



หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ชั้นมัธยมศึกษาปีที่



# ฟิสิกส์

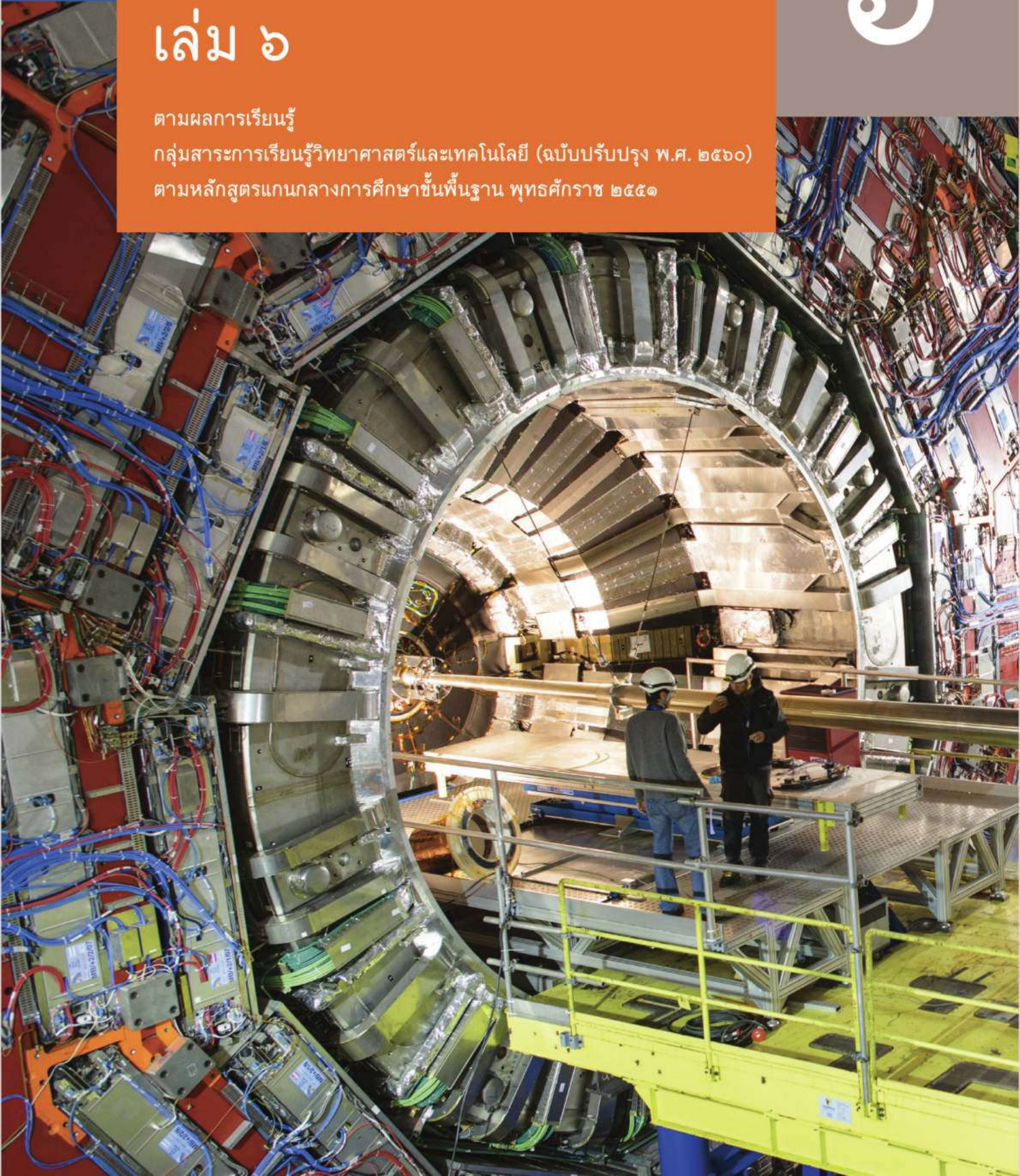
## เล่ม ๖

๖

ตามผลการเรียนรู้

กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)

ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑



## ตัวอักษรกรีก

ตัวอักษรเล็ก	ตัวอักษรใหญ่	ชื่อ	
$\alpha$	A	alpha	แอลฟา
$\beta$	B	beta	บีตา
$\gamma$	$\Gamma$	gamma	แกมมา
$\delta, \delta$	$\Delta$	delta	เดลตา
$\epsilon$	E	epsilon	เอปไซลอน
$\zeta$	Z	zeta	ซีตา
$\eta$	H	eta	อีตา
$\theta$	$\Theta$	theta	ทีตา
$\iota$	I	iota	ไอโอตา
$\kappa$	K	kappa	แคปปา
$\lambda$	$\Lambda$	lambda	แลมบ์ดา
$\mu$	M	mu	มิว

ตัวอักษรเล็ก	ตัวอักษรใหญ่	ชื่อ	
$\nu$	N	nu	นิว
$\xi$	$\Xi$	xi	ไซ
$\omicron$	O	omicron	โอไมครอน
$\pi$	$\Pi$	pi	พาย
$\rho$	P	rho	โร
$\sigma$	$\Sigma$	sigma	ซิกมา
$\tau$	T	tau	เทา
$\upsilon$	Y	upsilon	อึปไซลอน
$\phi$	$\Phi$	phi	ฟาย, ฟี
$\chi$	X	chi	ไค
$\psi$	$\Psi$	psi	ซาย
$\omega$	$\Omega$	omega	โอเมกา

ราชบัณฑิตยสถาน ศัพท์คณิตศาสตร์ ฉบับราชบัณฑิตยสถาน พิมพ์ครั้งที่ ๙ แก้ไขเพิ่มเติม กรุงเทพฯ : ราชบัณฑิตยสถาน, ๒๕๔๙.



รูปปกหน้า เครื่องตรวจวัดอนุภาคซีเอ็มเอส (CMS หรือ Compact Muon Solenoid) เป็นหนึ่งในเครื่องตรวจวัดอนุภาคที่องค์กรเพื่อการวิจัยนิวเคลียร์แห่งยุโรป หรือ เซิร์น (CERN หรือ Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) ใช้ศึกษาพฤติกรรมและอันตรกิริยาของอนุภาคมูลฐาน ซึ่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้เข้าร่วมเป็นสมาชิกของ CMS นี้ด้วย



หนังสือเรียน

---

# รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี

---

## ฟิสิกส์

ชั้น

---

## มัธยมศึกษาปีที่ ๖ เล่ม ๖

ตามผลการเรียนรู้

กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)

ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑

จัดทำโดย

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงศึกษาธิการ

จัดทำเป็นฉบับ e-book ครั้งที่ ๑ พ.ศ. ๒๕๖๓

มีลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติ

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำหนังสือเรียนฉบับ e-book นี้ขึ้น โดยมีเนื้อหาเช่นเดียวกับหนังสือเรียน สสวท. ฉบับสิ่งพิมพ์ที่ได้จัดทำตามมาตรฐานหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ทุกประการ เพื่ออำนวยความสะดวกในการเข้าถึงหนังสือเรียน สสวท. ผ่านเทคโนโลยีดิจิทัลเพื่อให้ นักเรียน ครู ผู้ปกครอง นักวิชาการ และ ผู้สนใจทั่วไปเข้าถึงได้ง่ายและสะดวก รวดเร็ว รวมทั้งสามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสมกับจุดประสงค์ต่าง ๆ ทั้งนี้ สสวท. ขอสงวนสิทธิ์ในหนังสือเรียน ฉบับ e-book นี้ตามกฎหมายลิขสิทธิ์ ห้ามผู้ใดทำซ้ำ คัดลอก ดัดแปลง เลียนแบบ จำหน่าย หรือ เผยแพร่โดยมิได้รับอนุญาต

# คำชี้แจง

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำตัวชี้วัดและสาระการเรียนรู้แกนกลาง กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐานพุทธศักราช ๒๕๕๑ โดยมีจุดเน้นเพื่อพัฒนาผู้เรียนให้มีความรู้ความสามารถที่ทัดเทียมกับนานาชาติ ได้เรียนรู้วิทยาศาสตร์ที่เชื่อมโยงความรู้กับกระบวนการใช้กระบวนการสืบเสาะหาความรู้และแก้ปัญหาที่หลากหลาย มีการทำกิจกรรมด้วยการลงมือปฏิบัติเพื่อให้ผู้เรียนได้ใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์และทักษะแห่งศตวรรษที่ ๒๑ ซึ่งในปีการศึกษา ๒๕๖๑ เป็นต้นไป โรงเรียนจะต้องใช้หลักสูตรกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) สสวท. จึงได้จัดทำหนังสือเรียนที่เป็นไปตามมาตรฐานหลักสูตรเพื่อให้โรงเรียนได้ใช้สำหรับจัดการเรียนการสอนในชั้นเรียน

หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๖ เล่ม ๖ มีผลการเรียนรู้และสาระการเรียนรู้เพิ่มเติมที่ครอบคลุมเนื้อหาบางส่วนที่ปรากฏตามตัวชี้วัดรายวิชาพื้นฐานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์กายภาพ เล่ม ๒ โดยเมื่อผู้เรียนเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ เล่ม ๑ – เล่ม ๖ ครบทุกชั้นปีในชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๔ – ๖ แล้วจะสามารถบรรลุผลสัมฤทธิ์ตามตัวชี้วัดของรายวิชาพื้นฐานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์กายภาพ เล่ม ๒ ได้ และในขณะเดียวกันก็สามารถต่อยอดเนื้อหาจากรายวิชาพื้นฐานไปสู่เนื้อหาในรายวิชาเพิ่มเติมได้โดยไม่ต้องเสียเวลาเรียนซ้ำซ้อน ทั้งนี้หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ เล่ม ๖ นี้ มีเนื้อหาที่จำเป็นที่ต้องเรียนประกอบด้วยเรื่อง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ฟิสิกส์อะตอม ฟิสิกส์นิวเคลียร์ และฟิสิกส์อนุภาค ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาในด้านวิทยาศาสตร์ หรือประกอบอาชีพในสาขาที่ใช้วิทยาศาสตร์เป็นฐาน เช่น แพทย์ วิศวกร สถาปนิก นักอุตุนิยมวิทยา นักธรณีวิทยา ฯลฯ โดยเน้นกระบวนการคิดวิเคราะห์และการแก้ปัญหา เชื่อมโยงความรู้สู่การนำไปใช้ในชีวิตจริง ผู้เรียนจะได้ทำกิจกรรมที่เป็นพื้นฐานที่สำคัญ รวมทั้งกิจกรรมที่ผู้เรียนสามารถคิดค้นและออกแบบการทดลองด้วยตนเอง มีแบบตรวจสอบความรู้ความเข้าใจก่อนเรียน มีแบบฝึกหัดเพื่อให้ตรวจทานความรู้หลังจากที่เรียนไปแล้ว รวมทั้งสรุปความรู้ในแต่ละบทด้วย ในการจัดทำหนังสือเรียนเล่มนี้ได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดีจากผู้ทรงคุณวุฒิ นักวิชาการอิสระ คณาจารย์ทั้งหลาย รวมทั้งครูผู้สอน นักวิชาการ จากสถาบันและสถานศึกษาทั้งภาครัฐและเอกชน จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สสวท. หวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ เล่ม ๖ นี้ จะเป็นประโยชน์แก่ผู้เรียน และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่าย ที่จะช่วยให้การจัดการศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีประสิทธิภาพและประสิทธิผล หากมีข้อเสนอแนะใดที่จะทำให้หนังสือเรียนเล่มนี้ มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โปรดแจ้ง สสวท. ทราบด้วย จะขอบคุณยิ่ง

(ศาสตราจารย์ชูกิจ ลิ้มปิฉ่างค์)

ผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

กระทรวงศึกษาธิการ

## คำอธิบายรายวิชาเพิ่มเติม

ฟิสิกส์ เล่ม ๖

กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)

ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๖

เวลา ๘๐ ชั่วโมง จำนวน ๒ หน่วยกิต

ศึกษาการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การสื่อสารโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สมมติฐานของพลังค์ ทฤษฎีอะตอมของโบร์ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ทวิภาวะของคลื่นและอนุภาค เสถียรภาพของนิวเคลียส กัมมันตภาพรังสี ปฏิกิริยานิวเคลียร์ พลังงานนิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค โดยใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ การสืบเสาะหาความรู้ การสืบค้นข้อมูล การสังเกต วิเคราะห์ เปรียบเทียบ อธิบาย อภิปราย และสรุป เพื่อให้เกิดความรู้ ความเข้าใจ มีความสามารถในการตัดสินใจ มีทักษะปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ รวมทั้งทักษะแห่งศตวรรษที่ ๒๑ ในด้านการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ ด้านการคิดและการแก้ปัญหา ด้านการสื่อสาร สามารถสื่อสารสิ่งที่เรียนรู้และนำความรู้ไปใช้ในชีวิตของตนเอง มีจิตวิทยาศาสตร์ จริยธรรม คุณธรรม และค่านิยมที่เหมาะสม

### ผลการเรียนรู้

๑. อธิบายการเกิดและลักษณะเฉพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสงไม่โพลาไรส์ แสงโพลาไรส์เชิงเส้น และแผ่นโพลาไรซ์ รวมทั้งอธิบายการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่าง ๆ ไปประยุกต์ใช้และ หลักการทำงานของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง
๒. สืบค้นและอธิบายการสื่อสารโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการส่งผ่านสารสนเทศ และเปรียบเทียบการสื่อสารด้วยสัญญาณแอนะล็อกกับสัญญาณดิจิทัล
๓. อธิบายสมมติฐานของพลังค์ ทฤษฎีอะตอมของโบร์ และการเกิดเส้นสเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจน รวมทั้งคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
๔. อธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกและคำนวณพลังงานโฟตอน พลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอนและฟังก์ชันงานของโลหะ
๕. อธิบายทวิภาวะของคลื่นและอนุภาค รวมทั้งอธิบายและคำนวณความยาวคลื่นเดอบรอยล์
๖. อธิบายกัมมันตภาพรังสีและความแตกต่างของรังสีแอลฟา บีตาและแกมมา
๗. อธิบายและคำนวณกัมมันตภาพของนิวเคลียสกัมมันตรังสี รวมทั้งทดลอง อธิบาย และคำนวณจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสีที่เหลือจากการสลายและครึ่งชีวิต
๘. อธิบายแรงนิวเคลียร์ เสถียรภาพของนิวเคลียส และพลังงานยึดเหนี่ยว รวมทั้งคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
๙. อธิบายปฏิกิริยานิวเคลียร์ ฟิชชัน และฟิวชัน รวมทั้งคำนวณพลังงานนิวเคลียร์
๑๐. อธิบายประโยชน์ของพลังงานนิวเคลียร์และรังสี รวมทั้งอันตรายและการป้องกันรังสีในด้านต่าง ๆ
๑๑. อธิบายการค้นคว้าวิจัยด้านฟิสิกส์อนุภาค แบบจำลองมาตรฐาน และการใช้ประโยชน์จากการค้นคว้าวิจัยด้านฟิสิกส์อนุภาคในด้านต่าง

รวมทั้งหมด ๑๑ ผลการเรียนรู้

## ข้อเสนอแนะทั่วไปในการใช้หนังสือเรียน

หนังสือเรียนเป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อให้นักเรียนได้ใช้ในการศึกษาเนื้อหาที่สำคัญและเกิดทักษะที่จำเป็นที่สอดคล้องกับมาตรฐานและสาระการเรียนรู้ รวมทั้งยังมีสื่อที่ช่วยเสริมการเรียนรู้ของนักเรียน โดยสามารถเชื่อมต่อไปยังหน้าเว็บไซต์รายการสื่อได้จาก QR code หรือ URL ที่อยู่ประจำแต่ละบท การทำความเข้าใจเกี่ยวกับสัญลักษณ์หรือข้อความตามหัวข้อต่าง ๆ ที่ปรากฏในหนังสือเรียน จะช่วยให้นักเรียนใช้หนังสือเรียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสัญลักษณ์หรือข้อความตามหัวข้อต่าง ๆ ที่ปรากฏในหนังสือเรียน มีดังนี้

- คำถามสำคัญ
- จุดประสงค์การเรียนรู้
- ความรู้ก่อนเรียน
- ข้อสังเกต
- ขวนคิด
- กิจกรรม
- คำถามท้ายกิจกรรม
- กิจกรรมลองทำดู
- ความรู้เพิ่มเติม
- รู้หรือไม่
- สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน
- แบบฝึกหัดท้ายหัวข้อ
- แบบฝึกหัดท้ายบท



### คำถามสำคัญ

คำถามประจำบทที่นักเรียนต้องอาศัยความรู้ทั้งหมดในบทเรียนในการตอบคำถาม ซึ่งนักเรียนควรตอบได้หลังจากได้เรียนรู้ในบทนั้นแล้ว



### จุดประสงค์การเรียนรู้

เป้าหมายของการจัดการเรียนรู้ที่ต้องการให้นักเรียนเกิดความรู้หรือทักษะหลังจากผ่านกิจกรรมการจัดการเรียนรู้ในแต่ละหัวข้อ ซึ่งนักเรียนควรศึกษาทำความเข้าใจก่อนเริ่มเรียนรู้ในแต่ละหัวข้อ



### ความรู้ก่อนเรียน

คำสำคัญหรือข้อความสั้น ๆ ที่เกี่ยวกับความรู้ที่นักเรียนควรมีสำหรับเป็นพื้นฐานของการศึกษาความรู้ใหม่ในแต่ละบท



### ข้อสังเกต

ความรู้ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้นักเรียนเห็นแนวคิดสำคัญและความเชื่อมโยงของเนื้อหา



### ชวนคิด

คำถามระหว่างเรียนที่เชื่อมโยงหรือต่อยอดความรู้เดิมที่ศึกษาแล้วกับความรู้ใหม่หรือความรู้ในศาสตร์อื่น เพื่อให้นักเรียนเห็นความสัมพันธ์หรือความต่อเนื่องของเนื้อหา



### กิจกรรม

การปฏิบัติที่ช่วยในการเรียนรู้เนื้อหาหรือฝึกฝนให้เกิดทักษะตามจุดประสงค์การเรียนรู้ของบทเรียน โดยอาจเป็นการทดลอง การสืบค้นข้อมูล หรือกิจกรรมอื่น ๆ ซึ่งนักเรียนควรลงมือปฏิบัติกิจกรรมด้วยตนเอง



### คำถามท้ายกิจกรรม

คำถามที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมนั้น ๆ ช่วยเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ อภิปรายและสรุปผลการทำกิจกรรม



### กิจกรรมลองทำดู

การปฏิบัติที่ช่วยเสริมความรู้ที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาในบทเรียน ซึ่งอาจเป็นกิจกรรมที่ลงมือปฏิบัติในห้องเรียนหรือนอกเวลาเรียนได้



### ความรู้เพิ่มเติม

ความรู้ที่เพิ่มเติมจากเนื้อหาในบทเรียน เพื่อให้นักเรียนมีความรู้ความเข้าใจมากขึ้น โดยไม่มีการวัดและประเมินผล



### รู้หรือไม่

ความรู้ที่เชื่อมโยงให้เห็นความสอดคล้องของเนื้อหาบทเรียนกับปรากฏการณ์หรือสถานการณ์ในชีวิตประจำวัน



### สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

การสรุปเนื้อหาสำคัญภายในบทเรียน เพื่อช่วยให้เห็นภาพรวมของเนื้อหาทั้งหมด



## แบบฝึกหัดท้ายหัวข้อ

ประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้



### คำถามตรวจสอบความเข้าใจ

คำถามระหว่างเรียนที่ช่วยประเมินการเรียนรู้ ซึ่งนักเรียนสามารถใช้ตรวจสอบว่า ตนเองมีความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาแล้วหรือยัง



### แบบฝึกหัด

แบบฝึกหัดระหว่างเรียนที่ช่วยฝึกทักษะการคิด การคำนวณ และการแก้ปัญหาเบื้องต้น โดยใช้ความรู้ในหัวข้อนั้น ๆ ซึ่งนักเรียนสามารถใช้ตรวจสอบความเข้าใจของเนื้อหา และฝึกฝนตนเองให้มีทักษะที่จำเป็นตามจุดประสงค์การเรียนรู้ได้

## แบบฝึกหัดท้ายบท

ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้



### คำถาม

คำถามที่เน้นให้นักเรียนตอบโดยการเขียนบรรยายแสดงความเข้าใจจนถึงการวิเคราะห์



### ปัญหา

ปัญหาที่มีความซับซ้อนน้อยจนถึงปานกลาง เน้นให้นักเรียนได้ใช้ทักษะการคำนวณ และการแก้ปัญหา



### ปัญหาท้าทาย

ปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก เน้นให้นักเรียนได้ใช้ทักษะการคิดระดับสูงในการคำนวณ และการแก้ปัญหา

# 18

## คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

18.1 การเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	3
18.2 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	12
18.2.1 คลื่นวิทยุ	13
18.2.2 ไมโครเวฟ	14
18.2.3 รังสีใต้แดงหรือรังสีอินฟราเรด	14
18.2.4 แสง	16
18.2.5 รังสีเหนือม่วงหรือรังสีอัลตราไวโอเล็ต	17
18.2.6 รังสีเอกซ์	20
18.2.7 รังสีแกมมา	21
18.3 โพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	23
18.4 การประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	28
18.4.1 เครื่องฉายรังสีเอกซ์	28
18.4.2 เครื่องถ่ายภาพเอกซ์เรย์คอมพิวเตอร์	31
18.4.3 เครื่องควบคุมระยะไกล	33
18.4.4 เครื่องระบุตำแหน่งบนพื้นโลก	35
18.4.5 เครื่องถ่ายภาพการสั่นพ้องของแม่เหล็ก	36
18.5 การสื่อสารโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	39
18.5.1 การสื่อสารโดยอาศัยคลื่นวิทยุ	39
18.5.2 การสื่อสารโดยอาศัยไมโครเวฟ	43
18.5.3 การสื่อสารโดยอาศัยแสง	44
18.5.4 สัญญาณแอนะล็อกและสัญญาณดิจิทัล	45
สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	47
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 18	49

# 19

## ฟิสิกส์อะตอม

19.1	สมมติฐานของพลังค์และทฤษฎีอะตอมของโบร์	53
19.1.1	การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุดำ	53
19.1.2	ทฤษฎีอะตอมของโบร์	59
19.2	ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก	81
19.2.1	ควอนตัมของแสงและโฟตอน	81
19.2.2	ฟังก์ชันงานและพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน	83
19.3	ทวิภาวะของคลื่นและอนุภาค	93
19.3.1	สมมติฐานของเดอบรอยล์	93
19.3.2	กลศาสตร์ควอนตัมและการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์	97
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	104
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 19	105

# 20

## ฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์อนุภาค

20.1	เสถียรภาพของนิวเคลียส	114
20.1.1	แรงนิวเคลียร์	114
20.1.2	พลังงานยึดเหนี่ยว	119
20.2	กัมมันตภาพรังสี	131
20.2.1	การค้นพบกัมมันตภาพรังสี	131
20.2.2	รังสีจากธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสี	134
20.2.3	การสลายและสมการการสลาย	137
20.2.4	กัมมันตภาพ	145
20.2.5	ครึ่งชีวิต	150
20.3	ปฏิกิริยานิวเคลียร์และพลังงานนิวเคลียร์	161
20.3.1	ฟิชชัน	163
20.3.2	ฟิวชัน	170

## สารบัญ

## บทที่ 20 - ภาคผนวก

บทที่	เนื้อหา	หน้า
20.4	ประโยชน์และการป้องกันอันตรายจากรังสี	177
20.4.1	การนำรังสีไปใช้ประโยชน์	177
20.4.2	รังสีในธรรมชาติและ การป้องกันอันตรายจากรังสี	181
20.5	ฟิสิกส์อนุภาค	186
20.5.1	อนุภาคมูลฐาน	186
20.5.2	แบบจำลองมาตรฐาน	194
20.5.3	ประโยชน์จากการค้นคว้าวิจัยด้านฟิสิกส์อนุภาค	200
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	206
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 20	209

## ภาคผนวก

ภาคผนวก ก	ตารางธาตุ	221
ภาคผนวก ข	คณิตศาสตร์สำหรับฟิสิกส์	222
ภาคผนวก ค	ระบบหน่วยระหว่างชาติ	233
ภาคผนวก ง	ตารางฟังก์ชันตรีโกณมิติ	236
ภาคผนวก จ	ตารางเลขกำลังสอง รากที่สองและส่วนกลับ	237
ภาคผนวก ฉ	ตัวอย่างการบันทึกผลการทดลอง	238
ภาคผนวก ช	ลอกกาฬิม	241
	คำศัพท์	244
	บรรณานุกรม	247
	ที่มาของรูป	249
	คณะกรรมการจัดทำหนังสือเรียน	253



บทที่

## 18

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

[ipst.me/11067](http://ipst.me/11067)

โลกในยุคโลกาภิวัตน์มีการใช้เทคโนโลยีในการส่งและรับข่าวสารต่าง ๆ การส่งเสริมทางด้านการศึกษา การทำธุรกิจออนไลน์ อีกทั้งปัจจุบันยังสามารถควบคุมการทำงานเครื่องมือเครื่องใช้ภายในบ้านผ่านสมาร์ทโฟนได้ ที่เรียกว่า อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (internet of things) กิจกรรมดังกล่าวเกี่ยวข้องกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสิ้น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นได้อย่างไร แต่ละชนิดมีลักษณะเป็นอย่างไร และนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ ได้อย่างไร จะได้ศึกษาในบทนี้



### คำถามสำคัญ

- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นได้อย่างไร มีลักษณะเฉพาะอย่างไร และนำไปประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันได้อย่างไร
- การสื่อสารโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบดิจิทัล และระบบแอนะล็อกแตกต่างกันอย่างไร



### จุดประสงค์การเรียนรู้

#### 18.1 การเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

1. อธิบายการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
2. อธิบายลักษณะเฉพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

#### 18.2 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

3. บอกความหมายของสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
4. อธิบายการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่าง ๆ ไปประยุกต์ใช้

#### 18.3 โพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

5. อธิบายโพลาริเซชันของแสง แสงไม่โพลาริส์และแสงโพลาริส์เชิงเส้น
6. สังเกตความสว่างของแสงเมื่อผ่านแผ่นโพลารอยด์สองแผ่น

#### 18.4 การประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

7. ยกตัวอย่างและอธิบายหลักการทำงานอุปกรณ์บางชนิดที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

#### 18.5 การสื่อสารโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

8. สืบค้นและอธิบายการสื่อสารโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
9. เปรียบเทียบการสื่อสารด้วยสัญญาณแอนะล็อกกับสัญญาณดิจิทัล



### ความรู้ก่อนเรียน

สมบัติของคลื่น คลื่นกล ไฟฟ้าสถิต ไฟฟ้ากระแส แม่เหล็กและไฟฟ้า

เราทราบมาแล้วว่า คลื่น เกิดจากการรบกวนสิ่งใดสิ่งหนึ่งแล้วมีการส่งผ่านพลังงานของการรบกวนนั้น จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง สำหรับคลื่นกล การส่งผ่านพลังงานดังกล่าวต้องอาศัยตัวกลางเท่านั้น เช่น คลื่นในเส้นเชือก คลื่นน้ำ และ คลื่นเสียง ขณะคลื่นกลเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง อนุภาคตัวกลางจะเคลื่อนที่แบบแกว่งกวัดรอบจุดสมดุลของแต่ละอนุภาค และส่งผ่านพลังงานไปยังอนุภาคในบริเวณถัดไป ทำให้อนุภาคเหล่านั้นเคลื่อนที่แบบแกว่งกวัดต่อเนื่องกันไป สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถส่งผ่านพลังงานออกไปได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นได้อย่างไร และแผ่ออกจากแหล่งกำเนิดอย่างไร จะได้ศึกษาต่อไปนี้

### 18.1 การเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

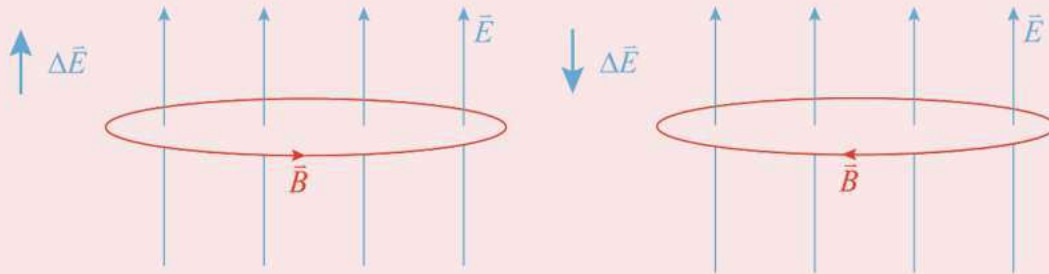
จากการศึกษาเกี่ยวกับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เราทราบแล้วว่าประจุไฟฟ้าทำให้เกิดสนามไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก นอกจากนี้ยังทราบอีกว่า เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กเปลี่ยนแปลงผ่านขดลวดตัวนำ จะทำให้เกิดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำในขดลวดตัวนำนั้น ในปี พ.ศ. 2407 เจมส์ คลาร์ก แมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell) ได้รวบรวมแนวคิดเกี่ยวกับไฟฟ้าและแม่เหล็ก โดยนำเสนอในรูปแบบของสมการคณิตศาสตร์ว่า สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาทำให้เกิดสนามไฟฟ้า โดยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากซึ่งกันและกัน แมกซ์เวลล์ได้ทำนายว่ามีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic waves) ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่องระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วประมาณ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที ซึ่งเท่ากับอัตราเร็วของแสง จึงได้เสนอแนวคิดที่ว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ช่วงหนึ่ง คำทำนายนี้ได้รับการยืนยันว่าเป็นจริงโดยการทดลองของเฮิร์ตซ์ ในปี พ.ศ. 2430





### ความรู้เพิ่มเติม

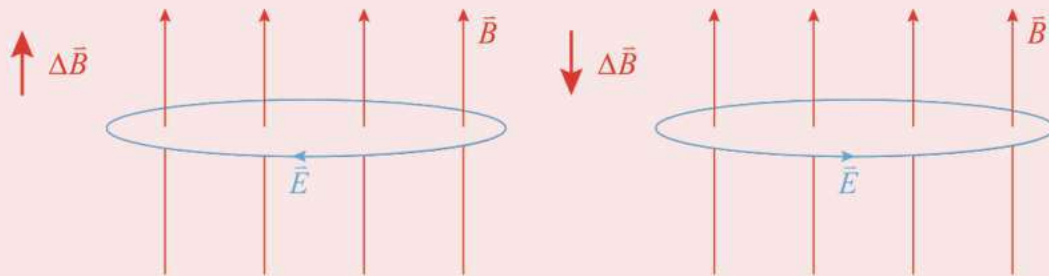
สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาทำให้เกิดสนามไฟฟ้า สามารถเขียนภาพแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้



ก. เมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่ม

ข. เมื่อสนามไฟฟ้าลด

รูป การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก



ก. เมื่อสนามแม่เหล็กเพิ่ม

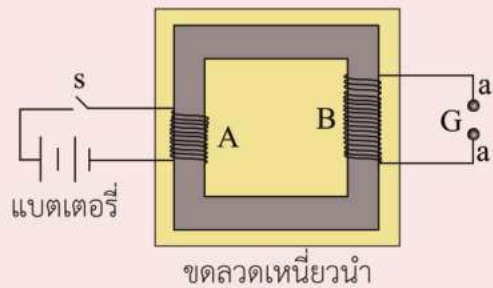
ข. เมื่อสนามแม่เหล็กลด

รูป การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า



### ความรู้เพิ่มเติม

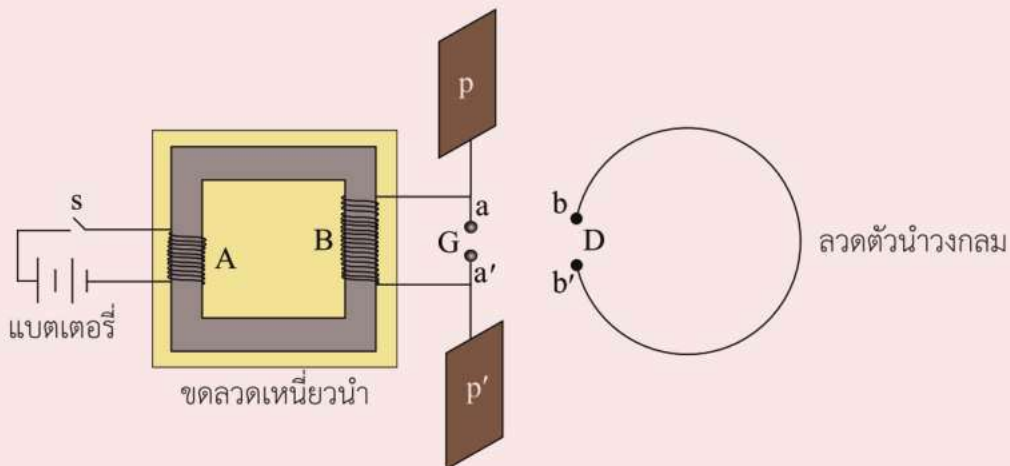
เฮิร์ตซ์ได้ทดลองพิสูจน์หาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามคำทำนายของแมกซ์เวลล์ โดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำ (induction coil) ประกอบด้วยขดลวดสองขดพันรอบแกนเหล็ก ขดลวด A เป็นขดลวดปฐมภูมิ ขดลวด B เป็นขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งมีจำนวนรอบมากกว่าขดลวด A มาก ปลายของขดลวดทุติยภูมิทั้งสองข้างต่อกับตัวนำทรงกลม a และ a' อยู่ห่างกันเป็นช่องแคบ G ส่วนขดลวดปฐมภูมิต่อกับสวิตช์ S เป็นสวิตช์แบบสั่น ทำหน้าที่ปิดเปิดวงจรไฟฟ้าของขดลวดปฐมภูมิซึ่งต่อกับแบตเตอรี่ มีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ผ่านขดลวดปฐมภูมิตามจังหวะการปิดเปิดของสวิตช์ ดังรูป



รูป แผนภาพอุปกรณ์การทดลองของเฮิร์ตซ์

เมื่อสวิตช์ปิดเปิดวงจรไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ผ่านขดลวดปฐมภูมิจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นจังหวะตามไปด้วย ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในแกนเหล็กของขดลวด เนื่องจากขดลวด B มีจำนวนรอบมากกว่า ดังนั้นสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดอีเอ็มเอฟที่สูงมากในช่วงเวลาสั้นๆ ที่ขดลวด B ส่งผลให้ตัวนำทรงกลมทั้งสองเกิดสนามไฟฟ้าภายในช่องแคบ G ที่มีค่ามากพอที่จะทำให้อากาศระหว่างช่องแคบแตกตัว เกิดเป็นประกายไฟขึ้น เพราะฉะนั้นทุกครั้งที่สวิตช์ปิดหรือเปิดวงจรจะเห็นประกายไฟที่ช่องแคบนี้

เฮิร์ตซ์ใช้แผ่นโลหะแบน p และ p' ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ ต่อเข้ากับตัวนำทรงกลม a และ a' ตามลำดับทำหน้าที่ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แล้วใช้เส้นลวดตัวนำอเป็นรูปร่างกลมต่อกับตัวนำทรงกลมเล็ก ๆ b และ b' โดยเหลือช่องแคบ D ไว้ แล้วนำมาไว้ห่างช่องแคบ G พอสมควรทำหน้าที่รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสดงการส่งและรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูป



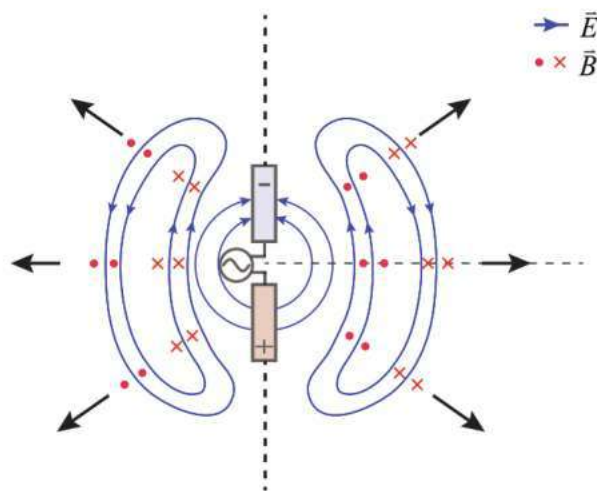
รูป การส่งและรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามการทดลองของเฮิร์ตซ์

การส่งและรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะสังเกตจากประกายไฟฟ้าที่ช่องแคบ **G** และช่องแคบ **D** ตามลำดับ เฮิร์ตซยืนยันว่ามีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกจากช่องแคบ **G** ตามแนวคิดของแมกซ์เวลล์ โดยอธิบายการเกิดประกายไฟฟ้าที่ช่องแคบ **D** ดังนี้

ขณะที่เกิดอีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำสูงช่วงเวลาสั้น ๆ ในขดลวด **B** ความต่างศักย์ซึ่งมีความถี่สูงมาก จะเกิดระหว่างแผ่นโลหะแบนทั้งสองที่ต่อไว้ ความถี่นี้ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวด **B** ขนาดแผ่นโลหะแบนและระยะห่างช่อง **G** ในการทดลองทั่วไป ความถี่จะมีค่าประมาณ  $10^8$  เฮิร์ตซ ความต่างศักย์แปรเปลี่ยนที่เกิดขึ้นช่วงเวลาหนึ่งและมีความถี่สูง จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงและประกายไฟฟ้าที่ช่องแคบ **G**

การที่สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงและเกิดประกายไฟฟ้าที่ช่องแคบ **G** ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกจากช่องแคบ **G** เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านลวดตัวนำวงกลมในรูป โดยรัศมีของลวดตัวนำวงกลมและขนาดช่องแคบ **D** ที่เหมาะสม จะทำให้เกิดความต่างศักย์และสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง จึงเกิดประกายไฟฟ้าที่ช่องแคบ **D** มีความถี่ของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับที่ช่องแคบ **G**

ตัวอย่างการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยพิจารณาการเปลี่ยนสนามไฟฟ้ากับเวลา ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงมากพอที่ต่อเข้ากับสายอากาศ เช่น ท่อนโลหะของสายอากาศที่วางตัวอยู่ในแนวตั้ง จะมีอิเล็กตรอนในสายอากาศเคลื่อนที่กลับไปมาด้วยความเร่งในแนวตั้ง ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วย เกิดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกรอบสายอากาศทุกทิศทางในแนวรัศมี ยกเว้นในแนวตั้งซึ่งเป็นแนวเส้นตรงเดียวกับสายอากาศ ดังรูป 18.1



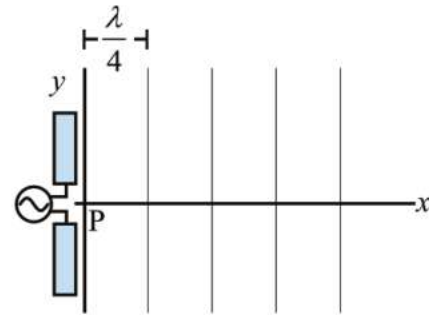
รูป 18.1 การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายอากาศที่อยู่ในสุญญากาศ

จากรูป 18.1 พิจารณากรณีสายอากาศอยู่ในสุญญากาศ ประกอบด้วยท่อนโลหะ 2 ท่อน ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างท่อนโลหะทั้งสองเปลี่ยนแปลงกับเวลาในรูปของฟังก์ชันแบบไซน์ ในที่นี้จะอธิบายการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่น  $\lambda$  แผล่ออกไปในแนวเส้นตรงที่ตั้งฉากกับสายอากาศได้ดังนี้

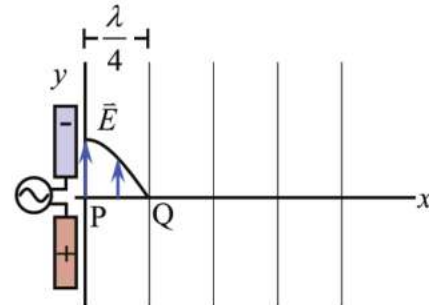
เมื่อพิจารณาตำแหน่ง P ใกล้สายอากาศ โดยเวลาที่เริ่มพิจารณา  $t = 0$  ความต่างศักย์ระหว่างท่อนโลหะทั้งสองเป็นศูนย์ ท่อนโลหะจะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ณ ขณะนี้สนามไฟฟ้าที่จุด P จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังรูป 18.2 ก.

เมื่อเวลาผ่านไป ตำแหน่ง P จะมีค่าสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและมีการเหนี่ยวนำต่อเนื่อง ให้เกิดสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงแผ่ออกไปที่ตำแหน่งอื่น ๆ โดยขณะที่  $t = \frac{T}{4}$  ( $T$  เป็นคาบการเคลื่อนที่ครบรอบของประจุไฟฟ้า) ความต่างศักย์ระหว่างท่อนโลหะทั้งสองมีค่าสูงสุด โดยท่อนโลหะล่างมีประจุไฟฟ้าบวกมากที่สุด และท่อนโลหะบนมีประจุไฟฟ้านลบมากที่สุด ทำให้ตำแหน่ง P เกิดสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  มีค่ามากที่สุดและมีทิศทางชี้ขึ้น ซึ่งขณะนี้อธิบายการเหนี่ยวนำต่อเนื่อง ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงแผ่ไปถึงจุด Q ด้วยอัตราเร็วแสง ดังรูป 18.2 ข.

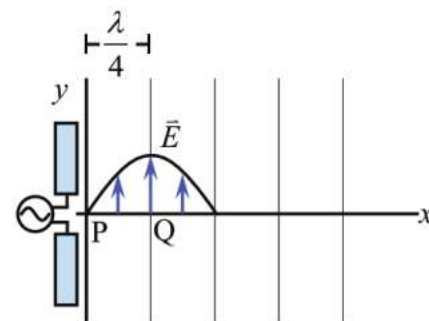
เมื่อเวลาผ่านไป ตำแหน่ง P จะมีค่าสนามไฟฟ้าลดลงและมีการเหนี่ยวนำต่อเนื่อง ให้เกิดสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงแผ่ออกไป โดยขณะที่  $t = \frac{T}{2}$  ความต่างศักย์ระหว่างท่อนโลหะทั้งสองเป็นศูนย์ ท่อนโลหะจะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าอีก ณ ขณะนี้สนามไฟฟ้าที่จุด P จะลดลงเป็นศูนย์ การเหนี่ยวนำต่อเนื่องทำให้สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง Q เพิ่มขึ้นสูงสุด ดังรูป 18.2 ค.



ก. สนามไฟฟ้าที่เวลา  $t = 0$



ข. สนามไฟฟ้าที่เวลา  $t = \frac{T}{4}$



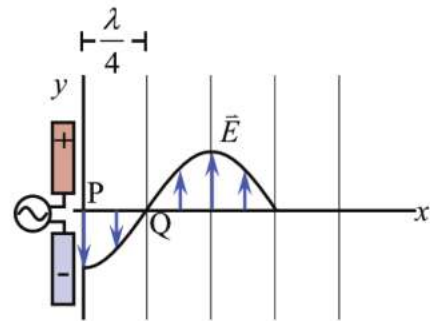
ค. สนามไฟฟ้าที่เวลา  $t = \frac{T}{2}$

เมื่อเวลาผ่านไปสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $P$  จะกลับทิศ มีขนาดเพิ่มขึ้นและมีการเหนี่ยวนำต่อเนื่องให้เกิดสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงแผ่ออกไป โดยขณะที่  $t = \frac{3T}{4}$  ความต่างศักย์ระหว่างท่อนโลหะทั้งสองมีค่าสูงสุด แต่ครั้งนี้ท่อนโลหะบนมีประจุไฟฟ้าบวกมากที่สุด และท่อนโลหะล่างมีประจุไฟฟ้าลบมากที่สุด ทำให้สนามไฟฟ้าที่จุด  $P$  มีค่ามากที่สุดแต่มีทิศทางซึ่ลง โดยมีการเหนี่ยวนำต่อเนื่อง ให้เกิดสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงแผ่ออกไป ดังรูป 18.2 ง.

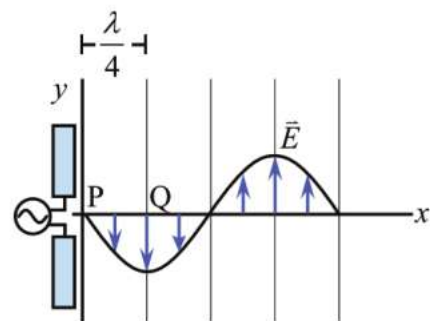
ทำนองเดียวกัน เมื่อเวลา  $t = T$  ประจุเคลื่อนที่กลับไปครบรอบ ความต่างศักย์ระหว่างท่อนโลหะทั้งสองเปลี่ยนกลับมาเป็นศูนย์ ท่อนโลหะจะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าอีกครั้ง ทำให้สนามไฟฟ้าที่จุด  $P$  เป็นศูนย์ การเหนี่ยวนำต่อเนื่อง ให้เกิดสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงแผ่ออกไปจากสายอากาศ ดังรูป 18.2 จ.

สนามไฟฟ้าที่เกิดการเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่องจากสายอากาศที่ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ เกิดสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงและแผ่ออกไปจากสายอากาศ (คล้ายกับการแผ่ของคลื่นในเส้นเชือก)

สำหรับสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  เกิดจากการเหนี่ยวนำต่อเนื่อง พร้อมกับการเกิดของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง พิจารณาคคล้ายกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากเส้นลวดตรงที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน

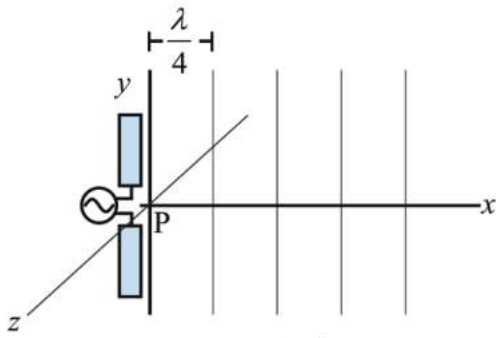
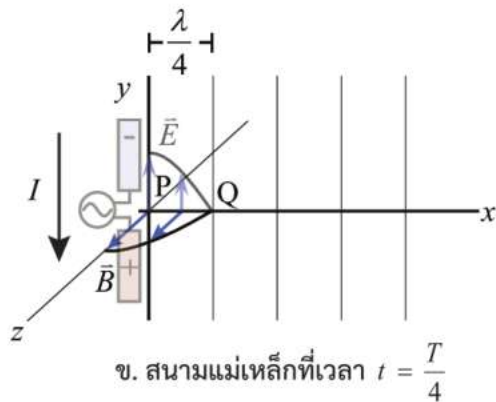
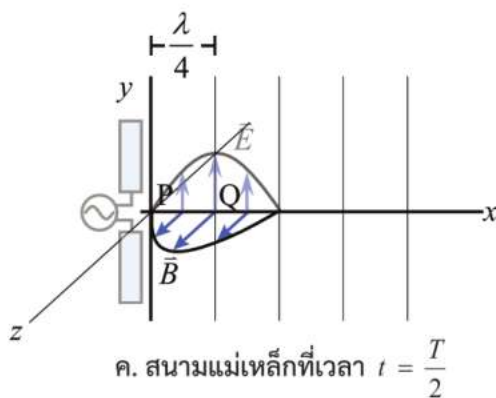


ง. สนามไฟฟ้าที่เวลา  $t = \frac{3T}{4}$



จ. สนามไฟฟ้าที่เวลา  $t = T$

รูป 18.2 แผนภาพการเกิดสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  เนื่องจากประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่กลับไปมาในสายอากาศและเคลื่อนที่จากสายอากาศด้วยความเร็วแสง

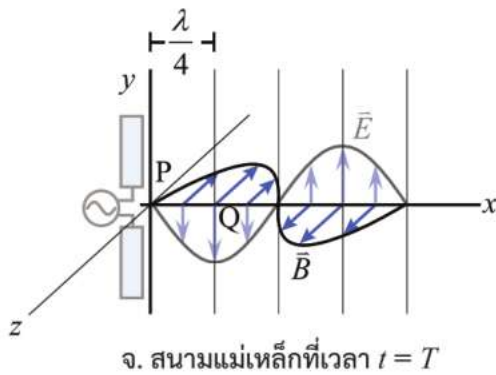
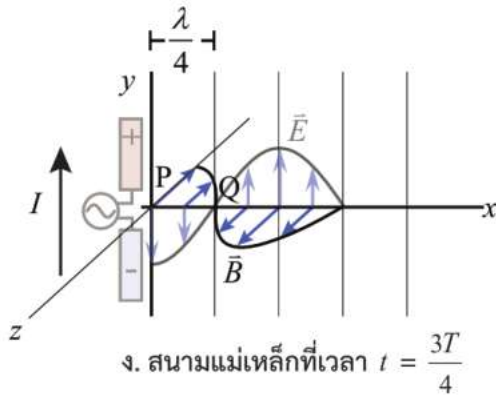
ก. สนามแม่เหล็กที่เวลา  $t = 0$ ข. สนามแม่เหล็กที่เวลา  $t = \frac{T}{4}$ ค. สนามแม่เหล็กที่เวลา  $t = \frac{T}{2}$ 

หากพิจารณาตำแหน่งใกล้สายอากาศ (จุด P) โดยเวลาที่เริ่มพิจารณา  $t = 0$  ความต่างศักย์ระหว่างแท่งโลหะทั้งสองเป็นศูนย์ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านสายอากาศจะเป็นศูนย์ ณ ขณะนี้สนามแม่เหล็กที่จุด P จะมีค่าเป็นศูนย์เช่นเดียวกับสนามแม่ไฟฟ้า ดังรูป 18.3 ก.

เมื่อเวลาผ่านไป ตำแหน่ง P มีการเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง ให้เกิดสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงค่า และจะมีค่าเพิ่มขึ้น แผล่ออกไป โดยขณะที่  $t = \frac{T}{4}$  ความต่างศักย์ระหว่างแท่งโลหะทั้งสองมีค่าสูงสุด โดยที่ตอนล่างมีประจุบวกมากที่สุด เสมือนมีกระแสไฟฟ้าในสายอากาศในทิศทางลงมีค่ามากที่สุดด้วย

ทิศทางของสนามแม่เหล็กจากสายอากาศ หาได้โดยใช้มือขวา นิ้วหัวแม่มือขวาชี้ตามทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านสายอากาศ ทิศทางการวนของนิ้วทั้งสองจะแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงบนแกน  $x$  ที่ตำแหน่ง P จะมีทิศทางชี้ออกไปทาง  $+z$  และมีค่ามากที่สุด ซึ่งขณะนี้การเหนี่ยวนำต่อเนื่อง ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงแผ่ไปถึงจุด Q ด้วยอัตราเร็วแสง  $c$  พร้อมกับสนามไฟฟ้า ดังรูป 18.3 ข.

เมื่อเวลาผ่านไป ตำแหน่ง P จะมีค่าสนามแม่เหล็กลดลงและการเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง เกิดสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงแผ่ออกไป โดยขณะที่  $t = \frac{T}{2}$  ความต่างศักย์ระหว่างแท่งโลหะทั้งสองเป็นศูนย์ ดังนั้น สนามแม่เหล็กที่จุด P จะลดลงเป็นศูนย์ ขณะเดียวกัน การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง จะแผ่ออกไป โดยการเหนี่ยวนำต่อเนื่อง ทำให้สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง Q เพิ่มขึ้นสูงสุดพร้อมกัน ดังรูป 18.3 ค.

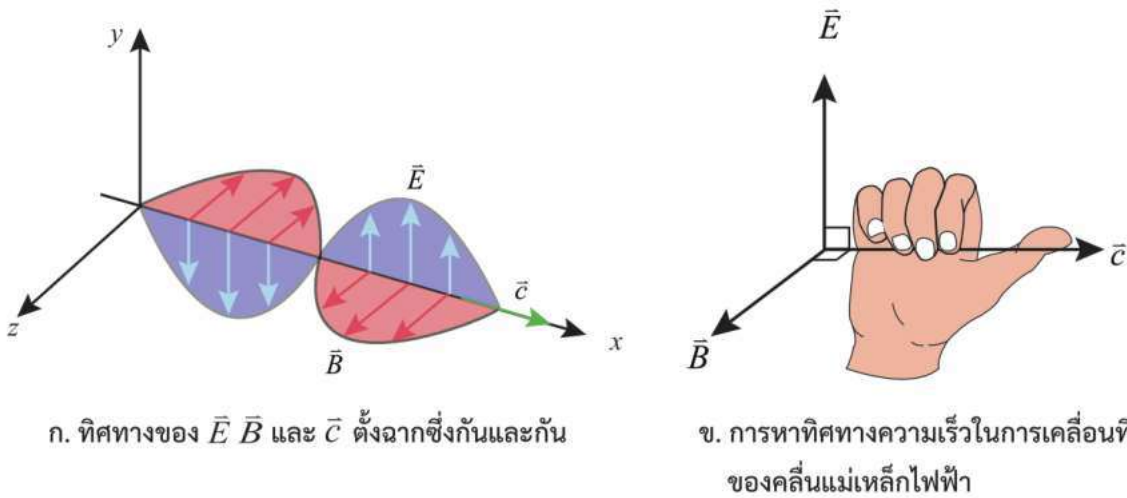


รูป 18.3 แผนภาพการเกิดสนามแม่เหล็ก

เมื่อเวลาผ่านไปสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่ง  $P$  จะกลับทิศ มีขนาดเพิ่มขึ้นและการเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่องเกิดสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงแผ่ออกไป โดยขณะที่  $t = \frac{3T}{4}$  ความต่างศักย์ระหว่างแท่งโลหะทั้งสองมีค่าสูงสุด เสมือนมีกระแสไฟฟ้าในทิศทางซีกขึ้นมีค่าสูงสุดอีกครั้ง สนามแม่เหล็กที่จุด  $P$  จึงมีค่ามากที่สุดและมีทิศทางซีกเข้าไปทาง  $-z$  โดยการเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่องเกิดสนามแม่เหล็กพร้อมทั้งสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงแผ่ออกไปจากสายอากาศ ดังรูป 18.3 ง.

เมื่อเวลา  $t = T$  ประจุเคลื่อนที่กลับไปครอบรอบความต่างศักย์ระหว่างแท่งโลหะทั้งสองเป็นศูนย์ ท่อนโลหะจะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าอีกครั้ง ทำให้สนามแม่เหล็กที่จุด  $P$  เป็นศูนย์อีก การเหนี่ยวนำต่อเนื่องเกิดสนามแม่เหล็กพร้อมทั้งสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงแผ่ออกไปจากสายอากาศ ดังรูป 18.3 จ.

การต่อสายอากาศกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับข้างต้น ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำต่อเนื่องระหว่างสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า เกิดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกจากสายอากาศ การเปลี่ยนแปลงสนามทั้งสองมีเฟสตรงกัน กล่าวคือมีค่าเป็นศูนย์พร้อมกัน และมีค่าสูงสุดพร้อมกัน โดยทิศทางสนามทั้งสองตั้งฉากกัน ดังรูป 18.4 ก. ทิศทางความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หาได้โดยใช้มือขวา ซี่นิ้วทั้งสี่ไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้า จากนั้นนิ้วทั้งสี่ไปหาทิศทางของสนามแม่เหล็ก นิ้วหัวแม่มือจะชี้ทิศทางของความเร็ว  $\vec{c}$  ดังรูป 18.4 ข.



รูป 18.4 การแผ่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูป จะเห็นว่าทิศทางของสนามทั้งสองตั้งฉากกับทิศทางของความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเป็นคลื่นตามขวาง



### ความรู้เพิ่มเติม

**เจมส์ คลาร์ก แมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell ค.ศ. 1831 - 1879 หรือ พ.ศ. 2374 - 2422)** เป็นนักฟิสิกส์ที่อธิบายการมีอยู่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคนแรก ได้รวบรวมสมการเกี่ยวกับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก แล้วนำเสนอสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วแสง นำไปสู่ข้อสรุปว่าแสงเป็น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูป แมกซ์เวลล์

**ไฮน์ริช เฮิร์ตซ์ (Heinrich Hertz ค.ศ. 1857 - 1894 หรือ พ.ศ. 2400 - 2437)** เป็นนักฟิสิกส์คนแรกที่สาธิตการทำให้เกิดและการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ในห้องทดลอง โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นในห้องทดลองของเขานั้นเป็นคลื่นวิทยุ



รูป เฮิร์ตซ์





### คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 18.1

1. ขณะที่มีการแสไฟฟ้าผ่านสายไฟฟ้าที่ต่อระหว่างแบตเตอรี่กับหลอดไฟฟ้า จะเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกมาจากสายไฟฟ้านั้นหรือไม่ เพราะเหตุใด
2. ชายคนหนึ่งอยู่ที่เส้นศูนย์สูตรของโลก ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ขนานกับพื้นไปทางทิศเหนือ และตรวจพบว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกไปนั้นมีการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าอยู่ในแนวทิศตะวันออก – ทิศตะวันตก การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กจะอยู่ในแนวใด
3. จงระบุความแตกต่างระหว่างคลื่นกลและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

### 18.2 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีหลายชนิดขึ้นอยู่กับช่วงความถี่ โดยแต่ละชนิดถูกเรียกชื่อแตกต่างกัน เช่น แสงคลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ รังสีเอกซ์และรังสีแกมมา คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิดสามารถแผ่ออกไปได้ในสุญญากาศด้วยอัตราเร็วประมาณ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที หากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีตัวกลางอยู่จะมีอัตราเร็วลดลง ขึ้นกับตัวกลางและชนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

อัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลาง ( $v$ ) กับความถี่ ( $f$ ) และความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) มีความสัมพันธ์กันเช่นเดียวกับคลื่นกลที่ต่อเนื่อง ตามสมการ

$$v = f\lambda$$

เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ในตัวกลางอื่น ๆ อัตราเร็วและความยาวคลื่นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป แต่ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะไม่เปลี่ยนแปลง

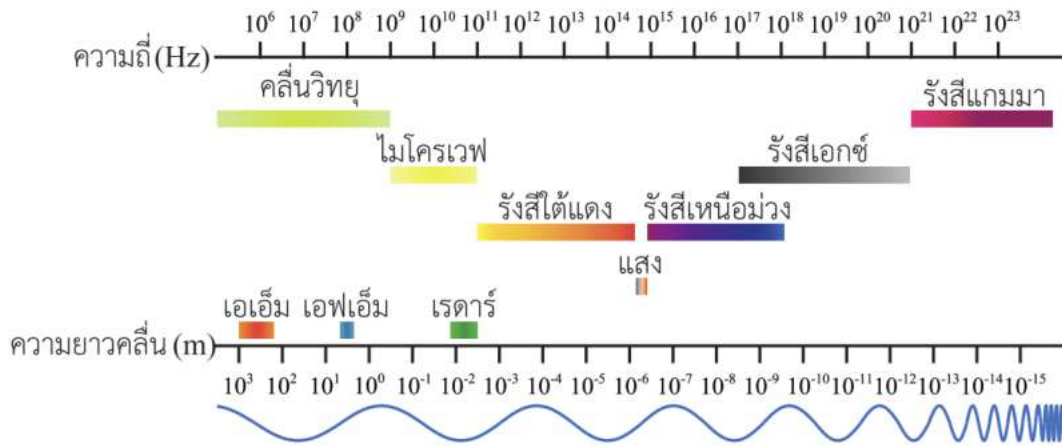


#### ความรู้เพิ่มเติม

อัตราเร็วของแสงในสุญญากาศเป็นค่าคงตัวเท่ากับ 299 792 458 เมตรต่อวินาที\* ซึ่งถูกใช้ในการนิยามระยะทางมาตรฐาน 1 เมตร โดยระยะทางมาตรฐาน 1 เมตร มีค่าเท่ากับระยะที่แสงเดินทางในสุญญากาศในเวลา  $\frac{1}{299\,792\,458}$  วินาที

\* General Conference on Weights And Measures, 1983 Oct 21.

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาจนทราบว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความถี่ต่าง ๆ สัมพันธ์กับพลังงาน โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงจะมีพลังงานสูง และเป็นความถี่ต่อเนื่องกันเป็นช่วงกว้าง เรียกรวมกันว่า สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic spectrum) ดังรูป 18.5



รูป 18.5 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า\*

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละชนิดที่มีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน เนื่องจากแหล่งกำเนิดและการนำไปใช้งาน เมื่อพิจารณาสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะเห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบางชนิดมีความถี่บางช่วงคาบเกี่ยวกัน เช่น ไมโครเวฟกับอินฟราเรด รังสีอัลตราไวโอเล็ตกับรังสีเอกซ์ หมายความว่ารังสีช่วงนี้ถ้าเกิดจากแหล่งกำเนิดต่างกันเรียกชื่อต่างกัน แต่มีความยาวคลื่นและความถี่เท่ากัน

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่หรือความยาวคลื่นต่างกัน ทั้งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในธรรมชาติและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์สร้างขึ้น จะถูกนำไปประยุกต์ใช้แตกต่างกัน ซึ่งจะได้ศึกษาต่อไป

### 18.2.1 คลื่นวิทยุ

**คลื่นวิทยุ (radio waves)** เป็นคลื่นที่มีความถี่น้อยกว่า  $10^9$  เฮิรตซ์ และความยาวคลื่นอยู่ในระดับเซนติเมตรจนถึงกิโลเมตร คลื่นวิทยุสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย โดยความยาวคลื่นของคลื่นวิทยุที่แตกต่างกันก็จะมี การนำไปใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกันด้วย

คลื่นวิทยุนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการส่งสารสนเทศจากตำแหน่งหนึ่ง (ผู้ส่ง) ไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง (ผู้รับ) โดยไม่ต้องมีสายส่งระหว่างสองตำแหน่งนั้น ในชีวิตประจำวัน สถานีวิทยุจะส่งสารสนเทศจากสถานีส่งไปยังผู้รับ โดยการผสมสัญญาณไฟฟ้าที่แปลงจากเสียงหรือภาพกับสัญญาณคลื่นวิทยุ ซึ่งสามารถผสมสัญญาณได้ 2 แบบ คือ แบบเอเอ็มและแบบเอฟเอ็ม แล้วส่งสัญญาณคลื่นผสมเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีส่งไปยังผู้รับ รายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อ 18.5 การสื่อสารโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

\* การแบ่งช่วงความถี่ของสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อาจแตกต่างกันตามแหล่งที่มาของข้อมูล

### 18.2.2 ไมโครเวฟ

ไมโครเวฟ (microwaves) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในช่วง  $10^9$  ถึง  $10^{11}$  เฮิรตซ์ และความยาวคลื่นอยู่ในระดับ มิลลิเมตร จนถึง เซนติเมตร มีสมบัติทะลุผ่านชั้นบรรยากาศได้ดีกว่าคลื่นวิทยุ มีการนำไมโครเวฟมาใช้ประโยชน์หลายอย่าง เช่น

- การทำให้อาหารร้อนด้วยเตาไมโครเวฟ กล่าวคือ ไมโครเวฟทำให้อาหารร้อนขึ้นได้ เนื่องจากทำให้โมเลกุลของน้ำสั่นจนเกิดความร้อน เตาไมโครเวฟจะใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ประมาณ 2.45 จิกะเฮิรตซ์
- การส่งสัญญาณเสียงและภาพ โดยการส่งสัญญาณดังกล่าวเป็นการผสมสัญญาณแบบ เอฟเอ็ม และไมโครเวฟยังใช้ในการส่งสัญญาณระยะไกล โดยการส่งสัญญาณจากเครื่องส่งไปยังดาวเทียม จากนั้นดาวเทียมจะส่งสัญญาณต่อไปยังเครื่องรับที่อยู่ไกลออกไป
- เรดาร์ (RADAR หรือ radio detection and ranging) เป็นระบบที่นำไปใช้ระบุตำแหน่งและอัตราเร็วของวัตถุ เช่น พายุ เครื่องบิน หรือการตรวจจับความเร็วรถบนท้องถนนโดยตำรวจจราจร

นอกจากนี้ไมโครเวฟยังนำไปประยุกต์ใช้ในการระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยรายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อ 18.4 การประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

### 18.2.3 รังสีใต้แดงหรือรังสีอินฟราเรด

รังสีใต้แดงหรือรังสีอินฟราเรด (infrared) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในช่วง  $10^{11}$  ถึง  $10^{14}$  เฮิรตซ์ หรือความยาวคลื่นในระดับไมโครเมตรจนถึงระดับมิลลิเมตร รังสีอินฟราเรดมีสมบัติผ่านชั้นบรรยากาศได้ดี และยังสามารถผ่านเมฆหมอกที่หนาทึบเกินกว่าที่แสงธรรมดาคะผ่านได้ ประสาทสัมผัสทางผิวหนังของมนุษย์ สามารถรับรู้รังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นบางช่วงได้ โดยปกติวัตถุต่าง ๆ จะแผ่รังสีอินฟราเรดตลอดเวลา จึงมีการพัฒนากล้องที่อาศัยรังสีอินฟราเรดในการถ่ายภาพ ซึ่งภาพที่ถ่ายได้จากกล้องนี้จะแสดงอุณหภูมิของวัตถุได้ ดังรูป 18.6



รูป 18.6 ตัวอย่างภาพถ่ายโดยใช้รังสีอินฟราเรด

นอกจากนี้รังสีอินฟราเรดยังถูกนำมาใช้ในการถ่ายภาพพื้นโลกจากดาวเทียมสำรวจทรัพยากรธรรมชาติ เพื่อศึกษาการแปรสภาพของป่าไม้หรือการอพยพเคลื่อนย้ายของฝูงสัตว์ เนื่องจากรังสีอินฟราเรด สามารถทะลุผ่านเมฆหมอกได้ดีกว่าแสง

อุปกรณ์บางชนิดในชีวิตประจำวัน มีการนำรังสีอินฟราเรดมาประยุกต์ใช้งานในระบบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ที่เรียกว่า **รีโมทคอนโทรลเลอร์ (remote controller)** หรือ รีโมท เช่น รีโมทโทรทัศน์ รีโมทเครื่องปรับอากาศ โดยรายละเอียดหลักการประยุกต์จะกล่าวถึงในหัวข้อ 18.4 การประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

### | รู้หรือไม่

รังสีอินฟราเรดสามารถแบ่งตามความยาวคลื่นโดยเทียบกับความยาวคลื่นของแสงที่ตามองเห็น ได้เป็น 3 ชนิดดังนี้

1. **รังสีอินฟราเรดใกล้ (near infrared)** มีความยาวคลื่นในช่วง 0.7 ถึง 1.5 ไมโครเมตร เป็นรังสีอินฟราเรดช่วงที่มีพลังงานสูงที่สุด จึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการความร้อนสูงเช่น การอบสี การอบแห้งผลิตภัณฑ์
2. **รังสีอินฟราเรดปานกลาง (medium infrared)** มีความยาวคลื่นในช่วง 1.5 ถึง 4.0 ไมโครเมตร ซึ่งถูกนำไปใช้ในการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง
3. **รังสีอินฟราเรดไกล (far infrared)** มีความยาวคลื่นในช่วง 4.0 ถึง 1000 ไมโครเมตร เป็นรังสีอินฟราเรดช่วงที่มีพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งรังสีในช่วงความยาวคลื่นนี้ถูกนำไปใช้ในการสร้างอุปกรณ์ให้ความร้อน เช่น ตู้อบชาวนำระบบอินฟราเรด

### 18.2.4 แสง

แสงหรือแสงที่ตามองเห็น (visible light) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตามนุษย์มองเห็นได้ มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต มีความถี่ในช่วงตั้งแต่  $4.3 \times 10^{14}$  ถึง  $7.5 \times 10^{14}$  เฮิรตซ์ หรือมีความยาวคลื่นของแสงในสุญญากาศอยู่ในช่วง 400 นาโนเมตร ถึง 700 นาโนเมตร ประสาทตาของมนุษย์ไวต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงนี้มาก โดยความยาวคลื่นในช่วงนี้ ตารับรู้และสมองของเราแปลเป็นสีที่แตกต่างกัน โดยสีของแสงที่เราเห็นซึ่งมีความยาวคลื่นน้อยที่สุดคือแสงสีม่วง และความยาวคลื่นมากที่สุดคือแสงสีแดง

การใช้ประโยชน์จากแสง เช่น ใช้แสงในการมองเห็น การผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ พืชใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง แหล่งกำเนิดแสงโดยทั่วไปจะให้แสงหลายความถี่ แต่ในปัจจุบันมีการพัฒนาเครื่องกำเนิดแสงความถี่เดียวที่มีความเข้มสูง เรียกว่า เลเซอร์ (light amplification by stimulated emission of radiation : LASER) ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ เช่น ด้านการสื่อสาร ด้านการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรม



#### ความรู้เพิ่มเติม

เลเซอร์ในปัจจุบันมีหลากหลายชนิด ซึ่งให้แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่รังสีเอกซ์ รังสีอัลตราไวโอเล็ต แสงที่มองเห็น จนถึงรังสีอินฟราเรด เลเซอร์หลายชนิดปล่อยคลื่นได้ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบห้วง (pulse) ดังนั้นเลเซอร์จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ เช่น

1. กระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม เช่น ใช้เลเซอร์ในการเชื่อม ตัด เจาะ สกัด
2. การแพทย์และศัลยกรรม เช่น การผ่าตัดเนื้องอกและมะเร็ง ศัลยกรรมตกแต่ง
3. การอ่านแถบรหัส (bar code) สินค้า ได้แก่ การใช้เลเซอร์อ่านแถบรหัสข้อมูลของสินค้า
4. การเก็บข้อมูลโดยใช้แสง (optical storage) การเก็บข้อมูลลงแผ่นดีวีดี หรือ แผ่นซีดี
5. ฮอโลกราฟี (holography) หรือวิธีถ่ายภาพสามมิติ

### 18.2.5 รังสีเหนือม่วงหรือรังสีอัลตราไวโอเล็ต

รังสีเหนือม่วงหรือรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ในช่วง  $10^{15}$  ถึง  $10^{18}$  เฮิร์ตซ์ ความยาวคลื่นอยู่ในระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร ในธรรมชาติการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จะมีรังสีอัลตราไวโอเล็ตแผ่มาด้วย รังสีอัลตราไวโอเล็ตมีความถี่สูงกว่าแสงทำให้มีพลังงานสูงกว่าแสง แต่เมื่อผ่านชั้นบรรยากาศของโลกรังสีอัลตราไวโอเล็ตบางส่วนจะถูกชั้นบรรยากาศดูดกลืนก่อนกระทบผิวโลก

รังสีอัลตราไวโอเล็ตเมื่อตกกระทบบนผิวหนังของมนุษย์ ทำให้ร่างกายสามารถสร้างวิตามินดี ซึ่งจำเป็นสำหรับความแข็งแรงของกระดูกและฟันด้วย แต่ถ้าได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ตในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้ผิวหนังระคายเคือง เกิดความเสียหายได้ และอาจนำไปสู่การเป็นมะเร็งผิวหนัง

นอกจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์แล้ว การเชื่อมโลหะด้วยไฟฟ้าก็สามารถทำให้เกิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความเข้มสูงในปริมาณที่เป็นอันตรายต่อนัยน์ตาและผิวหนัง จึงจำเป็นต้องสวมแว่นสำหรับป้องกันนัยน์ตา รวมทั้งสวมหมวกและเสื้อผ้าเพื่อป้องกันผิวหนัง

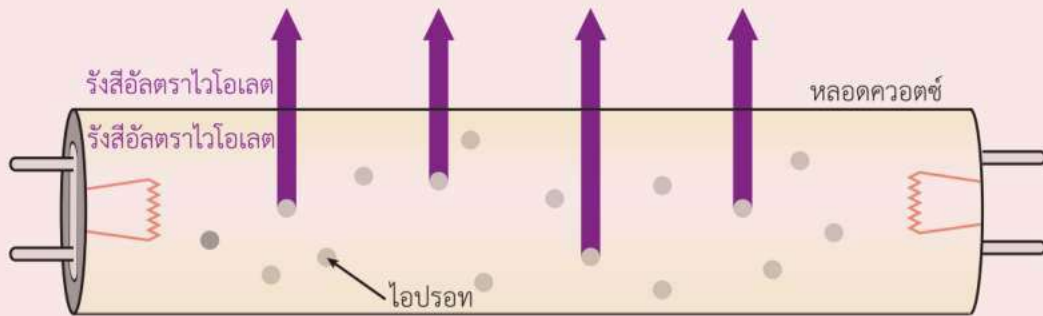
รังสีอัลตราไวโอเล็ตสามารถนำไปฆ่าเชื้อแบคทีเรียในอาหาร และฆ่าเชื้อในเครื่องมือที่ใช้ในงานด้านต่าง ๆ ได้ เช่น ด้านการแพทย์ ด้านการเกษตร นอกจากนี้รังสีอัลตราไวโอเล็ตยังถูกนำมาใช้ในการรักษาโรคผิวหนังบางชนิด และยังสามารถทำให้สารบางชนิดเรืองแสงได้จึงนำมาใช้ในการตรวจสอบเอกสารหลักฐาน



#### ความรู้เพิ่มเติม

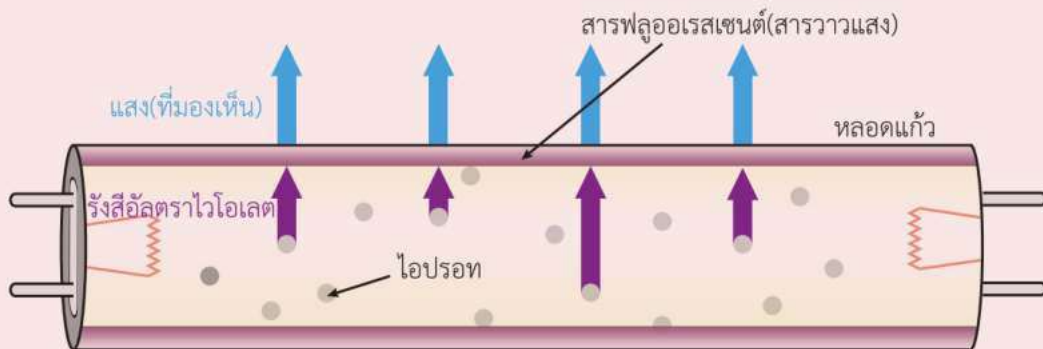
การผลิตรังสีอัลตราไวโอเล็ตทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าไปในหลอดที่บรรจุก๊าซ เช่น ไอปรอท โดยอะตอมปรอทในไอปรอทจะรับพลังงานจากอิเล็กตรอนในกระแสไฟฟ้าที่ผ่านหลอด แล้วปลดปล่อยรังสีอัลตราไวโอเล็ตออกมาพร้อมกับให้แสงสีม่วงปนออกมาเล็กน้อย รังสีอัลตราไวโอเล็ตสามารถทะลุผ่านแก้วได้บ้างเล็กน้อย แต่ผ่านควอตซ์ได้ดี ดังนั้นวัสดุที่นำมาสร้างหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเล็ตนั้นจะแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

สำหรับหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตสำหรับใช้ฆ่าเชื้อโรค และหลอดแบล็คไลท์สำหรับทำให้สารบางชนิดเรืองแสง ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์จากรังสีอัลตราไวโอเล็ตโดยตรง ตัวหลอดจะผลิตจากควอตซ์ เพื่อให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตแผ่ออกมาภายนอกได้ ดังรูป



รูป หลอดแบล็คไลท์

แต่สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้ตามบ้านเรือนเพื่อให้แสงสว่างนั้น ตัวหลอดจะผลิตจากแก้ว โดยจะเคลือบสารวาบแสงไว้ภายใน เมื่อรังสีอัลตราไวโอเล็ตกระทบสารวาบแสงนี้ สารวาบแสงจะถูกกระตุ้นให้เปล่งแสงสว่าง สีขาวหรือแสงสีอื่น ๆ ขึ้นกับชนิดของสารวาบแสง ส่วนรังสีอัลตราไวโอเล็ต จะถูกหลอดแก้วกั้นไม่ให้แผ่ออกมานอกหลอด ดังรูป



รูป หลอดฟลูออเรสเซนต์



## รู้หรือไม่

องค์การอนามัยโลก (World Health Organization หรือ WHO) แบ่งรังสีอัลตราไวโอเล็ต ตามความยาวคลื่นได้ 3 ชนิดดังนี้

1. รังสีอัลตราไวโอเล็ตเอ (ultraviolet A หรือ UV-A) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 315 ถึง 400 นาโนเมตร มีพลังงานน้อยที่สุด รังสีนี้ส่วนมากจะทะลุผ่านชั้นบรรยากาศของโลกมายังพื้นผิวโลกได้ ซึ่งเมื่อกระทบผิวหนังจะทำให้เกิดผลเสียต่อผิวหนังในระยะยาว เช่น ทำให้เกิดการเหี่ยวย่น ผิวแก่ก่อนวัย แม้รังสี UV-A มีพลังงานน้อยไม่สามารถทำอันตรายต่อดีเอ็นเอของเซลล์ได้โดยตรง แต่ก็ยังเป็นปัจจัยส่งผลให้เกิดมะเร็งผิวหนังได้ รังสี UV-A มีอีกชื่อหนึ่งคือ แบล็คไลท์ ด้วยคุณสมบัติที่สามารถทำให้สารบางชนิดเกิดการเรืองแสง จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการสืบสวนสอบสวน เช่น การตรวจสอบธนบัตร การตรวจหารอยเลือด
2. รังสีอัลตราไวโอเล็ตบี (ultraviolet B หรือ UV-B) มีความยาวคลื่นในช่วง 280 ถึง 315 นาโนเมตร ส่วนใหญ่จะถูกดูดกลืนก่อนที่จะมาถึงผิวโลก รังสีนี้เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ผิวไหม้จากแสงแดด และทำให้มีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งผิวหนัง
3. รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี (ultraviolet C หรือ UV-C) มีความยาวคลื่นในช่วง 100 ถึง 280 นาโนเมตร มีพลังงานสูงที่สุด แต่รังสีนี้เกือบทั้งหมดจะถูกดูดกลืนในชั้นบรรยากาศของโลก จึงไม่สามารถผ่านมาถึงผิวโลกได้ รังสี UV-C ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการฆ่าเชื้อในอาหาร เช่น ในเครื่องกรองน้ำดื่ม



### 18.2.6 รังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ (X-rays) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในช่วง  $10^{17}$  ถึง  $10^{21}$  เฮิรตซ์ ความยาวคลื่นอยู่ในช่วงพิโคเมตร ถึง นาโนเมตร ในธรรมชาติรังสีเอกซ์ซึ่งเกิดจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ จะถูกชั้นบรรยากาศของโลกดูดกลืนก่อนกระทบผิวโลก รังสีเอกซ์สามารถทะลุผ่านสิ่งกีดขวางหนา ๆ และ จะถูกขวางกั้นโดยอะตอมของธาตุหนักได้ดีกว่าธาตุเบา จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น ด้านความปลอดภัยในท่าอากาศยานใช้ในการตรวจหาวัตถุอันตรายในกระเป๋าเดินทางโดยไม่ต้องเปิดกระเป๋า ดังรูป 18.7 ก. ด้านการแพทย์ใช้รังสีเอกซ์ผ่านร่างกายมนุษย์และสร้างภาพประกอบการวินิจฉัยความผิดปกติของอวัยวะ ดังรูป 18.7 ข.



ก. การตรวจหาวัตถุอันตรายในกระเป๋าเดินทางจาก เครื่องฉายรังสีเอกซ์



ข. ภาพอวัยวะจากเครื่องเอกซ์เรย์

รูป 18.7 ตัวอย่างการนำรังสีเอกซ์ไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ

สำหรับหลักการทำงานของตัวอย่างอุปกรณ์ที่ทำงานโดยอาศัยรังสีเอกซ์ เช่น เครื่องฉายรังสีเอกซ์ เครื่องถ่ายภาพเอกซ์เรย์คอมพิวเตอร์ จะได้ศึกษาในหัวข้อ 18.4

### 18.2.7 รังสีแกมมา

**รังสีแกมมา (gamma rays)** เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่มากกว่า หรือมีความยาวคลื่นน้อยกว่ารังสีเอกซ์ เป็นรังสีที่มีความถี่และพลังงานสูงที่สุด โดยรังสีแกมมาที่มาจากนอกโลก จะถูกชั้นบรรยากาศดูดกลืนก่อนกระทบผิวโลก นอกจากนี้รังสีแกมมายังพบได้จากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี เช่น สารโคบอลต์ 60 อีกด้วย รังสีแกมมาสามารถเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีกว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดอื่น มีอำนาจทะลุผ่านสูง และอาจทำให้ตัวกลางที่รังสีแกมมาผ่านแตกตัวเป็นไอออนได้ นอกจากนี้หากรังสีแกมมาผ่านเนื้อเยื่อจะทำให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อเยื่อ และอาจทำให้เกิดความผิดปกติต่อโครงสร้างของดีเอ็นเอได้ ด้วยเหตุนี้รังสีแกมมาจึงเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

แม้รังสีแกมมาจะมีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต แต่ก็มีการนำรังสีแกมมามาใช้ประโยชน์มากมาย เช่น ในทางการแพทย์ ใช้รังสีแกมมาในการทำลายเซลล์มะเร็ง ในทางอุตสาหกรรมอาหาร ใช้ฆ่าเชื้อโรคในอาหาร และการถนอมอาหาร นอกจากนี้นักดาราศาสตร์ยังใช้เครื่องมือตรวจจับรังสีแกมมาที่มาจากนอกโลกเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในอวกาศ เช่น การระเบิดรังสีแกมมา (gamma-ray bursts) ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า

## รู้หรือไม่

เนื่องจากรังสีแกมมามีพลังงานและอำนาจทะลุผ่านสูง สามารถใช้ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดโรค และลดปริมาณปรสิตได้ จึงถูกนำมาประยุกต์ในการถนอมอาหาร

“องค์การอนามัยโลก องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ ร่วมกับทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ ได้สรุปผลการทดสอบความปลอดภัยของอาหารฉายรังสี ในปี 2523 ว่า “อาหารใดๆ ก็ตามที่ผ่านมาการฉายรังสีในปริมาณเฉลี่ยไม่เกิน 10 กิโลเกรย์ ไม่ก่อให้เกิดโทษอันตราย ไม่ก่อให้เกิดปัญหาพิเศษทางโภชนาการและจุลชีววิทยา และไม่จำเป็นต้องทดสอบความปลอดภัยอีกต่อไป””\*

ปริมาณ 1 เกรย์ (gray หรือ Gy) หมายถึง อาหารได้ดูดกลืนพลังงาน 1 จูล ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม โดยกระทรวงสาธารณสุขได้ประกาศไว้ในประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 297) พ.ศ. 2549 เรื่องอาหารฉายรังสี ว่าอาหารที่ผ่านมาการฉายรังสี จะต้องแสดงข้อความว่า “ผ่านการฉายรังสี” และอาจแสดงเครื่องหมายการฉายรังสี ดังรูป



รูป เครื่องหมายการฉายรังสี



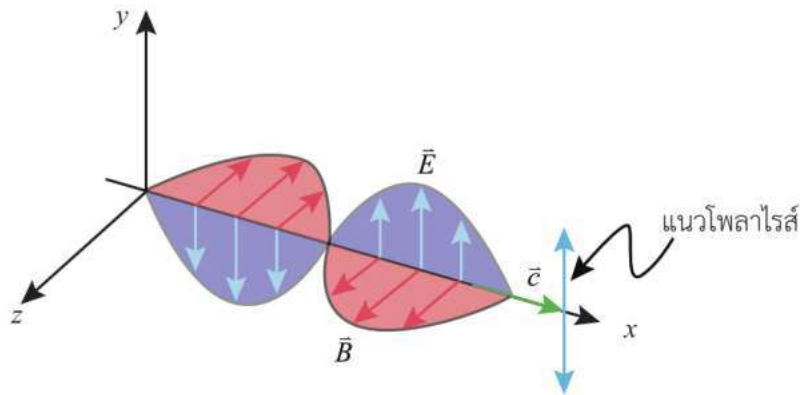
### คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 18.2

1. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงใดที่ประสาทสัมผัสของมนุษย์รับรู้ได้
2. คลื่นไมโครเวฟใช้ปรุงอาหารให้สุกเมื่อนำมาใช้ในการสื่อสารระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่จะเกิดอันตรายต่อผู้ใช้หรือไม่ เพราะอะไร
3. จงยกตัวอย่างการใช้ประโยชน์และผลกระทบจากรังสีเหนือม่วงที่มีต่อมนุษย์
4. นอกจากการใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์แล้ว เรายังใช้ประโยชน์จากรังสีเอกซ์ในด้านใดได้บ้าง

\* สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ. 2553: ออนไลน์.

### 18.3 โพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

พิจารณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายอากาศที่เป็นท่อนโลหะสองท่อนในแนวตั้งที่ติดอยู่กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ดังรูป 18.4 ก. มีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกไป โดยสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงทิศทางการกลับไปมาในแนวตั้งเพียงแนวเดียว ดังรูป 18.8



รูป 18.8 การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าในแนวตั้ง

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าข้างต้น มีสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงทิศทางการกลับไปมาในแนวแกน  $y$  แนวเดียว ขณะที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปตามแกน  $x$  จึงกล่าวได้ว่าสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  มีการเปลี่ยนแปลงกลับไปมาบนระนาบ  $xy$  เรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงในระนาบเดี่ยวนี้อีกว่า **คลื่นโพลาริส์เชิงเส้น (linear polarized wave)** โดยพิจารณาแนวโพลาริส์ของคลื่นจากการวางตัวของทิศทางการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า เช่น สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงทิศทางการกลับไปมาวางตัวอยู่ในแนวตั้ง เรียกว่า **โพลาริส์เชิงเส้นในแนวตั้ง (vertically polarized)**



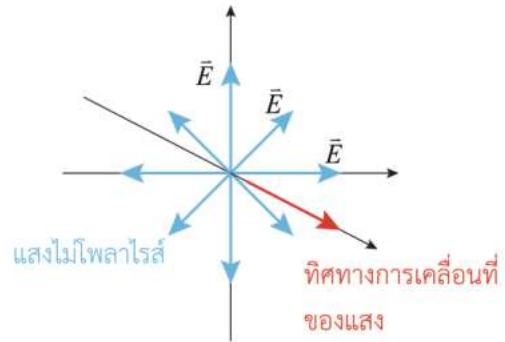
#### ชวนคิด

กรณีสายอากาศอยู่ในแนวระดับ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกไป จะเป็นคลื่นโพลาริส์เชิงเส้นในแนวใด

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งออกมาจากสายอากาศที่กล่าวมาข้างต้นเป็นคลื่นโพลาริส์ เพราะสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงทิศทางการกลับไปมาในแนวเดียวกันเสมอ แสงก็เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสงเป็นคลื่นโพลาริส์หรือไม่

แสงจากแหล่งกำเนิดทั่วไป เช่น ดวงอาทิตย์ หลอดไฟ รวมทั้งแสงที่สะท้อนจากวัตถุรอบๆ ตัวเรา จะมีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กวางตัวในแนวต่างๆ กัน ถ้าพิจารณาเฉพาะสนามไฟฟ้าของแสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดในแนวต่างๆ ดังรูป 18.9 แสงจากแหล่งกำเนิดลักษณะนี้จึงเป็นแสงไม่โพลาไรส์ (unpolarized light)

การทำให้แสงที่ไม่โพลาไรส์ เป็นแสงโพลาไรส์เชิงเส้น ศึกษาจากกิจกรรม 18.1



รูป 18.9 สนามไฟฟ้าของแสงไม่โพลาไรส์



### กิจกรรม 18.1 ความสว่างของแสงเมื่อผ่านแผ่นโพลาไรซ์

#### จุดประสงค์

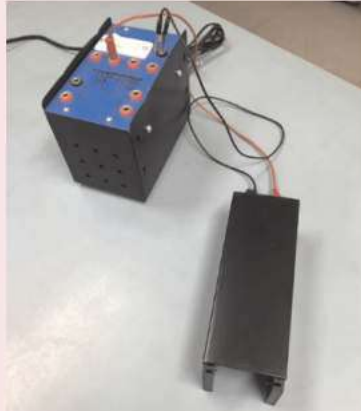
เพื่อศึกษาความสว่างของแสงเมื่อผ่านแผ่นโพลาไรซ์

#### วัสดุและอุปกรณ์

- |                     |           |
|---------------------|-----------|
| 1. แผ่นโพลาไรซ์     | 2 แผ่น    |
| 2. หม้อแปลงโวลต์ต่ำ | 1 เครื่อง |
| 3. สายไฟ            | 2 เส้น    |
| 4. กล่องแสง         | 1 กล่อง   |

### วิธีทำกิจกรรม

1. ต่อกล่องแสงเข้ากับหม้อแปลงโวลต์ต่ำ โดยใช้ความต่างศักย์ 8 โวลต์ ดังรูป



รูป การต่ออุปกรณ์เพื่อศึกษาความสว่างของแสงเมื่อผ่านแผ่นโพลาไรซ์

2. เปิดสวิตช์ สังเกตและเปรียบเทียบความสว่าง เมื่อมองหลอดไฟโดยตรงกับมองหลอดไฟผ่านแผ่นโพลาไรซ์ 1 แผ่น
3. หมุนแผ่นโพลาไรซ์ไปจนครบ 1 รอบ สังเกตความสว่างของหลอดไฟที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์
4. นำแผ่นโพลาไรซ์อีกแผ่นหนึ่งมาประกบกับแผ่นแรก แล้วหมุนแผ่นโพลาไรซ์แผ่นที่สองอย่างช้า ๆ ไปจนครบ 1 รอบ สังเกตความสว่างของแสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ทั้งสอง ขณะหมุน บันทึกมุมที่หมุนไประหว่างตำแหน่งที่มีความสว่างเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ปิดสวิตช์



### คำถามท้ายกิจกรรม

- ความสว่างของแสงซึ่งผ่านแผ่นโพลาไรซ์ 1 แผ่น ต่างจากความสว่างของแสงขณะไม่มีแผ่นโพลาไรซ์กั้นหรือไม่
- เมื่อหมุนแผ่นโพลาไรซ์ 1 แผ่นไปจนครบ 1 รอบ ความสว่างของแสงที่ผ่านออกมา แต่ละขณะเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร
- เมื่อหมุนโพลาไรซ์แผ่นที่ 2 ไปจนครบ 1 รอบ ความสว่างของแสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ 2 แผ่น แต่ละขณะ เปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร
- มุมระหว่างตำแหน่งของแผ่นโพลาไรซ์แผ่นที่ 2 ที่แสงมีความสว่างมากที่สุด กับแสงมีความสว่างน้อยที่สุด เป็นมุมเท่าใด

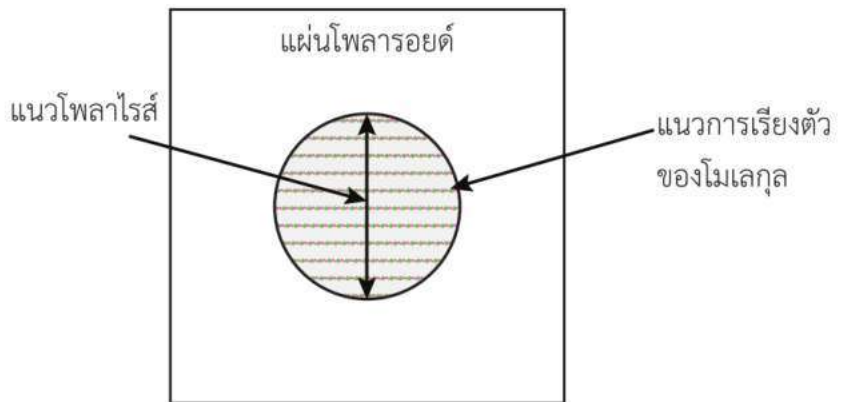
จากกิจกรรม 18.1 ความสว่างของแสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ 1 แผ่น มีความสว่างลดลงเมื่อเทียบกับขณะไม่มีแผ่นโพลาไรซ์กัน เมื่อหมุนแผ่นโพลาไรซ์ไปตำแหน่งต่างๆ ความสว่างไม่เปลี่ยนแปลง

เมื่อนำแผ่นโพลาไรซ์แผ่นที่ 2 มาประกบแล้วหมุนแผ่นที่ 2 ไปจนครบ 1 รอบ พบว่าความสว่างมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างสว่างมากที่สุดกับสว่างน้อยที่สุด โดยตำแหน่งของแผ่นโพลาไรซ์แผ่นที่ 2 ที่แสงมีความสว่างมากที่สุดกับตำแหน่งที่แสงมีความสว่างน้อยที่สุด จะทำมุมต่างกัน 90 องศา

แผ่นโพลาไรซ์ดังรูป 18.10 ก. เป็นแผ่นพลาสติกที่มีโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol) ฝังอยู่ในเนื้อพลาสติก และแผ่นพลาสติกถูกยึดให้โมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เรียงตัวในแนวขนานกัน เมื่อแสงผ่านแผ่นโพลาไรซ์ องค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแนวขนานกับแนวการเรียงตัวของโมเลกุล จะถูกโมเลกุลดูดกลืน ส่วนองค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับแนวการเรียงตัวของโมเลกุล จะผ่านแผ่นโพลาไรซ์ออกไปได้ ต่อไปจะเรียกแนวที่ตั้งฉากกับแนวการเรียงตัวของโมเลกุลนี้ว่า แนวโพลาไรส์ของแผ่นโพลาไรซ์ ดังรูป 18.10 ข.



ก. ตัวอย่างของแผ่นโพลาไรซ์

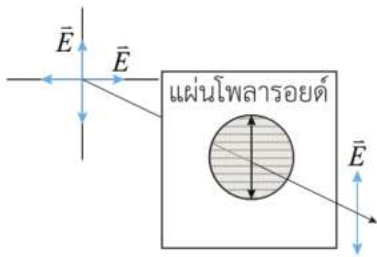


ข. แนวการเรียงตัวของโมเลกุลและแนวโพลาไรส์

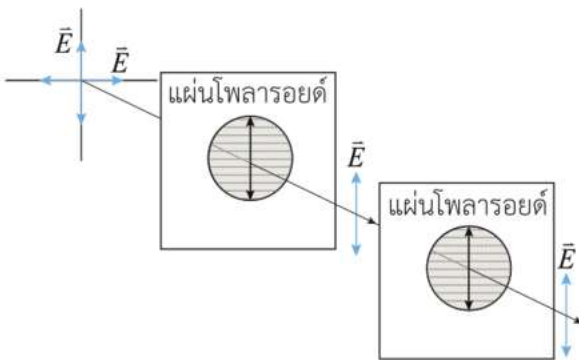
รูป 18.10 แผ่นโพลาไรซ์

ดังนั้นสรุปได้ว่า

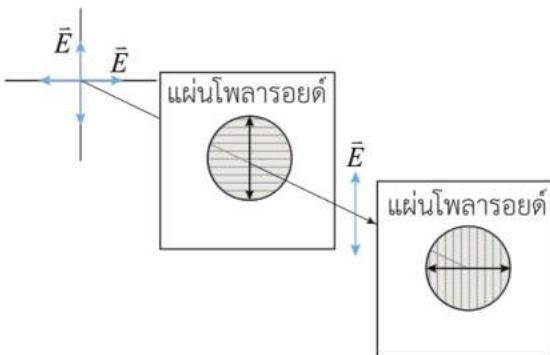
1. องค์ประกอบสนามไฟฟ้าของแสงในแนวขนานกับแนวโพลาไรส์ของแผ่นโพลาไรซ์ จะสามารถผ่านแผ่นโพลาไรซ์ได้
2. องค์ประกอบสนามไฟฟ้าของแสงในแนวตั้งฉากกับแนวโพลาไรส์ จะถูกแผ่นโพลาไรซ์ดูดกลืน



ก. สนามไฟฟ้าของแสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์



ข. สนามไฟฟ้าของแสงไม่โพลาไรซ์ที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์สองแผ่นที่มีแนวโพลาไรซ์ขนานกัน



ค. สนามไฟฟ้าของแสงไม่โพลาไรซ์ที่แผ่นโพลาไรซ์สองแผ่นที่มีแนวโพลาไรซ์ตั้งฉากกัน

รูป 18.11 แสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์

เมื่อแสงไม่โพลาไรซ์ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ สนามไฟฟ้าของแสงไม่โพลาไรซ์ที่มีทิศตั้งฉากกับแนวโพลาไรซ์จะถูกดูดกลืน เหลือเพียงสนามไฟฟ้าที่มีทิศขนานกับแนวโพลาไรซ์ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ออกมา ดังรูป 18.11 ก. จะได้แสงโพลาไรซ์เชิงเส้น (linear polarized light)

นั่นคือ แสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์แล้ว จะเป็นแสงที่มีสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงในระนาบเดียว และอยู่ในแนวโพลาไรซ์ของแผ่นโพลาไรซ์ สมบัติของแสงลักษณะนี้เรียกว่า โพลาไรเซชัน (polarization)

เมื่อให้แสงไม่โพลาไรซ์ผ่านแผ่นโพลาไรซ์สองแผ่นที่นำมาประกบกัน ขณะหมุนแผ่นโพลาไรซ์แผ่นที่สอง ความสว่างของแสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ทั้งสองจะเปลี่ยนไป ความสว่างของแสงจะมากที่สุดเมื่อแนวโพลาไรซ์ของแผ่นโพลาไรซ์ทั้งสองขนานกัน ดังรูป 18.11 ข. และความสว่างจะน้อยที่สุด เมื่อแนวโพลาไรซ์ของแผ่นโพลาไรซ์ทั้งสองตั้งฉากกัน ดังรูป 18.11 ค. (ถ้าแผ่นโพลาไรซ์มีคุณภาพดีมาก จะไม่มีแสงผ่านออกมา)

### 💡 | ขวนคิด

แสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ 1 แผ่นแล้ว มีสนามไฟฟ้าอยู่ในแนวระดับ ยังมีสนามแม่เหล็กอยู่หรือไม่ และหากมีจะอยู่ในแนวใด





### คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 18.3

จากกิจกรรม 18.1 ในการส่องดูแสงจากแหล่งกำเนิดแสงไม่โพลาไรส์ด้วยแผ่นโพลาไรซ์สองแผ่นซ้อนกัน หากเปลี่ยนเป็นหมุนแผ่นโพลาไรซ์แผ่นแรก ไปจนครบ 1 รอบ ความสว่างของแสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ทั้งสอง ออกมาจะมีการเปลี่ยนแปลง หรือไม่เพราะเหตุใด

## 18.4 การประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

จากหัวข้อที่ผ่านมาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบ่งได้เป็นหลายชนิดตามความถี่ ซึ่งจะมีสมบัติที่แตกต่างกันตามชนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงได้มีการนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น ด้านการสื่อสาร ด้านการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรม ในหัวข้อนี้จะได้ศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์บางชนิดที่ทำงานโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

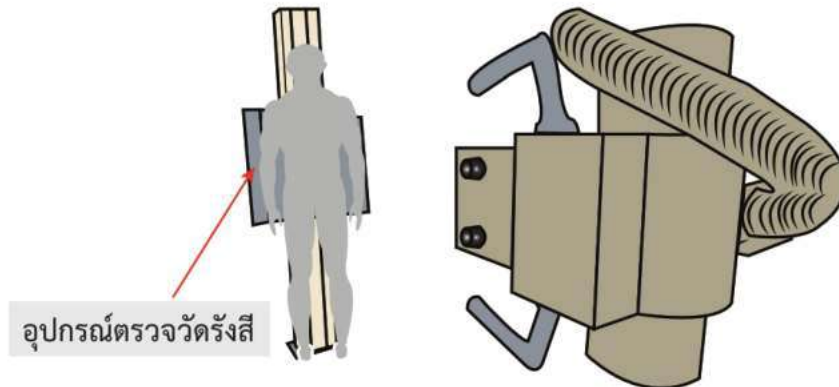
### 18.4.1 เครื่องฉายรังสีเอกซ์

เครื่องฉายรังสีเอกซ์ (X-ray machine) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงรังสีเอกซ์ฉายผ่านร่างกายในบริเวณที่ต้องการวินิจฉัย ซึ่งจะได้ภาพเป็นภาพ 2 มิติ เครื่องฉายรังสีเอกซ์มีส่วนประกอบ ดังรูป 18.12



รูป 18.12 ส่วนประกอบของเครื่องฉายรังสีเอกซ์

หลอดรังสีเอกซ์ (X-ray tube) จะฉายรังสีเอกซ์ผ่านร่างกายในบริเวณอวัยวะที่ต้องการตรวจหาความผิดปกติ ไปยังอุปกรณ์ตรวจวัดรังสี ดังรูป 18.13 โดยความเข้มของรังสีเอกซ์จะถูกปรับจากส่วนควบคุม



รูป 18.13 การฉายรังสีเอกซ์ผ่านร่างกายในบริเวณที่ต้องการตรวจสอบความผิดปกติ

อุปกรณ์ตรวจวัดรังสี มีสองแบบคือ แบบแผ่นฟิล์ม และแบบดิจิทัล รังสีเอกซ์ที่ฉายผ่านร่างกายจะถูกเนื้อเยื่อและกระดูกดูดกลืนในปริมาณที่แตกต่างกัน เมื่อตกกระทบอุปกรณ์ตรวจวัดรังสี ทำให้เกิดเป็นภาพบนระนาบใน 2 มิติ ถ้าเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดรังสีแบบแผ่นฟิล์มจะได้ภาพดังรูป 18.14 ก. หากเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดรังสีแบบดิจิทัลจะได้ภาพแสดงบนจอแสดงผล ดังรูป 18.14 ข. ซึ่งแพทย์จะนำภาพนี้ไปประกอบการวินิจฉัยโรคต่อไป



ก. แบบแผ่นฟิล์ม



ข. แบบดิจิทัล

รูป 18.14 ภาพเอกซเรย์จากอุปกรณ์ตรวจวัดรังสี

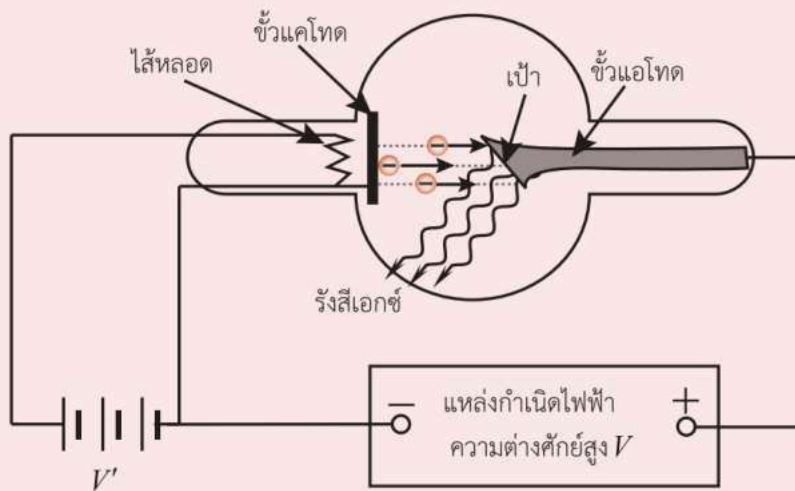
ภาพเอกซเรย์ที่ได้จะเป็นภาพขาวดำ โดยในแต่ละตำแหน่งจะมีสีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีเอกซ์ที่ผ่านร่างกาย แล้วไปตกกระทบอุปกรณ์ตรวจวัดรังสี เช่น กระจุกมีแคลเซียมซึ่งสามารถดูดกลืนรังสีเอกซ์ได้มากที่สุด จึงทำให้มองเห็นภาพเอกซเรย์กระดูกเป็นสีขาว ส่วนเนื้อเยื่อและอวัยวะภายในมีคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนซึ่งดูดกลืนรังสีได้น้อยกว่า จึงมองเห็นภาพเป็นสีเทา ในขณะที่ปอดมีออกซิเจนซึ่งดูดกลืนรังสีได้น้อยที่สุดจึงมองเห็นเป็นสีดำ ดังรูป 18.14 สำหรับเนื้อเยื่อ ภาพที่เห็นจะไม่สามารถแยกเนื้อเยื่อแบบต่าง ๆ ออกจากกันได้ เนื่องจากความเข้มของรังสีที่อุปกรณ์ตรวจวัดรังสีวัดได้มีความแตกต่างกันน้อยมาก ทางแพทย์อาจแก้ปัญหานี้ได้ โดยการฉีดสารทึบแสง เช่น ไอโอดีนหรือแบเรียมเข้าไปในเนื้อเยื่อก่อนฉายรังสี

การสร้างภาพอวัยวะภายในร่างกายด้วยเครื่องฉายรังสีเอกซ์เพื่อใช้ประกอบวินิจฉัยทางการแพทย์ เป็นการใช้ประโยชน์ของรังสีเอกซ์ การได้รับรังสีเป็นระยะเวลานานหรือได้รับรังสีเป็นปริมาณมากอาจทำให้เกิดอันตราย เพื่อความปลอดภัยควรปฏิบัติตามคำแนะนำของแพทย์หรือผู้เชี่ยวชาญ



### ความรู้เพิ่มเติม

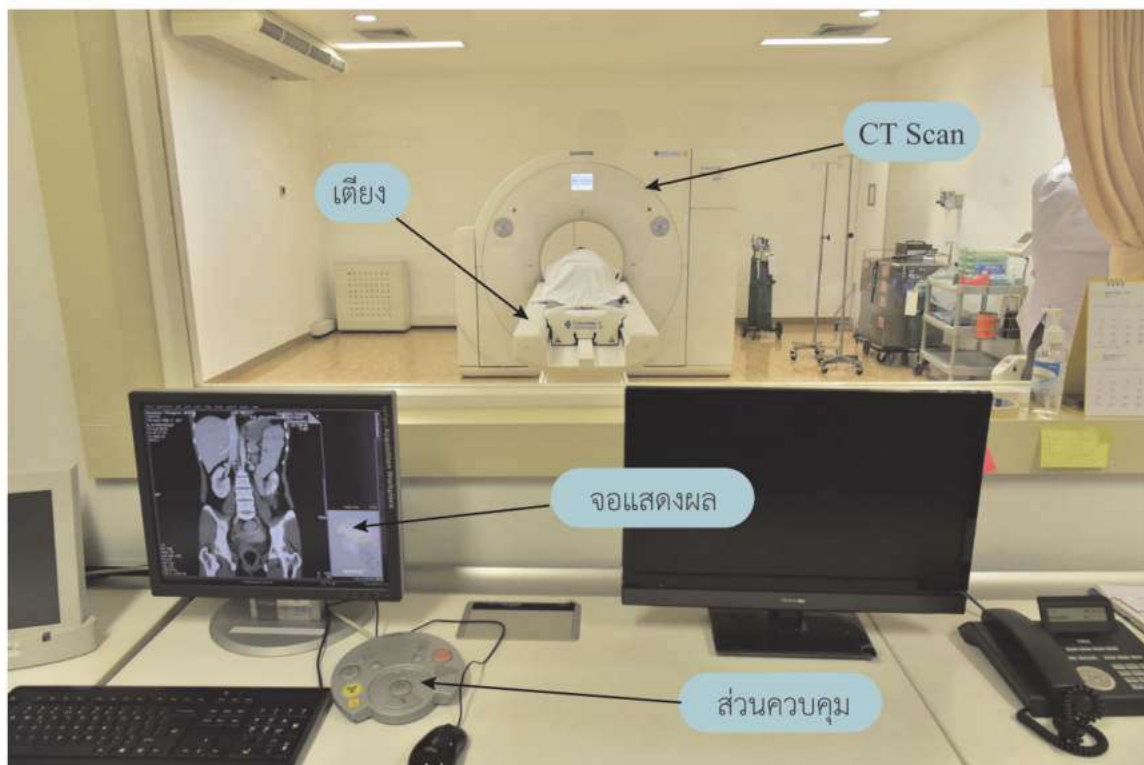
เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ หลอดรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นหลอดแก้วสุญญากาศ ภายในมีขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้วลบ (แคโทด) หรือ **ไส้หลอด** (filament) และขั้วบวก (แอโนด) หรือ **เป้า** (target) ขั้วทั้ง 2 ต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูง เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปในไส้หลอด แล้วจะเกิดความร้อนจนเพิ่มอุณหภูมิสูงประมาณ 2000 องศาเซลเซียส หรือมากกว่า ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากไส้หลอดมากเพียงพอ และถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูงไปกระทบกับเป้า จึงปลดปล่อยพลังงานออกมาเป็นรังสีเอกซ์ความถี่ต่าง ๆ ดังรูป



รูป ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์

### 18.4.2 เครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์

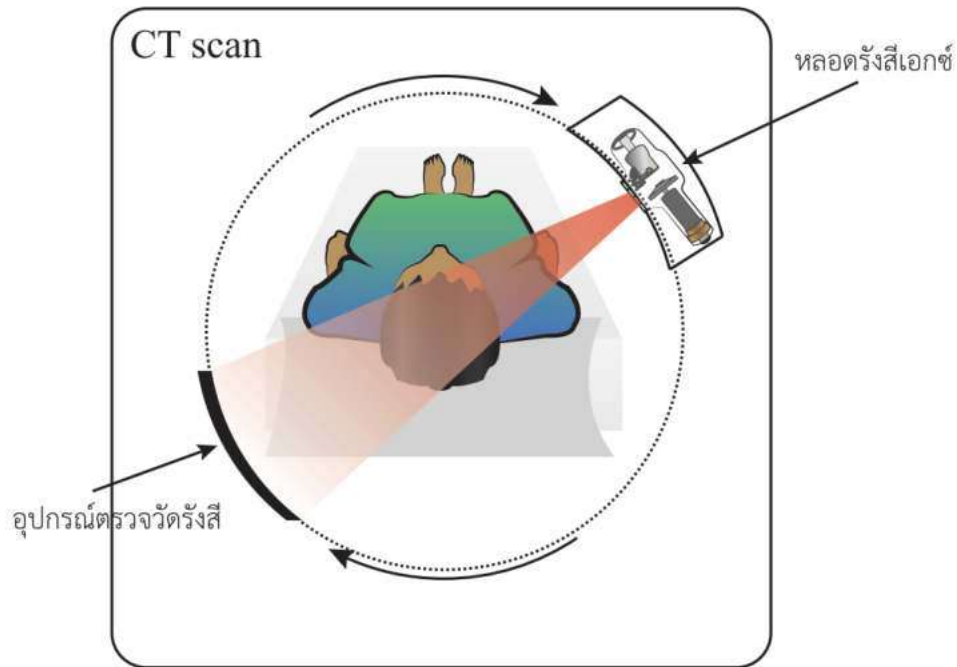
เครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (computed tomography scan หรือ CT Scan) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า ซีทีสแกน เป็นอีกหนึ่งอุปกรณ์ที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงรังสีเอกซ์ฉายกราด (scan) ผ่านตัวอวัยวะหรือร่างกาย และสร้างภาพที่เห็นรายละเอียดโครงสร้างของอวัยวะภายในร่างกาย โดยแพทย์ จะใช้ภาพควบคู่กับการตรวจวินิจฉัยว่าอวัยวะนั้น ๆ มีความผิดปกติหรือไม่ ซีทีสแกนมีส่วนประกอบ ดังรูป 18.15



รูป 18.15 ส่วนประกอบของซีทีสแกน

ซีทีสแกนมีหลักการทำงาน ดังนี้

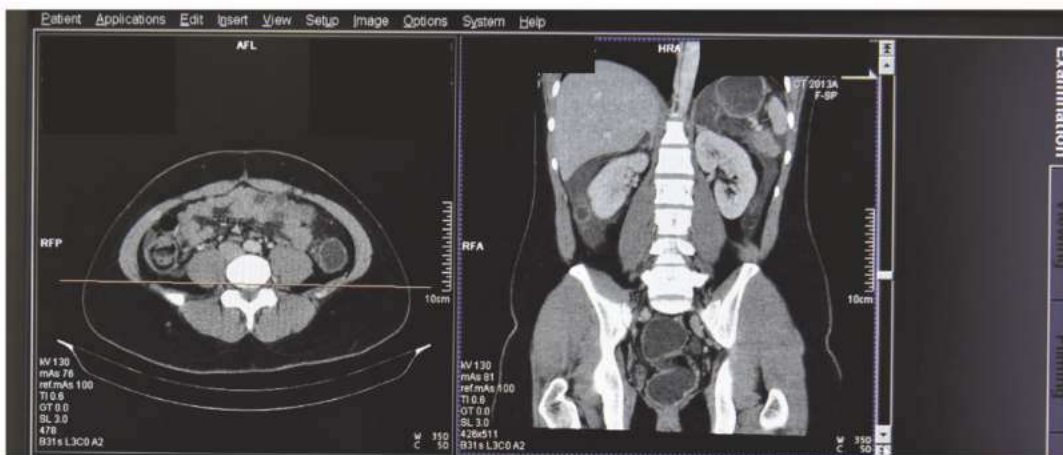
แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ จะหมุนรอบร่างกาย พร้อมกับฉายรังสีเอกซ์ผ่านร่างกายบริเวณอวัยวะที่ต้องการตรวจสอบความผิดปกติในแนวต่าง ๆ จนรอบอวัยวะนั้น ไปยังอุปกรณ์ตรวจวัดรังสีที่อยู่ในทิศตรงกันข้าม ดังรูป 18.16



รูป 18.16 แผนภาพการทำงานของซีทีสแกน

ขณะที่รังสีเอกซ์ผ่านร่างกายในแนวต่าง ๆ โดยรอบ จะถูกดูดกลืนในปริมาณที่ต่างกัน ขึ้นกับความหนาแน่นส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย การดูดกลืนจากมากไปน้อยเป็นดังนี้ กระดูก > เนื้อเยื่อ > ไขมัน > อากาศ

รังสีที่ผ่านร่างกายจะถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดรังสี แล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและถูกสร้างเป็นภาพภาคตัดขวางด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ผู้ป่วยจะถูกเลื่อนเข้าไปในเครื่องซีทีสแกน และสร้างภาพภาคตัดขวางต่อเนื่อง เมื่อนำภาพภาคตัดขวางมาวางต่อกันจะทำให้สามารถสร้างเป็นภาพ 3 มิติได้ ตัวอย่างภาพภาคตัดขวางจากซีทีสแกนแสดงดังรูป 18.17



รูป 18.17 ภาพภาคตัดขวางของลำตัวจากซีทีสแกน

ภาพภาคตัดขวางที่แสดงบนจอคอมพิวเตอร์เป็นภาพขาวดำ (gray scale) โดยสีของภาพแต่ละจุดจะแทนเนื้อเยื่อต่าง ๆ เช่น บริเวณที่มีสีขาวแทนกระดูก บริเวณสีเทาแทนเนื้อเยื่อในอวัยวะ บริเวณสีเทาเข้มแทนไขมัน บริเวณสีดำแทนอากาศ การทำซีทีสแกนในบางกรณีอาจมีการนำสารทึบแสงเข้าสู่ร่างกายเช่นเดียวกับเครื่องฉายรังสีเอกซ์ ก่อนทำซีทีสแกนเพื่อให้เนื้อเยื่อภายในอวัยวะดูกลืนรังสีเอกซ์ได้มากขึ้น

### 18.4.3 เครื่องควบคุมระยะไกล

เครื่องควบคุมระยะไกล หรือ รีโมทคอนโทรลเลอร์ หรือ เรียกสั้นๆ ว่า รีโมท เป็นอุปกรณ์ที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงรังสีอินฟราเรด สำหรับส่งผ่านข้อมูลไปยังอุปกรณ์ที่ต้องการควบคุม เช่น โทรทัศน์

โดยทั่วไป เครื่องควบคุมระยะไกลมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนได้แก่ ปุ่มคำสั่งต่าง ๆ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และ ส่วนส่งสัญญาณ ดังรูป 18.18 ก. และ รูป 18.18 ข. ตามลำดับ



ก. ปุ่มคำสั่งต่างๆ และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์



ไดโอดเปล่งแสงสำหรับใช้ส่งรังสีอินฟราเรด

ข. ส่วนส่งสัญญาณ

รูป 18.18 เครื่องควบคุมระยะไกลของโทรทัศน์

เมื่อกดที่ปุ่มใดปุ่มหนึ่งบนเครื่องควบคุมระยะไกล แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในรีโมทจะทำหน้าที่ประมวลผลการกดปุ่มเป็นรหัสคำสั่ง จากนั้นรหัสคำสั่งจะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วส่งต่อไปยังส่วนส่งสัญญาณ ซึ่งจะส่งรังสีอินฟราเรดที่มีสัญญาณคำสั่งไปยังเครื่องใช้ไฟฟ้า แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของรีโมทดังรูป 18.19 ก.

เมื่อส่วนรับสัญญาณของโทรทัศน์ได้รับรังสีอินฟราเรดที่ส่งมา จะแปลงกลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า และส่งต่อไปยังส่วนต่าง ๆ ของเครื่องเพื่อการทำงานตามคำสั่งที่ได้มาจากรีโมทต่อไป แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของส่วนรับสัญญาณ ดังรูป 18.19 ข.



รูป 18.19 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของเครื่องควบคุมระยะไกลและส่วนรับสัญญาณ

สำหรับเครื่องควบคุมระยะไกลของอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น คีย์บอร์ดไร้สาย (wireless keyboard) และเมาส์ไร้สาย (wireless mouse) ดังรูป 18.20 ก. เครื่องควบคุมระยะไกลของโดรนของเล่น ดังรูป 18.20 ข. มีขั้นตอนการทำงานหลักเหมือนกับรีโมทของโทรทัศน์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่คีย์บอร์ดไร้สาย เมาส์ไร้สายและเครื่องควบคุมโดรน อาจใช้อินฟราเรดหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดอื่น ในการส่งและรับสัญญาณ



ก. คีย์บอร์ดและเมาส์ของคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย



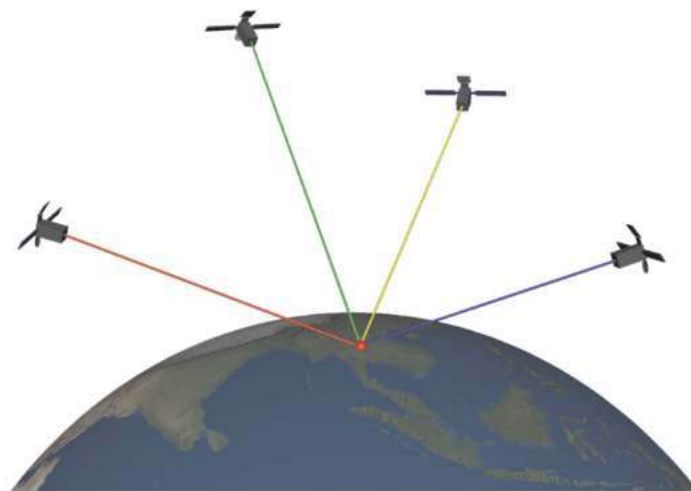
ข. เครื่องควบคุมโดรนแบบไร้สาย

รูป 18.20 ตัวอย่างเครื่องควบคุมระยะไกลของอุปกรณ์อื่น ๆ

#### 18.4.4 เครื่องระบุตำแหน่งบนพื้นโลก

การระบุตำแหน่งบนพื้นโลก ในปัจจุบันส่วนใหญ่จะใช้ระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลกหรือจีพีเอส (global positioning system หรือ GPS) ซึ่งจะประกอบไปด้วยศูนย์ควบคุมภาคพื้นดิน ดาวเทียมส่งสัญญาณ และเครื่องระบุตำแหน่งบนพื้นโลก โดยมีหลักการทำงานดังนี้

ดาวเทียมส่งสัญญาณจะส่งข้อมูลตำแหน่งและเวลาของดาวเทียมขณะส่งสัญญาณ โดยผสมสัญญาณเข้ากับไมโครเวฟ เมื่อเครื่องระบุตำแหน่งบนพื้นโลกรับสัญญาณจากดาวเทียม จะคำนวณความแตกต่างของเวลาในการรับสัญญาณกับเวลาส่งสัญญาณของดาวเทียมแต่ละดวง ทำให้สามารถหาระยะห่างระหว่างดาวเทียมแต่ละดวงกับเครื่องระบุตำแหน่งบนพื้นโลก แล้วนำมาประมวลผลเป็นตำแหน่งของเครื่องระบุตำแหน่งบนพื้นโลกขณะนั้น เนื่องจากข้อมูลตำแหน่งและเวลาของดาวเทียมในวงโคจรอาจมีการเปลี่ยนแปลงไป ศูนย์ควบคุมภาคพื้นดินทำหน้าที่ตรวจสอบ ปรับปรุงและดูแลการทำงานของดาวเทียมส่งสัญญาณ ให้ข้อมูลของดาวเทียมถูกต้องตลอดเวลา ในการระบุตำแหน่งที่มีความแม่นยำสูงเครื่องระบุตำแหน่งบนพื้นโลกจำเป็นต้องใช้ข้อมูลของดาวเทียมส่งสัญญาณอย่างน้อย 4 ดวง เพื่อหาดำแหน่งบนพื้นโลก ณ เวลานั้น ๆ ดังรูป



รูป 18.21 การระบุตำแหน่งบนพื้นโลกด้วยระบบจีพีเอส

ในความเป็นจริงแล้วความแม่นยำของการระบุตำแหน่งยังมีปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศ ความชื้น อุณหภูมิ การหักเหของคลื่นสัญญาณ ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของการระบุตำแหน่งนั้นลดลง



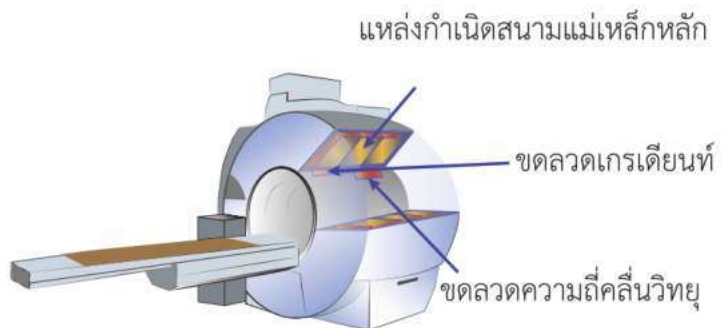


## ความรู้เพิ่มเติม

NAVSTAR (navigation satellite timing and ranging) เป็นเครือข่ายดาวเทียม GPS ของสหรัฐอเมริกา มีดาวเทียม 28 ดวง ใช้งานจริง 24 ดวง อีก 4 ดวง ไว้สำรอง โดยจะแบ่งเป็น 6 รอบวงโคจร แต่ละวงโคจรมีดาวเทียม 4 ดวง และดาวเทียมแต่ละดวงใช้เวลาในการโคจรรอบโลก 12 ชั่วโมง ซึ่งทำให้ทุกตำแหน่งบนโลกติดต่อกับดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวงตลอดเวลาซึ่งประชาชนทั่วโลกสามารถใช้ข้อมูลจาก NAVSTAR ได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย ในระดับที่ไม่เป็นภัยต่อความมั่นคงของสหรัฐอเมริกา นอกจากนี้ยังมีเครือข่ายดาวเทียม GPS ประเทศอื่นอีกเช่น กลุ่มประเทศยุโรป รัสเซีย เรียกรวมกันว่า ระบบดาวเทียมนำร่องโลก (global navigation satellite system หรือ GNSS)

### 18.4.5 เครื่องถ่ายภาพการสั่นพ้องแม่เหล็ก

เครื่องถ่ายภาพการสั่นพ้องแม่เหล็ก หรือเครื่องเอ็มอาร์ไอ (magnetic resonance imaging หรือ MRI) เป็นอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่ใช้ประกอบการวินิจฉัยโรค ซึ่งสามารถแยกภาพฉายของเนื้อเยื่อต่างชนิดกันเป็นภาคตัดขวาง และภาพ 3 มิติได้ โดยอุปกรณ์นี้อาศัยสมบัติความเป็นแม่เหล็กของนิวเคลียสของไฮโดรเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญภายในร่างกายมนุษย์เช่น โมเลกุลของน้ำ เครื่องถ่ายภาพสั่นพ้อง แม่เหล็กซึ่งมีลักษณะเป็นอุโมงค์ ดังรูป 18.22 มีส่วนประกอบสำคัญและหลักการทำงานดังนี้



รูป 18.22 ส่วนประกอบของเครื่องถ่ายภาพสั่นพ้องแม่เหล็ก

แม่เหล็กกำเนิดสนามแม่เหล็กหลัก ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กความเข้มสูงประมาณ 1.5 - 3 เทสลา เพื่อจัดระเบียบนิวเคลียสของไฮโดรเจนในเนื้อเยื่อ ขดลวดเกรเดียนท์ (gradient coils) ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มน้อยกว่าสนามแม่เหล็กหลัก ในทิศทางที่แตกต่างกันตามแนวแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  เพื่อให้ได้ข้อมูลในการสร้างภาพ 3 มิติ

ขดลวดความถี่คลื่นวิทยุ (radio frequency coils) ทำหน้าที่สร้างคลื่นวิทยุความถี่เหมาะสมกับความถี่สั่นพ้องของนิวเคลียสของไฮโดรเจนในเนื้อเยื่อที่ต้องการถ่ายภาพ เพื่อให้พลังงานแก่นิวเคลียสของไฮโดรเจน เมื่อขดลวดความถี่คลื่นวิทยุหยุดสร้างคลื่นวิทยุ นิวเคลียสของไฮโดรเจนที่ได้รับพลังงาน จะปลดปล่อยพลังงานที่ได้รับกลับออกมาเป็นสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยขดลวดความถี่คลื่นวิทยุ จะรับสัญญาณที่ปลดปล่อยนี้ และส่งไปวิเคราะห์เพื่อสร้างภาพ ดังรูป 18.23



รูป 18.23 ตัวอย่างภาพถ่ายจากเครื่องถ่ายภาพสั่นพ้องแม่เหล็ก

เครื่องถ่ายภาพสั่นพ้องแม่เหล็กใช้คลื่นวิทยุในการทำงาน ซึ่งคลื่นวิทยุนี้ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ แตกต่างจากการตรวจด้วยการใช้รังสีเอกซ์ อีกทั้งสามารถตรวจสอบได้ทุกระบบของร่างกายและมีความแม่นยำสูง แต่การตรวจด้วยเครื่องถ่ายภาพสั่นพ้องแม่เหล็ก มีการใช้สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงค่าและมีความเข้มสูง ดังนั้นผู้เข้ารับการตรวจจะต้องไม่มีอุปกรณ์ที่เป็นโลหะ เช่น เครื่องประดับ เครื่องกระตุ้นหัวใจ แม้ว่าในปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลว่า การตรวจด้วยเครื่องถ่ายภาพสั่นพ้องแม่เหล็กมีผลกระทบต่อทารกในครรภ์ สตรีมีครรภ์ควรปรึกษาแพทย์ก่อนเข้ารับการตรวจด้วยวิธีนี้



### ความรู้เพิ่มเติม

นักฟิสิกส์พบว่า นิวเคลียสมีสมบัติเชิงแม่เหล็ก เมื่อนิวเคลียสอยู่ในสนามแม่เหล็กและถูกกระตุ้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่เหมาะสม นิวเคลียสจะเกิดการสั่นพ้องและมีพลังงานสูง เมื่อหยุดการรบกวน นิวเคลียสจะกลับสู่สถานะเดิมและปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การสั่นพ้องแม่เหล็กนิวเคลียร์หรือเอ็นเอ็มอาร์ (nuclear magnetic resonance หรือ NMR)

การประยุกต์ที่สำคัญของเอ็นเอ็มอาร์ก็คือการนำหลักการเอ็นเอ็มอาร์ร่วมกับเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ไปประดิษฐ์เครื่องถ่ายภาพการสั่นพ้องแม่เหล็กหรือเครื่องเอ็มอาร์ไอ เพื่อใช้ในการถ่ายภาพภาคตัดขวางของร่างกายมนุษย์



### คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 18.4

1. ภาพที่ได้จากเครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์แตกต่างจากภาพที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์ทั่วไปอย่างไร
2. เครื่องถ่ายภาพการสั่นพ้องแม่เหล็กใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดใดในการสร้างภาพของอวัยวะภายในร่างกาย และคลื่นนั้นมีผลกับร่างกายผู้ป่วยหรือไม่ อย่างไร
3. เพราะเหตุใด การถ่ายภาพด้วยเครื่องถ่ายภาพสั่นพ้องแม่เหล็กจึงมีอันตรายน้อยกว่าการถ่ายภาพด้วยเครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์
4. ปัจจัยใดบ้าง ที่มีผลต่อความแม่นยำของการระบุตำแหน่งของเครื่องระบุตำแหน่งบนพื้นโลก

## 18.5 การสื่อสารโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่นำมาใช้ส่งสัญญาณเพื่อการสื่อสารได้แก่ คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ และแสงที่ตามองเห็น โดยสัญญาณที่ใช้มี 2 ชนิดได้แก่ สัญญาณแอนะล็อกและสัญญาณดิจิทัล

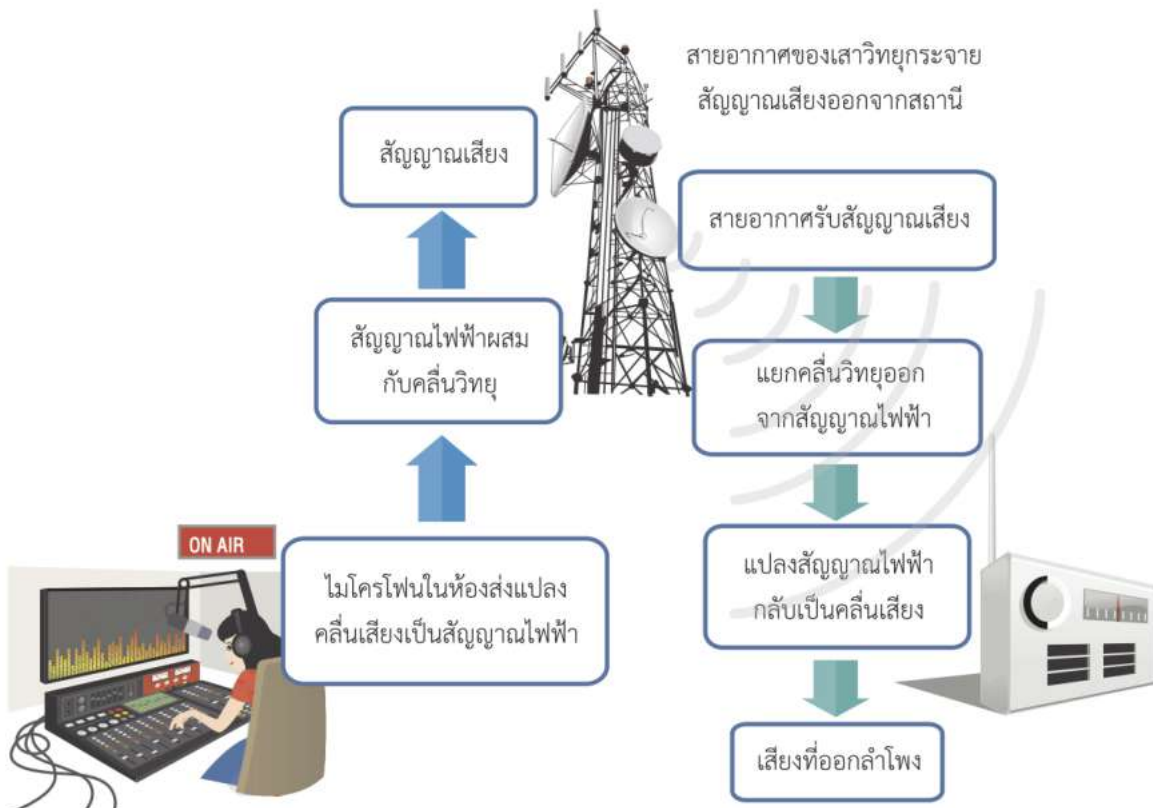
การสื่อสารโดยอาศัยคลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ และ แสงมีหลักการสำคัญอย่างไร และสัญญาณแอนะล็อกแตกต่างอย่างไรจากสัญญาณดิจิทัล ศึกษาได้ในหัวข้อต่อไป

### 18.5.1 การสื่อสารโดยอาศัยคลื่นวิทยุ

คลื่นวิทยุเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการสื่อสารมากที่สุด ซึ่งมีรูปแบบการใช้ที่หลากหลาย ในที่นี้จะกล่าวถึงการใช้คลื่นวิทยุเพื่อการสื่อสาร 3 แบบ คือ การกระจายสัญญาณเสียงของสถานีวิทยุ การส่งและรับสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ และการส่งและรับสัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย

#### การกระจายสัญญาณเสียงของสถานีวิทยุ

การกระจายสัญญาณเสียงของสถานีวิทยุมีขั้นตอนหลักตามแผนภาพในรูป 18.24

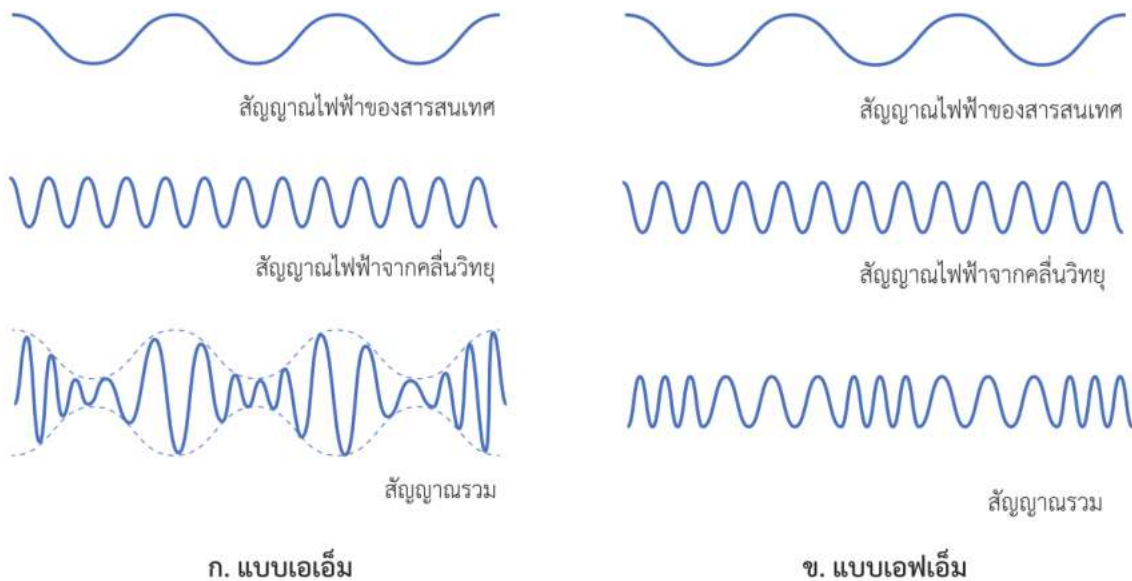


รูป 18.24 การส่งสัญญาณเสียงของสถานีวิทยุและการรับสัญญาณเสียงของเครื่องรับวิทยุ

เริ่มจากคลื่นเสียงที่พูดผ่านไมโครโฟนได้รับการแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปผสมกับคลื่นวิทยุ คลื่นที่ผสมแล้ว เรียกว่า สัญญาณเสียงของสถานีวิทยุ ซึ่งจะถูกขยายให้มีกำลังสูงขึ้น แล้วส่งไปยังสายอากาศเพื่อกระจายออกจากสถานีวิทยุ และเมื่อสัญญาณเสียงเดินทางไปถึงเครื่องรับวิทยุ คลื่นวิทยุจะถูกแยกออกจากสัญญาณไฟฟ้า แล้วสัญญาณไฟฟ้าจะถูกแปลงกลับไปเป็นเสียงที่เหมือนกับส่งมาจากสถานี

ในการผสมคลื่นวิทยุกับสัญญาณไฟฟ้า มีวิธีการผสม 2 แบบด้วยกันคือ แบบเอเอ็มและแบบเอฟเอ็ม ซึ่งระบบกระจายสัญญาณวิทยุที่ใช้การผสมแต่ละแบบเรียกว่า ระบบวิทยุเอเอ็ม (AM radio) และ ระบบวิทยุเอฟเอ็ม (FM radio) ตามลำดับ

การผสมแบบเอเอ็ม เป็นการผสมในลักษณะที่แอมพลิจูดของคลื่นวิทยุมีการปรับแต่งตามลักษณะของสัญญาณไฟฟ้านำมาผสม ในขณะที่ความถี่ของคลื่นวิทยุไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังรูป 18.25 ก. ส่วนการผสมแบบเอฟเอ็ม เป็นการผสมในลักษณะที่ความถี่ของคลื่นวิทยุมีการปรับแต่งตามสัญญาณไฟฟ้านำมาผสม ในขณะที่แอมพลิจูดของคลื่นวิทยุไม่เปลี่ยนแปลง ดังรูป 18.25 ข.

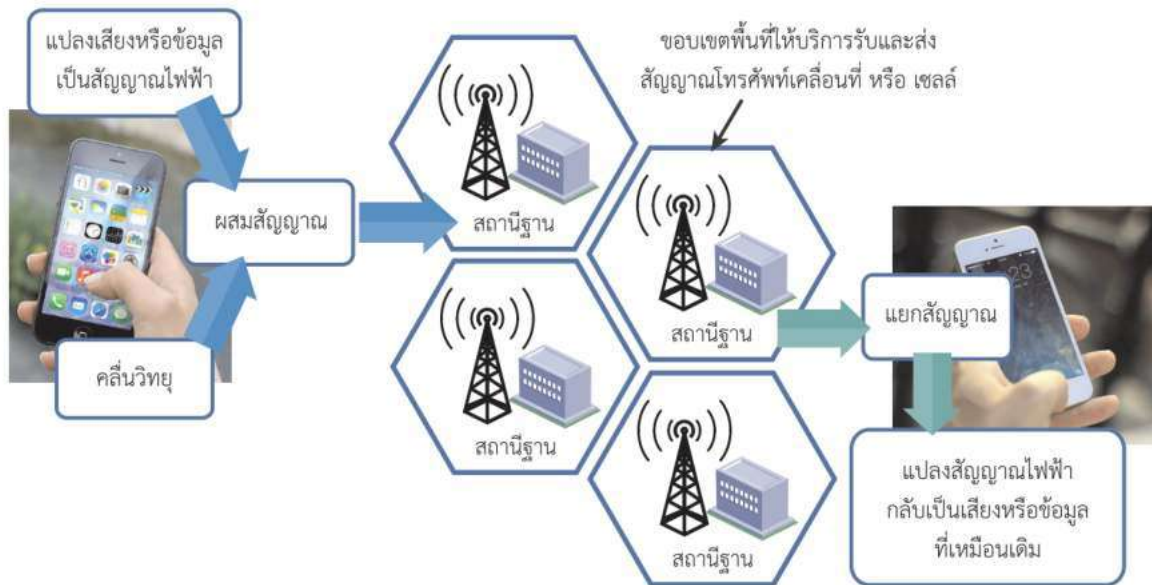


รูป 18.25 การผสมคลื่นวิทยุกับสัญญาณไฟฟ้า

หลายคนอาจเคยมีประสบการณ์ที่ได้ยินเสียงที่ขาดหายจากเครื่องรับวิทยุ เมื่อมีฝนตกฟ้าคะนอง ทั้งนี้ เพราะปรากฏการณ์ฟ้าแลบและฟ้าผ่าสามารถทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รบกวนสัญญาณที่ส่งมาจากสถานีวิทยุ ถ้าการรับสัญญาณเสียงจากระบบเอเอ็ม จะพบว่า เสียงที่ได้ยินขาดหายและมีความไม่ชัดเจนมากกว่าสัญญาณเสียงที่มาจากระบบเอฟเอ็ม ทั้งนี้ เพราะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มารบกวนส่วนใหญ่ไม่ส่งผลกับความถี่ของสัญญาณเสียง แต่จะส่งผลกับแอมพลิจูด ดังนั้น ระบบวิทยุเอฟเอ็มจึงเป็นที่นิยมมากกว่า อย่างไรก็ตาม ระบบวิทยุเอเอ็มยังมีข้อได้เปรียบในด้านขนาดพื้นที่ครอบคลุมของการส่งสัญญาณที่มากกว่า และสามารถส่งสัญญาณผ่านสิ่งกีดขวางต่าง ๆ เช่น ตึกสูง หรือ ภูเขาใหญ่ ได้ดีกว่าระบบวิทยุเอฟเอ็ม

### การส่งและรับสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่

การสื่อสารด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่มีขั้นตอนของการส่งและรับสัญญาณคล้ายกับการกระจายสัญญาณเสียงของสถานีวิทยุ แต่มีความแตกต่างที่การแบ่งขอบเขตพื้นที่การรับและส่งสัญญาณ หรือ เซลล์ (cell) ออกเป็นพื้นที่ที่ไม่กว้างมาก โดยแต่ละเซลล์มีสถานีฐาน (base station) ที่ทำหน้าที่รับและส่งต่อสัญญาณระหว่างกัน ดังรูป 18.26



รูป 18.26 การรับและส่งสัญญาณของเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่

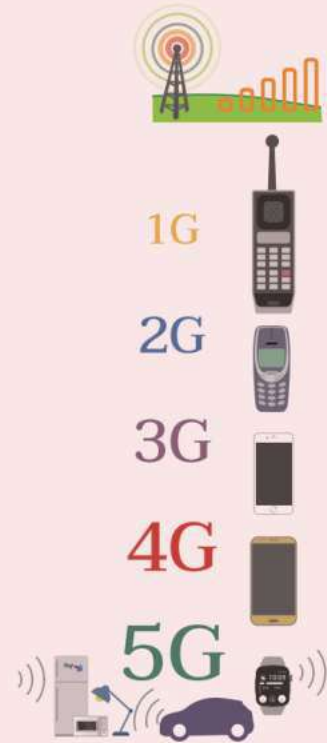
การสื่อสารโดยใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่เริ่มจากการที่เสียงพูดหรือข้อมูลต่าง ๆ ถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะนำไปผสมกับคลื่นวิทยุกลายเป็นสัญญาณเสียงหรือสัญญาณข้อมูลที่ถูกส่งต่อไปยังสายอากาศขนาดเล็กของโทรศัพท์เพื่อการกระจายออกไปยังเสารับสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียง จากนั้นเสารับสัญญาณจะส่งสัญญาณต่อไปยังสถานีฐานที่มีขอบเขตพื้นที่ให้บริการครอบคลุมบริเวณที่ผู้ใช้โทรศัพท์อยู่ ลำดับต่อมา สถานีฐานจะทำหน้าที่รับแล้วส่งต่อสัญญาณเสียงหรือข้อมูลไปยังสถานีฐานอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้เคียงจนกระทั่งถึงสถานีฐานที่มีขอบเขตพื้นที่ให้บริการครอบคลุมบริเวณที่มีผู้รับปลายทางอยู่ เมื่อสัญญาณเสียงหรือข้อมูลไปถึงสายอากาศของโทรศัพท์เคลื่อนที่ของผู้รับ จะถูกแยกออกเป็นคลื่นวิทยุ และสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งสัญญาณไฟฟ้าจะถูกแปลงกลับเป็นเสียงหรือข้อมูลที่เหมือนกับที่ส่งมาจากต้นทาง



## ความรู้เพิ่มเติม

วิวัฒนาการของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ถูกแบ่งเป็นยุค ๆ (generation) โดยยุคแรก (first generation) เรียกว่า ยุค 1G และยุคต่อไปมีชื่อเรียกตามลำดับตัวเลขที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยแต่ละยุคมีช่วงเวลาประมาณ 10 ปี ซึ่งในปัจจุบันอยู่ในช่วงของยุค 4G ที่ประเทศไทยได้เริ่มใช้งานในปี พ.ศ. 2556 และต่อไปจะเป็นช่วงของยุค 5G

การพัฒนาของระบบโทรศัพท์ในแต่ละยุค ได้นำไปสู่การขยายการรองรับปริมาณการใช้งานที่มากขึ้น ประสิทธิภาพการส่งสัญญาณที่ดีขึ้น รวมทั้งความสามารถในการส่งสัญญาณอื่น ๆ นอกจากสัญญาณเสียง โดยในยุค 4G ได้มีการพัฒนาให้การส่งและรับสัญญาณข้อมูลรวดเร็วขึ้นกว่าในยุค 3G ช่วยให้โทรศัพท์ที่ใช้ระบบ 4G สามารถใช้ชมคลิปวิดีโอแบบคมชัดสูง (high definition) ประชุมทางไกล (video conference) หรือเข้าชมเว็บไซต์ที่มีสื่อต่าง ๆ จำนวนมากได้อย่างชัดเจนและไม่ติดขัด



### การส่งและรับสัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย

Wi-Fi เป็นชื่อเรียกของมาตรฐานของเทคโนโลยีเครือข่ายแบบไร้สายมาตรฐานหนึ่ง ซึ่งปัจจุบัน เป็นมาตรฐานที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในการส่งและรับสัญญาณอินเทอร์เน็ต ดังจะเห็นป้ายระบุการให้บริการสัญญาณ Wi-Fi ในร้านค้าหรือในสถานที่สาธารณะ กระบวนการของการส่งและรับสัญญาณ Wi-Fi คล้ายกับการส่งและรับสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่

แต่สัญญาณ Wi-Fi จะใช้คลื่นวิทยุความถี่สูงยิ่ง\* ขนาด 2.4 GHz หรือ 5 GHz ที่แตกต่างจากความถี่ของคลื่นวิทยุจากเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่อื่น ๆ เพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนของสัญญาณ

ในการส่งและรับสัญญาณ Wi-Fi จะมีอุปกรณ์จัดเส้นทาง หรือ เราเตอร์ (router) เป็นตัวกลางที่ทำหน้าที่เชื่อมโยงอุปกรณ์หลายชนิดที่ใช้ Wi-Fi เข้าด้วยกัน ดังรูป 18.27 และจัดเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับการส่งและรับข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

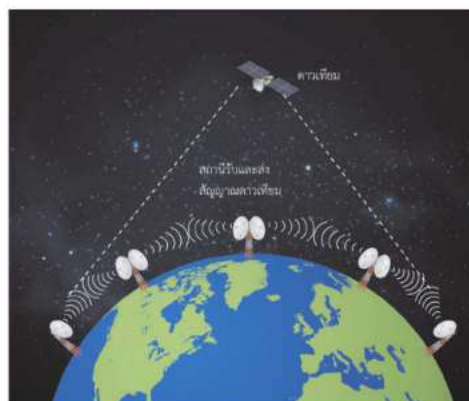


รูป 18.27 อุปกรณ์จัดเส้นทาง หรือ เราเตอร์ของสัญญาณ Wi-Fi

\* หมายเหตุ: คลื่นวิทยุความถี่สูงยิ่ง มีขนาดความถี่อยู่ในช่วงของไมโครเวฟ ในบางกรณีจึงเรียกว่าไมโครเวฟ

### 18.5.2 การสื่อสารโดยอาศัยไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอีกช่วงความถี่ที่ใช้ในการสื่อสาร ทั้งในระบบเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่และระบบสัญญาณดาวเทียม โดยการส่งและรับสัญญาณมีกระบวนการคล้ายกับการสื่อสารของโทรศัพท์เคลื่อนที่ แต่เนื่องจากไมโครเวฟไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีเท่ากับคลื่นวิทยุ การใช้ไมโครเวฟในการสื่อสารจึงจำกัดเฉพาะในกรณีที่อุปกรณ์สำหรับส่งและรับสัญญาณไม่มีอาคาร ภูเขา หรือสิ่งใดมา กีดขวางหรือบดบังเส้นทางการเคลื่อนที่ของสัญญาณ ยกตัวอย่าง เช่น การส่งและรับสัญญาณระหว่างดาวเทียมกับจานรับสัญญาณดาวเทียม หรือระหว่างเสาส่งและรับสัญญาณที่อยู่บนที่สูง ดังรูป 18.28

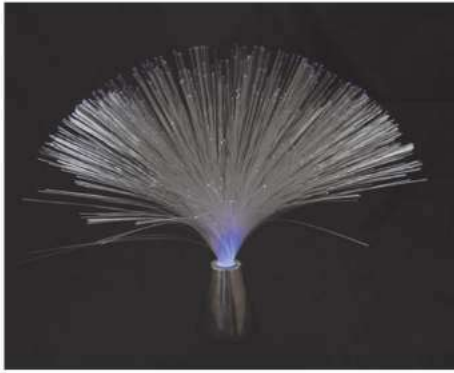


รูป 18.28 การส่งและรับสัญญาณดาวเทียมโดยใช้ไมโครเวฟ



### 18.5.3 การสื่อสารโดยอาศัยแสง

นอกจากคลื่นวิทยุและไมโครเวฟแล้ว แสงยังสามารถนำมาใช้ในการสื่อสารได้เช่นกัน แต่เนื่องจากแสงไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านวัตถุทึบแสงได้ และได้รับผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมได้ง่าย จึงต้องมีการใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างระบบส่งกับระบบรับสัญญาณโดยตรง โดยอุปกรณ์ที่ใช้อย่างแพร่หลายคือ เส้นใยนำแสง (optical fiber) ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นใยขนาดเล็ก สามารถนำแสงให้เคลื่อนที่ไปตามสายที่โค้งงอได้และสามารถส่งข้อมูลได้จำนวนมากในระยะเวลาสั้น ๆ ดังรูป 18.29



ก. การนำแสงของเส้นใยนำแสง



ข. รูปจำลองเส้นใยนำแสงในสายเคเบิลที่ใช้ในการส่งสัญญาณ

รูป 18.29 เส้นใยนำแสง

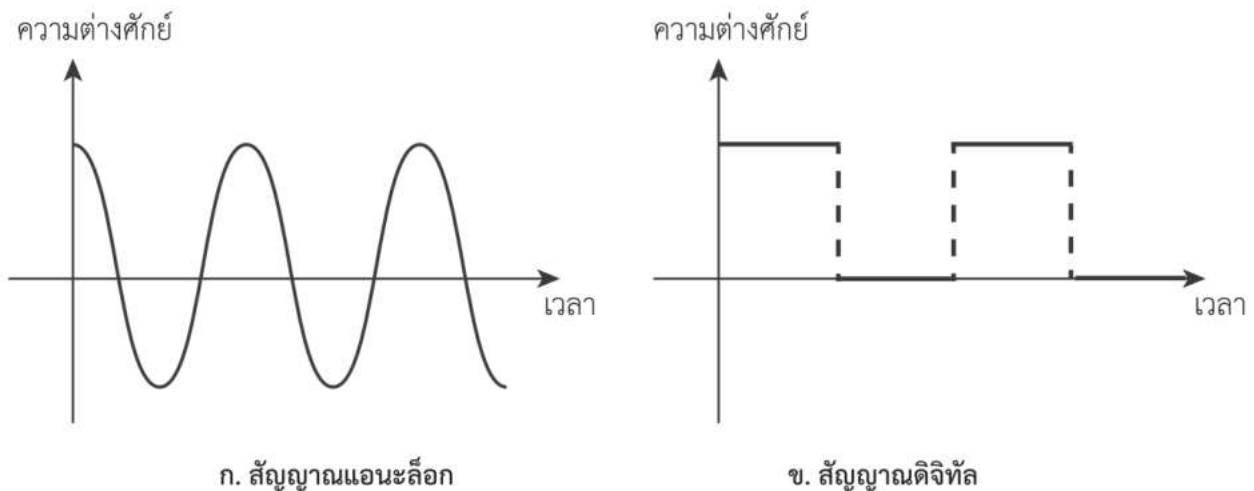


#### ความรู้เพิ่มเติม

การสื่อสารโดยอาศัยแสงผ่านเส้นใยนำแสงส่วนใหญ่เป็นการสื่อสารในระยะทางไกล ๆ ส่วนการสื่อสารระยะทางไกลผ่านเส้นใยนำแสงจะใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงรังสีอินฟราเรด เนื่องจากรังสีอินฟราเรดสูญเสียพลังงานระหว่างการเดินทางภายในเส้นใยนำแสงน้อยกว่า จึงสามารถใช้สื่อสารในระยะทางไกลได้ดีกว่า

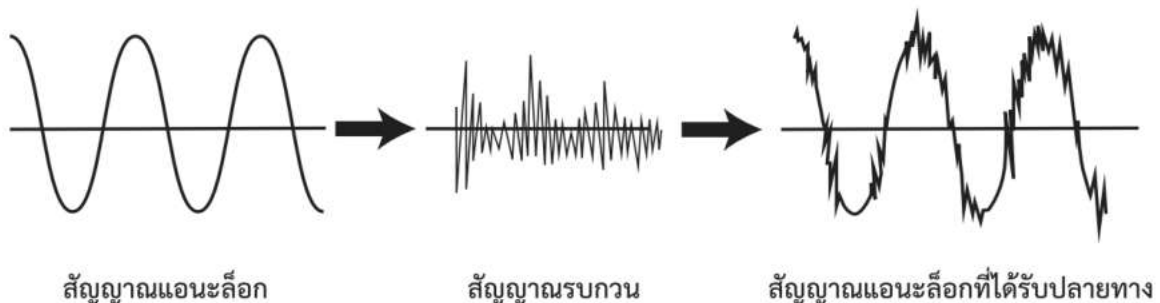
### 18.5.4 สัญญาณแอนะล็อกและสัญญาณดิจิทัล

สัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารมี 2 ชนิดคือ สัญญาณแอนะล็อก (analog signal) และสัญญาณดิจิทัล (digital signal) โดยสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณที่มีค่าต่าง ๆ ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามเวลา ยกตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ของสัญญาณแอนะล็อก ดังรูป 18.30 ก. ส่วนสัญญาณดิจิทัล เป็นสัญญาณที่มีค่าต่าง ๆ ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงเพียงสองสถานะ เช่น มีหรือไม่มี เปิดหรือปิด ยกตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ของสัญญาณดิจิทัล ดังรูป 18.30 ข.



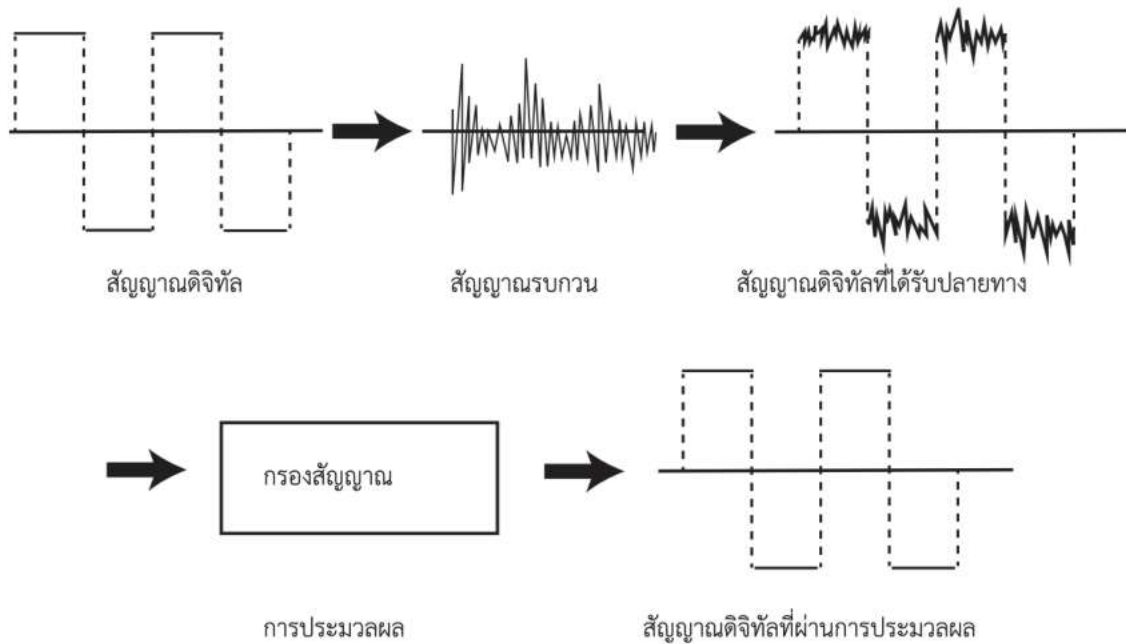
รูป 18.30 กราฟระหว่างความต่างศักย์ของสัญญาณไฟฟ้ากับเวลา

ในอดีต ช่วงก่อนที่จะมีการแพร่หลายของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และโทรศัพท์เคลื่อนที่ การสื่อสารส่วนใหญ่เป็นการใช้สัญญาณแอนะล็อก ยกตัวอย่างเช่น การกระจายสัญญาณเสียงของสถานีวิทยุ หรือ การกระจายสัญญาณภาพและเสียงของสถานีโทรทัศน์ในอดีต ซึ่งสามารถใช้ในการสื่อสารได้ดีในระดับหนึ่ง แต่การสื่อสารด้วยสัญญาณแอนะล็อกมักจะมีปัญหาความผิดพลาดของข้อมูลหรือสารสนเทศที่ได้รับปลายทาง เมื่อเกิดการรบกวนจากสิ่งแวดล้อม เช่น เมื่อมีฝนตกฟ้าคะนอง หรือ เมื่อมีเครื่องจักรทำงานในบริเวณใกล้เคียง ตัวอย่างของสัญญาณแอนะล็อกเมื่อมีสัญญาณรบกวนมีลักษณะดังรูป 18.31



รูป 18.31 ตัวอย่างของลักษณะสัญญาณแอนะล็อกที่ได้รับสัญญาณรบกวน

เนื่องจาก สัญญาณดิจิทัลมีค่าเพียงสองค่าเท่านั้น ถึงแม้จะมีการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมบ้าง แต่การแปลงสัญญาณกลับมา จะสามารถแยกแยะสัญญาณดิจิทัลออกมาได้ง่าย ทำให้ข้อมูลหรือสารสนเทศที่ส่งมา เหมือนกับต้นฉบับ ตัวอย่างลักษณะของสัญญาณดิจิทัลที่ได้รับปลายทางเมื่อมีสัญญาณรบกวนแสดง ดังรูป 18.32



รูป 18.32 ตัวอย่างของลักษณะสัญญาณดิจิทัลที่ได้รับสัญญาณรบกวนและผ่านการประมวลผล

ด้วยสาเหตุนี้ โทรทัศน์ที่รับสัญญาณดิจิทัลจึงให้ภาพและเสียงที่มีความคมชัดมากกว่าโทรทัศน์ที่รับสัญญาณแอนะล็อก นอกจากนี้ การสื่อสารด้วยสัญญาณดิจิทัลยังมีข้อได้เปรียบอีกหลายอย่าง เช่น ข้อมูลที่ได้จากสัญญาณดิจิทัลสามารถนำมาจัดเก็บได้อย่างสะดวก ง่ายต่อการเข้าถึง และสามารถนำไปประมวลผล ปรับปรุงแก้ไขได้ง่ายหลากหลายแนวทาง โดยที่ข้อมูลยังมีลักษณะเหมือนกับต้นฉบับที่ส่งมาจากต้นทาง

จากข้อได้เปรียบดังกล่าว การสื่อสารด้วยสัญญาณดิจิทัลจึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ทำให้ระบบ อุปกรณ์ และ แนวทางการดำเนินการต่าง ๆ ในปัจจุบันส่วนใหญ่ ได้มีการเปลี่ยนมาใช้เทคโนโลยีดิจิทัล ส่งผลกับวิถีการดำรงชีวิตของผู้คนอย่างมาก จนกระทั่งได้มีการเรียกช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงมาใช้เทคโนโลยีดิจิทัลดังกล่าวว่า **การปฏิวัติดิจิทัล (digital revolution)** ซึ่งได้รับการคาดการณ์ว่าจะส่งผลกับการขับเคลื่อนเศรษฐกิจ สังคม การศึกษา และด้านอื่น ๆ อีกมากในอนาคต



### คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 18.5

1. ในการสื่อสารโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ก่อนที่สัญญาณไฟฟ้าของข้อมูลจะถูกส่งออกจากผู้ส่งไปยังผู้รับ จะต้องผ่านกระบวนการใดก่อน
2. การฝากสัญญาณเสียงไปกับคลื่นในระบบวิทยุแบบเอฟเอ็ม คลื่นวิทยุที่ได้จะมีลักษณะอย่างไร
3. สัญญาณดิจิทัลแตกต่างจากสัญญาณแอนะล็อกอย่างไร



### สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

#### 18.1 การเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากการเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่องระหว่างสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ประกอบด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยทั้งสองสนามตั้งฉากกันและตั้งฉากกับทิศของความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง สามารถแผ่ออกไปได้ในสุญญากาศ ด้วยอัตราเร็วเท่ากับอัตราเร็วแสงหรือประมาณ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาทีและมีอัตราเร็วลดลงขึ้นกับตัวกลางและชนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
- เมื่อต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเข้ากับสายอากาศและทำให้ อิเล็กตรอนในสายอากาศจะเคลื่อนที่กลับไปมาด้วยความเร่ง ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกรอบสายอากาศทุกทิศทาง ยกเว้นในแนวเส้นตรงเดียวกับสายอากาศ

#### 18.2 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความถี่ต่าง ๆ มากมายต่อเนื่องกันเป็นช่วงกว้างหลายช่วง เรียกรวมกันว่า สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีหลายชนิด ได้แก่ คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ รังสีอินฟราเรด แสง รังสีอัลตราไวโอเล็ต รังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา ในปัจจุบันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ

### 18.3 โพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงกลับไปมาในระนาบเดียว เรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลักษณะนี้ว่า คลื่นโพลาไรส์เชิงเส้น
- แหล่งกำเนิดแสงทั่วไปในชีวิตประจำวัน เช่น ดวงอาทิตย์ หลอดไฟ จะมีสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงกลับไปมาอยู่ในหลายระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ แสงจากแหล่งกำเนิดแสงเหล่านี้จึงเป็นแสงไม่โพลาไรส์
- แสงไม่โพลาไรส์ เมื่อผ่านแผ่นโพลาไรซ์ สนามไฟฟ้าจะมีทิศทางอยู่ในระนาบเดียวกับแนวโพลาไรส์ของแผ่นโพลาไรซ์ แสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ออกมาจึงเป็นแสงโพลาไรส์เชิงเส้น สมบัติของแสงลักษณะนี้เรียกว่า โพลาริเซชัน

### 18.4 การประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

- เครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ใช้รังสีเอกซ์ ในการสร้างภาพตัดขวางอวัยวะภายในร่างกาย
- เครื่องควบคุมระยะไกลใช้รังสีอินฟราเรดหรือคลื่นวิทยุ ในการควบคุมการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้า
- เครื่องถ่ายภาพการสั่นพ้องแม่เหล็กใช้คลื่นวิทยุในการสร้างภาพสามมิติอวัยวะภายในร่างกาย

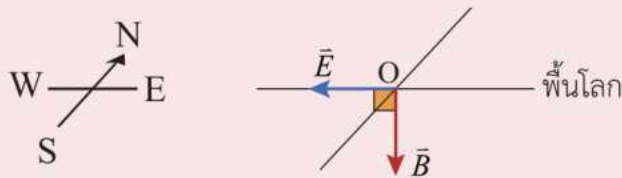
### 18.5 การสื่อสารโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

- การกระจายเสียงของสถานีวิทยุ การส่งและรับสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ รวมทั้งการส่งและรับสัญญาณ อาศัยคลื่นวิทยุ
- ไมโครเวฟและแสง ใช้สำหรับการส่งและรับสัญญาณดาวเทียม และการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงตามลำดับ
- สัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารมีสองชนิดคือสัญญาณแอนะล็อกและสัญญาณดิจิทัล
- สัญญาณแอนะล็อก เป็นสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบต่อเนื่องตามเวลา ส่วนสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงสองสถานะ เช่น มีหรือไม่มี เปิดหรือปิด โดยไม่มีค่าระหว่างสถานะทั้งสอง
- การส่งผ่านสารสนเทศด้วยสัญญาณดิจิทัลสามารถส่งผ่านได้โดยมีความผิดพลาดน้อยกว่าสัญญาณแอนะล็อก

## แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 18

## ?? | คำถาม

1. ใช้ลวดตัวนำต่อกับแบตเตอรี่และหลอดไฟจนครบวงจร ขณะกระแสไฟฟ้าสม่ำเสมอ ลวดตัวนำนี้ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้หรือไม่ เพราะเหตุใด
2. "คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิดมีอัตราเร็วเท่ากันในทุกตัวกลาง เท่ากับอัตราเร็วของแสง" คำกล่าวข้างต้นนี้ถูกต้องหรือไม่ จงอธิบาย
3. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขณะหนึ่ง ณ ตำแหน่ง O มีสนามไฟฟ้าขนานกับพื้นโลกชี้ไปทางทิศตะวันตก และสนามแม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นโลก ดังรูป



รูป ประกอบคำถามข้อ 3

แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้อยู่ทางทิศใดของตำแหน่ง O

4. การใช้ดาวเทียมสำรวจการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลก ต้องใช้เซนเซอร์หรือตัวรับรู้ที่ตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงใด เพราะเหตุใด
5. ดาวฤกษ์สีน้ำเงินกับดาวฤกษ์สีเหลือง ดาวฤกษ์ดวงใดมีอุณหภูมิสูงกว่ากัน
6. ระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดใดในการรับส่งสารสนเทศ เพราะเหตุใด

## F | ปัญหา

1. จงพิจารณาข้อความต่อไปนี้ ข้อใดไม่ถูกต้อง
  - ก. การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กทำให้เกิดสนามไฟฟ้า
  - ข. สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีเฟสต่างกัน 90 องศา
  - ค. สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากซึ่งกันและกัน และตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นด้วย
  - ง. ในตัวกลางเดียวกัน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกความถี่มีความเร็วเท่ากัน

2. แสงที่คนเรามองเห็นมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400 นาโนเมตร ถึง 700 นาโนเมตร จงหาช่วงความถี่ของแสงที่ตามองเห็น
3. ถ้าดวงจันทร์อยู่ห่างจากโลกเป็นระยะทาง 384 000 กิโลเมตร จงหาระยะเวลาที่แสงเคลื่อนที่จากดวงจันทร์ถึงโลก
4. แสงเคลื่อนที่จากดาวซิริอุสถึงโลกใช้เวลา 8.61 ปี จงหาระยะทางจากดาวซิริอุสถึงโลกในหน่วยกิโลเมตร
5. จงเรียงลำดับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อไปนี้ รังสีเอกซ์ อินฟราเรด ไมโครเวฟ วิทยุ รังสีอัลตราไวโอเล็ต ตามความถี่จากมากไปน้อย
6. รังสีเอกซ์กับรังสีแกมมามีข้อเหมือนกันและข้อที่แตกต่างกันอย่างไรบ้าง
7. เพราะเหตุใด โทรศัพท์ที่ใช้ระบบรับสัญญาณแบบดิจิทัล จึงให้ภาพและเสียงที่คมชัดกว่าโทรศัพท์ที่ใช้ระบบสัญญาณแอนะล็อก

บทที่



ipst.me/11068

## 19

ฟิสิกส์อะตอม



หลังจากนิวตันได้เสนอกฎการเคลื่อนที่ทั้งสามข้อซึ่งเป็นรากฐานของฟิสิกส์แบบฉบับ (classical physics) ในช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 17 นักฟิสิกส์จึงได้เข้าใจพฤติกรรมของวัตถุมากขึ้น และนำความรู้ดังกล่าวมาพัฒนาวิทยาการและเทคโนโลยีอย่างต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามฟิสิกส์แบบฉบับยังไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมบางอย่างของแสงและอนุภาคที่มีขนาดเล็กในระดับอะตอมได้อย่างถูกต้อง เช่น การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุดำ การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแก๊สร้อนที่แผ่ออกมาเฉพาะบางค่าความถี่ การอธิบายโครงสร้างและเสถียรภาพของอะตอมหรือการเกิดสวดลายการแทรกสอดของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านผลึกนิกเกิลการค้นพบองค์ความรู้และหลักการทางฟิสิกส์จึงได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่ออธิบายพฤติกรรมของอนุภาคดังกล่าว นำไปสู่การศึกษาฟิสิกส์อะตอม (atomic physics) จนกระทั่งได้มีการพัฒนาเป็นฟิสิกส์ควอนตัม (quantum physics) อย่างเป็นระบบตั้งแต่ช่วงต้นคริสต์ศตวรรษที่ 20 ทำให้นักฟิสิกส์เข้าใจพฤติกรรมของแสงและอนุภาคที่มีขนาดเล็กในระดับอะตอมมากขึ้น และนำมาสู่การพัฒนาวิทยาการและเทคโนโลยีสมัยใหม่อย่างรวดเร็ว รวมถึงการประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์แก่มนุษย์อย่างมากมาย เช่น การประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงมาก การประดิษฐ์เลเซอร์ในการตัดชิ้นงานโลหะด้วยความแม่นยำหรือการประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การค้นพบและหลักการด้านฟิสิกส์ควอนตัมมีที่มาจากอะไร เป็นอย่างไร และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อย่างไร เราจะศึกษาได้ในบทนี้





### คำถามสำคัญ

- พฤติกรรมของอนุภาคเล็ก ๆ ในระดับอะตอมต่างจากวัตถุขนาดใหญ่อย่างไร
- แนวคิดเกี่ยวกับควอนตัมของพลังงานทำให้เข้าใจปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกและอะตอมได้อย่างไร



### จุดประสงค์การเรียนรู้

#### 19.1 สมมติฐานของพลังค์ และทฤษฎีอะตอมของโบร์

1. อธิบายสมมติฐานของพลังค์
2. อธิบายทฤษฎีอะตอมของโบร์และการเกิดเส้นสเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจน
3. คำนวณรัศมีวงโคจรของอิเล็กตรอน พลังงานอะตอมของไฮโดรเจน และความยาวคลื่นของแสงในสเปกตรัมแบบเส้นตามทฤษฎีอะตอมของโบร์

#### 19.2 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

4. อธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก
5. อธิบายและคำนวณพลังงานโฟตอน พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน และฟังก์ชันงานของโลหะ

#### 19.3 ทวิภาวะของคลื่นและอนุภาค

6. อธิบายและคำนวณความยาวคลื่นเดอบรอยล์
7. อธิบายทวิภาวะของคลื่นและอนุภาค



### ความรู้ก่อนเรียน

การเคลื่อนที่แบบวงกลม กฎการอนุรักษ์พลังงาน กฎคูลอมบ์ ไฟฟ้าและแม่เหล็ก คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สเปกตรัมแสงของอะตอม แบบจำลองอะตอม

ความรู้ทางฟิสิกส์ที่นักเรียนได้ศึกษามาก่อนถึงบทนี้ จัดเป็นฟิสิกส์แบบฉบับ ที่มีพัฒนาการอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลานานก่อนคริสต์ศตวรรษที่ 20 โดยนักวิทยาศาสตร์ เช่น กาลิเลโอ นิวตัน ฮอยเกนส์ ยัง พาสคัล แอมแปร์ ฟาราเดย์ แมกซ์เวลล์ โบลตซ์มันน์ จำแนกเป็นสาขาต่าง ๆ ในวิชาฟิสิกส์ เช่น กลศาสตร์ ความร้อนและอุณหพลศาสตร์ ของแข็งและของไหล การสั่นและคลื่น ไฟฟ้าและแม่เหล็ก ความรู้ทางฟิสิกส์ ในสาขาต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้มนุษย์เข้าใจความเป็นไปในธรรมชาติมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อนักวิทยาศาสตร์ ศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ในระดับอะตอม (ระดับขนาดประมาณ 0.1 นาโนเมตร) กลับพบว่า ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมบางอย่างโดยอาศัยความรู้ทางฟิสิกส์แบบฉบับ นำไปสู่การคิดค้น หลักการหรือทฤษฎีใหม่ ๆ เพื่ออธิบายพฤติกรรมเหล่านั้นจนเกิดเป็นความรู้ทางฟิสิกส์แขนงใหม่ที่เรียกว่า ฟิสิกส์ควอนตัม เพื่ออธิบายพฤติกรรมของอนุภาคในระดับอะตอมหรือเล็กกว่าอะตอม ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

### 19.1 สมมติฐานของพลังค์และทฤษฎีอะตอมของโบร์

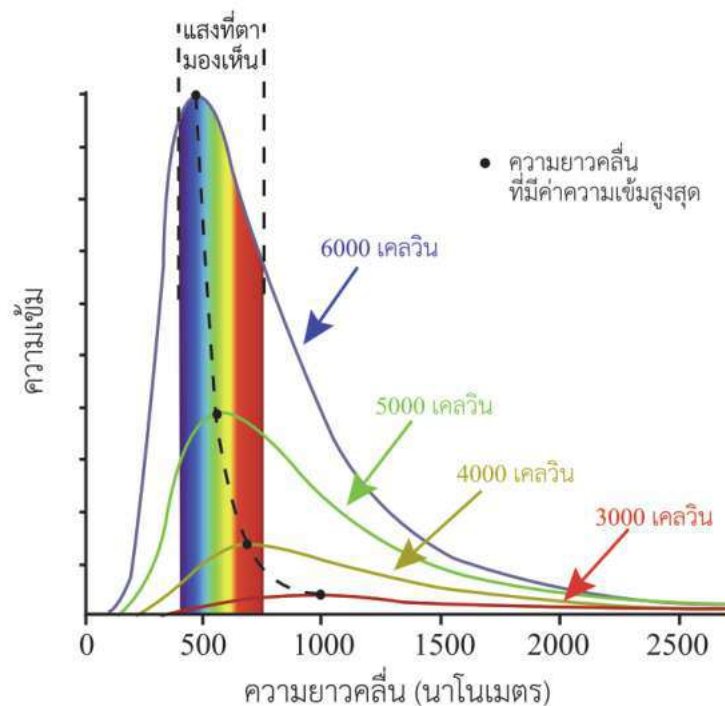
ในช่วงปลายคริสต์ศตวรรษที่ 19 ได้มีการศึกษาการแผ่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุ ซึ่งพบว่า อัตราการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุร้อนขึ้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสมบัติของผิววัตถุ โดยความรู้จากฟิสิกส์ แบบฉบับไม่สามารถอธิบายการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ได้ นักฟิสิกส์จึงได้นำเสนอสมมติฐานเพื่ออธิบายสิ่ง ที่เกิดขึ้นนี้ซึ่งเป็นรากฐานที่สำคัญของฟิสิกส์ควอนตัม และยังนำไปอธิบายสเปกตรัมของอะตอมของ แก๊สร้อนได้ ดังจะได้ศึกษาในหัวข้อนี้

#### 19.1.1 การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุดำ

วัตถุทุกชนิดมีอุณหภูมิสูงกว่า 0 เคลวิน รวมทั้งร่างกายของเราด้วย มีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เรียก การแผ่รังสีความร้อน (thermal radiation) เสมอ โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมามีความถี่ ต่อเนื่อง เรียกว่า สเปกตรัมต่อเนื่อง (continuous spectrum) และความยาวคลื่นที่มีความเข้มสูงสุด ( $\lambda_{\max}$ ) ขึ้นกับอุณหภูมิของวัตถุนั้น เช่น เมื่อเผาเหล็กให้ร้อน บริเวณที่เหล็กร้อนน้อยจะมีสีออกแดง บริเวณที่ร้อน มากขึ้น จะมีสีเหลือง สีส้ม และบริเวณที่ร้อนมาก ๆ จะมีสีขาว ซึ่งแสดงว่า บริเวณที่เหล็กร้อนน้อย จะ แผ่คลื่นแสงสีแดงออกมามากกว่าแสงสีอื่น บริเวณที่ร้อนมากขึ้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น เหล็กจะแผ่คลื่นแสงสีเหลือง สีส้ม มากกว่าแสงสีอื่น และบริเวณที่ร้อนมาก ๆ อุณหภูมิสูงมาก ๆ เหล็กจะแผ่คลื่นแสงทุกสีออกมาใน ปริมาณใกล้เคียงกัน จึงมีสีขาว ดังรูป 19.1 โดยความยาวคลื่นที่มีความเข้มสูงสุดขึ้นกับอุณหภูมิ ดังรูป 19.2



รูป 19.1 บริเวณที่เหล็กได้รับความร้อนต่างกัน จะเห็นเป็นสีต่างกัน



รูป 19.2 ความเข้มของสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากวัตถุที่มีอุณหภูมิต่าง ๆ

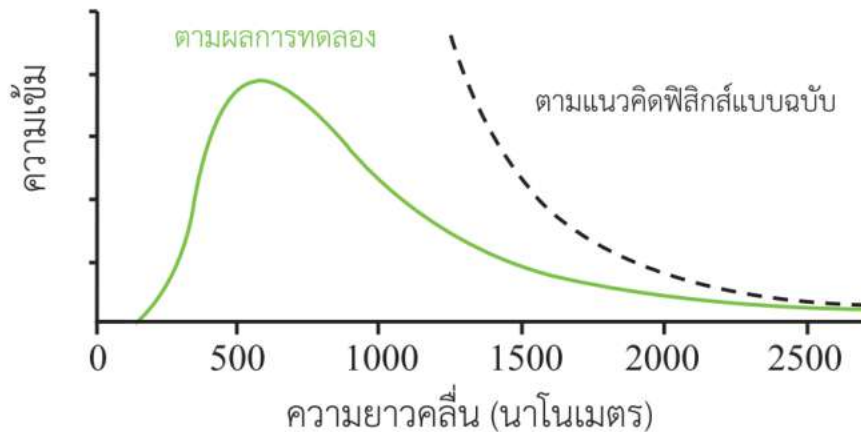
จากรูป 19.2 จะเห็นว่า วัตถุที่มีอุณหภูมิ 3000 เคลวินจะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงสุดในช่วงอินฟราเรด เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เช่น 5000 เคลวิน ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมามากที่สุดจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงแสงสีแดง และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นไปอีก เช่น 6000 เคลวิน ก็จะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงแสงที่ตามองเห็นออกมามาก และมีความเข้มสูงสุดอยู่ในช่วงแสงสีน้ำเงิน ทำให้มองเห็นวัตถุที่มีอุณหภูมินี้มีสีขาว



### ชวนคิด

ในวิชาศิลปะ เรามักบอกว่า สีโทนเย็นคือพวกสีฟ้า สีน้ำเงิน ส่วนสีโทนร้อนคือพวกสีส้ม สีแดง นักเรียนคิดว่า เปลวไฟจากแก๊สหุงต้มที่ใช้ตามครัวเรือน ส่วนของเปลวไฟที่เป็นสีฟ้าน้ำเงิน หรือ ส่วนที่เป็นสีส้มแดง ส่วนใดจะร้อนมากกว่ากัน

ทฤษฎีจากฟิสิกส์แบบฉบับทำนายว่า ยิ่งวัตถุมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากเท่าใด ก็จะมีแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นสั้นออกมาเท่านั้น ดังรูป 19.3 ซึ่งแตกต่างอย่างสิ้นเชิงกับผลการทดลองในรูป 19.2 ที่ทุกอุณหภูมิจะมีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นออกมามาก ๆ จากปัญหานี้ไม่สามารถใช้แนวคิดฟิสิกส์แบบฉบับอธิบายการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุร้อนได้ นักฟิสิกส์จำเป็นต้องมองหาหรือคิดค้นแนวคิดหรือหลักการใหม่เพื่ออธิบายผลการทดลองเหล่านี้



รูป 19.3 ความเข้มของสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากวัตถุที่อุณหภูมิหนึ่งตามแนวคิดฟิสิกส์แบบฉบับกับตามผลการทดลอง

หนึ่งในนักฟิสิกส์ที่พยายามไขปัญหาดังกล่าวคือ มักซ์ พลังค์ (Max Planck) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน พลังค์ได้เสนอสมมติฐานเกี่ยวกับการแผ่รังสีของวัตถุดำ (blackbody radiation) ซึ่งไม่ได้หมายถึงวัตถุที่มีสีดำ แต่หมายถึงวัตถุในอุดมคติที่มีการดูดกลืนและแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ เพื่ออธิบายการแผ่รังสีของวัตถุทั่วไปที่มีสเปกตรัมการแผ่รังสีคล้ายกับรูป 19.2

**สมมติฐานของพลังค์ (Planck's hypothesis)** สรุปได้ว่า พลังงานที่วัตถุดำดูดกลืนหรือแผ่ออกมามีค่าได้เฉพาะบางค่าเท่านั้น และค่านี้จะเป็นจำนวนเต็มเท่าของ  $\varepsilon$  ซึ่งเท่ากับ  $hf$  เรียกว่า **ควอนตัมของพลังงาน (quantum of energy)** โดย  $f$  เป็นความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นั่นคือ พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดูดกลืนหรือแผ่ออกมา จะมีค่าตามสมการ

$$E = n\varepsilon$$

จาก  $\varepsilon = hf$  จะได้

$$E = nhf \quad (19.1)$$

โดย  $h$  คือ **ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant)** มีค่าประมาณ  $6.626 \times 10^{-34}$  จูล วินาที  $n$  คือ จำนวนควอนตัมของพลังงาน ซึ่งเป็นจำนวนเต็มบวก เรียกว่า **เลขควอนตัม (quantum number)** มีค่าเท่ากับ 1,2,3,...



### ข้อสังเกต

แนวคิดเกี่ยวกับควอนตัมของพลังงานนั้นเป็นแนวคิดใหม่ ในฟิสิกส์แบบฉบับอนุภาคจะดูดกลืนหรือปลดปล่อยพลังงานที่มีค่าต่อเนื่องเท่าใดก็ได้ แต่ในฟิสิกส์ควอนตัมอนุภาคภายในอะตอมสามารถดูดกลืนหรือปลดปล่อยพลังงานที่มีค่าเฉพาะบางค่าเท่านั้น เพื่อความเข้าใจใจอาจลองเปรียบเทียบกับการซื้อขายข้าวสาร ร้านค้าแบบดั้งเดิมในตลาดสด นักเรียนสามารถซื้อข้าวสารแบบตักแบ่งขาย จะซื้อเท่าใดก็ได้ เช่น นักเรียนอาจซื้อ 2.5 กิโลกรัม หรือ 2.8 กิโลกรัม แต่ถ้านักเรียนไปซื้อในร้านค้าที่ขายข้าวสารเป็นถุง ๆ เช่น ถุงละ 5 กิโลกรัม นักเรียนไม่สามารถซื้อในปริมาณเท่าใดก็ได้ที่อยากซื้อ แต่ถูกบังคับว่าต้องซื้อไปเป็นถุง ๆ เท่านั้น จะซื้อครึ่งถุง แปะในลิบ ส่วนของถุง หรือถุงครึ่ง ไม่ได้ ถ้าซื้อก็ต้องซื้อเป็นจำนวนถุง หรือไม่ซื้อเลย

อนุภาคภายในอะตอมในระบบควอนตัมก็เช่นกัน จะถูกบังคับให้ดูดกลืนหรือปลดปล่อยพลังงานเป็น "ถุง ๆ" เท่านั้น เช่น วัตถุดำสามารถดูดกลืนพลังงานเป็นควอนตัม (คือ แบบไม่ต่อเนื่อง หรือมีค่าเป็น "ถุง ๆ") โดยแต่ละควอนตัมของพลังงานมีค่าเท่ากับ  $hf$  (หรือแต่ละ "ถุง" มีค่า  $hf$  นั่นเอง)

**ตัวอย่าง 19.1** จงหาควอนตัมของพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่  $6.50 \times 10^{14}$  เฮิร์ตซ์

**แนวคิด** หาควอนตัมของพลังงานจาก  $\epsilon = hf$

**วิธีทำ** จาก  $\epsilon = hf$

แทนค่า  $h = 6.626 \times 10^{-34}$  J s และ  $f = 6.50 \times 10^{14}$  Hz จะได้

$$\begin{aligned}\epsilon &= (6.626 \times 10^{-34} \text{ J s})(6.50 \times 10^{14} \text{ Hz}) \\ &= 4.3069 \times 10^{-19} \text{ J}\end{aligned}$$

**ตอบ** ควอนตัมของพลังงานเท่ากับ  $4.31 \times 10^{-19}$  จูล

ในการศึกษาฟิสิกส์ระดับอะตอมหรือที่เล็กกว่า นิยมระบุพลังงานในหน่วย **อิเล็กตรอนโวลต์** (electron volt; eV) ด้วย โดยอนุภาคที่มีพลังงาน 1 อิเล็กตรอนโวลต์ มีค่าเท่ากับพลังงานของอิเล็กตรอนหรือโปรตอน (ขนาดประจุไฟฟ้า  $1.60 \times 10^{-19}$  คูลอมบ์) ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเร่งด้วยความต่างศักย์ 1 โวลต์ โดยที่ 1 อิเล็กตรอนโวลต์ มีค่าเท่ากับ  $1.60 \times 10^{-19}$  จูล เช่น ในกรณีตัวอย่าง 19.1 เมื่อคิดพลังงานในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ จะมีค่าเท่ากับ 2.69 อิเล็กตรอนโวลต์

**ตัวอย่าง 19.2** แสงมีควอนตัมของพลังงาน 2.5 อิเล็กตรอนโวลต์ มีความถี่เท่าใด

**แนวคิด** หาความถี่ของแสงจากจากหนึ่งควอนตัมของพลังงานจาก  $\epsilon = hf$

**วิธีทำ** จาก  $\epsilon = hf$

แทนค่า  $h = 6.626 \times 10^{-34}$  J s และ  $\epsilon = 2.5 \times 1.6 \times 10^{-19}$  J

$$\begin{aligned}\text{จะได้ } 2.5 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} &= (6.626 \times 10^{-34} \text{ J s})f \\ f &= 6.04 \times 10^{14} \text{ Hz}\end{aligned}$$

**ตอบ** แสงมีความถี่เท่ากับ  $6.04 \times 10^{14}$  เฮิร์ตซ์

**ตัวอย่าง 19.3** แสงความถี่หนึ่งมีพลังงานต่ำที่สุด เท่ากับ  $21.76 \times 10^{-19}$  จูล จงหาพลังงานของแสงเมื่อมีจำนวนควอนตัมเป็น 2 และ 3

**แนวคิด** พลังงานต่ำสุดของแสงความถี่หนึ่งคือพลังงานหนึ่งควอนตัม  $\varepsilon = hf$  และหาพลังงานของแสงเมื่อมีจำนวนควอนตัมของพลังงานเป็น 2 และ 3 ได้แก่  $E = n\varepsilon$  เมื่อ  $n = 2$  และ  $n = 3$

**วิธีทำ** จาก  $\varepsilon = 21.76 \times 10^{-19}$  J

หาพลังงานของแสงจาก  $E = n\varepsilon$

เมื่อ  $n = 2$  จะได้

$$\begin{aligned} E_2 &= (2)(21.76 \times 10^{-19} \text{ J}) \\ &= 43.52 \times 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

เมื่อ  $n = 3$  จะได้

$$\begin{aligned} E_3 &= (3)(21.76 \times 10^{-19} \text{ J}) \\ &= 65.28 \times 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

**ตอบ** พลังงานของแสงเมื่อมีจำนวนควอนตัมเป็น 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ  $43.52 \times 10^{-19}$  จูล และ  $65.28 \times 10^{-19}$  จูล ตามลำดับ



### ความรู้เพิ่มเติม

มักซ์ คาร์ล แอนสท์ ลุดวิก พลังค์ (Max Karl Ernst Ludwig Planck ค.ศ. 1858 - 1947 หรือ พ.ศ. 2401 – 2490) หรือ มักซ์ พลังค์ นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันเป็นผู้นำเสนอแนวความคิดเกี่ยวกับควอนตัมของพลังงานมาใช้อธิบายการแผ่รังสีของวัตถุดำต่อมาไอน์สไตน์นำความคิดของพลังค์ไปอธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก และโบร์นำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองอะตอมของไฮโดรเจน พลังค์ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ใน พ.ศ. 2461 จากแนวคิดเรื่องควอนตัมของพลังงาน



รูป พลังค์

สมมติฐานของพลังค์มิใช่เป็นเพียงแนวทางเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการแก้ปัญหาการแผ่รังสีของวัตถุดำ แต่เป็นแนวคิดพื้นฐานสำหรับฟิสิกส์ในระดับอะตอมหรืออนุภาคที่เล็กกว่าอะตอม นอกจากนี้ค่าคงตัวของพลังค์ยังเป็นหนึ่งในค่าคงตัวสากลในวิชาฟิสิกส์ที่มีความสำคัญเช่นเดียวกับค่าคงตัวโน้มถ่วงสากล  $G$  และค่าคงตัวโบลตซ์มันน์  $k_B$

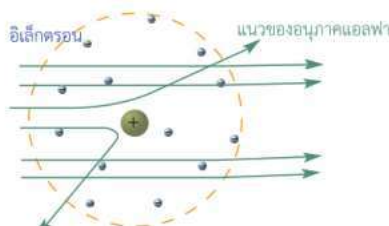
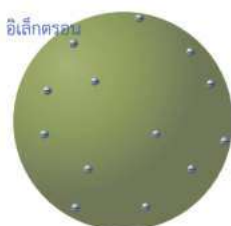
สมมติฐานของพลังค์นำไปใช้อธิบายปรากฏการณ์เกี่ยวกับฟิสิกส์ควอนตัมอะไรบ้าง จะได้ศึกษาในหัวข้อต่อไปนี้

### 19.1.2 ทฤษฎีอะตอมของโบร์

ในวิชาเคมี นักเรียนได้ทราบว่า หน่วยย่อยที่สุดของสสารที่แสดงสมบัติทางเคมีเฉพาะตัวคืออะตอมของธาตุ โดยธาตุแต่ละชนิดประกอบขึ้นจากอะตอมชนิดเดียวกัน อะตอมของธาตุต่างชนิดกันมีสมบัติต่างกัน เช่น อะตอมของไฮโดรเจนมีสมบัติไม่เหมือนกับอะตอมของออกซิเจน ถ้าอะตอมเป็นหน่วยที่ย่อยที่สุดของสสารอะตอมของธาตุทุกชนิดควรที่จะต้องเหมือนกัน การที่อะตอมของธาตุแต่ละชนิดแตกต่างกันย่อมแสดงให้เห็นว่าอะตอมยังไม่ใช่หน่วยที่เล็กที่สุดของสสาร อะตอมน่าจะต้องประกอบขึ้นจาก "อะไร" ที่เป็นมูลฐานกว่าหรือที่เล็กกว่าอะตอม

ในปี พ.ศ. 2440 ทอมสัน (J. J. Thomson) ได้ทำการทดลองพบว่า **รังสีแคโทด** (cathode ray) ประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบ ซึ่งเป็นอนุภาคชนิดเดียวกันกับที่เป็นพาหะนำไฟฟ้าที่เรียกว่าอิเล็กตรอน และเสนอแบบจำลองอะตอมที่ว่า อะตอมมีลักษณะเป็นทรงกลมตันเนื้อเดียวมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า อะตอมของธาตุทุกชนิดประกอบด้วยส่วนที่เป็นเนื้อทรงกลมเป็นประจุบวก และมีอิเล็กตรอนกระจายตัวอยู่ในเนื้อทรงกลมดังรูป 19.4 ก.

ต่อมาในปี พ.ศ. 2454 รัทเทอร์ฟอร์ดสรุปผลการทดลองของไกเกอร์ (Geiger) และมาร์สเดน (Marsden) ซึ่งทำการทดลองโดยปล่อยอนุภาคแอลฟา (alpha particle) ให้ตกกระทบแผ่นทองคำบาง ๆ ผลการทดลองพบว่าอนุภาคแอลฟาส่วนใหญ่ผ่านไปตรง ๆ และอนุภาคแอลฟาบางตัวเบนไปจากแนวเดิม ดังรูป 19.4 ข. แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองอะตอมของทอมสันไม่ถูกต้อง และได้เสนอแบบจำลองอะตอมซึ่งประกอบด้วยนิวเคลียสและอิเล็กตรอน โดยนิวเคลียสประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวกรวมกันอยู่บริเวณใจกลางอะตอมมีรัศมีประมาณ  $10^{-15} - 10^{-14}$  เมตร และมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่รอบ ๆ นิวเคลียส โดยอะตอมมีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีรัศมีประมาณ  $10^{-10}$  เมตร ดังรูป 19.4 ค.



ก. แบบจำลองอะตอมของทอมสัน ข. แนวคิดนิวเคลียสของรัทเทอร์ฟอร์ด ค. แบบจำลองอะตอมของรัทเทอร์ฟอร์ด  
รูป 19.4 แบบจำลองอะตอมของทอมสัน แนวคิดนิวเคลียสและแบบจำลองอะตอมของรัทเทอร์ฟอร์ด





### กิจกรรมลองทำดู การเปรียบเทียบลักษณะการกระเจิงของอนุภาคแอลฟา

#### จุดประสงค์

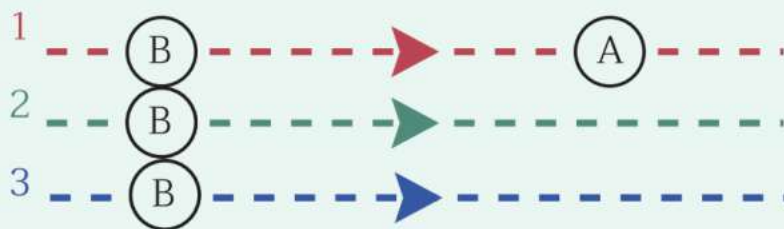
1. ศึกษาการกระเจิงของอนุภาคแอลฟา

#### วัสดุและอุปกรณ์

- |                               |       |
|-------------------------------|-------|
| 1. แม่เหล็กแผ่นกลมขนาดเท่ากัน | 5 อัน |
| 2. ภาดลดแรงเสียดทาน           | 1 ภาด |
| 3. เม็ดพลาสติก                | 1 ถู  |

#### วิธีทำกิจกรรม

1. ใช้แม่เหล็กแผ่นกลมขนาดเท่ากันซ้อนกัน 4 อัน วางบนภาดลดแรงเสียดทาน เรียกแม่เหล็กนี้ว่า แม่เหล็ก A
2. โรยเม็ดพลาสติกลงบนภาดรอบแม่เหล็ก A แล้วเกลี่ยให้สม่ำเสมอ
3. วางแม่เหล็กอีกอันหนึ่งบนเม็ดพลาสติกโดยวางให้มีขั้วแม่เหล็กอยู่ในลักษณะเดียวกันกับแม่เหล็ก A จนเกิดแรงผลักระหว่างกัน เรียกแม่เหล็กอันที่สองนี้ว่า แม่เหล็ก B
4. กำหนดแนวที่ให้แม่เหล็ก B เคลื่อนที่เข้าหาแม่เหล็ก A ตามแนว 1 2 และ 3 ดังรูป



รูป การเคลื่อนที่ของแม่เหล็ก B ก่อนเคลื่อนที่เข้าใกล้แม่เหล็ก A

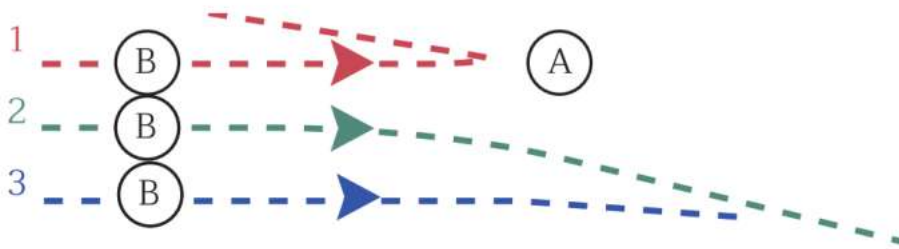
5. ผลักแม่เหล็ก B เข้าหาแม่เหล็ก A ในแนวที่ 1 จำนวน 3 ครั้ง โดยใช้แรงเท่าเดิม และสังเกตแนวการเคลื่อนที่ของแม่เหล็ก B
6. ทำซ้ำข้อ 5 โดยเปลี่ยนเป็นแนวที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



### คำถามท้ายกิจกรรม

- การเคลื่อนที่ของแม่เหล็ก B เป็นอย่างไร ขณะเคลื่อนที่เข้าหาแม่เหล็ก A ในแต่ละแนว

จากกิจกรรมเมื่อผลึกแม่เหล็ก B บนถาดลดแรงเสียดทาน ให้เคลื่อนที่เข้าหาแม่เหล็ก A ตามแนวต่าง ๆ จะมีลักษณะการเคลื่อนที่ดังรูป 19.5



รูป 19.5 การเคลื่อนที่ของแม่เหล็ก B เมื่อเคลื่อนที่เข้าใกล้แม่เหล็ก A ตามแนวต่าง ๆ

จากรูปพบว่าเมื่อผลึกแม่เหล็ก B เคลื่อนเข้าหาแม่เหล็ก A ตามแนวที่ 1 แม่เหล็ก B มีแนวการเคลื่อนที่ย้อนกลับในแนวเดิมหรือย้อนกลับเบนออกจากแนวเดิม

เมื่อผลึกแม่เหล็ก B เคลื่อนเข้าหาแม่เหล็ก A ตามแนวที่ 2 แม่เหล็ก B ไม่ย้อนกลับทางเดิม แต่เคลื่อนที่เบนออกจากแนวเดิมน้อยกว่าแนวการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 1

เมื่อผลึกแม่เหล็ก B เคลื่อนเข้าหาแม่เหล็ก A ตามแนวที่ 3 แม่เหล็ก B ไม่ย้อนกลับทางเดิม แต่เคลื่อนที่เบนออกจากแนวเดิมน้อยที่สุด

กิจกรรมนี้สามารถอธิบายเปรียบเทียบกับ การเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟาเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปในอะตอมของทองคำ ตามการทดลองไกเกอร์และมาร์สเดนได้ดังนี้

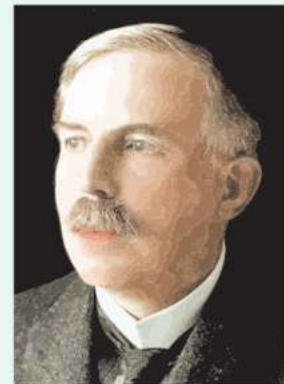
1. แม่เหล็ก A เปรียบเสมือนนิวเคลียสของทองคำ และแม่เหล็ก B เปรียบเสมือนอนุภาคแอลฟา
2. แม่เหล็ก B และแม่เหล็ก A ที่ถูกวางให้มีขั้วแม่เหล็กอยู่ในลักษณะผลักรัน เช่นเดียวกับอนุภาคแอลฟาและนิวเคลียสที่มีประจุไฟฟ้าบวกผลักรัน
3. แรงผลักระหว่างแม่เหล็ก B และแม่เหล็ก A ทำให้แม่เหล็ก B เบนออกจากแนวเดิมเปรียบเสมือนแรงผลักระหว่างอนุภาคแอลฟาและนิวเคลียสที่ทำให้อนุภาคแอลฟาเบนออกจากแนวเดิมเมื่อเคลื่อนที่เข้าหานิวเคลียส

4. แม่เหล็ก B ที่มีแนวการเคลื่อนที่เดิมอยู่ใกล้กับแม่เหล็ก A จะได้รับผลจากแรงผลักมากกว่าแม่เหล็ก B ที่มีแนวการเคลื่อนที่เดิมอยู่ไกลจากแม่เหล็ก A เปรียบเสมือนกับอนุภาคแอลฟาที่มีแนวการเคลื่อนที่เดิมใกล้กับนิวเคลียสมากกว่า จะได้รับผลจากแรงผลักทางไฟฟ้ามากกว่า ทำให้แนวการเคลื่อนที่เบนออกจากแนวเดิมมากกว่า อนุภาคแอลฟาที่มีแนวการเคลื่อนที่เดิมไกลจากนิวเคลียส



### ความรู้เพิ่มเติม

เออร์เนสต์ รัทเทอร์ฟอร์ด (Ernest Rutherford ค.ศ. 1871-1937 หรือ พ.ศ. 2414 – 2480) นักฟิสิกส์ชาวนิวซีแลนด์ ได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมีใน พ.ศ. 2451 ผลงานที่สำคัญคือ การทดลองเกี่ยวกับการค้นพบนิวเคลียสของอะตอมและการทดลองเกี่ยวกับกัมมันตภาพรังสี



รูป รัทเทอร์ฟอร์ด

แม้แบบจำลองอะตอมของรัทเทอร์ฟอร์ดสามารถอธิบายผลการทดลองของไกเกอร์และมาร์สเดนได้ แต่ก็ทำให้เกิดคำถามเกี่ยวกับเสถียรภาพของอะตอม หากอะตอมเป็นไปตามแบบจำลองของรัทเทอร์ฟอร์ด เพราะตามแนวคิดฟิสิกส์แบบฉบับอิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานอย่างต่อเนื่องขณะเคลื่อนที่รอบนิวเคลียส โดยพลังงานที่สูญเสียไปจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้รัศมีของวงโคจรลดลงอย่างต่อเนื่อง จนในที่สุดอิเล็กตรอนก็จะถูกดึงดูดเข้าไปรวมกับนิวเคลียส อะตอมตามแบบจำลองอะตอมของรัทเทอร์ฟอร์ดจึงไม่เสถียร จะไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงที่อะตอมมีความเสถียร มิเช่นนั้นเอกภพก็คงจะมีแต่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ไร้ซึ่งสสารทั้งปวง รวมทั้งมนุษย์ด้วยเช่นกัน

นอกจากปัญหาเรื่องความไม่เสถียรของอะตอมตามแบบจำลองอะตอมของรัทเทอร์ฟอร์ด อีกปัญหาหนึ่งของแบบจำลองของรัทเทอร์ฟอร์ดคือไม่สามารถอธิบายการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแก๊สร้อนที่แผ่ออกมาเฉพาะบางค่าความถี่ และยังพบว่าแก๊สแต่ละชนิดจะมีชุดสเปกตรัมที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจจะศึกษาได้จากกิจกรรมลองทำดู การศึกษาสเปกตรัมของแก๊สร้อน



### กิจกรรม 19.1 การศึกษาสเปกตรัมของแก๊สร้อน

#### จุดประสงค์

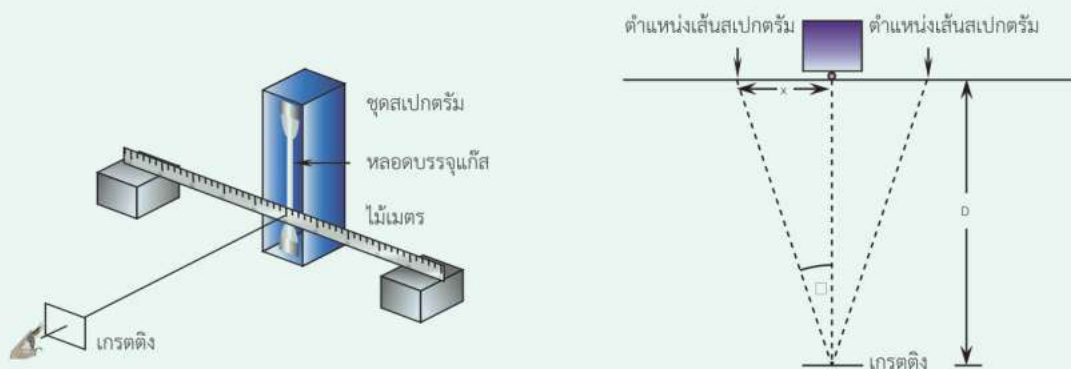
1. ศึกษาสเปกตรัมที่เกิดจากแก๊สร้อน

#### วัสดุและอุปกรณ์

- |  |           |
|--|-----------|
| 1. ชุดสเปกตรัม                               | 1 เครื่อง |
| 2. หลอดบรรจุแก๊สไฮโดรเจน                     | 1 หลอด    |
| 3. หลอดบรรจุแก๊สฮีเลียม                      | 1 หลอด    |
| 4. เกรตติง (อย่างน้อย 5300 เส้นต่อเซนติเมตร) | 1 อัน     |
| 5. ไม้เมตร                                   | 1 อัน     |

#### วิธีทำกิจกรรม

1. สังเกตสเปกตรัม โดยมองแสงจากหลอดไฟฟ้าผ่านเกรตติง
2. เสียบหลอดบรรจุแก๊สไฮโดรเจนเข้าที่เสียบของชุดสเปกตรัม
3. วางไม้เมตรไว้ข้างหน้าหลอดบรรจุแก๊ส โดยจัดให้ไม้เมตรอยู่ในแนวระดับและขีดกึ่งกลางไม้เมตรอยู่ตรงกับหลอดบรรจุแก๊ส ดังรูป



รูป การจัดกิจกรรมการศึกษาสเปกตรัมของแก๊สร้อน

4. วัดระยะตั้งฉาก  $D$  จากไม้เมตรให้ห่างออกมาประมาณ 1 เมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้มองผ่านเกรตติง
5. เปิดสวิตช์ชุดสเปกตรัมแล้วมองแสงจากหลอดบรรจุแก๊สผ่านเกรตติงจัดระนาบของเกรตติงให้เห็นเส้นสเปกตรัมปรากฏชัดที่ทั้งสองข้างของไม้เมตร

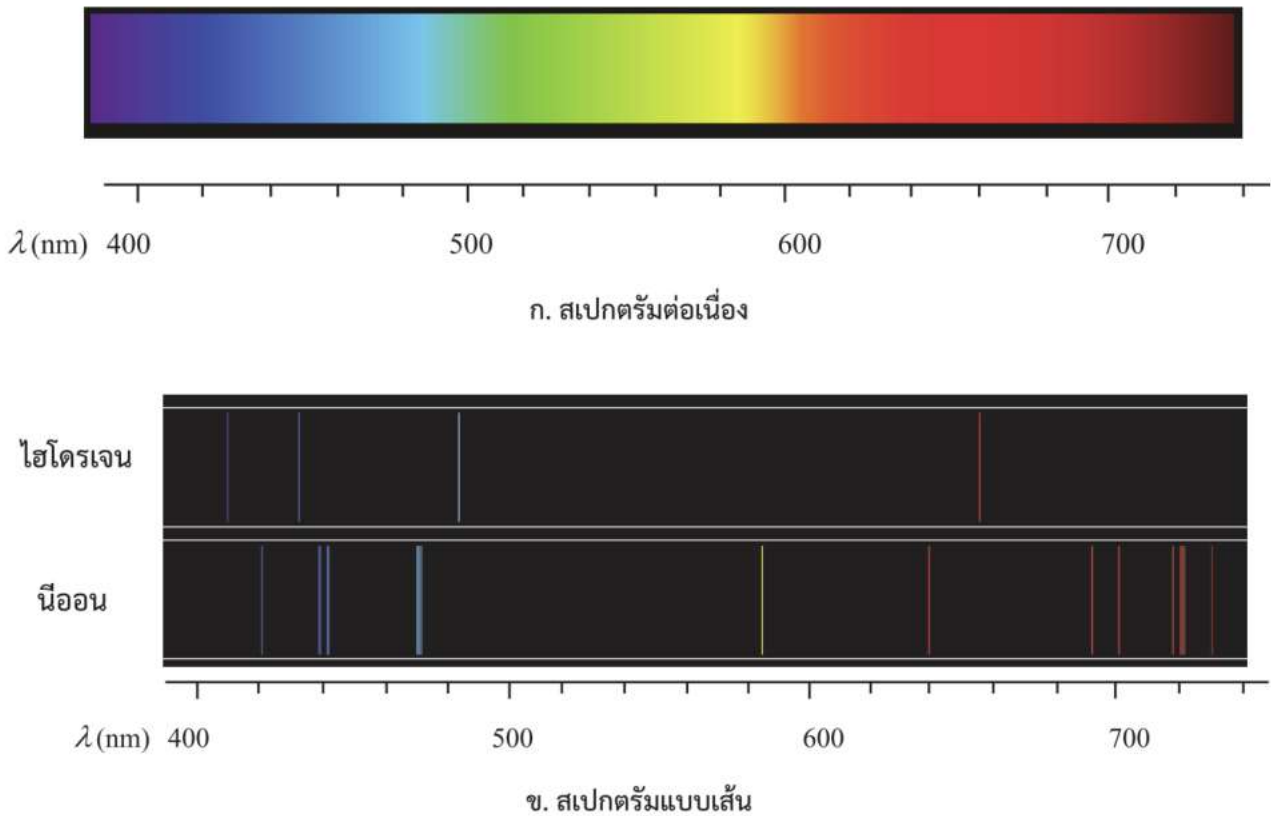
6. บันทึกสีและตำแหน่งต่าง ๆ ของเส้นสเปกตรัมที่ปรากฏบนไม้เมตรแต่ละข้างเป็นระยะ แล้วหาค่าเฉลี่ย  $\bar{x}$  สำหรับสเปกตรัมสีเดียวกัน จากนั้นคำนวณหา  $\sqrt{D^2 + \bar{x}^2}$  ซึ่งเป็นด้านตรงข้ามมุมฉากของสามเหลี่ยมมุมฉากที่มี  $D$  และ  $\bar{x}$  เป็นด้านประกอบมุมฉาก
7. คำนวณหาความยาวคลื่นของสเปกตรัมแต่ละสีจากสมการ  $\lambda = d \sin \theta$  หรือ  $\lambda = d \frac{\bar{x}}{\sqrt{D^2 + \bar{x}^2}}$  เมื่อ  $d$  คือระยะระหว่างเส้นของเกรตติง บันทึกข้อมูลลงในตาราง บันทึกผลการทดลอง
8. ทำซ้ำข้อ 2. – ข้อ 7. โดยเปลี่ยนเป็นหลอดบรรจุแก๊สชนิดอื่น สังกะสีและตำแหน่งของสเปกตรัมต่าง ๆ เปรียบเทียบกับสเปกตรัมก่อนหน้านี้



### คำถามท้ายกิจกรรม

- สเปกตรัมจากหลอดบรรจุแก๊สมีลักษณะเหมือนกับสเปกตรัมจากหลอดไฟฟ้าทั่วไปหรือไม่ อย่างไร
- สเปกตรัมจากหลอดบรรจุแก๊สแต่ละชนิดมีลักษณะเหมือนหรือต่างกันอย่างไร
- สเปกตรัมจากหลอดบรรจุแก๊สไฮโดรเจน ประกอบด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นเท่าใดบ้าง

จากกิจกรรมพบว่า สเปกตรัมของแก๊สร้อนมีลักษณะเป็นเส้น ๆ แยกจากกัน เรียกว่า **สเปกตรัมแบบเส้น (line spectrum)** ซึ่งแตกต่างจากสเปกตรัมของแสงจากหลอดไฟฟ้าซึ่งเป็นสเปกตรัมแบบต่อเนื่อง ดังรูป 19.6 ก. แก๊สแต่ละชนิดมีชุดสเปกตรัมแบบเส้นที่แตกต่างกัน ดังรูป 19.6 ข. ซึ่งสเปกตรัมเหล่านี้เป็นสมบัติเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิด



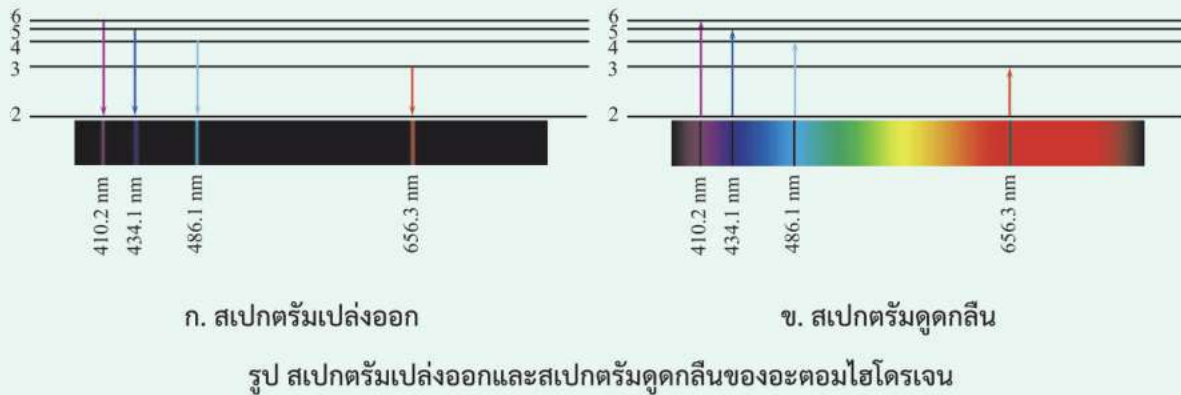
รูป 19.6 สเปกตรัมแบบเส้นของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สนีออน



### ความรู้เพิ่มเติม

สเปกตรัมแบบเส้นแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ **สเปกตรัมเปล่งออก (emission spectrum)** เกิดจากการที่อะตอมถูกกระตุ้นและปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของชุดสเปกตรัมของแสงที่มีความถี่บางค่า ขึ้นกับสมบัติเฉพาะตัวของธาตุ สเปกตรัมเปล่งออกของอะตอมไฮโดรเจน เป็นดังรูป ก. และ **สเปกตรัมดูดกลืน (absorption spectrum)** เกิดจากการฉายแสงที่มีสเปกตรัมต่อเนื่องผ่านอะตอมของแก๊สอุณหภูมิต่ำ

อะตอมของแก๊สอุณหภูมิต่ำจะดูดกลืนพลังงานของแสงที่มีความถี่บางค่า ทำให้สเปกตรัมต่อเนื่องที่ผ่านแก๊สอุณหภูมิต่ำ ปรากฏเป็นเส้นดำแทรกอยู่ ซึ่งขึ้นกับสมบัติเฉพาะตัวของธาตุนั้น สเปกตรัมดูดกลืนของอะตอมไฮโดรเจน เป็นดังรูป ข. จะเห็นได้ว่า สเปกตรัมเปล่งออกกับสเปกตรัมดูดกลืน จะมีค่าความยาวคลื่นเดียวกัน



ในปี พ.ศ. 2456 โบร์ (N. Bohr) นักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์ก ได้อธิบายเกี่ยวกับเสถียรภาพของอะตอม และสเปกตรัมแบบเส้นของแก๊สไฮโดรเจน โดยใช้แนวคิดเกี่ยวกับนิวเคลียสของรัทเทอร์ฟอร์ด และควอนตัมของพลังงานของพลังค์ แล้วนำเสนอแบบจำลองอะตอม มีใจความว่า

1. อิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสนั้นจะอยู่ในวงโคจรเฉพาะที่มีรัศมีบางค่าเท่านั้น โดยเงื่อนไขวงโคจรเฉพาะนี้เป็นวงโคจรที่อิเล็กตรอนมีขนาดโมเมนตัมเชิงมุม (angular momentum) เป็นไปตามสมการ (19.2)

$$L = n\hbar$$

$$mvr = n\hbar$$

$$= n \frac{h}{2\pi} \quad (19.2)$$

โดย  $L$  คือ ขนาดโมเมนตัมเชิงมุม

$n$  คือ เลขควอนตัม แทนลำดับชั้นของวงโคจรของอิเล็กตรอน โดย  $n = 1, 2, 3, \dots$

$\hbar$  คือ ค่าคงตัว (อ่านว่า เอชบาร์) มีค่าเท่ากับ  $\frac{h}{2\pi}$

$m$  คือ มวลของอิเล็กตรอน

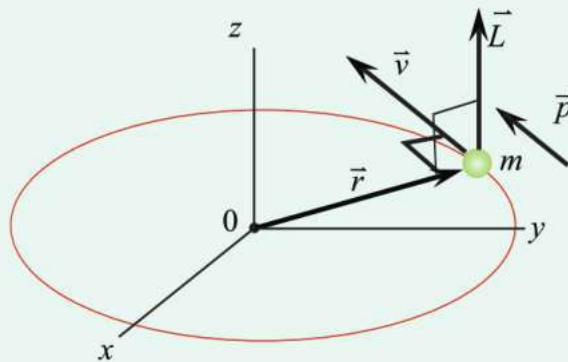
$v$  คือ อัตราเร็วของอิเล็กตรอน

$r$  คือ รัศมีวงโคจรของอิเล็กตรอน



### ความรู้เพิ่มเติม

โมเมนตัมที่เราได้ศึกษามาก่อนหน้านี้  $\vec{p} = m\vec{v}$  เรียกว่า โมเมนตัมเชิงเส้น ยังมีโมเมนตัมอีกแบบหนึ่ง เรียกว่า โมเมนตัมเชิงมุม ในกรณีวัตถุที่เคลื่อนด้วยโมเมนตัมเชิงเส้น  $p$  รอบจุดตรึงหนึ่ง ๆ เป็นวงกลมรัศมี  $r$  จะมีขนาดโมเมนตัมเชิงมุม  $L$  เท่ากับผลคูณระหว่างขนาดโมเมนตัมเชิงเส้นกับรัศมี ตามสมการ  $L = pr = mvr$  มีหน่วยเป็น จูล วินาที



รูป โมเมนตัมเชิงมุม



### ความรู้เพิ่มเติม

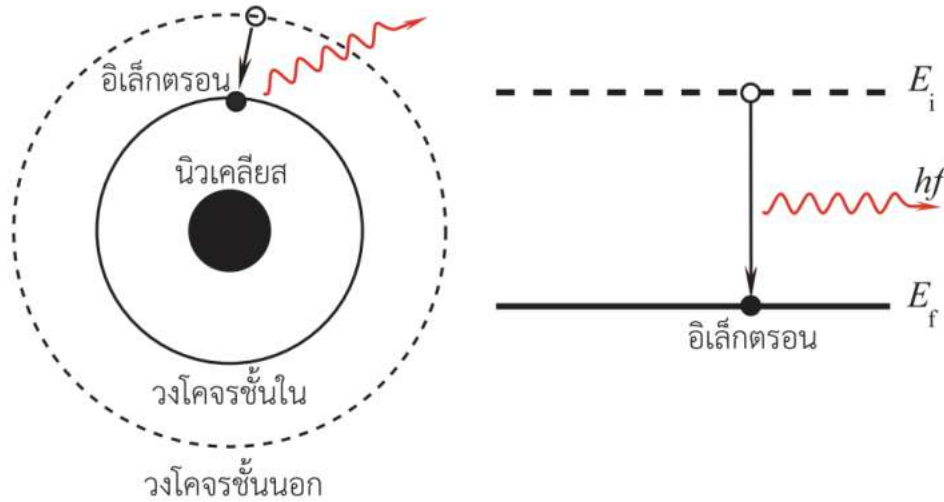
นีลส์ เฮนริก เดวิด โบร์ (Niels Henrik David Bohr ค.ศ. 1885-1962 หรือ พ.ศ.2428-2505) นักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์ก เป็นผู้เสนอแบบจำลองอะตอมโดยใช้ความรู้ทางด้านฟิสิกส์ควอนตัม และแนวคิดนิวเคลียสอะตอมของรัทเทอร์ฟอร์ด อธิบายการเกิดสเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจนได้ โบร์ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์เมื่อ พ.ศ.2465



รูป โบร์



2. อิเล็กตรอนในวงโคจรเฉพาะนี้ก็จะเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสได้โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แต่อิเล็กตรอนจะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนวงโคจรจากวงโคจรชั้นนอกลง มาสู่วงโคจรชั้นใน ดังรูป 19.7



รูป 19.7 อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากวงโคจรชั้นนอกมาสู่วงโคจรชั้นใน จะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีควอนตัมของพลังงาน  $hf$

โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่  $f$  ที่แผ่ออกมาจะมีควอนตัมของพลังงาน เป็นไปตามสมการ

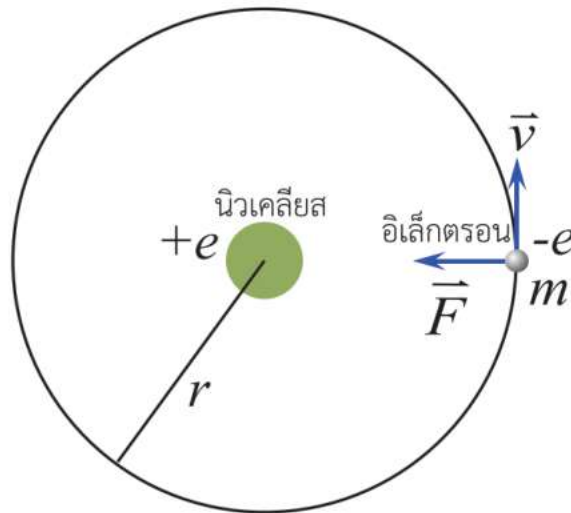
$$hf = E_i - E_f \quad (19.3)$$

โดย  $E_i$  คือ พลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้นนอกซึ่งพลังงานสูงกว่า

$E_f$  คือ พลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้นในซึ่งพลังงานต่ำกว่า

จึงทำให้อะตอมแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบางความถี่ที่มีควอนตัมของพลังงานเท่ากับผลต่างของพลังงานของอิเล็กตรอนที่เปลี่ยนวงโคจร

เราสามารถนำแบบจำลองอะตอมของโบร์มาพิจารณารัศมีของวงโคจรของอิเล็กตรอนของอะตอมไฮโดรเจนซึ่งมีนิวเคลียสที่ประกอบด้วยโปรตอนประจุไฟฟ้า  $+e$  จำนวน 1 ตัว ที่มีอิเล็กตรอน มวล  $m$  ประจุไฟฟ้า  $-e$  จำนวน 1 ตัว เคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบนิวเคลียสด้วยรัศมี  $r$  โดยมีแรงไฟฟ้า  $F$  ระหว่างอิเล็กตรอนและโปรตอน เป็นแรงสู่ศูนย์กลาง ดังรูป 19.8



รูป 19.8 แบบจำลองอะตอมไฮโดรเจนตามแบบจำลองอะตอมของโบร์

และมีขนาดของแรงไฟฟ้าดังสมการ

$$F = \frac{ke^2}{r^2} \quad (a)$$

อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอ  $v$  ภายใต้แรงไฟฟ้า

$$\begin{aligned} F &= F_c \\ \frac{ke^2}{r^2} &= m \frac{v^2}{r} \\ mke^2 &= \frac{m^2 v^2 r^2}{r} \end{aligned} \quad (b)$$

จัดรูปสมการ (b) ให้อยู่ในพจน์ของโมเมนตัมเชิงมุม สมการ (19.2)  $mvr = n\hbar$  จะได้

$$\begin{aligned} mke^2 &= \frac{(n\hbar)^2}{r} \\ r &= \frac{n^2 \hbar^2}{mke^2} \end{aligned}$$

ให้รัศมีวงโคจรวงที่  $n$  เป็น  $r_n$  จะได้

$$r_n = \left( \frac{\hbar^2}{mke^2} \right) n^2 \quad (19.4a)$$

เมื่อแทนค่าคงตัวในสมการ (19.4a) อย่างละเอียด

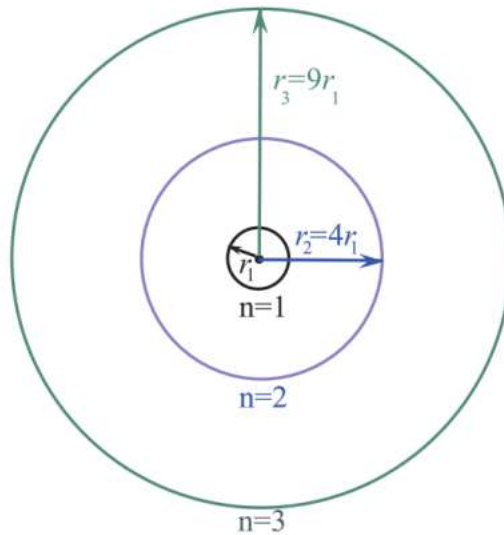
จะได้

$$r_n = (0.529 \times 10^{-10} \text{ m}) n^2 \quad (19.4b)$$

สำหรับวงโคจรที่เล็กที่สุด (ใกล้นิวเคลียสที่สุด)  $n = 1$  จะได้  $r_1 = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m}$  เรียกว่า **รัศมีโบร์** (Bohr radius โดยทั่วไปใช้สัญลักษณ์  $a_0$ ) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของรัศมีของวงโคจรที่  $n$  ในรูปของรัศมีโบร์ดังสมการ (19.4c)

$$\begin{aligned} r_n &= r_1 n^2 \\ &= a_0 n^2 \end{aligned} \quad (19.4c)$$

และถ้าแทนค่า  $n = 2$  ค่า  $r_2$  จะเป็น 4 เท่าของ  $r_1$  หรือ ถ้าแทน  $n = 3$  ค่า  $r_3$  จะเป็น 9 เท่าของ  $r_1$  ดังแสดงในรูป 19.9



รูป 19.9 วงโคจรของอิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจนตามแบบจำลองอะตอมของโบร์

ในตอนแรก โบร์ถือว่า นิวเคลียสไม่เคลื่อนที่ ดังนั้น พลังงานรวมของอะตอมก็คือพลังงานรวมของอิเล็กตรอนในวงโคจรรอบนิวเคลียส ซึ่งพลังงานรวมของอิเล็กตรอนประกอบด้วยพลังงานศักย์ไฟฟ้า และพลังงานจลน์  $E_k$  พลังงานของอิเล็กตรอนในวงโคจรที่  $n$  พิจารณาได้จากผลรวมพลังงานจลน์ และพลังงานศักย์ของอิเล็กตรอนในวงโคจรนั้น

$$E = E_k + E_p$$

จากพลังงานศักย์ของประจุไฟฟ้า  $E_p = U = \frac{kQq}{r}$  ดังนั้น พลังงานศักย์ของอิเล็กตรอนในวงโคจร  $E_p = -k \frac{e^2}{r}$  จะได้พลังงานรวม  $E$  ของอิเล็กตรอน

$$E = \frac{1}{2} mv^2 + \left( -k \frac{e^2}{r} \right) \quad (c)$$

จากสมการ (b) เขียนอัตราเร็ว  $v$  ให้เป็นไปตามสมการ

$$v^2 = \frac{ke^2}{mr} \quad (d)$$

แทนอัตราเร็ว  $v$  จากสมการ (d) ลงในสมการ (c)

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2} m \left( \frac{ke^2}{mr} \right) + \left( -k \frac{e^2}{r} \right) \\ &= -\frac{1}{2} \frac{ke^2}{r} \end{aligned} \quad (e)$$

แทน  $r$  ในรูป  $r_n$  จากสมการ (19.4a) และเขียน  $E_n$  แทน  $E$  ในสมการ (e) จะได้

$$E_n = -\frac{1}{2} \frac{mk^2e^4}{\hbar^2} \left( \frac{1}{n^2} \right) \quad (19.5a)$$

เมื่อแทนค่าคงตัวในสมการ (19.5a) อย่างละเอียด จะได้

$$E_n = -\frac{21.76 \times 10^{-19} \text{ J}}{n^2} \quad (19.5b)$$

และในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) จะได้

$$E_n = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2} \quad (19.5c)$$

เราสามารถเขียนพลังงานรวมของอะตอมไฮโดรเจนตามแบบจำลองของโบร์ เป็นระดับพลังงาน (energy level) ได้ดังรูป 19.10

เลขควอนตัม $n$		พลังงาน $E$
$n = \infty$	=====	$E_\infty = 0$
$n = 5$	=====	$E_5 = -0.54 \text{ eV}$
$n = 4$	=====	$E_4 = -0.85 \text{ eV}$
$n = 3$	=====	$E_3 = -1.51 \text{ eV}$
$n = 2$	=====	$E_2 = -3.40 \text{ eV}$

$$n = 1 \quad \text{-----} \quad E_1 = -13.60 \text{ eV}$$

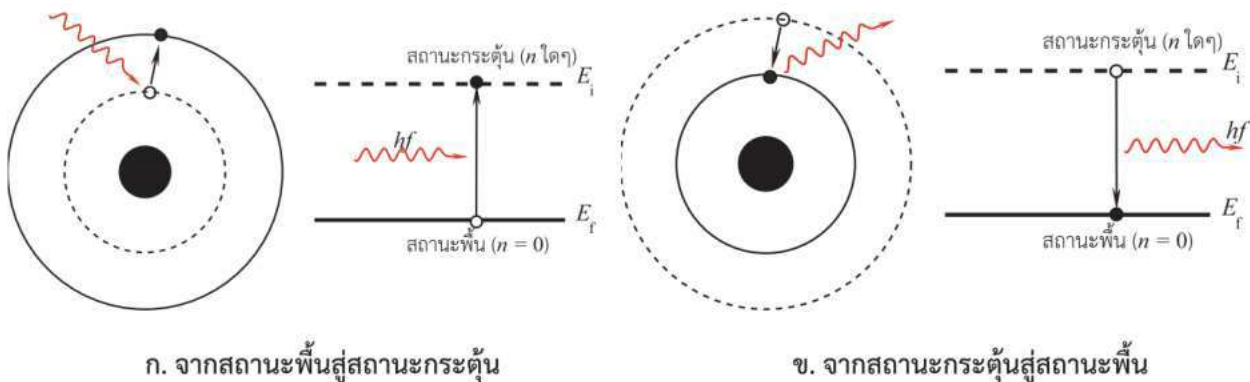
รูป 19.10 ระดับพลังงานของอะตอมไฮโดรเจนตามแบบจำลองอะตอมของโบร์



### ข้อสังเกต

พลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมมีเครื่องหมายลบ เช่น ในกรณีของอะตอมไฮโดรเจน อิเล็กตรอนมีพลังงานเท่ากับ  $E_n = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2}$  หมายความว่า อิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจน ถูกยึดเหนี่ยวไว้โดยแรงไฟฟ้าจากโปรตอนในนิวเคลียส โดยอิเล็กตรอนในวงโคจรที่ใกล้นิวเคลียสมากที่สุด ( $n = 1$ ) ถูกยึดเหนี่ยวไว้ในอะตอมด้วยพลังงานเท่ากับ 13.6 eV หากต้องการให้อิเล็กตรอนนี้หลุดออกจากอะตอมเป็นอิเล็กตรอนอิสระ จะต้องใช้พลังงานอย่างน้อยที่สุดเท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวในวงโคจรนั้นซึ่งเท่ากับ 13.6 eV เราเรียกพลังงานดังกล่าวนี้ว่า **พลังงานไอออไนเซชัน (ionization energy)**

ทฤษฎีอะตอมของโบร์อธิบายการเกิดสเปกตรัมแบบเส้นของแก๊สไฮโดรเจนได้ดังนี้ โดยทั่วไปที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนในอะตอมของแก๊สไฮโดรเจนจะอยู่ในระดับพลังงาน  $n = 1$  ซึ่งเป็นระดับพลังงานต่ำสุด เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า **สถานะพื้น (ground state)** แต่เมื่ออะตอมของแก๊สไฮโดรเจนสถานะพื้นได้รับพลังงานมากพอ อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า หรือ  $n > 1$  เรียกว่า **สถานะกระตุ้น (excited state)** พลังงานที่รับจะมีการเปลี่ยนระดับพลังงาน โดยจะอยู่ในระดับชั้นที่สูงกว่าตามสมการ  $hf = \Delta E$  หลังจากนั้นอิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้นจะเปลี่ยนลงมายังสถานะพื้นหรือระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ซึ่งมีเสถียรภาพมากกว่า ดังรูป 19.11



ก. จากสถานะพื้นสู่สถานะกระตุ้น

ข. จากสถานะกระตุ้นสู่สถานะพื้น

รูป 19.11 การเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอม

โดยปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่  $f$  ที่มีควอนตัมของพลังงาน  $hf$  ตามสมการ (19.3) และ (19.5a) โบร์สามารถคำนวณความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาได้ดังนี้

$$hf = E_i - E_f$$

แทน  $f$  ด้วย  $\frac{c}{\lambda}$   $h$  ด้วย  $2\pi\hbar$  และ แทนค่า  $E_n = -\frac{1}{2} \frac{mk^2e^4}{\hbar^2} \left(\frac{1}{n^2}\right)$

จะได้ 
$$2\pi\hbar \frac{c}{\lambda} = -\frac{1}{2} \frac{mk^2e^4}{\hbar^2} \left[ \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right]$$

$$\frac{1}{\lambda} = \left( \frac{mk^2e^4}{4\pi c\hbar^3} \right) \left[ \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right]$$

ค่า  $\frac{mk^2e^4}{4\pi c\hbar^3}$  เป็นค่าคงตัว เรียกว่า ค่าคงตัวริดเบิร์ก (Rydberg constant:  $R_H$ ) จะได้

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left[ \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right] \quad (19.6)$$

โดย  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมา

$n_i$  คือ ระดับพลังงานก่อนเปลี่ยน

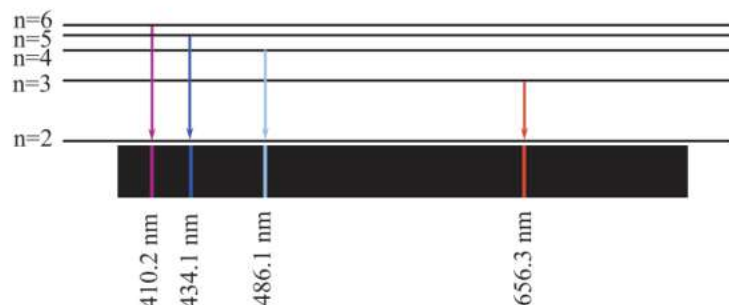
$n_f$  คือ ระดับพลังงานหลังเปลี่ยน

$R_H$  คือ ค่าคงตัวริดเบิร์ก (Rydberg's constant) มีค่าเท่ากับ  $1.0974 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

จากสมการ (19.6) โบร์นำไปคำนวณความยาวคลื่นสเปกตรัมแบบเส้นสว่างของอะตอมไฮโดรเจนตาม **อนุกรมบัลเมอร์** (Balmer series) ซึ่งริดเบิร์กได้เสนอรูปสมการที่ใช้ในการคำนวณไว้ก่อนหน้าได้ตรงกัน โดยแทน  $n_f = 2$  และ  $n_i = n$  ในสมการ (19.6) เป็นดังนี้

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left[ \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right]$$

เมื่อแทนค่า  $n = 3, 4, 5$  และ  $6$  ในสมการข้างบน จะได้ความยาวคลื่นของสเปกตรัมแบบเส้นที่ตามองเห็นได้เป็น 656.3 486.1 434.1 และ 410.2 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งตรงกับควมยาวคลื่นสเปกตรัมแบบเส้นของอะตอมไฮโดรเจนในอนุกรมบัลเมอร์ ดังรูป 19.12



รูป 19.12 ความยาวคลื่นสเปกตรัมแบบเส้นของอะตอมไฮโดรเจนในอนุกรมบัลเมอร์



### ความรู้เพิ่มเติม : อนุกรมสเปกตรัมของไฮโดรเจน

สำหรับชุดสเปกตรัมแบบเส้นของแก๊สไฮโดรเจน ในปี พ.ศ. 2428 บัลเมอร์ (Johann Jacob Balmer) ซึ่งเป็นครูสอนคณิตศาสตร์ในประเทศสวีเดนแลนด์ สามารถหาสูตรที่คำนวณหาความยาวคลื่นของสเปกตรัมแบบเส้นต่าง ๆ ของอะตอมไฮโดรเจนในช่วงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งมีทั้งหมด 4 เส้น ได้แก่ 656.3 486.1 434.1 และ 410.2 นาโนเมตร ตามลำดับ ด้วยสมการ

$$\lambda = b \left( \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \right)$$

โดย  $b$  เป็นค่าคงตัวที่มีค่าเท่ากับ 364.56 นาโนเมตร

$n$  เป็นเลขจำนวนเต็มที่มีค่ามากกว่า 2

ซึ่งในปี พ.ศ. 2433 ริทเบิร์ก นักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดนได้เขียนสูตรอนุกรมบัลเมอร์ใหม่ในรูปแบบที่สะดวกต่อการศึกษา คือ

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left[ \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right]$$

โดย  $R_H$  เป็นค่าคงตัวริทเบิร์กมีค่าเท่ากับ  $1.0974 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

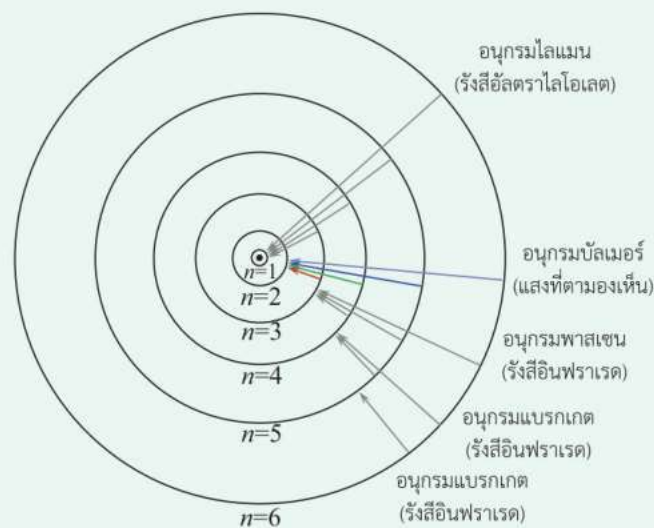
$n$  เป็นเลขจำนวนเต็มที่มีค่ามากกว่า 2

หลังจากที่ริทเบิร์กได้เสนออนุกรมของบัลเมอร์ใหม่ ได้มีการพบสเปกตรัมชุดอื่นๆ ของไฮโดรเจนอีก และสามารถหาความยาวคลื่นของสเปกตรัมทุกชุดได้จากสมการข้างบน โดยเปลี่ยน  $2^2$  เป็นเลขอื่น เช่น  $1^2$   $3^2$  ฯลฯ ดังตาราง

ตาราง อนุกรมของสเปกตรัมชุดต่าง ๆ ของไฮโดรเจนที่สอดคล้องกับสมการของโบร์

ชื่ออนุกรม	ปี พ.ศ. ที่ค้นพบ	$n_f$	$n_i$	ความยาวคลื่นตามสมการ $\frac{1}{\lambda} = R_H \left[ \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right]$	ช่วงของรังสี
ไลมาน (Lyman)	2449	1	2,3,4,...	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left[ \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n_i^2} \right]$	อัลตราไวโอเล็ต (UV)
บัลเมอร์ (Balmer)	2428	2	3,4,5,...	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left[ \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_i^2} \right]$	แสงที่ตามองเห็นถึง UV
พาสเชน (Paschen)	2451	3	4,5,6,...	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left[ \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n_i^2} \right]$	อินฟราเรด (IR)
แบรกกेट (Brackett)	2465	4	5,6,7,...	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left[ \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n_i^2} \right]$	
พุนด์ (Pfund)	2467	5	6,7,8,...	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left[ \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n_i^2} \right]$	

อนุกรมของสเปกตรัมในตารางข้างต้น สามารถแสดงการเปลี่ยนวงโคจรของอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดสเปกตรัมอนุกรมต่าง ๆ ได้ดังรูป



รูป การเปลี่ยนวงโคจรของอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดสเปกตรัมอนุกรมต่าง ๆ



**ตัวอย่าง 19.4** เมื่ออิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจนเปลี่ยนระดับพลังงานจาก  $n = 4$  มาถึง  $n = 2$  จงคำนวณ

- ก. ความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมา  
 ข. พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมา

**แนวคิด** ก. จำนวนความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมา โดยใช้สมการ (19.6) โดย  $n_i = 4$  และ  $n_f = 2$

ข. จำนวนพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาโดยใช้สมการ  $E = hf = h\frac{c}{\lambda}$

**วิธีทำ** ก.

$$\begin{aligned}\frac{1}{\lambda} &= R_H \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \\ &= R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2} \right) \\ &= (1.0974 \times 10^7 \text{ m}^{-1}) \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{16} \right) \\ &= 0.2057625 \times 10^7 \text{ m}^{-1} \\ \lambda &= 4.8599 \times 10^{-9} \text{ m} \\ &= 485.99 \text{ nm}\end{aligned}$$

ข. จำนวนพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจาก  $E = hf = h\frac{c}{\lambda}$   
 แทนค่า  $\lambda$  ที่ได้จาก ก.

$$\begin{aligned}E &= h\frac{c}{\lambda} \\ &= \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}{(485.9 \times 10^{-9} \text{ m})} \\ &= 4.091 \times 10^{-19} \text{ J} \\ &= \frac{(4.091 \times 10^{-19} \text{ J})}{(1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV})} \\ &= 2.56 \text{ eV}\end{aligned}$$

**ตอบ** ก. ความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาเมื่ออิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจนเปลี่ยนระดับพลังงานจาก  $n = 4$  มาถึง  $n = 2$  เท่ากับ 485.99 นาโนเมตร

ข. พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาเมื่ออิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจนเปลี่ยนระดับพลังงานจาก  $n = 4$  มาถึง  $n = 2$  เท่ากับ  $4.10 \times 10^{-19}$  จูล หรือเท่ากับ 2.56 อิเล็กตรอนโวลต์



## ข้อสังเกต

การคำนวณแต่ละครั้งอาจได้ค่าผลลัพธ์แตกต่างกันเล็กน้อยขึ้นอยู่กับความละเอียดในการแทนค่าและวิธีในการคำนวณ เช่น ในตัวอย่าง 19.4 ข. ถ้าหาพลังงานที่แผ่ออกมาจากสมการ

$$E_n = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2} \text{ และ } \Delta E = E_i - E_f \text{ จะได้ } \Delta E = E_4 - E_2 = 2.55 \text{ eV}$$

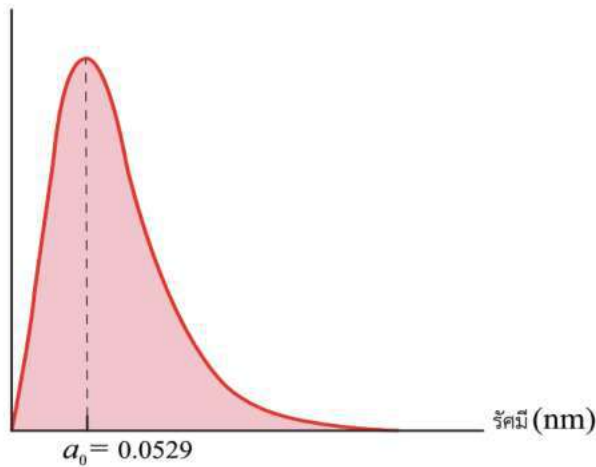


## ชวนคิด

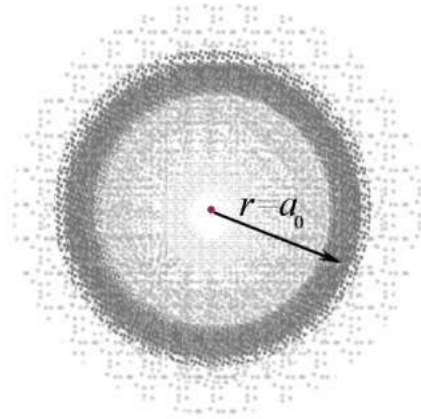
นักเรียนสามารถมองเห็นสเปกตรัมแบบเส้นที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานจาก  $n = 7$  ไปยัง  $n = 2$  ของอะตอมไฮโดรเจนได้หรือไม่ เพราะเหตุใด

อย่างไรก็ดี แม้แบบจำลองอะตอมของโบร์สามารถอธิบายเสถียรภาพของอะตอมและการเกิดสเปกตรัมแบบเส้นได้ แต่ก็จัดว่าเป็นทฤษฎีที่ยังไม่สมบูรณ์ นักฟิสิกส์อีกหลายท่าน เช่น ชเรอดิงเงอร์ (Schrödinger) ไฮเซนเบิร์ก (Heisenberg) พาาลี (Pauli) ดิแรก (Dirac) เป็นต้น ได้ร่วมกันพัฒนากลศาสตร์แนวใหม่ที่สามารถอธิบายฟิสิกส์ของอนุภาคหรือระบบที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ในระดับอะตอมหรือเล็กกว่าจนเกิดเป็นวิชา**กลศาสตร์ควอนตัม (quantum mechanics)** ซึ่งอธิบายว่าอิเล็กตรอนในอะตอมไม่ได้โคจรรอบนิวเคลียสโดยมีวงโคจรที่แน่นอนตามแบบจำลองของโบร์ ดังนั้นจึงไม่สามารถทราบตำแหน่งที่แน่นอนของอิเล็กตรอน ณ ขณะเวลาหนึ่งได้ แต่จะทราบได้เพียง**ความน่าจะเป็น (probability)** ที่จะพบอิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานหนึ่ง ๆ ว่า อยู่ในบริเวณใดบ้าง เปรียบเทียบได้กับลักษณะของกลุ่มหมอก ดังรูป 19.13

ความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอน



ก. กราฟระหว่างความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในสถานะพื้นกับรัศมี



ข. แผนภาพ 2 มิติแสดงความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในสถานะพื้น

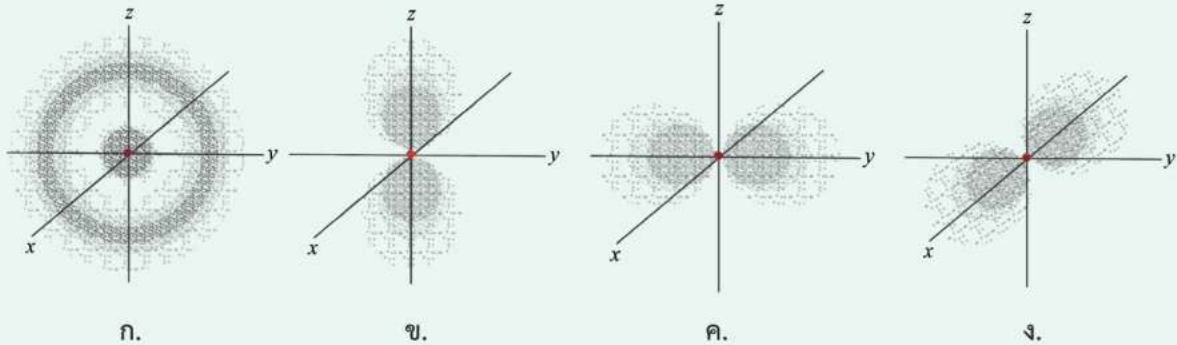
**รูป 19.13** ความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในสถานะพื้นโคจรรอบนิวเคลียสของอะตอมไฮโดรเจนตามกลศาสตร์ควอนตัม ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางนิวเคลียสเท่ากับรัศมีโบร์มีค่าโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนมากที่สุด

จากรูป 19.13 ก. เป็นกราฟระหว่างความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอน ณ ระยะห่างจากศูนย์กลางนิวเคลียสของอะตอมไฮโดรเจนสำหรับอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะพื้น ( $n = 1$ ) จะเห็นว่าความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนที่รัศมีโบร์มีค่ามากที่สุด ส่วนรูป 19.13 ข. แสดงความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนบนระนาบ  $xy$  ในลักษณะของกลุ่มหมอก โดยบริเวณที่มีหมอกหนาแน่น (สีเข้ม) แสดงถึงความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนมาก กล่าวคือ อิเล็กตรอนไม่ได้มีวงโคจรที่แน่นอนตามแบบจำลองอะตอมของโบร์ แต่อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ นิวเคลียสได้ขึ้นอยู่กับระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอม



### ความรู้เพิ่มเติม : แบบจำลองกลุ่มหมอกอิเล็กตรอน

สำหรับอิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจนที่อยู่ในระดับพลังงาน  $n = 2$  ความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ก็จะแตกต่างจากอิเล็กตรอนในสถานะพื้น ดังรูป ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน  $n = 2$  มีได้ 4 รูปแบบ ได้แก่ ลักษณะคล้ายทรงกลมซ้อนกัน 2 ชั้น ดังรูป ก. ลักษณะคล้ายดัมพ์เบลตามแนวแกน  $z$  แกน  $y$  และ แกน  $x$  ดังรูป ข. ค. และ ง. ตามลำดับ โดยจุดสีแดงแทนตำแหน่งของนิวเคลียส และจุดสีดำแต่ละจุดแทนตำแหน่งที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอน



รูป ความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนของอะตอมไฮโดรเจนอยู่ในระดับพลังงาน  $n = 2$  มีลักษณะ

- ก. คล้ายทรงกลมซ้อนกัน 2 ชั้น ข. คล้ายดัมพ์เบลล์ตามแนวแกน  $z$  ค. คล้ายดัมพ์เบลล์ตามแนวแกน  $y$  และ  
ง. คล้ายดัมพ์เบลล์ตามแนวแกน  $x$

เราไม่สามารถบอกได้ว่า อิเล็กตรอนอยู่ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งได้อย่างแน่นอน เราบอกได้แต่เพียงความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอน ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งมีค่าเป็นเท่าใด โดยสิ่งที่จะทำให้เราทราบเกี่ยวกับความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอน ณ ตำแหน่งหนึ่ง ณ เวลาหนึ่ง ๆ คือ ฟังก์ชันคลื่น (wave function) ซึ่งนักเรียนจะได้มีโอกาสศึกษาในวิชาฟิสิกส์ควอนตัมในการเรียนระดับสูงต่อไป



### คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 19.1

1. จงอธิบายเลขควอนตัม และยกตัวอย่างประกอบ
2. จงอธิบายความแตกต่างระหว่างแบบจำลองอะตอมของทอมสันกับแบบจำลองอะตอมของรัทเทอร์ฟอร์ด
3. จงอธิบายความแตกต่างระหว่างสเปกตรัมแบบเส้นและสเปกตรัมต่อเนื่อง พร้อมกับยกตัวอย่างปรากฏการณ์ของการเกิดสเปกตรัมในแต่ละแบบ



### แบบฝึกหัด 19.1

1. แสงที่มีความถี่  $5.0 \times 10^{14}$  เฮิร์ตซ์ ควอนตัมของพลังงานมีค่าเท่าใด
2. พลังงาน  $1.0 \times 10^{-3}$  จูล ได้จากแสงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร มีจำนวนควอนตัมพลังงานของแสงเท่าใด
3. จงหาอัตราเร็วของอิเล็กตรอนในวงโคจรที่  $n$
4. จะต้องใช้พลังงานอย่างน้อยที่สุดกี่อิเล็กตรอนโวลต์ในการทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรที่สอง ( $n = 2$ ) หลุดออกจากอะตอมไฮโดรเจนเป็นอิเล็กตรอนอิสระ
5. ระดับพลังงาน 3 ระดับของอะตอมหนึ่ง แสดงดังรูป

$n$	พลังงาน
3	----- -1 eV
2	----- -3 eV
1	----- -7 eV

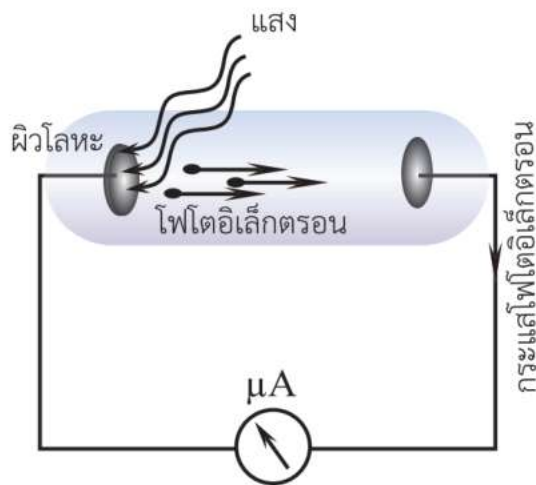
- ถ้าอะตอมอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น  $n = 2$  จะสามารถปล่อยโฟตอนที่มีพลังงานเท่าใด
6. อิเล็กตรอนตัวหนึ่งโคจรรอบนิวเคลียสของอะตอมไฮโดรเจน โดยมี  $n = 3$  จงหา
    - ก. รัศมีของวงโคจร
    - ข. ถ้าอิเล็กตรอนกลับสู่สถานะพื้น จะปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นเท่าใด

## 19.2 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

ในบทที่ผ่านมา นักเรียนทราบว่า แสงเป็นสเปกตรัมหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และนักฟิสิกส์สามารถวัดอัตราเร็วแสงและอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับแสงได้ อย่างไรก็ตาม ก็มีปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถอธิบายได้โดยใช้ความรู้เกี่ยวกับแสงเป็นคลื่นตามแนวคิดฟิสิกส์แบบฉบับ ซึ่งจะศึกษาได้ต่อไปนี้

### 19.2.1 ควอนตัมของแสงและโฟตอน

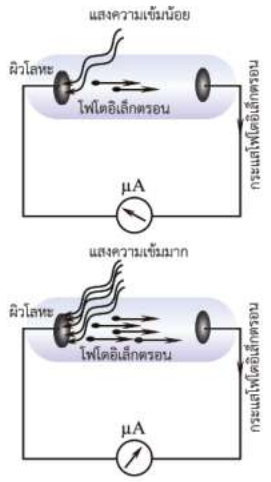
ในปี พ.ศ. 2430 ไฮน์ริช รูดอล์ฟ แฮทซ์ (Heinrich Rudolf Hertz) ได้ค้นพบปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนหลุดจากผิวโลหะเมื่อมีแสงที่มีความถี่เหมาะสมมาตกกระทบโดยเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) และเกิดกระแสโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectric current) ดังรูป 19.14



รูป 19.14 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

โดยผลการทดลองของเฮิร์ตซ์สรุปได้ดังตาราง 19.1

ตาราง 19.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองของเฮิร์ตซ์กับแนวคิดฟิสิกส์แบบฉบับ

หัวข้อที่ศึกษา	ผลการทดลอง	แนวคิดฟิสิกส์แบบฉบับ
การเกิดโฟโตอิเล็กตรอนสำหรับโลหะชนิดหนึ่ง ๆ	<ul style="list-style-type: none"> <li>การเกิดโฟโตอิเล็กตรอนไม่ขึ้นกับความเข้มแสงที่ใช้ แต่ขึ้นกับความถี่หรือความยาวคลื่นของแสง</li> <li>ความถี่ของแสงที่ใช้ต้องมากกว่าค่า ๆ หนึ่งหากน้อยกว่านั้นไม่ว่าแสงจะมีความเข้มมากเท่าใดก็ตามก็จะไม่เกิดโฟโตอิเล็กตรอน</li> <li>เมื่อเปลี่ยนชนิดของโลหะ ความถี่ของแสงที่ใช้ทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนก็จะเปลี่ยนไป</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>การเกิดโฟโตอิเล็กตรอนขึ้นกับความเข้มแสง ถ้าความเข้มแสงมากพอที่จะเกิดได้ โดยไม่ขึ้นกับความถี่ของแสงที่ใช้</li> </ul>
จำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น	<ul style="list-style-type: none"> <li>จำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นไม่ขึ้นกับความถี่ของแสงที่กระทบ แต่ขึ้นกับความเข้มของแสงที่ใช้</li> <li>แสงที่มีความเข้มมาก จะทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนจำนวนมากกว่าแสงความเข้มน้อยกว่า</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>ไม่มีแนวคิดเกี่ยวกับเรื่องนี้</li> </ul>
พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน	<ul style="list-style-type: none"> <li>พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนไม่ขึ้นกับความเข้มแสง แต่ขึ้นกับความถี่ของแสง</li> <li>หากใช้แสงที่มีความเข้มต่างกัน แต่มีความถี่เท่ากัน พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนจะมีค่าเท่ากัน</li> <li>หากใช้ความเข้มแสงเท่ากัน แสงที่มีความถี่มากกว่า พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนจะมีค่ามากกว่าเมื่อใช้แสงที่มีความถี่ต่ำกว่า</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนขึ้นกับความเข้มแสง แสงที่มีความเข้มสูงพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนจะมีค่ามาก</li> </ul>

ผลการทดลองของเฮิร์ตซ์ไม่สามารถอธิบายได้โดยใช้ความรู้แสงเป็นคลื่นตามแนวคิดฟิสิกส์แบบฉบับ นอกจากนี้ แอทซ์ยังพบว่า โฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานั้นเกิดขึ้นเกือบทันทีที่ฉายแสงที่มีความถี่เหมาะสมไปกระทบผิวโลหะแม้ว่าแสงที่ใช้จะมีความเข้มต่ำมาก แต่ตามแนวคิดฟิสิกส์แบบฉบับ หากใช้แสงที่มีความเข้มต่ำมาก เมื่อใช้ระยะเวลาเวลานานพออิเล็กตรอนจะหลุดออกมาได้เสมอ

### 19.2.2 ฟังก์ชันงานและพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน

ในปี พ.ศ. 2448 แอลเบิร์ต ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) สามารถอธิบายผลการทดลองของเฮิร์ตซ์โดยใช้สมมติฐานควอนตัมของพลังงานของแสงของพลังค์ โดยพิจารณาว่า แสงแสดงสมบัติเป็นอนุภาค เรียกว่า โฟตอน (photon) หรือ อนุภาคแสง โดยแต่ละโฟตอนมีพลังงานเท่ากับ  $hf$  ถ้าแสงความถี่  $f$  ประกอบด้วยโฟตอนจำนวนมาก เมื่อแสงความถี่  $f$  ตกกระทบบนผิวโลหะ ถ้าความถี่  $f$  ของแสงที่ใช้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับความถี่ค่าหนึ่งที่เรียกว่า ความถี่ขีดเริ่ม (threshold frequency)  $f_0$  ก็จะมีโฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกมา ดังรูป 19.15



รูป 19.15 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

ไอน์สไตน์อธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกนี้ได้โดยอาศัยสมมติฐานควอนตัมของพลังงานของแสงของพลังค์ข้างต้น และกฎการอนุรักษ์พลังงาน ว่าโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมา เกิดจากโฟตอน 1 โฟตอน ชนและถ่ายโอนพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอน 1 อิเล็กตรอน ตามสมการ (19.7a)

$$hf = W + E_{k_{\max}} \quad (19.7a)$$

โดย  $hf$  คือ พลังงานของโฟตอนที่มีความถี่  $f$  ที่ฉายลงบนผิวโลหะ

$W$  คือ พลังงานที่น้อยที่สุดของโฟตอนที่ทำให้มีโฟโตอิเล็กตรอนได้

มีค่าเท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนในโลหะ เรียกอีกอย่างว่า

**ฟังก์ชันงาน (work function)**

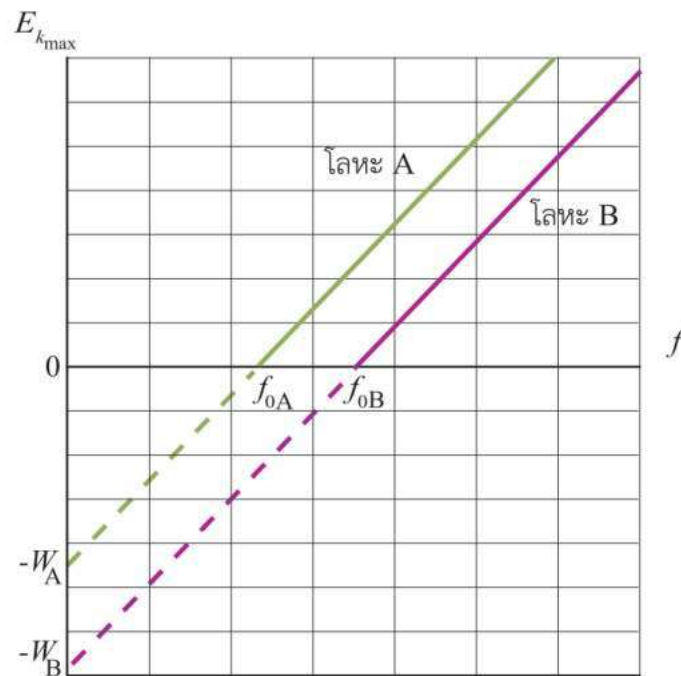
$E_{k_{\max}}$  คือ พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน



เราสามารถนำสมการโฟโตอิเล็กทริกของไอน์สไตน์ สมการ (19.7a) อธิบายผลการทดลองของเฮิร์ตซ์ให้เข้าใจได้ดีขึ้น โดยการเขียนสมการ (19.7a) ใหม่ให้อยู่ในรูปสมการ (19.7b)

$$E_{k_{\max}} = hf - W \quad (19.7b)$$

และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนกับความถี่ของโฟตอนที่ตกกระทบผิวโลหะ ซึ่งอยู่ในรูปของสมการเส้นตรง โดยมีความชันของเส้นตรงเท่ากับ  $h$  และมีจุดตัดแกนตั้งเท่ากับ  $-W$  ดังรูป 19.16



รูป 19.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนกับความถี่ของโฟตอนที่ตกกระทบผิวโลหะสองชนิด (กราฟเส้นตรง สีเขียวและสีม่วง)

จากรูป 19.16 กราฟเส้นตรง สีเขียวและสีม่วงแทนพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนที่เกิดจากโฟตอนที่ตกกระทบผิวโลหะ A และ B ตามลำดับ จะเห็นว่ากราฟเส้นตรงทั้งสองนั้นมีความชันเท่ากัน ซึ่งจากสมการ (19.7b) จะได้ว่า ความชันของกราฟเส้นตรงทั้งสองก็คือ ค่าคงตัวของพลังค์  $h$  นั่นเอง

ส่วนจุดตัดแกนตั้งบอกให้ทราบเกี่ยวกับฟังก์ชันงานของโลหะทั้งสอง จะเห็นว่าจุดตัดแกนตั้งของกราฟเส้นสีเขียวอยู่เหนือเส้นสีม่วง แสดงว่าฟังก์ชันงาน ( $W_A$ ) ของโลหะ A (เส้นสีเขียว) มีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงาน ( $W_B$ ) ของโลหะ B (เส้นสีม่วง) หมายความว่า พลังงานของโฟตอนที่ต้องใช้ในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะ A มีค่าน้อยกว่าพลังงานที่ต้องใช้สำหรับโลหะ B

สำหรับจุดตัดแกนนอนในกราฟบอกให้ทราบเกี่ยวกับความถี่ขีดเริ่ม ( $f_0$ ) ของโฟตอนที่ต้องใช้ในการทำให้อิเล็กตรอนสำหรับโลหะแต่ละชนิด จะเห็นว่า จุดตัดแกนนอนของเส้นสีเขียวอยู่ทางซ้ายของเส้นสีม่วง หมายความว่า ความถี่ขีดเริ่ม ( $f_{0A}$ ) ของโลหะ A น้อยกว่าความถี่ขีดเริ่ม ( $f_{0B}$ ) ของโลหะ B

จากกราฟในรูป 19.16 เราสามารถอธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกได้ดังนี้

- เมื่อฉายแสงที่มีความถี่  $f < f_{0A}$  ลงบนโลหะทั้งสองชนิด จะไม่ทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอน เนื่องจากความถี่น้อยกว่าความถี่ขีดเริ่มของโลหะทั้งสอง พลังงานจากโฟตอนไม่สามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในโลหะได้ (พลังงานของโฟตอนน้อยกว่าฟังก์ชันงานของโลหะ)
- เมื่อฉายแสงที่มีความถี่  $f_{0A} < f < f_{0B}$  จะมีโฟโตอิเล็กตรอนเกิดขึ้นจากโลหะ A แต่ไม่เกิดโฟโตอิเล็กตรอนที่โลหะ B เนื่องจากความถี่ของแสงที่ใช้้น้อยกว่าความถี่ขีดเริ่มของโลหะ B โฟตอนมีพลังงานมากพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในโลหะ A ได้ แต่ยังไม่สามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในโลหะ B
- เมื่อฉายแสงที่มีความถี่  $f > f_{0B}$  จะมีโฟโตอิเล็กตรอนเกิดขึ้นจากโลหะ A และโลหะ B เนื่องจากความถี่ของแสงที่ใช้มากกว่าความถี่ขีดเริ่มของโลหะทั้งสองชนิด
- เมื่อทำให้โฟโตอิเล็กตรอนเกิดขึ้นแล้ว การเพิ่มความถี่ของแสง (ลดความยาวคลื่น) จะทำให้พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนมีค่ามากขึ้น

จากสมการ (19.7b) และกราฟในรูป 19.16 จะเห็นว่า เมื่อแสงที่ตกกระทบมีความถี่เท่ากับความถี่ขีดเริ่ม ( $f = f_0$ ) เริ่มเกิดโฟโตอิเล็กตรอนพอดี จะมีพลังงานจลน์สูงสุดเป็นศูนย์ ( $E_{k_{\max}} = 0$ ) เราสามารถคำนวณฟังก์ชันงาน ( $W$ ) ของโลหะได้จากสมการ

$$W = hf_0 \quad (19.8)$$

ซึ่งก็คือพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในโลหะหนึ่ง ๆ นั้นเอง ตัวอย่างฟังก์ชันงานของโลหะบางชนิดแสดงดังตาราง 19.2

ตาราง 19.2 ตัวอย่างฟังก์ชันงานของโลหะบางชนิด

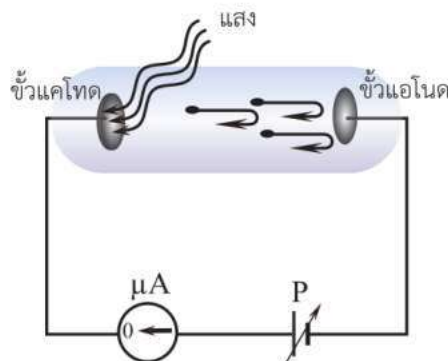
โลหะ	สัญลักษณ์	ฟังก์ชันงาน (eV)	โลหะ	สัญลักษณ์	ฟังก์ชันงาน (eV)
ซีเซียม	Cs	2.1	อะลูมิเนียม	Al	4.2
โพแทสเซียม	K	2.3	ทองแดง	Cu	4.8
โซเดียม	Na	2.4	เงิน	Ag	4.6
แบเรียม	Ba	2.6	ทองคำ	Au	5.3
แคลเซียม	Ca	2.9	แพลทินัม	Pt	5.5



### ชวนคิด

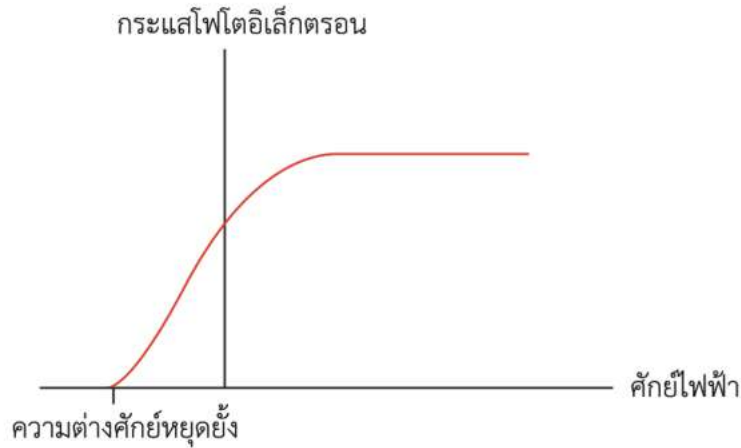
เมื่อแสงกระทบผิวโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ โซเดียม ทองแดง และทองคำ ถ้าแสงที่ตกกระทบมีพลังงานเท่ากับ 6 อิเล็กตรอนโวลต์ จงเรียงลำดับพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนของโลหะทั้งสาม จากน้อยไปมาก

เราสามารถหาค่าพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนจากการทดลองได้โดยการต่อคัลยไฟฟ้างลับขั้วเพื่อหยุดยั้งโฟโตอิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์สูงสุดไม่ให้ไปถึงขั้วแอโนดได้ดังรูป 19.17



รูป 19.17 การต่อวงจรเพื่อวัดพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน

จากรูปเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจะทำให้จำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่ไปถึงแอโนดลดลง ทำให้กระแสโฟโตอิเล็กตรอนในวงจรลดลง จนกระทั่งกระแสไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ ดังรูป 19.18

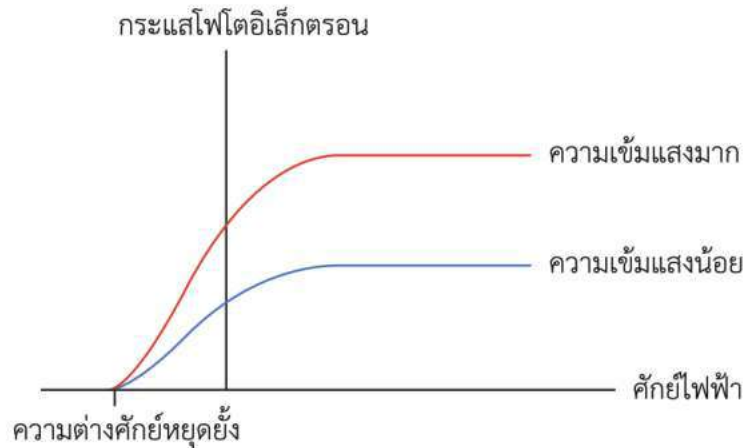


รูป 19.18 กราฟกระแสโฟโตอิเล็กตรอนกับศักย์ไฟฟ้า

ศักย์ไฟฟ้าขณะที่กระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ เรียกว่าศักย์หยุดยั้ง (stopping potential)  $V_s$  นั่นคือ พลังงานศักย์ไฟฟ้าที่ศักย์หยุดยั้ง ( $eV_s$ ) มีค่าเท่ากับพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน ดังสมการ (19.9)

$$E_{k_{\max}} = eV_s \quad (19.9)$$

จากสมการ 19.9 จะเห็นได้ว่า ถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์สูงที่สุดมาก ก็ต้องปรับความต่างศักย์หยุดยั้งให้มีค่ามากขึ้นด้วย นั่นคือ ความต่างศักย์หยุดยั้งจะเป็นค่าที่แสดงถึงพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน และถ้าทดลองโดยใช้แสงความถี่เท่าเดิม แต่เพิ่มความเข้มแสงที่ตกกระทบ พบว่ากระแสไฟฟ้าในวงจรเพิ่มขึ้น แต่ศักย์หยุดยั้งมีค่าเท่ากัน สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ได้ดังรูป 19.19



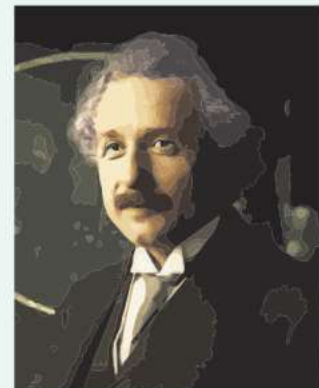
รูป 19.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ของแสงที่มีความเข้มแสงต่างกัน โดยความถี่แสงคงตัว

การที่ความเข้มแสงเพิ่มขึ้น คือ มีจำนวนโฟตอนที่กระทบผิวโลหะมากขึ้น ทำให้จำนวนโฟโตอิเล็กตรอนจากผิวโลหะมากขึ้น กระแสไฟฟ้าในวงจรเพิ่มขึ้น



### ความรู้เพิ่มเติม

แอลเบิร์ต ไอน์สไตน์ (Albert Einstein ค.ศ. 1879-1955 หรือ พ.ศ. 2422-2498) หรือ ไอน์สไตน์ เกิดที่เมืองอูล์ม ประเทศเยอรมนี ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี พ.ศ. 2464 จากผลงานการอธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกที่ตีพิมพ์ในปี พ.ศ. 2448 มิใช่จากผลงานเรื่องทฤษฎีสัมพัทธภาพที่ทำให้ทุกคนรู้จักเขาและสมการ  $E = mc^2$  เนื่องจากในขณะนั้นทฤษฎีสัมพัทธภาพยังไม่สามารถพิสูจน์ได้



รูป ไอน์สไตน์

**ตัวอย่าง 19.5** ฟังก์ชันงานของโลหะโซเดียมเท่ากับ 2.4 อิเล็กตรอนโวลต์ จงหา

ก. ความถี่ขีดเริ่มของแสงที่ทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอน

ข. พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน เมื่อแสงที่ไปตกกระทบมีความถี่  $6.50 \times 10^{14}$  เฮิรตซ์

**แนวคิด** ก. หาความถี่ขีดเริ่มจากฟังก์ชันงาน สมการ (19.8) โดยเปลี่ยนหน่วยจากอิเล็กตรอนโวลต์เป็นจูล

ข. หาพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนจากสมการ (19.7b)

**วิธีทำ**

ก.  $W = hf_0$

$$f_0 = \frac{W}{h}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{(2.4 \text{ eV}) \times (1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV})}{6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}} \\ &= 5.795 \times 10^{14} \text{ Hz} \end{aligned}$$

ข.  $E_{k_{\max}} = hf - W$

$$\begin{aligned} &= (6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(6.50 \times 10^{14} \text{ Hz}) - (2.4 \text{ eV})(1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV}) \\ &= 4.669 \times 10^{-20} \text{ J} \\ &= \frac{4.669 \times 10^{-20} \text{ J}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV}} \\ &= 0.2918 \text{ eV} \end{aligned}$$

**ตอบ** ก. ความถี่ขีดเริ่มของแสงที่ทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนคือ  $5.80 \times 10^{14}$  เฮิรตซ์

ข. พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนเท่ากับ  $4.67 \times 10^{-20}$  จูล หรือเท่ากับ 0.292 อิเล็กตรอนโวลต์

**ตัวอย่าง 19.6** ในการทดลองปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกของโลหะชนิดหนึ่ง พบว่าจะไม่เกิดกระแสโฟโตอิเล็กทริกเมื่อใช้แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 550 นาโนเมตร จงหาว่าจะต้องใช้ศักย์หยุดยั้งกี่โวลต์หากใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร

**แนวคิด** เมื่อใช้แสงความยาวคลื่นมากกว่า 550 นาโนเมตร จะไม่เกิดกระแสโฟโตอิเล็กตรอน แสดงว่าความยาวคลื่นที่มากที่สุด ( $\lambda$ ) ที่เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกได้คือ 550 นาโนเมตร หากมากกว่านี้จะไม่เกิดโฟโตอิเล็กทริก และสามารถหาฟังก์ชันงานได้จากสมการ (19.8) โดยเขียน  $f$  ให้อยู่ในรูป  $\frac{c}{\lambda}$  จะได้

วิธีทำ

$$\begin{aligned} W &= hf = \frac{hc}{\lambda} \\ &= \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}{550 \times 10^{-9} \text{ m}} \\ &= 3.614 \times 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

หาพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนจากสมการ (19.7b)

$$\begin{aligned} E_{k_{\max}} &= hf - W \\ &= \frac{hc}{\lambda} - W \\ &= \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}{400 \times 10^{-9} \text{ m}} - 3.614 \times 10^{-19} \text{ J} \\ &= 1.356 \times 10^{-19} \text{ J} \\ &= \frac{1.356 \times 10^{-19} \text{ J}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV}} \\ &= 0.848 \text{ eV} \end{aligned}$$

หาศักย์หยุดยั้งจากสมการ (19.9)

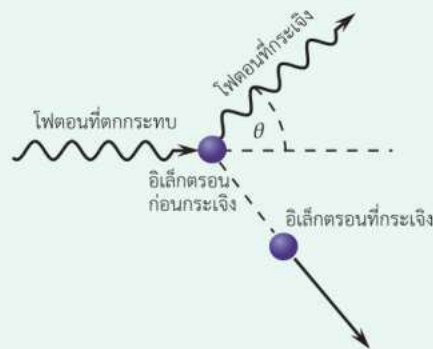
$$\begin{aligned} E_{k_{\max}} &= eV_s \\ V_s &= \frac{E_{k_{\max}}}{e} \\ &= \frac{0.848 \text{ eV}}{e} \\ &= 0.848 \text{ V} \end{aligned}$$

**ตอบ** ศักย์หยุดยั้งหากใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 400 นาโนเมตรเท่ากับ 0.85 โวลต์



### ความรู้เพิ่มเติม : ปรากฏการณ์คอมป์ตัน

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกมิใช่ปรากฏการณ์เดียวเท่านั้นที่แสดงให้เห็นว่าแสงประพฤติตัวเป็นอนุภาค อีกปรากฏการณ์หนึ่งที่สนับสนุนให้เห็นว่าแสงประพฤติตัวเป็นอนุภาค คือ **ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton effect)** นำเสนอโดย อาร์เทอร์ ฮอลลี คอมป์ตัน (Arthur Holly Compton) ใช้แนวคิดควอนตัมของพลังงานของแสงหรือโฟตอนมาอธิบายผลการกระเจิงของรังสีเอกซ์โดยแกรไฟต์ ซึ่งพิจารณาว่าเป็นการชนแบบยืดหยุ่นระหว่างโฟตอนและอิเล็กตรอนในอะตอมของแกรไฟต์ ทำให้สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ภายหลังเกิดการกระเจิงได้ ดังรูป ซึ่งตามทฤษฎีฟิสิกส์แบบฉบับ ความยาวคลื่นภายหลังการกระเจิงจะมีค่าคงเดิมเสมอ การค้นพบปรากฏการณ์คอมป์ตันส่งผลให้คอมป์ตันได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ร่วมกับ ซีที อาร์ วิลสัน (จากการคิดค้นเครื่องตรวจจับอนุภาคชนิดห้องหมอก หรือ cloud chamber) ในปี พ.ศ. 2470



รูป ปรากฏการณ์คอมป์ตัน





### คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 19.2

1. ค่าพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนมีค่าคงตัวหรือไม่ สำหรับโลหะแต่ละชนิด
2. ในการทดลองปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ความเข้มของแสงที่ตกกระทบผิวโลหะมีผลต่อความต่างศักย์หยุดยั้งหรือไม่ จงอธิบาย
3. ในช่วงการหาค่าความต่างศักย์หยุดยั้ง ขณะที่ยังอ่านได้ค่ากระแสไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ของโฟโตอิเล็กตรอนในวงจร หากนำค่าความต่างศักย์ขณะนั้น มาหาค่าของพลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอนเพื่อสามารถหาค่าฟังก์ชันงานที่เป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องในสมการโฟโตอิเล็กทริกได้หรือไม่
4. ในการทดลองโฟโตอิเล็กทริก ผู้ทดลองฉายแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะค่าหนึ่งไปตกกระทบผิวโลหะ พบว่าอิเล็กตรอนจำนวนหนึ่งหลุดออกจากผิวโลหะ ถ้าต้องการให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากผิวโลหะนี้มีจำนวนเพิ่มขึ้น และพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนแต่ละตัวเพิ่มขึ้น ผู้ทดลองควรทำอย่างไร



### แบบฝึกหัด 19.2

1. ฉายแสงความถี่ค่าหนึ่งตกกระทบผิวโลหะทองแดงซึ่งมีฟังก์ชันงาน 4.8 อิเล็กตรอนโวลต์ พบว่าความถี่นี้เป็นความถี่ขีดเริ่มของโลหะทองแดง ถ้าฉายแสงนี้ไปบนโลหะโซเดียม พบว่าความต่างศักย์หยุดยั้งมีค่า 2.4 โวลต์ โลหะโซเดียมมีฟังก์ชันงานเท่าใด
2. ฉายแสงที่มีความยาวคลื่น  $3.0 \times 10^{-7}$  เมตร ตกบนผิวโพแทสเซียมที่มีฟังก์ชันงาน 2.3 อิเล็กตรอนโวลต์ โฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมามีพลังงานจลน์สูงสุดเท่าใด
3. ฉายแสงที่มีความถี่  $1.10 \times 10^{15}$  เฮิร์ตซ์ ไปที่ผิวของโลหะหนึ่ง ถ้าความถี่ขีดเริ่มมีค่าเป็น  $5.69 \times 10^{14}$  เฮิร์ตซ์ จงหา
  - ก. ฟังก์ชันงานของโลหะนั้น
  - ข. พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน
4. แสงความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ตกกระทบผิวโพแทสเซียมที่มีฟังก์ชันงาน 2.3 อิเล็กตรอนโวลต์ จะมีอิเล็กตรอนหลุดออกมาหรือไม่ ถ้ามีพลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนเหล่านี้มีค่าเท่าใด และถ้าไม่มี พลังงานที่ต้องเพิ่มมีค่าอย่างน้อยเท่าใด
5. ในการทดลองปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก เมื่อฉายแสงตกกระทบผิวโลหะชนิดหนึ่ง พบว่าความต่างศักย์หยุดยั้งที่ใช้เท่ากับ 3.7 โวลต์ พลังงานจลน์สูงสุดของอิเล็กตรอนมีค่าเท่าใด ในหน่วยจูลและในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์

### 19.3 ทวิภาวะของคลื่นและอนุภาค

นักเรียนอาจเกิดคำถามในใจว่า ตกลงแล้วแสงเป็นคลื่นหรือเป็นอนุภาคกันแน่ ในบทที่ 10 นักเรียนได้ศึกษาสมบัติเชิงคลื่นของแสงพบว่า แสงมีพฤติกรรมการสะท้อน การหักเห การแทรกสอด และการเลี้ยวเบน เช่นเดียวกับคลื่นอื่น ๆ แต่ในหัวข้อที่ผ่านมา นักฟิสิกส์ไม่สามารถใช้สมบัติความเป็นคลื่นของแสงในการอธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก แต่กลับสามารถอธิบายได้โดยพิจารณาแสงแสดงสมบัติเป็นอนุภาคที่เรียกว่า โฟตอน ในทางกลับกัน อนุภาคจะแสดงพฤติกรรมเป็นคลื่นได้หรือไม่ จะได้ศึกษาต่อไปนี้

#### 19.3.1 สมมติฐานของเดอบรอยล์

ในปี พ.ศ. 2467 เดอ เบรย ได้เสนอสมมติฐานที่ปฏิวัติแนวคิดเดิมเกี่ยวกับอนุภาคในการทำงานว่า ในเมื่อแสงซึ่งประพฤติตัวเป็นคลื่น สามารถแสดงสมบัติของอนุภาคได้ สิ่งที่เป็นอนุภาค เช่น อิเล็กตรอน ก็น่าจะแสดงสมบัติของคลื่นได้เช่นกัน ตามสมมติฐานของเดอบรอยล์ (de Broglie's hypothesis) อนุภาคที่ประพฤติตัวเป็นคลื่นจะมีความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ซึ่งเรียกว่า ความยาวคลื่นเดอบรอยล์ (de Broglie wavelength) ซึ่งมีค่าขึ้นกับโมเมนตัม ( $p$ ) ของอนุภาคตามสมการ (19.10)

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (19.10)$$



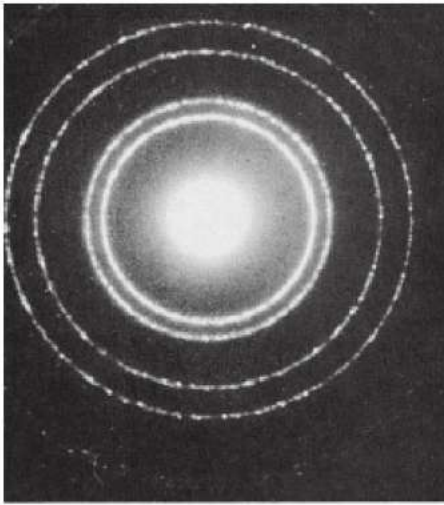
#### ความรู้เพิ่มเติม

ลุย วิกตอร์ เดอ เบรย (Louis Victor de Broglie ค.ศ. 1892-1987 หรือ พ.ศ. 2435-2530) หรือ เดอ เบรย นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ได้เสนอความคิดเกี่ยวกับอนุภาคอิเล็กตรอนมีสมบัติของคลื่น เดอ เบรย ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ใน พ.ศ. 2472

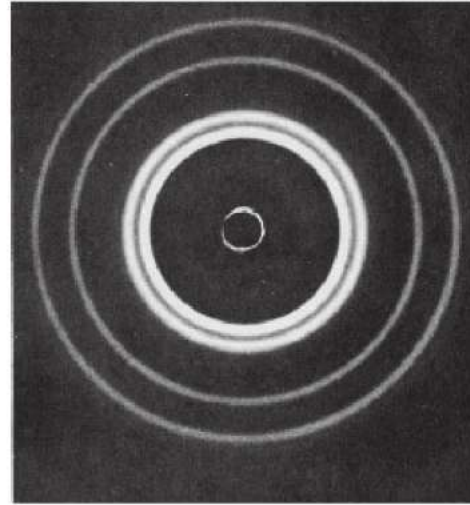


รูป เดอ เบรย

ในปี พ.ศ. 2470 คลินตัน โจเซฟ เดวิสสัน (Clinton Joseph Davisson) และ เลสเตอร์ ฮัลเบิร์ต เจอร์เมอร์ (Lester Halbert Germer) ได้ทำการทดลองพบว่า อิเล็กตรอนสามารถเลี้ยวเบนผ่านผลึกนิกเกิลได้และปรากฏลวดลายการแทรกสอดในลักษณะคล้ายกับลวดลายการแทรกสอดของคลื่นแสง ดังรูป 19.20 ซึ่งเป็น การยืนยันสิ่งที่เดอ บรอยล์ได้นำเสนอไว้



ก. ลวดลายจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน



ข. ลวดลายจากการเลี้ยวเบนของแสง

รูป 19.20 เปรียบเทียบลวดลายที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกับการเลี้ยวเบนของแสง

สมมติฐานของพลังค์ก็وبرกับแนวคิดของไอน์สไตน์และเดอ บรอยล์ ทำให้สรุปว่า คลื่นสามารถประพฤติตัวเป็นอนุภาคได้ ในทำนองกลับกัน อนุภาคก็สามารถประพฤติตัวเป็นคลื่นได้เช่นกัน โดยคลื่นที่มีความถี่  $f$  (หรือ ความยาวคลื่น  $\lambda$ ) จะมีพลังงาน  $E = hf$  ส่วนอนุภาคที่มีโมเมนตัม  $p$  จะมีความยาวคลื่น  $\lambda = \frac{h}{p}$  สมบัตินี้เรียกว่า **ทวิภาวะของคลื่นและอนุภาค (wave-particle duality)**

**ตัวอย่าง 19.7** อิเล็กตรอน มวล  $9.11 \times 10^{-31}$  กิโลกรัม ที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว  $1.00 \times 10^7$  เมตรต่อวินาที จะมีความยาวคลื่นเดอบรอยล์เท่าใด

**แนวคิด** หาโมเมนตัมของอิเล็กตรอนจาก  $p = mv$  แล้วหาความยาวคลื่นเดอบรอยล์ของอิเล็กตรอน จากสมการ (19.10)

**วิธีทำ** โมเมนตัมของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว  $1.00 \times 10^7$  เมตรต่อวินาที มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} p &= mv \\ &= (9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(1.00 \times 10^7 \text{ m/s}) \\ &= 9.11 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s} \end{aligned}$$

แทนค่า  $p$  ในสมการ (19.10) ได้

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{h}{p} \\ &= \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})}{(9.11 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s})} \\ &= 7.273 \times 10^{-11} \text{ m} \end{aligned}$$

**ตอบ** ความยาวคลื่นเดอบรอยล์เท่ากับ  $7.28 \times 10^{-11}$  เมตร

**ตัวอย่าง 19.8** ยิงก้อนหินมวล 200 กรัม ด้วยอัตราเร็ว 30.0 เมตรต่อวินาที ความยาวคลื่นเดอบรอยล์ของก้อนหินเป็นเท่าใด

**แนวคิด** หาโมเมนตัมของก้อนหินจาก  $p = mv$  แล้วหาความยาวคลื่นเดอบรอยล์ของก้อนหิน จากสมการ (19.10)

**วิธีทำ** โมเมนตัมของก้อนหินที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 30.0 เมตรต่อวินาที มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} p &= mv \\ &= (0.200 \text{ kg})(30.0 \text{ m/s}) \\ &= 6.00 \text{ kg} \cdot \text{m/s} \end{aligned}$$

แทนค่า  $p$  ในสมการ (19.10) ได้

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{h}{p} \\ &= \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})}{(6.00 \text{ kg} \cdot \text{m/s})} \\ &= 1.104 \times 10^{-34} \text{ m} \end{aligned}$$

**ตอบ** ความยาวคลื่นเดอบรอยล์เท่ากับ  $1.10 \times 10^{-34}$  เมตร



### ข้อสังเกต

ในบทเรื่องคลื่นที่ผ่านมา นักเรียนได้ทราบว่า เราจะสังเกตการเลี้ยวเบนของคลื่นได้อย่างชัดเจน หากสิ่งกีดขวางหรือช่องเปิดมีระดับขนาดไม่แตกต่างจากความยาวคลื่นมากนัก จากตัวอย่าง 19.7 ความยาวคลื่นเดอบรอยล์ของอิเล็กตรอนมีค่าในระดับขนาดเดียวกับระยะห่างระหว่างอะตอม ในผลึก เราจึงสังเกตการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในผลึกได้ แต่จากตัวอย่าง 19.8 ความยาวคลื่นเดอบรอยล์ของก้อนหินมีค่าน้อยมากในชีวิตประจำวันเราไม่มีสิ่งกีดขวางหรือช่องเปิดที่มีขนาดใกล้เคียงกับค่าความยาวคลื่นดังกล่าว เราจึงไม่สามารถสังเกตหรือตรวจวัดการเลี้ยวเบนของวัตถุขนาดใหญ่ที่พบในชีวิตประจำวันได้



### ชวนคิด

จงเปรียบเทียบความยาวคลื่นเดอบรอยล์ระหว่างอิเล็กตรอน ( $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ) และโปรตอน ( $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ) ในกรณีต่อไปนี้

- ก. อัตราเร็วเท่ากัน
- ข. โมเมนตัมเท่ากัน
- ค. พลังงานจลน์เท่ากัน

### 19.3.2 กลศาสตร์ควอนตัม และการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์

หลังจากสมมติฐานของเดอบรอยล์ ประสบความสำเร็จในการอธิบายอิเล็กตรอนมีพฤติกรรมเป็นคลื่นได้ นักฟิสิกส์หลายคนจึงพยายามใช้สมมติฐานนี้สร้างทฤษฎีเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในอะตอม จนปี พ.ศ. 2468 นักฟิสิกส์ได้รวบรวมแนวคิดและทฤษฎีต่าง ๆ จนเกิดเป็นกลศาสตร์ควอนตัม ซึ่งเป็นทฤษฎีทางฟิสิกส์ที่ใช้อธิบายธรรมชาติในระดับอะตอมได้อย่างถูกต้อง

กลศาสตร์ควอนตัมประสบความสำเร็จในการอธิบายอะตอมไฮโดรเจนอย่างดียิ่ง การแก้สมการคลื่นของชเรอดิงเงอร์ ให้ผลลัพธ์ที่แสดงให้เห็นความไม่ต่อเนื่องของพลังงานและโมเมนตัมเชิงมุมของอิเล็กตรอนตรงกับที่ได้จากสมมติฐานในทฤษฎีอะตอมของโบร์ นอกจากนี้กลศาสตร์ควอนตัมยังสามารถคำนวณระดับพลังงานชั้นต่าง ๆ ของอะตอมที่มีอิเล็กตรอนมากกว่าหนึ่งตัวขึ้นไปได้ ซึ่งสอดคล้องกับเส้นสเปกตรัมที่ได้จากอะตอมนั้น ๆ จึงสรุปได้ว่า กลศาสตร์ควอนตัมสามารถอธิบายอะตอมได้กว้างขวางกว่าและดีกว่าทฤษฎีอะตอมของโบร์มาก จึงเป็นที่ยอมรับกันมาจนถึงปัจจุบัน ซึ่งนอกจากชเรอดิงเงอร์แล้ว ยังมีนักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ ไฮเซนเบิร์ก ซึ่งเป็นผู้มีส่วนสำคัญในการพัฒนากลศาสตร์ควอนตัม



#### ความรู้เพิ่มเติม



รูป ชเรอดิงเงอร์

แอร์วิน ชเรอดิงเงอร์ (Erwin Schrödinger ค.ศ. 1887-1961 หรือ พ.ศ. 2430 – 2504) หรือชเรอดิงเงอร์ นักฟิสิกส์ชาวออสเตรีย ทำงานเกี่ยวกับการพัฒนากลศาสตร์ควอนตัม ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ร่วมกับ พอล ดิแรก (Paul Adrien Maurice Dirac) ใน พ.ศ. 2476



รูป ไฮเซนเบิร์ก

แวร์เนอร์ คาร์ล ไฮเซนเบิร์ก (Werner Karl Heisenberg ค.ศ. 1901 – 1976 หรือ พ.ศ. 2444 – 2519) หรือไฮเซนเบิร์ก นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันเป็นผู้หนึ่งที่มีส่วนในการพัฒนากลศาสตร์ควอนตัม เขาได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ใน พ.ศ. 2475

จากการต่อยอดองค์ความรู้ด้านฟิสิกส์ควอนตัมทำให้วิทยาการและเทคโนโลยีพัฒนาไปได้อย่างรวดเร็วและกว้างขวาง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์แก่มนุษย์ในหลากหลายด้าน เช่น การประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscope) การประดิษฐ์แสงเลเซอร์ (laser) หรือ การประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (electronic device)

### กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

จากการที่อิเล็กตรอนสามารถแสดงสมบัติของคลื่นโดยเป็นคลื่นที่มีความยาวน้อยกว่าแสง ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปกระทบวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก ๆ จะเกิดการสะท้อน และการที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จึงเป็นแนวทางในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมี 2 ชนิด ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope หรือ TEM) ดังรูป 19.21 ก. และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope หรือ SEM) ดังรูป 19.21 ข. ซึ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถมีกำลังขยายได้สูงถึง 4 ล้านเท่า และสามารถให้ความละเอียดของภาพ (resolution) ได้ถึง 0.5 นาโนเมตร ทำให้สามารถส่องดูวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ เช่น ไวรัสโปลิโอจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ดังรูป 19.22 ก. และ ละอองเรณูของดอกทานตะวันจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูป 19.22 ข.

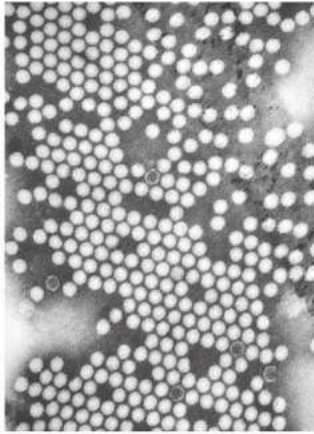


ก. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

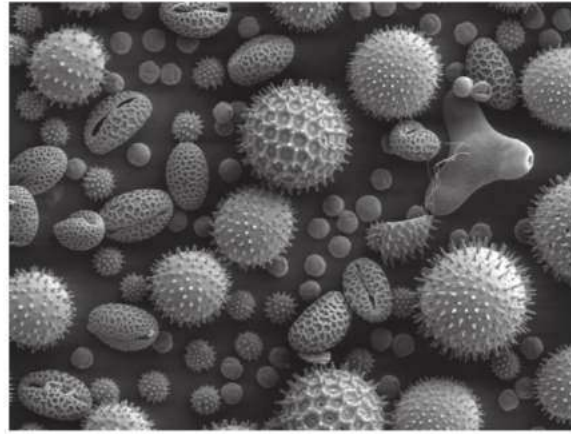


ข. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

รูป 19.21 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ก.แบบส่องผ่าน ข.แบบส่องกราด



ก. ไวรัสโปลิโอจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



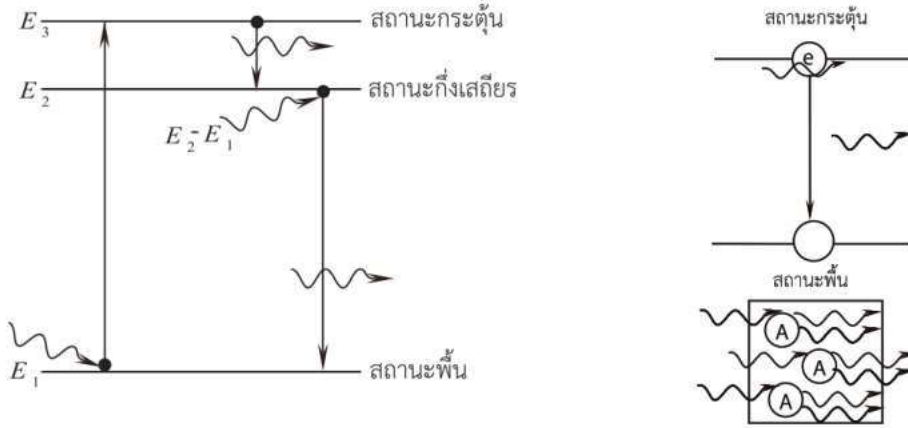
ข. ละอองเรณูของดอกทานตะวันจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

รูป 19.22 ตัวอย่างภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและแบบส่องกราด

### เลเซอร์

เลเซอร์ (laser : light amplification by stimulated emission of radiation) เป็นกระบวนการผลิตแสงที่มนุษย์ทำให้เกิดขึ้น แสงเลเซอร์ (laser light) มีสมบัติเป็นแสงอาพันธ์ ความถี่เดียว และใกล้เคียงกับลำแสงขนาน ในกระบวนการผลิตแสงเลเซอร์ อะตอมจะถูกทำให้อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเป็นเวลานาน โดยยังไม่กลับคืนสู่สถานะพื้น เรียกสถานะของอะตอมนี้ว่า **สถานะกึ่งเสถียร (metastable)** ดังรูป 19.23 ก. อิเล็กตรอนในอะตอมที่ถูกกระตุ้นให้มาอยู่ในสถานะกึ่งเสถียรจะอยู่ได้นานมากกว่า  $10^{-8}$  วินาที จนกระทั่งมีโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับโฟตอนที่ถูกดูดกลืนมากระตุ้น อะตอมจะกลับคืนสู่สถานะพื้น โดยการปล่อยโฟตอนที่มีความถี่ เฟส และมีทิศการเคลื่อนที่ในทิศเดียวกับโฟตอนที่มากระตุ้น ดังรูป 19.23 ข. เรียกการปล่อยลักษณะนี้ว่า **การปล่อยโดยการกระตุ้น (stimulated emission) หรือการปล่อยโดยการเหนี่ยวนำ (induced emission)** ซึ่งเสนอโดยไอน์สไตน์ ในปีพ.ศ. 2460 และเรียกโฟตอนที่ปล่อยออกมาว่า แสงเลเซอร์



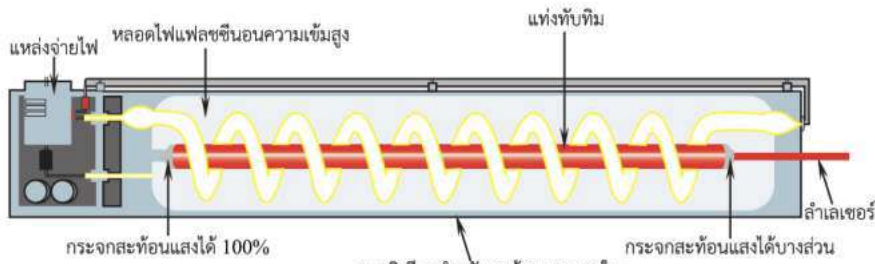


ก. อะตอมที่ใช้ในการผลิตเลเซอร์ จะต้องอยู่ในสถานะกึ่งเสถียร

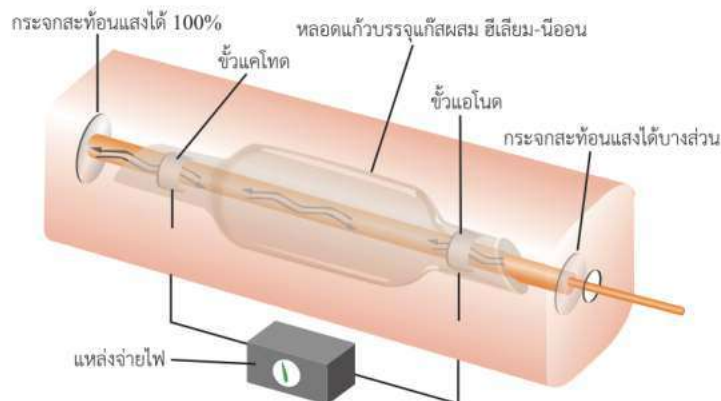
ข. โฟตอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเลเซอร์

รูป 19.23 การผลิตแสงเลเซอร์

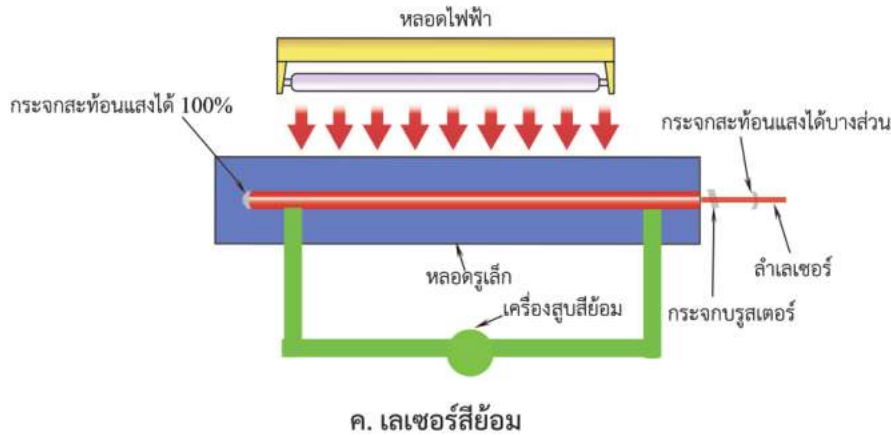
เลเซอร์มี 3 ชนิด คือ เลเซอร์สถานะของแข็ง (solid state laser) เช่น เลเซอร์ทับทิม ดังรูป 19.24 ก. เลเซอร์แก๊ส (gas laser) เช่น เลเซอร์แก๊สฮีเลียม-นีออน ดังรูป 19.24 ข. และเลเซอร์เคมี (chemical laser) เช่น เลเซอร์สีย้อม ดังรูป 19.24 ค. จากสมบัติของแสงเลเซอร์ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ได้หลากหลาย เช่น เครื่องเล่น CD DVD เครื่องพิมพ์เลเซอร์ ตัวชี้เลเซอร์ หรือ เลเซอร์พอยเตอร์ การวัดระยะทางระหว่างผิวโลกกับผิวดวงจันทร์ในการศึกษาด้านดาราศาสตร์ หรือ การตัด เจาะ ชิ้นงานโลหะ ด้วยความแม่นยำสูง



ก. เลเซอร์ทับทิม



ข. เลเซอร์แก๊สฮีเลียม-นีออน



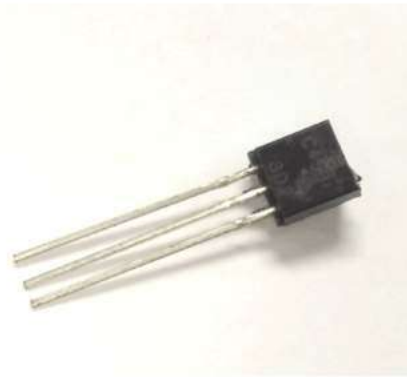
รูป 19.24 การทำงานของเลเซอร์ชนิดต่าง ๆ

### อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ภายในอุปกรณ์ที่ใช้งานในชีวิตประจำวัน เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์เคลื่อนที่ ประกอบด้วย ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญ เช่น ไดโอด (diode) ดังรูป 19.25 ก. และ ทรานซิสเตอร์ (transistor) ดังรูป 19.25 ข. ซึ่งมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำไฟฟ้าและฉนวนไฟฟ้า เรียกว่า สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) เช่น ซิลิกอน โดยมีการเจือสารลงไปในสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดเป็น สารกึ่งตัวนำชนิดบวก (p-type semiconductor) และ สารกึ่งตัวนำชนิดลบ (n-type semiconductor) ขึ้นอยู่กับสารที่นำมาเจือ โดยทั่วไปอัตราส่วนจำนวนอะตอมของสารที่นำมาเจือกับจำนวนอะตอมของสารกึ่งตัวนำมีค่าประมาณ 1 ต่อ 1 000 000 จากความรู้ทางด้านเคมี อะตอมของสารกึ่งตัวนำมีจำนวนเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 4 เมื่อทำการเจือด้วยสารที่อะตอมมีจำนวนเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 3 ลงไปในสารกึ่งตัวนำ เช่น การเจือ อะลูมิเนียมลงไปในซิลิกอน จะทำให้ได้สารกึ่งตัวนำชนิดบวก ซึ่งมีระดับพลังงานที่เพิ่มขึ้นมาอยู่ใกล้กับระดับพลังงานของอิเล็กตรอนระดับนอกสุด แต่อยู่ไกลจากแถบนำไฟฟ้า (conduction band) ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เมื่ออิเล็กตรอนอยู่ จะสามารถเคลื่อนที่ไปยังอะตอมอื่นได้ ทำให้มีโอกาสที่อิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้นนอกสุด (แถบเวเลนซ์) สามารถเปลี่ยนระดับพลังงานมาที่ชั้นนี้ได้ จึงเสมือนมีประจุบวกหรือ โฮล (hole) อยู่ในระดับพลังงาน ดังรูป 19.26 ก. เมื่อทำการเจือด้วยสารที่อะตอมมีจำนวนเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 5 ลงไปในสารกึ่งตัวนำ เช่น การเจือฟอสฟอรัสลงไปในซิลิกอน จะทำให้ได้สารกึ่งตัวนำชนิดลบ ซึ่งมีระดับพลังงานที่เพิ่มขึ้นมาอยู่ใกล้จากระดับพลังงานชั้นของอิเล็กตรอนระดับนอกสุด แต่อยู่ใกล้แถบนำไฟฟ้า ทำให้มีโอกาสที่อิเล็กตรอนในระดับพลังงานที่เพิ่มขึ้นมานี้สามารถเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับอิเล็กตรอนในตัวนำไฟฟ้าได้ ดังรูป 19.26 ข. ในชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีการเชื่อมสารกึ่งตัวนำชนิดบวก กับสารกึ่งตัวนำชนิดลบในหลายรูปแบบ เพื่อสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระแสไฟฟ้าตามจุดประสงค์ที่แตกต่างกันไป

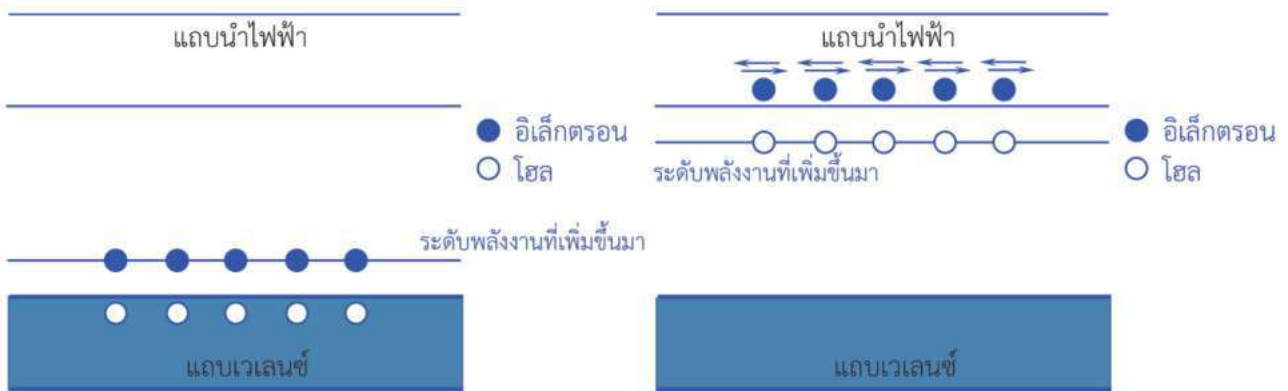


ก. ตัวอย่างของไดโอด



ข. ตัวอย่างของทรานซิสเตอร์

รูป 19.25 ตัวอย่างของไดโอดและทรานซิสเตอร์



ก. ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดบวก

ข. ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดลบ

รูป 19.26 ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ก.ชนิดบวก และ ข.ชนิดลบ



### คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 19.3

1. ความยาวคลื่นเดอบรอยล์ขึ้นอยู่กับปริมาณใด
2. วัตถุขนาดใหญ่ที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวันจะแสดงสมบัติคลื่นให้สังเกตได้หรือไม่ อธิบาย
3. ตามสมมติฐานของเดอบรอยล์ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุและกำลังเคลื่อนที่สามารถแสดงสมบัติเป็นคลื่นได้ กรณีนิวตรอนซึ่งเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุและกำลังเคลื่อนที่ จะแสดงสมบัติเป็นคลื่นได้หรือไม่ เพราะเหตุใด
4. อิเล็กตรอนสามารถแสดงสมบัติความเป็นคลื่นหรืออนุภาคได้พร้อมกัน หรือไม่ อธิบาย
5. จงยกตัวอย่างการประยุกต์ความรู้ทางกลศาสตร์ควอนตัมในการนำมาใช้ประโยชน์ 2 ข้อ



### แบบฝึกหัด 19.3

1. โพรตอนที่มีมวล  $1.67 \times 10^{-27}$  กิโลกรัม และกำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว  $5.0 \times 10^7$  เมตรต่อวินาที มีความยาวคลื่นเดอบรอยล์เท่าใด
2. รถแข่งที่มีมวล (รวมผู้ขับ) 650 กิโลกรัม ขณะกำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 300 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีความยาวคลื่นเดอบรอยล์เท่าใด
3. ยุงกำลังบินด้วยอัตราเร็ว 0.05 เมตรต่อวินาที ถ้าความยาวคลื่นเดอบรอยล์ของยุงมีค่าเท่ากับ  $2.60 \times 10^{-27}$  เมตร ยุงตัวนี้มีมวลเท่าใด (ตอบในหน่วยมิลลิกรัม)
4. ลูกบอลลูกหนึ่งมีมวล 0.40 กิโลกรัม กำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 10 เมตรต่อวินาที
  - ก. จงหาความยาวคลื่นเดอบรอยล์
  - ข. ความยาวคลื่นเดอบรอยล์ของลูกบอลนี้จะวัดในห้องทดลองได้หรือไม่ เพราะเหตุใด



## สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

### 19.1 สมมติฐานของพลังค์และทฤษฎีอะตอมของโบร์

- วัตถุดำ คือ วัตถุในอุดมคติที่มีการดูดกลืนและแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์
- การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุดำเป็นแบบสเปกตรัมต่อเนื่อง โดยความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงสุดจะลดลง เมื่ออุณหภูมิของวัตถุดำสูงขึ้น
- สมมติฐานของพลังค์ มีใจความว่า พลังงานที่วัตถุดำดูดกลืนหรือแผ่ออกมามีค่าได้เฉพาะบางค่าเท่านั้น และค่านี้จะเป็นจำนวนเต็มเท่าของควอนตัมของพลังงาน ตามสมการ  $E = nhf$
- ทฤษฎีอะตอมไฮโดรเจนของโบร์ มีใจความว่า อิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสของไฮโดรเจน จะอยู่ในวงโคจรเฉพาะที่มีรัศมีบางค่า โดยไม่แผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อมีโมเมนตัมเชิงมุมตามสมการ  $mvr = n \frac{h}{2\pi}$  และมีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนวงโคจรจากชั้นนอกสู่ชั้นใน ตามสมการ  $hf = E_i - E_f$
- ระดับพลังงานของอะตอมไฮโดรเจนเป็นไปตามสมการ  $E_n = -\frac{1}{2} \frac{mk^2e^4}{h^2} \left( \frac{1}{n^2} \right)$
- ความยาวคลื่นของแสงในสเปกตรัมแบบเส้นตามทฤษฎีอะตอมของโบร์ คำนวณได้จากสมการ  $\frac{1}{\lambda} = R_H \left[ \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right]$

### 19.2 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

- ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก เป็นปรากฏการณ์ที่มีอิเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวโลหะเมื่อฉายแสงที่มีความถี่มากกว่าหรือเท่ากับความถี่ขีดเริ่ม  $f_0$  ของโลหะชนิดนั้น
- พลังงานโฟตอน พลังงานของโลหะ และพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน มีความสัมพันธ์ตามสมการ  $hf = W + E_{k_{\max}}$  โดย  $W = hf_0$
- ความต่างศักย์ที่น้อยที่สุดที่ทำให้ไม่มีกระแสโฟโตอิเล็กตรอนเกิดขึ้นเรียกว่า ศักย์หยุดยั้ง และพลังงานศักย์ไฟฟ้ามามีค่าเท่ากับพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน ตามสมการ  $E_{k_{\max}} = eV_s$

### 19.3 ทวิภาวะของคลื่นและอนุภาค

- อนุภาคสามารถประพฤติตัวเป็นคลื่นได้ และคลื่นสามารถประพฤติตัวเป็นอนุภาคได้ โดยอนุภาคที่มีโมเมนตัม  $p$  จะมีความยาวคลื่นเดอบรอยล์ตามสมการ  $\lambda = \frac{h}{p}$  ส่วนคลื่นที่มีความถี่ (หรือความยาวคลื่น  $\lambda$ ) จะมีพลังงานควอนตัม  $E = hf$  สมบัติดังกล่าวนี้ เรียกว่า ทวิภาวะของคลื่นและอนุภาค

### แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 19

#### ?? | คำถาม

- จากแนวคิดการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุดำ นักเรียนไม่สามารถมองเห็นสิ่งของต่าง ๆ ในห้องเรียนที่ปิดมิดชิด และไม่มีแสงสว่าง เพราะสิ่งของภายในห้องเรียนนั้น ไม่มีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ข้อความดังกล่าวถูกต้องหรือไม่ เพราะเหตุใด
- จากการทดลองปล่อยอนุภาคแอลฟาซึ่งมีประจุบวกไปยังแผ่นทองคำบาง พบว่าอนุภาคแอลฟาบางส่วนเบี่ยงเบนไปจากแนวเดิม และบางส่วนสะท้อนกลับออกมา เพราะเหตุใด
- สมมติให้ระดับพลังงานต่าง ๆ ของอะตอม เป็นดังรูป

เลขควอนตัม  $n$

$n = 4$  \_\_\_\_\_

$n = 3$  \_\_\_\_\_

$n = 2$  \_\_\_\_\_

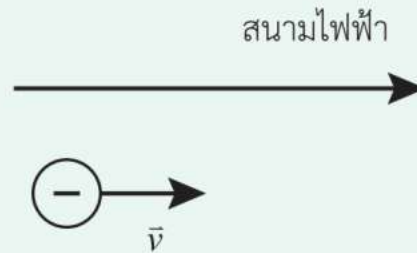
$n = 1$  \_\_\_\_\_

รูป ประกอบคำถามข้อ 3

จงบอกจำนวนเส้นสเปกตรัมทั้งหมดที่อะตอมนี้สามารถเปล่งออกมาได้ เมื่ออะตอมอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น

- แสงที่มีความถี่และความเข้มค่าหนึ่งตกกระทบผิวโลหะชนิดหนึ่ง จะเกิดโฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกมา เมื่อเพิ่มความถี่ของแสง ข้อใดต่อไปนี้เป็นข้อที่ถูกต้อง เพราะเหตุใด
  - จำนวนโฟโตอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น
  - พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น
  - ทั้งจำนวนและพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น

5. แสงที่มีความถี่และความเข้มค่าหนึ่งตกกระทบผิวโลหะชนิดหนึ่ง จะเกิดโฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกมา เมื่อเพิ่มความเข้มของแสง ข้อใดต่อไปนี้เป็นข้อที่ถูกต้อง เพราะเหตุใด
  - ก. จำนวนโฟโตอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น
  - ข. พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น
  - ค. ทั้งจำนวนและพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น
6. แสงความถี่ค่าหนึ่งตกกระทบผิวโลหะต่างชนิดกัน จะให้โฟโตอิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์สูงสุดเท่ากันหรือไม่ เหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น
7. ในการทดลองปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ความเข้มของแสงที่ตกกระทบผิวโลหะมีผลต่อความต่างศักย์หยุดยั้งหรือไม่ อธิบาย
8. โฟโตอิเล็กตรอน สมการโฟโตอิเล็กทริกและฟังก์ชันงาน มีความสัมพันธ์กันอย่างไรในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก จงอธิบาย
9. อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า ดังรูป ความยาวคลื่นเดอบรอยล์ของอิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร



รูป ประกอบคำถามข้อ 9

### Ⓣ | ปัญหา

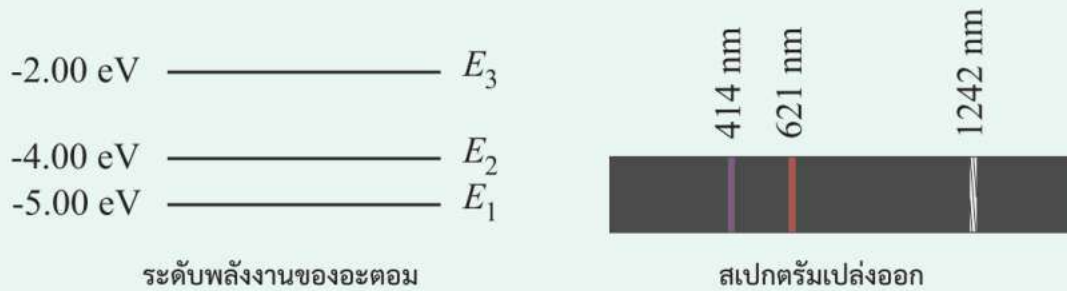
1. ถ้าควอนตัมของพลังงานของแสงที่ตามองเห็นได้มีพลังงาน  $3.62 \times 10^{-19}$  จูล แสงที่เห็นนี้มีสีอะไร
2. อะตอมหนึ่ง มีระดับพลังงาน ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 2

เมื่อถูกกระตุ้นแล้ว จะปลดปล่อยพลังงานออกมา ทำให้เกิดสเปกตรัมแบบเส้น 3 เส้น จงระบุค่าความยาวคลื่นของสเปกตรัมทั้งสามเส้น

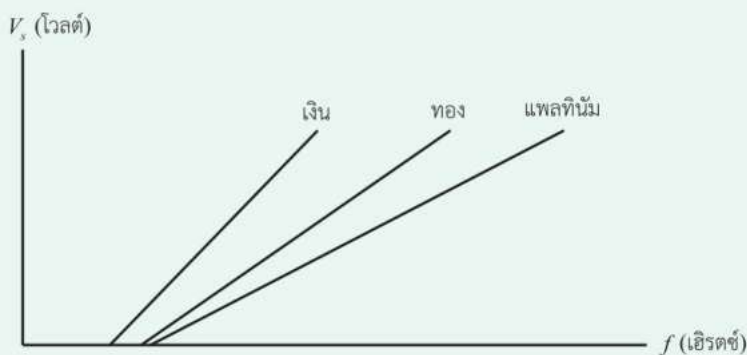
- ถ้าอิเล็กตรอนในแบบจำลองอะตอมไฮโดรเจนของโบร์อยู่ห่างจากนิวเคลียสเป็นระยะ 25 เท่าของรัศมีโบร์ แสดงว่าอิเล็กตรอนนี้อยู่ที่ระดับพลังงานเท่าใด
- อะตอมหนึ่ง มีระดับพลังงาน ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 4

เมื่อถูกกระตุ้นแล้ว จะปลดปล่อยพลังงานออกมา ทำให้เกิดเส้นสเปกตรัม 3 เส้น ถ้าต้องการกระตุ้นอะตอมนี้ จากสถานะพื้นไปยังสถานะถูกกระตุ้น จะต้องใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นเท่าใด

- จงหาความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกดูดกลืนหรือเปล่งออกมาจากอะตอมไฮโดรเจน เมื่ออะตอมเปลี่ยนระดับพลังงานจาก  $n = 1$  ไปยัง  $n = 3$  และจาก  $n = 6$  ไปยัง  $n = 3$
- ฉายแสงที่มีความยาวคลื่น  $2.5 \times 10^{-7}$  เมตร ตกบนผิวซีเซียมที่มีฟังก์ชันงาน 2.1 อิเล็กตรอนโวลต์ โฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมามีพลังงานจลน์สูงสุดเท่าใด
- ในการทดลองโฟโตอิเล็กทริก พบว่าได้ผลการทดลอง ดังรูป



ผลการทดลองนี้ถูกต้องหรือไม่ เพราะเหตุใด



8. กำหนดให้ โลหะ A B และ C มีค่าฟังก์ชันงานเท่ากับ 1.035 อิเล็กตรอนโวลต์ 2.070 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 4.140 อิเล็กตรอนโวลต์
- ก. จงหาความถี่ขีดเริ่มของโลหะทั้ง 3 ชนิด
- ข. วาดกราฟระหว่างความต่างศักย์หยุดยั้งกับความถี่ของโฟตอนที่ตกกระทบแผ่นโลหะ โดยระบุชนิดของโลหะและความถี่ขีดเริ่ม ลงในกราฟแต่ละเส้น
9. เมื่อฉายแสงที่มีความถี่  $8.5 \times 10^{14}$  เฮิร์ตซ์ ไปที่ธาตุต่อไปนี้

ธาตุ	ฟังก์ชันงาน $W$ (eV)
แบเรียม	2.6
อะลูมิเนียม	4.2
เงิน	4.6
ทองคำ	5.3

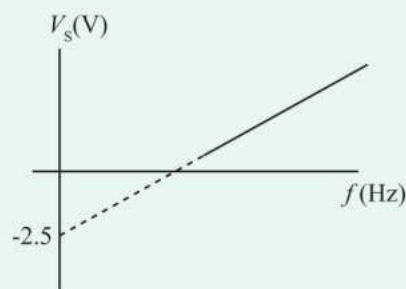
จะเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกกับธาตุใด

10. ในการทดลองปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ถ้าโลหะที่ใช้มีฟังก์ชันงานเท่ากับ  $1.1 \times 10^{-19}$  จูล โฟตอน ของแสงที่มีความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวโลหะนี้ด้วยความเร็วสูงสุดเท่าใด และความต่างศักย์หยุดยั้งของการทดลองนี้มีค่าเท่าใด
11. คนที่อยู่กลางแจ้งในตอนกลางวันเป็นเวลานานๆจะทำให้ผิวหนังคล้ำ จากการศึกษาพบว่าพลังงานโฟตอนของแสงแดดที่ทำให้ผิวหนังคล้ำ มีค่าประมาณ 3.50 อิเล็กตรอนโวลต์ จงหาความยาวคลื่นของโฟตอนและความยาวคลื่นของโฟตอนที่คำนวณได้นี้ อยู่ในช่วงรังสีชนิดใดในสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
12. ฟังก์ชันงานของโลหะชนิดหนึ่งมีค่า  $3.3 \times 10^{-19}$  จูล
- ก. จงหาความถี่ต่ำสุดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกกับโลหะนี้
- ข. เมื่อให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อไปนี้ตกกระทบโลหะจะเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกหรือไม่
- (1) คลื่นที่มีความยาวคลื่น  $5.0 \times 10^{-7}$  เมตร
  - (2) คลื่นที่มีความถี่  $4.0 \times 10^{14}$  เฮิร์ตซ์
13. โฟตอนของรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่น 30 พิโกเมตร จะมีความถี่และพลังงานเท่าใด
14. โฟตอนของรังสีชนิดหนึ่งมีพลังงาน 24.8 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จะมีความถี่และความยาวคลื่นเท่าใด
15. ฟังก์ชันงานของทองคำเท่ากับ 5.3 อิเล็กตรอนโวลต์ จงหาความถี่ขีดเริ่มของ โฟตอนที่ใช้สำหรับทองคำ แสงที่ตามองเห็นจะทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนจากทองคำได้หรือไม่
16. พิจารณา โปรตอน อิเล็กตรอน และนิวเคลียสของฮีเลียม ที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากัน จงหาลำดับความยาวคลื่นเดอบรอยล์จากน้อยไปมาก

17. โฟตอนและอิเล็กตรอนที่ประพุดิตัวเป็นคลื่นมีความยาวคลื่น 0.2 นาโนเมตร จะมีโมเมนตัมและพลังงานเท่าใด
18. ร่างกายมนุษย์สามารถแผ่รังสีอินฟราเรดได้ ถ้าความยาวคลื่นสูงสุดของอินฟราเรดที่แผ่ออกมามีค่า 9350 นาโนเมตร ความถี่ของพลังงานของอินฟราเรดที่ร่างกายมนุษย์แผ่ออกมามีพลังงานเท่าใด
19. อิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจนอยู่ในสถานะพื้น ตามทฤษฎีอะตอมของโบร์ สถานะนี้จะมีพลังงาน  $-13.6$  อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานจลน์และพลังงานศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานนี้มีค่าเท่าใด

### ปัญหาท้าทาย

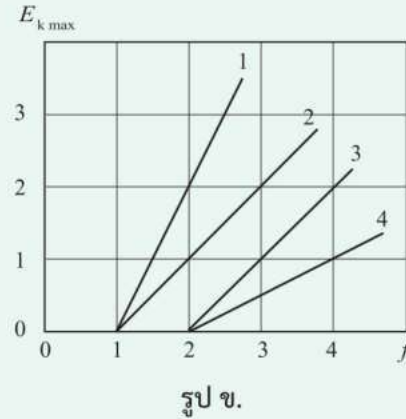
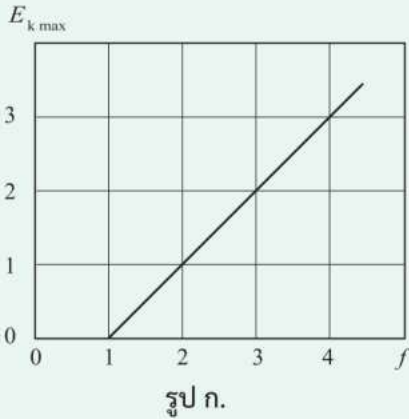
20. รังสีอัลตราไวโอเล็ตความเข้ม 0.05 วัตต์ต่อตารางเมตร ตกกระทบตั้งฉากกับผิวโลหะชนิดหนึ่งที่มีฟังก์ชันงาน 5.30 อิเล็กตรอนโวลต์ และโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมามีอัตราเร็ว  $4.2 \times 10^5$  เมตรต่อวินาที โฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร ทุก 1 วินาที มีจำนวนเท่าใด (สมมติว่าโฟตอนของรังสีอัลตราไวโอเล็ตถูกดูดกลืนทั้งหมด)
21. แสงความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร ตกกระทบผิวโพแทสเซียมที่มีฟังก์ชันงาน 2.3 อิเล็กตรอนโวลต์ จะมีอิเล็กตรอนหลุดออกมาหรือไม่ ถ้ามี พลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอนมีค่าเท่าใด และถ้าไม่มี พลังงานที่ต้องเพิ่มมีค่าเท่าใด
22. ในการทดลองปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก โดยการฉายแสงความถี่  $f$  ไปตกกระทบผิวโลหะชนิดหนึ่ง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์หยุดยั้ง ( $V_s$ ) กับความถี่แสง  $f$  เป็นดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 22

เมื่อโฟตอนพลังงาน  $3.6 \times 10^{-19}$  จูล ตกกระทบแผ่นโลหะ จะมีอิเล็กตรอนหลุดออกมาหรือไม่

23. ในการทดลองปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกโดยให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเข้มคงตัว  $I_0$  แต่มีความถี่ต่างๆ ตกกระทบโลหะชนิดหนึ่ง พบว่าพลังงานจลน์สูงสุด  $E_{k \max}$  ของโฟโตอิเล็กตรอน และความถี่  $f$  ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบ มีความสัมพันธ์ดังกราฟรูป ก. จงใช้กราฟรูป ข. (ซึ่งมีสเกลเดียวกับรูป ก.) ตอบคำถามต่อไปนี้



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 23

- ก. ถ้าความเข้มเพิ่มเป็น  $2I_0$  ความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_{k \max}$  และ  $f$  จะเป็นเส้นใด  
 ข. ถ้าความเข้มเป็น  $I_0$  เท่าเดิม แต่เคลือบผิวโลหะเดิมด้วยโลหะใหม่ที่มีฟังก์ชันงานเป็น 2 เท่าของโลหะเดิม ความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_{k \max}$  และ  $f$  จะเป็นเส้นใด
24. ในการศึกษาปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ผู้ทดลองได้บันทึกความถี่  $f$  และความต่างศักย์หยุดยั้ง ( $V_s$ ) ดังตาราง

$f (\times 10^{14} \text{ Hz})$	12.0	9.5	8.2	5.5
$V_s$ (V)	3.00	2.10	1.60	0.50

- ก. เขียนกราฟระหว่าง  $f$  กับ  $V_s$  โดยให้  $f$  อยู่บนแกนนอนและ  $V_s$  อยู่บนแกนตั้ง  
 ข. จากกราฟในข้อ ก. ความถี่ขีดเริ่ม ค่าคงตัวพลังค์และฟังก์ชันงานมีค่าประมาณเท่าใด
25. จงเปรียบเทียบความยาวคลื่นเดอบรอยล์ของอิเล็กตรอนและนิวเคลียสไฮโดรเจนที่ถูกเร่งด้วยความต่างศักย์ 300 โวลต์ เท่ากัน กำหนดให้มวลของนิวเคลียสไฮโดรเจนเท่ากับ  $1.67 \times 10^{-27}$  กิโลกรัม

บทที่



ipst.mc/11069

## 20

ฟิลิกส์นิวเคลียร์และฟิลิกส์อนุภาค



อัญมณีบางชนิด เมื่อได้รับการฉายรังสี เช่น รังสีนิวตรอน หรือ รังสีแกมมา จะทำให้มีสีและความแวววาวเปลี่ยนไปจากเดิม ทำให้มีมูลค่าเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น โทแพซ (topaz) ที่ปกติมีสีฟ้าอ่อน และยังไม่มีประกายสวยงาม เมื่อถูกฉายด้วยรังสีนิวตรอน จะทำให้มีสีฟ้าเข้มเป็นประกายสวยงามดังรูป ทำให้โทแพซที่ผ่านการฉายรังสีมีราคาเพิ่มขึ้นหลายเท่า การฉายรังสีอัญมณีเพื่อเพิ่มมูลค่าเป็นแนวทางหนึ่งของการนำความรู้ทางฟิลิกส์นิวเคลียร์มาใช้ประโยชน์ รังสีทางฟิลิกส์นิวเคลียร์คืออะไร และการนำรังสีมาใช้ประโยชน์ได้อย่างปลอดภัยมีแนวทางอย่างไร ศึกษาได้ในบทนี้



### คำถามสำคัญ

- เพราะเหตุใดนิวเคลียสบางชนิดจึงเสถียรแต่บางชนิดไม่เสถียร
- รังสีและพลังงานนิวเคลียร์คืออะไร และเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของนิวเคลียสอย่างไร
- รังสีและพลังงานนิวเคลียร์ได้รับการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ อย่างไร และการป้องกันอันตรายจากรังสีมีแนวทางอย่างไร
- องค์ประกอบพื้นฐานของสสารและแรงพื้นฐานในธรรมชาติคืออะไร
- การค้นคว้าวิจัยด้านฟิสิกส์อนุภาคนำไปสู่การประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ อย่างไร



### จุดประสงค์การเรียนรู้

#### 20.1 เสถียรภาพของนิวเคลียส

1. อธิบายธรรมชาติของแรงนิวเคลียร์
2. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงนิวเคลียร์กับเสถียรภาพของนิวเคลียส
3. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวกับส่วนพร่องมวล
4. คำนวณพลังงานยึดเหนี่ยวและพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน
5. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวกับเสถียรภาพของนิวเคลียส

#### 20.2 กัมมันตภาพรังสี

6. บอกความหมายของกัมมันตภาพรังสี ธาตุกัมมันตรังสี และ ไอโซโทปกัมมันตรังสี
7. ระบุชนิดและบอกสมบัติของรังสีที่แผ่ออกมาจากธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสี
8. เขียนสมการของการสลายให้แอลฟา บีตา และ แกมมา
9. บอกความหมายและคำนวณกัมมันตภาพ
10. ทดลองเพื่ออธิบายการสลายของนิวเคลียสกัมมันตรังสีและครึ่งชีวิต
11. คำนวณจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสีที่เหลือจากการสลายและครึ่งชีวิต

#### 20.3 ปฏิกริยานิวเคลียร์และพลังงานนิวเคลียร์

12. บอกความหมายของปฏิกริยานิวเคลียร์
13. อธิบายฟิชชันและความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากฟิชชัน
14. คำนวณพลังงานนิวเคลียร์ที่ปลดปล่อยออกจากฟิชชัน
15. อธิบายฟิวชันและความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากฟิวชัน
16. คำนวณพลังงานนิวเคลียร์ที่ปลดปล่อยออกจากฟิวชัน
17. บอกแนวทางการนำพลังงานนิวเคลียร์ไปใช้ประโยชน์

#### 20.4 ประโยชน์และการป้องกันอันตรายจากรังสี

18. ยกตัวอย่างการนำรังสีไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ
19. ยกตัวอย่างอันตรายของรังสีที่มีต่อร่างกาย
20. บอกวิธีการป้องกันอันตรายจากรังสี

#### 20.5 ฟิสิกส์อนุภาค

21. ยกตัวอย่างการค้นคว้าวิจัยที่ค้นพบอนุภาคมูลฐาน
22. ระบุชนิดและสมบัติของอนุภาคมูลฐาน
23. อธิบายพฤติกรรมและอันตรกิริยาของอนุภาคมูลฐานโดยอาศัยแบบจำลองมาตรฐาน
24. ยกตัวอย่างประโยชน์ที่ได้จากการค้นคว้าวิจัยด้านฟิสิกส์อนุภาค



#### ความรู้ก่อนเรียน

แรง พลังงาน ไฟฟ้าสถิต แม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โครงสร้างอะตอม

ในบทที่ผ่านมา เราได้เรียนรู้แล้วว่า อะตอมเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของสสารทุกชนิด และภายในอะตอมประกอบด้วยนิวเคลียสที่มีประจุไฟฟ้าบวกอยู่ตรงกลาง และอิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าลบเคลื่อนที่อยู่รอบ ๆ นิวเคลียส ทำให้มีแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนกับนิวเคลียส อิเล็กตรอนจึงไม่หลุดออกจากอะตอม นอกจากนี้ จากการศึกษาพฤติกรรมของอะตอม เราได้เรียนรู้ธรรมชาติหลายอย่างของอะตอม เช่น เมื่อให้พลังงานกับอะตอมมากพอ จะทำให้อะตอมเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะกระตุ้น และจะปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่ออะตอมกลับคืนสู่สถานะพื้น หรือ ถ้ามีการให้พลังงานกับอะตอมมากขึ้นอีก อิเล็กตรอนในอะตอมสามารถหลุดออกจากอะตอมได้ ปรากฏการณ์ในลักษณะเดียวกันนี้ เกิดขึ้นกับนิวเคลียสหรือไม่ แรงอะไรที่ทำให้โปรตอนและนิวตรอนในนิวเคลียสอยู่รวมกันได้อย่างมีเสถียรภาพ และโปรตอนกับนิวตรอนมีองค์ประกอบภายในอีกหรือไม่ จะหาคำตอบได้ในบทนี้

## 20.1 เสถียรภาพของนิวเคลียส

ภายในนิวเคลียส มีโปรตอนที่มีประจุไฟฟ้าบวกและนิวตรอนที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอยู่รวมกัน เรียกอนุภาคทั้งสองว่า **นิวคลีออน (nucleon)** การที่โปรตอนจำนวนหลายอนุภาคสามารถรวมกันอยู่ได้ภายในนิวเคลียส ทั้งที่มีแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างโปรตอน แสดงว่า ต้องมีแรงอีกชนิดหนึ่งที่มีขนาดมากกว่าแรงไฟฟ้า จึงสามารถยึดเหนี่ยวให้โปรตอนในนิวเคลียสรวมกันอยู่ได้ แรงดังกล่าวมีสมบัติอย่างไร และส่งผลกับเสถียรภาพและการเปลี่ยนแปลงของนิวเคลียสอย่างไร ศึกษาได้ในหัวข้อนี้

### 20.1.1 แรงนิวเคลียร์

ในช่วงที่นักฟิสิกส์เริ่มได้ภาพที่ชัดเจนขององค์ประกอบภายในนิวเคลียส หลังการเรียกนิวเคลียสของไฮโดรเจนว่าโปรตอนโดย เออร์เนสต์ รัทเทอร์ฟอร์ด (Ernest Rutherford) ในปี พ.ศ. 2462 และการค้นพบนิวตรอนของ เจมส์ แชดวิก (James Chadwick) ในปี พ.ศ. 2475 นักฟิสิกส์ในช่วงเวลานั้นต่างมั่นใจว่า ภายในนิวเคลียสต้องมีแรงอีกชนิดหนึ่งที่มีขนาดมากกว่าแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างโปรตอนที่สามารถทำให้โปรตอนกับโปรตอนยึดเหนี่ยวให้รวมกันอยู่ โดยได้เรียกแรงดังกล่าวว่า **แรงนิวเคลียร์ (nuclear force)** ซึ่งนักฟิสิกส์คนแรกที่ประสบความสำเร็จในการพัฒนาทฤษฎีเพื่ออธิบายธรรมชาติของแรงนิวเคลียร์คือ ฮิเดกิ ยูกะวะ (Hideki Yukawa) นักฟิสิกส์ชาวญี่ปุ่น

ถึงแม้ว่า ทฤษฎีที่ยูกะวะที่นำเสนอในปี พ.ศ. 2478 จะสามารถอธิบายผลการทดลองเกี่ยวกับแรงนิวเคลียร์ในช่วงเวลานั้นได้เป็นอย่างดี แต่เมื่อมีการค้นพบหลักฐานเพิ่มเติมเกี่ยวกับองค์ประกอบภายในโปรตอนและนิวตรอนที่ทฤษฎีของยูกะวะไม่สามารถอธิบายได้ จึงต้องมีการพัฒนาทฤษฎีเกี่ยวกับแรงนิวเคลียร์ขึ้นมาใหม่ แต่อย่างไรก็ตาม แนวคิดของยูกะวะได้นำไปสู่การค้นพบอนุภาคชนิดใหม่ที่มาจากอวกาศและการพัฒนาความเข้าใจเกี่ยวกับอนุภาคมูลฐาน ซึ่งจะได้กล่าวโดยละเอียดต่อไปในหัวข้อ 20.5 ฟิสิกส์อนุภาค



#### ความรู้เพิ่มเติม

เจมส์ แชดวิก (Sir James Chadwick ค.ศ. 1891-1974 หรือ พ.ศ. 2434-2517) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ในปี พ.ศ. 2478 จากผลงานการค้นพบนิวตรอน



รูป แชดวิก



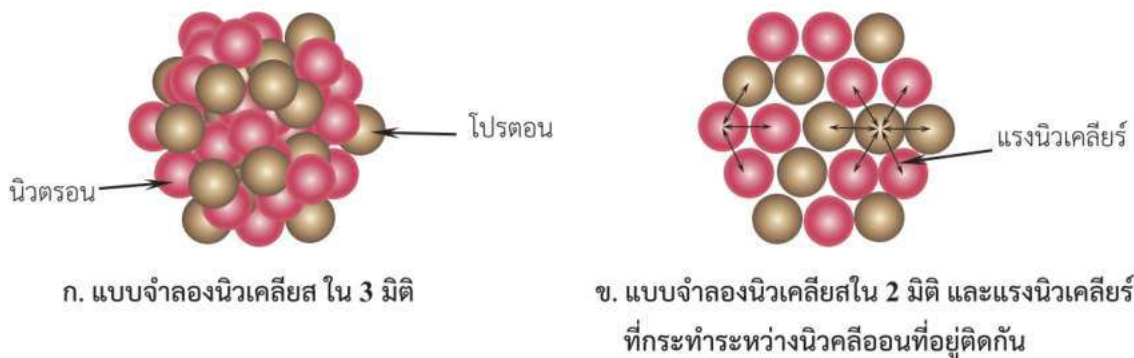
## ความรู้เพิ่มเติม

ฮิเดกิ ยูกะวะ (Hideki Yukawa ค.ศ. 1907-1981 หรือ พ.ศ. 2450-2524) นักฟิสิกส์ชาวญี่ปุ่น ได้รับรางวัลโนเบล สาขาฟิสิกส์ ในปี พ.ศ. 2492 จากผลงานด้านทฤษฎีเกี่ยวกับ แรงนิวเคลียร์



รูป ยูกะวะ

จากทฤษฎีที่ใช้อธิบายธรรมชาติของแรงนิวเคลียร์ที่เป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน เราทราบว่า แรงนิวเคลียร์เป็นแรงดึงดูดระหว่างโปรตอนกับโปรตอน นิวตรอนกับนิวตรอน และ โปรตอนกับนิวตรอน ในนิวเคลียส โดยแรงนิวเคลียร์ไม่ขึ้นกับประจุและมวลของนิวคลีออน แรงนิวเคลียร์ระหว่างคู่ นิวคลีออน เหล่านี้จึงมีค่าเท่ากัน นอกจากนี้ แรงนิวเคลียร์ส่งผลเฉพาะในระยะใกล้มาก (very short-range force) จึงเป็นแรงที่กระทำระหว่างนิวคลีออนที่อยู่ติดกันเท่านั้น ไม่ส่งผลต่อนิวคลีออนอื่น ๆ ที่อยู่ถัดออกไป ดังรูป 20.1 ข. และไม่ส่งผลต่ออิเล็กตรอนด้วย



รูป 20.1 นิวคลีออนในนิวเคลียสและแรงนิวเคลียร์กระทำระหว่างนิวคลีออน

แรงนิวเคลียร์ทำให้นิวเคลียสของธาตุและไอโซโทปของธาตุประมาณ 270 ชนิดมีเสถียรภาพ กล่าวคือ นิวเคลียสเหล่านี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพตามเวลา เรียกว่า **นิวเคลียสเสถียร (stable nucleus)** แต่ในขณะเดียวกัน ยังมีนิวเคลียสอีกหลายร้อยชนิด เป็นนิวเคลียสที่ไม่เสถียรหรือไม่มีเสถียรภาพ และพร้อมจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ตัวอย่างไอโซโทปของธาตุบางชนิดที่นิวเคลียสเป็นนิวเคลียสเสถียร ดังแสดงในตาราง 20.1



ตาราง 20.1 ตัวอย่างไอโซโทปของธาตุบางชนิดที่นิวเคลียสเป็นนิวเคลียสเสถียร

ธาตุ	ไอโซโทป	เลขอะตอม	เลขมวล	มวลอะตอม (u)**	ปริมาณในธรรมชาติ (%)
ไฮโดรเจน (H)	โปรเทียม หรือ ไฮโดรเจน-1 ( $^1_1\text{H}$ )	1	1	1.007825	99.98
	ดิวเทอเรียม หรือ ไฮโดรเจน-2 ( $^2_1\text{H}$ )	1	2	2.014102	0.02
คาร์บอน (C)	คาร์บอน-12 ( $^{12}_6\text{C}$ )	6	12	12.000000	98.90
	คาร์บอน-13 ( $^{13}_6\text{C}$ )	6	13	13.003354	1.10
ออกซิเจน (O)	ออกซิเจน-16 ( $^{16}_8\text{O}$ )	8	16	15.994915	99.76
	ออกซิเจน-17 ( $^{17}_8\text{O}$ )	8	17	16.999134	0.04
อะลูมิเนียม (Al)	อะลูมิเนียม-27 ( $^{27}_{13}\text{Al}$ )	13	27	26.981538	100.00
คลอรีน (Cl)	คลอรีน-35 ( $^{35}_{17}\text{Cl}$ )	17	35	34.968853	75.78
แมงกานีส (Mn)	แมงกานีส-55 ( $^{55}_{25}\text{Mn}$ )	25	55	54.938048	100.00
คริปทอน (Kr)	คริปทอน-84 ( $^{84}_{36}\text{Kr}$ )	36	84	83.911497	56.99
แคดเมียม (Cd)	แคดเมียม-110 ( $^{110}_{48}\text{Cd}$ )	48	110	109.903008	12.49
แบเรียม (Ba)	แบเรียม-138 ( $^{138}_{56}\text{Ba}$ )	56	138	137.905247	71.70
ทังสแตน (W)	ทังสแตน-182 ( $^{182}_{74}\text{W}$ )	74	182	181.948206	26.50
ทองคำ (Au)	ทองคำ-197 ( $^{197}_{79}\text{Au}$ )	79	197	196.966570	100.00
ตะกั่ว (Pb)	ตะกั่ว-208 ( $^{208}_{82}\text{Pb}$ )	82	208	207.976652	52.30
บิสมัท (Bi)	บิสมัท-209 ( $^{209}_{83}\text{Bi}$ )	83	209	208.980401	100.00

ที่มา: สหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่างประเทศ (International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC)

\*\* เนื่องจากการศึกษาเกี่ยวกับอะตอมและนิวเคลียสเกี่ยวข้องกับขนาดของมวลที่เล็กมาก จึงนิยมใช้มวลในหน่วย u โดย 1 u มีค่าเท่ากับ  $1.660540 \times 10^{-27}$  กิโลกรัม ซึ่งเท่ากับ  $\frac{1}{12}$  ของมวลของอะตอมของคาร์บอน-12

## ไอโซโทป

อะตอมของธาตุเดียวกันที่มีเลขมวลต่างกัน เรียกว่า **ไอโซโทป (isotope)** โดยธาตุชนิดหนึ่งอาจมีหลายไอโซโทป บางไอโซโทปมีอยู่ในธรรมชาติในสัดส่วนที่มากกว่าไอโซโทปอื่น ๆ และบางไอโซโทปได้จากการสังเคราะห์ ตัวอย่างไอโซโทปของธาตุคาร์บอน ได้แก่ คาร์บอน-11 คาร์บอน-12 คาร์บอน-13 และ คาร์บอน-14 เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์นิวเคลียร์ได้เป็น  ${}^1_6\text{C}$   ${}^{12}_6\text{C}$   ${}^{13}_6\text{C}$  และ  ${}^{14}_6\text{C}$  ตามลำดับ

ทั้งนี้ คาร์บอน-12 เป็นไอโซโทปของธาตุคาร์บอนมีอยู่ในธรรมชาติประมาณร้อยละ 98.90 ในขณะที่ คาร์บอน-13 มีอยู่ในธรรมชาติเพียงร้อยละ 1.10 เท่านั้น ส่วนคาร์บอน-14 มีอยู่ในธรรมชาติ น้อยมาก และคาร์บอน-11 เป็นไอโซโทปที่เกิดจากการสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเท่านั้น

## สัญลักษณ์นิวเคลียร์

ในการศึกษาเกี่ยวกับนิวเคลียส นิยมใช้**สัญลักษณ์นิวเคลียร์ (nuclear symbol)** เพื่อแสดงจำนวนโปรตอนและจำนวนนิวตรอนในนิวเคลียสของธาตุ โดยตัวเลขที่ใช้ระบุถึงจำนวนโปรตอนในนิวเคลียสเรียกว่า **เลขอะตอม (atomic number)** แทนด้วย  $Z$  ส่วนตัวเลขที่ใช้ระบุผลรวมระหว่างจำนวนโปรตอนและจำนวนนิวตรอนในนิวเคลียสเรียกว่า **เลขมวล (mass number)** แทนด้วย  $A$

วิธีเขียนสัญลักษณ์นิวเคลียร์ในแบบสากลคือ การเขียนเลขอะตอมไว้ด้านล่างซ้าย และเลขมวลไว้ด้านบนซ้ายของสัญลักษณ์ของธาตุ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าให้  $X$  แทนสัญลักษณ์ของธาตุใด ๆ สามารถเขียนสัญลักษณ์นิวเคลียร์ของ  $X$  ได้ดังนี้



โดยที่  $A = Z + N$  เมื่อ  $N$  แทนเลขนิวตรอนซึ่งมีค่าเท่ากับจำนวนนิวตรอนในนิวเคลียส

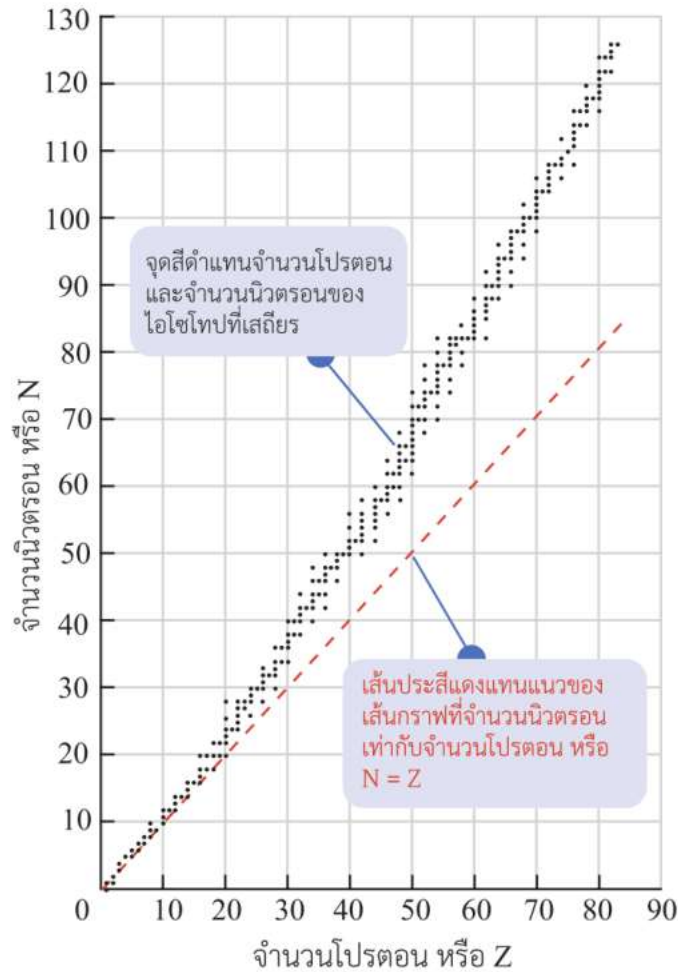


### กิจกรรมลองทำดู

เขียนกราฟโดยแกนตั้งแทนจำนวนนิวตรอน ( $N$ ) และแกนนอนแทนจำนวนโปรตอน ( $Z$ ) และจากข้อมูลในตาราง 20.1 ให้วาดจุดที่สอดคล้องกับจำนวนนิวตรอนและจำนวนโปรตอนของนิวเคลียสที่เสถียรลงบนกราฟ จากนั้น ลากเส้นที่  $N = Z$  ลงบนกราฟ

สังเกตและอภิปรายเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนิวตรอนกับจำนวนโปรตอนของนิวเคลียสที่เสถียร

เมื่อเขียนกราฟระหว่างจำนวนนิวตรอนกับจำนวนโปรตอนของนิวเคลียส โดยให้จุดสีดำแทนจำนวนโปรตอนและนิวตรอนของนิวเคลียสที่เสถียร และเส้นประสีแดงแทนแนวของเส้นกราฟที่จำนวนนิวตรอนเท่ากับจำนวนโปรตอน จะได้กราฟลักษณะดังรูป 20.2



รูป 20.2 กราฟระหว่างจำนวนนิวตรอนกับจำนวนโปรตอนของนิวเคลียสที่เสถียร

จากกราฟ จะเห็นได้ว่า

- สำหรับนิวเคลียสที่มีมวลน้อย หรือมีจำนวนโปรตอนน้อยกว่า 20 ( $Z < 20$ ) นิวเคลียสที่เสถียรคือนิวเคลียสที่มีจำนวนนิวตรอนประมาณเท่ากับจำนวนโปรตอน ดังแสดงให้เห็นการซ้อนทับกันระหว่างจุดสีดำกับเส้นประสีแดง
- สำหรับนิวเคลียสที่มีจำนวนโปรตอนมากกว่า 20 ( $Z > 20$ ) นิวเคลียสที่เสถียรคือนิวเคลียสที่มีจำนวนนิวตรอนมากกว่าโปรตอน ( $N > Z$ ) ดังจะเห็นได้จากการที่แนวการเรียงตัวของกลุ่มจุดสีดำเบนออกจากเส้นประสีแดง ซึ่งปรากฏการณ์นี้ สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อนิวเคลียสมีจำนวนโปรตอนเพิ่มขึ้น แรงผลักทางไฟฟ้าภายในนิวเคลียสจะยิ่งเพิ่มมากขึ้น นิวเคลียสจึงมี

แนวโน้มที่จะแยกจากกันมากขึ้น การที่นิวเคลียสจะมีเสถียรภาพได้ จำเป็นต้องมีจำนวนนิวตรอนเพิ่มขึ้นอย่างเหมาะสม เท่าที่ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวทางนิวเคลียร์มากพอสำหรับการทำให้นิวเคลียสมีเสถียรภาพ

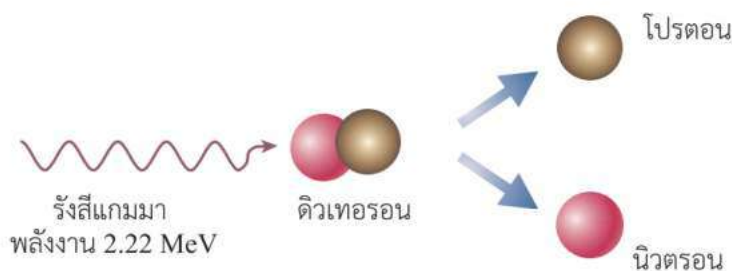
- สำหรับนิวเคลียสที่มีจำนวนโปรตอนมากกว่า 83 ( $Z > 83$ ) จะพบว่า ไม่มีนิวเคลียสที่มีเสถียรภาพอีกต่อไป เนื่องจาก ไม่ว่าจะเพิ่มจำนวนนิวตรอนเท่าไร แรงนิวเคลียร์ไม่สามารถชดเชยแรงผลัทางไฟฟ้าระหว่างโปรตอนจำนวนมากได้อีกต่อไป

ในการพิจารณาเสถียรภาพของนิวเคลียส นอกจากจะพิจารณาจากแรงนิวเคลียร์ที่ยึดเหนี่ยวให้นิวคลีออนรวมอยู่ด้วยกันแล้ว เรายังสามารถพิจารณาได้จากพลังงานที่ต้องใช้ในการทำให้นิวคลีออนแยกออกจากกัน ซึ่งจะได้ศึกษาในหัวข้อต่อไป

### 20.1.2 พลังงานยึดเหนี่ยว

ในการศึกษาโครงสร้างของอะตอมที่ผ่านมา เราทราบว่า อิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่รอบ ๆ นิวเคลียสได้โดยไม่หลุดออกมาจากอะตอม เนื่องจาก มีแรงดึงดูดทางไฟฟ้ากระทำระหว่างอิเล็กตรอนที่มีประจุลบกับโปรตอนที่มีประจุบวกในนิวเคลียส และถ้ามีการให้พลังงานกับอะตอมมากพอ จะสามารถทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมได้ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าให้พลังงาน 13.6 อิเล็กตรอนโวลต์ แก่อะตอมของไฮโดรเจน จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้ ปริมาณของพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมนี้ เกี่ยวข้องโดยตรงกับแรงไฟฟ้าที่ยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนไว้ภายในอะตอม

ในทำนองเดียวกัน ถ้ามีการให้พลังงานกับนิวเคลียสมากพอ จะสามารถทำให้นิวคลีออนหลุดออกจากนิวเคลียสได้เช่นกัน ซึ่งพลังงานนี้เกี่ยวข้องโดยตรงกับแรงนิวเคลียร์ที่ยึดเหนี่ยวนิวคลีออนไว้ภายในนิวเคลียส โดยพลังงานที่พอดีทำให้นิวคลีออนทั้งหมดในนิวเคลียสแยกออกจากกัน เรียกว่า **พลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy หรือ nuclear binding energy)** เช่น เมื่อฉายรังสีแกมมาไปที่ดิวเทอรอน (deuteron) ซึ่งเป็นนิวเคลียสของดิวเทอเรียม (deuterium,  ${}^2_1\text{H}$ ) หนึ่งในไอโซโทปของไฮโดรเจน ที่ประกอบด้วยโปรตอน 1 โปรตอนและนิวตรอน 1 นิวตรอน พบว่า รังสีแกมมาต้องมีพลังงานไม่น้อยกว่า 2.22 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ จึงจะสามารถทำโปรตอนและนิวตรอนของดิวเทอรอนแยกออกจากกันได้พอดี ดังรูป 20.3 ดังนั้น พลังงานยึดเหนี่ยวของดิวเทอรอนจึงมีค่าเท่ากับ 2.22 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์



รูป 20.3 การให้พลังงานมากพอกับดิวเทอรอน ทำให้อิเล็กตรอนและนิวตรอนแยกออกจากกันได้

## การเรียกชื่อไอโซโทปของไฮโดรเจน

ไอโซโทปของไฮโดรเจนเป็นไอโซโทปชนิดแรกที่นักวิทยาศาสตร์ค้นพบ ซึ่งได้มีการให้ชื่อเฉพาะดังตาราง 20.2

**ตาราง 20.2** ชื่อไอโซโทปของไฮโดรเจนและชื่อนิวเคลียสของไอโซโทป

สัญลักษณ์นิวเคลียร์	ชื่อไอโซโทป	ชื่อนิวเคลียสของไอโซโทป
${}^1_1\text{H}$	โปรเทียม	โปรตอน
${}^2_1\text{H}$	ดิวเทอเรียม	ดิวเทอรอน
${}^3_1\text{H}$	ทริเทียม	ทริทอน

หลังจากมีการค้นพบไอโซโทปของธาตุอื่น ๆ อีกเป็นจำนวนมาก เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการจดจำ นักวิทยาศาสตร์จึงได้เรียกชื่อไอโซโทปตามชื่อธาตุและเลขมวลของไอโซโทปนั้น ๆ เช่น ไอโซโทปของคาร์บอนที่มีเลขมวลเท่ากับ 14 เรียกชื่อว่า คาร์บอน-14 หรือไอโซโทปของฮีเลียมที่มีเลขมวลเท่ากับ 3 เรียกชื่อว่า ฮีเลียม-3

พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสมีความสัมพันธ์กับส่วนต่างระหว่างมวลของนิวเคลียสกับมวลรวมของนิวคลีออนในนิวเคลียส ซึ่งพิจารณาได้ดังนี้

จากตาราง 20.1 มวลอะตอมของดิวเทอเรียมเท่ากับ  $2.014102 \text{ u}$  ถ้าหักมวลของอิเล็กตรอนออก 1 อิเล็กตรอน จะได้มวลของนิวเคลียสของดิวเทอเรียม หรือ ดิวเทอรอน ซึ่งจากข้อมูลในตาราง 20.3 มวลของอิเล็กตรอนเท่ากับ  $0.000549 \text{ u}$  ดังนั้น สามารถคำนวณมวลของดิวเทอรอนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จาก มวลของนิวเคลียส} &= \text{มวลอะตอม} - \text{มวลรวมของอิเล็กตรอนในอะตอม} \\ \text{จะได้ มวลของดิวเทอรอน} &= \text{มวลอะตอมของดิวเทอเรียม} - \text{มวลของอิเล็กตรอน 1 อิเล็กตรอน} \\ &= 2.014102 \text{ u} - 0.000549 \text{ u} \\ &= 2.013553 \text{ u} \end{aligned}$$

**ตาราง 20.3** สัญลักษณ์นิวเคลียร์และมวลของนิวคลีออนและอิเล็กตรอน

สัญลักษณ์นิวเคลียร์	ชนิดของอนุภาค	มวล (u)
${}^1_1\text{p}$ หรือ ${}^1_1\text{H}$	โปรตอน	1.007276
${}^1_0\text{n}$	นิวตรอน	1.008665
${}^0_{-1}\text{e}$	อิเล็กตรอน	0.000549

ดิวเทรียมมีโปรตอน 1 โปรตอน และนิวตรอน 1 นิวตรอน ซึ่งจากตาราง 20.3 เราสามารถหามวลรวมของนิวคลีออนในดิวเทรียมได้ดังนี้

จาก มวลรวมนิวคลีออนในนิวเคลียส = มวลรวมของโปรตอน + มวลรวมของนิวตรอน  
จะได้ มวลรวมนิวคลีออนในดิวเทรียม

$$\begin{aligned} &= \text{มวลของโปรตอน 1 โปรตอน} + \text{มวลของนิวตรอน 1 นิวตรอน} \\ &= 1.007276 \text{ u} + 1.008665 \text{ u} \\ &= 2.015941 \text{ u} \end{aligned}$$

จะเห็นว่า มวลรวมนิวคลีออนในดิวเทรียม มากกว่า มวลของดิวเทรียม ซึ่งเท่ากับ

$$\begin{aligned} \Delta m &= 2.015941 \text{ u} - 2.013553 \text{ u} \\ &= 0.002388 \text{ u} \end{aligned}$$

### หน่วยสำหรับระดับพลังงานในนิวเคลียส

มวล 1 u มีค่า  $1.660540 \times 10^{-27}$  กิโลกรัม เมื่อพิจารณาพลังงานที่เทียบเท่ามวล 1 u โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างมวล ( $m$ ) กับพลังงาน ( $E$ ) ของไอน์สไตน์ตามสมการ  $E = mc^2$  เมื่อ  $c$  เป็นอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศ ซึ่งมีค่าประมาณ  $2.997925 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที จะได้

$$\begin{aligned} E &= (1.660540 \times 10^{-27} \text{ kg})(2.997925 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 1.492419 \times 10^{-10} \text{ J} \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่า พลังงานที่เทียบเท่ามวล 1 u เป็นปริมาณที่น้อยมาก เพื่อความสะดวกจึงได้กำหนดให้ใช้หน่วยของ เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) เป็นหน่วยของพลังงานในระดับนิวเคลียส ซึ่ง 1 MeV มีค่าเท่ากับ  $1.602177 \times 10^{-13}$  จูล

ดังนั้น พลังงาน  $1.492419 \times 10^{-10}$  จูล ที่เทียบเท่ามวล 1 u จะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} E &= \frac{(1.492419 \times 10^{-10} \text{ J})}{(1.602177 \times 10^{-13} \text{ J/MeV})} \\ &= 931.4945 \text{ MeV} \end{aligned}$$

เพื่อความสะดวก เรามักใช้ค่า **931.5 MeV** เป็นพลังงานที่เทียบเท่ากับมวล **1 u**

เราสามารถหาพลังงาน  $E$  ที่เทียบเท่ากับส่วนต่างของมวล  $\Delta m$  ได้ โดยหาผลคูณระหว่างมวลในหน่วย u กับพลังงาน 931.5 MeV ดังนี้

$$\begin{aligned} E &= (\Delta m)(931.5 \text{ MeV/u}) \\ &= (0.002388 \text{ u})(931.5 \text{ MeV/u}) \\ &= 2.22 \text{ MeV} \end{aligned}$$

นั่นคือพลังงานที่เทียบเท่ากับผลต่างของมวล 0.002388 u มีค่าเท่ากับ 2.22 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเท่ากับพลังงานของรังสีแกมมาที่ใช้ในการทำให้โปรตอนและนิวตรอนในนิวเคลียสแยกออกจากกันได้พอดี ซึ่งค่านี้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสนั้นเอง

ในธรรมชาติ นิวเคลียสของธาตุและไอโซโทปของธาตุทุกชนิด มีมวลน้อยกว่ามวลรวมของนิวคลีออนที่อยู่ภายในนิวเคลียส เนื่องจาก การที่นิวคลีออนจะมารวมกันอยู่ได้ในนิวเคลียสต้องมีการเปลี่ยนมวลบางส่วนเป็นพลังงาน สำหรับใช้ในการยึดเหนี่ยวให้อยู่ร่วมกันเพื่อทำให้นิวเคลียสมีเสถียรภาพ ส่วนของมวลที่แตกต่างระหว่างมวลของนิวเคลียสกับมวลรวมของนิวคลีออนทั้งหมดในนิวเคลียสนี้ เรียกว่า **ส่วนพร่องมวล (mass defect,  $\Delta m$ )** ซึ่งเทียบเท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยว ( $E$ ) ของนิวเคลียส ตามสมการ

$$E = (\Delta m)c^2 \quad (20.1a)$$

เมื่อพิจารณามวล 1 u เทียบเท่ากับพลังงาน 931.5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ จะได้พลังงาน  $E$  ดังนี้

$$E = (\Delta m)(931.5 \text{ MeV/u}) \quad (20.1b)$$

เนื่องจากมวลของนิวเคลียสเป็นค่าที่ไม่นิยมระบุในตารางธาตุหรือตารางข้อมูลของธาตุทั่ว ๆ ไป ในการคำนวณพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสของธาตุต่าง ๆ เราสามารถหาส่วนพร่องมวลได้จากผลต่างระหว่างมวลรวมขององค์ประกอบอะตอม (มวลรวมของโปรตอน นิวตรอน และ อิเล็กตรอน) กับมวลอะตอมของธาตุ โดยผลต่างระหว่างปริมาณทั้งสองคือ ส่วนพร่องมวล เนื่องจากมวลรวมของอิเล็กตรอนจะหักล้างกันพอดี

ดังนั้น สามารถหาส่วนพร่องมวลของนิวเคลียส  ${}^A_Z\text{X}$  ได้จาก

$$\text{ส่วนพร่องมวล} = \text{มวลรวมขององค์ประกอบอะตอม} - \text{มวลอะตอม}$$

ถ้ากำหนดให้  $m_p$  คือ มวลของโปรตอน  $m_n$  คือ มวลของนิวตรอน

$m_e$  คือ มวลของอิเล็กตรอน และ  $m_x$  คือ มวลอะตอมของไอโซโทป  ${}^A_Z\text{X}$

เราสามารถเขียนสมการหาส่วนพร่องมวล  $\Delta m$  ได้ดังนี้

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n + Zm_e] - m_x \quad (20.2a)$$

ถ้าให้  $m_H$  คือ มวลอะตอมของไฮโดรเจน ( $^1_1\text{H}$ ) ซึ่งเท่ากับผลรวมของมวลโปรตอน 1 โปรตอน และมวลอิเล็กตรอน 1 อิเล็กตรอน สามารถจัดรูปสมการ (20.2a) ใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned}\Delta m &= [Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n] - m_X \\ &= [Zm_H + (A - Z)m_n] - m_X\end{aligned}\quad (20.2b)$$

**ตัวอย่าง 20.1** จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสของคาร์บอน-12 ( $^{12}_6\text{C}$ ) ซึ่งมีมวลอะตอมเท่ากับ 12.000000 u กำหนดให้ มวลของโปรตอน นิวตรอน และอิเล็กตรอน มีค่าตามตาราง 20.3

**แนวคิด** หาส่วนพร่องมวล โดยหาผลต่างระหว่าง มวลรวมองค์ประกอบของอะตอมกับมวลอะตอม หรือใช้สมการ (20.2a) จากนั้น หาพลังงานยึดเหนี่ยวจากการหาพลังงานที่เทียบเท่ากับ ส่วนพร่องมวล โดยใช้สมการ (20.1a) หรือ (20.1b)

**วิธีทำ** คาร์บอน-12 มีเลขมวลเท่ากับ 12 ( $A = 12$ ) และเลขอะตอมเท่ากับ 6 ( $Z = 6$ ) ดังนั้น มีจำนวน นิวตรอนเท่ากับ 6 ( $A - Z = 6$ )

มวลรวมขององค์ประกอบของอะตอมคาร์บอน-12 หาได้จากผลรวมของมวลโปรตอน ( $m_p$ ) 6 โปรตอน มวลนิวตรอน ( $m_n$ ) 6 นิวตรอน และ มวลอิเล็กตรอน ( $m_e$ ) 6 อิเล็กตรอน ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{มวลรวมองค์ประกอบของอะตอมคาร์บอน-12} &= \text{มวล 6 โปรตอน} + \text{มวล 6 นิวตรอน} + \text{มวล 6 อิเล็กตรอน} \\ &= (6m_p + 6m_n) + 6m_e \\ &= 6(1.007276 \text{ u}) + 6(1.008665 \text{ u}) + 6(0.000549 \text{ u}) \\ &= 12.098940 \text{ u}\end{aligned}$$

หาส่วนพร่องมวลจากผลต่างระหว่างมวลรวมขององค์ประกอบของอะตอม กับ มวลอะตอม ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{ส่วนพร่องมวลของคาร์บอน-12} &= \text{มวลรวมองค์ประกอบของอะตอมคาร์บอน-12} - \text{มวลอะตอมของคาร์บอน-12} \\ &= 12.098940 \text{ u} - 12.000000 \text{ u} \\ &= 0.098940 \text{ u}\end{aligned}$$



หรือ หาส่วนพร่องมวลโดยแทนเลขมวลและเลขอะตอมของคาร์บอน-12 โนสมการ (20.2a) จะได้

$$\Delta m = [6m_p + (12 - 6)m_n + 6m_e] - m_{C-12}$$

แทนค่า มวลของโปรตอน นิวตรอน อิเล็กตรอน และ มวลอะตอมของคาร์บอน-12 จะได้

$$\begin{aligned}\Delta m &= [6(1.007276 \text{ u}) + 6(1.008665 \text{ u}) + 6(0.000549 \text{ u})] - 12.000000 \text{ u} \\ &= 0.098940 \text{ u}\end{aligned}$$

หาพลังงานยึดเหนี่ยวที่เทียบเท่ากับส่วนพร่องมวล  $\Delta m$  ได้ดังนี้

จากสมการ (20.1a) แทนค่า  $\Delta m = 0.098940 \text{ u}$  โดย มวล 1 u มีค่า  $1.660540 \times 10^{-27}$  กิโลกรัม และ  $c$  มีค่าประมาณ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที จะได้

$$\begin{aligned}E &= (\Delta m)c^2 \\ &= (0.098940 \times 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 1.48 \times 10^{-11} \text{ J}\end{aligned}$$

หรือ จากสมการ (20.1b) แทนค่า  $\Delta m = 0.098940 \text{ u}$  จะได้

$$\begin{aligned}E &= (\Delta m)(931.5 \text{ MeV/u}) \\ &= (0.098940 \text{ u})(931.5 \text{ MeV/u}) \\ &= 92.16 \text{ MeV}\end{aligned}$$

**ตอบ** พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสของคาร์บอน-12 มีค่าเท่ากับ  $1.48 \times 10^{-11}$  จูล  
หรือ 92.16 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

**ตัวอย่าง 20.2** จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวของ ก.  ${}_{17}^{35}\text{Cl}$  ข.  ${}_{25}^{55}\text{Mn}$  กำหนดให้มวลของโปรตอน นิวตรอน และอิเล็กตรอน มีค่าตามตาราง 20.3

**แนวคิด** หาส่วนพร้อมมวล โดยใช้สมการ (20.2a) จากนั้น หาพลังงานยึดเหนี่ยวที่เทียบเท่าส่วนพร้อมมวล โดยใช้สมการ (20.1a) หรือ (20.1b)

**วิธีทำ** ก. สำหรับ  ${}_{17}^{35}\text{Cl}$   $A = 35$   $Z = 17$  และ  $m_{\text{Cl-35}} = 34.968853$  u  
แทนค่าในสมการ (20.2a) จะได้

$$\begin{aligned}\Delta m &= (17m_p + 18m_n + 17m_e) - m_{\text{Cl-35}} \\ &= [17(1.007276 \text{ u}) + 18(1.008665 \text{ u}) + 17(0.000549 \text{ u})] - 34.968853 \text{ u} \\ &= 0.320142 \text{ u}\end{aligned}$$

หาพลังงานยึดเหนี่ยวที่เทียบเท่าส่วนพร้อมมวลโดยใช้สมการ (20.1b) จะได้

$$\begin{aligned}E &= (\Delta m)(931.5 \text{ MeV/u}) \\ &= (0.320142 \text{ u})(931.5 \text{ MeV/u}) \\ &= 298.21227 \text{ MeV}\end{aligned}$$

ข. สำหรับ  ${}_{25}^{55}\text{Mn}$   $A = 55$   $Z = 25$  และ  $m_{\text{Mn-55}} = 54.938048$  u  
แทนค่าในสมการ (20.2a) จะได้

$$\begin{aligned}\Delta m &= (25m_p + 30m_n + 25m_e) - m_{\text{Mn-55}} \\ &= [25(1.007276 \text{ u}) + 30(1.008665 \text{ u}) + 25(0.000549 \text{ u})] - 54.938048 \text{ u} \\ &= 0.517527 \text{ u}\end{aligned}$$

หาพลังงานยึดเหนี่ยวที่เทียบเท่าส่วนพร้อมมวลโดยใช้สมการ (20.1b) จะได้

$$\begin{aligned}E &= (\Delta m)(931.5 \text{ MeV/u}) \\ &= (0.517527 \text{ u})(931.5 \text{ MeV/u}) \\ &= 482.0764 \text{ MeV}\end{aligned}$$

**ตอบ** ก. พลังงานยึดเหนี่ยวของ  ${}_{17}^{35}\text{Cl}$  เท่ากับ 298.2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์  
ข. พลังงานยึดเหนี่ยวของ  ${}_{25}^{55}\text{Mn}$  เท่ากับ 482.1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

จากตัวอย่าง 20.1 และ 20.2 จะเห็นได้ว่า นิวเคลียสของธาตุหรือไอโซโทปที่มีจำนวนนิวคลีออนมาก จะมีพลังงานยึดเหนี่ยวมากกว่านิวเคลียสที่มีจำนวนนิวคลีออนน้อยกว่า และถ้าคำนวณพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสอื่น ๆ เพิ่มเติม จะพบว่า แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของพลังงานยึดเหนี่ยวตามจำนวนนิวคลีออนจะเป็นไปในทำนองเดียวกัน ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าพลังงานยึดเหนี่ยวขึ้นกับจำนวนนิวคลีออน แต่ทั้งนี้ การที่จะสรุปว่า นิวเคลียสที่มีจำนวนนิวคลีออนมากมีพลังงานยึดเหนี่ยวมาก จึงเป็นนิวเคลียสที่มีเสถียรภาพมาก จะไม่สอดคล้องกับหลักฐานที่ค้นพบ เนื่องจากในธรรมชาติ เราพบว่านิวเคลียสที่มีเลขอะตอมหรือจำนวนโปรตอนมากกว่า 83 ล้วนเป็นนิวเคลียสที่ไม่เสถียร ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 20.1.1

ในการพิจารณาว่า นิวเคลียสใดมีเสถียรภาพมากหรือน้อย จึงต้องพิจารณา พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน ซึ่งเป็นพลังงานเฉลี่ยที่ต้องใช้ในการทำให้นิวคลีออนแต่ละนิวคลีออนในนิวเคลียสแยกออกจากกัน คำนวณได้จากสมการ

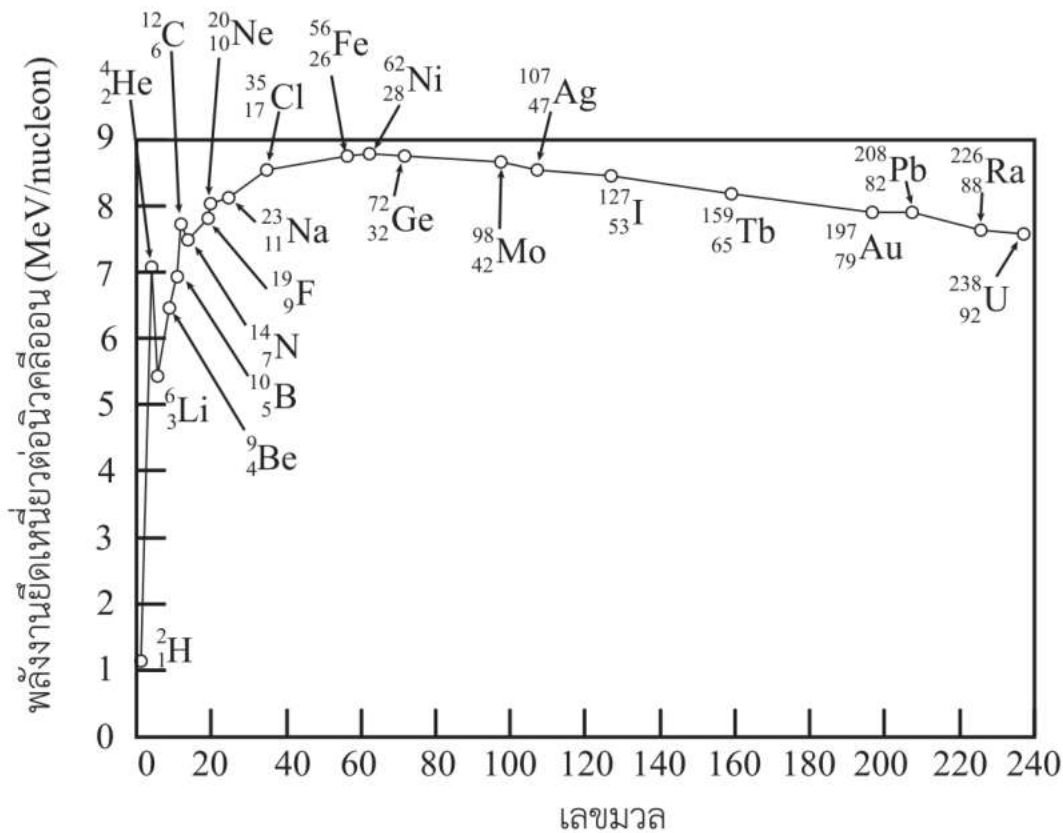
$$\frac{E}{A} = \frac{(\Delta m)c^2}{A} \quad (20.3a)$$

หรือ เมื่อพิจารณา  $\Delta m$  ในหน่วย u จะได้

$$\frac{E}{A} = \frac{(\Delta m)(931.5 \text{ MeV})}{A} \quad (20.3b)$$

ทั้งนี้ พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนมีหน่วยเป็น จูลต่อนิวคลีออน (J/nucleon) หรือ เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ต่อนิวคลีออน (MeV/nucleon)

เมื่อเขียนกราฟระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน ( $\frac{E}{A}$ ) กับเลขมวล ( $A$ ) จะได้กราฟดังรูป 20.4



รูป 20.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนกับเลขมวล

จากกราฟ เห็นได้ว่า นิวเคลียสที่มีเลขมวลอยู่ในช่วงประมาณระหว่าง 55 - 70 เป็นนิวเคลียสที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนมากกว่านิวเคลียสในช่วงเลขมวลอื่น ๆ โดยนิวเคลียสของนิกเกิล ( $^{62}_{28}\text{Ni}$ ) เป็นนิวเคลียสที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนมากที่สุด ซึ่งหมายความว่า นิวเคลียสที่มีเลขมวลในช่วงนี้ มีเสถียรภาพมากกว่านิวเคลียสอื่น ๆ โดยนิกเกิลเป็นนิวเคลียสที่มีเสถียรภาพมากที่สุด ดังนั้น การทำให้นิวคลีออนในนิวเคลียสที่มีเลขมวลอยู่ในช่วงประมาณระหว่าง 55 - 70 แยกออกจากกันหมด จึงต้องใช้พลังงานมากกว่านิวเคลียสอื่น ๆ



### ชวนคิด

จากกราฟในรูป 20.4 การทำให้นิวคลีออนของเหล็ก ( $^{56}_{26}\text{Fe}$ ) แยกออกจากกันง่ายหรือยากกว่า การทำให้นิวคลีออนของโซเดียม ( $^{23}_{11}\text{Na}$ ) แยกออกจากกัน เพราะเหตุใด

**ตัวอย่าง 20.3** จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของ ก. เหล็ก-56 ( ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ ) ข. ยูเรเนียม-238 ( ${}^{238}_{92}\text{U}$ )

กำหนดให้ มวลอะตอมของเหล็ก-56 เท่ากับ 55.934935 u

มวลอะตอมของยูเรเนียม-238 เท่ากับ 238.050787 u

มวลอะตอมของไฮโดรเจน เท่ากับ 1.007825 u

มวลของนิวตรอน เท่ากับ 1.008665 u

**แนวคิด** เนื่องจากทราบค่ามวลอะตอมของไฮโดรเจนที่กำหนดมาให้ จึงสามารถหาส่วนประกอบมวลได้โดยใช้สมการ (20.2b) จากนั้น หาพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนได้จากส่วนประกอบมวลในหน่วย u โดยใช้สมการ (20.3b)

**วิธีทำ** ก. อะตอมของเหล็ก-56 มีเลขมวลเท่ากับ 56 ( $A = 56$ ) และเลขอะตอมเท่ากับ 26 ( $Z = 26$ ) แทนค่าลงในสมการ (20.2b) จะได้

$$\begin{aligned}\Delta m &= [Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_{\text{n}}] - m_{\text{X}} \\ &= (26m_{\text{H}} + 30m_{\text{n}}) - m_{\text{Fe-56}} \\ &= (26)(1.007825 \text{ u}) + (30)(1.008665 \text{ u}) - 55.934935 \text{ u} \\ &= 0.528465 \text{ u}\end{aligned}$$

จากสมการ (20.3b) เหล็ก-56 มีจำนวนนิวคลีออนเท่ากับ 56 นิวคลีออน แทนค่าลงในสมการ (20.3b) จะได้

$$\begin{aligned}\frac{E}{A} &= \frac{(\Delta m)(931.5 \text{ MeV/u})}{56 \text{ nucleons}} \\ &= \frac{(0.528465 \text{ u})(931.5 \text{ MeV/u})}{56 \text{ nucleons}} \\ &= 8.79 \text{ MeV/nucleon}\end{aligned}$$

ข. อะตอมของยูเรเนียม-238 มีเลขมวลเท่ากับ 238 ( $A = 238$ ) และเลขอะตอมเท่ากับ 92 ( $Z = 92$ ) แทนค่าลงในสมการ (20.2b) จะได้

$$\begin{aligned}\Delta m &= [Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_{\text{n}}] - m_{\text{X}} \\ &= (92m_{\text{H}} + 146m_{\text{n}}) - m_{\text{U-238}} \\ &= (92)(1.007825 \text{ u}) + (146)(1.008665 \text{ u}) - 238.050787 \text{ u} \\ &= 1.934203 \text{ u}\end{aligned}$$

จากสมการ (20.3b) ยูเรเนียม-238 มีจำนวนนิวคลีออน 238 นิวคลีออน แทนค่าในสมการ (20.3b) จะได้

$$\begin{aligned}\frac{E}{A} &= \frac{(\Delta m)(931.5 \text{ MeV/u})}{238 \text{ nucleons}} \\ &= \frac{(1.934203 \text{ u})(931.5 \text{ MeV/u})}{238 \text{ nucleons}} \\ &= 7.57 \text{ MeV/nucleon}\end{aligned}$$

- ตอบ**
- ก. พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของ เหล็ก-56  
มีค่า 8.79 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ต่อนิวคลีออน
- ข. พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของ ยูเรเนียม-238  
มีค่า 7.57 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ต่อนิวคลีออน

นิวเคลียสของธาตุและไอโซโทปที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนมาก ต้องใช้พลังงานมากในการทำนิวคลีออนแยกออกจากกันทั้งหมด ซึ่งนิวเคลียสเหล่านี้อาจเป็นนิวเคลียสที่เสถียรหรือไม่เสถียรขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ อีก ทั้งนี้ ในธรรมชาติ มีนิวเคลียสของธาตุและไอโซโทปที่เสถียรประมาณ 270 ชนิดเท่านั้น ในขณะที่มีนิวเคลียสอีกหลายร้อยชนิดที่ไม่เสถียร

นิวเคลียสที่ไม่เสถียรมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร และการเปลี่ยนแปลงนั้นทำให้เกิดอะไรขึ้น ศึกษาได้ในหัวข้อต่อไป



### คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 20.1

1. เพราะเหตุใดแรงผลัทางไฟฟ้าระหว่างโปรตอนในนิวเคลียสจึงไม่สามารถทำให้โปรตอนแยกออกจากกัน
2. เพราะเหตุใดนิวเคลียสของไอโซโทปที่เสถียรและมีเลขอะตอมระหว่าง 20 ถึง 83 จึงมีจำนวนนิวตรอนมากกว่าจำนวนโปรตอน
3. จงให้ความหมายของพลังงานยึดเหนี่ยวและส่วนพร่องมวล
4. พลังงานยึดเหนี่ยวมีความสัมพันธ์กับส่วนพร่องมวลอย่างไร
5. พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของนิวเคลียสมีความสัมพันธ์กับเสถียรภาพของนิวเคลียสอย่างไร



### แบบฝึกหัด 20.1

คำถามต่อไปนี้ กำหนดให้

- มวล 1 u เท่ากับ  $1.66 \times 10^{-27}$  กิโลกรัม ซึ่งเทียบเท่ากับพลังงาน 931.5 MeV
- พลังงาน 1 อิเล็กตรอนโวลต์ เท่ากับ  $1.6 \times 10^{-19}$  จูล
- มวลของโปรตอนเท่ากับ 1.007276 u มวลของนิวตรอนเท่ากับ 1.008665 u และ มวลของอิเล็กตรอนเท่ากับ 0.000549 u

1. กำหนดมวลอะตอมของยูเรเนียม-238 ( $^{238}_{92}\text{U}$ ) เท่ากับ 238.050788 u

จงหาปริมาณต่อไปนี้ (คำตอบเป็นตัวเลขทศนิยม 6 ตำแหน่ง)

- ก. ส่วนพร่องมวลของ  $^{238}_{92}\text{U}$
- ข. พลังงานยึดเหนี่ยวของ  $^{238}_{92}\text{U}$
- ค. พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของ  $^{238}_{92}\text{U}$

2. กำหนดมวลของอะตอมของแคลเซียม ( $^{40}_{20}\text{Ca}$ ) เท่ากับ 39.962591 u

จงหาปริมาณต่อไปนี้ (คำตอบเป็นตัวเลขทศนิยม 6 ตำแหน่ง)

- ก. ส่วนพร่องมวลของ  $^{40}_{20}\text{Ca}$
- ข. พลังงานยึดเหนี่ยวของ  $^{40}_{20}\text{Ca}$
- ค. พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของ  $^{40}_{20}\text{Ca}$

3. จากข้อ 1. และ ข้อ 2. นิวเคลียสของธาตุใดมีเสถียรภาพมากกว่า เพราะเหตุใด

4. พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของนิวเคลียสของฮีเลียม ( $^4_2\text{He}$ ) มีค่าเท่ากับ 6.82 MeV/nucleon จงหาส่วนพร่องมวลของฮีเลียม

5. โปรตอนแต่ละอนุภาคที่อยู่ในนิวเคลียสของลิเทียม ( $^7_3\text{Li}$ ) ถูกยึดเหนี่ยวไว้ด้วยพลังงานเฉลี่ยเท่าไร กำหนดให้มวลอะตอมของลิเทียมเท่ากับ 7.016005 u

## 20.2 กัมมันตภาพรังสี

จากการศึกษาเกี่ยวกับอะตอมที่ผ่านมา เราทราบว่า อะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้นเป็นอะตอมที่ไม่เสถียร และจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อกลับคืนสู่สถานะพื้นซึ่งเป็นสถานะเสถียร ปรากฏการณ์ในลักษณะคล้ายกันนี้ จะเกิดขึ้นกับนิวเคลียสที่ไม่เสถียรหรือไม่ ศึกษาได้ในหัวข้อนี้

### 20.2.1 การค้นพบกัมมันตภาพรังสี

ในปี พ.ศ. 2439 อองรี แแบ็กเกอแรล (Henri Becquerel) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ได้ทดลองเพื่อศึกษาว่า สารที่สามารถเรืองแสงได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงแดดจะปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาหรือไม่ โดยแบ็กเกอแรลได้ทดลองนำผลึกแร่ของสารต่าง ๆ ไปวางไว้บนของกระดาษที่บรรจุฟิล์มถ่ายรูปไว้ข้างใน จากนั้น นำชุดอุปกรณ์ทั้งหมดไปวางรับแสงแดด ดังรูป 20.5 เขาตั้งสมมติฐานว่า ถ้าสารใดมีการปล่อยรังสีเอกซ์เมื่อเกิดการเรืองแสง รังสีเอกซ์จะทะลุผ่านของกระดาษที่ทึบแสงไปยังแผ่นฟิล์มที่อยู่ข้างล่าง ซึ่งจะทำให้เกิดรอยดำตามรูปทรงของผลึกบนฟิล์มเมื่อนำฟิล์มนั้นไปล้าง



รูป 20.5 การทดลองการปล่อยรังสีของสารเรืองแสงเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงแดดของแบ็กเกอแรล

ในการทดลองกับสารต่าง ๆ แแบ็กเกอแรลพบว่า มีเพียงสารประกอบของยูเรเนียม (uranium, U) เท่านั้น ที่ทำให้ฟิล์มมีรอยดำ ทำให้เขาสรุปในขั้นต้นว่า สารประกอบยูเรเนียมปล่อยรังสีออกมาระหว่างการทดลอง และรังสีนี้ได้ทะลุผ่านของกระดาษไปกระทบแผ่นฟิล์มทำให้เกิดรอยดำบนแผ่นฟิล์ม แต่เนื่องจากเขายังไม่ได้ตรวจสอบสมบัติของรังสีนั้นอย่างละเอียด จึงยังไม่สรุปว่ารังสีนี้เป็นรังสีเอกซ์ จากนั้นเพื่อเป็นการศึกษาเพิ่มเติมว่า ระยะเวลาที่ได้รับแสงแดดมีผลกับการปล่อยรังสีหรือไม่ แแบ็กเกอแรลจึงวางแผนที่จะนำชุดอุปกรณ์ไปวางไว้กลางแดดอีกครั้ง ด้วยระยะเวลาที่นานมากขึ้น แต่เนื่องจากสภาพอากาศ



ในช่วงเวลาที่เขาจะทดลอง มีท้องฟ้ามืดครึ้ม เขาจึงต้องเก็บชุดอุปกรณ์ทั้งหมดไว้ในลิ้นชัก จนกระทั่ง เวลาผ่านไปหลายวัน เมื่อสภาพอากาศเริ่มมีแสงแดด เขาได้นำแผ่นฟิล์มที่เก็บไว้ไปล้างเพื่อตรวจสอบว่า สารเคมีต่าง ๆ บนแผ่นฟิล์มยังคงสภาพเดิมหรือไม่ ซึ่งเขาได้พบว่า บนแผ่นฟิล์มมีรอยดำที่เข้มกว่ารอยดำที่ได้จากการทดลองครั้งแรกเสียอีก ภายหลังจากการศึกษาเพิ่มเติม แแบ็กเกอแรลได้ข้อสรุปว่า สารประกอบยูเรเนียมสามารถปล่อยรังสีชนิดหนึ่งออกมาตลอดเวลาโดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแสงแดดแต่อย่างใด และรังสีที่ปล่อยออกมานี้ สามารถทะลุผ่านวัตถุทึบแสงได้



### ความรู้เพิ่มเติม

องตวน อองรี แแบ็กเกอแรล (Antoine Henri Becquerel ค.ศ.1852-1908 หรือ พ.ศ. 2395-2451) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ในปี พ.ศ. 2446 จากผลงานการค้นพบกัมมันตภาพรังสีซึ่งได้จุดประกายให้นักวิทยาศาสตร์คนอื่น ๆ เริ่มการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับรังสีและโครงสร้างของนิวเคลียสในเวลาต่อมา



รูป แแบ็กเกอแรล

การศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับรังสีที่ได้จากสารประกอบของยูเรเนียมทำให้แบ็กเกอแรลรู้ว่ารังสีนี้มีสมบัติบางประการคล้ายรังสีเอกซ์ เช่น มีอำนาจทะลุผ่านวัตถุต่าง ๆ และทำให้อากาศแตกตัวเป็นไอออนได้ แต่การแผ่รังสีชนิดนี้เกิดขึ้นได้เองตลอดเวลา ในขณะที่ความรู้ในช่วงเวลานั้นทราบว่า รังสีเอกซ์เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติไม่ได้ นอกจากนี้แบ็กเกอแรลยังได้พบอีกว่า สารประกอบของยูเรเนียมทุกชนิดจะทำให้เกิดรอยดำบนฟิล์ม เขาจึงเสนอความคิดว่า รังสีชนิดใหม่นี้เกิดจากยูเรเนียม



### ความรู้เพิ่มเติม

ยูเรเนียม (uranium, U) เป็นธาตุโลหะที่มีเลขอะตอม 92 พบได้ในองค์ประกอบของหินและน้ำทะเล โดยผลึกแร่ที่มียูเรเนียมเป็นองค์ประกอบจะมีสีเหลืองบางส่วน ดังรูป สัดส่วนของยูเรเนียมที่พบในธรรมชาติประมาณ 99.28% เป็นยูเรเนียม-238 และประมาณ 0.71% เป็นยูเรเนียม-235 ทั้งนี้ ยูเรเนียมที่ได้รับการสกัดออกมาแล้วจะมีสีขาวเงิน

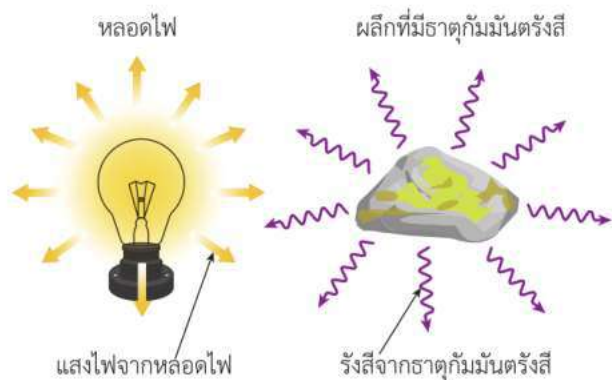


รูป ผลึกแร่ที่มียูเรเนียมเป็นองค์ประกอบ

การค้นพบรังสีชนิดใหม่ของแบ็กเกอเรล ทำให้ในวงการนักวิทยาศาสตร์เกิดความสงสัยว่าธาตุอื่น ๆ สามารถแผ่รังสีโดยธรรมชาติได้เช่นเดียวกับยูเรเนียมอีกหรือไม่ โดยในปี พ.ศ. 2441 ปีแอร์ กูรี (Pierre Curie) และมารี กูรี (Marie Curie) ได้ค้นพบธาตุที่แผ่รังสีได้เองอีก 2 ชนิด และทั้งสองให้ชื่อธาตุชนิดใหม่ที่ค้นพบว่า เรเดียม (radium, Ra) และ พอลอเนียม (polonium, Po)

กระบวนการที่ธาตุมีการปล่อยรังสีออกมาอย่างต่อเนื่องนี้เรียกว่า การแผ่รังสี (radiation) และปรากฏการณ์ที่ธาตุแผ่รังสีได้เองนี้เรียกว่า กัมมันตภาพรังสี (radioactivity) ส่วนไอโซโทปของธาตุที่สามารถแผ่รังสีได้เองนี้เรียกว่า ไอโซโทปกัมมันตรังสี (radioactive isotope) โดยธาตุที่ทุกไอโซโทปเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี เราเรียกธาตุนั้นว่าเป็น ธาตุกัมมันตรังสี (radioactive element) ซึ่งส่วนใหญ่ธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติจะมีเลขอะตอมสูงกว่า 82 เช่น เรดอน (เลขอะตอมเท่ากับ 86) ทอเรียม (เลขอะตอมเท่ากับ 90) และ ยูเรเนียม (เลขอะตอมเท่ากับ 92)

การแผ่รังสีของธาตุกัมมันตรังสีเปรียบเทียบกับ การให้แสงของหลอดไฟ โดยธาตุกัมมันตรังสีเป็นแหล่งกำเนิดรังสีที่แผ่รังสีออกมาทุกทิศทุกทาง เช่นเดียวกับหลอดไฟที่ให้แสงออกมาทุกทิศทุกทาง ดังรูป 20.6 แต่ทั้งนี้ ความแตกต่างระหว่างธาตุกัมมันตรังสีกับหลอดไฟมีหลายอย่าง เช่น เราไม่สามารถควบคุมการแผ่รังสีได้ แต่เราสามารถควบคุมการให้แสงของหลอดไฟได้ หรือ การแผ่รังสีเกิดขึ้นได้เอง แต่แสงจากหลอดไฟเกิดจากกระแสไฟฟ้า



รูป 20.6 การเปรียบเทียบธาตุกัมมันตรังสีกับหลอดไฟ



### ความรู้เพิ่มเติม

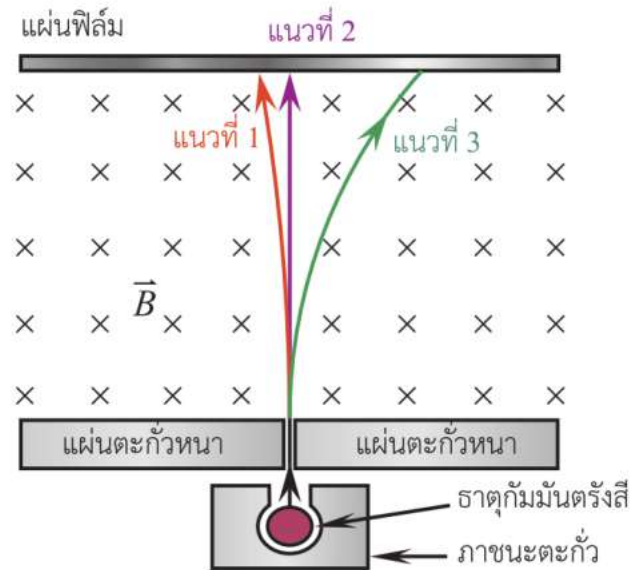
ปีแอร์ กูรี (Pierre Curie ค.ศ. 1859-1906 หรือ พ.ศ. 2402-2449) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส และ มารี กูรี (Marie Curie ค.ศ. 1867-1934 หรือ พ.ศ. 2410-2477) นักฟิสิกส์ชาวโปแลนด์ เป็นสามีและภรรยาที่ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับกัมมันตภาพรังสีร่วมกัน และได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ร่วมกับแบ็กเกอเรล ในปี พ.ศ. 2446 นอกจากนี้ บุตรสาวของทั้งสองชื่อ อีแรน กูรี (Irene Curie) ได้รับรางวัลโนเบลจากผลงานเกี่ยวกับกัมมันตภาพรังสีเช่นเดียวกัน



รูป ปีแอร์ และ มารี กูรี

### 20.2.2 รังสีจากธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสี

การศึกษารังสีที่แผ่ออกมาจากธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีในเวลาต่อมาพบว่า เมื่อให้รังสีผ่านเข้าไปในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก จะมีแนวการเคลื่อนที่ ดังรูป 20.7



รูป 20.7 แนวการเบนของรังสีจากธาตุกัมมันตรังสีในสนามแม่เหล็ก

จากรูป ธาตุกัมมันตรังสีถูกบรรจุอยู่ในภาชนะที่ทำจากตะกั่วหนา ซึ่งมีช่องเปิดแคบ ๆ พอให้รังสี ผ่านออกไปได้ โดยเหนือช่องแคบมีแผ่นฟิล์มวางอยู่ และบริเวณระหว่างช่องแคบกับแผ่นฟิล์มมีสนามแม่เหล็กที่มีค่าคงตัวและตั้งฉากกับแนวที่รังสีแผ่ออกมา เมื่อนำแผ่นฟิล์มไปล้าง พบว่ามีรอยดำปรากฏบนแผ่นฟิล์ม 3 รอย ซึ่งช่วยให้สามารถสรุปได้ว่า แนวการเคลื่อนที่ของรังสีมี 3 แนว คือ แนวที่ 1 เป็นแนวโค้งเบนไปคนละทางกับแนวที่ 3 ส่วนแนวที่ 2 เป็นแนวตรง



#### ชวนคิด

จากแนวการเบนของรังสีในรูป 20.7 สามารถสรุปได้หรือไม่ว่ามีรังสีแตกต่างกันอย่างน้อยกี่ชนิด และ รังสีแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกันอย่างไร

จากผลการศึกษาสมบัติอื่น ๆ ของรังสีเพิ่มเติม ทำให้สรุปได้ว่าธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีส่วนใหญ่มีการแผ่รังสีออกมาอยู่ 3 ชนิด ดังนี้

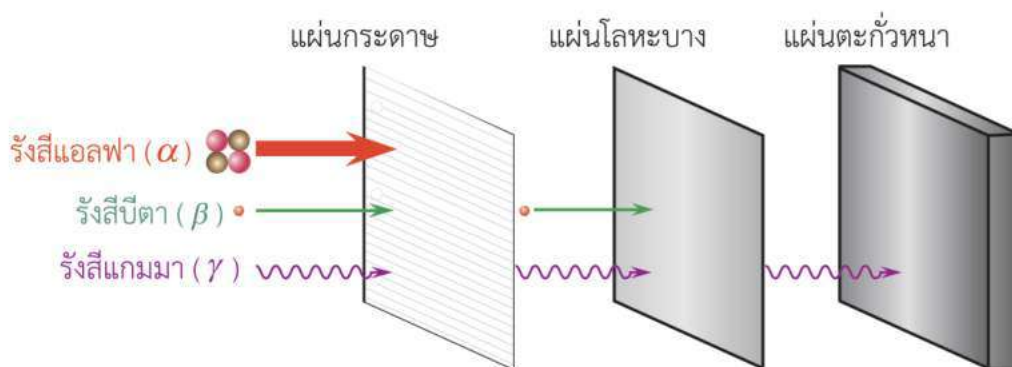
1. รังสีแอลฟา (alpha rays,  $\alpha$ ) เป็นนิวเคลียสของฮีเลียมที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง อาจเรียกอีกชื่อว่า อนุภาคแอลฟา (alpha particle) มีประจุไฟฟ้า  $+2e$  และ ประกอบด้วย โปรตอนและนิวตรอนอย่างละ 2 อนุภาค
2. รังสีบีตา (beta rays,  $\beta$ ) เป็นอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง อาจเรียกอีกชื่อว่า อนุภาคบีตา (beta particle) มีประจุไฟฟ้า  $-1e$
3. รังสีแกมมา (gamma rays,  $\gamma$ ) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอนที่เป็นกลางทางไฟฟ้าและมีความถี่สูงมาก



### ชวนคิด

จากรูป 20.7 แนวการเบนของรังสีแนวใด เป็นรังสีแอลฟา บีตา และ แกมมา ตามลำดับ

รังสีทั้ง 3 ชนิดมีอำนาจทะลุผ่านวัสดุได้แตกต่างกัน โดยรังสีแอลฟาไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นกระดาษบางได้ ในขณะที่รังสีบีตาทะลุผ่านกระดาษได้แต่ไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นโลหะบางได้ ส่วนรังสีแกมมาสามารถทะลุผ่านได้ทั้งแผ่นกระดาษและแผ่นโลหะบาง แต่ไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นตะกั่วหนาได้ ดังรูป 20.8



รูป 20.8 รังสีทั้ง 3 ชนิดสามารถทะลุผ่านวัสดุได้แตกต่างกัน

สมบัติสำคัญที่ทำให้รังสีทั้ง 3 ชนิดแตกต่างจากรังสีทั่วไปที่เราคุ้นเคยในชีวิตประจำวัน เช่น แสง ไมโครเวฟ หรือ รังสีอินฟราเรด คือ ความสามารถทำให้อากาศหรือสารที่รังสีเหล่านี้เคลื่อนที่ผ่านแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ได้ ดังนั้น ในบางกรณี จึงมีการจำแนกรังสีเหล่านี้ออกเป็น รังสีชนิดก่อไอออน (ionizing radiation) ส่วนรังสีอื่น ๆ ที่ไม่สามารถทำให้อากาศแตกตัวได้ เรียกว่า รังสีชนิดไม่ก่อไอออน (non-ionizing radiation)

สมบัติสำคัญของรังสีทั้ง 3 ชนิดสามารถสรุปได้ดังตาราง 20.4

ตาราง 20.4 สมบัติของรังสีแอลฟา บีตา และ แกมมา

สมบัติ	ชนิดของรังสี		
	แอลฟา	บีตา	แกมมา
องค์ประกอบ	นิวเคลียสฮีเลียมความเร็วสูง	อิเล็กตรอนความเร็วสูง	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความถี่สูง
ประจุไฟฟ้า	$+2e$	$-1e$	ไม่มีประจุ (เป็นกลาง)
มวล	$4.001506 \text{ u} = 6.644657 \times 10^{-27} \text{ kg}$	$0.000549 \text{ u} = 9.109390 \times 10^{-31} \text{ kg}$	0
อำนาจทะลุผ่าน (ในอากาศ)	3 – 5 cm	1 – 30 m	มากกว่าแอลฟาและ บีตามาก
การเบี่ยงเบนใน สนามแม่เหล็ก	เบี่ยงเบน	เบี่ยงเบนไปในทิศทางตรง ข้ามกับแอลฟาและ เบี่ยงเบนมากกว่าแอลฟา เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก เดียวกัน	ไม่เบี่ยงเบน
ความสามารถในการทำให้ อากาศแตกตัวเป็นไอออน เมื่อเทียบกับแกมมา	2500 เท่า	100 เท่า	1 เท่า

ในการศึกษาต่อมาอย่างละเอียดพบว่า รังสีบีตาสามารถจำแนกได้เป็นทั้งรังสีบีตาบวก ( $\beta^+$ ) และรังสีบีตาลบ ( $\beta^-$ ) โดยรังสีบีตาลบ คือ อิเล็กตรอน ส่วน รังสีบีตาบวก คือ โพซิตรอน (positron) ซึ่งเป็นปฏิยานุภาค (antiparticle) ของอิเล็กตรอน โดยจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดต่อไปในหัวข้อ 20.5 ฟิสิกส์อนุภาค อย่างไรก็ตาม ธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีส่วนใหญ่จะปล่อย  $\beta^-$  ออกมา ดังนั้น เมื่อกล่าวถึงรังสีบีตาจึงมักหมายถึง  $\beta^-$



### ความรู้เพิ่มเติม

รังสีแอลฟา บีตา และ แกมมา เป็นรังสีที่ธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีส่วนใหญ่แผ่ออกมาตามธรรมชาติ แต่มีบางกรณี ที่ธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีมีการแผ่รังสีชนิดอื่น เช่น รังสีนิวตรอน (neutron rays) หรือ รังสีโปรตอน (proton rays) ซึ่งเกิดขึ้นในธรรมชาติน้อยมาก นอกจากนี้ ยังมีรังสีชนิดอื่น ๆ ที่มาจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงนิวเคลียสในรูปแบบอื่น ๆ เช่น รังสีนิวตรอน ที่มาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ หรือ รังสีคอสมิก (cosmic rays) ที่มาจากอวกาศ

### 20.2.3 การสลายและสมการการสลาย

ในการศึกษาการแผ่รังสีแอลฟาและรังสีบีตาพบว่า เมื่อธาตุกัมมันตรังสีต่าง ๆ แผ่รังสีออกมา จะมีธาตุใหม่เกิดขึ้นเสมอ เช่น เมื่อทอเรียมแผ่รังสีแอลฟาออกมาจะมีเรเดียมเกิดขึ้น ซึ่งเรเดียมมีจำนวนนิวคลีออน น้อยกว่าทอเรียมอยู่ 4 นิวคลีออน หรือ เมื่อตะกั่วแผ่รังสีบีตาออกมา จะมีบิสมัทเกิดขึ้น ซึ่งบิสมัทมีประจุของนิวเคลียสมากกว่าแต่มีมวลใกล้เคียงตะกั่ว ดังรูป 20.9



รูป 20.9 การแผ่รังสีแอลฟาและบีตาทำให้เกิดธาตุใหม่เกิดขึ้น

ส่วนกรณีการแผ่รังสีแกมมา พบว่า ไม่มีธาตุใหม่เกิดขึ้น แต่พลังงานของรังสีแกมมาที่แผ่ออกมาจากธาตุกัมมันตรังสีมีค่าสูงเกินกว่าที่จะเป็นพลังงานที่ได้จากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอม ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า การแผ่รังสีทั้งสามชนิดเกิดจากการเปลี่ยนสภาพของนิวเคลียส

จากความรู้เกี่ยวกับเสถียรภาพของนิวเคลียส สามารถอธิบายได้ว่า การแผ่รังสีของธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากนิวเคลียสที่ไม่เสถียรมีการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของอนุภาคความเร็วสูงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง เพื่อไปอยู่ในสถานะที่มีเสถียรภาพมากกว่า ในลักษณะเดียวกับการที่อะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้นมีการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะพื้นที่มีเสถียรภาพมากกว่า

กระบวนการที่นิวเคลียสไม่เสถียรเปลี่ยนไปเป็นนิวเคลียสชนิดใหม่หรือมีระดับพลังงานต่ำกว่าเดิมพร้อมแผ่รังสีออกมาได้เองตามธรรมชาตินี้ เรียกว่า **การสลายกัมมันตรังสี (radioactive decay)** หรือเรียกสั้น ๆ ว่า **การสลาย (decay)** โดยนิวเคลียสที่เกิดการสลายเรียกว่า **นิวเคลียสกัมมันตรังสี (radioactive nucleus)** และกระบวนการที่นิวเคลียสกัมมันตรังสีเกิดการสลายให้อนุภาคแอลฟา หรืออนุภาคบีตา หรือ รังสีแกมมา ออกมา เรียกว่า **การสลายให้แอลฟา (alpha decay)** **การสลายให้บีตา (beta decay)** และ **การสลายให้แกมมา (gamma decay)** ตามลำดับ

จากความรู้เกี่ยวกับองค์ประกอบของนิวเคลียสและรังสีทั้ง 3 ชนิด เราสามารถอธิบายการสลายของนิวเคลียสทั้ง 3 แบบได้โดยอาศัยสมการแสดงสัญลักษณ์นิวเคลียร์ ที่บอกชนิดของธาตุและชนิดของอนุภาค ก่อนและหลังการสลาย ด้วยหลักการที่ว่า **ผลรวมของเลขอะตอมและผลรวมของเลขมวลก่อนและหลังการสลายมีค่าเท่ากัน** ดังนี้

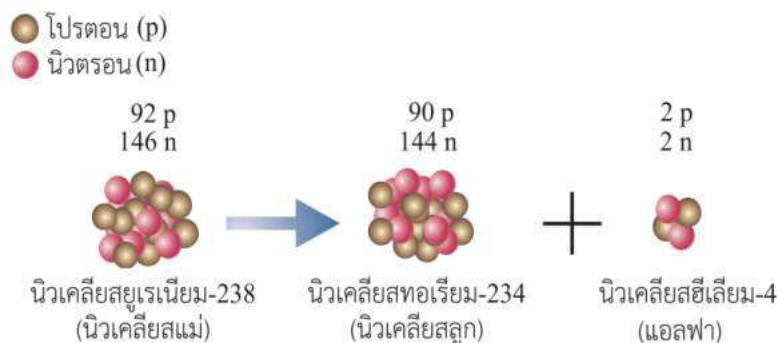
### 1. สมการการสลายให้แอลฟา

เนื่องจากรังสีแอลฟาคือนิวเคลียสของฮีเลียมที่มีความเร็วสูง ซึ่งมีเลขมวลเท่ากับ 4 และมีเลขอะตอมเท่ากับ 2 จึงเขียนสัญลักษณ์นิวเคลียร์ได้เป็น  ${}^4_2\text{He}$  ถ้ากำหนดให้  ${}^A_Z\text{X}$  แทนนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสี การสลายให้แอลฟาจะทำให้ได้นิวเคลียสของธาตุใหม่ที่มีเลขมวลลดลง 4 และเลขอะตอมลดลง 2 เขียนแทนได้ด้วยสัญลักษณ์  ${}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}$  นั่นคือ ในการสลายให้แอลฟา เขียนแทนได้ด้วยสมการ



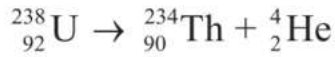
นิวเคลียสของธาตุ X เรียก **นิวเคลียสแม่ (parent nucleus)** ส่วนนิวเคลียสของธาตุใหม่ Y เรียก **นิวเคลียสลูก (daughter nucleus)** จะเห็นว่า ผลรวมของเลขอะตอมก่อนและหลังการสลายมีค่าเท่ากัน เช่นเดียวกับผลรวมของเลขมวล การเขียนสมการแทนการสลายนี้ ช่วยให้เราทราบชนิดของธาตุใหม่หลังการสลายเสมอ เมื่อทราบว่า นิวเคลียสแม่สลายแล้วให้อนุภาคหรือรังสีชนิดใด

ตัวอย่างการสลายให้แอลฟาของยูเรเนียม-238 ( ${}^{238}_{92}\text{U}$ ) ดังรูป 20.10



รูป 20.10 การสลายให้แอลฟาของยูเรเนียม-238

การสลายให้อัลฟาของนิวเคลียสยูเรเนียม-238 ( ${}_{92}^{238}\text{U}$ ) ดังรูป 20.10 จะได้นิวเคลียสลูกเป็นนิวเคลียสของทอเรียม-234 ( ${}_{90}^{234}\text{Th}$ ) ซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการ



## 2. สมการการสลายให้บีตา

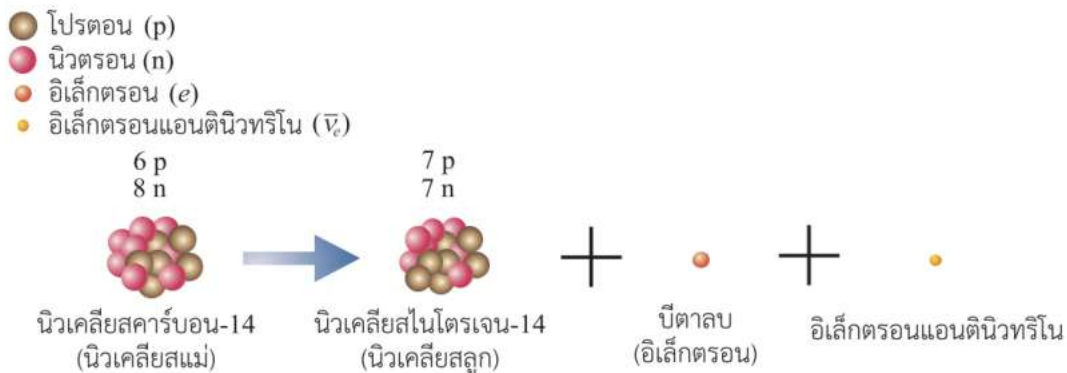
ในการสลายให้บีตา มีทั้งบีตาบวกและบีตาลบ โดยบีตาลบคืออิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูง เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  ${}_{-1}^0\text{e}$  ซึ่งหมายถึงอิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้า  $-1e$  ส่วนบีตาบวกคือโพซิตรอน เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  ${}_{+1}^0\text{e}$  ซึ่งหมายถึงโพซิตรอนที่มีประจุไฟฟ้า  $+1e$  ทั้งนี้ อิเล็กตรอนและโพซิตรอนมีมวลน้อยมากเมื่อเทียบกับมวลของธาตุใด ๆ จึงพิจารณาได้ว่าเลขมวลเป็นศูนย์

นอกจากนี้ ในการสลายให้บีตา ยังมีอนุภาคที่เกี่ยวข้องอีกสองชนิด คือ อิเล็กตรอนนิวทริโน (electron-neutrino) และ อิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน (electron-antineutrino) ซึ่งเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและมีมวลน้อยมาก เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $\nu_e$  และ  $\bar{\nu}_e$  ตามลำดับ รายละเอียดเกี่ยวกับอนุภาคสองชนิดนี้จะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อ 20.5 ฟิสิกส์อนุภาค

ถ้ากำหนดให้  ${}^A_Z\text{X}$  แทนนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสี การสลายให้บีตาลบจะทำให้นิวเคลียสของธาตุใหม่ที่มีเลขมวลเท่าเดิมแต่เลขอะตอมเพิ่มขึ้น 1 เขียนแทนได้ด้วยสัญลักษณ์  ${}^{A}_{Z+1}\text{Y}$  พร้อมกับให้อิเล็กตรอน และ อิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน ( $\bar{\nu}_e$ ) ออกมาด้วย เขียนแทนได้ด้วยสมการ



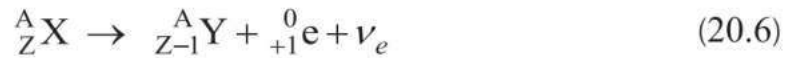
ตัวอย่าง การสลายให้บีตาลบของคาร์บอน-14 ( ${}^{14}_6\text{C}$ ) ดังรูป 20.11 จะทำให้ได้ไนโตรเจน-14 ( ${}^{14}_7\text{N}$ ) พร้อมกับอนุภาคต่าง ๆ เขียนแทนได้ด้วยสมการ



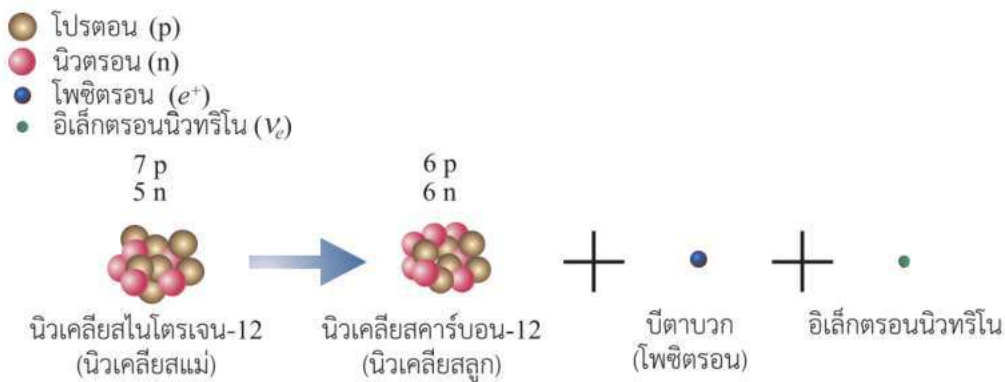
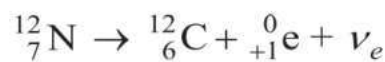
รูป 20.11 การสลายให้บีตาลบของคาร์บอน-14



สำหรับการสลายให้บีตาบวก จะทำให้นิวเคลียสของธาตุใหม่ที่มีเลขมวลเท่าเดิมแต่เลขอะตอมลดลง 1 เขียนแทนได้ด้วยสัญลักษณ์  ${}_{Z-1}^A Y$  พร้อมกับการปล่อยโพซิตรอน และ อิเล็กตรอนนิวทริโน ( $\nu_e$ ) ออกมาด้วยเสมอ เขียนแทนได้ด้วยสมการ

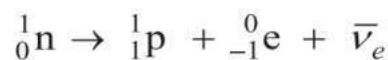


ตัวอย่าง การสลายให้บีตาบวกของไนโตรเจน-12 ( ${}_{7}^{12}N$ ) ดังรูป 20.12 จะทำให้ได้คาร์บอน-12 ( ${}_{6}^{12}C$ ) พร้อมกับอนุภาคต่าง ๆ เขียนแทนได้ด้วยสมการ



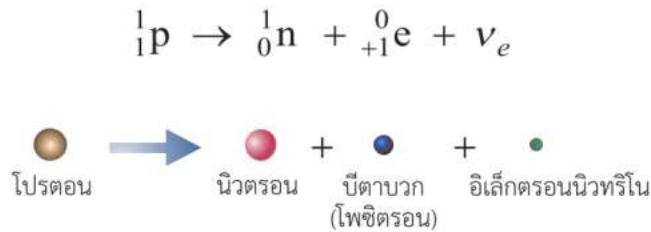
รูป 20.12 การสลายให้บีตาบวกของไนโตรเจน-12

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาในระดับนิวคลีออน การสลายให้บีตาบวกเกิดจากการที่นิวตรอนในนิวเคลียสเปลี่ยนไปเป็นโปรตอนดังรูป 20.13 เขียนแทนได้ด้วยสมการ



รูป 20.13 นิวตรอนเปลี่ยนไปเป็นโปรตอนในการสลายให้บีตาบวก

การสลายให้บีตาบวกเกิดจากโปรตอนในนิวเคลียสเปลี่ยนไปเป็นนิวตรอน ดังรูป 20.14 เขียนแทนได้ด้วยสมการ



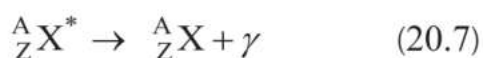
รูป 20.14 โปรตอนเปลี่ยนไปเป็นนิวตรอนในการสลายให้บีตาบวก

### 3. สมการการสลายให้แกมมา

ในบางกรณี นิวเคลียสแม่ที่สลายให้แอลฟาหรือบีตาแล้ว นิวเคลียสลูกที่ได้ยังอยู่ในสถานะกระตุ้น และเพื่อเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะที่มีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น จึงมีการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในทำนองเดียวกับการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของอิเล็กตรอนในอะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้น แต่ทั้งนี้ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาจากนิวเคลียสมีพลังงานสูง จึงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ของรังสีแกมมา

การเปลี่ยนระดับพลังงานของนิวเคลียสไปสู่ระดับพลังงานที่ต่ำและเสถียรกว่าโดยการปล่อยรังสีแกมมาออกมานี้ เรียกว่า **การสลายให้แกมมา (gamma decay)**

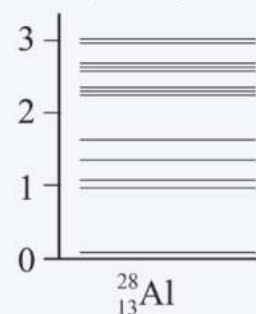
ถ้ากำหนดให้  ${}_Z^A\text{X}^*$  แทนสัญลักษณ์ของนิวเคลียสที่อยู่ในสถานะกระตุ้น การสลายให้แกมมาจะทำให้ได้นิวเคลียสของธาตุเดิมที่มีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลขมวลและเลขอะตอม เขียนแทนได้ด้วยสมการ



### ความรู้เพิ่มเติม

นิวเคลียสมีระดับพลังงาน (energy level) ที่มีค่าไม่ต่อเนื่อง เช่นเดียวกับระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอม ตัวอย่างระดับพลังงานของนิวเคลียสของอะลูมิเนียม-28 ดังรูป

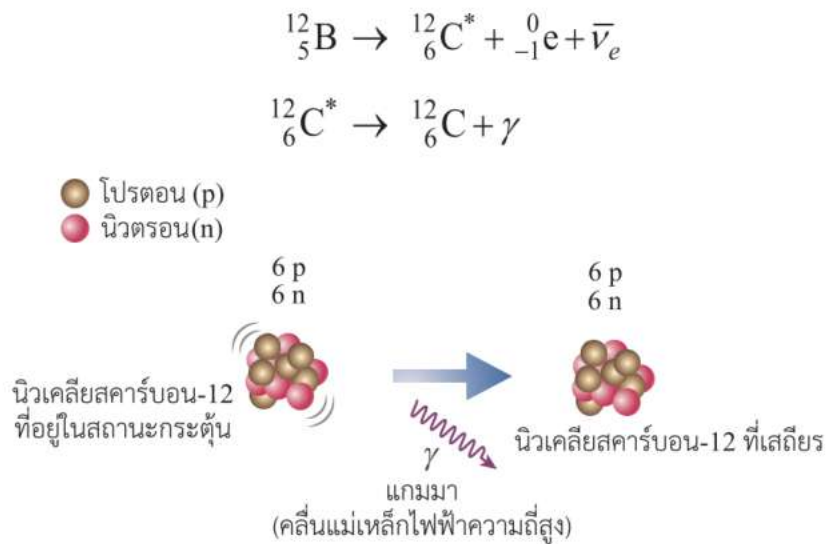
พลังงาน (MeV)



รูป ระดับพลังงานของนิวเคลียสอะลูมิเนียม-28

ทั้งนี้ ระดับพลังงานของนิวเคลียสอยู่ในระดับเมกะอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) ต่างจากของอิเล็กตรอนในอะตอมที่พลังงานอยู่ในระดับอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ดังนั้น การเปลี่ยนระดับพลังงานของนิวเคลียสจึงให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงในช่วงของรังสีแกมมา

ยกตัวอย่างการสลายให้แกมมาที่เกิดขึ้นหลังจากการสลายให้บีตาของนิวเคลียสของโบรอน-12 ( $^{12}_5\text{B}$ ) ซึ่งจะทำให้ได้นิวเคลียสของคาร์บอน-12 ที่อยู่ในสถานะกระตุ้น ( $^{12}_6\text{C}^*$ ) และต่อมาจะสลายให้แกมมา ( $\gamma$ ) กลายเป็นคาร์บอน-12 ที่เสถียร ( $^{12}_6\text{C}$ ) ดังรูป 20.15 ซึ่งเขียนแทนได้ด้วยสมการ



รูป 20.15 การสลายให้แกมมาของคาร์บอน-12



### ข้อสังเกต

การสลายให้แกมมาเกิดขึ้นต่อเนื่องหลังจากการสลายให้แอลฟาหรือบีตาเท่านั้น

**ตัวอย่าง 20.4** จากสมการการสลายให้แอลฟาของเรเดียม เขียนแทนด้วย  $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^A_Z\text{X} + {}^4_2\text{He}$  ให้ตอบคำถามต่อไปนี้

- A และ Z มีค่าเท่าใด
- X คือธาตุอะไร

**แนวคิด** หาเลขมวล (A) และ เลขอะตอม (Z) ได้จากหลักการที่ว่า เลขอะตอมก่อนการสลายเท่ากับผลรวมของเลขอะตอมหลังการสลาย เช่นเดียวกับเลขมวลก่อนการสลายมีค่าเท่ากับผลรวมของเลขมวลหลังการสลาย จากนั้น ระบุชนิดของธาตุโดยพิจารณาจากเลขอะตอมของ X

**วิธีทำ** ก. หาค่าของ A และ Z

เลขมวลก่อนการสลายมีค่า 226 ซึ่งต้องเท่ากับผลรวมของเลขมวลหลังการสลาย นั่นคือ

$$226 = A + 4$$

จะได้  $A = 222$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับเลขอะตอมก่อนการสลายมีค่า 88

ซึ่งต้องเท่ากับผลรวมของเลขอะตอมหลังการสลาย นั่นคือ

$$88 = Z + 2$$

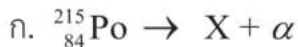
จะได้  $Z = 86$

ข. จากคำตอบในข้อ ก. ธาตุซึ่งมีเลขอะตอมเท่ากับ 86 คือเรดอน ดังนั้น X คือ Rn

**ตอบ** ก. ค่าของ A และ Z คือ 222 และ 86 ตามลำดับ

ข. X คือเรดอน หรือ Rn

**ตัวอย่าง 20.5** จากการสลายต่อไปนี้ X คือธาตุอะไร



**แนวคิด** การระบุ X ว่าเป็นธาตุอะไร พิจารณาได้จากเลขอะตอมของ X ซึ่งหาได้จากหลักการที่ว่า เลขอะตอมก่อนการสลายเท่ากับผลรวมของเลขอะตอมหลังการสลาย

**วิธีทำ** ก. เขียนสมการการสลายได้เป็น  ${}_{84}^{215}\text{Po} \rightarrow {}_Z^AX + {}_2^4\text{He}$

เลขอะตอมก่อนการสลายเท่ากับผลรวมของเลขอะตอมหลังการสลายให้แอลฟา จะได้

$$84 = Z + 2$$

$$Z = 82$$

ธาตุซึ่งมีเลขอะตอมเท่ากับ 82 คือตะกั่ว ดังนั้น X คือตะกั่ว หรือ Pb



เลขอะตอมก่อนการสลายเท่ากับผลรวมของเลขอะตอมหลังการสลายให้บีตาบวก จะได้

$$Z = 26 + 1$$

$$Z = 27$$

ธาตุซึ่งมีเลขอะตอมเท่ากับ 27 คือโคบอลต์ ดังนั้น X คือโคบอลต์ หรือ Co

ค. เขียนสมการการสลายได้เป็น  ${}^A_Z X \rightarrow {}^{65}_{28} \text{Ni} + \gamma$

เลขอะตอมก่อนการสลายเท่ากับผลรวมของเลขอะตอมหลังการสลายให้แกมมา จะได้

$$Z = 28$$

ธาตุที่มีเลขอะตอมเท่ากับ 28 คือนิกเกิลที่นิวเคลียสอยู่ในสถานะกระตุ้น ดังนั้น X คือนิกเกิลที่นิวเคลียสอยู่ในสถานะกระตุ้นเขียนแทนด้วย  $\text{Ni}^*$

ตอบ ก. X คือ ตะกั่ว หรือ Pb

ข. X คือ โคบอลต์ หรือ Co

ค. X คือ นิกเกิลที่นิวเคลียสอยู่ในสถานะกระตุ้น  $\text{Ni}^*$

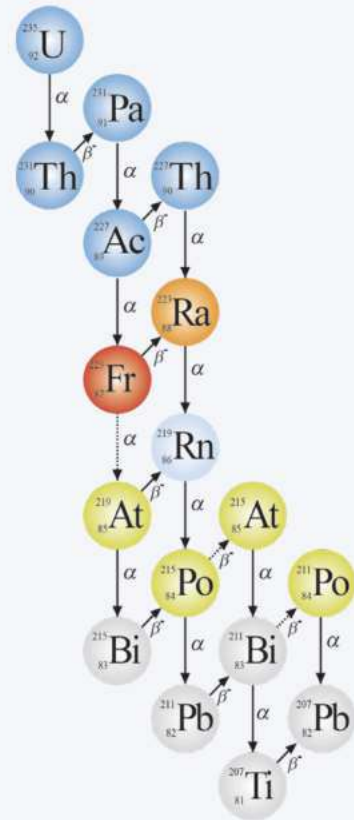


### ความรู้เพิ่มเติม

ในการสลายของนิวเคลียสของธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสี นิวเคลียสลูกที่ได้หลังการสลายอาจยังเป็นนิวเคลียสที่ไม่เสถียร และจะมีการสลายเป็นนิวเคลียสของไอโซโทปใหม่ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้นิวเคลียสที่เสถียร ยกตัวอย่างเช่น ยูเรเนียม-235 ( ${}^{235}_{92} \text{U}$ ) เมื่อสลายให้แอลฟาแล้ว จะเปลี่ยนเป็นทอเรียม-231 ( ${}^{231}_{90} \text{Th}$ ) จากนั้น ทอเรียม-231 จะสลายให้บีตาและเปลี่ยนเป็นโปรแทกทีเนียม-234 ( ${}^{234}_{91} \text{Pa}$ ) และเกิดการสลายต่อไปอีกเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้ไอโซโทปที่เสถียร (stable isotope) ดังรูป

ทั้งนี้ การสลายของนิวเคลียสบางช่วงอาจมีได้หลายแนวทาง เช่น การสลายของพอลโลเนียม-215 ( ${}^{215}_{84} \text{Po}$ ) อาจเป็นการสลายให้แอลฟาหรือบีตา ซึ่งท้ายที่สุด การสลายของยูเรเนียม-235 จะได้ตะกั่ว-207 ( ${}^{207}_{82} \text{Pb}$ ) ดังรูป

ลำดับการสลายของนิวเคลียสกัมมันตรังสีจนกระทั่งได้อาตมหรือไอโซโทปที่เสถียรนี้เรียกว่า อนุกรมกัมมันตรังสี (radioactive series) หรือ ลูกโซ่การสลายกัมมันตรังสี (decay chain) ซึ่งธาตุหรือไอโซโทปกัมมันตรังสีแต่ละชนิด อาจมีอนุกรมการสลายได้หลายแบบ



รูป อนุกรมกัมมันตรังสีของ ยูเรเนียม-235

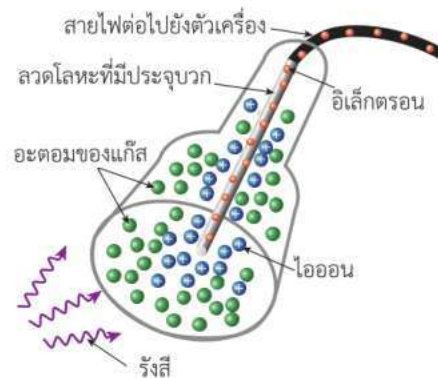
### 20.2.4 กัมมันตภาพ

จากหัวข้อที่ผ่านมา เราทราบแล้วว่า รังสีที่แผ่ออกมาจากธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสี เกิดจากการสลายของนิวเคลียสที่ไม่เสถียร ในหัวข้อนี้ จะเป็นการศึกษาในเชิงปริมาณเกี่ยวกับ อัตราการแผ่รังสีของธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีในขณะหนึ่ง ซึ่งในทางฟิสิกส์นิวเคลียร์เรียกปริมาณนี้ว่า **กัมมันตภาพ (activity)** เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $A$  ซึ่งในระบบเอสไอ มีหน่วยเป็นเบ็กเคอเรล (Bq) ซึ่ง 1 เบ็กเคอเรล หมายถึง ในเวลา 1 วินาทีมีนิวเคลียสสลายไป 1 นิวเคลียส หรือ  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ nucleus/s}$

ในทางปฏิบัติ เราสามารถวัดกัมมันตภาพได้โดยใช้เครื่องมือหลายชนิด โดยหนึ่งในเครื่องมือที่นิยมใช้คือ **เครื่องนับรังสีแบบไกเกอร์มิลเลอร์ (Geiger-Müller counter)** หรือ **เครื่องนับไกเกอร์ (GM counter)** ดังรูป 20.16 ก. ซึ่งทำงานโดยให้รังสีผ่านเข้าไปในหัววัดที่มีแก๊สเฉื่อยอยู่ จากนั้นรังสีจะทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออนและทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ไปยังลวดโลหะตรงแกนกลางที่มีประจุบวก ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าตามปริมาณรังสีที่ผ่านเข้าไปในหัววัด ดังรูป 20.16 ข. โดยการแสดงปริมาณรังสีที่วัดได้มีทั้งการแสดงด้วยเข็มบนสเกลและการให้เสียงผ่านลำโพง



ก. เครื่องนับไกเกอร์



ข. การทำงานของเครื่องนับไกเกอร์

รูป 20.16 เครื่องนับไกเกอร์และหลักการทำงาน

ถ้าเราใช้เครื่องนับไกเกอร์วัดการแผ่รังสีของธาตุหรือไอโซโทปกัมมันตรังสีที่มีอัตราการแผ่รังสีน้อย และสังเกตเสียงที่มาจากเครื่องในช่วงระยะเวลาหนึ่ง จะพบว่า เสียงที่ได้ยินเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ เราไม่สามารถทำนายได้ว่า จะได้ยินเสียงเมื่อไร เช่น ในแต่ละหนึ่งวินาที เราอาจได้ยินเสียงจากเครื่อง 1 ครั้ง หรือ 2 ครั้ง หรือ ไม่ได้ยินเสียงเลย และถ้าเปลี่ยนเป็นธาตุหรือไอโซโทปกัมมันตรังสีชนิดอื่นที่มีอัตราการแผ่รังสีน้อยเช่นกัน จะพบสถานการณ์ในทำนองเดียวกัน ดังนั้น เราจึงสามารถสรุปได้ว่าการแผ่รังสีเกี่ยวข้องกับกระบวนการที่เกิดขึ้นแบบสุ่ม และจากความรู้เกี่ยวกับการสลายของนิวเคลียสในหัวข้อที่ผ่านมา จึงกล่าวได้ว่า การสลายของนิวเคลียสของธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นแบบสุ่ม นั่นคือ เราไม่สามารถบอกได้ว่า ในแต่ละวินาที นิวเคลียสใดจะสลาย และสลายจำนวนเท่าใด ทำนองเดียวกับการที่โยนเหรียญหรือทอดลูกบาศก์จำนวนหนึ่งลงพื้น เราไม่สามารถบอกได้ว่า เหรียญหรือลูกบาศก์ใดจะหงายหน้าที่ต้องการและมีจำนวนเท่าใด

การศึกษาเชิงปริมาณของปรากฏการณ์ในธรรมชาติที่เกิดขึ้นแบบสุ่มนี้ ส่วนใหญ่ จะเป็นการพิจารณาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจำนวนมากในช่วงระยะเวลาที่นานพอสมควร และใช้หลักการทางสถิติมาช่วยวิเคราะห์ปริมาณที่สนใจ ดังนั้น ในการศึกษาเชิงปริมาณเกี่ยวกับการแผ่รังสีของธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสี เราจึงพิจารณาการสลายของนิวเคลียสกัมมันตรังสีจำนวนมากในช่วงระยะเวลาที่นานพอสมควรและใช้หลักการทางสถิติในการวิเคราะห์ ซึ่งศึกษาได้จากกิจกรรม 20.1



### กิจกรรม 20.1 สถานการณ์จำลองการสลายของนิวเคลียสกัมมันตรังสี

#### จุดประสงค์

อธิบายค่าคงตัวการสลายของนิวเคลียสกัมมันตรังสีเปรียบเทียบกับอัตราการทอกลูกบาศก์

#### วัสดุและอุปกรณ์

- |                                  |    |       |
|----------------------------------|----|-------|
| 1. กล่องใส่ลูกบาศก์              | 1  | กล่อง |
| 2. ลูกบาศก์ 6 หน้า แต้มสี 1 หน้า | 50 | ลูก   |
| 3. ถาดหรือภาชนะรองรับลูกบาศก์    | 1  | อัน   |

#### วิธีทำกิจกรรม

- นำลูกบาศก์จำนวน 30 ลูกใส่กล่อง ส่วนที่เหลือให้เก็บไว้ เปรียบให้ลูกบาศก์หนึ่งลูกในกล่องเป็นนิวเคลียสกัมมันตรังสีหนึ่งนิวเคลียส และการที่ทอกลูกบาศก์แล้วลูกบาศก์หงายหน้าที่แต้มสีเปรียบได้กับนิวเคลียสที่เกิดการสลาย
- ทอกลูกบาศก์ทั้งหมดลงบนถาดหรือภาชนะรองรับพร้อม ๆ กัน นับและบันทึกจำนวนลูกบาศก์ที่หงายหน้าแต้มสี
- นำลูกบาศก์ทั้งหมดใส่กล่อง แล้วทำซ้ำข้อ 2. อีก 4 ครั้ง นำค่าที่ได้ทั้ง 5 ครั้งมาหาค่าเฉลี่ยบันทึกผล
- คำนวณอัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยที่ได้จากข้อ 3. กับจำนวนลูกบาศก์ที่โยน ซึ่งค่านี้กำหนดให้เป็นความน่าจะเป็นที่ลูกบาศก์จะหงายหน้าแต้มสี บันทึกผล
- ทำซ้ำข้อ 2. ถึงข้อ 4. แต่เปลี่ยนจำนวนลูกบาศก์ในกล่องเป็น 40 และ 50 ลูก ตามลำดับ



### คำถามท้ายกิจกรรม

- ความน่าจะเป็นที่ลูกบาศก์จะหงายหน้าแต้มสี่จากการทอดลูกบาศก์จำนวน 30 40 และ 50 ลูก แตกต่างกันหรือไม่ อย่างไร
- ถ้าเปรียบเทียบกับความน่าจะเป็นที่ลูกบาศก์จะหงายหน้าแต้มสี่ในทางคณิตศาสตร์ ค่าที่ได้จากการทำกิจกรรมเป็นอย่างไร
- ถ้าเพิ่มจำนวนครั้งที่ทอดเป็น 100 ครั้ง หรือ เพิ่มจำนวนลูกบาศก์เป็น 1000 ลูก ความน่าจะเป็นที่ได้จากการทำกิจกรรมจะแตกต่างไปจากเดิมหรือไม่ อย่างไร

จากกิจกรรม 20.1 เราพบว่า จากการทอดลูกบาศก์จำนวน 30 40 และ 50 ลูก ความน่าจะเป็นที่ลูกบาศก์จะหงายหน้าแต้มสี่มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งถ้าเพิ่มจำนวนครั้งที่ทอดและเพิ่มจำนวนลูกบาศก์ให้มากยิ่งขึ้น จะพบว่า ค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับ  $\frac{1}{6}$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนหน้าที่แต้มสี่กับจำนวนหน้าที่ทั้งหมดที่ลูกบาศก์มี

เมื่อเปรียบเทียบกับ การสลายของนิวเคลียส โดยเปรียบให้ลูกบาศก์หนึ่งลูกในกล่องเป็นนิวเคลียสกัมมันตรังสีหนึ่งนิวเคลียส และการที่ทอดลูกบาศก์แล้วลูกบาศก์หงายหน้าที่แต้มสี่เปรียบได้กับการเกิดการสลาย ความน่าจะเป็นที่ลูกบาศก์จะหงายหน้าแต้มสี่ในการทอดแต่ละครั้งนี้ เปรียบได้กับความน่าจะเป็นที่นิวเคลียสจะเกิดการสลายในหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งในทางฟิสิกส์นิวเคลียร์เรียกปริมาณนี้ว่า **ค่าคงตัวการสลาย (decay constant)** แทนด้วยสัญลักษณ์  $\lambda$  มีหน่วยเป็น ต่อวินาที ( $s^{-1}$ ) ต่อชั่วโมง ( $h^{-1}$ ) ต่อวัน ( $day^{-1}$ ) หรือ ต่อปี ( $year^{-1}$ ) ทั้งนี้ ค่าคงตัวการสลายเป็นค่าเฉพาะของนิวเคลียสแต่ละชนิด นิวเคลียสของธาตุหรือไอโซโทปกัมมันตรังสีใดมีค่าคงตัวการสลายมาก แสดงว่า นิวเคลียสนั้นมีโอกาสมากที่จะสลายในหนึ่งหน่วยเวลา



### ชวนคิด

ถ้ามีลูกเหลี่ยม 20 หน้า โดยแต่ละหน้ามีโอกาสหงายได้เท่า ๆ กัน และมีหน้าที่แต้มสี่ไว้ 1 หน้า หลังทอดลูกเหลี่ยมนี้ออกไป จงหาความน่าจะเป็นที่ลูกเหลี่ยมนี้ออกหน้าแต้มสี่ไว้



เมื่อนำค่าคงตัวการสลาย ( $\lambda$ ) ที่มีหน่วยต่อหนึ่งหน่วยเวลามาคูณกับจำนวนนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ขณะนั้น ( $N$ ) จะได้ อัตราการลดลงของจำนวนนิวเคลียส หรือ อัตราการแผ่รังสีของธาตุกัมมันตรังสี ซึ่งปริมาณนี้ คือ **กัมมันตภาพ** ( $A$ ) นั่นเอง เขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$A = \lambda N \quad (20.8)$$

$A$  มีหน่วยเป็น จำนวนนิวเคลียสต่อวินาที ( $s^{-1}$ ) หรือ เบ็กเคอเรล (Bq) ตามระบบเอสไอ นอกจากนี้บางแห่ง อาจมีการใช้หน่วยกัมมันตภาพเป็น คูรี แทนด้วยสัญลักษณ์ Ci ซึ่งเป็นหน่วยที่นิยมใช้วัดกัมมันตภาพในอดีต โดยที่ 1 คูรี มีค่าเท่ากับอัตราการสลายของนิวเคลียสของเรเดียมปริมาณ 1 กรัม ซึ่งเท่ากับ  $3.7 \times 10^{10}$  นิวเคลียสต่อวินาที หรือ  $3.7 \times 10^{10}$  เบ็กเคอเรล

ในทางปฏิบัติ กัมมันตภาพ 1 คูรีเป็นค่าที่สูงมาก จึงนิยมใช้หน่วยที่เล็กกว่า เช่น มิลลิคูรี หรือ ไมโครคูรี แทนด้วยสัญลักษณ์ mCi และ  $\mu$ Ci ตามลำดับ

**ตัวอย่าง 20.6**  $^{210}_{83}\text{Bi}$  มีค่าคงตัวการสลาย  $1.6 \times 10^{-6}$  ต่อวินาที และมีการสลายให้บีตาแลบ ถ้าในขณะหนึ่งมี  $^{210}_{83}\text{Bi}$  จำนวน  $2.5 \times 10^{12}$  นิวเคลียส จงหา กัมมันตภาพของ  $^{210}_{83}\text{Bi}$  ณ เวลานั้น ในหน่วยของกิโลเบ็กเคอเรล และ มิลลิคูรี

**แนวคิด** หากกัมมันตภาพ ของ  $^{210}_{83}\text{Bi}$  ณ เวลานั้น จากผลคูณของค่าคงตัวการสลายกับจำนวนนิวเคลียสที่มีอยู่ ณ เวลานั้น ตามสมการ (20.8) โดย  $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$

**วิธีทำ** จากสมการ

$$A = \lambda N$$

แทนค่า จะได้

$$\begin{aligned} A &= (1.6 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1})(2.5 \times 10^{12}) \\ &= 4.0 \times 10^6 \text{ s}^{-1} \\ &= 4.0 \times 10^6 \text{ Bq} \\ &= 4.0 \times 10^3 \text{ kBq} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} 4.0 \times 10^3 \text{ kBq} &= 4.0 \times 10^6 \text{ Bq} \times \frac{1 \text{ Ci}}{3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}} \\ &= 1.1 \times 10^{-4} \text{ Ci} \\ &= 0.11 \text{ mCi} \end{aligned}$$

**ตอบ** ณ เวลานั้น  $^{210}_{83}\text{Bi}$  มีกัมมันตภาพเท่ากับ  $4.0 \times 10^3$  กิโลเบ็กเคอเรล หรือ 0.11 มิลลิคูรี

**ตัวอย่าง 20.7**  $^{214}_{82}\text{Pb}$  ปริมาณ  $3 \times 10^{-14}$  กิโลกรัม มีกัมมันตภาพ 1 มิลลิวูรี่ จงหาค่าคงตัวการสลาย กำหนดให้  $^{214}_{82}\text{Pb}$  1 โมล มีมวล 214 กรัม

**แนวคิด** หาจำนวนนิวเคลียสของ  $^{214}_{82}\text{Pb}$  จากจำนวนอะตอม โดยพิจารณา  $^{214}_{82}\text{Pb}$  ปริมาณ 1 โมลมีจำนวนอะตอม  $6.0221 \times 10^{23}$  อะตอมและมีมวล 214 กรัม จากนั้น แปลงค่ากัมมันตภาพ จากหน่วยมิลลิวูรี่เป็นหน่วยเบ็กเคอเรล และหาค่าคงตัวการสลายโดยการแทนค่ากัมมันตภาพในหน่วยเบ็กเคอเรลและจำนวนนิวเคลียสที่คำนวณได้ลงไปในสมการ (20.8)

**วิธีทำ**  $^{214}_{82}\text{Pb}$  1 โมล มีมวล 214 กรัม และมีจำนวนอะตอม  $6.0221 \times 10^{23}$  อะตอม ดังนั้น  $^{214}_{82}\text{Pb}$  มวล  $3 \times 10^{-14}$  กิโลกรัม มีจำนวนอะตอมหรือจำนวนนิวเคลียสเท่ากับ

$$N = \frac{(6.0221 \times 10^{23})(3 \times 10^{-14} \text{ kg})}{214 \times 10^{-3} \text{ kg}}$$

$$= 8.44 \times 10^{10}$$

กัมมันตภาพของ  $^{214}_{82}\text{Pb}$  เท่ากับ

$$A = 1 \text{ mCi}$$

$$= 3.7 \times 10^7 \text{ Bq}$$

จากสมการ

$$A = \lambda N$$

แทนค่า  $A$  และ  $N$  จะได้

$$3.7 \times 10^7 \text{ Bq} = \lambda (8.44 \times 10^{10})$$

$$\lambda = \frac{3.7 \times 10^7 \text{ s}^{-1}}{8.44 \times 10^{10}}$$

$$= 4.38 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

**ตอบ** ค่าคงตัวการสลายเท่ากับ  $4.38 \times 10^{-4}$  ต่อวินาที

### 20.2.5 ครึ่งชีวิต

ในการศึกษาเชิงปริมาณของการแผ่รังสีของธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสี นอกจากมีการใช้กัมมันตภาพเพื่อบอกถึงอัตราการแผ่รังสีแล้ว ยังมีการใช้ **ครึ่งชีวิต (half-life)** เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $T_{\frac{1}{2}}$  เพื่อบอกถึงช่วงเวลาที่ธาตุกัมมันตรังสีสลายจนกระทั่งลดลงเหลืออยู่ครึ่งหนึ่งของปริมาณเริ่มต้น ซึ่งมีหน่วยเป็น วินาที (s) ชั่วโมง (h) วัน (day) หรือ ปี (year) ธาตุหรือไอโซโทปกัมมันตรังสีใดมีครึ่งชีวิตมาก แสดงว่าใช้เวลาในการสลายมาก

ครึ่งชีวิตของธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสี มีความสัมพันธ์กับปริมาณใดบ้าง ศึกษาได้จากกิจกรรม 2.2



#### ความรู้เพิ่มเติม

ความรู้เกี่ยวกับครึ่งชีวิตของธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีถูกนำไปประยุกต์ใช้หลากหลายด้าน โดยเฉพาะในด้านธรณีวิทยาและโบราณคดี ที่มีการวิเคราะห์ปริมาณไอโซโทปกัมมันตรังสีเพื่อหาอายุของหิน แร่ซากดึกดำบรรพ์ และ วัตถุโบราณ



รูป เครื่องปั้นดินเผาบ้านเชียง จังหวัดอุดรธานี อายุหลายพันปี



### กิจกรรม 20.2 สถานการณ์จำลองครึ่งชีวิต

#### จุดประสงค์

- อธิบายครึ่งชีวิตของนิวเคลียสกัมมันตรังสีเปรียบเทียบกับ การทอดลูกบาศก์
- เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนลูกบาศก์ที่เหลือกับจำนวนครั้งที่ทอดลูกบาศก์
- หาครึ่งชีวิตจากกราฟที่ได้จากการทอดลูกบาศก์ที่แต้มสีหนึ่งหน้าและแต้มสีสองหน้า

#### วัสดุและอุปกรณ์

- |                                  |    |       |
|----------------------------------|----|-------|
| 1. กล่องใส่ลูกบาศก์              | 1  | กล่อง |
| 2. ลูกบาศก์ 6 หน้า แต้มสี 1 หน้า | 40 | ลูก   |
| 3. ปากกาเมจิกหรือชอล์กสี         | 1  | ด้าม  |
| 4. ถาดหรือภาชนะรองรับลูกบาศก์    | 1  | อัน   |

## วิธีทำกิจกรรม

### ตอนที่ 1 ลูกบาศก์แฉก 1 หน้า

- นำลูกบาศก์ทั้งหมดใส่กล่อง โดยเปรียบให้ลูกบาศก์หนึ่งลูกเป็นนิวเคลียสกัมมันตรังสีหนึ่งนิวเคลียส และการที่ลูกบาศก์หงายหน้าที่แฉกเปรียบได้กับการเกิดการสลาย
- ทอดลูกบาศก์ทั้งหมดลงบนถาดหรือภาชนะรองรับพร้อม ๆ กัน คัดลูกบาศก์ที่หงายหน้าแฉกออก บันทึกจำนวนครั้งที่ทอดกับจำนวนลูกบาศก์ที่เหลือ
- ทำซ้ำข้อ 2. โดยนำลูกบาศก์ที่เหลือมาทอดต่อ จนกระทั่งเหลือลูกบาศก์ที่จะทอดเพียง 1 – 3 ลูก หรือไม่มีเลย
- ทำซ้ำข้อ 1. ถึงข้อ 3. อีก 2 รอบ แล้วนำค่าที่ได้แต่ละรอบมาหาค่าเฉลี่ยของจำนวนลูกบาศก์ที่เหลือจากการทอดแต่ละครั้ง บันทึกผล
- เขียนกราฟระหว่างค่าเฉลี่ยของจำนวนลูกบาศก์ที่เหลือที่ได้จากข้อ 4. กับจำนวนครั้งที่ทอด โดยให้จำนวนค่าเฉลี่ยของลูกบาศก์ที่เหลืออยู่บนแกนตั้ง และจำนวนครั้งที่ทอดอยู่บนแกนนอน จากกราฟ หาจำนวนครั้งที่ทอดแล้วมีลูกบาศก์เหลือ 20, 10 และ 5 ลูก ตามลำดับ

### ตอนที่ 2 ลูกบาศก์แฉก 2 หน้า

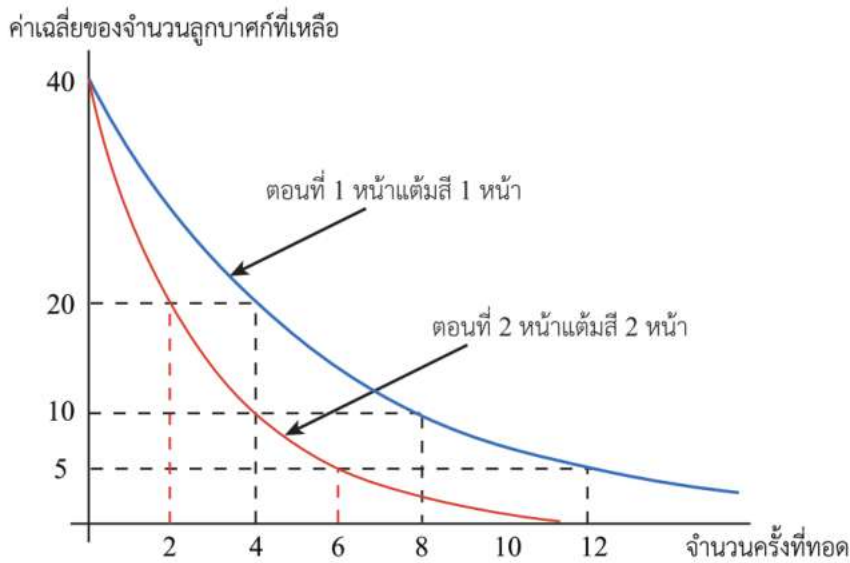
- แฉกสีบนลูกบาศก์ทุกลูกเพิ่มอีก 1 หน้า ในด้านตรงข้ามกับหน้าที่แฉกสีไว้แล้ว จากนั้นทำซ้ำตามขั้นตอนเดียวกับตอนที่ 1



### คำถามท้ายกิจกรรม

- ครึ่งชีวิตของนิวเคลียสกัมมันตรังสีเปรียบได้กับปริมาณใดในการทอดลูกบาศก์
- กราฟที่ได้จากกิจกรรมทั้ง 2 ตอน มีลักษณะเหมือนและแตกต่างกันอย่างไร
- จำนวนครั้งที่ทอดลูกบาศก์แล้วทำให้ลูกบาศก์ลดลงจาก 40 ลูก เหลือ 20 ลูก จาก 20 ลูก เหลือ 10 ลูก และ จาก 10 ลูก เหลือ 5 ลูก ในกิจกรรมตอนที่ 1 และตอนที่ 2 มีค่าประมาณเท่าใดบ้าง และมีค่าเป็นสัดส่วนกันอย่างไร

จากกิจกรรม 20.2 กราฟระหว่างค่าเฉลี่ยของจำนวนลูกบาศก์ที่เหลือกับจำนวนครั้งที่ทอดของกิจกรรมทั้ง 2 ตอน มีลักษณะเป็นเส้นโค้งและตัดแกน  $y$  คล้ายกัน โดยในตอนที่ 2 จำนวนครั้งที่ทอดแล้วทำให้มีจำนวนลูกบาศก์ลดลงเหลือ 1 - 3 ลูก มีจำนวนครั้งน้อยกว่า ดังรูป 20.17



รูป 20.17 กราฟระหว่างค่าเฉลี่ยของลูกบาศก์ที่เหลือกับจำนวนครั้งที่ทอด

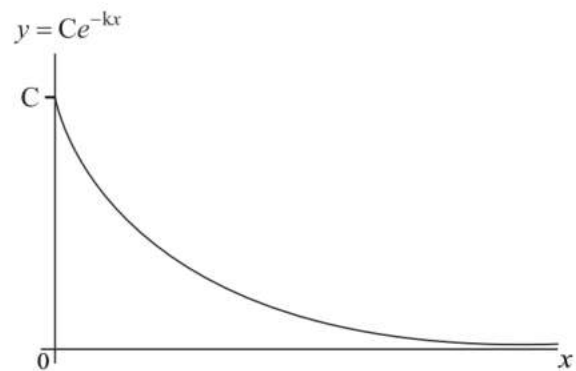
เมื่อพิจารณาจำนวนครั้งที่ทอดแล้วทำให้มีลูกบาศก์เหลืออยู่เฉลี่ยประมาณครึ่งหนึ่งของจำนวนเริ่มต้น เช่น จาก 40 ลูก เหลือ 20 ลูก จาก 20 ลูก เหลือ 10 ลูก และ จาก 10 ลูก เหลือ 5 ลูก พบว่า ในตอนที่ 1 ใช้จำนวนครั้งที่ทอดใกล้เคียงกัน คือประมาณ 4 ครั้ง ส่วนในตอนที่ 2 พบว่า ได้ผลในการทำงานเดียวกัน แต่ใช้จำนวนครั้งที่ทอดประมาณ 2 ครั้ง

จำนวนครั้งในการทอดเปรียบได้กับจำนวนหน่วยของเวลาที่นิวเคลียสกัมมันตรังสีสลาย ดังนั้น จำนวนครั้งที่ทอดลูกบาศก์แล้วทำให้มีลูกบาศก์เหลืออยู่ครึ่งหนึ่งของจำนวนเริ่มทอด จึงเปรียบได้กับช่วงเวลาที่นิวเคลียสสลายจนกระทั่งเหลือนิวเคลียสอยู่ครึ่งหนึ่งของจำนวนเริ่มต้น หรือ ครึ่งชีวิต นั่นเอง

จากกิจกรรม 20.2 กราฟที่ได้จากกิจกรรมแต่ละตอน มีลักษณะโค้งเหมือนกับกราฟของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ดังรูป 20.18 ซึ่งมีรูปทั่วไปของสมการ คือ

$$y = Ce^{-kx}$$

โดย  $C$  และ  $k$  คือ ค่าคงตัวที่มีค่ามากกว่าศูนย์ ส่วน  $e$  คือ ค่าคงตัวที่เป็นฐานของลอการิทึมธรรมชาติ มีค่าประมาณ 2.7182818



รูป 20.18 กราฟของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล

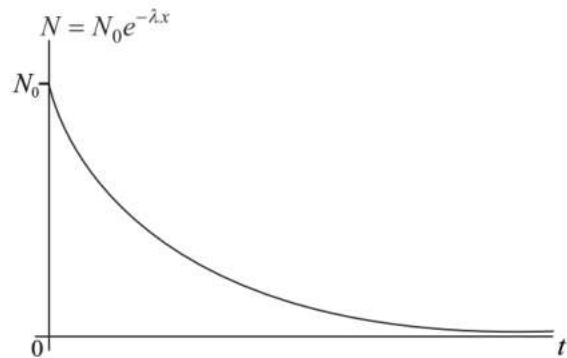
ถ้าเปรียบเทียบกับการสลายของนิวเคลียส กราฟระหว่างจำนวนนิวเคลียสที่เหลือหลังการสลายกับเวลาที่ผ่านไป ควรมีลักษณะเดียวกัน ดังรูป 20.19 ซึ่งจะได้สมการของกราฟเป็น

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (20.9a)$$

โดย  $N_0$  คือ จำนวนนิวเคลียสเริ่มต้น ( $t = 0$ )

$N$  คือ จำนวนนิวเคลียสที่เหลือหลังการสลาย  
เมื่อเวลาผ่านไป  $t$

$\lambda$  คือ ค่าคงตัวการสลาย มีหน่วย ต่อวินาที



รูป 20.19 กราฟการสลายของนิวเคลียส

สมการ (20.9a) สามารถจัดรูปใหม่ ให้อยู่ในรูปปริมาณอื่นที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้  
คูณทั้งสองข้างของสมการ (20.9a) ด้วย  $\lambda$  จะได้

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

แทน  $A = \lambda N$  และ  $A_0 = \lambda N_0$  จะได้

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (20.9b)$$

หรืออาจจัดสมการ (20.9a) ให้อยู่ในรูปของค่ามวล โดยกำหนดให้นิวเคลียสจำนวน  $N_0$

มีมวล  $m_0$  ดังนั้นจะได้ว่า นิวเคลียสจำนวน  $N$  นิวเคลียส มีมวล

$$m = \left(\frac{m_0}{N_0}\right)N \quad (a)$$

คูณทั้งสองข้างของสมการ (20.9a) ด้วย  $\frac{m_0}{N_0}$  จะได้

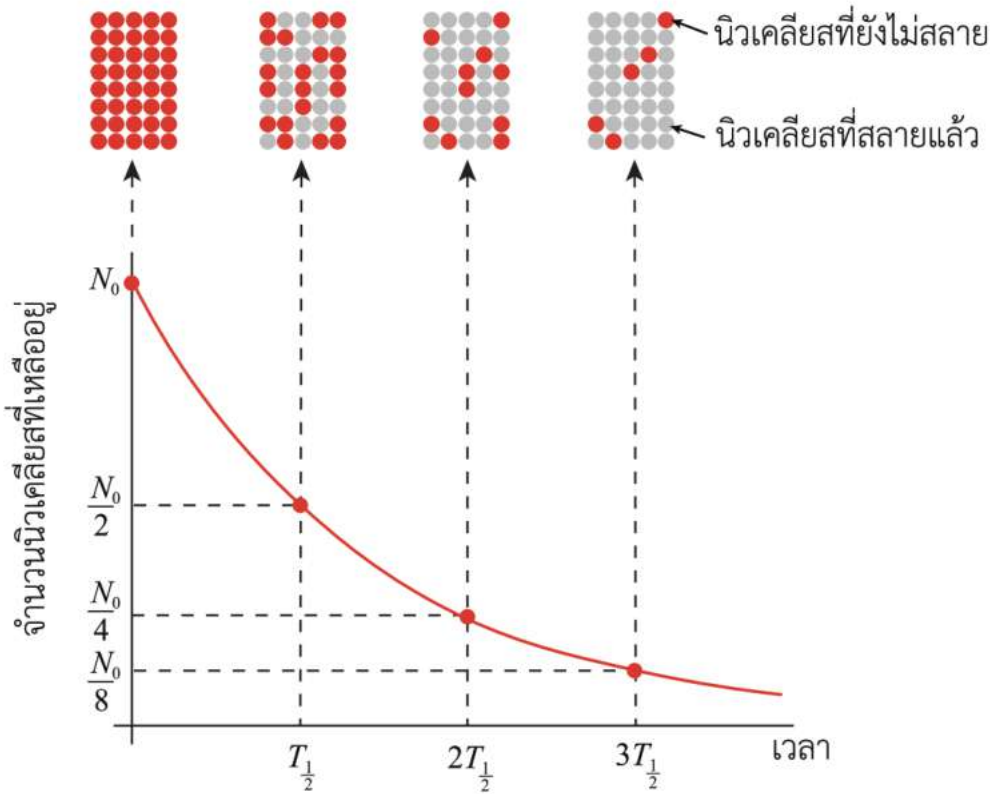
$$\left(\frac{m_0}{N_0}\right)N = \left(\frac{m_0}{N_0}\right)N_0 e^{-\lambda t} \quad (b)$$

แทน  $m$  จาก (a) ลงใน (b) จะได้

$$m = m_0 e^{-\lambda t} \quad (20.9c)$$

สมการ (20.9a) - (20.9c) ช่วยให้เราสามารถหาจำนวนนิวเคลียส กัมมันตภาพ และมวลของธาตุหรือไอโซโทปกัมมันตรังสีเมื่อเวลาผ่านไป  $t$  ใด ๆ แต่ในกรณีที่เวลาที่ผ่านไปเป็นจำนวนเท่าของครึ่งชีวิต หรือ  $t = nT_{\frac{1}{2}}$  เราสามารถหาปริมาณต่าง ๆ ได้ดังนี้

พิจารณารูปของสมการ (20.9a) ที่แสดงจำนวนนิวเคลียสที่เหลืออยู่ ณ เวลาที่เป็นจำนวนเต็มเท่าของครึ่งชีวิต ดังรูป 20.20



รูป 20.20 กราฟแสดงจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสีที่เหลืออยู่ ณ เวลา  $T_{\frac{1}{2}}$ ,  $2T_{\frac{1}{2}}$  และ  $3T_{\frac{1}{2}}$

จากกราฟ เมื่อเวลาผ่านไปเป็นสองเท่าของครึ่งชีวิต ( $t = 2T_{\frac{1}{2}}$ ) นิวเคลียสที่เหลืออยู่จะมีจำนวนครึ่งหนึ่งของ  $\frac{N_0}{2}$  หรือ  $\frac{1}{2}\left(\frac{N_0}{2}\right) = \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2}$  และเมื่อเวลาผ่านไปเป็นสามเท่าของครึ่งชีวิต ( $t = 3T_{\frac{1}{2}}$ ) นิวเคลียสที่เหลืออยู่จะมีจำนวนครึ่งหนึ่งของ  $\frac{N_0}{4}$  หรือ  $\frac{1}{2}\left(\frac{N_0}{4}\right) = \frac{N_0}{8} = \frac{N_0}{2^3}$  และถ้าเวลาผ่านไปอีก เป็น  $4T_{\frac{1}{2}}$ ,  $5T_{\frac{1}{2}}$  จำนวนนิวเคลียสที่เหลือจะเป็น  $\frac{N_0}{16} = \frac{N_0}{2^4}$  และ  $\frac{N_0}{32} = \frac{N_0}{2^5}$  ตามลำดับ

นั่นคือ เมื่อนิวเคลียสกัมมันตรังสีมีการสลายด้วยเวลาที่ผ่านไป ( $t$ ) เป็นจำนวนเต็มเท่า ( $n$ ) ของครึ่งชีวิต ( $T_{\frac{1}{2}}$ ) หรือ  $t = nT_{\frac{1}{2}}$  จำนวนนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีที่เหลืออยู่จะเท่ากับ

$$N = \frac{N_0}{2^n}$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับกัมมันตภาพ ( $A$ ) และมวลของธาตุหรือไอโซโทปกัมมันตรังสี ( $m$ ) เมื่อเวลาที่ผ่านไป  $t = n T_{\frac{1}{2}}$  จะได้

$$A = \frac{A_0}{2^n}$$

และ

$$m = \frac{m_0}{2^n}$$

นอกจากนี้ เราสามารถหาครึ่งชีวิตของธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีได้ เมื่อเราทราบค่าคงตัวการสลาย ( $\lambda$ ) ซึ่งพิจารณาได้ดังนี้

เมื่อ  $t = T_{\frac{1}{2}}$  จำนวนนิวเคลียสที่เหลืออยู่เท่ากับ  $N = \frac{N_0}{2}$   
แทนลงในสมการ (20.9a) จะได้

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}}$$

$$e^{\lambda T_{\frac{1}{2}}} = 2$$

หาลอการิทึมธรรมชาติของปริมาณทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$\ln(e^{\lambda T_{\frac{1}{2}}}) = \ln(2)$$

$$(\lambda T_{\frac{1}{2}}) \ln(e) = \ln 2$$

$$\lambda T_{\frac{1}{2}} = \ln 2$$

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (20.10a)$$

แทนค่า  $\ln 2 = 0.693$  จะได้

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (20.10b)$$

นั่นคือ ครึ่งชีวิตของธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีมีค่าเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าคงตัวการสลาย ตัวอย่างครึ่งชีวิตของธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีบางชนิด ดังแสดงในตาราง 20.5



ตาราง 20.5 ครึ่งชีวิตของไอโซโทปกัมมันตรังสีบางชนิด

ไอโซโทปกัมมันตรังสี	ครึ่งชีวิต
พอลเนียม-194	0.392 วินาที
เรดอน-220	55.6 วินาที
โซเดียม-24	15 ชั่วโมง
ไอโอดีน-131	8 วัน
กำมะถัน-35	87 วัน
โคบอลต์-60	5.3 ปี
ซีเซียม-137	30 ปี
คาร์บอน-14	5730 ปี
ยูเรเนียม-235	$7.1 \times 10^8$ ปี
โพแทสเซียม-40	$1.3 \times 10^9$ ปี

ตัวอย่าง 20.8 ตอบคำถามต่อไปนี้ โดยใช้ตาราง 20.5

ก. ค่าคงตัวการสลายของโซเดียม-24 เท่ากับเท่าใด

ข. เมื่อเวลาผ่านไป 75 ชั่วโมง จะเหลือโซเดียม-24 เป็นกี่เท่าของค่าเริ่มต้น

กำหนด  $e^{3.465} = 31.98$

**แนวคิด** หาค่าคงตัวการสลายได้จากสมการ  $T_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\lambda}$  และหาปริมาณโซเดียม-24 ที่เหลืออยู่ได้จากสมการ  $N = N_0 e^{-\lambda t}$  โดยถ้าในกรณีที่เวลาที่พิจารณาเป็นจำนวนเท่าของครึ่งชีวิตสามารถหาปริมาณโซเดียม-24 ที่เหลืออยู่ได้จากสมการ  $N = \frac{N_0}{2^n}$

**วิธีทำ** ก. จาก  $T_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\lambda}$  จะได้  $\lambda = \frac{0.693}{T_{\frac{1}{2}}}$

แทนค่า  $T_{\frac{1}{2}} = 15\text{h}$  จะได้  $\lambda = \frac{0.693}{15\text{h}}$

$= 0.0462\text{h}^{-1}$

ข. จาก  $N = N_0 e^{-\lambda t}$

แทนค่า  $\lambda = 0.0462 \text{ h}^{-1}$  และ  $t = 75 \text{ h}$  จะได้

$$\begin{aligned} N &= N_0 e^{-(0.0462 \text{ h}^{-1})(75 \text{ h})} \\ &= N_0 e^{-(3.465)} \\ &= N_0 \left( \frac{1}{e^{3.465}} \right) \\ &= (0.0313) N_0 \end{aligned}$$

หรือ อาจหาปริมาณโซเดียม-24 ที่เหลือจาก การพิจารณาเวลา 75 ชั่วโมง เป็นจำนวนเต็มเท่าของครึ่งชีวิต

$$\begin{aligned} 75 \text{ h} &= n(15 \text{ h}) \\ n &= 5 \end{aligned}$$

ดังนั้น เมื่อเวลาผ่านไป 75 ชั่วโมง จะมีโซเดียม-24 เหลืออยู่

$$\begin{aligned} N &= \frac{N_0}{2^n} \\ &= \frac{N_0}{2^5} \\ &= (0.03125) N_0 \end{aligned}$$

- ตอบ** ก. ค่าคงตัวการสลายของโซเดียม-24 เท่ากับ 0.05 ต่อชั่วโมง  
 ข. เมื่อเวลาผ่านไป 75 ชั่วโมง จะเหลือโซเดียม-24 ประมาณ 0.03 เท่าของค่าเริ่มต้น

**ตัวอย่าง 20.9** ไอโอดีน-126 มีครึ่งชีวิต 13.3 วัน ถ้าในขณะหนึ่งไอโอดีนนี้มีมวล 10 กรัม จงหาว่า

- ก. จะต้องใช้เวลานานเท่าใด จึงจะเหลือไอโอดีน-126 เท่ากับ 2.5 กรัม  
 ข. ถ้าเวลาผ่านไป 20 วัน จะมีไอโอดีน-126 เหลืออยู่กี่กรัม

- แนวคิด** ก. เนื่องจากปริมาณไอโอดีน-126 ที่เริ่มต้น มวล 10 กรัม เป็นจำนวน 4 เท่าของปริมาณที่เหลืออยู่ 2.5 กรัม หรือ  $10 = 2^2(2.5)$  ดังนั้น สามารถหาเวลาที่ผ่านไปได้จากการคูณ 2 กับครึ่งชีวิต  
 ข. หาค่าคงตัวการสลาย ( $\lambda$ ) จากครึ่งชีวิตของไอโอดีน-126 โดยใช้สมการ (20.10b) จากนั้น หามวลของไอโอดีน-126 ที่เหลืออยู่ได้จากสมการ (20.9c)

**วิธีทำ** ก. ปริมาณไอโอดีน-126 เริ่มต้นมีอยู่ 10 กรัม จากนั้นสลายจนกระทั่งเหลืออยู่เท่ากับ 2.5 กรัม

$$\text{ซึ่ง } 2.5 = \frac{10}{4} = \frac{10}{2^2} \quad \text{ดังนั้น เวลาที่ไอโอดีน-126 สลายเท่ากับ}$$

$$\begin{aligned} t &= n(T_{\frac{1}{2}}) \\ &= 2(T_{\frac{1}{2}}) \\ &= 2(13.3 \text{ day}) \\ &= 26.6 \text{ day} \end{aligned}$$

ข. หา  $\lambda$  ได้จากสมการ (20.10b) โดยแทนค่าครึ่งชีวิตของไอโอดีน-126 เท่ากับ 13.3 วัน จะได้

$$\begin{aligned} 13.3 \text{ day} &= \frac{0.693}{\lambda} \\ \lambda &= \frac{0.693}{13.3 \text{ day}} \\ &= 0.0521 \text{ day}^{-1} \end{aligned}$$

หามวลของไอโอดีน-126 ที่เหลืออยู่จากสมการ (20.9c)

แทนค่า  $m_0 = 10 \text{ g}$   $t = 20 \text{ day}$  และ  $\lambda = 0.0521 \text{ day}^{-1}$  จะได้

$$\begin{aligned} m &= (10 \text{ g})(e^{-(0.0521 \text{ day}^{-1})(20 \text{ day})}) \\ &= (10 \text{ g})e^{-1.0} \\ &= \frac{(10 \text{ g})}{e} \\ &= 3.53 \text{ g} \end{aligned}$$

**ตอบ** ก. ต้องใช้เวลา 26.6 วัน ไอโอดีน-126 จึงจะเหลือ 2.5 กรัม

ข. เมื่อเวลาผ่านไป 20 วัน จะมีปริมาณไอโอดีน-126 เหลืออยู่ประมาณ 3.53 กรัม

การสลายของธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีที่ได้ศึกษามา เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ กล่าวคือ นิวเคลียสที่ไม่เสถียรมีการสลายได้เองตามธรรมชาติ เพื่อเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะที่มีเสถียรภาพมากกว่า พร้อมกับมีการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของอนุภาคหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนแปลงนี้ไม่เกี่ยวข้องกับการกระทำของมนุษย์ หรือปัจจัยแวดล้อมภายนอก เช่น อุณหภูมิ หรือ ความดันแต่อย่างใด

ถ้านิวเคลียสของธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีได้รับการกระตุ้นจากการกระทำของมนุษย์ หรือปัจจัยแวดล้อมภายนอกที่เหมาะสม นิวเคลียสจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้หรือไม่ และจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปใด ศึกษาได้ในหัวข้อต่อไป



## คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 20.2

1. บอกความหมายของคำต่อไปนี้
  - ก. กัมมันตภาพรังสี
  - ข. ไอโซโทปกัมมันตรังสี
  - ค. รังสี
  - ง. การแผ่รังสี
2. ข้อใดเป็นสมบัติของรังสีแอลฟา บีตา และแกมมา
  - ก. มีอำนาจทะลุผ่านน้อยที่สุด
  - ข. มีความสามารถในการทำให้เกิดแก๊สแตกตัวเป็นไอออนได้ดีที่สุด
  - ค. ต้องใช้วัสดุที่มีความหนามากที่สุดในการกั้นรังสีชนิดนั้น
  - ง. ไม่เบี่ยงเบนเมื่อผ่านเข้าไปในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก
  - จ. เมื่อเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก แนวการเคลื่อนที่จะเบนออกจากแนวการเคลื่อนที่เดิมมากที่สุด
  - ฉ. อัตราส่วนระหว่างประจุไฟฟ้าต่อมวลมีค่ามากที่สุด
3. ธาตุกัมมันตรังสีชนิดหนึ่งสลายให้บีตา เลขอะตอมและเลขมวลของธาตุใหม่เปลี่ยนไปจากธาตุเดิมเท่าใด
4. เมื่อนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีชนิดหนึ่ง สลายให้แกมมาแล้ว นิวเคลียสนั้นจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร
5. ข้อความใดต่อไปนี้เป็นธรรมชาติการสลายของธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสี
  - ก. หลังการสลายของนิวเคลียสแม่ นิวเคลียสลูกที่ได้อาจเป็นนิวเคลียสที่เสถียรหรือสลายต่อไปได้อีก
  - ข. ธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีมีการสลายให้รังสีไม่มีวันหมด
  - ค. เฉพาะการสลายให้แอลฟาหรือบีตาทำให้ได้นิวเคลียสของธาตุใหม่
  - ง. จำนวนนิวเคลียสที่สลายในหนึ่งหน่วยเวลาขึ้นอยู่กับจำนวนนิวเคลียสที่มีอยู่ทั้งหมดขณะนั้น
  - จ. การเพิ่มอุณหภูมิสามารถเพิ่มอัตราการสลายได้
6. กัมมันตภาพของธาตุกัมมันตรังสี คืออะไร และในทางปฏิบัติสามารถวัดได้อย่างไร
7. ถ้าเปรียบเทียบให้ลูกบาศก์ 6 หน้าเป็นนิวเคลียสกัมมันตรังสี และการทอยหน้าแต้มสี่เปรียบได้กับการสลาย ค่าคงตัวการสลายเปรียบได้กับปริมาณใดในการทอดลูกบาศก์

8. เริ่มต้น มีนิวเคลียสกัมมันตรังสี X และ Y อย่างละ 1 ล้านนิวเคลียส เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง นิวเคลียส X เหลืออยู่จำนวน 550 000 นิวเคลียส ส่วนนิวเคลียส Y เหลืออยู่ 500 000 นิวเคลียส นิวเคลียสใดมีค่าคงตัวการสลายมากกว่ากัน อธิบาย
9. ไอโซโทปกัมมันตรังสี W มีครึ่งชีวิตน้อยกว่าครึ่งชีวิตของไอโซโทปกัมมันตรังสี Z แสดงว่า ไอโซโทปชนิดใดสลายได้เร็วกว่ากัน อธิบาย

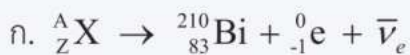


### แบบฝึกหัด 20.2

1. จงเขียนเลขอะตอมและเลขมวลในสมการการสลายต่อไปนี้



2. จากสมการการสลายต่อไปนี้ ให้ระบุว่า X เป็นธาตุใด และ A กับ Z มีค่าเท่าใด



3. นิวเคลียสของทอเรียม-232 ( ${}_{90}^{232}\text{Th}$ ) สลายให้แอลฟาแล้วกลายเป็นนิวเคลียสของไอโซโทป X ซึ่งมีการสลายต่อให้บีตา แล้วกลายเป็นนิวเคลียสของไอโซโทป Y จงเขียนสมการการสลายที่ระบุเลขอะตอมและเลขมวล

4. ตะกั่ว-214 ( ${}_{82}^{214}\text{Pb}$ ) จำนวน  $8.44 \times 10^{10}$  นิวเคลียส มีกัมมันตภาพ 1 มิลลิคูรี จงหาค่าคงตัวการสลาย

5. ฟอสฟอรัส-32 ( ${}_{15}^{32}\text{P}$ ) มีครึ่งชีวิต 14 วัน จะใช้เวลานานเท่าใด จึงจะเหลือฟอสฟอรัส-32 ร้อยละ 25 ของปริมาณเดิม

6. ธาตุกัมมันตรังสีชนิดหนึ่งมีครึ่งชีวิต 10 นาที มีจำนวนนิวเคลียสเริ่มต้นเท่ากับ  $8.0 \times 10^{20}$  นิวเคลียส จงหาว่า

ก. เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที มีนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีสลายไปกี่นิวเคลียส

ข. เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที มีนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีเหลือเท่าใด

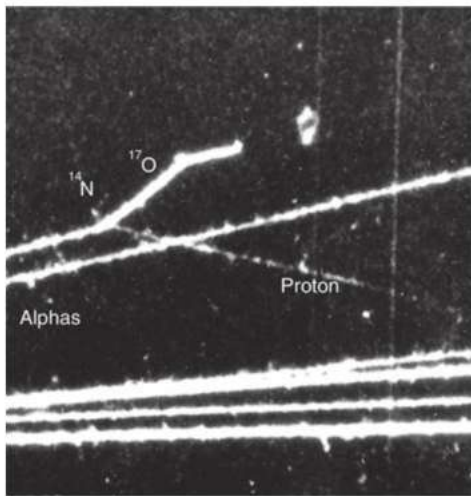
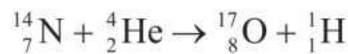
7. ไอโอดีน-131 ( ${}_{53}^{131}\text{I}$ ) มีจำนวนนิวเคลียสเริ่มต้น  $3.69 \times 10^{10}$  นิวเคลียส และมีกัมมันตภาพ 1 ไมโครคูรี จงหาครึ่งชีวิตของไอโอดีน-131

8. พอลอเนียม-210 ( ${}_{84}^{210}\text{Po}$ ) มีครึ่งชีวิต 140 วัน เริ่มต้นมีปริมาณ 20.0 กรัม เมื่อเวลาผ่านไป 120 วัน จะเหลือพอลอเนียม-210 อยู่กี่กรัม กำหนด  $e^{-0.594}$  เท่ากับ 0.552

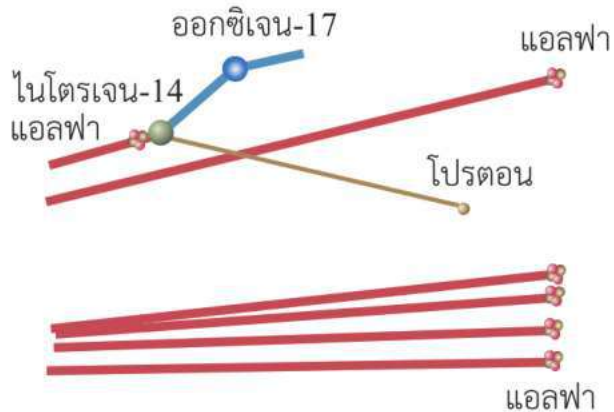
### 20.3 ปฏิกริยานิวเคลียร์และพลังงานนิวเคลียร์

ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2457 - 2462 รัทเทอร์ฟอร์ดได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของนิวเคลียส โดยทดลองให้อนุภาคแอลฟาจากการสลายของธาตุกัมมันตรังสีไปชนกับนิวเคลียสของไนโตรเจน-14 ซึ่งรัทเทอร์ฟอร์ดพบว่า การชนกันดังกล่าวจะทำให้ได้นิวเคลียสของไฮโดรเจนพลังงานสูงออกมา แต่ รัทเทอร์ฟอร์ดยังไม่สามารถอธิบายกระบวนการที่เกิดขึ้นได้

จนกระทั่ง ในปี พ.ศ. 2468 แพทริก แบล็กเกตต์ (Patrick Blackett) ได้ทำการวิเคราะห์เพิ่มเติม จากภาพถ่ายดังรูป 20.21 และสามารถพิสูจน์ได้ว่า หลังจากให้อนุภาคแอลฟาเข้าไปชนกับนิวเคลียสของไนโตรเจน-14 ทำให้นิวเคลียสของไนโตรเจน-14 เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นนิวเคลียสของออกซิเจน-17 พร้อมกับมีการปล่อยโปรตอนพลังงานสูงออกมา เขียนแทนได้ด้วยสมการ



ก. ตัวอย่างภาพถ่ายรอยทางของอนุภาคที่แบล็กเกตต์ใช้วิเคราะห์



ข. แผนภาพแสดงรอยทางจากภาพถ่ายในรูป ก. โดยด้านบนแสดงการชนของอนุภาคแอลฟากับนิวเคลียสของไนโตรเจน-14 ซึ่งทำให้เกิดออกซิเจน-17 และ โปรตอน

รูป 20.21 ตัวอย่างภาพถ่ายและแผนภาพแสดงรอยทางของอนุภาคที่แบล็กเกตต์วิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์ของแบล็กเกตต์ได้แสดงให้เห็นว่า การทดลองของรัทเทอร์ฟอร์ดเป็นครั้งแรกในประวัติศาสตร์ ที่มนุษย์สามารถกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในนิวเคลียสได้ โดยที่ผ่านมามีเพียงการสลายของนิวเคลียสกัมมันตรังสีตามธรรมชาติเท่านั้นที่ทำให้นิวเคลียสมีการเปลี่ยนแปลง

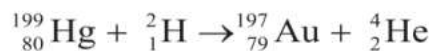
กระบวนการที่นิวเคลียสมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในเมื่อได้รับการกระตุ้นนี้ เรียกว่าปฏิกิริยานิวเคลียร์ (nuclear reaction)



### ข้อสังเกต

บางแหล่งเรียนรู้ มีการจัดให้การสลายตามธรรมชาติของนิวเคลียสกัมมันตรังสีเป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์ชนิดหนึ่ง

ผลการทดลองของรัทเทอร์ฟอร์ด ทำให้วงการวิทยาศาสตร์ในช่วงเวลานั้นเกิดการตื่นตัวครั้งใหญ่ โดยส่วนหนึ่งหวังว่า ถ้าสามารถเปลี่ยนนิวเคลียสของธาตุบางชนิดเป็นนิวเคลียสของทองคำได้ จะทำให้อร่ารวยมหาศาล เช่น การเปลี่ยนนิวเคลียสของแพลทินัมและนิวเคลียสของปรอท ให้เป็นนิวเคลียสของทองคำ ดังสมการด้านล่าง



แต่จากความพยายามเป็นเวลานาน ในที่สุด นักวิทยาศาสตร์ได้พบว่า การที่จะเปลี่ยนนิวเคลียสของธาตุบางธาตุเป็นนิวเคลียสของทองคำได้นั้น ต้องให้อนุภาคที่มีพลังงานสูงมากไปชนนิวเคลียสที่เป็นเป้า และการที่ต้องใช้อนุภาคที่มีพลังงานสูง ทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูง มากกว่ามูลค่าของทองคำที่ได้

อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองของรัทเทอร์ฟอร์ดได้บุกเบิกการศึกษาค้นคว้าทางด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์ ด้วยวิธีการให้อนุภาคไปชนกับนิวเคลียสของธาตุต่าง ๆ ที่นำไปสู่การค้นพบธาตุใหม่ ๆ ที่ไม่มีในธรรมชาติ รวมทั้งการค้นพบปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ให้พลังงานออกมามหาศาลอย่างฟิชชัน และฟิวชัน ซึ่งจะศึกษาได้ในหัวข้อนี้

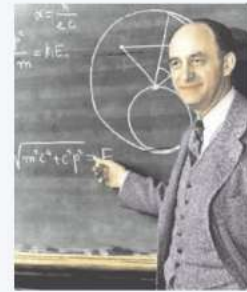
### 20.3.1 ฟิชชัน

ในปี พ.ศ. 2477 หลังจากที่ เอนริโก แฟร์มี (Enrico Fermi) นักฟิสิกส์ชาวอิตาลี ได้ทราบผลการทดลองที่ใช้อนุภาคแอลฟากระตุ้นให้นิวเคลียสมีการเปลี่ยนแปลงของรัทเทอร์ฟอร์ด เขาได้ทดลองให้นิวตรอนไปชนกับนิวเคลียสของธาตุต่าง ๆ ด้วยแนวคิดที่ว่า นิวตรอนที่ไม่มีประจุไฟฟ้าจะสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับองค์ประกอบของนิวเคลียสได้แตกต่างจากการให้อนุภาคแอลฟาที่มีประจุ  $+2e$  ไปชนกับนิวเคลียส เพราะนิวตรอนไม่ได้รับอิทธิพลจากแรงไฟฟ้าเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปใกล้นิวเคลียส ซึ่งจากการทดลอง แฟร์มีได้พบว่า การให้นิวตรอนพลังงานต่ำไปชนกับนิวเคลียสของยูเรเนียม จะทำให้ได้ธาตุใหม่ ๆ หลายชนิด แต่แฟร์มียังไม่ทราบแน่ชัดว่า ธาตุเหล่านั้นคือธาตุอะไร และกระบวนการที่เกิดขึ้นเป็นอย่างไร



#### ความรู้เพิ่มเติม

เอนริโก แฟร์มี (Enrico Fermi ค.ศ. 1901-1954 หรือ พ.ศ. 2444-2497) นักฟิสิกส์ชาวอิตาลี ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ในปีพ.ศ. 2481 จากผลงานการสังเคราะห์ธาตุกัมมันตรังสีและการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ด้วยวิธีให้นิวตรอนพลังงานต่ำไปชนกับนิวเคลียส นอกจากนี้ แฟร์มียังเป็นหนึ่งในผู้ริเริ่มเสนอแนวคิดเกี่ยวกับแรงอ่อน (weak force) ซึ่งเป็นแรงพื้นฐานในธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับการสลายให้บีตา อีกทั้งเขายังเป็นผู้คิดค้นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์อีกด้วย



รูป แฟร์มี

ในปี พ.ศ.2482 ออตโต ฮาห์น (Otto Hahn) และฟริทซ์ สตราสมันน์ (Fritz Strassmann) สองนักเคมีชาวเยอรมัน ได้ร่วมกันวิเคราะห์หาชนิดของธาตุที่เกิดจากการทดลองของแฟร์มีข้างต้น และได้พบว่า หนึ่งในนิวเคลียสที่ได้คือ นิวเคลียสของแบเรียม-139 ที่มีเลขอะตอมเท่ากับ 56 ซึ่งน้อยกว่าเลขอะตอมของยูเรเนียมประมาณครึ่งหนึ่ง ซึ่งต่อมาไม่นาน ลีเซ ไมท์เนอร์ (Lise Meitner) และ ออตโต ฟริช (Otto Frisch) สองนักฟิสิกส์ชาวออสเตรีย ได้ประสบความสำเร็จในการให้คำอธิบายเกี่ยวกับกระบวนการที่เกิดขึ้น ซึ่งมีใจความสำคัญว่า เมื่อนิวตรอนพลังงานต่ำไปชนกับนิวเคลียสของยูเรเนียมแล้ว นิวเคลียสของยูเรเนียมจะจับนิวตรอนไว้ กลายเป็นนิวเคลียสที่อยู่ในสถานะกระตุ้น จากนั้น เพื่อเปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะที่มีเสถียรภาพมากกว่า จึงแยกออกเป็นนิวเคลียสใหม่สองนิวเคลียสที่มีเลขอะตอมและมวลน้อยกว่า โดยบางครั้งนิวเคลียสใหม่ที่เกิดขึ้นจากการแยกออกจากกันนี้ เป็นนิวเคลียสของแบเรียม-139 สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ของฮาห์นและสตราสมันน์

ฟริชได้เรียกปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่นิวเคลียสมวลมากแยกออกเป็นนิวเคลียสที่มีมวลน้อยกว่านี้ว่า **ฟิชชัน (fission)**





### ความรู้เพิ่มเติม

นอกจากนิวเคลียสของยูเรเนียมแล้ว การให้นิวตรอนไปชนกับนิวเคลียสของธาตุหนักอื่น ๆ เช่น พลูโตเนียม (Plutonium,  $^{239}_{94}\text{Pu}$ ) หรือทอเรียม (Thorium,  $^{232}_{90}\text{Th}$ ) สามารถทำให้เกิดฟิชชันได้เช่นกัน ทั้งนี้ ธาตุหนัก หมายถึง ธาตุที่มีเลขมวลตั้งแต่ 150 ขึ้นไป ส่วนธาตุเบา หมายถึงธาตุที่มีเลขมวลอยู่ในช่วง 1 - 25 และ ธาตุขนาดกลาง หมายถึง ธาตุที่มีเลขมวลอยู่ในช่วง 25 - 150



### ความรู้เพิ่มเติม

ออตโต ฮาห์น (Otto Hahn ค.ศ. 1879-1968 หรือ พ.ศ. 2422-2511) และฟริทซ์ สตราสมันน์ (Fritz Strassmann ค.ศ. 1902-1980 หรือ พ.ศ. 2445-2523) สองนักเคมีชาวเยอรมนี ได้ร่วมทำการทดลองด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์และได้พบว่า เมื่อให้นิวตรอนพลังงานต่ำไปชนกับนิวเคลียสของยูเรเนียม จะทำให้เกิดนิวเคลียสของแบเรียมได้ การค้นพบนี้ทำให้ฮาห์นได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมี ในปี พ.ศ. 2487



รูป ฮาห์น



รูป สตราสมันน์

ลิเซ ไมท์เนอร์ (Lise Meitner ค.ศ. 1878-1968 หรือ พ.ศ. 2421-2511) และ ออตโต รอเบิร์ต ฟริช (Otto Robert Frisch ค.ศ. 1904-1979 หรือ พ.ศ. 2447-2522) สองนักฟิสิกส์ชาวออสเตรีย ได้ร่วมกันเสนอคำอธิบายเกี่ยวกับปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่นิวเคลียสของยูเรเนียมแยกออกจากกันแล้วทำให้ได้นิวเคลียสของแบเรียมตามที่ฮาห์นและสตราสมันน์ค้นพบ ซึ่งในปี พ.ศ. 2535 ชื่อไมท์เนอร์ได้รับเกียรติให้นำไปตั้งเป็นชื่อของธาตุที่มีเลขอะตอม 109 ว่า ไมท์เนเรียม (Meitnerium, Mt)

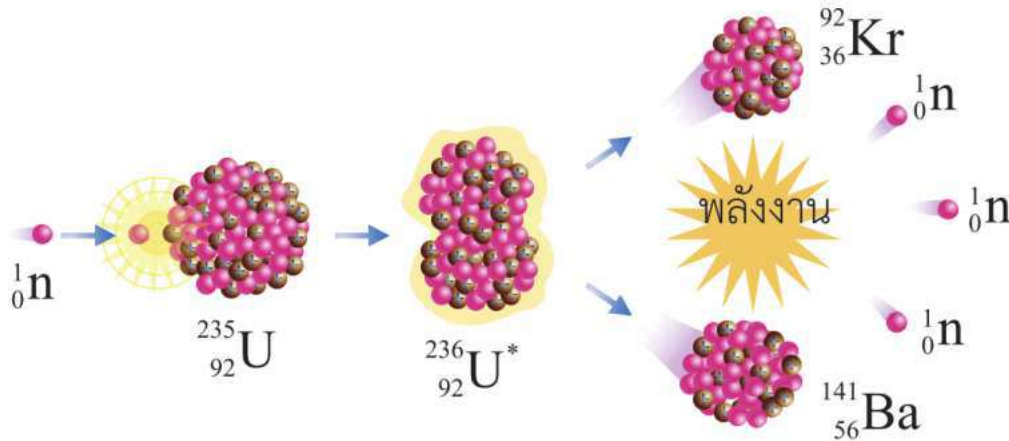


รูป ไมท์เนอร์



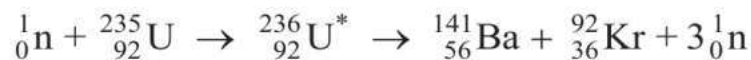
รูป ฟริช

จากการศึกษาเกี่ยวกับฟิชชันของยูเรเนียมในเวลาต่อมา พบว่า ชนิดของคู่นิวเคลียสที่ได้จากฟิชชันของยูเรเนียมนั้นมีมากกว่า 40 ชนิด ซึ่งนิวเคลียสเหล่านี้ต่างมีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 30 ถึง 63 และเลขมวลอยู่ระหว่าง 72 ถึง 158 อีกทั้งหลังการเกิดฟิชชันทุกครั้ง จะมีการปลดปล่อยพลังงานและนิวตรอนพลังงานสูงออกมาด้วย โดยเฉลี่ยประมาณครั้งละ 2 ถึง 3 นิวตรอน เช่น ในการเกิดฟิชชันของยูเรเนียม-235 จะมีการปลดปล่อยพลังงานและนิวตรอนพลังงานสูงออกมา 3 นิวตรอน ดังรูป 20.22



รูป 20.22 การเกิดฟิชชันของยูเรเนียม-235

สมการแทนการเกิดฟิชชันของยูเรเนียม-235 ตามรูป 20.22 เขียนได้ดังนี้



โดย เครื่องหมาย \* หมายถึง นิวเคลียสที่ไม่เสถียรเนื่องจากอยู่ในสถานะกระตุ้น (เช่นเดียวกับกรณีการสลายให้แกมมา)

พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากฟิชชัน รวมทั้งปฏิกิริยานิวเคลียร์ต่าง ๆ เรียกว่า **พลังงานนิวเคลียร์ (nuclear energy)** ซึ่งนักฟิสิกส์พบว่า พลังงานที่ได้จากฟิชชันมีความสัมพันธ์กับมวลที่ลดลงหลังการเกิดฟิชชัน ตามความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับพลังงานที่เสนอไว้โดยไอน์สไตน์ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 20.1 กล่าวคือ ผลรวมมวลของอนุภาคต่าง ๆ หลังการเกิดฟิชชันมีค่าน้อยกว่าผลรวมมวลของอนุภาคต่าง ๆ ก่อนการเกิดฟิชชัน และมวลที่ลดลงนี้มีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ปล่อยออกมาจากฟิชชัน ตามสมการ

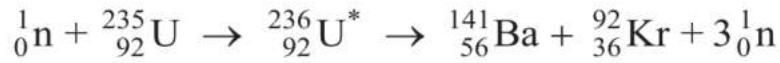
$$E = (\Delta m)c^2 \quad (20.11)$$

โดย  $E$  คือ พลังงานนิวเคลียร์ที่ปล่อยออกมาจากฟิชชัน

$\Delta m$  คือ ผลต่างระหว่างมวลก่อนกับหลังการเกิดฟิชชัน

$c$  คือ อัตราเร็วของแสงในสุญญากาศ ซึ่งมีค่าประมาณ  $3.00 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที

**ตัวอย่าง 20.10** จงหาพลังงานนิวเคลียร์ที่ปลดปล่อยออกมาจากฟิชชันของยูเรเนียม-235 ตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



กำหนด	มวลของนิวตรอน	$m_{{}_0^1\text{n}}$	เท่ากับ 1.008665 u
	มวลของยูเรเนียม-235	$m_{{}_{92}^{235}\text{U}}$	เท่ากับ 235.043930 u
	มวลของแบเรียม-141	$m_{{}_{56}^{141}\text{Ba}}$	เท่ากับ 140.914494 u
	มวลของคริปทอน-92	$m_{{}_{36}^{92}\text{Kr}}$	เท่ากับ 91.926173 u

**แนวคิด** คำนวณผลรวมมวลของอนุภาคต่าง ๆ ก่อนและหลังการเกิดฟิชชัน จากนั้น หาผลต่างระหว่างปริมาณทั้งสอง แล้วนำไปหาค่าพลังงาน โดยมวล 1 u เทียบเท่ากับพลังงาน 931.5 MeV ซึ่งตามสมการ  $E = (\Delta m)c^2$  จะได้  $E = (\Delta m)(931.5 \text{ MeV/u})$

**วิธีทำ** ก่อนเกิดฟิชชัน  ${}_0^1\text{n}$  มีมวล 1.008665 u  
 ${}_{92}^{235}\text{U}$  มีมวล 235.043930 u  
 ดังนั้น มวลรวมก่อนเกิดฟิชชัน เท่ากับ  $(235.043930 \text{ u} + 1.008665 \text{ u}) = 236.052595 \text{ u}$   
 หลังเกิดฟิชชัน  ${}_{56}^{141}\text{Ba}$  มีมวล 140.914494 u  
 ${}_{36}^{92}\text{Kr}$  มีมวล 91.926173 u  
 ${}_0^1\text{n}$  มีมวล 1.008665 u  
 ดังนั้น มวลรวมหลังเกิดฟิชชัน เท่ากับ

$$[140.914494 \text{ u} + 91.926173 \text{ u} + (3)(1.008665 \text{ u})] = 235.866662 \text{ u}$$

หามวลที่ลดลง  $\Delta m = 236.052595 \text{ u} - 235.867108 \text{ u} = 0.185933 \text{ u}$

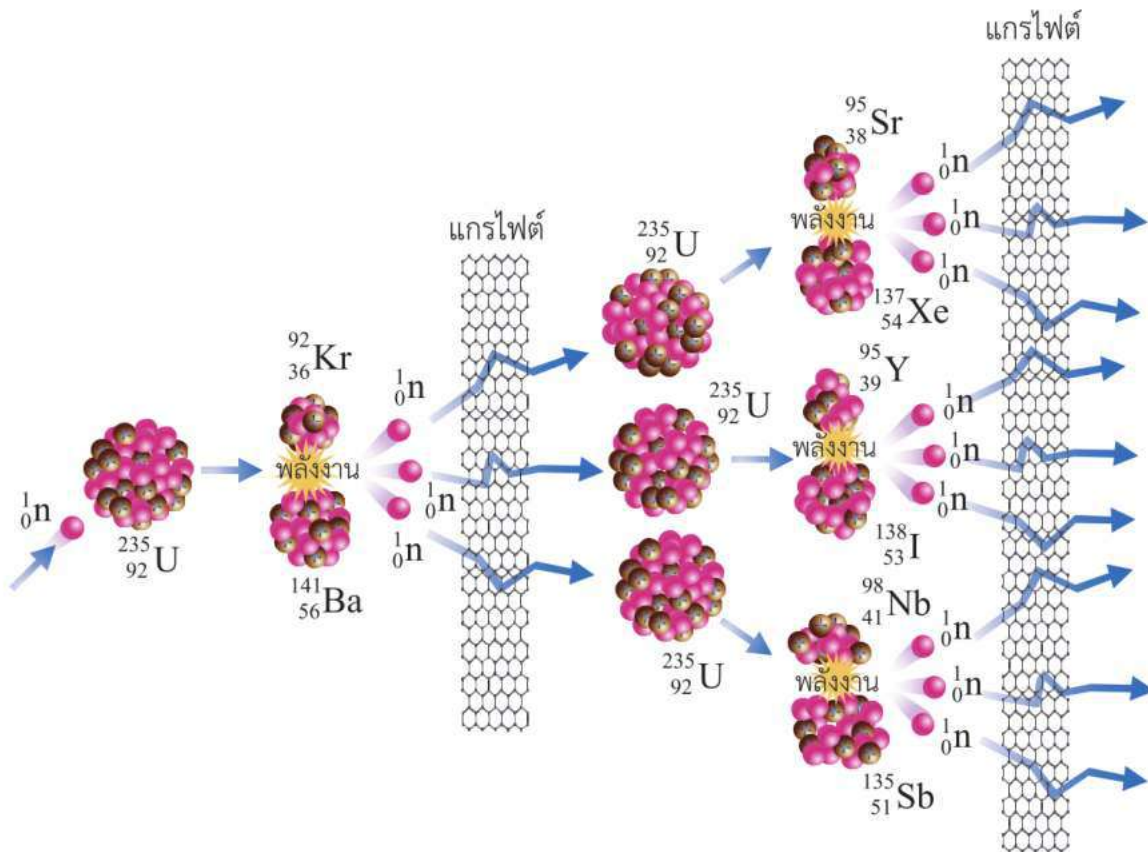
หาพลังงานนิวเคลียร์จากส่วนมวลที่ลดลง โดยมวล 1 u เทียบเท่ากับพลังงาน 931.5 MeV จะได้

$$\begin{aligned} E &= (\Delta m)(931.5 \text{ MeV/u}) \\ &= (0.185933 \text{ u})(931.5 \text{ MeV/u}) \\ &= 173.197 \text{ MeV} \end{aligned}$$

**ตอบ** พลังงานนิวเคลียร์ที่ปลดปล่อยออกมาจากฟิชชันของยูเรเนียม-235 ตามปฏิกิริยาที่กำหนด มีค่าประมาณ 173.20 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

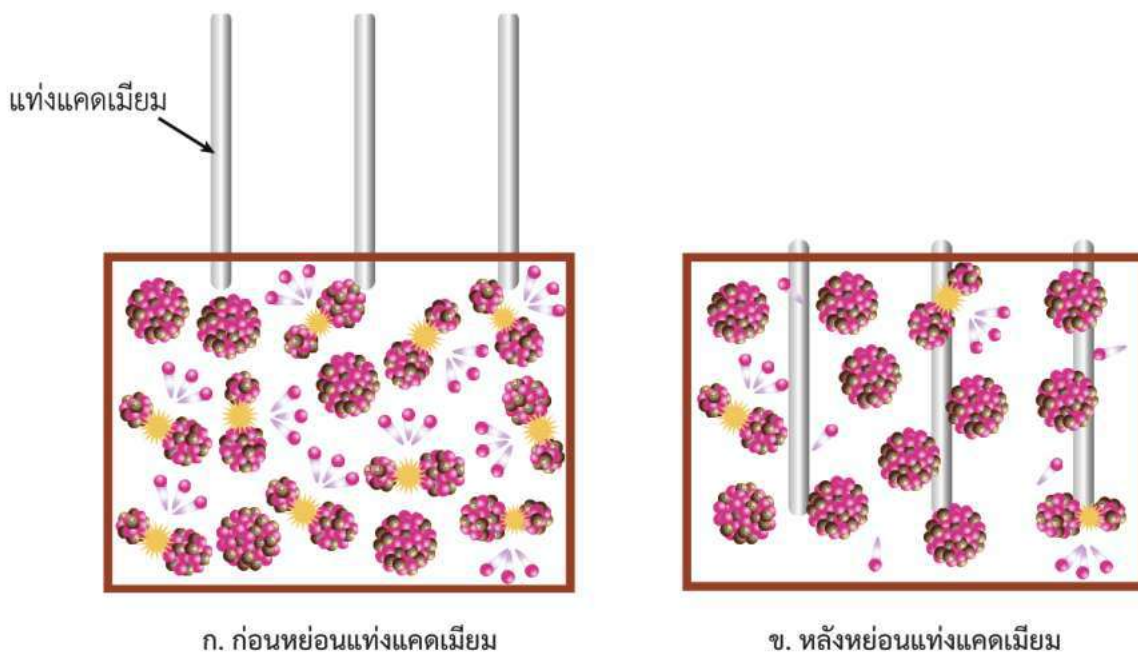
จากตัวอย่าง 20.10 เมื่อเปรียบเทียบพลังงานนิวเคลียร์ที่ได้จากฟิชชันของยูเรเนียม-235 จำนวน 1 นิวเคลียส กับพลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้คาร์บอน 1 อะตอม พลังงานจากฟิชชันมีค่ามากกว่าประมาณ 10 ล้านเท่า (คาร์บอนเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ทุกชนิด) ดังนั้น การทำให้เกิดฟิชชันอย่างต่อเนื่องกับนิวเคลียสของยูเรเนียม-235 จำนวนมาก จึงสามารถทำให้มีการปล่อยพลังงานนิวเคลียร์ออกมาในปริมาณมหาศาล

ในปี พ.ศ. 2485 แฟร์มีได้ประสบความสำเร็จในการสร้างและควบคุมการเกิดฟิชชันได้อย่างต่อเนื่องและปลอดภัยเป็นครั้งแรก โดยแฟร์มีได้ใช้แกรไฟต์เป็นวัสดุที่ช่วยหน่วงนิวตรอนพลังงานสูงที่ปล่อยออกมาจากการเกิดฟิชชันแต่ละครั้งให้มีพลังงานลดลง และพอเหมาะที่จะสามารถทำให้เกิดฟิชชันในครั้งต่อ ๆ ไป เมื่อนิวตรอนเหล่านี้พุ่งไปชนกับนิวเคลียสของยูเรเนียม-235 อื่น ๆ ที่อยู่ใกล้เคียง การเกิดฟิชชันอย่างต่อเนื่องในลักษณะนี้ เรียกว่า **ปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction)** ดังรูป 20.23 ทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานนิวเคลียร์ออกมาในปริมาณมหาศาล



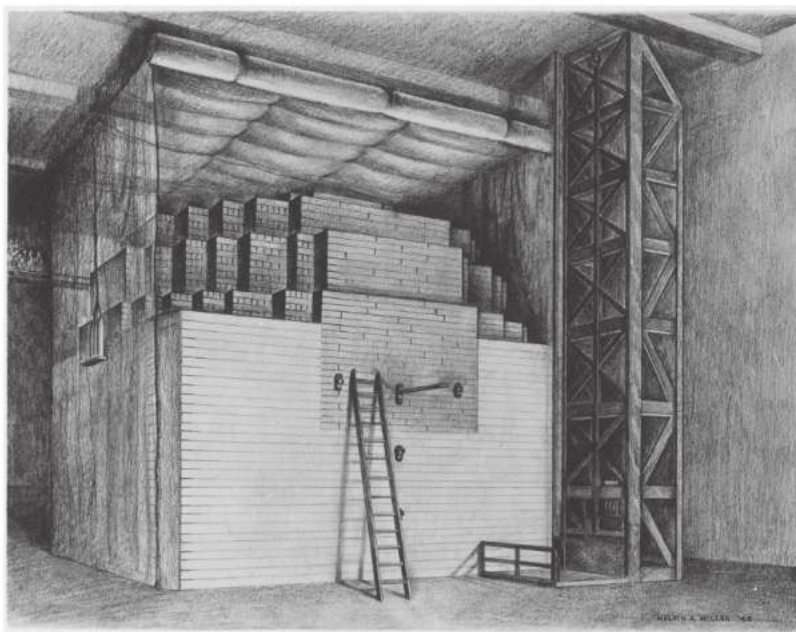
รูป 20.23 การเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของยูเรเนียม-235

เนื่องจากในการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่มีพลังงานปลดปล่อยออกมาจำนวนมาก ซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายได้ แฟร์มีจึงได้ออกแบบให้มีการใช้แท่งแคดเมียม (Cadmium, Cd) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสมบัติจับนิวตรอนได้ดีหย่อนลงไปบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา ดังรูป 20.24 ช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ไม่เกิดขึ้นมากเกินไป

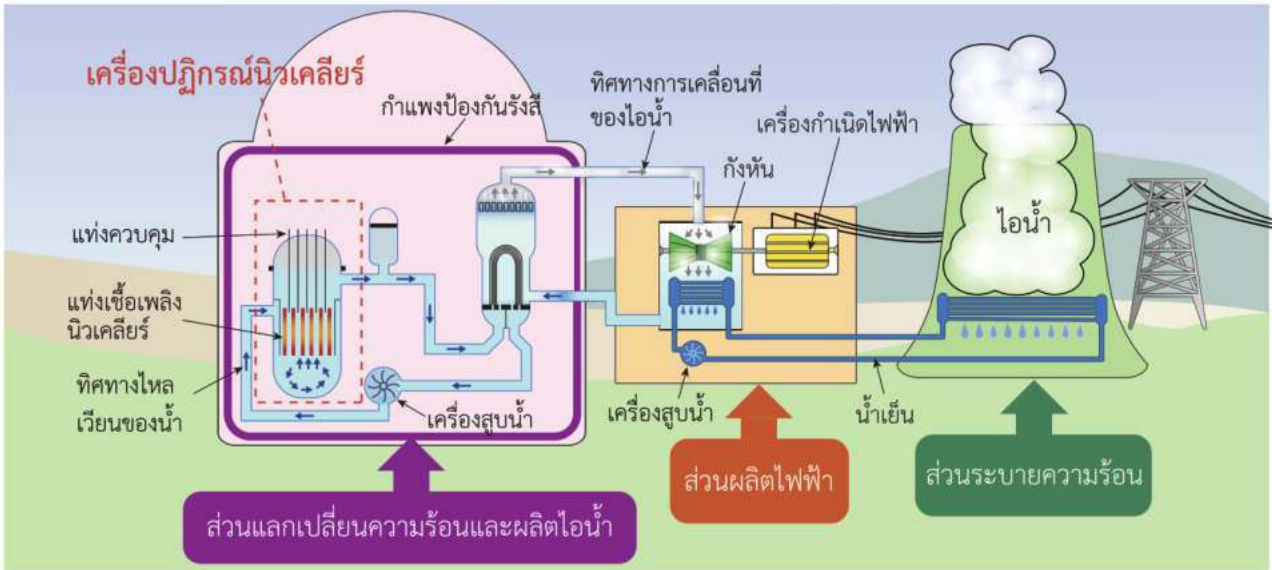


รูป 20.24 การใช้แท่งแคดเมียมควบคุมปริมาณนิวตรอนจากปฏิกิริยาลูกโซ่

ระบบที่แฟร์มีใช้ในการสร้างและควบคุมปฏิกิริยาลูกโซ่ให้เกิดขึ้นในอัตราที่เหมาะสมนี้ ถือได้ว่าเป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactor) เครื่องแรกของโลก ดังรูป 20.25 ซึ่งในเวลาต่อมา ได้มีการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ให้มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เพื่อผลิตไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ได้ ดังรูป 20.26



รูป 20.25 ภาพวาดของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ชิคาโกไพล์วัน (Chicago Pile 1) ที่แฟร์มีใช้ทดลอง



รูป 20.26 แผนภาพแสดงส่วนประกอบหลักของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

การนำพลังงานนิวเคลียร์มาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ มีกระบวนการคล้ายกับการนำพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์มาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า แต่โรงไฟฟ้านิวเคลียร์อาศัยพลังงานนิวเคลียร์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์สำหรับถ่ายโอนให้กับน้ำเพื่อทำให้น้ำกลายเป็นไอน้ำแล้วนำไปหมุนกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากแผนภาพแสดงส่วนประกอบหลักของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ดังรูป 20.26 ในส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนและผลิตไอน้ำ เมื่อน้ำได้รับการถ่ายโอนพลังงานจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ จะกลายเป็นไอน้ำที่มีความร้อนและความดันสูง ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังส่วนผลิตไฟฟ้าเพื่อไปหมุนกังหันที่มีเพลาต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้มีการผลิตกระแสไฟฟ้าออกมา จากนั้น ไอน้ำที่ได้จากการหมุนกังหันจะถูกส่งต่อไปยังส่วนระบายความร้อน เพื่อถ่ายโอนความร้อนให้กับน้ำเย็น ซึ่งน้ำเย็นที่ได้รับความร้อนจะถูกระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยอาจเป็นการระบายความร้อนผ่านหอคอยระบายความร้อน หรือ การระบายความร้อนสู่แหล่งน้ำในบริเวณใกล้เคียงกับโรงไฟฟ้า ส่วนไอน้ำที่เย็นลงจะกลายเป็นน้ำร้อนและถูกส่งกลับไปยังส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการผลิตไอน้ำต่อไป



### ความรู้เพิ่มเติม

ในปัจจุบัน โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ส่วนใหญ่ใช้ เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (nuclear fuel) ที่มีส่วนผสมของ ยูเรเนียม-235 หรือ พลูโทเนียม-239 และใช้ น้ำ ( $H_2O$ ) หรือ น้ำมวลหนัก (heavy water,  $D_2O$ ) ซึ่งเป็นน้ำที่เกิดจากอะตอมของดิวเทอเรียม ( $^2_1H$ ) เป็นตัวหน่วงความเร็วนิวตรอน (moderator) ทำให้นิวตรอนที่ปล่อยออกมาจากฟิชชันมีพลังงานลดลงและเคลื่อนที่ช้าลงพอเหมาะกับการทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ ทั้งนี้ อัตราการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่จะถูกควบคุมด้วย แท่งควบคุม (control rod) ที่ทำจากส่วนผสมของ โบรอน และ แคดเมียม ซึ่งมีสมบัติจับนิวตรอนได้ดี

การผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ไม่มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ จึงไม่ทำให้เกิดแก๊สเรือนกระจก อีกทั้งมีต้นทุนของการผลิตต่ำเมื่อคิดในระยะยาว และสัดส่วนพลังงานต่อมวลที่ได้นั้นมีค่ามากเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น การผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้พลังงานนิวเคลียร์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและสร้างความมั่นคงด้านพลังงานของหลายประเทศ



### ความรู้เพิ่มเติม

เม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ขนาดประมาณเท่านิ้วก้อย สามารถให้พลังงานได้ประมาณเทียบเท่ากับการเผาไหม้น้ำมัน 447 ลิตร หรือ ถ่านหิน 1 ตัน หรือ แก๊สธรรมชาติ 481 ลูกบาศก์เมตร หรือ ไม้ 2.5 ตัน ดังรูป



รูป เปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากเม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์กับแหล่งพลังงานอื่น ๆ

### 20.3.2 ฟิวชัน

ในช่วงปี พ.ศ. 2457 – 2462 ขณะที่นักฟิสิกส์กำลังศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในนิวเคลียส เป็นเวลาเดียวกันที่กลุ่มนักดาราศาสตร์กำลังพยายามทำความเข้าใจเกี่ยวกับแหล่งพลังงานของดวงอาทิตย์และดวงดาวต่าง ๆ ในเอกภพ โดยในปี พ.ศ. 2463 หลังจากที่ อาร์เทอร์ เอ็ดดิงตัน (Arthur Eddington) นักฟิสิกส์และนักดาราศาสตร์ชาวอังกฤษ ได้ทราบผลการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิวชันที่มวลส่วนหนึ่งได้เปลี่ยนไปเป็นพลังงาน และผลการทดลองที่พบว่าผลรวมมวลของไฮโดรเจน 4 อะตอมมีค่ามากกว่ามวลของฮีเลียมซึ่งมีองค์ประกอบของไฮโดรเจน 4 อะตอม เขาได้เสนอแนวคิดว่าพลังงานของดวงอาทิตย์และดาวฤกษ์ต่าง ๆ น่าจะมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์อีกชนิดหนึ่ง ที่นิวเคลียสของธาตุเบาอย่างไฮโดรเจนมารวมกันเป็นนิวเคลียสของธาตุที่มีมวลมากกว่าอย่างฮีเลียม พร้อมกับปลดปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานนี้มีความสัมพันธ์กับผลรวมมวลที่ลดลง โดยเขาเรียกปฏิกิริยานิวเคลียร์ดังกล่าวว่า ฟิวชัน (fusion)



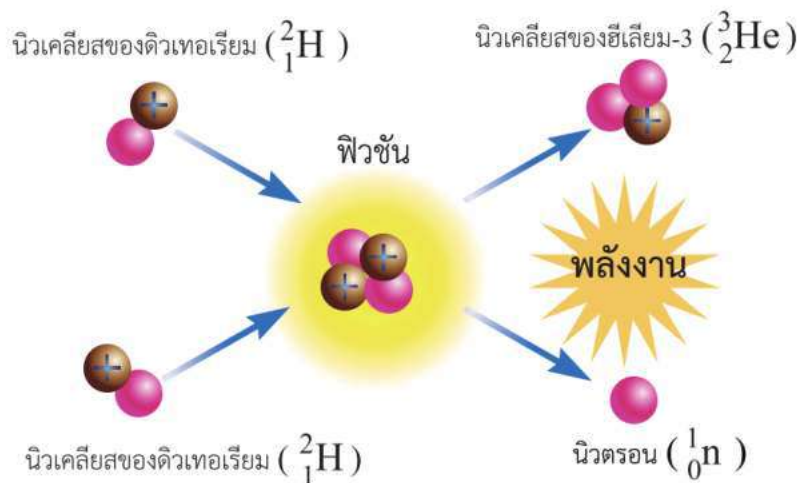
### ความรู้เพิ่มเติม

อาร์เทอร์ เอ็ดดิงตัน (Arthur Eddington ค.ศ. 1882-1944 หรือ พ.ศ. 2425-2487) นักฟิสิกส์และนักดาราศาสตร์ชาวอังกฤษ เป็นหนึ่งในผู้วางรากฐานในการศึกษาโครงสร้างและวิวัฒนาการของดาวฤกษ์ในสาขาฟิสิกส์ดาราศาสตร์ (astrophysics) นอกจากนี้ เขายังมีชื่อเสียงจากการทำการสำรวจปรากฏการณ์ทางดาราศาสตร์ที่ช่วยยืนยันความถูกต้องของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์



รูป เอ็ดดิงตัน

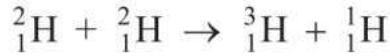
ต่อมา ในปี พ.ศ. 2475 มาร์ค โอลิฟาน (Mark Oliphant) นักฟิสิกส์ชาวออสเตรเลียที่ทำวิจัยร่วมกับบริษัทเทอร์ฟอร์ด ณ ห้องปฏิบัติการคาเวนดิช (Cavendish laboratory) ได้ใช้เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerator) เร่งให้นิวเคลียสของดิวเทอเรียม ( ${}^2_1\text{H}$ ) มาชนกันที่พลังงานสูง ทำให้มีนิวเคลียสของฮีเลียม-3 ( ${}^3_2\text{He}$ ) และนิวตรอนเกิดขึ้น พร้อมกับการปล่อยพลังงานออกมาจำนวนหนึ่ง ดังรูป 20.27 ซึ่งเขียนแทนได้ด้วยสมการ



รูป 20.27 แผนภาพแสดงฟิวชันระหว่างนิวเคลียสของดิวเทอเรียมที่ให้นิวเคลียสของฮีเลียม-3 และนิวตรอน



การทดลองของโอลิเฟนเป็นการพิสูจน์ให้เห็นเป็นครั้งแรกในประวัติศาสตร์ว่า ฟิวชันระหว่างนิวเคลียสของธาตุเบาเกิดขึ้นได้จริง นอกจากนี้ โอลิเฟนและรัทเทอร์ฟอร์ด ยังได้ค้นพบไอโซโทปชนิดใหม่ของไฮโดรเจนที่เรียกว่า ทริเทียม (tritium,  ${}^3_1\text{H}$ ) จากฟิวชันแบบเดียวกัน ตามสมการ



ผลการทดลองของโอลิเฟน ทำให้นักดาราศาสตร์เริ่มพยายามนำเสนอแนวคิดเกี่ยวกับกระบวนการให้พลังงานของดาวฤกษ์จากฟิวชันของนิวเคลียสของธาตุเบา และในปี พ.ศ. 2482 ฮันส์ เบเทอ (Hans Bethe) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมนี ได้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาทฤษฎีเกี่ยวกับฟิวชันแบบต่อเนื่องบนดวงดาวโดยมีนิวเคลียสของไฮโดรเจนเป็นนิวเคลียสตั้งต้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการสังเกตทางดาราศาสตร์ที่มีอยู่ในขณะนั้น ทำให้ในเวลาต่อมา แนวคิดของเบเทอได้กลายเป็นแนวคิดพื้นฐานของการศึกษาวิวัฒนาการของดาวฤกษ์ต่าง ๆ รวมทั้งดวงอาทิตย์มาจนกระทั่งปัจจุบัน



### ความรู้เพิ่มเติม

ฮันส์ เบเทอ (Hans Bethe ค.ศ. 1906-2005 หรือ พ.ศ. 2449-2548) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมนี ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ในปี พ.ศ. 2510 จากผลงานการพัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ให้พลังงานในดาวฤกษ์ นอกจากนี้ เบเทอยังได้มีผลงานเด่นอีกมากในด้านฟิสิกส์อวกาศ เช่น งานเกี่ยวกับอนุภาคนิวทริโน หลุมดำ และทฤษฎีทางฟิสิกส์อนุภาค



รูป เบเทอ

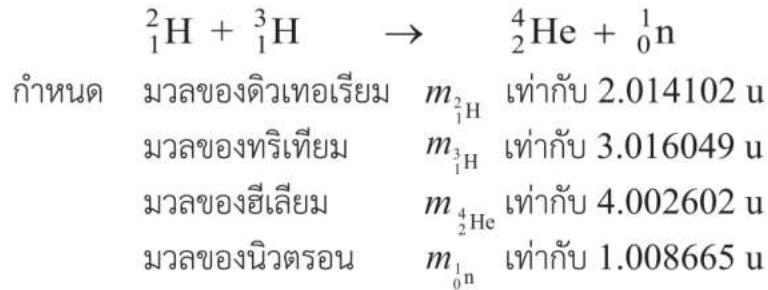
ในการเกิดฟิวชันแต่ละครั้ง ผลรวมของมวลของอนุภาคต่าง ๆ หลังการเกิดฟิวชันมีค่าน้อยกว่าก่อนการเกิดฟิวชัน ซึ่งผลรวมของมวลที่ลดลงไปนี้มีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากฟิวชัน ตามสมการ  $E = (\Delta m)c^2$  ในทำนองเดียวกับการเกิดฟิชชัน



### ชวนคิด

การที่ดวงอาทิตย์ปลดปล่อยพลังงานออกมาตลอดเวลาส่งผลต่อมวลของดวงอาทิตย์อย่างไร

**ตัวอย่าง 20.11** จงหาพลังงานนิวเคลียร์ที่ปลดปล่อยออกมาจากฟิวชันระหว่างนิวเคลียสของดิวเทอเรียมกับทริเทียม ตามสมการ



**แนวคิด** คำนวณผลรวมมวลของอนุภาคต่าง ๆ ก่อนและหลังการเกิดฟิวชัน จากนั้น หาผลต่างระหว่างปริมาณทั้งสอง แล้วนำไปหาค่าพลังงาน โดยมวล 1 u เทียบเท่ากับพลังงาน 931.5 MeV ตามสมการ  $E = (\Delta m)(931.5 \text{ MeV/u})$

**วิธีทำ** ก่อนเกิดฟิวชัน  ${}^2_1\text{H}$  มีมวล 2.014102 u  
 ${}^3_1\text{H}$  มีมวล 3.016049 u  
 ดังนั้น มวลรวมก่อนเกิดฟิวชัน เท่ากับ  $(2.014102 \text{ u} + 3.016049 \text{ u}) = 5.030151 \text{ u}$   
 หลังเกิดฟิวชัน  ${}^4_2\text{He}$  มีมวล 4.002602 u  
 ${}^1_0\text{n}$  มีมวล 1.008665 u  
 ดังนั้น มวลรวมหลังเกิดฟิวชัน เท่ากับ  $(4.002602 \text{ u} + 1.008665 \text{ u}) = 5.011267 \text{ u}$   
 หาพลังงานที่เทียบเท่ากับมวลที่แตกต่างระหว่างก่อนกับหลังการเกิดปฏิกิริยา โดยมวล 1 u เทียบเท่ากับพลังงาน 931.5 MeV จะได้

$$\begin{aligned} E &= (5.030151 \text{ u} - 5.011267 \text{ u})(931.5 \text{ MeV/u}) \\ &= (0.018884 \text{ u})(931.5 \text{ MeV/u}) \\ &= 17.590446 \text{ MeV} \end{aligned}$$

**ตอบ** พลังงานนิวเคลียร์ที่ปลดปล่อยออกมาจากฟิวชันระหว่างนิวเคลียสของดิวเทอเรียมกับนิวเคลียสของทริเทียมมีค่าประมาณ 17.59 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

จากกรณีของฟิวชันในตัวอย่าง 20.11 เมื่อพิจารณาพลังงานที่ได้ต่อมวลของอนุภาคตั้งต้นทั้งหมด พบว่ามีค่าประมาณ  $\frac{17.59 \text{ MeV}}{5.03 \text{ u}} = 3.50 \text{ MeV/u}$  ซึ่งจากกรณีของฟิวชันในตัวอย่าง 20.10 พบว่า พลังงานที่ได้ต่อมวลของอนุภาคตั้งต้นทั้งหมด มีค่าประมาณ  $\frac{173.20 \text{ MeV}}{236.05 \text{ u}} = 0.73 \text{ MeV/u}$  เมื่อเปรียบเทียบพลังงานต่อมวลที่ได้จากฟิวชันกับพลังงานต่อมวลที่ได้จากฟิชชัน จะเห็นได้ว่า ฟิวชันให้พลังงานมากกว่าฟิชชันประมาณ 4.79 เท่า ดังนั้น ถ้านักฟิสิกส์สามารถสร้างและควบคุมฟิวชันให้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและปลอดภัย จะทำให้มีแหล่งพลังงานสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในสัดส่วนของพลังงานต่อมวลที่มากกว่า อีกทั้ง การที่วัสดุดิบสำหรับสร้างฟิวชันสามารถหาได้จากส่วนประกอบของน้ำที่มีอยู่มากบนโลก และกระบวนการเกิดฟิวชันไม่มีการเผาไหม้ การใช้พลังงานที่ได้จากฟิวชันจึงสามารถช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานและปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ เนื่องจากฟิวชันไม่มีการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือสร้างกากกัมมันตรังสีที่อยู่ในระดับที่เป็นอันตรายด้วย

อย่างไรก็ตาม ในการสร้างและควบคุมฟิวชันให้เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องนั้น นักฟิสิกส์ต้องสร้างสถานะที่มีอุณหภูมิสูงหลายล้านองศาเซลเซียสและความดันมากมหาศาลหลายพันล้านเท่าของความดันบรรยากาศ เพื่อให้ทำให้นิวเคลียสเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันแล้วเกิดฟิวชันได้ ซึ่งพบว่า ต้องมีค่าใช้จ่ายสูงมาก ไม่คุ้มค่ากับพลังงานสุทธิที่ได้ การนำพลังงานนิวเคลียร์จากฟิวชันมาใช้ประโยชน์จึงยังอยู่ระหว่างการศึกษาค้นคว้าโดยนักฟิสิกส์จากทั่วโลก



### ข้อสังเกต

ฟิวชันระหว่างนิวเคลียสของธาตุเบาบางธาตุให้พลังงานต่อมวลน้อยกว่าฟิชชัน



### คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 20.3

1. จงให้ความหมายของปฏิกิริยานิวเคลียร์
2. ในการเกิดฟิวชัน นิวเคลียสมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร
3. นิวเคลียสที่เกิดฟิวชันมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร
4. พลังงานนิวเคลียร์ที่ได้จากฟิชชันและฟิวชัน มาจากอะไร
5. จงยกตัวอย่าง ธาตุหรือไอโซโทปของธาตุ ที่สามารถทำให้เกิดฟิวชันได้มา 3 ชนิด
6. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ช่วยให้สามารถนำพลังงานนิวเคลียร์จากฟิชชันมาผลิตไฟฟ้าได้อย่างไร



## แบบฝึกหัด 20.3

คำถามต่อไปนี้ กำหนดให้

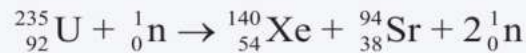
- มวล 1 u เท่ากับ  $1.66 \times 10^{-27}$  กิโลกรัม โดยมวล 1 u เทียบเท่ากับพลังงาน 931.5 MeV
- พลังงาน 1 อิเล็กตรอนโวลต์ เท่ากับ  $1.6 \times 10^{-19}$  จูล และ 1 โมลอะตอม เท่ากับ  $6.02 \times 10^{23}$  อะตอม

1. จงคำนวณพลังงานที่ได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ต่อไปนี้



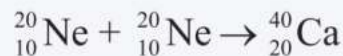
กำหนด มวลอะตอม  $m_{{}^{14}_7\text{N}} = 14.003074\text{u}$   $m_{{}^2_1\text{H}} = 2.014102\text{u}$   
 $m_{{}^{15}_7\text{N}} = 15.000108\text{u}$   $m_{{}^1_1\text{H}} = 1.007825\text{u}$

2. จากสมการการเกิดฟิชชันของยูเรเนียม-235



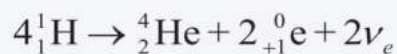
ถ้ามีพลังงานปลดปล่อยออกมา 200 MeV จงคำนวณพลังงานที่ได้จากการเกิดฟิชชันของยูเรเนียม-235 มวล 1 กรัม กำหนดมวลอะตอมของยูเรเนียม-235 เท่ากับ 235.043930 u

3. การเกิดฟิวชันของนีออน-20 ( ${}^{20}_{10}\text{Ne}$ ) 2 นิวเคลียส ทำให้ได้แคลเซียม-40 ( ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ) ดังสมการ



จงหาพลังงานที่ปลดปล่อยออกมา กำหนด มวลอะตอมของ  ${}^{20}_{10}\text{Ne}$  และ  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$  เท่ากับ 19.992436 u และ 39.962591 u ตามลำดับ

4. ฟิวชันบนดวงอาทิตย์และดวงดาวส่วนมาก เกิดจากการรวมกันของนิวเคลียสของไฮโดรเจน ( ${}^1_1\text{H}$ ) จำนวน 4 นิวเคลียส กลายเป็นนิวเคลียสของฮีเลียม ( ${}^4_2\text{He}$ ) จำนวน 1 นิวเคลียส ดังสมการ



จงหาพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากฟิวชันนี้

กำหนด มวลอะตอม  ${}^1_1\text{H}$   ${}^4_2\text{He}$  และ  ${}^0_{+1}\text{e}$  เท่ากับ 1.007825 u 4.002603 u และ 0.000549 u ตามลำดับ และ มวลของนิวทริโนมีค่าน้อยมาก

5. โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แห่งหนึ่ง ใช้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่มียูเรเนียม-235 ( $^{235}_{92}\text{U}$ ) เป็นองค์ประกอบ จงตอบคำถามต่อไปนี้

ก. ถ้าเริ่มต้นมียูเรเนียม-235 มวล 100 มิลลิกรัม หลังการเกิดฟิชชัน มวลของยูเรเนียม-235 หายไป 0.20% พลังงานนิวเคลียร์ที่ได้จากฟิชชันของยูเรเนียม-235 มีค่าเท่าใด

ข. ถ้าเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่ใช้น้ำมันเตา เพื่อให้ได้ความร้อนเท่ากับ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ จะต้องใช้น้ำมันเตากี่ตัน

กำหนด การเผาไหม้ น้ำมันเตา 1 ตัน ได้ความร้อน  $8.4 \times 10^9$  จูล



### ความรู้เพิ่มเติม

ปัจจุบัน นักฟิสิกส์จากหลายประเทศได้ร่วมมือกัน ภายใต้โครงการที่ชื่อว่า อีเทอร์ (ITER หรือ International Thermonuclear Experimental Reactor) เพื่อพัฒนาต้นแบบของเครื่องปฏิกรณ์ นิวเคลียร์ฟิวชันที่สามารถผลิตไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ได้ ดังรูป

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ฟิวชันในโครงการ อีเทอร์ได้รับการออกแบบให้ใช้สนามแม่เหล็กกักขัง กลุ่มแก๊สของดิวเทรียมและทริทอนกว่า 840 ลูกบาศก์เมตร ให้อยู่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง มากกว่า 150 ล้านองศาเซลเซียส เพื่อทำให้เกิด การหลอมรวมกันของนิวเคลียสทั้งสอง ซึ่งตามแผนที่วางไว้ โครงการจะเริ่มเดินเครื่องในปี พ.ศ. 2568

ทั้งนี้ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.) ของประเทศไทย ได้มีการทำบันทึก ลงนามความเข้าใจกับโครงการอีเทอร์ในการส่ง นักวิทยาศาสตร์จากประเทศไทยไปเข้าร่วมการ ฝึกอบรมและดูงานเกี่ยวกับโครงการนี้แล้ว



รูป ภาพคอมพิวเตอร์กราฟิกของภาคตัดขวาง ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ฟิวชัน ภายใต้ โครงการอีเทอร์

## 20.4 ประโยชน์และการป้องกันอันตรายจากรังสี

จากการศึกษาเกี่ยวกับรังสีที่ผ่านมา เราทราบว่ารังสีจากธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีมีสมบัติต่าง ๆ เช่น สามารถทะลุผ่านวัสดุบางชนิดได้ เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็ก และ ทำให้สารที่เคลื่อนที่ผ่านแตกตัวเป็นไอออน ด้วยสมบัติดังกล่าว ทำให้มีการนำรังสีไปใช้ประโยชน์ในหลากหลายด้าน แต่ในขณะเดียวกัน รังสีที่มีปริมาณที่มากเกินไปสามารถทำให้เกิดอันตรายกับร่างกายมนุษย์ได้ จึงควรมีการป้องกันที่ถูกต้อง ซึ่งจะศึกษาได้ในหัวข้อนี้

### 20.4.1 การนำรังสีไปใช้ประโยชน์

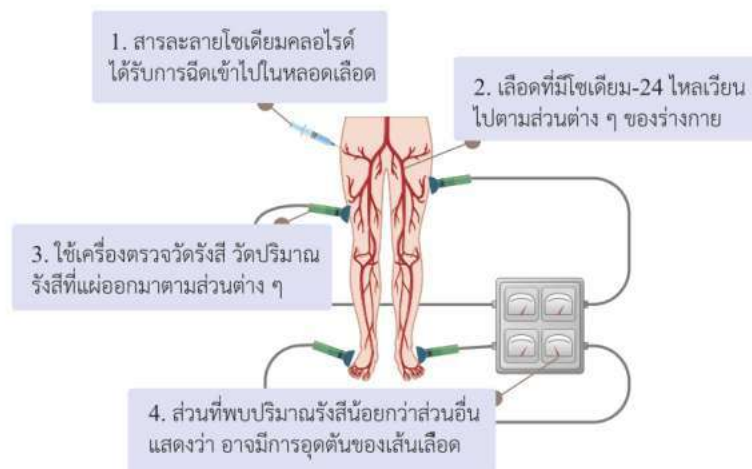
#### ด้านการแพทย์

รังสีจากธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีสามารถนำไปใช้ตรวจและรักษาโรคมะเร็งได้ เนื่องจากรังสีสามารถทำลายเซลล์มะเร็งที่มีการแบ่งเซลล์อย่างรวดเร็วได้ดีกว่าเซลล์ปกติ เช่น การใช้รังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 ( $^{60}_{27}\text{Co}$ ) ในการรักษาโรคมะเร็งด้วยเครื่องมือฉายดังรูป 20.28



รูป 20.28 ตัวอย่างเครื่องฉายรังสีแกมมาสำหรับการรักษาโรคมะเร็ง

นอกจากนี้ ในด้านการแพทย์ได้มีการใช้รังสีแกมมาจากโซเดียม-24 ( $^{24}_{11}\text{Na}$ ) ซึ่งอยู่ในรูปของเกลือโซเดียมคลอไรด์ในการศึกษาลักษณะการหมุนเวียนของเลือด โดยการฉีดสารละลายที่มีโซเดียม-24 เข้าไปในหลอดเลือด และเมื่อทำการวัดปริมาณรังสีแกมมาตามส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย จะทำให้ทราบว่ามีการอุดตันหรือการหมุนเวียนของเลือดไม่สะดวกของระบบการหมุนเวียนหรือไม่ ดังรูป 20.28



รูป 20.29 แผนภาพการใช้โซเดียม-24 ในรูปของเกลือโซเดียมคลอไรด์ติดตามการหมุนเวียนของเลือด



## ความรู้เพิ่มเติม

วิทยาการทางการแพทย์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้ธาตุหรือไอโซโทปกัมมันตรังสีในการตรวจและรักษาโรค เรียกว่า เวชศาสตร์นิวเคลียร์ (nuclear medicine) ส่วนสาขาทางการแพทย์ที่ใช้รังสีสำหรับการสร้างภาพอวัยวะภายในของร่างกายผู้ป่วยเพื่อการตรวจและรักษา เรียกว่า สาขารังสีวิทยา (radiology) โดยแพทย์ที่เชี่ยวชาญในด้านรังสีวิทยาเรียกว่า รังสีแพทย์ (radiologist) และสาขาทางฟิสิกส์ที่เน้นการประยุกต์ใช้ความรู้ทางฟิสิกส์ โดยเฉพาะด้านรังสีมาใช้ในการตรวจและรักษาโรค เรียกว่า สาขาฟิสิกส์การแพทย์ (medical physics)

### ด้านโบราณคดีและธรณีวิทยา

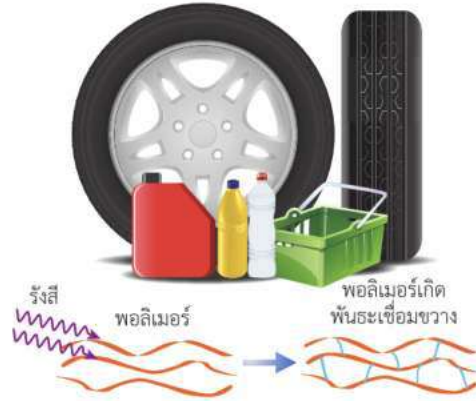
การหาอายุของวัตถุโบราณและซากดึกดำบรรพ์มีความสำคัญมากในทางโบราณคดีและธรณีวิทยา ซึ่งหนึ่งในวิธีที่ใช้กันมากคือการหาอายุจากปริมาณของคาร์บอน-14 ( $^{14}\text{C}$ ) ในซากสิ่งมีชีวิตโดยอาศัยหลักการที่ว่า คาร์บอน-14 เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีและมีครึ่งชีวิตประมาณ 5730 ปี และองค์ประกอบสำคัญของสิ่งมีชีวิตทั้งหลายคือ คาร์บอน ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของคาร์บอน-12 ( $^{12}\text{C}$ ) ที่เสถียร และมีคาร์บอน-14 ปริมาณเล็กน้อย ในขณะที่สัตว์หรือพืชมีชีวิตอยู่ จะมีการนำคาร์บอน-12 และคาร์บอน-14 เข้าร่างกาย ดังรูป 20.30 ทำให้อัตราส่วนระหว่างไอโซโทปของคาร์บอนทั้งสองที่สะสมในสิ่งมีชีวิตค่อนข้างคงตัว แต่เมื่อสิ่งมีชีวิตตาย โอกาสที่จะได้รับคาร์บอนตามปกติจะหยุดลง และเนื่องจากคาร์บอน-14 มีการสลายให้บีตาตลอดเวลา ปริมาณของคาร์บอน-14 ในซากสิ่งมีชีวิตจึงลดลงเรื่อย ๆ ทำให้อัตราส่วนระหว่างคาร์บอน-14 กับ คาร์บอน-12 ลดลงเรื่อย ๆ เช่นกัน ซึ่งเราสามารถนำอัตราส่วนดังกล่าวมาคำนวณหาอายุของซากสิ่งมีชีวิต และวัตถุโบราณที่มีส่วนของซากของสิ่งมีชีวิตที่มีอายุไม่เกิน 70 000 ปีได้



รูป 20.30 แผนภาพการเกิดและถ่ายโอนคาร์บอน-14 ในพืชและสัตว์

### ด้านอุตสาหกรรม

ในอุตสาหกรรมยางและพลาสติก การฉายรังสีแกมมาไปยังน้ำยางหรือพอลิเมอร์ของพลาสติก จะทำให้ผลิตภัณฑ์ยางหรือพลาสติกมีสมบัติทนต่อแรงดึงและต้านทานการฉีกขาดได้มากขึ้น อีกทั้ง สามารถทนต่อความร้อนและความชื้นได้ดีขึ้น เนื่องจากรังสีแกมมาทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายพอลิเมอร์ของยางหรือพลาสติก กลายเป็น พอลิเมอร์แบบร่างแห ดังรูป 20.31



รูป 20.31 ยางรถยนต์และพลาสติกที่ผ่านการฉายรังสี ทำให้มีสมบัติบางอย่างดีขึ้น

ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ การฉายรังสีให้กับอัญมณีบางชนิด สามารถทำให้สีและความแวววาวของอัญมณีเปลี่ยนไป ทั้งนี้ เนื่องจากสีของผลึกอัญมณีขึ้นอยู่กับตำแหน่งของอิเล็กตรอนในโครงสร้างผลึก การฉายรังสีที่มีพลังงานสูงสามารถทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนตำแหน่ง จึงทำให้อัญมณีมีสีเปลี่ยนไป และในบางกรณี ทำให้อัญมณีมีมูลค่าเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การฉายรังสีนิวตรอนให้กับโทแพซ (topaz) ที่ปกติใส ไม่มีสี ไม่มีประกายแวววาว และราคาไม่สูง ทำให้กลายเป็นโทแพซสีฟ้าเข้มเป็นประกายสวยงาม ดังรูปนำบทที่ 20 หรือ อีกตัวอย่างหนึ่งคือ การฉายรังสีแกมมาให้กับทัวร์มาลีน (tourmaline) ที่ปกติมีสีชมพูอ่อน ดังรูป 20.32 ก. กลายเป็นทัวร์มาลีนสีแดงหรือชมพูเข้ม ดังรูป 20.32 ข.



ก. ทัวร์มาลีนสีชมพูบนควอตซ์สีขาวก่อนได้รับการฉายรังสีแกมมา



ข. ทัวร์มาลีนหลังได้รับการฉายรังสีแกมมา

รูป 20.32 ทัวร์มาลีนก่อนและหลังจากได้รับการฉายรังสีแกมมา

### ด้านเกษตรกรรม

ในด้านการพัฒนาการเกษตร มีการใช้ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่พืชสามารถดูดซึมได้ดีสำหรับการศึกษาอัตราการดูดซึมปุ๋ยของต้นไม้ เช่น การใส่ปุ๋ยที่มีฟอสฟอรัส-32 ( $^{32}_{15}\text{P}$ ) ซึ่งสลายให้บีตา ลงในดินบริเวณใกล้ต้นไม้ รากต้นไม้จะดูดซึมฟอสฟอรัส-32 เข้าไป แล้วส่งต่อไปยังลำต้นและใบเพื่อการสังเคราะห์สารอาหาร การตรวจวัดปริมาณรังสีที่ส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น การตรวจวัดรังสีที่ใบ ดังรูป 20.33 จะช่วยให้สามารถหาอัตราการดูดซึมปุ๋ยของต้นไม้และรู้ว่าพืชแต่ละช่วงอายุ ต้องการปุ๋ยชนิดใด ปริมาณเท่าใด และต้องใช้ปุ๋ยแบบใด





รูป 20.33 การใช้ฟอสฟอรัส-32 ทำอัตรา การดูดซึมปุ๋ยของต้นไม้



ก. พุทธรักษาพันธุ์เดิม

ข. พุทธรักษาที่ผ่าน การฉายรังสี

รูป 20.34 การปรับปรุงพันธุ์พุทธรักษาด้วยวิธีการฉายรังสี

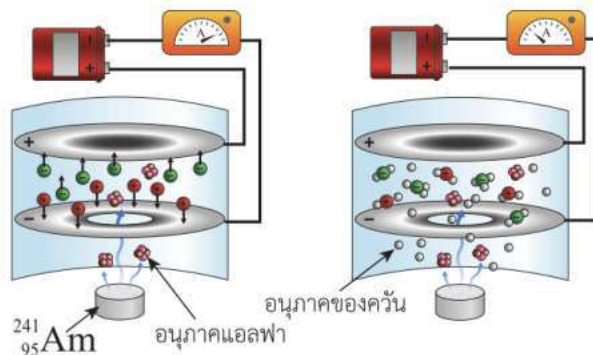
ในการปรับปรุงพันธุ์พืช การฉายรังสีให้กับส่วนของพืช เช่น เหง้าหรือหน่อ ทำให้รังสีสามารถทะลุผ่านเนื้อเยื่อไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับยีนของพืช ชักนำให้พืชเกิดมิวเทชัน (mutation) ซึ่งมีพืชพันธุ์ดีหลายสิบชนิดทั้งพันธุ์ไม้ดอกและไม้ผลที่เกิดจากวิธีการนี้ เช่น พุทธรักษาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา ทำให้มีสีและรูปร่างของดอกเปลี่ยนไป ดังรูป 20.34

### ด้านความปลอดภัย

ในการป้องกันอค์ภัย มีการนำอะเมริเซียม-241 ( $^{241}_{95}\text{Am}$ ) ที่สลายให้แอลฟามาใช้ในอุปกรณ์ตรวจจับควัน (smoke detector) ดังรูป 20.35 ก. โดยในสภาวะปกติ อนุภาคแอลฟาที่มาจาก การสลายของอะเมริเซียม-241 จะทำให้อากาศภายในกล่องที่อยู่ในอุปกรณ์ตรวจจับควันแตกตัวเป็นไอออน ทำให้มีกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้วภายในกล่อง ดังรูป 20.35 ข. และถ้ามีควันไฟลอยเข้ามาในอุปกรณ์ อนุภาคของควันไฟจะจับตัวกับไอออนรวมกันเป็นอนุภาคที่มีมวลมากขึ้นและมีการเคลื่อนที่ช้า ดังรูป 20.35 ค. ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟาลดลง ทำให้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ในอุปกรณ์ส่งสัญญาณเตือนภัย



ก. อุปกรณ์ตรวจจับควัน



ข. ในสภาวะปกติ

ค. เมื่อมีควัน

รูป 20.35 อุปกรณ์ตรวจจับควันและแผนภาพแสดงการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับควัน

### 20.4.2 รังสีในธรรมชาติ และการป้องกันอันตรายจากรังสี

ในสิ่งแวดล้อมรวมทั้งภายในร่างกายของเรา มีรังสีที่มาจากการสลายของธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีตลอดเวลา ซึ่งมีปริมาณน้อย จึงไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย

รังสีในสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่ มีที่มาจากสิ่งต่าง ๆ รอบตัว ดังนี้

#### 1. รังสีจากอากาศ น้ำ ดิน และหิน

เช่น รังสีจากเรดอน-222 ในอากาศ หรือ รังสีจากทอเรียม-232 และ ยูเรเนียม-238 ในน้ำ ดิน และหิน ซึ่งสิ่งก่อสร้างที่มีส่วนผสมของดินและหิน จะมีธาตุกัมมันตรังสีเหล่านี้ปะปนอยู่ด้วย โดยปริมาณรังสีที่คนทั่วไปได้รับจาก อากาศ น้ำ ดิน และหิน เฉลี่ยประมาณ 0.26 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี อย่างไรก็ตาม ปริมาณรังสีที่ได้รับจะแตกต่างกันไปตามสภาพภูมิศาสตร์ เช่น คนที่อยู่ใกล้บริเวณเหมืองแร่ เหมืองน้ำมัน หรือแหล่งแก๊สธรรมชาติ จะได้รับรังสีที่มากกว่าคนที่อยู่ในบริเวณอื่น

#### 2. รังสีจากอาหาร เช่น รังสีจาก

โพแทสเซียม-40 ที่อยู่ในกล้วย นม และเนื้อสัตว์ หรือรังสีจากคาร์บอน-14 ที่อยู่ในเนื้อสัตว์และพืช โดยเฉลี่ยร่างกายได้รับรังสีจากอาหารประมาณ 0.01 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี

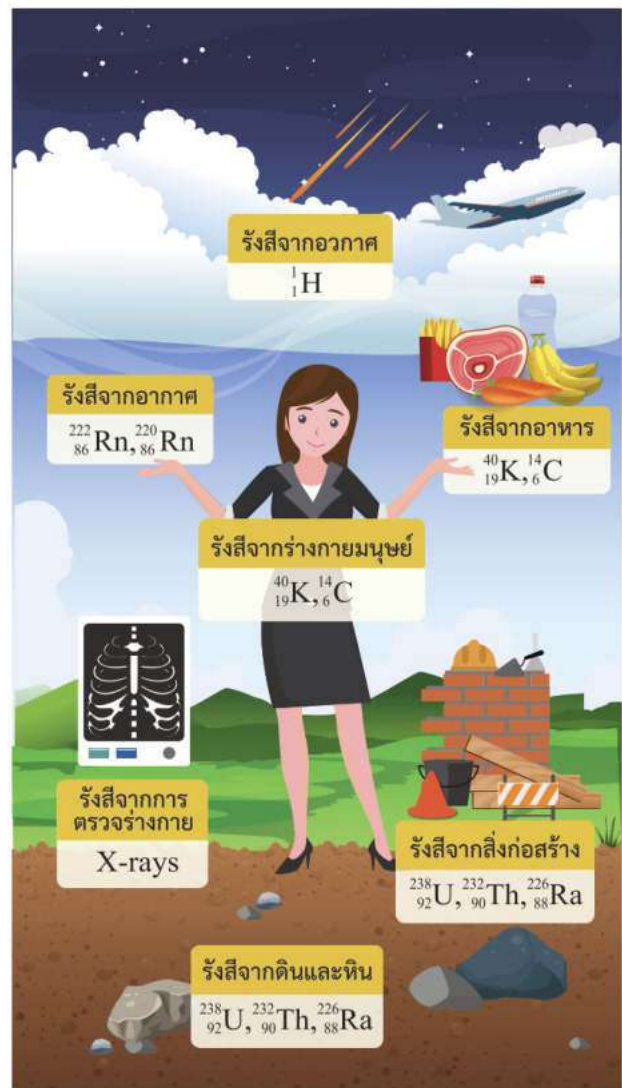
#### 3. รังสีจากอวกาศ หรือ รังสีคอสมิก

ซึ่งเป็นอนุภาคพลังงานสูง เช่น โปรตอนที่เคลื่อนที่เข้ามาในชั้นบรรยากาศโลกแล้วชนกับอนุภาคต่าง ๆ ในชั้น บรรยากาศ ทำให้เกิดอนุภาคอีกหลากหลายชนิดที่เดินทางมายังผิวโลก ซึ่งปริมาณรังสีคอสมิกที่คนทั่วไปได้รับเฉลี่ยประมาณ 1.0 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี



#### ความรู้เพิ่มเติม

ซีเวิร์ต (sievert; Sv) เป็นหน่วยในระบบเอสไอที่ใช้บอกปริมาณรังสีที่มีผลทางชีวภาพต่อเนื้อเยื่อหรืออวัยวะมนุษย์ ทั้งนี้ หน่วยซีเวิร์ตเป็นหน่วยที่ค่อนข้างใหญ่ โดยทั่วไปจึงนิยมใช้หน่วยของปริมาณรังสีเป็นมิลลิซีเวิร์ต (millisievert, mSv) หรือ ไมโครซีเวิร์ต (microsievert,  $\mu$ Sv)



รูป 20.36 รังสีจากสิ่งแวดล้อมและรังสีในร่างกายมนุษย์

นอกจากนี้ ภายในร่างกายมนุษย์ยังมีธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีหลายชนิด ทั้งที่ประกอบอยู่ในเซลล์ของร่างกาย เช่น โพแทสเซียม-40 และ คาร์บอน-14 และ ที่ได้รับจากภายนอกเข้าสู่ร่างกาย เช่น จากอาหาร เครื่องดื่มและยาชนิดต่าง ๆ หรือ จากการตรวจรักษาด้วยรังสี แต่ปริมาณรังสีที่ได้รับยังไม่อยู่ในระดับที่เป็นอันตราย หากร่างกายได้รับรังสีในปริมาณที่มากเกินไป จะเกิดอันตรายอย่างไร ศึกษาได้ในหัวข้อต่อไป

### อันตรายจากรังสี

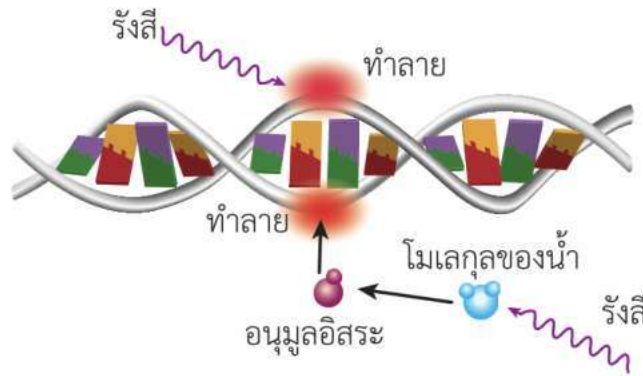
จากการศึกษาเกี่ยวกับรังสีที่ผ่านมา เราทราบว่า รังสีคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงหรืออนุภาคความเร็วสูงที่มีพลังงานพร้อมจะถ่ายโอนให้กับสิ่งที่ต่าง ๆ ที่รังสีตกกระทบหรือเคลื่อนที่ผ่าน ถ้าร่างกายมนุษย์ได้รับรังสีในปริมาณมาก พลังงานที่มาจากรังสีอาจทำให้เกิดความเสียหายกับเนื้อเยื่อและเซลล์ของอวัยวะต่าง ๆ ได้ ซึ่งระดับความรุนแรงของความเสียหายนอกจากจะขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีที่ได้รับแล้วยังขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ เช่น ชนิดของรังสี ระยะเวลาที่ได้รับรังสี และอวัยวะที่ได้รับรังสี

คณะกรรมการว่าด้วยการป้องกันอันตรายจากรังสีระหว่างประเทศ (International Commission on Radiological Protection หรือ ICRP) ได้สรุปผลกระทบจากรังสีที่มีต่อร่างกายมนุษย์ตามระดับปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับไว้ดังตาราง 20.6

**ตาราง 20.6** ผลกระทบกับร่างกายมนุษย์เมื่อร่างกายได้รับรังสีในปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณรังสี (มิลลิซีเวิร์ต)	อาการ
2.2	เป็นระดับรังสีปกติในธรรมชาติ ที่มนุษย์แต่ละคนได้รับใน 1 ปี
5	เกณฑ์สูงสุดที่อนุญาตให้สาธารณชนได้รับใน 1 ปี
50	เกณฑ์สูงสุดที่อนุญาตให้ผู้ปฏิบัติงานทางรังสีได้รับใน 1 ปี
250	ไม่ปรากฏอาการผิดปกติใด ๆ ทั้งระยะสั้นและระยะยาว
500	เม็ดเลือดขาวลดลงเล็กน้อย
1000	มีอาการคลื่นเหียน และอ่อนเพลีย เม็ดเลือดขาวลดลง
3000	อ่อนเพลีย อาเจียน ท้องเสีย เม็ดเลือดขาวลดลง ผมร่วง เบื่ออาหาร ตัวซีด คอแห้ง มีไข้ อายุสั้น อาจเสียชีวิตภายใน 3-6 สัปดาห์
6000	อ่อนเพลีย อาเจียน ท้องร่วงภายใน 1-2 ชั่วโมง เม็ดเลือดลดลงอย่างรวดเร็ว ผมร่วง มีไข้ อักเสบบริเวณปากและลำคออย่างรุนแรง มีเลือดออก มีโอกาสเสียชีวิตถึง 50% ภายใน 2-6 สัปดาห์
10000	มีอาการเหมือนข้างต้น ผิวหนังพองบวม ผมร่วง เสียชีวิตภายใน 2-3 สัปดาห์

ส่วนใหญ่ อาการผิดปกติที่เกิดขึ้นกับร่างกายเนื่องจากการได้รับรังสี เป็นผลมาจากความเสียหายในระดับเซลล์ หรือความเสียหายขององค์ประกอบภายในเซลล์อย่างโครโมโซมและดีเอ็นเอ โดยมีสาเหตุมาจากการที่รังสีไปทำลายโครงสร้างโมเลกุลของดีเอ็นเอโดยตรง หรือรังสีไปทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radicals) ที่ไปทำลายโครงสร้างโมเลกุลของดีเอ็นเออีกทีหนึ่ง ดังรูป 20.37 การเปลี่ยนแปลงของดีเอ็นเอที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้เซลล์ผิดปกติหรืออาจทำให้เซลล์ตายได้



รูป 20.37 สายของดีเอ็นเอถูกทำลายจากรังสีทั้งในทางตรงและทางอ้อม

สำหรับเนื้อเยื่อบริเวณอวัยวะสืบพันธุ์ที่ทำหน้าที่สร้างอสุจิหรือไข่ เมื่อได้รับรังสี อาจทำให้ดีเอ็นเอของเซลล์สืบพันธุ์เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการผสมพันธุ์ ผลของการเปลี่ยนแปลงนี้จะถูกถ่ายทอดสู่ลูกหลาน เป็นผลให้เกิดมิวเทชัน ซึ่งมิวเทชันอาจทำให้เกิดผลดีหรือผลเสียก็ได้ แต่มิวเทชันส่วนใหญ่ให้ผลเสีย ดังนั้นการป้องกันอันตรายจากการได้รับรังสีเกินปริมาณที่ปลอดภัย จึงเป็นเรื่องสำคัญ

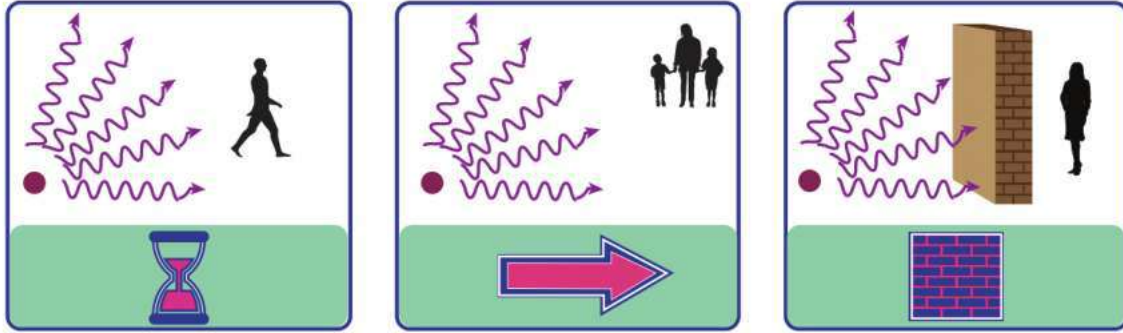
อันตรายจากรังสีบางครั้งอาจเกิดจากอุบัติเหตุหรือความประมาทของบุคคลได้ เช่น ในกรณีที่มีผู้ได้รับอันตรายจากรังสีในปี พ.ศ. 2543 ที่ จังหวัดสมุทรปราการ เนื่องจากการนำส่วนหัวของเครื่องฉายรังสีโคบอลต์-60 ที่ไม่ใช้แล้วออกมาจากสถานที่จัดเก็บ และได้มีคนเก็บของเก่านำส่วนหัวดังกล่าวที่มีลักษณะดังรูป 20.38 ไปขายให้กับร้านรับซื้อของเก่า ทำให้มีผู้เจ็บป่วยและได้รับอันตรายถึงชีวิต



รูป 20.38 แหล่งเหล็กที่หุ้มโคบอลต์-60 จำนวน 2 แห่ง ที่คนเก็บของเก่าเก็บได้ที่ จังหวัดสมุทรปราการ

### การป้องกันอันตรายจากรังสี

ในบางสถานการณ์ที่เราจำเป็นต้องอยู่ในบริเวณที่มีแหล่งกำเนิดรังสี เพื่อลดความเสี่ยงจากอันตรายที่อาจเกิดจากรังสี ควรปฏิบัติตามแนวทางหลัก 3 แนวทาง ดังแผนภาพในรูป 20.39



ก. ใช้เวลาให้สั้นที่สุดในบริเวณที่มีแหล่งกำเนิดรังสี

ข. อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีให้มากที่สุด

ค. ใช้วัสดุกำบังรังสีที่เหมาะสม

รูป 20.39 แผนภาพแสดงแนวทางหลักในการป้องกันอันตรายจากรังสี 3 แนวทาง

แต่ละแนวทาง มีคำอธิบายดังนี้

1. เมื่อจำเป็นต้องอยู่ในบริเวณที่มีแหล่งกำเนิดรังสี ให้ใช้เวลาให้สั้นที่สุด เนื่องจากรังสีแผ่ออกมาจากแหล่งกำเนิดรังสีตลอดเวลา การอยู่ในบริเวณที่มีรังสีเป็นระยะเวลานานจะทำให้ได้รับปริมาณรังสีมากกว่าการอยู่เป็นระยะเวลาสั้น ๆ ดังนั้น ถ้าจำเป็นต้องเข้าไปใกล้บริเวณที่มีรังสีควรใช้เวลาสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้
2. เมื่อทราบว่า มีแหล่งกำเนิดรังสีในบริเวณใกล้เคียง ให้พยายามอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เนื่องจากรังสีที่แผ่ออกมาจากแหล่งกำเนิดจะสูญเสียพลังงานให้กับอากาศและวัตถุอื่น ๆ รอบ ๆ ทำให้พลังงานของรังสีลดลงเรื่อย ๆ เมื่อแผ่ออกห่างจากแหล่งกำเนิดมากขึ้น ดังนั้น ควรพยายามออกห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีให้มากที่สุด
3. ถ้าจำเป็นต้องอยู่ใกล้แหล่งกำเนิดรังสีเป็นเวลานาน ควรใช้วัสดุที่รังสีทะลุผ่านได้ยากมาเป็นอุปกรณ์กำบังรังสี เช่น การใช้ชุดหรืออุปกรณ์สวมใส่ที่ทำจากตะกั่วที่มีความหนาเพียงพอมากำบังรังสีบีตาและรังสีแกมมา ดังรูป 20.40 หรือ ในกรณีที่ต้องทำงานใกล้กับแหล่งกำเนิดรังสี เช่น เจ้าหน้าที่ในห้องปฏิบัติการวิจัยด้านนิวเคลียร์ ควรใช้น้ำเป็นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน



รูป 20.40 ชุดกำบังรังสีที่มีแผ่นตะกั่วอยู่ข้างใน

โดยทั่วไป ในบริเวณที่มีการใช้รังสี เช่น ในโรงพยาบาล โรงงานอุตสาหกรรม รวมทั้งบนเครื่องมือหรือภาชนะที่เกี่ยวข้องกับรังสี จะมีสัญลักษณ์เตือนว่ามีแหล่งกำเนิดรังสีที่แผ่รังสีออกมาโดยรอบ ดังรูป 20.41 ก. และ ข. ผู้ที่พบเห็นวัตถุหรือบริเวณที่มีสัญลักษณ์ดังกล่าว จึงต้องระมัดระวังและควรปฏิบัติตามแนวทางการป้องกันรังสี 3 แนวทาง ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

ในกรณีที่บริเวณใดหรือวัตถุใดมีรังสีที่อยู่ในระดับเป็นอันตรายสูง จะมีสัญลักษณ์เตือนภัยอีกสัญลักษณ์หนึ่ง ดังรูป 20.41 ค. ซึ่งผู้ที่พบเห็นควรต้องรีบออกห่างจากบริเวณนั้นหรือวัตถุนั้นทันที



ก.



ข.



ค.

รูป 20.41 สัญลักษณ์เตือนภัยจากรังสี

จะเห็นได้ว่า รังสีมีประโยชน์ในหลากหลายด้าน แต่ในขณะเดียวกัน รังสีที่มีปริมาณมากเกินไป อาจทำให้เกิดอันตรายได้ ซึ่งในอนาคต เมื่อวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมีการพัฒนามากยิ่งขึ้น แนวโน้มที่จะมีการนำรังสีมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น เราจึงควรมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้รังสีและแนวทางการป้องกันอันตรายจากรังสีที่ถูกต้อง เพื่อการดำรงชีวิตท่ามกลางเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับรังสีได้อย่างปลอดภัย และเกิดประโยชน์สูงสุดกับตนเองและบุคคลทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง



#### คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 20.4

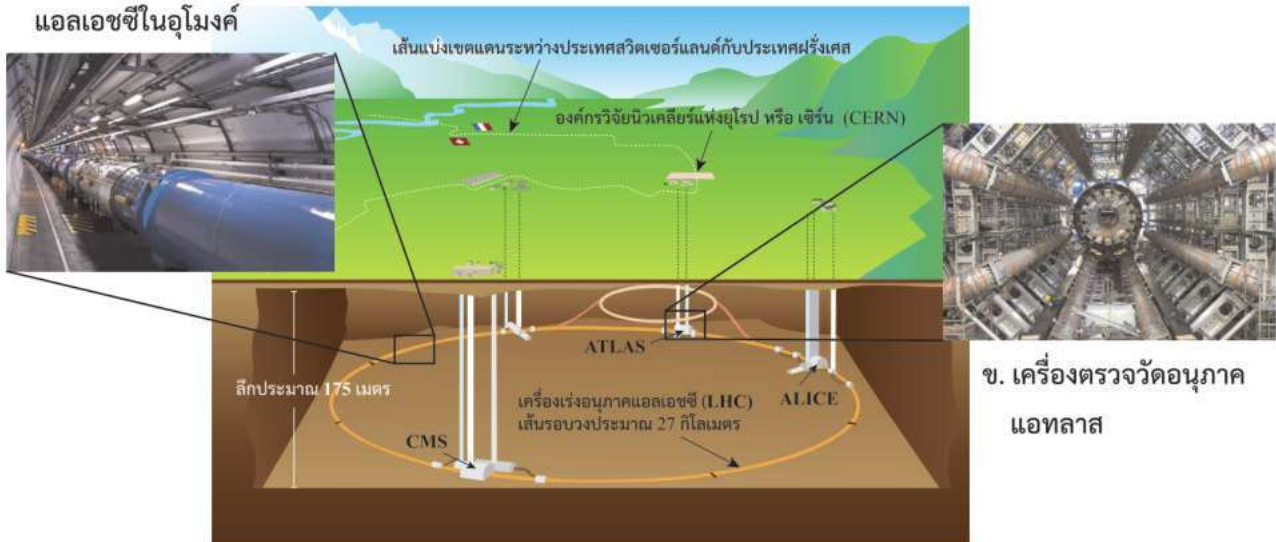
1. จงยกตัวอย่างประโยชน์ของรังสีจากไอโซโทปกัมมันตรังสีในด้านการแพทย์อย่างน้อย 2 ตัวอย่าง
2. นักโบราณคดีใช้ความรู้ด้านไอโซโทปกัมมันตรังสีในการหาอายุของวัตถุโบราณอย่างไร
3. จงยกตัวอย่างประโยชน์ของรังสีจากไอโซโทปกัมมันตรังสีในด้านการอุตสาหกรรมอย่างน้อย 2 ตัวอย่าง
4. การฉายรังสีให้กับส่วนของพืช ชักนำให้พืชเกิดมิวเทชันได้อย่างไร
5. ในชีวิตประจำวัน เราได้รับรังสีจากไอโซโทปกัมมันตรังสี จากแหล่งใดบ้าง ให้ระบุอย่างน้อย 3 อย่าง
6. ถ้าร่างกายได้รับรังสีจากไอโซโทปกัมมันตรังสีมากเกินไป จะมีอาการเริ่มต้นที่สังเกตได้อย่างไร
7. ถ้าจำเป็นต้องอยู่ใกล้บริเวณที่มีรังสีจากไอโซโทปกัมมันตรังสี ควรปฏิบัติอย่างไร
8. ชุดหรืออุปกรณ์ที่นำมาสวมใส่เพื่อป้องกันรังสีจากไอโซโทปกัมมันตรังสี ควรทำจากวัสดุชนิดใด

## 20.5 ฟิสิกส์อนุภาค

ในการศึกษาเกี่ยวกับฟิสิกส์อะตอมและฟิสิกส์นิวเคลียร์ที่ผ่านมา เราทราบว่า อิเล็กตรอน โปรตอน และ นิวตรอน เป็นอนุภาคที่เป็นองค์ประกอบของอะตอม และ โฟตอนแสดงสมบัติอนุภาคของแสง ซึ่งการศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคเหล่านี้ ทำให้เข้าใจปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในธรรมชาติและได้นำไปสู่การประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มากมาย และนอกจากอนุภาคที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น นักฟิสิกส์ยังได้ค้นพบอนุภาคชนิดอื่น ๆ อีกเป็นจำนวนมาก โดยอาศัยเครื่องมือสำคัญ คือ **เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerator)** และ **เครื่องตรวจจับอนุภาค (particle detector)** เช่น ที่องค์การวิจัยนิวเคลียร์แห่งยุโรป หรือ เซิร์น (CERN) ได้ใช้เครื่องเร่งอนุภาคแอลเอชซี (LHC) และเครื่องตรวจจับอนุภาคแอทลาส (ATLAS) ดังรูป 20.42 ค้นพบอนุภาคมูลฐานและศึกษาอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคต่าง ๆ ซึ่งการค้นคว้าวิจัยได้นำไปสู่ความเข้าใจเกี่ยวกับธรรมชาติของสสารและพลังงานมากขึ้น ทั้งในระดับเล็กกว่าอะตอมและระดับเอกภพ อีกทั้ง ได้นำไปสู่การประยุกต์ใช้ประโยชน์หลากหลายด้าน ซึ่งจะศึกษาได้ในหัวข้อนี้

### ก. ส่วนหนึ่งของเครื่องเร่งอนุภาค

#### แอลเอชซีในอุโมงค์

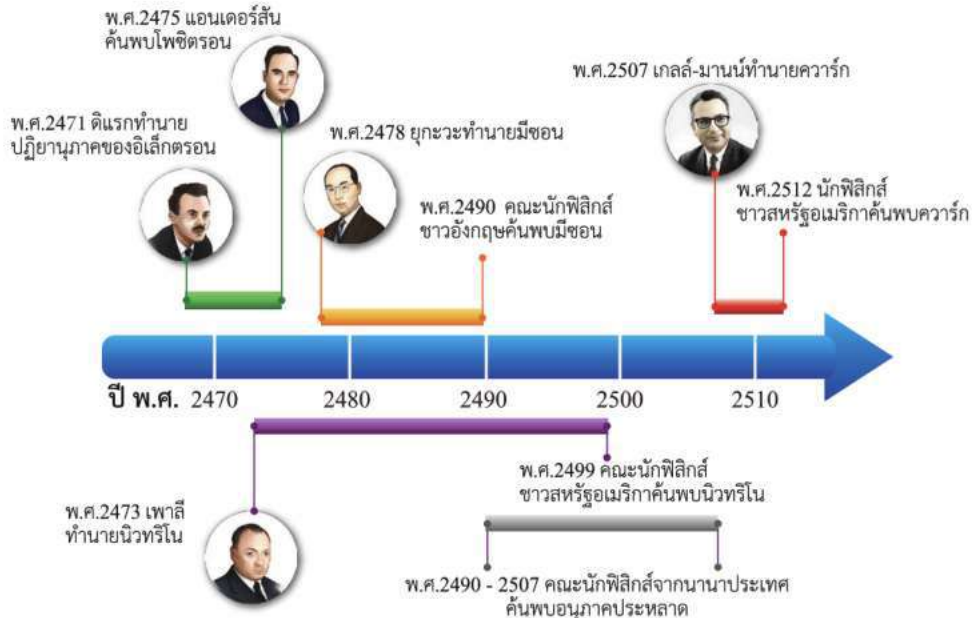


ข. เครื่องตรวจจับอนุภาค  
แอทลาส

รูป 20.42 เครื่องเร่งอนุภาคแอลเอชซีและเครื่องตรวจจับอนุภาคแอทลาสที่เซิร์น

### 20.5.1 อนุภาคมูลฐาน

ภายหลังการค้นพบโปรตอนและนิวตรอน นักฟิสิกส์เข้าใจว่า อนุภาคทั้งสองเป็น **อนุภาคมูลฐาน (elementary particle)** ซึ่งหมายถึงอนุภาคที่ไม่ได้ประกอบขึ้นจากอนุภาคชนิดอื่นและไม่มีโครงสร้างหรือองค์ประกอบภายใน แต่ในเวลาต่อมา เมื่อเทคโนโลยีของเครื่องมือค้นคว้าวิจัยได้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้น นักฟิสิกส์ได้ค้นพบหลักฐานที่บ่งชี้ว่า โปรตอนและนิวตรอนมีองค์ประกอบภายใน อีกทั้งได้ค้นพบอนุภาคชนิดใหม่ ๆ ตามช่วงเวลาดังรูป 20.43

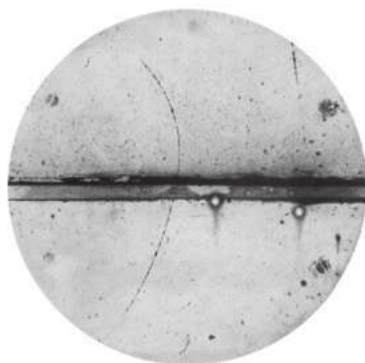


รูป 20.43 ช่วงเวลาของการทำนายและค้นพบอนุภาคมูลฐานชนิดต่าง ๆ

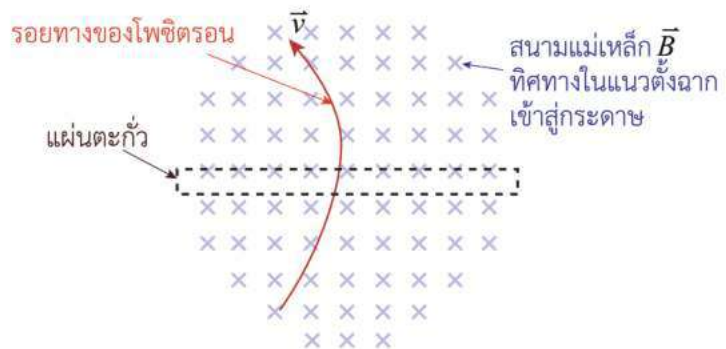
การค้นพบอนุภาคในแต่ละช่วงเวลา มีความเป็นมาอย่างไร ศึกษาได้ต่อไปนี้

**การค้นพบปฏิยานุภาค**

ในปี พ.ศ. 2471 พอล ดิแรก (Paul Dirac) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้พยายามนำกลศาสตร์ควอนตัมมาอธิบายพฤติกรรมของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วใกล้ความเร็วแสง และในปี พ.ศ. 2473 เขาทำนายว่า มีอนุภาคอีกชนิดหนึ่ง ที่มีสมบัติเหมือนอิเล็กตรอน แต่มีประจุตรงข้ามอยู่ในธรรมชาติ ซึ่งต่อมาในปี พ.ศ.2475 คาร์ล แอนเดอร์สัน (Carl Anderson) นักฟิสิกส์ชาวสหรัฐอเมริกา ได้วิเคราะห์ภาพที่ได้จากเครื่องตรวจวัดอนุภาคแบบห้องหมอก (cloud chamber) ดังตัวอย่างในรูป 20.44 และได้ยืนยันการค้นพบอนุภาคที่มีสมบัติตามที่ดิแรกได้เสนอไว้ ภายหลังได้มีการเรียกชื่ออนุภาคชนิดใหม่ที่ค้นพบนี้ว่า โพซิตรอน (positron,  $e^+$  หรือ  ${}_{+1}^0e$ ) ที่หมายถึงอิเล็กตรอนที่มีประจุบวก (positive electron)



ก. ภาพถ่ายรอยทางของโพซิตรอนใน เครื่องตรวจวัดอนุภาคแบบห้องหมอก



ข. แผนภาพแสดงการวิเคราะห์รอยทางของโพซิตรอน

รูป 20.44 รอยทางของโพซิตรอนและแผนภาพแสดงการวิเคราะห์





## ความรู้เพิ่มเติม

พอล เอเดรียน มอริซ ดิแรก (Paul Adrian Maurice Dirac ค.ศ. 1902-1984 หรือ พ.ศ. 2445-2527) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ เป็นหนึ่งในนักฟิสิกส์ที่ได้ร่วมวางรากฐานกลศาสตร์ควอนตัมและทฤษฎีเกี่ยวกับปฏิยานุภาค เขาได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี พ.ศ. 2476 จากผลงานการพัฒนากลศาสตร์ควอนตัม



รูป ดิแรก

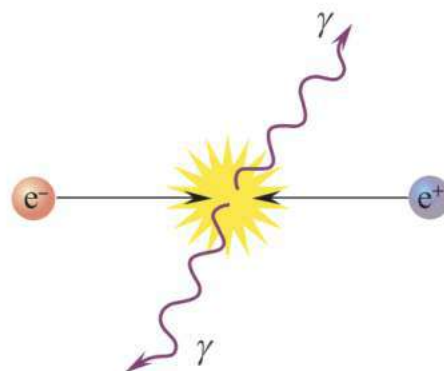
คาร์ล เดวิด แอนเดอร์สัน (Carl David Anderson ค.ศ. 1905-1991 หรือ พ.ศ. 2448-2534) นักฟิสิกส์ชาวสหรัฐอเมริกา ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี พ.ศ. 2479 จากผลงานการค้นพบโพซิตรอน นอกจากนี้ แอนเดอร์สันยังเป็นผู้ร่วมคณณะนักฟิสิกส์ที่ค้นพบมิวออน หนึ่งในอนุภาคมูลฐาน



รูป แอนเดอร์สัน

นอกจากการค้นพบโพซิตรอนจะเป็นการยืนยันแนวคิดที่ดิแรกได้เสนอไว้ ยังได้นำไปสู่แนวคิดที่ว่า อนุภาคทุกชนิดมีคู่อนุภาคที่มีสมบัติเหมือนกันแต่มีประจุตรงข้าม เรียกว่า **ปฏิยานุภาค** (antiparticle) ซึ่งต่อมา ได้มีการค้นพบปฏิยานุภาคของโปรตอน เรียกว่า แอนติโปรตอน (antiproton,  $\bar{p}$ ) และปฏิยานุภาคของนิวตรอน เรียกว่า แอนตินิวตรอน (antineutron,  $\bar{n}$ )

เมื่ออนุภาคและปฏิยานุภาคมาพบกัน มวลทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกกระบวนการนี้ว่า **การประลัย** (annihilation) เช่น เมื่อโพซิตรอน ( $e^+$ ) มาพบกับอิเล็กตรอน ( $e^-$ ) จะเกิดการประลัยแล้วกลายเป็นโฟตอนของรังสีแกมมาที่เคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกัน ดังรูป 20.45



รูป 20.45 การเกิดการประลัยเมื่ออิเล็กตรอน มาพบกับโพซิตรอน



### ข้อสังเกต

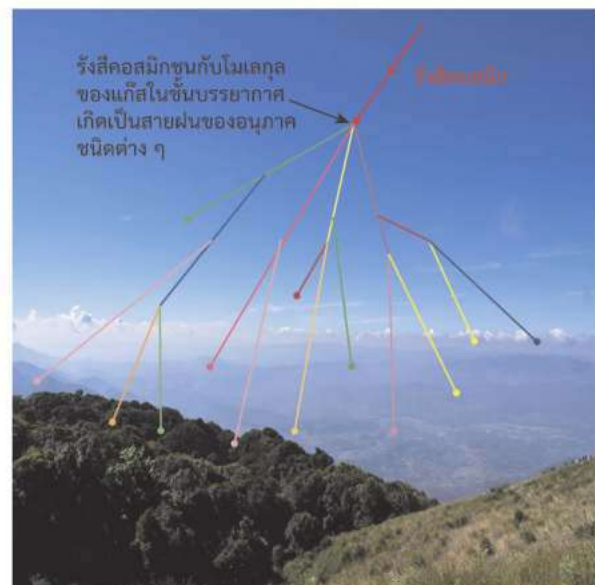
การใช้สัญลักษณ์ระบุปฏิยานุภาคของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า จะใช้เครื่องหมายบวก (+) หรือ ลบ (-) แสดงประจุตรงข้ามกับอนุภาคนั้น ยกเว้น ปฏิยานุภาคของโปรตอน ใช้สัญลักษณ์  $\bar{p}$  (อ่านว่า พีบาร์) ส่วนอนุภาคอื่น ๆ ที่ไม่มีประจุ หรือ มีประจุเป็นเศษส่วนของประจุอิเล็กตรอน (ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป) การใช้สัญลักษณ์ระบุปฏิยานุภาคจะใช้เครื่องหมาย  $^-$  (อ่านว่า บาร์) วางไว้เหนือสัญลักษณ์ของอนุภาคนั้น เช่น  $\bar{n}$  เป็นสัญลักษณ์ปฏิยานุภาคของนิวตรอน  $n$  ทั้งนี้ ปฏิยานุภาคของอนุภาคที่ไม่มีประจุ มีสมบัติทางควอนตัมบางอย่างที่ตรงข้ามกับสมบัติของอนุภาค

### การค้นพบมีซอนและมิวออน

ในปี พ.ศ. 2478 ในช่วงที่นักฟิสิกส์พยายามอธิบายแรงที่ยึดเหนี่ยวนิวคลีออนในนิวเคลียส ฮิเดกิ ยูกะวะ (Hideki Yukawa) นักฟิสิกส์ชาวญี่ปุ่นได้นำเสนอแนวคิดว่า การที่นิวคลีออนสามารถอยู่รวมกันในนิวเคลียสโดยไม่แยกออกจากกันด้วยแรงผลักรังสีไฟฟ้าเนื่องจากมีแรงนิวเคลียร์ที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนอนุภาคสื่อแรง (force-carrier particle หรือ force carrier) ระหว่างนิวคลีออน จึงทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างนิวคลีออนให้อยู่รวมกันในนิวเคลียส

อนุภาคสื่อแรงของแรงนิวเคลียร์ที่ยุกะวะทำนายไว้มีมวลประมาณ 200 เท่าของอิเล็กตรอน เรียกว่า มีซอน (meson) ตามคำในภาษากรีก เมโซ (meso) ที่แปลว่า ระดับปานกลาง เพราะอนุภาคนี้นี้มีมวลอยู่ระหว่างมวลของโปรตอนกับมวลของอิเล็กตรอน

ในปี พ.ศ.2480 แอนเดอร์สันผู้ค้นพบโพซิตรอนได้ร่วมกับคณะนักฟิสิกส์ชาวสหรัฐอเมริกา ทำการศึกษารังสีคอสมิกซึ่งเป็นอนุภาคพลังงานสูงจากอวกาศ และได้ค้นพบว่า มีอนุภาคชนิดใหม่ที่มีมวลใกล้เคียงกับที่ยุกะวะทำนายไว้ แต่ภายหลังการตรวจสอบโดยละเอียด พบว่าอนุภาคที่ค้นพบนี้มีสมบัติอื่น ๆ ต่างออกไปจากทฤษฎีของยุกะวะ จึงได้มีการพยายามค้นหามีซอนต่อไป จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2490 คณะนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้ยืนยันการค้นพบมีซอน จากการใช้แผ่นฟิล์มบันทึกรอยทางของอนุภาคจากรังสีคอสมิก อนุภาคดังกล่าวต่อมาได้รับการเรียกชื่อว่า ไพมีซอน (pi meson) หรือ ไพออน (pion,  $\pi$ )



รูป 20.46 รังสีคอสมิก

การค้นพบโพซอนทำให้ทฤษฎีแรงนิวเคลียร์ของยูกะวะได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง และในเวลาต่อมา นักฟิสิกส์ได้ค้นพบโพซอนอีก 2 ชนิดรวมทั้งหมดเป็น 3 ชนิดได้แก่โพซอนบวก ( $\pi^+$ ) โพซอนลบ ( $\pi^-$ ) และ โพซอนศูนย์ ( $\pi^0$ ) ส่วนอนุภาคที่แอนเดอร์สันและคณะได้ค้นพบในตอนแรก ได้รับการให้ชื่อว่า **มิวออน (muon,  $\mu^-$ )** ซึ่งจากการศึกษาเพิ่มเติม พบว่า มิวออน เป็นอนุภาคมูลฐาน เช่นเดียวกับอิเล็กตรอน ส่วนโพซอนเป็นอนุภาคที่มีองค์ประกอบภายในและเป็นอนุภาคสื่อแรงของแรงนิวเคลียร์ ตามที่ยูกะวะเสนอไว้ ซึ่งจะได้กล่าวเพิ่มเติมในหัวข้อถัดไป

หลังจากปี พ.ศ. 2490 การศึกษาอนุภาคจากรังสีคอสมิกและเครื่องเร่งอนุภาคได้นำไปสู่การค้นพบมีซอนอีกหลายอนุภาค รวมทั้งการค้นพบอนุภาคที่มีมวลมากกว่านิวตรอนที่ไม่เคยมีการทำนายมาก่อนอีกหลายอนุภาคเช่นกัน ซึ่งนักฟิสิกส์ได้จัดอนุภาคเหล่านี้ให้อยู่ในกลุ่ม **อนุภาคประหลาด (strange particle)** เนื่องจากเป็นอนุภาคที่มีการเกิดและการสลายแตกต่างไปจากอนุภาคอื่น ๆ ที่ได้ค้นพบมา

### การค้นพบนิวทริโน

ในปี พ.ศ. 2473 โวล์ฟกัง เพาลี (Wolfgang Pauli) นักฟิสิกส์ชาวออสเตรีย พยายามแก้ปัญหาความไม่สมดุลของพลังงานก่อนและหลังการสลายให้บีตา โดยได้เสนอว่า พลังงานส่วนหนึ่งที่หายไปนั้น น่าจะมีอนุภาคชนิดใหม่ นำพลังงานส่วนนี้ออกไป และอนุภาคนี้ต้องมีขนาดเล็กมาก ไม่มีประจุ ซึ่งข้อเสนอของเพาลีได้รับการสนับสนุนจากแฟร์มี โดยแฟร์มีเรียกอนุภาคชนิดใหม่ที่เพาลีเสนอว่า **นิวทริโน (neutrino)** ซึ่งเป็นภาษาอิตาเลียนที่แปลว่า ตัวเล็กที่เป็นกลางทางไฟฟ้า



### ความรู้เพิ่มเติม

โวล์ฟกัง เพาลี (Wolfgang Pauli ค.ศ. 1900-1958 หรือ พ.ศ. 2443-2501) นักฟิสิกส์ชาวออสเตรีย หนึ่งในนักฟิสิกส์ที่วางรากฐานของกลศาสตร์ควอนตัม ซึ่งทำให้เขาได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี พ.ศ. 2488



รูป เพาลี

การตรวจวัดนิวทริโนเพื่อยืนยันแนวคิดของเพาลีเป็นเรื่องที่ทำทายนักฟิสิกส์มาก เนื่องจากนิวทริโนมีอันตรกิริยากับสสารอื่น ๆ น้อยมาก การค้นพบนิวทริโนจึงต้องใช้เวลาานกว่า 26 ปี โดยในปี พ.ศ.2499 คณะนักฟิสิกส์ชาวสหรัฐอเมริกาได้ยืนยันการค้นพบนิวทริโนจากการใช้ถังขนาดใหญ่บรรจุน้ำผสมแคดเมียมคลอไรด์ ซึ่งติดตั้งไวใกล้ ๆ กับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่มีไอโซโทปกัมมันตรังสีสลายให้นิวทริโนจำนวนมากพอ ทำให้เกิดสัญญาณในถังน้ำที่สามารถตรวจวัดได้

เมื่อมีการศึกษาเพิ่มเติมในเวลาต่อมา พบว่า นิวทริโนเป็นอนุภาคมูลฐานและมีทั้งหมด 3 ชนิด โดยนิวทริโนที่ได้รับการค้นพบครั้งแรกเป็นปฏิยานุภาคของ อิเล็กตรอนนิวทริโน (electron neutrino,  $\nu_e$ ) เรียกว่า อิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน (electron-antineutrino,  $\bar{\nu}_e$ ) ที่มาจากการสลายให้บีตา ส่วนนิวทริโนอีก 2 ชนิด ได้แก่ มิวออนนิวทริโน (muon neutrino,  $\nu_\mu$ ) และ ทาวนิวทริโน (tau neutrino,  $\nu_\tau$ ) ซึ่งนิวทริโนทั้ง 2 มีคู่ปฏิยานุภาคเช่นเดียวกับอิเล็กตรอนนิวทริโน

### การค้นพบควาร์ก

หลังจากการค้นพบอนุภาคจำนวนมาก นักฟิสิกส์ได้พยายามจัดจำแนกอนุภาคเป็นหมวดหมู่ เพื่ออำนวยความสะดวกในการทำงานเกี่ยวกับการจัดจำแนกธาตุเป็นหมวดหมู่ต่าง ๆ ในตารางธาตุของเมนเดเลเยฟ โดยในปี พ.ศ.2503 มัวร์เรย์ เกลล์-มานน์ (Murray Gell-Mann) นักฟิสิกส์ชาวสหรัฐอเมริกา ได้ประสบความสำเร็จในการจัดจำแนกอนุภาคต่าง ๆ อย่างเป็นระบบ ภายใต้รูปแบบที่เขาให้ชื่อว่า แปดหนทาง (Eightfold Way) ซึ่งได้นำไปสู่การค้นพบอนุภาคชนิดใหม่ ๆ ที่ทำนายไว้ในระบบ คล้ายกับ การค้นพบธาตุใหม่ ๆ ที่ทำนายไว้ในตารางธาตุ อีกทั้งการจัดจำแนกอนุภาคของเกลล์-มานน์ ยังได้นำไปสู่การทำนายว่า ภายในของโปรตอนและนิวตรอนจะต้องมีอนุภาคมูลฐานชนิดใหม่เป็นองค์ประกอบ ซึ่ง เกลล์-มานน์ ได้ให้ชื่อว่า ควาร์ก (quark) ตามคำที่ใช้ในบทกวีบทหนึ่งที่เกลล์-มานน์ ชื่นชอบ



### ความรู้เพิ่มเติม

มัวร์เรย์ เกลล์-มานน์ (Murray Gell-Mann ค.ศ. 1929-2019 หรือ พ.ศ. 2472 - 2562) นักฟิสิกส์ชาวสหรัฐอเมริกา ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี พ.ศ. 2512 จากผลงานการจัดหมวดหมู่อนุภาค



รูป เกลล์-มานน์

ในปี พ.ศ.2512 คณะนักฟิสิกส์ชาวสหรัฐอเมริกาได้ทำการทดลองโดยใช้เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรงที่ยาวกว่า 3.2 กิโลเมตรดังรูป 20.47 เร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงให้เข้าไปชนกับโปรตอนและนิวตรอน ซึ่งได้พบว่า อิเล็กตรอนบางอนุภาคมีการเบนออกไปจากแนวเดิม คล้ายกับการเบนออกจากแนวเดิมของอนุภาคแอลฟาในการทดลองของรัทเทอร์ฟอร์ด ซึ่งในกรณีการเร่งอิเล็กตรอนไปชนโปรตอนและนิวตรอน รูปแบบการเบนของอิเล็กตรอนทำให้นักฟิสิกส์สรุปได้ว่า โปรตอนและนิวตรอนประกอบไปด้วยอนุภาคที่เล็กกว่าจำนวน 3 อนุภาค สอดคล้องกับการทำนายของเกลล์-มานน์



รูป 20.47 ภาพถ่ายจากด้านบนแสดงเครื่องเร่งอนุภาคแนวตรงสแตนฟอร์ดที่ค้นพบควาร์ก

ควาร์กที่เกลล์-มานน์ ทำนายไว้มี 3 ชนิด ได้แก่ ควาร์กอัพ (up quark, u) ควาร์กดาวน์ (down quark, d) และ ควาร์กสเตรนจ์ (strange quark, s) ซึ่งการศึกษาเพิ่มเติมในเวลาต่อมา ได้พบหลักฐานใหม่ ๆ ที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยควาร์กเพียง 3 ชนิด จึงได้มีการนำเสนอ ควาร์กเพิ่มเติมอีก 3 ชนิด ได้แก่ ควาร์กชาร์ม (charm quark, c) ควาร์กบอททอม (bottom quark, b) และ ควาร์กทอป (top quark, t) ซึ่งในเวลาต่อมา ควาร์ก 3 ชนิดหลังได้รับการค้นพบจากการทดลองที่ใช้เครื่องเร่งอนุภาคที่มีพลังงานสูงมากยิ่งขึ้นและเครื่องตรวจจับอนุภาคที่มีสมรรถนะสูงมากยิ่งขึ้น



#### ข้อสังเกต

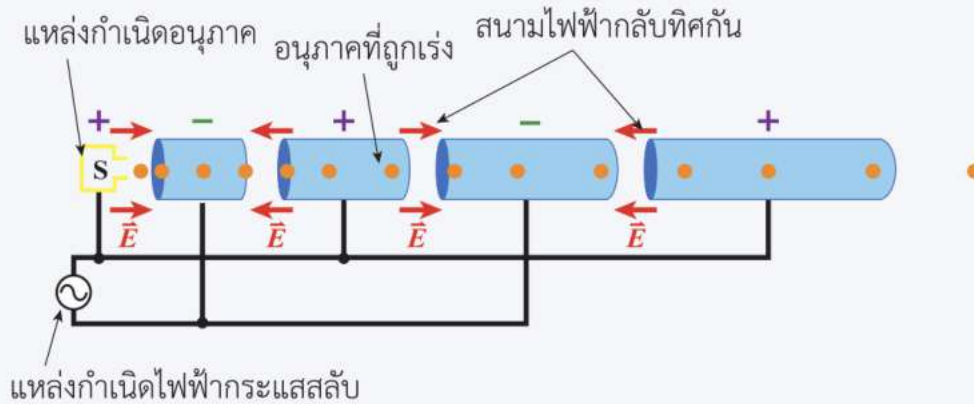
บางแหล่งเรียนรู้ เรียก ควาร์กบอททอม ว่า ควาร์กบิวตี้ (beauty quark) และ เรียกควาร์กทอป ว่า ควาร์กทรูท (truth quark)



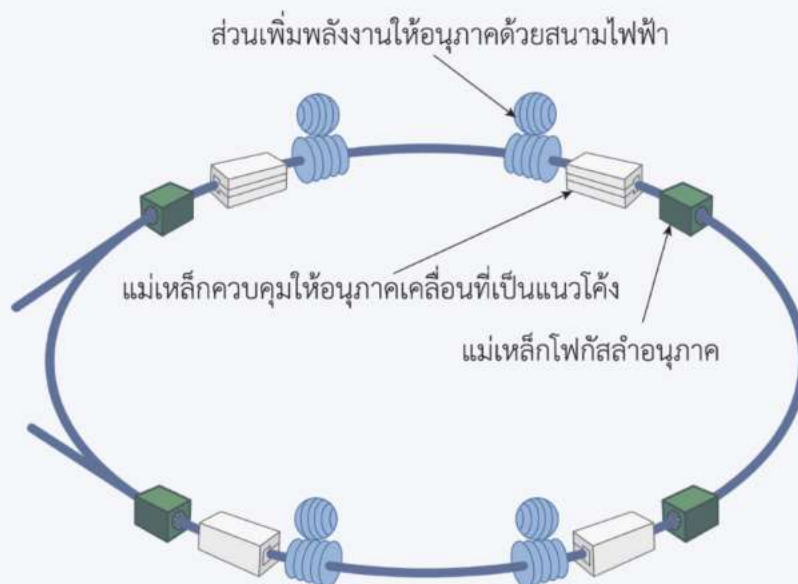
## ความรู้เพิ่มเติม

เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerator) ที่นักฟิสิกส์ใช้ในการศึกษาค้นคว้าในปัจจุบันมี 2 ชนิดคือ เครื่องเร่งเชิงเส้น (linear accelerator หรือ linac) และ เครื่องเร่งแนววงกลม (circular accelerator) โดยทั้ง 2 ชนิดใช้หลักการเดียวกันคือ เพิ่มพลังงานจลน์ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า โดยใช้สนามไฟฟ้า และควบคุมทิศการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยใช้สนามแม่เหล็ก

ส่วนประกอบหลักของเครื่องเร่งอนุภาคทั้ง 2 ชนิด ดังรูป



รูป เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง ใช้การกลับทิศของสนามไฟฟ้าในการเร่งอนุภาค

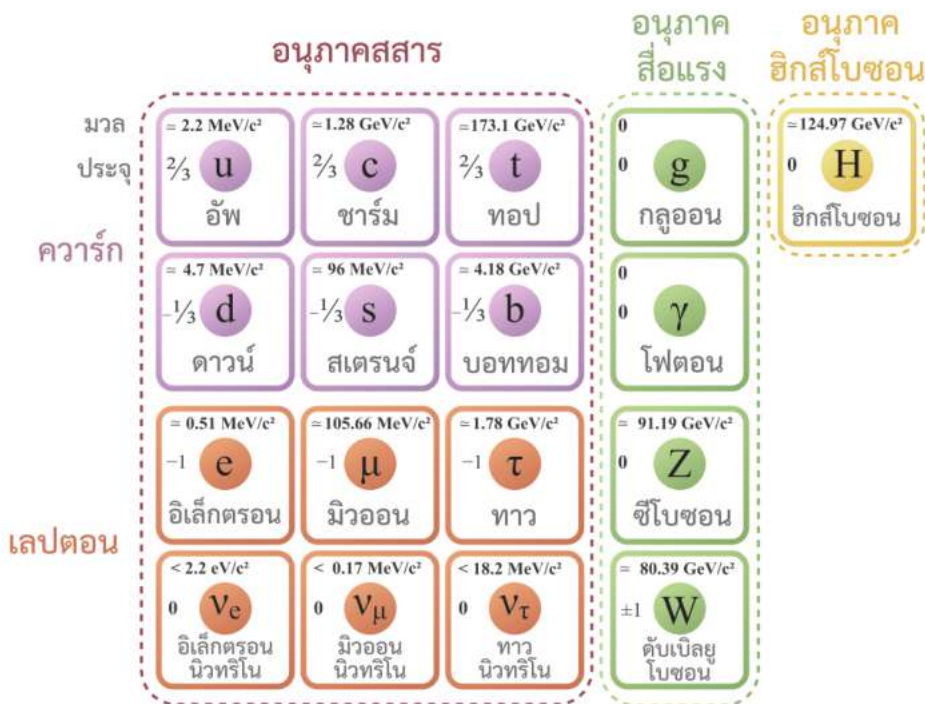


รูป เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม ใช้สนามไฟฟ้าเพิ่มพลังงานจลน์ให้อนุภาคและใช้สนามแม่เหล็กควบคุมให้อนุภาคเคลื่อนที่เป็นวงกลม

### 20.5.2 แบบจำลองมาตรฐาน

จากอนุภาคหลายร้อยชนิดที่ได้รับการค้นพบ นักฟิสิกส์ได้พยายามทำความเข้าใจธรรมชาติของอนุภาคเหล่านี้ผ่านหลายทศวรรษ จนในที่สุด พวกเขาได้พบว่า อนุภาคจำนวนมากที่ค้นพบประกอบด้วยอนุภาคมูลฐานไม่เกิน 20 ชนิด และพวกเขาได้สรุปแนวคิดและทฤษฎีต่าง ๆ ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมและอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคมูลฐานเหล่านี้ภายใต้กรอบของแบบจำลองที่เรียกว่าแบบจำลองมาตรฐาน (the Standard Model)

ในแบบจำลองมาตรฐาน อนุภาคมูลฐานได้รับการแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ อนุภาคสสาร (matter particle) อนุภาคสื่อแรง (force-carrier particle หรือ force carrier) และอนุภาคฮิกส์โบซอน (Higgs boson) ดังรูป 20.48



รูป 20.48 แผนภาพแสดงการจัดกลุ่มอนุภาคมูลฐานตามแบบจำลองมาตรฐานของฟิสิกส์อนุภาค



#### ข้อสังเกต

การระบุมวลของอนุภาคมูลฐาน นิยมใช้หน่วยของพลังงานหารด้วยความเร็วของแสงยกกำลังสอง เช่น  $\text{MeV}/c^2$  หรือ  $\text{GeV}/c^2$  ซึ่งมาจากความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับพลังงาน ตามสมการ

$$E = mc^2$$

ในแต่ละกลุ่ม ประกอบด้วยอนุภาคมูลฐานดังต่อไปนี้

- อนุภาคสสาร เป็นองค์ประกอบของสสารที่มีอยู่ในเอกภพ ประกอบด้วยอนุภาคมูลฐาน 2 กลุ่มย่อย ได้แก่
  - ควาร์ก มี 6 ชนิด ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยควาร์กแต่ละชนิดมีประจุ  $+\frac{2}{3}e$  หรือ  $-\frac{1}{3}e$  ดังรูป 20.48
  - เลปตอน (lepton) มี 6 ชนิด ได้แก่ อิเล็กตรอน (electron,  $e^-$ ) มิวออน (muon,  $\mu^-$ ) ทาว (tau,  $\tau^-$ ) และนิวทริโนอีก 3 ชนิด ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ทั้งนี้ นิวทริโนทั้ง 3 ชนิดเป็นกลางทางไฟฟ้า ส่วนอิเล็กตรอน มิวออน และทาว มีประจุ  $-e$  ดังรูป 20.48 (คำว่า เลปตอน มาจากคำในภาษากรีกที่แปลว่า เบา ซึ่งหมายถึง อนุภาคที่มีมวลน้อย)
- อนุภาคสื่อแรง เป็นอนุภาคที่เป็นสื่อของแรงพื้นฐานในธรรมชาติ ประกอบด้วยอนุภาคต่อไปนี้
  - กลูออน (gluon,  $g$ ) เป็นอนุภาคสื่อแรงของแรงเข้ม (strong force) โดยกลูออนเป็นกลางทางไฟฟ้า ทั้งนี้ แรงเข้มเป็นแรงที่ยึดเหนี่ยวควาร์กให้อยู่รวมกันในโปรตอนและนิวตรอน และเป็นแรงพิสัยใกล้ประมาณ  $10^{-15}$  เมตร แรงเข้มจัดว่ามีค่าความแรงมากที่สุดในแรงพื้นฐานทั้งหมดและเป็นแรงที่รับรู้ได้เฉพาะควาร์กเท่านั้น
  - ดับเบิลยูโบซอน (W-boson,  $W^\pm$ ) และ ซีโบซอน (Z-boson,  $Z^0$ ) เป็นอนุภาคสื่อแรงของแรงอ่อน (weak force) โดยดับเบิลยูโบซอนมีทั้งชนิดที่มีประจุไฟฟ้าบวกและประจุไฟฟ้าน้อย ส่วนซีโบซอนเป็นกลางทางไฟฟ้า ทั้งนี้ แรงอ่อนเป็นแรงที่เกี่ยวข้องกับการสลายให้บีตาของธาตุกัมมันตรังสีและเป็นแรงพิสัยใกล้ในระดับประมาณ  $10^{-18}$  เมตร แรงอ่อนมีค่าความแรงประมาณ  $10^{-5}$  เท่าของแรงเข้มและรับรู้ได้ทั้งเลปตอนและควาร์ก

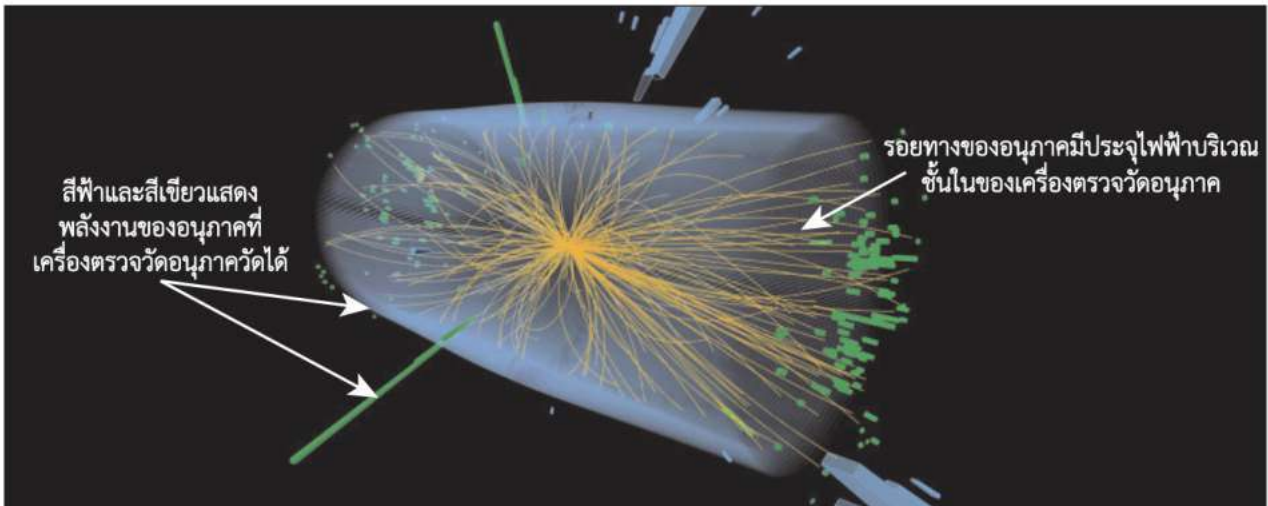


### ข้อสังเกต

บางแหล่งเรียนรู้อาจเรียก แรงเข้ม ว่า แรงนิวเคลียร์อย่างเข้ม (strong nuclear force) และเรียกแรงอ่อน ว่า แรงนิวเคลียร์อย่างอ่อน (weak nuclear force) ซึ่งอาจทำให้เข้าใจว่า แรงนิวเคลียร์มี 2 ชนิด ทำให้เกิดความเข้าใจคลาดเคลื่อน เนื่องจาก แรงนิวเคลียร์เป็นแรงระหว่างนิวคลีออน ส่วนแรงเข้มและแรงอ่อน เป็นแรงระหว่างอนุภาคมูลฐาน



- โฟตอน (photon,  $\gamma$ ) เป็นอนุภาคสื่อแรงของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic force) โดยโฟตอนเป็นกลางทางไฟฟ้า ทั้งนี้ แรงแม่เหล็กไฟฟ้า แตกต่างจากแรงเข้มและแรงอ่อนคือ มีทั้งที่เป็นแรงดึงดูดและที่เป็นแรงผลัก โดยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแรงพิสัยไกล มีค่าความแรงประมาณ 1/100 เท่าของแรงเข้ม แรงแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแรงที่รับรู้ได้เฉพาะอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า
- อนุภาคฮิกส์โบซอน เป็นอนุภาคที่เกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาที่ทำให้อนุภาคมูลฐานต่าง ๆ มีมวล ฮิกส์โบซอนเป็นกลางทางไฟฟ้าและเป็นอนุภาคสุดท้ายที่ได้รับการค้นพบในแบบจำลองมาตรฐานจากการใช้เครื่องเร่งอนุภาคเร่งให้โปรตอนมีพลังงานสูงแล้วควบคุมให้มาชนกัน ทำให้เกิดอนุภาคจำนวนมากพุ่งออกมาผ่านเครื่องตรวจจับอนุภาค ซึ่งสามารถนำผลการตรวจวัดไปวิเคราะห์เพื่อยืนยันการค้นพบฮิกส์โบซอน ตัวอย่างเหตุการณ์ที่อาจมีอนุภาคฮิกส์โบซอนเกิดขึ้น ดังรูป 20.49



รูป 20.49 ภาพที่สร้างจากคอมพิวเตอร์แสดงเหตุการณ์ที่โปรตอนมาชนกันที่พลังงานสูงทำให้เกิดอนุภาคชนิดต่าง ๆ จำนวนมาก ซึ่งหนึ่งในเหตุการณ์นั้นอาจมีอนุภาคฮิกส์โบซอนเกิดขึ้น



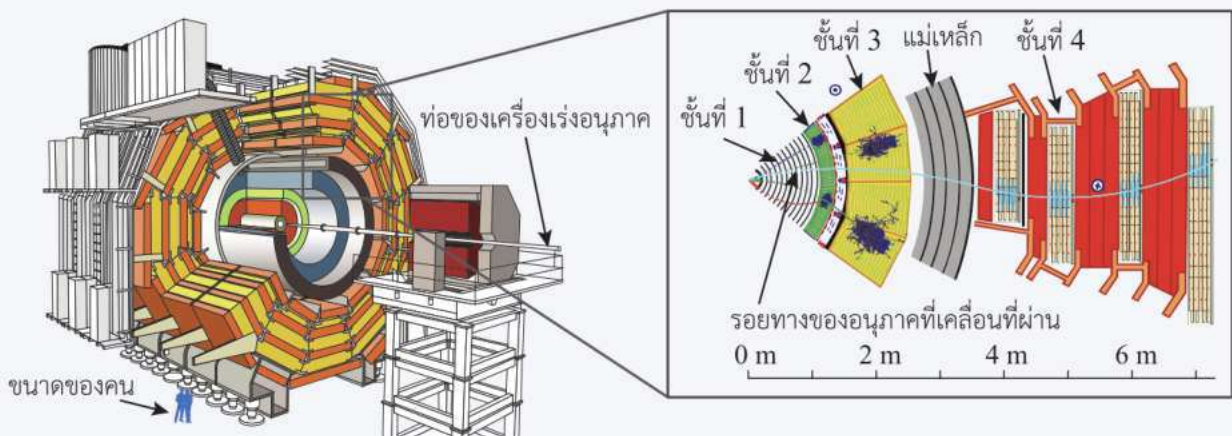
### ข้อสังเกต

แรงโน้มถ่วง (gravitational force) เป็นหนึ่งในแรงพื้นฐานในธรรมชาติซึ่งอนุภาคสสารทุกชนิดรับรู้ได้ แต่แบบจำลองมาตรฐานไม่ได้รวมแรงโน้มถ่วงไว้ เนื่องจากแรงโน้มถ่วงมีค่าความแรงน้อยที่สุดหรือ ประมาณ  $10^{-39}$  เท่าของแรงเข้ม และมีผลกับอนุภาคขนาดเล็กน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงอื่น ๆ แต่นักฟิสิกส์เชื่อว่า แรงโน้มถ่วงมีอนุภาคสื่อแรงเช่นกัน เรียกว่า แกรวิตอน (graviton,  $g$ ) ซึ่งยังไม่ได้รับการค้นพบ



### ความรู้เพิ่มเติม

เครื่องตรวจวัดอนุภาค (particle detector) ส่วนใหญ่ที่นักฟิสิกส์อนุภาคใช้ในการทดลองในปัจจุบัน มีโครงสร้างเป็นชั้น ๆ คล้ายหัวหอม โดยมีท่อของเครื่องเร่งอนุภาคอยู่ตรงแกนกลาง ดังรูป ก. เมื่ออนุภาคพลังงานสูงในเครื่องเร่งอนุภาคเคลื่อนที่มาชนกันหรือชนกับเป้าบริเวณแกนกลางของเครื่อง จะทำให้เกิดอนุภาคหลากหลายชนิดพวยพุ่งผ่านแต่ละชั้นของเครื่องตรวจวัดอนุภาค ซึ่งค่าพลังงาน โมเมนตัม ประจุไฟฟ้า รวมทั้งรอยทางของอนุภาค จะได้รับการวิเคราะห์โดยอาศัยความเข้าใจเกี่ยวกับอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคกับวัสดุหรือตัวกลางในแต่ละชั้น ดังรูป ข. ค่าที่ได้จะนำมาวิเคราะห์เพื่อระบุชนิดและสมบัติของอนุภาคต่อไป



ก. ภาพจำลองสามมิติของเครื่องตรวจวัดอนุภาคซีเอ็มเอส

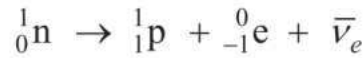
ข. ภาพส่วนหนึ่งของภาคตัดขวางของเครื่องตรวจวัดอนุภาคซีเอ็มเอส แสดงชั้นต่าง ๆ ที่มีอนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน

### รูป โครงสร้างของเครื่องตรวจวัดอนุภาคซีเอ็มเอส

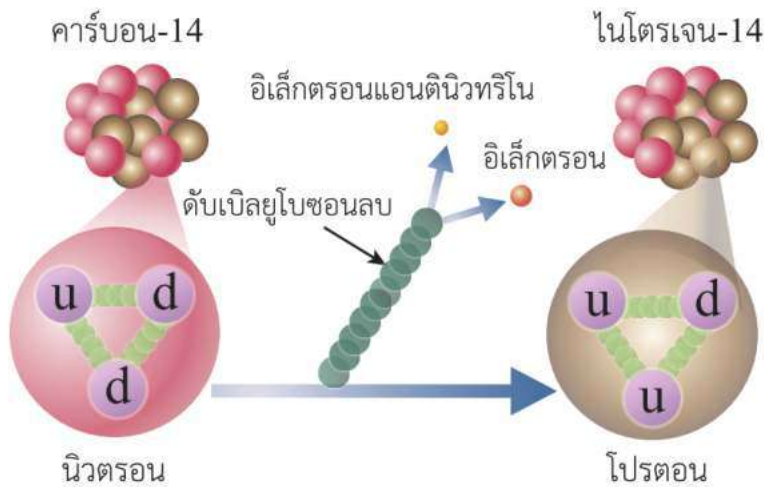
อย่างไรก็ตาม เราไม่สามารถตรวจวัดอนุภาคทุกชนิดที่เกิดขึ้นได้ เครื่องตรวจวัดอนุภาคสามารถตรวจวัดอนุภาคที่เสถียร เช่น อิเล็กตรอน โปรตอน โฟตอน และอนุภาคที่สลายไม่รวดเร็วเกินไป เช่น นิวตรอน ไพออน มิวออน ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว การตรวจวัดอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าจะทำได้ง่ายกว่าการตรวจวัดอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้า



อีกตัวอย่างของการอธิบายพฤติกรรมอนุภาคโดยอาศัยแนวคิดเกี่ยวกับอนุภาคมูลฐานในแบบจำลองมาตรฐาน คือ ปรากฏการณ์การสลายให้บีตาของไอโซโทปกัมมันตรังสี ที่นิวตรอนมีการสลายและเปลี่ยนไปเป็นโปรตอน ดังสมการ

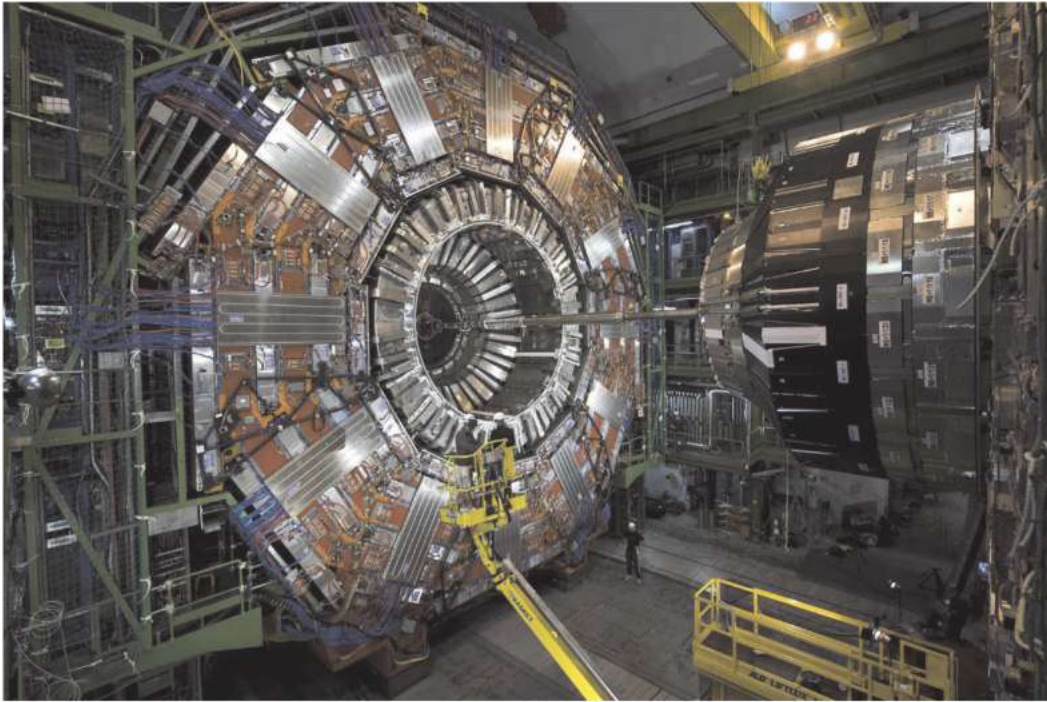


ซึ่งในแบบจำลองมาตรฐาน ได้ให้คำอธิบายว่า การสลายให้บีตาเกิดขึ้นจากการที่ควาร์กดาวน์ในนิวตรอน ได้เปลี่ยนไปเป็น ควาร์กอัพ พร้อมกับมีการปล่อยดับเบิลยูโบซอนลบ ( $W^-$ ) ซึ่งเป็นอนุภาคสื่อแรงของแรงอ่อนออกมา จากนั้น ดับเบิลยูโบซอนลบได้สลายเป็นอิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน ดังรูป 20.52



รูป 20.52 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนชนิดของควาร์กในการสลายให้บีตา

แบบจำลองมาตรฐานนับเป็นความสำเร็จที่ยิ่งใหญ่ของนักฟิสิกส์ในศตวรรษที่ 20 ล่วงมาถึงต้นศตวรรษที่ 21 อย่างไรก็ดีตาม แบบจำลองมาตรฐานยังไม่สามารถอธิบายครอบคลุมถึงข้อสงสัยในธรรมชาติได้ทั้งหมด เช่น เหตุใดในปัจจุบันจึงมีจำนวนสสารและปฏิสสารไม่เท่ากัน หรือ สสารมืด (dark matter) ที่ทำให้กาแล็กซีมีการเคลื่อนที่อย่างเป็นอยู่ มีองค์ประกอบคืออะไร ข้อสงสัยเหล่านี้เป็นสิ่งที่ท้าทายความรู้ความเข้าใจของมนุษย์ที่มีต่อธรรมชาติ ซึ่งในปัจจุบันนักฟิสิกส์ทั่วโลกกำลังทำการศึกษาค้นคว้าเพื่อตอบข้อสงสัยดังกล่าว เช่น ท้องค์กรเพื่อการวิจัยนิวเคลียร์แห่งยุโรป หรือ เซิร์น มีการใช้เครื่องเร่งอนุภาคแอลเอชซี ที่สามารถเร่งให้โปรตอนมาชนกันที่พลังงานสูง และใช้เครื่องตรวจวัดอนุภาคซีเอ็มเอส (CMS หรือ Compact Muon Solenoid) ดังรูป 20.53 ทำการตรวจวัดอนุภาคเพื่อตอบข้อสงสัยข้างต้น นักฟิสิกส์คาดหวังว่าความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับอนุภาคมูลฐานจะช่วยให้เราเข้าใจที่มาและความเป็นไปของสิ่งที่ใหญ่ที่สุดอย่างเอกภพ



รูป 20.53 เครื่องตรวจวัดอนุภาคซีเอ็มเอส

### 20.5.3 ประโยชน์จากการค้นคว้าวิจัยด้านฟิสิกส์อนุภาค

การค้นคว้าวิจัยด้านฟิสิกส์อนุภาคเป็นการศึกษาเพื่อตอบคำถามที่เป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์ เช่น สสารประกอบขึ้นจากอะไร อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคมูลฐานเป็นอย่างไร ซึ่งการพยายามหาคำตอบ นอกจากจะนำมาซึ่งองค์ความรู้ใหม่ ๆ แล้วยังทำให้เกิดและนวัตกรรมทางเทคโนโลยีที่สามารถนำมาพัฒนาคุณภาพชีวิตและประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ มากมาย ซึ่งในที่นี่จะนำเสนอตัวอย่างของประโยชน์ที่ได้จากการค้นคว้าวิจัยด้านฟิสิกส์อนุภาค 4 ด้าน ได้แก่ ด้านการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรม ด้านการรักษาความปลอดภัย และด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ

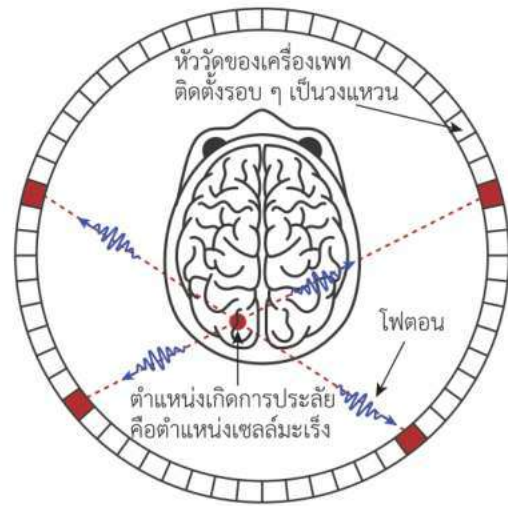
#### ด้านการแพทย์

จากความเข้าใจธรรมชาติและอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคและปฏิยานุภาค ทำให้แพทย์สามารถนำปฏิยานุภาค เช่น โพซิตรอน มาประยุกต์ใช้ในการตรวจวินิจฉัยโรคมะเร็งได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น การใช้เครื่องถ่ายภาพรังสีระนาบด้วยการปล่อยโพซิตรอน หรือ เครื่องเพท (PET หรือ Positron Emission Tomography) ดังรูป 20.54 ในการตรวจวินิจฉัยโรคมะเร็ง



รูป 20.54. เครื่องถ่ายภาพรังสีระนาบด้วยการปล่อยโพซิตรอนหรือเครื่องเพท

ในการตรวจวินิจฉัยโรคมะเร็งด้วยเครื่อง PET แพทย์จะฉีดกลูโคสชนิดพิเศษที่มีไอโซโทปกัมมันตรังสีสลายให้โพซิตรอนปริมาณน้อยและมีครึ่งชีวิตสั้นเข้าไปในร่างกายผู้ป่วย และเมื่อกกลูโคสได้รับการดูดซึมเข้าสู่เนื้อเยื่อทั่วร่างกาย โพซิตรอนจะเกิดการประลัยกับอิเล็กตรอนที่มีอยู่ทั่วไปในเซลล์ทำให้เกิดโฟตอนเคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกัน ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ ทั้งนี้ เนื่องจากเซลล์มะเร็งเป็นเซลล์ที่มีการแบ่งตัวอย่างรวดเร็ว จึงมีการดูดกลืนกลูโคสมากกว่าเซลล์ทั่วไป อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโพซิตรอนกับอิเล็กตรอนที่บริเวณเซลล์มะเร็งจึงมีมากกว่าปกติ ทำให้มีการปล่อยโฟตอนออกมามากกว่าบริเวณอื่น และเมื่อวิเคราะห์ตำแหน่งของหัววัดแต่ละคู่ที่ได้รับโฟตอนและอยู่ตรงข้ามกัน จะช่วยให้ทราบตำแหน่งของเซลล์มะเร็งได้จากจุดตัดระหว่างแนวของหัววัดแต่ละคู่ ดังรูป 20.55



รูป 20.55 การตรวจวัดโฟตอนด้วยหัววัดแต่ละคู่ของเครื่อง PET ทำให้สามารถระบุตำแหน่งของเซลล์มะเร็งได้

นอกจากการนำปฏิกิริยานิวเคลียร์มาช่วยในการตรวจวินิจฉัยโรคมะเร็งแล้ว เทคโนโลยีของเครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้ค้นคว้าวิจัยทางฟิสิกส์อนุภาค ยังได้รับการนำไปประยุกต์ใช้รักษาโรคมะเร็งด้วยวิธีการฉายรังสีให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ตัวอย่างเช่น การใช้โปรตอนพลังงานสูงในการรักษาโรคมะเร็งที่เรียกว่า การบำบัดด้วยโปรตอน (proton therapy) ซึ่งต้องใช้เครื่องเร่งอนุภาคสำหรับเร่งให้โปรตอนมีพลังงานสูง ก่อนจะฉายไปที่เซลล์มะเร็ง ดังรูป 20.56



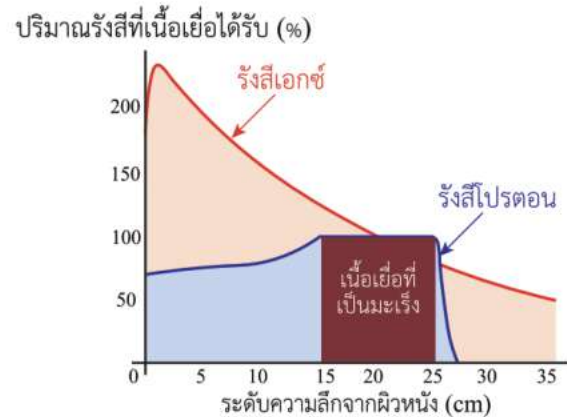
รูป 20.56 การบำบัดด้วยโปรตอนใช้โปรตอนพลังงานสูงจากเครื่องเร่งอนุภาคในการรักษาโรคมะเร็ง

ข้อดีของการรักษาโรคมะเร็งด้วยโปรตอน พิจารณาได้จากกราฟในรูป 20.57 และแผนภาพในรูป 20.58 ก. และ ข. ดังนี้

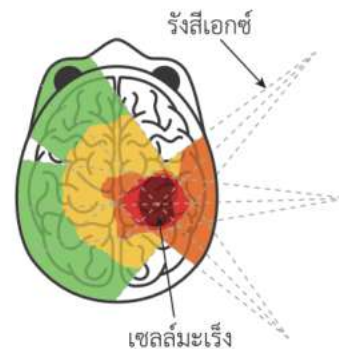
จากรูป 20.57 จะเห็นว่าในการทำลายเซลล์มะเร็งที่อยู่ลึกเข้าไปในร่างกาย 15 -25 เซนติเมตร (พื้นที่ที่มีการแรเงาสีแดงเข้ม) หากใช้การรักษาด้วยรังสีเอกซ์ (เส้นกราฟสีแดง) จะต้องฉายรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานมาก ทำให้เนื้อเยื่อดีบริเวณตำแหน่งก่อนถึงและหลังเซลล์มะเร็งได้รับปริมาณรังสีจำนวนมากด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะเนื้อเยื่อดีบริเวณก่อนถึงเซลล์มะเร็ง แต่หากใช้รังสีโปรตอน (เส้นกราฟสีน้ำเงิน) พลังงานส่วนใหญ่ของโปรตอนจะได้รับการถ่ายโอนให้กับเซลล์มะเร็ง โดยเนื้อเยื่อดีด้านหลังเซลล์มะเร็งไม่ได้รับปริมาณรังสีเลย ส่วนบริเวณก่อนถึงเซลล์มะเร็ง แม้เนื้อเยื่อดีจะได้รับปริมาณรังสีบ้าง แต่ถือว่าค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับการใช้รังสีเอกซ์

สำหรับรูป 20.58 ก. แสดงให้เห็นว่าการใช้รังสีเอกซ์ในการรักษามะเร็งที่อยู่ข้างในสมอง จะต้องฉายรังสีเอกซ์จากมุมต่าง ๆ หลายทิศทางเพื่อเป็นการลดผลกระทบกับเนื้อเยื่อดีโดยที่เซลล์มะเร็งได้รับพลังงานที่มากพอ แต่หากใช้รังสีโปรตอนเนื้อเยื่อดีรอบเซลล์มะเร็งจะได้รับผลกระทบน้อยมากดังรูป 20.58 ข. ดังนั้น การรักษามะเร็งด้วยรังสีโปรตอนจึงส่งผลกระทบต่อเนื้อเยื่อข้างเคียงน้อยกว่าการรักษาด้วยรังสีเอกซ์

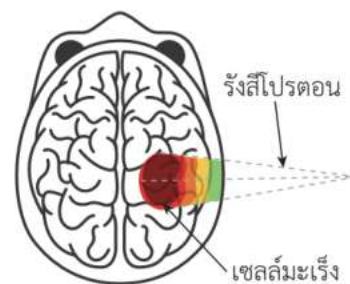
ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีเครื่องเร่งอนุภาค ทำให้สามารถผลิตลำอนุภาคโปรตอนพลังงานสูงได้โดยมีขนาดเครื่องเล็กลง ทำให้ ต้นทุนในการผลิตลดลง ซึ่งคาดว่าในอีกไม่นาน การรักษาโรคมะเร็งโดยใช้โปรตอนจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น



รูป 20.57 กราฟแสดงปริมาณรังสีที่เนื้อเยื่อที่ระดับความลึกต่าง ๆ ที่ได้รับจากรังสีเอกซ์และรังสีโปรตอน



ก. การฉายรังสีเอกซ์เพื่อรักษามะเร็งในสมอง



ข. การฉายรังสีโปรตอนเพื่อรักษามะเร็งในสมอง

รูป 20.58 เปรียบเทียบระหว่างการฉายรังสีเอกซ์กับรังสีโปรตอน

## ด้านอุตสาหกรรม

ในด้านอุตสาหกรรม ได้มีการนำเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องเร่งอนุภาคไปใช้ประโยชน์หลากหลาย ดังตัวอย่างต่อไปนี้

- การผลิตชิป (chip) ในคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ มีการใช้เครื่องเร่งอนุภาคเร่งให้อิออนมีพลังงานเหมาะสมสำหรับการฝังลงในเนื้อของสารกึ่งตัวนำ ทำให้ได้ชิปที่มีประสิทธิภาพและราคาต่ำลง
- การเชื่อมโลหะด้วยลำอิเล็กตรอนจากเครื่องเร่งอนุภาคสำหรับงานที่ต้องการความประณีตเป็นพิเศษ
- การใช้ลำแสงความเข้มสูงที่เรียกว่า แสงซินโครตรอน (synchrotron light) ซึ่งได้จากการเร่งอิเล็กตรอนในเครื่องเร่งอนุภาค นำไปใช้ศึกษาโครงสร้างของแผ่นเหล็กหรือพอลิเมอร์เพื่อการปรับปรุงคุณภาพวัสดุสำหรับใช้ในทางอุตสาหกรรม



### รู้หรือไม่

ในประเทศไทย มีสถาบันที่วิจัยโดยใช้แสงซินโครตรอน ชื่อ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (Synchrotron Light Research Institute) ตั้งอยู่ที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เป็นสถาบันวิจัยที่ใช้เครื่องเร่งอนุภาคเร่งให้อิเล็กตรอนมีความเร็วสูงใกล้ความเร็วแสง และควบคุมให้เลี้ยวโค้งด้วยสนามแม่เหล็ก ทำให้อิเล็กตรอนปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่า แสงซินโครตรอน (synchrotron light) ซึ่งมีสมบัติพิเศษหลายอย่าง เช่น มีความเข้มสูง มีความสว่างมากกว่าแสงปกติประมาณหนึ่งล้านเท่า และครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ รังสีอินฟราเรด ถึง รังสีเอกซ์

นักวิทยาศาสตร์สามารถใช้แสงซินโครตรอนในการศึกษาโครงสร้างของวัสดุหรือสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในระดับโมเลกุลหรือระดับอะตอมในแนวทางที่ไม่สามารถทำได้ด้วยวิธีอื่น เพื่อการวิจัยที่ช่วยพัฒนาคุณภาพชีวิตในหลากหลายด้าน เช่น ด้านการแพทย์ สิ่งแวดล้อม การเกษตร อาหาร



รูป เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน จ.นครราชสีมา



### ด้านการรักษาความปลอดภัย

ในสนามบิน ท่าเรือ หรือ ชายแดน มีการติดตั้งระบบสร้างภาพจากรังสีเอกซ์เพื่อตรวจหาวัตถุอันตรายหรือสิ่งของต้องห้ามในกระเป๋า หรือ ตู้สินค้า เช่น เครื่องสแกนกระเป๋าที่สนามบิน ดังรูป 20.59 ก. ซึ่งรังสีเอกซ์นี้สร้างมาจากการเร่งให้อิเล็กตรอนมีพลังงานพอเหมาะและเข้าชนกับเป้าโลหะ เมื่อรังสีเอกซ์ผ่านวัสดุแต่ละชนิด จะถูกดูดกลืนไว้ในปริมาณที่แตกต่างกัน และเมื่อใช้เครื่องตรวจวัตถุรังสีที่ฉายผ่านวัสดุต่าง ๆ จะทำให้สามารถจำแนกชนิดของวัสดุได้ โดยอาจมีการแสดงภาพที่ตรวจวัดได้ด้วยสีที่แตกต่างกันตามชนิดของวัสดุ เช่น สีส้มสำหรับสารอินทรีย์อย่างใยผ้าหรือกระดาษ หรือ สีฟ้าสำหรับโลหะหรือแก้ว ดังรูป 20.59 ข.



ก. เครื่องสแกนกระเป๋าด้วยรังสีเอกซ์ที่สนามบิน



ข. ภาพแสดงสิ่งของที่ทำจากวัสดุชนิดต่าง ๆ ในกระเป๋า เมื่อผ่านการสแกนด้วยรังสีเอกซ์

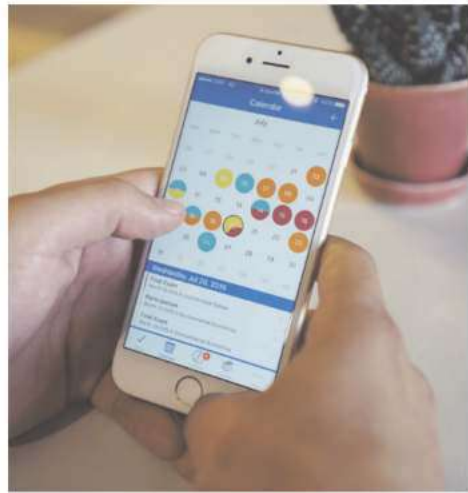
รูป 20.59 การใช้รังสีเอกซ์ที่สร้างจากการเร่งอิเล็กตรอนในการตรวจวัตถุอันตรายหรือสิ่งของต้องห้าม

### ด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ

เนื่องจากการค้นคว้าวิจัยด้านฟิสิกส์อนุภาคจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีสารสนเทศสำหรับการส่งรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองและการติดต่อสื่อสารระหว่างนักวิทยาศาสตร์จากทั่วโลก อีกทั้ง ต้องอาศัยระบบคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมการทำงานของเครื่องมือต่าง ๆ และการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณมหาศาล ส่งผลให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อการค้นคว้าวิจัย ซึ่งได้นำไปสู่การประยุกต์ใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันต่าง ๆ มากมาย ดังตัวอย่างต่อไปนี้

- เวิลด์ไวด์เว็บ (World Wide Web หรือ WWW) เป็นระบบสารสนเทศที่มีต้นกำเนิดจากแนวคิดของวิศวกรที่ CERN ต้องการพัฒนาวีธีการที่ช่วยให้การติดต่อสื่อสารระหว่างนักฟิสิกส์ที่อยู่สถานที่ต่าง ๆ ทั่วโลกสะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น จึงได้เสนอระบบการส่งรับข้อมูลและการสื่อสารแบบใหม่ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตในรูปแบบการเชื่อมโยงกันทางเว็บไซต์ เรียกว่าเวิลด์ไวด์เว็บ และต่อมาแนวคิดดังกล่าวได้รับการพัฒนาจนกระทั่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้อำนวยความสะดวกในการติดต่อสื่อสารและการค้นหาข้อมูลด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่และอุปกรณ์ต่าง ๆ ของคนทั่วโลกทุกวันนี้

- จอสัมผัสแบบใช้ตัวเก็บประจุ (capacitive touch screen) เป็นเทคโนโลยีควบคุมที่มีต้นกำเนิดจากแนวคิดของวิศวกรที่ CERN ต้องการแก้ปัญหาลักษณะของแผงควบคุมการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคที่ประกอบด้วยปุ่มขนาดใหญ่จำนวนมากที่ทำให้ไม่สะดวกต่อการใช้งาน จึงได้เสนอให้พัฒนาเทคโนโลยีการควบคุมบนหน้าจอที่ใช้แผงตัวเก็บประจุติดตั้งไว้ข้างใต้จอ และเมื่อใช้นิ้วสัมผัสที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนหน้าจอ จะทำให้ความจุของตัวเก็บประจุเปลี่ยนไป ซึ่งสามารถใช้ควบคุมการทำงานส่วนต่าง ๆ ของเครื่องเร่งอนุภาคได้



รูป 20.60 จอสัมผัสของโทรศัพท์เคลื่อนที่

ทุกวันนี้ จอสัมผัสแบบใช้ตัวเก็บประจุได้เป็นเทคโนโลยีที่อยู่บนโทรศัพท์เคลื่อนที่และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้กันทั่วไปในชีวิตประจำวัน



### คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 20.5

1. โพรตอนและนิวตรอนเป็นอนุภาคมูลฐานหรือไม่ จงอธิบาย
2. หลักฐานที่ยืนยันการค้นพบปฏิยานุภาคของอิเล็กตรอนคืออะไร
3. เพราะเหตุใดนักฟิสิกส์จึงทำนายว่ามีนิวทริโนอยู่ในธรรมชาติ
4. ในแบบจำลองมาตรฐาน มีการจัดกลุ่มอนุภาคมูลฐานออกเป็นกี่กลุ่ม อะไรบ้าง
5. การยึดเหนี่ยวกันของควาร์กเกี่ยวข้องกับอนุภาคสื่อแรงชนิดใดและแรงพื้นฐานแรงใด
6. ในแบบจำลองมาตรฐาน การสลายให้บีตาทำให้ควาร์กมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร และเกี่ยวข้องกับอนุภาคสื่อแรงชนิดใด
7. จงยกตัวอย่างประโยชน์ที่ได้จากค้นคว้าวิจัยด้านฟิสิกส์อนุภาคอย่างน้อย 2 ตัวอย่าง



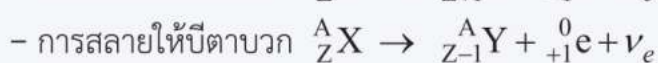
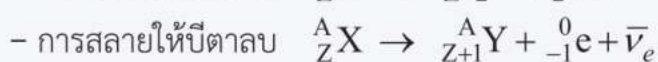
## สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

### 20.1 เสถียรภาพของนิวเคลียส

- นิวเคลียสของธาตุและไอโซโทปหลายชนิดมีเสถียรภาพเนื่องจากมีแรงนิวเคลียร์ยึดเหนี่ยว นิวคลีออนให้อยู่รวมกันในนิวเคลียส
- แรงนิวเคลียร์ส่งผลเฉพาะในระยะใกล้มาก และไม่ขึ้นกับประจุและชนิดของนิวคลีออน
- ถ้ามีการให้พลังงานกับนิวเคลียสมากพอ จะสามารถทำให้นิวคลีออนหลุดออกจากนิวเคลียส ซึ่งพลังงานที่พอดีทำให้นิวคลีออนในนิวเคลียสแยกจากกันหมด เรียกว่า พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส
- ในธรรมชาติ มวลของนิวเคลียสมีค่าน้อยกว่ามวลรวมของนิวคลีออนที่อยู่ในนิวเคลียส ซึ่งส่วนของมวลที่แตกต่างนี้ เรียกว่า ส่วนพร่องมวล
- พลังงานที่เทียบเท่าส่วนพร่องมวลของนิวเคลียสคือพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส ตามสมการ  $E = (\Delta m)c^2$
- นิวเคลียสที่มีเสถียรภาพมากเป็นนิวเคลียสที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนมาก โดยพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนหาได้จากสมการ  $\frac{E}{A} = \frac{(\Delta m)c^2}{A}$

### 20.2 กัมมันตภาพรังสี

- ธาตุและไอโซโทปของธาตุบางชนิด สามารถแผ่รังสีได้เองอย่างต่อเนื่อง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า กัมมันตภาพรังสี
- รังสีที่ธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีส่วนใหญ่แผ่ออกมา มี 3 ชนิด ได้แก่ รังสีแอลฟา รังสีบีตา และ รังสีแกมมา ซึ่งแต่ละชนิด มีประจุไฟฟ้า มวล อำนาจทะลุผ่านวัสดุ หรือความสามารถในการทำให้อากาศแตกตัว แตกต่างกัน
- เมื่อธาตุหรือไอโซโทปกัมมันตรังสีมีการแผ่รังสี นิวเคลียสจะเปลี่ยนไปเป็นนิวเคลียสชนิดใหม่หรือมีระดับพลังงานต่ำกว่าเดิม เรียกกระบวนการนี้ว่า การสลาย
- การสลายให้แอลฟา บีตา และ แกมมา สามารถอธิบายได้ด้วยสมการการสลายที่ผลรวมของเลขอะตอมและผลรวมของเลขมวลก่อนและหลังการสลายมีค่าเท่ากัน ดังนี้



- กัมมันตภาพของธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสี คือ อัตราการแผ่รังสีในขณะหนึ่ง หรือ อัตราการสลายของนิวเคลียสกัมมันตรังสีในขณะหนึ่ง หาได้จากสมการ  $A = \lambda N$
- จำนวนนิวเคลียสที่เหลือจากการสลายมีความสัมพันธ์กับจำนวนนิวเคลียสเริ่มต้น ค่าคงตัวการสลาย และ เวลาที่เกิดการสลาย ตามสมการ  $N = N_0 e^{-\lambda t}$
- ช่วงเวลาที่ธาตุกัมมันตรังสีสลายจนกระทั่งลดลงเหลืออยู่ครึ่งหนึ่งของปริมาณเริ่มต้น เรียกว่า ครึ่งชีวิต เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $T_{\frac{1}{2}}$  หาได้จากสมการ  $T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$

### 20.3 ปฏิกิริยานิวเคลียร์และพลังงานนิวเคลียร์

- ปฏิกิริยานิวเคลียร์ คือ กระบวนการที่นิวเคลียสมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในเมื่อได้รับการกระตุ้น โดยในทุกสมการที่ใช้อธิบายปฏิกิริยานิวเคลียร์ ผลรวมของเลขอะตอมและเลขมวลก่อนปฏิกิริยามีค่าเท่ากับหลังปฏิกิริยา
- ฟิชชัน คือ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่นิวเคลียสมวลมากแยกออกเป็นนิวเคลียสที่มีมวลน้อยกว่า
- ฟิวชัน คือ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่นิวเคลียสมวลน้อยรวมกันเป็นนิวเคลียสที่มีมวลมากขึ้น
- พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากฟิชชันและฟิวชัน เรียกว่า พลังงานนิวเคลียร์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับมวลที่ลดลงหลังการเกิดปฏิกิริยาตามสมการ  $E = (\Delta m)c^2$
- พลังงานนิวเคลียร์จากฟิชชัน สามารถควบคุมให้เกิดอย่างต่อเนื่องและปลอดภัยได้ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งช่วยให้สามารถนำพลังงานนิวเคลียร์ไปผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ได้
- การนำพลังงานนิวเคลียร์จากฟิวชันมาใช้ประโยชน์ยังอยู่ในขั้นตอนการค้นคว้าวิจัย ซึ่งถ้าประสบความสำเร็จ คาดว่าจะสามารถช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานและปัญหาสิ่งแวดล้อมได้

### 20.4 ประโยชน์และการป้องกันอันตรายจากรังสี

- รังสีที่ได้จากธาตุและไอโซโทปกัมมันตรังสีสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายด้าน เช่น ใช้รังสีแกมมาในการรักษาโรคมะเร็งทางด้านการแพทย์ ใช้รังสีบีตาในการหาอายุของหินทางด้านธรณีวิทยา ใช้รังสีนิวตรอนในการเพิ่มมูลค่าให้อัญมณีทางด้านอุตสาหกรรม หรือใช้รังสีแอลฟาในการป้องกันอวกาศภัยทางด้านความปลอดภัย
- ร่างกายเราได้รับรังสีจากสิ่งแวดล้อมตลอดเวลา แต่มีปริมาณน้อยจึงไม่เป็นอันตราย
- บางกิจกรรมอาจทำให้ร่างกายได้รับอันตรายจากรังสีได้ เมื่อรู้ว่าอยู่ใกล้แหล่งกำเนิดรังสีให้พยายามออกห่างให้มากที่สุดและใช้เวลาอยู่ใกล้ให้สั้นที่สุด แต่ถ้าจำเป็นต้องอยู่ใกล้แหล่งกำเนิดรังสี ให้สวมใส่ชุดหรืออุปกรณ์ที่ทำจากวัสดุที่สามารถกำบังรังสีได้ดี เช่น ตะกั่ว
- ถ้าร่างกายได้รับรังสีในปริมาณมากเกินไป อาจทำให้มีอาการต่าง ๆ ที่สังเกตได้ เช่น อาการคลื่นเหียน อ่อนเพลีย อาเจียน ท้องเสีย ผอมร่าง เบื่ออาหาร

## 20.5 ฟิสิกส์อนุภาค

- การค้นพบอนุภาคมูลฐานและอนุภาคชนิดต่าง ๆ อาศัยเครื่องมือที่สำคัญ คือ เครื่องเร่งอนุภาค และ เครื่องตรวจจับอนุภาค เช่น การค้นพบโพซิตรอนอาศัยเครื่องตรวจจับอนุภาคแบบห้องหมอก การค้นพบนิวทริโนอาศัยถังน้ำขนาดใหญ่ หรือ การค้นพบควาร์กอาศัยเครื่องเร่งอนุภาคเร่งให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงไปชนกับโปรตอนและนิวตรอน
- อนุภาคมูลฐาน คือ อนุภาคที่ไม่ได้ประกอบขึ้นจากอนุภาคชนิดอื่นและไม่มีโครงสร้างหรือองค์ประกอบภายใน เช่น ควาร์ก อิเล็กตรอน นิวตริโน กลูออน โฟตอน
- โปรตอนและนิวตรอนประกอบด้วยองค์ประกอบที่มีขนาดเล็กกว่า เรียกว่า ควาร์ก ซึ่งยึดเหนี่ยวกันไว้ด้วยแรงเข้ม
- ควาร์กเป็นอนุภาคมูลฐาน มี 6 ชนิด ได้แก่ ควาร์กอัพ ควาร์กดาวน์ ควาร์กชาร์ม ควาร์กทอป ควาร์กบอตทอม ควาร์กสเตรนจ์ และ ควาร์กบอททอม โดยบางชนิดมีประจุ  $+\frac{2}{3}e$  บางชนิดมีประจุ  $-\frac{1}{3}e$
- กลูออน เป็น อนุภาคสื่อแรงของแรงเข้ม ซึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้า ส่วนอนุภาคสื่อแรงของแรงอ่อน ได้แก่ ดับเบิลยูโบซอน และ ซีโบซอน ซึ่งดับเบิลยูโบซอนมีทั้งประจุไฟฟ้าบวกและประจุไฟฟ้านลบ ส่วนซีโบซอนเป็นกลางทางไฟฟ้า
- แบบจำลองมาตรฐาน คือ ทฤษฎีที่ใช้อธิบายพฤติกรรมและอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคมูลฐาน ซึ่งได้แบ่งกลุ่มอนุภาคออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ อนุภาคสาร อนุภาคสื่อแรง และ อนุภาคฮิกส์โบซอน
- การค้นคว้าวิจัยด้านฟิสิกส์อนุภาคได้นำไปสู่การประยุกต์ใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น ในด้านการแพทย์ได้มีการพัฒนาวิธีการตรวจวินิจฉัยและรักษาโรคมะเร็งให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น หรือ ในด้านอุตสาหกรรม ได้มีการใช้เครื่องเร่งอนุภาคมาช่วยในการผลิตชิปให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และช่วยวิเคราะห์โครงสร้างวัสดุเพื่อการปรับปรุงคุณภาพให้ดียิ่งขึ้น

## แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 20



## คำถาม

1. แรงแม่เหล็กเป็นแรงที่กระทำระหว่างอนุภาคคู่ใดบ้าง
2. นิวเคลียสของไอโซโทปของธาตุเดียวกัน ที่มีจำนวนนิวตรอนต่างกัน มีเสถียรภาพต่างกันหรือไม่ อย่างไร
3. เพราะเหตุใด มวลของนิวเคลียสจึงน้อยกว่ามวลรวมของนิวคลีออนในนิวเคลียส
4. นิวเคลียสที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวสูงจะมีเสถียรภาพมากกว่านิวเคลียสที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่ำกว่าหรือไม่ เพราะเหตุใด
5. ใช้สมบัติต่อไปนี้เรียงลำดับของรังสีที่แผ่ออกมาจากธาตุกัมมันตรังสีจากมากไปน้อย

ก. มวล

ข. อำนาจทะลุผ่าน

ค. ความสามารถในการทำให้อากาศแตกตัวเป็นไอออน

6. นำธาตุกัมมันตรังสี 3 ชนิดใส่กล่องตะกั่วหมายเลข 1, 2 และ 3 กล่องละ 1 ชนิด จากนั้น ทดลองให้รังสีที่แผ่ออกมาจากธาตุกัมมันตรังสีผ่านแผ่นกระดาษและผ่านสนามแม่เหล็ก ได้ผลการทดลองดังตาราง

รังสีจากกล่องตะกั่ว	การทะลุผ่าน	การเบน
1	ผ่านกระดาษได้	ไม่เบนในสนามแม่เหล็ก
2	ผ่านกระดาษไม่ได้	เบนในสนามแม่เหล็ก
3	ผ่านกระดาษได้	เบนในสนามแม่เหล็ก

ถ้าธาตุกัมมันตรังสีในกล่องแต่ละใบแผ่รังสีเพียงชนิดเดียว ธาตุกัมมันตรังสีในแต่ละกล่องแผ่รังสีชนิดใด อธิบาย

7. เมื่อนิวเคลียสมีการสลาย และให้อนุภาคหรือรังสีต่อไปนี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร

ก. อนุภาคแอลฟา

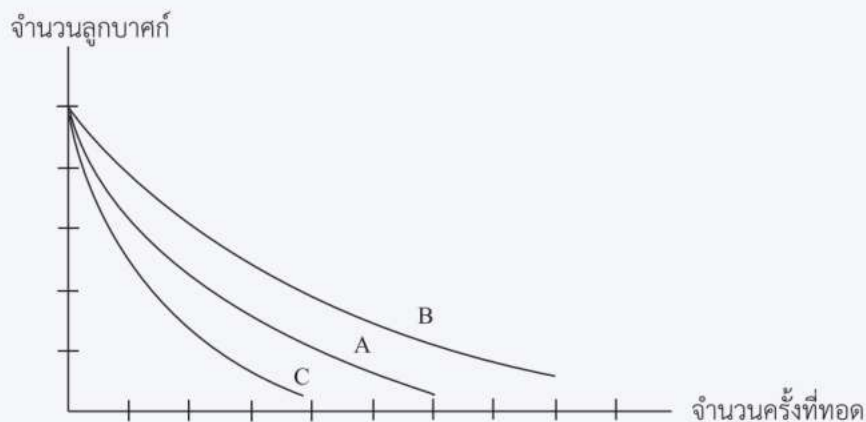
ข. อนุภาคบีตา

ค. รังสีแกมมา

8. สำหรับการแผ่รังสีของธาตุกัมมันตรังสี ข้อความต่อไปนี้ ข้อใดถูกต้อง

ก. ธาตุกัมมันตรังสีเมื่อแผ่รังสีและให้ธาตุใหม่ ธาตุใหม่นี้อาจเป็นธาตุกัมมันตรังสีหรือเป็นธาตุเสถียรก็ได้

- ข. ธาตุกัมมันตรังสีมีการแผ่รังสีแอลฟา รังสีบีตา และรังสีแกมมา ออกมาพร้อมกัน  
 ค. รังสีที่แผ่ออกมาจากธาตุกัมมันตรังสีทุกชนิดจะเบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็ก  
 ง. ธาตุที่เกิดภายหลังการแผ่รังสีจะมีเลขอะตอมลดลง
9. นิวเคลียส  $^{216}_{84}\text{Po}$  สลายเป็น  $^{212}_{82}\text{Pb}$  และ นิวเคลียส  $^{198}_{79}\text{Au}$  สลายเป็น  $^{198}_{80}\text{Hg}$   
 ก. ในการสลายของแต่ละนิวเคลียสมีอนุภาคใดถูกปล่อยออกมา  
 ข. จงเขียนสมการการสลายของนิวเคลียสแต่ละนิวเคลียส
10. โรงพยาบาลต่าง ๆ ใช้โคบอลต์-60 ( $^{60}_{27}\text{Co}$ ) ในการฉายรังสีบำบัดมะเร็ง เมื่อโคบอลต์-60  
 แผ่รังสีแล้วจะกลายเป็นนิกเกิล-60 ( $^{60}_{28}\text{Ni}$ ) ซึ่งจะแผ่รังสีแกมมาต่อไปอีก  
 ก. จงเขียนสมการนิวเคลียร์แสดงการสลายของโคบอลต์-60 ไปเป็นนิกเกิล-60  
 ข. รังสีที่ได้จากการแผ่รังสีของโคบอลต์-60 คือรังสีใด และมีสมบัติอย่างไร
11. ในกิจกรรมจำลองการสลายของนิวเคลียสกัมมันตรังสีด้วยการทอดลูกบาศก์ โดยใช้ลูกบาศก์  
 6 หน้าแต้มสีไว้ 2 หน้า เมื่อเขียนกราฟระหว่างจำนวนลูกบาศก์ที่เหลือกับจำนวนครั้งที่ทอด  
 จะได้กราฟ A ถ้าลูกบาศก์นั้นแต้มสีไว้เพียงหน้าเดียว กราฟที่ได้จะเป็นกราฟ B หรือ C  
 จงอธิบาย



รูป ประกอบคำถามข้อ 11

12. ถ้าเปรียบเทียบให้ลูกบาศก์ 6 หน้าเป็นนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสี และการทอยหน้าแต้มสี  
 เปรียบได้กับการสลายของนิวเคลียส จงตอบคำถามต่อไปนี้  
 ก. ครึ่งชีวิตของธาตุกัมมันตรังสีเปรียบได้กับปริมาณใดในการทอดลูกบาศก์  
 ข. ถ้าลูกบาศก์ชุดหนึ่งมีการแต้มสี 2 หน้า ส่วนอีกชุดมีการแต้มสี 3 หน้า ลูกบาศก์ชุดใด  
 มีครึ่งชีวิตมากกว่า เพราะเหตุใด

13. ถ้าเปรียบเทียบให้เหรียญ 1 บาท เป็นนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสี และการหงายด้านก้อยเปรียบได้กับการสลาย ให้ตอบคำถามต่อไปนี้

ก. ค่าคงตัวการสลายหาได้จากปริมาณใด

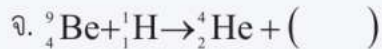
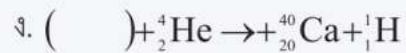
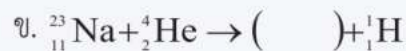
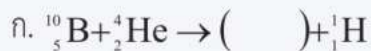
ข. ค่าคงตัวการสลาย มีค่าเท่าใด

14. กัมมันตภาพของธาตุกัมมันตรังสี มีความสัมพันธ์กับครึ่งชีวิตอย่างไร

15. ระบุปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการแผ่รังสีของธาตุกัมมันตรังสีชนิดใดชนิดหนึ่ง

16. จงอธิบายความแตกต่างระหว่างฟิซชันกับฟิวชัน

17. จงเติมสัญลักษณ์นิวเคลียร์ของธาตุ ไอโซโทปของธาตุ หรืออนุภาคที่เหมาะสมลงในวงเล็บ เพื่อให้ปฏิกิริยานิวเคลียร์สมดุล



18. พลังงานนิวเคลียร์ต่อมวลที่ได้จากฟิวชันระหว่างดิวเทอรอนกับทริทอนแตกต่างจากพลังงานนิวเคลียร์ต่อมวลที่ได้จากฟิซชันของยูเรเนียม-235 อย่างไร

19. เหตุใด การทำให้เกิดฟิวชันขึ้นบนโลก จึงยากกว่า ฟิซชัน

20. ถ้ามนุษย์สามารถควบคุมพลังงานนิวเคลียร์จากฟิวชันให้เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบที่ใช้ประโยชน์ได้ จะช่วยแก้ปัญหาด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมได้อย่างไร

21. อาหารที่ผ่านการฉายรังสี มีอันตรายหรือไม่ อธิบาย

22. รังสีที่มากเกินไป ทำให้เกิดความเสียหายทางชีวภาพกับร่างกายมนุษย์อย่างไร

23. ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่ฉีดเข้าไปในร่างกายเพื่อการตรวจวินิจฉัยของแพทย์ ควรมีสมบัติที่สำคัญอย่างไร ระบุมา 2 ข้อ

24. จงบอกแนวทางป้องกันอันตรายจากรังสีอย่างน้อย 3 แนวทาง

25. สัญลักษณ์เตือนภัยจากรังสีทั้งสองดังรูป มีความหมายแตกต่างกันอย่างไร



รูป ประกอบคำถามข้อ 25



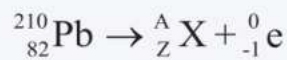
26. ให้อธิบายถึงความจำเป็นที่ต้องใช้เครื่องเร่งอนุภาคในการศึกษาอนุภาคมูลฐาน โดยใช้แนวคิด ทวิภาวะของคลื่นและอนุภาคของเดอบรอยล์
27. อนุภาคใดต่อไปนี้ เป็นอนุภาคมูลฐาน  
ก. บีตาแลบ ข. ดิวเทอรอน ค. โปรตอน ง. เลปตอน จ. มีซอน ฉ. ดับเบิลยูโบซอน
28. แรงแม่เหล็กเป็นแรงพื้นฐานหรือไม่ จงอธิบาย
29. ในแบบจำลองมาตรฐาน อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคมูลฐานเกิดขึ้นได้อย่างไร
30. อันตรกิริยาต่อไปนี้เกี่ยวข้องกับอนุภาคสื่อแรงชนิดใด  
ก. การยึดเหนี่ยวกันของควาร์กในโปรตอน  
ข. การที่ควาร์กเปลี่ยนชนิดในการสลายให้บีตาแลบ  
ค. การผลักรันระหว่างอนุภาคแอลฟา กับนิวเคลียส  
ง. การยึดเหนี่ยวกันระหว่างนิวคลีออนในนิวเคลียส
31. การรักษามะเร็งด้วยวิธีการบำบัดด้วยโปรตอน มีข้อดีอย่างไร ให้ระบุมา 2 ข้อ
32. ยกตัวอย่าง ประโยชน์ที่ได้จากการค้นคว้าวิจัยด้านฟิสิกส์อนุภาคในด้านอุตสาหกรรมและด้านความปลอดภัยอย่างน้อยด้านละ 1 ตัวอย่าง

## Ⓕ | ปัญหา

กำหนดให้

- มวล 1 u เท่ากับ  $1.66 \times 10^{-27}$  กิโลกรัม
- มวล 1 u เทียบเท่ากับพลังงาน 931.5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์
- พลังงาน 1 อิเล็กตรอนโวลต์ เท่ากับ  $1.6 \times 10^{-19}$  จูล
- มวลอะตอมของไฮโดรเจนเท่ากับ 1.007825 u
- มวลของโปรตอนเท่ากับ 1.007276 u
- มวลของนิวตรอนเท่ากับ 1.008665 u
- มวลของอิเล็กตรอนเท่ากับ 0.000549 u
- กำหนด 1 ปี เท่ากับ  $3.15 \times 10^7$  วินาที
- ค่าคงตัวอวาโวกาโดร  $N_A$  มีค่าเท่ากับ  $6.023 \times 10^{23}$  อะตอมต่อโมล
- กัมมันตภาพ 1 คูรีเท่ากับ  $3.7 \times 10^{10}$  เบ็กเคอเรล

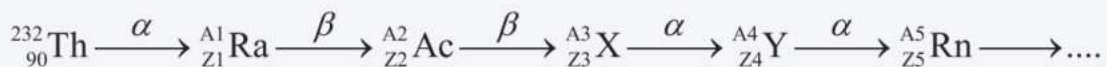
- จงคำนวณส่วนพร่องมวล พลังงานยึดเหนี่ยว และ พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน ของนิวเคลียสของธาตุและไอโซโทปต่อไปนี้
  - ลิเทียม-7 ( ${}^7_3\text{Li}$ ) มวลอะตอมเท่ากับ 7.016005 u
  - โพแทสเซียม-39 ( ${}^{39}_{19}\text{K}$ ) มวลอะตอมเท่ากับ 38.963710 u
  - แคดเมียม-114 ( ${}^{114}_{48}\text{Cd}$ ) มวลอะตอมเท่ากับ 113.903361 u
- นิวเคลียสของนิกเกิล-60 ( ${}^{60}_{28}\text{Ni}$ ) มีพลังงานยึดเหนี่ยว 526.80 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ จงหามวลอะตอมของนิกเกิล-60
- พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของนิวเคลียสของแมกนีเซียม-24 ( ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ ) เท่ากับ 8.26 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ต่อนิวคลีออน จงหาส่วนพร่องมวลนิวเคลียสแมกนีเซียม-24
- สมการต่อไปนี้แสดงการสลายของตะกั่ว-210



ก. A และ Z มีค่าเท่าใด

ข. X เป็นนิวเคลียสของธาตุใด

- ในการสลายของนิวเคลียสของยูเรเนียม-238 ( ${}^{238}_{92}\text{U}$ ) ได้นิวเคลียสสุดท้ายที่เสถียรคือนิวเคลียสของตะกั่ว ซึ่งการสลายของนิวเคลียสยูเรเนียม-238 นี้จะได้อนุภาคแอลฟา 8 อนุภาค และอนุภาคบีตา 6 อนุภาค จงหาเลขอะตอมและเลขมวลของนิวเคลียสตะกั่วที่ได้จากการสลายของนิวเคลียสยูเรเนียม-238
- ในอนุกรมการสลายของยูเรเนียม-238 ( ${}^{238}_{92}\text{U}$ ) มีทั้งการสลายให้แอลฟา บีตาและแกมมา จนได้ธาตุสุดท้ายเป็นตะกั่ว-206 ( ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ ) ถ้าในอนุกรมการสลาย พบว่ามีการปล่อยอนุภาคแอลฟาออกมา 8 อนุภาค การสลายนี้จะมีการปล่อยอนุภาคบีตาออกมากี่อนุภาค
- สมการการสลายต่อไปนี้ เป็นบางส่วนของอนุกรมการสลายของทอเรียม -232



จงหา ค่า A1 ถึง A5 และ Z1 ถึง Z5 พร้อมทั้งระบุว่า X และ Y เป็นนิวเคลียสของธาตุใด

- ในการทดลองอุปมาอุปมัยการทอดลูกบาศก์กับการสลายของนิวเคลียสกัมมันตรังสี ถ้าลูกบาศก์มี 20 หน้า และมีหน้าที่แต้มสีไว้ 3 หน้า
  - จงหาโอกาสที่ลูกบาศก์จะหงายหน้าที่แต้มสีไว้
  - ถ้าใช้ลูกบาศก์เดียวกันนี้จำนวน 200 ลูกมาทดลอง แล้วคัดลูกบาศก์ที่หงายหน้าแต้มสีออก จงหาจำนวนครั้งของการทอดที่ทำให้ลูกบาศก์เหลือประมาณ 50 ลูก

9. ในการทดลองหาครึ่งชีวิตของธาตุกัมมันตรังสี โดยใช้เครื่องนับไกเกอร์วัดกัมมันตภาพ ได้ผลการทดลองดังข้อมูลในตาราง

เวลาวัดจากเริ่มต้น (นาทีก)	0	2	4	6	8	10	12
กัมมันตภาพที่วัดได้ (ต่อวินาที)	116	96	80	69	58	50	44

ครึ่งชีวิตของธาตุกัมมันตรังสีนี้มีค่าประมาณเท่าใด และเมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที จะตรวจวัดกัมมันตภาพได้ประมาณเท่าใด

10. นำลูกบาศก์ชนิดที่มีหน้า 10 หน้า โดยมีหน้าแต้มสี 2 หน้า จำนวน 60 ลูก มาทอดแล้วคัดลูกที่หงายหน้าแต้มสีออก จะต้องทอดลูกบาศก์ประมาณกี่ครั้งจึงเหลือลูกบาศก์ประมาณ  $\frac{1}{4}$  ของจำนวนลูกบาศก์เริ่มต้น
11. การฉายรังสีเพื่อรักษาโรคมะเร็งต้องใช้โคบอลต์-60 ( ${}_{27}^{60}\text{Co}$ ) ที่มีกัมมันตภาพ 0.1 มิลลิวูรี จงหามวลของโคบอลต์-60 กำหนดครึ่งชีวิตของโคบอลต์-60 เท่ากับ 5.26 ปี
12. เรดอน-222 ( ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ ) มีครึ่งชีวิต 3.82 วัน ถ้าเริ่มต้นมีเรดอน-222 ปริมาณ 1 มิลลิกรัม กัมมันตภาพของเรดอนมีค่าเท่าใด
13. ธาตุกัมมันตรังสีปริมาณหนึ่ง เมื่อทิ้งไว้ 6 ชั่วโมง พบว่าสลายไป  $\frac{31}{32}$  เท่าของปริมาณเดิม จงหาครึ่งชีวิตของธาตุกัมมันตรังสีนี้
14. ธาตุกัมมันตรังสี X มีจำนวนอะตอม  $8 \times 10^{13}$  อะตอม และมีครึ่งชีวิต 10 ปี สลายไปเป็นธาตุ Y ที่เสถียร หลังจากเริ่มสลายไปแล้ว 30 ปี ธาตุ X และ Y จะมีจำนวนอะตอมเป็นเท่าใด
15. ซีซอน-135 ( ${}_{54}^{135}\text{Xe}$ ) เป็นธาตุกัมมันตรังสีซึ่งมีครึ่งชีวิต 9 ชั่วโมง เมื่อเวลาผ่านไป 10 ชั่วโมง จะเหลือจำนวนนิวเคลียสซีซอน-135 เท่าใดของจำนวนเริ่มต้น กำหนด  $e^{-0.77}$  เท่ากับ 0.463
16. ธาตุกัมมันตรังสีชนิดหนึ่งมีครึ่งชีวิต 10 ชั่วโมง เริ่มต้นมีจำนวนนิวเคลียส  $N_0$  และเมื่อเวลาผ่านไป  $t$  นิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีนี้จะสลายให้นิวเคลียสใหม่ ถ้า  $N$  เป็นจำนวนนิวเคลียสที่เหลือ
- ก. จงหาอัตราส่วน  $\frac{N}{N_0}$  เมื่อเวลาผ่านไป 0, 10, 20, 30 และ 40 ชั่วโมง
- ข. จงเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{N}{N_0}$  กับ  $t$  เมื่อเวลาผ่านไปนาน 40 ชั่วโมง
- ค. จากกราฟที่ได้ในข้อ ก. จงประมาณเวลาที่ทำให้  $\frac{N}{N_0} = 0.40$

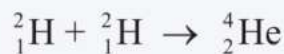
17. โพแทสเซียม-44 ( ${}^{44}_{19}\text{K}$ ) มีครึ่งชีวิต 20 นาที สลายให้แคลเซียม-44 ( ${}^{44}_{20}\text{Ca}$ ) ซึ่งเป็นไอโซโทปเสถียร ถ้ามีโพแทสเซียม-44 ปริมาณ 10 มิลลิกรัม จงหาว่า
- มีโพแทสเซียม-44 กี่นิวเคลียส
  - เริ่มต้น โพแทสเซียม-44 มีกัมมันตภาพเท่าใด
  - เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง โพแทสเซียม-44 มีกัมมันตภาพเท่าใด
  - เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง อัตราส่วนระหว่างอะตอมโพแทสเซียม-44 ต่ออะตอมแคลเซียม-44 เป็นเท่าใด
18. ไอโอดีน-125 ( ${}^{125}_{53}\text{I}$ ) เป็นไอโซโทปที่ใช้มากในทางการแพทย์ มีครึ่งชีวิต 60 วัน และ ถ้าเริ่มต้น ไอโอดีน-125 มีกัมมันตภาพ 4 เมกะเบ็กเคอเรล จะต้องใช้เวลานานเท่าใดเพื่อให้ไอโอดีน-125 สลายไปร้อยละ 75 ของปริมาณเริ่มต้น
19. ยูเรเนียม-238 ( ${}^{238}_{92}\text{U}$ ) มวล 1 กิโลกรัม แผ่รังสีแอลฟา โดยมีครึ่งชีวิต  $4.5 \times 10^9$  ปี จงหาที่กัมมันตภาพของยูเรเนียม-238 นี้
20. ทอเรียม-230 ( ${}^{230}_{90}\text{Th}$ ) มีมวล 0.1 มิลลิกรัม และกัมมันตภาพ  $7.20 \times 10^4$  เบ็กเคอเรล ครึ่งชีวิตของทอเรียม-230 มีค่ากี่ปี
21. ถ้าแคลเซียม-45 ( ${}^{45}_{20}\text{Ca}$ ) แผ่รังสีบีตาแล้วกลายเป็นสแกนเดียม-45 ( ${}^{45}_{21}\text{Sc}$ ) โดยเริ่มต้น แคลเซียม-45 มีกัมมันตภาพ 20 มิลลิวูรี เมื่อเวลาผ่านไป 100 วัน จะมีกัมมันตภาพเหลือ 13.14 มิลลิวูรี จงหาครึ่งชีวิตของแคลเซียม-45 กำหนด  $\ln(0.657)$  เท่ากับ  $-0.42$
22. ทองคำ-198 ( ${}^{198}_{79}\text{Au}$ ) มีครึ่งชีวิต 2.7 วัน และมีกัมมันตภาพเริ่มต้น 50 ไมโครคูรี จงหาจำนวนนิวเคลียสของทองคำ-198 ที่สลายไปในช่วงเวลา 10 - 15 ชั่วโมง กำหนด  $e^{-0.1069}$  เท่ากับ 0.8986 และ  $e^{-0.1035}$  เท่ากับ 0.8518
23. เรเดียม-224 ( ${}^{224}_{88}\text{Ra}$ ) มีครึ่งชีวิต 3.5 วัน และมีอัตราการสลาย  $2.4 \times 10^2$  เบ็กเคอเรล เมื่อเวลาผ่านไป 21 วัน เรเดียม-224 มีกัมมันตภาพเท่าใดในหน่วยไมโครคูรี
24. คาร์บอน-14 ( ${}^{14}_6\text{C}$ ) มีครึ่งชีวิต 5730 ปี ถ้าเริ่มต้นมีคาร์บอน-14 จำนวน 2 ไมโครกรัม ขณะนั้น กัมมันตภาพของคาร์บอน-14 มีค่าเท่าใด
25. ธาตุกัมมันตรังสีชนิดหนึ่งมีครึ่งชีวิต 80 ปี จะใช้เวลานานเท่าใด กัมมันตภาพจึงลดลงเหลือร้อยละ 25 จากปริมาณเริ่มต้น
26. จากปฏิกิริยานิวเคลียร์  ${}^4_2\text{He} + {}^9_4\text{Be} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + \text{X}$  จงหาว่า X คืออะไร
27. จากสมการของปฏิกิริยานิวเคลียร์  ${}^{33}_{16}\text{S} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{33}_{15}\text{P} + {}^1_1\text{H}$  ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ให้พลังงาน 0.533 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ถ้ามวลอะตอมของ  ${}^{33}_{16}\text{S}$  มีค่า 32.97146 u มวลอะตอมของ  ${}^{33}_{15}\text{P}$  มีค่าเท่าใด

28. ในการทดลองระเบิดนิวเคลียร์โดยใช้ยูเรเนียม-235 ทำให้เกิดฟิชชัน ได้พลังงานทั้งสิ้น  $9.0 \times 10^{12}$  จูล พลังงานจำนวนนี้เกิดจากส่วนของมวลที่ลดลงเท่าใด
29. ระเบิดที่เอ็นที 1 ตัน เมื่อเกิดการระเบิดจะปล่อยพลังงานประมาณ 4 จิกะจูล ถ้าระเบิดปรมาณูที่ทิ้งที่ ฮิโรชิมาได้จากฟิชชันของยูเรเนียม-235 ซึ่งปล่อยพลังงานเทียบได้กับระเบิดที่เอ็นที  $2.0 \times 10^4$  ตัน จงคำนวณมวลของยูเรเนียม-235 ที่เปลี่ยนไปเป็นพลังงาน กำหนดให้การเกิดฟิชชัน 1 ครั้งของยูเรเนียม-235 ปลดปล่อยพลังงาน 173.20 MeV
30. ในการเกิดฟิชชันแต่ละครั้งของนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีชนิดหนึ่ง ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ พบว่าส่วนของมวลที่ลดลงมีค่า 0.025 u จะต้องเกิดฟิชชันกี่ครั้งต่อวินาที จึงจะได้กำลัง 1000 วัตต์
31. จงหาพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ตามสมการ



กำหนดมวลอะตอมของเบริลเลียม-9 ( ${}^9_4\text{Be}$ ) เท่ากับ 9.012183 u และ มวลอะตอมของเบริลเลียม-10 เท่ากับ 10.013535 u

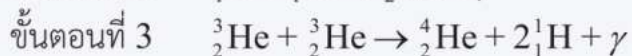
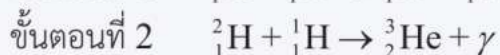
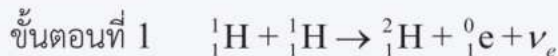
32. จงคำนวณพลังงานที่ได้เมื่อตีวเทอเรียมมวล 1 กิโลกรัม เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ตามสมการ



กำหนด มวลอะตอมของดิวเทอเรียม ( ${}^2_1\text{H}$ ) เท่ากับ 2.014102 u

มวลอะตอมของฮีเลียม ( ${}^4_2\text{He}$ ) เท่ากับ 4.002604 u

33. ฟิวชันในดวงอาทิตย์และดาวฤกษ์ส่วนมาก เกิดจากการรวมกันของไฮโดรเจนเป็นฮีเลียม มีขั้นตอนดังนี้



จงหา

ก. พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1

ข. พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2

ค. พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 3

ง. พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาการรวมกันของไฮโดรเจนเป็นฮีเลียม ( ${}^4_2\text{He}$ )

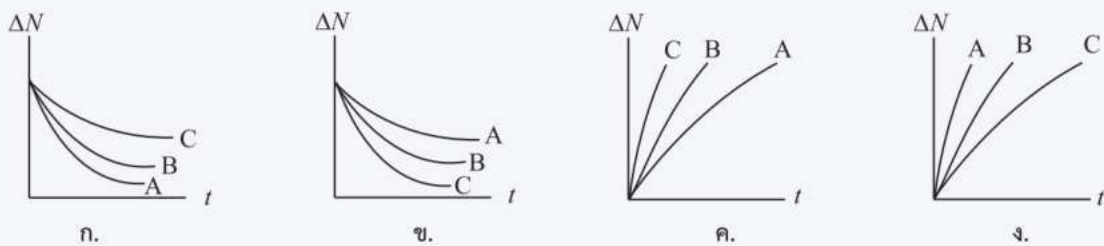
กำหนดมวลอะตอมของ  ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^3_2\text{He}$  และ  ${}^4_2\text{He}$  เท่ากับ 1.007825 u, 2.014102 u, 3.016029 u และ 4.002603 u ตามลำดับ

34. ในโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหิน ต้องเผาถ่านหิน 1 ตัน จึงจะให้ความร้อน  $3.2 \times 10^{10}$  จูล สำหรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แห่งหนึ่ง ความร้อนมาจากฟิชชันของยูเรเนียม-235 ซึ่งฟิชชันแต่ละครั้งจะให้ความร้อนประมาณ 200 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แห่งนี้ต้องมียูเรเนียม-235 ที่เกิดฟิชชันเป็นมวลเท่าใดในหน่วยกรัม จึงจะให้ความร้อนเท่ากับถ่านหิน 1 ตัน
35. โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กแห่งหนึ่งผลิตไฟฟ้าได้ 10 เมกะวัตต์ โดยใช้พลังงานจากฟิชชันของพลูโทเนียม-239 ถ้าพลังงานจากฟิชชันแต่ละครั้งมีค่า  $3.3 \times 10^{-11}$  จูล และถ้าเพียง 1 ใน 5 ของพลังงานที่ได้จากฟิชชันเท่านั้นที่เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ในแต่ละวัน โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แห่งนี้ จะต้องใช้พลูโทเนียม-239 กี่กรัม  
กำหนด มวลอะตอมของพลูโทเนียม-239 เท่ากับ 239.052163 u
36. ในอาคารใหญ่ ๆ มักจะติดตั้งเครื่องตรวจจับควันไฟที่เพดานห้องเพื่อระวังป้องกันอัคคีภัย ถ้าอาคารแห่งเครื่องติดตั้งเครื่องตรวจจับควันไฟแบบที่ใช้ธาตุกัมมันตรังสี อะเมริเซียม ( $^{241}_{95}\text{Am}$ ) ที่แผ่รังสีแอลฟา
- จงเขียนสมการการแผ่รังสีแอลฟาของอะเมริเซียม-241
  - จงอธิบายเหตุผลที่เครื่องตรวจจับควันไฟใช้ธาตุกัมมันตรังสีที่แผ่รังสีแอลฟา
37. ฟิวชันในดวงอาทิตย์เปลี่ยนไฮโดรเจนจำนวนมากให้เป็นพลังงานที่แผ่ออกมาทุก ๆ วินาที ถ้าแต่ละวินาทีพลังงานที่แผ่ออกมาเท่ากับ  $3.90 \times 10^{26}$  จูล มวลของดวงอาทิตย์จะเปลี่ยนแปลงอย่างไร ด้วยอัตราเท่าใด
38. จงหาพลังงานที่เกิดจากการประลัยของคู่อนุภาคกับปฏิยานุภาคต่อไปนี้ โดยไม่พิจารณาพลังงานจลน์เริ่มต้น
- อิเล็กตรอนกับโพซิตรอน
  - โปรตอนกับแอนติโปรตอน

## | ปัญหาท้าทาย

39. ถ้าธาตุ X มีจำนวนอะตอมเป็น 2 เท่าของธาตุ Y แต่มีกัมมันตภาพเป็น 3 เท่าของธาตุ Y ครึ่งชีวิตของธาตุ X เป็นกี่เท่าของธาตุ Y
40. ธาตุกัมมันตรังสี A มีครึ่งชีวิต 12 ชั่วโมง แผ่รังสีแล้วกลายเป็นธาตุกัมมันตรังสี B ซึ่งมีครึ่งชีวิต 20 ชั่วโมง จากนั้น ธาตุกัมมันตรังสี B แผ่รังสีต่อแล้วกลายเป็นธาตุ C ที่เสถียร ในขณะที่กัมมันตภาพของ B คงตัว อัตราส่วนระหว่างจำนวนนิวเคลียสของ A ต่อ B เป็นเท่าใด

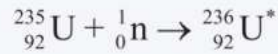
41. ถ้ามีธาตุกัมมันตรังสี 3 ชนิด ได้แก่ A B และ C โดยครึ่งชีวิตของ A มากกว่า ครึ่งชีวิตของ B และครึ่งชีวิตของ B มากกว่าครึ่งชีวิตของ C และถ้าที่เวลาเริ่มต้น ธาตุทั้ง 3 มีจำนวนนิวเคลียสเท่ากัน กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนิวเคลียสที่สลายไป ( $\Delta N$ ) กับเวลา ( $t$ ) คือข้อใด



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 41

42. ในอนุกรมการสลายของเรดอน-222 ( $^{222}_{86}\text{Rn}$ ) มีทั้งการสลายให้แอลฟาและการสลายให้บีตา จนได้บิสมัท-214 ( $^{214}_{83}\text{Bi}$ ) ในอนุกรมการสลายนี้มีการปล่อยอนุภาคแอลฟาและอนุภาคบีตา ออกมาอย่างละกี่อนุภาค
43. ถ้าให้อนุภาคแอลฟา ( $^4_2\text{He}$ ) มวล 4.002603 u และประจุ +2e เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $1.5 \times 10^7$  เมตรต่อวินาที ไปยังศูนย์กลางนิวเคลียสของโฮโลเนียม-165 ( $^{165}_{67}\text{Ho}$ ) ซึ่งถูกตรึงไว้ จงหาระยะที่อนุภาคแอลฟาเข้าใกล้นิวเคลียสของโฮโลเนียม-165 ได้มากที่สุด
44. ธาตุกัมมันตรังสีชนิดหนึ่งแผ่รังสีแอลฟาโดยมีกัมมันตภาพ  $3.2 \times 10^9$  เบ็กเคอเรล ถ้าอนุภาคแอลฟาแต่ละอนุภาคมีพลังงานเฉลี่ย 5.2 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และอนุภาคแอลฟาจากธาตุนี้นั้นแผ่นอะลูมิเนียมบางซึ่งมีมวล  $2 \times 10^{-4}$  กิโลกรัม ซึ่งสามารถกั้นรังสีแอลฟาได้ทั้งหมด
- จงหาพลังงานในหน่วยจูล ที่แผ่นอะลูมิเนียมดูดกลืนไว้ในแต่ละวินาที
  - หากพลังงานที่แผ่นอะลูมิเนียมได้รับ เป็นความร้อน เมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที แผ่นอะลูมิเนียมมีอุณหภูมิสูงขึ้นกี่องศาเซลเซียส
- กำหนด ความร้อนจำเพาะของอะลูมิเนียม 900 จูลต่อกิโลกรัมเคลวิน
45. ในการสลายของธาตุกัมมันตรังสี เมื่อเวลาผ่านไป  $t = nT_{\frac{1}{2}}$  จงแสดงให้เห็นว่า  $A = \frac{A_0}{2^n}$  และ  $m = \frac{m_0}{2^n}$  โดยที่  $A_0$  คือ กัมมันตภาพเริ่มต้น และ  $m_0$  คือ มวลเริ่มต้น
46. ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เมื่อให้นิวตรอนไปชนกับนิวเคลียสของยูเรเนียม-235 ( $^{235}_{92}\text{U}$ ) แล้วเกิดฟิชชัน จะมีพลังงานถูกปล่อยออกมา 200 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ต่อครั้ง ถ้าเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์นี้ มีกำลัง 800 เมกะวัตต์ และมีประสิทธิภาพร้อยละ 25 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เครื่องนี้สามารถทำให้ยูเรเนียม-235 เกิดฟิชชันกี่ครั้งต่อวัน

47. ในการให้นิวตรอนไปชนกับนิวเคลียสของยูเรเนียม-235 ( ${}_{92}^{235}\text{U}$ ) จะทำให้ได้นิวเคลียสของยูเรเนียม-236 ในสถานะกระตุ้น ( ${}_{92}^{236}\text{U}^*$ ) ดังสมการ



จากนั้น นิวเคลียสของยูเรเนียม-236 จะเกิดฟิชชัน ทำให้ได้นิวเคลียสลูกคือโมลิบดีนัม-98 ( ${}_{42}^{98}\text{Mo}$ ) และ ซีโนน-136 ( ${}_{54}^{136}\text{Xe}$ ) พร้อมทั้งมีนิวตรอนถูกปล่อยออกมา 2 อนุภาค และบีตา 4 อนุภาค จงคำนวณพลังงานที่ถูกปล่อยออกมาจากฟิชชันของยูเรเนียม-235 โดยไม่คิดพลังงานของอนุภาคบีตา

กำหนด มวลของ  ${}_{92}^{235}\text{U}$ ,  ${}_{42}^{98}\text{Mo}$  และ  ${}_{54}^{136}\text{Xe}$  เท่ากับ 235.043925 u, 97.905405 u และ 135.907220 u ตามลำดับ



# ภาคผนวก



## ภาคผนวก ข คณิตศาสตร์สำหรับฟิลิกส์

## 1. พื้นฐานทั่วไปทางคณิตศาสตร์

- 1.1 เศษส่วน ทศนิยม ร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์
- 1.2 อัตราส่วน อัตรา สัดส่วน
- 1.3 การแปรผันและสมการ

## 2. พีชคณิต

- 2.1 เลขชี้กำลัง
- 2.2 การแก้สมการ
- 2.3 สมการกำลังสอง
- 2.4 สมการเชิงเส้น

## 3. เรขาคณิตและตรีโกณมิติ

- 3.1 การหาความยาวระหว่างจุดสองจุดในระบบพิกัดฉาก
- 3.2 ข้อมูลรูปทรงทางเรขาคณิต
- 3.3 ทฤษฎีบทพีทาโกรัส
- 3.4 ฟังก์ชันตรีโกณมิติ

## 1. พื้นฐานทั่วไปทางคณิตศาสตร์

## 1.1 เศษส่วน ทศนิยม ร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์

เศษส่วน (fraction) ในทางเลขคณิต หมายถึง จำนวนที่อยู่ในรูป  $\frac{A}{B}$  โดยที่  $B \neq 0$  เรียก A ว่า ตัวเศษ เรียก B ว่า ตัวส่วน เช่น  $\frac{2}{5}$ ,  $\frac{1+\sqrt{2}}{2-\sqrt{3}}$  ในทางพีชคณิต ตัวเศษและตัวส่วนอาจเป็นตัวแปรหรือตัวไม่รู้ค่า (unknown) เช่น  $\frac{x}{2}$ ,  $\frac{1}{f}$  เราอาจแสดงเศษส่วนในรูปทศนิยม (decimal) โดยหารตัวเศษด้วยตัวส่วนหรือแสดงในรูปร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์ (percent) โดยการคูณด้วย 100% เช่น  $\frac{1}{4}$  ในรูปทศนิยมเขียนได้ดังนี้  $\frac{1}{4} = 0.25$  และในรูปเปอร์เซ็นต์ เขียนได้ดังนี้  $0.25 \times 100\% = 25\%$

## 1.2 อัตราส่วน อัตรา สัดส่วน

อัตราส่วน (ratio) เป็นการเปรียบเทียบปริมาณสองปริมาณโดยการหาร ซึ่งจะเขียนเหมือนเศษส่วน

อัตรา (rate) เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณสองปริมาณที่มีหน่วยต่างกัน เช่น  $\frac{\text{ระยะทาง}}{\text{เวลา}}$  โดยที่ระยะทางมีหน่วย เมตร (m) และเวลามีหน่วย วินาที (s) ในฟิสิกส์ ปริมาณที่เป็นตัวส่วน มักเป็น เวลา

สัดส่วน (proportion) เป็นสมการหรือข้อความที่แสดงการเท่ากันของอัตราส่วนสองอัตราส่วน เช่น

$$\frac{3}{6} = \frac{1}{2} \quad \text{บางสัดส่วนอาจมีตัวไม่รู้ค่า เช่น} \quad \frac{4}{x} = \frac{2}{3}, \quad \frac{x}{y} = \frac{a}{b}$$

## 1.3 การแปรผันและสมการ

ในการค้นหาความรู้ทางวิทยาศาสตร์ จะพบว่าเมื่อปริมาณหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลถึงปริมาณอื่น ปัญหาสำคัญประการหนึ่ง ก็คือ การหาว่าปริมาณต่าง ๆ เหล่านี้มีความสัมพันธ์กันอย่างไร

นักวิทยาศาสตร์พบว่า เมื่อให้ความต่างศักย์ระหว่างปลายของลวดตัวนำ จะเกิดกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำนั้น ถ้าเพิ่มความต่างศักย์เป็นสองเท่า กระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำจะเป็นสองเท่า และถ้าเพิ่มความต่างศักย์เป็นสามเท่า กระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำก็จะเป็นสามเท่า จึงกล่าวได้ว่า กระแสไฟฟ้าแปรผันกับความต่างศักย์ เขียนในรูปสัญลักษณ์ ได้ดังนี้  $I \propto V$  โดย  $I$  คือกระแสไฟฟ้า  $V$  คือความต่างศักย์ และ  $\propto$  มีความหมายว่า “แปรผันกับ (is proportional to)”

การที่ปริมาณสองปริมาณมีความสัมพันธ์ในลักษณะที่เมื่อปริมาณหนึ่งเพิ่ม ทำให้อีกปริมาณหนึ่งเพิ่มขึ้นอย่างได้สัดส่วนกัน เรียกว่า การแปรผันตรง (direct proportion)

บางครั้งปริมาณสองปริมาณอาจมีความสัมพันธ์ในลักษณะที่เมื่อปริมาณหนึ่งเพิ่ม ทำให้อีกปริมาณหนึ่งลดลงอย่างได้สัดส่วนกัน เรียกว่า การแปรผันกลับ (inverse proportion) เช่น นักวิทยาศาสตร์พบว่า เมื่อเพิ่มความดันให้แก๊สจำนวนหนึ่ง แก๊สจะมีปริมาตรลดลง ถ้าเพิ่มความดันเป็นสองเท่า ปริมาตรลดลงเหลือ  $\frac{1}{2}$  และถ้าเพิ่มความดันเป็นสามเท่า ปริมาตรลดลงเหลือ  $\frac{1}{3}$  จึงกล่าวได้ว่า ความดันของแก๊สแปรผันกับส่วนกลับของปริมาตร เขียนในรูปสัญลักษณ์ ได้ดังนี้  $P \propto \frac{1}{V}$  โดย  $P$  คือความดัน  $V$  คือปริมาตร และ  $\propto$  มีความหมายว่า “แปรผันกับ” ซึ่งในกรณีนี้ กล่าวได้ว่า  $P$  แปรผันกับ  $\frac{1}{V}$  หรือ  $P$  แปรผันกลับกับ  $V$

ขั้นตอนต่อไปคือ เปลี่ยนการแปรผัน (proportionality) เป็นสมการ (equation) (หรือเปลี่ยน  $\propto$  เป็น =) ซึ่งทำได้โดยการใส่ ค่าคงตัวการแปรผัน (proportionality constant)  $k$  ดังนี้

$$\text{จาก } I \propto V \text{ จะได้} \quad I = kV \quad (1)$$

$$\text{และ } P \propto \frac{1}{V} \text{ จะได้} \quad P = \frac{k}{V} \quad (2)$$

นอกจากนี้ยังมีการแปรผันอื่น เช่น  $T \propto \sqrt{l}$ ,  $F \propto \frac{1}{r^2}$ ,  $F \propto a$ ,  $W \propto g$  ซึ่งจะทราบเกี่ยวกับความสัมพันธ์ (1) (2) และอื่น ๆ เมื่อศึกษาในรายวิชาเพิ่มเติม ฟิสิกส์

การหาความสัมพันธ์ของปริมาณในรูปแบบของสมการ จะทำให้เราสามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของปริมาณทั้งสองในเชิงปริมาณ (quantitative) หรือเชิงตัวเลขได้ ซึ่งนำไปสู่การทำนายการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของปรากฏการณ์ต่าง ๆ ได้

## 2. พีชคณิต

### 2.1 เลขชี้กำลัง

เลขชี้กำลัง (exponent) หมายถึง ตัวเลขหรือสัญลักษณ์ที่เขียนไว้ด้านบนขวาของจำนวนหรือนิพจน์ใด ๆ เช่น และ  $5^3$ ,  $9^{\frac{1}{2}}$ ,  $4^a$  และ  $(x+1)^2$  มี 3,  $\frac{1}{2}$ ,  $a$  และ 2 เป็นเลขชี้กำลัง ตามลำดับ ส่วนจำนวนหรือนิพจน์ 5, 9, 4 และ  $x+1$  เรียกว่า ฐานเลขชี้กำลังจะบอกให้ทราบว่า จะต้องคูณจำนวนหรือนิพจน์ (ฐาน) กี่ครั้ง เช่น  $a^3$  หมายถึง  $a \times a \times a$  หรือ  $a \cdot a \cdot a$

#### สมบัติของเลขชี้กำลัง

สำหรับ  $a$  ไม่เท่ากับศูนย์ และ  $p$  เป็นจำนวนเต็มใด ๆ จะได้

$$a^0 = 1, a^1 = a, \frac{1}{a^p} = a^{-p}$$

สำหรับ  $a$  และ  $b$  เป็นจำนวนเต็มและไม่เท่ากับศูนย์  $r$ ,  $s$  และ  $t$  เป็นจำนวนเต็ม จะได้

$$a^r a^s = a^{r+s}, (a^r)^s = a^{rs}, \frac{a^r}{a^s} = a^{r-s}, (ab)^r = a^r b^r, (a^r b^s)^t = a^{rt} b^{st}$$

### 2.2 การแก้สมการ

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณต่าง ๆ ในฟิสิกส์ มักอยู่ในรูปสมการที่มีสัญลักษณ์แทนปริมาณเหล่านั้น และมีเครื่องหมาย = ซึ่งบอกให้ทราบว่าปริมาณทั้งหลายที่อยู่ข้างซ้ายและข้างขวาของ = มีค่าเท่ากัน เช่น  $\rho = \frac{m}{V}$ ,  $v = \frac{s}{t}$ ,  $v^2 = u^2 + 2as$ ,  $v = 2\pi rf$ ,  $F = ma$  และ  $E = mc^2$  ในวิชาพีชคณิตนิยมใช้สัญลักษณ์  $x$ ,  $y$  และ  $z$  แทนปริมาณที่ไม่ทราบค่าหรือตัวไม่รู้ค่า (unknown) เราต้องแก้สมการเพื่อหาค่าของปริมาณหรือตัวไม่รู้ค่านั้น

#### การแก้สมการที่มีตัวไม่รู้ค่า 1 ตัว

ในการแก้สมการที่มีตัวไม่รู้ค่า 1 ตัว เช่น  $2x + 5 = 8$  ให้จัดกระทำกับสมการโดยอาศัยหลักการได้แก่ (1) การบวกหรือลบด้วยตัวเลขหรือสัญลักษณ์ (2) การคูณหรือหารด้วยตัวเลขหรือสัญลักษณ์ และ (3) การยกกำลังหรือใส่รากด้วยตัวเลขหรือสัญลักษณ์ การจัดกระทำดังกล่าวต้องทำทั้งสองข้างของสมการเพื่อให้ทั้งสองข้างของสมการยังคงเท่ากันจนกระทั่งได้ ตัวไม่รู้ค่า อยู่ข้างซ้ายของ = ดังตัวอย่าง

**ตัวอย่าง** จงหา  $x$  จากสมการ ก.  $x + 6 = 2$  ข.  $4x = 12$  ค.  $\frac{x}{2} = 5$

**วิธีทำ** ก. ลบทั้งสองข้างด้วย 6  $x + 6 - 6 = 2 - 6$

$$x = -4$$

ข. ทหารทั้งสองข้างด้วย 4

$$\frac{4x}{4} = \frac{12}{4}$$

$$x = 3$$

ค. คูณทั้งสองข้างด้วย 2

$$\frac{x}{2} \times 2 = 5 \times 2$$

$$x = 10$$

### การแก้สมการ (กำลังหนึ่ง) ที่มีตัวไม่รู้ค่า 2 ตัว

ในการแก้สมการที่มีตัวไม่รู้ค่า 1 ตัว ต้องการเพียง 1 สมการ แต่การแก้สมการ (กำลังหนึ่ง) ที่มีตัวไม่รู้ค่า 2 ตัว ต้องใช้ 2 สมการ โดยมีขั้นตอนดังนี้ (1) เลือกสมการใดสมการหนึ่ง แล้วหา  $x$  ในเทอมของ  $y$  (หรือหา  $y$  ในเทอมของ  $x$ ) (2) นำ  $x$  ไปแทนในอีกสมการหนึ่ง จะได้ค่าของ  $y$  (3) นำค่าของ  $y$  ไปแทนในอีกสมการหนึ่ง จะได้ค่าของ  $x$  ในการจัดกระทำกับขั้นตอนแต่ละขั้น ใช้หลักการเดียวกับการแก้สมการที่มีตัวไม่รู้ค่า 1 ตัว ดังตัวอย่าง

[หมายเหตุ การแก้สมการในตัวอย่างต่อไปนี้เป็นวิธีการหนึ่ง ยังมีวิธีการอื่น ซึ่งให้ผลเหมือนกัน]

**ตัวอย่าง** จงหา  $x$  และ  $y$  ในสมการ ก.  $x - 2y = 4$  และ สมการ ข.  $3x + y = 5$

**วิธีทำ** ขั้นที่ (1) เลือกสมการ ก. เพื่อหา  $x$  ในเทอมของ  $y$  [หรือเลือกสมการ ข. เพื่อหา  $y$  ในเทอมของ  $x$  ก็ได้]

$$x - 2y = 4$$

$$x = 4 + 2y$$

[บวกทั้งสองข้างด้วย  $2y$ ]

ขั้นที่ (2) นำ  $x = 4 + 2y$  ไปแทนในสมการ ข. จะได้

$$3(4 + 2y) + y = 5$$

$$12 + 6y + y = 5$$

$$12 + 7y = 5$$

$$7y = -7$$

[ลบทั้งสองข้างด้วย 12]

$$y = -1$$

[หารทั้งสองข้างด้วย 7]

ขั้นที่ (3)  $y = -1$  นำไปแทนในสมการ  $x = 2y + 4$  จะได้  $x = 2(-1) + 4 = 2$

**ตอบ**  $x = 2$  และ  $y = -1$

**การตรวจคำตอบ** โดยการนำคำตอบที่หาได้ไปแทนในสมการทั้งสองในโจทย์ ดังนี้

จากสมการ ก.

$$x - 2y = 4$$

$$2 - 2(-1) = 4$$

[แทน  $x = 2$  และ  $y = -1$ ]

$$2 + 2 = 4$$

$$4 = 4$$

[สองข้างของ = มีค่าเท่ากัน]

และสมการ ข.

$$3x + y = 5$$

$$3(2) + (-1) = 5$$

[แทน  $x = 2$  และ  $y = -1$ ]

$$6 - 1 = 5$$

$$5 = 5$$

[สองข้างของ = มีค่าเท่ากัน]

จะเห็นว่า สองข้างของ = มีค่าเท่ากัน แสดงว่า  $x = 2$  และ  $y = -1$  ถูกต้อง

### 2.3 สมการกำลังสอง

สมการกำลังสอง (quadratic equation) อยู่ในรูป  $ax^2 + bx + c = 0$  เมื่อ  $x$  เป็นตัวไม่รู้ค่า  $a$   $b$  และ  $c$  เป็นตัวคงค่า โดยที่  $a \neq 0$

รากของสมการกำลังสองคือ  $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$  ถ้า  $b^2 - 4ac \geq 0$  รากจะเป็นจำนวนจริง 2 ค่า

**ตัวอย่าง** จงหา  $x$  จากสมการ  $x^2 + 3x + 2 = 0$

**วิธีทำ** รากของสมการคือ  $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$

$$x = \frac{-3 \pm \sqrt{3^2 - 4(1)(2)}}{2(1)} = \frac{-3 \pm \sqrt{1}}{2} = \frac{-3 \pm 1}{2}$$

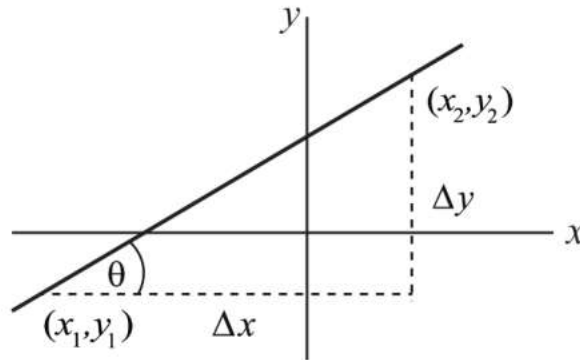
$$x = \frac{-3+1}{2} = -1 \text{ และ } x = \frac{-3-1}{2} = -2$$

$$x = -1, -2$$

**ตอบ**  $x$  เท่ากับ  $-1$  หรือ  $-2$

## 2.4 สมการเชิงเส้น

สมการเชิงเส้น (linear equation) หรือสมการเส้นตรง มีรูปแบบดังนี้  $y = mx + b$  โดยที่  $m$  และ  $b$  เป็นตัวคงค่า สมการนี้เป็นเชิงเส้นเพราะเมื่อเขียนกราฟของ  $y$  และ  $x$  จะได้กราฟเป็นเส้นตรง ดังรูป ข.1



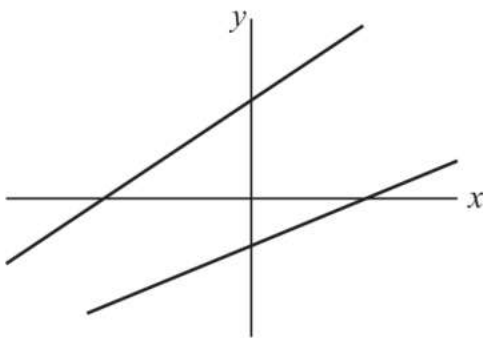
รูป ข.1

ตัวคงค่า  $b$  เรียกว่า ระยะตัดแกน  $y$  ( $y$ -intercept) เป็นค่าของ  $y$  ที่เส้นตรงตัดกับแกน  $y$  ตัวคงค่า  $m$  เท่ากับ ความชัน (slope, gradient) ของเส้นตรง และเท่ากับ  $\tan$  ของมุมที่เส้นตรงทำกับแกน  $x$  (ในกรณีแกนทั้งสองใช้สเกลเดียวกัน)

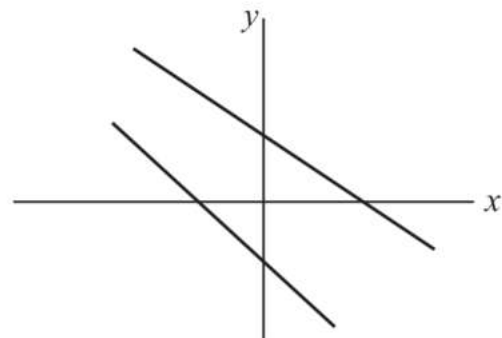
ถ้า  $(x_1, y_1)$  และ  $(x_2, y_2)$  เป็นจุดสองจุดบนเส้นตรง ดังรูป ข.1 ความชันของเส้นตรงมีค่าดังนี้

$$\text{ความชัน} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \tan \theta$$

ถ้า  $m > 0$  เส้นตรงมีความชันเป็นบวก ดังรูป ข.2 ถ้า  $m < 0$  เส้นตรงมีความชันเป็นลบ ดังรูป ข.3 สังเกตว่า  $m$  และ  $b$  มีค่าได้ทั้งบวกและลบ



รูป ข.2  $m > 0$



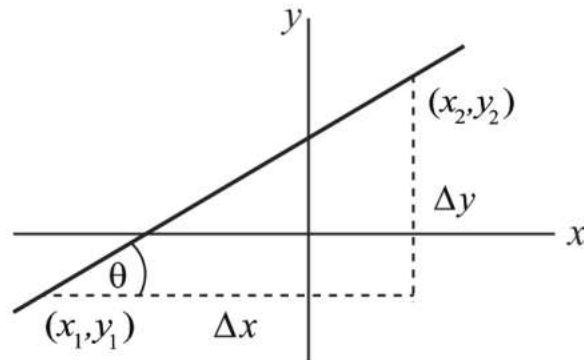
รูป ข.3  $m < 0$



### 3. เรขาคณิตและตรีโกณมิติ

#### 3.1 การหาความยาวระหว่างจุดสองจุดในระบบพิกัดฉาก

ความยาวระหว่างจุดสองจุดที่มีพิกัด  $(x_1, y_1)$  และ  $(x_2, y_2)$  หาได้จาก  $s = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$



รูป ข.4

#### 3.2 ข้อมูลรูปทรงทางเรขาคณิต

ข้อมูลเกี่ยวกับรูปทรงทางเรขาคณิต ได้แก่ เส้นรอบรูป พื้นที่ พื้นที่ผิวและปริมาตร แสดงในตาราง ข.1

ตาราง ข.1 ข้อมูลรูปทรงทางเรขาคณิต

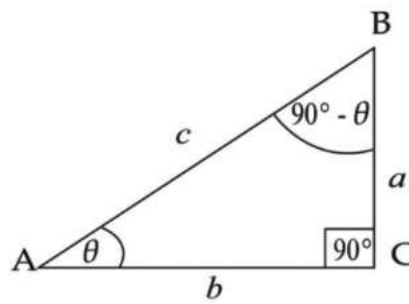
รูปทรง	เส้นรอบรูป	พื้นที่	พื้นที่ผิว	ปริมาตร
วงกลม รัศมี $r$	$2\pi r$	$\pi r^2$		
จัตุรัส ความยาวด้าน $a$	$4a$	$a^2$		
สี่เหลี่ยมผืนผ้า ยาว $l$ กว้าง $w$	$2l + 2w$	$lw$		
สามเหลี่ยม ฐาน $a$ สูง $h$		$\frac{1}{2}ah$		
ทรงกระบอก รัศมี $r$ สูง $h$			$2\pi rh + 2\pi r^2$	$\pi r^2 h$
ทรงกลม รัศมี $r$			$4\pi r^2$	$\frac{4}{3}\pi r^3$
ลูกบาศก์ ความยาวด้าน $a$			$6a^2$	$a^3$

### 3.3 ทฤษฎีบทพีทาโกรัส

ทฤษฎีบทพีทาโกรัส (Pythagoras' theorem) เป็นทฤษฎีบทที่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างด้านทั้งสามของสามเหลี่ยมมุมฉาก กล่าวคือ ในสามเหลี่ยมมุมฉากใด ๆ ผลรวมของพื้นที่จัตุรัสบนด้านประกอบมุมฉากเท่ากับพื้นที่ของจัตุรัสบนด้านตรงข้ามมุมฉาก

ถ้า  $a$  และ  $b$  แทนความยาวของด้านประกอบมุมฉากและ  $c$  แทนความยาวของด้านตรงข้ามมุมฉาก ดังรูป ข.5 จะเขียนทฤษฎีบทพีทาโกรัส ในรูปสมการได้ดังนี้

$$c^2 = a^2 + b^2 \quad \text{หรือ} \quad c = \sqrt{a^2 + b^2}$$



รูป ข.5

**ตัวอย่าง** จงหาความยาว  $c$  ของด้าน  $AB$  ของสามเหลี่ยมมุมฉาก  $ABC$  ในรูป ข.5 เมื่อ  $a$  เท่ากับ 3 เซนติเมตร และ  $b$  เท่ากับ 4 เซนติเมตร

**วิธีทำ** ความยาวของด้าน  $AC = b = 4$  cm

ความยาวของด้าน  $BC = a = 3$  cm

$$\begin{aligned} c &= \sqrt{a^2 + b^2} \\ &= \sqrt{(3 \text{ cm})^2 + (4 \text{ cm})^2} = \sqrt{9 \text{ cm}^2 + 16 \text{ cm}^2} = \sqrt{25 \text{ cm}^2} \\ &= 5 \text{ cm} \end{aligned}$$

**ตอบ**  $c$  มีค่าความยาวเท่ากับ 5 เซนติเมตร

### 3.4 ฟังก์ชันตรีโกณมิติ

ฟังก์ชันตรีโกณมิติเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวของด้านสองด้านของสามเหลี่ยมมุมฉาก ฟังก์ชันตรีโกณมิติ ได้แก่ sine (sin), cosine (cos), tangent (tan), cosecant (csc), secant (sec) และ cotangent (cot) แต่ฟังก์ชันตรีโกณมิติที่ใช้บ่อย ได้แก่ sin cos และ tan

พิจารณา สามเหลี่ยมมุมฉาก ABC มี C เป็นมุมฉาก

$a$  เป็นความยาวของด้านตรงข้ามมุม  $\theta$

$b$  เป็นความยาวของด้านประชิดมุม  $\theta$

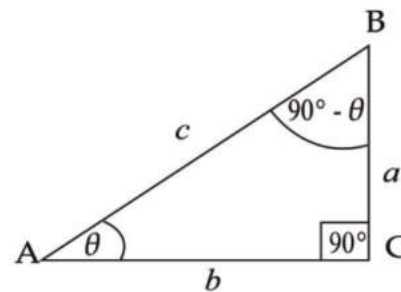
$c$  เป็นความยาวของด้านตรงข้ามมุมฉาก

ฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุม  $\theta$  ถูกกำหนดดังนี้

$$\sin \theta = \frac{a}{c} \quad \csc \theta = \frac{c}{a} = \frac{1}{\sin \theta}$$

$$\cos \theta = \frac{b}{c} \quad \sec \theta = \frac{c}{b} = \frac{1}{\cos \theta}$$

$$\tan \theta = \frac{a}{b} \quad \cot \theta = \frac{b}{a} = \frac{1}{\tan \theta}$$



รูป ข.6

จากสามเหลี่ยมมุมฉาก ในรูป ข.6 จะได้

$$\sin \theta = \cos(90^\circ - \theta), \quad \cos \theta = \sin(90^\circ - \theta), \quad \tan \theta = \cot(90^\circ - \theta), \quad \tan \theta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

จากทฤษฎีบทพีทาโกรัส  $c^2 = a^2 + b^2$  สามารถพิสูจน์ได้ว่า

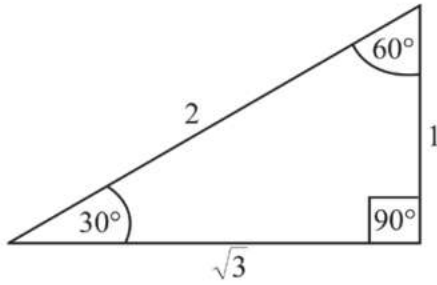
$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1, \quad \sec^2 \theta - \tan^2 \theta = 1, \quad \csc^2 \theta - \cot^2 \theta = 1$$

ความสัมพันธ์อื่น ๆ ของฟังก์ชันตรีโกณมิติ

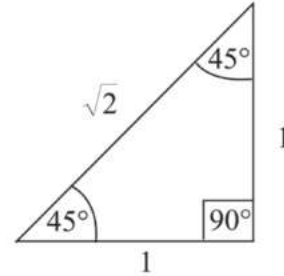
$\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$	$\sin(A \pm B) = \sin A \cos B \pm \cos A \sin B$
$\cos 2\theta = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta$	$\cos(A \pm B) = \cos A \cos B \mp \sin A \sin B$
$\tan 2\theta = \frac{2 \tan \theta}{1 - \tan^2 \theta}$	$\tan(A \pm B) = \frac{\tan A \pm \tan B}{1 \mp \tan A \tan B}$

ฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมที่พบบ่อย

สามเหลี่ยมมุมฉากที่พบบ่อยคือสามเหลี่ยมมุมฉากที่มีมุม  $30^\circ - 60^\circ - 90^\circ$  และ  $45^\circ - 45^\circ - 90^\circ$  สามเหลี่ยมทั้งสองมีความยาวของด้านทั้งสามดังรูป ข.7 และ ข.8 ฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมต่าง ๆ มีค่าดังตาราง ข.2 [ถ้าจำได้ จะช่วยแก้ปัญหาทางฟิสิกส์ได้เร็วขึ้น]

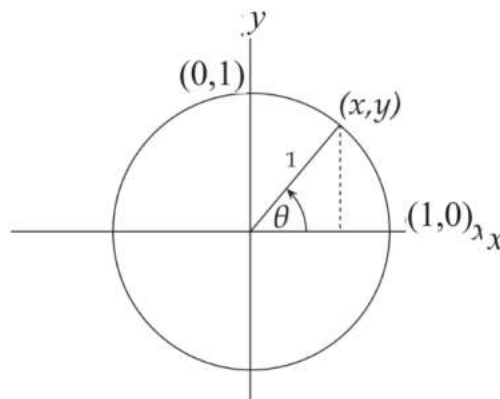


รูป ข.7 สามเหลี่ยมมุมฉาก  $30^\circ - 60^\circ - 90^\circ$



รูป ข.8 สามเหลี่ยมมุมฉาก  $45^\circ - 45^\circ - 90^\circ$

ส่วนฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมอื่น ๆ ที่พบบ่อย เช่น  $90^\circ$   $120^\circ$   $180^\circ$  หาได้จากค่าของ  $x$  และ  $y$  บนส่วนโค้งของวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วย ดังรูป ข. 9 โดย  $\sin \theta = y$   $\cos \theta = x$  และ  $\tan \theta = \frac{y}{x}$  เช่น ที่  $\theta = 90^\circ$   $x = 0$   $y = 1$  ได้  $\sin 90^\circ = 1$   $\cos 90^\circ = 0$  และ  $\tan 90^\circ = \infty$



รูป ข.9 วงกลมรัศมีหนึ่งหน่วย

## ตาราง ข.2 ฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมที่พบบ่อย

ฟังก์ชัน ตรีโกณมิติ	มุม								
	0°	30°	45°	60°	90°	120°	180°	270°	360°
sin	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	0	-1	0
cos	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	-1	0	1
tan	0	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	1	$\sqrt{3}$	$\infty$	$-\sqrt{3}$	0	$\infty$	0

การใช้งานฟังก์ชันตรีโกณมิติในฟิลิกส์ระดับนี้ อาจแบ่งได้ 3 กรณี

1. การหาค่าของฟังก์ชันตรีโกณมิติที่มีมุมไม่ตรงกับมุมในตาราง ข. 2 ซึ่งสามารถหาค่าของฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมต่าง ๆ ได้จาก ภาคผนวก ง ตารางฟังก์ชันตรีโกณมิติ เช่น  $\sin 23^\circ$   $\cos 47^\circ$   $\tan 62^\circ$  จะได้  $\sin 23^\circ = 0.3907$   $\cos 47^\circ = 0.6820$   $\tan 62^\circ = 1.8807$  ตามลำดับ

2. การหามุมของฟังก์ชันตรีโกณมิติ เช่น การหา  $\phi$  ของ  $\tan \phi = 1.3519$  สามารถหาค่าได้จาก ภาคผนวก ค ตารางฟังก์ชันตรีโกณมิติ จะได้  $\phi = 53.5^\circ$

3. การหามุมของฟังก์ชันตรีโกณมิติที่อยู่ในเทอมของตัวแปร เช่น  $\sin \theta = \frac{a}{\omega^2 L}$  อาจแสดงค่าของมุมได้ 2 แบบ ดังนี้  $\theta = \sin^{-1}\left(\frac{a}{\omega^2 L}\right)$  หรือ  $\theta = \arcsin\left(\frac{a}{\omega^2 L}\right)$

ความสัมพันธ์ระหว่างด้านและมุมภายในของสามเหลี่ยมใด ๆ

สมมติสามเหลี่ยมใด ๆ มี  $\alpha$   $\beta$  และ  $\gamma$  เป็นมุมภายใน และมี  $a$   $b$  และ  $c$  เป็นความยาวของด้านตรงข้ามมุม  $\alpha$   $\beta$  และ  $\gamma$  ตามลำดับ ดังรูป ข.10 ด้านและมุมภายในของสามเหลี่ยมมีความสัมพันธ์กันดังนี้

กฎของไซน์ (law of sines)

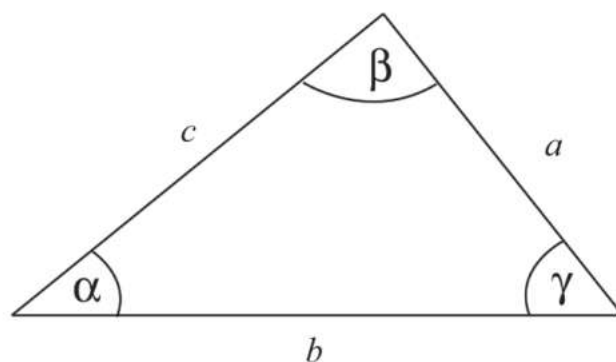
$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma}$$

กฎของโคไซน์ (law of cosines)

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cos \beta$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma$$



รูป ข.10

## ภาคผนวก ค ระบบหน่วยระหว่างชาติ

ระบบหน่วยระหว่างชาติ (The International System of Units หรือ Le Système international d'unités) หรือเอสไอ ประกอบด้วย หน่วยฐาน หน่วยอนุพัทธ์ และคำนำหน้าหน่วย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

**1. หน่วยฐาน (base units)** เป็นหน่วยหลักของเอสไอ มีทั้งหมด 7 หน่วย ดังตาราง ค.1

ตาราง ค.1 ชื่อและสัญลักษณ์ของหน่วยฐาน

หน่วยฐาน	ศัพท์บัญญัติ	สัญลักษณ์	ปริมาณฐาน
meter	เมตร	m	ความยาว
kilogram	กิโลกรัม	kg	มวล
second	วินาที	s	เวลา
ampere	แอมแปร์	A	กระแสไฟฟ้า
kelvin	เคลวิน	K	อุณหภูมิอุณหพลวัต
mole	โมล	mol	ปริมาณของสาร
candela	แคนเดลา	cd	ความเข้มของการส่องสว่าง

**2. หน่วยอนุพัทธ์ (derived units)**

หน่วยอนุพัทธ์เป็นหน่วยที่มีหน่วยฐานหลายหน่วยมาเกี่ยวเนื่องกัน หน่วยอนุพัทธ์มีหลายหน่วยซึ่งมีชื่อและสัญลักษณ์ที่กำหนดขึ้นโดยเฉพาะ ดังตาราง ค.2

ตาราง ค.2 ชื่อและสัญลักษณ์ของหน่วยอนุพัทธ์

ปริมาณอนุพัทธ์	หน่วยอนุพัทธ์				
	ชื่อหน่วย	ศัพท์บัญญัติ	สัญลักษณ์	ในเทอมของเอสไออื่น	ในเทอมของหน่วยฐาน
ความถี่	เฮิร์ตซ์	hertz	Hz	-	$s^{-1}$
แรง	นิวตัน	newton	N	-	$m\ kg\ s^{-2}$
ความดัน	พาสคัล	pascal	Pa	$N/m^2$	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
พลังงาน งาน ปริมาณความร้อน	จูล	joule	J	$N\ m$	$m^2\ kg\ s^{-2}$
กำลัง ฟลักซ์การแผ่รังสี	วัตต์	watt	W	$J/s$	$m^2\ kg\ s^{-3}$
ประจุไฟฟ้า ปริมาณไฟฟ้า	คูลอมบ์	coulomb	C	-	$s\ A$

ตาราง ค.2 ชื่อและสัญลักษณ์ของหน่วยอนุพัทธ์ (ต่อ)

ปริมาณอนุพัทธ์	หน่วยอนุพัทธ์				
	ชื่อหน่วย	ศัพท์บัญญัติ	สัญลักษณ์	ในเทอมของเอสไออื่น	ในเทอมของหน่วยฐาน
ศักย์ไฟฟ้า ความต่างศักย์ อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ	โวลต์	volt	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
ความจุ	ฟารัด	farad	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
ความต้านทาน	โอห์ม	ohm	$\Omega$	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
ความนำ	ซีเมนส์	siemens	S	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
ฟลักซ์แม่เหล็ก	เวเบอร์	weber	Wb	V s	$m^2 kg s^{-2} A^{-1}$
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก	เทสลา	tesla	T	Wb/m <sup>2</sup>	$kg s^{-2} A^{-1}$
ความเหนี่ยวนำ	เฮนรี	henry	H	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
ฟลักซ์ส่องสว่าง	ลูเมน	lumen	lm	cd sr	cd
ความสว่าง	ลักซ์	lux	lx	lm/m <sup>2</sup>	$m^{-2} cd$
กัมมันตภาพ	เบ็กเคอเรล	becquerel	Bq	-	$s^{-1}$
ขนาดกำหนดของกัมมันตภาพรังสี	ซีเวิร์ต	sievert	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
ขนาดกำหนดของการดูดกลืน ของรังสีที่ทำให้แตกตัวเป็นไอออน	เกรย์	gray	Gy	J/kg	$m^2 s^{-2}$
มุมระนาบ	เรเดียน	radian	rad	-	m/m
มุมตัน	สเตอเรเดียน	steradian	sr	-	$m^2/m^2$

### 3. คำนำหน้าหน่วย (prefixes)

เมื่อค่าในหน่วยฐานหรือหน่วยอนุพัทธ์มากหรือน้อยเกินไป เราสามารถเขียนค่านั้นเป็นตัวเลขคูณด้วยตัวคูณ (เลขสิบยกกำลังบวกหรือลบ) ได้ เช่น 0.000005 แอมแปร์ เขียนเป็น  $5 \times 10^{-6}$  แอมแปร์ หรือ 6 000 000 วัตต์ เขียนเป็น  $6 \times 10^6$  วัตต์ ตัวคูณ  $10^{-6}$  และ  $10^6$  ให้เขียนแทนด้วยคำนำหน้าหน่วย ไมโคร และเมกะ กำกับไว้หน้าแอมแปร์และวัตต์ ตามลำดับ คำนำหน้าหน่วยที่ใช้แทนตัวคูณและสัญลักษณ์แสดงไว้ในตาราง ค.3

ตาราง ค.3 คำนำหน้าหน่วยและสัญลักษณ์

ตัวคูณ	คำนำหน้าหน่วย		สัญลักษณ์	ตัวคูณ	คำนำหน้าหน่วย		สัญลักษณ์
	ชื่อ	ศัพท์บัญญัติ			ชื่อ	ศัพท์บัญญัติ	
$10^{-24}$	yocto	ยอคโต	y	$10^1$	deca	เดคา	da
$10^{-21}$	zepto	เซปโต	z	$10^2$	hecto	เฮกโต	h
$10^{-18}$	atto	อัตโต	a	$10^3$	kilo	กิโล	k
$10^{-15}$	femto	เฟมโต	f	$10^6$	mega	เมกะ	M
$10^{-12}$	pico	พิโก	p	$10^9$	giga	จิกะ	G
$10^{-9}$	nano	นาโน	n	$10^{12}$	tera	เทระ	T
$10^{-6}$	micro	ไมโคร	$\mu$	$10^{15}$	peta	เพตะ	P
$10^{-3}$	milli	มิลลิ	m	$10^{18}$	exa	เอกซะ	E
$10^{-2}$	centi	เซนติ	c	$10^{21}$	zetta	เซตตะ	Z
$10^{-1}$	deci	เดซี	d	$10^{24}$	yotta	ยอตตะ	Y

จากตัวอย่างข้างต้น

$$0.000005 \text{ แอมแปร์} = 5 \times 10^{-6} \text{ แอมแปร์} = 5 \text{ ไมโครแอมแปร์ } (\mu\text{A})$$

$$6000000 \text{ วัตต์} = 6 \times 10^6 \text{ วัตต์} = 6 \text{ เมกะวัตต์ (MW)}$$

หมายเหตุ

1. การใช้คำนำหน้าหน่วยควรใช้เพียงครั้งเดียว ไม่นิยมเขียนคำนำหน้าหน่วยซ้อนกัน เช่นไม่ควรเขียน มิลลิไมโครวินาที (m $\mu$ s) ควรเขียนนาโนวินาที (ns)

2. การนำสัญลักษณ์ของคำนำหน้าหน่วยไปกำกับหน้าสัญลักษณ์ของหน่วย จะถือว่าได้สัญลักษณ์ใหม่ เป็นสัญลักษณ์เดี่ยว เมื่อนำไปยกกำลังไม่ต้องใส่วงเล็บ เช่น  $\text{mm}^3$ ,  $\mu\text{s}^{-1}$ ,  $\text{GHz}^{-1}$



## ภาคผนวก ง ตารางฟังก์ชันตรีโกณมิติ

มุม (องศา)	มุม (เรเดียน)	sine	cosine	tangent	มุม (องศา)	มุม (เรเดียน)	sine	cosine	tangent	มุม (องศา)	มุม (เรเดียน)	sine	cosine	tangent
0	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	31	0.5411	0.5150	0.8572	0.6009	61	1.0647	0.8746	0.4848	1.8040
1	0.0175	0.0175	0.9998	0.0175	32	0.5585	0.5299	0.8480	0.6249	62	1.0821	0.8829	0.4695	1.8807
2	0.0349	0.0349	0.9994	0.0349	33	0.5760	0.5446	0.8387	0.6494	63	1.0996	0.8910	0.4540	1.9626
3	0.0524	0.0524	0.9986	0.0524	34	0.5934	0.5592	0.8290	0.6745	64	1.1170	0.8988	0.4384	2.0503
4	0.0698	0.0697	0.9976	0.0699	35	0.6109	0.5736	0.8192	0.7002	65	1.1345	0.9063	0.4226	2.1445
5	0.0873	0.0872	0.9962	0.0875	36	0.6283	0.5878	0.8090	0.7265	66	1.1519	0.9135	0.4067	2.2460
6	0.1047	0.1045	0.9945	0.1051	37	0.6458	0.6018	0.7986	0.7536	67	1.1694	0.9205	0.3907	2.3559
7	0.1222	0.1219	0.9925	0.1228	38	0.6632	0.6157	0.7880	0.7813	68	1.1868	0.9272	0.3746	2.4751
8	0.1396	0.1391	0.9903	0.1405	39	0.6807	0.6293	0.7771	0.8098	69	1.2043	0.9336	0.3584	2.6051
9	0.1571	0.1565	0.9877	0.1584	40	0.6981	0.6428	0.7660	0.8391	70	1.2217	0.9397	0.3420	2.7475
10	0.1745	0.1736	0.9848	0.1763	41	0.7156	0.6561	0.7547	0.8693	71	1.2392	0.9455	0.3256	2.9042
11	0.1920	0.1908	0.9816	0.1944	42	0.7330	0.6691	0.7431	0.9004	72	1.2566	0.9511	0.3090	3.0777
12	0.2094	0.2079	0.9782	0.2126	43	0.7505	0.6820	0.7314	0.9325	73	1.2741	0.9563	0.2924	3.2709
13	0.2269	0.2250	0.9744	0.2309	44	0.7679	0.6947	0.7193	0.9657	74	1.2915	0.9613	0.2756	3.4874
14	0.2443	0.2419	0.9703	0.2493	45	0.7854	0.7071	0.7071	1.0000	75	1.3090	0.9659	0.2588	3.7321
15	0.2618	0.2588	0.9659	0.2679	46	0.8029	0.7193	0.6947	1.0724	76	1.3265	0.9703	0.2419	4.0108
16	0.2793	0.2756	0.9613	0.2867	47	0.8203	0.7314	0.6820	1.0724	77	1.3439	0.9744	0.2250	4.3315
17	0.2967	0.2924	0.9563	0.3057	48	0.8378	0.7431	0.6691	1.1106	78	1.3614	0.9781	0.2079	4.7046
18	0.3142	0.3090	0.9511	0.3249	49	0.8552	0.7547	0.6561	1.1504	79	1.3788	0.9816	0.1908	5.1446
19	0.3316	0.3256	0.9455	0.3443	50	0.8727	0.7660	0.6428	1.1918	80	1.3963	0.9848	0.1736	5.6713
20	0.3491	0.3421	0.9397	0.3640	51	0.8901	0.7771	0.6293	1.2349	81	1.4137	0.9877	0.1564	6.3138
21	0.3665	0.3584	0.9336	0.3839	52	0.9076	0.7880	0.6157	1.2799	82	1.4312	0.9903	0.1392	7.1154
22	0.3840	0.3746	0.9272	0.4040	53	0.9250	0.7986	0.6018	1.3270	83	1.4486	0.9925	0.1219	8.1443
23	0.4014	0.3907	0.9205	0.4245	54	0.9425	0.8090	0.5878	1.3764	84	1.4661	0.9945	0.1045	9.5144
24	0.4189	0.4067	0.9135	0.4452	55	0.9599	0.8192	0.5736	1.4281	85	1.4835	0.9962	0.0872	11.430
25	0.4363	0.4226	0.9063	0.4663	56	0.9774	0.8290	0.5592	1.4826	86	1.5010	0.9976	0.0698	14.301
26	0.4538	0.4384	0.8988	0.4877	57	0.9948	0.8387	0.5446	1.5399	87	1.5184	0.9986	0.0523	19.081
27	0.4712	0.4540	0.8910	0.5095	58	1.0123	0.8480	0.5299	1.6003	88	1.5359	0.9994	0.0349	28.636
28	0.4887	0.4695	0.8829	0.5317	59	1.0297	0.8572	0.5150	1.6643	89	1.5533	0.9998	0.0175	57.290
29	0.5061	0.4848	0.8746	0.5543	60	1.0472	0.8660	0.5000	1.7321	90	1.5708	1.0000	0.0000	∞
30	0.5236	0.5000	0.8660	0.5774	61	1.0647	0.8746	0.4848	1.8040					

ภาคผนวก จ ตารางเลขกำลังสอง รากที่สองและส่วนกลับ

$n$	$n^2$	$\sqrt{n}$	$10/n$	$n$	$n^2$	$\sqrt{n}$	$10/n$	$n$	$n^2$	$\sqrt{n}$	$10/n$
1	1	1.000	10.000	41	1681	6.403	0.244	81	6561	9.000	0.123
2	4	1.414	5.000	42	1764	6.481	0.238	82	6724	9.055	0.122
3	9	1.732	3.333	43	1849	6.557	0.233	83	6889	9.110	0.120
4	16	2.000	2.500	44	1936	6.633	0.227	84	7056	9.165	0.119
5	25	2.236	2.000	45	2025	6.708	0.222	85	7225	9.220	0.118
6	36	2.449	1.667	46	2116	6.782	0.217	86	7396	9.274	0.116
7	49	2.646	1.429	47	2209	6.856	0.213	87	7569	9.327	0.115
8	64	2.828	1.250	48	2304	6.928	0.208	88	7744	9.381	0.114
9	81	3.000	1.111	49	2401	7.000	0.204	89	7921	9.434	0.112
10	100	3.162	1.000	50	2500	7.071	0.200	90	8100	9.487	0.111
11	121	3.317	0.909	51	2601	7.141	0.196	91	8281	9.539	0.110
12	144	3.464	0.833	52	2704	7.211	0.192	92	8464	9.592	0.109
13	169	3.606	0.769	53	2809	7.280	0.189	93	8649	9.644	0.108
14	196	3.742	0.714	54	2916	7.348	0.185	94	8836	9.695	0.106
15	225	3.873	0.667	55	3025	7.416	0.182	95	9025	9.747	0.105
16	256	4.000	0.625	56	3136	7.483	0.179	96	9216	9.798	0.104
17	289	4.123	0.588	57	3249	7.550	0.175	97	9409	9.849	0.103
18	324	4.243	0.556	58	3364	7.616	0.172	98	9604	9.899	0.102
19	361	4.359	0.526	59	3481	7.681	0.169	99	9801	9.950	0.101
20	400	4.472	0.500	60	3600	7.746	0.167	100	10000	10.000	0.100
21	441	4.583	0.476	61	3721	7.810	0.164	101	10201	10.049	0.099
22	484	4.690	0.455	62	3844	7.874	0.161	102	10404	10.100	0.098
23	529	4.796	0.435	63	3969	7.937	0.159	103	10609	10.149	0.097
24	576	4.899	0.417	64	4096	8.000	0.156	104	10816	10.198	0.096
25	625	5.000	0.400	65	4225	8.062	0.154	105	11025	10.247	0.095
26	676	5.099	0.385	66	4356	8.124	0.152	106	11236	10.296	0.094
27	729	5.196	0.370	67	4489	8.185	0.149	107	11449	10.344	0.093
28	784	5.292	0.357	68	4624	8.246	0.147	108	11664	10.392	0.093
29	841	5.385	0.345	69	4761	8.307	0.145	109	11881	10.440	0.092
30	900	5.477	0.333	70	4900	8.367	0.143	110	12100	10.488	0.091
		5.568	0.323	71	5041	8.426	0.141	111	12321	10.536	0.090
31	961			72	5184	8.485	0.139	112	12544	10.583	0.089
32	1024	5.657	0.313	73	5329	8.544	0.137	113	12769	10.630	0.088
33	1089	5.745	0.303	74	5476	8.602	0.135	114	12996	10.677	0.088
34	1156	5.831	0.294	75	5625	8.660	0.133	115	13225	10.724	0.087
35	1225	5.916	0.286	76	5776	8.718	0.132	116	13456	10.770	0.086
36	1296	6.000	0.278	77	5929	8.775	0.130	117	13689	10.817	0.085
37	1369	6.083	0.270	78	6084	8.832	0.128	118	13924	10.863	0.085
38	1444	6.164	0.263	79	6241	8.888	0.127	119	14161	10.909	0.084
39	1521	6.245	0.256	80	6400	8.944	0.125	120	14400	10.954	0.083
40	1600	6.325	0.25								

### ภาคผนวก ฉ ตัวอย่างการบันทึกการทดลอง

การศึกษาหาความรู้ทางวิทยาศาสตร์นั้นจำเป็นต้องมีการทดลอง เพื่อให้รู้จักและเข้าใจกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการหาเหตุผลหรือหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ การบันทึกรายละเอียดต่าง ๆ จากการสังเกตสิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลองจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพราะการสรุปเหตุผลหรือการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะใช้ข้อมูลที่ได้จากสังเกตเท่านั้นถ้าการบันทึกรายละเอียดในการทดลองมีความบกพร่อง เราอาจไม่สามารถสรุปได้ หรือต้องทำการทดลองซ้ำใหม่ ดังนั้น เราจะบันทึกผลการทดลองอย่างไร

การบันทึกการทดลอง ควรจัดลำดับของรายละเอียดต่าง ๆ ให้เหมาะสมและควรบันทึกด้วยข้อความที่กะทัดรัด เข้าใจง่ายและชัดเจน รายการที่บันทึกอาจเรียงลำดับดังนี้

1. หัวข้อการทดลอง
2. วัน เวลา สถานที่ทดลอง และสภาพแวดล้อมขณะนั้น
3. จุดประสงค์
4. วัสดุอุปกรณ์
5. วิธีทำกิจกรรม
6. ภาพการจัดอุปกรณ์การทดลอง
7. ตารางบันทึกผลการทดลอง
8. กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณที่วัดได้
9. การคำนวณจากตารางบันทึกผลการทดลองหรือจากกราฟ
10. การสรุปและอภิปรายผล หัวข้อนี้ควรประกอบด้วย การสรุป การแปลความหมาย การบอกความคลาดเคลื่อน (ในกรณีที่มีการหาความคลาดเคลื่อน) รวมทั้งข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงแก้ไขสำหรับการทดลองนี้ในครั้งต่อไป

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในขั้นตอนการทำการทดลองข้างต้น ขอให้ศึกษาตัวอย่างการบันทึกการทดลองต่อไปนี้



#### กิจกรรม 5.3 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออก

##### จุดประสงค์

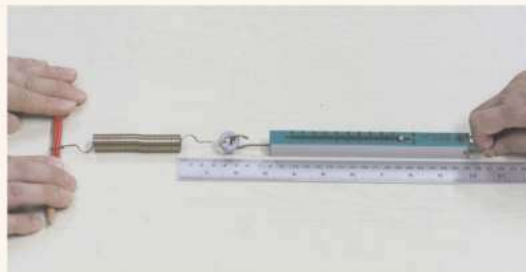
1. เขียนและวิเคราะห์กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออกจากตำแหน่งสมดุล
2. อภิปรายเพื่อสรุปเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออกจากตำแหน่งสมดุล
3. อภิปรายเพื่อสรุปเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างงานของแรงที่ใช้ดึงสปริงกับพลังงานศักย์ยืดหยุ่นของสปริง

### วัสดุและอุปกรณ์

- |                     |           |
|---------------------|-----------|
| 1. เครื่องชั่งสปริง | 1 เครื่อง |
| 2. สปริง            | 1 อัน     |
| 3. ไม้บรรทัด        | 1 อัน     |
| 4. นอต              | 1 ตัว     |

### วิธีทำกิจกรรม

1. ยึดนอตกับปลายสปริงด้านหนึ่งแล้วยึดปลายสปริงอีกด้านไว้กับดินสอ จากนั้นใช้ตะขอของเครื่องชั่งสปริงเกี่ยวนอตตัวเดียวกันไว้ แล้ววางสปริงและเครื่องชั่งสปริงให้อยู่ในแนวขนานกับไม้บรรทัด ให้ปลายสุดของสปริงด้านที่เกี่ยวกับเครื่องชั่งสปริงอยู่ตรงขีดศูนย์ของไม้บรรทัด ดังแสดงในรูปด้านล่าง



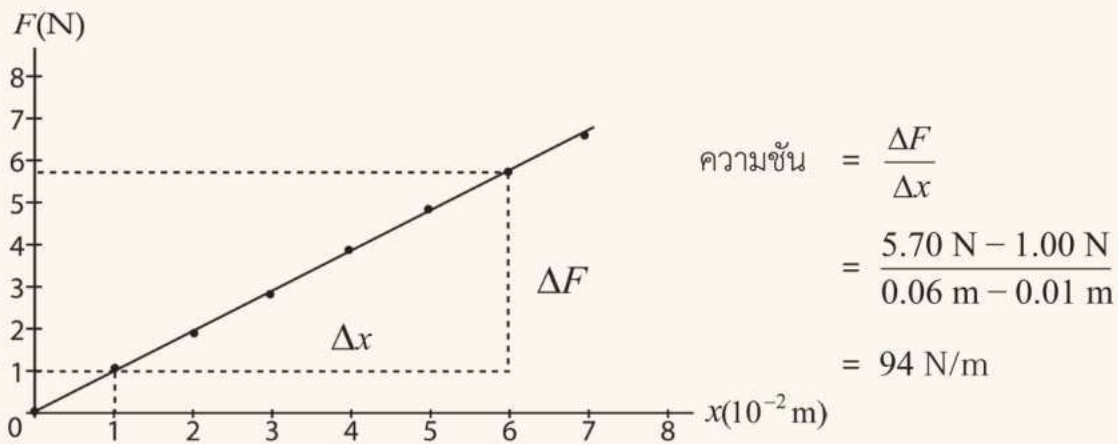
รูป การจัดอุปกรณ์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออก

2. ใช้เครื่องชั่งสปริงออกแรงดึงสปริงผ่านนอตสให้สปริงยืดออกจากตำแหน่งสมดุลครั้งละ 1 เซนติเมตร เมื่อนอตหยุดนิ่ง บันทึกขนาดของแรงดึงกับระยะที่สปริงยืดออกจากตำแหน่งสมดุลจนสปริงยืดออกเป็น 5 เซนติเมตร
3. เขียนกราฟระหว่างขนาดของแรงดึงกับระยะที่สปริงยืดออกโดยให้ขนาดของแรงดึงอยู่ในแกนตั้ง และระยะที่สปริงยืดออกอยู่ในแกนนอน
4. หาความชันของกราฟ
5. หางานของแรงที่ดึงที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากตำแหน่งสมดุล จากกราฟในข้อ 3.
6. เขียนกราฟระหว่างงานของแรงที่ดึงที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากตำแหน่งสมดุลอยู่ในแกนตั้ง กับกำลังสองของระยะที่สปริงยืดออกอยู่ในแกนนอน และหาความชันของกราฟ

### ตารางบันทึกผลการทดลอง

ระยะที่สปริงยืดออก (cm)	0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
ขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริง (N)	0	1.00	1.85	2.80	3.85	4.80	5.70	6.60

กราฟระหว่างขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออกเป็นดังนี้



รูป กราฟระหว่างขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออก

### การสรุปและอภิปรายผล

จากการทดลองพบว่า เมื่อออกแรงที่ใช้ดึงสปริงเพิ่มขึ้น ระยะที่สปริงยืดออกจะเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออก จะได้เส้นตรงผ่านจุดกำเนิด แสดงว่า ขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริง  $F$  แปรผันกับระยะที่สปริงยืดออก  $x$  ซึ่งเขียนได้ว่า

$$F \propto x$$

หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า  $F = kx$

เมื่อ  $k$  เป็นค่าคงตัวของการแปรผัน และเป็นความชันของกราฟเส้นตรงที่ผ่านจุดกำเนิด ความชันของกราฟระหว่างแรงที่ใช้ดึงสปริง  $F$  กับระยะที่สปริงยืดออก  $x$  มีค่า 94 นิวตันต่อเมตร

### ข้อเสนอแนะ

1. การจัดอุปกรณ์ ควรให้ตะขอของเครื่องชั่งสปริง และตะขอของสปริงอยู่ในแนวระดับ
2. ควรทำเครื่องหมายที่ปลายสุดท้ายของสปริงเป็นตำแหน่งของการสังเกตเพื่อวัดระยะยืด
3. วางไม้บรรทัดให้ใกล้กับสปริงมากที่สุด และขณะอ่านระยะยืดของสปริงควรให้สายตาอยู่ในแนวตั้งฉากกับไม้บรรทัดกับปลายสุดท้ายที่ทำเครื่องหมาย
4. การกำหนดสเกลของกราฟควรกำหนดให้เหมาะสม เพื่อให้ง่ายต่อการบันทึก
5. ระวังอย่าดึงสปริงจนเกินขีดจำกัดความยืดหยุ่นของสปริง เพราะอาจทำให้ตำแหน่งสมดุลของสปริงเปลี่ยนไป

## ภาคผนวก ข ลอการิทึม

ลอการิทึม (logarithm) เรียกว่า ล็อก (log) ถูกกำหนดดังนี้

$$\text{ถ้า } N = A^x \text{ ดังนั้น } \log_A N = x$$

$\log_A N = x$  อ่านว่า ลอการิทึมของจำนวน  $N$  บนฐาน  $A$  เท่ากับจำนวน  $x$  (ซึ่งเป็นเลขชี้กำลังของ  $A$ )  
ลอการิทึมที่ใช้กันมี 2 ชนิด คือ

1. ลอการิทึมสามัญ (common logarithm) เป็นลอการิทึมที่มีฐานเป็น 10 เขียนแทนด้วย  $\log_{10}$  หรือ  $\log$  ถ้า  $N = 10^x$  ดังนั้น  $x = \log_{10} N = \log N$

2. ลอการิทึมธรรมชาติ (natural logarithm) เป็นลอการิทึมที่มีฐานเป็น  $e = 2.718$  เขียนแทนด้วย  $\log_e$  หรือ  $\ln$  ถ้า  $N = e^x$  ดังนั้น  $x = \log_e N = \ln N$

สมบัติสำคัญของลอการิทึม มีดังนี้

$$\log(ab) = \log a + \log b \quad (1)$$

$$\log\left(\frac{a}{b}\right) = \log a - \log b \quad (2)$$

$$\log a^n = n \log a \quad (3)$$

สมบัติทั้งสามข้อนี้ใช้ได้ทั้งลอการิทึมสามัญ ลอการิทึมธรรมชาติ และแบบอื่น ๆ

ลอการิทึมสามัญและลอการิทึมธรรมชาติมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\log N = 0.4343 \ln N \quad \text{หรือ} \quad (4)$$

$$\ln N = 2.3026 \log N \quad (5)$$

ในหนังสือเรียนฟิสิกส์ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย มีสูตรและสมการที่เกี่ยวกับลอการิทึม ดังนี้

$$\beta = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad m = m_0 e^{-\lambda t} \quad N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{และ} \quad A = A_0 e^{-\lambda t}$$

ลอการิทึมของจำนวนบางจำนวนที่ควรจำได้ ได้แก่

$$\log 1 = 0 \quad \log 2 = 0.301 \quad \log e = 0.434 \quad \log 5 = 0.699 \quad \log 10 = 1 \quad \ln 2 = 0.693 \quad \ln e = 1$$

ในการหาค่าของลอการิทึมของจำนวนใด ๆ ต้องอาศัยตารางต่อไปนี้

ตาราง ข.1 ลอการิทึมสามัญ

$N$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1	0.000	0.041	0.079	0.114	0.146	0.176	0.204	0.230	0.255	0.279
2	0.301	0.322	0.342	0.362	0.380	0.398	0.415	0.431	0.447	0.462
3	0.477	0.491	0.505	0.519	0.531	0.544	0.556	0.568	0.580	0.591
4	0.602	0.613	0.623	0.633	0.643	0.653	0.663	0.672	0.681	0.690
5	0.699	0.708	0.716	0.724	0.732	0.740	0.748	0.756	0.763	0.771
6	0.778	0.785	0.792	0.799	0.806	0.813	0.820	0.826	0.833	0.839
7	0.845	0.851	0.857	0.863	0.869	0.875	0.881	0.886	0.892	0.898
8	0.903	0.908	0.914	0.919	0.924	0.929	0.935	0.940	0.944	0.949
9	0.954	0.959	0.964	0.968	0.973	0.978	0.982	0.987	0.991	0.996

ตารางนี้สามารถหาค่าของลอการิทึมของจำนวนระหว่าง 1.0 และ 9.9 จำนวนที่น้อยกว่า 1.0 และมากกว่า 9.9 ให้ใช้สมบัติข้อ (1)  $\log(ab) = \log a + \log b$  ดังตัวอย่าง

ตัวอย่าง 1 จงหา  $\log(420)$  และ  $\log(0.73)$

แนวคิด ในที่นี้  $N = 420$  และ  $0.73$  ซึ่งเราไม่สามารถหาค่าของ  $\log(420)$  และ  $\log(0.73)$  โดยตรงจากตารางได้ ต้องใช้สมบัติของลอการิทึม จากนั้นใช้ตาราง

วิธีทำ

$$\begin{aligned}\log(420) &= \log(4.2 \times 10^2) = \log(4.2) + \log(10^2) \\ &= 0.623 + 2 \\ &= 2.623\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\log(0.73) &= \log(7.3 \times 10^{-1}) = \log(7.3) + \log(10^{-1}) \\ &= 0.863 + (-1) \\ &= -0.137\end{aligned}$$

ตอบ ค่า  $\log(42)$  และ  $\log(0.73)$  เท่ากับ 2.623 และ -0.137 ตามลำดับ

ในกรณีที่ทราบค่าของลอการิทึม เช่น  $\log N = 3.748$  เราสามารถหา  $N$  โดยการกระทำย้อนกลับดังตัวอย่าง

**ตัวอย่าง 2** จงหา  $\log N = 3.748$  จงหา  $N$

**แนวคิด** เปรียบเทียบค่า  $N$  กับ ลอการิทึมที่ให้ค่า 3.748

**วิธีทำ**

$$\log N = 3 + 0.748$$

$$= \log(10^3) + \log(5.6) = \log(5.6 \times 10^3) = \log(5600)$$

$$N = 5600$$

**ตอบ**  $N$  เท่ากับ 5600



## คำศัพท์

**บทที่ 18 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า**

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave)  
 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic spectrum)  
 คลื่นวิทยุ (radio waves)  
 ไมโครเวฟ (microwave)  
 เรดาร์ (Radio Detection And Ranging : RADAR)  
 ระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลกหรือจีพีเอส (Global Positioning System: GPS)  
 รังสีอินฟราเรด (infrared)  
 แสงที่ตามองเห็น (visible light)  
 เลเซอร์ (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation: LASER)  
 รังสีเหนือม่วงหรือรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet)  
 รังสีเอกซ์ (X-Rays)  
 รังสีแกมมา (gamma rays)  
 คลื่นโพลาไรส์เชิงเส้น (linear polarized wave)  
 โพลาไรส์เชิงเส้นในแนวตั้ง (vertically polarized)  
 แสงไม่โพลาไรส์ (unpolarized light)  
 แสงโพลาไรส์เชิงเส้น (linear polarized light)  
 โพลาไรเซชัน (polarization)  
 เครื่องฉายรังสีเอกซ์ (X-ray machine)  
 หลอดรังสีเอกซ์ (X-ray tube)  
 เครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (Computed Tomography Scan : CT Scan)  
 ระบบดาวเทียมนำร่อง (Global Navigation Satellite System : GNSS)  
 เครื่องถ่ายภาพการสั่นพ้องแม่เหล็กหรือเครื่องเอ็มอาร์ไอ (magnetic resonance imaging : MRI)  
 การสั่นพ้องแม่เหล็กนิวเคลียร์ หรือเอ็นเอ็มอาร์ (nuclear magnetic resonance : NMR)  
 เส้นใยนำแสง (optical fiber)  
 สัญญาณแอนะล็อก (analog signal)  
 สัญญาณดิจิทัล (digital signal)

**บทที่ 19 ฟิสิกส์อะตอม**

ฟิสิกส์แบบฉบับ (classical physics)  
 ฟิสิกส์อะตอม (atomic physics)  
 ฟิสิกส์ควอนตัม (quantum physics)

การรังสีความร้อน (thermal radiation)  
 สเปกตรัมต่อเนื่อง (continuous spectrum)  
 การแผ่รังสีของวัตถุดำ (blackbody radiation)  
 สมมติฐานของพลังค์ (Planck's hypothesis)  
 ควอนตัมของพลังงาน (quantum of energy)  
 ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant)  
 เลขควอนตัม (quantum number)  
 รังสีแคโทด (cathode ray)  
 อนุภาคแอลฟา (alpha particle)  
 สเปกตรัมแบบเส้น (line spectrum)  
 โมเมนตัมเชิงมุม (angular momentum)  
 รัศมีโบร์ (Bohr radius)  
 ระดับพลังงาน (energy level)  
 สถานะพื้น (ground state)  
 สถานะกระตุ้น (excited state)  
 ค่าคงตัวริดเบิร์ก (Rydberg's constant)  
 อนุกรมบัลเมอร์ (Balmer series)  
 กลศาสตร์ควอนตัม (quantum mechanics)  
 ความน่าจะเป็น (probability)  
 ฟังก์ชันคลื่น (wave function)  
 ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect)  
 โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron)  
 กระแสโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectric current)  
 โฟตอน (photon)  
 ความถี่ขีดเริ่ม (threshold frequency)  
 ฟังก์ชันงาน (work function)  
 ศักย์หยุดยั้ง (stopping potential)  
 สมมติฐานของเดอบรอยล์ (de Broglie's hypothesis)  
 ความยาวคลื่นเดอบรอยล์ (de Broglie wavelength)  
 ทวิภาวะของคลื่นและอนุภาค (wave-particle duality)  
 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscope)  
 เลเซอร์ (laser)  
 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (electronic device)  
 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope หรือ TEM)  
 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope หรือ SEM)

**บทที่ 19 ฟิสิกส์อะตอม (ต่อ)**

ความละเอียดของภาพ (resolution)  
แสงเลเซอร์ (laser light)  
ไดโอด (diode)  
ทรานซิสเตอร์ (transistor)  
สารกึ่งตัวนำ (semiconductor)  
แถบนำไฟฟ้า (conduction band)  
สารกึ่งตัวนำชนิดบวก (p-type semiconductor)  
สารกึ่งตัวนำชนิดลบ (n-type semiconductor)  
โฮล (hole)

**บทที่ 20 ฟิสิกส์นิวเคลียร์ และฟิสิกส์อนุภาค**

นิวคลีออน (nucleon)  
แรงนิวเคลียร์ (nuclear force)  
นิวเคลียสเสถียร (stable nucleus)  
ไอโซโทป (isotope)  
เลขอะตอม (atomic number)  
เลขมวล (mass number)  
พลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy หรือ nuclear binding energy)  
ดิวเทอรอน (deuteron)  
ดิวเทอเรียม (deuterium)  
ทริทอน (triton)  
ทริเทียม (tritium)  
ส่วนพร่องมวล (mass defect)  
การแผ่รังสี (radiation)  
กัมมันตภาพรังสี (radioactivity)  
ไอโซโทปกัมมันตรังสี (radioactive isotope)  
ธาตุกัมมันตรังสี (radioactive element)  
รังสีแอลฟา (alpha rays)  
รังสีบีตา (beta rays)  
รังสีแกมมา (gamma rays)  
รังสีชนิดก่อไอออน (ionizing radiation)  
รังสีชนิดไม่ก่อไอออน (non-ionizing radiation)  
รังสีนิวตรอน (neutron rays)  
รังสีโปรตอน (proton rays)  
รังสีคอสมิก (cosmic rays)  
การสลายกัมมันตรังสี (radioactive decay)

การสลาย (decay)  
นิวเคลียสกัมมันตรังสี (radioactive nucleus)  
การสลายให้แอลฟา (alpha decay)  
การสลายให้บีตา (beta decay)  
การสลายให้แกมมา (gamma decay)  
อนุกรมกัมมันตรังสี (radioactive series)  
ลูกโซ่การสลายกัมมันตรังสี (decay chain)  
กัมมันตภาพ (activity)  
เครื่องนับรังสีแบบไกเกอร์มิลเลอร์ (Geiger-Müller counter)  
เครื่องนับไกเกอร์ (Geiger counter)  
ค่าคงตัวการสลาย (decay constant)  
ครึ่งชีวิต (half-life)  
ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (nuclear reaction)  
ฟิชชัน (fission)  
พลังงานนิวเคลียร์ (nuclear energy)  
ปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction)  
เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactor)  
เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (nuclear fuel)  
ตัวหน่วงความเร็วนิวตรอน (moderator)  
แท่งควบคุม (control rod)  
ฟิวชัน (fusion)  
เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerator)  
เครื่องตรวจจับอนุภาค (particle detector)  
อนุภาคมูลฐาน (elementary particle)  
ห้องหมอก (cloud chamber)  
โพซิตรอน (positron)  
ปฏิยานุภาค (antiparticle)  
แอนติโปรตอน (antiproton)  
แอนตินิวตรอน (antineutron)  
การประลัย (annihilation)  
อนุภาคสื่อแรง (force-carrier particle หรือ force carrier)  
มีซอน (meson)  
ไพออน (pion)  
มิวออน (muon)  
อนุภาคประหลาด (strange particle)  
นิวทริโน (neutrino)  
อิเล็กตรอนนิวทริโน (electron-neutrino)

**บทที่ 20 ฟิสิกส์นิวเคลียร์ และฟิสิกส์อนุภาค (ต่อ)**

อิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน (electron-antineutrino)

มิวออนนิวทริโน (muon neutrino)

ทาวนิวทริโน (tau neutrino)

ควาร์ก (quark)

ควาร์กอัพ (up quark)

ควาร์กดาวน์ (down quark)

ควาร์กสเตรนจ์ (strange quark)

ควาร์กชาร์ม (charm quark)

ควาร์กบอททอม (bottom quark) หรือ ควาร์กบิวตี้ (beauty quark)

ควาร์กท็อป (top quark) หรือ ควาร์กทรูธ (truth quark)

เครื่องเร่งเชิงเส้น (linear accelerator หรือ linac)

เครื่องเร่งแนววงกลม (circular accelerator)

อนุภาคสสาร (matter particle)

อนุภาคฮิกส์โบซอน (Higgs boson)

เลปตอน (lepton)

กลูออน (gluon)

แรงเข้ม (strong force)

ดับเบิลยูโบซอน (W-boson)

ซีโบซอน (Z-boson)

แรงอ่อน (weak force)

แกรวิตอน (graviton)

แอนติควาร์ก (antiquark)

แอนติควาร์กดาวน์ (down antiquark)

แอนติควาร์กอัพ (up antiquark)

เครื่องถ่ายภาพรังสีระนาบด้วยการปล่อยโพซิตรอน (Positron Emission Tomography scanner)

เครื่องเพท (positron emission tomography scanner : PET scanner)

### บรรณานุกรม

- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2557). **หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 5.** (พิมพ์ครั้งที่ 6). กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ สกสค. ลาดพร้าว.
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2558). **หนังสือเรียนรัฐเพิ่มเติมเพื่อเสริมศักยภาพ ฟิสิกส์ เล่ม 5.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ : บริษัท พัฒนาคุณภาพวิชาการ (พว.) จำกัด.
- สราวุฒิ สุจิตจร, ประพงษ์ คล้ายสุบรรณ, วันทนา คล้ายสุบรรณ, สุพัฒน์ กลิ่นเขียว, สำเริง ด้วงนิล, วราภรณ์ ตัณฑนุช, ศิริวัช สุนทรานนท์. **ครายุทธ ตันมี และสมใจ ชื่นเจริญ.** (2561). **หนังสือทศวรรษ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). จ.นครราชสีมา : บริษัท โคราช มาร์เก็ตติ้ง แอนด์ โปรดักชั่น.
- สำนักงานราชบัณฑิตยสภา. (2546). **ศัพท์วิทยาศาสตร์ อังกฤษ-ไทย ไทย-อังกฤษ ฉบับราชบัณฑิตยสถาน.** (พิมพ์ครั้งที่ 5 แก้ไขเพิ่มเติม). กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด อรุณการพิมพ์.
- สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. **ศัพทานุกรมนิวเคลียร์.** กรุงเทพฯ : สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. 2552.
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2532). **หนังสือเรียนวิชาฟิสิกส์ เล่ม 5.** (พิมพ์ครั้งที่ 5) กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์คุรุสภา ลาดพร้าว.
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2554). **หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 4** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์คุรุสภา ลาดพร้าว.
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2562). **หนังสือเรียนรายวิชาพื้นฐานวิทยาศาสตร์ วิทยาศาสตร์กายภาพ เล่ม 2.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน.
- สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.) (2553). **เล่าเรื่อง อาหารฉายรังสี**  
โครงการโรงเรียนภาคฤดูร้อนเทคโนโลยีนิวเคลียร์ 2553 สืบค้นเมื่อวันที่ 26 กรกฎาคม 2562  
จาก <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc53/content/nstkc53-016.html>

Division of Physics of Beams of the American Physical Society. (2013).

**Accelerators and Beams: Tool of Discovery and Innovation.** (4<sup>th</sup> ed). Retrieved January 15, 2019 from [https://www.aps.org/units/dpb/upload/accel\\_beams\\_2013.pdf](https://www.aps.org/units/dpb/upload/accel_beams_2013.pdf).

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- Eddington, A. S. (1920). The Internal Constitution of the Stars. **The Scientific Monthly**, 11(4), 297-303.
- Giancoli, D. C. (2014). **Physics: Principles with Applications**. (7<sup>th</sup> ed). Pearson.
- Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. (2013). **Fundamentals of Physics**. (10<sup>th</sup> ed). John Wiley & Sons, Inc.
- International Union of Pure and Applied Chemistry. (2019). **Periodic Table of Elements**. Retrieved January 15, 2019 from <https://iupac.org/what-we-do/periodic-table-of-elements>.
- International Commission on Radiological Protection. (2007). **ICRP Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. Retrieved January 15, 2019 from [https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB\\_37\\_2-4](https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_37_2-4)
- ITER Organization Head of Communication. (2019). **The ITER Tokamak**. Retrieved January 15, 2019, from <https://www.iter.org/mach>
- ITER Organization Head of Communication. (2019). **Plasma Confinement**. Retrieved January 15, 2019, from <https://www.iter.org/sci/PlasmaConfinement>
- Serway, R. A., Jewett, Jr., J. W. (2014). **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics**. (10<sup>th</sup> ed). Brooks/Cole.
- Sang, D., Jones, G., Chadha G., Woodside R. (2014). **Cambridge International AS and A Level Physics Coursebook**. (2<sup>th</sup> ed). Cambridge University Press.
- Stumpe, B., Sutton, C. (2010). The first capacitive touch screens at CERN. **CERN Courier**. Retrieved January 15, 2019 from <https://cerncourier.com/a/the-first-capacitive-touch-screens-at-cern/>
- Watanabe, Y., Shimada, M. Yamashita, K. (2015). **Let's Start Learning Radiation: Supplementary Material on Radiation for Secondary School Students**. Japan Atomic Energy Agency.
- Young, H.D., Freedman, R. A. (2015). **Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics**. (14<sup>th</sup> ed). Pearson.

## ที่มาของรูป

หน้า	รูป	ที่มา
1	รูปเปิดบทที่ 18	shutterstock_1197282490
14	18.6 ตัวอย่างภาพถ่ายโดยรังสีอินฟราเรด	โรงเรียนกำเนิดวิทย์
20	18.7 ก. การตรวจหาวัตถุอันตรายใน กระเป๋าดำเดินทางจากเครื่องฉายรังสีเอกซ์	shutterstock_1074820118
28	18.12 ส่วนประกอบของเครื่อง ฉายรังสีเอกซ์	โรงพยาบาลสุขุมวิท
29	18.14 แบบดิจิทัล	โรงพยาบาลสุขุมวิท
31	18.15 ส่วนประกอบของซีทีสแกน	โรงพยาบาลสุขุมวิท
32	18.17 ภาพภาคตัดขวางของลำตัวจาก ซีทีสแกน	โรงพยาบาลสุขุมวิท
36	18.22 ส่วนประกอบของเครื่องถ่ายภาพ สันป่องแม่เหล็ก	โรงพยาบาลสุขุมวิท
37	18.23 ตัวอย่างภาพถ่ายจากเครื่องถ่ายภาพ สันป่องแม่เหล็ก	โรงพยาบาลสุขุมวิท
39	18.24 การส่งสัญญาณเสียงของสถานี ของสถานีวิทยุ	pixabay_36800
41	18.26 การรับและส่งสัญญาณของเครือข่าย โทรศัพท์เคลื่อนที่	pixabay_410311 pixabay_410324
42	วิวัฒนาการของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่	nevoski from Pixabay Clker-Free-Vector-Images from Pixabay OpenClipart-Vectors from Pixabay Niran Kasri from Pixabay cdz from Pixabay
43	18.27 อุปกรณ์จัดเส้นทาง หรือ เราเตอร์	OpenClipart-Vectors from Pixabay

## ที่มาของรูป (ต่อ)

หน้า	รูป	ที่มา
44	18.29 ก. เส้นใยนำแสงที่นำมาใส่ในแจกัน	955169 from Pixabay
51	รูปนำบท กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	KENNETH RODRIGUES from Pixabay
98	รูป 19.21 ข. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)
99	รูป 19.22 ก. ไวรัสโปลิโอจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	CDC/ Dr. Fred Murphy, Sylvia Whitfield
99	รูป 19.22 ข. ละอองเรณูของดอกทานตะวันจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	Dartmouth College Electron Microscope Facility
111	รูปนำบท อัญมณีโทแพซ	shutterstock_87620740
131	รูป 20.5 การทดลองการปล่อยรังสีของสารเรืองแสงเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงแดดของแบ็กเกอร์	OpenClipart-Vectors from Pixabay
132	รูป ผลึกแร่ที่มียูเรเนียมเป็นองค์ประกอบ	Shutterstock_1355364992
133	รูป 20.6 การเปรียบเทียบธาตุกัมมันตรังสีกับหลอดไฟ	OpenClipart-Vectors from Pixabay
137	รูป 20.9 การแผ่รังสีแอลฟาและบีตาทำให้มีธาตุใหม่เกิดขึ้น	OpenClipart-Vectors from Pixabay
150	รูป เครื่องปั้นดินเผาบ้านเชียง	Kiwiodyssey
161	รูป 20.21 ก. ตัวอย่างภาพถ่ายรอยทางของอนุภาคที่แบล็กเกตใช้วิเคราะห์	Patrick M.S. Blackett
168	รูป 20.25 ภาพวาดของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ชิคาโกไฟลิวิน (Chicago Pile 1) ที่แฟร์มิใช้ทดลอง	Melvin A. Miller of the Argonne National Laboratory
176	รูป ภาพคอมพิวเตอร์กราฟิกของภาคตัดขวางของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ฟิวชันภายใต้โครงการ International Thermonuclear Experimental Reactor	Conleth Brady / IAEA

## ที่มาของรูป (ต่อ)

หน้า	รูป	ที่มา
177	รูป 20.28 ตัวอย่างเครื่องฉายรังสีแกมมาสำหรับการรักษามะเร็ง	Shutterstock_228667765
179	รูป 20.31 ยางรถยนต์และพลาสติกที่ผ่านการฉายรังสีทำให้มีสมบัติบางอย่างดีขึ้น	Quique from Pixabay JJuni from PixabayOpenClipart-Vectors from Pixabay
179	รูป 20.32 ก. ทัวร์มาลีนสีชมพูบนควอตซ์สีขาวก่อนได้รับการฉายรังสีแกมมา	shutterstock_1016473438
179	รูป 20.32 ข. ทัวร์มาลีนหลังได้รับการฉายรังสีแกมมา	shutterstock_771681112
180	รูป 20.34 ก. พุทธรักษาพันธุ์เดิม	Bishnu Sarangi from Pixabay
180	รูป 20.34 ข. พุทธรักษาที่ผ่านการฉายรังสี	C B from Pixabay
181	รูป 20.36 รังสีจากสิ่งแวดล้อมและรังสีในร่างกายมนุษย์	Freepik.com OpenClipart-Vectors from Pixabay
183	รูป 20.38 แท่งเหล็กที่หุ้มโคบอลต์-60 จำนวน 2 แท่งที่คนเก็บของเก่าเก็บได้ที่ จังหวัดสมุทรปราการ	สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ
184	รูป 20.40 ชุดกำบังรังสีที่มีแผ่นตะกั่วอยู่ข้างใน	shutterstock_1304919445
186	รูป 20.42 ก. เครื่องเร่งอนุภาคแอลเอชซีในอุโมงค์	CERN
186	รูป 20.42 ข. เครื่องตรวจวัดอนุภาคแอลทาส	CERN
187	รูป 20.44 ก. ภาพถ่ายรอยทางของโพซิตรอนในเครื่องตรวจวัดอนุภาคแบบห้องหมอก	Carl D. Anderson
189	รูป 20.46 รังสีคอสมิก	Suhai_hilal from Pixabay
192	รูป 20.47 ภาพถ่ายจากด้านบนแสดงเครื่องเร่งอนุภาคแนวตรงสแตนฟอร์ดที่ค้นพบควาร์ก	Peter Kaminski



## ที่มาของรูป (ต่อ)

หน้า	รูป	ที่มา
194	รูป 20.48 แผนภาพแสดงการจัดกลุ่มอนุภาคมูลฐานตามแบบจำลองมาตรฐานของฟิสิกส์อนุภาค	Cush, MissMJ
196	รูป 20.49 ภาพที่สร้างจากคอมพิวเตอร์ แสดงเหตุการณ์ที่โปรตอนมาชนกันที่พลังงานสูง ทำให้เกิดอนุภาคชนิดต่าง ๆ จำนวนมาก ซึ่งหนึ่งในนั้นคือ อนุภาคฮิกส์โบซอน	CERN
197	รูป ก. ภาพจำลองสามมิติของเครื่องตรวจวัดอนุภาคซีเอ็มเอส	CERN
197	รูป ข. ภาพส่วนหนึ่งของภาคตัดขวางของเครื่องตรวจวัดอนุภาคซีเอ็มเอส แสดงชั้นต่าง ๆ ที่มีอนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน	CERN
200	รูป 20.53 เครื่องตรวจวัดอนุภาคซีเอ็มเอส	CERN
200	รูป 20.54 เครื่องถ่ายภาพรังสีระนาบด้วยการปล่อยโพซิตรอนหรือเครื่องเพท	Jens Maus ( <a href="http://jens-maus.de/">http://jens-maus.de/</a> )
203	รูป เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน จ.นครราชสีมา	สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)
204	รูป 20.59 ก. เครื่องสแกนกระเปาะด้วยรังสีเอ็กซ์ที่สนามบิน	shutterstock_632849699
204	รูป 20.59 ข. ภาพแสดงสิ่งของที่ทำจากวัสดุชนิดต่าง ๆ ในกระเปาะเมื่อผ่านการสแกนด้วยรังสีเอ็กซ์	shutterstock_539405011
205	รูป 20.60 จอสัมผัสของโทรศัพท์เคลื่อนที่	Pexels from Pixabay

คณะผู้จัดทำหนังสือเรียน รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 เล่ม 6  
ตามผลการเรียนรู้ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560)  
ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐานพุทธศักราช 2551

### คณะที่ปรึกษา

1. ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์ ผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. ดร.วนิดา ธนประโยชน์ศักดิ์ ผู้ช่วยผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คณะผู้จัดทำหนังสือเรียน รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์  
ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 เล่ม 6

1. ผศ. ดร.บุรินทร์ อัครพิภพ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. ผศ. ดร.นฤมล สุวรรณจันทร์ดี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. รศ. ดร.พวงรัตน์ ไพเราะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
4. ผศ. ดร.พรรรัตน์ วัฒนกลีวิชช์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
5. รศ. ดร.วิวัฒน์ ยงค์ดี มหาวิทยาลัยขอนแก่น
6. นายสมิตร สอนสุข โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร
7. นายรังสรรค์ ศรีสาคร ผู้เชี่ยวชาญ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก  
สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
8. นายบุญชัย ต้นไถง ผู้ชำนาญ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก  
สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
9. นายวัฒน์ มากชื่น ผู้ชำนาญ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก  
สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
10. นายไฉลิต ลิงหลุต ผู้ชำนาญ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก  
สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คณะผู้จัดทำหนังสือเรียน รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิลิกส์  
ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 เล่ม 6 (ต่อ)

- |                              |  |
|------------------------------|--|
| 11. นายวินัย เลิศเกษมสันต์   | ผู้อำนวยการ สาขาฟิลิกส์และวิทยาศาสตร์โลก<br>สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี      |
| 12. นายรักษพล ธนานวงค์       | นักวิชาการอาวุโส สาขาฟิลิกส์และวิทยาศาสตร์โลก<br>สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี |
| 13. ดร.กวิณ เชื้อมกลาง       | นักวิชาการอาวุโส สาขาฟิลิกส์และวิทยาศาสตร์โลก<br>สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี |
| 14. ดร.ปรีดา พัทธมณีกรณ์     | นักวิชาการ สาขาฟิลิกส์และวิทยาศาสตร์โลก<br>สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี       |
| 15. ดร.จำเริญตา ปริญญาธารมาศ | นักวิชาการ สาขาฟิลิกส์และวิทยาศาสตร์โลก<br>สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี       |
| 16. นายเทพนคร แสงหัวช้าง     | นักวิชาการ สาขาฟิลิกส์และวิทยาศาสตร์โลก<br>สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี       |
| 17. นายจอมพรรค นวลดี         | นักวิชาการ สาขาฟิลิกส์และวิทยาศาสตร์โลก<br>สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี       |
| 18. นายสรจิตต์ อาวีรัตน์     | นักวิชาการ สาขาฟิลิกส์และวิทยาศาสตร์โลก<br>สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี       |
| 19. นายธนระวีชต์ คัญทักษ์    | นักวิชาการ สาขาฟิลิกส์และวิทยาศาสตร์โลก<br>สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี       |

คณะผู้ร่วมพิจารณาหนังสือเรียน รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์  
ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 เล่ม 6 (ฉบับร่าง)

- |                                 |   |
|---------------------------------|---|
| 1. นายประสิทธิ์ สลัดทุกข์       | ข้าราชการเกษียณ จ.ตรัง  |
| 2. นายพลพิพัฒน์ วัฒนเศรษฐานุกูล | สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษามัธยมศึกษาเขต 2 กรุงเทพมหานคร                                 |
| 3. นางจรรุณี จิตสุภานันท์       | โรงเรียนย่านตาขาวรัฐชนูปถัมภ์ จ.ตรัง  |
| 4. นายชรินทร์ วัฒนธีรางกูร      | โรงเรียนพระปฐมวิทยาลัย จ.นครปฐม   |
| 5. นายเมธี มีแก้ว               | โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ จ.ประจวบคีรีขันธ์                                       |
| 6. นายนิกรณ นิลพงษ์             | โรงเรียนศรีคุณวิทยบาลังก จ.อำนาจเจริญ   |
| 7. นางสาวกวิสรา อุ่นไธสง        | โรงเรียนปทุมคงคา กรุงเทพมหานคร  |
| 8. นางสาวสายชล สุขโข            | โรงเรียนจ่านกร้อง จ.พิษณุโลก  |
| 9. นายวีรภัทร์ โปณะทอง          | โรงเรียนภูเก็ตวิทยาลัย จ.ภูเก็ต   |
| 10. นางฤทัย เพลงวัฒนา           | ผู้อำนวยการ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก<br>สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี |
| 11. ดร.นันทน์ภัส ลิมสันติธรรม   | ผู้อำนวยการสาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก<br>สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  |

### คณะบรรณาธิการ

- |                              |   |
|------------------------------|---|
| 1. ดร.ศักดิ์ สุวรรณฉาย       | นักวิชาการอิสระ   |
| 2. ผศ. ดร.บุรินทร์ อัครพิภพ  | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย   |
| 3. ผศ. ดร.เดชา ศุภพิทยาภรณ์  | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  |
| 4. ผศ. ดร.ประสงค์ เกษราธิคุณ | มหาวิทยาลัยทักษิณ   |
| 5. นายบุญชัย ต้นไธง          | ผู้อำนวยการ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก<br>สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี |
| 6. นายวัฒน์ มากชื่น          | ผู้อำนวยการ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก<br>สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี |
| 7. นายโฆสิต สิงหสูต          | ผู้อำนวยการ สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์โลก<br>สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี |

## ค่าคงตัวและข้อมูลทางกายภาพอื่น ๆ

### ค่าคงตัว

ปริมาณ	สัญลักษณ์	ค่าประมาณ
อัตราเร็วของแสง	$c, c_0$	$3.0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
ค่าคงตัวโน้มถ่วง	$G$	$6.6726 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$
ค่าคงตัวพลังค์	$h$	$6.6261 \times 10^{-34} \text{ J s}$
ประจุมูลฐาน	$e$	$1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$
ค่าคงตัวริดเบิร์ก	$R_\infty$	$1.0974 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$
รัศมีโบร์	$a_0$	$5.2918 \times 10^{-11} \text{ m}$
มวลอิเล็กตรอน	$m_e$	$9.1094 \times 10^{-31} \text{ kg}$
มวลโปรตอน	$m_p$	$1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg}$
มวลนิวตรอน	$m_n$	$1.6749 \times 10^{-27} \text{ kg}$
มวลดิวเทอรอน	$m_d$	$3.3436 \times 10^{-27} \text{ kg}$
ค่าคงตัวอวอกาโดร	$N_A, L$	$6.0221 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
ค่าคงตัวมวลอะตอม	$m_u$	$1.6605 \times 10^{-27} \text{ kg}$
ค่าคงตัวแก๊ส	$R$	$8.3145 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
ค่าคงตัวโบลต์ซมันน์	$k_B$	$1.3807 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

### ข้อมูลทางกายภาพอื่น ๆ

ปริมาณ	ค่า
มวลของโลก	$5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$
มวลของดวงจันทร์	$7.36 \times 10^{22} \text{ kg}$
มวลของดวงอาทิตย์	$1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$
รัศมีของโลก (เฉลี่ย)	$6.38 \times 10^3 \text{ km}$
รัศมีของดวงจันทร์ (เฉลี่ย)	$1.74 \times 10^3 \text{ km}$
รัศมีของดวงอาทิตย์ (เฉลี่ย)	$6.96 \times 10^5 \text{ km}$
ระยะทางระหว่างโลกและดวงจันทร์ (เฉลี่ย)	$3.84 \times 10^5 \text{ km}$
ระยะทางระหว่างโลกและดวงอาทิตย์ (เฉลี่ย)	$1.496 \times 10^8 \text{ km}$



สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
กระทรวงศึกษาธิการ