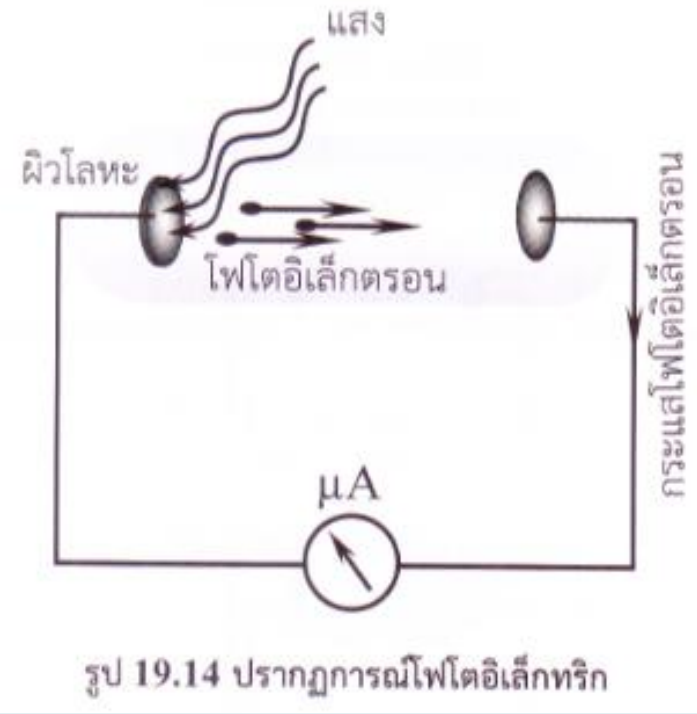
19.2 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

จุดประสงค์การเรียนรู้

1. อธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

2. อธิบายและคำนวณพลังงานโฟตอน พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน และฟังก์ชันงานของโลหะ

19.2.1 ควอนตัมของแสงและโฟตอน



รูป 19.14 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

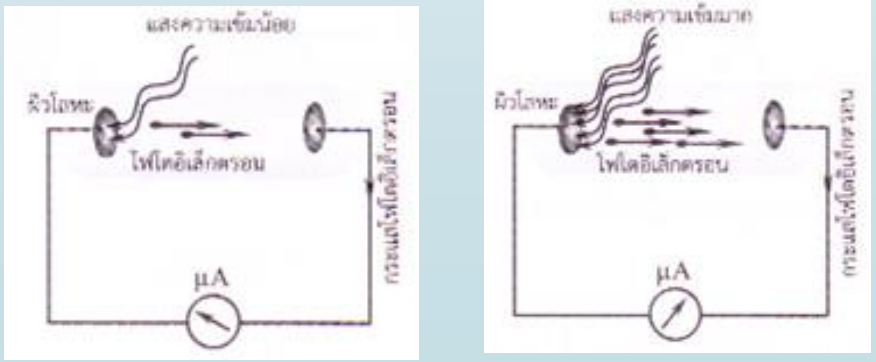
คำถาม เมื่อฉายแสงที่มีความถี่เหมาะสมลงบน ผิวโลหะ จะเป็นอย่างไร

สรุปได้ว่า

คำถาม จากสมมติฐานของพลังค์สามารถอธิบายการแผ่ของวัตถุดำ การแผ่ของแก๊สร้อน และโครงสร้างของอะตอมได้อย่างถูกต้อง ในขณะที่ฟิสิกส์แบบฉบับไม่สามารถอธิบายได้นั้น สมมติฐานของพลังค์สามารถนำมาอธิบายการเกิดโฟโตอิเล็กทริกได้หรือ ไม่อย่างไร

19.2.1 ควอนตัมของแสงและโฟตอน

ตารางที่ 19.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองของเฮิรตซ์กับแนวคิดฟิสิกส์แบบฉบับ

หัวข้อศึกษา	ผลการทดลอง	แนวคิดฟิสิกส์แบบฉบับ
การเกิดโฟโตอิเล็กตรอนสำหรับโลหะชนิดหนึ่ง ๆ	• การเกิดโฟโตอิเล็กตรอนไม่ขึ้นกับความเข้มแสงที่ใช้ แต่ขึ้นกับความถี่หรือความยาวคลื่นของแสง • ความถี่ของแสงที่ใช้ต้องมากกว่าค่า ๆ หนึ่งหากน้อยกว่านั้นไม่ว่าแสงจะมีความเข้มมากเท่าใดก็ตามก็จะไม่เกิดโฟโตอิเล็กตรอน • เมื่อเปลี่ยนชนิดของโลหะความถี่ของแสงที่ใช้ทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนก็จะเปลี่ยนไป	การเกิดโฟโตอิเล็กตรอนขึ้นกับความเข้มแสง ถ้าความเข้มแสงมากพอก็จะเกิดได้ โดยไม่ขึ้นกับความถี่ของแสงที่ใช้
จำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น	• จำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่เกิดไม่ขึ้นกับความถี่ของแสงที่กระทบแต่ขึ้นกับความเข้มของแสงที่ใช้ • แสงที่มีความเข้มมาก จะทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนจำนวนมากกว่าแสงความเข้มน้อยกว่า 	ไม่มีแนวคิดเกี่ยวกับเรื่องนี้

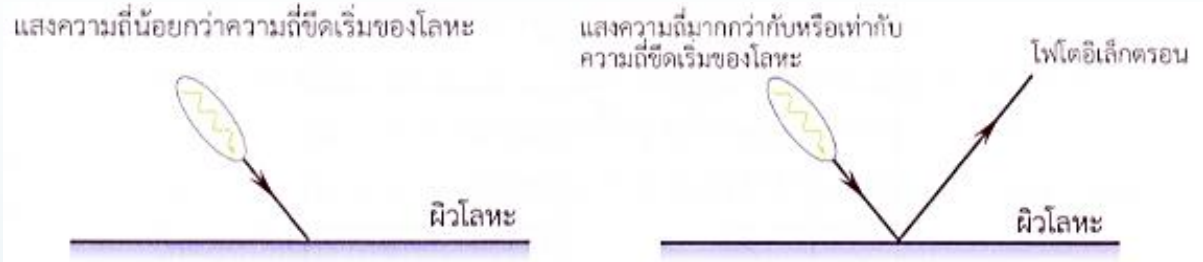
19.2.1 ควอนตัมของแสงและโฟตอน

ตารางที่ 19.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองของเฮิรตซ์กับแนวคิดฟิสิกส์แบบฉบับ

หัวข้อศึกษา	ผลการทดลอง	แนวคิดฟิสิกส์แบบฉบับ
พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน	• พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนไม่ขึ้นกับความเข้มแสงแต่ขึ้นกับความถี่ของแสง • หากใช้แสงที่มีความเข้มต่างกัน แต่มีความถี่เท่ากัน พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนจะมีค่าเท่ากัน • หากใช้ความเข้มแสงเท่ากันแสงที่มีความถี่มากกว่า พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนจะมีค่ามากกว่าเมื่อใช้แสงที่มีความถี่ต่ำกว่า	• พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนขึ้นกับความเข้มแสง แสงที่มีความเข้มสูงพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนจะมีค่ามาก

19.2.2 ฟังก์ชันงานและพลังจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน

ให้นักเรียนสืบค้นนักวิทยาศาสตร์ท่านใดสามารถอธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกและให้คำอธิบายไว้อย่างไร



รูป 19.15 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

ใช้รูป 19.15 จนสรุปได้ว่า ไอน์สไตน์ใช้สมมติฐานควอนตัมพลังงานแสงของพลังค์อธิบายว่า แสงแสดงสมบัติเป็นอนุภาค เรียกว่า **ควอนตัมของแสง** ซึ่งต่อมาเรียกว่า **โฟตอน** โดยแต่ละโฟตอนมีพลังงานเท่ากับ hf เมื่อโฟตอน 1 โฟตอน ตกกระทบบนผิวโลหะ จะถ่ายโอนพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอน 1 อิเล็กตรอน ถ้าความถี่ของแสงที่ใช้มีค่าเท่ากับความถี่ขีดเริ่ม f_0 ก็จะเกิดโฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะพอดี และพลังงานของโฟตอนจะเท่ากับฟังก์ชันงานของโลหะ หากความถี่ของแสงที่ใช้มีค่ามากกว่าความถี่ขีดเริ่ม อิเล็กตรอนที่หลุดจากผิวโลหะจะมีพลังงานจลน์ตามสมการ $hf = W + E_{kmax}$

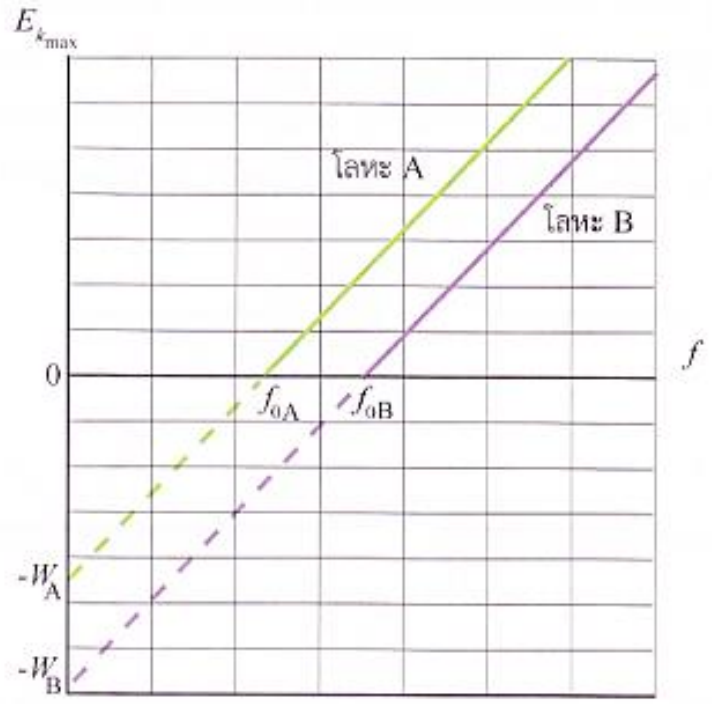
โดย hf คือ พลังงานของโฟตอนที่มีความถี่ f ที่ฉายลงบนผิวโลหะ

W คือ พลังงานที่น้อยที่สุดของโฟตอนที่ทำให้มีโฟโตอิเล็กตรอนได้ มีค่าเท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนในโลหะ เรียกอีกอย่างว่า **ฟังก์ชันงาน** (Work function)

E_{kmax} คือ พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน

19.2.2 ฟังก์ชันงานและพลังจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน

คำถาม จากสมการ $E_{kmax} = hf - W$ (19.7b) หากเปลี่ยนค่าความถี่ของแสงที่กระทบโลหะใดโลหะหนึ่ง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนกับความถี่แสงมีลักษณะอย่างไร



รูป 19.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์สงสดของโฟโตอิเล็กตรอนกับ

จากรูป 19.16 สรุปได้ว่า

19.2.2 ฟังก์ชันงานและพลังจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน

จากกราฟ ในรูป 19.16 เราสามารถอธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกได้ดังนี้

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

19.2.2 ฟังก์ชันงานและพลังจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน

คำถามชวนคิด

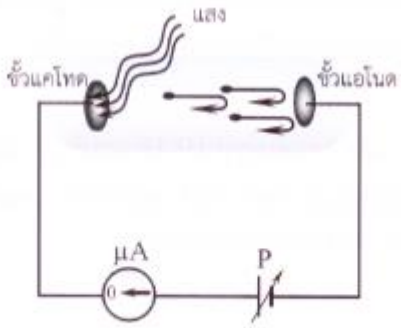
เมื่อแสงกระทบผิวโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ โซเดียม ทองแดง และทองคำ ถ้าแสงที่ตกกระทบมีพลังงาน เท่ากับ 6 อิเล็กตรอนโวลต์ จงเรียงลำดับพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนของโลหะทั้งสามจากน้อยไปมาก โดยใช้ข้อมูลจากตาราง 19.2

ตาราง 19.2 ตัวอย่างฟังก์ชันงานของโลหะบางชนิด

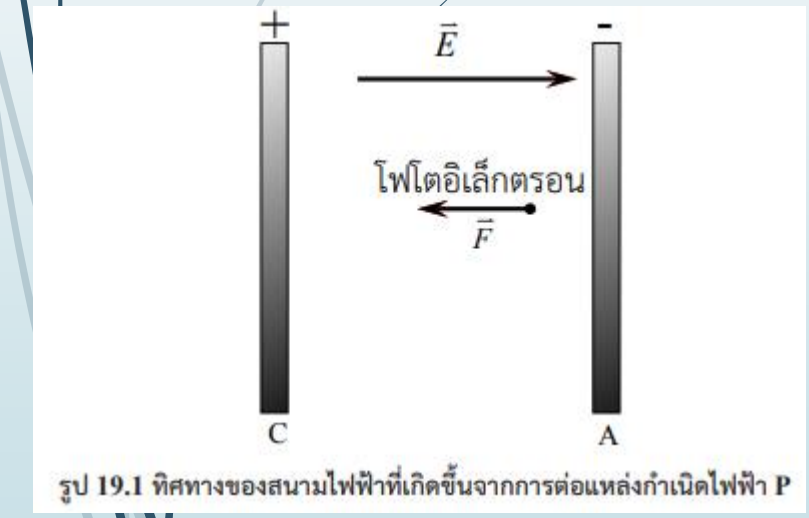
โลหะ	สัญลักษณ์	ฟังก์ชันงาน (eV)	โลหะ	สัญลักษณ์	ฟังก์ชันงาน (eV)
ซีเซียม	Cs	2.1	อะลูมิเนียม	Al	4.2
โพแทสเซียม	K	2.3	ทองแดง	Cu	4.8
โซเดียม	Na	2.4	เงิน	Ag	4.6
แบเรียม	Ba	2.6	ทองคำ	Au	5.3
แคลเซียม	Ca	2.9	แพลทินัม	Pt	5.5

19.2.2 ฟังก์ชันงานและพลังจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน

ครูใช้รูป 19.17 นำ อภิปรายจนสรุปว่า การวัดพลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอน ทำได้โดยการต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้า P ที่ปรับความต่างศักย์ได้ทำให้ศักย์ไฟฟ้าของขั้วแอโนดเป็นลบเมื่อเทียบกับขั้วแคโทด ดังรูป 19.17 โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูป 19.17 การต่อวงจรเพื่อวัดพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน

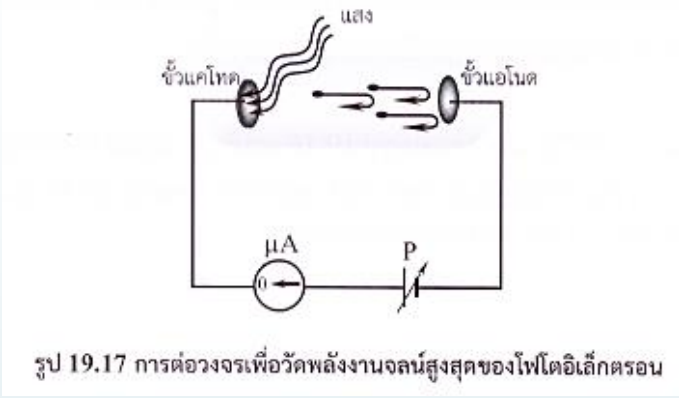


รูป 19.1 ทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้า P

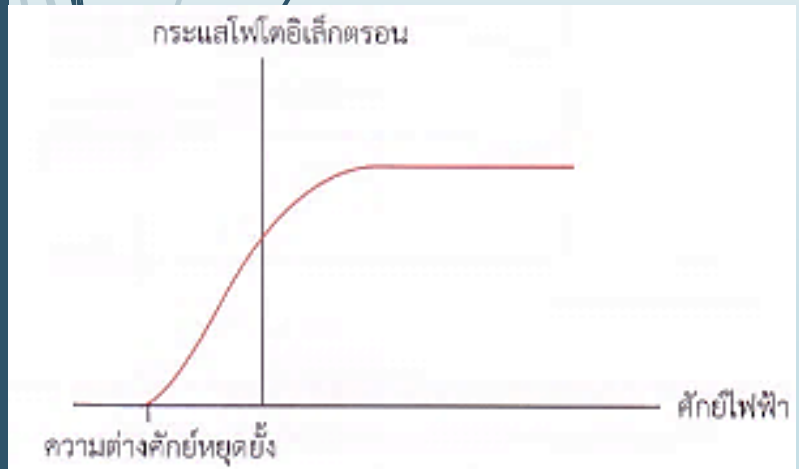
- ในวงจรนี้ A จะทำหน้าที่ผลักอิเล็กตรอน เนื่องจากบริเวณระหว่างแผ่นโลหะขนาน A และ C มีสนามไฟฟ้าทำให้เกิดแรงไฟฟ้ากระทำต่ออิเล็กตรอนในทิศทางจากขั้วแอโนดไปขั้วแคโทด ดังรูป 19.1
- ถ้าสนามไฟฟ้านี้มีค่ามากพอ อิเล็กตรอนที่หลุดจากโลหะ C จะเคลื่อนที่กลับก่อนที่จะไปถึง A ดังรูป 19.17 ดังนั้นการที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปถึง C ได้หรือไม่ ขึ้นกับว่าอิเล็กตรอน หลุดออกจาก C ด้วยความเร็วต้นหรือพลังงานจลน์เริ่มต้นมากเพียงใด

19.2.2 ฟังก์ชันงานและพลังจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน ถ้าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ออกจาก C มากกว่าผลต่างระหว่างพลังงานศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กตรอนที่ A และที่ C แล้ว อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ถึง A ได้แต่ถ้าพลังงานดังกล่าวน้อยกว่า อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่กลับก่อนที่จะไปถึง A โดยวิธีนี้จะสามารถวัดพลังงานจลน์สูงสุดของอิเล็กตรอนได้โดยการเพิ่มความต่างศักย์จนกระทั่งไม่มีกระแสโฟโตอิเล็กตรอน และจะได้กราฟดังรูป 19.18 ซึ่งหมายความว่า อิเล็กตรอนตัวที่มีพลังงานจลน์มากที่สุดเคลื่อนที่ เกือบถึง A แต่ไม่ถึง และในกรณีนี้**พลังงานจลน์สูงสุดของอิเล็กตรอนจะเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานศักย์ไฟฟ้า**พอดี นั่นคือ พลังงานศักย์ไฟฟ้าที่ศักย์หยุดยั้งมีค่าเท่ากับพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน และศักย์ไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับวงจรในขณะนั้น คือ **ศักย์หยุดยั้ง**



รูป 19.17 การต่อวงจรเพื่อวัดพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน



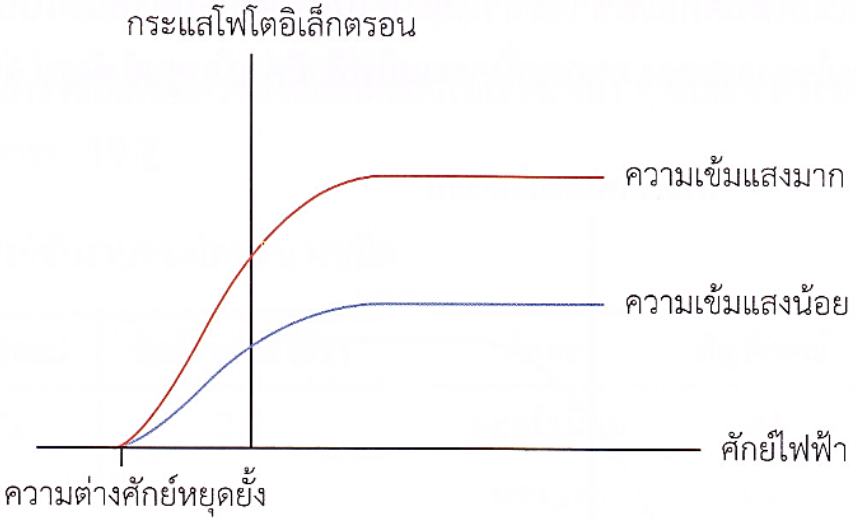
รูป 19.18 กราฟกระแสโฟโตอิเล็กตรอนกับศักย์ไฟฟ้า

ศักย์ไฟฟ้าขณะที่กระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ เรียกว่า **ศักย์หยุดยั้ง** (stopping potential) V_s นั่นคือ พลังงานศักย์ไฟฟ้าที่ศักย์หยุดยั้ง (eV_s) มีค่าเท่ากับพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน ดังสมการ 19.9

$$E_{kmax} = eV_s \qquad (19.9)$$

19.2.2 ฟังก์ชันงานและพลังจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน

ถ้าทำการทดลองโดยใช้แสงความถี่เท่าเดิม **แต่เพิ่มความเข้มแสงที่ตกกระทบจะพบว่ากระแสไฟฟ้าในวงจรเพิ่มขึ้น** แต่ศักย์หยุดยั้งมีค่าเท่ากัน สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ได้ดังรูป 19.19



รูป 19.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ของแสงที่มีความเข้มแสงต่างกัน โดยความถี่แสงคงตัว

ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยการชนแบบยืดหยุ่นระหว่างอนุภาคของแสงหรือโฟตอนกับอิเล็กตรอนในอะตอมของแกรไฟต์ซึ่งเป็นการยืนยันว่า คลื่นแสงสามารถแสดงพฤติกรรมของอนุภาคได้ สรุปว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก สามารถอธิบายโดยใช้สมมติฐานของพลังค์ โดยควอนตัมพลังงานของแสง หรือโฟตอน มีพลังงานเท่ากับ hf ดังนั้นคลื่นแสงจึง **สามารถแสดงพฤติกรรมของอนุภาค**ได้

19.2.2 ฟังก์ชันงานและพลังจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน

ตัวอย่าง 19.5 ฟังก์ชันงานของโลหะโซเดียมเท่ากับ 2.4 อิเล็กตรอนโวลต์ จงหา

ก. ความถี่ขีดเริ่มของแสงที่ทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอน

ข. พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน เมื่อแสงที่ไปตกกระทบมีความถี่ 6.50×10^{14} เฮิรตซ์

แนวคิด ก. หาความถี่ขีดเริ่มจากฟังก์ชันงาน สมการ (19.8) โดยเปลี่ยนหน่วยจากอิเล็กตรอนโวลต์เป็นจูล

ข. หาพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนจากสมการ (19.7b)

วิธีทำ ก.
$$W = hf_0$$
$$f_0 = \frac{W}{h}$$
$$= \frac{(2.4\text{ eV}) \times \left(1.60 \times 10^{-19}\text{ J/eV}\right)}{6.626 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}}$$
$$= 5.795 \times 10^{14}\text{ Hz}$$

ข.
$$E_{k_{max}} = hf - W$$
$$= \left(6.626 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}\right)\left(6.50 \times 10^{14}\text{ Hz}\right) - (2.4\text{ eV})\left(1.60 \times 10^{-19}\text{ J/eV}\right)$$
$$= 4.669 \times 10^{-20}\text{ J}$$
$$= \frac{4.669 \times 10^{-20}\text{ J}}{1.60 \times 10^{-19}\text{ J/eV}}$$
$$= 0.2918\text{ eV}$$

ตอบ ก. ความถี่ขีดเริ่มของแสงที่ทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนคือ 5.80×10^{14} เฮิรตซ์

ข. พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนเท่ากับ 4.67×10^{-20} จูล หรือเท่ากับ 0.292 อิเล็กตรอนโวลต์

แบบฝึกหัด 19.2

1. ค่าพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนมีค่าคงตัวหรือไม่ สำหรับโลหะแต่ละชนิด

คำตอบ

2. ในการทดลองปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ความเข้มของแสงที่ตกกระทบผิวโลหะมีผลต่อความต่างศักย์หยุดยั้งหรือไม่ จงอธิบาย

คำตอบ

3. ในช่วงการหาค่าความต่างศักย์หยุดยั้ง ขณะที่ยังอ่านได้ค่ากระแสไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ของโฟโตอิเล็กตรอนในวงจร หากนำค่าความต่างศักย์ขณะนั้น มาหาค่าของพลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอน เพื่อสามารถหาค่าฟังก์ชั่นงานที่เป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องในสมการโฟโตอิเล็กทริก ได้หรือไม่

คำตอบ

แบบฝึกหัด 19.2

4. ในการทดลองโฟโตอิเล็กทริก ผู้ทดลองฉายแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะค่าหนึ่งไปตกกระทบผิวโลหะ พบว่าอิเล็กตรอนจำนวนหนึ่งหลุดออกจากผิวโลหะ ถ้าต้องการให้อิเล็กตรอนที่หลุดออก มาจากผิวโลหะนี้มีจำนวนเพิ่มขึ้น และพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนแต่ละอนุภาคเพิ่มขึ้น ผู้ทดลองควรทำอย่างไร

คำตอบ

แบบฝึกหัด 19.2

5. ฉายแสงความถี่ค่าหนึ่งตกกระทบผิวโลหะทองแดงซึ่งมีฟังก์ชันงาน 4.8 อิเล็กตรอนโวลต์พบว่า ความถี่นี้เป็นความถี่ขีดเริ่มของโลหะทองแดง ถ้าฉายแสงนี้ไปบนโลหะโซเดียม พบว่าความต่าง ศักย์หยุดยั้งมีค่า 2.4 โวลต์โลหะโซเดียมมีฟังก์ชันงานเท่าใด

แบบฝึกหัด 19.2

6. ฉายแสงที่มีความยาวคลื่น 3.0×10^{-7} เมตร ตกบนผิวโพแทสเซียมที่มีฟังก์ชันงาน 2.3 อิเล็กตรอนโวลต์โฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมามีพลังงานจลน์สูงสุดเท่าใด

แบบฝึกหัด 19.2

7. ฉายแสงที่มีความถี่ 1.10×10^{15} เฮิรตซ์ไปที่ผิวโลหะหนึ่ง ถ้าความถี่ขีดเริ่มมีค่าเป็น 5.69×10^{14} เฮิรตซ์จงหา

ก. ฟังก์ชันงานของโลหะนั้น

ข. พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน

แบบฝึกหัด 19.2

8. แสงความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ตกกระทบผิวโพแทสซียมที่มีฟังก์ชันงาน 2.3 อิเล็กตรอนโวลต์ จะมีอิเล็กตรอนหลุดออกมาหรือไม่ถ้ามีพลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนเหล่านี้มีค่าเท่าใด และถ้าไม่มี พลังงานที่ต้องเพิ่มมีค่าอย่างน้อยเท่าใด

แบบฝึกหัด 19.2

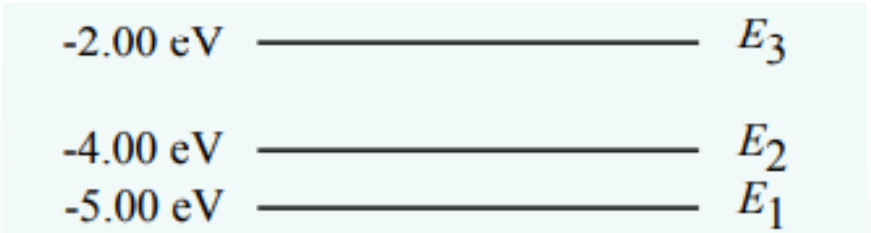
9. ในการทดลองปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก เมื่อฉายแสงตกกระทบผิวโลหะชนิดหนึ่ง พบว่าความ ต่างศักย์หยุดยั้งที่ใช้เท่ากับ 3.7 โวลต์พลังงานจลน์สูงสุดของอิเล็กตรอนมีค่าเท่าใด ในหน่วยจูล และในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์

แบบฝึกหัด 19.2

10. ถ้าควอนตัมของพลังงานของแสงที่ตามองเห็นได้มีพลังงาน 3.62×10^{-19} จูล แสงที่เห็นนี้มีสีอะไร

แบบฝึกหัด 19.2

11. อะตอมหนึ่ง มีระดับพลังงาน ดังรูป



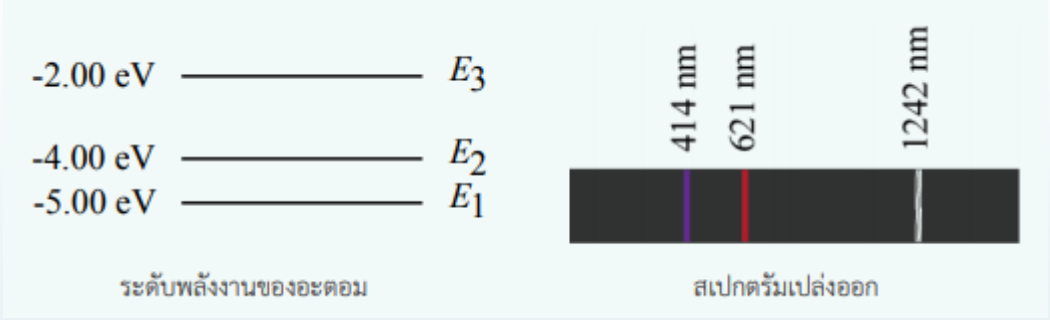
เมื่อถูกกระตุ้นแล้ว จะปลดปล่อยพลังงานออกมาทำให้เกิดสเปกตรัมแบบเส้นจำนวน 3 เส้น จงระบุค่าความยาวคลื่นของสเปกตรัมทั้งสามเส้น

แบบฝึกหัด 19.2

12. ถ้าอิเล็กตรอนในแบบจำลองอะตอมไฮโดรเจนของโบร์อยู่ห่างจากนิวเคลียสเป็นระยะ 25 เท่าของ รัศมีโบร์แสดงว่าอิเล็กตรอนนี้อยู่ที่ระดับพลังงานเท่าใด

แบบฝึกหัด 19.2

13. อะตอมหนึ่ง มีระดับพลังงาน ทำให้เกิดสเปกตรัมเปล่งออก 3 เส้น ที่มีความยาวคลื่น ดังรูป



ถ้าต้องการกระตุ้นอะตอมนี้จากสถานะพื้นไปยังสถานะถูกกระตุ้น จะต้องใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีความยาวคลื่นเท่าใด

แบบฝึกหัด 19.2

14. ฉายแสงที่มีความยาวคลื่น 2.5×10^{-7} เมตร ตกบนผิวซีเซียมที่มีฟังก์ชันงาน 2.1 อิเล็กตรอนโวลต์ โฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมามีพลังงานจลน์สูงสุดเท่าใด