ทฤษฎีควอนตัมเบื้องต้น

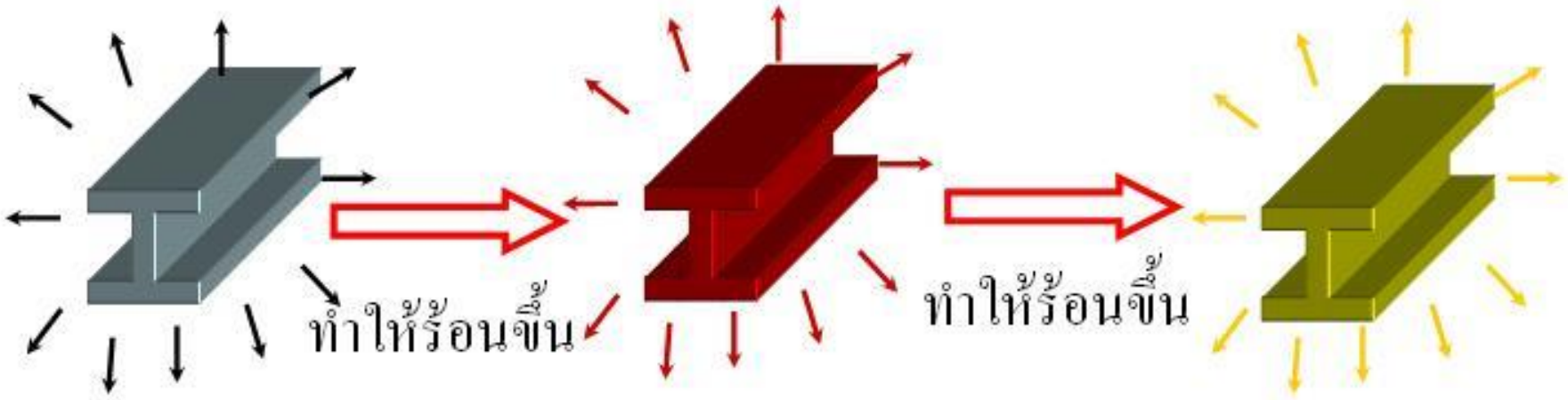
จากการศึกษาของนักฟิสิกส์ยุคเก่า พบว่าไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ของอนุภาคขนาดเล็กได้ เช่น การแผ่รังสีของวัตถุดำ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก การเกิดสเปกตรัมชนิดเส้น การเกิดรังสีเอ็กซ์ และปรากฏการณ์คอมป์ตัน ต่อมา Max Planck ได้เสนอแนวความคิด แบบควอนตัมมาอธิบายการเกิดสเปกตรัมของการแผ่รังสีจากวัตถุดำได้ และเป็นแนวคิดพื้นฐานที่นำไปสู่ทฤษฎีควอนตัม

การแผ่รังสีของวัตถุดำ(Black body Radiation)

การแผ่รังสีความร้อน

วัตถุต่างๆ จะมีการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในปริมาณที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิของวัตถุนั้น

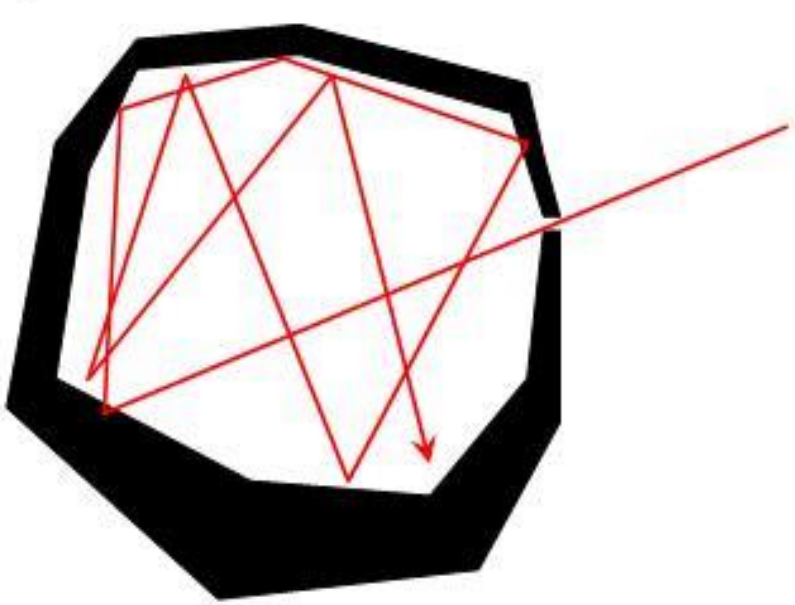
อุณหภูมิห้อง ⇨ รังสีอินฟราเรด (IR)

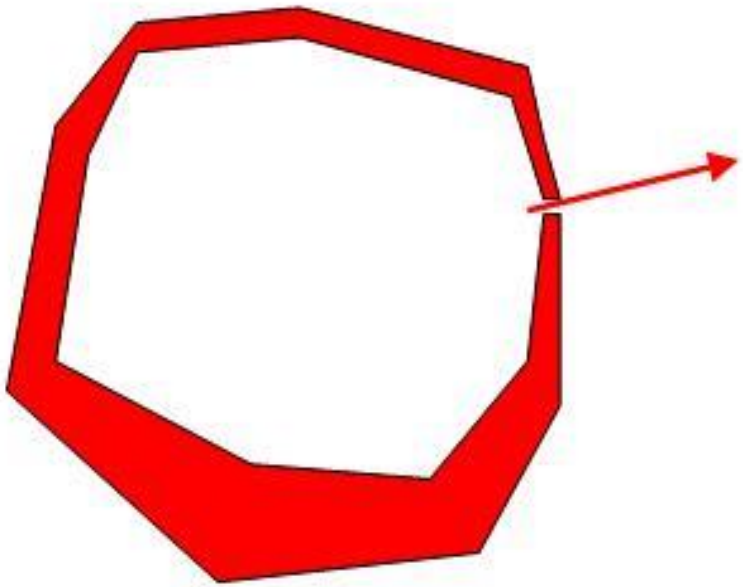


วัตถุดำ Blackbody

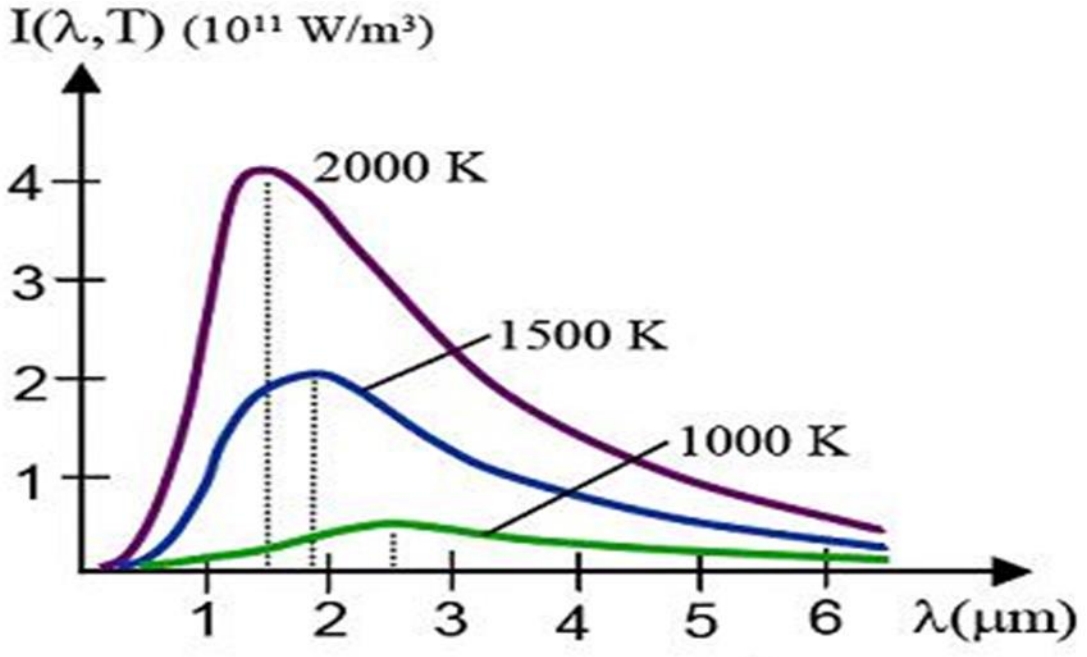
วัตถุในอุดมคติที่ดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ในทุกย่านความถี่จะสามารถปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในทุกย่านความถี่เช่นเดียวกัน

การทดลองอาจแทนวัตถุดำด้วยโพรงโลหะภายในกลวงและสังเกตการแผ่รังสีผ่านรูที่เจาะไว้ด้านหนึ่ง





เมื่อทำให้วัตถุดำร้อน จนเกิดสมดุลความร้อนที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ณ อุณหภูมิแต่ละค่าพบว่าความเข้ม I ของการแผ่รังสีที่ความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ มีความสัมพันธ์เป็นไปตามกราฟ



สเปกตรัมการแผ่รังสีของวัตถุดำที่อุณหภูมิบางค่า

จากการศึกษาการแผ่รังสีของวัตถุดำที่อุณหภูมิต่างๆสรุปได้ดังนี้

1. สเปกตรัมของการแผ่รังสีเป็นแบบต่อเนื่อง คือมี ทุกความยาวคลื่น
2. พลังงานที่วัตถุดำแผ่ออกมาเป็นไปตามกฎของ(stefan-blotzman)

$$R = \sigma T^4$$

R คืออัตราการแผ่พลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (W/m^2)

σ คือ ค่าคงที่สเตฟาน ($W/m^2.K$)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็นเคลวิน (K)

3. ความเข้มของพลังงานที่แผ่ออกมา มีค่าน้อยที่ความยาวคลื่นสั้นมากและที่ความยาวคลื่นยาว และมีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่น โดยที่ จะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นสั้นลงเมื่อวัตถุมีอุณหภูมิสูงขึ้น เป็นไปตามกฎการกระจัดของวีน

$$\lambda_{max} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{m.K}$$

การแผ่รังสีของวัตถุดำของ(Lord ray leigh and Sir James Jeans)

ผนังของวัตถุดำประกอบด้วยอะตอมจำนวนมาก ซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้งตัวรับและตัวแผ่รังสี ซึ่งเรียกว่า ออสซิลเลเตอร์ เมื่ออะตอมรับพลังงานจากความร้อนก็จะสั่น การสั่นทำให้อะตอมในประจุไฟฟ้ามีความเร่ง ก็จะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยความถี่เท่ากับความถี่ของการสั่น ในขณะเดียวกันก็จะรับพลังงานจากการแผ่รังสีของอะตอมข้างเคียง อะตอมหรือออสซิลเลเตอร์สามารถแผ่หรือดูดกลืนรังสีได้ทุกความถี่

ความเข้มของการแผ่รังสีคือ $$I(\lambda,T)=2\pi ck\frac{T}{\lambda^4}$$

c คืออัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ $c=3\times10^8\,m/s$

k เป็นค่าคงตัวโบลต์ซมันน์ $k=1.381\times10^{-23}\,J/K$

ให้ผลขัดกับการทดลองเพราะที่ความยาวคลื่นสั้น ความเข้มกลับเพิ่มขึ้น

การแผ่รังสีของวัตถุดำและสมมุติฐานของ Planck

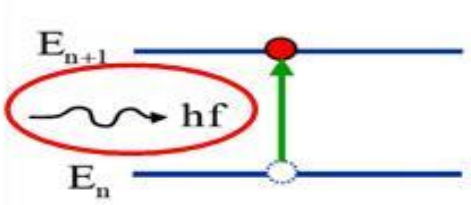
อะตอมที่มีความถี่ f จะมีพลังงาน

$$E = nhf; \quad n = 0, 1, 2, 3,...$$

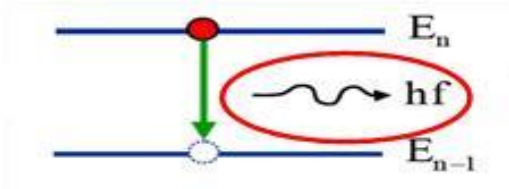
พลังงานมีค่าต่างกันเป็นขั้น ๆ และไม่ต่อเนื่องนี้เรียกว่า **ควอนไตเซชัน**(quantization)

ก้อนพลังงาน ที่ตัวแผ่รังสีดูดกลืนหรือปลดปล่อยออกมานั้น เรียกว่า

ควอนตา (quanta)



ทฤษฎีควอนตัม



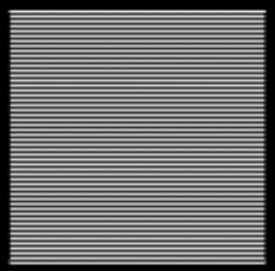
พลังงานของ**โฟตอน (photon)**

ควอนตาของแสงมีค่าแปรผันตามความถี่ของแสง

$$\Delta E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

การแผ่รังสีของวัตถุดำและสมมุติฐานของ Planck

- ความแตกต่างระหว่างค่าพลังงานจองอะตอมที่สั่นใน 1 มิติตามฟิสิกส์ยุคเก่าและตามสมมติฐานของ Planck คือในฟิสิกส์ยุคเก่าอะตอมจะมีพลังงานเท่าไรก็ได้ในช่วงพลังงานจาก 0 ถึง E_{max} ในขณะที่พลังงานของอะตอมตามสมมติฐานของ Planck อะตอมจะมีพลังงานไม่ต่อเนื่อง ดังภาพ



$E = E_{max}$

$E = 0$

$E = 5h\nu$

$E = 4h\nu$

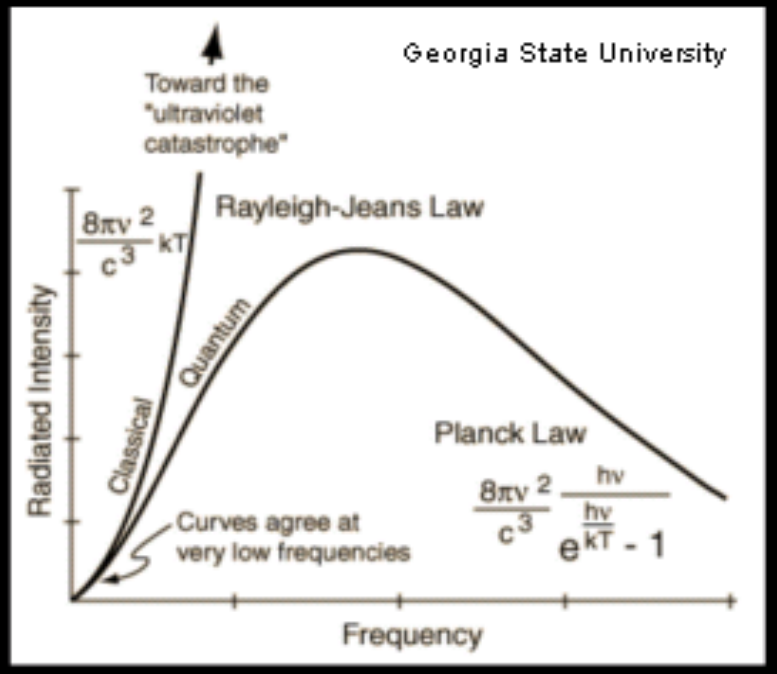
$E = 3h\nu$

$E = 2h\nu$

$E = h\nu$

การแผ่รังสีของวัตถุดำและสมมุติฐานของ Planck

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับกฎของ Rayleigh-Jeans พบว่าถูกต้องเฉพาะเมื่อความถี่ไม่สูงมากนัก แต่ในบริเวณความถี่สูงจะพบว่าทฤษฎีดังกล่าวขัดแย้งกับผลการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทฤษฎียุคเก่าไม่สามารถอธิบายการแผ่รังสีของวัตถุดำได้



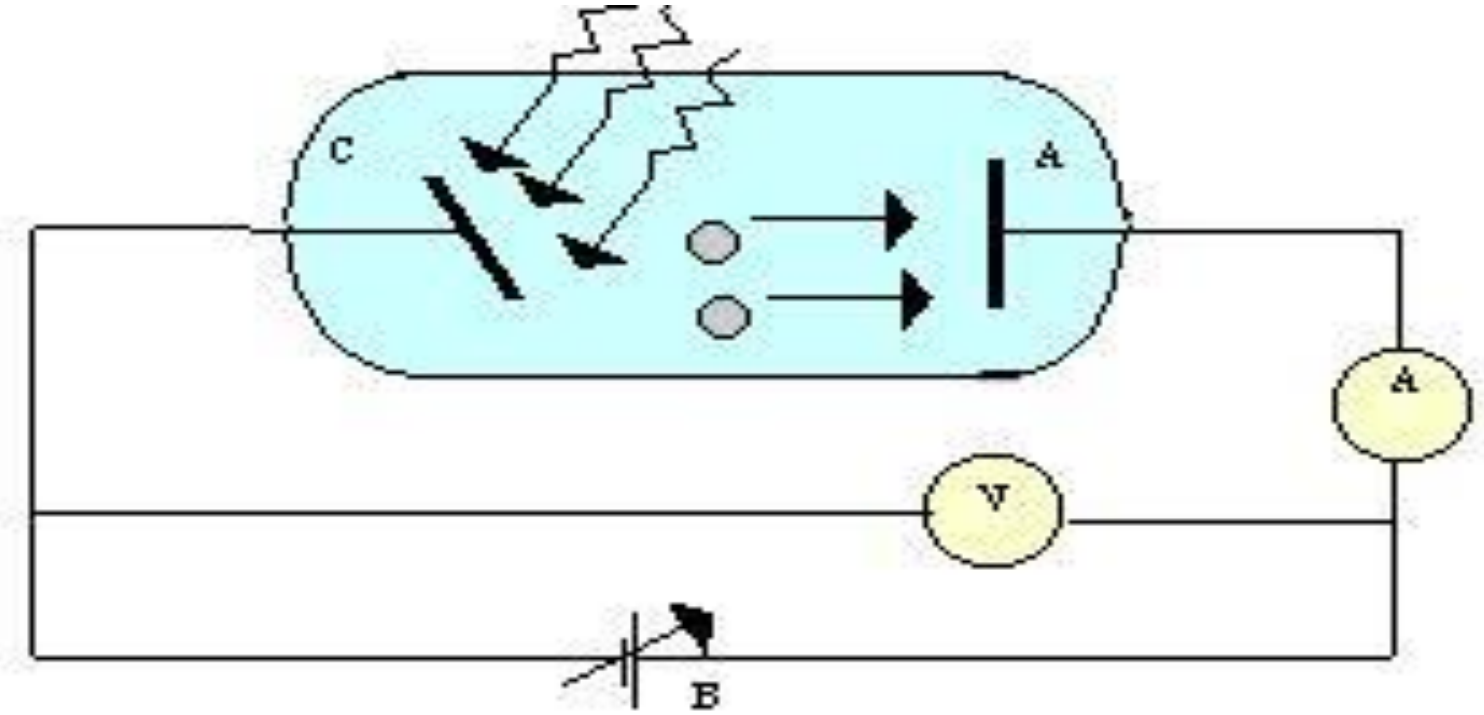
กฎการแผ่รังสีของพลังค์

(Planck's radiation law)

$$I(\lambda,T)=\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5(e^{hc/\lambda kT}-1)}$$

Photoelectric effect

เมื่อฉายแสงที่มีความถี่สูงไปบนโลหะพบว่ามีอิเล็กตรอนหลุดจากผิวโลหะนั้น ปรากฏการณ์ที่แสงทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา เรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก(Photoelectric effect) และเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาว่า โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectrons)



Photoelectric effect

- จากรูปเมื่อทดลองปรับความต่างศักย์ ระหว่างขั้ว C กับ A แล้วอ่านค่ากระแส พบว่าที่ความต่างศักย์ต่ำ กระแสในวงจรจะน้อย แต่เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ กระแสจะมากขึ้น แสดงว่าโฟโตอิเล็กตรอนทุกตัวมีพลังงานมากพอที่จะวิ่งไปถึง A ได้
- ถ้าเราลองสลับขั้วให้ A เป็นลบ C เป็นบวกกระแสในวงจรค่อยน้อยลง เพราะอิเล็กตรอนบางตัวมีพลังงานมากพอที่จะเคลื่อนที่ไปที่ A ได้ ถึงแม้จะลดความต่างศักย์ลงจนเป็นศูนย์ ก็ยังคงมีกรแสในวงจรอยู่ เมื่อปรับจนค่าศักย์ที่ A เป็นค่าลบค่าหนึ่ง เทียบกับ C คือ V_s พบว่าไม่มีกระแสในวงจรเลย ความต่างศักย์ที่ทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าในวงจรเรียกว่า <u>ศักย์หยุดยั้ง</u>
- เราสามารถหาพลังงานจลน์สูงสุด $(E_k)_{max}$ ของโฟโตอิเล็กตรอนได้ จากสมการ

$$(E_k)_{\max} = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 = eV_s$$

จากผลการทดลองไม่สามารถใช้ความรู้เรื่องแสงเป็นคลื่นอธิบายได้สรุปเป็นข้อๆได้ดังนี้

1. ถ้าความถี่ของแสงต่ำกว่าความถี่ขีดเริ่ม f_o ไม่ว่าจะเพิ่มความเข้มแสงเท่าใดก็ไม่ทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตริก
2. จำนวนโฟโตอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับความเข้มแสง
3. พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นตามความถี่ของแสง
4. ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นมาก (น้อยกว่า 10^{-9} วินาที)

Photoelectric effect

- **Einstein** ได้นำแนวความคิดของ **Planck** มาอธิบายปรากฏการณ์ Photoelectric โดยอธิบายว่าแสงประกอบด้วยกลุ่มก้อนของพลังงานที่เรียกว่า โฟตอน แสงที่มีความถี่ f โฟตอนแต่ละตัวจะมีพลังงาน E= hf h คือค่าคงที่ของพลังค์ แสงที่กระทบโลหะมีลักษณะคล้ายลำอนุภาค ประกอบด้วยก้อนพลังงานเล็กๆ แต่ละก้อนมีพลังงาน hf โฟตอนแต่ละตัวกระทบอิเล็กตรอนในลักษณะการกระทบกันของอนุภาค โฟตอนจึงถ่ายเทพลังงาน hf ให้อิเล็กตรอน อะตอมจะหลุดออกจากแผ่นโลหะได้จะต้องได้รับพลังงานอย่างน้อยเท่ากับค่าฟังก์ชันงาน ø พลังงานที่อะตอมยึดอิเล็กตรอนไว้ ถ้าพลังงานที่ได้รับมากกว่า ø พลังงานที่เหลือก็จะเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน

$$E_{kmax} = hf - \emptyset$$

สรุปแนวคิดของEinstein สามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆได้อย่างถูกต้องดังนี้คือ

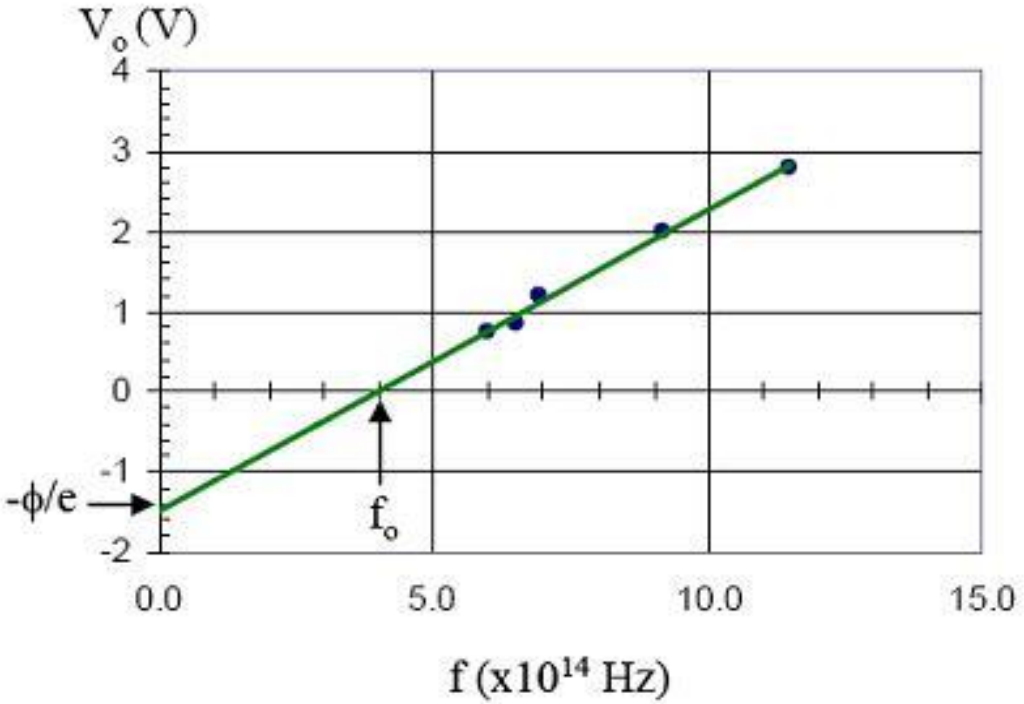
1. ไม่ว่าแสงจะมีความเข้มเท่าใดก็ตาม ถ้าความถี่น้อยกว่าความถี่ขีดเริ่มก็จะไม่ทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนขึ้นได้
2. พลังงานจลน์สูงสุดของอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับความถี่ของแสง ทั้งนี้เนื่องจาก ø เป็นค่าคงตัวสำหรับโลหะแต่ละชนิด
3. ถ้าเพิ่มความเข้มแสงจะเป็นการเพิ่มจำนวนโฟตอนกับอิเล็กตรอน
4. การชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟตอนเป็นลักษณะการชนกันระหว่างอนุภาคกับอนุภาค การถ่ายทอดพลังงานจึงเกิดขึ้นเกือบจะทันทีที่แสงตกกระทบผิวโลหะ

พลังงานจลน์สูงสุดของอิเล็กตรอนที่หลุดจากแคโทด K_{max}

$$K_{max} = \frac{1}{2} m v_{max}^2 = eV_0$$

$e \approx 1.602 \times 10^{-19}\ C$ เป็นค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

K_{max} ขึ้นกับความถี่ f ของแสงที่ตกกระทบแต่ไม่ขึ้นกับความเข้มของแสง



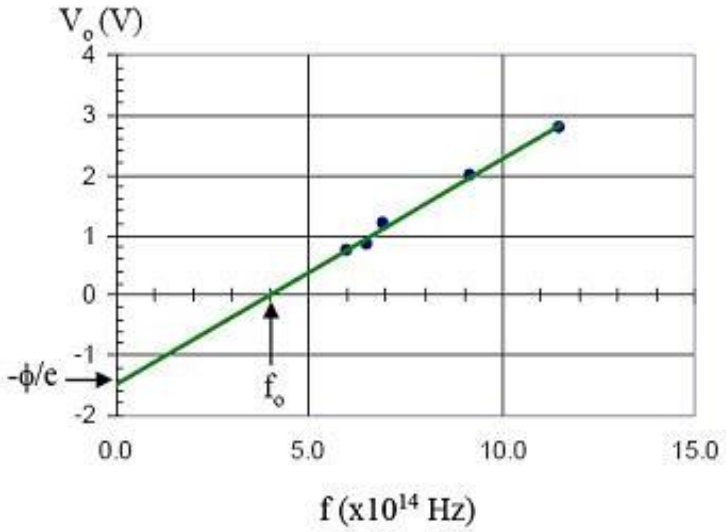
แนวคิดของพลังค์ ⇨ ควอนตาของแสง ⇨ อธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

$$hf = K_{max} + \phi \quad \text{หรือ} \quad \boxed{K_{max} = hf - \phi}$$

hf : พลังงานของโฟตอน

ϕ : ฟังก์ชันงาน

$$\boxed{eV_0 = hf - \phi}$$



ความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ $\frac{h}{e}$

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

$h = 6.626 \times 10^{-34}\ J \cdot s$

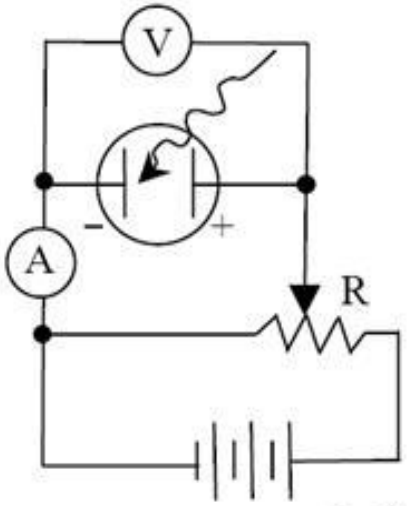
$= 4.136 \times 10^{-15}\ eV \cdot s$

อิเล็กตรอนตัวหนึ่งจะรับพลังงานได้จากโฟตอนแต่เพียงตัวเดียวซึ่ง
พลังงานที่รับไปนั้นจะขึ้นกับความถี่ของแสงและไม่ขึ้นกับความเข้มของแสง

ฟังก์ชันงานของสารบางชนิด

โลหะ	ฟังก์ชันงาน (eV)	โลหะ	ฟังก์ชันงาน (eV)
อลูมิเนียม (Al)	4.3	ทอง (Au)	5.1
คาร์บอน(C)	5.0	เงิน (Ag)	4.3
ซิลิกอน(Si)	4.8	ทองแดง (Cu)	4.7
สังกะสี (Zn)	4.3	โซเดียม (Na)	2.3
โพตัสเซียม (K)	2.3	ซีเซียม (Cs)	2.0

ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วงพลังงานของแสงเหนือม่วง (ultraviolet)

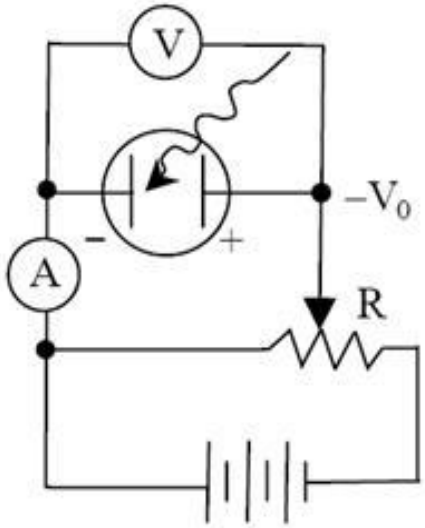


จากการทดลองฮอลล์วอคส์ และเลนาร์ด พบว่า

เมื่อ $f < f_0$	ไม่มีกระแสไหล
เมื่อ $f > f_0$	มีกระแสไหล

อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากผิวโลหะเราเรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน

โดยที่ f_0 คือความถี่ขั้นต่ำ และค่า f_0 ขึ้นกับชนิดของโลหะที่ทำเป็นขั้ว แคโทด

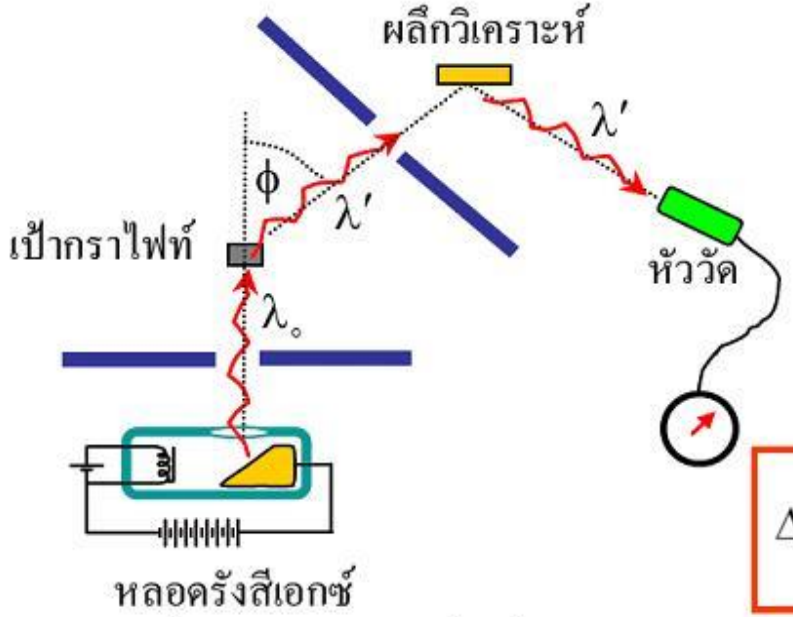


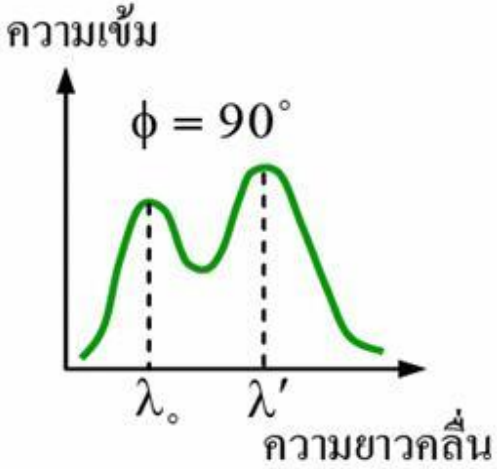
ถ้าจะหยุดไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านหลอดโฟโตเซลล์ จะต้องกลับขั้วแบตเตอรี่และปรับให้ศักย์ไฟฟ้าที่แอโนดต่ำกว่า V_0 นี้ค่า V_0 เรียกว่า ศักย์หยุดยั้ง (stopping potential)

Compton effect

- ทฤษฎียุคเก่ากล่าวว่า เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบอนุภาคอิสระมีประจุ จะทำให้อนุภาคนั้นสั่นด้วยความถี่เดียวกันและแผ่รังสีความถี่นั้นออกมา
- จากการทดลองของ Compton พบว่าเมื่อฉายรังสี X ความยาวคลื่นเดียวลงบนแท่ง graphite จะมีรังสี X กระเจิงออกมาโดยส่วนหนึ่งมีความยาวคลื่นเท่าเดิม (λ) และอีกส่วนหนึ่งมีความยาวคลื่นยาวขึ้น (λ') ทั้งนี้ความยาวคลื่นที่ยาวขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับมุมที่กระเจิง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Compton's Effect และ $\Delta\lambda = (\lambda' - \lambda)$ คือ Compton shift

อาร์เทอร์ คอมป์ตัน (Arthur Compton)





$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{mc}(1 - \cos\phi)$$

ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่เปลี่ยนไปเกิดจากการที่โฟตอนของรังสีเอกซ์ ถ่ายเทพลังงานส่วนหนึ่งให้แก่อิเล็กตรอนหลังจากการชน

$$\lambda_C = \frac{h}{mc} = \frac{6.626 \times 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s}}{(9.109 \times 10^{-31}\ \text{kg})(2.998 \times 10^{8}\ \text{m/s})}$$

$$= 2.426 \times 10^{-12}\ \text{m}$$ คือ ความยาวคลื่นคอมป์ตัน (Compton wavelength)

จากทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอน์สไตน์จะหา โมเมนตัมของโฟตอน ได้จาก $E = mc^2$

สำหรับโฟตอนความถี่ f มีพลังงาน $E = hf$ จะได้ $hf = mc^2$

โมเมนตัมของโฟตอนที่มีความเร็ว c นั่นคือ $= mc = h\frac{f}{c} = \frac{h}{\lambda}$

$$P = \frac{h}{\lambda}$$