PHYS3408 Modern Physics

ฟิสิกส์แผนใหม่

บรรยายครั้งที่ 3

1 กรกฎาคม 2554

ทฤษฎีควอนตัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การเปล่งและการดูดกลืนรังสี

สเปกตรัมของวัตถุดำ

กฎการกระจัดของวีน

กฎของเรย์ลีและจีนส์

สมมติฐานควอนตัมของพลังค์และกฎการแผ่รังสี

ดร.ภาณุวัฒน์ ชิมะลาวงค์

ห้องพัก 2643 อาคาร 26 โทร 0-2942-6900-99 ต่อ 5018

Website: http://p-chimalawong.freevar.com/page/teaching.html

e-mail: p.chimalawong@gmail.com

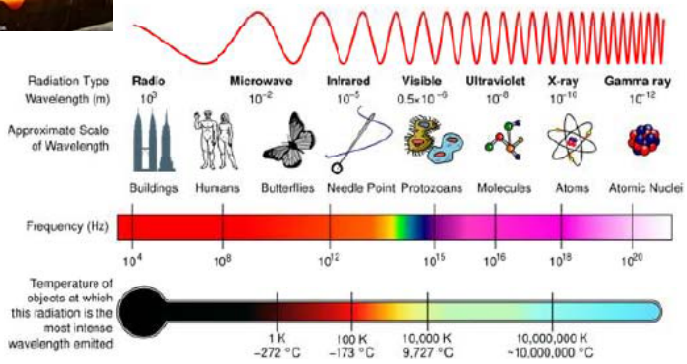
Blackbody Radiation

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

การแผ่และการดูดกลืนรังสีความร้อนของวัตถุ

วัตถุทุกชนิด ถ้ามีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์สัมบูรณ์ จะแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา

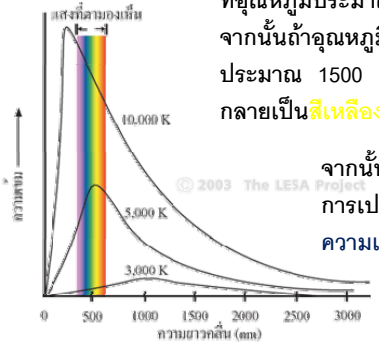
ตัวอย่างเช่น เมื่อเผาทองแดงหรือเหล็กให้ร้อน เราจะได้รับรังสีความร้อน แต่เรามองไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของแท่งโลหะที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 K



Blackbody Radiation

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

ปริมาณของการแผ่รังสีไม่ขึ้นอยู่กับธรรมชาติ(ชนิด)ของวัตถุแต่จะขึ้นกับอุณหภูมิเท่านั้น



ที่อุณหภูมิประมาณ 1000 K โลหะจะเริ่มมีสีแดงเรื่อๆ จากนั้นถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น สีจะเปลี่ยนเป็นสีส้มที่อุณหภูมิประมาณ 1500 K และเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 2000 K จะกลายเป็นสีเหลือง และเป็นสีขาวเมื่อร้อนถึง 3000 K

จากนั้นการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้นเพียงแต่ความเข้มของรังสีจะเพิ่มขึ้นเท่านั้น

สเปกตรัมของรังสีที่แผ่ออกมาจากแท่งเหล็กร้อนจัด (ของแข็ง) เป็นสเปกตรัมต่อเนื่อง (Continuous Spectrum) ซึ่งมีทั้งรังสีในช่วงที่ตามองเห็นและไม่เห็น

Blackbody Radiation

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

การแผ่และการดูดกลืนรังสีความร้อนของวัตถุ

ในปี ค.ศ. 1879 สเตฟาน (Josef Stefan) ได้พบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานการแผ่รังสีความร้อน I_T ที่เปล่งจากวัตถุดำกับอุณหภูมิของวัตถุดำ และโบลทซ์มานน์ (Ludwing Boltzmann) ได้คำนวณทางทฤษฎีและพบความสัมพันธ์เช่นเดียวกัน จึงรวมทั้งทฤษฎีและการทดลองเข้าด้วยกัน เรียกว่า กฎของสเตฟาน-โบลทซ์มานน์ (Stefan-Boltzmann law)

$$I_T = \sigma T^4 \quad \ldots(1)$$

"ถ้าวัตถุดำที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ T อยู่ในวัตถุดำอีกอันหนึ่งซึ่งมีอุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ อัตราการแผ่พลังงานรังสีความร้อนของวัตถุดำ (อุณหภูมิ T) เป็นสัดส่วนกับ T^4"

เมื่อ I_T เป็นพลังงานที่แผ่ออกมาทั้งหมดจากทุกความถี่ต่อวินาทีต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

T เป็นอุณหภูมิของวัตถุดำในหน่วยเคลวิน

σ เป็นค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann = 5.67×10^{-8} W/m^2.K^4

กรณีอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมมีค่าเป็น T_o (K) สมการของการแผ่รังสีความร้อนจะเป็น

$$I_T = \sigma\left(T^4 - T_o^4\right) \quad \ldots(2)$$

Blackbody Radiation

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

การแผ่และการดูดกลืนรังสีความร้อนของวัตถุ

วัตถุร้อนไม่เพียงแต่จะแผ่รังสีเท่านั้นในขณะเดียวกันยังดูดกลืนรังสีจากสิ่งแวดล้อมด้วย

- ขณะใดๆ ถ้าวัตถุมีอุณหภูมิสูงกว่าสิ่งแวดล้อม อัตราการแผ่รังสีจะมากกว่าอัตราการดูดกลืนรังสี
- ถ้าวัตถุมีอุณหภูมิต่ำกว่าสิ่งแวดล้อม อัตราการดูดกลืนรังสีจะมากกว่าอัตราการแผ่รังสี
- เมื่อวัตถุมีอุณหภูมิเท่ากับสิ่งแวดล้อม อัตราการแผ่รังสีและอัตราการดูดกลืนรังสีจะเท่ากัน

วัตถุจะมีอุณหภูมิคงที่เรียกว่าวัตถุอยู่ใน สมดุลความร้อน (thermal equilibrium)

Blackbody Radiation

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

การแผ่และการดูดกลืนรังสีความร้อนของวัตถุ

อัตราการเปล่งและการดูดกลืนพลังงานการแผ่รังสีที่อุณหภูมิใดๆ ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผิววัตถุ วัตถุที่เป็นตัวแผ่รังสีที่ดี จะเป็นตัวดูดกลืนรังสีที่ดีด้วย

ตัวอย่างเช่น ทรงกลม 2 ลูกทำด้วยโลหะชนิดเดียวกัน ลูกหนึ่งทาสีดำ อีกลูกทาด้วยสีขาว แม้ว่าจะอยู่ที่อุณหภูมิเดียวกันก็ตาม ลูกทรงกลมดำจะปล่อยรังสีมากกว่าลูกทรงกลมขาว

ปริมาณที่ใช้บอกลักษณะธรรมชาติของผิววัตถุคือ สภาพการดูดกลืน absorptivity (a) และ สภาพการเปล่ง emissivity (e)

กรณีอุณหภูมิของโลหะมีค่าเท่ากันและอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิเดียวกัน ทรงกลมสีดำจะมีค่า e และ a มากกว่าทรงกลมสีขาว

Blackbody Radiation

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

การแผ่และการดูดกลืนรังสีความร้อนของวัตถุ

ปริมาณที่ใช้บอกลักษณะธรรมชาติของผิววัตถุคือ สภาพการดูดกลืน absorptivity (a) และ สภาพการเปล่ง emissivity (e)

สภาพการเปล่ง (emissivity; e) อัตราส่วนของพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ผิววัตถุปล่อยออกมาต่อพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ตกกระทบลงบนผิววัตถุ

สภาพการดูดกลืน (absorptivity; a) เป็นอัตราส่วนของพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ผิววัตถุดูดกลืนต่อพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ตกกระทบลงบนผิววัตถุนั้น

- ค่าของ a และ e ของวัตถุใดๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1
- วัตถุที่มีผิวดูดกลืนสูง ค่าของ a = 1 เรียกว่า วัตถุดำ (black body) ส่วนผิวอื่นๆ มีค่าน้อยกว่า 1

Blackbody Radiation

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

การแผ่และการดูดกลืนรังสีความร้อนของวัตถุ

โดยทั่วไปวัตถุใดก็ตามที่เปล่งรังสีความร้อนสูง ก็จะเป็นวัตถุที่ดูดกลืนรังสีความร้อนสูงเช่นกัน และได้มีการพิสูจน์เกี่ยวกับเรื่องนี้ เรียกว่า กฎการแผ่รังสีของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoffs' law of radiation) ได้เสนอว่า "ในสภาวะสมดุลความร้อนของผิววัตถุต่างชนิดกันจะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานการดูดกลืนและการแผ่รังสีความร้อน และจะทำให้ e = a"

ในกรณีที่วัตถุที่มีอุณหภูมิ T นี้มิได้เป็นวัตถุดำสมบูรณ์ สมการ (1) และ (2) จะได้

$$I_T = e\sigma T^4 \qquad \ldots(3)$$

$$I_T = e\sigma\left(T_o^4 - T^4\right) \qquad \ldots(4)$$

เมื่อ I_T เป็นพลังงานที่แผ่ออกมาทั้งหมดจากทุกความถี่ต่อวินาทีต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

T, T_0 เป็นอุณหภูมิของวัตถุดำและสิ่งแวดล้อม (K)

σ เป็นค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann = 5.67×10^{-8} $W/m^2.K^4$

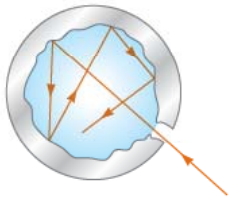
e เป็นค่าสภาพการเปล่ง มีค่าเท่ากับ 0 - 1

Blackbody Radiation

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

วัตถุต่างชนิดกันมีความสามารถในการแผ่รังสีและดูดกลืนรังสีได้ต่างกัน

วัตถุดำ (black body) หมายถึง วัตถุที่เป็นตัวแผ่รังสีและดูดกลืนรังสีได้อย่างสมบูรณ์และดีที่สุด วัตถุดำจะดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกความถี่ที่ตกกระทบ โดยไม่สะท้อนเลย นั่นคือ วัตถุดำมีค่า a = 1 ดังนั้นตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้ว่า e = 1 ด้วย



วัตถุดำในความเป็นจริงแล้วไม่มี แต่สามารถสร้างแบบจำลอง (model) ของวัตถุดำ คือ ก้อนวัตถุที่มีโพรงกลวง (cavity) มีรูเปิดเล็กๆ เพียงรูเดียวที่ผนังโพรงกลวงนี้

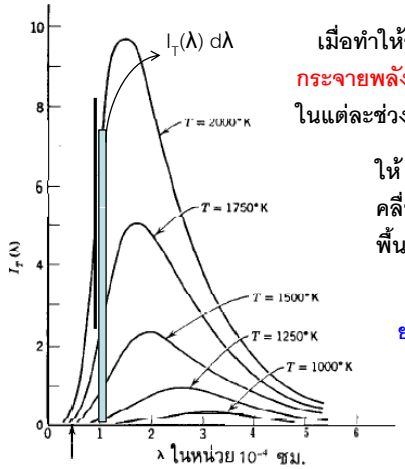
เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านรูเล็กๆ นี้เข้าไป จะสะท้อนกลับไปกลับมาอยู่ในโพรงกลวงนี้และถูกดูดกลืนทั้งหมด และเมื่อเราเผาโพรงนี้ให้ร้อนที่อุณหภูมิหนึ่ง แล้วทำการวัดรังสีที่ออกมาจากโพรงนี้ พบว่ารังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากโพรงนี้มีลักษณะเหมือนรังสีที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำ ณ อุณหภูมินั้น

พลังงานรังสีที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว ไม่ขึ้นอยู่กับชนิดหรือรูปร่างของวัตถุดำ ดังนั้นในการศึกษาการแผ่รังสีจากของแข็งร้อนจึงจะสะดวกกว่าถ้าศึกษาจากวัตถุดำ

Blackbody Radiation

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

สเปกตรัมการแผ่รังสีของวัตถุดำ



เมื่อทำให้วัตถุดำร้อนจนเกิดสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆ แล้ววัดการกระจายพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำในแต่ละช่วงคลื่นด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์

ให้ $I_T(\lambda)\, d\lambda$ คือพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความยาวคลื่นระหว่าง λ กับ $\lambda+d\lambda$ ที่แผ่ออกมาจากหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวของวัตถุดำอุณหภูมิ T ต่อวินาที

ปริมาณรังสีที่แผ่ออกมาทั้งหมด (ทุกช่วงความยาวคลื่น) คือ

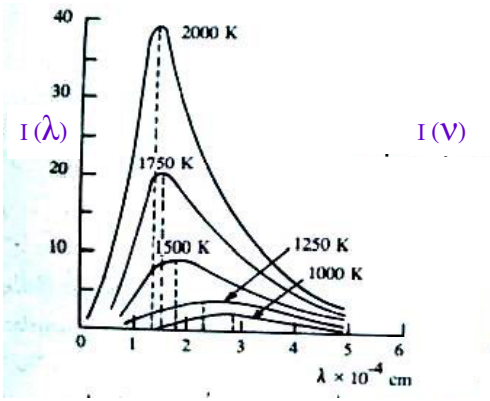
$$I_T = \int_0^\infty I(\lambda)\, d\lambda \quad \ldots(5)$$

กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $I_T(\lambda)$ กับความยาวคลื่น λ ที่อุณหภูมิต่างๆ

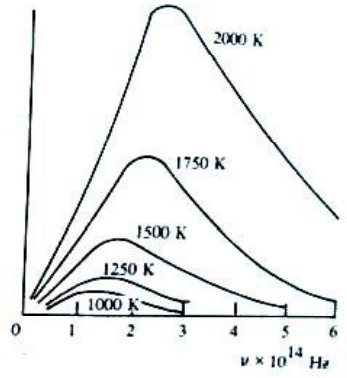
Blackbody Radiation

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

สเปกตรัมของรังสีที่แผ่จากวัตถุดำที่อุณหภูมิต่างๆ กัน

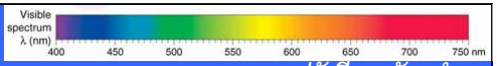


(a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $I(\lambda)$ กับ λ



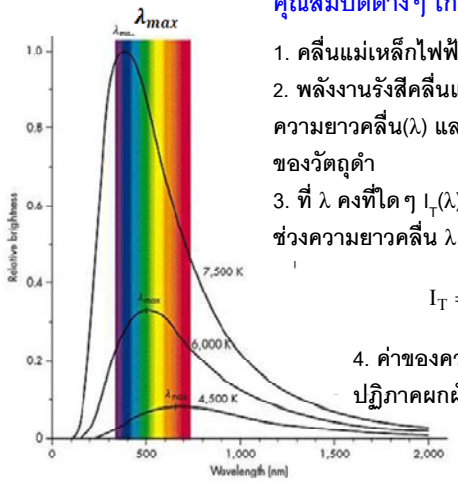
(b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $I(\nu)$ กับ ν

Blackbody Radiation



การแผ่รังสีของวัตถุดำ

คุณสมบัติต่างๆ เกี่ยวกับการแผ่รังสีของวัตถุดำ



1. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมามีความยาวคลื่นต่างๆ กัน
2. พลังงานรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำขึ้นกับความยาวคลื่น(λ) และอุณหภูมิ (T) เท่านั้น ไม่ขึ้นกับชนิดหรือรูปร่างของวัตถุดำ
3. ที่ λ คงที่ใดๆ $I_T(\lambda)$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ T มากขึ้น ถ้ารวม $I_T(\lambda)$ ทุกช่วงความยาวคลื่น λ จะได้อัตราการแผ่พลังงานทั้งหมด I_T

$$I_T = \int_0^\infty I(\lambda)\, d\lambda = \sigma T^4 \qquad \text{(Stefan-Boltzmann law)}$$

4. ค่าของความยาวคลื่นที่ให้พลังงานสูงสุด (λ_{max}) จะเป็นปฏิภาคผกผันกับอุณหภูมิ

$$\lambda_{max} T \propto \frac{1}{T}$$

$$\lambda_{max} T = \text{const.} = 2.898\times10^{-3}\ \text{m.K} \quad \ldots(6)$$

กฎการกระจัดของวีน (Wien's displacement law)

"เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความยาวคลื่นที่ให้พลังงานสูงสุด (λ_{max}) จะลดลง"

Blackbody Radiation

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

สมมติฐานการแผ่รังสีของวัตถุดำ

เรย์ลีและจีนส์ (Rayleigh - Jeans) ได้ทำการคำนวณหาการแผ่รังสีของวัตถุดำโดยใช้หลักฟิสิกส์ยุคเก่า โดยที่สภาวะสมดุลความร้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในวัตถุดำจะมีลักษณะเป็นคลื่นนิ่ง (Standing wave) โดยมีบัพอยู่ที่ผิวภายในของวัตถุดำ และใช้กฎการแบ่งเท่ากันของพลังงาน (Equipartition of energy) พบว่าสามารถคำนวณหาความหนาแน่นพลังงาน u(ν) ในการแผ่รังสีในช่วงความถี่ ν ถึง ν + dν ซึ่งเป็นปฏิภาค โดยตรงกับกำลังสองของความถี่ ν ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังสมการ

$$u(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}kTd\nu \quad \ldots(6)$$

เมื่อ k คือ ค่านิจโบลต์ซมันท์ มีค่า 1.38×10^{-23} J/K

c คือ อัตราเร็วของแสง (3×10^8 m/s)

เรียกความสัมพันธ์นี้ว่า **กฎของเรย์ลี-จีนส์** (Rayleigh-Jeans law)

สมการข้างต้น คือ การแจกแจงพลังงานของการแผ่รังสีความร้อนในโพรงหรือวัตถุดำ

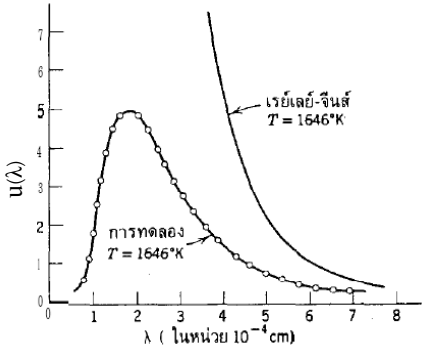
หรืออาจเขียนในเทอมของความยาวคลื่น (λ) จะได้ $u(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi k}{\lambda^5}\lambda Td\lambda$ ...(7)

Blackbody Radiation

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

สมมติฐานการแผ่รังสีของวัตถุดำ

สมการของเรย์เลย์-จีนส์ จะใช้ได้ดี**เฉพาะบริเวณช่วงความถี่ต่ำ**เท่านั้น คือค่าที่คำนวณได้ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลอง แต่สำหรับช่วงความถี่สูงเช่นรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) จะให้ผลขัดแย้งกับการทดลอง กล่าวคือ เมื่อ $\lambda \to 0$ จะได้ $u(\lambda) \to \infty$ แต่จากผลการทดลอง $u(\lambda)$ มีค่าแน่นอนและเท่ากับศูนย์เมื่อ λ เป็นศูนย์



$$u(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi k}{\lambda^5}\lambda Td\lambda$$

ของความแตกต่างกันนี้เรียกว่า ความหายนะเหนือม่วง (ultraviolet catastrophe)

Blackbody Radiation

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

สมมติฐานควอนตัมของพลังค์และกฎการแผ่รังสี

ในการศึกษาพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายออกมาในแต่ละช่วงความยาวคลื่น ถ้าให้ผนังของวัตถุดำประกอบด้วยอะตอมเป็นจำนวนมาก ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวส่งและรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเรียกว่า **ออสซิลเลเตอร์** (Osillator) เมื่อได้รับพลังงานความร้อนจะเกิดการสั่น การสั่นของประจุไฟฟ้าทำให้เกิดความเร่งและแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปด้วยความถี่เดียวกับที่สั่นอยู่พร้อมทั้งดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกจากอะตอมอื่น

ปี ค.ศ. 1901 แมกซ์ พลังค์ ได้เสนอว่า ออสซิเลเตอร์จะมีการรับและปลดปล่อยพลังงาน โดยปริมาณของพลังงานของออสซิเลเตอร์จะมีค่าเป็นชุดของพลังงาน แต่ละชุดของพลังงานมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความถี่ของรังสีนั้นๆ คูณด้วยด้วยค่าคงตัว คือ ค่าคงที่ของพลังค์ Plank's constant (h) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} J.s

Blackbody Radiation

ทฤษฎีควอนตัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สมมติฐานควอนตัมของพลังค์และกฎการแผ่รังสี

แมกซ์-แพลงค์ เสนอสมมติฐาน 2 ข้อคือ

1. ออสซิลเลเตอร์ที่สั่นจะมีพลังงานเป็นค่าใดๆ ไม่ได้ โดยจะมีค่าจำกัดเป็นช่วงๆ

ออสซิลเลเตอร์ที่มีความถี่ ν จะมีพลังงานเป็น

$$E = nh\nu \quad \ldots(8) \qquad n = 0, 1, 2, 3\ldots\infty$$

เมื่อ E เป็นพลังงานของออสซิลเลเตอร์ , n เป็นเลขควอนตัมมีค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม , h เป็นค่าคงที่ของแพลงค์ = 6.626×10^{-34} J.s และ ν คือค่าความถี่ของการสั่น

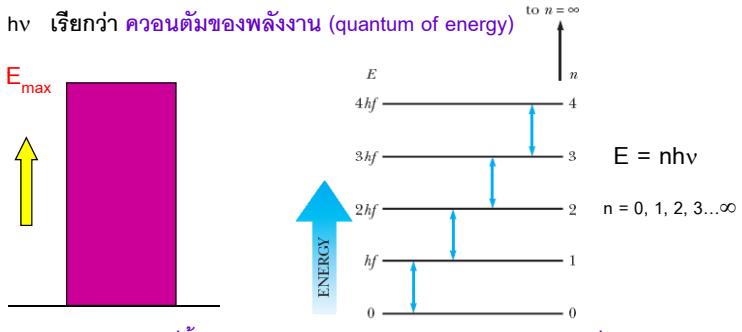
2. ออสซิลเลเตอร์จะไม่ถูกดูดกลืนหรือแผ่พลังงานออกมาอย่างต่อเนื่อง แต่จะดูดกลืนหรือแผ่พลังงานรังสีด้วยจำนวนที่เป็นปฏิภาคโดยตรงกับความถี่ ν ของออสซิลเลเตอร์เท่านั้น

การที่พลังงานของออสซิลเลเตอร์มีค่าพลังงานได้เฉพาะเป็นค่าๆ เช่นนี้เรียกว่า **พลังงานถูกควอนไตซ์** (quantized energy)

สมมติฐานควอนตัมของพลังค์และกฎการแผ่รังสี

แนวความคิดนี้นับว่าเป็นการปฏิวัติความคิดของฟิสิกส์แผนเก่า (ตามฟิสิกส์แผนเก่า พลังงานของออสซิเลเตอร์มีค่าแบบต่อเนื่อง คือมีได้ทุกค่าตั้งแต่ 0 ถึง ∞) และถือกันว่าเป็นจุดกำเนิดของทฤษฎีควอนตัม

ปริมาณ hν เรียกว่า ควอนตัมของพลังงาน (quantum of energy)



(a) ตามแนวของฟิสิกส์ดั้งเดิม (b) ตามสมมติฐานของพลังค์

รูปการเปรียบเทียบระหว่างพลังงานของอะตอมที่สั่น

Blackbody Radiation
ทฤษฎีควอนตัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สมมติฐานควอนตัมของพลังค์และกฎการแผ่รังสี

ในที่สุดพลังค์ก็สามารถเขียนสมการ ความหนาแน่นพลังงานของการแผ่รังสีของวัตถุดำในช่วงความถี่ ν ถึง ν+d ν คือ

$$u(\nu)d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}\left(\frac{1}{e^{h\nu/kT}-1}\right)d\nu \qquad \ldots(9)$$

ถ้าเขียนสมการในเทอมความยาวคลื่น ซึ่ง $c = \nu\lambda$ และ $d\nu = -(c/\lambda^2)d\lambda$ จะได้

$$u(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5}\left(\frac{1}{e^{hc/\lambda kT}-1}\right)d\lambda \qquad \ldots(10)$$

เมื่อ k เป็นค่าคงที่โบลต์มานต์ 1.38×10^{-23} J/K
c เป็นค่าความเร็วแสง = 3×10^{8} m/s
ν เป็นค่าความถี่ (Hz)
h เป็นค่าคงที่พลังค์ = 6.626×10^{-34} J.s
T เป็นอุณหภูมิของวัตถุดำ (K)

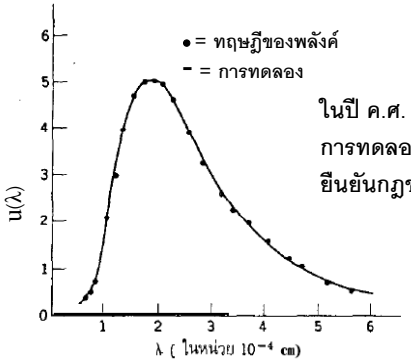
"กฎการแผ่รังสีของพลังค์"

Blackbody Radiation
ทฤษฎีควอนตัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สมมติฐานควอนตัมของพลังค์และกฎการแผ่รังสี

เมื่อแทนค่าคงที่ของพลังค์ h, แล้วจะพบว่า ตามทฤษฎีและผลการทดลองสอดคล้องกัน

$$u(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5}\left(\frac{1}{e^{hc/\lambda kT}-1}\right)d\lambda$$



ในปี ค.ศ. 1919 รูเบนส์และมิเชล (Rubens and Michel) ได้ทำการทดลองวัดสเปกตรัมของการแผ่รังสีที่อุณหภูมิต่างๆ และยืนยันกฎของพลังค์ว่าถูกต้อง ตั้งแต่อุณหภูมิ -160°C -1800 °C

สำหรับค่าคงตัวของพลังค์ที่เป็นการยอมรับโดยทั่วไปมีค่า h = 6.626176±0.0000054 x 10^{-34} J.s

เปรียบเทียบสเปกตรัมการแผ่รังสีที่คำนวณโดยพลังค์และการทดลองเมื่อ T = 1646 °C

Blackbody Radiation
ทฤษฎีควอนตัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สมมติฐานควอนตัมของพลังค์และกฎการแผ่รังสี

ถ้าทฤษฎีควอนตัมตามสมมติฐานของพลังค์ถูกต้องแล้ว เราสามารถที่จะเปลี่ยนเงื่อนไขบางประการให้กลายเป็นทฤษฎีแผนเดิมได้ กล่าวคือ สามารถแปลงสมการของพลังค์ให้อยู่ในรูปอุณหพลศาสตร์แผนเดิม เพื่อที่จะได้กฎของเรย์ลีและจีนส์ หรือกฎการกระจัดของวีน หรือ กฎของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ ได้

ตัวอย่างเช่น จากสมการ $u(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5}\left(\frac{1}{e^{hc/\lambda kT}-1}\right)d\lambda$

สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของกฎสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ได้เมื่อ

$$I_T = \int_0^\infty u(\lambda)d\lambda \quad \Rightarrow \quad I_T = \int_0^\infty \frac{8\pi hc}{\lambda^5}\left(\frac{1}{e^{hc/\lambda kT}-1}\right)d\lambda$$

Blackbody Radiation

ทฤษฎีควอนตัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สมมติฐานควอนตัมของพลังค์และกฎการแผ่รังสี

จาก $I_T = \int_0^\infty \frac{8\pi hc}{\lambda^5}\left(\frac{1}{e^{hc/\lambda kT}-1}\right)d\lambda$ ให้ $hc/\lambda kT = x$ จะได้

$\Rightarrow$ $I_T = \frac{2\pi k^4}{h^3c^2}T^4\int_0^\infty\left(\frac{x^3}{e^x-1}\right)dx$ เมื่อ $\int_0^\infty\left(\frac{x^3}{e^x-1}\right)dx = \frac{\pi^4}{15}$

ดังนั้น $I_T = \frac{2\pi^5k^4}{15h^3c^2}T^4 = \sigma T^4$ ซึ่งเป็นกฎสเตฟาน-โบลต์ซมันน์

และค่าคงตัว $\sigma = \frac{2\pi^5k^4}{15h^3c^2}$ = 5.67×10^{-8} Wm^{-2} K^4

Blackbody Radiation

ทฤษฎีควอนตัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สมมติฐานควอนตัมของพลังค์และกฎการแผ่รังสี

จากแนวคิดของพลังค์เกี่ยวกับความไม่ต่อเนื่องของพลังงาน เป็นลักษณะสำคัญของทฤษฎีควอนตัมที่ต่างไปจากฟิสิกส์ยุคเก่า ซึ่งกล่าวว่าสมบัติของระบบทางฟิสิกส์มีค่าต่อเนื่อง ไอน์สไตน์ได้นำแนวคิดของพลังค์อธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเลกตริกได้สำเร็จ นักวิทยาศาสตร์จึงเริ่มยอมรับว่าธรรมชาติมีความไม่ต่อเนื่องของพลังงานตามที่พลังค์เสนอ

Blackbody Radiation

ตัวอย่างที่ 1 พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่แผ่สู่ผิวโลกมีค่าเท่ากับ 1.4×10^3 J/m^2 สมมติดวงอาทิตย์เป็นวัตถุดำ จงหาค่าของอุณหภูมิที่ผิวดวงของอาทิตย์ เมื่อระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์เท่ากับ 1.4×10^{11} m และรัศมีของดวงอาทิตย์เท่ากับ 1.5×10^9 m

Blackbody Radiation

ตัวอย่างที่ 2 อุณหภูมิที่ผิวหนังของมนุษย์โดยทั่วไปประมาณ 35 °C จงหาความยาวคลื่นสูงสุดที่สมนัยกับรังสีที่ปลดปล่อยจากผิวมนุษย์นี้มีค่าเท่าใด

Blackbody Radiation

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

ตัวอย่างที่ 3 ลวดโลหะเส้นหนึ่งยาว 1 m มีรัศมี 1 mm ถูกทำให้ร้อนโดยกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดการแผ่รังสีความร้อน 1 kW สมมติว่าลวดโลหะนี้เป็นวัตถุดำและไม่ได้รับอิทธิพลกระทบจากสิ่งแวดล้อม จงคำนวณหาอุณหภูมิที่ผิวของลวดโลหะนี้

Blackbody Radiation

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

ตัวอย่างที่ 4 ปริมาณความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกตั้งฉากกับผิวโลกมีค่าเท่ากับ 1.4 kW/m^2 สมมติให้ดวงอาทิตย์เป็นวัตถุดำ มีรัศมี 7x10^5 km และระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์เท่ากับ 1.5x10^8 km จงแสดงว่าปริมาณรังสีความร้อนที่ปล่อยจากผิวดวงอาทิตย์มีค่า 6.4x10^7 W/m^2 และคำนวณหาอุณหภูมิที่ผิวของดวงอาทิตย์

บทสรุป

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

วัตถุทุกชนิด ถ้ามีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์สัมบูรณ์ จะแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ปริมาณของการแผ่รังสีไม่ขึ้นอยู่กับธรรมชาติ(ชนิด)ของวัตถุแต่จะขึ้นกับอุณหภูมิเท่านั้น วัตถุดำ (black body) หมายถึง วัตถุที่เป็นตัวแผ่รังสีและดูดกลืนรังสีได้อย่างสมบูรณ์

กฎของสเตฟาน-โบลทซ์มานน์ (Stefan-Boltzmann law)

$$I_T = \sigma T^4$$

กฎการกระจัดของวีน (Wien's displacement law)

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

สมมติฐานการแผ่รังสีของวัตถุดำ

กฎของเรย์ลี-จีนส์ (Rayleigh-Jeans law)

$$u(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT d\nu$$

สมมติฐานของ แมกซ์-พลังค์ $E = nh\nu$

กฎการแผ่รังสีของพลังค์

$$u(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5}\left(\frac{1}{e^{hc/\lambda kT}-1}\right)d\lambda$$

สมการของพลังค์ สามารถแปลงให้อยู่ในรูป กฎของเรย์ลีและจีนส์, กฎการกระจัดของวีน และ กฎของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ ได้

Homework #3

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

แบบฝึกหัดครั้งที่ 3

1) ในสภาวะสมดุลทางความร้อน จงหาอุณหภูมิที่ผิวโลกที่เกิดจากการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ เมื่อระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์เท่ากับ 1.5x10^{11} m รัศมีของดวงอาทิตย์เท่ากับ 7x10^8 m และสมมติดวงอาทิตย์เป็นวัตถุดำที่มีอุณหภูมิที่ผิว 5800 K (280 K or 7°C)

2) จงหาอัตราการแผ่รังสีความร้อนของมนุษย์ที่เปลือยกายในห้องมืดที่มีอุณหภูมิ 20°C ผิวหนังของคน ๆ นี้มีอุณหภูมิ 33°C และพื้นที่ผิวทั้งหมดคือ 1.5 m^2 (กำหนดให้สภาพการเปล่งรังสีความร้อนของผิวมนุษย์มีค่า 0.97) (115 J/s or W)

3) ดาวดวงหนึ่งเมื่อใช้กล้องโทรทรรศน์ส่องรับแสง พบว่าแสงที่ส่องออกมาเป็นสีเขียว(ความยาวคลื่น ≈ 500 nm อยากทราบว่า อุณหภูมิที่ผิวของดวงดาวนี้มีค่าประมาณเท่าใด (5960 K)

4) จากกฎการแผ่รังสีวัตถุดำของพลังค์ $u(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5}\left(\frac{1}{e^{hc/\lambda kT}-1}\right)d\lambda$ จงแสดงว่าที่ช่วงความยาวคลื่นค่าสูง ๆ และอุณหภูมิของวัตถุดำมีค่ามาก กฎการแผ่รังสีของพลังค์สามารถแปลงเป็นกฎของเรย์ลี-จีนส์ได้ $u(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT d\nu$

ส่งภายในวันที่ 5 ก.ค. 54