บทที่ 9
การอธิบายปรากฏการณ์สำคัญโดยหลักสถิติ

จุดประสงค์การเรียนรู้

1. อธิบายการแผ่รังสีของวัตถุดำโดยหลักสถิติทางอุณหพลศาสตร์และทฤษฎีควอนตัมได้
2. แสดงกฎการแจกแจงพลังงานของโฟตอนโดยหลักสถิติของโบส-ไอน์สไตน์ได้
3. หาค่าต่าง ๆ ทางอุณหพลศาสตร์หรือเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการแผ่รังสีของวัตถุดำได้
4. อธิบายสมบัติของอิเล็กตรอนอิสระที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนและการนำไฟฟ้าของโลหะต่าง ๆ ได้
5. เปรียบเทียบลักษณะการแจกแจงของอิเล็กตรอนอิสระกับก๊าซโดยทั่วไปได้
6. แสดงฟังก์ชันการแจกแจงที่ถูกต้องสำหรับอิเล็กตรอนอิสระได้
7. ชี้แจงความหมายของพลังงานเฟร์มีในกรณีของอิเล็กตรอนอิสระได้
8. หาค่าต่าง ๆ ของอิเล็กตรอนอิสระได้

เค้าโครงเรื่อง

1. **การแผ่รังสีของวัตถุดำ**
   - 1.1 ความหมายของวัตถุดำ
   - 1.2 จำนวนโฟตอนของการแผ่รังสี
   - 1.3 ความหนาแน่นของพลังงาน
   - 1.4 การเปรียบเทียบกับกฎมูลฐานต่าง ๆ
2. **การหาค่าต่าง ๆ ของการแผ่รังสีของวัตถุดำ**
   - 2.1 ความดันของการแผ่รังสี
   - 2.2 พลังงานทั้งหมดของระบบ
   - 2.3 ความจุความร้อนของระบบ

2.4 เอนโทรปีของระบบ

2.5 ฟังก์ชันเฮล์มโฮลส์ของระบบ

2.6 ฟังก์ชันกิบส์ของระบบ

3. อิเล็กตรอนอิสระในโลหะ

3.1 คุณลักษณะของอิเล็กตรอนอิสระในโลหะ

3.2 การแจกแจงของอิเล็กตรอนอิสระ

3.3 ฟังก์ชันเฟร์มี

3.4 การหาค่าศักย์ทางเคมี

3.5 พลังงานเฟร์มี

4. การหาค่าต่าง ๆ ของอิเล็กตรอนอิสระ

4.1 พลังงานทั้งหมดของอิเล็กตรอนอิสระ

4.2 ความร้อนจำเพาะของอิเล็กตรอนอิสระ

4.3 เอนโทรปีของอิเล็กตรอนอิสระ

4.4 ฟังก์ชันเฮล์มโฮลส์ของอิเล็กตรอนอิสระ

4.5 ความดันของก๊าซอิเล็กตรอน

(หน้า 494-499)

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

คำอธิบายศัพท์/สำนวน

1. การแผ่รังสีของวัตถุดำ คือ การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในทุกขนาดช่วงคลื่นหรือทุกระดับพลังงานตั้งแต่ศูนย์ถึงอนันต์ จากวัตถุซึ่งสามารถรับพลังงานของการแผ่รังสีที่ตกมายังวัตถุนั้นได้ทั้งหมดทุกขนาดช่วงคลื่น เมื่อศึกษาจากวัตถุดำภายในสุญญากาศซึ่งล้อมรอบด้วยผนังทึบ ขณะที่อยู่ในสถานะคงตัวปรากฏว่าอัตราการรับรังสีที่ตกมายังวัตถุนั้นจะเท่ากับอัตราการแผ่รังสีออกจากวัตถุ โดยการแผ่รังสีจะขึ้นกับอุณหภูมิของผนังที่ล้อมรอบ

2. โฟตอน คือ หน่วยพลังงานของแสงหรือการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเรียกว่าควอนตัม โดยมีค่าตามขนาดความถี่ของแสงหรือคลื่นเท่ากับผลคูณของค่าคงตัวของพลังค์กับความถี่นั้น

สรุปประเด็นสำคัญ

โดยการพิจารณาการแผ่รังสีของวัตถุดำตามหลักสถิติโบส-ไอน์สไตน์ เนื่องจากรังสีประกอบด้วยอนุภาคโฟตอนซึ่ง**ไม่**มีความแตกต่างกันและ**ไม่**มีขีดจำกัดใด ๆ ในการกระจายอนุภาค ปรากฏว่าได้ผลตรงกับ**กฎของพลังค์**ที่ได้จากการทดลอง และตรงกับ**กฎของสเตฟาน**ที่ได้จากการทดลองด้วย

กิจกรรมการเรียนที่ 1

1. ทบทวนเนื้อหาหัวข้อที่ 1 จากตำราเรียนด้วยตนเองแบบโปรแกรมสำหรับกระบวนวิชานี้ (รหัสการพิมพ์ 29241) หน้า 494-499 หรือฟังคำบรรยายสรุปจากแถบคำบรรยายสรุปสำหรับกระบวนวิชานี้ ครั้งที่ 10 (ดูบันทึกท้ายเล่ม) ประกอบแผ่นภาพโปร่งใสแผ่นที่ 61-62 (ดูต้นแบบท้ายเล่มนี้)

2. แสดงรูปแบบฟังก์ชันการแจกแจงสำหรับการแผ่รังสีของวัตถุดำตามหลักสถิติโบส-ไอน์สไตน์ และเปรียบเทียบกับผลการทดลองตามกฎต่าง ๆ

(หน้า 500-504)

การหาค่าต่าง ๆ ของการแผ่รังสีของวัตถุดำ

คำอธิบายศัพท์/สำนวน

1. ความดันของการแผ่รังสี คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานต่อปริมาตร ซึ่งจะลดลงเมื่อมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ตามคำจำกัดความดังนี้ ความดัน $P = -\partial\varepsilon_j/\partial V$ จะได้ ความดันเฉลี่ย

จากโฟตอนของการแผ่รังสีทั้งหมด $\overline{P} = \Sigma \overline{N}_j (-\partial\epsilon_j/\partial V)$

2. พลังงานทั้งหมดของการแผ่รังสี คือ พลังงานของระบบโฟตอนซึ่งมีขนาดความถี่ต่าง ๆ กัน ภายในปริมาตร V ดังนั้น จะหาพลังงานทั้งหมดของระบบโฟตอนได้จากความหนาแน่นของพลังงานคูณกับปริมาตร และพลังงานทั้งหมดของระบบคือพลังงานภายในของระบบ

สรุปประเด็นสำคัญ

ความดันของการแผ่รังสีขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพลังงานการแผ่รังสี โดยที่พลังงานทั้งหมดของระบบคือพลังงานภายในของระบบ จึงหาความจุความร้อนของวัตถุดำได้จากพลังงานภายในขณะที่ปริมาตรคงที่ ส่วนค่าอื่น ๆ จะหาได้จากความสัมพันธ์ตามที่ได้ศึกษาแล้วในอุณหพลศาสตร์แผนเดิม

กิจกรรมการเรียนที่ 2

1. ทบทวนเนื้อหาหัวข้อที่ 2 จากตำราเรียนด้วยตนเองแบบโปรแกรมสำหรับกระบวนวิชานี้ (รหัสการพิมพ์ 2524) หน้า 500-504

2. เปรียบเทียบค่าความดันของการแผ่รังสีกับความดันของก๊าซอุดมคติ เมื่อเทียบกับความหนาแน่นของพลังงานในแต่ละระบบ

3. พิจารณาค่าต่าง ๆ ของการแผ่รังสีจากวัตถุดำว่าสัมพันธ์กับคุณสมบัติของผนังที่ล้อมรอบอย่างไร

(หน้า 505-518)

อิเล็กตรอนอิสระในโลหะ

คำอธิบายศัพท์/สำนวน

1. ก๊าซอิเล็กตรอน คือ อิเล็กตรอนอิสระในโลหะซึ่งสามารถเคลื่อนออกจากวงนอกสุดของอะตอมในโครงสร้างแลตทิซได้โดยง่าย จึงกระจายอยู่บริเวณผิวโลหะ เป็นตัวการในการนำไฟฟ้าและความร้อน ซึ่งทำให้โลหะเป็นตัวนำที่ดีได้ อิเล็กตรอนอิสระซึ่งกระจายอยู่ทั่วไปในขอบเขตของผิวโลหะ จึงเปรียบเสมือนอนุภาคก๊าซซึ่งฟุ้งกระจายอยู่ภายในภาชนะที่บรรจุก๊าซนั้น จึงเรียกอิเล็กตรอนอิสระนี้ว่า ก๊าซอิเล็กตรอน แต่การแจกแจงของอิเล็กตรอนอิสระต่างกับในกรณีของก๊าซทั่วไป โดยระบบอิเล็กตรอนอิสระจะเป็นระบบตามหลักสถิติเฟร์มี-ดิแรก นอกจากนั้น ความดันของก๊าซอิเล็กตรอนจะมีค่ามากกว่าของก๊าซทั่วไปหลายแสนเท่า

2. พลังงานเฟร์มี คือ พลังงานสูงสุดที่อิเล็กตรอนอิสระในโลหะจะมีได้ที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ ในขณะที่พลังงานเฉลี่ยของก๊าซอุดมคติเป็นศูนย์ที่ศูนย์สัมบูรณ์ แต่สำหรับอิเล็กตรอนอิสระจะมีค่าสูงกว่ามาก และที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากพลังงานเฟร์มี ถ้าอุณหภูมิไม่สูงมากนักจะมีอิเล็กตรอนอยู่ประมาณครึ่งหนึ่งของจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดที่ระดับเฟร์มี โดยที่ศูนย์สัมบูรณ์จะมีการแจกแจงหนึ่งตัวต่อหนึ่งสภาวะอย่างเต็มที่

สรุปประเด็นสำคัญ

เมื่อพิจารณาอิเล็กตรอนอิสระในโลหะเสมือนก๊าซซึ่งประกอบด้วยอนุภาคอิเล็กตรอนกระจายโดยทั่วไป และเทียบระยะห่างระหว่างอนุภาคกับความยาวคลื่นของเดอบรอยล์ ปรากฏว่าไม่ตรงกับในกรณีของก๊าซทั่วไป จึงอาศัยหลักสถิติของเฟร์มี-ดิแรก และหลักกีดกันของเพาลี รวมทั้งสปินของอิเล็กตรอนซึ่งอาจอยู่ในทิศขึ้นหรือลง ซึ่งสอดคล้องกับระบบอิเล็กตรอนอิสระในโลหะโดยมีพลังงานเฉลี่ยที่ศูนย์สัมบูรณ์ไม่เป็นศูนย์

กิจกรรมการเรียนที่ 3

1. ทบทวนเนื้อหาหัวข้อที่ 3 จากตำราเรียนด้วยตนเองแบบโปรแกรมสำหรับกระบวนวิชานี้ (รหัสการพิมพ์ 29241) หน้า 505-518 หรือฟังคำบรรยายสรุปจากแถบคำบรรยายสรุปสำหรับกระบวนวิชานี้ ครั้งที่ 10 (ดูบันทึกท้ายเล่ม) ประกอบแผ่นภาพโปร่งใสแผ่นที่ 61-62 (ดูต้นแบบท้ายเล่มนี้)

2. แสดงระยะห่างระหว่างโมเลกุลโดยเฉลี่ยและความยาวคลื่นของเดอบรอยล์สำหรับก๊าซอุดมคติและก๊าซอิเล็กตรอนว่าแตกต่างกันอย่างไร

3. เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงของอิเล็กตรอนอิสระที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์กับที่อุณหภูมิอื่น ๆ

(หน้า 519-531)

การหาค่าต่าง ๆ ของอิเล็กตรอนอิสระ

คำอธิบายศัพท์/สำนวน

1. พลังงานทั้งหมดของก๊าซอิเล็กตรอน คือ พลังงานทั้งหมดของอิเล็กตรอนอิสระในโลหะซึ่งมีค่าไม่เป็นศูนย์ที่ศูนย์สัมบูรณ์ และที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้นเล็กน้อยจากพลังงานสูงสุดที่อิเล็กตรอนอิสระในโลหะจะมีได้ที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ (พลังงานเฟร์มี)

2. ความร้อนจำเพาะของอิเล็กตรอนอิสระในโลหะ คือ ความจุความร้อนต่อโมลของ

อิเล็กตรอนอิสระในโลหะ ซึ่งเมื่อหาจากความสัมพันธ์กับพลังงานภายในของอิเล็กตรอนอิสระในโลหะจะเป็นความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ โดยขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้นจึงมีค่าเป็นศูนย์ที่ศูนย์สัมบูรณ์ (สำหรับความร้อนจำเพาะของก๊าซอุดมคติที่ศูนย์สัมบูรณ์มีค่าไม่เป็นศูนย์) และมีค่าน้อยมากที่อุณหภูมิใด ๆ

3. ความดันของก๊าซอิเล็กตรอน คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานต่อปริมาตร ซึ่งจะลดลงเมื่อมีปริมาตรเพิ่มขึ้น และมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิตามความสัมพันธ์ของพลังงาน โดยมีค่ามากกว่าความดันของก๊าซทั่วไปหลายแสนเท่าที่ศูนย์สัมบูรณ์ แต่ไม่สามารถทำให้อิเล็กตรอนหลุดพ้นจากผิวโลหะได้ เนื่องจากการขัดขวางของพลังงานศักย์ซึ่งเรียกว่า กำแพงศักย์

สรุปประเด็นสำคัญ

การหาค่าต่าง ๆ ของอิเล็กตรอนอิสระจะหาได้จากฟังก์ชันการแจกแจงสำหรับอิเล็กตรอนอิสระ เช่น พลังงานทั้งหมดของระบบจะเท่ากับผลรวมของพลังงานของอนุภาคทุกตัวซึ่งนับว่าเป็นพลังงานภายในของระบบ จึงหาค่าความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่จากความสัมพันธ์กับพลังงานภายใน และหาค่าเอนโทรปีจากความสัมพันธ์กับค่าความจุความร้อน สำหรับค่าอื่น ๆ จะหาได้จากความสัมพันธ์กับค่าข้างต้นนี้ ตามที่ได้ศึกษาแล้วในอุณหพลศาสตร์แผนเดิม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้ในกรณีนี้กับกรณีของก๊าซทั่วไปจะแตกต่างกันมาก และสอดคล้องกับผลการทดลองรวมทั้งกฎที่เกี่ยวข้องด้วย

กิจกรรมการเรียนที่ 4

1. ทบทวนเนื้อหาหัวข้อที่ 4 จากตำราเรียนด้วยตนเองแบบโปรแกรมสำหรับกระบวนวิชานี้ (รหัสการพิมพ์ 29241) หน้า 619-631 หรือฟังคำบรรยายสรุปจากแถบคำบรรยายสรุปสำหรับกระบวนวิชานี้ ครั้งที่ 10 (ดูบันทึกท้ายเล่ม)

2. พิจารณาค่าต่าง ๆ ของอิเล็กตรอนอิสระโดยเฉพาะที่ศูนย์สัมบูรณ์ว่ามีค่าเป็นศูนย์หรือไม่เป็นศูนย์ในกรณีใดบ้าง เพราะเหตุใด

การประเมินผลท้ายบทที่ 9

จงเลือกคำตอบที่ถูกต้องจากคำถามต่อไปนี้

(ดูคำถามใน **ทดสอบ 9** กรอบที่ 9-80 ถึง 9-83 ในหน้า 534-536 ในตำรารหัสการพิมพ์ 29241)

2. จงทำ **แบบฝึกหัด 9** ในกรอบที่ 9-84 ถึง 9-93 ในหน้า 536-543 ในตำรารหัสการพิมพ์ 29241