บันทึกคำบรรยายสรุปวิชาฟิสิกส์อุณหภาพ (PH 314) ครั้งที่ 10

เสียงจากผู้ประกาศนำ "การบันทึกแถบคำบรรยายสรุปกระบวนวิชาของมหาวิทยาลัยรามคำแหง มุ่งส่งเสริมการศึกษาด้วยตนเองและบริการความรู้มายังนักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์พระราชบัญญัติจัดตั้งมหาวิทยาลัยรามคำแหง เป็นตลาดวิชา..... ผลิตโดยสำนักเทคโนโลยีการศึกษามหาวิทยาลัยรามคำแหง ท่านผู้ฟังครับ ต่อไปนี้เป็นการบรรยายสรุปวิชาฟิสิกส์อุณหภาพ หรือ (PH 314) ครั้งที่ 10ในหัวข้อ

1. การเปรียบเทียบการแจกแจงแบบต่าง ๆ
2. ฟังก์ชันพาร์ทิชัน
3. การอธิบายปรากฏการณ์ที่สำคัญโดยหลักสถิติ

โดย รศ.อัจฉรา พันธุ์อำไพ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

**********บันทึกแถบคำบรรยายสรุปนี้ประกอบการบรรยายด้วยการฉายแผ่นภาพโปร่งใสตลอดคำบรรยาย**********

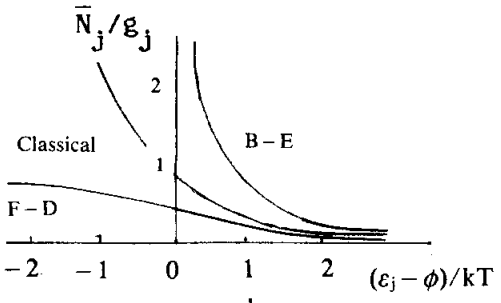
การเปรียบเทียบการแจกแจงแบบต่าง ๆ

จากการบรรยายครั้งก่อนได้พิจารณาถึงฟังก์ชันการแจกแจงแบบโบส-ไอน์สไตน์ แบบเฟร์มี-ดิแรกและแบบแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์ ปรากฏว่ามีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยที่ในหลักของโบส-ไอน์สไตน์และเฟร์มี-ดิแรก จะได้ว่าจำนวนอนุภาคโดยเฉลี่ยในระดับพลังงานหนึ่งต่อจำนวนสภาวะที่เป็นไปได้ในระดับพลังงานนั้น จะเป็นส่วนกลับของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลของพลังงานที่แตกต่างกัน ระหว่างพลังงานของระดับนั้นกับศักย์ทางเคมีซึ่งไม่มีหน่วย (เพราะหารด้วยค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์กับอุณหภูมิสัมบูรณ์) และลบหรือบวกด้วย 1 หรือเขียนได้ว่า $\bar{N}_j/g_j = |\exp(\varepsilon_j - \phi)/k_BT + a|^{-1}$ โดยที่ $a = -1$ สำหรับแบบโบส-ไอน์สไตน์ และ $a = +1$ สำหรับแบบเฟร์มี-ดิแรก

ส่วนฟังก์ชันการแจกแจงของแบบแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์ ซึ่งหาได้โดยวิธีการทำนองเดียวกันจะได้ว่า $\bar{N}_j/(Ng_j) = \exp(\phi - \varepsilon_j)/k_BT$ แสดงว่า**สัดส่วนของ**จำนวนอนุภาคโดยเฉลี่ยในระดับพลังงานหนึ่ง เมื่อเทียบกับจำนวนอนุภาคทั้งหมดของระบบต่อจำนวนสภาวะที่เป็นไปได้ในระดับพลังงานนั้น จะเป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลของพลังงานที่ต่างกัน ระหว่างศักย์ทางเคมีกับพลังงานระดับนั้นที่ไม่มีหน่วย

ขอให้นักศึกษาสังเกตรูปแบบของฟังก์ชันทั้งสามแบบ จะเห็นว่าของแมกซ์เวลล์-โบลต์-ซมันน์นั้นจะเป็นจำนวนโดยเฉลี่ยต่อจำนวนทั้งหมด (N) ซึ่งต่างไปจากอีกสองแบบที่ได้มาก่อนนั้น

ในที่นี้จะเปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงแบบโบส-ไอน์สไตน์ กับแบบเฟร์มี-ดิแรกก่อน โดยจะแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างจำนวนอนุภาคกับพลังงาน (ดังแสดงไว้ในรูปที่ 44) ซึ่งจะเห็นว่าเส้นกราฟของโบส-ไอน์สไตน์ จะมีแกนทั้งสองเป็นเส้นกำกับ แสดงว่าที่พลังงานต่ำและมีค่าใกล้เคียงพลังงานศักย์ทางเคมีจะมีจำนวนอนุภาคโดยเฉลี่ยต่อสภาวะมาก แต่ที่พลังงานสูง ๆ จะมีน้อย ส่วนเส้นกราฟของเฟร์มี-ดิแรกก็แสดงว่า ที่พลังงานสูง ๆ มีจำนวนอนุภาค โดยเฉลี่ยต่อสภาวะน้อยเช่นกัน แต่เมื่อพลังงานต่ำใกล้เคียงกับศักย์ทางเคมีจะมีจำนวนอนุภาคโดยเฉลี่ยต่อสภาวะเป็น 1 ต่อ 2 และเมื่อพลังงานยิ่งต่ำกว่าศักย์ทางเคมีมาก ๆ จะมีอัตราส่วนนี้เกือบเป็น 1 ต่อ 1 นั่นคือ ทุกสภาวะจะมีอนุภาคอยู่เต็มที่ได้ 1 ตัว ซึ่งตรงกับหลักการกีดกันของเพาลีที่จำกัดอนุภาคสำหรับระบบในแบบเฟร์มี-ดิแรกว่า อนุภาคจะอยู่ในสภาวะเดียวกัน**เกินกว่า** 1 ตัวไม่ได้



รูปที่ 44

ถ้านักศึกษาจะพิจารณาในกรณีที่จำนวนอนุภาคโดยเฉลี่ย ในระดับพลังงานหนึ่ง ๆ น้อยกว่าจำนวนสภาวะที่เป็นไปได้ในระดับนั้นมาก นั่นคือ $\bar{N}_j \ll g_j$ จะได้ว่า $\bar{N}_j/g_j = \exp(\phi - \varepsilon_j)/k_BT$ นักศึกษาจะเห็นได้ว่ารูปแบบนี้คล้ายกับแบบแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์ยิ่งขึ้น แต่ยังคงต่างกันโดยที่ไม่ได้เทียบจำนวนทั้งหมด (N) ตามเดิม อย่างไรก็ตามรูปแบบนี้จะเรียกได้ว่าเป็น **ฟังก์ชันการแจกแจงตามแผนเดิม** (classical distribution function) และนับว่าเป็นรูปแบบที่ถูกต้องของแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์ ซึ่งเมื่อแสดงด้วยกราฟ (ในรูปที่ 44) ก็อาจกล่าวได้ว่าที่พลังงานสูง ๆ จะมีจำนวนอนุภาคโดยเฉลี่ยต่อสภาวะน้อยมาก และเหมือนกันทั้งสามแบบ

ความแตกต่างกันในระหว่างฟังก์ชันการกระจายแบบต่าง ๆ จะเห็นว่ามีสาเหตุมาจากการพิจารณาระบบมหภาค ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคที่แตกต่างกัน สำหรับของเฟร์มี-ดิแรกนั้น อนุภาคจะต้องกระจายกันตามหลักการกีดกันเพาลี โดยที่หลักการนี้จะใช้กับอนุภาคที่มีสปินเป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนเต็ม เช่น $\pm 1/2, \pm 3/2, \ldots$ อนุภาคเหล่านี้ได้แก่อิเล็กตรอนและโพสิตรอน ส่วนอนุภาคที่เป็นไปตามแบบโบส-ไอน์สไตน์จะมีสปินเป็นเลขจำนวนเต็ม ได้แก่ อนุภาคโฟตอนและโฟนอน และสำหรับอนุภาคตามแบบแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์ คืออนุภาคของก๊าซต่าง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะเกาะกันเป็นโมเลกุล จึงเรียกรวมกันไปว่าก๊าซเชิงโมเลกุล (molecular gas) เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน และไฮโดรเจน

ในตอนต่อไปนี้จะได้นำฟังก์ชันการแจกแจงแบบต่าง ๆ มาใช้ในการหาค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบต่าง ๆ กัน ซึ่งสามารถจะพิจารณาได้ง่ายขึ้นเมื่อนำไปสัมพันธ์กับฟังก์ชันที่สำคัญอีกฟังก์ชันหนึ่ง เรียกว่า "ฟังก์ชันพาร์ทิชัน" ที่มีประโยชน์มากและสามารถนำมาใช้เพื่อหาค่าต่าง ๆ ทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยที่ถ้าทราบว่าฟังก์ชันนี้สัมพันธ์อย่างไรกับค่าใดค่าหนึ่งเช่น ความดัน ปริมาตร และพลังงานภายใน ซึ่งเป็นค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่มีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 8 ค่า ดังได้บรรยายไปแล้วในตอนต้น ๆ ก็จะสามารถคำนวณหาค่านั้น ๆ ได้จากฟังก์ชันนี้

ฟังก์ชันพาร์ทิชัน

ในการนำฟังก์ชันพาร์ทิชัน (partition function) ไปใช้หาค่าต่าง ๆ ทางเทอร์โมไดนามิกส์ จะใช้อักษร Z แทนฟังก์ชันนี้ โดยจะกำหนดว่า $Z = \Sigma\, g_j \exp(-\varepsilon_j/k_BT)$

เมื่อพิจารณาอยู่ในรูปของฟังก์ชันการแจกแจงแบบแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์จะเขียนได้ว่า $\bar{N}_j/g_j = (N/Z)\exp(-\varepsilon/k_BT)$ และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันพาร์ทิชันกับค่าต่าง ๆ ทางเทอร์โมไดนามิกส์ก็ได้ ดังนี้

ศักย์ทางเคมี $\phi = -k_BT \ln Z$

ฟังก์ชันเฮล์มโฮลท์ส, $F = -Nk_BT\,(\ln Z - \ln N + 1)$

เอนโทรปี, $S = Nk_BT\,(\partial \ln Z/\partial T) + Nk_B(\ln Z - \ln N + 1)$

พลังงานภายใน, $U = Nk_BT(\partial \ln Z/\partial T)_v$

ความดัน, $P = Nk_BT(\partial \ln Z/\partial V)_T$

การนำความสัมพันธ์เหล่านี้ไปใช้หาค่าต่าง ๆ จะต้องทราบว่า ฟังก์ชันพาร์ทิชันสำหรับระบบที่ต้องการหาค่านั้นคืออะไรเสียก่อน ดังเช่นการหาค่าต่าง ๆ ของก๊าซอุดมคติโดยอาศัยฟังก์ชันพาร์ทิชันต่อไปนี้

ตัวอย่าง 10-1 การหาค่าต่าง ๆ ของก๊าซอุดมคติโดยฟังก์ชันพาร์ทิชัน

สำหรับระบบก๊าซอุดมคติที่ประกอบด้วยอนุภาคเดี่ยว (monatomic) จะได้ว่า ฟังก์ชันพาร์ทิชัน $Z = V(2\pi mk_BT/h^2)^{3/2}$ เมื่อแทนค่าลงในความสัมพันธ์สำหรับค่าความดัน ปรากฏว่า $P = Nk_BT/V = nRT$ ซึ่งตรงกับกฎของก๊าซนั่นเอง และสำหรับพลังงานภายใน $U = 3/2\ Nk_BT = 3/2\ nRT$ ซึ่งตรงกับที่ได้พิจารณาแล้วโดยทฤษฎีจลน์ของก๊าซอุดมคติ และจะหาค่าความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ $c_v = 3/2\ R$

ตัวอย่าง 10-2 การแจกแจงของโมเลกุลตามขนาดความเร็วของก๊าซอุดมคติ

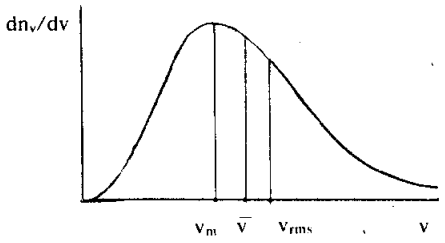
โดยอาศัยฟังก์ชันพาร์ทิชันสามารถแสดงได้ว่า อัตราเร็วของโมเลกุลก๊าซอุดมคติขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ดังนี้ สำหรับความเร็วโดยเฉลี่ยแบบต่าง ๆ (ดังแสดงไว้ในรูปที่ 45) คือ

$$v_{rms} = \sqrt{\bar{v}^2} = (1/N_0^{\infty} \int v^2\, dn_v)^{1/2}$$

$$\bar{v} = \int v dN_v/N = \sqrt{2.55k_BT/m}$$

และ $v_m = \sqrt{2k_BT/m}$

โดยที่ $v_m : \bar{v} : v_{rms} = 1 : 1.128 : 1.224$



รูปที่ 45

ตัวอย่าง 10-3 ความดันบรรยากาศ

โดยที่บรรยากาศประกอบด้วยอนุภาคที่จะเป็นไปตามแบบแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์ และจะมีความดันเปลี่ยนแปลงไปตามระดับความสูงจากผิวโลก (y) ดังนี้

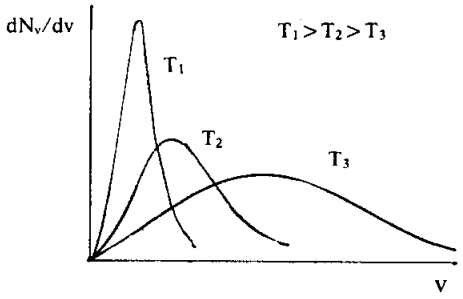
$$P_y = P_o \exp(-mgy/k_BT)$$

เมื่อ P_0 คือ ความดันของบรรยากาศที่ผิวโลก

จะเห็นว่าความดันของบรรยากาศเกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งกระทำต่ออนุภาคในบรรยากาศ (mg) และขึ้นอยู่กับระดับความสูงจากผิวโลกกับอุณหภูมิด้วย

หมายเหตุ

นอกจากนี้จะเห็นว่ายังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิด้วย ในตอนนี้จะขอให้นักศึกษาพิจารณาลักษณะการกระจายตามอัตราเร็วของแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ นอกจากจะสัมพันธ์กับความเร็วแล้ว ในฟังก์ชันการแจกแจงซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์คูณกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ด้วยนั้น ผลคูณนี้คือพลังงานความร้อน จึงแสดงถึงความสัมพันธ์ของพลังงานในรูปต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดพลังงานของระบบและการแจกแจงของอนุภาคภายในระบบ ภายในระบบ



รูปที่ 46

อนึ่ง ฟังก์ชันการแจกแจงของแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์ (ดังแสดงไว้ในรูปที่ 45 และ 46) จะเห็นว่ามีลักษณะคล้ายระฆังเบ้ไปทางซ้าย ซึ่งอธิบายได้ว่า โดยทั่วไปจะมีอนุภาคอยู่เป็นจำนวนน้อยมากที่ความเร็วสูงและความเร็วต่ำมาก ๆ แต่จะมีอนุภาคอยู่มากในช่วงที่ความเร็วไม่สูงหรือต่ำจนเกินไป และที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้พลังงานของระบบต่ำ ดังนั้นอนุภาคส่วนใหญ่จะมีความเร็วต่ำไปด้วย แต่ที่อุณหภูมิสูงอนุภาคส่วนใหญ่จะมีความเร็วสูงนั่นคือ มีพลังงานสูงด้วย (โดยที่พื้นที่ใต้เส้นโค้งคือจำนวนอนุภาคทั้งหมดของระบบซึ่งคงที่ ดังนั้น เมื่ออนุภาคส่วนใหญ่มีความเร็วสูงขึ้นที่อุณหภูมิสูงจะเห็นว่าเส้นโค้งในกราฟของรูปที่ 46 จะขยายออกไปทางขวา แต่จุดสูงสุดของเส้นโค้งจะลดลงเพื่อที่จะได้ว่าพื้นที่ใต้เส้นโค้งแต่ละเส้นเท่ากันหมด)

ต่อจากนี้จะนำหลักสถิติที่ได้พิจารณาแล้วในทางเทอร์โมไดนามิกส์ ไปอธิบายระบบที่แตกต่างกัน

การอธิบายปรากฏการณ์ที่สำคัญโดยหลักสถิติ

ในการนำฟังก์ชันการแจกแจงทั้งสามแบบไปพิจารณาระบบที่แตกต่างกัน เช่น ระบบอิเล็กตรอนอิสระในโลหะตัวนำ ซึ่งมีผู้ค้นพบว่าอิเล็กตรอนอิสระในโลหะทำให้โลหะเป็นตัวนำที่ดีเพราะอิเล็กตรอนเหล่านี้สามารถฟุ้งกระจายได้อย่างรวดเร็ว ถ้าหากพิจารณาว่าเป็นกลุ่มอนุภาคเช่นเดียวกับกลุ่มอนุภาคก๊าซทั่วไป อาจจะเรียกอิเล็กตรอนอิสระในโลหะว่า**ก๊าซอิเล็กตรอน**อยู่ในโลหะนั้น ในทำนองเดียวกันกับก๊าซที่บรรจุอยู่ภายในภาชนะ เมื่อหาค่าความร้อนจำเพาะโดยพิจารณาว่า ก๊าซอิเล็กตรอนก็เหมือนกับก๊าซทั่วไป ปรากฏว่าค่าความร้อนจำเพาะของโลหะที่ประกอบด้วยโครงสร้างของโลหะภายใน และมีก๊าซอิเล็กตรอนกระจายอยู่ทั่วไปภายในโลหะจะมีค่ามากเกินไปกว่าค่าที่วัดได้จากการทดลอง (สำหรับก๊าซอนุภาคโดยมีค่าความร้อนจำเพาะ $c_v = 3/2R$ และสำหรับของแข็งทั่วไปมีค่าราว 3R ที่อุณหภูมิห้อง) ดังนั้น จึง**ไม่**อาจนำหลักสถิติที่ใช้กับก๊าซทั่วไป มาใช้กับอิเล็กตรอนอิสระในโลหะได้ ส่วนอนุภาคโฟตอนซึ่งเป็นหน่วยหนึ่งของการแผ่สนามแม่ไฟฟ้าแม่เหล็ก อาจพิจารณาว่าเป็นกลุ่ม**ก๊าซโฟตอน**ทำนองเดียวกับก๊าซทั่วไป แต่ไม่สามารถนำหลักสถิติที่ใช้กับก๊าซทั่วไปมาใช้กับก๊าซโฟตอนได้ จึงทำให้มีหลักสถิติที่ต่างกันถึงสามหลัก สำหรับระบบที่ต่างกันสามระบบนี้

สำหรับสถิติของแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์จะนำไปใช้กับระบบก๊าซทั่วไป ซึ่งเรารู้จักดีกันอยู่แล้ว ในขณะที่หลักสถิติของโบส-ไอน์สไตน์จะใช้กับอนุภาคโฟตอนและอนุภาคโฟนอน แต่หลักสถิติของเฟร์มี-ดิแรกจะใช้กับอนุภาคอิเล็กตรอนและโพสิตรอนเป็นต้น อนุภาคที่เป็นไปตามหลักการแต่ละหลักการจึงมีชื่อเรียกโดยเฉพาะ ดังนี้ สำหรับอนุภาคที่เป็นไปตามหลักของโบส-ไอน์สไตน์จะเรียกว่า **โบซอน** (bosons) และอนุภาคที่เป็นไปตามหลักของเฟร์มี-ดิแรกจะเรียกว่า **เฟร์มีออน** (fermions) ส่วนอนุภาคก๊าซทั่วไปที่ส่วนใหญ่เกาะกันเป็นโมเลกุลนั้นเรียกว่า **ก๊าซเชิงโมเลกุล** (molecular gas) ซึ่งเป็นไปตามหลักของแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์ดังกล่าวแล้ว

ในตอนสุดท้ายนี้ ขอให้นักศึกษาเปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงทั้งสามแบบ และหลักการหรือที่มาของทั้งสามหลักการนี้ว่า สิ่งที่เหมือนกันมีอย่างไรบ้าง และหากใช้หลักสถิติหนึ่งกับระบบใด ๆ จะให้ผลถูกต้องตรงกับที่เป็นจริงหรือไม่ โดยเฉพาะการนำหลักการทั้งสามแบบนี้ไปศึกษาและคำนวณหาค่าต่าง ๆ ของระบบมหภาค ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคแต่ละชนิดข้างต้น นักศึกษาจะอ่านรายละเอียดได้จากตำราที่จัดพิมพ์ไว้แล้วและทำโจทย์แบบฝึกหัดที่น่าสนใจ พร้อมทั้งทบทวนหลักการต่าง ๆ ตลอดจนรูปแบบของฟังก์ชันการแจกแจงแบบต่าง ๆ ทั้งหมด เชื่อว่านักศึกษาจะสามารถทำความเข้าใจกับหลักการทั้งหมด โดยเฉพาะหลักสถิติทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้โดยง่าย จึงขอจบการบรรยายสำหรับกระบวนวิชานี้ทั้งหมดไว้เพียงเท่านี้

แบบทดสอบความเข้าใจ

1. สมมติฐานเบื้องต้นคืออะไร
2. ความน่าจะเป็นของระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์มีความหมายอย่างไร
3. หลักสถิติทางเทอร์โมไดนามิกส์เชิงสถิติมีกี่แบบและเพราะเหตุใดจึงมีหลายแบบ
4. ฟังก์ชันการแจกแจงคืออะไร
5. ฟังก์ชันการแจกแจงตามแผนเดิมคือแบบแมกซ์เวลล์ใช่หรือไม่
6. ฟังก์ชันพาร์ทิชันคืออะไรและสำคัญอย่างไร
7. การกระจายของโมเลกุลก๊าซทั่วไปขึ้นกับอัตราเร็วของโมเลกุลอย่างไร
8. ระบบใดบ้างที่เป็นไปตามหลักสถิติแต่ละแบบ
9. ถ้าถือว่าอิเล็กตรอนอิสระในโลหะตัวนำเทียบได้กับก๊าซทั่วไปจะถูกต้องหรือไม่

คำตอบแบบทดสอบ 7

1. สภาวะที่เป็นไปได้ต่าง ๆ ของระบบอิสระมีความน่าจะเป็นเท่ากันทุกสภาวะ
2. จำนวนสภาวะจุลภาคที่เป็นไปได้ทั้งหมดของระบบ
3. 3 แบบสำหรับระบบที่ประกอบด้วยอนุภาคตามเกณฑ์ต่าง ๆ กัน 3 หลักเกณฑ์ คือหลักของโบส-ไอน์สไตน์, หลักของเฟร์มี-ดิแรก, และหลักของแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์
4. ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอนุภาคกับค่าต่าง ๆ ของระบบ เช่น ฟังก์ชันการแจกแจงตามอัตราเร็ว แสดงถึงจำนวนอนุภาคที่มีขนาดความเร็วต่าง ๆ
5. ไม่ใช่ แต่คล้ายกันมาก แต่ถือว่าฟังก์ชันการแจกแจงตามแผนเดิม คือ รูปแบบที่ถูกต้องของแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์
6. $Z = \Sigma g_j \exp(-\varepsilon_j/k_BT)$ ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์กับค่าต่าง ๆ ของระบบได้
7. ตามฟังก์ชันการแจกแจงของแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์ โมเลกุลส่วนใหญ่มีอัตราเร็วไม่สูงมากนักแต่ค่อนข้างต่ำ จึงทำให้ฟังก์ชันการแจกแจงนี้มีลักษณะคล้ายระฆังเบ้ไปทางด้านที่ความเร็วต่ำมากกว่า
8. ระบบอนุภาคที่เหมือนกันทุกตัวและสามารถแจกแจงไป ตามสภาวะพลังงานต่าง ๆ ได้ไม่จำกัดทั้งจำนวนอนุภาคและสภาวะ โดยที่แต่ละสภาวะพลังงานถือว่าแตกต่างกัน จะเป็นไปตามหลักสถิติโบส-ไอน์สไตน์ ซึ่งอนุภาคเหล่านี้มีชื่อเฉพาะเรียกว่า "โบซอน" ส่วนระบบอนุภาคที่เหมือนกันทุกประการแต่แจกแจงไปตามสภาวะพลังงานต่าง ๆ ตามหลักการกีดกันเพาลีจะเป็นไปตามหลักสถิติเฟร์มี-ดิแรก โดยอนุภาคเหล่านี้มีชื่อว่า "เฟร์มิออน" แต่ระบบอนุภาคที่ไม่เหมือนกันและสามารถกระจายไปตามสภาวะพลังงานต่าง ๆ ได้ไม่จำกัด

จะเป็นไปตามหลักสถิติแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์ ซึ่งได้แก่ก๊าซทั่วไปที่เรียกรวมกันว่าก๊าซเชิงโมเลกุล

9. ไม่ถูกเพราะเมื่อหาค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซอิเล็กตรอน เสมือนหนึ่งก๊าซอนุภาคโดดซึ่งฟุ้งกระจายอยู่ในโครงนร้างของโลหะ เมื่อรวมกันจะได้ค่าความร้อนจำเพาะของโลหะตัวนำมากกว่าที่วัดได้ แต่เมื่อพิจารณาตามหลักของเฟร์มี-ดิแรก ปรากฏว่าค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซอิเล็กตรอนน้อยมากจนไม่ทำให้ค่าความร้อนจำเพาะของโลหะตัวนำนั้นผิดไปจากที่วัดได้จริง (ดูตำราหน้า 525 กรอบที่ 9-62 สำหรับก๊าซอิเล็กตรอนในโลหะเงินที่อุณหภูมิห้อง มีค่าความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ $= 2.25 \times 10^{-2}R$ เท่านั้น ตามที่คำนวณได้จากหลักสถิติของเฟร์มี-ดิแรก)

เสียงจากผู้ประกาศ "ที่จบลงไปนั้นคือการบรรยายสรุปวิชาฟิสิกส์อุณหภาพ หรือ PH 314 ครั้งที่ 10 โดย รศ.อัจฉรา พันธุ์อำไพ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง"

.....การบันทึกแถบคำบรรยายสรุปกระบวนวิชาของมหาวิทยาลัยรามคำแหง มุ่งส่งเสริมการศึกษาด้วยตนเองและบริการความรู้มายังนักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป โปรดส่งคำถามและข้อข้องใจไปยังคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพ 10240.....