บทความปริทรรศน์

กำเนิดฟิสิกส์เชิงสถิติ

นิคม ชูศิริ
Nikom Choosiri

รองศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Thaksin University

กล่าวอย่างกว้างๆ ฟิสิกส์เชิงสถิติเป็นวิชาที่ว่าด้วยการนำสถิติไปประยุกต์ใช้กับระบบฟิสิกส์ที่ประกอบด้วยอนุภาคจำนวนมหาศาลและอยู่ในภาวะสมดุล อาทิ กลุ่มโมเลกุลของแก๊ส ของเหลว และของแข็ง เป็นต้น ประวัติความเป็นมาของฟิสิกส์เชิงสถิตินั้นมีความเกี่ยวข้องอย่างแนบแน่นกับวิชาอุณหพลศาสตร์(thermodynamics) และทฤษฎีจลน์(kinetic theory) โดยทั้งสามวิชาได้รับการสร้างและพัฒนาในช่วงเวลาเกือบจะต่อเนื่องกันและด้วยจุดประสงค์เดียวกัน คือศึกษาสมบัติทางกายภาพของสสาร(ทั้งเชิงความร้อนและเชิงกล)

การศึกษาระบบซึ่งประกอบด้วยอนุภาคจำนวนมหาศาล ปัจจุบันได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง โดยจัดอยู่ในกลุ่มของวิชาฟิสิกส์แผนใหม่(modern physics) ที่นอกเหนือไปจากฟิสิกส์พลังงานสูง(high-energy physics) สำหรับฟิสิกส์พลังงานสูงนั้นจะศึกษาเกี่ยวกับอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคมูลฐาน อาทิ นิวคลีออน นิวตริโน เมซอน หรืออนุภาคประหลาด (strange particles) เป็นต้น ในขณะที่การศึกษาเกี่ยวกับของแข็ง ของเหลว แก๊ส และกลุ่มโมเลกุลในระบบชีวเคมีซึ่งเป็นระบบที่ประกอบขึ้นมาจากอนุภาคเป็นจำนวนมากนั้นมีจุดมุ่งเน้นที่แตกต่างออกไป แต่ความเข้าใจมิได้ยิ่งหย่อนไปกว่ากันเลย สำหรับกลุ่มอนุภาคซึ่งรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของสสารนั้น เราสามารถนำกลศาสตร์ควอนตัมไปประยุกต์ได้ กล่าวคือ แต่ละอนุภาค(อะตอมหรือโมเลกุล)ยังคงมีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับกฎเกณฑ์ทางควอนตัม และเราทราบว่ากระบวนการทางเคมีหรือชีววิทยามิได้ส่งผลกระทบต่อระบบนิวเคลียสในอะตอมแต่ประการใด อีกทั้งแรงดึงดูดระหว่างมวลที่เกิดขึ้นในกลุ่มอนุภาคเหล่านั้นมีค่าน้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ ดังนั้นอันตรกิริยาที่ยังคงอยู่ในกลุ่มอนุภาคเหล่านั้นเหลือเพียงอันตรกิริยาทางไฟฟ้าเท่านั้น จากความรู้ที่เรามีอยู่เกี่ยวกับกลุ่มอนุภาคนั้น ดูเหมือนว่าเรารู้ถ่องแท้แล้ว ดังนั้นโดยหลักการแล้วเราน่าจะสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคได้ทุกตัว อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้วเป็นไปได้ยากด้วยเหตุผลของจำนวนอนุภาคซึ่งขนาดอยู่ในระดับ 10^{23} อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แม้จะใช้เครื่องคำนวณที่มีหน่วยความจำมากมายขนาดไหนก็ตาม หากกล่าวในส่วนอันตรกิริยาระหว่างกลุ่มอนุภาค แม้ว่ารูปแบบเชิงคณิตศาสตร์ของอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคคู่หนึ่งมิได้ซับซ้อน แต่ด้วยสาเหตุของกลุ่มอนุภาคมีจำนวนมหาศาลจึงทำให้ความซับซ้อนเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ยิ่งไปกว่านั้นผลของอันตรกิริยาเหล่านี้ยังก่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่คาดไม่ถึงอยู่เสมอ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องรู้ถึง

พฤติกรรมของอนุภาคเดี่ยวๆ ในระบบเพื่อนำความรู้ดังกล่าวไปทำนายอุบัติการณ์ของปรากฏการณ์ที่คาดไม่ถึงดังกล่าว ตัวอย่างของปัญหาที่ยากต่อการเข้าใจในรายละเอียดเชิงจุลทรรศน์(microscopic detail) เช่น แก๊สภายใต้เงื่อนไขบางอย่างจะควบแน่น(condense)เป็นของเหลวอย่างทันทีทันใดซึ่งมีคุณสมบัติแตกต่างไปจากแก๊สโดยสิ้นเชิง หรือแม้แต่กลุ่มโมเลกุลบางชนิดมีคุณสมบัติพิเศษอันนำไปสู่การเติบโตทางชีวภาพหรือการสืบพันธุ์ ก็ยากต่อการเข้าใจในแง่จุลทรรศน์ จะเห็นว่าปัญหาของกลุ่มอนุภาคจำนวนมากที่อยู่ร่วมกันเป็นระบบนั้น มิได้มีปัญหาเฉพาะความมหาศาลของจำนวนอนุภาคเท่านั้น หากแต่ยังรวมถึงรายละเอียดของพฤติกรรมของอนุภาคแต่ละอนุภาคด้วย อย่างไรก็ตามสิ่งที่นักฟิสิกส์สนใจอย่างแท้จริงนั้นมิใช่พฤติกรรมอย่างละเอียดของทุกๆ อนุภาคในระบบ แต่กลับเป็นพฤติกรรมโดยเฉลี่ยของอนุภาคจุลทรรศน์(microscopic particle) และอิทธิพลของมันที่มีต่อปริมาณมหาทรรศน์(macroscopic quantities) อาทิ ความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิสัมบูรณ์ของระบบ เป็นต้น โดยทั่วไปปริมาณมหาทรรศน์มีความสัมพันธ์กับปริมาณจุลทรรศน์(microscopic quantities)เสมอ ตัวอย่างเช่น ในแก๊สอุดมคติ พบว่า $\bar{\varepsilon} = (3/2)k_B T$ เมื่อ $\bar{\varepsilon}$ เป็นพลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุล(ปริมาณจุลทรรศน์) k_B เป็นค่าคงตัวโบลต์ซมันน์ ส่วน T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ของระบบ(ปริมาณมหาทรรศน์) เป็นต้น

เนื่องจากการศึกษาระบบที่ประกอบไปด้วยอนุภาคจำนวนมหาศาลนั้น สามารถทำการศึกษาได้สองแง่ คือ แง่จุลทรรศน์ และ แง่มหาทรรศน์ จึงเห็นสมควรให้ความหมายของคำดังกล่าวให้ชัดเจนดังนี้ ระบบจุลทรรศน์(microscopic system) หมายถึงระบบที่มีขนาดของอะตอมหรือเล็กกว่า(กล่าวอีกนัยหนึ่งมีขนาดประมาณ 10 Å หรือเล็กกว่า)(Reif, 1988) อาทิ อะตอมเดี่ยวๆ หรือโมเลกุลเดี่ยวๆ เป็นต้น ส่วนระบบที่จัดว่าเป็นประเภทมหาทรรศน์(macroscopic system) (หรือสเกลขนาดใหญ่) หมายถึงระบบที่มีขนาดใหญ่จนสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือโดยอาศัยกล้องจุลทรรศน์ชนิดใช้แสงธรรมดา(กล่าวอีกนัยหนึ่งเป็นระบบที่โตกว่า 1 nm) ดังนั้นระบบมหาทรรศน์จึงประกอบด้วยอะตอมหรือโมเลกุลเป็นจำนวนมหาศาล(ในระดับขนาด 10^{23} โมเลกุลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ปกติเมื่อเราปฏิบัติหรือเกี่ยวข้องกับระบบมหาทรรศน์ เรามักไม่ใส่ใจต่อพฤติกรรมของอนุภาคจุลทรรศน์ที่ประกอบขึ้นเป็นระบบมหาทรรศน์ แต่กลับให้ความสนใจต่อปริมาณมหาทรรศน์หรือพารามิเตอร์มหาทรรศน์ (macroscopic parameter) ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น พารามิเตอร์มหาทรรศน์ของระบบจะเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะของระบบโดยรวม ตัวอย่างเช่น ปริมาตร ความดัน โมเมนต์แม่เหล็ก เป็นต้น ถ้าหากพารามิเตอร์มหาทรรศน์ของระบบโดดเดี่ยว (isolated system)ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เรากล่าวว่าระบบอยู่ในภาวะสมดุล แต่ถ้าระบบโดดเดี่ยวไม่อยู่ในภาวะสมดุล พารามิเตอร์มหาทรรศน์ของระบบจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาพร้อมกับปรับตัวเข้าสู่ค่าคงที่สอดคล้องกับเงื่อนไขสมดุลใหม่อีกครั้งหนึ่ง

ระบบมหาทรรศน์(เช่น ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส)ได้รับการศึกษาอย่างมีแบบแผนในแง่มหาทรรศน์มาตั้งแต่ศตวรรษที่ 19 กฎเกณฑ์ต่างๆ ที่ใช้บรรยายปรากฏการณ์มหาทรรศน์ได้ก่อให้เกิดวิชาอุณหพลศาสตร์ ในช่วงครึ่งหลังของศตวรรษที่ 19 ทฤษฎีการดำรงอยู่ของอะตอมได้รับการยอมรับอย่างจริงจัง ในขณะเดียวกันการวิเคราะห์ปรากฏการณ์มหาทรรศน์ด้วยแง่มุมเชิงจุลทรรศน์ก็ได้เริ่มขึ้น โดยอาศัยความคิดที่ว่าระบบมหาทรรศน์นั้นแท้จริงแล้วประกอบด้วยอะตอมหรือโมเลกุล(อนุภาคจุลทรรศน์)จำนวนมหาศาล ยิ่งไปกว่านั้นพัฒนาการของวิชากลศาสตร์ควอนตัมซึ่งถือกำเนิดขึ้นในศตวรรษที่ 20(ประมาณ ค.ศ. 1926) ได้ช่วยเสริมให้การบรรยายพฤติกรรมของอนุภาคจุลทรรศน์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น พร้อมทั้งเปิดทางสำหรับการวิเคราะห์ระบบมหาทรรศน์บนพื้นฐานของมโนภาพเชิงจุลทรรศน์อย่างจริงจัง ผนวกกับการพบวิธีการสมัยใหม่ในการแก้ปัญหาเทหวัตถุหลายชิ้น(many-body problem) ส่งผล

ให้มีการพัฒนาวิธีการศึกษาเชิงฟิสิกส์เกี่ยวกับวัตถุที่ประกอบขึ้นจากอนุภาคจำนวนมหาศาลด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน ก่อให้เกิดแขนงวิชาหลายแขนง โดยที่ขอบเขตของวิชาเหล่านั้นมิได้ถูกแบ่งอย่างเด่นชัด ความแตกต่างและความคล้ายคลึงของกลุ่มวิชาเหล่านั้นขึ้นอยู่กับวิธีการเข้าสู่คำตอบของปัญหา อาจกล่าวโดยย่อดังนี้ (Trevena, 1993)

1. สำหรับระบบที่อยู่ในภาวะสมดุล โดยอาศัยกฎของปรากฏการณ์(phenomenological laws) และสมมุติฐานซึ่งประมวลมาจากผลการทดลองอย่างมีระบบ ทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมหาทรรศน์หรือพารามิเตอร์มหาทรรศน์ของระบบได้ การเข้าถึงองค์ความรู้ของระบบด้วยวิธีการดังกล่าวก่อให้เกิดวิชาอุณหพลศาสตร์ กล่าวในเชิงประวัติศาสตร์ ถือว่าเป็นวิชาที่เก่าแก่ที่สุดในกลุ่ม จุดเด่นของวิชานี้ก็คือสามารถสร้างกฎเกณฑ์หรือถ้อยแถลง(statement)บนพื้นฐานของจำนวนสมมุติฐานน้อยที่สุดและไม่ต้องอาศัยรายละเอียดเชิงจุลทรรศน์ของระบบเลย อย่างไรก็ตามภายใต้จุดเด่นก็ได้ซ่อนจุดด้อยไว้ไม่น้อย กล่าวคือด้วยวิธีการของวิชาอุณหพลศาสตร์ สามารถสร้างกฎเกณฑ์ดังกล่าวด้วยจำนวนค่อนข้างน้อย และสมบัติเชิงอุณหพลวัต(thermodynamic properties)ที่น่าสนใจเป็นจำนวนมากที่ไม่อาจทำนายได้แม้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเหล่านั้น เช่นอุณหพลศาสตร์บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างความจุความร้อน(heat capacity)ของแก๊สกับสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวและขยายตัว แต่ไม่สามารถทำนายความจุความร้อนของแก๊สใดๆ ได้

2. สำหรับระบบที่อยู่ในภาวะสมดุล สามารถสร้างกฎเกณฑ์หรือถ้อยแถลงที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานเชิงจุลทรรศน์ของระบบ กล่าวคืออาศัยสมบัติของอนุภาคจุลทรรศน์ซึ่งอยู่ภายใต้กฎเกณฑ์ของกลศาสตร์(แผนเดิมและควอนตัม) การเข้าสู่องค์ความรู้ด้วยวิธีนี้ก่อให้เกิดวิชาฟิสิกส์เชิงสถิติ จัดได้ว่าเป็นวิธีการที่ทรงประสิทธิภาพและสวยงามที่สุดในกลุ่ม กฎเกณฑ์หรือความสัมพันธ์ต่างๆ ที่สามารถหาได้ด้วยวิธีของอุณหพลศาสตร์ทั้งหมด สามารถใช้วิธีการของฟิสิกส์เชิงสถิติได้ทั้งหมดเช่นกัน ยิ่งไปกว่านั้นมีความสัมพันธ์อีกเป็นจำนวนมากที่ไม่อาจสร้างขึ้นมาได้ด้วยวิธีของอุณหพลศาสตร์ แต่สามารถหาได้โดยอาศัยความรู้เชิงจุลทรรศน์ของระบบ

3. หากระบบมิได้อยู่ในภาวะสมดุล เราต้องเผชิญกับปัญหาที่หนักหน่วงยิ่งขึ้น หากใช้วิธีการทางอุณหพลศาสตร์จัดการกับปัญหาดังกล่าว จะนำไปสู่วิธีการที่เรียกว่า อุณหพลศาสตร์ที่ผันกลับไม่ได้(irreversible thermodynamics) แต่ถ้าหากใช้วิธีการเชิงสถิติเพื่อบรรยายระบบดังกล่าว ก็จะนำไปสู่กลศาสตร์เชิงสถิติของกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้(statistical mechanics of irreversible process) อย่างไรก็ดี คุณลักษณะทั่วไป (generality)หรือความเป็นสากลและประสิทธิภาพของวิธีการทั้งคู่มีข้อจำกัดอยู่มาก

4. หากศึกษาถึงรายละเอียดของอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกลุ่มอนุภาคทั้งมวลของระบบ และคำนวณปริมาณมหาทรรศน์ที่มีนัยสำคัญออกมา วิธีนี้เรียกว่าทฤษฎีจลน์ โดยหลักการ วิธีนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับทุกกรณีไม่ว่าระบบจะอยู่ในภาวะสมดุลหรือไม่ จึงจัดว่าเป็นวิธีที่ทรงประสิทธิภาพอีกวิธีหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพพร้อมทั้งเจาะลึกถึงรายละเอียดของระบบเช่นกัน แต่วิธีการในทางปฏิบัตินั้นค่อนข้างยาก และบางครั้งยังนำไปสู่ความสัมพันธ์ที่ไม่กระจ่างชัด

กล่าวในเชิงประวัติศาสตร์ วิชาอุณหพลศาสตร์ถือกำเนิดก่อนที่มนุษย์รู้จักและเข้าใจธรรมชาติของอะตอมเสียอีก ด้วยความคิดที่ว่า ความร้อนเป็นพลังงานรูปหนึ่ง ซึ่งเสนอโดยรัมฟอร์ด(Count Rumford)ในปี ค.ศ. 1798 และได้รับการสนับสนุนอย่างแข็งขันจากนักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อเมเออร์(R.J. Mayer)ในปี ค.ศ. 1842 อย่างไรก็ตามความคิดที่ว่าความร้อนเป็นพลังงานรูปหนึ่งได้รับการยอมรับจากวงการวิทยาศาสตร์อย่างจริงจังหลังจากการทดลองอย่างระมัดระวังของจูล (Joule)ในช่วง ค.ศ. 1843-1849 ในส่วนของการวิเคราะห์เกี่ยวกับเครื่องจักรกลความร้อนได้รับการเสนอต่อสาธารณชนครั้งแรก

โดยวิศวกรชาวฝรั่งเศสนามคาร์โนท์(S. Carnot)ในปีค.ศ. 1824 ทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ได้รับการรวบรวมและวางรากฐานอย่างมั่นคงและเป็นระบบเกือบสมบูรณ์โดยเคลาซิอุส(Clausius) และเคลวิน(Lord Kelvin) ราวปี ค.ศ.1850 ต่อมาได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมดังปรากฏในบทความทางวิชาการของกิบส์(J.W. Gibbs) ซึ่งตีพิมพ์ในระหว่างปี ค.ศ. 1876-1878

ในส่วนพัฒนาการของวิชาฟิสิกส์เชิงสถิตินั้น แนวคิดที่จะนำมโนภาพเชิงจุลทรรศน์ไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาเชิงมหาทรรศน์ได้ริเริ่มมาตั้งแต่ครึ่งหลังของศตวรรษที่ 19 อย่างไรก็ตามความคิดพื้นฐานที่เกี่ยวข้องได้ถูกวางรากฐานไว้ก่อนหน้านั้นแล้ว โดยมีความเกี่ยวเนื่องหรือมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับทฤษฎีจลน์ของแก๊สอุดมคติ อาจเริ่มต้นตั้งแต่งานชิ้นสำคัญของแบร์นูลลี (Daniel Bernuolli)ที่ปรากฏอยู่ในหนังสือ Hydrodynamica ซึ่งตีพิมพ์เผยแพร่ในปี ค.ศ. 1738 ด้วยความพยามยามทำความเข้าใจธรรมชาติเชิงอะตอมของสสาร แบร์นูลลีคิดว่าความดันของแก๊สนั้นเกิดจากอนุภาคของแก๊สชนกับผนังภาชนะที่ใช้บรรจุมัน และเขาก็ประสบความสำเร็จในการอนุมานกฎของบอยล์(Boyle's law) หลังจากนั้นพัฒนาการความรู้เกี่ยวกับระบบมหาทรรศน์โดยอาศัยแนวคิดเชิงจุลทรรศน์ได้ชะงักงันราว 1 ศตวรรษ จนกระทั่งวัตเตอร์สัน(Waterson), เคลาซิอุส และ แมกซ์เวลล์(Maxwell) ได้ร่วมกันเสนอผลงานเกี่ยวกับอัตราเร็วของโมเลกุล ณ เมือง อเบอร์ดีน (Aberdeen) ในปีค.ศ. 1859 ผลงานดังกล่าวมีชื่อเสียงมากรู้จักกันในนามการแจกแจงแบบแมกซ์เวลล์(Maxwell distribution) สามารถใช้ทำนายการแจกแจงอัตราเร็วโมเลกุลของแก๊สในภาวะสมดุลได้อย่างแม่นยำ

หลังจากนั้นไม่นานโบลต์ซมันน์(Boltzmann) ได้ขยายหรือดัดแปร(modified)ทฤษฎีของแมกซ์เวลล์ โดยแสดงให้เห็นว่าแต่ละระดับขั้นความเสรี(degree of freedom)ของแก๊สจะสมนัยกับพลังงานเฉลี่ย $\bar{\varepsilon}$ และพลังงานเฉลี่ยแต่ละระดับขั้นความเสรีดังกล่าวมีค่าเท่ากันหมด หลักการนี้นำไปสู่ทฤษฎีการแบ่งเท่ากันของพลังงาน (the equipartition of energy) ยิ่งไปกว่านั้นโบลต์ซมันน์ยังเป็นผู้มีส่วนร่วมที่สำคัญยิ่งต่อวิชาฟิสิกส์เชิงสถิติ กล่าวคือเขาเป็นผู้สร้างสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์มหาทรรศน์กับพารามิเตอร์จุลทรรศน์ สมการดังกล่าวคือ $S = k_B \ln W$ เมื่อ S คือเอนโทรปี(ปริมาณมหาทรรศน์) ส่วน k_B และ W คือค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ และจำนวนสถานะจุลทรรศน์ตามลำดับ สมการดังกล่าวมีชื่อเสียงและสำคัญมากจนได้รับการจารึกไว้บนแผ่นป้ายหน้าหลุมศพของโบลต์ซมันน์ในกรุงเวียนนาทีเดียว ผลงานของแมกซ์เวลล์และโบลต์ซมันน์ที่กล่าวมาได้วางรากฐานวิชาฟิสิกส์เชิงสถิติไว้อย่างมั่นคงและได้รับการตั้งชื่อว่าสถิติแผนเดิม(classical statistics)หรือสถิติแบบแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์ (Maxwell-Boltzmann statistics) อย่างไรก็ตามยังมีอีกท่านหนึ่งที่มีคุณูปการต่อวิชาฟิสิกส์เชิงสถิติคือกิบส์ เขาเป็นผู้ที่เสนอความสัมพันธ์ระหว่างเอนโทรปีกับความน่าจะเป็น ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าทั้งโบลต์ซมันน์และกิบส์คือผู้ค้นพบวิชาฟิสิกส์เชิงสถิติ

ในปีค.ศ. 1873 แวนเดอร์วาลส์(van der Walls) ได้เสนอสมการซึ่งมีชื่อเสียงมากคือสมการสถานะ (equation of state) สมการดังกล่าวสามารถใช้บรรยายระบบอนุภาคหรือโมเลกุล ทั้งที่โมเลกุลมีขนาดและมีอันตรกิริยาระหว่างกัน กล่าวอีกนัยหนึ่งสมการนี้สามารถบรรยายแก๊สที่มีอยู่จริงในธรรมชาติ(real gases)นั่นเอง เป็นที่ทราบกันว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของแก๊สย่อมมีค่ามากขึ้นเมื่อความหนาแน่นของแก๊สเพิ่มขึ้น ทฤษฎีบทของแวนเดอร์วาลส์ทำนายว่าภายใต้อุณหภูมิใด ๆ ที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ T_C ค่าหนึ่ง ผลจากจากความกดดันทำให้ความหนาแน่นมากขึ้นจะนำไปสู่การยุบตัว(land slide)ของระบบอนุภาค ภายใต้ภาวะการณ์ดังกล่าวกลุ่มโมเลกุลหรืออะตอมจะอยู่ใกล้ชิดจนเกือบสัมผัสกัน เราเรียกอุบัติการณ์นี้ว่า "การควบแน่นเป็นของเหลว" กล่าวได้ว่า งานของแวนเดอร์วาลส์ไม่เพียงแต่ให้ความกระจ่างในเรื่องความแตกต่างระหว่างแก๊สจริงและแก๊สอุดมคติเท่านั้น ยังให้ความเข้าใจต่อปรากฏการณ์ที่สังเกตได้จากระบบ

ของแก๊ส อาทิ การควบแน่น อุณหภูมิวิกฤติ และสมบัติบางประการขณะมีการเปลี่ยนสถานะ

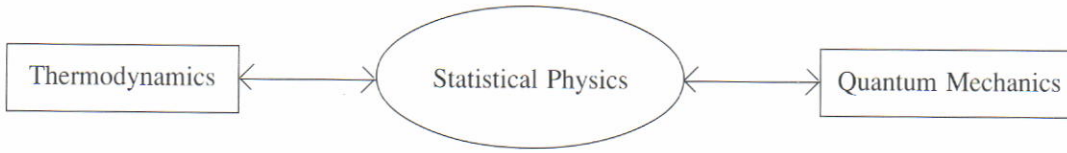
เมื่อย่างเข้าสู่ศตวรรษที่ 20 พลังค์(M. Planck) ได้เสนอสมมติฐานทางควอนตัมพร้อมกับนำวิธีการทางสถิติไปแก้ปัญหาการแผ่รังสีของวัตถุดำ(blackbody radiation)ได้เป็นผลสำเร็จโดยพลังค์คิดว่ารังสีที่แผ่จากวัตถุดำคือกลุ่มของอนุภาคโฟตอน(photon gas) ต่อมาในปีค.ศ. 1907 ไอน์สไตน์(Einstein) ได้นำมโนภาพทางควอนตัมไปแก้ปัญหาความจุความร้อนของของแข็ง และปัญหานี้ยังได้รับการดัดแปรโดยกลุ่มของเดอบาย (Debye) พัฒนาการแบบก้าวกระโดดของฟิสิกส์เชิงสถิติเกิดขึ้นเมื่อสามารถผนวกความคิดทางควอนตัมและทางสถิติได้เป็นผลสำเร็จจนสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับแก๊สโฟตอน สถิติแบบดังกล่าวเรียกว่าสถิติแบบโบซ-ไอน์สไตน์(Bose-Einstien statistics) อย่างไรก็ดีเมื่อนำแนวคิดเชิงควอนตัม-สถิติไปประยุกต์ใช้กับปัญหาของแก๊สอิเล็กตรอนจำเป็นต้องเพิ่มเงื่อนไขหรือข้อจำกัดบางประการเข้าไป ทั้งนี้เพราะอิเล็กตรอนมีพฤติกรรมเป็นไปตามหลักการกีดกันของเพาลี(Pauli exclusion principle) ผลที่ติดตามมาก็คือทำให้เกิดสถิติแบบเฟร์มี-ดิแรก(Fermi-Dirac statistics)ในปีค.ศ. 1926 สองปีถัดมาซัมเมอร์เฟลด์ (Summerfeld) ก็ได้เสนอทฤษฎีอิเล็กตรอนในโลหะ(Summerfeld 's electron theory of metals) เราสามารถทดสอบได้ว่าสถิติแบบโบซ-ไอน์สไตน์และแบบเฟร์มี-ดิแรกนั้นสอดคล้องกับฟังก์ชันคลื่นแบบสมมาตร(symmetric wave function) และแบบปฏิสมมาตร(antisymmetric wave function)ของกลุ่มอนุภาคตามลำดับ อีกทั้งยังแสดงได้ว่าการแจกแจงแบบแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์นั้นคือลิมิตของการแจกแจงแบบโบซ-ไอน์สไตน์ หรือสถิติแบบเฟร์มี-ดิแรกเมื่ออุณหภูมิสูงนั่นเอง ต่อมาในทศรรษที่ 1940 สมบัติที่ประหลาดของฮีเลียมเหลว He^3 และ He^4 สามารถอธิบายได้ด้วยสถิติแบบโบซ-ไอน์สไตน์ และสถิติแบบเฟร์มี-ดิแรกตามลำดับ

ย้อนกลับไปสู่ทศวรรษ 1910 อีกครั้งเลาเอ(van Laue)กับคณะ และต่อมาแบร็กก์ (W.L. Bragg)ได้ศึกษาโครงสร้างผลึกของของแข็งโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลของลวดลายการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนแผ่นฟิล์มแสดงให้เห็นว่าโมเลกุลหรือกลุ่มอะตอมของของแข็งมีการวางตัวเป็นระเบียบด้วยพิสัยยาว(long-range order) ถัดมาในปีค.ศ. 1916 เดอบายและ เชอร์เรอร์(Scherrer) ได้ศึกษาของเหลวด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เช่นกัน พบว่าโมเลกุลของของเหลวมิได้มีความเป็นระเบียบอย่างเช่นของของแข็ง อาจกล่าวว่ากลุ่มโมเลกุลของของเหลววางตัวเป็นระเบียบด้วยพิสัยสั้น(short-range order) อาจคิดเสมือนหนึ่งว่าโมเลกุลของของเหลววางตัวแบบเสมือนผลึก(quasi-crystalline arrangement) แนวคิดดังกล่าวได้กลายเป็นแนวคิดพื้นฐานในการเข้าสู่องค์ความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างของของเหลวอีกทางหนึ่ง

กลับไปสู่การพิจารณาแก๊สจริงอีกครั้ง(แก๊สในธรรมชาติหรือแก๊สในห้องปฏิบัติการ) แก๊สดังกล่าวต่างจากแก๊สอิเล็กตรอนและแก๊สโฟตอน กล่าวคือมันมีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับการแจกแจงแบบแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์หรือใกล้เคียง หลังจากทฤษฎีเกี่ยวกับแก๊สจริงได้ถูกเสนอต่อสาธารณชนในช่วงครึ่งหลังของศตวรรษที่ 19 ดังที่ได้กล่าวมา ทฤษฎีของแก๊สได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในต้นศตวรรษที่ 20โดยจีนส์(Jeans) และต่อมาโดยเลนาร์ด-โจนส์(Lenard -Jones) ติดตามด้วยการศึกษาแก๊สที่มีความหนาแน่นสูงด้วยทฤษฎีของเมเออร์(Mayers)ด้วยวิธีการอีกแนวหนึ่ง กล่าวคือด้วยวิธีการคิดเสมือนหนึ่งว่าของเหลวคือแก๊สที่มีความหนาแน่นสูง ผู้มีส่วนร่วมอย่างสำคัญในการศึกษาของเหลวด้วยแนวคิดนี้มีหลายท่าน อาทิ บอร์น(Born) กรีน(Green) และ เคอร์ควูด (Kirkwood) เป็นต้น

กล่าวเพิ่มเติม ฟิสิกส์เชิงสถิติยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปรากฏการณ์ของระบบที่มิได้อยู่ในภาวะสมดุลได้เช่นกัน อาทิ สมบัติการขนส่ง(transport properties) การเปลี่ยนเฟสหรือการเปลี่ยนสถานะ เป็นต้น อย่างไรก็ตามสาระดังกล่าวมิได้อยู่ในขอบข่ายของ

บทความนี้ กล่าวโดยสรุปฟิสิกส์เชิงสถิติเป็นสาขาวิชาหนึ่งของ "ฟิสิกส์แผนใหม่" ที่เชื่อมโยงระหว่างกลศาสตร์ควอนตัมซึ่งศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคระดับจุลทรรศน์ กับ "ฟิสิกส์แผนเดิม" โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหพลศาสตร์ซึ่งศึกษาระบบมหาทรรศน์ ดังแผนภาพประกอบข้างล่าง



เอกสารอ้างอิง

1. Reif, F. 1988, **Fundamentals of Statistical and Thermal Physics**, McGraw-Hill Book Company, Singapore.
2. Trevena, D.H. 1993, **Statistical Mechanics an Introduction**, Ellis Horwood Limitted, Chichester.