1 ปารีส 1877

เรื่องราวของเราเปิดฉากในปี ค.ศ. 1877 วันนั้นเป็นวันก่อนคริสต์มาส 1 วัน และฉากถูกกำหนดให้เป็นที่บัณฑิตยสภาวิทยาศาสตร์ในปารีส ตลอดสัปดาห์ที่ผ่านมามีข่าวเล่าลืออย่างหนาหูขึ้นว่าจะมีการประกาศเรื่องการค้นพบที่สำคัญเรื่องหนึ่ง ดังนั้นที่ประชุมสภากำลังรอกันอยู่อย่างกระวนกระวาย ในขณะที่กิจการอย่างเป็นทางการกำลังส่งกันไปอย่างเยิ่นเย้อตามลักษณะของบัณฑิตยสภาผู้ทรงคุณวุฒิทั้งหลาย ต่อมาเลขาธิการเมอซิเออร์ ดูมาส์ ในฐานะผู้เปิดม่านจึงได้อ่านข้อความที่ถอดมาจากผลงานทั้งหลายของลาวัวซิเอร์ ดังนี้

"ถ้าโลกถูกนำไปยังบริเวณที่ร้อนกว่าของระบบสุริยะ เช่นที่อุณหภูมิโดยรอบสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ ของเหลวทุกชนิดและแม้กระทั่งโลหะบางชนิดของเราอาจถูกเปลี่ยนเป็นสถานะก๊าซและกลายเป็นส่วนหนึ่งของบรรยากาศ แต่ในทางตรงข้ามถ้าหากโลกถูกนำไปยังบริเวณที่เย็นมาก เช่นไปยังดาวพฤหัสหรือดาวเสาร์ น้ำในแม่น้ำและมหาสมุทรทั้งหลายของเราจะถูกเปลี่ยนเป็นภูเขาน้ำแข็ง อากาศหรืออย่างน้อยบางส่วนของส่วนประกอบทั้งหลายของมันจะยุติที่จะคงสภาพก๊าซที่มองไม่เห็นและจะกลายเป็นสถานะของเหลว การเปลี่ยนสถานะในกรณีเช่นนี้จึงอาจสร้างของเหลวชนิดใหม่ ๆ ซึ่งเรายังนึกไม่ถึง"

เกือบร้อยปีที่ได้ผ่านไปนับแต่นักเคมีผู้ยิ่งใหญ่ผู้นี้ได้เขียนคำพยากรณ์เหล่านี้ไว้และความพยายามทุกวิถีทางที่จะสร้าง "ของเหลวชนิดใหม่ๆ" ของลาวัวซิเอร์ขึ้นในห้องทดลองประสบแต่ความล้มเหลว คำแถลงข่าวซึ่งกำลังจะถูกอ่านในขณะนี้และซึ่งจะได้ประกาศถึงการทำออกซิเจนเหลวจึงนับว่าเป็นหลักที่บอกระยะหนึ่งบนถนนสายใหม่ นั่นคือ ถนนที่จะนำไปสู่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์

ผู้ประพันธ์คำแถลงข่าวเป็นสมาชิกที่เพิ่งได้รับเลือกตั้งเป็นสาราณียกรของบัณฑิตยสภานี้เป็นวิศวกรเหมืองแร่จากชาติภูมิเหนือแม่น้ำแซนชื่อ กาเยเต เช่นเดียวกับคนรุ่นก่อนเขาหลายคน เขาได้เริ่มต้นทดลองกับก๊าซหลายชนิดด้วยความหวังว่าจะพบวิธีทำให้เหลวได้โดยนำไปไว้ภายใต้ความกดดันสูง ก๊าซแอเซทีลีน (C_2H_2) เป็นก๊าซแรกที่ได้เลือกมาสำหรับทำการทดลองครั้งแรก เพราะได้รับคำแนะนำว่าที่อุณหภูมิห้อง ความดันราว 60 บรรยากาศอาจจะเพียงพอที่จะทำให้

กลายเป็นของเหลวได้ อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะถึงความดันนี้อุปกรณ์เกิดรอยรั่วขึ้นและก๊าซที่ถูกอัดก็เล็ดลอดออกมา กาเยเตได้กำลังจ้องดูผนังของหลอดแก้วที่แข็งแรงซึ่งบรรจุแอเซทีลีนที่ถูกอัดในขณะที่เกิดเหตุร้ายนี้ขึ้น เขาสังเกตในขณะต่อมาจากอุบัติเหตุได้ว่ามีหมอกบาง ๆ เกิดขึ้นในหลอดเพียงที่จะปราศนาการไปอีกครั้งในทันที กุญแจที่นำไปสู่ความสำเร็จในเวลาต่อมาก็คือข้อสรุปในทันใดนั้นของกาเยเตว่า การลดความดันเป็นผลให้เกิดการเย็นลงอย่างเฉียบพลันของแอเซทีลีนและว่าเขาได้เห็นเหตุการณ์การควบแน่นของก๊าซขณะหนึ่ง ข้อสงสัยของเขาในครั้งแรกก็คือว่าแอเซทีลีนนั้นไม่บริสุทธิ์และว่าเขาได้เห็นหยดน้ำหลายหยด ห้องทดลองที่มีชื่อเสียงของแบร์เธโลได้เตรียมแอเซทีลีนที่บริสุทธิ์มากให้กับเขาแต่เมื่อทำการทดลองซ้ำอีกก็มีหมอกเกิดขึ้นอีกในตอนนี้จึงไม่เป็นที่สงสัยได้เลยว่าแอเซทีลีนได้ถูกทำให้เหลวแล้วและเหตุการณ์ร้ายของกาเยเตนั้นเองได้ให้กลวิธีใหม่สำหรับการทำให้ก๊าซเหลวแก่เขา

ด้วยความรู้นี้เต็มเปี่ยมเขาไม่ปล่อยเวลาให้เสียไปในการแก้ไขปัญหาที่สำคัญที่สุดในสาขานี้คือ การทำก๊าซเหลวจากก๊าซทั้งหลายในบรรยากาศ เขาเริ่มต้นด้วยออกซิเจนเพราะสามารถเตรียมได้ค่อนข้างง่ายในสถานะบริสุทธิ์ เขาอัดก๊าซนี้ จนถึงความดันราว 300 บรรยากาศและทำให้หลอดแก้วที่ทนทานแข็งแรงของอุปกรณ์ของเขาเย็นลงจนถึง −29 °ซ โดยการหุ้มด้วยสารระเหยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เมื่อทำให้ความดันลดลงอย่างกระทันหัน เขาได้สังเกตเห็นหมอกของหยดเหลวเล็ก ๆ อีกและโดยการทดลองหลายครั้งทำให้เขาพอใจว่าหมอกนี้ไม่ได้เกิดจากสิ่งเจือปน แต่ออกซิเจนได้ถูกทำให้เหลวแล้วและเรื่องราวทั้งหมดของการทดลองนี้เป็นสิ่งที่เขาเสนอต่อบัณฑิตยสภา

อย่างไรก็ตาม สิ่งที่น่าฉงนอีกอย่างหนึ่งกำลังจะเกิดขึ้นอีก รายงานของกาเยเตยังไม่ทันจะได้อ่าน ในขณะที่เมื่อเลขาธิการประกาศว่าสองวันก่อนหน้านี้เมื่อวันที่ 22 ธันวาคม บัณฑิตยสภาได้รับโทรเลขจากนักฟิสิกส์ในเจนีวามีความว่า

"ออกซิเจนได้ถูกทำให้เหลววันนี้ภายใต้ 320 บรรยากาศและ 140 องศาด้วยความเย็นจากการใช้กรดซัลเฟอรัสร่วมกับกรดคาร์บอนิก" ราอูล พิคเตต์

ข้อความสั้น ๆ นี้ได้รับการยืนยันด้วยเรื่องราวของกรรมวิธีที่พิคเตต์ได้นำมาใช้

ซึ่งได้ส่งมาอย่างชัดแจ้งก่อนหน้านี้แล้ว ด้วยความคาดหวังของผลที่จะได้รับ เขาไม่ได้พบวิธีลัดไปสู่ความสำเร็จของกาเยเต แต่ได้เริ่มการทำออกซิเจนเหลวด้วยขั้นตอนที่ต่อเนื่องหลายขั้น ซึ่งแต่ละขั้นเป็นการทำก๊าซเหลวต่างชนิดกันไปซึ่งกลายเป็นขั้นตอนที่รู้จักกันต่อมาว่า " การลดหลั่น " และซึ่งจะได้กล่าวในภายหลัง จุดสำคัญอยู่ที่พิคเตต์ได้บรรลุเป้าหมายเดียวกันกับกาเยเตในเวลาเดียวกันอย่างแท้จริงแต่โดยกรรมวิธีที่ต่างกันอย่างสิ้นเชิง

นับว่าไม่ใช่การค้นพบที่มาพ้องกันโดยบังเอิญ ประวัติศาสตร์ทางวิทยาศาสตร์ได้เคยแสดงกรณีการค้นพบเรื่องเดียวกันแต่ต่างฝ่ายต่างทำมากมาย ซึ่งมาประชันกันในเวลาเกือบจะไล่เลี่ยกันสองรายบ้างหรือมากกว่านี้ก็เคยมี เมื่อเราพูดถึง "ต่างคนต่างทำ" ย่อมหมายความอย่างแท้จริงว่าเขาเหล่านั้นไม่ได้คัดลอกซึ่งกันและกัน หรือแอบชะเง้อมองข้ามไหล่ของกันและกัน การค้นพบเหล่านั้นไม่ได้เคยทำได้อย่างอิสระ เมื่อพิจารณาสถานะความรู้ทางวิทยาศาสตร์ทั้งหมด วิทยาศาสตร์ไม่ได้ก้าวคืบหน้าไปด้วยอุบัติเหตุที่นำความโชคดีมาอย่างต่อเนื่อง นับว่าเป็นการเจริญเติบโตเหมือนสิ่งมีชีวิตซึ่งก่อให้เกิดการค้นพบที่จำเป็นสำหรับแต่ละขั้นตอนของการพัฒนาอย่างเลี่ยงไม่ได้ กาเยเต์ก็อาจจะมองข้ามหมอกที่สังเกตเห็นตอนแรกถ้าหากเขาไม่ได้คอยเฝ้าหาการทำให้เป็นของเหลว ถ้าเขาปล่อยให้นัยสำคัญนี้พลาดหลุดมือไปก็อาจจะมีบุคคลอื่นที่จะสังเกตได้ไม่ช้าก็เร็ว กระนั้นก็มีพิคเตต์คนหนึ่งละที่มาถึงจุดหมายปลายทางเดียวกันโดยเส้นทางอีกสายหนึ่ง ดังที่เราจะได้เห็นกันต่อไป ถึงแม้เรื่องของเราเริ่มต้นด้วยการประกาศซ้อนกันถึง 2 เรื่องควบในวันก่อนวันคริสต์มาสปีค.ศ. 1877 เวทีสำหรับการนี้ถูกจัดเตรียมไว้แล้วและการเปิดฉากอย่างใหญ่โตก็จะติดตามมาเกือบจะในเวลานั้น

ความก้าวหน้าคุจมีชีวิตของวิทยาศาสตร์จากความสำเร็จอย่างเลี่ยงไม่ได้ในเวลาที่เหมาะเช่นนี้ ได้ทำให้ผู้ปฏิบัติทั้งหลายพบกับปัญหาที่ยุ่งยากปัญหาหนึ่ง นั่นคือบุริมภาพ ในขณะที่ทุกคนรู้ว่าเมื่อมีการค้นพบแล้ว ซึ่งที่จริงจะต้องค้นพบให้ได้นั้น คำยกย่องสรรเสริญอย่างมากมายจะมีให้ต่อการค้นพบครั้งแรกเท่านั้น แต่ละคนรู้ว่ามีหลายกรณีพอควรที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกันขนาดเทียบได้กับการแข่งขันที่คู่คี่กันมาทีเดียว จนต้องอาศัยการตัดสินด้วยรูปถ่าย มีกฎที่แน่นอนหลายกฎสำหรับการแข่งขันนี้ซึ่งแตกต่างไปเล็กน้อยในบางเวลาและบางประเทศ แต่ทั้งหมดยึดถือการเผยแพร่

อย่างเป็นทางการบางประการของการค้นพบ ในประเทศฝรั่งเศสในยุคของกาเยเตและพิคเตต์ นับว่าการติดต่อผ่านบัณฑิตยสภาเป็นสิ่งสำคัญ จากไทรเลขของพิคเตต์จึงยึดถือเอาวันที่ 22 ธันวาคม ว่าเป็นวันที่การทดลองของเขาประสบความสำเร็จ แต่สำหรับกาเยเตแล้วรายงานของเขาได้นำมาอ่านเพียงในวันที่ 24 เท่านั้นละหรือ? การสังเกตอย่างแน่นอนของเขากระทำในวันที่ 2 ธันวาคม และด้วยเหตุผลส่วนตัวอย่างแท้จริงจึงยังไม่มีการประกาศต่อที่ประชุมในวันที่ 3 หรือวันที่ 10 หรือแม้แต่วันที่ 17 กาเยเตต้องอยู่ในภาวะกระอักกระอ่วน เขาจะต้องเข้ารับเลือกตั้งเป็นสาราณียกรของบัณฑิตยสภาในการประชุมวันที่ 17 ธันวาคม และเขาไตร่ตรองอย่างรอบคอบแล้วว่าหากจะประกาศผลที่น่าตื่นเต้นใดๆออกไปในวันนั้นหรือแม้แต่ก่อนหน้านั้นเล็กน้อยก็จะเป็นวิธีการที่เลวร้าย การเลือกตั้งนี้เป็นการแข่งขันกันและอาจจะดูราวกับว่าเป็นความพยายามที่จะโน้มน้าวผู้ออกเสียงทั้งหลาย ในทางตรงข้าม การปล่อยแมวออกจากถุงจะไม่มีผลร้ายใดๆถ้าไม่ได้กระทำในบัณฑิตยสภา และกาเยเตได้เตรียมการสาธิตการทำออกซิเจนเหลวแก่สมาชิกที่ได้รับเชิญมายังอีคอลนอร์มัลในปารีส วันอาทิตย์ที่ 16 ธันวาคม ในวันต่อมาบัณฑิตยสภาได้เลือกเขาด้วยคะแนนเสียง สามสิบสามต่อสิบเก้า

ตอนนี้การประกาศเรื่องสำคัญนี้น่าจะกระทำได้ในวันที่ 24 แต่ก็มีไทรเลขของพิคเตต์ในวันที่ 22 ดูราวกับว่ากาเยเตสูญเสียบุริมสิทธิ์ของเขาไปเสียแล้ว อย่างไรก็ตาม เรื่องนี้จบลงด้วยดี เนื่องจากในวันที่ 2 ธันวาคม ซึ่งเป็นวันที่การทดลองของเขาเข้าขั้นวิกฤติในฌาติญองเหนือแม่น้ำแซน กาเยเตได้มีจดหมายแจ้งรายละเอียดทั้งหมดของการค้นพบนี้ไปยังเพื่อนของเขาชื่อ ซังต์-แคลร์ เดอวิลล์ ในปารีส ซึ่งถึงผู้รับในวันที่ 3 โดยทันทีนั้นเองซังต์-แคลร์ เดอวิลล์ได้นำจดหมายนี้ไปมอบให้เลขาธิการผู้มีอำนาจเต็มของบัณฑิตยสภา ผู้ซึ่งได้ลงนามและประทับตราลงวันที่ไว้ กาเยเตจึงกลายเป็นคนแรกที่ทำให้ออกซิเจนเหลวอย่างเป็นทางการแล้วในขณะนี้

พิคเตต์ไม่ได้กล่าวถึงอุณหภูมิสุดท้ายของการทดลองของเขาแต่อย่างใดในการแจ้งข่าวครั้งแรก กาเยเตได้ประมาณอุณหภูมิที่ลดลงในการขยายตัวของการทดลองของเขาเป็น 200°ซ ซึ่งถึงแม้จะเป็นการคาดคะเนอย่างหยาบแต่ไม่ได้ผิดพลาดไปเท่าใดนัก แม้ว่าในระยะนั้นอุณหภูมิไม่ได้ลดลงมากแต่ดูเหมือนว่าเป็นเรื่องสำคัญทีเดียว เพราะแสดงว่าการทำนายของลาววัวซิเอร์ได้ถูก

พิสูจน์แล้วว่าเป็นไปได้ในห้องทดลอง หลังจากการประชุมที่ประทับอยู่ในความทรงจำเมื่อวันที่ 24 เพียงสัปดาห์เดียวเท่านั้น อากาศของบรรยากาศโลกได้ถูกทำให้กลายเป็นของเหลว เนื่องจากกาเยเตได้ประกาศการทำไนโตรเจนเหลว นับว่าเขาได้ประสบความสำเร็จซ้ำแล้วซ้ำอีกระหว่างสัปดาห์คริสต์มาส

กุยโยม อามองตองส์ ซึ่งมีชีวิตอยู่ในครึ่งหลังของคริสต์ศตวรรษที่ 17 ดูเหมือนจะเป็นคนแรกที่ได้สร้างแนวคิดเกี่ยวกับอุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ เขาอยู่ในช่วงปลายของยุคสมัยของบอยล์กับมาริออตต์ ซึ่งทำการค้นคว้าอย่างอิสระได้แสดงว่าความดันอากาศเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนเดียวกันกับปริมาตรที่ลดลงเมื่อถูกอัด อามองตองส์หูหนวกมาตั้งแต่เด็กและได้อุทิศชีวิตให้กับการศึกษาอุณหภูมิและการวัดอุณหภูมิ ด้วยความพยายามที่จะสร้างเทอร์มอมิเตอร์ที่เชื่อถือได้ เขาได้ใช้อากาศปริมาตรหนึ่งซึ่งมีปรอทกายในหลอดเป็นเครื่องแสดงปริมาตรอากาศที่ถูกกักอยู่ ดังนั้น เขาจึงได้ทำงานของบอยล์และมาริออตต่อด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงความดันของอากาศปริมาตรหนึ่งที่กำหนดไว้ขณะที่อุณหภูมิของอากาศเปลี่ยนแปลงไป เขาได้เริ่มการวัดของเขาที่จุดเดือดของน้ำและสังเกตได้ว่าระดับอุณหภูมิลดลงไปเท่าใดจะทำให้ความดันของอากาศลดลงไปเท่านั้นด้วย จากผลการทดลองนี้เขาสรุปได้ว่าการลดอุณหภูมิต่อไปจะทำให้ความดันอากาศกลายเป็นศูนย์ในที่สุดที่ระดับอุณหภูมิแน่นอนระดับหนึ่ง ซึ่งเขาคาดคะเนว่าเป็น −240°ซ เนื่องจากความดันของอากาศไม่สามารถเป็นค่าติดลบ จึงสรุปได้ว่า จะต้องมีอุณหภูมิต่ำสุดค่าหนึ่งที่หากต่ำกว่านี้ไปอากาศหรือสารอื่นใดจะไม่สามารถทำให้เย็นลงได้อีก อามองตองส์จึงได้คาดการณ์ถึงผลงานทั้งของชาร์ลส และของเกย์−ลุสแซกในประเทศฝรั่งเศสผู้สร้างกฎนี้ขึ้นโดยต่างคนต่างกระทำอย่างอิสระในรูปแบบที่สมบูรณ์ขึ้นอีกศตวรรษหนึ่งต่อมา เขาเหล่านี้ได้แสดงให้เห็นว่าความดันที่ลดลงต่อองศาเซ็นติเกรดมีค่าเท่ากับ 1/273 ของความดันที่อุณหภูมิหลอมเหลวของน้ำแข็ง นั่นคือที่ 0°ซ ศูนย์องศาสัมบูรณ์จึงได้ถูกกำหนดให้เป็น −273°ซ

นับว่าอามองตองส์ได้มองภาพศูนย์องศาสัมบูรณ์ออกว่าเป็นสถานะของการหยุดนิ่งอย่างแท้จริงซึ่งการเคลื่อนไหวทั้งหมดได้หยุดลง ความจริงนี้นับว่าสำคัญเพราะได้ให้แนวทางแก่ความคิดของเขาในเรื่องธรรมชาติของความร้อน ความหมายของความร้อนและอุณหภูมิและการวัดที่ถูกต้อง

ได้ทำให้นักวิทยาศาสตร์ทั้งหลายในคริสต์ศตวรรษที่ 17 และ 18 พบกับปัญหาที่น่ากระอักกระอ่วนบางประการอยู่บ้าง เขาเหล่านั้นได้ตั้งคำถามขึ้นถามตัวเองว่า อะไรคือธรรมชาติของความร้อน สิ่งที่เห็นได้อย่างชัดเจนสำหรับสถานะทางกายภาพของน้ำซึ่งถูกทำให้ร้อนขึ้นเหนือเปลวไฟขณะที่กำลังจะเดือดเล็กน้อยจะต่างไปจากน้ำเย็น เรื่องนี้สามารถแสดงได้โดยเทอร์มอมิเตอร์ของอามองตองส์ ทั้งยังแสดงว่ามีบางสิ่งบางอย่างได้เข้าไปในน้ำนั้น และบางสิ่งบางอย่างนี้มีที่มาจากเปลวไฟนั้น โดยความเชื่อเรื่องเล่นแร่แปรธาตุโน้มน้าวได้ว่า "หลักการ" บางประการเกี่ยวกับไฟจากเปลวไฟนั้นได้เข้าไปในน้ำ นอกจากนี้แท่งเหล็กร้อนที่จุ่มลงในน้ำจะทำให้อุณหภูมิของน้ำร้อนขึ้นด้วย คำอธิบายที่จะเป็นไปได้ต่อสิ่งที่สังเกตได้ทั้งหมดจะได้จากการตั้งสมมุติฐานว่ามีของไหลชนิดหนึ่งเรียกว่า แคลอริก ซึ่งคุณสมบัติของมันที่มีแต่เพียงความร้อนและความสามารถที่จะผ่านจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งโดยการสัมผัส ด้วยเหตุนี้แคลอริกจึงถูกส่งผ่านจากเปลวไฟไปยังเหล็กและจากเหล็กไปยังน้ำอีกทอดหนึ่ง ความเข้มข้นของมันวัดได้จากเทอร์มอมิเตอร์และเช่นเดียวกับของไหลใด ๆ จะต้องไหลจากความเข้มข้นสูงไปยังความเข้มข้นต่ำ ในที่สุดเหล็กและน้ำก็มีอุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งหมายความว่าทั้งสองมีความเข้มข้นของแคลอริกเท่ากัน เป็นข้อดีอย่างมากของแนวคิดนี้สำหรับการมีตัวตนของความร้อนก็คือช่วยให้วัดปริมาณได้ ตัวอย่างเช่น สามารถที่จะวัดแคลอริกในหน่วยทั้งหลาย ปริมาณของแคลอริกที่จะทำให้อุณหภูมิของน้ำ 1 กรัมร้อนขึ้น 1 องศา เรียกว่า 1 แคลอรี ข้อยุ่งยากเกี่ยวกับแคลอริกก็คือมันเป็นของไหลที่ไม่มีน้ำหนัก เนื่องจากพบว่าแท่งเหล็กนั้นไม่ได้หนักขึ้นเมื่อได้รับความร้อน เรื่องนี้จึงทำให้ยากแก่การที่จะทำให้สอดคล้องกับส่วนอื่น ๆ ของภาพโลกฟิสิกส์ของเรา

ความคิดที่เกี่ยวกับแคลอริกซึ่งเป็นของไหลไร้น้ำหนักนั้นในที่สุดได้ยกเลิกไปในต้นคริสต์ศตวรรษที่ 19 แต่ประโยชน์ของแนวคิดนี้จะเห็นได้จากความจริงที่ว่ามันยังคงแฝงอยู่ในรูปที่มีความเด่นชัดน้อยลงจนกระทั่งทุกวันนี้ แนวคิดของ "ปริมาณความร้อน" ซึ่งวัดเป็นจูลกับแนวคิดอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิ ความดันและปริมาตรนับว่าเป็นมโนภาพเบื้องต้นของวิชาอุณหพลศาสตร์

ความแน่นแฟ้นของอุณหพลศาสตร์ขึ้นอยู่กับการใช้ปริมาณเหล่านี้ที่ได้ให้คำจำกัดความไว้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถวัดได้โดยง่าย และไม่สับสน สูตรต่าง ๆ อย่างง่ายและชัดเจนซึ่งนำ

ปริมาณเหล่านี้มาสัมพันธ์กันได้กลายเป็นกุญแจไปสู่การแก้ปัญหาที่ท้าทายทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีได้บ่อยครั้ง น่าขอบคุณลักษณะที่ใช้ได้ทั่วไปของอุณหพลศาสตร์ซึ่งช่วยให้เรื่องง่ายขึ้นอย่างแทบมหัศจรรย์

แนวคิดของอุณหพลศาสตร์จะคอยติดตามเรานับจากนี้ไปจนตลอดเรื่องของเราโดยจะเคียงคู่ไปกับแนวคิดทั้งหลายของการอธิบายเชิงอะตอมของความร้อนนั่นคือ ทฤษฎีจลน์ ปริมาณที่อุณหพลศาสตร์เกี่ยวข้องด้วยได้แก่ อุณหภูมิที่วัดจากเทอร์มอมิเตอร์ ความดันซึ่งวัดจากแรงกระทำต่อตารางพื้นที่ และปริมาตรซึ่งวัดจากขนาดของภาชนะบรรจุ ทั้งหมดนี้หมายถึงการสังเกตบนมาตราส่วนที่มีขนาดหลายล้านเท่าของแต่ละอะตอม ดังนั้นในทางอุณหพลศาสตร์ปริมาณมูลฐานของความร้อนคือ จูล ซึ่งเป็นปริมาณของความร้อนที่ต้องใช้ไปในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำ 1 กรัม ให้สูงขึ้นราว 1 ใน 4 ส่วนขององศาบนสเกลเซ็นติเกรด (ที่ถูกต้องเป็นตัวเลขคือ 0.239 องศา) คำจำกัดความนี้ไม่ได้กล่าวถึงลักษณะเชิงกายภาพของความร้อนแต่ประการใดจึงอาจเป็นของไหลที่ไร้น้ำหนักหรือของอย่างอื่นก็ได้

การอ้างถึงศูนย์สัมบูรณ์ของอามองตองส์ว่าเป็นสถานะของการหยุดนิ่งนั้น แสดงว่าแน่ละเขาได้คิดถึงบางสิ่งที่นอกเหนือไปจากสาร "แคลอริก" ที่สมมติขึ้นนี้ สิ่งอื่นบางอย่างนี้เคลื่อนไหวในสเกลอะตอม เมื่อก่อนสมัยของอามองตองส์สองพันปี ดีโมคริตุสได้ตั้งสมมติฐานว่า สารทั้งหมดประกอบด้วยอิฐก่อสร้างก้อนเล็กๆที่ไม่สามารถแบ่งแยกได้คือ อะตอมทั้งหลาย นับแต่นั้นมาทฤษฎีเชิงอะตอมได้รุดหน้าบ้างถอยหลังบ้างตลอดมา แต่ไม่เคยถูกทอดทิ้งไปทีเดียว สิ่งที่ดึงดูดใจประการหนึ่งก็คือ ทฤษฎีนี้ช่วยให้การอธิบายเกี่ยวกับความร้อนที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยของไหลที่ไร้น้ำหนักแต่อาศัยสิ่งที่รู้จักกันดีแล้วคือ กฎของกลศาสตร์ นิวตันและอามองตองส์อยู่ในยุคสมัยเดียวกันและเป็นธรรมดาที่จะนำกฎของนิวตันซึ่งอธิบายการเคลื่อนที่ของเทห์วัตถุในท้องฟ้าและวัตถุทั้งหลายในโลกด้วยมาใช้กับอนุภาคสมมติเหล่านี้ที่เรียกว่า อะตอม อามองตองส์ดูเหมือนจะไม่ออกไปนอกเหนือการอ้างอิงที่คลุมเครือนั้น แต่ในปีค.ศ.1738 คำถามนั้นได้ถูกนักคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์ผู้ยิ่งใหญ่ชาวสวิสชื่อ ดาเนียล เบอร์นูล นำมาพิจารณาอย่างขึงขัง ในเรื่องของเขาเกี่ยวกับ "ไฮดรอลิกส์" ที่รู้จักกันดีทั่วไป เขาได้ตั้งสมมติฐานว่า "ของไหลยืดหยุ่น" ทุกชนิด เช่น อากาศ

ประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆที่อยู่ในอาการเคลื่อนไหวอย่างไม่เป็นระเบียบตลอดเวลา มีการชนกันเองและกับผนังภาชนะอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการชนกันเหล่านี้เป็นแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์การเคลื่อนที่นี้จึงไม่ "หมดลาน" อนุภาคทั้งหลายนี้จะประพฤติตัวคล้ายกับลูกเทนนิสแต่แตกต่างกันที่อนุภาคเหล่านี้จะไม่รู้จักล้าลงเลย ลูกเทนนิสเชิงอะตอมเหล่านี้แต่ละลูกเมื่อตกลงพื้นจะกระดอนขึ้นอีกครั้งแล้วครั้งเล่าไปสู่ระดับความสูงเดิมชั่วกัปป์กัลป์ ความรุนแรงของการปะทะกัน อัตราเร็วของแต่ละอนุภาคจะรับรู้ได้ในความรู้สึกสัมผัสในรูปของความร้อน เบอร์นูลีได้ชี้ให้เห็นว่าทฤษฎีของเขาให้ผลเช่นเดียวกันกับที่อามองตองส์ได้บรรลุจากการทดลองไว้เมื่อปีค.ศ.1702

การอธิบายเชิงจลน์ของความร้อนเช่นนี้มีความสวยงามมากทีเดียว ไม่ใช่เพราะความเรียบง่ายโดยเฉพาะ และดังที่เราจะได้พบว่าไม่จำเป็นจะต้องเป็นเช่นนั้น แต่เพราะใช้อธิบายปรากฏการณ์ต่างๆของความร้อนได้อย่างสมบูรณ์ในรูปแบบทางกลศาสตร์ที่รู้จักกันดีแล้ว ไม่จำเป็นต้องใช้แนวคิดใหม่ดังเช่น แคลอริคที่ไร้น้ำหนัก

นับเป็นความเชื่อถือขั้นมูลฐานทางวิทยาศาสตร์ที่ว่าโลกฟิสิกส์สร้างมาจากผังที่สอดคล้องและเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน เราจึงคาดหมายได้ว่าการสังเกตของเราทั้งหมด แม้ว่าจะไม่มีความเกี่ยวข้องกันจากที่ปรากฏแก่สายตาเราก็ตาม จะต้องเป็นส่วนหนึ่งของรูปแบบนี้ การค้นพบรูปแบบนี้เป็นความมุ่งหมายเพียงประการเดียวของการค้นคว้าขั้นต้นทั้งหมด เท่าที่ผ่านมาเราเพิ่งจะเริ่มต้นกัน เมื่อเรายังคงกำลังสาละวนอยู่กับการค้นพบปรากฏการณ์ใหม่ๆและด้วยเหตุนี้รู้ว่า ถึงแม้เราจะฉลาดปราดเปรื่องอย่างยอดเยี่ยมจริงๆ เราไม่สามารถหวังที่จะก่อแนวคิดอย่างเพียงพอสำหรับรูปแบบนี้ เหมือนกับการก่อสร้างรูปปริศนาภาพต่อ และในปัจจุบันเรารู้ว่าเรายังปะติดปะต่อไม่ได้หมดทุกชิ้น ทั้งเราไม่รู้ว่ารูปปริศนานี้จะกลายเป็นรูปที่ใหญ่โตเพียงใดด้วยและเกิดความรู้สึกที่ดีคือดูว่ามันอาจจะมีขนาดไม่จำกัด ถ้าพิจารณาสถานะนี้ของเรื่องราวทั้งหลายเราต้องจัดตัวเราเองว่าโชคดี เมื่อเราพบชิ้นส่วนบางชิ้นที่โน่นบ้างที่นี่บ้างซึ่งต่อกันได้พอดี กลายเป็นเกาะลอยเล็กๆทั้งหลายของรูปแบบซึ่งยังไม่มีความสัมพันธ์กับเกาะอื่นๆ ดังนั้น นับว่าเป็นชัยชนะอย่างแท้จริงเมื่อเราสามารถเชื่อมโยงสองเกาะเข้าด้วยกันได้ ความเกี่ยวพันโดยตรงของปรากฏการณ์ทั้งหลายของความร้อนกับกฎต่างๆทางกลศาสตร์โดยอาศัยทฤษฎีจลน์เป็นชัยชนะอย่างหนึ่ง

ทีเดียวที่ยิ่งใหญ่ที่สุดครั้งหนึ่งในประวัติศาสตร์ของวิทยาศาสตร์

แต่กระนั้น กว่าทฤษฎีจลน์ของเบอร์นูลลีจะเป็นที่ยอมรับก็ใช้เวลาอีกศตวรรษหนึ่ง และเราสามารถประจักษ์โดยง่ายดายได้ว่าทำไมจึงเป็นเช่นนั้น การอธิบายความร้อนว่าเป็นความรู้สึกที่เกิดจากการระคายเคืองยุบยิบมากมายมหาศาลที่มาสู่เราจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคเล็กๆที่มองไม่เห็น เป็นสิ่งที่น่าเชื่อถือ นอกจากนั้น ดังที่เราจะประจักษ์ในทันทีก็คือ ความสัมพันธ์ต่างๆระหว่างปริมาตร ความดันและอุณหภูมิที่ค้นพบจากการทดลองของบอยล์และเกย์-ลูสแซก ปรากฏผลออกมาที่ง่ายและตรงไปตรงมาจากทฤษฎีจลน์ แต่อะไรละหรือที่เป็นปริมาณความร้อนซึ่งอธิบายด้วยรูปแบบของการเคลื่อนที่เชิงอะตอม ใครๆก็สามารถจะเห็นได้ทันทีว่า ในที่นี้แนวคิดเกี่ยวกับของไหลที่ไร้น้ำหนักซึ่งสามารถรินได้จากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งสะดวกกว่ามากนัก นอกจากนี้ ดังที่ผู้เล่นบิลเลียดใดๆรู้ดีกันอยู่ว่า การชนกันระหว่างลูกบิลเลียดมากกว่าสองขึ้นไปคาดคะเนได้ยาก ดังนั้นใครจะสามารถแก้ปัญหาเชิงคำนวณในการชนกันระหว่างอนุภาคที่เคลื่อนที่อย่างรวดเร็วเป็นจำนวนหลายล้านๆตัวได้อย่างไร ต่อเมื่อปัญหาสุดท้ายนี้ถูกไขออกมาแล้วอย่างเป็นที่น่าพอใจเท่านั้น ทฤษฎีจลน์สำหรับความร้อนจึงได้เป็นอย่างที่เป็นอยู่ ในระหว่างนี้ตราบเท่าที่ไม่มีผู้ใดถามหาคำอธิบายโดยวิธีสร้างรูปแบบทางฟิสิกส์ ตราบนั้นก็ยังคงมีอุณหพลศาสตร์ คำตอบทั้งหลายของมันอาจจะไม่ให้ความกระจ่างเท่าใดแต่ก็ถูกต้องเสมอ

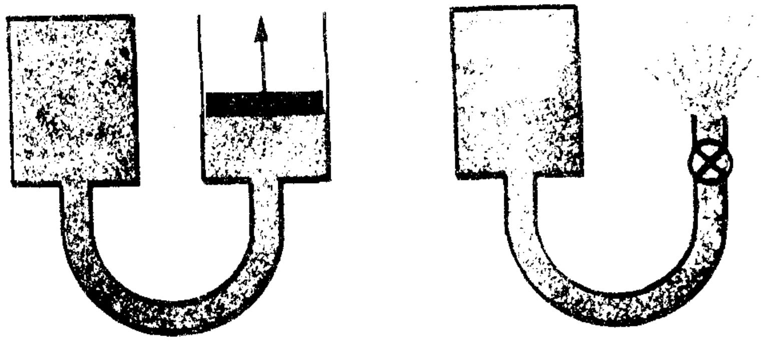
ทุกวันนี้ยังคงมีปัญหาอีกมากมายในวิชาว่าด้วยปรากฏการณ์ของความร้อน ซึ่งไม่ทำให้ยุ่งยากมากเท่าใดสำหรับคำตอบทางอุณหพลศาสตร์ แต่ซึ่งยังคงว่านอนสอนยากทีเดียวสำหรับการอธิบายเชิงจลน์ เมื่อใดก็ตามที่ข้อแม้ทั้งหลายถูกเลือกเฟ้นได้ว่าเราสามารถถือว่าอะตอมหรือโมเลกุลทั้งหลายเสมือนลูกเทนนิสออกแรงกระทำซึ่งกันและกันจะเกิดความยุ่งยากที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ ในทางตรงข้าม ความยุ่งยากที่ดูเหมือนน่าสะพึงกลัวในเชิงคณิตศาสตร์ที่เกิดจากการชนกันเป็นจำนวนมากถูกไขได้แล้วโดยแมกซ์เวลล์และโบลต์ซมันน์ ในครึ่งหลังของคริสตศตวรรษที่สิบเก้า กรรมวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ก็คือกรรมวิธีทางสถิติ ซึ่งดังชื่อที่บ่งบอกอยู่แล้วได้พิสูจน์ว่ามีคุณค่าในการบริหารรัฐกิจ เมื่อต้องเกี่ยวข้องกับคนจำนวนมาก เช่นเดียวกับวิธีทั้งหมดของการบริหารรัฐกิจนี้ ต้องไม่คำนึงเป็นรายตัวแต่จะต้องจัดการกับค่าเฉลี่ยทั้งหลายเหมือนกับงบประมาณที่จัดการกับรายได้ถ้า

เฉลี่ยและบริษัทประกันภัยทั้งหลายจัดการกับการคาดคะเนช่วงอายุโดยเฉลี่ย ทฤษฎีจลน์ก็เกี่ยวข้องกับความเร็วเฉลี่ย บริษัทประกันภัยจะไม่เดือดร้อนเมื่อบางคนเสียชีวิตลงเร็วกว่าที่เฉลี่ยไว้เพราะยังมีคนอื่นๆอีกที่มีชีวิตยืนยาวกว่าอายุเฉลี่ย ในขณะใดๆภายในก๊าซจะมีอะตอมบางตัวที่มีความเร็วสูงกว่าค่าเฉลี่ยมาก และอีกหลายตัวที่มีความเร็วต่ำกว่ามาก แต่สิ่งนี้ก็เหมือนกันไม่มีความสำคัญอะไรตราบใดที่การศึกษาทางสถิติครอบคลุมจำนวนมากมายได้

ขอให้เรานำการพิจารณาเหล่านี้ไปใช้กับกรณีง่ายๆของบริเวณที่บรรจุก๊าซซึ่งสมมติว่าเป็นอากาศไว้ โดยที่เราสามารถเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้ ตัวอย่างเช่นกระบอกสูบที่มีลูกสูบด้วยตอนแรกเราจะให้ลูกสูบตรึงอยู่กับที่หนึ่งและเราวัดความดันของก๊าซ นั่นคือ แรงซึ่งโมเลกุลก๊าซกระทำต่อลูกสูบ ซึ่งทำได้โดยหาว่าต้องใช้น้ำหนักเท่าใดกดลงไปบนลูกสูบนั้นเพื่อให้ตรึงอยู่กับตำแหน่งดังกล่าว แรงที่กระทำนี้มาจากโมเลกุลจำนวนหนึ่งที่ชนผนังหนึ่งหน่วยตารางพื้นที่ของลูกสูบในหนึ่งหน่วยเวลาและด้วยอัตราเร็วเฉลี่ยของโมเลกุลเหล่านั้น ค่าสุดท้ายนี้คือการวัดอุณหภูมิและเนื่องจากเราต้องการจะดำเนินการทดลองครั้งแรกต่อไปโดยที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยน ดังนั้นอัตราเร็วเฉลี่ยจะยังคงมีค่าเท่าเดิม การทดลองครั้งแรกนี้ประกอบด้วยการวางน้ำหนักลงไปในลูกสูบให้มากจนกระทั่งก๊าซถูกอัดเหลือปริมาตรครึ่งหนึ่งของปริมาตรเดิม ดังนั้นเราจะได้พบเช่นเดียวกับบอยล์ผู้ซึ่งกระทำเช่นเดียวกันนี้เมื่อ 200 ปีก่อนว่าต้องใช้น้ำหนักเพิ่มขึ้น 2 เท่าพอดี ผลการทดลองนี้ตรงกับทฤษฎีเป็นอย่างดี เนื่องจากโมเลกุลจำนวนเดียวกันนี้ถูกจำกัดอยู่ภายในปริมาตรเพียงครึ่งเดียว และดังนั้นจึงชนลูกสูบบ่อยครั้งกว่าเดิมถึงสองเท่า

สำหรับการทดลองที่สอง เราเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นแต่จะไม่เปลี่ยนตำแหน่งของลูกสูบตอนนี้อัตราเร็วของโมเลกุลทั้งหลายเพิ่มขึ้นและพร้อมด้วยแรงของแต่ละโมเลกุลกระแทกกัน นอกจากนี้อัตราเร็วที่เพิ่มจะทำให้ลูกสูบถูกกระแทกบ่อยครั้งมากขึ้นด้วย แรงกระทำที่เพิ่มขึ้นบนลูกสูบจึงเนื่องมาจากกำลังสองของอัตราเร็วเชิงโมเลกุล การเพิ่มขึ้นของความดันดังที่อามองตองส์สังเกตได้นั้น เป็นส่วนสัดโดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่บันทึกโดยเทอร์มอมิเตอร์ของเขา ด้วยเหตุนี้เราจึงพบความหมายของอุณหภูมิในตอนนี้จากรูปแบบเชิงอะตอมของเรา นั่นคือความเร็วของโมเลกุลที่ยกกำลังสองซึ่งเหมือนกับพลังงานจลน์ของโมเลกุลเหล่านั้น

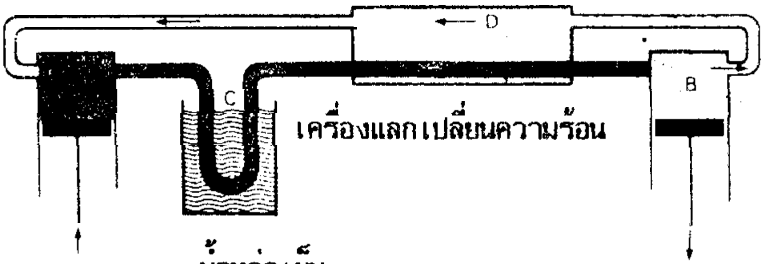
รูปที่ 1.1 อุปกรณ์การทำให้เย็นลงของกาเยเตซึ่งนับว่าเป็นส่วนของจังหวะเดียวของเครื่องขยาย



ในที่สุด เราสืบพบว่ามีอะไรเกิดขึ้นในกระบวนการขณะที่เรากดลูกสูบลงไปด้วยการเพิ่มน้ำหนัก และตอนนี้เราจะไม่ดำเนินขั้นต่อไปโดยให้อุณหภูมิคงที่ ขอให้เราเพ่งเล็งยังโมเลกุลใดโมเลกุลหนึ่งโดยเฉพาะสักชั่วขณะหนึ่ง ซึ่งโมเลกุลนั้นกำลังจะพุ่งชนลูกสูบด้วยความเร็วขนาดหนึ่งก่อนที่การกระแทกจะเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อมันกระดอนกลับความเร็วของมันตอนนี้จะเพิ่มขึ้นเพราะว่าลูกสูบไม่ได้อยู่กับที่ แต่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วของลูกสูบเองต้านทานกับโมเลกุลนั้นโมเลกุลที่กลับมาจะถ่ายทอดความเร็วที่สูงขึ้นแก่โมเลกุลอื่นในการชนกันครั้งต่อๆไป ด้วยเหตุนี้ความเร็วเฉลี่ยของโมเลกุลทั้งหมดในกระบอกสูบจึงเพิ่มขึ้นและการเพิ่มขึ้นเช่นนี้ตรงกับการเพิ่มอุณหภูมิดังที่เราได้ประสบมาแล้ว กล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่าก๊าซซึ่งถูกอัดจะร้อนขึ้น ปรากฏการณ์นี้เป็นที่รู้จักกันดีสำหรับผู้ที่เคยสูบยางรถจักรยานและเคยสังเกตว่าที่สูบลมร้อนขึ้น

ในทางกลับกันก็เป็นจริงด้วยเช่นกัน ถ้าเราลดน้ำหนักบนลูกสูบและปล่อยให้ก๊าซดันขึ้นมา โมเลกุลทั้งหลายจะชนลูกสูบที่ถอยออกไปและจะกระดอนกลับมาด้วยอัตราเร็วที่ต่ำลงก๊าซนั้นจะเย็นลงในขณะขยายตัว เราจึงมาถึงการอธิบายสำหรับการทดลองของกาเยเตในตอนนี้เขาไม่ได้ใช้ลูกสูบแต่เราสามารถเข้าใจง่ายว่าอะไรเกิดขึ้นในกรณีของเขาโดยแบ่งกระบอกสูบออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งต่อเชื่อมกันอยู่ด้วยท่ออันหนึ่งและเพียงกระบอกสูบเดียวที่มีลูกสูบ (รูปที่ 1.1) อีกส่วนหนึ่งจะเป็นท่อแก้วที่แข็งแรงของกาเยเตซึ่งบรรจุก๊าซออกซิเจนที่ถูกอัดอยู่ ถ้าตอนนี้ก๊าซถูกปล่อยให้ขยายตัวออกโดยดันลูกสูบให้ถอยออกไปในกระบอกสูบข้างขวา ออกซิเจนที่อยู่ในภาชนะทั้งข้างขวาและข้างซ้ายจะเย็นลงเนื่องจากการลดอัตราเร็วลงร่วมกันของโมเลกุลทั้งหมด ซึ่งน่าขอบใจการชนซึ่งกันและกัน เมื่อลูกสูบถอยออกไปนั้นจะเกิดการไหลพุ่งของก๊าซติดตามมาตลอดท่อ

รูปที่ 1.2 วัฏจักรทำให้เย็นลงแบบต่อเนื่องโดยใช้คอมเพรสเซอร์ A, เครื่องขยาย B และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน D ความร้อนที่ B จะถูกดึงออกไปจากวัฏจักรโดยน้ำหล่อเย็นใน C



ที่เชื่อมต่อนั้น ตามความเป็นจริงโมเลกุลทั้งหมดภายในกระบอกของกาเยเตข้างซ้ายไม่เคยรู้ว่ามีลูกสูบเลยทีเดียว และแทนที่จะยุ่งวุ่นวายไปกับการจัดหากระบอกสูบและลูกสูบก็อาจจะง่ายมากยิ่งขึ้นและถูกลงมากด้วยถ้าหากจะมีก๊อกไว้ทางปลายของท่อที่เชื่อมต่อนั้น เมื่อก๊อกนั้นถูกเปิดออกจะทำให้ออกซิเจนที่ถูกอัดทะลักออกมาและสิ่งที่ยังคงอยู่ในกระบอกที่มีผนังแข็งแรงจะเย็นลงเป็นอย่างมากจนกระทั่งกลายเป็นหยดเหลวเล็ก ๆ ชั่วขณะหนึ่ง แน่ละ ก๊อกทางปลายท่อของเราจะเป็นอะไรไม่ได้นอกเสียจากการรั่วโดยบังเอิญที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ของกาเยเตซึ่งทำให้เขาประสบผลสำเร็จ

กาเยเตได้พยายามทำให้แอเซทิลีนเป็นของเหลวโดยให้อยู่ภายใต้ความดันสูงและดูเหมือนอย่างค่อนข้างแน่นอนว่าเขาไม่ได้ตระหนักในความหมายที่แท้จริงของเหตุร้ายที่เป็นความสำเร็จของเขาในทันทีทันใดนั้น เราเพิ่งได้เห็นแล้วว่าการทดลองของเขาสามารถอธิบายด้วยพลังจลน์อย่างไร แต่แน่ละยังมีการอธิบายในภาษาอุณหพลศาสตร์ด้วยอีกแบบหนึ่ง นับว่าเก่าแก่กว่าแบบเชิงจลน์และช่วยให้ตัวมันเองไปสู่การคำนวณเชิงปริมาณได้ดีกว่า แต่ให้ความกระจ่างน้อยกว่าและไม่เคยบอกให้เราทราบโดยละเอียดว่าอะไรเกิดขึ้นบ้างในการขยายตัวของก๊าซ รากฐานของการนำอุณหพลศาสตร์ไปใช้ได้วางไว้แล้วเมื่อครึ่งศตวรรษก่อนสมัยกาเยเตโดยวิศวกรฝรั่งเศส ชื่อซาดิ คาร์โนต์ ในทฤษฎีของเขาว่าด้วยเครื่องยนต์ความร้อน ในรายงานของเขาเรื่อง "Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu" ซึ่งพิมพ์เผยแพร่ในปีค.ศ. 1824 และกลายเป็นรากฐานของการผลิตไฟฟ้ากำลังและอุณหพลศาสตร์ เขาได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่าง

พลังงานเชิงกลที่ต้องใช้ไปในการอัดก๊าซกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เกิดจากพลังงานนั้น ในทางกลับกันพลังงานที่ได้จากก๊าซในการผลักดันให้ลูกสูบถอยออกไปก็ส่งผลทำให้เย็นลง ในกระบวนการเหล่านี้เราจึงเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนพลังงานจากงานเชิงกลเป็นความร้อน หรือกลับกันได้ การพิจารณาเหล่านี้ไปใช้ทำให้สามารถสร้างอุปกรณ์การลดอุณหภูมิแบบง่ายซึ่งประกอบด้วยเครื่องยนต์ชนิดสองสูบ ลูกสูบหนึ่ง (A) สำหรับการอัดก๊าซและอีกลูกสูบหนึ่ง (B) สำหรับปล่อยให้ก๊าซทำงานกลโดยการขยายตัว (รูปที่ 1.2) ก๊าซที่ถูกอัดออกจาก A จะร้อนและความร้อนจากการอัดจะถูกดึงออกไปโดยน้ำหล่อเย็นในอ่าง C ก๊าซนั้นจะผ่านต่อไปในตอนนี้สู่เครื่องขยาย B ที่ซึ่งพลังงานความร้อนถูกเปลี่ยนไปเป็นงานกล ก๊าซซึ่งได้ถูกทำให้เย็นลงด้วยเหตุนี้จะออกจาก B และก่อนที่จะเข้าสู่ A อีกครั้งหนึ่งจะไหลไปยัง D ผ่านกระบอกซึ่งหุ้มท่อนำก๊าซซึ่งถูกอัดไปยัง B ความมุ่งหมายของอุปกรณ์ D นี้ก็คือ เพื่อลดอุณหภูมิของก๊าซซึ่งถูกอัดแล้วผ่านเข้ามาโดยอาศัยการไหลทวนของก๊าซเย็นที่ออกมาจากเครื่องขยาย "เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน" นี้จึงทำหน้าที่ควบคุมให้เมื่อสิ้นแต่ละจังหวะหนึ่งของ B ก๊าซที่เข้าไปยัง B ในจังหวะต่อไปจะเย็นลงกว่าเดิม กระบวนการทั้งหมดนี้เป็นวัฏจักรปิดซึ่งความร้อนจะถูกดึงออกไปอย่างสม่ำเสมอโดยน้ำหล่อเย็นและ B จะเย็นลงไปเรื่อยๆ ทั้งหมดนี้สามารถดำเนินต่อไปจนกระทั่งในที่สุดถึงอุณหภูมิซึ่งก๊าซในวัฏจักรเย็นลงจนเริ่มเป็นของเหลวใน B

อุปกรณ์การลดอุณหภูมิตามกรรมวิธีเหล่านี้แท้ที่จริงได้ขึ้นทะเบียนกรรมสิทธิ์โดยซีเมนส์ ตั้งแต่ค.ศ.1857 ทีเดียว แต่เมื่อยี่สิบปีต่อมากาเยเตได้ทำการทดลองของเขาก็ไม่มีผู้ใดอ้างถึงกรรมสิทธิ์นั้น แสดงว่าในเวลานั้นยังไม่ทราบแน่ชัดถึงความสัมพันธ์ระหว่างวิธีของกาเยเตและเครื่องยนต์ชนิดสูบสำหรับลดอุณหภูมิ ตามความเป็นจริงเครื่องยนต์ซีเมนส์จำนวนหนึ่งได้สร้างขึ้นแล้วและในปีค.ศ.1862 วิศวกรชาวสก็อตต์ชื่อ เคอร์ค ได้สร้างต้นแบบสำหรับลดอุณหภูมิของน้ำมันหินในกระบวนการกลั่นน้ำมันที่นับว่าได้ผลอย่างยิ่ง สามารถทำให้ปรอทแข็งได้โดยบังเอิญนั่นคือ อุณหภูมิลดลงถึงอย่างน้อย −39°ซ อย่างไรก็ตามบรรดาผู้ที่พัฒนาเครื่องมือเหล่านี้ไม่ใช่นักวิทยาศาสตร์ แต่เป็นวิศวกรที่แท้จริงซึ่งความมุ่งหมายของเขาก็คือการสร้างระบบทำความเย็นในเรือใหญ่ทั้งหลาย เพื่อที่จะสามารถรักษาสภาพของเนื้อสัตว์ซึ่งส่งออกจากออสเตรเลียไปยังอังกฤษ

ให้เป็นไปด้วยดี ซึ่งทำได้ผลเป็นครั้งแรกในปีค.ศ.1879

ความพยายามครั้งแรกที่จะทำอากาศเหลวด้วยเครื่องขยายได้กระทำโดยโซลเวย์ ประมาณปีค.ศ.1887 เมื่อสิทธิบัตรในประเทศเยอรมันเป็นของเขา สิทธินี้อ้างถึงความเป็นไปได้สามแบบ โดยสองแบบเป็นเครื่องขยาย แบบหนึ่งที่เคยทดสอบกันให้ผลแต่เพียงราวครึ่งเดียวของอุณหภูมิที่ต้องการให้ทดลอง เนื่องจากบันทึกเดิมของการทดสอบได้สูญหายไป จึงไม่มีใครทราบว่าแบบใดในบรรดาสามแบบของเขาเป็นแบบที่เคยได้ถูกทดสอบไว้บ้าง

ในที่สุดความสำเร็จก็เป็นของวิศวกรฝรั่งเศสชื่อ จอร์จส์ คลอด ซึ่งความพยายามหลายครั้งอย่างเป็นระบบและอย่างไม่ลดละของเขาได้นำไปสู่การทำอากาศเหลวในปีค.ศ.1902 ความยุ่งยากทางเทคนิกทั้งหลายซึ่งจะต้องฟันฝ่านั้นมีอยู่มากมาย ประการแรกเครื่องขยายต้องบุฉนวนความร้อนอย่างดี เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้งานเมื่อถึงที่สุดนั้นต่ำกว่า -150°ซ และจะต้องหาทางลดความร้อนไหลเข้าให้น้อยที่สุด ประการที่สองการหล่อลื่นส่วนประกอบที่เลื่อนไปมาทำได้ยากเหลือเกิน เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำๆเหล่านี้น้ำมันจะแข็งตัว น้ำมันอีเทอร์ซึ่งยังเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำถึง -140°ซ สามารถนำไปใช้ได้ แต่ผลที่สุดการใช้หนังแท้หุ้มห่อจะให้ผลดีกว่า อากาศปริมาณเล็กน้อยซึ่งรั่วไหลระหว่างส่วนที่หุ้มห่อลูกสูบกับผนังกระบอกสูบนับว่าเป็นตัวหล่อลื่นที่แท้จริงในกรณีนี้ คลอดอาจจะไม่พยายามต่อไปอย่างไม่ลดละในการเผชิญหน้ากับความยุ่งยากเหล่านี้ทั้งหมด เพื่อประโยชน์ของการทดลองทางวิทยาศาสตร์ แต่ในช่วงเปลี่ยนศตวรรษนั้นการทำอากาศเหลวได้ให้ความหวังแก่กิจการเชิงอุตสาหกรรมที่สำคัญอย่างหนึ่งสำหรับการแยกออกซิเจนจากบรรยากาศ เขาได้รับแนวทางจากความสำเร็จซึ่งคู่แข่งชาวเยอรมันและชาวอังกฤษได้บรรลุจากกระบวนการแตกต่างกันเมื่อ 7 ปีก่อน

อุณหภูมิที่ต่ำขนาด -200°ซ ตามที่เครื่องขยายของคลอดทำได้ในปีค.ศ.1920 ได้ใช้ก๊าซไฮโดรเจนแทนอากาศเป็นสารทำงาน ความมุ่งหมายในครั้งนี้คือการแยกก๊าซอีกเหมือนกันซึ่งเป็นไฮโดรเจนจากก๊าซในเตาเผาที่ปราศจากควัน และไม่ใช่การทำไฮโดรเจนเหลวแต่อย่างใด ดูเหมือนว่าไม่มีใครคำนึงถึงเครื่องขยายที่จะเป็นเครื่องมือสำหรับการค้นคว้าทางวิทยาศาสตร์ที่อุณหภูมิต่ำอย่างจริงจัง เมื่อปีค.ศ.1933 ข้าพเจ้าได้ไปเยี่ยมเยียนนักฟิสิกส์ชาวรัสเซียชื่อ ปีเตอร์

คาปิทซา ในห้องปฏิบัติการใหม่ของเขาในเคมบริดจ์ ข้าพเจ้าสังเกตเห็นโลหะบางชิ้นที่ขึ้นรูปไว้แล้ววางอยู่ประปราย ซึ่งข้าพเจ้าเข้าใจว่าเป็นชิ้นส่วนต่างๆของอุปกรณ์การทำความเย็น คาปิทซายอมรับแต่หลีกเลี่ยงที่จะระบุให้แน่ชัด เขากล่าวว่าเขาอยากเห็นมันทำงานได้ก่อนที่จะพูดถึงมัน ในไม่ช้าเขาประกาศความสำเร็จของเขา เขาได้สร้างเครื่องทำฮีเลียมเหลวซึ่งมีเครื่องขยายเครื่องหนึ่งทำงานที่อุณหภูมิเหนือกว่าศูนย์สัมบูรณ์เพียง 10 องศาเท่านั้น นับเป็นความสำเร็จเชิงวิศวกรรมที่ออกแบบได้อย่างหลักแหลมและดำเนินการได้อย่างเลอเลิศ ในที่สุดในปีค.ศ. 1946 เครื่องทำฮีเลียมเหลวตามแนวในทำนองเดียวกันนี้ได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นโดยศาสตราจารย์คอลลินส์ แห่งสถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซ็ตส์และได้นำออกจำหน่ายโดยบริษัท เอ. ดี. ลิทเทิล ไปทั่วโลกกว่าร้อยเครื่องทีเดียว และได้ทำให้เกิดวิวัฒนาการในด้านการวิจัยอุณหภูมิต่ำ ฮีเลียมเหลวซึ่งก่อนหน้านั้นเป็นสินค้าที่หาได้ยาก จะมีก็เฉพาะแต่ห้องปฏิบัติการไม่กี่แห่งเท่านั้น ได้กลายเป็นสิ่งที่ศูนย์ค้นคว้าวิจัยหลายแห่งสามารถมีไว้ใช้ขึ้นมาทันที ยังผลให้งานทางเทคโนโลยีและวิทยาศาสตร์ที่อุณหภูมิต่ำมากๆเพิ่มขึ้นมหาศาล จนกระทั่งในปัจจุบันมักจะเรียกยุคก่อนปีค.ศ. 1946 ว่าเป็นยุคก่อนคริสตศักราช โดยเลียนคำ B.C. แต่หมายถึงยุคก่อนคอลลินส์

เครื่องยนต์ชนิดสูบไม่ได้เป็นเพียงอุปกรณ์เดียวเท่านั้นที่ความร้อนสามารถเปลี่ยนเป็นงานกล สำหรับการผลิตไฟฟ้ากำลังสูง เช่น ตามสถานีจ่ายกระแสไฟฟ้า เรือเดินสมุทร และในเครื่องบินยุคปัจจุบันนี้เช่นกัน ได้เปลี่ยนมาใช้กังหันแทน ด้วยเหตุผลในด้านประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ของกังหันที่สูงกว่าหลายประการ ซึ่งอย่างไรก็ตามมันบ่าอยู่นอกเหนือขอบเขตเรื่องของเรา ด้วยเหตุผลเดียวกันนี้ทำให้กังหันเป็นที่น่าสนใจมากยิ่งขึ้นสำหรับการดึงความร้อนออกนั่นคือ สำหรับการทำความเย็นต่างๆ สิทธิบัตรสำหรับกังหันทั้งหลายที่ใช้ในการแยกก๊าซตกเป็นของทรัพย์ในประเทศอังกฤษ และจอห์นสันในประเทศอเมริกาในปลายศตวรรษที่ 19 กังหันต่างๆที่ใช้ทำก๊าซเหลวได้สำเร็จเป็นครั้งแรกในตอนต้นๆของระหว่างปีค.ศ. 1930–1939 โดยบริษัทลินเดในประเทศเยอรมัน แต่ด้วยเหตุผลในด้านความลับทางอุตสาหกรรมหรือทางทหาร จึงมีรายละเอียดเกี่ยวกับเรื่องนี้น้อยมากในปีต่อๆมา จนอีกครั้งหนึ่งที่คาปิทซาผู้ปราดเปรื่องทางวิศวกรรม ซึ่งตอนนี้อยู่ในมอสโคว์เป็นผู้เสนอการวิเคราะห์อย่างละเอียดทางด้านคุณสมบัติที่เหนือ

กว่าของกังหันในปีค.ศ.1939 ในการใช้เป็นอุปกรณ์การทำก๊าซเหลว นอกจากข้อดีเบื้องต้นต่างๆ ของกังหันซึ่งตั้งอยู่บนรากฐานในการพิจารณาทางอุณหพลศาสตร์แล้ว กังหันยังทำงานได้ที่ความดันต่ำกว่าเครื่องยนต์ชนิดลูกสูบมากด้วย ทำให้ทั้งโรงงานมีความปลอดภัยยิ่งกว่าและถูกกว่าในการก่อสร้าง ปัจจุบันกังหันได้กลายเป็นอุปกรณ์มาตรฐานสำหรับการติดตั้งขนาดมหึมาที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อป้อนงานผลิตเหล็กและฐานจรวด หมอกควันที่เห็นโดยกาเยเตในปีค.ศ.1877 ได้นำไปสู่การพัฒนาทางเทคโนโลยีอย่างมหาศาลและพร้อมด้วยแขนงต่างๆที่เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีที่สิ้นสุด

ขอให้เราย้อนกลับมาพิจารณาความเกี่ยวข้องที่ละเลยไประหว่างการทดลองของกาเยเตกับเครื่องขยาย เครื่องขยายนี้ให้ความเย็นเพราะทำงานกล แต่งานที่กระทำนี้อยู่ที่ไหนในอุปกรณ์ของกาเยเต สิ่งที่เกิดขึ้นทั้งหมดก็คือว่าก๊าซออกซิเจนที่ถูกอัดจะถูกปล่อยออกสู่อากาศ เงื่อนไขของปัญหานี้ได้ให้ไว้แล้วในรูปที่ 1.1 ซึ่งเราได้นำจุกก๊อกมาแทนกระบอกข้างขวา เมื่อใดก็ตามที่จุกนี้ถูกเปิดออก ออกซิเจนจะทำมากกว่าไหลพุ่งออกเท่านั้นเล็กน้อย และด้วยงานนี้เองที่ทำให้เกิดความเย็น อีกนัยหนึ่งการทดลองของกาเยเตเปรียบเสมือนอะไรอื่นไม่ได้นอกเสียจากวัฏจักรเดี่ยวที่ไม่สมบูรณ์ของอุปกรณ์การทำให้เย็น ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 1.2 ก๊าซออกซิเจนจะถูกอัดในตอนแรกที่ A ถึง 300 บรรยากาศ ทำให้เย็นลงก่อนจนถึง −29 °ซ โดยใช้ไอระเหยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ใน C และป้อนเข้าไปโดยไม่ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเข้าสู่ B ในกรณีของกาเยเต B เทียบได้กับส่วนของกระบอกขยาย (ข้างซ้ายมือของรูปที่ 1.1) เท่านั้น และเมื่อจุกก๊อกถูกเปิดออกจึงกระทำไปเพียงส่วนหนึ่งของจังหวะขยายเดี่ยวเท่านั้น ส่วนน้อยส่วนหนึ่งของก๊าซที่ขยายตัวออกไปยังคงอยู่ในกระบอกแก้วที่ซึ่งหยดเล็กๆของออกซิเจนเหลวปรากฏขึ้นมา หยดเล็กๆส่วนมากจะเล็ดลอดออกทางวาล์วและระเหยไปอย่างรวดเร็วเท่าๆกับเวลาที่เกิดขึ้น

ในขณะที่การทดลองของกาเยเตได้แสดงให้เห็นแล้วว่าบรรยากาศของโลกอยู่ในสถานะของเหลวเป็นครั้งแรกนั้น ยังนับว่าไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะเป็นวิธีทำก๊าซเหลวได้ อีกไม่กี่ปีต่อมาเมื่อได้ค้นพบวิธีทำอากาศเหลวที่ดีกว่า กรรมวิธีของกาเยเตจึงถูกละทิ้งไปและยังคงเป็นอะไรไม่ได้นอกจากความน่าสนใจในทางประวัติศาสตร์ จนกระทั่งปีค.ศ.1932 เอฟ.อี.ซิมอน ได้รื้อฟื้นวิธีการตามแบบเดิมของกาเยเต โดยที่ไม่ได้เปลี่ยนแปลง ซึ่งเขาสาธิตว่าในกรณี

พิเศษของฮีเลียมถึงแม้จะยังคงขาดประสิทธิภาพอยู่บ้าง แต่ยังเป็นกรรมวิธีที่ง่ายและสะดวกสำหรับการทำให้ได้ของเหลว

กาเยเตได้กระทำซ้ำหลังจากความสำเร็จของเขาด้วยการปรับปรุงอุปกรณ์ ในปี ค.ศ.1882 เขาทำให้หลอดแก้วรูเล็กเย็นลงด้วยเอทีลีนเหลวแทนที่จะใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งลดอุณหภูมิเริ่มต้นของการทดลองจาก -29°ซ ให้เป็น -105°ซ และในระหว่างการขยายเขาสังเกตเห็นความปั่นป่วนอย่างรุนแรงภายในหลอดนั้น แต่ละอองที่พุ่งออกมาของออกซิเจนเหลวก็ระเหยไปในทันทีอีกเหมือนกัน ดังนั้นความมุ่งมั่นขั้นต่อไปในความเป็นผู้สามารถเรื่องอุณหภูมิต่ำจึงได้หลุดลอยไปจากเขาอีก เมื่อขั้นนี้ได้ถูกวางแผนไว้อย่างชัดเจนในการประชุมอันอยู่ในความทรงจำของบัณฑิตยสภาในวันก่อนวันคริสต์มาสหนึ่งวันของปีค.ศ.1877 โดยผู้บุกเบิกผู้ยิ่งใหญ่อีกผู้หนึ่งของฟิสิกส์ในคริสต์ศตวรรษที่ 19 ชื่อ จามิน เขาได้กล่าวว่า "ความเป็นไปได้ของการทำให้ออกซิเจนเหลวได้พิสูจน์ให้เห็นแล้วในบัดนี้ การทดลองที่มุ่งมั่นยังคงจะต้องทำต่อไป ซึ่งจะประกอบด้วยการควบคุมออกซิเจนเหลวที่อุณหภูมิที่จุดเดือดของมัน" เขาได้ข้อแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างการสังเกตชั่วขณะหนึ่งของกลุ่มหมอกของหยดเล็กๆกับของเหลวที่มีเม็ดเล็กๆกำลังเดือดอย่างเงียบๆในหลอดทดลอง

กาเยเตและนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสหลายคนไม่ได้รับความสำเร็จนี้ เขาได้ทำงานของเขาต่อไปเป็นเวลาหลายปีต่อมาและเมื่อปีค.ศ.1913 เขาเสียชีวิตในปารีสด้วยอายุขัย 80 ปี เขามีความพึงพอใจที่ได้เห็นว่างานค้นคว้าดั้งเดิมของเขาได้กลายเป็นสาขาใหม่ของฟิสิกส์ ก๊าซทั้งหมดถูกทำให้เป็นของเหลวได้และอีกเพียง 1 องศาเท่านั้นก็จะบรรลุถึงศูนย์สัมบูรณ์ ประตูไปสู่โลกใหม่ที่น่าอัศจรรย์ของปรากฏการณ์ทางกายภาพที่น่าพิศวง ดังเช่นการสูญหายไปอย่างสิ้นเชิงของความต้านทานไฟฟ้าได้ถูกเปิดออกแล้ว ห้องปฏิบัติการเก่าแก่ของเขาที่ชาติลของบนฝั่งแม่น้ำแซนยังคงอยู่ที่นั่น ห้องที่เต็มไปด้วยอุปกรณ์ของเขาซึ่งมองลงไปแลเห็นสวนผักของเขายังได้รับการดูแลอย่างเอาใจใส่จากทายาทของเขาด้วยดี