NU Science Journal 2005; 2(1): 1 - 10

เสี้ยวหนึ่งในผลงานสามชิ้นของไอน์สไตน์ที่พลิกโฉมหน้าวงการฟิสิกส์โลก

ศิรินุช จินดารักษ์ และ ชโนภาส ชนลักษณ์ดาว*

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก 65000

*Corresponding author. E-mail: chanopatp@nu.ac.th

บทสรุป

ปี ค.ศ. 2005 เป็นปีพิเศษที่เกี่ยวข้องกับ Einstein เป็นปีที่ทั่วโลกกำลังฉลองวาระครบรอบ 100 ปี การตีพิมพ์ผลงานของ Einstein และเป็นปีที่องค์การสหประชาชาติประกาศให้เป็นปีฟิสิกส์โลก 2005 ดังนั้นในบทความนี้ผู้เขียนจะอธิบายว่าทำไมถึงต้องจัดงานเฉลิมฉลองให้กับ Einstein

บทนำ

การที่โลกหมุนรอบดวงอาทิตย์ให้หน่วยของเวลาที่คุ้นเคยกันดีคือ ปี และงานเฉลิมฉลองโดยทั่วๆ ไปหลังจากจบเหตุการณ์หนึ่งมักจะจัดกันทุกๆ 25 ปี แต่ถ้าครบรอบ 100 ปี ก็มักจะเป็นการเฉลิมฉลองแบบพิเศษ ในทางด้านวิทยาศาสตร์มีหลายเหตุการณ์ที่น่าสนใจและเหมาะสมกับงานฉลองครบรอบ 100 ปี เมื่อเวลาเดินมาถึงปี ค.ศ.2005 จัดเป็นวาระครบรอบ 100 ปีแห่งการค้นพบของ Einstein ซึ่งประกาศเป็นปีฟิสิกส์โลก โดยมีโปรแกรมพิเศษต่างๆ เช่นจัดให้มีการสัมมนาในเกือบทุกประเทศ รวมทั้งในประเทศไทยด้วย ปีมหัศจรรย์ของ Albert Einstein 1905 ระหว่างเดือนมีนาคมถึงเดือนธันวาคมในปีนั้น Einstein มีอายุ 26 ปี ได้ตีพิมพ์งานวิจัยฟิสิกส์ระดับขั้นสูง 5 ชิ้นโดยมีเรื่องที่แตกต่างกันถึง 3 เรื่องในวารสาร Annalen der Physik จริง ๆ แล้วมันเป็นการเปลี่ยนแปลงขนานใหญ่เกี่ยวกับความเข้าใจของพวกเราเกี่ยวกับจักรวาล โดยงานวิจัยทั้งหมดได้จัดการความเข้าใจหลักถึง 3 เรื่องที่แตกต่างดังนี้ (ก) แนวคิดของควอนตัมแสง (light-quantum) หรือ โฟตอน (photon) และการอธิบายปรากฏการณ์ photoelectric (ข) การอธิบายทฤษฎีการเคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian motion) และ (ค) ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ (special theory of relativity) ซึ่งให้แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับอวกาศและเวลา Einstein เองถือว่าข้อ (ก) เป็นการเปลี่ยนแปลงขนานใหญ่ที่แท้จริงเพราะมันเป็นขั้นตอนที่สองในการพัฒนาทฤษฎีควอนตัม (quantum theory) ในทางตรงกันข้ามทั้งการเคลื่อนที่แบบบราวน์และสัมพัทธภาพพิเศษเป็นส่วนของฟิสิกส์ดั้งเดิมและสิ่งที่ได้เพิ่มเติมในปี ค.ศ. 1905 ก็คือ Einstein ค้นพบความสมมูลระหว่างมวลและพลังงานมีสูตรเป็น $E = mc^2$ เมื่อ E คือพลังงาน, m คือมวล และ c คือความเร็วแสง ไม่มีปีใดมาก่อนหน้านั้นที่จะมีการค้นพบสิ่งที่เป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์ที่มี

ลักษณะหลายอย่างโดยบุคคลเพียงคนเดียว (ยกเว้นในช่วงปี ค.ศ. 1665-1666 ที่ Isaac Newton เป็นผู้วางรากฐานการค้นคว้าทางด้านกลศาสตร์ ทัศนศาสตร์ และแคลคูลัส)

ก่อนปี ค.ศ. 1905 มีการทดลองที่สำคัญสามอย่างนำไปสู่การค้นพบทางฟิสิกส์เริ่มต้นจาก X-rays ถูกค้นพบโดย Wilhelm Rontgen ในปีค.ศ. 1895 ที่ประเทศเยอรมัน ต่อมา Henri Becquerel ได้ค้นพบกัมมันตภาพรังสี (radio-activity) ในปี ค.ศ. 1896 ที่ประเทศฝรั่งเศส และ J J Thomson พิสูจน์อิเล็กตรอนในปี ค.ศ. 1897 ที่ประเทศอังกฤษ และอีกไม่นานในปี ค.ศ. 1900 ปีนี้จัดเป็นปีที่นำไปสู่ทฤษฎีควอนตัมโดยอาศัยกฎการแผ่รังสีจากวัตถุร้อนของ Max Planck ชาวเยอรมัน การที่จะนำพวกเราไปสู่ความเข้าใจความหมายของสิ่งที่ Einstein ทำสำเร็จสามอย่างที่สำคัญในปี ค.ศ. 1905 ของ Einstein พวกเราต้องรู้ประวัติศาสตร์ที่สำคัญบางอย่างดังนี้

การเริ่มต้นของโฟตอน

ในปี ค.ศ. 1859 Gustav Kirchhoff ได้ตั้งปัญหาเพื่อทดลองทำการวัดและอธิบายการแจกแจงพลังงานของการแผ่รังสีของวัตถุร้อนโดยพิจารณาการแผ่รังสีในภาวะสมดุลความร้อนของวัสดุที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ T ในแต่ละขอบเขตเล็กๆ $(\nu, \nu + d\nu)$ ของความถี่ แล้วเกิดคำถามขึ้นมาว่าจะมีความหนาแน่นพลังงานของการแผ่รังสีเท่าไร? ในปีต่อมาได้มีนักฟิสิกส์จำนวนมากอาทิเช่น Stefan, Boltzmann และ Wien ซึ่งได้มีส่วนร่วมในการแก้ปัญหานี้ โดย Wien ไม่เพียงแต่จะพิสูจน์โดยทฤษฎีเท่านั้นแต่แสดงให้เห็นได้ว่าความหนาแน่นพลังงาน $\rho(\nu, T)$ ต้องมีลักษณะเป็นดังนี้

$$\rho(\nu, T) = a\nu^3 f(\nu / T)$$

และ Wien ยังเสนอว่าฟังก์ชั่น f เป็นลักษณะเอกซ์โพเนนเชียล

$$\rho(\nu, T) = a\nu^3 e^{-b\nu/T} \quad (a, b = \text{ค่าคงที่})$$

อย่างไรก็ตามเฉพาะค่า ν มีค่ามากเท่านั้นสูตรนี้จึงจะสอดคล้องกับผลการทดลอง ในทางตรงกันข้ามถ้า ν มีค่าน้อยแล้วผลการทดลองจะสอดคล้องกับกฎของ Rayleigh-Jeans ตามสูตร

$$\rho(\nu, T) = (8\pi\nu^2 / c^3)(k_B T)$$

โดยที่ k_B คือค่าคงที่ของ Boltzmann จากการทำนาย ρ บนพื้นฐานสมการ Maxwell ของแม่เหล็กไฟฟ้ารวมกับฟิสิกส์เชิงสถิติได้นำ Planck ไปสู่การพบสูตร

$$\rho(\nu,T)=\frac{8\pi\nu^2}{c^3}\left(\frac{h\nu}{e^{h\nu/k_BT}-1}\right)$$

เมื่อ ν มีค่าน้อยจะได้ $\left(8\pi\nu^2/c^3\right)\left(k_BT\right)$ และถ้า ν มีค่ามากจะได้ $\left(8\pi\nu^2/c^3\right)\left(h\nu\, e^{-h\nu/k_BT}\right)$ สูตรนี้คือกฎของ Planck ที่รู้จักกันดี ซึ่งได้รวมค่าคงที่ของธรรมชาติ h ที่รู้เรียกกันว่าค่าคงที่ของ Planck สูตรนี้สอดคล้องกับผลการทดลองทุกขอบเขตของความถี่ Planck ได้สร้างกลไกที่นำไปสู่สูตรโดยสร้างสมมุติฐานว่าพลังงานการแผ่รังสีสามารถดูดหรือปล่อยแบบไม่ต่อเนื่องกันได้ ซึ่งขัดแย้งกับสมการ Maxwell ที่ว่าพลังงานการแผ่รังสีมีค่าต่อเนื่องกันโดยเริ่มจากศูนย์ขึ้นไป

ในปี ค.ศ. 1905 Einstein ได้แสดงการวิเคราะห์กฎของ Planck อย่างชัดเจนในขอบเขตของความถี่สูง (หรือในขอบเขต Wien) ว่ามีบางสิ่งที่สามารถเรียนรู้ได้อีกจากการแผ่รังสีในขอบเขตของ Wien โดยเขาพิจารณาการแผ่รังสีที่มีพลังงาน E ที่ความถี่ ν ค่าหนึ่งซึ่งบรรจุในปริมาตร V และเขาได้ทราบผลลัพธ์แนวคิดใหม่ว่าพลังงานการแผ่รังสีทั้งหมดในส่วน ν ของปริมาตร V ก็คือ $W=\left(\nu/V\right)^{E/h\nu}$ จากสิ่งนี้เขาได้สรุปว่าการแผ่รังสีเอกรงค์ (monochromatic radiation) ภายในขอบเขตของ Wien ประพฤติตัวราวกับว่ามันประกอบด้วยพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องกันแบบอิสระซึ่งกันและกันโดยมีขนาดเป็น $h\nu$ ซึ่งดูมีเหตุผลพอที่ใช้ครอบคลุมถึงแสงที่เปล่งออกมาว่าประกอบด้วยพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องกัน (energy quanta) สิ่งนี้เป็นเหตุผลของแนวคิดของโฟตอนที่ถือกำเนิดขึ้นในปี ค.ศ. 1905 Einstein ได้นำความคิดนี้มาประยุกต์ใช้กับปรากฏการณ์สามอย่างที่รู้จักกันดีคือปรากฏการณ์ photoelectric ถูกสังเกตเห็นโดย Heinrich Hertz ชาวเยอรมันในปี ค.ศ. 1887 โดยเขาพบว่าถ้าผิวโลหะสองชนิดที่แตกต่างกันต่ออยู่กับความต่างศักย์ที่มีค่าสูงแล้วจะสังเกตเห็นประกายแสง (spark) จากผิวโลหะหนึ่งไปตกกระทบบนผิวโลหะอีกอันหนึ่ง ในปี ค.ศ. 1899 J J Thomson แสดงให้เห็นว่าเมื่อแสงตกกระทบบนผิวโลหะหนึ่งแล้วจะมีอิเล็กตรอนถูกปล่อยออกมา ในปี ค.ศ. 1902 Philip Lenard ค้นพบว่าพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่มาตกกระทบบนผิวโลหะและยิ่งไปกว่านั้นถ้าเพิ่มความถี่ของแสงให้มากขึ้นพบว่าพลังงานของอิเล็กตรอนก็มีค่ามากขึ้นด้วย สถานการณ์เช่นนี้ไม่สอดคล้องกับแนวคิดที่ว่าแสงเป็นคลื่น เหตุผลข้อแรกเพราะพลังงานที่ถูกถ่ายเทจากแสงไปให้อิเล็กตรอนไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงซึ่งมันขัดแย้งกับสิ่งที่เคยคาดหวังไว้ว่าพลังงานของคลื่นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของแสง เหตุผลข้อที่สอง คาดหวังว่าคลื่นแสงที่มีความถี่สูง (ความเข้มของแสงคงที่) จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมามากเพราะว่าความถี่ของคลื่นจะให้จำนวนการรบกวนต่อหนึ่งหน่วยเวลา แต่จำนวนของอิเล็กตรอนก็ไม่เพิ่มขึ้นซึ่งไม่

สอดคล้องกับผลการทดลอง ในที่สุดผลการทดลองก็ยืนยันให้เห็นว่า ถ้าแสงที่ตกกระทบผิวโลหะมีความถี่ต่ำกว่าความถี่ขีดเริ่มต้น (threshold frequency) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะแล้วจะพบว่าไม่มีอิเล็กตรอนหลุดออกมาเลยถึงแม้ว่าจะเพิ่มความเข้มของแสงตกกระทบให้มากขึ้นก็ตาม สิ่งนี้นี่เองเป็นปริศนาเพราะแม้ว่าจะมีกำแพงพลังงาน (energy barrier) อิเล็กตรอนก็น่าจะสามารถหลุดออกมาจากผิวโลหะได้โดยคาดหวังว่าการเพิ่มความเข้มของแสงจะให้พลังขับดันอิเล็กตรอนที่เพียงพอทำให้อิเล็กตรอนหลุดพ้นจากบ่อดึงดูดของโลหะได้ แล้วทำไมความถี่ของแสงจึงต้องมาเกี่ยวข้องด้วย? Einstein ตอบคำถามทั้งหมดนี้ในงานเอกสารของเขาที่ตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 1905 เขาใช้ความคิดควอนตัมของแสงโดยได้เสนอสมการที่เรียบง่ายดังนี้ (Pais, 1982)

$$E = h\nu - \phi$$

เมื่อ E คือพลังงานจลน์ของ Photo-electron

ϕ คือ Work function หรือพลังงานที่อิเล็กตรอนถูกใช้เพื่อที่จะหลุดพ้นจากผิวโลหะ

สมการนี้อธิบายผลการทดลองได้ทั้งหมดเพราะพลังงานแต่ละก้อนของการแผ่รังสี (ซึ่งใช้เพื่อผลิต photo-electron) เป็นสัดส่วนตรงกับความถี่ ν เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นจำนวนก้อนของการแผ่รังสีก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วยแต่ไม่ได้ไปเพิ่มพลังงานของแต่ละควอนตัมแสง ในปัจจุบันสมการนี้ได้ถูกนำมาใช้สอนในโรงเรียนมัธยมกันแล้ว ณ ช่วงเวลาที่ Einstein เสนอสมการนี้มันเป็นการปฏิวัติแนวคิดของนักฟิสิกส์เพื่อเพิ่มเติมแนวคิดที่ว่าแสงเป็นคลื่นและไม่ใช่เรื่องประหลาดเลยที่แนวคิดแสงเป็นคลื่นจะขัดแย้งกับแนวคิดของ Einstein เป็นระยะเวลาเกือบสิบปี เมื่อ R A Millikan ชาวอเมริกันได้พยายามทำการทดลองทดสอบสมการ Einstein เริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ. 1905 ถึง 1915 ในที่สุดเขาก็พูดว่า “ผมใช้เวลาถึง 10 ปี เพื่อทดสอบสมการ Einstein และผลที่ได้จากการทดลองก็ขัดแย้งกับแนวความคิดของผม สุดท้ายผมได้ข้อสรุปในปี ค.ศ. 1915 และยืนยันว่าสมการ Einstein ได้ถูกพิสูจน์ว่าถูกต้องโดยดูเหมือนว่ามันได้ทำลายทุกๆ สิ่งที่ผมรู้และความเชื่อเกี่ยวกับการแทรกสอดของแสงจนหมดสิ้น” เวลาระหว่างนั้น Einstein ได้พัฒนาแนวคิดของควอนตัมแสงให้ชัดเจนยิ่งขึ้นในปี ค.ศ. 1909 เขาได้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงานสำหรับการแผ่รังสีของวัตถุร้อนแล้วสามารถอธิบายกฎของ Planck ได้สมบูรณ์และยังพบอีกว่ากฎของ Planck เป็นผลรวมของสองทฤษฎีดังต่อไปนี้ เริ่มจากส่วนที่หนึ่งเกี่ยวข้องกับกฎของ Wien และอีกส่วนหนึ่งเกี่ยวข้องกับกฎของ Rayleigh-Jeans โดย Einstein ได้กล่าวว่าแนวความคิดของ Planck ไม่ได้ใช้ได้กับเฉพาะคลื่นแสงเท่านั้นแต่ยังสามารถนำไปใช้กับตัวแกว่งกวัด (oscillator) ชนิดอื่นๆ ได้อีกด้วย

Einstein ยังพบอีกว่าทฤษฎีฟิสิกส์แผนเดิมไม่สามารถอธิบายสเปกตรัมของวัตถุดำ (blackbody spectrum) ได้โดยเฉพาะการอธิบายพฤติกรรมของความร้อนจำเพาะของของแข็งในช่วงอุณหภูมิต่ำซึ่งเป็นเรื่องที่ทำได้ยากมาก จนในปี ค.ศ. 1907 Einstein ได้เสนอแนะว่าผลึกของแข็งเป็นชุดของตัวแกว่งกวัดและทำการคำนวณค่าพลังงานภายในเฉลี่ยที่อุณหภูมิ T โดยสมมุติให้ตัวแกว่งกวัดมีพลังงานเป็นแบบไม่ต่อเนื่องกันตามที่ Planck ได้เสนอไว้ นั่นก็คือพลังงานของตัวแกว่งกวัดตัวหนึ่งเกี่ยวข้องกับความถี่ของมันเอง โดยที่ $E = nh\nu$ เมื่อ $n = 1, 2, 3, ...$ (ชื่อเรื่องของงานวิจัยชิ้นนี้มีชื่อว่า The Planck theory of radiation and the theory of specific heat)

ในปัจจุบันนี้เราเรียกพลังงานการแกว่งกวัดของอะตอมในผลึกซึ่งถูกทำให้เป็นควอนตัมว่าโฟนอน (phonon) ถึงแม้ว่าการอธิบายเรื่องความร้อนจำเพาะจะสามารถอธิบายได้อย่างสมบูรณ์โดย Peter Debye ชาวฮอลันดาในเวลาถัดมาก็ตาม แต่ Einstein ก็ยังจัดว่าเป็นนักฟิสิกส์คนแรกที่ยอมรับแนวคิดการทำพลังงานให้เป็นควอนตัม โดยเขาให้เป็นกฎหลักพื้นฐาน ถัดมาในปี ค.ศ. 1916 Einstein แสดงให้เห็นว่านอกจากควอนตัมแสงจะมีพลังงาน $h\nu$ แล้วมันยังสามารถมีขนาดโมเมนตัมเชิงเส้นเป็น $p = h\nu/c$ โดยมีทิศไปตามทิศของการเคลื่อนที่ ผลสะท้อนจากแนวคิดนี้ได้มีการตอบสนองแบบขัดแย้งต่อการทำให้เป็นควอนตัมของแสง ไม่เพียงแต่ Millikan เท่านั้นที่ไม่ชอบแนวคิดนี้ยังรวมไปถึง Planck และ Bohr อีกด้วย โดย Bohr ได้เสนอขอบเขตไว้ที่ว่าพลังงานของระบบเล็ก ๆ แต่ละระบบจะต้องอนุรักษ์โดยให้ถือใหม่ว่าเป็นสิ่งที่ต้องยกเลิกก็เพื่อที่จะทำให้การอธิบายการแผ่รังสีโดยสมการ Maxwell เป็นสิ่งที่ถูกต้อง แต่มันก็เป็นไปได้ว่า Einstein ได้พิจารณาเรียบร้อยแล้วและไม่ยอมรับข้อเสนอของ Bohr (ในปีค.ศ. 1910) สุดท้ายแนวคิดโฟตอนก็เป็นสิ่งที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางในปี ค.ศ. 1925 หลังจากที่ A H Compton และ A W Simon ได้พิสูจน์ว่ากฎพลังงานและโมเมนตัมจะต้องอนุรักษ์ถ้าแสงเป็นอนุภาคในปรากฏการณ์ Compton โดยในการทดลองเขาให้โฟตอนชนกับอิเล็กตรอนโดยตรง

การเคลื่อนที่แบบบราวน์

อนุภาคขนาดจุลภาคเช่น ละอองเกสรดอกไม้ที่ลอยอยู่ในของเหลวมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาโดยมีทิศการเคลื่อนที่ไม่เป็นไปตามกฎเกณฑ์สิ่งนี้คือการเคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian motion) ซึ่งเป็นชื่อของนักชีววิทยาชาวอังกฤษ Robert Brown ได้เป็นผู้ศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์สังเกตละอองเกสรในช่วงปี ค.ศ. 1827-1828 ก่อนหน้านี้เชื่อกันว่าการที่ละอองเกสรเคลื่อนที่แบบตะกุกตะกักเป็นหลักฐานอย่างหนึ่งว่าต้องมีแรงที่จำเป็นมาทำให้ละอองเกสรที่ไม่มีชีวิตทำตัวเสมือนว่ามีชีวิต หลังจากที่ Brown ได้ทำการศึกษาก็พบว่าไม่มีแรงที่จำเป็นดังกล่าวเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์นี้เลย

โดยหลังปี ค.ศ. 1850 นักวิทยาศาสตร์หลายคนเชื่อว่าการเคลื่อนที่แบบบราวน์เกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุที่ว่าถ้าไม่ใช่เกิดจากการเคลื่อนที่ภายในของไหลแล้วก็อาจเกิดจากการชนกันระหว่างโมเลกุลของของไหลกันเองในทิศทางที่แตกต่างกัน Einstein ไม่เชื่อความเชื่อเหล่านี้เขาได้ศึกษางานนี้อย่างพิถีพิถันโดย Einstein พูดไว้ว่า ถ้าการศึกษาการเคลื่อนที่แบบบราวน์ ที่เกิดจากการมีโมเลกุลของน้ำจำนวนมากพุ่งชนละอองเกสรตลอดเวลาในทิศต่างๆ กันสอดคล้องกับการทดลองแล้ว เขาจะสามารถกำหนดขนาดของอะตอมที่แท้จริงได้อย่างแม่นยำจริง ๆ แล้วการกำหนดขนาดของอะตอมและเลข Avogadro N_A เป็นเรื่องที่ได้มีการทำซ้ำในงานฟิสิกส์เชิงสถิติช่วงแรกๆ ของ Einstein โดยเขาได้นำกลับมาคำนวณเพื่อกำหนดเลข Avogadro ซ้ำแล้วซ้ำอีก โดยเสนอวิธีการหลายๆ แบบที่เป็นอิสระต่อกันเพื่อประมาณเลขปริมาณพื้นฐานนี้ นับได้ว่างานของ Einstein เป็นแรงกระตุ้นให้มีการศึกษาและพิสูจน์เกี่ยวกับอะตอมของสสาร

Einstein ได้วิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบบราวน์โดยใช้หลักฟิสิกส์ในพฤติกรรมของกระบวนการแบบสุ่ม โดยก่อนหน้านี้ A A Markov ได้เสนอกระบวนการ Markov ในทฤษฎีของความน่าจะเป็น Einstein ยอมรับว่าการเคลื่อนที่แบบบราวน์เป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการ Markov ที่รู้จักกันดีในชื่อกระบวนการแพร่ซึม Einstein ได้เขียนสมการที่ควบคุมการแจกแจงความน่าจะเป็นของตำแหน่งของอนุภาคในรูป

$$\frac{\partial p(x,t)}{\partial t} = D\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2}$$

สมการนี้รู้จักกันดีว่าเป็นสมการการแผ่กระจาย (หรือถูกเรียกว่าเป็นสมการการนำความร้อน) เมื่อ D คือสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม ถ้าอนุภาคถูกทำให้เริ่มเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้น $x = 0$ ที่ $t = 0$ แล้วจะได้คำตอบดังนี้

$$p(x,t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-x^2/4Dt} \quad \text{สำหรับค่า } t > 0$$

ผลลัพธ์สมการนี้คือคุณลักษณะพิเศษของกระบวนการแพร่ซึมในนามที่รู้จักกันดีว่าค่าเฉลี่ยของการกระจัดยกกำลังสองในทิศทางต่าง ๆ กันของอนุภาค Brownian ในช่วงเวลา t ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ t มากกว่า t^2

$$\left\langle x^2(t) \right\rangle = 2Dt$$

Einstein พบความจริงว่าคำตอบต้องเป็นการกระจัดเฉลี่ยยกกำลังสองมากกว่าเป็นความเร็วบัดดลของอนุภาคดังเช่นในอดีต Einstein ได้ใช้ความฉลาดโดยเขารวมเอาอุณหพลศาสตร์ (thermodynamics) เข้ากับพลศาสตร์ (dynamics) แล้วพบว่าได้ความสัมพันธ์ระหว่าง D กับอุณหภูมิ T ของของเหลวและสัมประสิทธิ์ความหนืดของของเหลว η ตามสมการดังนี้

$$D = \frac{RT}{6\pi N_A \eta a}$$

เมื่อ R เป็นค่าคงที่ของก๊าซ Einstein แสดงให้เห็นว่าถ้าอนุภาคเป็นทรงกลมรัศมี a แล้วจะได้

$$\left\langle x^2(t) \right\rangle = \frac{RT}{3\pi N_A \eta a} t$$

สมการนี้ทำให้สามารถหาเลข Avogadro N_A ได้ โดยการวัดค่าเฉลี่ยของการกระจัดยกกำลังสองของอนุภาค Brownian ตลอดช่วงของเวลาที่แตกต่างกัน การทำนายทฤษฎีของ Einstein ได้รับการยืนยันว่าถูกต้องทุกประการโดย Jean Perrin และลูกศิษย์ โดยการทดลองในช่วงปี ค.ศ. 1908-1914 ไม่ใช่มีเพียงแต่ Einstein เท่านั้น ที่เป็นผู้แสวงหาคำตอบปัญหานี้ยังมีผู้บุกเบิกปัญหาการเคลื่อนที่แบบบราวน์อีกอาทิเช่น นักฟิสิกส์ชาวโปแลนด์ Marian von Smoluchowski และนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส Paul Langevin การเคลื่อนที่แบบบราวน์ ได้กลายเป็นตัวอย่างสำหรับชนิดของการเคลื่อนที่แบบสุ่มที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้มากมายเช่น การเปลี่ยนแปลงของราคาสินค้าที่มีอยู่ในร้าน พลวัตความเสียดทาน (dynamic friction) ของกลุ่มดาวในดาราจักร (galaxies) และช่วย Feynman วางกฎเกณฑ์ path integral ของกลศาสตร์ควอนตัม และยังเป็นวิธีสมัยใหม่ของการทำให้เป็นควอนตัมในทฤษฎีสนามควอนตัมเป็นต้น (Rigden, 2005)

จุดเริ่มต้นของสัมพัทธภาพพิเศษ

สัมพัทธภาพพิเศษเกิดจากการแสวงหาวิธีอธิบายพลวัตไฟฟ้า (electrodynamics) ของประจุที่กำลังเคลื่อนที่ซึ่งรวมพลวัตของอนุภาควัสดุและพลวัตของการแผ่รังสี อย่างไรก็ตามหลักการพื้นฐานและเงื่อนไขที่จำเป็นของสัมพัทธภาพพิเศษได้นำไปสู่ความเข้าใจในธรรมชาติเรื่องอวกาศ - เวลาและนำไปสู่กฎของฟิสิกส์เรื่องสมมาตร (symmetry) เรื่องหลักการไม่แปรเปลี่ยน (invariance) เป็นต้น พวกเรารู้สึกสำนึกบุญคุณในความสำเร็จของ Einstein ที่เกี่ยวข้องกับสัมพัทธภาพพิเศษนี้ โดยระลึกถึงประวัติศาสตร์กันอีกสักครั้งเริ่มจากหนังสือ Philosophiae Naturalis Principia Mathematica ของ

Newton ที่ตีพิมพ์ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1687 ในหนังสือเล่มนี้ Newton ได้พิจารณาธรรมชาติของอวกาศและเวลาไว้ดังนี้ “พิจารณาอวกาศและเวลาว่าแยกกันอย่างสมบูรณ์” และลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุที่อยู่ในยานพาหนะจะเหมือนกันไม่ว่ายานพาหนะจะเคลื่อนที่ตรงไปด้วยความเร็วคงที่หรือในเวลาที่หยุดนิ่ง ที่จริงแล้วกฎการเคลื่อนที่นี้เป็นการกำหนดกรอบอ้างอิงชนิดหนึ่งที่เรียกว่ากรอบอ้างอิงเฉื่อย (inertial reference frame) โดยกฎการเคลื่อนที่ของ Newton จะเป็นจริงได้เมื่อการเคลื่อนที่อยู่ภายในกรอบอ้างอิงชนิดนี้เท่านั้นและแน่นอนว่าผลลัพธ์ที่ไม่เหมือนกันจะเกิดขึ้นเมื่ออยู่ในกรอบอ้างอิงที่มีลักษณะการเคลื่อนที่แตกต่างกัน

เมื่อเวลาผ่านมาเกือบสองร้อยปีจนในปี ค.ศ. 1865 Maxwell ได้แสดงสมการของเขาที่ได้รวมเอาปรากฏการณ์ไฟฟ้า แม่เหล็กและแสงเข้าไว้ด้วยกัน โดยแสงได้ถูกแสดงให้เห็นว่าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำลังแผ่ด้วยความเร็วค่าหนึ่งที่ซึ่งคำนวณได้จากการวัดสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กในห้องทดลอง และในที่สุดก็เกิดความขัดแย้งกันระหว่างแนวคิดด้านอวกาศและเวลาของ Newton กับทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ Maxwell ความขัดแย้งที่เกิดขึ้นก็คือการที่พลังแม่เหล็กไฟฟ้าผันแปรทุกครั้งที่เราเคลื่อนที่ ความเร็วของแสงในสุญญากาศสามารถทำนายได้ในกรอบอ้างอิงเฉื่อยเท่านั้น ดังนั้นในทุกๆ กรอบอ้างอิงเฉื่อยความเร็วแสงก็ต้องแปรผันขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของผู้สังเกต ดังนั้นตอนวัดความเร็วของแสงก็น่าจะเป็นไปตามกฎพื้นฐานของกลศาสตร์โดยถ้าวัดความเร็วของแสงขณะที่โลกหมุนโดยที่เราอยู่บนโลก (อนุโลมให้กรอบอ้างอิงที่ติดอยู่กับโลกเป็นกรอบอ้างอิงเฉื่อย) ความเร็วของแสงก็น่าจะแตกต่างกันไปตามทิศทางของแสง จากกฎการรวมอัตราความเร็วของ Newton จะได้ความเร็วของแสงมีค่าจาก $c-\mathrm{v}$ ถึง $c+\mathrm{v}$ โดยขึ้นอยู่กับทิศทางของ $\vec{\mathrm{v}}$ เมื่อ c คือความเร็วของแสง และ v คืออัตราเร็วที่โลกเคลื่อนที่ ซึ่งให้ค่าความเร็วแสงไม่เป็นไปตามสมการของ Maxwell

อย่างไรก็ตามการทดลองที่ Michelson และ Morley นักฟิสิกส์ชาวอเมริกันคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1887 ที่ Case School of Applied Science and Western Reserve University in Cleveland, Ohio ได้แสดงให้เห็นว่า Maxwell ถูก แต่ Newton ผิด ได้มีนักวิทยาศาสตร์หลายคนพยายามที่จะทำให้กลศาสตร์ของ Newton สอดคล้องกับทฤษฎีของ Maxwell เริ่มจาก Lorentz, Fitzgerald และ Poincare แต่ความพยายามก็ไม่ประสบผลสำเร็จ และคำตอบทั้งหลายก็ชัดเจนขึ้นโดยงานของ Einstein ในปี ค.ศ. 1905 โดยเขาสามารถสร้างสมการการแปลงขึ้นมาโดยเปรียบเทียบวัตถุที่ต่างก็เคลื่อนที่อยู่ได้โดยเขากำหนดให้ความเร็วแสงเป็นค่าคงที่ สมการก็เหมือนของ Lorentz แต่คำอธิบายของ Einstein ไม่มีอีเทอร์มาเกี่ยวข้องเท่านั้นเอง ในที่สุดเขาก็พบทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษโดยสรุปได้ดังนี้ เวลาและอวกาศจะผันแปรไปตามความเร็วการเคลื่อนที่ และนี่ก็คือใจความสำคัญที่สุดของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษและที่เรียกว่าพิเศษก็เพราะเป็นทฤษฎีที่ใช้เฉพาะตอนที่เคลื่อนที่ตรงไปด้วยความเร็วคงที่เท่านั้น สิ่งที่ได้ตามมาอีกก็คือการสังเกตวัตถุที่เคลื่อนที่ใกล้ความเร็วแสงเมื่อเทียบกับผู้สังเกตซึ่งอยู่นิ่ง

ความยาวของวัตถุจะลดลง เวลาของวัตถุจะช้าลงและมวลของวัตถุจะมากขึ้นเมื่อวัตถุมีความเร็วเท่าแสงความยาววัตถุจะเท่ากับศูนย์ เวลาจะหยุดนิ่ง และน้ำหนักของวัตถุจะมีค่าเป็นอนันต์

สรุปและวิจารณ์

งานของ Einstein มีเรื่องให้น่าจดจำมากมายเป็นความสำเร็จอย่างน่าทึ่งของ Einstein ในปี ค.ศ. 1905 ซึ่งทั่วโลกพร้อมใจกันเรียกว่าเป็นปีมหัศจรรย์ของ Einstein และหลังจากปีนั้นก็เป็นความทรงจำที่พอจะสรุปให้พวกเราได้ระลึกถึงงานของเขาดังนี้เริ่มจากในปี ค.ศ. 1909 จากที่กล่าวมาในตอนแรกมีการใช้กฎของ Planck แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานของการแผ่รังสีของวัตถุร้อนเป็นผลรวมของสองเทอมคือส่วนของ Wien และส่วนของ Rayleigh - Jeans ต่อมาในช่วงปี ค.ศ. 1907 - 1915 ในช่วงนี้ Einstein สร้างทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปซึ่งเป็นความพยายามที่จะรวมทฤษฎีความโน้มถ่วงของ Newton และสัมพัทธภาพพิเศษเข้าไว้ด้วยกัน โดยเขาได้พัฒนาหลักแห่งสัมพัทธภาพให้อธิบายสภาพการเคลื่อนที่ขณะที่มีแรงอื่นกระทำเช่นแรงโน้มถ่วง และในที่สุดเขาก็ได้หลักแห่งสัมพัทธภาพทั่วไปกล่าวไว้ดังนี้ ไม่ว่าจะเป็นการเคลื่อนที่แบบใดทั้งมีแรงภายนอกหรือไม่มีแรงภายนอก กฎของธรรมชาติจะยังคงเดิมเสมอและมวลทำให้อวกาศโค้งงอ ยิ่งไปกว่านั้นเวลาและอวกาศจะผันแปรไปตามสภาวะการเคลื่อนที่ด้วยอัตราความเร่งและกรณีสภาวะที่มีแรงโน้มถ่วง ยิ่งแรงโน้มถ่วงมากการเดินของเวลาก็จะยิ่งช้าลงและการโค้งงอของอวกาศก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น

ต่อมาในปี ค.ศ. 1916 กฎควอนตัมของ Planck ถูกนำมาใช้ในงานของ Einstein หลายครั้งในปี ค.ศ. 1905 ในปี ค.ศ. 1909 และอีกครั้งในปี ค.ศ. 1916 โดย Einstein รับเอาแนวคิดของ Bohr ชาวเดนมาร์ก ที่กล่าวไว้ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวงโคจรรอบ ๆ นิวเคลียสแต่ละวงโคจรจะมีค่าพลังงานต่างกัน ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นกับค่าคงที่ของ Planck อิเล็กตรอนที่โคจรอยู่จะไม่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แต่เมื่ออิเล็กตรอนย้ายไปวงโคจรที่มีพลังงานต่ำกว่าจึงจะปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แนวคิดนี้ Einstein บอกว่าสามารถนำไปใช้ทำเลเซอร์ (laser) ได้ ต่อมาในปีค.ศ. 1917 Einstein ได้เห็นว่าทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปบอกว่าจักรวาลกำลังขยายตัว ต่อมาในปี ค.ศ. 1925 หลังจากที่มีการค้นพบสถิติแบบ Bose โดย Satyendra Nath Bose ชาวอินเดียในปี ค.ศ. 1924 Einstein ก็ได้ให้ทฤษฎี ideal quantum gas และปรากฏการณ์นี้ได้ถูกทำนายไว้เป็นที่รู้จักกันดีในชื่อ Bose-Einstein condensation

ต่อมาในช่วงปี ค.ศ. 1925-1935 ที่จริงแล้ว Einstein เป็นคนแรกๆ ที่นำวิชาสถิติมาใช้กับฟิสิกส์และเขาได้เห็นบุคคลสามคนที่เป็นคนบุกเบิกวิชากลศาสตร์ควอนตัมคนแรกก็คือ Werner Heisenberg ชาวเยอรมัน ได้เสนอว่าอะตอมเป็นอนุภาค ต่อมา Erwin Schroedinger ชาวออสเตรียได้กำหนดให้อะตอมเป็นคลื่น และ P A M Dirac ชาวอังกฤษได้ศึกษากลศาสตร์ควอนตัมจากบุคคลทั้งสองอย่างละเอียดจนได้ปรับปรุงวิธีคิดให้ง่ายขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น Werner Heisenberg ก็ได้เผยแพร่

หลักการสำคัญคือหลักความไม่แน่นอนโดยกล่าวไว้ว่าเราจะไม่สามารถหาค่าที่แน่นอนของตำแหน่งและความเร็วของวัตถุใดๆ ได้พร้อมกัน แต่กระนั้น Einstein ก็ยังไม่พอใจเท่าใดนักเพราะ กลศาสตร์ควอนตัมใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นมาเป็นหลักในการอธิบาย แม้ว่า Einstein จะเป็นคนแรกที่นำเอาทฤษฎีความน่าจะเป็นมาใช้ในการอธิบายโลกของอะตอมเป็นคนแรกก็ตามแต่ก็เป็นเพียงเพื่อความสะดวกในเบื้องต้นเท่านั้น Einstein ถึงกับกล่าวว่าพระเจ้าจะไม่โยนลูกเต๋าซึ่งหมายความว่าสรรพสิ่งทั้งหลายในธรรมชาติที่พระเจ้าสร้างขึ้นมาล้วนแต่มีกฎเกณฑ์ชัดแจ้ง การใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นในการอธิบายเท่ากับยอมรับว่าผลงานศึกษาไม่มีความแน่ชัดเปลี่ยนไปมาได้ตามความสะดวก Einstein เองถึงกับเขียนบทความวิพากษ์วิจารณ์ทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัมของ Bohr ที่นำทฤษฎีความน่าจะเป็นมาใช้ว่าเป็นวิชาที่มีข้อบกพร่องและขาดความสมบูรณ์โดยสิ้นเชิง

สุดท้าย ใครคือนักวิทยาศาสตร์ที่ยิ่งใหญ่ที่สุดในคริสต์ศตวรรษที่ 20 คำตอบของคนส่วนใหญ่น่าจะเป็น Einstein จากผลงานสามเรื่องที่แตกต่างกันในปี ค.ศ. 1905 และความสำเร็จของ Bohr เกี่ยวกับแบบจำลองอะตอมในปี ค.ศ. 1913 ตามด้วยทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปในปี ค.ศ. 1915 และการเริ่มใช้กลศาสตร์ควอนตัมในช่วงปี ค.ศ. 1925-1927 ก็น่าจะเป็นเหตุผลเพียงพอที่พวกเราต้องจัดงานเฉลิมฉลองให้กับ Einstein

เอกสารอ้างอิง

Pais, A., 1982. *The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford University Press, Oxford.

Rigden, J S., 2005. *The Standard of Greatness*. Harvard University Press, Cambridge.