

ใหญ่แค่ไหน ไกลแค่ไหน เก่า แค่ไหน — ที่มาของตัวเลขใน สารานุกรม

ห้องสมุด AICE · how-big-how-far-how-old

12 บท · ฉบับภาษาเดียว

เขียนครั้งแรก 7 สิงหาคม 2026 · ปรับปรุงล่าสุด 12 กันยายน 2026

ทุกตัวเลข ชื่อ และปีในเล่มนี้ตรวจย้อนไปยังแหล่งที่อ้างไว้ได้

01. กล่องข้อมูล — ทุกตัวเลขล้วนมีคนคนแรกที่เป็นผู้ค้นพบ

ตัวเลขที่มาถึงมือโดยไม่มีชื่อคนคิดมา

เปิดสารานุกรมเล่มไหนก็ได้ แล้วพลิกไปหน้าที่บอกขนาดของโลก สิ่งที่คุณเจอคือตัวเลขที่นิ่งและมั่นใจ เส้นรอบวงของโลกยาวประมาณ 40,075 กิโลเมตร ไม่มีร่องรอยว่ากว่าจะรู้ตัวเลขนี้ ใครต้องยืนอยู่ตรงไหน ถือเครื่องมืออะไร หรือเดาผิดกี่ครั้ง ตัวเลขมาถึงมือผู้อ่านในสภาพเสร็จแล้ว เหมือนมันมีอยู่ตลอดมา และนั่นคือความรู้สึกที่งานอ้างอิงถูกสร้างขึ้นมาเพื่อให้พอดี

แต่ทุกตัวเลขในทุกรายการเคยไม่มีใครรู้ แต่ละตัวเลขมีคนคนแรกที่ไม่รู้เหมือนกัน แล้ววันหนึ่งก็รู้ กล่องข้อมูลคือมหาวีรกรรมที่สร้างเสร็จแล้ว หนังสือเล่มนี้คือนั่งร้านที่ยังไม่ถูกรื้อ และมีแต่มุมมองจากนั่งร้านเท่านั้นที่ทำให้คุณสร้างมหาวีรกรรมเป็น คนที่สร้างมันขึ้นมาเกือบทุกครั้งที่ทำงานด้วยอุปกรณ์ที่วันนี้ดูไร้สาระ ไม้ปักดิน ลูกตุ้มตะกั่วผูกเชือก สายอากาศแบบฮอร์นที่มีนกพิราบอยู่เต็ม ช่องว่างระหว่างอุปกรณ์กับคำตอบคือส่วนที่น่าสนใจ และกล่องข้อมูลคือที่ที่รับประกันได้ว่าส่วนนั้นจะไม่ปรากฏ หนังสือเล่มนี้เอาตัวเลขแบบนั้น 10 ชุด กลับไปวางในมือของคนที่ยึดมันเป็นคนแรก

เหตุใดเรื่องราวเหล่านี้จึงไม่เคยเป็นฉบับที่สวยหรู

ฉบับเรียบร้อยแล้วว่าคนฉลาดคนหนึ่งคิดออก แล้ววัดสิ่งนั้นได้ถูกต้อง ฉบับจริงมักไม่ยอมจบง่ายขนาดนั้น ความแม่นยำของ Eratosthenes ขึ้นอยู่กับความยาวของหน่วยวัดที่ทุกวันนี้ไม่มีใครระบุได้แน่ นักประวัติศาสตร์จึงยังเถียงกันว่าเขาถูกแค่ไหน เมตรถูกสร้างจากการสำรวจที่มีข้อผิดพลาด ผู้เขียนการสำรวจนั้นพบมันเอง ปิดไว้ และเก็บไปจนตาย Cavendish ไม่เคยรายงานค่าคงที่ที่ทุกคนยกเครดิตให้เขา และค่าคงที่ที่ตัวนั้นยังเป็นค่าที่วัดได้แย่ที่สุดในวิชาฟิสิกส์ Römer ตีพิมพ์เวลาที่แสงใช้เดินทาง ไม่ใช่ความเร็ว ส่วนความเร็วที่เราอ้างอิงกันคือเลขคณิตของคนอื่น แต่ละบทในเล่มนี้เก็บความซับซ้อนไว้ ไม่ขัดให้เรียบ เพราะความซับซ้อนนั่นเองคือสิ่งที่สอนวิธีการ

เหตุใดเด็กคนหนึ่งจึงคิดถูกที่ใส่ใจเรื่องนี้

เด็กที่อ่านสารานุกรมเพราะสนุกมักถูกหาว่าสะสมเรื่องไร้สาระ ข้อนั้นอ่านความสนุกผิด ความสนุกคือความรู้สึกว่าโลกถูกค้นพบแล้ว ว่าที่ไหนสักแห่งมีคนยืนกลางทุ่ง แล้วคิดออกว่าดวงอาทิตย์อยู่ไกลเท่าไร รู้ว่าตัวเลขถูกสร้างขึ้นอย่างไร ตัวเลขก็เปลี่ยนจากสิ่งที่ต้องท่องเป็นสิ่งที่ใช้คิด และผู้อ่านจะรู้ว่าเมื่อไรควรสงสัยมัน นั่นคือเกราะเดียวที่ทนทานต่อตัวเลขที่ดูมั่นใจแต่ไม่มีอะไรรองรับ ของแบบนี้พบบ่อยกว่าการวัดที่ทำมาดี เด็กคนนั้นคิดถูกตั้งแต่แรก และสืบบทถัดจากนี้คือเหตุผล

ตัวอย่าง: มหาวิหารที่มองจากที่นั่งในโบสถ์คือของที่เสร็จแล้ว มองจากนั่งร้านมันคือชุดของการตัดสินใจ และมีแต่มุมมองที่สองเท่านั้นที่ทำให้คุณสร้างมหาวิหารได้

คำตัดสิน. ตัวเลขจากการวัดคือข้ออ้างที่มีวิธีการติดตามด้วย และการอ่านวิธีการนั้นคือสิ่งที่แยกการรู้ข้อเท็จจริงออกจากการมีข้อเท็จจริงไว้ในครอบครอง

จะพลิกคำตัดสินได้เมื่อ: รายงานมาตรฐานเหล่านี้ตรงกับแหล่งข้อมูลปฐมภูมิแล้ว รอดมาได้โดยไม่ต้องแก้ ไม่มีข้อผิดพลาดที่ถูกปกปิด ไม่มีการระบุตัวบุคคลผิด และไม่มีความขัดแย้งกันอยู่

แหล่งอ้างอิง. 2018 · Dmitry A. Shcheglov, "The so-called 'Itinerary Stade' and the Accuracy of Eratosthenes' Measurement of the Earth," *Klio* — [De Gruyter](#)
· **2022** · CODATA, "Recommended Values of the Fundamental Physical Constants" — [NIST](#)

02. ขนาดของโลก — เจาและก้าอย่าง

เจาที่หายไปบ่อน้ำหนึ่งบ่อ

ประมาณ 240 ปีก่อนคริสตกาล ที่เมืองไซโอนีในอียิปต์ มีบ่อน้ำลึกบ่อหนึ่งที่ไม่มีเจาตกลงไปเลยในเที่ยงวันของวันครีษมายัน เพราะดวงอาทิตย์อยู่ตรงหัวพอดี เอราทอสเทนิสแห่งไซรินได้นเรื่องนี้ และถามต่อว่าวันเดียวกัน เวลาเดียวกัน ที่เมืองอเล็กซานเดรียซึ่งอยู่ทางเหนือขึ้นไป แท่งไม้ตั้งตรงจะมีเจาหรือไม่ มันมี และมุมของเเจนั้นวัดได้ประมาณหนึ่งในห้าสิบของวงกลม ถ้าสองเมืองห่างกันหนึ่งในห้าสิบของระยะรอบโลก เส้นรอบวงทั้งหมดก็เท่ากับห้าสิบเท่าของระยะห่างนั้น เขาได้คำตอบ 250,000 สตาไดออน ต่อมาปรับเป็น 252,000 สตาไดออน วิธีทั้งหมดใช้เพียงสามเหลี่ยมคล้าย ไม่มีอะไรมากกว่านั้น

ค่าปัจจุบันของเส้นรอบวงโลกอยู่ที่ประมาณ 40,075 กิโลเมตร และค่ากล่าวอ้างที่แพร่หลายคือเอราทอสเทนิสวัดคลาดจากค่านี้ไม่ถึงหนึ่งเปอร์เซ็นต์ ฟังดูเหมือนปิดคดีได้แล้ว แต่คำถามที่ตามมาคือ เขาเข้าใจความจริงขนาดนั้นจริงหรือ

เหตุใดจึงไม่มีใครระบุได้ว่าเขาเข้าใจความจริงเพียงใด

ปัญหาคือสตาไดออนไม่ใช่ความยาวคงที่ และไม่มีแหล่งข้อมูลที่หลงเหลืออยู่บอกว่าเขาใช้สตาไดออนแบบใด ค่าประมาณของสตาไดออนอยู่ราว 157 ถึง 185 เมตร แล้วแต่มาตรฐานที่สมมติ ช่วงนี้อย่างเดียวก็ขยับคำตอบของเขาไปได้มากกว่าสิบห้าเปอร์เซ็นต์ เลือกค่าอียิปต์ที่สั้นกว่า เขาตกเกือบพอดีค่าปัจจุบัน เลือกค่าแอตติก เขาคลาดไปหนึ่งในหก ดมิทรี เชกลอฟ และฌากส์ ดุตกา ทำงานห่างกันหลายทศวรรษ แต่สรุปตรงกันว่าค่ากล่าวอ้าง "คลาดเคลื่อนไม่ถึงหนึ่งเปอร์เซ็นต์" เกิดจากการเลือกค่าแปลงหน่วยที่ให้ตัวเลขสวยที่สุด ข้อมูลตั้งต้นของเขาก็หลวมด้วย: ไซโอนีไม่ได้อยู่บนเส้นทรอปิกพอดี ไม่ได้อยู่ใต้อเล็กซานเดรียตรงพอดี และระยะทางระหว่างสองเมืองเป็นตัวเลขกะจากถนน

สรุปอย่างตรงไปตรงมาคือ วิธีของเขาถูก คำตอบอยู่ในอันดับความใหญ่ที่ถูก ส่วนความแม่นยำที่แท้จริงไม่มีทางรู้ได้ ไม่ใช่เพราะเขาทำพลาด แต่เพราะหน่วยที่เขาใช้ตายไปพร้อมกับเขา

ประเด็นสำคัญของการโต้แย้งนี้

ความผิดพลาดสองอย่างที่ตึงกันคนละทางทำให้วิธีที่ผิดดูแม่นยำได้ นี่คือการหักที่เก่าแก่ที่สุดของการวัด เอราทอสเทนิสยังสมควรได้รับเครดิตอยู่ดี เพราะสิ่งที่เขาทำสำเร็จไม่ใช่ตัวเลขที่แม่นยำ แต่คือการแสดงให้เห็นว่าขนาดของดาวเคราะห์เป็นสิ่งที่คนหนึ่งคนคำนวณได้จากเงา บทเรียนจริงของบทนี้คือ ผลลัพธ์ที่บอกโดยไม่มีหน่วยไม่ใช่ผลลัพธ์บดบังไปจะพาประเด็นนี้ไปถึงการสำรวจที่กินเวลาเจ็ดปีและการฆ่าตัวตายหนึ่งราย

ตัวอย่าง: เราส่วนสูงของคนแปลกหน้าจากเงาได้ผลดี จนกระทั่งรู้ว่าภาพถ่ายนั้นถ่ายตอนเย็น

คำตัดสิน. เอราทอสเทนิสวัดโลกด้วยวิธีที่ถูกต้อง และได้อันดับความใหญ่ที่ถูกต้อง คำกล่าวอ้างใดที่แคบกว่านั้นเรื่องความแม่นยำของเขา เป็นคำกล่าวอ้างเรื่องสถิติออนไม่ใช่เรื่องตัวเขา

จะพลิกคำตัดสินได้เมื่อ: พบแหล่งข้อมูลที่ระบุว่าเอราทอสเทนิสใช้สถิติออนแบบใด คำถามเรื่องความแม่นยำจะเปลี่ยนจากตอบไม่ได้เป็นตอบได้ทันที

แหล่งอ้างอิง. 2018 · Dmitry A. Shcheglov, "The so-called 'Itinerary Stade' and the Accuracy of Eratosthenes' Measurement of the Earth," *Klio* — [De Gruyter](#)
· **1993** · Jacques Dutka, "Eratosthenes' Measurement of the Earth Reconsidered," *Archive for History of Exact Sciences* — [PhilPapers](#)

03. เมตร — ข้อผิดพลาดที่ซ่อนอยู่ในมาตรฐาน

หน่วยวัดที่ต้องไม่เป็นของใคร

หน่วยความยาวหน่วยใหม่จะต้องไม่มีใครเป็นเจ้าของ นั่นคือเงื่อนไขที่สาธารณรัฐฝรั่งเศสที่เพิ่งตั้งในปี 1792 วางไว้ ก่อนจะส่งนักดาราศาสตร์สองคนออกไปวัดส่วนโค้งของเส้นเมริเดียนจากดันเคิร์กถึงบาร์เซโลนา เพื่อให้หน่วยความยาวถูกนิยามจากตัวโลกเอง เมตรจะต้องเท่ากับหนึ่งในสิบล้านส่วนของระยะจากขั้วโลกเหนือถึงเส้นศูนย์สูตร นิยามแบบนี้ไม่มีใครเป็นเจ้าของ ทุกคนจึงรับได้ งานนี้เป็นเรื่องการเมืองไม่น้อยไปกว่าเรื่องวิทยาศาสตร์ มาตรฐานที่ได้จากธรรมชาติเป็นสมบัติของกษัตริย์ไม่ได้

Jean-Baptiste Delambre รับครึ่งเหนือ Pierre Méchain รับครึ่งใต้ และคาดกันว่าการสำรวจจะกินเวลาราวหนึ่งปี มันกินเวลาเจ็ดปี ผ่านการปฏิบัติ ผ่านสงคราม ผ่านการที่ Méchain ถูกจับขัง ทั้งสองคนวัดสามเหลี่ยมข้ามประเทศไปที่ละจุดเล็ก และในที่สุดเมตรที่ได้ออกมาก็สั้นกว่าหนึ่งในสี่ของเส้นเมริเดียนที่มันควรจะแทนอยู่ประมาณ 0.2 มิลลิเมตร ตัวเลขที่คลาดเคลื่อนน้อยขนาดนี้ฟังดูเหมือนความสำเร็จเรียบร้อยของงานเจ็ดปี แต่ Méchain รู้ดีกว่าใครว่ามันไม่เรียบร้อยขนาดนั้น

ข้อผิดพลาดที่ Méchain ไม่สามารถรายงานได้

Méchain วัดละติจูดของบาร์เซโลนาจากสถานีสองแห่ง และผลสองค่าไม่ตรงกัน ส่วนต่างนั้นเล็ก น้อยกว่าความกว้างของเล็บมือมากเมื่อเทียบกับที่ระยะนั้น แต่มันใหญ่กว่าที่วิธีของเขาควรจะยอมให้เกิดได้ บันทึกจากจดหมายเหตุของ Ken Alder เล่าว่า Méchain ซ่อนความไม่ตรงกันนั้น แก้อ้อมมูลของตัวเองใหม่ และถูกเรื่องนี้ก่อกวนไปตลอดหลายปีถัดมา เขาตายในปี 1804 โดยไม่เคยคลี่คลายมันได้ เขารู้จุดผิด แต่ไม่มีทางรายงานมันได้เลย

เรื่องตลกร้ายคือส่วนต่างนั้นไม่ใช่ความผิดของเขาเลย โลกไม่ใช่ทรงรีที่สมบูรณ์แบบ และแรงโน้มถ่วงที่แปรผันเฉพาะที่ทำให้ลูกดิ่งเอียงไปเล็กน้อย ผู้สังเกตในศตวรรษที่สิบแปดไม่มีทางจำลองสิ่งนี้ได้ การสำรวจยังสมมติค่าความแบนของโลกไว้ใกล้ $1/334$

ห่างจากตัวเลขสมัยใหม่ที่ราว 1/298 อยู่พอสมควร มาตรฐานที่โลกรับไปใช้จึงตั้งอยู่บนข้อผิดพลาดจริงและการปกปิดอย่างซื่อสัตย์

เหตุใดจึงไม่สำคัญ และเหตุใดจึงกลายเป็นเรื่องสำคัญในเวลาต่อมา

และมันก็ใช้การได้อยู่ดี หน่วยวัดไม่ต้องจริงก็ใช้ได้ มันต้องเป็นที่ตกลงกันและต้องนิ่ง และเมตรมีทั้งสองอย่าง นิยามถูกตัดออกจากดาวเคราะห์ที่ละชั้น จนปี 1983 เมตรถูกนิยามด้วยการตรึงค่าความเร็วแสง และมันยังอยู่ตรงนั้นจนทุกวันนี้ ก้าวนั้นปิดทางให้ความล้มเหลวแบบนี้เกิดขึ้นอีกโดยสิ้นเชิง หน่วยที่นิยามด้วยค่าคงที่ของธรรมชาติ บรรจุความผิดพลาดของนักสำรวจไว้ไม่ได้ เพราะไม่มีการสำรวจ มาตรฐานที่ต้องการแค่ข้อตกลงและความนิ่ง ไม่ใช่ความจริง คือมาตรฐานที่รอดจากข้อผิดพลาดของคนคนเดียวได้เสมอ

ตัวอย่าง: นาฬิกาที่ทั้งเมืองใช้ร่วมกันเดินเข้าไปสัปดาห์ที่ยังทำให้ทั้งเมืองตรงเวลา จนถึงวินาทีที่ใครสักคนเอามันไปเทียบกับนาฬิกาของอีกเมือง

คำตัดสิน. เมตรตั้งอยู่บนข้อผิดพลาดที่วัดได้และผู้สร้างมันซ่อนไว้เอง แต่ยังใช้ได้ตามวัตถุประสงค์ เพราะมาตรฐานต้องการข้อตกลงและความนิ่ง ไม่ใช่ความจริง

จะพลิกคำตัดสินได้เมื่อ: บันทึกในจดหมายเหตุแสดงว่า Méchain รายงานส่วนต่างที่บาร์เซโลนาต่อคณะกรรมการอย่างเปิดเผย ซึ่งจะลบการปกปิดอันเป็นรากฐานของเรื่องเล่ามาตรฐานนี้ออกไป

แหล่งอ้างอิง. 2002 · Ken Alder, "The Measure of All Things: The Seven-Year Odyssey and Hidden Error That Transformed the World" — [American Scientist review](#) · **ไม่ระบุปี** · NIST, "Meter" — [NIST](#)

04. น้ำหนักของโลก — คาเวนดิชในโรงเก็บของ

การชั่งน้ำหนักดาวเคราะห์ด้วยลูกตะกั่วสองลูก

แรงโน้มถ่วงระหว่างลูกตะกั่วสองลูกเบาเสียจนกระแสนลมพัดผ่านหรืออุณหภูมิที่ต่างกันเพียงเล็กน้อยก็กลบมันได้ นั่นคือสิ่งที่คาเวนดิชต้องเอาชนะในปี 1798 เมื่อเขาตีพิมพ์ "การทดลองเพื่อหาความหนาแน่นของโลก" ในวารสาร Philosophical Transactions ของราชสมาคมแห่งลอนดอน เขาแขวนคานเบาที่ปลายทั้งสองข้างมีลูกตะกั่วเล็กไว้กับเส้นลวดบาง เลื่อนทรงกลมตะกั่วใหญ่สองลูกเข้ามาใกล้ แล้ววัดว่าคานบิดไปเท่าใด ได้ยินเสียงกระซิบในห้องเงียบนั้นง่าย ทักษะที่แท้จริงอยู่ที่การสร้างห้องเงียบขึ้นมาก่อน และคาเวนดิชสร้างห้องเงียบที่สุดเท่าที่ศตวรรษที่สิบแปดจะสร้างได้ เขาปิดเครื่องมือไว้ในตู้ในอาคารแยกต่างหาก แล้วเฝ้าดูจากข้างนอกผ่านกล้องโทรทรรศน์ เพื่อไม่ให้ความร้อนจากร่างกายของเขาเองรบกวนผล

เครื่องมือนี้ไม่ใช่ความคิดของเขาเองด้วยซ้ำ จอห์น มิเชล เป็นผู้ออกแบบ แต่เสียชีวิตก่อนได้ใช้ เครื่องมือจึงส่งต่อมาถึงคาเวนดิชผ่านคนกลาง เขารายงานความหนาแน่นเฉลี่ยของโลกไว้ที่ประมาณ 5.48 เท่าของน้ำ ค่าสมัยใหม่คือ 5.514 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ห่างกันไม่ถึงครึ่งเปอร์เซ็นต์

ค่าคงที่ที่เขาไม่ได้วัด

แต่สิ่งที่คาเวนดิชได้เครดิตอยู่เสมอว่าเป็นคนแรกที่วัด ไม่ใช่ความหนาแน่นของโลก มันคือค่าคงที่โน้มถ่วง ซึ่งเขาไม่ได้วัด และไม่ได้เอ่ยถึงเลยแม้แต่คำเดียว ค่าคงที่ G ยังไม่มีอยู่ในฐานะปริมาณที่มีชื่อเรียกในช่วงชีวิตของเขา งานวิจัยของเขาว่าด้วยความหนาแน่นของโลก และนั่นคือคำถามที่ราชสมาคมสนใจ ค่าของ G ถูกดึงออกมาจากตัวเลขของเขาในเวลาต่อมาอีกนาน โดยคนอื่นที่ทำงานในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่เขาไม่เคยใช้

ค่าปัจจุบันคือ $6.67430(15) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ มีความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ประมาณ 22 ส่วนในล้านส่วน ตามการปรับค่าของ CODATA ปี 2022 G จึงเป็นค่าคงที่พื้นฐานที่รู้ค่าแม่นยำน้อยที่สุด และทิ้งห่างตัวอื่นมาก ในยุคที่หน่วยวินาทีรู้ค่าได้ถึงหนึ่งใน

10^{18} เหตุผลคือแรงโน้มถ่วงเอง มันปิดกันไม่ได้ ขยายไม่ได้ และมวลทุกก้อนในห้องปฏิบัติการดิ่งการทดลองอยู่ตลอดเวลา

ความหมายของความล้มเหลวในการพัฒนาตลอดสองศตวรรษ

การหาค่า G ในยุคใหม่ที่ทำอย่างอิสระจากกันให้ผลต่างกันเกินค่าความไม่แน่นอนที่แต่ละแห่งระบุไว้ แปลว่าอย่างน้อยบางการทดลองมีความคลาดเคลื่อนเชิงระบบที่ยังไม่มีใครตรวจพบ นี่คือสภาพปกติของการวัดที่ยาก ไม่ใช่เรื่องอื้อฉาว และสาขาวิชานี้ตอบสนองด้วยการตีพิมพ์ความไม่สอดคล้องนั้นออกมา ไม่ใช่หาค่าเฉลี่ยเพื่อกลบมันไป ความสำเร็จจริงของคาเวนดิชจึงไม่ใช่ตัวเลข แต่เป็นเทคนิค แยกปรากฏการณ์ออกมา เอาผู้สังเกตออกไป แล้วปล่อยให้แรงที่อ่อนสะสมจนกลายเป็นการเคลื่อนที่ที่มองเห็นได้ สองศตวรรษผ่านไป ห้องเจียบของเขายังเป็นห้องที่เจียบที่สุดเท่าที่ฟิสิกส์มี และ G ยังคงเป็นค่าคงที่ที่รู้จักน้อยที่สุดในบรรดาทั้งหมด

ตัวอย่าง: ได้ยินเสียงกระซิบในห้องเจียบนั้นง่าย ทักชะอยู่กับการสร้างห้องเจียบ

คำตัดสิน. คาเวนดิชวัดความหนาแน่นของโลกได้ห่างจากค่าสมัยใหม่ประมาณครึ่งเปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าคงที่ที่คนยกเครดิตให้เขาไม่ปรากฏในงานวิจัยของเขา และยังคงเป็นค่าที่รู้ความแม่นยำน้อยที่สุดในฟิสิกส์

จะพลิกคำตัดสินได้เมื่อ: การหาค่า G ครั้งใหม่ทำให้ผลจากห้องปฏิบัติการอิสระต่างๆ สอดคล้องกันภายในขอบเขตความไม่แน่นอนที่ระบุไว้

แหล่งอ้างอิง. 1798 · Henry Cavendish, "Experiments to Determine the Density of the Earth," Philosophical Transactions 88:469–526 — **Royal Society** · **2022** · CODATA, "Recommended Values of the Fundamental Physical Constants" — **NIST**

05. ความเร็วแสง — ดวงจันทร์ที่ล่าช้า

นาฬิกาบนท้องฟ้าที่เดินช้าลง

ในศตวรรษที่ 17 นาฬิกาที่ดีที่สุดเรือนหนึ่งลอยอยู่บนฟ้า คือดวงจันทร์ไอโอของดาวพฤหัสบดี ที่เคลื่อนเข้าสู่เงาของดาวเคราะห์ตรงเวลาครั้งแล้วครั้งเล่า แต่ในปี 1676 Ole Rømer ที่ทำงานอยู่ที่หอดูดาวปารีส สังเกตเห็นว่านาฬิกาเรือนนี้เดินไม่ตรง คราสไม่ได้มาตามกำหนดตลอดทั้งปี ช่วงที่โลกเคลื่อนห่างจากดาวพฤหัสบดี คราสมาช้า ช่วงที่โลกเคลื่อนเข้าหา คราสมาเร็ว และรูปแบบนี้ตามเรขาคณิตของวงโคจรทั้งสองพอดี

สิ่งที่ Rømer ตีพิมพ์คือเวลาที่แสงใช้เดินทาง ไม่ใช่ความเร็ว และข้อพิพาททางประวัติศาสตร์ทั้งหมดที่ตามมาอีกสามศตวรรษอยู่ที่ความต่างข้อนี้เพียงข้อเดียว คำอธิบายของเขาคือแสงต้องใช้เวลาข้ามอวกาศ ความล่าช้าจึงวัดระยะทางส่วนเกินที่แสงต้องเดินทางเพิ่ม เขาประกาศว่าแสงใช้เวลาราว 22 นาทีในการข้ามเส้นผ่านศูนย์กลางวงโคจรโลก แล้วใช้ค่านี้นำมาว่าคราสครั้งหนึ่งจะมาช้า และมันก็มาช้าจริง คำทำนายที่พิสูจน์ต่อหน้าสาธารณะนั่นเองที่ทำให้ข้อโต้แย้งนี้ยืนอยู่ได้

ความเร็วที่เขาไม่เคยระบุ

จะแปลงตัวเลขของเขาเป็นความเร็วได้ ต้องรู้เส้นผ่านศูนย์กลางวงโคจรโลกก่อน และในปี 1676 ยังไม่มีใครรู้ค่านั้นแน่ชัด Christiaan Huygens เป็นคนแปลงค่านั้นในปี 1690 ตัวเลขที่ตำราเรียนมักยกให้ Rømer จึงเป็นเลขคณิตของ Huygens ส่วนหนึ่งและเป็นการเดาขนาดระบบสุริยะแบบศตวรรษที่ 17 อีกส่วนหนึ่ง ไม่ใช่ของ Rømer ล้วนๆ อย่างที่เล่ากัน

การวัดบนพื้นโลกมาถึงกับ Hippolyte Fizeau ในปี 1849 เขาส่งลำแสงลอดช่องฟันเฟืองที่กำลังหมุนไปยังกระจกที่อยู่ไกลออกไปแล้วสะท้อนกลับ แล้วปรับความเร็วการหมุนจนลำแสงที่กลับมาถูกฟันซี่ถัดไปบังพอดี Albert Michelson ใช้เวลาหลายทศวรรษขัดเกลาวีธีกระจกหมุนที่ใช้หลักการเดียวกันนี้ต่อเนื่องเข้าสู่ศตวรรษที่ 20 งานทั้งสองชุดทำสิ่งเดียวกัน วัดความเร็วให้แม่นยำขึ้นทีละขั้น จนในปี 1983

กระบวนการนี้จบลง เมตรกนิยามใหม่โดยตั้งความเร็วแสงไว้ที่ 299,792,458 เมตร ต่อวินาทีพอดี

เมื่อการวัดกลายมาเป็นนิยาม

เมื่อรู้ค่าปริมาณหนึ่งได้ดีกว่าหน่วยที่ใช้บอกค่านั้น การวัดมันให้แม่นยำขึ้นก็หมดความหมาย ทุกวันนี้ความเร็วแสงเป็นค่าแน่นอนโดยข้อกำหนด และการทดลองที่ดีขึ้นทุกครั้งในอนาคตจะไปขัดเกลานิยามของเมตรแทน การกลับด้านนี้ ค่าคงที่ถูกตรึงส่วนหน่วยเป็นฝ่ายลอย คือรูปแบบที่บ๊อบท้ายๆ ของหนังสือเล่มนี้สร้างขึ้นบนนั้น และปี 1983 คือจุดที่มันเริ่มต้น

ตัวอย่าง: เฝียกันเรื่องความยาวของไม้เมตรมีประโยชน์อยู่ จนถึงวันที่ไม้เมตรอันนั้นกลายเป็นตัวนิยามหนึ่งเมตร ณ จุดนั้นสิ่งที่เฝียกันอยู่คือไม้บรรทัดของคุณเอง

คำตัดสิน. Rømer พิสูจน์ว่าแสงมีความเร็วจำกัด และวัดเวลาที่แสงใช้ข้ามวงโคจรโลก ส่วนความเร็วที่ยกให้เป็นของเขานั้นต้องอาศัย Huygens และค่าเส้นผ่านศูนย์กลางวงโคจรที่ยังรู้ไม่ดี และตั้งแต่ปี 1983 ตัวเลขนี้เป็นนิยาม ไม่ใช่ผลการวัด

จะพลิกคำตัดสินได้เมื่อ: มีต้นฉบับที่แสดงว่า Rømer ระบุค่าความเร็วในหน่วยของเขาเอง ซึ่งจะคืนเครดิตตามตำราเรียนให้เขา

แหล่งอ้างอิง. 2026 · "Rømer's determination of the speed of light" —

Wikipedia · 2009 · "Ole Rømer and the Speed of Light," Optics & Photonics News — **Optica**

06. จำนวนอะตอมเท่าไร — การพิสูจน์ว่าสารมีความเป็นเม็ดเล็ก ๆ

ตัวเลขที่ตั้งชื่อตามบุคคลผู้ไม่เคยคำนวณมัน

พยานคนเดียวบรรยายคนแปลกหน้าอาจจำผิดได้ พยานสี่คนที่ไม่เคยพบกันบรรยายคนแปลกหน้าคนเดียวกันตรงกัน เป็นการกล่าวอ้างคนละชนิด นี่คือนี่ที่เกิดขึ้นกับคำถามว่าอะตอมมีอยู่จริงหรือไม่ และเป็นเหตุผลที่ค่าคงที่อาโวกาโด ซึ่งเป็นจำนวนอนุภาคในสารหนึ่งโมล ตั้งชื่อตามชายที่ไม่เคยคำนวณมันเลยสักครั้ง Amedeo Avogadro เสนอในปี 1811 ว่าก๊าซปริมาตรเท่ากัน ที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน มีอนุภาคจำนวนเท่ากัน แต่เขาไม่เคยคำนวณว่าเท่าใด ค่าคงที่ที่ใช้ชื่อเขาถูกประมาณครั้งแรกหลายทศวรรษหลังเขาเสียชีวิต และตั้งแต่ปี 2019 ค่านี้ถูกกำหนดตายตัวไว้ที่ $6.02214076 \times 10^{23}$ ต่อโมล ไม่มีความคลาดเคลื่อน

Josef Loschmidt หาค่านี้ในยุคแรกเมื่อปี 1865 จากทฤษฎีจลน์ของก๊าซ โดยคำนวณความหนาแน่นเชิงจำนวนของโมเลกุลในอากาศ ภาษาเยอรมันยังเรียกปริมาณที่เกี่ยวข้องนี้ว่าค่าคงที่ลอชมิทท์จนถึงทุกวันนี้ ตัวเลขที่แหล่งข้อมูลทฤษฎีสมัยใหม่อ้างว่าเป็นของ Loschmidt ไม่ตรงกันเอง ต่างกันราวหนึ่งอันดับความใหญ่ นี่คือการเตือนว่าตัวเลขเก่าต้องสืบทอดไปถึงบทความต้นฉบับ ไม่ใช่สืบทอดผ่านการเล่าต่อ สิ่งที่สำคัญคือ ในทศวรรษ 1860 ความเป็นเม็ดของสสารได้กลายเป็นปริมาณที่มีคนใส่ค่าให้ได้แล้ว

การทดลองที่ยุติข้อโต้แย้ง

ล่วงเข้าศตวรรษที่ยี่สิบแล้ว นักวิทยาศาสตร์ที่จริงจังยังถืออยู่ว่าอะตอมเป็นเครื่องมือทางบัญชีที่มีประโยชน์ ไม่ใช่วัตถุที่มีอยู่จริง Jean Perrin โจมตีคำถามนี้ผ่านการเคลื่อนที่แบบบราวน์ คือการสั่นของละอองเกสรที่แขวนลอยในน้ำ ซึ่ง Einstein ได้เชื่อมโยงเข้ากับการพุ่งชนของโมเลกุลไว้ก่อนแล้ว Perrin วัดว่าละอองเกสรกระจายตัวในแนวตั้งอย่างไรภายใต้แรงโน้มถ่วง ติดตามระยะที่มันเคลื่อน แล้วสกัดค่าคงที่ออกมาได้หลายวิธีต่างกัน

จุดชี้ขาดไม่ใช่ค่าใดค่าหนึ่ง แต่คือวิธีที่เป็นอิสระต่อกันของเขาลู่เข้าสู่ตัวเลขเดียวกัน ถ้าวณูภาคที่อยู่เบื้องหลังไม่มีจริง เรื่องนี้อธิบายได้ยากมาก เขาได้รับรางวัลโนเบล สาขาฟิสิกส์ปี 1926 "สำหรับผลงานเกี่ยวกับโครงสร้างที่ไม่ต่อเนื่องของสสาร" คำประกาศนี้ระบุความสำเร็จที่แท้จริง ไม่ใช่ตัวเลข หลัง Perrin สมมติฐานเรื่องอะตอม เล็กเป็นสมมติฐาน

ความลู่เข้าในฐานะหลักฐานที่แข็งแกร่งที่สุด

การวัดครั้งเดียวอาจผิดในแบบที่ผู้วัดมองไม่เห็น และการวัดซ้ำก็ผิดซ้ำในแบบเดิมได้ ทุกประการ วิธีที่เป็นอิสระต่อกันจะพลาดไปทางเดียวกันได้ยากกว่ามาก ความสอดคล้องระหว่างเทคนิคที่ไม่เกี่ยวข้องกันจึงมีน้ำหนักมากกว่าความแม่นยำภายในเทคนิคเดียว ไม่ใช่ตัวเลขตัวใดตัวหนึ่งของ Perrin ที่ปิดข้อถกเถียงเรื่องอะตอม แต่คือการที่พยานทั้งหมดพูดตรงกันโดยไม่นัดหมาย นี่คือเหตุผลที่รูปแบบนี้กลับมาอีกในทุกบทถัดไปของหนังสือเล่มนี้ และเป็นเหตุผลที่ผลลัพธ์ตระการตาเพียงชิ้นเดียวควรอ่านเป็นคำเชื่อเชียว ไม่ใช่บทสรุป

ตัวอย่าง: พยานคนเดียวบรรยายคนแปลกหน้าอาจจำผิดได้ พยานสี่คนที่ไม่เคยพบกัน บรรยายคนแปลกหน้าคนเดียวกันตรงกัน เป็นการกล่าวอ้างคนละชนิด

คำตัดสิน. ค่าคงที่อาโวกาโดที่ตั้งชื่อตามคนที่ไม่ได้คำนวณมัน และถูกยืนยันด้วยวิธีที่เป็นอิสระต่อกันของ Perrin ที่ลู่เข้าสู่ค่าเดียวกัน นั่นคือสิ่งที่ยุติข้อถกเถียงว่าอะตอมมีอยู่จริงหรือไม่

จะพลิกคำตัดสินได้เมื่อ: มีผู้แสดงได้ว่าการวัดหลายครั้งของ Perrin ใช้สมมติฐานเชิงระบบร่วมกัน ความเป็นอิสระที่รองรับข้อโต้แย้งนี้จะพังลงทันที

แหล่งอ้างอิง. 1926 · Nobel Prize in Physics, Jean Baptiste Perrin —

NobelPrize.org · 2019 · "Avogadro constant" — Wikipedia

07. อายุของโลก — ผู้ที่กำจัดการตะกั่วออกไปเช่นกัน

คำตอบที่ผิดจากผลการคำนวณที่ถูกต้อง

ทำไมบทที่ว่าด้วยอายุของโลกจึงตั้งชื่อรองตามชายผู้กำจัดการตะกั่วออกจากน้ำมันเบนซิน คำตอบซ่อนอยู่ในเรื่องที่เกิดพลาดก่อนเรื่องที่ถูกต้อง ลอร์ดเคลวินคำนวณอายุโลกในคริสต์ศตวรรษที่ 19 ด้วยแบบจำลองเดียว: โลกคือก้อนวัตถุร้อนที่เริ่มจากสภาพหลอมละลายแล้วเย็นตัวลง ฟิสิกส์ถูกต้อง เลขคำนวณรอบคอบ คำตอบออกมาที่หลายสิบถึงหนึ่งร้อยล้านปี และเขาบีบตัวเลขลงเรื่อยๆ ตลอดอาชีพจนเหลือประมาณยี่สิบล้านปี นักธรณีวิทยาต้องการเวลายาวกว่านั้นมาก ชีวิตวิทยาของดาร์วินก็ต้องการเช่นกัน และเพราะผู้พูดคือเคลวิน ความเห็นที่ขัดกันนี้จึงเป็นวิกฤตจริง ไม่ใช่เชิงอรรถ

เขาผิดเพราะกัมมันตภาพรังสียังไม่ถูกค้นพบ ไอโซโทปที่สลายตัวปล่อยความร้อนออกมา และความร้อนนั้นรักษาอุณหภูมิภายในโลกไว้ได้นานกว่าที่แบบจำลองเย็นตัวอย่างง่ายจะยอมให้เป็นไปได้มาก อาร์เธอร์ โฮล์มส์ นำการสลายตัวของยูเรเนียม-ตะกั่วมาวัดหินตั้งแต่ปี 1911 และตีพิมพ์ "The Age of the Earth" ในปี 1913 ค้นตัวเลขขึ้นไปถึงระดับพันล้านปีท่ามกลางแรงต้าน บทเรียนจากเคลวินคือ คำนวณอย่างเข้มงวดจากฟิสิกส์ที่ยังรู้ไม่ครบ ได้คำตอบที่ผิดแต่มั่นใจ และคำตอบแบบนั้นอันตรายกว่าการยอมรับตรงๆ ว่ายังไม่รู้

อุกกาบาต และสิ่งที่การวัดต้องแลกมา

แคลร์ แพตเตอร์สัน ปิดคำถามนี้ในปี 1956 เขาหาอายุอุกกาบาต Canyon Diablo ด้วยอัตราส่วนไอโซโทปตะกั่ว บนเหตุผลว่าอุกกาบาตกับโลกก่อตัวขึ้นพร้อมกัน ตัวเลขที่รายงานคือ 4.55 ± 0.07 พันล้านปี ค่าที่ยอมรับกันในปัจจุบันอยู่ที่ประมาณ 4.54 พันล้านปี และแทบไม่ขยับเลยนับจากวันนั้น กว่าจะได้ตัวเลขนี้ต้องมีห้องปฏิบัติการที่สะอาดพอจะเอาชนะการปนเปื้อนของตะกั่ว เพราะอากาศ ฝุ่น เครื่องแก้ว และสารเคมีธรรมดามีตะกั่วมากกว่าตัวอย่างของเขาหลายเท่า

การสร้างห้องสะอาดนั้นบังคับให้แพดเตอร์สันต้องวัดว่าสภาพแวดล้อมทั่วไปมีตะกั่วอยู่เท่าไร นี่คือจุดที่การวัดอายุโลกกลายเป็นเรื่องอื่นไปโดยไม่ตั้งใจ คำตอบคือตะกั่วจากอุตสาหกรรม เกือบทั้งหมดมาจากสารเติมแต่งในน้ำมันเชื้อเพลิง ได้ดันระดับพื้นหลังขึ้นสูงกว่าระดับธรรมชาติมาก เขาใช้เวลาที่เหลือในอาชีพพรรณรงค์ต่อต้านมัน โดยมีอุตสาหกรรมที่ให้ทุนงานวิจัยส่วนใหญ่ในสาขานี้เป็นฝ่ายตรงข้าม หลังสหรัฐอเมริกาเลิกใช้น้ำมันเบนซินผสมสารตะกั่ว CDC บันทึกได้ว่าค่าเฉลี่ยตะกั่วในเลือดของประชากรลดลงต่อเนื่องในการสำรวจระดับชาติครั้งแล้วครั้งเล่า

เมื่อการปนเปื้อนคือการค้นพบ

ปัญหาการปนเปื้อนของแพดเตอร์สันไม่ใช่อุปสรรคของการวัด มันคือการค้นพบครั้งที่สองที่ซ่อนอยู่ในการวัดนั่นเอง การทดลองที่ไวพอจะหาอายุดาวเคราะห์ กลายเป็นไวพอจะตรวจจับการวางยาพิษขั้นบรรยากาศด้วยตะกั่วจากอุตสาหกรรม และมันเกิดขึ้นได้เพราะเหตุผลเดียว: เขาไม่ยอมรับค่าพื้นหลังที่ผิดปกติว่าเป็นแค่สัญญาณรบกวน มองสิ่งที่กำลังทำลายการวัดของคุณเป็นข้อมูล ไม่ใช่ความรำคาญ นิสัยข้อนี้มีประวัติความสำเร็จสูงเกินกว่าจะเป็นเรื่องบังเอิญ ชายคนที่ปกป้องตัวเลขของตัวเองจากตะกั่วในห้องทดลอง จบลงด้วยการเอาตะกั่วออกจากน้ำมันของทั้งโลก

ตัวอย่าง: ไมโครโฟนที่จับเสียงฮัมได้ จะเปลี่ยนตัวใหม่ก็ได้ หรือจะตามหาที่มาของเสียงฮัมก็ได้ และบางครั้งเสียงฮัมนั่นเองคือเรื่องที่ต้องเล่า

คำตัดสิน. โลกมีอายุประมาณ 4.54 พันล้านปี แพดเตอร์สันเป็นผู้กำหนดค่านี้ในปี 1956 และการไล่ตามการปนเปื้อนที่คุกคามการวัดของเขายังให้ผลพลอยได้อีกอย่าง: คติความต่อต้านน้ำมันเบนซินผสมสารตะกั่ว

จะพลิกคำตัดสินได้เมื่อ: มีการพิสูจน์ว่าการหาอายุถูกกาบาศด้วยไอโซโทปตะกั่วตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ผิด คือถูกกาบาศไม่ได้ก่อตัวพร้อมกับโลก

แหล่งอ้างอิง. 1956 · Clair C. Patterson, "Age of Meteorites and the Earth," *Geochimica et Cosmochimica Acta* 10:230 — **ADS** · **1994** · CDC, "Blood Lead Levels — United States, 1988–1991," *MMWR* — **CDC**

08. บันไดระยะทาง — ชั้นของ Leavitt และรอยร้าว ในนั้น

สตรีผู้ทำให้ท้องฟ้ากลายเป็นสิ่งที่วัดได้

ไม้บรรทัดแม่นยำสองอันวัดได้ะตัวเดียวกันแล้วได้ค่าไม่เท่ากัน แปลว่าอันใดอันหนึ่งไม่ได้วัดสิ่งที่เจ้าของคิดว่ามันวัดอยู่ นั่นคือสภาพที่ดาราศาสตร์เจออยู่ทุกวันนี้กับปริมาณที่วัดยากที่สุดในสาขานี้ คือระยะทาง เพราะความสว่างอย่างเดียวบอกไม่ได้ว่าดาวดวงหนึ่งสลัวเพราะอยู่ไกล หรือสว่างจ้าเพราะอยู่ใกล้ ทุกอย่างเริ่มจาก Henrietta Swan Leavitt ที่ทำงานอยู่ที่ Harvard College Observatory มีหน้าที่ตรวจแผ่นภาพถ่าย เธอศึกษาดาวแปรแสงในเมฆแมกเจลแลนเล็ก

งานที่ตีพิมพ์ปี 1908 และขยายผลในปี 1912 พบว่าดาวแปรแสงชนิดเซเฟอิดยิ่งสว่างรอบสว่าง-สลัวของมันยิ่งกินเวลานาน ดาวทุกดวงในเมฆนั้นอยู่ห่างจากเราเกือบเท่ากัน ความสัมพันธ์ระหว่างคาบกับความสว่างปรากฏจึงต้องเป็นความสัมพันธ์ระหว่างคาบกับความสว่างจริงด้วย ดาวเซเฟอิดจึงกลายเป็นเทียนมาตรฐาน จับเวลาคาบ รู้กำลังส่องสว่างจริง เทียบกับความสว่างที่เห็น แล้วระยะทางก็ออกมา บทความปี 1912 ลงชื่อ Edward Pickering พร้อมหมายเหตุว่าจัดทำโดย Miss Leavitt หอดูดาวสมัยนั้นให้เครดิตสตรีแบบนี้

รอยร้าวที่ยังไม่ถูกปิด

ชั้นบันไดของ Leavitt แบกทุกชั้นที่อยู่เหนือมัน รวมทั้งการวัดว่าเอกภพขยายตัวเร็วแค่ไหน โครงการ SHOES ที่ Adam Riess เป็นหัวหน้า ปรับเทียบดาวเซเฟอิดแล้วใช้มันไต่ไปถึงซูเปอร์โนวา รายงานค่าคงที่ฮับเบิลที่ 73.04 ± 1.04 กิโลเมตรต่อวินาทีต่อเมกะพาร์เซก โครงการความร่วมมือ Planck อนุมานปริมาณเดียวกันจากรังสีไมโครเวฟพื้นหลังของจักรวาล ได้ 67.4 ± 0.5 ในหน่วยเดียวกัน สองค่านี้ไม่ซ้อนทับกัน ระยะห่างอยู่ที่ราวห้าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน มากเกินกว่าจะเป็นเรื่องบังเอิญ และยังไม่มีคำอธิบายใดลุ่มมันได้ ทางออกที่เห็นชัดที่สุดคือดาวแอ็ดในบริเวณนั้นรบกวนการวัดความสว่างของดาวเซเฟอิด ข้อเสนอพื้นฐานนี้ถูกทดสอบด้วย JWST ในปี 2024

และตกไปด้วยความเชื่อมั่นระดับสูง ความขัดแย้งยังเปิดอยู่ มันเป็นไปได้สองอย่าง ความผิดพลาดเชิงระบบที่ยังไม่มีใครเจอ หรือช่องว่างในแบบจำลองมาตรฐานทางจักรวาลวิทยา

เหตุใดตัวเลขที่ยังหาข้อสรุปไม่ได้จึงเป็นสิ่งที่ควรเก็บไว้

ความคลาดเคลื่อนที่ทนอยู่ได้นานขนาดนี้ให้ข้อมูลมากกว่าความเห็นที่ตรงกัน มันเป็นสิ่งเดียวในสาขาที่รับประกันได้ว่ากำลังสอนอะไรบางอย่างให้ใครสักคน มันยังพิสูจน์ว่าอุปมาเรื่องบันไดเป็นความหมายตรงตัว ความผิดพลาดในชั้นล่างลามขึ้นข้างบน ข้อพิพาทนี้จึงอาจเป็นเรื่องดาวของ Leavitt มากกว่าเรื่องจักรวาลวิทยา รายการที่ชื่อตรงสำหรับค่าคงที่ฮับเบิลจึงไม่ใช่ตัวเลขเดียว มันคือตัวเลขสองค่ากับข้อพิพาทหนึ่งเรื่อง และไม่มีกล่องข้อมูลใดที่มีที่พอจะพิมพ์ทั้งหมดนั้น ห้าชิกมาไม่ใช่เรื่องน่าอาย มันคือขอบเขตที่ยังมีชีวิตของวิชานี้ และตัวเลขที่ยังไม่ลงตัวควรถูกเก็บไว้แบบนั้น ไม่ใช่ถูกบีบให้จบ

ตัวอย่าง: ไม่บรรทัดแม่นยำสองอันวัดโตะตัวเดียวกันแล้วได้ค่าไม่เท่ากัน แปลว่าอันใดอันหนึ่งไม่ได้วัดสิ่งที่เจ้าของคิดว่ามันวัดอยู่

คำตัดสิน. ความสัมพันธ์คาบ-ความสว่างของ Leavitt ทำให้ระยะทางในอวกาศวัดได้ และบันไดที่ต่อขึ้นจากมันตอนนี้ให้อัตราการขยายตัวที่ขัดกับค่าจากยุคเอกภพยุคแรก ที่ระดับราวห้าชิกมา

จะพลิกคำตัดสินได้เมื่อ: พบความผิดพลาดเชิงระบบในการปรับเทียบขั้นบันไดระยะทาง หรือในการอนุมานจาก CMB แล้วค่าทั้งสองค่ากลับมาสอดคล้องกัน

แหล่งอ้างอิง. 2022 · Riess et al., "A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant..." — [arXiv:2112.04510](#) · **2024** · "JWST Observations Reject Unrecognized Crowding of Cepheid Photometry as an Explanation for the Hubble Tension at 8σ Confidence" — [arXiv:2401.04773](#)

09. อุณหภูมิของท้องฟ้า — สัญญานรบกวนที่ยังคงอยู่

เสาอากาศที่ส่งเสียงซ่าในทุกทิศทาง

เสียงกึกกักในรถที่รูดมาจากข้างสี่คนไม่ใช่เสียงกึกกักอีกต่อไป มันคือการค้นพบ และในปี 1964 Arno Penzias กับ Robert Wilson ที่ Bell Labs ในเมือง Holmdel รัฐ New Jersey เจอเสียงแบบนั้นเข้ากับเสาอากาศแบบฮอร์นที่พวกเขา กำลังเตรียมไว้ใช้ในงานดาราศาสตร์วิทยุ เสียงซ่าพื้นหลังติดอยู่ตลอด กำจัดไม่ได้ และอธิบายไม่ได้ พวกเขาตรวจระบบอิเล็กทรอนิกส์ ตัดเมือง New York ออก ตัดชั้นบรรยากาศออก และตัดผลตกค้างจากการทดสอบนิวเคลียร์ที่ระดับความสูงสูงเมื่อไม่นานก่อนหน้านั้น ออก นักพิราบคู่หนึ่งทำรังอยู่ในฮอร์นด้วยซ้ำ พวกเขาจึงเอานกออกและล้างมูลนกที่สะสมอยู่ทิ้ง แต่เสียงรบกวนยังเท่าเดิม

สัญญาณแรงเท่ากันทุกทิศทาง ทุกชั่วโมง และทุกฤดูกาล ไม่มีแหล่งกำเนิดในระดับท้องถื่นหรือระดับกาแล็กซีใดให้ผลแบบนั้นได้ บทความของพวกเขาในปี 1965 รายงานเรื่องนี้ไว้ตรงๆ ว่า "A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s" ชื่อเรื่องที่ไม่กล่าวอ้างอะไรเลย

บทความที่ตีพิมพ์เคียงคู่กัน

ห่างออกไป 30 ไมล์ที่มหาวิทยาลัย Princeton กลุ่มวิจัยของ Robert Dicke ให้เหตุผลไว้แล้วว่าเอกภพยุคเริ่มต้นที่ร้อนควรทิ้งรังสีที่เย็นตัวลงหลงเหลือไว้เต็มทั่วอวกาศ และกำลังสร้างเครื่องมือเพื่อค้นหามัน เมื่อสองกลุ่มได้ติดต่อกัน การตีความก็ตามมาทันที และวารสาร Astrophysical Journal ตีพิมพ์บทความทฤษฎีของกลุ่ม Dicke เคียงคู่กับผลวัดของ Penzias และ Wilson การแบ่งงานครั้งนี้ขาดจากกันชัดเจนปกติ ทีมหนึ่งมีคำทำนายแต่ไม่มีข้อมูล อีกทีมมีข้อมูลแต่ไม่รู้ว่ามันคืออะไร Penzias และ Wilson ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ร่วมกันในปี 1978 จากการตรวจพบครั้งนี้ นับแต่นั้นอุณหภูมิถูกวัดซ้ำด้วยความแม่นยำสูงมากโดยเครื่องมือ FIRAS บนดาวเทียม COBE ได้

ค่า 2.72548 ± 0.00057 kelvin สเปกตรัมนี้ใกล้วัตถุดำสมบูรณ์แบบที่สุทธที่สุดเท่าที่เคยสังเกตมา ทั้งในห้องปฏิบัติการและนอกห้องปฏิบัติการ

ประโยชน์ของนกพิราบ

เรื่องนี้ถูกเล่าเพราะนก แต่นกคือส่วนที่น่าสนใจน้อยที่สุดของมัน ประเด็นอยู่ที่การตัดออก Penzias และ Wilson พบสัญญาณที่สำคัญที่สุดในจักรวาลวิทยาแห่งศตวรรษที่ 20 ด้วยการตัดคำอธิบายทุกข้อที่ निकออกทิ้งไปทีละข้ออย่างเป็นระบบ และไม่ยอมหยุดเมื่อเสียงรบกวนยังอยู่ นกพิราบเป็นแค่คำอธิบายข้อหนึ่งในหลายข้อที่พวกเขาตัดทิ้ง ความผิดพลาดที่รอดจากความพยายามเต็มที่ในการฆ่ามันได้ สมควรถูกเอาจริง นี่คือการเดียวกับที่ Patterson ใช้กับตะกั่วของเขา จากมูลนกในเสาอากาศฮอร์นหนึ่งต้นมาถึง 2.72548 ± 0.00057 K ซึ่งเป็นหนึ่งในปริมาณที่วัดได้แม่นยำที่สุดในดาราศาสตร์ทุกวันนี้

ตัวอย่าง: เสียงกึกกักในรถที่รอดมาจากช่างสีคน ไม่ใช่เสียงกึกกักอีกต่อไป มันคือการค้นพบ

คำตัดสิน. รังสีไมโครเวฟพื้นหลังของจักรวาลถูกค้นพบในฐานะเสียงรบกวนที่อธิบายไม่ได้ โดยผู้สังเกตที่ไม่รู้ว่าตัวเองพบอะไร และวันนี้อุณหภูมิของมันเป็นหนึ่งในปริมาณที่วัดได้แม่นยำที่สุดในดาราศาสตร์ ที่ 2.72548 ± 0.00057 K

จะพลิกคำตัดสินได้เมื่อ: สเปกตรัม FIRAS เบี่ยงจากวัตถุดำในระดับที่วัดได้ และการเบี่ยงนั้นต้องการแหล่งกำเนิดอื่นนอกเหนือจากเอกภพยุคเริ่มต้นที่ร้อน

แหล่งอ้างอิง. 1965 · A. A. Penzias & R. W. Wilson, "A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s," *Astrophysical Journal* 142:419 —

reference record · 1996 · "Measurement of the cosmic microwave background spectrum by the COBE FIRAS instrument" — **NASA NTRS**

10. ความยาวของหนึ่งวินาที — ตัวเลขที่เรารู้จักกันดีที่สุด

หน่วยที่ได้มาจากท้องฟ้า

นาฬิกาในห้องปฏิบัติการทุกวันนี้แม่นยำกว่านิยามที่มันกำลังรักษาไว้ถึงหนึ่งหมื่นเท่า และเรื่องนี้เริ่มต้นจากจุดที่ต่ำต้อยที่สุด วินาทีเคยเป็นเศษส่วนของวันมาเกือบตลอดประวัติศาสตร์ และวันก็ยาวเท่าที่โลกหมุนรอบตัวเองหนึ่งรอบ แต่โลกหมุนไม่สม่ำเสมอ น้ำขึ้นน้ำลงหน่วงมันไว้ บรรยากาศกับมหาสมุทรย้ายมวลไปมา แผ่นดินไหวก็เคลื่อนมวลใหม่เล็กน้อย ถึงกลางศตวรรษที่ยี่สิบ นาฬิกาแม่นยำกว่าดาวเคราะห์ที่ใช้ตั้ง นาฬิกาเสียแล้ว นิยามทางดาราศาสตร์จึงกลายเป็นตัวจำกัดความคลาดเคลื่อนเสียเอง

ปี 1967 ที่ประชุมใหญ่ว่าด้วยการชั่งตวงวัดครั้งที่ 13 ตัดสายสัมพันธ์นั้นทิ้ง และนิยามหนึ่งวินาทีให้เท่ากับ 9,192,631,770 คาบของรังสีจากการเปลี่ยนสถานะเฉพาะหนึ่งในซีเซียม-133 พอดี ตัวเลขไม่กลม เพราะเลือกมาให้วินาทีใหม่ยาวเท่าวินาทีเก่า ชีวิตประจำวันจะได้ไม่ต้องขยับอะไรเลย อะตอมซีเซียม-133 ทุกอะตอมเหมือนกันหมด มาตรฐานนี้จึงสร้างซ้ำได้ในห้องปฏิบัติการไหนก็ได้ ไม่ต้องเก็บไว้ในห้องนิรภัย

ดีกว่าคำจำกัดความถึงหนึ่งหมื่นเท่า

ในห้องปฏิบัติการ นาฬิกาเชิงแสงแขงหน้านาฬิกาซีเซียมไปแล้ว มันนับการแกว่งที่เร็วกว่ามาก จึงชอยเวลาได้ละเอียดกว่ามาก นาฬิกาแบบตาข่ายแสงสตรอนเชียมที่รายงานในปี 2024 มีความไม่แน่นอนเชิงระบบราว 8×10^{-19} ส่วนงานที่เสริมด้วยการพั่วพันเชิงควอนตัมซึ่งรายงานในปี 2025 ดันความแม่นยำเชิงเศษส่วนไปถึงราว 1.1×10^{-18} ที่ระดับนั้น ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปกลายเป็นเรื่องประจำวันที่น่าฬิกาอ่านออก ยกนาฬิกาขึ้นหนึ่งเซนติเมตร มันเดินเร็วขึ้นจนวัดได้ เพราะในสนามความโน้มถ่วง เวลาที่ความสูงต่างกันผ่านไปไม่เท่ากัน นาฬิกาจึงกลายเป็นเครื่องมือของวิชาการวัดสัญญาณโลก วัดความต่างของความสูงด้วยการจับเวลาแทนการรังวัด

และหมายความว่าตอนนี้เรารู้ค่าวินาทีแม่นยำกว่านิยามที่กำหนดมันไว้ เมตรก็เคยตกอยู่ในสภาพเดียวกันก่อนปี 1983 นักมาตรวิทยากำลังเดินหน้านิยามวินาทีใหม่บนการเปลี่ยนสถานะเชิงแสง ส่วนกำหนดเวลาเป็นเรื่องของคณะกรรมการระหว่างประเทศ ยังไม่ใช่ข้อเท็จจริงที่ปิดแล้ว

ปริมาณที่ทุกสิ่งทุกอย่างต้องอิงอาศัย

เวลาเป็นปริมาณที่วัดได้แม่นยำที่สุดในบรรดาทุกสิ่ง ทั้งห่างอันดับสองหลายอันดับความใหญ่ เมตรนิยามผ่านวินาทีกับความถี่แสงที่ตรึงค่าไว้ กิโลกรัมตั้งแต่ปี 2019 ก็นิยามผ่านวินาทีกับค่าคงที่พลังค์ที่ตรึงค่าไว้ ระบบการวัดจัดตัวเองใหม่รอบสิ่งที่มีมนับได้นำเชื่อถือที่สุดเสมอ และตลอดหกสิบปีที่ผ่านมา สิ่งนั้นคือจังหวะเต้นของอะตอม เวลาจึงไม่ใช่แค่หน่วยหนึ่งในหลายหน่วยอีกต่อไป มันคือสมอที่หน่วยวัดอื่นทั้งหมดผูกตัวเองไว้

ตัวอย่าง: โรงช่างวางเครื่องมือทุกชิ้นเทียบกับขอบที่ตรงที่สุดในโรง และขอบที่ตรงที่สุดที่เรามีคืออะตอมซีเซียม

คำตัดสิน. วินาทีถูกนิยามมาตั้งแต่ปี 1967 ว่าเท่ากับ 9,192,631,770 คาบของซีเซียม-133 นาฬิกาในห้องปฏิบัติการวันนี้แม่นยำกว่านิยามนั้นหลายอันดับความใหญ่ เวลาจึงเป็นสมอที่หน่วยวัดอื่น ๆ ยึดอยู่

จะพลิกคำตัดสินได้เมื่อ: นาฬิกาเชิงแสงที่เทียบกันข้ามห้องปฏิบัติการให้ค่าต่างกันเกินความไม่แน่นอนที่แต่ละแห่งระบุไว้ นั่นแปลว่าความแม่นยำที่อ้างยังไม่เป็นจริง

แหล่งอ้างอิง. 2024 · "A clock with 8×10^{-19} systematic uncertainty" —

[arXiv:2403.10664](#) · **2025** · Optica, "Unprecedented optical clock network lays groundwork for redefining the second" — [Optica](#)

11. วัตถุดันแบบขึ้นสุดท้าย – วันที่กิโลกรัมเล็กเป็นวัตถุ

ก่อนโลหะในห้องนิรภัยนอกกรุงปารีส

วันที่ 20 พฤษภาคม 2019 ไม่มีหน่วยฐานใดของระบบ SI ขึ้นกับวัตถุทางกายภาพอีกต่อไปเลยสักหน่วยเดียว นับเป็นครั้งแรกในประวัติศาสตร์ของระบบการวัด และกิโลกรัมคือหน่วยสุดท้ายที่หลุดพ้น จนถึงวันนั้นกิโลกรัมคือแท่งทรงกระบอกแพลทินัม-อิริเดียมหนึ่งแท่ง เก็บไว้ที่สำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ ณ เมืองแซฟวร์ มันคือกิโลกรัมโดยนิยาม แท่งนี้หนักเท่าใด หนึ่งกิโลกรัมก็เท่านั้น รอยขีดข่วนหนึ่งรอยจึงไม่ใช่ความเสียหาย แต่คือการนิยามหน่วยใหม่

สำเนาอย่างเป็นทางการถูกส่งไปยังประเทศสมาชิก และถูกนำกลับมาเทียบกับต้นแบบเป็นระยะ ปัญหาถูกพบด้วยวิธีนี้เอง ตลอดศตวรรษที่ยี่สิบ สำเนาและต้นแบบเคลื่อนห่างจากกันหลายสิบไมโครกรัม ความต่างนับพันทีไว้ในรายงาน Metrologia ปี 2015 ว่าด้วยแคมเปญสอบเทียบ ไม่มีใครบอกได้ว่าขึ้นไหนเปลี่ยน เพราะไม่มีสิ่งอ้างอิงนอกตระกูลเดียวกันให้หันไปพึ่ง หน่วยที่นิยามด้วยวัตถุคือหน่วยที่ทำตกได้ และเป็นมาตรฐานชนิดสุดท้ายที่ระบบใดก็ไม่ควรอยากมี

การกำหนดค่าคงที่แทนการเก็บรักษาสิ่งของ

วันเดียวกันนั้น ระบบ SI ฉบับปรับปรุงมีผลบังคับใช้ กิโลกรัมถูกนิยามใหม่ด้วยการตรึงค่าคงที่ของพลังค์ไว้ที่ $6.62607015 \times 10^{-34}$ จูลวินาทีพอดี แอมแปร์ เคลวิน และโมลถูกนิยามใหม่ในการปรับปรุงครั้งเดียวกัน โดยตรึงประจุไฟฟ้ามูลฐาน ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ และค่าคงที่ของอาวอกาโดรตามลำดับ นับจากวันนั้น หน่วยฐานทุกหน่วยในระบบ SI นิยามด้วยค่าคงที่ของธรรมชาติหรือคุณสมบัติของอะตอม ไม่มีวัตถุต้นแบบขึ้นใดในโลกเป็นมาตรฐานของสิ่งใดอีก ในทางปฏิบัติ กิโลกรัมทุกวันนี้สร้างขึ้นด้วยตาชั่ง Kibble ซึ่งมวลเทียบกับแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่วัดออกมาเป็นค่าคงที่ของพลังค์ได้ หรือไม่ก็นับอะตอมในทรงกลมซิลิโคนบริสุทธิ์ ต้นแบบที่แซฟวร์ยังอยู่ และยังคงวัดอยู่ แต่มันไม่มีอำนาจอีกแล้ว มวลของมันตอนนี้เป็นปริมาณที่มีความไม่แน่นอน

ติดตามด้วย เหมือนสิ่งอื่นทุกสิ่ง การเปลี่ยนผ่านถูกออกแบบให้ไม่มีกิโลกรัมใดเปลี่ยนค่าในวันนั้น นี่คือเหตุผลที่ดูเหมือนไม่มีอะไรเกิดขึ้น

วัตถุประสงค์ของบทต่างๆ เหล่านี้

อ่านรวมกันแล้ว การวัดทั้งหมดในหนังสือเล่มนี้เล่าความเคลื่อนไหวเดียว จากวัตถุไปสู่การสำรวจ ไปสู่ค่าคงที่ ขนาดของโลกมาจากเงา เมตรมาจากการสำรวจที่ซ่อนข้อผิดพลาดไว้ วินาทีมาจากอะตอม และท้ายที่สุดกิโลกรัมมาจากตัวเลขที่ขีดข่วนไม่ได้ และทำลายไม่ได้ แต่ละก้าวคือการพึ่งพาสิ่งที่เปลี่ยนไปเรื่อยๆ ได้ขณะไม่มีใครมอง นั่นคือนิยามเดียวที่แท้จริงของความก้าวหน้าในมาตรวิทยา สูตรอาหารที่บอกว่า "หนึ่งถ้วย" ขึ้นกับถ้วยของคุณ สูตรที่บอกว่า 240 มิลลิลิตร ไม่สนว่าอยู่ในถ้วยของใคร และนั่นคือที่หนังสือเล่มนี้ทั้งเล่มเดินทางมาถึง

ตัวอย่าง: สูตรอาหารที่บอกว่า "หนึ่งถ้วย" ขึ้นกับถ้วยของคุณ สูตรที่บอกว่า 240 มิลลิลิตร ไม่สนว่าอยู่ในถ้วยของใคร

คำตัดสิน. ตั้งแต่วันที่ 20 พฤษภาคม 2019 ไม่มีหน่วยฐาน SI ใดขึ้นกับวัตถุทางกายภาพ กิโลกรัมถูกนิยามใหม่ด้วยการตรึงค่าคงที่ของพลังค์ไว้ที่ $6.62607015 \times 10^{-34}$ J·s พอดี

จะพลิกคำตัดสินได้เมื่อ: การสร้างกิโลกรัมด้วยตาชั่ง Kibble และด้วยทรงกลมซิลิโคนที่ทำแยกกันอย่างอิสระ ให้ผลต่างกันเกินค่าความไม่แน่นอนที่แต่ละฝ่ายระบุไว้

แหล่งอ้างอิง. 2015 · "Calibration campaign against the international prototype of the kilogram," Metrologia 52(2):310 — [IOPscience](#) · **2019** · "2019 revision of the SI" — [Wikipedia](#)

12. การอ่านกล่องข้อมูล — ขั้นตอนการดำเนินงาน

หนังสือเล่มนี้ให้คะแนนจุดอ่อนของตัวเองก่อนที่คุณจะทำ

สิบเอ็ดบทที่ผ่านมาวัดคนอื่น บทสุดท้ายนี้วัดตัวมันเอง และทำก่อนที่ผู้อ่านจะต้องทำแทน นั่นคือสิ่งที่บทนี้เป็น ไม่ใช่บทสรุป แต่เป็นขั้นตอนห้าข้อที่ใช้ซ้ำได้กับตัวเลขไหนก็ได้ ข้อแรก ถามว่าวัดอะไรจริง ๆ ปริมาณในพาดหัวบ่อยครั้งไม่ใช่ปริมาณในการทดลอง Cavendish วัดความหนาแน่น แต่ได้เครดิตว่าวัดค่าคงที่ ข้อสอง ถามว่าหน่วยอะไร และหน่วยนั้นนิ่งอยู่หรือไม่ในเวลานั้น ความแม่นยำของ Eratosthenes รู้ไม่ได้ เพราะไม่มีใครรู้ว่าสาดิออนยาวเท่าไร ข้อสาม ถามว่าความไม่แน่นอนเท่าไร ตัวเลขที่ถูกอ้างโดยไม่บอกค่านี้ ให้ถือว่าผู้เขียนไม่ยอมให้ถาม ค่า G มีความไม่แน่นอน 22 ส่วนในล้านส่วน ค่าหนึ่งวินาทีที่มีความไม่แน่นอนระดับส่วนใน 10^{18} ข้อสี่ ถามว่าวิธีที่เป็นอิสระต่อกันให้ผลตรงกันหรือไม่ ผลที่ลู่เข้าหากันจากเทคนิคที่ไม่เกี่ยวข้องกันมีค่ามากกว่าความแม่นยำภายในเทคนิคเดียว งานของ Perrin พิสูจน์ข้อนี้ไว้ ข้อห้า ถามว่าอะไรจะเปลี่ยนคำตอบได้ ตัวเลขที่ไม่มีอะไรล้มได้ไม่ใช่การวัด มันคือจุดยืน ตัวเลขที่ผ่านคำถามห้าข้อนี้ได้จึงค่อยเก็บไว้ใช้ และตัวเลขส่วนใหญ่ที่เผยแพร่กันอยู่ตกที่ข้อสาม

จุดอ่อนของหนังสือเล่มนี้

บทต่าง ๆ ในเล่มนี้พึ่งแหล่งทุติยภูมิและตติยภูมิมากกว่าที่ควร หลายบทสืบตัวเลขย้อนไปได้แค่การเล่าต่อไม่ถึงงานวิจัยต้นฉบับ ข้อเท็จจริงสองข้อถูกตัดทิ้งระหว่างร่าง เพราะแหล่งข้อมูลให้ตัวเลขต่างกันถึงหนึ่งอันดับความใหญ่ ไม่ใช่ดีกว่าใส่ การคัดเลือกยังเอียงตามภูมิศาสตร์ด้วย เกือบทั้งหมดเป็นการวัดของยุโรปและอเมริกา นั้นสะท้อนว่าเครื่องมือและหोजดหมายเหตุของใครเข้าถึงง่าย ไม่ได้สะท้อนว่าใครเป็นคนวัดโลก ความขัดแย้งเรื่องค่า Hubble ในบทที่ 08 อาจคลี่คลายไปแล้วหลังจากเขียนเสร็จ บทนี้จึงจงใจระบุวันที่ไว้ให้ผู้อ่านดูออก

สิ่งที่ยังคงอยู่

ขั้นตอนนี้อยู่ได้แม้บทแต่ละบทจะเก่าไป เพราะมันเป็นวิธีอ่าน ไม่ใช่ชุดผลลัพธ์ มันยังกลับความสัมพันธ์ตามปกติที่คนมีต่อหนังสืออ้างอิงด้วย รายการข้อมูลเล็กเป็นอำนาจที่ต้องยอมรับ กลายเป็นข้อกล่าวอ้างที่ต้องซักถาม และนั่นให้เกียรติคนที่สร้างมันขึ้นมา มากกว่า คนเหล่านั้นส่วนใหญ่ทำงานด้วยอุปกรณ์ที่ไม่พอท่ามกลางสัญญาณรบกวน แต่ก็ยังได้ตัวเลขมาจนได้ นี่คือส่วนที่ควรเก็บไว้จากวัยเด็กที่หมดไปกับการอ่านสารานุกรม ทำคำถามนี้คือสิ่งที่ส่งต่อให้คุณ ตอนนี้คุณทำกับตัวเลขไหนก็ได้ ในแบบที่หนังสือเล่มนี้ทำกับตัวเลขสิบเอ็ดตัว

ตัวอย่าง: ป้ายในพิพิธภัณฑ์บอกว่าวัตถุนั้นคืออะไร บันทึกของนักอนุรักษ์บอกว่ารู้ได้อย่างไร และมีแค่อย่างเดียวในสองอย่างนี้ที่โต้แย้งได้

คำตัดสิน. ตัวเลขควรค่าแก่การเก็บไว้เมื่อบอกได้ครบว่าวัดปริมาณอะไร หน่วยอะไร ความไม่แน่นอนเท่าไร มีการยืนยันจากวิธีที่เป็นอิสระอะไรบ้าง และเงื่อนไขใดจะหักล้างมันได้ ตัวเลขส่วนใหญ่ที่ตีพิมพ์ตกตรงความไม่แน่นอน

จะพลิกคำตัดสินได้เมื่อ: นำคำถามทั้งห้าข้อไปใช้กับการวัดที่ยอมรับกันดีแล้ว แต่แยกมันออกจากการวัดที่พิสูจน์ไม่ได้ นั่นแปลว่าขั้นตอนนี้คัดกรองอะไรไม่ได้เลย

แหล่งอ้างอิง. 2022 · CODATA, "Recommended Values of the Fundamental Physical Constants" — [NIST](#) · 2019 · "2019 revision of the SI" — [Wikipedia](#)