

AMINOอมตะ ฉบับสมบูรณ์

การเดินทางข้ามห้วงเวลา ลึก เล่าโดยโมเลกุลที่ยังจดจำ

ห้องสมุด AICE · amino-the-complete-book

14 บท · ฉบับภาษาเดียว

เขียนครั้งแรก 30 สิงหาคม 2026 · ปรับปรุงล่าสุด 30 สิงหาคม 2026

ทุกตัวเลข ชื่อ และปีในเล่มนี้ตรวจย้อนไปยังแหล่งที่อ้างอิงได้

01. ทางเลือกแรก

มีบางสิ่งบนโลกที่มีชีวิตอยู่แล้วเมื่อประมาณสี่พันสองร้อยล้านปีก่อน บวกเล็กน้อย — หรือ 4.2 Gya ตามคำย่อที่หนังสือเล่มนี้จะใช้ต่อไปตลอดทั้งเล่ม โดย Gya หมายถึง กิกะอาณัม คือหนึ่งพันล้านปีก่อนปัจจุบัน — ทีมที่สืบสร้างเคมีของสิ่งมีชีวิตนี้ขึ้นใหม่ เชื่อว่ามันอยู่ในปล่องพลังงานความร้อนใต้ทะเลหรือบ่อน้ำพุร้อน คือหินแตกกร้าว น้ำที่ไหลเวียน และความร้อน ประชากรกลุ่มนี้หายใจด้วยการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์แบบเดียวกับแบคทีเรียอะซิโดเจนที่ไม่ใช้ออกซิเจน สิ่งมีชีวิตแบบนี้ยังอยู่ได้ด้วยการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นอะซิเตต ผ่านสายพานปฏิกิริยาเคมีที่เรียกว่าวู้ด-ยุงดาห์ล (Wood-Ljungdahl pathway) และโปรตีนทุกตัวที่เซลล์ของมันสร้างขึ้น ประกอบจากกรดอะมิโนที่ถนัดมือเพียงข้างเดียว ข้างเดียวเท่านั้น

ความไม่สมมาตรนี้มีชื่อเรียกว่า ความถนัดซ้ายขวา (chirality) คำที่ยืมมาจากภาษากรีกแปลว่า "มือ" วัตถุมีคุณสมบัตินี้เมื่อวางทับภาพสะท้อนในกระจกของตัวเองให้ตรงกันสนิทไม่ได้ ไม่ว่าจะหมุนไปทางใด มือซ้ายกับมือขวามีนิ้วหัวแม่มือเรียงลำดับเหมือนกันทุกประการ แต่ไม่มีการหมุนใดทำให้มือข้างหนึ่งสวมพอดีในถุงมือของอีกข้าง โมเลกุลก็ถนัดซ้ายขวาได้แบบเดียวกัน อะตอมเหมือนกัน พันธะเหมือนกัน แต่จัดเรียงเป็นสองรูปแบบที่เป็นภาพสะท้อนกระจกของกัน และบิดหมุนในปริภูมิเท่าใดก็ไม่ซ้อนทับกันสนิท นักเคมีเรียกสองรูปแบบนี้ว่า L และ D จนถึงปี 1848 ยังไม่มีใครพิสูจน์ว่าโมเลกุลคู่แฝดกระจกเช่นนี้มีอยู่จริงและแยกออกจากกันได้ทางกายภาพ ไม่ใช่เพียงกลลวงทางคณิตศาสตร์

บทพิสูจน์มาจากถังไวน์ โซเดียมแอมโมเนียมพาราทาร์ทเรตเป็นผลึกที่ได้เป็นผลพลอยได้จากการหมักไวน์ และนักเคมีในทศวรรษ 1840 รู้อยู่แล้วว่ามันมีพฤติกรรมประหลาด เมื่อละลายในน้ำ ตัวอย่างบางชุดบิดลำแสงโพลาไรซ์ที่ส่องผ่าน อีกชุดหนึ่งไม่บิดแสงเลย ทั้งที่การทดสอบทางเคมีทุกอย่างที่มีอยู่ในเวลานั้นบอกว่าเหมือนกันทุกประการ ปี 1848 ที่กรุงปารีส นักเคมีหนุ่มชื่อหลุยส์ ปาสเตอร์ (Louis Pasteur) นั่งอยู่หน้ากล้องจุลทรรศน์พร้อมคีมคีบ แล้วคัดกรองผลึกของรูปแบบที่ไม่บิดแสงที่ละผลึกเล็ก ๆ โดยดูความเอียงของหน้าผลึกที่เล็กจนตาเปล่ามองแทบไม่เห็น บางผลึกเอียงไป

ทางหนึ่ง เรียกว่าเฮมิอีตรัลด้านขวา อีกกลุ่มเอียงไปอีกทาง คือเฮมิอีตรัลด้านซ้าย ภาพสะท้อนกระจกของกัน

จากนั้นเขาละลายผลึกสองกองแยกกัน แล้วส่งสารละลายแต่ละชุดผ่านโพลาไรมิเตอร์ของฌ็อง-บาติสต์ บิโต์ (Jean-Baptiste Biot) เครื่องมือที่สร้างขึ้นเพื่อวัดว่าแสงโพลาไรซ์บิดไปไกลเท่าใดขณะเดินทางผ่านของเหลว บทความย้อนรอยการค้นพบนี้เมื่อปี 2021 บันทึกถ้อยคำของปาสเตอร์เองไว้ว่า "ข้าพเจ้าแยกผลึกเฮมิอีตรัลด้านขวาและผลึกเฮมิอีตรัลด้านซ้ายออกจากกันอย่างระมัดระวัง ข้าพเจ้าสังเกตสารละลายของแต่ละกลุ่มแยกกันในเครื่องโพลาไรซ์ของบิโต์ และข้าพเจ้าเห็นว่า...ผลึกเฮมิอีตรัลด้านขวาเบี่ยงระนาบโพลาไรซ์ไปทางขวา ส่วนผลึกเฮมิอีตรัลด้านซ้ายเบี่ยงไปทางซ้าย" ผลึกสองกองนั้นกลายเป็นสารชนิดเดียวกัน คือส่วนผสมอัตราส่วนหนึ่งต่อหนึ่งของกรดทาร์ทาริกสองรูปแบบที่เป็นภาพสะท้อนกระจกแท้จริงของกัน และมีมนุษย์แยกมันออกจากกันได้เป็นครั้งแรกในประวัติศาสตร์ ความถนัดซ้ายขวาจึงเป็นเรื่องจริง มันถูกแยก ละลาย และวัดค่าได้

สิ่งมีชีวิตเลือกไปแล้ว นานก่อนที่ปาสเตอร์จะหาทางมองเห็นมัน โปรตีนแทบทุกตัวในสิ่งมีชีวิตแทบทุกชนิดที่ยังอยู่ในปัจจุบันประกอบขึ้นจากกรดอะมิโนแบบ L คือรูปแบบถนัดซ้าย ร้อยเรียงกันด้วยกลไกของเซลล์เอง สาย DNA และ RNA แทบทุกสายกลับวางอยู่บนโครงน้ำตาลแบบ D คือดีออกซีไรโบสแบบ D ใน DNA และไรโบสแบบ D ใน RNA อันเป็นรูปแบบถนัดขวา เคมีพื้นฐานไม่ได้บ่งชี้อย่างชัดเจนว่าต้องแยกกันเช่นนี้ ทั้งสองมือเสถียรเท่ากัน และสร้างขึ้นในขวดทดลองได้ง่ายพอ ๆ กัน แต่สิ่งมีชีวิตเลือกมือข้างหนึ่งให้โปรตีนของมัน เลือกมืออีกข้างให้โครงสร้างพันธุกรรมของมัน และในระดับกลไกแกนกลางนี้ มันไม่เคยเปลี่ยนกลับเลย

รายละเอียดข้อนี้ยังเป็นคำถามที่เปิดอยู่ ไม่ใช่ปัญหาที่คลี่คลายแล้ว — การที่โมเลกุลชีวภาพสองตระกูลใหญ่ถนัดมือตรงข้ามกัน แรงภายนอกเพียงแรงเดียวที่มีกำลังมากพอจะเอียงเคมีไปทางความถนัดข้างใดข้างหนึ่ง ควรเอียงทุกอย่างไปในทิศทางเดียวกัน ไม่ใช่เอียงโปรตีนกับน้ำตาลไปคนละทาง และไม่ว่าแรงนั้นจะเป็นแสงดาวที่โพลาไรซ์แบบวงกลม พื้นผิวแร่ธาตุที่มีความถนัดซ้ายขวาซึ่งทำหน้าที่เป็นโตะคัดแยก หรือแม้แต่ความเอียงจาก ๆ ไปทางซ้ายที่ฝังอยู่ในแรงนิวเคลียร์อย่างอ่อน ข้อคาดหมายก็เหมือนกัน นักวิจัยด้านกำเนิดชีวิตที่เขียนงานล่าสุดในปี 2025 และ 2026 ยังกล่าวตรง

ไปตรงมาว่าไม่มีคำอธิบายที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่าเหตุใดสารชีวโมเลกุลขนาดใหญ่ทั้งสองกลุ่มจึงลงเอยคนละฝั่งของกระจก นี่เป็นหนึ่งในช่องว่างที่ยังไม่มีคำตอบ และมันนั่งอยู่ใจกลางเรื่องราวทั้งหมดนี้

กฎนี้เข้มงวดพอที่ข้อยกเว้นของมันควรถูกกล่าวถึงที่ละกรณี เริ่มจากแบคทีเรีย กรดอะมิโนแบบ D ที่แตกต่างกันกว่าสิบชนิด โดยหลักคือ D-อะลานีนและ D-กลูตามेट ถูกสร้างเข้าไปตรง ๆ ในโครงตาข่ายอันแข็งแกร่งของผนังเซลล์แบคทีเรีย คือเพปทิโดไกลแคน ลำดับที่พบบ่อยคือ L-อะลานีน, D-กลูตามีน, L-ไลซีน (หรือโมเลกุลที่เกี่ยวข้องกันชื่อว่า meso-diaminopimelate), D-อะลานีน, D-อะลานีน เอสเชอริเชีย โคลิ (*Escherichia coli*) และสแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส (*Staphylococcus aureus*) ทำเช่นนี้ในปัจจุบัน และแบคทีเรียที่มีผนังเซลล์แทบทุกชนิดที่ยังมีชีวิตอยู่ก็ทำ ส่วนอาร์เคียเซลล์พืช และเซลล์เชื้อราที่สร้างผนังของตัวเอง ไม่ทำ อ่านได้อ่านได้ว่าเป็นสิ่งประติมากรรมของแบคทีเรีย ต่อเติมทับความถนัดมือที่ตกลงกันไว้เรียบร้อยแล้ว ไม่ใช่เศษซากที่หลงเหลือมาจากยุคก่อนที่ความถนัดมือจะถูกกำหนด

ข้อยกเว้นที่แปลกยิ่งกว่านั้นเป็นของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมชนิดหนึ่ง พืชของต้นปากเปิดมีเอนไซม์เฉพาะทางขนาดประมาณ 50 ถึง 60 กิโลดาลตัน หน้าที่เดียวของมันคือจับกรดอะมิโนบางตำแหน่งภายในเพปไทด์คล้ายดีเพนซินและเพปไทด์ขับโซเดียมในพืช แล้วพลิกกลับให้เป็นรูปแบบถนัดขวา โปรตีนเหล่านั้นถูกประกอบขึ้นตามแบบถนัดซ้ายปกติมาก่อน และเอนไซม์อาศัยการจดจำลำดับสัญลักษณ์สั้น ๆ ที่ปลายด้านหนึ่งของสายโซ่ รายงานเมื่อปี 2006 ระบุว่านี่คือไอโซเมอเรสตัวแรกที่เคยถูกบันทึกไว้ในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมชนิดใดก็ตาม ไอโซเมอเรสคือเอนไซม์ที่เปลี่ยนโมเลกุลให้กลายเป็นคู่แฝดภาพสะท้อนกระจกของตัวเอง กลวิธีแบบเดียวกันเป๊ะ คือสร้างแบบถนัดซ้ายก่อนแล้วค่อยพลิกกลับ วิวัฒนาการขึ้นมาอีกครั้งอย่างเป็นอิสระในพืชของหอยเต้าปูนและในสัตว์ทะเลหลังจากผิวหนังบก รวมเป็นสามสายวิวัฒนาการที่แยกจากกันคือหอย สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมออกไข่ ทั้งสามมาบรรจบที่ทางออกแบบเดียวกันในภายหลัง นานหลังจากความถนัดมือดั้งเดิมถูกกำหนดไว้แล้ว

ข้อยกเว้นเหล่านี้ยิ่งทำให้เคมีมาตรฐานโดดเด่นขึ้น ไม่ใช่ถ้อยแถลง เพราะมันหายากขนาดนี้ เกิดขึ้นซ้ำขนาดนี้ และเห็นได้ชัดว่าถูกต่อเติมเข้ากับเคมีมาตรฐานในภายหลัง พิสิกส์ของกรดอะมิโนหรือน้ำตาลไม่ได้บังคับให้เลือกมือซ้ายเหนือมือขวา เหยี่ยูไม่มี

เหตุผลใดที่จะชอบด้านหัวมากกว่าด้านก้อย ทว่าสิ่งมีชีวิตแทบทั้งหมด ตลอดหลายพันล้านปีและทุกกิ่งก้านที่มันเคยแตกแขนงออกไป ลงเอยที่ด้านเดียวกันซ้ำแล้วซ้ำเล่า การเลือกโดยพลการที่ใช้ร่วมกันเช่นนี้ และถูกรักษาไว้อย่างซื่อสัตย์ตลอดเวลาอันยาวนานและการแตกแขนงอันมากมายเพียงนี้ คือลายเซ็นชนิดที่ความคล้ายคลึงทางเครือญาติทิ้งไว้ให้เห็นพอดี มันเป็นเบาะแสว่าประชากรบรรพบุรุษกลุ่มเดียวส่งต่อการเลือกนี้ลงมา ไม่ใช่แต่ละสายพันธุ์ต่างโยนเหรียญเดียวกันแยกกันเองแล้วบังเอิญออกตรงกันครั้งแล้วครั้งเล่า

บรรพบุรุษหนึ่งเดียว หรือหลายกลุ่มที่ถูกผลักไปทางเดียวกัน

การเลือกร่วมกันเพียงอย่างเดียวไม่ใช่บทพิสูจน์ว่ามีต้นกำเนิดร่วมกัน บทปริทัศน์ปี 2025 ใน PNAS วางข้อโต้แย้งที่ตรงไปตรงมาไว้ว่า อคติทางความถนัดซ้ายขวาจากภายนอกในหลักการแล้วอาจกระทำต่อเหตุการณ์กำเนิดชีวิตที่เป็นอิสระต่อกันมากกว่าหนึ่งครั้ง และเอียงทุกเหตุการณ์ไปทางมือข้างเดียวกัน อคตินั้นอาจเป็นแสงดาวโพลาริสแบบวงกลมชนิดเดียวกัน แรงนิวเคลียร์อย่างอ่อนที่ละเมิดความสมมาตรแบบเดียวกัน หรือพื้นผิวแร่ธาตุที่มีความถนัดซ้ายขวาชนิดเดียวกับที่กล่าวไปข้างต้น เทียบได้กับลมแรงที่ทำให้เหรียญหลายเหรียญซึ่งโยนแยกกันตกลงด้านเดียวกัน โดยที่การโยนแต่ละครั้งไม่ได้เกี่ยวข้องกันเลย ความถนัดมือที่เหมือนกันจึงสอดคล้องกับประชากรกลุ่มแรกกลุ่มเดียวก็ได้ และสอดคล้องพอ ๆ กันกับหลายกลุ่มที่ถูกผลักไปทิศทางเดียวกันโดยแรงภายนอกเดียวกัน ความถนัดซ้ายขวาเพียงอย่างเดียวจึงชี้ขาดไม่ได้ว่าแบบใดถูกต้อง

ประชากรกลุ่มที่มีเคมีแบบนี้ลงตัวแล้วคือสิ่งที่ระบุอายุได้ พร้อมช่วงความคลาดเคลื่อนที่แท้จริง การศึกษาปี 2024 ใน Nature Ecology & Evolution นำโดย Moody, Álvarez-Carretero, Mahendrarajah และ Donoghue ให้บรรพบุรุษร่วมสากลสุดท้าย (LUCA) ของสิ่งมีชีวิตทั้งหมดที่ยังมีชีวิตอยู่ในปัจจุบันมีอายุประมาณ 4.2 พันล้านปี ช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์อยู่ที่ 4.09 ถึง 4.33 Gya ภายใต้แบบจำลองนาฬิกาโมเลกุลแบบผ่อนคลายหลักของทีมวิจัย และช่วงเติมกินตั้งแต่ 3.94 ถึง 4.52 Gya เมื่อนับรวมทุกแบบจำลองที่พวกเขาเปรียบเทียบ วิธีการนี้อาศัยยีนพาราล็อกห้าคู่คือยีนที่เกิดจากการจำลองซ้ำภายในจีโนมโบราณเพียงหนึ่งเดียวก่อนที่ LUCA จะถือ

กำเนิด แล้วถูกส่งทอดลงมาตามสองสายที่แยกจากกันตลอดมา ในจำนวนนี้มีหน่วยย่อยสองหน่วยของเอทีพีซินเทส และปัจจัยยืดสาย (elongation factor) สองตัวคือ Tu และ G ทั้งหมดถูกปรับเทียบกับจุดยึดโยงทางฟอสซิลและธรณีเคมีสิบสามจุด ตั้งแต่การพุ่งชนที่ก่อกำเนิดดวงจันทร์เมื่อ 4,510 ล้านปีก่อน ไปจนถึงร่องรอยออกซิเจนอายุ 2,954 ล้านปีที่เก็บรักษาไว้ในกลุ่มหินโมซานของแอฟริกาใต้

ตัวเลขนี้ปรับปรุงการสืบสร้างก่อนหน้า ไวส์และคณะเขียนไว้ใน Nature Microbiology เมื่อปี 2016 บรรยายถึง LUCA ที่ชอบความร้อนสูงและตรึงไนโตรเจนได้ โดยอาศัยหลักฐานที่ต่างออกไปบ้าง งานวิจัยฉบับใหม่ยังโต้แย้งเพดานที่งานวิจัยเก่าบางชิ้นใช้อ้างอิง คือสมมติฐานว่าดาวเคราะห์น้อยและดาวหางถล่มโลกยุคแรกอย่างหนักเมื่อประมาณ 3.7 ถึง 3.9 Gya เพดานนั้นไม่ใช่ขอบเขตบนที่ปลอดภัย เพราะแม้แต่ช่วงเวลา ความรุนแรง และการมีอยู่จริงของเหตุการณ์ถล่มครั้งนั้นก็ยังเป็นที่ถกเถียงกันในบันทึกการพุ่งชนบนดวงจันทร์ อายุของ LUCA จึงไม่ใช่ข้อความที่จาร์กไวต์ตายตัว มันคือคำตอบที่ดีที่สุดในปัจจุบัน ถูกปรับปรุงมาแล้วครั้งหนึ่ง และพร้อมจะถูกปรับปรุงอีก

เซลล์ของประชากรกลุ่มนั้นกำลังอ่านบางสิ่งอยู่แล้วเมื่อถึงเวลาที่มันมีชีวิตอยู่ ไม่ว่าหน้าตาจะเป็นอย่างไรหรืออาศัยอยู่ที่ใด สิ่งที่มีมันอ่านคือชุดคำสั่งที่เขียนด้วยตัวอักษรโมเลกุล และการแปลรหัสในตอนนั้นใช้วิธีเดียวกับที่ลูกหลานทุกสายพันธุ์ของมันแปลรหัสอยู่ในปัจจุบัน การเลือกมีอณูตมาก่อน การเลือกตัวอักษรตามมาทีหลัง

Four billion years, one alphabet

A timeline of the molecules that remember. Compressed toward the top; not to linear scale.



พลิกกลับได้หาก: พบสายพันธุ์สิ่งมีชีวิต ไม่ว่าจะโบราณ ปัจจุบัน หรือสร้างขึ้นใหม่ ในห้องทดลอง ที่ดำเนินชีวิตด้วยกรดอะมิโนแบบ D และน้ำตาลแบบ L เป็นแกนกลางที่สืบทอดได้ ไม่ใช่ข้อยกเว้นแยกโดดที่เกิดขึ้นภายหลัง นั่นจะหมายความว่าความถนัดมือที่เป็นเอกภาพของโลกสะท้อนถึงแรงผลักดันจากภายนอกเพียงแรงเดียว ที่กระทำต่อจุดกำเนิดหลายจุดแยกกัน ไม่ใช่มาจากบรรพบุรุษร่วมกันเพียงหนึ่งเดียว

แหล่งข้อมูล

- **2021** · Vantomme, "Pasteur and chirality: A story of how serendipity favors the prepared minds" — [Chirality \(Wiley\)](#)
- **2016** · "Why are all proteins 'left-handed'? New theory could solve origin of life mystery" — [Science/AAAS](#)
- **2011** · "Emerging knowledge of regulatory roles of d-amino acids in bacteria" — [Cellular and Molecular Life Sciences \(Springer\)](#)
- **2006** · Torres et al., "Mammalian L-to-D-amino-acid-residue isomerase from platypus venom" — [FEBS Letters](#)
- **2025** · "Life's homochirality: Across a prebiotic network" — [PNAS 122](#)
- **2024** · Moody et al., "The nature of the last universal common ancestor and its impact on the early Earth system" — [Nature Ecology & Evolution](#)

02. สีสี่ตัวอักษร

สิ่งมีชีวิตอ่านรหัสเป็นแล้วในเวลานั้น อายุยังใกล้เคียง 4.2 พันล้านปี และตัวอักษรที่มันใช้มีสี่ตัวพอดี คืออะดีนีนกับไทมีน กัวนีนกับไซโทซีน ในคลังข้อมูลสองสายที่เรียกว่า DNA หรืออะดีนีนกับยูราซิลที่มาแทนไทมีน ในสำเนาทำงานสายเดี่ยวที่เรียกว่า RNA ตัวอักษรสี่ตัวนี้ไม่จับคู่กันแบบสุม อะดีนีนหาไทมีนหรือยูราซิลเสมอ กัวนีนหาไซโทซีนเสมอ สองสายวางขนานกันไปเหมือนซิปที่ฟันแต่ละซี่เข้าคู่ได้กับซี่เดียวเท่านั้น การจับคู่ที่ตายตัวนี้คือเหตุผลทั้งหมดที่เซลล์คัดลอกคลังข้อมูลของตัวเองได้ ผ่าซิปลงตรงกลาง แล้วแต่ละครึ่งก็สกดไว้ครบแล้วว่าคู่ที่หายไปต้องเป็นอะไร

เซลล์ไม่เคยอ่านทีละตัวอักษร มันอ่านเป็นคำ คำละสามตัวอักษรพอดี เรียกว่าโคดอน เรียงต่อกันไปโดยไม่มีเครื่องหมายวรรคตอนและไม่มีช่องว่างคั่นระหว่างกัน ถ้าเซลล์อ่านทีละตัวจริง ๆ ตัวอักษรสี่ตัวคงเป็นชุดตัวอักษรที่บางเกินไปสำหรับสกดคำอธิบายร่างกายทั้งร่าง แกล่งข่าวรางวัลโนเบลของคณะกรรมการเองเมื่อปี 1989 บรรยายการจัดวางแบบนี้ด้วยถ้อยคำที่ใกล้เคียงกันมากกว่า "มีตัวอักษรเช่นนี้เพียงสี่ตัว...จัดเรียงเป็นประโยคยาวของคำสามตัวอักษร" คำละสามตัวอักษรที่ดึงมาจากชุดตัวอักษรสี่ตัวไม่ใช่ความยาวคำที่เลือกมาโดยพลการ มันสั้นที่สุดเท่าที่จะให้เซลล์มีการสกดต่างกันมากพอจะเรียกชื่อกรดอะมิโนทุกตัวที่มันต้องการ และยังเหลือเผื่อไว้อีก

เลขคณิตชุดนี้คุ่มที่จะคำนวณให้ครบถ้วน เพราะสุดท้ายแล้วมันคือสิ่งที่ขับเคลื่อนโลกของสิ่งมีชีวิตทั้งหมด ตำแหน่งแรกเลือกได้สี่ตัว ตำแหน่งที่สองสี่ตัว ตำแหน่งที่สามสี่ตัวสี่คูณสี่คูณสี่ได้โคดอนสามตัวอักษรที่เป็นไปได้หกสิบสี่แบบ ไม่มากไม่น้อยไปกว่านี้ หกสิบเอ็ดแบบในจำนวนนั้นระบุกรดอะมิโนตัวใดตัวหนึ่งในยี่สิบตัวที่ใช้สร้างโปรตีน อีกสามแบบที่เหลือ คือ UAA, UAG และ UGA ไม่แทนกรดอะมิโนใดเลย มันเป็นสัญญาณหยุด บอกกลไกสร้างโปรตีนของเซลล์ว่าโปรตีนสิ้นสุดตรงจุดใด โคดอนอีกตัวคือ AUG ทำสองหน้าที่พร้อมกัน เป็นทั้งสัญญาณเริ่มต้นมาตรฐานและโคดอนของกรดอะมิโนเมไทโอนีน เหมือนตัวพิมพ์ใหญ่ที่บังเอิญสกดเป็นคำได้ในตัวมันเอง นักวิจัยไขโครงสร้างทั้งหมดนี้ออกมาด้วยการทดลองทีละโคดอนในช่วงต้นถึงกลางทศวรรษ 1960 โดยหลักแล้วคือมาร์แชลล์ นิเรนเบิร์ก (Marshall Nirenberg), ไฮน์ริช มัทเธอี (Heinrich Matthaei) และฮาร์ โกบินด์ โครานา (Har Gobind Khorana) และห้อง

เรียนพันธุศาสตร์แทบทุกแห่งนับแต่นั้นมาก็สอนมันเหมือนกันทุกประการ ไม่มีความแตกต่างตามท้องถิ่น

กรดอะมิโนส่วนใหญ่ตอบสนองต่อการสะกดมากกว่าหนึ่งแบบ เพราะโคดอนหกสิบสี่แบบต้องรองรับกรดอะมิโนยี่สิบตัวกับสัญญาณหยุดหนึ่งชนิด นักชีววิทยาเรียกคุณสมบัตินี้ว่าความเสื่อมถอย (degeneracy) หรือความซ้ำซ้อน รูปแบบของมันมีเลขคณิตที่แม่นยำเป็นของตัวเอง กรดอะมิโนห้าตัว คือโพรลีน อะลานีน ทรีโอนีน วาลีน และไกลซีน ได้โคดอนต่างกันตัวละสี่แบบ นักชีววิทยาเรียกชุดนี้ว่าควอเตต กรดอะมิโนเก้าตัวได้ตัวละสองแบบพอดี เรียกว่าดับเบิ้ลต กรดอะมิโนสามตัว คือลิวซีน อาร์จินีน และเซรีน ได้ตัวละหกแบบ เรียกว่าเซกซ์เตต และเป็นการสะกดที่หลากหลายที่สุดที่พบในบรรดาทั้งหมด ไอโซลิวซีนตัวเดียวได้สามแบบ เรียกว่าทริปเลต เมไทโอนีนกับทริปโตเฟนได้ตัวละแบบเดียวพอดี เรียกว่าซิงเกิลต คุณออกมาแล้วปิดลงตัว ห้าควอเตตบวกเก้าดับเบิ้ลตบวกสามเซกซ์เตตบวกหนึ่งทริปเลตบวกสองซิงเกิลต รวมเป็นกรดอะมิโนยี่สิบตัว สะกดผ่านโคดอนหกสิบเอ็ดแบบ ไม่มีเหลือและไม่มีขาด

ความซ้ำซ้อนนี้คือประกันภัยที่ฝังอยู่ในตัวอักษรโดยตรง ไม่ใช่ความหละหลวม กรดอะมิโนจำนวนมากมีการสะกดสำรอง ความผิดพลาดในการคัดลอกที่ลงตรงตัวอักษรตัวที่สามของโคดอนในยีนจึงมีส่วนใหญ่ที่ไม่เปลี่ยนโปรตีนที่ได้เลย เซลล์ได้ประกันนี้มาฟรี ๆ เพียงเพราะวิธีที่การสะกดทั้งหกสิบสี่แบบถูกจัดสรรไว้ ประกันยังลงลึกกว่านั้นอีก ฟรานซิส คริก (Francis Crick) เสนอไว้ในปี 1966 ว่าการจับคู่ระหว่างโคดอนกับแอนติโคดอนคู่กันของมัน อันเป็นแท็กสามตัวอักษรที่โมเลกุลทรานสเฟอร์อาร์เอ็นเอพกมาพร้อมกับกรดอะมิโนที่มันลำเลียงเข้าประจำที่ จะเข้มงวดที่ตัวอักษรสองตัวแรก แต่ผ่อนปรนหรือ "โคลงเคลง" ที่ตัวที่สาม ความโคลงเคลงนั้นทำให้ทรานสเฟอร์อาร์เอ็นเอตัวเดียวมักอ่านโคดอนที่มีความหมายเหมือนกันได้มากกว่าหนึ่งแบบ เซลล์จึงอยู่ได้ด้วยทรานสเฟอร์อาร์เอ็นเอที่แตกต่างกันราวสี่สิบชนิด แทนที่จะต้องมีแยกชนิดหนึ่งต่อโคดอนความหมายทุกแบบในหกสิบเอ็ดแบบ

รูปแบบความซ้ำซ้อนไม่ได้กันแค่การพิมพ์ผิด มันกันความหมายด้วย ในปี 1998 สตีเฟน ฟรีแลนด์ (Stephen Freeland) และลอว์เรนซ์ เฮิร์สต์ (Laurence Hurst) วัดรหัสมาตรฐานเทียบกับรหัสทางเลือกที่คอมพิวเตอร์สร้างขึ้นประมาณหนึ่งล้านแบบ

ทุกแบบสร้างขึ้นภายใต้กฎพื้นฐานชุดเดียวกัน แล้วให้คะแนนแต่ละแบบด้วย "ต้นทุนจากการกลายพันธุ์" คือความเสียหายที่ความผิดพลาดในการคัดลอกเพียงตัวอักษรเดียวมักก่อกับโปรตีนที่ได้ เนื่องจากโคดอนที่ต่างกันเพียงตัวอักษรเดียวมักระบุกรดอะมิโนที่คล้ายกันทางเคมี รหัสมาตรฐานตัวจริงชนรหัสทางเลือกไปมากกว่า 99.99 เปอร์เซ็นต์ ฟรีแลนด์ขยายผลนี้ต่อในปี 2000 ร่วมกับไนต์ (Knight), แลนด์เวเบอร์ (Landweber) และเฮิร์สต์ โดยเสนอว่าการจัดวางที่เกือบสมบูรณ์แบบนี้ถูกล็อกไว้เกือบทั้งหมดก่อนที่ LUCA จะถือกำเนิดขึ้นด้วยซ้ำ นักวิจัยไม่ได้ยอมรับกันทุกคนว่านี่สะท้อนการคัดเลือกโดยตั้งใจเพื่อความทนทานต่อความผิดพลาด บทความปี 2010 ใน PNAS ชื่อ "A Neutral Origin for Error Minimization in the Genetic Code" ให้เหตุผลว่ารูปแบบความเสียหายต่ำแบบเดียวกันนี้อาจโผล่ขึ้นมาเป็นผลพลอยได้จากวิธีที่การกำหนดโคดอนสะสมตัวขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ผ่านกระบวนการลดความกำกวม ไม่ใช่จากการคัดเลือกโดยตรงเพื่อลดความผิดพลาด การถกเถียงนี้ยังคงเปิดอยู่ในวรรณกรรมทางวิชาการหลัก

ข้อถกเถียงเก่าแก่ที่สุดของรหัส

ข้อถกเถียงที่สองเก่าแก่กว่า และถามคนละคำถาม ไม่ใช่ว่ารหัสนี้ทนทานต่อความเสียหายได้ดีเพียงใด แต่ถามว่าเหตุใดตัวอักษรเฉพาะเหล่านี้จึงลงเอยด้วยการจับคู่กับกรดอะมิโนเฉพาะเหล่านี้ตั้งแต่แรก ฟรานซิส คริกเสนอคำตอบหนึ่งไว้ในปี 1968 คือ "อุบัติเหตุที่แช่แข็ง" (frozen accident) เมื่อระบบการแปลรหัสและโปรตีนจำนวนมากพึ่งพาความหมายของโคดอนชุดหนึ่งไปแล้ว การเปลี่ยนความหมายแม้เพียงโคดอนเดียวก็จะทำลายทุกสิ่งที่สร้างทับอยู่บนฐานนั้น การกำหนดความหมายจึงล็อกอยู่กับที่ด้วยอุบัติเหตุทางประวัติศาสตร์ และไม่ขยับอีกเลย คาร์ล วอส (Carl Woese) เสนอคำตอบคู่แข่งตั้งแต่ปี 1965 คือทฤษฎีสเตอริโอเคมี ลำดับโคดอนหรือแอนติโคดอนมีความสัมพันธ์ทางเคมีโดยตรงกับกรดอะมิโนของตัวเอง แม้จะอ่อนก็ตาม รูปร่างของรหัสจึงสะท้อนความชอบในการจับตัวทางโมเลกุลที่แท้จริง ไม่ใช่การล็อกไว้ทางประวัติศาสตร์ล้วน ๆ การทดสอบการจับตัวในห้องทดลองที่วอสทำในปี 1966 และ 1967 และทำอีกครั้งร่วมกับแซกซิงเจอร์ (Saxinger) และพอนนัมเปอรูมา (Ponnamperna) ในปี 1971 พบเพียงสิ่งที่ยืนยันการบรรยายว่าเป็น "ปฏิสัมพันธ์ที่อ่อนและค่อนข้างไม่จำเพาะเจาะจง" นั่นเป็นหลักฐานสนับสนุนแนวคิดนี้ แต่ไม่ใช่หลักฐาน

ที่หนักแน่น บทปริทัศน์ส่วนใหญ่ในปัจจุบัน รวมถึงงานสำรวจปี 2017 โดยยูจีน คูนิน (Eugene Koonin) ถือว่าคำตอบที่ตรงไปตรงมาคือส่วนผสมของทั้งสองแนวคิด มีการปรับรูปทางสแตอริโอเคมีอยู่บ้างในช่วงต้นขณะที่รหัสยังก่อตัวอยู่ แล้วจึงล็อกแบบ อุบัติเหตุແຂ່ງเมื่อรหัสและจีโนมพึ่งพากันแน่นหนาเกินกว่าจะเปลี่ยนแปลงได้อย่าง ปลอดภัย

การพึ่งพากันไม่เคยแปลว่าเปลี่ยนแปลงไม่ได้เลยในทุกที่ สายพันธุ์สิ่งมีชีวิตจำนวนหนึ่งใช้รหัสรูปแบบที่ไม่เป็นมาตรฐานอยู่ในทุกวันนี้ จีโนมไมโทคอนเดรียของสัตว์หลายชนิดกำหนดความหมายใหม่ให้โคดอนหยุดหรือโคดอนความหมายบางตัว ซิลิเอตบางชนิดย้าย UAA และ UAG จากสัญญาณหยุดไปเป็นกรดอะมิโนกลูตามีน แบคทีเรียไมโคพลาสมา ย้าย UGA จากสัญญาณหยุดไปเป็นกรดอะมิโนทริปโตเฟน ไมโทคอนเดรียของมนุษย์ก็เป็นหนึ่งในตัวอย่างที่ยังมีชีวิตอยู่ มันกำหนดความหมายใหม่ให้โคดอนหลายตัว รวมถึง AGA และ AGG ซ้อยกเว้นเหล่านี้ไม่ได้บ่อนทำลายแนวคิดอุบัติเหตุແຂ່ງ มันสนับสนุนแนวคิดนั้นด้วยซ้ำ เพราะมันปรากฏขึ้นเฉพาะในจีโนมขนาดเล็กที่มียีนน้อยอย่างไม่โทคอนเดรีย ที่นั่นมีโปรตีนเพียงไม่กี่ตัวพึ่งพาโคดอนที่ได้รับผลกระทบ การกำหนดความหมายใหม่จึงอยู่รอดได้แทนที่จะเป็นหายนะ ธรรมชาติของอุบัติเหตุແຂ່ງทำนายเงื่อนไขนี้ไว้พอดีว่าเป็นเงื่อนไขที่เปิดทางให้การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นได้

มองรหัสในฐานะช่องทางลำเลียงข้อมูล ถอยออกมาจากกลไกทั้งหมด แล้วตัวเลขอีกแบบหนึ่งจะปรากฏขึ้น เบสแต่ละตัวในสี่ตัว เมื่อนับเป็นสัญลักษณ์หนึ่งในชุดตัวอักษรสี่สัญลักษณ์ บรรทุกข้อมูลได้สูงสุดตามทฤษฎีสองบิต คือลอการิทึมฐานสองของสี่ นั่นเป็นเอกลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ ไม่ใช่ค่าที่วัดได้จริง DNA ของจีโนมจริงเมื่อวัดเชิงประจักษ์แล้วบรรทุกได้น้อยกว่านั้นเล็กน้อย คือประมาณ 1.9 บิตต่อเบส เพราะลำดับจริงไม่ได้สุ่มอย่างสมบูรณ์แบบ องค์ประกอบเบสที่เอนเอียงและความเอนเอียงในการใช้โคดอนต่างดังข้อมูลที่เกิดขึ้นจริงให้ต่ำกว่าเพดานตามทฤษฎี และช่วงที่ไม่เข้ารหัสของจีโนมวัดได้ต่ำกว่าช่วงที่เข้ารหัสลงไปอีก พุดอีกอย่าง สองบิตคือขีดจำกัดความเร็ว ส่วน 1.9 คือความเร็วที่สิ่งมีชีวิตซับซ้อนจริง

วางเทียบกับระบบข้อมูลใด ๆ ของมนุษย์แล้วแทบไม่ยุติธรรมเลย รหัสมาตรฐานยังทำงานอยู่ในแบคทีเรีย และในทุกเซลล์ของสิ่งมีชีวิตที่กำลังอ่านเรื่องนี้

แทบไม่ต่างจากเดิม นักวิจัยไข่มันออกมาในทศวรรษ 1960 และแทบไม่มีใครดัดแปลงมันอีกเลยนับแต่นั้น ยกเว้นตามมุมเล็ก ๆ ไม่กี่จุดที่มาทีหลังและมีต้นทุนต่ำ มันน่าจะเป็นรูปแบบข้อมูลที่ทำงานต่อเนื่องมายาวนานที่สุดบนโลกใบนี้ไม่เคยถูกเขียนใหม่จากศูนย์ มีแต่การปะซ่อมที่ขอบ และแบกตรรกะเดิมไว้ คือกรดอะมิโนยี่สิบตัวกับโคดอนหกสิบสี่แบบ ข้ามการใช้งานอย่างไม่ขาดตอนกว่าสี่พันล้านปี

ตัวอักษรลำพังตัวมันเองไม่ทำอะไรเลย มันต้องมีบางสิ่งมาอ่าน และมีบางสิ่งมาลงมือตามสิ่งที่อ่านได้ เมื่อถึงเวลาที่จีโนมของ LUCA มีรหัสสั้นอยู่ ทั้งสองสิ่งนั้นก็มียู่แล้ว ทำหน้าที่ทั้ง DNA และโปรตีนต่างทำเองลำพังไม่ได้

The oldest data format on Earth

Four letters, three-letter words, twenty meanings — the same code in a bacterium and in a reader.

1 · Four letters, paired



2 bonds



3 bonds

A always pairs with T
(U in RNA); G always with C.
Each strand is the recipe
for rebuilding the other.

2 · Read three at a time — a codon



one codon = one 3-letter word

$$4 \times 4 \times 4 = 64$$

64 possible words from just four letters.
Two letters (16) would be too few for 20 amino acids;
three is the smallest word that works.

3 · 64 words → 20 amino acids + STOP

64 codons

every 3-letter word



20 amino acids

+ a STOP signal

More words than meanings,
so meanings repeat.

Leucine is spelled six ways:



The spare spellings are not waste: a mis-copied third letter often still means the same amino acid,
so the redundancy quietly absorbs copying errors. The code protects its own meaning.

4 · Counting it in bits

One letter	2 bits	$\log_2 4$ — a choice of one out of four
One codon	6 bits	three letters, $2 + 2 + 2 = 6$ states
To name 1 of 20	~4.32 bits	$\log_2 20$ — what the meaning actually needs
The difference	~1.7 bits	spent on redundancy, banked as error protection

รหัสพันธุกรรม นับออกมาให้เห็นทีละตัว

พลิกกลับได้หาก: พบจีโนมขนาดใหญ่ โบราณ และมียืนมาก ไม่ใช่จีโนมขนาดเล็กที่
ลดรูปแล้วอย่างไมโทคอนเดรีย กำหนดความหมายใหม่ให้กับโคดอนความหมายตัว
หนึ่งโดยแทบไม่เสียต้นทุนด้านความเหมาะสมทางวิวัฒนาการ นั่นจะแสดงว่าความ

เป็นสากลเกือบสมบูรณ์ของรหัสสะท้อนถึงการสลับเปลี่ยนที่ทำได้ง่าย ไม่ใช่การ
ล็อกแบบแช่แข็งที่หากเปลี่ยนแล้วจะหายนะ

แหล่งข้อมูล

- **2020s (open textbook, accessed 2026)** · "An introduction to the genetic code," Chromosomes, Genes, and Traits: An Introduction to Genetics — [Rotel/Pressbooks](#)
- **1989** · Nobel Prize in Chemistry Press Release, "Ribonucleic acid (RNA) – a biomolecule of many functions" — [NobelPrize.org](#)
- **2011** · "The multiplet structure of the genetic code, in one and small number" — [arXiv:1101.2983](#)
- **1998** · Freeland & Hurst, "The Case for an Error Minimizing Standard Genetic Code" — [Journal of Molecular Evolution \(Springer\)](#); extended by **2000** · Freeland, Knight, Landweber & Hurst, "Early Fixation of an Optimal Genetic Code" — [Molecular Biology and Evolution \(Oxford Academic\)](#)
- **2017** · Koonin, "Frozen Accident Pushing 50: Stereochemistry, Expansion, and Chance in the Evolution of the Genetic Code" — [Life \(MDPI\) 7\(2\):22](#)
- **2012** · "On the Entropy of DNA: Algorithms and Measurements Based on Memory" — [Wharton School faculty paper](#)

03. โมเลกุลที่คัดลอกตัวเอง

โมเลกุลชนิดเดียวเคยทำหน้าที่ทั้งเป็นข้อความและเป็นเครื่องจักรที่อ่านข้อความนั้น มันดำรงอยู่ในช่วงระหว่างประมาณ 4.5 พันล้านปีก่อน ตอนที่ระบบโลก-ดวงจันทร์ เพิ่งก่อตัวเสร็จ กับประมาณ 4.2 พันล้านปีก่อน ตอนที่ประชากรของ LUCA ถูกรหัส พันธุกรรมที่ใช้งานได้แล้ว การศึกษาปี 2024 ที่ระบุอายุของ LUCA เรียกช่วงนี้ว่า "สั้น อย่างน่าประหลาดใจ" ในช่วงนั้นยังไม่มีอะไรแย่งงานสองอย่างออกจากกัน สารชนิดเดียวถือทั้งการถ่ายทอดพันธุกรรมและปฏิกิริยาเคมีไว้พร้อมกัน ต่อมาสิ่งมีชีวิตจึงแบ่ง งานนั้นออก ให้ DNA เก็บคลังข้อมูล และให้โปรตีนเป็นเครื่องจักร

แนวคิดนี้มีชื่อและมีวันเกิด "โลกอาร์เอ็นเอ" (RNA world) คือคำที่วอลเตอร์ กิลเบิร์ต (Walter Gilbert) แห่งห้องปฏิบัติการชีววิทยา มหาวิทยาลัยฮาร์วาร์ด บัญญัติไว้ในบท วิจารณ์ยาวย่อหน้าเดียวในวารสาร Nature เล่มที่ 319 หน้า 618 ฉบับวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 1986 โมเลกุลที่ว่านั่นคือ RNA และแนวคิดนี้บอกว่ายุคหนึ่งทั้งยุคของสิ่งมีชีวิตยุคแรกดำเนินไปด้วย RNA เพียงอย่างเดียว กิลเบิร์ตเสนออย่างชัดเจนเป็นคนแรก ว่าระบบสิ่งมีชีวิตยุคแรกสุดสร้างขึ้นจาก RNA ทั้งหมด เก็บข้อมูลและเร่งปฏิกิริยาไว้ใน โมเลกุลเดียว คือกระตุ้นและเร่งความเร็วของปฏิกิริยาเคมี บทบาทเหล่านี้ถูกแยกออก ระหว่าง DNA กับโปรตีนในภายหลัง บทวิจารณ์นี้สั้นมาก แต่จากการนับของ Nature เอง มันถูกอ้างอิงไปแล้วถึง 2,623 ครั้ง

กิลเบิร์ตมีฐานรองรับอยู่แล้ว เป็นการค้นพบที่เกิดก่อนหน้าเขาเพียงปีเดียว นักวิจัย สองคนทำงานเป็นอิสระต่อกัน และเพิ่งแสดงว่า RNA ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทาง ชีวภาพที่แท้จริงได้ เรียกว่าไรโบไซม์ (ribozyme) ไม่ใช่เป็นเพียงตัวพาข้อมูล พันธุกรรม โทมัส เช็ก (Thomas Cech) แห่งมหาวิทยาลัยโคโลราโด โบโลเดอร์ แสดงใน ปี 1982 ว่าโมเลกุล RNA ที่ยังไม่ผ่านการตัดต่อ เอามาจากซิลิเอดชนิด Tetrahymena thermophila ตัดต่อตัวเองได้ มันตัดและเชื่อมลำดับของตัวเองใหม่โดยไม่มีโปรตีนอยู่ ในปฏิกิริยาเลย ซิดนีย์ อัลต์แมน (Sidney Altman) แห่งมหาวิทยาลัยเยล ก่อข้อพิสูจน์ ที่ละชั้น ชั้นแรกในปี 1978 เขาพบว่าเอนไซม์แบคทีเรีย RNase P หยุดทำงานเมื่อตั้ง องค์ประกอบ RNA ออกไป และกลับมาทำงานอีกครั้งเมื่อใส่ RNA คืนเข้าไป จากนั้นใน ปี 1983 เขาสาธิตได้สมบูรณ์ขึ้นว่าองค์ประกอบ RNA เพียงลำพัง ไม่มีตัวช่วยใด ๆ เร่ง

ปฏิกิริยาการตัดที่ RNase P เป็นที่รู้จักได้เอง เช็กและอัลต์แมนรับรางวัลโนเบลสาขาเคมีร่วมกันในปี 1989 "จากการค้นพบคุณสมบัติเชิงเร่งปฏิกิริยาของ RNA" ตอนที่ประกาศรางวัลนั้น วงการรู้จักไรโบไซม์ลักษณะนี้แล้ว "เกือบร้อยชนิด"

RNase P ยังทำงานอยู่ทุกวันนี้ในแบคทีเรีย อาร์เคีย และยูคาริโอตแทบทุกชนิดที่มีชีวิตอยู่ หน้าที่ของมันคือประมวลผลทรานสเฟออาร์เอ็นเอ ส่วนอินทรอนที่ตัดต่อตัวเองได้ของเช็กก็ยังพบใน Tetrahymena และในยีนของสิ่งมีชีวิตอื่นอีกมาก การค้นพบทั้งสองนี้ไม่ใช่ของเก่าเก็บในพิพิธภัณฑ์

หลักฐานที่หนักแน่นที่สุดชิ้นเดียวของอดีตที่ดำเนินไปด้วย RNA อยู่ตรงใจกลางของไรโบไซม เครื่องจักรที่เซลล์สิ่งมีชีวิตทุกเซลล์ยังต้องพึ่งเพื่อสร้างโปรตีน ในปี 2000 นิสเซน, แฮนเซน, บาน, มัวร์ และสไตทซ์ (Nissen, Hansen, Ban, Moore, and Steitz) ตีพิมพ์โครงสร้างระดับอะตอมของหน่วยย่อยขนาดใหญ่ของไรโบไซม เก็บมาจากอาร์เคียชนิด *Haloarcula marismortui* ลงในวารสาร Science เล่มที่ 289 หน้า 920 ถึง 930 สิ่งที่พบคือศูนย์กลางเพปติลทรานสเฟอเรส จุดที่สายโปรตีนกำลังเติบโตรับกรดอะมิโนตัวถัดไปพอดี สร้างขึ้นจาก RNA ของไรโบไซมล้วน ๆ ไม่มีอะตอมของโซ่ข้างโปรตีนตัวไหนเข้าใกล้ปฏิกริยานี้กว่าประมาณ 18 อังสตรอม ไกลเกินกว่าจะมีส่วนร่วมได้ โมเลกุลสารตั้งต้นทั้งสองสัมผัสเพียง RNA ที่อนุรักษ์ไว้ในส่วนของไรโบไซมที่เรียกว่าโดเมน V ไรโบไซมทุกตัวที่มีชีวิตอยู่วันนี้ ในทุกโดเมนของสิ่งมีชีวิตยังใช้ห้องปฏิกริยา RNA ล้วนแบบเดียวกันนี้ นี่อาจเป็นซากดึกดำบรรพ์ที่เป็นสากลที่สุดชิ้นเดียวที่โลกอาร์เอ็นเอทิ้งไว้ เพราะมันอยู่ที่ใจกลางเครื่องจักรที่จำเป็นที่สุดของชีววิทยา ไม่ใช่ตรงมุมรอบนอกที่เหลือเป็นเพียงร่องรอย

ห้องทดลองสาธิตโดยตรงในปี 2009 ว่า RNA คัดลอกตัวเองได้ ไม่ใช่แค่เร่งปฏิกิริยาเดี่ยว ๆ เทเรซี ลินคอล์น (Tracey Lincoln) และเจอร์ราร์ด จอยซ์ (Gerald Joyce) แห่งสถาบันวิจัยสคริปส์ ออกแบบเอนไซม์ RNA คู่หนึ่งให้เร่งการสังเคราะห์ซึ่งกันและกันจากโมเลกุลชิ้นส่วนสั้น ๆ สี่ชนิด เอนไซม์แต่ละตัวจึงผลิตคู่หูของตัวเองขึ้นมา ผลที่ดีพิมพ์ใน Science เล่มที่ 323 หน้า 1229 ถึง 1232 คือการขยายจำนวนแบบทวีคูณที่เลี้ยงตัวเองได้ เวลาเพิ่มจำนวนเป็นสองเท่าอยู่ที่ประมาณหนึ่งชั่วโมง และเดินต่อไปได้ไม่จำกัดตราบดีที่วัตถุดิบใหม่ยังเข้ามาเรื่อย ๆ เมื่อปล่อยตัวจำลองแบบหลายรุ่นที่แตกต่างกันให้แย่งวัตถุดิบจากแหล่งเดียวกัน ตัวจำลองแบบลูกผสมชนิดใหม่ก็โผล่ขึ้น

ระหว่างการทดลองและครองประชากรไปในที่สุด นั่นคือวิวัฒนาการแบบดาร์วินที่เกิดขึ้นกับระบบเคมีล้วน ๆ ไม่มีโปรตีนเข้ามาเกี่ยวข้องตรงไหนเลย ข้อจำกัดที่ตรงไปตรงมาของงานนี้ ผู้เขียนเองก็ยอมรับ ผลการทดลองเพียงอย่างเดียวตอบไม่ได้ว่าคู่ที่ถูกออกแบบอย่างพิถีพิถันคู่นี้คล้ายกับทางที่ตัวจำลองแบบตามธรรมชาติในยุคก่อนกำเนิดชีวิตจะเกิดขึ้นเองหรือไม่ หรือธรรมชาติต้องอาศัยการออกแบบซ้ำแล้วซ้ำเล่าโดยมนุษย์อย่างจงใจแบบที่สร้างเอนไซม์สองตัวนี้ขึ้นมา และนั่นเป็นคำถามที่ยุติธรรม

วัตถุดิบมาจากไหน

เคมีทั้งหมดนี้เดินไม่ได้ ถ้าไม่มีกรดอะมิโนและนิวคลีโอไทด์วางรออยู่ให้ร้อยเข้าด้วยกัน คำกล่าวของพวกนั้นมาจากไหนมีประวัติการทดลองของตัวเอง เริ่มในปี 1953 สแตนลีย์ มิลเลอร์ (Stanley Miller) ทำงานร่วมกับแฮโรลด์ ยูรี (Harold Urey) ที่มหาวิทยาลัยชิคาโก ปิคนิคส่วนผสมของมีเทน แอมโมเนีย ไฮโดรเจน และไอน้ำไว้ในขวดแก้ว เป็นการเดาบรรยากาศของโลกยุคแรก แล้วปล่อยประกายไฟฟ้าผ่านมันต่อเนื่องนานประมาณหนึ่งสัปดาห์แทนฟ้าผ่า หลังจากนั้นเขาพบสารประกอบอินทรีย์สิบเก้าชนิด ในนั้นมีกรดอะมิโนไกลซีน อัลฟา-อะลานีน และเบตา-อะลานีน ทั้งหมดสร้างขึ้นจากวัตถุดิบอินทรีย์สี่ชนิดนั้นกับประกายไฟเท่านั้น ต้นฉบับงานวิจัยถึงมือวารสาร Science ในเดือนกุมภาพันธ์ 1953

ห้าสิบห้าปีต่อมา วัตถุดิบต้นตำรับชุดเดิมให้ผลมากขึ้นไปอีก ในปี 2008 ทีมวิจัยที่นำโดยเจฟฟรีย์ บาดา (Jeffrey Bada) ค้นพบขวดตัวอย่างปิคนิคจากการทดลองที่มีมิลเลอร์เคยทำเองในทศวรรษ 1950 แต่ไม่เคยตีพิมพ์ การทดลองนั้นใช้ "อุปกรณ์จำลองภูเขาไฟ" ที่ดัดแปลงขึ้นเพื่อจำลองการปะทุของภูเขาไฟที่อุดมด้วยไอน้ำและมีฟ้าผ่าปะปนอยู่ ทีมนำมาวิเคราะห์ใหม่ด้วยเครื่องมือที่มิลเลอร์ไม่เคยเข้าถึง คือโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงและแมสสเปกโตรเมทรีสมัยใหม่ ขวดตัวอย่างอายุหลายสิบปีเหล่านั้นเผยกรดอะมิโนที่แตกต่างกัน 22 ชนิดและเอมีน 5 ชนิด หลายชนิดไม่เคยถูกระบุมาก่อนในการทดลองแบบมิลเลอร์เลย ผลผลิตอุดมกว่าชุดการทดลองที่ตีพิมพ์ครั้งแรกอย่างเห็นได้ชัด งานวิเคราะห์ใหม่นี้ตีพิมพ์ใน Science เมื่อวันที่ 17 ตุลาคม 2008 และให้เหตุผลว่าฟ้าผ่าภายในกลุ่มควันจากการปะทุของภูเขาไฟอาจเป็นมุมหนึ่งของโลกที่ผลิตวัตถุดิบของสิ่งมีชีวิตได้ดีเป็นพิเศษ ฟ้าผ่าแบบนั้นเกิด

ขึ้นจริงบนโลกยุคเฮอร์ที่ภูเขาไฟยังคุกรุ่นอยู่ ตัวเคมีเองไม่มีใครเถียง ที่ยังเถียงกันคือ บรรยากาศที่มีเลเซอร์สันนิษฐานไว้ใกล้เคียงกับบรรยากาศยุคแรกที่แท้จริงเพียงใด เขา สันนิษฐานบรรยากาศที่มีสภาพรีดิวซ์อย่างแรงและอุดมด้วยมีเทนกับแอมโมเนีย ส่วน วิทยาศาสตร์บรรยากาศส่วนใหญ่ในปัจจุบันตัดสินว่าของจริงน่าจะใกล้เคียงผสมที่ เป็นกลางทางเคมีและอุดมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์กับไนโตรเจนมากกว่า

หลักฐานอีกชนิดหนึ่งที่แตกต่างไปโดยสิ้นเชิงของเคมีชุดเดียวกันนี้มาจากนอกโลก อุกกาบาตเมอร์ซิสัน (Murchison) ตกลงที่ออสเตรเลียในปี 1969 และมันมีส่วนเกิน เล็กน้อยแต่มีอยู่จริงของรูปแบบภาพสะท้อนกระจกแบบหนึ่งเหนืออีกแบบ ในกรด อะมิโนไอโซวาเลอีน สารประกอบตัวนี้แทบไม่ปรากฏในชีวิตวิทยานบนโลก จึงเชื่อถือได้ใน ฐานะตัวติดตามเคมีนอกโลกที่ไม่ปนเปื้อน ส่วนเกินของรูปแบบกรดซัลฟิวเรอิกที่วัดได้มี ตั้งแต่ไม่มีเลย ไปจนถึงระหว่าง 18.5 ถึง 20.5 เปอร์เซ็นต์ แล้วแต่ก้อนหินและวิธี วิเคราะห์ที่ใช้ นั่นคือส่วนเกินสูงสุดเท่าที่เคยมีรายงานในอุกกาบาตก้อนใดก็ตามจนถึง วันนี้ พิชซาเรลโล (Pizzarello) วัดไว้ในปี 2003 ตีพิมพ์ใน *Geochimica et Cosmochimica Acta* ได้ช่วง 0 ถึง 15.2 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการศึกษาปี 2009 ใน *PNAS* โดยกลาวิน (Glavin) และดวอร์กิน (Dworkin) วัดได้ 18.5 เปอร์เซ็นต์ บวกลบ 2.6 เฉพาะในเมอร์ซิสัน และสูงถึง 20.5 เปอร์เซ็นต์เมื่อสำรวจอุกกาบาตคาร์บอน เนเซียสคอนโดรต์ในวงกว้างขึ้น อุกกาบาตกลุ่มนั้นเป็นหินที่อุดมด้วยสารประกอบ คาร์บอน

อคติทางความถนัดซ้ายขวานี้มีอยู่ในหินของระบบสุริยะก่อนที่ความถนัดมือเดียวของ โมเลกุลบนโลกจะถูกกำหนดลงตัว วัตถุต้นกำเนิดของเมอร์ซิสันมีอายุย้อนไปถึงยุคต้น ของระบบสุริยะ ประมาณ 4.5 ถึง 4.6 พันล้านปีก่อน เท่ากับอายุการก่อตัวมาตรฐาน ของอุกกาบาตในกลุ่มนี้ ลำดับเวลาแบบนี้สอดคล้องกับข้อเสนอว่าสสารนอกโลกมีส่วน ช่วยเอียงโลกไปทางมือข้างหนึ่งตั้งแต่แรก แต่ไม่ได้พิสูจน์ข้อเสนอนั้น การวิเคราะห์ ของกลาวินและดวอร์กินเองเพิ่มความยุ่งยากโดยตรงไปตรงมา แทนที่จะคลี่คลายมัน ส่วนเกินที่มากถึงประมาณ 20.5 เปอร์เซ็นต์ดูใหญ่เกินกว่าจะอธิบายด้วยกลไกหลักที่ เสนอกันไว้เพียงลำพัง คือการฉายรังสีด้วยแสงโพลาไรซ์แบบวงกลม ทั้งสองจึงเสนอ กระบวนการเปลี่ยนแปลงในน้ำเข้ามาเสริมหรือแทนที่ คือน้ำเหลวไหลผ่านวัตถุต้น กำเนิดของอุกกาบาตแล้วปรับสภาพทางเคมีให้มัน ช่องว่างระหว่างกลไกกับสิ่งที่ สังเกตได้ยังไม่ปิดลง

โครงสร้างของช่วงเวลาแรกสุดของการถ่ายทอดพันธุกรรมปรากฏขึ้นจากหลักฐานสามขั้นนี้ ประกายไฟที่เขียนกรดอะมิโนขึ้นจากแก๊สดิบ ๆ อุกกาบาตที่พกอคติทางความถนัดซ้ายขวาเก่าแก่กว่าโลกเอง และการสาธิตในห้องทดลองว่า RNA เพียงลำพังคัดลอกตัวเอง แข่งขัน และวิวัฒนาการได้ สิ่งที่เราได้ออกมาคือโมเลกุลที่คัดลอกตัวเองอย่างไม่สมบูรณ์แบบ อยู่ในแอ่งที่มีวัตถุดิบของมันเองสะสมอยู่แล้ว การคัดลอกที่ไม่สมบูรณ์แบบและเกิดซ้ำแล้วซ้ำเล่าคือรากเชิงกลไกทั้งหมดของการถ่ายทอดพันธุกรรม รุ่นหนึ่งคล้ายรุ่นก่อนหน้า แต่ไม่เคยซ้ำแบบเป๊ะ

บางสิ่งที่คัดลอกตัวเองได้ และบางครั้งก็คัดลอกผิดพลาด มีทุกอย่างที่จำเป็นครบแล้วสำหรับเริ่มสะสมประวัติศาสตร์ ไม่ใช่แค่เคมีอีกต่อไป สิ่งที่ยังไม่มีคือความถาวร คือ กุญแจล็อกที่แข็งแรงพอจะยึดการจัดเรียงที่มันค้นพบเอาไว้ กุญแจล็อกนั้นยังรออยู่ข้างหน้า

พลิกกลับได้หาก: มีใครแสดงให้เห็นว่าเคมีที่เกิดขึ้นก่อนการถ่ายทอดพันธุกรรมต้องมีเปปไทด์หรือเครือข่ายเมแทบอลิซึมที่กว้างกว่านั้นทำงานเคียงข้าง RNA มาตั้งแต่ต้น ไม่ใช่มีช่วงที่แท้จริงที่ RNA เพียงลำพังทำหน้าที่เป็นทั้งสารข้อความและเครื่องจักร

แหล่งข้อมูล

- **1986** · Gilbert, "Origin of life: The RNA world" — [Nature 319, 618](#)
- **2000** · Nissen, Hansen, Ban, Moore & Steitz, "The Structural Basis of Ribosome Activity in Peptide Bond Synthesis" — [Science 289\(5481\):920](#)
- **2009** · Lincoln & Joyce, "Self-Sustained Replication of an RNA Enzyme" — [Science 323\(5918\):1229-1232](#)
- **1953** · Miller-Urey spark-discharge experiment, NASA historical summary — [NASA NTRS technical report](#)
- **2008** · Johnson et al., "The Miller Volcanic Spark Discharge Experiment" — [Science 322\(5900\):404](#)
- **2009** · Glavin & Dworkin, "Enrichment of the amino acid L-isovaline by aqueous alteration on CI and CM meteorite parent bodies" — [PNAS 106\(14\)](#)

04. รหัสที่แข็งตัว

สี่พันสองร้อยล้านปีก่อน บวกลบร้อยล้านปีทั้งสองทาง น้ำอุ่นซึมผ่านเขาวงกตของรูพรุนแร่ธาตุในความมืด แสงอาทิตย์ส่องไม่ถึงความลึกระดับนั้น ที่นั่นคือบ้านของบรรพบุรุษร่วมสุดท้ายของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดบนโลกทุกวันนี้ — บ้านที่ประกอบขึ้นใหม่จากการอนุมาน ไม่มีใครเคยจับฟอสซิลของมัน ไม่มีใครเคยเห็นเซลล์ของมันสักเซลล์ สิ่งที่มีคือประชากรที่อนุมานย้อนกลับจากยีนที่ทุกสายพันธุ์ยังมีชีวิตอยู่ยังแบกไว้ภายในรูพรุนเหล่านั้น กลไกระดับโมเลกุลอ่านพจนานุกรมคำสามตัวอักษรหกสิบสี่คำอยู่ก่อนแล้ว — โคดอน หน่วยพื้นฐานของรหัสพันธุกรรม แต่ละคำคือสามตัวอักษรของอาร์เอ็นเอหรือดีเอ็นเอที่กำหนดกรดอะมิโนหนึ่งชนิดหรือสัญญาณหยุด — แล้วแปลออกมาเป็นโปรตีนที่สร้างทายาททุกตัวของมัน พจนานุกรมเล่มนั้นไม่เปลี่ยนอีกเลยนับแต่นั้น มันยังทำงานอยู่ คำต่อคำ ในทุกรากไม้ ทุกแนวปะการัง ทุกมือที่เคยพลิกหน้าหนังสือ

Francis Crick ให้คำตอบคลาสสิกไว้ในปี 1968 ในวารสาร *Journal of Molecular Biology* ต่อคำถามที่ว่าพจนานุกรมไร้เหตุผลชัดเจนเล่มนี้ถูกใช้ทั่วทุกหนแห่งได้อย่างไร แล้วหยุดเปลี่ยนไปเลย ๆ คำถามนั้นเป็นปริศนาในตัวมันเอง ตรรกะของ Crick เป็นกลไกล้วน ๆ และเรียบง่าย เมื่อโปรตีนในเซลล์มากพอพึงพาข้อตกลงว่าโคดอนตัวหนึ่งแทนกรดอะมิโนชนิดหนึ่งโดยเฉพาะ ใครเปลี่ยนความหมายนั้นย่อมทำลายโปรตีนทุกตัวที่สร้างขึ้นบนนิยามเดิมไปแล้ว เหมือนเปลี่ยนความหมายของคำสามัญ คำหนึ่งหลังพิมพ์หนังสือไปแล้วนับล้านหน้าด้วยความหมายเก่า ตามขอบ ๆ การปรับแต่งเล็กน้อยที่ไม่กระทบอะไรยังเกิดขึ้นได้ แต่รู้ความหมายทั้งระบบทำไม่ได้ เพราะมันพังกลไกร่วมกันที่เดียวมากเกินกว่าจะรอด Crick เรียกสิ่งนี้ว่าอุบัติเหตุที่แข็งตัว (frozen accident) และมันยังเป็นคำอธิบายตั้งต้นที่ทฤษฎีคู่แข่งทุกทฤษฎีต้องโต้แย้งให้ได้

อุบัติเหตุที่แข็งตัวอธิบายได้แค่ว่าทำไมรหัสจึงหยุดเปลี่ยน มันไม่ได้อธิบายว่าทำไมรหัสจึงแข็งตัวลงในรูปทรงเฉพาะแบบที่เห็น เหตุใดโคดอนที่คล้ายกันจึงมักกำหนดกรดอะมิโนที่มีคุณสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกัน แทนที่จะกระจายแบบสุ่ม แนวคิดสามข้อที่ตามมาภายหลังแข่งกันเติมช่องว่างนี้ ไม่มีข้อใดผลักอุบัติเหตุที่แข็งตัวออกจากวงการ

ได้ บทปริทัศน์สมัยใหม่ก็อ่านทั้งสี่แนวคิดเป็นชั้นที่ซ้อนทับกัน ไม่ใช่คู่แข่งที่ต้องเหลือผู้ชนะเพียงหนึ่งเดียว

แนวคิดแรกวางรหัสไว้บนเส้นทางการสังเคราะห์ทางชีวภาพ J. Tze-Fei Wong เสนอไว้ในปี 1975 และยืนยันซ้ำในบทปริทัศน์ของเขาเองสามสิบปีให้หลังว่า การกำหนดโคดอนเดินตามเส้นทางที่สร้างกรดอะมิโนแต่ละชนิดขึ้นมา กรดอะมิโนที่แปรรูปทางเคมีมาจากกันและกันมักใช้โคดอนที่เกี่ยวข้องกัน — แอสพาร์เตตเปลี่ยนเป็นแอสพาราจีนผ่านเส้นทางเคมีสั้น ๆ เป็นตัวอย่างหนึ่ง — รวากับรหัสขยายตัวออกไปที่ละก้าวพร้อมกับการคิดค้นวิธีผลิตกรดอะมิโนแต่ละชนิด ชนิดง่ายมาก่อน ชนิดซับซ้อนตามมาทีหลัง และลำดับทั้งหมดจบลงก่อนบรรพบุรุษร่วมสุดท้ายจะถือกำเนิดขึ้นด้วยซ้ำ การวิเคราะห์ซ้ำใน PNAS ในเวลาต่อมาได้กลับอย่างหนัก โดยชี้ว่ารูปแบบนั้นอาจเป็นเพียงผลพลอยได้จากการที่กรดอะมิโนคล้ายกันทางเคมีอยู่แล้ว ไม่ใช่หลักฐานแท้จริงของประวัติการสังเคราะห์ทางชีวภาพ ข้อโต้แย้งนี้ถูกจัดไว้ได้หัวข้อตรงไปตรงมาว่า "ข้อเท็จจริงหรือสิ่งประดิษฐ์" (fact or artifact) มีการประเมินครั้งหนึ่งในเวลาต่อมาที่พยายามชี้แจงน้ำหนักทฤษฎีเชิงปรับตัวเหล่านี้กันเอง ให้คำอธิบายทางสถิติสัมพันธ์ของการสังเคราะห์ทางชีวภาพ การลดข้อผิดพลาด และรูปร่างทางเคมี ไว้ที่ประมาณสี่สิบล้านต่อสิบล้านต่อหนึ่ง ตามการคำนวณนั้น การสังเคราะห์ทางชีวภาพรับงานอธิบายไว้เกือบทั้งหมด แม้การเปรียบเทียบนี้เองยังเป็นที่ถกเถียงอยู่

แนวคิดที่สองทดสอบได้ง่ายกว่า และมันจบลงที่ข้อบทความที่จำได้ติดหู "รหัสพันธุกรรมคือหนึ่งในล้าน" (The genetic code is one in a million) — Stephen Freeland กับ Laurence Hurst เสนอไว้ในปี 1998 Freeland และ Hurst สร้างรหัสพันธุกรรมทางเลือกด้วยคอมพิวเตอร์เป็นจำนวนมหาศาล แล้วให้คะแนนทุกแบบ รวมทั้งรหัสจริงด้วย ตามความเสียหายที่การอ่านผิดเพียงครั้งเดียวจะก่อขึ้น โคดอนของกรดอะมิโนที่มีคุณสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกันอยู่ติดกันในตารางจริง ตัวอักษรที่ผิดจึงมักแทนที่ด้วยกรดอะมิโนที่รูปร่างใกล้เคียงกัน ไม่ใช่ตัวที่ต่างกันคนละชั่ว ความเสียหายจากการอ่านรหัสผิดและจากการกลายพันธุ์ตามปกติจึงเบาลง รหัสจริงเอาชนะคู่แข่งที่สู้ขึ้นมาได้เกือบทั้งหมด เหลือคู่แข่งที่ทำได้ดีกว่าเพียงระหว่างหนึ่งในหมื่นถึงหนึ่งในล้าน ขึ้นอยู่กับว่าถ่วงน้ำหนักข้อผิดพลาดแบบไหน ตารางที่เกิดขึ้นโดยพลการไม่มีการลายเซ็นแบบนี้ มันอ่านได้เหมือนรหัสที่ถูกการคัดเลือกโดยธรรมชาติเล็มไว้ก่อนแล้ว ก่อนที่มันจะแข่งตัวเสียอีก

แนวคิดที่สามย้อนไปไกลกว่าชีววิทยาเองเสียอีก Michael Yarus ร่วมกับ Jeff Widmann และ Rob Knight เสนอว่าการกำหนดโคดอนบางส่วนเก็บรักษาการจับมือทางเคมีโดยตรงระหว่างสามตัวอักษรอาร์เอ็นเอกับกรดอะมิโนที่มันเข้ารหัสเอาไว้ ไม่ต้องมีกลไกโปรตีนเข้ามาเกี่ยวข้องเลย มีแต่เคมีล้วน ๆ นักวิจัยตกชั้นส่วนอาร์เอ็นเอล้วน ๆ ขึ้นมาจากหลอตทดลอง โดยเลือกจากความสามารถจับกรดอะมิโนชนิดหนึ่งโดยเฉพาะเท่านั้น การทดลองไม่ได้ใส่ข้อมูลเรื่องรหัสพันธุกรรมลงไปเลย ผลที่ออกมากลับพบลำดับโคดอนหรือแอนติโคดอนของกรดอะมิโนชนิดเดียวกันนั้นหนาแน่นเกินกว่าโอกาสสุ่มจะทำนายได้มาก ผลลัพธ์เหล่านี้ตีพิมพ์ในปี 2009 รูปแบบนี้เป็นจริงกับการกรดอะมิโนเจ็ดชนิดจากยี่สิบชนิด ได้แก่ อาร์จินีน ทรีปโตเฟน ฮิสทิดีน ไทโรซีน ไอโซลิวซีน ลิวซีน และฟีนิลอะลานีน David Johnson และ Lei Wang พบเสียงสะท้อนของลายนิ้วมือทางเคมีแบบเดียวกันนี้ในปี 2010 ฝังอยู่ในโครงสร้างของไรโบโซมยุคปัจจุบันเอง เจ็ดจากยี่สิบคือสัญญาณที่มีอยู่จริง แต่ไม่ใช่เรื่องราวทั้งหมด และนักทฤษฎีวิวัฒนาการร่วมยังยืนยันว่าการสังเคราะห์ทางชีวภาพอธิบายตารางโดยรวมได้มากกว่า

ข้อยกเว้นที่ยืนยันการแข่งตัว

ฉบับที่แตกต่างไปจากพจนานุกรมมาตรฐานไม่ได้กระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วต้นไม้แห่งชีวิต ถ้ารหัสยี่สิบไหนมาจนถึงปัจจุบันจริง ๆ มันควรกระจายฐานข้อมูลอนุกรมวิธานของ NCBI ที่ Andrzej Elzanowski และ Jim Ostell รวบรวมไว้ และปรับปรุงล่าสุดเมื่อเดือนกันยายน 2024 บันทึกตารางรหัสพันธุกรรมที่มีชื่อเรียกแยกจากกันไว้สามสิบสามตาราง ทุกตารางคือการเบี่ยงเบนที่มีบันทึกยืนยันไว้จริง ไมโทคอนเดรียของสัตว์มีกระดูกสันหลังย้ายโคดอน AGA และ AGG จากอาร์จินีนไปเป็นสัญญาณหยุด และย้าย AUA จากไอโซลิวซีนไปเป็นเมไทโอนีน แบคทีเรีย *Mycoplasma* และ *Spiroplasma* รวมถึงไมโทคอนเดรียของราและโปรโตซัวบางชนิด อ่าน UGA ที่ปกติเป็นสัญญาณหยุด ให้กลายเป็นทรีปโตเฟนแทน เชื้อรา *Candida albicans* และ *Candida auris* อ่าน CUG เป็นเซอรีน ไม่ใช่ลิวซีน ซิลิเอตอย่าง *Oxytricha*, *Tetrahymena* และ *Paramecium* อ่าน UAA และ UAG เป็นกลูตาเมต แทนที่จะหยุดตรงนั้นเลย

ทุกกรณีเหล่านี้เกาะอยู่บนกิ่งแคบ ๆ เพียงกิ่งเดียว — สายไมโทคอนเดรียสายหนึ่ง ซิลิเกตกลุ่มหนึ่ง เชื้อราหนึ่งหรือสองชนิด — ไม่มีกรณีใดอยู่ใกล้รากของต้นไม้เลย รูปแบบแบบนี้บ่งบอกว่าการดัดแปลงเฉพาะจุดเกิดขึ้นทีหลัง บนตารางที่แข็งแกร่งเป็นของแข็งไปแล้ว ไม่ใช่เศษที่หลงเหลือของรหัสที่ยังหาที่ยืนของตัวเองไม่เจอ สายพันธุ์หนึ่งรอดจากการสลับความหมายแบบนั้นได้อย่างไรโดยไม่ทำลายโปรตีนทุกตัวที่มันมี ยังเป็นที่ถกเถียงกันอยู่ ภายใต้ชื่อเรียกอย่างการยึดครองโคดอน (codon capture) และภาวะกำกวมระหว่างกลาง (ambiguous intermediate) แต่ข้อถกเถียงนั้นว่าด้วยกลไกของการแก้ไขในภายหลัง คำถามที่ว่าตารางบรรพบุรุษเองเคยละลายจากการแข็งตัวหรือไม่ ไม่ได้ถูกเปิดขึ้นใหม่ด้วยข้อถกเถียงนั้น

ความเป็นสากลแบบเดียวกันนี้เองคือเหตุผลที่หนักแน่นที่สุดที่ทำให้เชื่อว่า แบคทีเรียอาร์เคีย และยูคาริโอตา สืบทอดมรดกร่วมกันมาชุดเดียว สามโดเมนนี้คือทั้งหมดที่สิ่งมีชีวิตระดับเซลล์แบ่งออกเป็น ทางเลือกอีกทางคือสิ่งประดิษฐ์อิสระสามครั้งที่บังเอิญมาบรรจบกัน รหัสที่ไร้เหตุผลชัดเจนขนาดนี้ไม่ใช่สิ่งที่สายพันธุ์แยกกันสามสายจะคิดขึ้นใหม่แล้วลงเอยเหมือนกันเป๊ะโดยบังเอิญ บรรพบุรุษร่วมที่ตรรกะนี้บ่งชี้มีชื่อเรียกว่า LUCA บรรพบุรุษร่วมสากลสุดท้าย (LUCA)

ในปี 2016 Madeline Weiss, William Martin และเพื่อนร่วมงานที่มหาวิทยาลัย Heinrich Heine เมือง Düsseldorf ลงมือสร้าง LUCA ขึ้นใหม่ว่าแท้จริงแล้วมันคืออะไร ไม่ใช่ด้วยการเดา พวกเขาคัดกรองยีนเข้ารหัสโปรตีน 6.1 ล้านยีนที่ดึงมาจากจีโนมจุลินทรีย์ที่หาลำดับไว้แล้ว จัดเป็นกลุ่มยีนที่เกี่ยวข้องกัน 286,514 กลุ่ม แล้วสืบบย้อน 355 ตระกูลในจำนวนนั้นกลับไปถึง LUCA ได้ด้วยความเชื่อมั่นทางสถิติ — แทบจะเป็นเพียงหนึ่งยีนในพัน สิ่งที่เกิดผลึกออกมาคือสรีรวิทยา ไม่ใช่ภาพเหมือน สิ่งมีชีวิตนั้นไม่ใช่ออกซิเจน อยู่รอดได้ในที่ไม่มีออกซิเจน ใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นพลังงาน ทนความร้อนสูงได้ และตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ผ่านเส้นทางชีวเคมีที่เรียกว่าเส้นทาง Wood-Ljungdahl อยู่ในแหล่งอาศัยแบบปล่องน้ำพุร้อนใต้ทะเล จุลินทรีย์สมัยใหม่ที่เรียกว่าอะซิโตเจน (acetogens) และมีเทนโนเจน (methanogens) ยังเดินเคมีแกนกลางชุดใกล้เคียงกันนี้อยู่จนถึงทุกวันนี้ ที่ปล่องน้ำพุร้อน ในหนองบึง ในลำไส้ ที่ได้ก็ตามที่ออกซิเจนเข้าไปไม่ถึง

บทความของ Weiss และ Martin สร้างสรีรวิทยาขึ้นใหม่ ไม่ได้ให้วันที่ วันที่มาถึงในปี 2024 จาก Edmund Moody แห่งมหาวิทยาลัย Bristol และเพื่อนร่วมงาน พวกเขาสร้างนาฬิกาโมเลกุลขึ้นจากชุดยีนพาราล็อก (paralogous genes) ทำชุดที่แยกจากกัน นาฬิกาโมเลกุลคือเทคนิคที่อ่านความแตกต่างเล็ก ๆ น้อย ๆ ที่สะสมอยู่ระหว่างยีนให้เป็นเหมือนนาฬิกาจับเวลาที่ปรับเทียบกับเหตุการณ์ที่ทราบแน่ชัดมาแล้วอย่างป็นอิสระ ส่วนยีนพาราล็อกคือคู่ยีนภายในจีโนมเดียวกันที่เกิดขึ้นตอนยีนบรรพบุรุษหนึ่งตัวถูกจำลองซ้ำ แล้วสำเนาแต่ละชุดก็ค่อย ๆ เปลี่ยนไปตามทางของตัวเอง เมื่อตรวจสอบไขว้กับบันทึกฟอสซิลจุลินทรีย์และไอโซโทป ผลประมาณการของพวกเขา วาง LUCA ไว้ที่ราว 4.2 พันล้านปีก่อน โดยมีความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ครอบคลุม ช่วง 4.09 ถึง 4.33 พันล้านปี เร็วพอจะไปแตะปลายท้ายของยุครดมชนครั้งใหญ่ ตอนปลาย (Late Heavy Bombardment) ช่วงที่ระบบสุริยะชั้นในยังถูกเศษซากที่หลงเหลือจากการก่อตัวของตัวมันเองพุ่งชนอยู่ วันที่นั้นบ่งชี้บางอย่างที่ไม่สบายใจนัก สิ่งมีชีวิตที่ซับซ้อนทางพันธุกรรมและฝังตัวอยู่ในระบบนิเวศ ไม่ใช่โปรโตเซลล์ขั้นต่ำที่สุด ทำงานอยู่แล้วแทบจะทันทีที่โลกเย็นตัวลงพอจะรองรับมัน วิธีการนี้ไม่ได้ถูกโต้แย้งอย่างจริงจังนัก แต่วันที่ที่มันให้มาเร็วกว่าช่วง 3.5 ถึง 3.8 พันล้านปีที่การประมาณการรุ่นเก่าส่วนใหญ่นิยมใช้อยู่ และช่องว่างนั้นยังคงเป็นข้อถกเถียงที่มีชีวิตอยู่

ข้อแก้ไขหนึ่งสำคัญกว่าวันที่ใด ๆ LUCA แทบจะไม่เคยเป็นสิ่งมีชีวิตเดี่ยวเพียงตัวเดียวเลย ในแบบที่แผนภูมิลำดับวงศ์वादจุดเดียวไว้บนยอด แล้วให้ทุกสิ่งสืบเชื้อสายลงมาจากจุดนั้น Nicolas Glansdorff, Ying Xu และ Bernard Labedan เสนอเรื่องนี้ไว้ในปี 2008 พวกเขาเทียบต้นไม้ยีนข้ามจีโนมที่หาลำดับแล้ว และพบว่าตระกูลยีนต่าง ๆ สืบย้อนกลับไปยังจุดบรรพบุรุษร่วมคนละจุด ไม่บรรจบกันที่ช่วงเวลาเดียว การสร้างขึ้นใหม่ของ Moody ในปี 2024 เอนไปทางเดียวกัน โดยบรรยาย LUCA ว่าเป็นสมาชิกหนึ่งของระบบนิเวศร่วมยุคที่มีปฏิสัมพันธ์กัน ไม่ใช่ผู้ก่อตั้งที่โดดเดี่ยว เหตุที่จุดบรรพบุรุษกระจายคือการถ่ายโอนยีนในแนวนอน (horizontal gene transfer) ยีนส่งผ่านกันไปด้านข้าง ระหว่างเซลล์ที่ไม่ได้เป็นญาติกันแต่มีชีวิตอยู่ในเวลาเดียวกัน ไม่ได้ส่งลงมาตรง ๆ จากพ่อแม่สู่ลูกเพียงทางเดียว ให้มองภาพ LUCA เป็นย่านชุมชนขอบเขตหลวม ๆ ของเซลล์ที่เกี่ยวข้องกันและแลกเปลี่ยนยีนกันไปมา ไม่มีเซลล์ใดเซลล์หนึ่งเป็นตัวแรกโดยเฉพาะ ไม่ใช่เซลล์ดึกดำบรรพ์เดี่ยว ๆ ที่ทายาทของมัน

ภายหลังแยกออกเป็นสามโดเมน หลักฐานวางอยู่ตรงหน้าทุกวันนี้ แบคทีเรียและอาร์เคียไม่ได้แยกชุดเครื่องมือที่สืบทอดมาเหมือนกันทั้งชุด พวกมันแยกขึ้นส่วนที่ต่างกันทับซ้อนกันเพียงบางส่วน แบบที่ลูกพี่ลูกน้องอาจได้รับมรดกของปู่ย่าคนละส่วนกัน ไม่ใช่ชุดที่เหมือนกันทุกประการ

LUCA เก็บบันทึกของพจนานุกรมเล่มนั้นไว้ในโมเลกุลที่เก่าแก่กว่าและเปราะบางกว่าไม่ว่ามันจะเป็นประชากร เป็นย่านชุมชน หรือเป็นเซลล์นับพันที่แลกเปลี่ยนยีนกันโดยใช้พจนานุกรมเล่มเดียวกันที่แข็งแกร่งไปแล้วก็ตาม อาร์เอ็นเอทำหน้าที่นี้มาตั้งแต่ยุคโลกอาร์เอ็นเอ ย้อนขึ้นไปอีกราวสี่พันล้านปีก่อนหน้านั้น อาร์เอ็นเอไม่ได้ถูกสร้างมาให้คงทน ก้าวต่อไปของสายพันธุ์นี้จึงเป็นการหาสิ่งที่แข็งแกร่งกว่ามาเก็บคลังบันทึกแทน

พลิกกลับได้หาก: พบจีโนมที่อยู่ในตำแหน่งฐานรากลึกพอจะมีอายุก่อนแบคทีเรียอาร์เคีย และยูคาริโอตาแยกตัวจากกัน แล้วจีโนมนั้นใช้ตารางโคดอนที่แตกต่างโดยพื้นฐานและไม่เสื่อมสภาพ (non-degenerate) นั่นคือข้อพิสูจน์ว่ารหัสบรรพบุรุษยังคงล้นเหลืออยู่ในยุคของ LUCA เอง ไม่ได้แข็งแกร่งปิดสนิทไปแล้ว

แหล่งข้อมูล

- **1968** · Crick, F.H., "The Origin of the Genetic Code" (reviewed in Koonin & Novozhilov, "Origin and Evolution of the Genetic Code") — [PMC5492144](#)
- **1975** · Wong, J.T., "A Co-Evolution Theory of the Genetic Code" — [PNAS 72\(5\):1909–1912](#)
- **2024** · Elzanowski, A. & Ostell, J. (comp.), "The Genetic Codes" — [NCBI Taxonomy resource](#)
- **2016** · Weiss, M.C. et al., "The physiology and habitat of the last universal common ancestor" — [Nature Microbiology 1:16116](#)
- **2024** · Moody, E.R.R. et al., "The nature of the last universal common ancestor and its impact on the early Earth system" — [Nature Ecology & Evolution](#)
- **2008** · Glansdorff, N., Xu, Y., Labedan, B., "The Last Universal Common Ancestor: emergence, constitution and genetic legacy of an elusive forerunner" — [Biology Direct 3:29, PMC2478661](#)

05. การอัปเดตสู่ดีเอ็นเอ

อาร์เอ็นเอพอกอาวุธที่ใช้ทำร้ายตัวเองมาตั้งแต่กำเนิด ย้อนไปราวสี่พันล้านปีก่อน สายเดี่ยวสายหนึ่งลอยอยู่ในน้ำอุ่นที่เป็นต่างอ่อน ๆ ช่วงเวลานั้นคือช่วงที่โลกอาร์เอ็นเอยังเดินอยู่ และประชากรของ LUCA กำลังประกอบรหัสที่แข็งแกร่งขึ้นจากช่วงสุดท้ายของการเดินทางนี้ ณ จุดหนึ่งบนแกนสันหลังของสายนั้น มีหมู่เคมีเล็ก ๆ เกาะอยู่ คือไฮโดรอกซิล ออกซิเจนหนึ่งอะตอมกับไฮโดรเจนหนึ่งอะตอม ยึดอยู่บนคาร์บอนตัวที่สองของวงแหวนน้ำตาล มันเอื้อมไปโจมตีพันธะที่ยึดแกนสันหลังเส้นนั้นไว้เอง ไม่มีอะไรจากภายนอกมาทำ เคมีของโมเลกุลเองสร้างมันมาแบบนี้ ให้ความร้อนเล็กน้อย ไอออนโลหะที่หลงเข้ามา หรือน้ำที่เป็นต่าง หมู่ไฮโดรอกซิลก็เชือดคอเพื่อนบ้านของมัน อาร์เอ็นเอทุกโมเลกุล ทั้งเมื่อนั้นและตอนนี้ แบกข้อบกพร่องนี้ไว้เป็นอุปกรณ์มาตรฐาน

ดีเอ็นเอกำจัดข้อบกพร่องนั้นที่ต้นตอ น้ำตาลของมันคือไดออกซีไรโบส ขาดหมู่ไฮโดรอกซิลตัวนั้นไปพอดี และนั่นคือความหมายของคำว่า "ดีออกซี" (deoxy) ในชื่อของมัน คือปราศจากออกซิเจนตัวนั้น ไม่มีไฮโดรอกซิล ก็ไม่มีมิดที่กรีดตัวเอง บทปริทัศน์คลาสสิกของ Tomas Lindahl ในปี 1993 วัดผลตอบแทนออกมาเป็นตัวเลข พันธะแกนสันหลังของดีเอ็นเอเสถียรกว่าของอาร์เอ็นเอราวสองร้อยเท่า วัดที่ค่า pH เป็นกลางและความเข้มข้นแมกนีเซียมระดับที่เซลล์สิ่งมีชีวิตใช้งานจริง นี่ไม่ใช่การปรับปรุงเล็กน้อย มันคือเส้นแบ่งระหว่างคลังเก็บที่รักษารูปทรงของตัวเองไว้ได้ตลอดชีวิต กับคลังเก็บที่ทำไม่ได้

ตรรกะที่ตามมาเรียบง่ายและไม่ปรานีใคร สายพันธุ์ใดย้ายคลังเก็บหลักของตนไปอยู่บนโมเลกุลที่แข็งแรงกว่าได้ สายพันธุ์นั้นเจอแกนสันหลังแตกหักเองน้อยลงในแต่ละรุ่น แรงกดดันทางเคมีข้อนี้ตั้งอยู่ตลอดเวลา และเอื้อให้เกิดการเปลี่ยนทันทีที่ชีวเคมีเปิดทางให้ ดีเอ็นเอไม่ได้ลบข้อผิดพลาดในการคัดลอกทิ้ง มันแค่ชะลอการเสื่อมสลายตามธรรมชาติลงพอจะซื้อเวลาระหว่างข้อผิดพลาดสองครั้ง เวลาให้ระบบซ่อมแซมจับความผิดพลาดได้ทัน เวลาให้จีโนมโตขึ้นได้โดยไม่พังลงได้ความเสียหายของตัวเอง การพนันครั้งนี้ยังเห็นได้ทุกวันนี้ในสายพันธุ์หยาบมือหนึ่งที่เลือกจะไม่เปลี่ยน ไข้หวัดใหญ่ ไวรัสโคโรนา และเอชไอวี ยังแบกจีโนมของตนไว้ในรูปอาร์เอ็นเอ และทั้งสาม

จ่ายค่านี้นด้วยอัตราการกลายพันธุ์ที่สูงเกินกว่าจีโนมของเซลล์ที่จะรอดชีวิตอยู่ได้ หากต้องแบกไว้ในโครโมโซมของตัวเอง

เบาะแสที่สองของการเปลี่ยนผ่านเดียวกันนี้ซ่อนอยู่ในตัวอักษรตัวเดียวที่ถูกดัดแปลง ดีเอ็นเอไฮโปไซไทมีน ซึ่งพื้นฐานแล้วคือยูราซิลที่ติดหมู่เมทิลเล็ก ๆ เพิ่มเข้าไป ส่วนอาร์เอ็นเอไฮยูราซิลธรรมดา เหตุผลของมันอ่านได้เหมือนระบบลายเซ็นทางนิติวิทยาศาสตร์ ไฮโปไซน หนึ่งในตัวอักษรพันธุกรรมทั้งสี่ตัว เสื่อมสลายไปเป็นยูราซิลเองตามธรรมชาติ ในอัตราพื้นหลังที่ช้าและสม่ำเสมอ ผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่าดีอะมีเนชัน (deamination) โมเลกุลสูญเสียหมู่ไนโตรเจนและไฮโดรเจนไป แล้วกลายเป็นเบสคนละชนิดไปเลย ถ้าดีเอ็นเอไฮยูราซิลธรรมดาแบบเดียวกับอาร์เอ็นเอ ก็แยกไม่ออกว่าตัวอักษรใดเป็นของแท้ดั้งเดิม ตัวใดเป็นความเสียหายแบบนั้น พอกำหนดให้ตัวอักษรจริงเป็นไฮโปไซแทน ยูราซิลตัวใดก็ตามที่พบบ่งอยู่ในสายดีเอ็นเอก็ถูกอ่านได้เองว่าเป็นความผิดพลาด ไม่ใช่ตัวอักษรที่ชอบธรรม

เซลล์ใช้ประโยชน์จากกลไกเหล่านี้ด้วยกลไกเฉพาะทาง เอนไซม์ของมนุษย์สี่ชนิดที่แยกจากกัน คือ UNG2, SMUG1, TDG และ MBD4 ต่างเป็นยูราซิล-ดีเอ็นเอ ไกลโคซิลเลส (uracil-DNA glycosylase) ผู้ตรวจปฐพีระดับโมเลกุลที่มีหน้าที่เดียว คือจับยูราซิลในตำแหน่งที่ควรเป็นไฮโปไซไทน์ ทั้งสี่ตัวรู้จำแล้วตัดยูราซิลนั้นออก จุดขนวนวงจรตัด-ปะ-ปิดผนึกที่เรียกว่าการซ่อมแซมโดยการตัดฐาน (base-excision repair) บทปริทัศน์ปี 2013 ของ Hans Krokan และ Magnar Bjørås เรียกเส้นทางนี้ว่าได้รับการอนุรักษ์ไว้อย่างสูงตลอดวิวัฒนาการ ไม่มีวันที่ที่เป็นอิสระแนบมากับวลีนั้น แต่การอนุรักษ์ที่ลึกขนาดนี้ ชำมสิ่งมีชีวิตที่ห่างไกลกันทางเครือญาติขนาดนี้ ตามปกติแปลว่าเก่า และเป็นไปได้ว่าย้อนกลับไปถึงช่วงเปลี่ยนผ่านนั่นเอง

ไม่มีเส้นทางทางชีววิทยาใดที่รู้จักกัน สร้างขึ้นส่วนพื้นฐานของดีเอ็นเอขึ้นมาจากศูนย์ได้ เบาะแสที่สามจึงอยู่ในโลกที่สร้างวัตถุดิบของดีเอ็นเอ และบอกอะไรได้มากที่สุด ในสามข้อนี้ เส้นทางเดียวที่รู้จักวิ่งผ่านเอนไซม์ชื่อไรโบนิวคลีโอไทด์รีดักเทส (ribonucleotide reductase) มันหยิบชิ้นส่วนพื้นฐานของอาร์เอ็นเอมา ดึงหมู่ไฮดรอกซิลตัวก่อปัญหาตัวเดียวกันนั้นออก แล้วเปลี่ยนเป็นชิ้นส่วนพื้นฐานของดีเอ็นเอโดยตรง ทุกเซลล์ที่กำลังแบ่งตัวอยู่ในวันนี้ยังสร้างดีเอ็นเอของตนจากชิ้นส่วนอาร์เอ็นเอที่ถูกดัดแปลงทางเคมี ทุกครั้งที่มันแบ่งตัว นั่นไม่ใช่คำอุปมา มันคือชีวเคมีที่กำลัง

เดินอยู่จริงในปัจจุบัน และเป็นบันทึกฟอสซิลที่ซ่อนอยู่ต่อหน้าต่อตา การสังเคราะห์ดีเอ็นเออย่างพึ่งพาเคมีของอาร์เอ็นเอในเชิงกลไก เหมือนที่มันควรจะเป็น หากดีเอ็นเอมาถึงทีหลัง

ประวัติของเอนไซม์ตัวนี้เองตอกย้ำประเด็นเดิม ในปี 1997 Jordi Riera และเพื่อนร่วมงานโคลนและหาลำดับเบสจาก *Pyrococcus furiosus* อาร์เคียที่ชอบความร้อน แล้วพบว่ามันเป็นเอนไซม์คลาส II ที่พึ่งพาอะดีโนซิลโคบาลามิน (adenosylcobalamin) และมีส่วนแทรกอินเทอิน (intein) สองจุด รูปแบบนี้ต่างออกไปในเชิงโครงสร้าง แต่ลำดับกลับคล้ายกันอย่างมากกับเอนไซม์ชนิดเดียวกันอีกสองคลาสที่รู้จักกัน ซึ่งทำงานอยู่ในสิ่งมีชีวิตที่ใช้ออกซิเจนและสิ่งมีชีวิตที่ไม่ใช้ออกซิเจนอย่างเคร่งครัดในปัจจุบัน ปี 2015 Daniel Lundin และเพื่อนร่วมงานสังเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดนี้ขึ้นเป็นเอนไซม์บรรพบุรุษสมมติฐานตัวเดียว ฉายาว่า urRNR แล้วมันแตกแขนงออกเป็นสามคลาสที่ยังแบ่งต้นไม่แห้งชีวิตรอยู่จนถึงทุกวันนี้ คลาส I ในสิ่งมีชีวิตที่หายใจด้วยออกซิเจน คลาส II ในอาร์เคียและแบคทีเรียอย่าง *P. furiosus* คลาส III ในสิ่งมีชีวิตที่ไม่ใช้ออกซิเจนอย่างเคร่งครัด ทีมของ Lundin เองพูดตรง ๆ ว่าไม่เคยมีใครระบุตัวเอนไซม์บรรพบุรุษที่แท้จริงได้เลย และเรียกเป็นปริศนาที่ยังเปิดอยู่ ว่าเอนไซม์ที่สร้างจากอาร์เอ็นเอ หรือไรโบไซม์ (ribozyme) ซึ่งมารับงานที่ปกติปล่อยให้โปรตีน จะจัดการเคมีที่ขับเคลื่อนด้วยอนุโมลอิสระเฉพาะแบบนี้ได้เองโดยไม่มีใครช่วยหรือไม่

วันที่สองชุดนี้ผูกกันเอง โลกอาร์เอ็นเอถูกวางไว้ตามธรรมเนียมที่ราวสี่พันล้านปีก่อน บทปริทัศน์ปี 2015 ของ Paul Higgs และ Niles Lehman เป็นบทสังเคราะห์มาตรฐานสมัยใหม่ในประเด็นนี้ตามที่วงการถกกัน มันรวบรวมพันธุศาสตร์ เปรียบเทียบ การทดลองตัวเร่งปฏิกิริยาไรโบไซม์ และข้อมูลนาฬิกาโมเลกุลเข้าด้วยกันจนได้ตัวเลขนั้น บทบรรณาธิการประกอบของ Lehman เองระบุโดยไม่มีข้อแม้ว่า โลกอาร์เอ็นเอ "อยู่เบื้องหลังเรามาแล้วประมาณสี่พันล้านปี" การเปลี่ยนไปสู่จีโนมแบบดีเอ็นเอ-และ-โปรตีนถูกบีบเข้ามาอยู่ในหน้าต่างแคบเดียวกันนี้ เสร็จโดยพื้นฐานแล้วตั้งแต่ตอนที่ประชากรของ LUCA ใช้รหัสที่แข็งตัวของตนอยู่ ราว 4.2 พันล้านปีก่อน ตามการหาอายุของช่วงก่อนหน้า ส่วนโลกอาร์เอ็นเอเองยืนอยู่นานเท่าใดก่อนการส่งต่อครั้งนั้น ยังเถียงกันไม่จบ ตั้งแต่ราวหนึ่งร้อยล้านปีไปจนถึงนานกว่านั้นมาก

สองโมเลกุล สองหน้าที่

พอดิเอ็นเอ็มอีอยู่เป็นทางเลือก สิ่งมีชีวิตไม่ได้แลกโมเลกุลหนึ่งกับอีกโมเลกุลหนึ่ง แต่ผ่านงานหนึ่งงานออกเป็นสอง ดีเอ็นเอกลายเป็นคลังเก็บถาวร ถูกเก็บไว้เฉย ๆ และคัดลอกก็ต่อเมื่อเซลล์แบ่งตัวเท่านั้น อาร์เอ็นเอกลายเป็นสำเนาใช้งานแบบใช้แล้วทิ้ง ถอดรหัสขึ้นใหม่จากคลังดีเอ็นเอทุกครั้งที่ต้องใช้โปรตีนตัวใดตัวหนึ่งจริง ๆ แล้วก็ถูกสลายและทิ้งไป การแบ่งงานแบบนี้คือแก่นของสิ่งที่นักชีววิทยาโมเลกุลตั้งชื่อในภายหลังว่าหลักความเชื่อกลาง (Central Dogma) ข้อมูลไหลออกจากคลังเก็บที่มั่นคงไปสู่สำเนาใช้งานแบบใช้แล้วทิ้ง ไม่ไหลย้อนกลับ

สารนำสารโดยเฉลี่ยอยู่รอดได้เพียง 6.8 นาทีก่อนจะถูกสลายไป ขนาดของความเป็นของใช้แล้วทิ้งนี้มาจากการวัดโดยตรง ไม่ใช่การสันนิษฐาน การศึกษาทั่วทั้งจีโนมในปี 2003 ติดตามการสลายตัวของสารถอดรหัสอาร์เอ็นเอนำสาร (messenger RNA) ทุกตัวใน *Escherichia coli* แบคทีเรียในลำไส้ที่ใช้งานกันทั่วไป ครอบคลุม 1,036 ยีนและ 329 โอเปרון โอเปרוןคือชุดของยีนที่ถูกอ่านออกมาจากดีเอ็นเอพร้อมกันเป็นหน่วยเดียว เทียบกับคลังเก็บดีเอ็นเอเอง ที่คงอยู่ตลอดอายุขัยทั้งหมดของเซลล์ และถูกคัดลอกอย่างสม่ำเสมอไปยังทายาททุกตัว สองโมเลกุล สองช่วงอายุที่ห่างกันสุดขีด ทำสองงานที่ต่างกันมากในเซลล์เดียวกัน

ทุกวันนี้ไม่มีใครมองการแบ่งแยกนั้นเป็นจุดอ่อน เซลล์ใช้ประโยชน์จากอายุขัยสั้น ๆ ของอาร์เอ็นเอโดยตั้งใจ เปิดและปิดยีนได้เร็ว เพราะสารนำสารระเหยหายไปทันทีที่การผลิตหยุดลง ความเร็วนี้เป็นเหตุผลดั้งเดิมที่ทำให้อาร์เอ็นเออายุสั้นอยู่รอดมาได้ หรือเป็นเพียงมรดกตกทอดจากเคมีของโลกอาร์เอ็นเอที่ภายหลังกลับมีประโยชน์ด้วยเหตุผลคนละเรื่อง คำถามนี้ยังเปิดอยู่ ไม่มีข้อยุติ

ฟอสซิลที่ยังมีชีวิตของการเปลี่ยนผ่านทั้งหมดนี้เดินทางย้อนทิศจากปกติ รีเวิร์สทรานสคริปเทส (reverse transcriptase) คือเอนไซม์ที่อ่านอาร์เอ็นเอแล้วเขียนดีเอ็นเอ ย้อนทางการไหลปกติจากคลังเก็บไปสู่สารนำสาร และมันไม่ใช่ของแปลกที่จำกัดอยู่แค่ในโรโทรไวรัสอย่างเอชไอวี มันโผล่ขึ้นซ้ำแล้วซ้ำเล่า ถูกยืมมาใช้และปรับใช้ใหม่ทั่วทุกโดเมนของสิ่งมีชีวิต ในโรโทรทรานสโพซอนแบบ LINE-1 ช่วงดีเอ็นเอที่เคลื่อนที่ได้และคัดลอก-วางตัวเองผ่านตัวกลางอาร์เอ็นเอ ในเรตรอน (retrotransposons) ของแบคทีเรีย และระบบป้องกันตัวที่เกี่ยวข้องกับ CRISPR ในอินทรอนกลุ่ม II ที่ตัดต่อตัวเองได้ และ

ในยูคาริโอตที่มีโครโมโซมแบบเส้นตรง มันอยู่ในเทโลเมอเรส (telomerase) เอนไซม์ที่สร้างฝากรอบป้องกันปลายโครโมโซมขึ้นมาใหม่

เทโลเมอเรสอาจไม่ได้ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อปลายโครโมโซมเลย การวิเคราะห์เชิงสายวิวัฒนาการที่เผยแพร่เมื่อเดือนตุลาคม 2025 สืบย้อนแกนตัวเร่งปฏิกิริยาของเทโลเมอเรสไปถึงระบบป้องกันไวรัสของแบคทีเรียชนิดหนึ่งโดยเฉพาะ ชื่อว่า DRT10 ระบบนั้นใช้แม่แบบอาร์เอ็นเอชนิดไม่เข้ารหัสโปรตีนเขียนช่วงดีเอ็นเอซ้ำสั้น ๆ อยู่ก่อนแล้ว และคล้ายกันทั้งเชิงโครงสร้างและลำดับ ในวิธีที่แม่แบบอาร์เอ็นเอนั้นกำหนดรูปแบบการเพิ่มซ้ำ นานก่อนที่จะมีปลายโครโมโซมเหลืออยู่ให้ต้องปกป้อง หากข้อค้นพบนี้ผ่านการทบทวนไปได้ รีเวิร์สทรานสคริปชันก็ไม่ได้เกิดมาเพื่อแก้ปัญหาเทโลเมียร์เลยแม้แต่น้อย แต่สืบทอดมาจากชุดเครื่องมือของแบคทีเรียที่เก่าแก่กว่ามาก แล้วถูกนำมาใช้งานใหม่ งานชิ้นนี้ยังเป็นปริศนาและยังไม่ผ่านการทบทวนโดยผู้เชี่ยวชาญอย่างเป็นทางการ จึงกำกับไว้ ณ ที่นี้ว่ายังไม่ยืนยัน หลักฐานจากพรีพริ้นต์ยังไม่ผ่านมาตรฐานเดียวกับแหล่งข้อมูลอื่นในช่วงนี้

เบาะแสทุกข้อเหล่านี้ชี้ไปในทิศทางเดียวกัน ดีเอ็นเออ่านแล้วไม่เหมือนสิ่งที่มาแทนอาร์เอ็นเอ มากเท่ากับเป็นงานซ่อมแซมที่สร้างต่อขึ้นบนอาร์เอ็นเอ มันยังสวมลายนิ้วมือของอาร์เอ็นเอไว้ในวัตถุติดของตัวเอง และในเอนไซม์ที่พาความสัมพันธ์ทั้งหมดเดินย้อนกลับ สิ่งที่ดีเอ็นเอซื้อให้สายพันธุ์นี้คือเวลา คลังเก็บที่รักษารูปทรงของตัวเองได้นานขึ้นระหว่างการคัดลอกแต่ละครั้ง สิ่งที่มีนัยสำคัญไม่ได้คืออ่านตัวเองออกมาเป็นโปรตีนที่ใช้งานได้ งานอ่านนั้นเป็นของกลไกอีกชิ้นหนึ่งที่แยกออกไป เก่าแก่อยู่แล้ว ตั้งแต่ก่อนที่ดีเอ็นเอจะเข้ามารับหน้าที่คลังเก็บ และมันยังทำงานอยู่ แทบไม่เปลี่ยนแปลงเลย ในทุกเซลล์ที่มีชีวิตอยู่

พลิกกลับได้หาก: พบเส้นทางในเซลล์ตามธรรมชาติที่สังเคราะห์ชิ้นส่วนพื้นฐานของดีเอ็นเอขึ้นมาได้โดยตรง ไม่ต้องผ่านสารตั้งต้นอาร์เอ็นเอและไรโบนิวคลีโอไทด์รีดักเทส เส้นทางแบบนั้นทำลายบันทึกฟอสซิลระดับโมเลกุลที่ผูกเคมีของดีเอ็นเอเองไว้กับต้นกำเนิดจากอาร์เอ็นเอ

แหล่งข้อมูล

- **1993** · Lindahl, T., "Instability and decay of the primary structure of DNA" — [Nature 362:709–715](#), PMID 8469282
- **2013** · Krokan, H.E. & Bjørås, M., "Base Excision Repair" — [Cold Spring Harbor Perspectives in Biology 5:a012583](#)
- **2015** · Lundin, D. et al., "The Origin and Evolution of Ribonucleotide Reduction" — [Life 5:604–636](#), PMC4390871
- **2015** · Higgs, P.G. & Lehman, N., "The RNA World: molecular cooperation at the origins of life" — [Nature Reviews Genetics 16:7–17](#)
- **2003** · Selinger, D.W. et al., "Global RNA Half-Life Analysis in Escherichia coli Reveals Positional Patterns of Transcript Degradation" — [Genome Research 13:216–223](#)
- **2025** · (preprint) "Antiviral reverse transcriptases reveal the evolutionary origin of telomerase" — [bioRxiv / PMC12632851](#)

06. เยื่อหุ้มและเครื่องจักร

ทรงกลมกลวงใบแรกไม่ได้ถูกสั่งให้เกิด มันเกิดขึ้นเอง ฉากคือน้ำตื้นที่อุ่น หรือกลุ่มควันจากปล่องน้ำพุร้อนใต้ทะเล เมื่อราวสี่พันล้านปีก่อน โมเลกุลกรดไขมันเบียดกันอยู่ในสารละลาย แต่ละโมเลกุลเป็นสายโซ่คาร์บอนยาว หัวรักน้ำ หางหนีน้ำ พอมันมารวมกันมากพอ มันม้วนตัวเป็นทรงกลมกลวงทันทีโดยธรรมชาติ ไม่มียีนใดสั่งการสิ่งนี้ และยังไม่มีคำสั่งใดยุ่เลยที่จะสั่งมันได้ นี่เป็นเพียงรูปทรงที่เคมีชนิดนี้เลือกเอง เมื่อความเข้มข้นและสถานะแวดล้อมเอื้ออำนวย ทรงกลมกลวงที่ได้ออกมาเรียกว่าเวสิเคิล (vesicle) และมันคือร่างหยาบร่างแรกของ "ข้างใน" ที่แยกออกจาก "ข้างนอก"

เวสิเคิลเหล่านี้เป็นมากกว่าฟองอากาศที่นิ่งเฉย บทสังเคราะห์ปี 2016 ของ Roy Black และ Matthew Blosser สรุปลไว้เช่นนั้น โดยต่อยอดจากงานหลายทศวรรษของผู้บุกเบิกอย่าง Deamer, Luisi, Szostak และ Rasmussen มันสร้างขึ้นจากกรดไขมันสายเดี่ยวยาวราวสิบถึงสิบห้าอะตอมคาร์บอน และประกอบตัวขึ้นได้ในสถานะที่กว้างมาก pH ตั้งแต่ราว 6.5 ไปจนถึง 12 ในน้ำที่เค็มแบบที่เชื่อกันว่ามหาสมุทรยุคแรกเริ่มเป็น มีทั้งโซเดียม แมกนีเซียม และแคลเซียมอยู่ร่วมกัน มันก่อตัวง่ายที่สุดที่ราว 70 องศาเซลเซียส ร้อนจนแสบมือ แต่ไม่ใช่เรื่องแปลกเมื่อเทียบกับแหล่งน้ำพุร้อนใต้ทะเล เมื่อก่อตัวแล้ว มันจับและสะสมวัตถุดิบพื้นฐานของชีววิทยาไว้ในตัวเองอย่างจริงจัง ทั้งตัวอักษรแต่ละตัวที่ประกอบกันเป็นอาร์เอ็นเอ และน้ำตาลอย่างง่าย ส่วนกรดอะมิโนก็เข้าไปด้วย แม้ความแน่นอนในกรณีหลังจะน้อยกว่าเล็กน้อย

ผลของการสะสมความเข้มข้นนี้สำคัญกว่าที่ฟังดู โมเลกุลที่คัดลอกตัวเองได้ซึ่งลอยอยู่ในน้ำเปิดไม่ได้แข่งกับสิ่งใด และไม่ปกป้องสิ่งใดที่มันสร้างขึ้น โมเลกุลข้างเคียงที่มีประโยชน์ลอยหายไปในความกว้างใหญ่ของมหาสมุทร ห่อเคมีชุดเดียวกันนี้ไว้ในเยื่อไขมัน แล้วขอบเขตก็เกิดขึ้นทันที ข้างในกักตุนวัตถุดิบของตัวเองไว้ได้ ข้างนอกเจือจางมันออกไปทันทีที่ไม่ได้ ขอบเขตนั้นทำงานจริงให้เคมีทุกอย่างที่มันห่อหุ้มไว้ นานก่อนจะมียีนสักตัวคอยสร้างมันขึ้นมาโดยตั้งใจ ทุกเซลล์ที่มีชีวิตอยู่ในปัจจุบันยังสวมนาหยาบบางรูปแบบของขอบเขตเดียวกันนั้น นั่นคือเยื่อสองชั้นของไขมัน (lipid bilayer) โมเลกุลไขมันเรียงกันสองชั้น หางชี้เข้าด้านในหนีน้ำ หัวชี้ออกด้านนอกเข้าหาน้ำ เวสิเคิลอย่างง่ายแบบเดียวกันนี้ในห้องทดลองทุกวันนี้ยังห่อหุ้มและปกป้องสาย

อาร์เอ็นเอสั้น ๆ ได้ จำลองขั้นตอนแรกที่มีผู้เสนอไว้เมื่อสี่พันล้านปีก่อนขึ้นมาใหม่ในจานทดลอง

เคมีของขั้นตอนแรกเป็นที่ยุติแล้วและไม่มีข้อโต้แย้ง จำนวนขั้นถัดไปที่มันเดินได้ด้วยตัวเองต่างหากที่ยังไม่ยุติ นักวิจัยยังถกกันว่าเยื่อหุ้มแบบนี้ทำอะไรได้มากเพียงใดโดยลำพัง ไม่มีใครช่วย ก่อนที่ความช่วยเหลือซึ่งเข้ารหัสทางพันธุกรรมจะมาถึงในรูปโปรตีนเยื่อหุ้มที่เซลล์สร้างขึ้นเอง อีกข้อที่ยังถกกันคือกรดอะมิโนเกาะติดเยื่อหุ้มยุคแรกเช่นนี้ได้แน่นเพียงใดโดยเฉพาะ เทียบกับที่นิวคลีโอเบสและน้ำตาลเกาะได้ดีเพียงใด

ปริศนาข้อที่สองคือเยื่อหุ้มชนิดใดเกิดขึ้นก่อน สองโดเมนใหญ่ของสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวในปัจจุบันสร้างเยื่อหุ้มของตนจากชิ้นส่วนที่เป็นภาพสะท้อนกระจกทางเคมีของกันและกัน อาร์เคียใช้สายไฮโดรคาร์บอนแบบแตกกิ่งที่เรียกว่าไอโซพรีนอยด์ (isoprenoids) เชื่อมด้วยพันธะอีเทอร์ที่แข็งแรงเข้ากับแกนกลีเซอรอลรูปแบบภาพสะท้อนกระจกด้านหนึ่ง แบคทีเรียใช้สายกรดไขมันตรง เชื่อมด้วยพันธะเอสเทอร์ที่แตกง่ายกว่า เข้ากับแกนเดียวกันในรูปแบบภาพสะท้อนกระจกด้านตรงข้าม ยูคาริโอตาใช้แบบเดียวกับแบคทีเรีย เพราะรับเคมีของเยื่อหุ้มมาจากบรรพบุรุษคล้ายแบคทีเรีย นักชีววิทยาสันนิษฐานมานานว่าการแยกทางนี้เกิดขึ้นหลัง LUCA เท่านั้น เพราะไม่เคยพบสิ่งมีชีวิตใดคร่อมเคมีทั้งสองแบบไว้พร้อมกันเลย

ในปี 2021 Laura Villanueva, Bas Dutilh และเพื่อนร่วมงานตีกรอบสมมติฐานนั้นให้แคบลง โดยยังไม่ปิดคำถาม พวกเขาพบเส้นทางแบบอาร์เคียสำหรับสร้างไขมันอีเทอร์ครบถ้วนและดูจะทำงานได้จริง ซ่อนอยู่ในจีโนมของแบคทีเรียธรรมดาในซูเปอร์ไพลัม FCB กลุ่มแบคทีเรียขนาดใหญ่กลุ่มนี้ตั้งชื่อตามสามสายพันธุ์สมาชิกของมัน คือ Fibrobacteres, Chlorobi และ Bacteroidetes ยีนที่เกี่ยวข้องเปิดทำงานอยู่ในตัวอย่างจากสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ ไม่ใช่เพียงมีอยู่แล้วเฉยๆ ย้ายยีนแบคทีเรียเหล่านั้นเข้าไปใน E. coli ในห้องทดลอง ก็ได้เซลล์ที่เดินเยื่อหุ้มแบบผสมอย่างแท้จริง เคมีแบบอาร์เคียกับเคมีแบบแบคทีเรียอยู่เคียงกันในผนังเซลล์เดียวกัน ผลนี้ไม่ได้พิสูจน์ว่า LUCA เองมีเยื่อหุ้มแบบผสมสองมือเช่นนั้น ไม่มีสิ่งมีชีวิตใดยืนยันเรื่องนี้โดยตรง แต่มันแสดงให้เห็นว่าเคมีทั้งสองแบบถูกกั้นแยกจากกันน้อยกว่าที่การแบ่งแยกในตำราเรียนบอกไว้มาก

เครื่องจักรที่ไม่เคยเปลี่ยนแปลง

สิ่งที่ทำงานอยู่ในเยื่อหุ้มของ LUCA อ่านรหัสหกลีบสี่ค่าที่แข็งตัวแล้วจากช่วงสองตอนก่อนหน้า และใช้มันสร้างโปรตีนอยู่ก่อนแล้ว เยื่อหุ้มของ LUCA เองจะมีหน้าตาอย่างไรก็ไม่เปลี่ยนข้อนี้ สิ่งนั้นคือไรโบโซม เครื่องจักรระดับโมเลกุลขนาดใหญ่ สร้างขึ้นจากอาร์เอ็นเอเป็นส่วนใหญ่ มีโปรตีนเป็นนักแสดงสมทบ มันรับสายอาร์เอ็นเอนำสารเข้ามา แล้วร้อยเรียงกรดอะมิโนที่ตรงกันต่อกันเป็นสาย ทีละสามตัวอักษร

โครงสร้างเดียวชี้ขาดว่าเครื่องจักรนี้เองคือฟอสซิลที่ยังทำงานอยู่ของโลกอาร์เอ็นเอ ในปี 2000 Poul Nissen, Jeffrey Hansen, Nenad Ban, Peter Moore และ Thomas Steitz ใช้โครงสร้างระดับอะตอมของหน่วยย่อยขนาดใหญ่ของไรโบโซมได้สำเร็จ ความละเอียดอยู่ที่ 2.4 อังสตรอม หน่วยที่เล็กพอจะแยกแยะอะตอมทีละตัวได้ วัสดุที่ใช้มาจาก *Haloarcula marismortui* อาร์เคียที่ชอบเกลือ ผลงานตีพิมพ์เป็นบทความคู่กันสองฉบับในวารสาร Science ฉบับเดียวกัน ทีมของ Ban อธิบายโครงสร้างโดยรวมของหน่วยย่อย ทีมของ Nissen เจาะไปที่บริเวณเร่งปฏิกิริยาโดยตรง ณ จุดที่กรดอะมิโนสองตัวถูกเย็บเข้าด้วยกันพอดี เรียกว่าศูนย์เปปติดีลทรานสเฟอเรส (peptidyl transferase center) ไม่มีโปรตีนตัวใดอยู่ใกล้พอจะแตะต้องปฏิกิริยานั้นได้เลย บริเวณเร่งปฏิกิริยาส่งขึ้นจากโมเลกุลอาร์เอ็นเอสองตัวล้วน ๆ คือ 23S และ 5S ไรโบโซมัลอาร์เอ็นเอ Thomas Cech วิจัยผลงานนี้ในบทวิจารณ์ที่ตีพิมพ์ในฉบับเดียวกัน และสรุปด้วยคำห้าวคำว่า "ไรโบโซมคือไรโบไซม์" (the ribosome is a ribozyme) อาร์เอ็นเอชิ้นหนึ่งทำหน้าที่ที่ปกติสงวนไว้ให้เอนไซม์โปรตีน

นัยของเรื่องนี้ลึก อาร์เอ็นเอต้องเย็บกรดอะมิโนเข้าด้วยกันได้ก่อนที่โปรตีนจะมีอยู่เพื่อทำหน้าที่นั้นด้วยวิธีอื่นใด แกนเร่งปฏิกิริยาของไรโบโซมไม่ใช่คำอุปมาสำหรับโลกอาร์เอ็นเอ มันคือชิ้นส่วนหนึ่งของโลกนั้นที่ยังทำงานอยู่จริง ข้อเท็จจริงเชิงโครงสร้างนี้ไม่เคยถูกโต้แย้งอย่างจริงจังเลยนับตั้งแต่ปี 2000 สิ่งที่ยังศึกษากันอยู่อย่างต่อเนื่องคือไรโบไซม์เช่นนี้ประกอบตัวขึ้นครั้งแรกได้อย่างไรกันแน่ และมันไปได้เปลือกโปรตีนที่ห่อหุ้มรอบตัวมันมาในภายหลังได้อย่างไร

เปลือกนั้นมีประวัติศาสตร์ของตัวเอง และรูปร่างของไรโบโซมดูจะยังจดจำการสร้างมันไว้ ในปี 2009 Konstantin Bokov และ Sergey Steinberg ทำแผนที่รูปแบบการพับตัวภายในของหน่วยย่อยอาร์เอ็นเอไรโบโซมขนาดใหญ่ พวกเขาพบว่ามันเรียง

เป็นชั้น ๆ ซ้อนกันรอบจุดศูนย์กลาง แกนโบรามาอยู่ตรงกลาง แล้วมีเปลือกหุ้มเข้ามาที่
ละชั้นในภายหลัง ไม่ใช่เส้นอาร์เอ็นเอที่พันกันอย่างไร้ระเบียบ ทั้งสองสรุปว่ากำเนิด
ของไรโบโซม "เกิดขึ้นเมื่อเกือบสี่พันล้านปีก่อน" ตัวเลขนี้ได้จากการให้เหตุผลผ่าน
โครงสร้าง ไม่ได้อ่านจากชั้นหินใด ๆ การวิเคราะห์ซ้ำในเวลาต่อมาได้แย้งรายละเอียด
จุดหนึ่ง งานชิ้นนี้ตีพิมพ์ใน Journal of Molecular Evolution ภายใต้ชื่อเรื่อง

"Ancestral Insertions and Expansions of rRNA do not Support an Origin of the
Ribosome in Its Peptidyl Transferase Center" มันตั้งคำถามว่าแกนโบรามาตรง
กับตำแหน่งที่สร้างพันธะเปปไทด์พอดีหรือไม่ โดยไม่ได้ล้มล้างภาพรวมที่เป็นชั้น ๆ
นั้นเลย

การศึกษาแยกต่างหากในปี 2015 โดย Anton Petrov และเพื่อนร่วมงาน สร้างลำดับ
การเติบโตระยะที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นสำหรับระบบแปลรหัสทั้งระบบ แกนอาร์เอ็นเอ
บรรพบุรุษเรียนพบตัวให้ถูกต้องก่อนเป็นอันดับแรก จากนั้นเร่งปฏิกิริยาเคมีได้ จาก
นั้นจับคู่กับหน่วยย่อยที่สอง จากนั้นวิวัฒนาการรวมไปกับคู่หูโปรตีนที่กำลังก่อตัวขึ้น
จากนั้นเดินวงจรถอดรหัสที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงาน และเป็นลำดับสุดท้ายเท่านั้นที่พื้น
ผิวด้านนอกซึ่งเต็มไปด้วยโปรตีนแบบปัจจุบันจึงก่อร่างขึ้น ไรโบโซมทุกตัวที่มีชีวิตอยู่
ยังแบกแกนที่เป็นชั้น ๆ ชุดเดียวกันนี้ไว้ ไรโบโซมของยูคาริโอต ชนิดที่พบในเซลล์ที่มี
นิวเคลียส เพิ่มขึ้นที่ใหม่กว่าเข้ามาอีกสองชั้นเป็นของตัวเอง คือส่วนขยายอาร์เอ็นเอ
ยาวคล้ายหนวด ที่ไม่พบที่ใดอีกในต้นไม้แห่งชีวิต แบบจำลองการสะสมชั้นเช่นนี้มี
หลายแบบและแข่งกันอยู่ในเรื่องลำดับที่แน่นอนของแต่ละชั้น ทิศทางกว้าง ๆ ไม่มีใคร
ขัดแย้งกัน แกนอาร์เอ็นเอโบรามาขนาดเล็ก เติบโตขยายออกไปเป็นเครื่องจักรลูกผสม
ในปัจจุบัน

ขั้นตอนการอ่านทำงานด้วยการแบ่งหน้าที่ระหว่างโมเลกุลสองประเภท ดังที่บท
ปริทัศน์ฉบับครอบคลุมปี 2020 ของ Miguel Angel Rubio Gomez และ Michael
Ibba วางไว้ ทรานสเลชันที่เรียกว่าอะมิโนแอซิล-ทีอาร์เอ็นเอ ซินทีเทส
(aminoacyl-tRNA synthetases) ทำหน้าที่เป็นแม่สื่อระดับโมเลกุล และเป็นทรานสเล
ชันที่ทรานสเลชันเดียวที่สิ่งมีชีวิตทั้งหมดใช้ร่วมกัน มันเชื่อมกรดอะมิโนทั้งยี่สิบชนิดเข้า
กับทรานสเฟออาร์เอ็นเอที่ถูกต้องของแต่ละตัว โมเลกุลตัวปรับนั้นแบกแอนติโคดอน
สามตัวอักษรที่ตรงกันไว้ และเอนไซม์ตรวจการจับคู่แล้วตรวจซ้ำอีกครั้งก่อนปล่อย
ออกไป เมื่อขั้นตอนติดฉลากนี้เสร็จอย่างถูกต้อง ไรโบโซมเองไม่ตรวจสอบเอกลักษณ์

ทางเคมีของกรดอะมิโนซ้ำอีกเลย มันเชื่อการจับคู่สามตัวอักษรระหว่างโคดอนบนสายอาร์เอ็นเอ นำสารกับแอนติโคดอนบนทรานสเฟออาร์เอ็นเอที่เข้ามา แล้วสร้างพันธะขึ้น เรื่องแปลกอยู่ตรงที่เอนไซม์แม่สื่อมีอยู่สองตระกูลที่ไม่เกี่ยวข้องกันเลยในเชิงโครงสร้าง คือคลาส I และคลาส II ตระกูลละสิบเอนไซม์ ทั้งสองวิวัฒนาการขึ้นอย่างเป็นอิสระต่อกันเพื่อทำหน้าที่เดียวกันเป๊ะ เหตุผลของการแยกนี้ยังเป็นคำถามเปิด และมันย้อนกลับไปถึงยุคสร้างรหัสก่อน LUCA จากช่วงสองตอนก่อนหน้านี้

วางสองครึ่งของระบบการอ่านไว้เคียงกัน แล้วเครื่องจักรทั้งตัวก็อ่านได้เหมือนบันทึกฟอสซิลในตัวของมันเอง ครึ่งหนึ่งคือการเร่งปฏิกิริยาด้วยอาร์เอ็นเอล้วน ๆ ที่แกนกลางของไรโบโซม อีกครึ่งคือความแม่นยำที่อาศัยโปรตีนในขั้นตอนติดฉลาก มันคือทหารผ่านศึกจากโลกอาร์เอ็นเอที่สวมเครื่องมือซึ่งสร้างขึ้นโดยโลกโปรตีน โลกที่มันเองมีส่วนช่วยให้ถือกำเนิดขึ้นมา เครื่องจักรตัวเดียวกันนี้ยังทำงานอยู่โดยไม่มีกรดเปลี่ยนแปลงในทุกโดเมนของสิ่งมีชีวิตทุกวันนี้ และยังสามารถได้ในเชิงโครงสร้างลึกลงไปถึงแกนที่เก่าแก่ที่สุดของมัน เครื่องจักรที่จำเพาะเจาะจง เก่าแก่ และแม่นยำขนาดนี้ หากถูกประดิษฐ์ขึ้นอย่างเป็นอิสระถึงสองครั้ง ก็คงเป็นเรื่องบังเอิญที่ไม่มีใครศึกษาเรื่องนี้เคยจำเป็นต้องอ้างถึงเลย ไรโบโซมจึงเป็นข้อโต้แย้งสำหรับบรรพบุรุษร่วมเพียงหนึ่งเดียวที่หนักแน่นยิ่งกว่าตารางโคดอนที่แข็งตัวเพียงอย่างเดียวเสียอีก

เมื่อราวสี่พันล้านปีก่อน บวกไปตามขอบเขตปกติ ขึ้นส่วนสำคัญอยู่ครบแล้ว เยื่อหุ้มที่แยกตัวตนออกจากโลกภายนอก รหัสที่แข็งตัวไว้ใช้เขียนโปรตีน เครื่องจักรที่เก่าแก่พอจะจดจำการอ่านรหัสแรกสุดนั้นได้ สิ่งที่ยังไม่มีคือขนาด ต้องมีอะไรสักอย่างทำให้พลังงานมีมากพอจะสร้างเซลล์ที่ใหญ่กว่าเดิมมากจากชิ้นส่วนเก่าแก่ชุดเดียวกันนี้ สิ่งนั้นมาถึงในลำดับถัดไป เมื่อเซลล์หนึ่งทำสิ่งที่แปลกประหลาดยิ่งกว่าการคิดค้นโมเลกุลใหม่ใด ๆ มันกลืนกินเซลล์อีกเซลล์หนึ่งเข้าไปทั้งตัว แล้วเก็บมันไว้

พลิกกลับได้หาก: พบไรโบโซมในสายพันธุ์ใดก็ตามที่มีศูนย์เบตติลทรานสเฟอเรส สร้างขึ้นจากโปรตีนแทนที่จะเป็นอาร์เอ็นเอ ผลเช่นนั้นจะทำให้ลายข้อกล่าวอ้างที่ว่า การเร่งปฏิกิริยาสร้างพันธะเปปไทด์เป็นร่องรอยสากลที่สืบทอดมาจากโลกอาร์เอ็นเอ

แหล่งข้อมูล

- **2016** · Black, R.A. & Blosser, M.C., "A Self-Assembled Aggregate Composed of a Fatty Acid Membrane and the Building Blocks of Biological Polymers Provides a First Step in the Emergence of Protocells" — [Life 6:33](#)
- **2021** · Villanueva, L. et al., "Bridging the membrane lipid divide: bacteria of the FCB group superphylum have the potential to synthesize archaeal ether lipids" — [The ISME Journal 15:168–182](#)
- **2000** · Nissen, P., Hansen, J., Ban, N., Moore, P.B., Steitz, T.A., "The structural basis of ribosome activity in peptide bond synthesis" — [Science 289:920–930](#), [PMID 10937990](#)
- **2009** · Bokov, K. & Steinberg, S.V., "A hierarchical model for evolution of 23S ribosomal RNA" — [Nature 457:977–980](#)
- **2015** · Petrov, A.S. et al., "History of the Ribosome and the Origin of Translation" — [PNAS 112:15396–15401](#), [PMID 26621738](#)
- **2020** · Rubio Gomez, M.A. & Ibba, M., "Aminoacyl-tRNA synthetases" — [RNA 26:910–936](#), [PMC7373986](#)

07. การรวมตัวครั้งยิ่งใหญ่

บางสิ่งรวมตัวกันเมื่อราว 2.2 พันล้านปีก่อน และสิ่งนั้นยังทำงานอยู่จนถึงวันนี้ ภายในหัวใจที่เต้นอยู่ของมนุษย์ ที่เกิดเรื่องคือมหาสมุทรใต้แสงอาทิตย์ที่ยังจางกว่าทุกวันนี้ ใต้ท้องฟ้าที่กำลังปรับตัวเข้ากับออกซิเจนปริมาณใหม่ ยุคนั้นคือ Paleoproterozoic บทเปิดของประวัติศาสตร์มหายุค Proterozoic ของโลก ห่างจากตอนที่ LUCA บรรพบุรุษร่วมสกุลสุดท้ายของสิ่งมีชีวิต ปรากฏตัวครั้งแรกมาแล้วราวสองพันล้านปี ยังไม่มีสิ่งใดมีดวงตา ยังไม่มีสิ่งใดมีเส้นประสาทแม้แต่เส้นเดียว สิ่งที่เกิดขึ้นในมหาสมุทรแห่งนั้นเล็กกว่าเซลล์หนึ่งสังเกตเห็นอีกเซลล์หนึ่งเสียอีก แต่กลับใหญ่กว่าแทบทุกอย่างที่ตามมาภายหลัง

ไม่มีฟอสซิลบันทึกช่วงเวลานั้นไว้เลย เซลล์ที่เล็กและเก่าแก่ขนาดนั้นแทบไม่เคยทิ้งรูปร่างไว้ให้ดู ภาพเหตุการณ์จึงมีคำอธิบายคู่แข่งสองแบบ แบบแรก เซลล์เจ้าบ้านที่ใหญ่กว่ากลืนแบคทีเรียตัวเล็กเข้าไปทั้งตัวผ่านกระบวนการที่เรียกว่าฟาโกไซโทซิส หรือ "การกินเซลล์" แล้วไม่ย่อยเหยื่อนั้น แต่เก็บมันไว้ให้มีชีวิตอยู่ในร่างของตนอย่างถาวร แบบที่สองเรียกว่าสมมติฐานไฮโดรเจน และในแบบนี้ไม่มีการชุ่มโถมตีใดเลย อาร์เคียตัวหนึ่งซึ่งอยู่รอดได้ด้วยการกินก๊าซไฮโดรเจนเท่านั้น เข้าไปตั้งถิ่นฐานถาวรเคียงข้างแบคทีเรียที่ปล่อยไฮโดรเจนออกมาเป็นของเสียจากการหายใจของมันเอง อาร์เคียคือหนึ่งในสามโดเมนใหญ่ของสิ่งมีชีวิต เคียงข้างแบคทีเรียและเซลล์ที่ซับซ้อนกว่าที่จะตามมาทีหลัง ทั้งสองฝ่ายพึ่งพากันแน่นแฟ้นขึ้นเรื่อยๆ จนการแยกจากกันไม่ใช่ทางเลือกอีกต่อไป William F. Martin และ Miklós Müller เสนอแนวคิดไฮโดรเจนนี้ในปี 1998 โดยโต้แย้งว่ากาว่าที่เชื่อมสิ่งมีชีวิตทั้งสองไว้ด้วยกันตั้งแต่แรกเริ่มคือความพึ่งพากันด้านพลังงาน ไม่ใช่การล่าเหยื่อ แนวคิดนี้ยังแข่งขันอยู่กับเรื่องเล่าแบบการล่าเหยื่อดั้งเดิม และกับแนวคิดที่สามที่ว่าความสัมพันธ์นี้เริ่มต้นขึ้นเพื่อป้องกันพิษจากออกซิเจน ยังไม่มีคำอธิบายใดได้รับการยอมรับเป็นเอกฉันท์

แนวคิดโดยรวมนี้มีชื่อเรียกและมีผู้บุกเบิกในยุคใหม่ ไม่ว่าจากใดจะใกล้เคียงความจริงมากกว่ากัน เอนโดซิมไบโอซิส (Endosymbiosis) แปลตรงตัวว่าการอยู่ร่วมกัน คือเซลล์หนึ่งอาศัยอยู่ในอีกเซลล์หนึ่งอย่างถาวร ทฤษฎีเอนโดซิมไบโอซิสแบบต่อเนื่อง (serial endosymbiotic theory) เสนอว่าไมโทคอนเดรีย (ส่วนประกอบที่ผลิต

พลังงานให้เซลล์นำไปใช้ได้) พลาสติด (ส่วนประกอบที่ทำหน้าที่สังเคราะห์แสงในเซลล์พืชและสาหร่าย) และแฟลเจลลัมรูปแส้ ล้วนเริ่มต้นจากแบคทีเรียที่เคยดำรงชีวิตอิสระ ก่อนถูกเซลล์เจ้าบ้านรับเข้าไปและเก็บรักษาไว้ ข้อเสนอเรื่องแฟลเจลลัม นั้นคาดเดามากกว่าอีกสองข้อ นักชีววิทยา Lynn Margulis เป็นผู้ปะติดปะต่อทฤษฎีนี้ จนได้รับการยอมรับทางวิทยาศาสตร์ เธอตีพิมพ์งานชิ้นนี้ในปี 1967 ภายใต้ชื่อที่ใช้ในตอนนั้นคือ Lynn Sagan เธอต่อยอดจากแนวคิดเรื่องการอยู่ร่วมกันภายในเซลล์ ที่ Mereschkowski และ Wallin เคยเสนอไว้ตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ยี่สิบ บทความของเธอ ไม่มีการทดลองใหม่แม้แต่ชิ้นเดียว มันเป็นงานสังเคราะห์ ประกอบขึ้นจากหลักฐาน เดิมแล้วชี้ไปในทิศทางใหม่ วารสารกล่าวถึงฉบับปฏิเสศต้นฉบับนี้ ก่อนที่ Journal of Theoretical Biology จะยอมตีพิมพ์ในที่สุด

กาลเวลาคัดข้อเสนอของเธอออกเป็นสองกองที่ต่างกันสุดขั้ว ส่วนที่ว่าด้วย ไมโทคอนเดรียและพลาสติดเป็นวิทยาศาสตร์กระแสหลักไปแล้ว ยอมรับกันทั่วทั้ง วงการชีววิทยาเซลล์ หลักฐานคือเซลล์ยูคาริโอตทุกเซลล์ที่ยังคงมีไมโทคอนเดรียอยู่ (ยูคาริโอตคือเซลล์ที่มีนิวเคลียสและช่องภายใน โครงสร้างเดียวกันที่พบตั้งแต่ยีสต์ไป จนถึงวาฬ) และยูคาริโอตสังเคราะห์แสงทุกชนิดที่ยังคงมีพลาสติดสีเขียวมาจากรูบไป อีกทางหนึ่ง แนวคิดนั้นบอกว่าทางรูปแส้ที่เซลล์บางชนิดใช้ว่ายน้ำก็เริ่มต้นจาก แบคทีเรียที่ถูกจับกินเช่นกัน คราวนี้เป็นสไปโรไทร์รูปเกลียวสวยงาม มันไม่เคยได้รับแรง สนับสนุนในระดับเดียวกัน เพราะไม่มีใครพบหลักฐานทางจีโนมที่หนักแน่นอย่างที่พบ ในกรณีไมโทคอนเดรีย ทฤษฎีหนึ่งถูกต้องเพียงครั้งเดียวก็น่าแปลกใจทั้งสาขาวิชาได้

Margulis ไม่เคยกำหนดช่วงเวลาของเรื่องนี้เลย ข้อโต้แย้งของเธอว่าด้วยกลไก ไม่ใช่ เรื่องเวลา ตัวเลขปีมาถึงในอีกหลายทศวรรษต่อมา จากงานวิจัยที่นำโดย Paschalia Kapli, Davide Pisani และ Philip C. J. Donoghue แห่ง Bristol Palaeobiology Group ตีพิมพ์ในวารสาร Nature เผยแพร่ออนไลน์ในเดือนธันวาคม 2025 และตี พิมพ์ฉบับพิมพ์ในปี 2026 วิธีของพวกเขาคือนาฬิกาโมเลกุล ซึ่งมองการกลายพันธุ์ เป็นเสมือนจังหวะเมโทรโนม ยืนยันความเปลี่ยนแปลงในอัตราที่ค่อนข้างคงที่ เทียบดูว่ายีนสองชุดต่างกันมากเพียงใด ก็ประมาณได้ว่ามันแยกออกจากต้นแบบร่วม เมื่อใด ทีมวิจัยสร้างแผนภูมิสายวิวัฒนาการที่ระบุช่วงเวลาของยีนแต่ละตัวรวม 135 ต้น เป็นยีนที่มีรากฐานในอาร์เคีย 95 ต้น และมีรากฐานในแบคทีเรีย 40 ต้น แล้วนำไป

ซ้อนทับบนแผนภูมิหลักของยีนบ่งชี้ 62 ยีน จากนั้นเปรียบเทียบโครงสร้างทั้งหมดด้วย ฟอสซิลอิสระ 18 ชิ้น

สิ่งที่ปรากฏออกมาเรียงเรียงเรื่องราวเสียใหม่ทั้งหมด สายพันธุ์เจ้าบ้านที่งานวิจัยนี้ เรียกว่า nFECA (nuclear first eukaryotic common ancestor ตามศัพท์ของพวกเขาเอง) แยกตัวออกจากอาร์เคียกลุ่ม Asgard ญาติสนิทที่สุดที่ยังหลงเหลืออยู่ เมื่อราว 3.05 ถึง 2.79 พันล้านปีก่อน จุดสำคัญอยู่ตรงนี้ เจ้าบ้านตัวนี้สร้างโครงร่างภายใน (ไซโทสเกเลตอน) ช่องเยื่อหุ้มภายใน (ระบบเอนโดเมมเบรน) และกลไกกลืนกินแบบฟาโกไซโทซิสขึ้นมาสำเร็จแล้ว ก่อนที่มันจะได้ไมโทคอนเดรียมาด้วยซ้ำ บรรพบุรุษไมโทคอนเดรีย หรือ mFECA (mitochondrial first eukaryotic common ancestor) แยกตัวออกจากญาติสนิทที่สุดของมันทีหลัง ญาติกลุ่มนั้นคือตระกูลแบคทีเรียขนาดใหญ่ที่เรียกว่า Alphaproteobacteria และการแยกเกิดขึ้นเมื่อราว 2.37 ถึง 2.13 พันล้านปีก่อน ยีน TIM14 และ TIM44 ทำสำเนาตัวเองในแบบที่ผูกกับการนำโปรตีนเข้าสู่ไมโทคอนเดรียโดยเฉพาะ ยีนสองตัวนี้ทำหน้าที่เป็นผู้เฝ้าประตูระดับโมเลกุล ปลดปล่อยโปรตีนผ่านเยื่อหุ้มชั้นในของไมโทคอนเดรียเข้าไปได้ และสำเนาเหล่านั้นผลิตค่าประมาณจุดเริ่มต้นของการรวมตัวมาอยู่ที่ราว 2.2 พันล้านปีก่อน ต่อเมื่อการรวมตัวถูกดัดแปลงจนกลายเป็นเซลล์เดียวที่ทำงานสมบูรณ์แล้วเท่านั้น LECA บรรพบุรุษร่วมสกุลสุดท้ายของยูคาริโอต จึงแผ่ขยายออกเป็นสายพันธุ์ต่างๆ ที่จะกลายมาเป็นพืช สัตว์ เชื้อรา และไพรทิสต์ทุกชนิดที่มีชีวิตอยู่ในปัจจุบัน ระหว่าง 1.80 ถึง 1.67 พันล้านปีก่อน

ญาติที่ยังมีชีวิตอยู่ของทั้งสองฝ่ายในการรวมตัวนี้ยังคงหลงเหลืออยู่จริง อาร์เคียกลุ่ม Asgard ซึ่งรวมถึง Lokiarchaeota และ Heimdallarchaeia ที่ตั้งชื่อได้เหมาะสม คือเครือญาติที่ใกล้ชิดที่สุดของเซลล์เจ้าบ้านโบราณเท่าที่ยังหลงเหลืออยู่ ส่วน Alphaproteobacteria ยังคงเป็นเครือญาติที่ใกล้ชิดที่สุดของชิมแปนซี ไมโทคอนเดรียโบราณ ลำดับเหตุการณ์ที่งานวิจัยนี้สร้างขึ้นใหม่คือเจ้าบ้านที่ซับซ้อนเกิดก่อน แล้วจึงจับแบคทีเรียได้ที่หลัง ลำดับนี้ท้าทายสถานการณ์แบบเดิมที่มองว่าไมโทคอนเดรียมาก่อนโดยตรง ภาพเดิมนั้นจินตนาการว่าอาร์เคียธรรมดาแปลงร่างเป็นสิ่งซับซ้อนก็ต่อเมื่อได้ชิมแปนซีมาแล้วเท่านั้น งานวิจัยปี 2026 แยังภาพเดิมนั้นอย่างชัดเจน แต่ลำดับเวลาที่แม่นยำยังคงเป็นคำถามที่เปิดอยู่ และรากที่ลึกกว่านั้น

ของแผนภูมิวิวัฒนาการอาร์เคีย-แบคทีเรียเองก็ยังไม่เปิดอยู่เช่นกัน บทวิจารณ์ประกอบของ Hua ในวารสารตระกูลเดียวกันอภิปรายเรื่องนี้ไว้

พลังงานเบื้องหลังความซับซ้อน

ตัวเลขปีเหล่านี้ไม่ได้บอกเลยว่าเหตุใดการรวมตัวครั้งนี้จึงสำคัญนัก คำตอบที่ชัดเจนที่สุดมาจาก Nick Lane และ William F. Martin แห่ง University College London และ Heinrich Heine University Düsseldorf ในบทความปี 2010 ในวารสาร Nature ข้อเสนอของพวกเขาว่าด้วยพลังงานชีวภาพ และตั้งอยู่บนความไม่ลงรอยกันทางเรขาคณิต เซลล์สร้างสกุลเงินพลังงานที่ใช้งานได้จริง คือโมเลกุลที่เรียกว่า ATP ขึ้นบนพื้นผิวเยื่อหุ้ม แต่ต้นทุนในการสร้างและดูแลจีโนมที่ใหญ่ขึ้นแปรผันตามปริมาตรทั้งเซลล์ พื้นที่ผิวกับปริมาตรไม่ได้เพิ่มขึ้นในอัตราเดียวกัน พื้นที่ผิวตามหลังเมื่อวัตถุมีขนาดใหญ่ขึ้น แบคทีเรียที่ขยายขนาดจนเท่าเซลล์ซับซ้อนทั่วไปจึงจะขาดแคลนพลังงานเลี้ยงยีนของตัวเองเสียก่อนที่จะไปถึงขนาดนั้น เอนโดซิมไบโอซิสของไมโทคอนเดรียทำลายเพดานข้อจำกัดนั้นลง มันเพิ่มปริมาณเยื่อหุ้มที่ผลิตพลังงานให้อัดแน่นอยู่ในเซลล์เดียว โดยไม่ต้องเพิ่มพื้นที่ผิวด้านนอกของเซลล์นั้นตามไปด้วย Lane และ Martin คำนวณว่าผลลัพธ์ที่ได้คือจำนวนยีนที่เซลล์สามารถเปิดใช้งานไว้ได้เพิ่มขึ้นราวสองแสนเท่า

เรื่องนี้ยังไม่ใช้วิทยาศาสตร์ที่ปิดฉากแล้ว Michael Lynch และ Georgi K. Marinov เรียกกรอบคิดเรื่องพลังงานต่อยีนทั้งหมดนี้ว่าไร้ความหมายทั้งในเชิงนิเวศวิทยาและวิวัฒนาการ พวกเขาแย้งว่าเมื่อคิดคำนวณปริมาตรเซลล์ให้ถูกต้องแล้ว ไมโทคอนเดรียไม่ได้ขยายขีดความสามารถด้านพลังงานชีวภาพของเซลล์เลยแม้แต่น้อย Lane และ Martin ตอบโต้ในปี 2016 ด้วยบทความในวารสาร PNAS ที่ชื่อเรื่องพลิกคำวิจารณ์กลับ โดยมองความซับซ้อนของไมโทคอนเดรียว่าเป็นเสมือนการใช้จ่ายเกินตัวทางวิวัฒนาการ Lynch และ Marinov ตีพิมพ์บทความโต้กลับในปีเดียวกัน ข้อพิพาทนี้ยังคงเปิดกว้างและดำเนินต่อไป กลไกหนึ่งอาจถูกพูดถึงอย่างมั่นใจในวิทยาศาสตร์แพร่หลาย ขณะที่ความเห็นต่างในหมู่ผู้เชี่ยวชาญยังคงคุกรุ่นอยู่เบื้องหลัง

หลักฐานที่ชัดเจนที่สุดซึ่งยังหลงเหลืออยู่ว่าเรื่องทั้งหมดนี้เคยเกิดขึ้นจริง ไม่ใช่ข้อโต้แย้ง แต่เป็นวัตถุ นั่นคือดีเอ็นเอของไมโทคอนเดรีย มันมีขนาดเล็ก เป็นวงกลม และ

มีรูปร่างคล้ายโครโมโซมของแบคทีเรียมากกว่าโครโมโซมยาวที่ขดอยู่ในนิวเคลียสของเซลล์ เหตุผลตรงไปตรงมา โดยแก่นแท้ทุกด้าน มันคือโครโมโซมของแบคทีเรียที่หดตัวลง และไม่เคยถูกดัดกลืนจนเสร็จสมบูรณ์ ในมนุษย์มันยาว 16,569 คู่เบส (ตัวอักษรทางเคมีที่จับคู่กัน คือ A-T และ G-C ซึ่งสะกดคำสั่งของดีเอ็นเอ) และบรรจุยีนไว้เพียง 37 ยีน ได้แก่ 13 ยีนสำหรับโปรตีนที่ใช้ในการหายใจระดับเซลล์ 22 ยีนสำหรับตัวรับ RNA ขนาดเล็กที่เรียกว่า tRNA และ 2 ยีนสำหรับโครงสร้าง RNA ของไรโบโซม ตลอดสองพันล้านปีนับจากวันที่รวมตัวกัน จีโนมดั้งเดิมของแบคทีเรียส่วนใหญ่ย้ายออกจากไมโทคอนเดรียไปอยู่ในนิวเคลียสของเซลล์เอง สิ่งที่ยังหลงเหลืออยู่จึงเป็นนาฬิกาชนิดหนึ่ง ความเล็กของมันบอกคร่าวๆ ว่าเวลาผ่านไปนานเท่าใดแล้วนับตั้งแต่การยึดครองเริ่มต้นขึ้น

แม้แต่คำถามว่าไมโทคอนเดรียใกล้ชิดกับแบคทีเรียกลุ่มใดที่สุด ก็ยังเป็นที่ยกเถียงกันถึงสามทางพร้อมกัน ตัวเต็งดั้งเดิมมานานคือ Rickettsiales วงศ์แบคทีเรียที่รวมถึงจุลชีพต้นเหตุของโรคไข้รากสาดใหญ่และไข้กาฬหลังแอ่น การวิเคราะห์ที่ใหม่ในปี 2022 โดย Sergio A. Muñoz-Gómez และคณะ ให้คำตอบต่างออกไป พวกเขาเปรียบเทียบโปรตีนของไมโทคอนเดรีย 108 ชนิดด้วยแบบจำลองที่ออกแบบมาเพื่อแก้ความคลาดเคลื่อนขององค์ประกอบระหว่างจีโนมที่ห่างไกลกัน แล้วจัดให้ไมโทคอนเดรียเป็นพี่น้องกับ Alphaproteobacteria ทั้งกลุ่ม ไม่ใช่เฉพาะกับ Rickettsiales ส่วน Joran Martijn และคณะ เสนอสิ่งที่แปลกกว่านั้นอีกในปี 2018 สายพันธุ์พี่น้องที่แท้จริงแยกตัวออกไปก่อนหน้านั้นเสียอีก และไม่มีอัลฟาโปรตีโอแบคทีเรียชนิดใดที่เก็บตัวอย่างและถอดรหัสไว้แล้วในปัจจุบันเป็นตัวแทนของมันเลย เป็นญาติที่จนถึงบัดนี้ยังหลบเลี่ยงการค้นพบอยู่ ทั้งสามแนวคิดยังคงมีการกล่าวถึงอยู่ทั้งหมด ข้อถกเถียงขึ้นอยู่กับว่าแต่ละทีมเลือกเก็บตัวอย่างแบคทีเรียอย่างไร และสร้างแบบจำลองรับมือกับสัญญาณรบกวนทางสถิติตลอดสองพันล้านปีอย่างไร

สิ่งที่แน่นอนนั้นเรียบง่ายกว่าทั้งสามแนวคิดข้างต้นมาก การรวมตัวเกิดขึ้นจริง พลังงานกลายเป็นสิ่งที่มีเหลือเฟือภายในเซลล์เดี่ยวเป็นครั้งแรก และเซลล์ซับซ้อนขนาดใหญ่ทุกเซลล์ที่มีชีวิตอยู่ในวันนี้ล้วนสืบเชื้อสายมาจากหุ่นส่วนคู่นั้น ไม่ว่ามันจะเริ่มต้นขึ้นอย่างไรก็ตาม สิ่งที่ตามมาภายหลังยังเกิดขึ้นไม่ได้ในมหาสมุทรยุค Paleoproterozoic นั้น ไม่ว่าจะเป็นความคิด ความรู้สึก หรือสัญญาณที่ส่งจากเซลล์หนึ่งไปยังอีกเซลล์หนึ่งอย่างจงใจ แต่พลังงานที่จะสร้างสิ่งเหล่านั้นได้ปรากฏขึ้นแล้ว

เป็นครั้งแรก อยู่ภายในเซลล์ที่มีพื้นที่มากพอจะใช้มัน โมเลกุลที่วันหนึ่งจะนำพาความรู้สึกได้เริ่มปรากฏตัวขึ้นแล้ว ในเซลล์ที่เรียบง่ายยิ่งกว่าเซลล์นี้เสียอีก และเรื่องราวจะดำเนินต่อไปยังโมเลกุลเหล่านั้น ที่ยังคงมีดบาดและโคตเคียว

พลิกกลับได้หาก: ชุดข้อมูลไฟโลจีโนมิกส์ที่แข็งแกร่งพลิกลำดับเหตุการณ์ที่งานวิจัยเรื่องการทำซ้ำยีนของ Donoghue, Kapli และ Pisani ในปี 2026 รายงานไว้ นั่นคือแสดงให้เห็นว่าบรรพบุรุษไมโทคอนเดรียมาถึงก่อนวิวัฒนาการของไซโทสเกเลตอน ระบบเอนโดเมมเบรน และกลไกฟาโกไซโทซิสของสายพันธุ์เจ้าบ้าน ไม่ใช่มาถึงหลังจากนั้น

แหล่งข้อมูล

- **1967** · Lynn Sagan, "On the Origin of Mitosing Cells" — [Journal of Theoretical Biology](#), via [Embryo Project Encyclopedia](#); ย้อนรอย 50 ปี — [Molecular Biology of the Cell](#)
- **2026** · Donoghue, Kapli, Pisani และคณะ, "Dated gene duplications elucidate the evolutionary assembly of eukaryotes" — [Nature 650](#), 129–140; commentary — Hua, [Nature Genetics 58](#), 13 (2026)
- **2010** · Lane & Martin, "The energetics of genome complexity" — [Nature 467](#), 929–934; rebuttal — Lynch & Marinov, [PNAS 113\(6\):E668–E669 \(2016\)](#)
- **1998** · Martin & Müller, "The hydrogen hypothesis for the first eukaryote" — [Nature 392](#), 37–41
- **2022** · Muñoz-Gómez et al., "Site-and-branch-heterogeneous analyses of an expanded dataset favour mitochondria as sister to known Alphaproteobacteria" — [Nature Ecology & Evolution 6](#), 253–262; mtDNA structure — Anderson et al., [PMC5267354](#)
- **2018** · Martijn et al., "Deep mitochondrial origin outside the sampled alphaproteobacteria" — [Nature 557](#), 101–105

08. ผู้ส่งสารก่อนจะมีจิตใจ

เมลาโทนิทำงานอยู่บนโลกนี้แล้ว ก่อนที่จะมีเซลล์ประสาทแม้แต่เซลล์เดียว บนหาดเลนที่อบอุ่นด้วยแสงแดด เมื่อราวสามพันล้านถึงสองพันห้าร้อยล้านปีก่อน ขณะที่มหาสมุทรเคียนกำลังเปลี่ยนผ่านสู่มหาสมุทรโพรเทอโรโซอิก แผ่นชั้นไซยาโนแบคทีเรียกำลังผลิตยาพิษของตัวเองขึ้นมา ไซยาโนแบคทีเรียคือแบคทีเรียสีเขียวแกมน้ำเงินที่ปล่อยออกซิเจนออกมา และกำลังเปลี่ยนโฉมชั้นบรรยากาศโลกอย่างเงียบๆ พวกมันสังเคราะห์ด้วยแสง เปลี่ยนแสงอาทิตย์ให้เป็นน้ำตาลด้วยกลเม็ดทางเคมี แล้วปล่อยอนุมูลอิสระออกมาเป็นผลพลอยได้ อนุมูลอิสระคือเศษเสี้ยวโมเลกุลที่ไม่เสถียร และทำลายทุกสิ่งที่มีมันสัมผัส เซลล์ทุกเซลล์ในแผ่นชั้นนั้นจึงแช่อยู่ในไอเสียของตัวเอง ภายในเซลล์เหล่านั้นมีโมเลกุลเล็กๆ ตัวหนึ่งเข้าเวรอยู่ก่อนแล้ว คอยล้างความเสียหายก่อนที่มันจะถูกกลืน ชื่อของมันคือเมลาโทนิ ตอนนั้นยังไม่มีสิ่งใดบนโลกเข้าใกล้คำว่า "จิตใจ" เลยด้วยซ้ำ แต่โมเลกุลที่ในเวลาต่อมาจะถูกโยงเข้ากับการนอนหลับและอารมณ์ในสัตว์ กลับทำงานที่เคมีเรียกร้องอย่างเป๊ะๆ อยู่ก่อนหน้านั้นแล้ว มันกวาดล้างอนุมูลอิสระในเซลล์ที่เรียบง่ายเกินกว่าจะฝันถึงสิ่งใด

เคมีแห่งความรู้สึกเก่าแก่กว่าตัวความรู้สึกเอง เซโรโทนิน โดปามีน ฮิสตามีน และเมลาโทนิ มักถูกแนะนำให้รู้จักในฐานะสารสื่อประสาท คือผู้ส่งสารทางเคมีที่เซลล์ประสาทหลั่งออกมาเพื่อส่งสัญญาณข้ามช่องว่างเล็กๆ ที่เรียกว่าไซแนปส์ไปยังเซลล์ข้างเคียง คำอธิบายนั้นถูกต้องสำหรับหน้าที่ของโมเลกุลเหล่านี้ในสัตว์ที่มีระบบประสาท วางลงบนสเกลของกาลเวลาอันลึกล้ำ มันแทบเป็นเพียงเรื่องที่เกิดขึ้นทีหลัง โมเลกุลเหล่านี้ทำงานอย่างอื่นมาก่อน ทั้งงานเมแทบอลิซึม งานป้องกันตัว และงานควบคุมระบบ ทำมาตลอดช่วงยาวนานของประวัติศาสตร์โลก ก่อนที่ระบบประสาทใดจะเกิดขึ้นมาดั่งพวกมันไปใช้ส่งสัญญาณระหว่างเซลล์ประสาท

โครงสร้างโมเลกุลของเมลาโทนิแทบไม่เปลี่ยนแปลงเลยตั้งแต่ไซยาโนแบคทีเรียจนถึงมนุษย์ Russel J. Reiter, Dun Xian Tan, Lucien C. Manchester และคณะที่ UT Health San Antonio อธิบายกรณีนี้ไว้ละเอียดที่สุด โดยสังเคราะห์งานชีวเคมีเปรียบเทียบตลอดปี 2015 ถึง 2016 พวกเขาตั้งข้อสังเกตถึงความคงที่นั้น มันคือฟอสซิลทางเคมีที่ซ่อนตัวอย่างเปิดเผยอยู่ในทุกเซลล์ที่ยังผลิตมันจนถึงวันนี้ ช่วงเวลา

กำเนิดที่พวกเขาเสนอคือราว 3.0 ถึง 2.5 พันล้านปีก่อน ผูกไว้กับเหตุการณ์
ออกซิเดชันครั้งใหญ่เมื่อราว 2.5 ถึง 2.0 พันล้านปีก่อน ตอนนั้นออกซิเจนจากการ
สังเคราะห์แสงเพิ่มสูงขึ้น และน่าจะสร้างแรงกดดันคัดเลือกรุนแรงเป็นครั้งแรกให้กับ
สารต้านอนุมูลอิสระชนิดนี้โดยเฉพาะ ตัวเลขนี้เป็นการอนุมานทางธรณีวิทยา ไม่ใช่
การวัดด้วยนาฬิกาโมเลกุล จึงควรอ่านเป็นลำดับขนาดที่เป็นไปได้ ไม่ใช่ปีที่ผ่านการ
สอบเทียบ ไฮยาโนแบคทีเรียที่ยังมีชีวิตอยู่ทุกวันนี้ก็ยังผลิตเมลานินโดยไม่ผ่าน
ระบบประสาท เพื่อต้านอนุมูลอิสระแบบเดียวกับที่บรรพบุรุษของมันเคยต้องการ และ
มีข้อเสนอว่าวิถีการผลิตนี้เข้าสู่เซลล์ยูคาริโอตมาพร้อมกับเอนโดซิมไบโอซิสของไฮยา
โนแบคทีเรียครั้งเดียวกับที่ให้เกิดพลาสติดในส่วนอื่นของเซลล์

เซโรโทนินและโดปามีนมีบรรพบุรุษร่วมที่ลึกลงไปกว่านั้นอีก และร่องรอยอยู่ที่
เอนไซม์ผู้สร้าง ไม่ใช่ที่ตัวโมเลกุลเอง Tryptophan hydroxylase และ tyrosine
hydroxylase ทำหน้าที่ในขั้นตอนกำหนดอัตราการสร้างเซโรโทนินและโดปามีน ทั้งคู่
อยู่ตระกูลเดียวกับเอนไซม์ตัวที่สามคือ phenylalanine hydroxylase และทั้งหมดจัด
อยู่ในกลุ่ม pterin-dependent hydroxylases (pterin คือโมเลกุลผู้ช่วยขนาดเล็กที่
เอนไซม์ต้องใช้ในปฏิกิริยาเคมี) Linda Skjærven, Knut Teigen และ Aurora
Martinez แห่ง University of Bergen สังเคราะห์ข้อโต้แย้งนี้ไว้ในปี 2014 ต่อยอดจาก
งานทำแผนที่โครโมโซมในปี 1987 ที่วางยีนมนุษย์ของ tryptophan hydroxylase
และ tyrosine hydroxylase ไว้ด้วยกันบนโครโมโซมคู่ที่ 11 แยกจาก phenylalanine
hydroxylase บนโครโมโซมคู่ที่ 12 phenylalanine hydroxylase คือสมาชิกต้น
ตระกูลของกลุ่มนี้ สายวิวัฒนาการของเอนไซม์กลุ่มนี้ในสัตว์ทั้งหมดสืบทอดมาจาก
ตระกูล hydroxylase ที่มีอยู่ก่อนแล้วในโพรคาริโอต ผ่านการทำซ้ำอย่างน้อยสอง
ครั้งและย้ายตำแหน่งโครโมโซมอีกครั้ง โพรคาริโอตคือเซลล์ที่ไม่มีนิวเคลียส
โครงสร้างเรียบง่ายที่แบคทีเรียทุกชนิดใช้ร่วมกัน ทั้งหมดนี้เกิดขึ้นนานมากก่อนที่สัตว์
จะถือกำเนิดขึ้นมาต้องการเซโรโทนินหรือโดปามีนเสียอีก Dictyostelium
discoideum จะมีบางสังคมชนิดหนึ่ง มี hydroxylase เวอร์ชันของตัวเองที่ถูกศึกษา
แยกต่างหาก และยังใช้ช่วยหารากของแผนภูมิตระกูลนี้อยู่จนถึงทุกวันนี้

ยังไม่มีข้อสรุปว่าแบคทีเรียสร้างเซโรโทนินด้วยกลไกที่สืบทอดมานี้จริง หรือเพียงแบก
ยีนหน้าตาคล้ายกันเอาไว้เฉยๆ งานทบทวนวรรณกรรมในปี 2022 นำโดย Luqman,
Blackshaw และ Wei-Cheng Liu สืบหาจีโนมแบคทีเรีย แล้วพบเอนไซม์ที่สร้าง

เซโรโทนินได้ ทั้ง aromatic amino acid hydroxylases และ decarboxylases อยู่ทั่วไป แต่ไม่พบการผลิตเซโรโทนินที่ยืนยันแล้วในสปีชีส์ส่วนใหญ่ที่แบกยีนเหล่านั้น งานทบทวนระบุการตีความที่ตรงไปตรงมาไว้ชัดเจน นี่คือช่องว่างของความรู้ ไม่ใช่คำตอบ แบบที่เรีอาจไปถึงโมเลกุลเดียวกันด้วยเส้นทางเคมีคนละสายที่ไม่เกี่ยวข้องกัน เลย แทนที่จะเดินตามวิถีแบบสัตว์ที่สืบทอดมา สิ่งที่ไม่มีการสงสัยคือ แบบที่เรีในลำไส้บางชนิดที่มีชีวิตอยู่ทุกวันนี้ รวมถึงสปีชีส์ที่สร้างสปอร์และจุลินทรีย์กลุ่ม Akkermansia มีอิทธิพลที่วัดได้ต่อปริมาณเซโรโทนินที่โฮสต์สัตว์ของมันผลิตขึ้น ความเชื่อมโยงเชิงหน้าที่นี้เก่าแก่อย่างน้อยเท่ากับทางเดินอาหารของสัตว์เอง

พืชก็สร้างโดปามีนเช่นกัน และสร้างด้วยเส้นทางต่างกันสองแบบที่ไม่เคยทำงานพร้อมกันในสปีชีส์เดียวกัน เส้นทางหนึ่งไฮดรอกซิเลต tyrosine ให้เป็น L-DOPA ก่อน แล้วจึงดีคาร์บอกซิเลตกลายเป็นโดปามีน เป็นลำดับเดียวกับที่สัตว์ใช้ อีกเส้นทางกลับด้าน ดีคาร์บอกซิเลต tyrosine เป็น tyramine ก่อน แล้วจึงไฮดรอกซิเลตเป็นโดปามีน ด้วยเอนไซม์ที่เรียกว่า polyphenol oxidases พืชแต่ละชนิดเลือกเส้นทางไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับสปีชีส์ การศึกษาในปี 2025 พบว่าหญ้าต้นแบบอย่าง *Brachypodium distachyon* ใช้เส้นทางที่เริ่มจาก tyramine เป็นเส้นทางหลัก Roshchina และคณะ ทบทวนงานวิจัยในวงกว้างเมื่อปี 2020 และรวบรวมหน้าที่ของโดปามีนในพืชไว้ดังนี้ ส่งสัญญาณการเจริญเติบโตและการพัฒนาการ ป้องกันตัวแบบต้านอนุมูลอิสระ และสะสมตัวภายใต้ความเครียดทั้งจากสิ่งมีชีวิตอื่น (การถูกโจมตี) และจากสภาพแวดล้อม (ความร้อน ความแห้งแล้ง ความเค็ม) กล้วย มันฝรั่ง พืชตระกูลถั่วหลายชนิด และ *Brachypodium* คือตัวอย่างที่มีการระบุและศึกษาลักษณะไว้แล้ว ยังไม่มีนาฬิกาโมเลกุลใดกำหนดอายุการสังเคราะห์โดปามีนในพืชได้โดยตรง บรรพบุรุษร่วมของเอนไซม์เหล่านี้กับเวอร์ชันในสัตว์บ่งชี้ว่ามันกำเนิดขึ้นก่อนสายพืชและสายสัตว์แยกทางกัน นั่นเป็นการอนุมานจากความสัมพันธ์ของตระกูลเอนไซม์ ไม่ใช่อายุที่วัดได้

มรดกที่ขาดๆ หายๆ

ฮิสตามีนແຫກກູທີ່ໂມເລກູອີກສາມຕົວວາງໄວ້ ແລະຄວາມຮຽກຮ້ອງແຕກຕ່າງນີ້ໃຫ້ຂັດ ກດ ອະມິໂນຕັນທາງຂອງມັນຄືອີສທິດິນ ຈຸດກຳເນີດຂອງອີສທິດິນເກ່າແກ່ທີ່ສຸດເທົ່າທີ່ຈຸດກຳເນີດຈະເກ່າໄດ້ Marco Fondi, Renato Fani ແລະຄະນະ ອ່ານຈີໂນມິກສ໌ເປຣຶຍບເຕຶຍບຂອງ his

operon ในอาร์เคีย แบคทีเรีย และยูคาริโอตา แล้วสรุปไว้ในปี 2009 ว่าวิถีสร้างฮิสทีดินจากศูนย์น่าจะประกอบสร้างครบสมบูรณ์แล้วก่อน LUCA บรรพบุรุษร่วมสากลสุดท้ายของสิ่งมีชีวิตทั้งหมด เมื่อราว 3.5 ถึง 4 พันล้านปีก่อน ในมหายุคอาร์เคียนหรือก่อนหน้านั้น เหตุผลที่พวกเขาสรุปเช่นนั้นคือวิถีเดียวกันนี้ปรากฏอยู่ในสิ่งมีชีวิตทั้งสามโดเมนแทบไม่ต่างกัน ฮิสตามีนเองกลับเป็นอีกเรื่องหนึ่ง เอนไซม์ที่ดิงหมู่คาร์บอนไดออกไซด์ออกจากฮิสทีดินเพื่อเปลี่ยนเป็นฮิสตามีน เรียกว่าฮิสทีดินดีคาร์บอกซิเลส มันมีอยู่สองตระกูลที่โครงสร้างไม่เกี่ยวข้องกันเลย และวิวัฒนาการขึ้นแยกจากกันโดยอิสระ ตระกูลหนึ่งพึ่งโมเลกุลผู้ช่วยที่เรียกว่า pyridoxal-5'-phosphate พบมากในแบคทีเรียแกรมลบ อีกตระกูลประมวลผลตัวเองได้และพึ่งไพริวอิล พบมากในแบคทีเรียแกรมบวก เช่น แบคทีเรียกรดแล็กติก

ความสามารถในการสร้างฮิสตามีนกระจายและเคลื่อนที่ไปมาทั่วแผนภูมิวิวัฒนาการของแบคทีเรีย ไม่ได้กระจายตัวสม่ำเสมอและเก่าแก่เหมือนวิถีฮิสทีดินที่รองรับมันอยู่เบื้องล่าง หลักฐานที่ชัดเจนที่สุดที่คัดค้านจุดกำเนิดอันลึกลับและสม่ำเสมอของฮิสตามีน มาจากงานวิจัยในปี 2017 ของ Daniel Wüthrich, Hélène Berthoud, Stefan Irmeler และคณะ จาก Agroscope และมหาวิทยาลัยเบิร์น พวกเขาเปรียบเทียบกลุ่มยีนสร้างฮิสตามีนข้ามสายพันธุ์ต่างๆ ของ *Lactobacillus parabuchneri* ยีนเหล่านี้เหมือนกันในระดับนิวคลีโอไทด์เกือบเก้าสิบเก้าเปอร์เซ็นต์กับยีนที่คล้ายกันใน *Lactobacillus* ชนิดอื่นและใน *Oenococcus* ความเหมือนที่สูงขนาดนั้นบ่งชี้ถึงการถ่ายโอนยีนในแนวนอนเมื่อไม่นานมานี้ คือยีนเคลื่อนย้ายข้ามสายพันธุ์กันเอง มากกว่าการถ่ายทอดในแนวตั้งจากพ่อแม่สู่ลูกหลานตลอดหลายพันล้านปี บทเรียนนี้ขยายผลไปได้ไกลกว่ากรณีเดียว มันเตือนไม่ให้ด่วนสรุปว่าเอมีนชีวภาพทุกตัวย่อมเก่าแก่เท่ากับกรดอะมิโนต้นทางของมัน *Lactobacillus parabuchneri*, *Tetragenococcus halophilus* และ *Oenococcus oeni* พบได้ในอาหารหมักดองทุกวันนี้ และเป็นสิ่งมีชีวิตที่ผลิตฮิสตามีนโดยไม่พึ่งระบบประสาทที่ชัดเจนที่สุด พืชสะสมฮิสตามีนได้เมื่อเผชิญความเครียด แต่ดูเหมือนจะไม่มีวิถีฮิสทีดินดีคาร์บอกซิเลสของตัวเองที่ทำงานได้จริง ยีนตัวหนึ่งใน *Arabidopsis* เคยถูกเสนอว่าเป็นฮิสทีดินดีคาร์บอกซิเลสของพืช ภายหลังพิสูจน์ได้ว่าแท้จริงมันเป็นซีรีนดีคาร์บอกซิเลส และไม่มีฤทธิ์ต่อฮิสทีดินเลยแม้แต่น้อย

หลักฐานชิ้นเดียวที่ชัดเจนที่สุดว่าชุดเคมีทั้งหมดนี้มีมาก่อนระบบประสาท มาจากสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวที่แทบไม่มีระบบประสาทให้พูดถึงเลย Gyula Csaba แห่ง Semmelweis University ใช้เวลาหลายทศวรรษศึกษา Tetrahymena และสรุปผลไว้ในปี 2015 Tetrahymena คือซิลิเอตเซลล์เดียวที่ปกคลุมด้วยขนซีเลียคล้ายเส้นผม พบได้ทั่วไปในบ่อน้ำจืด มนัสเกราะห์ เก็บสะสม และหลังชุดสัญญาณเคมีของสัตว์เกือบทั้งหมดในคราวเดียวกัน ทั้งฮิสตามีน เซโรโทนิน อะดรีนาลีน โดปามีน และเมลาโทนิน พร้อมด้วยตำแหน่งจับที่คล้ายกับตัวรับ G-protein-coupled receptors ที่ระบบประสาทของสัตว์ใช้ตรวจจับโมเลกุลกลุ่มเดียวกันนี้เอง เคมีชุดนี้คัมภีร์ของตัวมันเอง ทั้งฟาโกไซโทซิส คือกลืนกินอาหาร การแบ่งเซลล์ การงอกใหม่ของขนซีเลีย เมแทบอลิซึมของกลูโคส และคีโมแทกซิส คือว่ายเข้าหาหรือว่ายหนีสัญญาณเคมี งานทบทวนของ Csaba ชี้ว่าทั้งหมดนี้เกิดขึ้นในสิ่งมีชีวิตที่ห่างจากระบบประสาทใดๆ นับร้อยล้านปี และอยู่คนละอาณาจักรของสิ่งมีชีวิตกันเลยทีเดียว Tetrahymena pyriformis และญาติของมันในกลุ่มที่เรียกว่าซิลิเอต คือสปิชีส์ที่มีชีวิตซึ่งวัดเรื่องนี้ได้โดยตรง ตัวรับเอมีนของพวกมันเป็นโปรตีนบรรพบุรุษตัวเดียวกับที่ระบบประสาทของสัตว์นำไปใช้ในภายหลังจริงหรือไม่ หรือเป็นสิ่งประดิษฐ์คนละชิ้นที่วิวัฒนาการมาบรรจบกัน ยังคงเป็นคำถามเปิด ไม่มีงานวิจัยชิ้นใดชี้ขาดได้

ไม่มีโมเลกุลตัวใดในบรรดานี้เคยสร้าง "ความรู้สึก" ขึ้นมาได้เลยแม้แต่น้อย ตลอดสามพันห้าร้อยล้านปีในแบคทีเรีย พืช และสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว ไฮยาโนแบคทีเรียที่กำลังอดสูระด้วยเมลาโทนินไม่ได้รู้สึกสงบ Lactobacillus ที่กำลังหมักและผลิตฮิสตามีนไม่ได้ตื่นตระหนก Tetrahymena ที่ว่ายทวนกระแสความเข้มข้นของโดปามีนของตัวเองไม่ได้ "ต้องการ" สิ่งใด ไม่ว่าจะเป็นในความหมายใดที่ร่างกายซึ่งมีสมองจะรับรู้ได้ ทุกแห่งที่พบโมเลกุลเหล่านี้ สิ่งที่มีอยู่คือเคมีที่ทำงานเมแทบอลิซึมและงานควบคุมระบบ โดยไม่มีประสบการณ์ใดผูกติดมาด้วยเลย ประสบการณ์ต้องการบางสิ่งที่สิ่งมีชีวิตเหล่านี้ไม่มีสักตัวเดียว นั่นคือเซลล์ที่ทำหน้าที่เดียวคือส่งผ่านสัญญาณ แล้วเชื่อมเข้าด้วยกันเป็นเครือข่าย เครือข่ายนั้น กับสัตว์ที่ถูกสร้างขึ้นรอบมัน คือสิ่งที่จะปรากฏขึ้นต่อไป

พลิกกลับได้หาก: ยืนยันได้ว่าแบคทีเรียสปิชีส์หนึ่งสังเคราะห์เซโรโทนินผ่านวิถี aromatic-amino-acid-hydroxylase และ decarboxylase สายเดียวกับที่สัตว์ใช้

ไม่ใช่วิธีคนละสายที่วิวัฒนาการมาบรรจบกันเอง การยืนยันแบบนี้จะปิดช่องว่าง
หลักฐานที่งานทบทวนของ Luqman, Blackshaw และ Liu ในปี 2022 ทิ้งเปิดไว้

แหล่งข้อมูล

- 2022 · "Enzyme Promiscuity in Serotonin Biosynthesis, From Bacteria to Plants and Humans" — [Frontiers in Microbiology 13:873555 / PMC9048412](#)
- 2015 · Manchester และคณะ, "Melatonin: an ancient molecule that makes oxygen metabolically tolerable" — [Journal of Pineal Research 59\(4\), 403–419](#); ทบทวนกลไก — [Reiter และคณะ, Cellular and Molecular Life Sciences 74, 3863–3881 \(2017\)](#)
- 2020 · "Functions of dopamine in plants: a review" — [Plant Signaling & Behavior](#); การศึกษา
กลไกในปัจจุบัน — [bioRxiv, "Dopamine biosynthesis in plants" \(2025\)](#)
- 2017 · Wüthrich, Berthoud, Wechsler, Eugster, Irmeler & Bruggmann, "The Histidine Decarboxylase Gene Cluster of *Lactobacillus parabuchneri* Was Gained by Horizontal Gene Transfer" — [Frontiers in Microbiology 8:218](#); วิถีฮิสทีดินยุคบรรพบุรุษร่วมสกุลสุดท้าย — [Fondi, Emiliani, Liò, Gribaldo & Fani, Journal of Molecular Evolution 69, 512–526 \(2009\)](#)
- 2015 · Csaba, "Biogenic amines at a low level of evolution: production, functions and regulation in the unicellular *Tetrahymena*" — [Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica 62\(2\), 93–108](#)
- 2014 · Skjærven, Teigen & Martinez, "Structure–Function Relationships in the Aromatic Amino Acid Hydroxylases Enzyme Family: Evolutionary Insights" — [Wiley Online Library / eLS](#); locus history — [Craig et al., PMID 2889273 \(1987\)](#)

09. สัตว์กลุ่มแรก

หินจุลินทรีย์อายุ 890 ล้านปีในเทือกเขา Mackenzie ทางตะวันตกเฉียงเหนือของแคนาดา เก็บเครือข่ายเส้นใยแตกแขนงไว้อย่างใน แลพบหินปูนแนวปะการังโบราณแถบนั้นเรียกว่า Little Dal Group และอยู่ในยุค Tonian องค์ก่เปิดของมหาวิทยาลัย Neoproterozoic Elizabeth C. Turner แห่ง Laurentian University ตีพิมพ์บทวิเคราะห์โครงสร้างเหล่านี้ในวารสาร Nature เมื่อปี 2021 และตีความว่าเป็นเนื้อเยื่อฟอสซิลของ demosponge ฟองน้ำชนิดที่เรียบง่ายที่สุดกลุ่มหนึ่ง หากการตีความนั้นยืนได้ นี่คือฟอสซิลสัตว์ที่เก่ากว่าฟอสซิลตัวฟองน้ำที่ไม่มีใครโต้แย้งขึ้นที่เการองลงมาราว 350 ล้านปี และเก่ากว่าการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนในบรรยากาศ ที่เคยเชื่อกันมานานว่าจำเป็นต่อชีวิตสัตว์ ไปอีกราว 90 ล้านปี ทั้ง Turner เองและผู้วิจารณ์จากภายนอกกระวังคำ เรียกการค้นพบนี้ว่ายังเป็นข้อสันนิษฐานเบื้องต้นที่ต้องรอการยืนยันภายหลัง เหตุผลคือไม่พบ spicules ที่ชัดเจน — เชื้อโครงร่างจากแร่ธาตุหรือโปรตีนที่ค้ำร่างฟองน้ำไว้ — ปนอยู่กับเครือข่ายเส้นใยเหล่านั้นเลย และโครงสร้างที่เห็นอาจเป็นแร่ที่ตกผลึกขึ้นเองโดยไม่มีชีวิต หรือร่องรอยธรรมดาของแผ่นจุลินทรีย์ก็ได้ ควรถือว่านี่คือค่าอายุสูงสุดที่ยังถกเถียงกันอยู่ ไม่ใช่วันที่ที่ยอมรับกันแล้ว

หลักฐานที่หนักแน่นกว่ามาจากเคมี ไม่ใช่รูปร่าง ในบรรดาสสิ่งมีชีวิตทั้งหมด มีเพียง demosponge เท่านั้นที่ผลิตโมเลกุลสเตียรอยด์ชื่อ 26-methylstigmastane ได้ Love และคณะรายงานการพบโมเลกุลนี้ในหินโบราณเมื่อปี 2009 ซึ่งวางอายุของ demosponge ที่แท้จริงไว้ที่อย่างน้อย 635 ล้านปี Demospongiae ยังเป็นชั้นฟองน้ำที่มีสปีชีส์มากที่สุดในปัจจุบัน และสมาชิกที่ยังมีชีวิตตัวหนึ่งของชั้นนี้ คือ Amphimedon queenslandica ฟองน้ำพื้นถิ่นของแนวปะการัง Great Barrier Reef กลายเป็นแบบจำลองทางจีโนมมาตรฐานของสายวิวัฒนาการฟองน้ำฐานรากทั้งสาย เป็นสิ่งมีชีวิตที่ตีเอ็นเอของมันเป็นคำตอบคำถามที่ไม่มีฟอสซิลใดตอบได้

จุดอ้างอิงสำหรับอายุของอาณาจักรสัตว์ทั้งหมด ไม่ใช่เฉพาะฟองน้ำ คือการศึกษาในปี 2015 ของ Mario dos Reis, Yuttapong Thawornwattana, Konstantinos Angelis, Maximilian J. Telford, Philip C. J. Donoghue และ Ziheng Yang พวกเขาใช้นาฬิกาโมเลกุลแบบเบย์เซียน วิธีนี้มองความแตกต่างที่สะสมอยู่ในยีนของสิ่งมีชีวิต

ปัจจุบันเป็นนาฬิกาจับเวลาเรือนหนึ่ง แล้วแปลงเป็นเวลาตามปฏิทินด้วยการยืดกิ่งบางกิ่งของแผนภูมิไว้กับฟอสซิลที่ทราบอายุแน่ชัด พวกเขาป้อนโปรตีนนิวเคลียร์ 203 ชนิดจาก 71 สปีชีส์ และตำแหน่งกรดอะมิโน 38,577 ตำแหน่ง แล้วทดสอบกลยุทธ์การสอบเทียบฟอสซิลสี่แบบเทียบกันเอง ผลที่ได้วางจุดกำเนิดของ crown Metazoa ไว้ในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ที่ 649.8 ถึง 833.5 ล้านปีก่อน crown Metazoa คือกลุ่มที่รวมสัตว์ทุกชนิดที่มีชีวิตอยู่ในปัจจุบัน พร้อมบรรพบุรุษร่วมล่าสุดของพวกมัน ช่วงเวลานั้นคร่อมรอยต่อระหว่างยุค Tonian กับยุค Cryogenian ยุคสมัยของธารน้ำแข็งโลกก้อนหิมะ (Snowball Earth)

งานวิจัยชิ้นเดียวกันให้อายุอีกสามค่า crown Eumetazoa (ในดาเรียนรวมกับไบลาเทเรียน หรือสัตว์แทบทุกชนิดที่มีชั้นเนื้อเยื่อแท้จริง) อยู่ที่ 625.9–746.2 ล้านปีก่อน crown Cnidaria (ปะการัง แมงกะพรุน ดอกไม้ทะเล) อยู่ที่ 531.5–641.8 ล้านปีก่อน และ crown Bilateria (สัตว์ที่เหลือทั้งหมด รวมถึงสัตว์มีกระดูกสันหลังทุกชนิด) อยู่ที่ 595.7–688.3 ล้านปีก่อน แต่หัวใจของบทความไม่ใช่ตัวเลข เป็นคำเตือน ผู้เขียนเองสรุปว่าการปักใจสร้างเรื่องราววิวัฒนาการบนสเกลเวลาแบบนาฬิกาโมเลกุลที่ลิขขนาดนี้ยังเร็วเกินไป เพราะพฤติกรรมแบบนาฬิกาถูกละเมิดอย่างเลื่องไม่ได้ตลอดช่วงเวลาอันมหึมาเช่นนั้น และเมื่อรวมกับความไม่แน่นอนแท้จริงในการสอบเทียบจากฟอสซิล ค่าที่แท้จริงก็แคบลงกว่านี้ไม่ได้อีก ก่อนการวิเคราะห์ความไวขั้นนี้ ค่าประมาณของ crown Metazoa ที่แข่งกันอยู่ในวรรณกรรมเคยกระจายตั้งแต่ 1,298 ล้านปี ลงมาถึง 615 ล้านปี ทีมของ dos Reis สร้างช่วงค่าที่กว้างและตรงไปตรงมาของตนขึ้นมาเพื่ออธิบายการกระจายนั้นโดยเฉพาะ

สัตว์ที่แปลกประหลาดที่สุดตัวหนึ่งที่วิธีการเหล่านี้พยายามกำหนดอายุคือ *Trichoplax adhaerens* ตัวแทนของกลุ่มที่เรียกว่า Placozoa มันแบน กว้างประมาณหนึ่งมิลลิเมตร ไม่มีสมอง ไม่มีทางเดินอาหาร ไม่มีกล้ามเนื้อ ประกอบขึ้นจากเซลล์เพียงไม่กี่ชนิด นับเป็นสัตว์ดำรงชีวิตอิสระที่เรียบง่ายที่สุดเท่าที่รู้จักกลุ่มหนึ่ง ทว่าจีโนมของมันยาวราว 98 ล้านคู่เบส และเข้ารหัสปัจจัยการถอดรหัสกับยีนในวิถีสังเคราะห์แสงไว้หลากหลายเกินคาด เป็นชนิดที่ปกติผูกอยู่กับพัฒนาการอันซับซ้อนของสัตว์ที่มีชั้นเนื้อเยื่อแท้จริง Mansi Srivastava, Emina Begovic, Jarrod Chapman, Daniel S. Rokhsar และคณะที่ DOE Joint Genome Institute และ UC Berkeley ถอดรหัสและบรรยายจีโนมนี้ไว้ในปี 2008 วิวัฒนาการเชิงโมเลกุลวางจุดที่สายพันธุ์

Placozoa แยกออกจากสัตว์กลุ่มอื่นไว้เมื่อกว่า 600 ล้านปีก่อน การวิเคราะห์ในบทความจีโนมเองจัด Placozoa ไว้ในกลุ่มสัตว์ที่กว้างกว่านั้นร่วมกับไนดาเรียนและไบลาทีเรียน โดยฟองน้ำแยกตัวออกไปก่อนใครเพื่อน ต่อมางานวิจัยจีโนมเปรียบเทียบที่ตีพิมพ์ในปี 2018 ยังพบสายพันธุ์ Placozoa ที่ต่างกันทางพันธุกรรมเพิ่มอีกหลายสายซ่อนอยู่ใต้สิ่งที่เคยดูเหมือนเป็นสปีชีส์เดียว ส่วนตำแหน่งที่แท้จริงของ Placozoa เมื่อเทียบกับฟองน้ำ ทีโนฟอร์ และกลุ่มอื่นๆ ยังเป็นจุดที่หาข้อสรุปไม่ได้มากที่สุดจุดหนึ่งในแผนภูมิวิวัฒนาการของสัตว์ทั้งหมด

ฟองน้ำที่ไม่มีเซลล์ประสาทแม้แต่เซลล์เดียวให้เงื่อนไขที่ชัดเจนที่สุดว่ามีอะไรอยู่ก่อนระบบประสาทจะถือกำเนิด ในปี 2007 Onur Sakarya, Kenneth W. Armstrong, Kevin J. Peterson และคณะ แสดงให้เห็นว่าจีโนมของ *Amphimedon queenslandica* ฟองน้ำชนิดเดียวกับที่ใช้เป็นแบบจำลองจีโนมข้างต้น มียีนสร้างโครงร่างโปรตีนหลังไซแนปส์อยู่เกือบครบ ในสัตว์ที่มีระบบประสาท โครงสร้างยัดเหนียวระดับโมเลกุลนี้ทำหน้าที่ตรึงโปรตีนรับสัญญาณไว้กับที่บนฝั่งรับของไซแนปส์ ในชุดยีนนั้นมี *dlg* ยีนโครงร่างที่ในมนุษย์รู้จักกันในชื่อ PSD-95 กรดอะมิโนตกค้างตำแหน่งที่สัมผัสกับคู่จับของมันเหมือนกันทุกประการร้อยเปอร์เซ็นต์ระหว่างฟองน้ำกับมนุษย์ และแสดงออกร่วมกันทั้งในระยะตัวอ่อนและตัวเต็มวัย สิ่งที่ย้ายไปจากจีโนมของฟองน้ำโดยสิ้นเชิงคือตัวรับกลูตาเมตชนิดไอออนโนโทรปิกตัวจริง ตัวที่จะมาเสียบเข้ากับโครงร่างนั้นภายในเซลล์ประสาทจริงๆ อ่านได้ว่าฮาร์ดแวร์ระดับโมเลกุลสำหรับไซแนปส์ประกอบขึ้นก่อนที่เซลล์ประสาทจะมีอยู่ แล้วชิ้นส่วนตัวรับสำคัญจึงถูกเติมเข้ามาทีหลัง ณ จุดอื่นบนแผนภูมิวิวัฒนาการ งานวิจัยต่อยอดในปี 2019 พบยีนชุดเดียวกันแสดงออกร่วมกันในเซลล์โคแอโนไซด์ของฟองน้ำตัวเต็มวัย เซลล์มีวงแหวนขนที่ฟองน้ำใช้กรองอาหารจากน้ำ ข้อนี้ตอกย้ำว่าหน้าที่ดังกล่าวมีมาก่อนระบบประสาทและไม่เกี่ยวข้องกับเซลล์ประสาท

สองผู้ทำชิงตำแหน่งแรก

ทีโนฟอร์ (เหวี่ยง) ทำให้ภาพรวมซับซ้อนขึ้นไปอีก Leonid L. Moroz แห่ง University of Florida และ Joseph F. Ryan กับคณะ ถอดรหัสจีโนมของทีโนฟอร์แยกกันโดยอิสระ ทีมของ Moroz ถอดรหัส *Pleurobrachia bachei* ทีมของ Ryan ถอดรหัส

Mnemiopsis leidyi ที่มีขนาดราว 150 ล้านเบส งานทั้งสองตีพิมพ์ในปี 2013 และ 2014 ทีโนฟอร์มีระบบประสาทที่ทำงานได้จริงอย่างชัดเจน แต่ระบบนั้นขาดสารสื่อประสาทคลาสสิกทุกตัวที่พบในสัตว์มีเส้นประสาทชนิดอื่น จีโนมทั้งสองชุดไม่ปรากฏอะเซทิลโคลีน เซโรโทนิน ฮิสตามีน โดปามีน อะดรีนาลีน นอร์อะดรีนาลีน หรือการส่งสัญญาณด้วยออกโทพามีนเลย สิ่งที่เราพบแทนคือความหลากหลายของตัวรับกลูตาเมต ชนิดไอออนโนโทรปิกในระดับที่ไม่เคยพบมาก่อน ตัวรับตระกูลเดียวกับที่ขาดหายไปอย่างเห็นได้ชัดจากจีโนมของฟองน้ำ และดูเหมือนมันจะรับภาระการส่งสัญญาณไว้ทั้งหมด ทั้งสองทีมจึงเสนอว่าระบบประสาทของทีโนฟอร์ถูกสร้างขึ้นจากชิ้นส่วนโมเลกุลคนละชุดกันโดยสิ้นเชิง แปลว่ามันอาจถือกำเนิดขึ้นเป็นอิสระ ไม่ได้สืบทอดมาจากระบบประสาทของสัตว์ชนิดอื่นเลยแม้แต่ตัวเดียว

ความเป็นอิสระนั้นจะจริงหรือไม่ ขึ้นอยู่กับคำถามที่ยังไม่มีคำตอบ ระหว่างฟองน้ำกับทีโนฟอร์ สายพันธุ์ใดแยกตัวออกจากสัตว์ที่มีชีวิตชนิดอื่นทั้งหมดก่อนกัน คำตอบชี้ขาดว่าระบบประสาทวิวัฒนาการขึ้นเพียงครั้งเดียวแล้วสูญหายไปใฟองน้ำและปลาโคซัวภายหลัง หรือวิวัฒนาการขึ้นอย่างน้อยสองครั้งโดยอิสระต่อกัน ครั้งหนึ่งในทีโนฟอร์ อีกครั้งในบรรพบุรุษร่วมของไนดาเรียนกับไบลาที่เรียน Roberto Feuda, Davide Pisani และคณะ ยืนยันว่าฟองน้ำแยกตัวออกไปก่อนสุด พวกเขาวิเคราะห์เมทริกซ์ไฟโลจีโนมิกส์แบบหลายยีนซ้ำอีกครั้งในปี 2017 ด้วยแบบจำลองที่ปรับปรุงใหม่ว่าด้วยความแตกต่างขององค์ประกอบกรดอะมิโนระหว่างสปีชีส์ แล้วสรุปว่าผลลัพธ์ฝ่ายตรงข้ามที่ให้ทีโนฟอร์มาก่อนเป็นเพียง "สิ่งประดิษฐ์จากการสร้างแผนภูมิวิวัฒนาการ" ที่เกิดจากแบบจำลองไม่รัดกุมพอ Joseph F. Ryan, Leonid Moroz, Casey Dunn และคณะ ยืนยันตรงกันข้าม ในปี 2023 Darrin T. Schultz, Stephen A. Smith, Ryan และคณะ ยกหลักฐานอีกรูปแบบหนึ่งมาหนุนฝ่ายทีโนฟอร์มาก่อน นั่นคือรูปแบบของยีนเพื่อนบ้านที่อนุรักษ์ไว้ เรียกว่า synteny ยีนบางตัวยังคงอยู่ติดกับยีนเพื่อนบ้านเดิมตลอดช่วงเวลาวิวัฒนาการอันยาวนานมหาศาล ฟองน้ำ ไนดาเรียน และไบลาที่เรียน มีรูปแบบ synteny ที่หายากบางอย่างร่วมกัน ส่วนทีโนฟอร์ไม่มี ทีมของ Schultz แย้งว่าตัวบ่งชี้ที่ทนทานต่อปัญหาการสร้างแบบจำลองที่รบกวนวิธีวิเคราะห์แบบใช้กรดอะมิโนอยู่เสมอ การโต้ตอบกันในวารสาร Nature Communications เมื่อปี 2023 แสดงให้เห็นว่าทั้งสองฝ่ายยังไม่ถือว่าคำถามนี้ปิดฉากลง

บันทึกฟอสซิลของทีโนฟอร์ เมื่อมันมาถึงจริงๆ ก็มาถึงช้ากว่าค่าประมาณระดับโมเลกุลเหล่านี้มาก ฟอสซิลร่างกายของทีโนฟอร์ที่เก่าแก่ที่สุดเท่าที่ยืนยันได้คือตัวอ่อนจากแหล่งซากดึกดำบรรพ์ Meishucun ในมณฑลसानซี ประเทศจีน เทคนิค Raman spectroscopy ยืนยันในปี 2007 ว่ามันเป็นสารอินทรีย์ ไม่ใช่การเก็บรักษาจากแร่ธาตุล้วนๆ และมีอายุอยู่ในยุคแคมเบรียนตอนต้น ราว 540 ล้านปีก่อน ส่วนรูปร่างตัวเต็มวัยจากกลุ่มสิ่งมีชีวิต Chengjiang ในมณฑลยูนนาน ประเทศจีน มีอายุราว 518 ล้านปีก่อน ในนั้นรวมถึง Maotianoascus octonarius ที่มีโครงร่างลำจุน และมีแถวหัวสำหรับว่ายน้ำมากถึง 24 แถว เทียบกับเพียง 8 แถวในสปีชีส์ปัจจุบัน ทั้งสองช่วงเวลาตามหลังจุดกำเนิดในยุค Cryogenian ที่นำฟิคาโมเลกุลขึ้นไว้สำหรับ crown Metazoa มากกว่า 100 ล้านปี นี่คือตัวอย่างในตำราเรียนของช่องว่างที่เปิดกว้างขึ้นเสมอ ระหว่างช่วงเวลาที่เย็นของสายพันธุ์หนึ่งบอกว่ามันต้องมีชีวิตอยู่แล้ว กับช่วงเวลาที่บันทึกฟอสซิลจับมันได้จริงในเนื้อหิน

บันทึกฟอสซิลนั้น เมื่อเริ่มปรากฏขึ้น ก็ทั้งบางเบาและตีความผิดได้ง่าย ฟอสซิลอีกชิ้นจาก Chengjiang คือ *Stromatoveris psygmoglena* เคยถูกเสนอว่าเป็นญาติของทีโนฟอร์ ตอนนี้นักวิจัยบางกลุ่มโต้แย้งว่ามันควรอยู่ในกลุ่มที่ไม่เกี่ยวข้องกันเลย กลุ่มรูปร่างคล้ายใบไม้ที่ตกค้างมาจากยุค Ediacaran ก่อนหน้า เรียกว่า *Petalonamae* กรณีนี้เตือนให้เห็นว่าฟอสซิลยุคแคมเบรียนที่มีเนื้ออ่อนนุ่มคล้ายใบไม้ถูกจัดหมวดหมู่ผิดพลาดได้ง่ายเพียงใด ฟอสซิลต้นสายทีโนฟอร์อีกชิ้นหนึ่ง อายุราว 358 ล้านปี พบที่ Miguasha ในแคนาดา อยู่ในยุคดีโวเนียนตอนปลาย ชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าสายพันธุ์นี้ยังคงอยู่รอด แม้จะมีบันทึกไว้เบาบาง ตลอดช่วงราวหนึ่งในสี่พันล้านปีระหว่างยุคแคมเบรียนกับทีโนฟอร์ที่คุ้นเคยกันในปัจจุบัน ทุกวันนี้มีสปีชีส์ที่มีชีวิตอยู่ราว 100 ถึง 150 ชนิด ในนั้นมี *Mnemiopsis leidyi* และ *Pleurobrachia bachei* ทั้งหมดยังคงขับเคลื่อนด้วยรูปแบบการส่งสัญญาณแบบกลูตาเมต ที่บรรพบุรุษจากยุคแคมเบรียนและก่อนหน้านั้นดูเหมือนจะเป็นผู้คิดค้นขึ้นมา

ไม่มีสัตว์ตัวใดในบรรดานี้มีสิ่งที่ใกล้เคียงกับจิตใจเลยแม้แต่น้อย ไม่ว่าจะเป็นฟองน้ำที่ไร้สมอง พลาโคซัวที่มีเซลล์เพียงน้อยนิด หรือทีโนฟอร์ที่มีร่างแหประสาท สิ่งพวกมันมี ไม่ว่าตัวใดจะอุบัติขึ้นก่อนก็ตาม คือเคมีส่งสัญญาณโบราณที่มีอายุนับพันล้านปีอยู่ก่อนแล้ว และเพิ่งถูกเดินสายเข้ากับเซลล์เป็นครั้งแรก เซลล์ที่มีหน้าที่เดียวคือส่งผ่านสัญญาณต่อไป โมเลกุลที่จะกล่าวถึงต่อจากนี้ไม่ใช่เอมีนธรรมดาที่คอยกำจัด

อนุโมลิสระหรือกระดูกเมแทบอลิซึมของเซลล์ แต่เป็นเปปไทด์ สายโซ่สั้นๆ ของกรดอะมิโน สร้างขึ้นเพื่อจุดประสงค์ที่สัตว์ยุคแรกเริ่มเหล่านี้ยังไม่ต้องการเลย นั่นคือการยึดสัตว์ตัวหนึ่งเข้ากับอีกตัวหนึ่ง

พลิกกลับได้หาก: วิธีการไฟโลจีโนมิกส์วิธีหนึ่งที่ทั้งสองฝ่ายยอมรับร่วมกัน — ฝ่ายสนับสนุนฟองน้ำมาก่อนของ Feuda และ Pisani กับฝ่ายสนับสนุนที่โนฟอร์มาก่อนของ Ryan, Moroz และ Schultz — มาบรรจบที่สายพันธุ์เดียวกันว่าเป็นพี่น้องกับสัตว์อื่นทั้งหมด และยุติคำถามว่าระบบประสาทอุบัติขึ้นเพียงครั้งเดียวหรืออุบัติขึ้นอย่างเป็นอิสระต่อกันอย่างน้อยสองครั้ง

แหล่งข้อมูล

- **2021** · Turner, "Possible poriferan body fossils in early Neoproterozoic microbial reefs" — [Nature 596, 87–91](#); biomarker evidence — [Love et al., Nature 457, 718–721 \(2009\)](#)
- **2015** · dos Reis, Thawornwattana, Angelis, Telford, Donoghue & Yang, "Uncertainty in the Timing of Origin of Animals and the Limits of Precision in Molecular Timescales" — [Current Biology 25\(22\), 2939–2950 / PMC4651906](#)
- **2008** · Srivastava, Begovic, Chapman, Putnam, Hellsten, Kawashima, Rokhsar et al., "The Trichoplax genome and the nature of placozoans" — [Nature 454, 955–960](#)
- **2007** · Sakarya et al., "A Post-Synaptic Scaffold at the Origin of the Animal Kingdom" — [PLOS ONE 2\(6\), e506 / PMC1876816](#); follow-up — [Najle et al., Scientific Reports \(2019\)](#)
- **2014** · Moroz et al., "The ctenophore genome and the evolutionary origins of neural systems" — [Nature 510, 109–114](#); **2013** · Ryan et al., "The genome of the ctenophore Mnemiopsis leidyi" — [Science 342\(6164\), 1242592](#)
- **2017** · Feuda et al., "Improved Modeling of Compositional Heterogeneity Supports Sponges as Sister to All Other Animals" — [Current Biology 27\(24\), 3864–3870](#)31453-7); countered by — [Schultz, Haddock, Bredeson, Green, Simakov & Rokhsar, "Ancient gene linkages support ctenophores as sister to other animals," Nature 618, 110–117 \(2023\)](#)

10. เปปไทด์แห่งความผูกพัน

โมเลกุลผู้ส่งสารเพียงตัวเดียว แพบไม่มากไปกว่าอะตอมกำมือเดียวที่ร้อยกันเป็นสาย กรดอะมิโนเก้าตัว ก็พอจะปรับจนพฤติกรรมผสมพันธุ์ขึ้นหนึ่งที่วิวัฒนาการใช้เวลาหลายร้อยล้านปีสร้างขึ้นมา ฉากอยู่ที่ปานามา คำคินอບอ์นข้างแอ่งน้ำฝน กบทุ่งการา ตัวผู้พองถุงเสียงใต้คางแล้วเปล่งเสียงร้อง เสียงร้องนั้นคือโฆษณาทั้งหมดของมัน หวิด ยาวแล้วเลื่อนไหลลงมาเป็นเสียง "ซึก" ส่งตรงไปยังตัวเมียตัวใดก็ตามที่อยู่ในระยะ ได้ยิน นักวิจัยฉีดโมเลกุลตัวเดียวที่ชื่อว่าโซโทซิน (vasotocin) เข้าไปในตัวมัน ความต้องการจะร้องไม่เปลี่ยน สิ่งที่เปลี่ยนคือตัวเสียงร้องเอง — โครงสร้างละเอียดของเสียง และความง่ายตายที่ตัวผู้ตัวอื่นจะเคลื่อนเข้าหาเสียงนั้น

เปปไทด์เก้าข้อต่อสายเดียวกันยังวิ่งอยู่ในตัวหนอน หอยทาก ปลา กบ และนก เพียงแต่สวมชื่อต่างกันไป เป็นเส้นด้ายแห่งเคมีของความผูกพันที่เก่าแก่ยิ่งกว่ากระดูก กรดอะมิโนเก้าตัวที่เชื่อมกันปลายต่อปลายเรียกว่าโนนาเปปไทด์ (nonapeptide) ชื่อนี้บอกความยาวของสายโซ่ ไม่ได้บอกหน้าที่ ในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม สมาชิกสองตัวของตระกูลสั้น ๆ นี้มีชื่อที่คุ้นหูกันดี ออกซิโทซินเกี่ยวข้องกับการผูกพัน การคลอด และการหลั่งน้ำนม วาโซเพรสซินเกี่ยวข้องกับการกักเก็บน้ำไว้ในไต และกับวงจรทางสังคมบางส่วนชุดเดียวกันนั้น งานเขียนวิทยาศาสตร์สำหรับคนทั่วไปบางครั้งเรียกออกซิโทซินว่า "ฮอร์โมนแห่งความรัก" คำนี้ขายโมเลกุลตัวหนึ่งเกินตัวไปหน่อย เพราะมันยังทำงานต่อประปาอยู่ในกระเพาะปัสสาวะและหลอดเลือดด้วย ส่วนเคมีพื้นฐานที่รองรับอยู่นั้น ไม่ได้ถูกขายเกินตัวเลยแม้แต่หน่อย

คู่โมเลกุลในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมสืบทอดกลับไปถึงคู่ยีนบรรพบุรุษเพียงคู่เดียว ที่เคยวางเรียงเคียงกันอยู่บนโครโมโซมโบราณแห่งเดียว มันไม่ได้ปรากฏขึ้นมาจากความว่างเปล่า Daniel Ocampo Daza, Christina Bergqvist และ Dan Larhammar ทำงานร่วมกันระหว่างมหาวิทยาลัยอุปซอลากับ UC Merced แล้วสืบสายตระกูลยีนหกตัวของตัวรับออกซิโทซินและวาโซโทซินที่พบในสัตว์มีกระดูกสันหลังมีขากรรไกร ซึ่งยังมีชีวิตอยู่ทุกวันนี้ ย้อนกลับไปถึงคู่ยีนคู่ นั้น คู่ยีนกลายเป็นหกยีนผ่านการเพิ่มจำนวนจีโนมทั้งชุด (whole-genome duplication) สองรอบที่แยกจากกัน เหตุการณ์แบบนี้คัดลอกคลังพันธุกรรมทั้งหมดของสิ่งมีชีวิตขึ้นมาพร้อมกันทีเดียว ไม่ใช่ทีละยีน

โครโมโซมทุกแท่งจึงเพิ่มเป็นสองเท่าภายในรุ่นเดียว ยีนที่ถูกทำซ้ำขึ้นมาด้วยวิธีนี้ส่วนใหญ่สูญหายไปภายในภายหลัง ถูกลบทิ้งเพราะซ้ำซ้อน มีเพียงส่วนน้อยที่รอดมาได้เพราะหางานใหม่ทำ ตระกูลตัวรับออกซิโทซิน/วาโซโทซินคือกรณีที่สำคัญหลายชุดรอดชีวิต แต่ละชุดแยกไปทำหน้าที่เฉพาะทางของตัวเอง

หลักฐานที่บ่งชี้ว่ามีการเพิ่มจำนวนสองครั้ง ไม่ใช่ครั้งเดียว ถูกจารึกไว้ในตัวโครโมโซมเองในรูปของไซนเทนี (synteny) ยีนมีแนวโน้มรักษาเพื่อนบ้านเดิมและลำดับเดิมไว้บนโครโมโซม แม้ผ่านวิวัฒนาการที่แยกทางกันมาหลายล้านปีแล้วก็ตาม ยีนที่รอดชีวิตยังคงเรียงตัวในรูปแบบที่สอดคล้องกันบนโครโมโซมที่แท่งที่ต่างกัน กระบวนการอื่นแทบผลิตแบบแผนสี่เท่าแบบนี้ไม่ได้เลย นอกจากการเพิ่มชุดพันธุกรรมทั้งหมดเป็นสองเท่าสองครั้ง งานวิจัยนี้เผยแพร่ทางออนไลน์เมื่อวันที่ 22 พฤศจิกายน 2021 และตีพิมพ์ฉบับพิมพ์เมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2022 ในวารสาร *Frontiers in Endocrinology* เล่มที่ 12 บทความหมายเลข 792644 คณะผู้วิจัยอาศัยจีโนมที่เพิ่งถูกถอดรหัสใหม่ — ปลารีดฟิช *Erpetoichthys calabaricus* ปลากะเบนหนาม *Amblyraja radiata* และกบเล็บตะวันตก *Xenopus tropicalis* — เพื่อยืนยันความสมมาตรสี่เท่านี้ในสายวิวัฒนาการของสัตว์มีกระดูกสันหลังช่วงที่กว้างกว่าที่งานวิจัยก่อนหน้านี้เคยไปถึง

ผู้เขียนวางอายุระบบยีนโนนาเปปไทด์บรรพบุรุษไว้ที่ราวระหว่าง 600 ถึง 450 ล้านปี และเปิดเผยตรงไปตรงมาว่าทำไมช่วงจึงกว้างขนาดนั้น พวกเขาบอกข้อจำกัดของวิธีการตัวเองก่อน นาฬิกาโมเลกุลแบบไร้เดียงสา (naive molecular clock) อ่านจำนวนการกลายพันธุ์ที่สะสมไว้ราวกับมันเป็นนาฬิกาจับเวลา เมื่อนำมาใช้กับตระกูลยีนนี้ ตามการประเมินของพวกเขาเอง มันมักจะ "ประเมินสูงเกินจริง" บางครั้งย้อนกลับไปไกลเกินจุดแยกระหว่างโปรโตสโตม (protostome) กับดิวเทอโรสโตม (deuterostome) เสียอีก จุดแยกนั้นคือเส้นแบ่งที่กึ่งใหญ่กึ่งหนึ่งของต้นไม้สัตว์ — โปรโตสโตม ได้แก่ หนอน หอยทาก แมลง — แยกออกจากอีกกึ่งหนึ่ง คือดิวเทอโรสโตม ได้แก่ ดาวทะเล ปลา และในที่สุดก็คือพวกเรา ตามธรรมเนียมเส้นแบ่งนี้วางไว้ที่ราวกว่า 600 ล้านปีก่อนเล็กน้อย ทีมวิจัยจึงไม่เชื่อนาฬิกานั้นตามลำพัง แต่ขนานช่วงเวลาของการเพิ่มจำนวนยีนไว้ระหว่างเหตุการณ์สองเหตุการณ์ที่ระบุอายุมาอย่างเป็นอิสระจากกันแทน คือไม่เก่าไปกว่าจุดแยกระหว่างสัตว์มีกระดูกสันหลังกับทูนิเคต และ

ไม่ใหม่ไปกว่าจุดที่ปลากระดูกแข็งแยกทางกับปลากระดูกอ่อน ช่วงที่ได้จึงกว้าง และ รายงานไว้อย่างชัดเจนว่าเป็นช่วง มิใช่ปิดเศษให้เหลือตัวเลขเดียวที่ฟังดูน่าใจ

ข้อพิพาทเรื่องกลไกยังไม่ยุติ และยังไม่มีการมีข้อมูลใหม่มาตัดสิน มันซ้อนทับอยู่บนกรอบ อายุที่กว้างอยู่แล้ว ผู้เชี่ยวชาญไม่ได้เห็นตรงกันทุกคนว่าเรื่องนี้เกิดขึ้นอย่างไร Theofanopoulou และคณะ สร้างภาพจำลองอีกแนวทางหนึ่งขึ้นจากลำดับยีนของปลาแลมเพรย์ แล้วเสนอว่าจีโนมทั้งชุดเพิ่มจำนวนเพียงครั้งเดียวเท่านั้น ส่วนสำเนาอื่นที่เหลือเกิดตามมาภายหลังจากการเพิ่มจำนวนและการย้ายตำแหน่งของโครโมโซมในสเกลที่เล็กกว่า ทีมของ Ocampo Daza ได้แย้งข้อเสนอนี้ไว้ในบทความเดียวกัน พวกเขายืนยันว่าแบบจำลองสองครั้งที่ให้ความสมมาตรที่เท่ากันเป็นคำอธิบายที่ประหยัดกว่า (parsimonious) ประหยัดในความหมายที่ว่าอธิบายแบบแผนเดียวกันได้ด้วยจำนวนเหตุการณ์สมมติที่แยกจากกันน้อยกว่า และโดยทั่วไป แม้จะไม่เสมอไป นั่นคือทางที่ควรเติมพัน

สัตว์มีกระดูกสันหลังมีชากรรไกรทุกตัวที่มีชีวิตอยู่ทุกวันนี้ ล้วนถือทายาทสายใดสายหนึ่งของตระกูลยีนนี้ติดตัวอยู่ ไม่ว่าจะเป็นกลไกที่แท้จริงจะเป็นอย่างไร ตระกูลนี้ก็แตกแขนงออกไป ปลาครีบก้านแข็งเก็บรักษารุ่นที่เรียกว่าไอโซโทซิน (isotocin) ไว้ นก สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม และสัตว์เลื้อยคลานด้วยนมที่ไม่เคยวิวัฒนาการกลับมาเลย ถือเมโซโทซิน (mesotocin) สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกและสัตว์เลื้อยคลานส่วนใหญ่ถืออาร์จินินวาโซโทซิน (arginine vasotocin) ตัวหลังต่างจากวาโซเพรสซินในสัตว์เลื้อยลูกด้วยนมเพียงกรดอะมิโนตัวเดียว เท่ากับการสะกดที่เปลี่ยนไปจุดเดียวในคำเก้าตัวอักษร และคงตัวมาตั้งแต่ก่อนสัตว์เลื้อยลูกด้วยนมจะถือกำเนิดขึ้น แต่ละชื่อหมายถึงยีนบรรพบุรุษตัวเดียวกัน ตกทอดไปคนละกิ่ง และถูกนำไปใช้ทำงานที่ต่างกันเล็กน้อย

วาโซโทซินคือรุ่นที่ถูกทำแผนที่ไว้ละเอียดที่สุดในบรรดารุ่นที่ไม่ใช่ของสัตว์เลื้อยลูกด้วยนม บทปริทัศน์ที่นำโดย Mario Penna แห่ง Universidad de Chile ประมวลผลงานหลายทศวรรษของนักวิจัยหลายคน รวมถึง Boyd, Moore, Hollis, González, Smeets และ Vandesande กับ Dierickx แล้วตามรอยเซลล์ที่ผลิตวาโซโทซินซึ่งวิ่งจากสมองส่วนหน้าไปยังสมองส่วนหลัง ทั้งในซาลาแมนเดอร์จำพวกนิวต์ (newt) ซาลาแมนเดอร์ทั่วไป กบ และกิ้งก่า แบบแผนการเดินสายนี้คงตัวไว้ทั่วทั้งกลุ่มนิวต์ที่ชื่อ *Pleurodeles waltl* และ *Taricha granulosa* มีสารนี้ ซาลาแมนเดอร์

Plethodon shermani ก็มี กบหลายสกุลก็มีด้วย ได้แก่ กบทั่วไปของยุโรป *Rana temporaria* กบกินได้และกบบึงในกลุ่ม *Pelophylax* กบวัวอเมริกัน คางคกทั่วไป *Bufo bufo* คางคกญี่ปุ่น *Bufo japonicus* กบเล็บแอฟริกา *Xenopus laevis* กบจิ้งหรีด *Acris crepitans* และกบทุ่งการาจากฉากเปิดเรื่อง กิ้งก่าอีกสองชนิด คือ *Lacerta muralis* และ *Acanthodactylus pardalis* ก็มีสารนี้เช่นกัน ตลอดทั้งรายชื่อนี้ วาโซโทซินขับเคลื่อนการร้อง การเกาะกอด และองค์ประกอบอื่น ๆ ของการเกี้ยวพาราสี แต่มันไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตายตัว ในนิวต์ ฮอร์โมนตัวนี้กระตุ้นพฤติกรรมเกี้ยวพาราสีได้ก็ต่อเมื่อสัตว์ตัวนั้นได้รับฮอร์โมนอีกตัวหนึ่งคือแอนโดรเจนในระดับที่เหมาะสมมาก่อนแล้วเท่านั้น ปิดกั้นการได้รับแอนโดรเจนเสีย วาโซโทซินก็แทบทำอะไรไม่ได้ โมเลกุลตัวนี้กำหนดความเป็นไปได้ ไม่ได้กำหนดสิ่งที่จะต้องเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

ปลาหางนกยูงที่ได้รับไอโซโทซิน (isotocin) ใช้เวลาอยู่ใกล้ปลาตัวอื่นมากกว่าปลาที่ได้รับสารปิดกั้นตัวรับชนิดเดียวกันถึงยี่สิบเก้าเปอร์เซ็นต์ และไม่ต่างกันระหว่างเพศ Babak Ataei Mehr, Shawn Garner และ Bryan Neff แห่งมหาวิทยาลัย Western Ontario ฉีดสารนี้เข้าไปในปลาหางนกยูงตัวเต็มวัยเก้าสิบสองตัว แบ่งเป็นเพศละสี่สิบหกตัว ไอโซโทซินคือพาราล็อก (paralogue) ของออกซิโทซินในปลา พาราล็อกหมายถึงสำเนาอื่นที่สืบเชื้อสายมาจากการเพิ่มจำนวนของบรรพบุรุษเดียวกัน ไม่ใช่ยืมมาจากสิ่งมีชีวิตต่างสปีชีส์ ปลาครีบก้านแข็งพายินบรรพบุรุษนี้ไปในทิศทางที่ได้แย้งกันอย่างแปลกประหลาด โมเลกุลตัวเดียวกันนี้ยังโผล่ในปลาชิบราฟิช ปลาทอง และปลาหมอสี *Neolamprologus pulcher* ที่เพาะพันธุ์แบบร่วมมือกัน ผลการทดลองปลาหางนกยูงในปี 2020 ควรถูกหักท้วงไว้อย่างตรงไปตรงมา เพราะมันสวนทางกับสิ่งที่งานวิจัยก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่พบ ผู้เขียนระบุไว้ตรง ๆ ว่างานศึกษาปลาก่อนหน้านี้โดยทั่วไปไม่พบผลทางสังคมใด ๆ จากไอโซโทซิน หรือบางครั้งกลับพบผลในทางต่อต้านสังคมด้วยซ้ำ นี่คือการค้นพบที่ชัดเจนครั้งแรก ๆ ของผลเชิงเสริมสร้างสังคม ไม่ใช่กฎที่ยึดแล้วสำหรับปลาโดยทั่วไป

ในนกที่อยู่รวมกันเป็นฝูง เมโซโทซินยึดฝูงทั้งฝูงไว้ด้วยกัน ไม่ใช่ยึดแค่คู่ นกใช้ยีนตัวเดียวกันนี้ในรูปของเมโซโทซิน James Goodson และคณะแห่งมหาวิทยาลัยอินเดียนา พบว่าการปิดกั้นตัวรับเมโซโทซินส่วนกลางในนกฟินช์ตระกูลเอสตริลิด (estrildid finch) ตัดเวลาที่นกเหล่านี้ใช้อยู่กับกลุ่มใหญ่และกับคู่สังคมที่คุ้นเคยให้ลด

ลงในนกฟินช์มาลาย เมโซโทซินที่ออกฤทธิ์ต่อตัวรับในสมองส่วนกลางจำเป็นต่อการก่อสายสัมพันธ์ตั้งแต่แรก ในนกเจย์สนไพนยอน มันเกี่ยวข้องกับการผูกพันทางสังคมในวงกว้างกว่านั้น นกเอสตริลดาทั่วไป (common waxbill) ก็มีสารนี้เช่นกัน โมเลกุลตัวเดียวกับที่ผูกคู่สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมไว้ด้วยกัน ในที่นี้กลับยึดฝูงไว้ทั้งฝูง เครื่องมือเก่าแก่ถูกนำกลับมาใช้ที่ระดับสังคมซึ่งต่างออกไป นี่ไม่ใช่ความขัดแย้งเท่าใดนัก แต่เป็นการสาธิตว่าวิธีการส่งสัญญาณเพียงหนึ่งเดียวถูกโยกไปใช้ใหม่ได้ง่ายเพียงใด

เหนือกว่ากระดูกสันหลัง

ตระกูลโนนาเปปไทด์นี้เก่าแก่ยิ่งกว่ากระดูกสันหลัง ใน *Caenorhabditis elegans* หนอนตัวกลมยาวประมาณหนึ่งมิลลิเมตรที่แทบไม่มีสมองให้พูดถึง เปปไทด์ตัวหนึ่งชื่อเนมาโทซิน (nematocin) ออกฤทธิ์ผ่านตัวรับที่ชื่อ NTR-1 แล้วทำให้หนอนเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเกลือกับประสบการณ์ในอดีต ความสามารถนี้เรียกว่าการเรียนรู้แบบเชื่อมโยงทางรสชาติ (gustatory associative learning) หนอนเปลี่ยนวิธีตอบสนองต่อรสชาติหนึ่งได้ โดยอาศัยสิ่งที่เกิดขึ้นครั้งล่าสุดที่มันเจอรสชาติ นั้น Isabel Beets และคณะแห่ง KU Leuven แสดงให้เห็นว่าหนอนที่ขาดเนมาโทซินหรือขาดตัวรับของมันจะสูญเสียการตอบสนองที่เรียนรู้มานี้ไป อีกทีมหนึ่งรายงานผลอย่างเป็นอิสระจากกันในเวลาใกล้เคียงกัน ไล่เดือนฝอยกับสัตว์มีกระดูกสันหลังมีบรรพบุรุษร่วมกันครั้งสุดท้ายก่อนจุดแยกระหว่างโปรโตสโตมกับดิเวอโรสโตม ตามธรรมเนียมจุดนั้นวางไว้ที่มากกว่า 600 ล้านปีก่อน จุดกำเนิดเชิงหน้าที่ของระบบส่งสัญญาณนี้จึงลึกยิ่งกว่าซากดึกดำบรรพ์ของสัตว์มีกระดูกสันหลังชั้นใด ๆ ย้อนไปถึงบรรพบุรุษที่ระบบประสาทเพิ่งเริ่มแตกความชำนาญเฉพาะทาง

ในไล่เดือนดิน *Eisenia foetida* ตระกูลเดียวกันนี้มีชื่อว่าแอนเนโทซิน (annetocin) และทำงานคนละเรื่องโดยสิ้นเชิง ฉีดในขนาดเกินห้านาโนโมล มันกระตุ้นให้เกิดการวางไข่ — ร่างกายเคลื่อนไหวหมุนตัว รูปทรงร่างกายเปลี่ยนไป และไคลเทลลัม (clitellum) ของไล่เดือนหลังเมื่อก่อออกมาสร้างรังห่อหุ้มไข่ของมัน Chizu Oumi และคณะแห่งสถาบันวิจัย Suntory Institute for Bioorganic Research บรรยายเรื่องนี้ไว้ในปี 1996 ไล่เดือนดินกับสัตว์มีกระดูกสันหลังแยกทางกันก่อนจุดแยกโปรโตสโตม-

คิวเทอโรสโตนมจุดเดียวกันนั่นเอง เช่นเดียวกับไส้เดือนฝอยกับสัตว์มีกระดูกสันหลัง นี่คือสายพันธุ์สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังอิสระสายที่สอง ซึ่ไปยังอายุอันลึกล้ำจุดเดียวกัน จากกิ่งก้านของต้นไม้แห่งชีวิตที่ต่างออกไปโดยสิ้นเชิง

หอยทากบึงยักษ์ *Lymnaea stagnalis* ใช้ตัวรับเพียงตัวเดียวทำงานสองอย่างที่สายวิวัฒนาการของสัตว์มีกระดูกสันหลังไม่มีอีกต่อไปแล้ว หอยทากมีรุ่นที่เรียกว่าโคโนเพรสซิน (conopressin) และหอยแยกทางจากสัตว์มีกระดูกสันหลังที่เส้นแบ่งเดียวกัน นี่คือกว่า 600 ล้านปีก่อน นี่คือโพลัมอิสระที่สามที่มาบรรจบกันที่ความลึกเดียวกัน ตัวรับตัวนั้นถูกโคลนขึ้นโดย van Kesteren และคณะแห่ง Vrije Universiteit Amsterdam และตั้งชื่อว่า LSCPR มันทำทั้งการส่งสัญญาณด้านการสืบพันธุ์แบบออกซิโทซิน และการส่งสัญญาณด้านเมแทบอลิซึมแบบวาโซเพรสซิน สัตว์มีกระดูกสันหลังแยกงานสองอย่างนี้ออกเป็นตระกูลตัวรับสองตระกูลต่างหากจากกัน ในที่สุด เปปไทด์ตัวเดียวกันนี้ถูกระบุทางเคมีในหอยทากทะเลตระกูลโคน (cone snail) *Conus geographus* ด้วยเช่นกัน และในหอยทากบึงมันยังทำหน้าที่บรรพบุรุษทั้งสองอย่างพร้อมกัน นั่นเป็นภาพที่น่าเชื่อถือของระบบก่อนแยกไปทำงานเฉพาะทาง และในตัวมันเองก็เป็นหลักฐานทางอ้อมว่าลึกลงไปถึงยุคนั้น ระบบบรรพบุรุษยังไม่ได้แยกออกเป็นพาราล็อกต่างหากจากกัน งานวิจัยในภายหลังเกี่ยวกับหอยทากทะเลไม่มีเปลือกจำพวกนูดิเบรังก์ (nudibranch) *Berghia stephanieae* ตีพิมพ์ในปี 2024 ขยายภาพนี้ให้กว้างขึ้น มากกว่าจะทำลายมัน

หกกิ่งก้าน ลำต้นบรรพบุรุษเดียว และเปปไทด์สายสั้นตัวเดียวกันทำงานที่เห็นได้ชัดว่าเกี่ยวข้องกันในทุกกิ่ง เมื่อเรียงต่อกันเป็นสาย ต้นไม้ตระกูลนี้ทอดยาวจากหนอนตัวเล็กยาวเพียงมิลลิเมตรที่ลึมรสเกลือ ผ่านไส้เดือนดินที่วางไข่ ผ่านหอยทากที่ใช้ตัวรับเดียวทำงานสองอย่าง ขึ้นไปถึงปลาที่แหวกว่ายเป็นฝูง กบที่ร้องเรียก นกฟินช์ที่รวมฝูง จนถึงคูโมเลกุลในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่ให้ชื่อสามัญแก่ตระกูลทั้งหมดนี้ งานที่ว่่านั้นคือรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งของการดัดเข้าหากัน การมอดกลไกการสืบพันธุ์หรือเมแทบอลิซึมให้ผูกพันกับการมีอยู่ของสิ่งมีชีวิตอีกตัวหนึ่ง

สิ่งที่คงอยู่ผ่านหกร้อยล้านปีและครึ่งโหลโพลัมนั้นไม่ใช่พฤติกรรมที่ตายตัว มันคือคำศัพท์ทางเคมีคำหนึ่ง ถูกนำกลับมาใช้ทุกครั้งที่ระบบประสาทต้องการจะพูดว่า จงอยู่ใกล้ตัวนี้ไว้ ทั้งหมดนี้ไม่ได้ทำให้เปปไทด์ตัวนี้กลายเป็นคั่นโยกเดี่ยว ๆ ที่เรียบง่าย

หน้าที่ของมันเปลี่ยนไปตามวงจรที่มันไปตกอยู่ — เป็นสายสัมพันธ์คู่ในสปีชีส์หนึ่ง เป็นฝูงในอีกสปีชีส์หนึ่ง เป็นปฏิกิริยาสะท้อนการวางไข่ในสปีชีส์ที่สาม ผู้ส่งสารโบราณ ไม่ได้พูดถึงความใกล้ชิดกันทุกตัว บางตัวพูดถึงลำดับชั้นแทน — และหนึ่งในนั้นกำลังจะยกก้ามของมันขึ้น

พลิกกลับได้หาก: พบยีนตระกูลโนนาเปปไทด์ที่ได้รับการยืนยัน — ออร์โทล็อก (ortholog) แท้จริงของเนมาโทซินหรือวาโซโทซิน — ในจีโนมของไนดาเรียน (cnidarian) หรือฟองน้ำ การพบเช่นนั้นจะผลักดันกำเนิดของตระกูลนี้ย้อนกลับไปไกลกว่าบรรพบุรุษร่วมสุดท้ายของปลาที่เรียน ที่บ่งชี้ถือว่าเป็นขอบเขตซึ่งได้รับการยืนยันลึกที่สุดของมัน

แหล่งข้อมูล

- **2021** · Ocampo Daza, Bergqvist, Larhammar, "The Evolution of Oxytocin and Vasotocin Receptor Genes in Jawed Vertebrates: A Clear Case for Gene Duplications Through Ancestral Whole-Genome Duplications" — [Frontiers in Endocrinology](#)
- **2017** · Penna et al., "Arginine Vasotocin, the Social Neuropeptide of Amphibians and Reptiles" — [Frontiers in Endocrinology](#)
- **2020** · Ataei Mehr, Garner, Neff, "Effect of isotocin on shoaling behaviour of the Guppy (*Poecilia reticulata*)" — [Animal Cognition, SpringerLink](#)
- **2009** · Goodson, Schrock, Klatt, Kabelik, Kingsbury, "Mesotocin and Nonapeptide Receptors Promote Estrildid Flocking Behavior" — [PubMed](#)
- **2012** · Beets et al., "Vasopressin/Oxytocin-Related Signaling Regulates Gustatory Associative Learning in *C. elegans*" — [Science](#)
- **1996 / 1995** · Oumi et al., "Annetocin, an annelid oxytocin-related peptide, induces egg-laying behavior in the earthworm, *Eisenia foetida*" — [PubMed](#); van Kesteren et al., "A Novel G Protein-Coupled Receptor Mediating Both Vasopressin- and Oxytocin-Like Functions of Lys-Conopressin in *Lymnaea stagnalis*" — [PubMed](#)

11. ทำยีนของลือบสเตอร์

ลือบสเตอร์ตัวหนึ่งเปลี่ยนทำยีนเพราะสารเคมีไม่กี่โมเลกุล ในตู้เลี้ยงสัตว์ของภาควิชาประสาทชีววิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยฮาร์วาร์ด มันลอยนิ่งอยู่ในน้ำ ถูกตรึงให้นิ่งพอสำหรับเข็มขนาดเล็ก Edward Kravitz, Margaret Livingstone และ Ronald Harris-Warrick ไม่ได้ศึกษาห้ามหรือเปลือกของมัน พวกเขาศึกษาทำทางและกำลังจะเปลี่ยนทำทางนั้นด้วยการฉีด เซโรโตนินปริมาณที่วัดไว้อย่างแม่นยำเข้าสู่ระบบไหลเวียนโลหิต ร่างของลือบสเตอร์ยกสูงขึ้น ก้ามกางออก มันยืนสูงบนขาเดิน — ทำที่ในตู้จริงแปลว่า มันจะไม่ลอย เปลี่ยนไปฉีดสารสื่อประสาทอีกตัวคือออกโทพามีน สัตว์ตัวเดิมหย่อนร่างลงต่ำ ก้ามและขาชี้ไปข้างหน้า มันคงทำที่ในตู้จริงแปลว่าการล่าลอย

โปรแกรมทำทางทั้งร่างกาย ไม่ใช่อารมณ์ที่ซับซ้อนอย่างคลุมเครือ — นั่นคือผลที่ตีพิมพ์ในวารสาร Science เมื่อวันที่ 4 เมษายน 1980 โมเลกุลตัวหนึ่งเปิดโปรแกรมทั้งชุด อีกตัวหนึ่งเปิดชุดตรงข้าม ทีมวิจัยไม่หยุดอยู่แค่ความประทับใจผิวเผิน พวกเขาบันทึกสัญญาณตรงจากเส้นประสาทด้านหลัง (ventral nerve cord) — สายเนื้อเยื่อประสาทที่ทอดไปตามด้านล่างของลือบสเตอร์ ทำหน้าที่แบบเดียวกับไขสันหลังในมนุษย์ แต่สร้างบนแผนผังโครงสร้างคนละแบบ โมโตนิวรอน (motoneuron) คือเซลล์ประสาทที่ส่งกล้ามเนื้อเป็นด้านสุดท้าย มันยังสัญญาณเป็นแบบแผนตรงข้ามกันแต่ประสานกันขึ้นกับว่าสารเคมีตัวใดในสองตัวนั้นกำลังไหลเวียนอยู่ ทำทางไม่ได้บังเอิญเกิดขึ้นคู่กับเคมีนี้ มันคือเคมีนั่นเอง ที่แสดงออกผ่านกล้ามเนื้อ

เอมีนสองตัวนี้ทำงานเป็นขั้วตรงข้ามกัน และนั่นคือเหตุผลที่การทดลองลือบสเตอร์สำคัญ เซโรโตนินและออกโทพามีนอยู่ในตระกูลสารเคมีที่เรียกว่าเอมีน (amine) — โมเลกุลขนาดเล็กที่สร้างขึ้นรอบอะตอมไนโตรเจน ระบบประสาทผลิตมันได้ด้วยต้นทุนต่ำ และมันเหมาะกับการกระจายสัญญาณออกไปทั้งวง มากกว่าจะกระซิบบอกเพื่อนบ้านเพียงตัวเดียว ทั้งคู่ไม่ใช่แค่สองรายการในบัญชีที่ยาวกว่าของสิ่งที่ระบบประสาทบังเอิญผลิตขึ้นมา ตัวหนึ่งบอกว่า จงคงทำนี้ไว้ อีกตัวหนึ่งบอกว่า จงคงทำตรงข้ามไว้

สวิตซ์ทำงานนี้ไม่ได้อยู่แค่ในสัตว์ทดลองชุดแรกของห้องแล็บ งานวิจัยภายหลังในล็อบสเตอร์แคระ (squat lobster) *Munida quadrispina* พบการเป็นขั้วตรงข้ามอย่างเดียวกันระหว่างโมเลกุลคู่เดิม สปีชีส์นี้อยู่ในกลุ่ม Anomura วงศ์ Galatheidae คนละกึ่งของต้นไม้เดคาพอดกับล็อบสเตอร์แท้และกุ้งเครย์ฟิชในงานวิจัยดั้งเดิม เดคาพอด (decapod) เป็นเพียงชื่อเรียกกลุ่มครัสเตเชียนที่รวมล็อบสเตอร์ ปู กุ้ง และญาติล็อบสเตอร์แคระของพวกมัน เดินด้วยขาสิบขาโดยประมาณ การปรากฏซ้ำทั่วทั้งกลุ่มแทนที่จะค้างอยู่ในสปีชีส์เดียวในฐานะเรื่องแปลกประหลาด คือสิ่งที่ยกการทดลองเดี่ยวที่โดดเด่นขึ้นหนึ่ง ขึ้นเป็นขึ้นส่วนสถาปัตยกรรมของระบบประสาทที่คงตัวไว้

ภาพจริงยิ่งกว่าป้ายที่ติดไว้ ออกโทพามีนถูกเรียกมานานว่าเป็น "นอร์อะดรีนาลีนฉบับสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง" สารสื่อประสาทแห่งความตื่นตัวและการเฝ้าระวังที่ขับเคลื่อนการตอบสนองแบบสู้หรือหนีในสัตว์มีกระดูกสันหลัง Gáspár Jékely ทำงานอยู่ที่ Living Systems Institute ในเอ็กซีเตอร์ และเขาแสดงให้เห็นว่าป้ายนั้นเรียบง่ายเกินจริง ภาพที่ได้แทนน่าสนใจกว่ามาก เขาเทียบจีโนมทั่วโลกของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง — เอไคโนเดิร์มและญาติของมัน หอยและสัตว์จำพวกไส้เดือน อาร์โทรพอดและหนอนตัวกลม และหนอนทะเลตัวเล็กชื่อ *Meara stichopi* ที่อยู่บนกิ่งก้านแยกต่างหากของต้นไม้แห่งสัตว์ Jékely พบสำเนาที่ยังทำงานได้ของตัวรับชนิดอะดรีนาลีนกระจายอยู่ในทุกกลุ่มเหล่านั้น ตัวรับออกโทพามีนไม่ได้เข้ามาแทนที่มัน ทั้งสองอยู่ร่วมกันไปพร้อม ๆ กัน

การส่งสัญญาณชนิดนอร์อะดรีนาลีนมีอยู่แล้วในบรรพบุรุษร่วมสุดท้ายของสัตว์ที่มีสมมาตรด้านข้างแทบทั้งหมด นั่นคือสิ่งที่การกระจายตัวแบบนี้ชี้ สายพันธุ์นั้นเก่าแก่กว่าจุดแยกโปรโตสโตม-ดิเวเทอโรสโตม ที่ตามธรรมเนียมกำหนดอายุไว้เกิน 600 ล้านปีก่อน ดำรกรุ่นเก่าที่เรียบง่ายกว่าเคยบอกว่าออกโทพามีนวิวัฒนาการขึ้นมาแทนที่นอร์อะดรีนาลีนในสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง มันไม่ได้มาแทนที่ ทั้งสองระบบ รวมถึงญาติทางเคมีที่ใกล้ชิดอีกตัวหนึ่งชื่อไทรามิน (tyramine) จะเดินคู่กันมาตั้งแต่ลึกในต้นไม้ตระกูลสัตว์ แต่ละสายพันธุ์เพียงเอนไปพึ่งพาตัวใดตัวหนึ่งมากกว่าอีกตัว ยังไม่มีใครตีพิมพ์งานโต้แย้งการสร้างภาพจำลองนี้ มันจึงยืนอยู่ในฐานะการแก้ไขเรื่องเก่าที่เรียบง่ายกว่า ไม่ใช่ข้อพิพาทที่ยังมีชีวิตอยู่

ยืมไปใช้เป็นข้อโต้แย้ง

การทดลองลอบสเตอร์โด่งดังขึ้นมาจากที่อื่น ไม่ใช่จากงานเหล่านั้น ในหนังสือ 12 Rules for Life ปี 2018 ของเขา นักจิตวิทยา Jordan Peterson แห่งมหาวิทยาลัยโตรอนโต พาผลการค้นพบของ Kravitz ไปไกลถึงจุดที่ผู้เขียนงานวิจัยไม่เคยอ้างว่าจะพาไปถึง เขาโต้แย้งว่าลอบสเตอร์กับมนุษย์แยกทางกันเมื่อราว 350 ล้านปีก่อน เขาปฏิบัติต่อลำดับชั้นความเหนือกว่าของลอบสเตอร์ที่ทำงานบนเซโรโทนิน ราวกับเทียบเคียงได้โดยตรงกับลำดับชั้นสถานะของมนุษย์ ชีวิตวิทยาร่วมกันชุดนี้ ตามการตีความของเขา แสดงให้เห็นว่าลำดับชั้นของมนุษย์เป็นข้อเท็จจริงตามธรรมชาติที่วิวัฒนาการขึ้นมา ไม่ใช่การจัดวางทางวัฒนธรรมหรือการเมืองล้วน ๆ ในรายการข่าว Channel 4 News ของอังกฤษ เขาวางกรอบตรรกะเดียวกันนี้ให้เป็นเรื่องของความหลีกเลี่ยงไม่ได้ ความต่อเนื่องระหว่างวิธีที่สัตว์กับมนุษย์จัดระเบียบโครงสร้างทางสังคมของตน ตามคำอธิบายของเขา เป็นเพียงสิ่งที่วิวัฒนาการทำนายไว้ ไม่ใช่สิ่งที่วัฒนธรรมประดิษฐ์ขึ้นมาจากความว่างเปล่า ไม่มีการทดลองใหม่ใดสนับสนุนเรื่องนี้เลย มันเป็นการสังเคราะห์ที่ได้รับความนิยม สร้างขึ้นบนสายงานวิจัยลอบสเตอร์ของ Kravitz แล้วขยายไปสู่มนุษย์ด้วยการเทียบเคียง

Leonor Gonçalves นักประสาทวิทยาแห่ง University College London รื้อการเทียบเคียงนี้ออกเป็นชิ้น ๆ ในเดือนมกราคม 2018 ข้อแรกเป็นเรื่องโครงสร้างโครงสร้างสมองที่เซโรโทนินออกฤทธิ์ด้วยในสัตว์มีกระดูกสันหลังหลากหลายกว่าสิ่งใดในระบบประสาทของลอบสเตอร์อย่างมาก และลอบสเตอร์ไม่มีสมองส่วนกลางในความหมายแบบสัตว์มีกระดูกสันหลังเลยแม้แต่น้อย มันทำงานด้วยปมประสาท (ganglia) กลุ่มเซลล์ประสาทที่ร้อยเรียงไปตามร่างกายแทนที่จะรวมกันเป็นอวัยวะเดียว และมันไม่มีอมิกดาลา (amygdala) โครงสร้างรูปอัลมอนต์ในสัตว์มีกระดูกสันหลังที่ผูกกับความกลัวและการให้น้ำหนัทางอารมณ์มากที่สุด ข้อที่สองเป็นเรื่องทิศทาง โมเลกุลตัวเดียวกันขึ้นไคคนละทางในสัตว์ต่างชนิดกัน เซโรโทนินที่ต่ำลงสัมพันธ์กับความก้าวร้าวที่น้อยลงในลอบสเตอร์ ในมนุษย์กลับตรงข้าม เมื่อเซโรโทนินต่ำ การสื่อสารระหว่างอมิกดาลากับสมองกลีบหน้าอ่อนแรงลง การควบคุมอารมณ์บกพร่อง และความก้าวร้าวเพิ่มขึ้นแทน — ทิศทางผลที่ตรงข้ามกันจากการขาดสารเคมีตัวเดียวกัน

Gonçalves เสริมอีกสองอย่าง ประเด็นทางเภสัชวิทยาข้อหนึ่ง และประเด็นเชิงเปรียบเทียบอีกข้อหนึ่ง โพรแซค (Prozac) ปิดกั้นไม่ให้เซโรโทนินถูกดูดกลับที่ปลายประสาท มันทำหน้าที่ระดับโมเลกุลที่ปลายประสาทของลอบสเตอร์แบบเดียวกับที่ทำในสมองมนุษย์ แต่ไม่ได้ทำให้ลอบสเตอร์กลายเป็นอะไรที่ผู้สังเกตการณ์ที่มีเหตุผลจะเรียกว่ามีความสุขขึ้นเลย ความคล้ายคลึงทางเคมีไม่ใช่ความเท่าเทียมกันทางจิตวิทยา ส่วนสัตว์เปรียบเทียบที่ห่างจากมนุษย์พอ ๆ กับลอบสเตอร์ เธอชี้ไปที่ผึ้ง ลำดับชั้นตามธรรมชาติของผึ้งเป็นแบบผู้หญิงเป็นใหญ่ — ตัวผู้ถูกขับไล่ออกจากรังและตายไม่นานหลังผสมพันธุ์ หากชีววิทยาเพียงอย่างเดียวเป็นตัวกำหนดโครงสร้างทางสังคมที่ถูกต้องเพียงหนึ่งเดียว ก็ไม่ชัดเจนเลยว่าทำไมแมลงกับคริสต์เตียนที่ใช้ชุดเครื่องมือทางเคมีเก่าแก่ชุดเดียวกันเป็นส่วนใหญ่ จึงลงเอยด้วยการกำหนดโครงสร้างที่ต่างกัน ขนาดนั้น Gonçalves วางจุดแยกลอบสเตอร์/มนุษย์ไว้ที่ราว 350 ล้านปีเช่นเดียวกับที่ Peterson ใช้ แต่ให้ค่ามรดกร่วมขึ้นเดียวที่ยืนยันได้จากบรรพบุรุษนั้นต่างออกไป ไม่ใช่การเดินสายของระบบประสาท แต่เป็นหมุดหมายของระบบย่อยอาหาร บรรพบุรุษตัวนั้นคือจุดที่สัตว์วิวัฒนาการมีทางเดินอาหารขึ้นเป็นครั้งแรกโดยพื้นฐาน

ตัวเลขคือจุดที่ PZ Myers เข้าใจโดยตรง เขาเป็นนักชีววิทยาด้านพัฒนาการเชิงวิวัฒนาการแห่ง University of Minnesota Morris และเป็นผู้เขียนบล็อก Pharyngula ในบทความสองชิ้นเมื่อเดือนมกราคม 2018 — ชิ้นที่สองสร้างขึ้นจากข้อโต้แย้งฉบับเต็มของเพื่อนร่วมงานนิรนามคนหนึ่ง งานชิ้นนั้น Myers เผยแพร่และรับรองโดยไม่มีข้อสงวนใด ๆ — Myers โต้แย้งว่าตัวเลข 350 ล้านปีของ Peterson ผิดพลาดไปมาก อาร์โทรพอดกับคอร์เดเตแยกเป็นคนละไฟลัมแล้วตั้งแตยุคแคมเบรียน เมื่อราว 550 ล้านปีก่อน และการประมาณด้วยนาฬิกาโมเลกุลวางจุดแยกที่แท้จริงไว้ใกล้ 800 ล้านปีมากกว่า ความคลาดเคลื่อนจึงอยู่ราวสองร้อยถึงสี่ร้อยห้าสิบล้านปี ขึ้นอยู่กับว่าหยิบปลายด้านใดของช่วงตัวเลขมาเปรียบเทียบ

การทำงานบนเซโรโทนินเป็นหลักฐานของอะไรกันแน่ — ข้อโต้แย้งที่ลึกกว่าของ Myers อยู่ตรงคำถามนั้น สัตว์ที่มีสมมาตรด้านข้างแทบทุกชนิดใช้เซโรโทนิน พืช เชื้อรา และอะมีบาบางชนิดก็ใช้ การพบมันทั้งในลอบสเตอร์และในมนุษย์จึงแทบไม่บอกอะไรเลยด้วยตัวมันเอง ในทางเคมี มันเทียบเท่ากับการสังเกตว่าสัตว์ทั้งสองใช้น้ำเหมือนกัน ลอบสเตอร์ เขาย้ำ ไม่มีสมองในความหมายที่สัตว์มีกระดูกสันหลังมี รูปร่างของลำดับชั้นก็ไม่ตายตัว แม้แต่ในหมู่ญาติที่ใกล้ชิดที่สุดของมนุษย์ โบโนโบใกล้ชิด

ทางพันธุกรรมกับทั้งชิมแปนซีและมนุษย์ พวกมันดำเนินระบบสังคมแบบส่าสอนที่นำโดยเพศเมีย บนเคมีสมองที่แทบแยกไม่ออกจากของชิมแปนซี ซึ่งจัดลำดับชั้นความเหนือกว่าโดยเพศผู้อย่างเคร่งครัด เคมีที่ใช้ร่วมกันกำหนดศักยภาพสำหรับโครงสร้างทางสังคม มันไม่ได้เขียนกฎของโครงสร้างนั้น ในมนุษย์โดยเฉพาะอย่างยิ่ง วัฒนธรรมต่างหากที่ทำหน้าที่ส่วนนั้น

Gonçalves กับ Myers เองก็ยังไม่เห็นตรงกันด้วยซ้ำว่า Peterson ผิดพลาดตรงไหน Gonçalves ยอมรับตัวเลข 350 ล้านปีของเขาไว้ แล้วโต้แย้งว่าการเทียบเคียงล้มเหลวอยู่ดี ทั้งในแง่โครงสร้างและทิศทางของผล Myers ปฏิเสธตัวเลขนั้นเองว่าเป็นความผิดพลาดขั้นพื้นฐาน ผู้เชี่ยวชาญที่ระบุชื่อได้สองคน มาบรรจบกันที่คำตัดสินเดียวกันว่าข้อโต้แย้งของ Peterson ล้มเหลว ผ่านสองเส้นทางที่ต่างกันและเข้ากันได้เพียงบางส่วน — สัญญาณแบบนี้ดีต่อสุขภาพของวิทยาศาสตร์ที่อยู่เบื้องหลังมากกว่า การที่นักวิจารณ์ทุกคนท่องข้อโต้แย้งเดียวกันเป๊ะ ๆ ซ้ำกันหมด

บทวิจารณ์เดินทางไปไกลเกินขอบเขตของชีววิทยาเชิงวิชาชีพ Nieve Brydges เขียนคอลัมน์วิทยาศาสตร์ให้ Varsity หนังสือพิมพ์นักศึกษาของมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ และตีพิมพ์บทความชิ้นหนึ่งในปี 2022 เธอยอมรับจุดแยกสัตรมีกระดูกสันหลัง/ไม่มีกระดูกสันหลังไว้ที่ราว 500 ล้านปี และยอมรับว่าลึอบสเตอร์แตกแขนงออกไปราว 150 ล้านปีหลังจุดแยกฐานนั้น แล้วยังพบว่าข้อโต้แย้งนี้พังทลายลงด้วยเงื่อนไขของมันเอง ในกรอบของเธอ วิวัฒนาการไม่ใช่การไต่ระดับที่มุ่งสู่เป้าหมายไปยังรูปแบบสุดท้ายที่ดีขึ้น แบบเดียวกับตัวละครในเกมที่เลเวลอัพ ลำดับชั้นที่รอดจากการคัดเลือกโดยธรรมชาติมาได้ ไม่ได้กลายเป็นแม่แบบที่ควรค่าแก่การเลียนแบบด้วยเหตุ นั้น โครงสร้างทางสังคมแบบร่วมมือและเสมอภาคก็รอดจากการคัดเลือกโดยธรรมชาติได้ดีพอ ๆ กับโครงสร้างที่จัดลำดับชั้นอย่างเคร่งครัด ชีววิทยาไม่ได้ให้ใบอนุญาตแก่ใครในการยกการจัดวางแบบใดแบบหนึ่งขึ้นเป็นแบบธรรมชาติหนึ่งเดียว เธอสรุปไว้อย่างนั้น Brydges ถูกทำเครื่องหมายไว้ตรงนี้ในฐานะเสียงของผู้ที่ไม่ใช่ผู้เชี่ยวชาญ ไม่ใช่แหล่งข้อมูลงานวิจัย แต่คอลัมน์ของเธอบอกว่าข้อโต้แย้งนี้ไหลออกไปไกลเพียงใดจากชีววิทยาต้นฉบับ และผู้อ่านอิสระจำนวนมากเพียงใดที่ยังคงพบรอยร้าวเดียวกันในมัน

สิ่งที่รุดผ่านการตรวจสอบทั้งหมดนี้มาได้แคบกว่าฉบับที่ได้รับความนิยม และน่าสนใจกว่าเพราะความแคบนั้นเอง เซโรโทนินและออกโทพามีนกำหนดท่าทางที่ตรงข้ามกันในคริสต์เขียนเดคาพอดจริง ลงลึกไปถึงการเดินสายระดับโมโตนิวรอน ชุดเครื่องมือการส่งสัญญาณด้วยเอมีนสีย้อนกลับไปถึงบรรพบุรุษร่วมสุดท้ายของโปลาทีเรียนได้จริง เก่าแก่กว่าการแยกตัวของอาณาจักรสัตว์ออกเป็นแผนผังร่างกายต่าง ๆ สิ่งที่ไม่รุดคือการกระโดดจากชุดเครื่องมือขึ้นไปสู่คำตัดสินเกี่ยวกับสังคมมนุษย์ โมเลกุลตัวเดียวถูกระบบประสาทต่างกันหยิบไปใช้กับงานต่างกัน นั่นคือเรื่องราวของการนำกลับมาใช้ใหม่เชิงวิวัฒนาการ — คำเก่าที่ถูกยืมเข้าไปในภาษาใหม่ ไม่ใช่ประโยคเดิมที่พูดซ้ำ มันกำหนดว่าระบบประสาทมีศักยภาพทำอะไรได้บ้าง มันไม่ได้กำหนดว่าสังคมจำเป็นต้องเป็นอย่างไร

ทำยึดตัวของล็อบสเตอร์อยู่ได้เท่าที่เซโรโทนินยังอยู่ ก้ามที่ใหญ่กว่าเข้ามาในตู้เมื่อไร มันก็ร่วงลงเมื่อนั้น ลำดับชั้น แม้แต่ในล็อบสเตอร์ เป็นสถานะชั่วคราว ไม่ใช่คำพิพากษาตลอดกาล ลีกลงไปตามเส้นประสาทเส้นเดียวกันนั้น มีเอมีนโบราณอีกตัวหนึ่งวิ่งอยู่ ปรับจูนไว้เพื่อการไล่ล่า ไม่ใช่เพื่อท่าทาง — โมเลกุลตัวนั้นพาการเดินทางนี้ต่อไปข้างหน้า จากการยืดยัดในจุดยืนของตน ไปสู่การอยากได้อะไรบางอย่างตั้งแต่แรกเริ่ม

พลิกกลับได้หาก: พบคริสต์เขียนเดคาพอดสักชนิดที่ออกโทพามีนก่อให้เกิดท่ายึดตัวแบบครองอำนาจ และเซโรโทนินก่อให้เกิดท่าทางแบบยอมจำนน — สลับทิศทางแทนที่จะทำซ้ำแบบแผนของ Kravitz และทำลายความคงตัวข้ามสปีชีส์ที่การทดลองซ้ำในล็อบสเตอร์แค่ครั้งเดียวในปัจจุบัน

แหล่งข้อมูล

- **1980** · Livingstone, Harris-Warrick, Kravitz, "Serotonin and Octopamine Produce Opposite Postures in Lobsters" — [Science](#)
- **2017** · Jékely, "Ancient Coexistence of Norepinephrine, Tyramine, and Octopamine Signaling in Bilaterians" — [BMC Biology](#)
- **2018** · The Conversation, "Psychologist Jordan Peterson says lobsters help to explain why human hierarchies exist – do they?" (quoting Jordan Peterson and Leonor Gonçalves, UCL) — [The Conversation](#)

- **2018** · Myers, "Lobsters are not people" — [Pharyngula/FreethoughtBlogs](#); companion post, "Jordan Peterson does not understand evolution, nervous systems, or logic" — [Pharyngula/FreethoughtBlogs](#)
- **2022** · Brydges, "Botched biology: how does Jordan Peterson use science to prop up his (mis)beliefs?" — [Varsity](#)

12. ข้อตกลงของสัตว์มีกระดูกสันหลัง

เอมีนโบรานตัวที่สามเดินทางอยู่บนเส้นประสาทสายเดียวกับที่หล่อเลี้ยงเซโรโทนิน และออกโทพามีนตลอดช่วงรุ่งเรืองและถดถอยของกึ่งลือสเตอร์ มันไม่ได้ปรับตัวทำ มันปรับการไล่ล่า ชื่อของมันคือโดปามีน โนนาเปปไทด์ผูกสัตว์ตัวหนึ่งไว้กับอีกตัวหนึ่ง เอมีนของลือสเตอร์กำหนดลำดับชั้นได้เพียงชั่วขณะที่สารเคมียังออกฤทธิ์ ส่วนผู้ส่งสารตัวนี้รับงานคนละอย่างโดยสิ้นเชิง มันไม่บอกว่าควรรู้สึกร้อยอย่างไรต่อสัตว์อีกตัว ไม่บอกว่าควรยืนอยู่ตรงไหน แต่ตัดสินใจว่าจะไล่ตามสิ่งที่ยังไม่เกิดขึ้นหรือไม่

สมองเล็กจิ๋วของปลาแลมเพรย์ซ่อนสิ่งที่ไม่มีใครคาดคิดไว้ ผ่าออกมาแล้วจะเจอเบซัลแกงเกลียที่เดินสายครบวงจร โครงสร้างสมองส่วนลึกตัวนี้ตัดสินใจว่าการเคลื่อนไหวใดจะเกิดขึ้น ณ ขณะนั้น มันทำงานด้วยโดปามีน ในผังที่แทบไม่ต่างจากของมนุษย์เลย ปลาแลมเพรย์ในแม่น้ำเย็นเยียบไม่มีชาครไกร ไม่มีกระดูกในกะโหลก และแทบไม่มีกระดูกสันหลังให้อ่อยถึง มีเพียงแท่งยึดหยุ่นที่เรียกว่าโนโทคอร์ดกับวงแหวนกระดูกอ่อนเท่านั้น มันคู่กับปลาแฮกฟิช เป็นหนึ่งในสองสายเลือดสัตว์มีกระดูกสันหลังที่เก่าแก่ที่สุดที่ยังมีชีวิตอยู่ในปัจจุบัน และยืนแทนสัตว์มีกระดูกสันหลังยุคแรกเริ่มได้ทั้งตัว ยุคก่อนที่สิ่งใดจะมีบ้านพักถาวรขึ้นในปาก

เบซัลแกงเกลียทำหน้าที่เหมือนเจ้าหน้าที่จราจรของการกระทำ มันกักแรงกระตุ้นที่แข่งกันไว้ จนกว่าจะมีตัวหนึ่งได้ไฟเขียวให้ผ่าน โดปามีนคือสารเคมีที่ปรับเกณฑ์ตัดสินใจของเจ้าหน้าที่คนนี้ เมื่อเซลล์ผลิตโดปามีนในวงจรนี้เองหายไป มนุษย์ก็เป็นโรคพาร์กินสัน — มือสั่น ตัวเกร็งแข็ง ร่างกายไม่เชื่อฟังอย่างราบรื่นอีกต่อไป นักวิจัยเดินแผนผังวงจรชุดเดียวกันนี้ในปลาแลมเพรย์ไว้แล้ว พวกเขาพบเซลล์ผลิตโดปามีนในบริเวณที่เทียบเท่ากับ substantia nigra และ ventral tegmental area ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เซลล์เหล่านั้นเชื่อมต่อผ่านวิถี "ทางตรง" และ "ทางอ้อม" แบบเดียวกับที่ทำให้สมองสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมทั้งเริ่มและหยุดการเคลื่อนไหวได้ และถูกคุมด้วยตัวรับสองชนิดคือ D1 และ D2 ที่ทำงานเหมือนสวิตช์คนละตัวในฝั่งผู้รับสัญญาณ บทปริทัศน์ปี 2021 ประมวลผลการเปรียบเทียบนี้เข้าไว้ด้วยกัน ก่อนหน้านั้นห้าปี มีบทความอ่อยถึงมันตรง ๆ ไปแล้ว ในชื่อที่ไม่ถ่อมตัวนักว่า "The Basal Ganglia Over 500 Million Years" ตีพิมพ์ในวารสาร Current Biology ปี 2016

เบซิลแกงเกลียที่ขับเคลื่อนด้วยโดปามีนของปลาแลมเพรย์แสดงโครงสร้างแบบสัตว์ เลี้ยงลูกด้วยนมครบถ้วนอยู่แล้ว จุดกำเนิดของระบบนี้จึงย้อนกลับไปได้ไกลอย่างน้อย เท่านั้น คือถึงรากฐานของ Vertebrata เอง ปลาแลมเพรย์และปลาแฮกฟิชแยกออกจากสายที่นำไปสู่สัตว์มีกระดูกสันหลังมีขากรรไกรเมื่อราว 560 ล้านปีก่อน ในยุคเอ เดียวคาร์บอนตอนปลาย ก่อนที่สิ่งมีชีวิตใดจะมีขากรรไกรหรือรยางค์ นั่นทำให้มันเป็นสัตว์ มีกระดูกสันหลังที่มีชีวิตซึ่งดั้งเดิมที่สุดเท่าที่จะหามาเปรียบเทียบได้ ยังเหลือความไม่ แน่นนอนอยู่บ้าง ว่าวงจรสมองส่วนอื่นของแลมเพรย์สะท้อนผังของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ได้ตรงเป๊ะเพียงใด หรือเป็นเพียงสภาวะบรรพบุรุษที่เรียบง่ายกว่าและถูกต่อเติม ภายหลัง แต่โครงสร้างแกนกลางของโดปามีนไม่มีข้อกังขาใด ๆ

วงจรนี้เก่าแก่ และเคมีที่อยู่เบื้องหลังมันเก่าแก่ยิ่งกว่า โดปามีนถูกสร้างขึ้นจากไทโรซีน ในสองขั้นตอน ไทโรซีนเป็นกรดอะมิโนที่เซลล์มีติดมืออยู่แล้วจากงานอื่น เอนไซม์ชื่อ 'ไทโรซีนไฮดรอกซิเลสเปลี่ยนมันเป็น L-DOPA — โมเลกุลตัวเดียวกับที่ใช้เป็นยาให้ ผู้ป่วยพาร์กินสันในทุกวันนี้ — จากนั้นเอนไซม์ตัวที่สอง DOPA ดีคาร์บอกซิเลส ปิดงาน ด้วยการเปลี่ยนมันจนกลายเป็นโดปามีนโดยสมบูรณ์

สูตรสองขั้นตอนแบบเป๊ะ ๆ นี้โผล่ขึ้นในสัตว์ที่ไม่มีกระดูกสันหลังเลยแม้แต่หน่อย ในปี 2021 ทีมวิจัยจาก Stockholm University — Rehab El-Shehawy, Sandra Luecke-Johansson, Anton Ribbenstedt และ Elena Gorokhova — ยืนยันว่าเอนไซม์ทั้งสอง ตัวแสดงออกอยู่ในผนังลำไส้ของไรน้ำ *Daphnia magna* พวกเขาติดตามการทำงานของเอนไซม์ตัวที่สองตลอดวัฏจักรการลอกคราบของมัน และตรวจพบ L-DOPA ที่ ออกฤทธิ์ทางชีวภาพอยู่ในลำไส้ แม้จะไม่พบโดปามีนอิสระก็ตาม งานวิจัยชิ้นนี้ตีพิมพ์ ใน mSystems เมื่อวันที่ 9 พฤศจิกายน 2021

Daphnia เป็นครัสเตเชียน เป็นโปรโตสโตม อยู่คนละกิ่งของแผนภูมิต้นไม้แห่งชีวิตกับ สัตว์มีกระดูกสันหลังทุกชนิด ซึ่งล้วนเป็นดิเวเทอโรสโตม เมื่อสายพันธุ์ที่ห่างกันขนาดนี้ สองสายใช้วิถีสองเอนไซม์เหมือนกันเป๊ะ การอ่านที่ตรงไปตรงมาที่สุดคือทั้งคู่สืบทอด มันมาจากบรรพบุรุษร่วม ไม่ใช่ต่างคนต่างคิดค้นเคมีชุดเดียวกันขึ้นแยกกันสองครั้ง นั่นย่อมผลักดันจุดกำเนิดของวิถีนี้ให้ย้อนไปก่อนการแยกสายระหว่างโปรโต สโตมกับดิเวเทอโรสโตม แล้วการแยกสายนั้นเกิดขึ้นเมื่อไรกันแน่ ก็ยังเถียงกันไม่จบ รู้ เพียงว่าอยู่ที่ไหนสักแห่งในยุคนีโอโปรเทอโรโซอิก การศึกษาด้วยนาฬิกาโมเลกุลวาง

มันไว้ที่ราว 642 ถึง 761 ล้านปีก่อน โดยการวิเคราะห์ 18 ยีนขึ้นหนึ่งตกลงใกล้ 670 ล้านปี ส่วนแบบจำลองทางสถิติที่สอบเทียบกับฟอสซิลรัดช่วงให้แคบลงเหลือราว 558 ถึง 575 ล้านปีก่อน บทความปี 2016 ว่าด้วยขีดจำกัดความแม่นยำของมาตราเวลา โมเลกุล ทบทวนข้อขัดแย้งระหว่างสองวิธีนี้ — "หินเทียบกับนาฬิกา" — ไว้อย่างตรงไปตรงมา

ไม่ว่าเคมีชุดนี้จะมาจากไหน มันก็ไม่ได้อยู่นิ่งเฉย ในหนอนตัวกลม *Caenorhabditis elegans* ระบบโดปามีนที่สร้างจากเซลล์ประสาทเพียง 8 เซลล์ กำหนดว่าหนอนจะตัดสินใจหาอาหารอย่างไร ตามที่มีการทบทวนไว้ในปี 2025 ในวารสาร Royal Society Open Science ในแมลงหวี่ *Drosophila* กลุ่มเซลล์ประสาทโดปามีนที่เรียกว่า PAM จำเป็นต่อการที่แมลงหวี่จะเรียนรู้ว่ากลิ่นหนึ่งทำให้น้ำตาลหรือน้ำได้ นี่คือการเชื่อมโยงแบบเข้าหา หมายถึงเรียนรู้โดยมุ่งเข้าใกล้สิ่งที่ดี ไม่ใช่หนีจากสิ่งที่เป็นอันตราย เซลล์กลุ่มนี้ยังสัญญาณเมื่อรางวัลมาถึงจริง ผลลัพธ์นี้รายงานไว้ในเอกสารพรีปริ้นต์ปี 2025 เฉพาะใน *C. elegans* โดปามีนดูเหมือนจะทำหน้าที่เป็นตัวปรับอารมณ์เคมีแบบกระจาย อาบเซลล์ประสาทจำนวนมากอย่างหลวม ๆ มากกว่าจะเดินสายแบบจุดต่อจุดอย่างที่สัตว์มีกระดูกสันหลังใช้ คำว่า "วงจร" จึงเข้ากับกรณีของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังตัวนี้ได้หลวมกว่าที่เข้ากับสมองสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

การนับคะแนน

หลักฐานที่ชัดเจนที่สุดว่าโดปามีนไม่ใช่แค่สารเคมีแห่งความสุข มาจากการบันทึกสัญญาณของเซลล์ประสาทโดปามีนที่ละเซลล์ในสมองลิงที่กำลังทำพฤติกรรมต่าง ๆ Wolfram Schultz ทำงานร่วมกับนักทฤษฎี Peter Dayan และ P. Read Montague แล้วพบว่าเซลล์ประสาทเหล่านี้ไม่ได้ยังสัญญาณแค่ตอนที่รางวัลมาถึง แต่ยังเป็นสัดส่วนกับว่าความคาดหวังของสัตว์นั้นผิดไปมากแค่ไหน รางวัลที่ดีเกินคาดดันสัญญาณให้พุ่งเหนืออัตราปกติของเซลล์ประสาท รางวัลที่มาตรงตามคาดไม่ก่อให้เกิดอะไรผิดปกติ ส่วนรางวัลที่ควรมาถึงแล้วกลับไม่มา กดสัญญาณให้ตกต่ำกว่าเส้นฐาน ตรงกับจังหวะที่มันควรปรากฏพอดี ผลงานนี้ตีพิมพ์ในวารสาร Science เดือนมีนาคม 1997 และรูปแบบที่พบตรงกันเกือบคำต่อคำกับสัญญาณความคลาดเคลื่อนที่ใช้ในกลุ่มวิธีการเรียนรู้ของคอมพิวเตอร์ที่เรียกว่า temporal-difference learning ระบบ

แบบนั้นปรับการคาดเดาอนาคตของตัวเองตามระยะที่การคาดเดาครั้งก่อนพลาดไปพอดี

สัญญาณเดียวกันนี้ไหลออกไปไกลเกินห้องทดลองลิงแสมเพียงแห่งเดียวมานานแล้ว นักวิจัยตามรอยกิจกรรมโดปามีนที่มีรูปทรงตามค่าคลาดเคลื่อนการทำนายได้ตลอดทางในปลากระดูกแข็งและสัตว์ฟันแทะ และจับมันได้ในมนุษย์ด้วยการสแกน fMRI บริเวณ ventral striatum และ ventral tegmental area ระหว่างทำภารกิจหายรางวัลง่าย ๆ การคำนวณนี้ถูกแยกออกมาได้ครั้งแรกในสมองส่วนกลางของลิงตัวหนึ่ง แล้วกลายเป็นนิสัยที่พบทั่วสัตว์มีกระดูกสันหลังทั้งหมด ไม่ใช่ความเชี่ยวชาญเฉพาะของไพรเมต

การคำนวณนี้ไม่ต้องมีชิ้นส่วนโมเลกุลใหม่แม้แต่ชิ้นเดียว มันทำงานบนสายที่ติดตั้งไว้แล้วนับร้อยล้านปี — วิถีจากไทโรซีนสู่โดปามีนแบบเดียวกับที่พบในลำไส้เรื้อน้า วางอยู่ในวงจรที่สร้างขึ้นตั้งแต่รากฐานของ Vertebrata แล้วได้รับมอบงานใหม่ ไม่ใช่ขยับรายการ แต่คือจดคะแนน

เรื่องราวของค่าคลาดเคลื่อนการทำนายรางวัลไม่ใช่เรื่องราวทั้งหมด Kent Berridge และ Terry Robinson จาก University of Michigan พบว่าเมื่อฉีดแอมเฟตามีนเข้าไปตรง ๆ ในศูนย์สมองที่เรียกว่า nucleus accumbens หนูก็อยากได้ชูโครสมากขึ้น มันเข้าหาชูโครสมากขึ้น ทำงานหนักขึ้นเพื่อจะได้มันมา แต่ไม่ได้ชอบมันมากขึ้นเลย ตัดสินจากปฏิกิริยาการแสดงออกทางใบหน้าต่อรสชาติชุดเดียวกัน อันเป็นแพตเทิร์นการขยับลิ้นและปากที่จำเพาะ ใช้วัดความเพลิดเพลินในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมวัยทารก ทั้งสองคนโต้แย้งว่าการอยากได้กับการชอบแยกออกจากกันได้ เดินผ่านวงจรคนละชุด และงานหลักของโดปามีนคือสร้างอย่างแรกขึ้นมา คือแรงดึงดูดที่พวกเขาเรียกว่า incentive salience ไม่ใช่ความสุขจากตัวรางวัลเอง

ทฤษฎีดั้งเดิมมีมาตั้งแต่ปี 1998 ในวารสาร Brain Research Reviews แล้วถูกขัดเกลาและตั้งชื่อใหม่ตรง ๆ ในฉบับปรับปรุงปี 2007 ว่า "The debate over dopamine's role in reward" เมื่อขยายผลออกไปเป็นทฤษฎี incentive-sensitization ของการเสพติด การแบ่งชุดเดียวกันนี้อธิบายความอยากที่ทวีความรุนแรงขึ้นเรื่อย ๆ แม้ความสุขจากยาจะจางลง ว่าคือสิ่งที่ "การอยากได้" ซึ่งพุ่งพันการควบคุมและหลุดลอยจาก "ความชอบ" ย่อมผลิตออกมาพอดี Robinson และ Berridge ยังยืนยันการปกป้องคำ

อธิบายนี้อยู่ในบทวิเคราะห์ย้อนหลังปี 2025 สามสิบปีให้หลัง การแบ่งสามทาง ว่า โดปามีนเกี่ยวข้องกับหลักกับการเรียนรู้ ความชอบ หรือการอยากได้ ยังเป็นคำถามเปิดที่ไม่มีข้อยุติ ไม่มีฝ่ายใดปิดประเด็นนี้ลงได้

ตัวรับที่อ่านสัญญาณโดปามีนเพิ่มจำนวนขึ้นระหว่างทาง การทำซ้ำจีโนมทั้งชุดเกิดขึ้น ไกล่รากฐานของสายวิวัฒนาการสัตว์มีกระดูกสันหลังเมื่อราว 450 ล้านปีก่อน ในยุค ออร์โดวิเซียน — เหตุการณ์ที่คลังพันธุกรรมทั้งหมดของสิ่งมีชีวิตถูกคัดลอกซ้ำโดย บังเอิญเป็นสองเท่า ยีนทุกตัวเพิ่มเป็นสองชุดพร้อมกัน มันแยกยีนตัวรับโดปามีนคู่ บรรพบุรุษหนึ่งคู่ ออกเป็นตัวรับชนิดคล้าย D1 สี่ตัวและชนิดคล้าย D2 อีกหลายตัวที่ ปลา นก และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมพกพากันมาถึงทุกวันนี้ การศึกษาปี 2013 ในวารสาร Molecular Biology and Evolution ทำแผนที่มันไว้ ไม่ใช่ทุกสายพันธุ์ที่รักษาสำเนา ไว้ครบในเวลาต่อมา สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมสูญเสียหนึ่งในสี่ตัวที่เรียกว่า D1C ไป ภายหลัง ส่วนอีกตัวคือ D1E หายไปอย่างเป็นอิสระในอีกหลายกิ่งก้านสายพันธุ์ ระบบ ที่หลงเหลืออยู่ยังทำงานแบบเดิมได้ตลอดช่วงว่าง 450 ล้านปี และนั่นไม่ใช่แค่การ อนุমানทางพันธุกรรม ปลาชิบราฟิซที่ได้รับมอร์ฟินพัฒนาความชอบต่อสถานที่ขึ้นมา และ naloxone ตัวยับยั้งโอปิออยด์สกัดกันความชอบนั้นได้ ปลาชนิดเดียวกันนี้ยัง แสดงความชอบต่อนิโคตินและเอทานอลที่ถูกปรับพฤติกรรมไว้ ความชอบที่คงอยู่แม้ งดสารไปแล้วสามสัปดาห์ ตามที่รายงานไว้ในการศึกษาปี 2013 ใน PLOS ONE ปลา ชิบราฟิซกับมนุษย์หน้าตาไม่เหมือนกัน ไม่มีบรรพบุรุษร่วมกันมานาน 450 ล้านปี และ ไม่ได้สร้างระบบให้รางวัลด้วยวิธีทางกายวิภาคแบบเดียวกัน แต่อะไรก็ตามที่คำนวณ รางวัลในสัตว์แต่ละชนิด ล้วนทำงานบนตัวอักษรชุดเดียวกันที่ยืมมาใช้ร่วมกัน

การเติมพันเป็นการเติมพันเดียวกันหมด ตั้งแต่ปลาไร้ขากรรไกรที่ไม่มีเปลือกสมอง เลยแม้แต่ชนิดเดียว ไปจนถึงปลาลายทางตัวเล็กที่เลือกว่ายเข้าไปในช่องตู้ที่เคยมียา วางอยู่ คือทำนาย ลงมือ แล้วปล่อยให้โมเลกุลโบราณตัวหนึ่งคอยจดคะแนนไว้ โมเลกุลตัวนี้คงที่เช่นนี้ตลอดสัตว์ทุกชนิดที่กล่าวมา สิ่งที่เปลี่ยนไปคือขนาดและ รูปทรงของสมองที่ถูกสร้างขึ้นล้อมรอบมัน และมันเปลี่ยนในสองสายพันธุ์ยิ่งกว่าสาย อื่นใด

พลิกกลับได้หาก: ยีนสังเคราะห์โดปามีนชนิด TH/DDC ที่พบใน *Daphnia* กลับ กลายเป็นยีนที่ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันทางวิวัฒนาการ (non-homologous) กับ

ฉบับที่พบในสัตว์มีกระดูกสันหลัง คือวิวัฒนาการขึ้นเองอย่างเป็นอิสระ ไม่ได้สืบทอดมาจากบรรพบุรุษร่วม สิ่งที่อ่านได้ว่าเป็นการสืบทอดอันลึกซึ้งหนึ่งเดียว ก็จะกลายเป็นการคิดค้นเคมีสองขั้นตอนแบบเดียวกันขึ้นแยกกันสองครั้ง

แหล่งข้อมูล

- **2021** · El-Shehawy, R. et al., "Microbiota-Dependent and -Independent Production of L-Dopa in the Gut of *Daphnia magna*" — [PMC8577283](#)
- **2016** · "Uncertainty in the Timing of Origin of Animals and the Limits of Precision in Molecular Timescales" — [PMC4651906](#)
- **1997** · Schultz, W., Dayan, P., Montague, P.R., "A Neural Substrate of Prediction and Reward" — [Science 275:1593](#)
- **1998** · Berridge, K.C., Robinson, T.E., "What is the role of dopamine in reward: hedonic impact, reward learning, or incentive salience?" — [Brain Research Reviews 28:309](#)
- **2016** · "The Basal Ganglia Over 500 Million Years" — [Current Biology30680-7.pdf](#))
- **2013** · "Evolution of Dopamine Receptor Genes of the D1 Class in Vertebrates" — [PMC3603308](#)

13. สมองใหญ่ โมเลกุลโบราณ

สมองของสัตว์กลุ่มหนึ่งเปลี่ยนไประหว่างการเดินทางจากบกลงน้ำ และการเปลี่ยนแปลงนั้นมีสิ่งเทียบเท่าอยู่เพียงสายพันธุ์เดียวบนโลกนี้ นั่นคือไพรเมต รวมถึงมนุษย์ที่ตามมาอีกหลายสิบล้านปีให้หลัง ย้อนกลับไปในยุคพาลีโอซีนตอนปลายต่อเนื่องถึงอีโอซีนตอนต้น เมื่อราว 55 ถึง 60 ล้านปีก่อน สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมบนบกที่มีกับสายพันธุ์หนึ่งเดินลุยลงไปในน้ำตื้น แล้วว่ายน้ำ แล้วไม่เคยกลับขึ้นฝั่งอีกเลย พวกมันคืออาร์เคโอซิติ บรรพบุรุษของวาฬและโลมาทุกตัวที่มีชีวิตอยู่ในปัจจุบัน

ปัญหาชนเข้าให้ทันทีเมื่อเอาขนาดสมองของสัตว์ที่ต่างกันขนาดนี้มาเทียบกัน ร่างกายที่ใหญ่กว่าต้องการสมองที่ใหญ่กว่าด้วยเหตุผลที่ไม่เกี่ยวกับความฉลาดเลย ผิวหนังต้องรับรู้สึกมากขึ้น กล้ามเนื้อต้องสั่งการมากขึ้น สัญญาณประสาทต้องเดินทางไกลขึ้น ในปี 1973 Harry Jerison แห่ง UCLA เสนอทางแก้ไข เขาเรียกมันว่าค่าดัชนี encephalization quotient หรือ EQ วิธีคิดคือเอามวลสมองจริงของสัตว์หารด้วยมวลสมองที่ "คาดว่าจะเป็น" ตามหลักสถิติสำหรับร่างกายขนาดนั้น EQ เท่ากับ 1 คือค่าเฉลี่ยพอดีของขนาดร่างกายนั้น สูงกว่า 1 คือสมองใหญ่กว่าที่ขนาดร่างกายเพียงอย่างเดียวจะทำได้

สิ่งที่สูตรถูกสร้างมาเพื่อจับต่างหากคือเรื่องสำคัญ ไม่ใช่ตัวสูตร — มวลสมองหารด้วย 0.12 คูณมวลกายยกกำลังสองในสาม — สิ่งนั้นคือขนาดสมองสัมพัทธ์ ปรับมาตรฐานไว้จนหนูตัวหนึ่งกับวาฬตัวหนึ่งมาอยู่บนสเกลเดียวกันได้เลย

บนสเกลนั้น มนุษย์ทำคะแนนสูงกว่าสัตว์อื่นทุกชนิดที่เคยวัดมา ด้วยค่า EQ ราว 7.4 ถึง 7.8 วาฬหัวทุยเป็นเจ้าของสมองที่ใหญ่ที่สุดเท่าที่เคยมีในสัตว์ตัวใดก็ตามหนักราว 8 ถึง 9 กิโลกรัม เกือบหกเท่าของมวลสมองมนุษย์ที่ 1.3 ถึง 1.4 กิโลกรัม แต่ทำคะแนน EQ ได้เพียงราว 0.58 ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมเสียอีก ขนาดสัมพันธ์กับขนาดสัมพัทธ์จึงชี้ไปคนละทาง Gerhard Roth และ Ursula Dicke ทบทวนตัวเลขเหล่านี้ที่ University of Bremen ในปี 2005 พวกเขาตั้งตารางเปรียบเทียบของตนมาจากชุดข้อมูลดั้งเดิมปี 1973 ของ Jerison ร่วมกับการสำรวจกายวิภาคปี 1987 ของ Haug ใช้ EQ เป็นเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับเทียบสัตว์ที่ต่างกัน

ขนาดนี้ แล้วชี้จุดอ่อนของมันไปในคราวเดียวกัน ข้อโต้แย้งของพวกเขาคือขนาดสมองดิบสะท้อนความสามารถทางปัญญาได้ใกล้เคียงกว่า EQ โดยเฉพาะจำนวนเซลล์ประสาทในเปลือกสมองและความเร็วที่สัญญาณเดินทางไปตามเซลล์เหล่านั้น ตัว EQ เอง ตามคำบอกเล่าของนักวิจัยที่ศึกษามันอย่างใกล้ชิด ยังเป็นตัวแทนของ "ความฉลาด" ที่ถกเถียงกันอยู่และยังไม่ยุติ ไม่ใช่ตัวแทนที่ได้ข้อสรุปแล้ว

การขยายตัวไม่ราบรื่นและไม่สม่ำเสมอ หากมองเฉพาะกลุ่มซีทาเซียนเพียงอย่างเดียว Stephen Montgomery และคณะที่ University College London สร้างแบบจำลองมวลสมองและมวลกายย้อนกลับข้ามแผนภูมิต้นไม้ตระกูลซีทาเซียนและฮิปโปโปแตมส์ที่กำหนดอายุไว้แล้ว งานปี 2013 ของพวกเขาคำนวณค่า EQ ออกมาที่จุดต่าง ๆ ตลอดสาย กิ่งแรกเริ่มอยู่ที่ราว 0.371 กิ่งถัดมาราว 0.702 จุดบรรพบุรุษของวาฬบาลีนราว 1.144 ตัวเลขเพิ่มขึ้นเป็นช่วง ๆ กระโดดขึ้นในบางกิ่งเฉพาะ ไม่ใช่ได้ระดับขึ้นทางเดียวอย่างราบรื่น วาฬมีฟันกับวาฬบาลีนไม่ได้เดินตามวิถีเดียวกันด้วยซ้ำ ผู้เขียนระบุความขัดแย้งที่ยังไม่ยุติข้อนี้ไว้ตรง ๆ พร้อมยกหลักฐานจากงานแยกต่างหากของ Barton และ Capellini และของ Hager กับคณะ ตีพิมพ์ระหว่างปี 2011 ถึง 2012 ที่ชี้ว่ามวลสมองและมวลกายอาจถูกกำหนดโดยยีนที่แยกจากกันบางส่วน ไม่ใช่แฟกเตอร์เดียวที่เชื่อมโยงกัน

ผลลัพธ์ที่ได้ไม่เหมือนสมองไพรเมตเลยแม้แต่น้อย Lori Marino ซึ่งขณะนั้นอยู่ที่ Emory University อธิบายว่าเปลือกสมองซีทาเซียนไปถึงความซับซ้อนด้วยการทวีคูณ ไม่ใช่ด้วยการเจาะจงเฉพาะทาง หน่วยเปลือกสมองบาง ๆ หน่วยหนึ่งถูกทำซ้ำแล้วซ้ำเล่าบนพื้นผิวที่พับทบไปมาอย่างมาก แทนที่จะเป็นมอดูลที่หนากว่าและแยกแยะหน้าที่ชัดเจนกว่าแบบที่ประกอบขึ้นเป็นเปลือกสมองไพรเมต บทความปี 2004 ของเธอดึงมาจากการฟอสซิลสี่ปี ตรวจกะโหลก 66 ชิ้น แล้วตรวจสอบไขว้กับข้อมูลอีก 144 ชิ้น นี่คือการรอบคอบของเธอเองว่าความซับซ้อนของซีทาเซียนเกิดขึ้นทางกลไกอย่างไร ไม่ใช่กลไกที่พิสูจน์แล้วเทียบกับคำอธิบายคู่แข่งเรื่องความซับซ้อนแบบไพรเมต แต่ก็ยังไม่มีใครหักล้างมันได้นับแต่นั้นมา

เคมีที่ไหลอยู่ภายในผลลัพธ์คือสิ่งเดียวที่สองสายพันธุ์นี้ไม่ได้ทำต่างกัน สายหนึ่งอยู่บนบก อีกสายหนึ่งกลับคืนสู่ทะเล ทั้งคู่ไปถึงสมองที่ใหญ่และซับซ้อนด้วยเส้นทางกายวิภาคที่ต่างกัน ด้วยจังหวะที่ต่างกัน ภายใตกฎสัดส่วนที่ต่างกัน แต่ระบบโดปามีน

ที่สร้างขึ้นตั้งแต่รากฐานของ Vertebrata — วิถีโทโรซินสู่โดปามีนแบบเดียวกัน
ตระกูลตัวรับโบราณแบบเดียวกัน — คือสิ่งที่ทั้งสมองไพรเมตและสมองซีทาเซียน
สืบทอดมา ก่อนที่ฝ่ายใดจะเริ่มสร้างสิ่งใหม่ทับลงไปข้างบน

ไม่มีสายพันธุ์ใดต้องคิดค้นคำศัพท์เคมีใหม่ขึ้นมาเพื่อสร้างสิ่งที่ไม่เคยมีมาก่อน เปลือก
สมองซีทาเซียนพับทบและทวิคูณ เปลือกสมองไพรเมตหนาขึ้นและแบ่งเป็นมอดูล
ฮาร์ดแวร์คนละชั้น มาถึงจุดนั้นคนละตารางเวลา แต่ที่เดินสายอยู่ในทั้งคู่คือโมเลกุลส่ง
สัญญาณโบราณกลุ่มเดียวกันหยิบมือหนึ่ง ทำหน้าที่พื้นฐานแบบเดียวกับที่เคยทำใน
ปลาหรือสัตว์เลื้อยลูกด้วยนมยุคแรก เพียงแต่ในสเกลที่ใหญ่ขึ้นและในการจัดวางแบบ
ใหม่ ความซับซ้อน จากหลักฐานนี้ ดูจะเป็นเรื่องว่าชิ้นส่วนที่มีอยู่แล้วถูกจัดระเบียบ
อย่างไรและมีอยู่กี่ชิ้น ไม่ใช่เรื่องของการหาชิ้นส่วนใหม่มาเพิ่ม

สายพันธุ์ที่สามตอกย้ำประเด็นเดียวกันนี้ด้วยกายวิภาคที่แปลกยิ่งกว่าเดิม นัก
วิวัฒนาการการประมวลผลเทียบเท่าเปลือกสมองขึ้นมาจากโครงสร้างที่จัดวางไม่
เหมือนนีโอคอร์เท็กซ์ของสัตว์เลื้อยลูกด้วยนมเลย นั่นคือแพลตฟอร์มแบบ "นิวเคลียร์" ที่
ประกอบด้วยกลุ่มเซลล์ประสาทรวมตัวกันเป็นก้อน แทนการจัดเรียงเป็นชั้น ๆ แบบ
สัตว์เลื้อยลูกด้วยนม เกือบหนึ่งศตวรรษ โครงสร้างสมองนกที่เกี่ยวข้องถูกตั้งชื่อและ
ถูกมองว่าเป็น "สไตรเอตัม" แบบดั้งเดิมคล้ายสัตว์เลื้อยคลาน ราวกับว่าสมองส่วนหน้า
ของนกเป็นเนื้อเยื่อสะท้อนกลับเป็นส่วนใหญ่ ไม่มีอะไรคล้ายเปลือกสมองอยู่เลย จน
กระทั่งกลุ่มนักวิจัยนานาชาติ the Avian Brain Nomenclature Consortium นำโดย
Erich Jarvis และ Anton Reiner ใช้เครื่องหมายโมเลกุล การตามรอยการเชื่อมต่อ
และสรีรวิทยาไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเหล่านี้คือแพลตฟอร์มแท้ ๆ คู่เทียบเชิง
วิวัฒนาการของเปลือกสมอง แล้วตั้งชื่อใหม่ให้สอดคล้องกันในปี 2005 บริเวณหนึ่งคือ
nidopallium caudolaterale ปัจจุบันถูกมองว่าเทียบเท่าในเชิงหน้าที่กับเปลือกสมอง
ส่วนหน้าพรีพรอนทาลของสัตว์เลื้อยลูกด้วยนม นกกับสัตว์เลื้อยลูกด้วยนมมีบรรพบุรุษ
ร่วมกันครั้งสุดท้ายเมื่อราว 320 ล้านปีก่อนตามการกำหนดอายุทั่วไป ในยุคคาร์บอนิ
เฟอรัส ณ จุดที่สายซึ่งนำไปสู่สัตว์เลื้อยคลานและนกฝ่ายหนึ่ง แยกออกจากสายที่นำ
ไปสู่สัตว์เลื้อยลูกด้วยนมอีกฝ่ายหนึ่ง สมองนกและสมองสัตว์เลื้อยลูกด้วยนมจึงสร้าง
การประมวลผลระดับสูงที่บรรจบกันขึ้นจากกายวิภาคเริ่มต้นที่เป็นอิสระจากกัน
ตลอดช่วงเวลาทางธรณีวิทยาอันยาวนานพอ ๆ กัน

แม้แต่ตัวโมเลกุลผู้ส่งสารเองก็ยังคงถูกดึงไปปรับบทบาทเชิงโครงสร้างใหม่แท้ ๆ ได้ในระบบการมองเห็นของปลาหมึกยักษ์ นักวิจัยระบุตัวรับโดปามีนที่ไม่มีสิ่งเทียบเท่าในชีวิตวิยาสัตว์มีกระดูกสันหลังเลย มันเป็นตัวรับแบบไอโอโนโทรปิก ช่องทางกายภาพที่เปิดเร็วเมื่อสัมผัสโดยตรง ขณะที่ตัวรับโดปามีนของสัตว์มีกระดูกสันหลังทุกชนิดกลับทำงานผ่านวิถีเมแทโบโทรปิกแบบลูกโซ่ที่ช้ากว่า การค้นพบนี้ตั้งชื่อตัวรับใหม่ว่า DopC1 เผยแพร่เป็นเอกสารปริบรินต์เมื่อเมษายน 2025 และยังไม่ผ่านการทบทวนโดยผู้ทรงคุณวุฒิอย่างสมบูรณ์ ข้อควรระวังที่ควรพาดพิงไปด้วย เซฟาโลพอดกับสัตว์มีกระดูกสันหลังแยกสายกันที่จุดแยกโปรโตสโตม-ดิเวเทอโรสโตมจุดเดียวกับที่กล่าวถึงไว้สำหรับจุดกำเนิดทางเคมีของโดปามีน ตัวโมเลกุลเองจึงสืบทอดมา แต่วิธีอ่านสัญญาณแบบเฉพาะนี้เป็นสิ่งประดิษฐ์แบบบรรจบที่แตกต่างหาก ซ่อนทับเข้าไปภายหลัง เหมาะสมกับสัตว์ที่วรรณกรรมประสาทวิทยาเซฟาโลพอดบรรยายไว้แล้วว่าเป็นสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังที่ก้าวหน้าทางพฤติกรรมที่สุดเท่าที่รู้จัก

เชื้อสายและการคิดค้นใหม่

รายการชิ้นส่วนประสาทพื้นฐานมีอยู่แล้วในบรรพบุรุษร่วมของไนดาเรียนกับสัตว์สมมาตรทวิภาคีทุกชนิด — เซลล์ประสาท ไชนอปส์ นิวโรเปปไทด์ และโปรแกรมกำหนดแบบแผนหน้า-หลังที่วางผังระบบประสาทไว้ก่อนจะถูกสร้างขึ้นจริง บทปริทัศน์ที่สังเคราะห์งานจากกลุ่มไฟโลจีโนมิกส์หลายกลุ่มระหว่างปี 2013 ถึง 2021 ลากเส้นชัดเจนผ่านเรื่องทั้งหมดนี้ ไนดาเรียน เช่น แมงกะพรุนและดอกไม้ทะเล มีเพียงร่างแหประสาทกระจายตัว ไม่มีสมองเลยแม้แต่น้อย และอยู่นอกกลุ่มที่รวมสัตว์ที่มีสมมาตรซ้าย-ขวาทุกชนิดโดยสิ้นเชิง ชุดเครื่องมือร่วมกันจึงมีอายุมากกว่า 600 ล้านปี

สมองใหญ่และซับซ้อนทุกสมองที่สร้างจากชิ้นส่วนเหล่านั้นนับแต่นั้นมา ปัจจุบันถูกอ่านว่าเป็นโครงการก่อสร้างที่เป็นอิสระจากกัน ไม่ใช่มรดกร่วมของสิ่งที่เรียกว่า "สมอง" ในตัวมันเอง — ในหนอนริบบิ้น ในแอนเนลิด ในเซฟาโลพอด ในสัตว์ขาข้อ ในสัตว์มีกระดูกสันหลัง นี่คือตัวอย่างของโฮโมพลาซี คำที่ใช้เรียกลักษณะที่วิวัฒนาการขึ้นมากกว่าหนึ่งครั้ง แทนที่จะถูกส่งทอดมาจากเจ้าของร่วมเพียงรายเดียว การอ่านแบบนี้เข้ามาแทนมุมมองเก่าที่เคยถือว่าความซับซ้อนร่วมกันในกลุ่มเหล่านี้คือ

หลักฐานของจุดกำเนิดร่วมอันลึกซึ้งเพียงจุดเดียว จุดยืนใหม่สร้างขึ้นจากหลักฐาน ฟอสซิลและการทำแผนที่ยีนด้านพัฒนาการที่รวบรวมมาจนถึงปี 2021 มันยังคงยึดว่า ชุดเครื่องมือระดับโมเลกุลมีจุดกำเนิดเดียว แต่ล้มเลิกความคิดที่ว่าสมองที่ซับซ้อนเอง ก็มีจุดกำเนิดเดียวนั้นร่วมกันด้วย

นี่คือรูปทรงที่ชัดเจนของคำตอบในเรื่องนี้ โมเลกุลโดปามีนทุกตัวที่เคลื่อนผ่านเปลือก สมองส่วนหน้าพรีพอนทัลของมนุษย์ ผ่านนีโอคอร์เทกซ์ที่พับทบของโลมา และผ่าน nidopallium caudolaterale ของนก ล้วนสืบเชื้อสายมาจากเคมีอายุนับพันล้านปีชุด เดียวกัน สืบทอดมาเพียงครั้งเดียวจากแหล่งกำเนิดเดียว อวัยวะที่ทำหน้าที่คิดล่อม รอบเคมีนั้นกลับไม่ได้มีเชื้อสายร่วมเดียวกันแบบนั้นเลย มันถูกสร้างขึ้นอย่างเป็นอิสระ ต่อกันอย่างน้อยสามหรือสี่ครั้งแยกกัน โดยสายพันธุ์ที่ไม่เคยมีวิวัฒนาการอื่นใดให้ใช้งาน นอกจากโมเลกุลเก่าแก่กับช่วงเวลาอันยาวนานมาก โมเลกุลนี้เก่าแก่พอ ๆ กันทั้งใน สมองนกและในสมองมนุษย์ ใหม่อยู่อย่างเดียวนั่นคือสถาปัตยกรรมที่หล่อหลอมมันไว้ สืบ ย้อนโมเลกุลที่ยืมมาเหล่านี้กลับไปให้ไกลพอ ผ่านพันสมองทุกสมองที่มันเคยถูกสร้าง เข้าไป แล้วมันจะบรรจบกันที่สิ่งที่เก่าแก่กว่าสมองใด ๆ ทั้งสิ้น นั่นคือประชากร บรรพบุรุษกลุ่มเดียวที่เขียนตัวอักษรซึ่งพวกมันถูกสร้างขึ้นมาจากนั้นเป็นครั้งแรก

พลิกกลับได้หาก: มีการแสดงให้เห็นว่าสมองซีทาเซียนและสมองไพรเมตขยาย ขนาดขึ้นจากตัวขับเคลื่อนทางพันธุกรรมร่วมกันที่มีอยู่แล้วในบรรพบุรุษร่วมล่าสุด ของทั้งคู่ — สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมยุคมีโซโซอิกที่ไม่มีลักษณะใดในสองอย่างนี้เลย — ไม่ใช่จากการกลายพันธุ์ที่เป็นอิสระต่อกันซึ่งเกิดขึ้นแยกกันในแต่ละสายพันธุ์ เรื่องราวการบรรจบกันที่ถูกเล่าซ้ำสองครั้งก็จะกลายเป็นมรดกร่วมเพียงหนึ่งเดียว

แหล่งข้อมูล

- **1973** · Jerison, H.J., Evolution of the Brain and Intelligence — [ScienceDirect topic overview](#)
- **2004** · Marino, L., "Cetacean Brain Evolution: Multiplication Generates Complexity" — [eScholarship](#)
- **2013** · Montgomery, S.H. et al., "The Evolutionary History of Cetacean Brain and Body Size" — [Evolution 67:3339](#)
- **2005** · Roth, G., Dicke, U., "Evolution of the Brain and Intelligence" — [Trends in Cognitive Sciences 9:250](#)

- **2005** · Jarvis, E.D., Reiner, A. et al., "Avian Brains and a New Understanding of Vertebrate Brain Evolution" — [Nature Reviews Neuroscience 6:151](#)
- **2025** · "Novel dopaminergic neurotransmission in the Octopus visual system" — [bioRxiv](#)

14. เส้นด้ายที่ไม่เคยขาด

เมื่อราว 4.2 พันล้านปีก่อน ประชากรเซลล์กลุ่มหนึ่งมีชีวิตอยู่บนโลกแล้ว และรักษาตัวอักษรชุดเดียวกับที่หนังสือเล่มนี้ติดตามมาตลอดไว้ได้ นั่นคือยุคเฮเดียน และตามการประมาณการล่าสุดครั้งหนึ่ง คือราว 300 ล้านปีหลังดวงจันทร์ก่อตัวเสร็จ ไม่ใช่เซลล์เดียว แต่เป็นประชากร คือสายพันธุ์ที่เกี่ยวข้องกันหลายสาย แลกเปลี่ยนยีนกันไปมา และหนึ่งในนั้นบังเอิญเป็นกึ่งที่ทิ้งลูกหลานมาถึงวันนี้ กิ่งคู่แข่งทุกกิ่งในประชากรกลุ่มนั้นเจียบไปนานแล้ว เหลือรอดแค่ชุดเครื่องมือของกิ่งเดียว ธรรมเนียมเรียกมันว่า LUCA — บรรพบุรุษร่วมสากลตัวสุดท้าย (last universal common ancestor) คำว่า "สุดท้าย" บอกข้อเท็จจริงเรื่องการสูญพันธุ์ไม่ได้อ้างว่า LUCA เป็นตัวแรก อยู่ตัวเดียว หรือเรียบง่าย

จีโนมของ LUCA ถูกประเมินว่าเข้ารหัสโปรตีนได้ราว 2,600 ชนิด เทียบเคียงได้กับแบคทีเรียยุคปัจจุบัน ตัวเลขนี้มาจากการสร้างแบบจำลองย้อนกลับปี 2024 ที่ Edmund Moody และ Philip Donoghue แห่ง University of Bristol เป็นผู้นำ ร่วมกับทีมนักชีววิทยาของนักธรณีวิทยา นักบรรพชีวินวิทยา และนักฟิสิกส์เชิงคณิตศาสตร์ฐานของมันเป็นตระกูลยีน 399 ตระกูลที่ได้รับค่าความน่าจะเป็นเชิงสถิติว่าเคยมีอยู่ในบรรพบุรุษ เพิ่มขึ้นจาก 355 ตระกูลที่การประเมินแบบระมัดระวังกว่าเมื่อปี 2016 ให้อยู่ในบรรดาอินเหล่านั้น ประมาณ 19 ยีนเป็นของ CRISPR ระบบภูมิคุ้มกันของแบคทีเรียที่ใช้ต่อสู้กับไวรัส กล่าวอีกนัยหนึ่ง LUCA มีอายุมากพอ และฝังตัวอยู่ในระบบนิเวศของตัวเองมากพอที่จะมีศัตรูแล้ว

ตัวเลขอายุ 4.2 พันล้านปีมาจากการเปรียบเทียบยีนพาราล็อกส์ คือคู่ยีนภายในจีโนมเดียวกันที่เกิดจากการทำซ้ำโบราณของยีนบรรพบุรุษตัวเดียว นักวิจัยใช้มันเป็นนาฬิกาโมเลกุล แล้วสอบเทียบกับบันทึกอิสระของฟอสซิลจุลินทรีย์และเคมีไอโซโทปช่วงความน่าเชื่อถือ 95% ครอบคลุมตั้งแต่ 4.09 ถึง 4.33 พันล้านปี งานวิจัยตีพิมพ์ในวารสาร Nature Ecology & Evolution เมื่อเดือนกรกฎาคม 2024 และนิตยสาร Quanta Magazine นำเสนอในเดือนพฤศจิกายนปีเดียวกัน

นักวิทยาศาสตร์ที่มีชื่อเสียงระบุข้อสงสัยที่ชัดเจนต่อผลนี้ Patrick Forterre อดีตหัวหน้าฝ่ายจุลชีววิทยาที่ Institut Pasteur และเป็นผู้ช่วยจัดการประชุมที่บัญญัติศัพท์ "LUCA" ขึ้นมาเอง กล่าวว่าอายุ 4.2 พันล้านปียากมากที่จะประสานเข้ากับระยะเวลาที่โลกต้องใช้เย็นตัวลงหลังการชนที่ก่อกำเนิดดวงจันทร์ เขายังสงสัยว่าจังหวะของวิวัฒนาการยุคแรกจะถูกระบุได้แม่นยำอย่างที่แบบจำลองนี้อ้างหรือไม่ Luis Delaye แห่ง Cinvestav Irapuato ยอมรับอายุที่เก่าแก่นี้ แต่ไม่ยอมรับเรื่องความซับซ้อน เขาชี้ไปที่ความแตกต่างในเคมีของเยื่อหุ้มเซลล์และกลไกการจำลอง DNA ระหว่างแบคทีเรียกับอาร์เคีย แล้วโต้แย้งว่า LUCA น่าจะเรียบง่ายกว่าที่จีโนม 2,600 โปรตีนบ่งบอก ข้อโต้แย้งสองข้อนี้ไม่ได้บ่งชี้ถึงผลการค้นพบ มันรักษาความเชื่อตรงของผลไว้

หลักฐานอิสระสามสายบรรจบกันที่ประชากรบรรพบุรุษเพียงกลุ่มเดียว ไม่ใช่จุดกำเนิดชีวิตที่แยกกันหลายจุด ข้อแรก รหัสพันธุกรรม — กฎเกณฑ์ที่จับคู่คำสามตัวอักษรของอักขระชีวภาพเข้ากับกรดอะมิโน — เกือบเป็นสากลทั้งหมด ข้อสอง ไรโบโซม เครื่องจักรโมเลกุลที่อ่านรหัสนั้นและร้อยกรดอะมิโนเข้าด้วยกันเป็นโปรตีน มีความเป็นเนื้อเดียวกันทางวิวัฒนาการ (homologous) ทั่วทุกโดเมนของสิ่งมีชีวิต และสร้างขึ้นบางส่วนจาก RNA ที่ยังคงร่องรอยของโลกที่เก่าแก่และเรียบง่ายกว่าไว้ ข้อสาม สิ่งมีชีวิตทุกชนิดสร้างโปรตีนจากกรดอะมิโนชนิดซ้าย และสร้างแกนพันธุกรรมจากน้ำตาลชนิดขวา ความถนัดมือแบบนี้ไม่จำเป็นต้องออกมาเหมือนกันถึงสองครั้ง แต่ละอย่างคือสิ่งที่นักสถิติเรียกว่าความบังเอิญในมิติสูง คือการจัดวางแบบหนึ่งจากอีกหลายแบบที่ใช้งานได้ดีทางเคมีพอ ๆ กัน แต่สิ่งมีชีวิตทั้งหมดกลับใช้ร่วมกันโดยไม่มีใครบอกได้ว่าทำไม

Carl Woese แห่ง University of Illinois ทำให้เหตุผลนี้ให้เป็นทางการ เขาใช้ไฟโลจีนติกส์ของ RNA ไรโบโซมสร้างรากของต้นไม้แห่งชีวิตขึ้นใหม่ แล้วสายการสร้างแบบจำลองที่ไล่จาก Weiss กับคณะในปี 2016 มาถึงทีมของ Moody ในปี 2024 ก็สืบทอดต่อมา แบบจำลองของ Woese เองในปี 1998 ตีพิมพ์ใน PNAS วาดภาพช่วง "การหลอมรวมทางพันธุกรรม" (genetic annealing) ก่อนยุค LUCA ไว้ว่า สายพันธุ์ยุคแรกแลกเปลี่ยนยีนกันอย่างสับสนและกลายพันธุ์เร็วมาก จนยังไม่มีสิ่งใดคล้ายสปีชีส์ที่เสถียรอยู่เลย จนกระทั่งการแลกเปลี่ยนช้าลง สามโดเมนในปัจจุบัน — แบคทีเรีย อาร์เคีย และยูคาริโอตา — จึงหลอมตัวแยกออกเป็นสายที่สืบทอดในแนว

ดิง งานติดตามผลปี 2003 พยายามสร้างเนื้อหาใหม่ที่แท้จริงของบรรพบุรุษนั้นขึ้นใหม่ โดยตรงจากจีโนมิกส์เชิงเปรียบเทียบ ไม่มีใครในสายงานนี้ได้แย้งข้อเท็จจริงเรื่องการอนุรักษ์แบบสากล แต่กลไกเฉพาะของ Woese ว่าความเป็นสากลนั้นเกิดขึ้นได้อย่างไร ยังเป็นเพียงหนึ่งในผู้ทำขิงหลายราย เพราะพลวัตของประชากรก่อนยุค LUCA ทดสอบได้ยากกว่าเนื้อหาจีโนมของ LUCA เองมาก

สิ่งที่จะพลิกกลับเรื่องนี้ได้

เรื่องราวสีพื้นล้านปีจะควรถ้าแก่การเชื่อถือก็ต่อเมื่อมันบอกตรง ๆ ว่าอะไรจะพลิกกลับมันได้ Paul Davies แห่ง Arizona State University ต่อยอดข้อเสนอก่อนหน้านี้ของ Carol Cleland และ Shelley Copley แล้วบรรยายบททดสอบที่ชัดเจนที่สุดไว้ นั่นคือ "ชีวมณฑลเงา" (shadow biosphere) — จุลินทรีย์ที่ใช้ชีวเคมีต่างออกไปอย่างแท้จริง ความถนัดมือต่างกัน ไม่มีรหัสพันธุกรรมร่วม เกิดขึ้นแยกต่างหากจากสายของ LUCA และเพียงแต่ยังไม่ถูกตรวจพบ เพราะจุลชีววิทยามาตรฐานถูกปรับให้จดจำได้ แต่ชีวเคมีที่ชีวิตมีอยู่แล้วเท่านั้น บทความปี 2005 ของ Cleland และ Copley เสนอให้ตามล่าหา "จุลินทรีย์เงา" เหล่านี้เป็นครั้งแรก ส่วน Davies กับผู้ร่วมเขียนขยายแนวคิดนี้เป็นโครงการค้นหาเต็มรูปแบบในปี 2009 พวกเขาเสนอกลยุทธ์ที่เป็นรูปธรรม เช่น สำนวณสภาพแวดล้อมสุดขั้ว — รวมถึงปล่องน้ำพุร้อนใต้ทะเลลึกที่อุณหภูมิ 300 ถึง 400 องศาฟาเรนไฮต์ — เพื่อหาเคมีที่ไม่ตรงกับสิ่งที่รู้จักมาก่อนเลย

ยังไม่พบสิ่งใดเลย ทุกตัวอย่างที่ตรวจสอบมาจนถึงตอนนี้อยู่ในกรอบชีวเคมีที่รู้จักเพียงแบบเดียว คือตัวอักษรชุดที่หนังสือเล่มนี้ติดตามมาตั้งแต่โมเลกุลโครีลตัวแรก Davies เองบอกไว้ว่าการค้นพบจริงจะหมายถึงอะไร "จะเป็นความฮือฮาที่ยิ่งใหญ่ที่สุดในชีววิทยานับตั้งแต่ยุคคาร์วิน" นักวิทยาศาสตร์คนหนึ่งหยิบการเปรียบเทียบขนาดนั้นมาใช้กับการค้นหาที่จับบัตินี้ยังว่างเปล่า นั่นคือการยอมรับอย่างตรงไปตรงมาอยู่ในตัวว่าภาพจุดกำเนิดเดียวในปัจจุบันตั้งอยู่บนการยังไม่พบตัวอย่างค่านมากเพียงใด ไม่ได้ตั้งอยู่บนการพิสูจน์ว่าไม่มีตัวอย่างเช่นนั้นอยู่จริง

บททดสอบนี้วิ่งไปในทิศทางตรงกันข้ามได้ด้วย ไม่ใช่แค่ว่าพบจุดกำเนิดที่เป็นอิสระแล้วหรือยัง แต่ว่าตอนนี้จะสร้างขึ้นมาได้หรือไม่ ในเดือนธันวาคม 2024 นักวิทยาศาสตร์ 38 คนจาก 9 ประเทศ รวมถึงผู้ได้รับรางวัลโนเบลสองคน ตีพิมพ์คำ

เรียกร้องร่วมกันในวารสาร Science หนุนหลังด้วยรายงานทางเทคนิคอิสระยาวราว 300 หน้า พวกเขาขอให้พักการวิจัยชั่วคราวและเปิดวงเสวนาสาธารณะเกี่ยวกับงานวิจัยที่มุ่งสร้าง "แบคทีเรียเงากระจก" (mirror bacteria) คือสิ่งมีชีวิตที่สร้างจากโปรตีนกรดอะมิโนชนิด D และกรดนิวคลีอิกชนิด L ความถนัดมือของทุกโมเลกุลกลับด้านจากสิ่งมีชีวิตทุกชนิดที่มีอยู่ในปัจจุบัน ความกังวลของพวกเขาเจาะจง สิ่งมีชีวิตแบบนี้อาจหลบเลี่ยงการจดจำของระบบภูมิคุ้มกันในมนุษย์ สัตว์ และพืชได้พร้อมกันทั้งหมด เพราะระบบภูมิคุ้มกันทุกระบบที่มีชีวิตอยู่เรียนรู้ที่จะจดจำได้แต่เคมีถนัดมือเดียวที่ร่างกายของตัวเองและเชื้อโรคของมันใช้ร่วมกัน เทคโนโลยีนี้เองถูกประเมินว่ายังห่างไกลอย่างน้อยหนึ่งทศวรรษ ไม่มีสิ่งมีชีวิตเงากระจกอยู่จริงในธรรมชาติหรือในห้องทดลองใด และรายงานฉบับนี้ระบุว่าความพยายามสร้างมันที่กำลังดำเนินอยู่ถูกระงับไปแล้ว

ชีวิตแบบกระจกเงาถูกมองว่าเป็นปัญหาทางวิศวกรรม ไม่ใช่ความเป็นไปไม่ได้ทางเคมี และข้อนั้นเองก็บอกอะไรบางอย่างอยู่ในตัว มันแปลว่าความถนัดมือซ้ายแบบสากลที่สืบทอดมาจาก LUCA ไม่เคยเป็นคำตอบเดียวที่เคมีผลิตออกมาให้ใช้งานได้ นักชีววิทยาเรียกสิ่งนี้ว่า "อุบัติเหตุที่ถูกแช่แข็ง" (frozen accident) คือผลลัพธ์ที่บังเอิญเกิดขึ้นในช่วงต้นแล้วถูกล็อกไว้ เพราะทุกสิ่งที่สร้างขึ้นภายหลังต้องเข้ากันกับมัน ไม่ใช่กฎที่ธรรมชาติจำเป็นต้องมาถึง อุบัติเหตุที่ถูกแช่แข็งยังคงเป็นข้อเท็จจริงที่แท้จริงและมีผลเชิงเหตุปัจจัยต่อโลกใบนี้ เพียงแต่ไม่ใช่ข้อเท็จจริงที่จำเป็นต้องเป็นเช่นนั้น

รูปแบบที่เป็นรูปธรรมที่สุดของบททดสอบนี้เขียนอยู่ในตัวเคมีเอง หากพบส่วนเกินที่แท้จริงของกรดอะมิโนชนิด D ในตัวอย่างใดในอนาคต — ไม่ใช่ความไม่สมดุลแบบรามิกเล็กน้อยที่ไม่ได้มาจากสิ่งมีชีวิตอย่างที่เคยพบในอุกกาบาตบางก้อนแล้ว แต่เป็นส่วนเกินระดับความเข้มข้นแบบชีวภาพจริง ๆ — นั่นจะนับเป็นหลักฐานหนักแน่นของชีวิตที่ไม่เกี่ยวข้องกับสายกรดอะมิโนชนิด L ของโลกเราเอง บทปริทัศน์ปี 2020 ในวารสาร Chemical Reviews พบว่ากรดอะมิโนส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นเองในอุกกาบาตโดยไม่ผ่านสิ่งมีชีวิตเป็นรามิก และยังไม่มีพบส่วนเกิน D ที่มีนัยสำคัญในตัวอย่างนอกโลกใดเลย ส่วนเกินเล็กน้อยที่ปรากฏในอุกกาบาตดึกดำบรรพ์บางก้อนสอดคล้องกับความเอนเอียงชนิดซ้ายของชีววิทยานานโลกเราเอง และถูกอธิบายว่ามาจากเคมีที่ไม่เกี่ยวกับสิ่งมีชีวิต ไม่ใช่จากชีวิตที่ถนัด D เป็นหลักในที่อื่น กรดอะมิโนชนิด D เกิดขึ้นในธรรมชาติจริง แต่อยู่ในบทบาทแคบ ๆ ที่ไม่ใช่โครงสร้างหลักเท่านั้น เช่น จุดเชื่อม

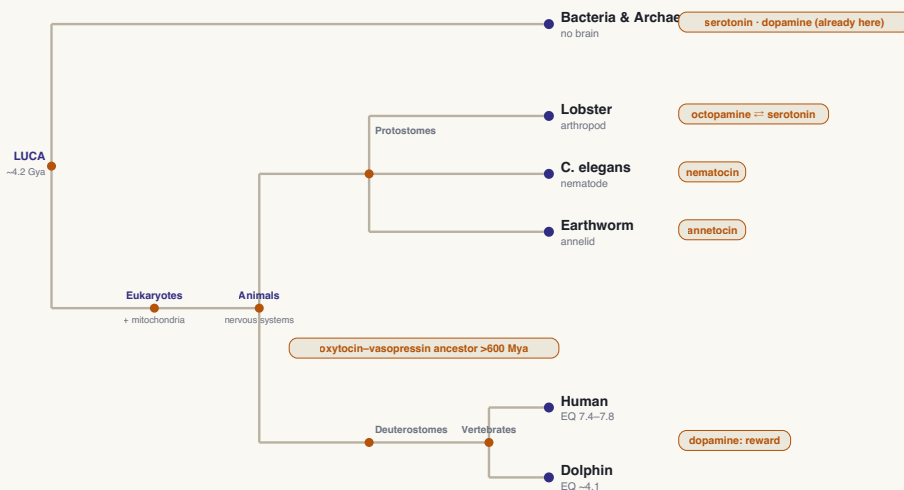
ขวางในผนังเซลล์แบคทีเรีย และยาปฏิชีวนะเพปไทด์จำนวนหยิบมือหนึ่ง ไม่เคยเป็นแกนหลักของโปรตีนทั้งชุดในสิ่งมีชีวิตใดเลย วรรณกรรมชุดเดียวกันนี้เตือนไว้ว่า การตรวจพบความไม่สมดุลไครัลไดในอนาคตยังต้องการการยืนยันอิสระก่อนจะได้รับการยอมรับว่าเป็นไบโอซิกเนเจอร์ เพราะไม่ใช่ทุกความไม่สมดุลทางเคมีในธรรมชาติที่มีสาเหตุจากสิ่งมีชีวิต

อ่านหลักฐานอย่างตรงไปตรงมาแล้ว สิ่งที่น่าสนใจสนับสนุนคือประชากรกลุ่มหนึ่ง ไม่ใช่โมเลกุลแรกเริ่มโมเลกุลเดียวที่ถูกสาดไฟส่อง โดดเดี่ยว และโชคดียิ่งเกิดขึ้นในบ่อน้ำอุ่นหรือปล่องพ่นความร้อนสักแห่ง ประชากรนั้นคือเคมีที่เกี่ยวข้องกันและแข่งขันกันหลายชุด ส่วนใหญ่ไม่ทิ้งลูกหลานไว้เลย มีชุดเดียวที่บังเอิญเป็นกิ้งกิ้งที่ทิ้งไว้ได้ ณ ช่วงเวลาที่ปัจจุบันกำหนดอายุไว้ราว 4.2 พันล้านปีก่อน และยังมีผู้โต้แย้งที่ระบุชื่อได้ สิ่งมีชีวิตทุกชนิดนับแต่นั้นมา — ไร่น้ำ ปลาแลมเพรย์ ปลาซิبراฟิช ปลาหมึกยักษ์ วาฬหัวทุย มนุษย์ผู้กำลังวัดค่าทั้งหมดนี้อยู่ — เป็นย่อหน้าถัดมาในเรื่องราวที่ย่อหน้าแรกคือประชากร ไม่ใช่จุดจุดเดียว

โมเลกุลไม่รู้เรื่องทั้งหมดนี้เลย โดปามีนที่กำลังคำนวณค่าตลาดเคลื่อนการจำหน่ายรางวัลอยู่ในสมองมนุษย์ตอนนี้ ไม่จดจำไร่น้ำตัวที่ผนังลำไส้ของมันรันเคมีสองชั้นตอนแบบเดียวกันเป็นครั้งแรก และจะไม่จดจำสิ่งมีชีวิตตัวต่อไปที่พกพามันไปด้วยเช่นกัน สัตว์ทุกตัวที่เคยใช้ตัวอักษรชุดนี้ — เพื่อปรารภบางสิ่ง เพื่อเรียนรู้จากความผิดพลาดในการคาดเดาสีนั้น เพื่อผูกพัน เพื่อวางท่าที เพื่อคิด — ตายไปแล้ว หรือกำลังจะตาย ตัวอักษรชุดนี้ยังอยู่ที่นี้ ถูกอ่านโดยปากอีกปากหนึ่งในร่างกายอีกร่างหนึ่ง เป็นครั้งแรกอีกครั้ง มันไม่จำเป็นต้องจดจำผู้พกพา เพราะมันอยู่รอดไม่ว่าผู้พกพาจะอยู่รอดหรือไม่ นั่นคือเส้นด้ายที่หนังสือเล่มนี้ติดตามมาตลอดสี่พันล้านปี ไม่ใช่ความเป็นอมตะของตัวตน แต่เป็นความเป็นอมตะของประโยค — ตัวอักษรที่อยู่ยืนยาวกว่าสิ่งมีชีวิตทุกตัวที่เคยสะกดความรู้สึกด้วยมัน

One tree, the same messengers

Where each signalling molecule sits on the tree of life. Branch lengths are schematic.



ต้นไม้แห่งชีวิตหนึ่งต้น และตำแหน่งที่สารสื่อประสาทแต่ละชนิดตั้งอยู่บนนั้น

พลิกกลับได้หาก: ยืนยันได้ว่าพบส่วนเกินของกรดอะมิโนชนิด D ระดับความเข้มข้นแบบชีวภาพจริง ในสิ่งมีชีวิต ฟอสซิล หรือตัวอย่างนอกโลกใด ๆ — นั่นคือหลักฐานของชีวมณฑลเงา หรือของจุดกำเนิดชีวิตที่สองซึ่งเป็นอิสระต่อกัน และจะเปลี่ยน "ประชากรบรรพบุรุษกลุ่มเดียว เท่าที่ใครเคยค้นพบมา" ให้กลายเป็นสองกลุ่ม

แหล่งข้อมูล

- 2024 · Moody, E.R.R. et al., "The nature of the last universal common ancestor and its impact on the early Earth system" — [Nature Ecology & Evolution](#)
- 2024 · Lambert, J., "All Life on Earth Today Descended From a Single Cell. Meet LUCA." — [Quanta Magazine](#)
- 1998 · Woese, C.R., "The Universal Ancestor" — [PNAS 95:6854](#)
- 2009 · Davies, P.C.W. et al., "Signatures of a Shadow Biosphere" — [PubMed 19292603](#)
- 2024 · "Confronting risks of mirror life" — [Science, DOI 10.1126/science.ads9158](#)
- 2020 · "The Search for Chiral Asymmetry as a Potential Biosignature in our Solar System" — [Chemical Reviews](#)