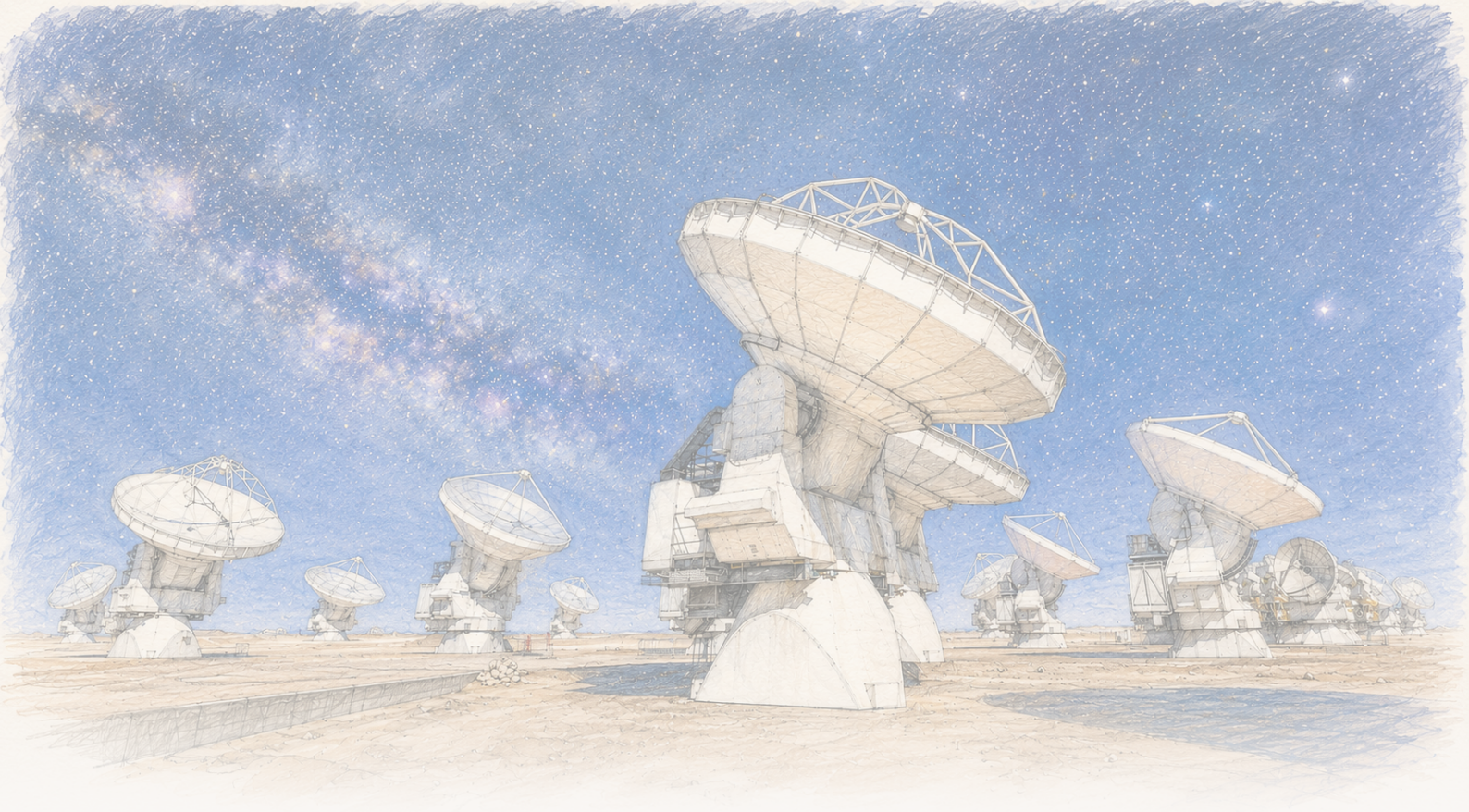


The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

# ดาวหาง interstellar 3I/ATLAS มีน้ำที่ก่อตัวเย็นกว่าดาวหางของเรา — การอ่านเคมีครั้งแรกจากระบบดาวเคราะห์อื่น

*ด้วย ALMA นักดาราศาสตร์จำกัดอัตราส่วนไฮโดรเจน 'หนัก' ต่อไฮโดรเจนธรรมดาในน้ำของ 3I/ATLAS — วัตถุ interstellar ลำดับสามที่รู้จัก — และพบว่าอุดม deuterium อย่างแรง: อย่างน้อยประมาณ 40 เท่าของมหาสมุทรโลกและ 30 เท่าของดาวหางระบบสุริยะทั่วไป นั่นชี้ว่าน้ำก่อตัวภายใต้สภาพเย็นกว่าดาวหางของเรา ผลเป็น lower limit ที่ได้ทางอ้อม (น้ำธรรมดาเองไม่เคยถูกตรวจโดยตรงในการสังเกตนี้) และไม่พูดอะไรเรื่องชีวิตหรือเทคโนโลยี — พูดเพียงเรื่องเคมีกับความเย็น*

---

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Laura Nesso · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Water D/H in 3I/ATLAS as a Probe of Formation Conditions in Another Planetary System*, L. E. Salazar Manzano, T. Paneque-Carreño et al., Nature Astronomy (2026) · DOI: 10.1038/s41550-026-02850-5

เสาอากาศ DV-59 อยู่ด้านหน้า โดยมีเสาอากาศ ALMA หลายตัวกำลังสังเกตท้องฟ้ายามคืนที่มีแสงจันทร์ เครดิต: Alex Pérez / ALMA Observatory

Alex Pérez / ALMA Observatory CC BY 4.0

# ดาวหางจากดาวฤกษ์อีกดวง และลายนิ้วมือในน้ำของมัน

เป็นครั้งคราว มีบางสิ่งตกผ่านระบบสุริยะซึ่งไม่เคยเป็นของเรา ไม่ใช่หินหลงจากแถบดาวเคราะห์น้อย ไม่ใช่ดาวหางที่กลับจาก Oort cloud ตามวงโคจรยาว แต่เป็นวัตถุบนเส้นทาง hyperbolic แบบเปิด — มาจากอวกาศระหว่างดาว วนผ่านดวงอาทิตย์หนึ่งครั้ง แล้วจากไปตลอดกาล ตอนนี้เราเห็นแล้วสามชิ้น ชิ้นแรก ‘Oumuamua ในปี 2017 แทบจากไปก่อนที่ทุกคนจะตกลงกันได้ว่ามันคืออะไร ชิ้นที่สอง 2I/Borisov ในปี 2019 เป็นดาวหางอย่างชัดเจน ชิ้นที่สาม ค้นพบในเดือนกรกฎาคม 2025 คือ 3I/ATLAS — และมันมาพร้อม โคมา ที่ ที่ยังมีการพ่นสสาร มากพอให้เราทำเคมีจริงจังกับมันได้

ก่อนเสียงรบกวนจะเข้ามา นี่คือส่วนที่ควรเก็บไว้ ดาวหาง ระหว่างดาว คือเศษชิ้นหนึ่งของระบบดาวเคราะห์อื่นอย่างแท้จริง: น้ำแข็งและฝุ่นที่ควบแน่นรอบดาวดวงอื่น น่าจะถูกแรงโน้มถ่วงเหวี่ยงออกไปนานแล้ว ลอยผ่านกาแล็กซี และบังเอิญผ่านใกล้ดวงอาทิตย์พอให้น้ำแข็งเริ่มระเหิดตรงตำแหน่งที่กล้องโทรทรรศน์ของเรามองได้ นี่คือข้อเท็จจริงที่น่าทึ่งจริง และน่าทึ่งพอโดยไม่ต้องเสริมอะไร

แต่มันมักถูกเสริมอยู่ดี วัตถุ ระหว่างดาว ดึงดูดการนำเสนอแบบเร้าอารมณ์ชนิดหนึ่ง — ไฟหรี่ลง แล้วถามว่า *แต่ถ้ามีใครสร้างมันล่ะ* — และ 3I/ATLAS ก็ได้ส่วนของมัน คำตอบตรงไปตรงมาคือน่าเบื่อ และคำตอบน่าเบื่อนั้นน่าสนใจกว่า: มันคือดาวหาง คำถามจริงไม่เคยเป็นว่ามีใครสร้างมันหรือไม่ แต่เป็นคำถามเงียบกว่า — ถ้าเราอ่านเคมีของสิ่งที่ประกอบขึ้นรอบดาวอีกดวงได้ มันจะบอกอะไรเกี่ยวกับครอบครัวดาวนั้น? และจะอ่านอย่างไร?

เครื่องมืออ่านครั้งนี้คือน้ำ น้ำประกอบด้วยไฮโดรเจนสองอะตอมกับออกซิเจนหนึ่งอะตอม แต่ไฮโดรเจนส่วนน้อยเป็น *ดิวเทอเรียม* — ฝาแฝดที่หนักกว่า คืออะตอมไฮโดรเจนปกติที่มีนิวตรอนเพิ่มอีกหนึ่งตัว อัตราส่วนไฮโดรเจนหนักต่อไฮโดรเจนปกติในน้ำ เขียน D/H ไม่ได้สุ่ม มันถูกกำหนดทางเคมีส่วนใหญ่จากความเย็น ณ ที่ที่น้ำก่อตัวครั้งแรก: ยิ่งแหล่งกำเนิดเย็นและสงบ ดิวเทอเรียม ยิ่งถูกเก็บเข้าไปมาก และเพราะดาวหางโดยพื้นฐานเป็นตู้แช่ลึก — เก็บน้ำแข็งในความเย็นได้หลายพันล้านปี — D/H ในน้ำของมันจึงเก็บลายนิ้วมือของสภาพที่น้ำก่อตัวไว้ได้

เรารู้ลายนิ้วมือของระบบเราเองพอสมควร: มหาสมุทรโลกและดาวหางหลายตระกูลในระบบสุริยะรวมตัวในช่วงค่อนข้างแคบ สิ่งที่ยังไม่มีใครตรึงได้คือ fingerprint เดียวกันของน้ำที่ก่อตัวรอบ *ดาวฮีกดวง* นั่นคือสิ่งที่งานนี้ออกไปอ่านจาก 3I/ATLAS

# ผู้วิจัยทำอะไร

พวกเขาหัน ALMA — ชุดจานวิทยุขนาดใหญ่ในทะเลทรายชิลี — ไปยัง 3I/ATLAS วันที่ 4 พฤศจิกายน 2025 หกวันหลังดาวหางผ่านรอบดวงอาทิตย์ แล้วปรับเครื่องให้จับการเรืองจาง ๆ ที่ความยาวคลื่นมิลลิเมตรของโมเลกุลสามชนิดใน โคมา: น้ำธรรมดา ($H_2O$), น้ำ *หนัก* (HDO ซึ่งไฮโดรเจนหนึ่งตัวเป็น ดิวเทอเรียม) และ เมทานอล ($CH_3OH$)

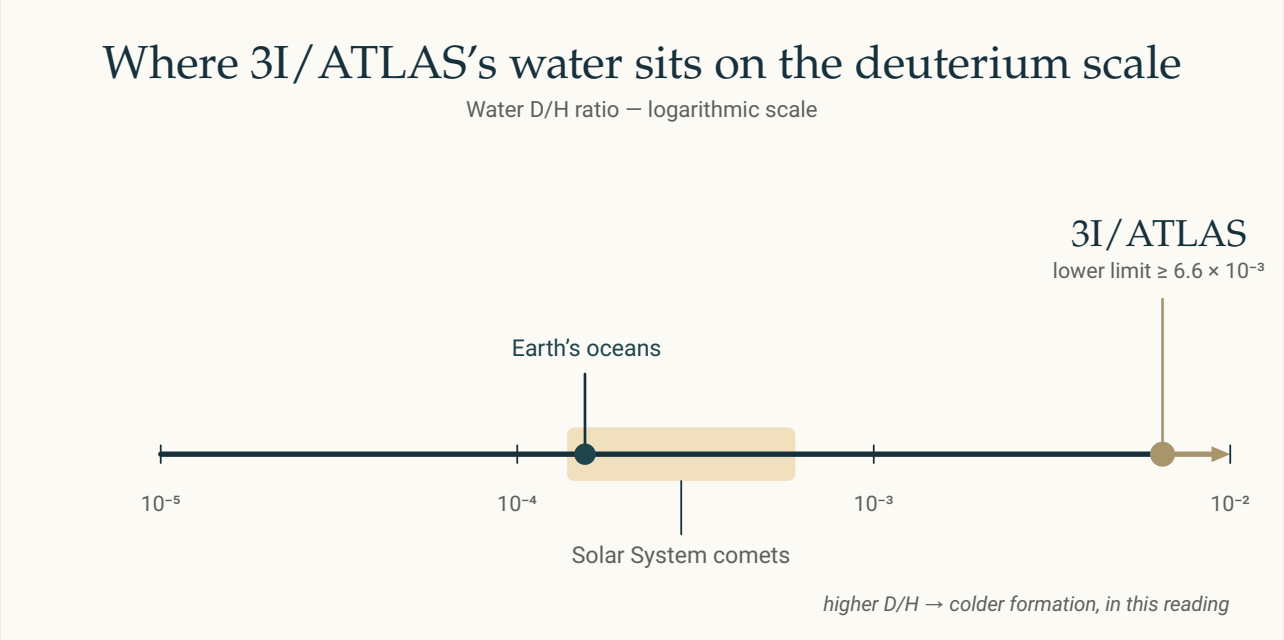
อัตราส่วน D/H ที่ต้องการหา โดยผลแล้วคืออัตราส่วนของน้ำหนักต่อน้ำธรรมดา จึงต้องการทั้งสองอย่าง จากนั้นป้อน spectrum เข้าแบบจำลอง radiative transfer ของบรรยากาศดาวหางที่กำลังขยายตัว (โค้ดชื่อ SUBLIME) และ fit ด้วยกลไกสถิติชนิดเดียวกับที่ใช้ดึงองค์ประกอบบรรยากาศ exoplanet เพื่อหาอุณหภูมิ การไหลออก และอัตราการผลิตโมเลกุลแต่ละชนิด

มีข้อแม้หนึ่งที่กำหนดทุกอย่างต่อจากนี้: **จริง ๆ แล้วพวกเขาตรวจไม่พบน้ำธรรมดา** HDO และ เมทานอล ปรากฏ แต่ $H_2O$ ต่ำกว่า สัญญาณรบกวน ไม่ใช่เพราะขาดน้ำธรรมดา — มันมีมากกว่าน้ำหนักอย่างมหาศาล การที่ เส้นสเปกตรัม หนึ่งจะเห็นได้ไม่ได้ขึ้นกับปริมาณโมเลกุลเท่านั้น แต่ขึ้นกับว่า เส้นสเปกตรัม นั้นสังเกตได้ง่ายแค่ไหน และมีสองสิ่งเล่นงาน เส้นสเปกตรัมของน้ำอย่างแรกคือบรรยากาศ: เส้นสเปกตรัม $H_2O$ ที่ใช้ได้ (ใกล้ 183 GHz) อยู่ตรงช่วงที่อากาศโลกซึ่งเต็มด้วยไอน้ำดูดกลืนรุนแรงที่สุด การอ่านน้ำดาวหางจากพื้นโลกตรงนั้นคล้ายพยายามมองเทียนผ่านหมอก — งานระบุว่า แถบสเปกตรัมของน้ำ พลังงานต่ำเหล่านี้ถูกบรรยากาศดูดกลืนมาก ขณะที่ เส้นสเปกตรัมของน้ำหนัก (HDO) ใกล้ 241 GHz อยู่ในหน้าต่างที่สะอาดกว่า อย่างที่สองคือ sensitivity: ช่องความถี่ น้ำมี สัญญาณรบกวน สูงกว่ามาก — ราว 500 mJy ต่อ beam เทียบกับ 21 สำหรับ HDO — ดังนั้นแม้สัญญาณอุดมสมบูรณ์ก็อาจซ่อนอยู่ด้านล่าง ระหว่างหมอกกับ สัญญาณรบกวน น้ำธรรมดาที่มีมากจึงอยู่ใต้ threshold ขณะที่น้ำหนักซึ่งหายากกว่ามาก แต่ถูกจับในหน้าต่างสะอาดและเงียบ ปรากฏชัด (จากอวกาศเหนือบรรยากาศ น้ำเดียวกันดูง่ายกว่ามาก: JWST ตรวจพบน้ำของดาวหางใน infrared ภายหลัง จุดใกล้ดวงอาทิตย์ที่สุด — ดังนั้น non-detection ของ ALMA ว่าด้วย เส้นสเปกตรัม เดียวผ่านบรรยากาศโลก ไม่ได้หมายถึงไม่มีน้ำ) ดังนั้นปริมาณน้ำธรรมดาต้องอนุมาน *ทางอ้อม* — โดยหลักจากการกระตุ้น เส้นสเปกตรัมของเมทานอล ซึ่งขึ้นกับว่าโมเลกุล เมทานอล ชนกับน้ำบ่อยแค่ไหน นี่เป็นการวัดจริง แต่พึ่งแบบจำลอง และผู้เขียนพูดเรื่องนี้ชัด

# พบอะไร

- **เห็นน้ำหนัก แต่ไม่เห็นน้ำธรรมดา** ตรวจพบ HDO และ เส้นสเปกตรัมของเมทานอล หลายเส้นชัดเจน แต่ไม่พบ $H_2O$ เพราะ D/H พึ่ง *ขีดจำกัดบน* ของอัตราผลิตน้ำธรรมดา — จงใจปฏิบัติเช่นนั้นเพราะ เส้นสเปกตรัมของน้ำอยู่ต่ำกว่า สัญญาณรบกวน — อัตราส่วน ดิวเทอเรียม จึงออกมาเป็น **ขีดจำกัดล่าง** ไม่ใช่ค่าเดียว
- **Deuterium enriched อย่างแรง** ใน scenario แบบอนุรักษ์นิยม อัตราส่วน D/H ของน้ำ **มากกว่า** $6.6 \times 10^{-3}$ — มากกว่ามหาสมุทรโลกประมาณ **40 เท่า** และมากกว่าดาวหางทั่วไปในระบบสุริยะประมาณ **30 เท่า** ไม่ว่าจะใช้การประเมินสองแบบใด 3I/ATLAS อยู่ที่ปลายสูงมากของการวัด D/H ในน้ำทั้งหมดจนถึงตอนนี้
- **น่าจะไม่ใช่ความบังเอิญของคืนเดียว** การวัดมาจาก epoch เดียว แต่การมองข้อมูล ALMA ใกล้เคียงแบบเบื้องต้นไม่

เห็นการแกว่งวันต่อวันที่ใหญ่ และการวิเคราะห์ JWST อิสระของ 3I/ATLAS ซึ่งทำมากกว่าหนึ่งเดือนให้หลังชี้ทิศเดียวกัน — น้ำอุดม ดิวเทอเรียม




ตำแหน่งน้ำของ 3I/ATLAS บนสเกล ดิวเทอเรียม: อยู่สุดฝั่งที่อุดม ดิวเทอเรียม ไกลกว่ามหาสมุทรโลกและประชากรดาวหางทั้งระบบสุริยะ (แสดงเป็นช่วงโดยประมาณ) ลูกศรหมายถึง *ขีดจำกัดล่าง* — ค่าจริงอาจสูงกว่า D/H สูงเป็นเบาะแสของ *สภาพการก่อตัวที่เย็น* ไม่ใช่ที่อยู่บ้านเกิด

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

# สิ่งนี้น่าจะหมายถึงอะไร

D/H ในน้ำสูงเป็นลายเซ็นของน้ำที่แข็งตัวในบริเวณเย็นมาก (ต่ำกว่าประมาณ 30 K) และไม่ได้ถูกความร้อนปรับเปลี่ยนอย่างหนักภายหลัง ดังนั้นการอ่านที่สะอาดที่สุดคือ น้ำของ 3I/ATLAS ก่อตัวภายใต้สภาพที่ *เย็นกว่าและอ่อนโยนกว่า* น้ำในดาวหางระบบสุริยะของเรา — และจึงหมายความว่าระบบดาวเคราะห์ต้นกำเนิดประกอบน้ำแข็งต่างจากระบบเรา

ผู้เขียนระวังก้าวถัดไป และเราก็ควรระวัง มีสองทางที่จะได้น้ำที่อุดม ดิวเทอเรียม ขนาดนี้ และการวัดนี้แยกไม่ได้: น้ำอาจ *สืบทอด* enrichment มาจากเมฆเย็นที่ระบบถือกำเนิด หรือถูกกำหนดภายหลังระหว่างการก่อตัวดาวหางใน outer disk เย็น ไม่ว่าแบบไหน ข้อสรุปสำคัญยังอยู่ — สภาพที่หล่อหลอม 3I/ATLAS ไม่เหมือนสภาพที่หล่อหลอมดาวหางของเรา — แต่คำถามว่า *ทำไม* ยังเปิด

ดังนั้นนี่คือครั้งแรกที่ใครอ่าน fingerprint การก่อตัวของน้ำจากวัสดุในระบบดาวเคราะห์อื่น และพบว่ามันไม่ตรงกับของเรา

# สิ่งที่ผลนี้ *ยังพิสูจน์ไม่ได้*

- มัน **ไม่พูดอะไรเลย** เรื่องชีวิต เทคโนโลยี หรือเจตนา ไม่มี “มัน” ที่ถูกสร้าง; “ระหว่างดาว” บรรยายวิถี ไม่ใช่เรื่องราวกำเนิด นี่คือการวัดเคมีของน้ำ
- มัน **ไม่ใช่** ค่า D/H ที่แม่นยำ แต่เป็น *ขีดจำกัดล่าง* และน้ำที่พูดถึงไม่เคยถูกตรวจโดยตรง — ปริมาณถูกอนุมานจากการกระตุ้นโมเลกุลอื่นคือ เมทานอล ภายใต้สมมติฐานว่าน้ำเป็นสิ่งหลักที่ เมทานอล ชน
- มัน **ไม่ได้** บอกว่า 3I/ATLAS เกิดที่ไหน ระบุดาวแม่อย่างเชื่อถือไม่ได้ และ D/H สูงเป็นเบาะแสของ *สภาพ* ไม่ใช่ที่อยู่บ้านเกิด
- มัน **ไม่ได้** ตัดสินว่า *ทำไม* น้ำอุดม ดิวเทอเรียม ทั้ง “สืบทอดจาก birth-cloud เย็น” และ “กำหนดระหว่างการก่อตัวใน disk” เข้ากับข้อมูล; งานไม่เลือกระหว่างสองทาง
- มันเป็นวัตถุ **หนึ่งชิ้น** วัดที่ **หนึ่ง epoch** หลักฐานเสริมชวนมั่นใจ แต่ไม่ใช่ baseเส้นสเปกตรัม ยาว

# หลักฐานแข็งแรงแค่ไหน?

ควรชั่งสองอย่างแยกกัน: ทิศทางของผล และค่าตัวเลขที่แน่นอน

- **ทิศทาง robust** ว่าน้ำของ 3I/ATLAS อุดม ดิวเทอเรียม อย่างเด่นชัดเป็น ขีดจำกัดล่าง แบบอนุรักษ์นิยม อยู่สูงกว่าประชากรดาวหางในระบบสุริยะทั้งหมด และมีการวิเคราะห์ JWST อิสระสนับสนุน ส่วนนี้ไม่เปราะ
- **ตัวเลขพึ่งห่วงโซ่แบบจำลอง** เพราะไม่พบ $H_2O$ ปริมาณน้ำ — และจึง D/H — พึ่งการอนุมานน้ำทางอ้อมจาก การกระตุ้น ของ เมทานอล ซึ่งสมมติว่าน้ำเป็น คู่ชนหลัก หลักใน โคมา (สมเหตุผลใกล้ จุดใกล้ดวงอาทิตย์ที่สุด แต่ตัดส่วนจาก $CO_2$ ไม่ได้) และใช้อัตราการชนโดยประมาณซึ่งผู้เขียนยอมรับว่า constrain ได้ไม่ดี ทีม flag ทั้งหมดนี้และจงใจรายงานเป็น limit ไม่ใช่ measurement
- **การตีความมีเหตุผลดีแต่ไม่ unique** การก่อตัวในความเย็นเป็นคำอธิบายธรรมชาติของ D/H สูง; ความเย็นนั้นสืบทอดมา หรือถูกกำหนดภายหลังยังไม่รู้ และระบุระบบต้นกำเนิดไม่ได้

สั้น ๆ: ว่าน้ำก่อตัวในความเย็นมีฐานแข็ง; เย็น *เท่าไร* และ *เพราะอะไร* ยังเปิดไว้อย่างซื่อตรง

# ทำไมจึงสำคัญ

หลายทศวรรษ คำถามว่าน้ำบนโลกมาจากไหน — และอะไรเป็นตัวกำหนดลักษณะเฉพาะเชิงไอโซโทปของดิวทีเรียมในน้ำในระบบดาวเคราะห์ที่กำลังก่อตัว — ถูกตอบด้วยการวัดภายในระบบสุริยะเราเท่านั้น นี่เป็นครั้งแรกที่แผนภูมินั้นขยายไปสู่วัสดุซึ่งแสดงได้ว่าก่อตัวรอบดาวอีกดวง

คำตอบไม่ใช่ “ทุกที่เหมือนบ้านเรา” แต่ตรงข้าม: ระบบอื่นสามารถวางน้ำแข็งภายใต้สภาพเย็นพอทิ้ง fingerprint ที่ดาวหางของเราไม่เคยมี นี่เป็นหลักฐานเล็กและเป็นรูปธรรมสำหรับสิ่งที่ใหญ่แบบเงียบ ๆ — เคมีและประวัติของของแข็งที่สร้างดาวเคราะห์แตกต่างกันได้จากดาวหนึ่งสู่อีกดาว และเราไม่ได้ได้มันจากยานอวกาศที่ส่งข้ามปีแสง แต่จากการจับเศษหลงจากระบบอื่นขณะมันผ่าน แล้วอ่านน้ำก่อนมันจากไป

# สรุป

3I/ATLAS เป็นวัตถุ ระหว่างดาว ที่รู้จักลำดับสามและดาวหาง ระหว่างดาว ที่ยังมีการพ่นสสาร ลำดับสอง — เศษจากระบบดาวเคราะห์อื่นที่ผ่านระบบเราครั้งเดียว ด้วย ALMA ใกล้ช่วงดาวหางเข้าใกล้ดวงอาทิตย์ที่สุด นักดาราศาสตร์ตรวจพบน้ำหนัก (HDO) และ เมทานอล ใน โคมา แต่ไม่พบน้ำธรรมดา แล้วอนุมานอัตราส่วน ดิวเทอเรียม ต่อ ไฮโดรเจน ในน้ำ พบว่าอุดม ดิวเทอเรียม อย่างแรง — ขีดจำกัดล่าง สูงกว่า $6.6 \times 10^{-3}$ หรือราว 40 เท่าของมหาสมุทรโลกและ 30 เท่าของดาวหางระบบสุริยะทั่วไป — ชี้สู่น้ำที่ก่อตัวภายใต้สภาพเย็นกว่าและถูกความร้อนแปรเปลี่ยนน้อยกว่าดาวหางระบบสุริยะ ตัวเลขเป็น ขีดจำกัดล่าง ที่ได้ทางอ้อมผ่านแบบจำลอง ไม่ใช่การวัดโดยตรง และบอกไม่ได้ว่า enrichment สืบทอดจาก birth-cloud เย็นหรือถูกกำหนดภายหลังใน disk เย็น หรือดาวหางมาจากไหน ถึงอย่างนั้น นี่เป็นการอ่าน fingerprint เคมีชนิดนี้ครั้งแรกสำหรับน้ำจากดาวอีกดวง — และ fingerprint ไม่ตรงกับของเรา

# ประเมินแบบไม่เกินจริง

**งานวิจัยแสดงอะไร:** จากการสังเกต 3I/ATLAS ด้วย ALMA ใกล้ จุดใกล้ดวงอาทิตย์ที่สุด ได้ ขีดจำกัดล่าง ของ D/H ในน้ำ $>6.6 \times 10^{-3}$ (scenario อนุรักษ์นิยม) — ประมาณ 40× มหาสมุทรโลกและ 30× ดาวหางระบบสุริยะทั่วไป — บ่งชี้น้ำที่ก่อตัวในสภาพเย็นกว่าและถูกความร้อนประมวลผลน้อยกว่าดาวหางระบบสุริยะอย่างชัดเจน การวิเคราะห์ JWST อิสระเห็นทิศทางเดียวกัน

**อะไรที่เป็นไปได้แต่ยังไม่พิสูจน์:** enrichment สืบทอดตรงจากเมฆ prestellar เย็น หรือถูกกำหนดระหว่างดาวหางก่อตัวใน protoplanetary disk เย็น ทั้งสอง scenario เข้ากับข้อมูล; แยกไม่ได้

**มันไม่ได้แสดงอะไร:** ไม่มีอะไรเกี่ยวกับชีวิต เทคโนโลยี หรือต้นกำเนิดประดิษฐ์; ไม่มีค่า D/H แม่นยำ (เป็น ขีดจำกัดล่าง); ไม่มีตัวตนหรือตำแหน่งดาวแม่; ไม่มีกลไกเฉพาะเบื้องหลัง D/H สูง; และไม่ได้แสดงว่าผล epoch เดียวนี้ไม่ไวต่อความแปรปรวนในโคมา

**ข้อจำกัดหลัก:** ไม่ตรวจพบ $H_2O$ โดยตรง ดังนั้นปริมาณน้ำ — และ D/H — ถูกอนุมานทางอ้อมจาก การกระตุ้น ของ เมทานอล โดยสมมติว่าน้ำเป็น collider หลัก และใช้อัตราการชนโดยประมาณที่ผู้เขียนเรียกว่า constrain ไม่ดี; ผลเป็น limit จาก epoch เดียวและพึ่งแบบจำลอง; ระบุระบบแม่ไม่ได้

**ผู้อ่านทั่วไปควรมั่นใจแค่ไหน?** สูงว่าน้ำของ 3I/ATLAS อุดม ดิวเทอเรียม จริงและก่อตัวเย็นกว่าดาวหางของเรา และว่านี่ไม่บอกอะไรเลยเรื่องมนุษย์ต่างดาว ปานกลางต่อระดับ enrichment ที่แน่นอน ซึ่งเป็น model-dependent ขีดจำกัดล่าง ต่ำต่อสาเหตุและบ้านเกิดเฉพาะ ซึ่งยังเปิด ท่าทีที่เหมาะคือความพิศวงเงียบ ๆ ต่อโปสการ์ดเคมีจากระบบดาวอีกดวง — ไม่ใช่ปริศนาและไม่ใช่ยานอวกาศ

# แหล่งข้อมูล

Nature Astronomy (2026)
https://doi.org/10.1038/s41550-026-02850-5

arXiv 2603.07026
https://arxiv.org/abs/2603.07026

Independent JWST corroboration (Cordiner et al., arXiv 2603.06911)
https://arxiv.org/abs/2603.06911

ALMA data archive (project 2025.A.00002.T)
https://almascience.nrao.edu/aq/