The Clean Paper

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

ไม้บรรทัดจักรวาลที่คมที่สุดของ DESI และคำว่า “อาจจะ” ที่ควรพูดอย่างระวังเรื่อง dark energy

DESI วัดประวัติการขยายตัวของเอกภพด้วยไม้บรรทัด baryon-acoustic ที่แม่นยำที่สุดจนถึงตอนนั้น จากวัตถุหกล้านชิ้น เมื่อดูเพียงอย่างเดียว ไม้บรรทัดนี้สอดคล้องกับแบบจำลองมาตรฐานที่ dark energy เป็นค่าคงที่ ความชอบต่อ dark energy ที่เปลี่ยนตามเวลาปรากฏเฉพาะเมื่อรวม DESI กับ cosmic microwave background และชุด supernova — ที่ 2.6σ ถึง 3.9σ ขึ้นกับชุด supernova ที่เพิ่ม ต่ำกว่า threshold สำหรับ discovery และไวต่อข้อมูลที่จับคู่ด้วย เป็นคำถามจริงที่ถูกทำให้แม่นยำขึ้น ยังไม่ใช่คำตอบ

Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *DESI 2024 VI: Cosmological Constraints from the Measurements of Baryon Acoustic Oscillations*, DESI Collaboration: A. G. Adame, J. Aguilar, S. Ahlen, S. Alam, D. M. Alexander, et al., Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP) 02 (2025) 021 · DOI: 10.1088/1475-7516/2025/02/021

ไม้บรรทัดที่ทำจากเสียง

ในเอกภพยุคแรก ก่อนจะมีดาวฤกษ์ พลาสมาร้อนของสสารธรรมดาและแสง "สั่นก้อง" คลื่นความดันวิ่งผ่านมันด้วยความเร็วมากกว่าครึ่งหนึ่งของความเร็วแสง จนเอกภพเย็นลงพอให้อะตอมก่อตัว แล้วการสั่นนั้นหยุด — ทิ้งระยะที่มีความชอบเล็กน้อยไว้ในโครงสร้างการกระจายของสสาร ระยะนั้นเรียกว่า *sound horizon* ปัจจุบันยาวราว 150 เมกะพาร์เซก (ประมาณ 490 ล้านปีแสง) และปรากฏเป็นโอกาสสูงขึ้นเล็กน้อยที่จะพบกาแล็กซีสองแห่งแยกกันด้วยระยะนี้ ในทุกทิศและทุกยุค นักจักรวาลวิทยาเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า **baryon acoustic oscillation** หรือ BAO และใช้มันเป็นไม้บรรทัดมาตรฐาน: วัดว่าสเกลที่ถูก "แช่แข็ง" นี้ดูใหญ่แค่ไหนบนท้องฟ้าที่ระยะต่าง ๆ แล้วคุณจะทำแผนที่ได้ว่าเอกภพขยายตัวเร็วเพียงใดตลอดประวัติของมัน

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) ถูกสร้างมาเพื่อวัดไม้บรรทัดนี้ให้ดีกว่าใคร Data release แรกทำแผนที่สเกล BAO จากกาแล็กซี quasar และ Lyman-alpha forest ของเมฆก๊าซไกลโพ้น — รวมวัตถุมากกว่าหกล้านชิ้น กระจายเป็นเจ็ดช่วง redshift ตั้งแต่ 0.1 ถึง 4.2 เพื่อกันความคาดหวังของมนุษย์ออกจากผล ทีมทำการวิเคราะห์แบบ *แบบปกปิดข้อมูลกลุ่ม* ซ่อนคำตอบทางจักรวาลวิทยาจากตัวเองจนวิธีการถูกล็อก นี่คือการวัด BAO ที่แม่นยำที่สุดเท่าที่เคยทำมาอย่างห่างชั้น

DESI ติดตั้งบนกล้องโทรทรรศน์ Nicholas U. Mayall ขนาด 4 เมตรที่ Kitt Peak รัฐ Arizona เครื่องมือส่งแสงผ่านใยแก้วนำแสงหลายพันเส้นเข้าสู่ spectrograph เปลี่ยนตำแหน่งบนท้องฟ้าให้เป็นสเปกตรัมและ redshift ของกาแล็กซีและ quasar หลายล้านแห่ง

KPNO/NOIRLab/NSF/AURA/P. Marenfeld CC BY 4.0

DESI คืออะไร

Dark Energy Spectroscopic Instrument เป็น spectrograph บนกล้องโทรทรรศน์ Nicholas U. Mayall ขนาด 4 เมตรที่ Kitt Peak รัฐ Arizona มันไม่ได้ "เห็น" พลังงานมืด โดยตรง — ไม่มีเครื่องมือใดเห็นได้ เพราะ

> พลังงานมืด ไม่ปล่อยแสง แต่ DESI บันทึกสเปกตรัมของกาแล็กซีและ quasar ราว 5,000 แห่งพร้อมกัน อ่าน redshift ของแต่ละวัตถุจากการที่การขยายตัวของเอกภพยืดแสงของมัน แล้วสร้างแผนที่สามมิติของวัตถุหลายล้านแห่ง จากนั้นจึงอนุมาน พลังงานมืด จากวิธีที่แผนที่นั้นบอกว่าการขยายตัวของเอกภพเปลี่ยนไปตามเวลา สำหรับสายโซ่เต็ม — จากใยแก้วหุ่นยนต์ถึงไม้บรรทัดอะคูสติก — ดู How DESI works

พาดหัวที่เดินทางออกมาจากผลนี้คือ พลังงานมืด อาจไม่ใช่ค่าคงที่ — สิ่งลึกลับที่เร่งการขยายตัวของเอกภพอาจ *อ่อนลง* ตามเวลา และกำลังทำให้แบบจำลองจักรวาลวิทยามาตรฐานแตกร้าว ข้อกล่าวนั้นไม่ได้ถูกแต่งขึ้น แต่ถูกอ่านเลยเถิดได้ง่าย เวอร์ชันที่ซื่อสัตย์เฉพาะเจาะจงกว่าและน่าสนใจกว่า: ไม้บรรทัดของ DESI *ด้วยตัวมันเอง* สอดคล้องกับแบบจำลองธรรมดา สัญญาณของสิ่งใหม่จะปรากฏเมื่อเอา DESI ไปรวมกับข้อมูลอื่นเท่านั้น — และความแรงของสัญญาณขึ้นกับว่าคุณเลือกข้อมูลชุดไหนมารวม

ไม้บรรทัด baryon-acoustic ของ DESI เพียงอย่างเดียวสอดคล้องกับ พลังงานมืด คงที่ (cosmological constant) ความชอบต่อ พลังงานมืด ที่ *เปลี่ยนตามเวลา* ปรากฏเมื่อรวม DESI กับ พื้นหลังไมโครเวฟจักรวาล และชุดข้อมูล ซูเปอร์โนวา — และความแรงเปลี่ยนตามว่าชุด ซูเปอร์โนวา ใดถูกใช้

> **ไม้บรรทัดมาตรฐาน และสองวิธีที่ พลังงานมืด อาจเปลี่ยนได้**
>
> สเกล BAO เป็น *standard ruler*: เพราะเรารู้ความยาวจริงจากฟิสิกส์ของเอกภพยุคแรก การเปรียบเทียบความยาวจริงกับขนาดปรากฏที่ระยะหนึ่งบอกได้ว่าเอกภพขยายตัวไปมากแค่ไหนในเวลานั้น เมื่อวัดที่หลายระยะ ไม้บรรทัดนี้จะติดตามประวัติการขยายตัวทั้งหมด — ซึ่งเป็นสิ่งที่ พลังงานมืด ควบคุม
> ในแบบจำลองมาตรฐานที่เรียกว่า ΛCDM พลังงานมืด คือ *cosmological constant*: ความหนาแน่นพลังงานคงที่ของปริภูมิว่างที่ไม่เปลี่ยน นักฟิสิกส์อธิบายพฤติกรรมด้วยพารามิเตอร์ “equation of state” w ซึ่งถ้าเป็น cosmological constant จริง จะเท่ากับ -1 พอดี ทุกที่ทุกเวลา
> เพื่อทดสอบสมมติฐานนี้ เราผ่อนเงื่อนไขได้สองแบบ แบบง่ายคือให้ w เป็นค่าคงที่อื่น (ยังไม่เปลี่ยนตามเวลา) — เรียกว่า “wCDM” แบบที่ยืดหยุ่นกว่า คือให้ w เปลี่ยนเมื่อเอกภพขยาย อธิบายด้วยสองตัวเลข: w_0 ค่าปัจจุบัน และ w_a อัตราที่มันเปลี่ยน แบบจำลอง “w_0w_aCDM” นี้ยุบกลับเป็น ΛCDM ที่จุดเดียว $w_0 = -1,\ w_a = 0$ การชอบค่าที่ w_0 มากกว่า -1 และ w_a ติดลบ คือสิ่งที่คำว่า “พลังงานมืด เปลี่ยนตามเวลา” หมายถึงในที่นี้: พลังงานมืด ที่มีแรงผลักมากกว่าในอดีตและกำลังอ่อนลงในปัจจุบัน

ผู้วิจัยทำอะไร

- วัดสเกล BAO จากข้อมูลปีแรกของ DESI — กาแล็กซี quasar และ Lyman-alpha forest — มากกว่าหกล้านวัตถุในเจ็ดช่วง redshift ครอบคลุม $0.1 < z < 4.2$
- วิเคราะห์แบบ **แบบปกปิดข้อมูลกลุ่ม** ปิดบังผลจักรวาลวิทยาจนวิธีการถูกกำหนดเสร็จ เพื่อป้องกัน confirmation bias
- fit แบบจำลอง flat ΛCDM มาตรฐานกับ DESI BAO เพียงอย่างเดียว จากนั้นรวมกับ prior จาก big-bang nucleosynthesis และ พื้นหลังไมโครเวฟจักรวาล (CMB) จาก Planck และ ACT
- ขยายแบบจำลองสองวิธี: พลังงานมืด ที่มี w คงที่ (wCDM) และแบบ w_0w_a ที่เปลี่ยนตามเวลา (w_0w_aCDM)
- ทดสอบแบบจำลองที่เปลี่ยนตามเวลาด้วยการรวม DESI+CMB กับชุด type Ia ซูเปอร์โนวา สามชุดทีละชุด — Pantheon+, Union3 และ DES-SN5YR — แทนการเลือกเพียงชุดเดียว
- วางขีดจำกัดมวลรวมของนิวตริโน และตรวจว่าขีดจำกัดเปลี่ยนอย่างไรหากอนุญาตให้พื้นหลัง พลังงานมืด ต่างจาก ΛCDM

พวกเขาพบอะไร

- **DESI BAO เพียงอย่างเดียวสอดคล้องกับแบบจำลองมาตรฐาน** ให้ความหนาแน่นสสาร $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$ และเมื่ออนุญาตให้ พลังงานมืด มี w คงที่ ได้ $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — อยู่ตรงบนค่าของ cosmological constant ที่ -1
- เมื่อรวมกับ CMB และ lensing ของมัน DESI ให้ $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ และค่าคงที่ฮับเบิล $H_0 = 67.97 \pm 0.38$ km s^{-1} Mpc^{-1} (68.52 ± 0.62 เมื่อจับคู่กับ nucleosynthesis และ acoustic scale ของ CMB แทน)
- **ในแบบจำลองที่เปลี่ยนตามเวลา การรวมข้อมูลชอบ พลังงานมืด ที่วิวัฒน์ตามเวลา** — $w_0 > -1$ และ $w_a < 0$ ความชอบอยู่ที่ 2.6σ สำหรับ DESI+CMB และเมื่อเพิ่มชุด ซูเปอร์โนวา กลายเป็น 2.5σ, 3.5σ หรือ 3.9σ สำหรับ Pantheon+, Union3 หรือ DES-SN5YR ตามลำดับ (sigma วัดว่าผลอยู่ห่างจากความคาดหมายของแบบจำลองมาตรฐานมากแค่ไหน; 5σ คือเกณฑ์ทั่วไปก่อนประกาศ discovery และไม่ได้หมายความว่าการตีความนั้นถูกต้อง — guide)
- ถ้าปล่อยอิสระ มวลรวมของนิวตริโนถูกจำกัดค่อนข้างแน่น — ต่ำกว่า 0.072 eV (ความเชื่อมั่น 95%) สำหรับ DESI+CMB — แต่งานระบุชัดว่าขีดจำกัดนี้คลายลงมาก หากอนุญาตให้พื้นหลัง พลังงานมืด เบี่ยงจาก ΛCDM

สิ่งที่ผลนี้ไม่ได้พิสูจน์

- มัน **ไม่ได้** แสดงว่า พลังงานมืด กำลังเปลี่ยน ไม้บรรทัดของ DESI เองสอดคล้องกับ cosmological constant; สัญญาณการเปลี่ยนปรากฏเฉพาะใน fit *ที่รวมข้อมูล* และเฉพาะในแบบจำลองสองพารามิเตอร์ที่ richer
- มัน **ไม่ได้** หมายความว่า "ΛCDM ตายแล้ว" หรือ "Einstein ผิด" ตัวเลขแรงที่สุด 3.9σ ยังต่ำกว่า convention 5σ ที่นักฟิสิกส์ต้องการก่อนเรียก discovery — และแบบจำลองมาตรฐานยัง fit DESI เพียงอย่างเดียวได้ดี
- ผล **ไม่ได้เป็นอิสระจากชุดตัวอย่าง** เปลี่ยนชุด ซูเปอร์โนวา แล้ว significance ขยับจาก 2.5σ เป็น 3.9σ — มากกว่าหนึ่ง sigma สัญญาณที่ขนาดขึ้นกับชุดข้อมูลภายนอกที่เอามาต่อมากขนาดนี้คือเบาะแสที่ควรไล่ต่อ ไม่ใช่ค่าที่ควรฝากธนาคาร
- การเอนของ DESI *เพียงอย่างเดียว* ไปทาง $w_0 > -1$ ถูกขับ **บางส่วนโดยจุดผิดปกติเพียงจุดเดียว** — bin กาแล็กซี redshift 0.51 ซึ่งสูงกว่า ΛCDM เล็กน้อย แต่ตรงนี้งานทำการบ้าน: มองจุดนั้นเป็น statistical fluctuation และแสดงว่าแทนที่การวัด DESI *ทั้งหมด* ที่ redshift ต่ำ ($z < 0.6$) ด้วยค่าจาก SDSS รุ่นเก่า ผล dark-energy แทบไม่เปลี่ยน จุดแปลกดึง DESI เมื่อมองเดี่ยว ๆ; มัน **ไม่ได้** ค้ำสัญญาณเมื่อรวมข้อมูล (กลุ่มอิสระได้ตรวจบทบาทของมันต่อเพิ่มเติมภายหลัง) ดังนั้น caveat นี้ตัดไปทางตรงข้ามกับการเล่าบางแบบ: ผลถูก stress-test กับข้อมูลที่ผิดปกติที่สุดแล้วและยังอยู่
- ขีดจำกัดมวลนิวตริโน **ไม่ใช่** verdict ที่เป็นอิสระจากแบบจำลอง มันแน่นเมื่อ background expansion ถูกตรึงไว้กับ ΛCDM เท่านั้น; ผ่อนเงื่อนไขนั้น ขีดจำกัดก็ผ่อนตาม

หลักฐานแข็งแรงแค่ไหน

- **แข็งแรงมากในฐานะการวัดระยะทาง** ไม้บรรทัด BAO เป็นหนึ่งในเครื่องมือสะอาดที่สุดของจักรวาลวิทยา การวัดของ DESI แม่นยำที่สุดจนถึงตอนนั้น และการวิเคราะห์ แบบปกปิดข้อมูลกลุ่ม คือ safeguard ที่เหมาะสำหรับกันการอ่านคำตอบที่หวังไว้เข้าไปในข้อมูล
- **น่าสนใจจริง แต่ยังไม่ตัดสิน ในฐานะข้อกล่าวเรื่อง พลังงานมืด** ความชอบ 2.6σ จาก DESI+CMB ที่ขึ้นถึง 3.9σ กับชุด ซูเปอร์โนวา ที่ constraining ที่สุด เป็นผลชนิดที่สมควรได้เวลาจากกล้องโทรทรรศน์เพิ่ม — ไม่ใช่ผลชนิดที่พลิกแบบจำลอง เหตุผลซื่อสัตย์ที่ต้องระวังคือ spread ระหว่างชุด ซูเปอร์โนวา; และผู้เขียนก็ตรวจว่าจุด BAO ผิดปกติที่สุดเพียงจุดเดียวไม่ได้ขับผล — เป็นการบ้านที่ข้อกล่าวแบบนี้ควรทำ
- งานระวังตัวเองดี: รายงาน significance สามแบบแทนการเลือกเฉพาะค่ามากที่สุด และติดธง model-dependence ของผลนิวตริโน ความเลยเถิด ถ้ามี มักอยู่ในการเล่าต่อ ไม่ใช่ในตัวงาน

ทำไมจึงสำคัญ

ตลอดราวหนึ่งในสี่ศตวรรษ “พลังงานมืด” กับ “cosmological constant” แทบถูกใช้แทนกัน เพราะทุกการวัดสอดคล้องกับ w เท่ากับ -1 พอดี DESI เป็นชุดข้อมูลแรก ๆ ที่แม่นยำพอ เมื่อรวมกับข้อมูลอื่น จะสามารถ *ถาม* จริง ๆ ว่า -1 นั้นเลื่อนหรือไม่ — และได้คำตอบที่ไม่ใช่ “ไม่” แบบราบเรียบ นี่คือการเปลี่ยนจริงในสิ่งที่ข้อมูลทำได้ และเป็นเหตุผลที่ผลสมควรได้รับความสนใจ แต่ความแม่นยำเดียวกันก็ทำให้เห็นว่าคำใบ้นั้นมีเงื่อนไขแค่ไหน: มีชีวิตในบางการรวมข้อมูล เงียบในบางชุด และไวเป็นพิเศษต่อ แคตาล็อก ซูเปอร์โนวา ที่จับคู่กับ DESI ท่าทีที่ถูกไม่ใช่ทั้งปัดทิ้งหรือประกาศปฏิวัติก่อนเวลา แต่คือดู ชุดข้อมูลเผยแพร่ DESI ที่ใหญ่กว่าถัดไป — DR2 ซึ่งออกแล้วในปี 2025 — และชุด ซูเปอร์โนวา อิสระ แล้วดูว่าการ drift จะชัดขึ้นหรือจางหาย นี่คือหน้าตาของ “อาจจะ” ที่จริงจังในจักรวาลวิทยา และควรรายงานว่าเป็น “อาจจะ”

สรุป

DESI วัดประวัติการขยายตัวของเอกภพด้วยไม้บรรทัด baryon-acoustic ที่ดีที่สุดจนถึงตอนนั้น จากวัตถุหกล้านชิ้น เมื่อดูเพียงอย่างเดียว ไม้บรรทัดนี้สอดคล้องกับแบบจำลองมาตรฐานที่ พลังงานมืด เป็นค่าคงที่ แต่เมื่อรวมกับ พื้นหลังไมโครเวฟจักรวาล และชุด ซูเปอร์โนวา จะเกิดความชอบต่อ พลังงานมืด ที่เปลี่ยนตามเวลา — ที่ 2.6σ ถึง 3.9σ ขึ้นกับว่าคุณเพิ่ม ซูเปอร์โนวา ชุดใด นี่เป็นคำใบ้จริงและน่าสนใจ ไม่ใช่ discovery: ยังต่ำกว่า threshold ที่นักฟิสิกส์ต้องการ และขยับตามข้อมูล ซูเปอร์โนวา ที่นำมาจับคู่ Dark energy อาจกำลังเปลี่ยน DESI ทำให้คำถามนี้ถามได้อย่างแม่นยำ — ยังไม่ได้ตอบมัน

แหล่งข้อมูล

DESI Collaboration, arXiv:2404.03002 (published in JCAP)
https://arxiv.org/abs/2404.03002

DESI Collaboration, JCAP 02 (2025) 021, DOI 10.1088/1475-7516/2025/02/021
https://doi.org/10.1088/1475-7516/2025/02/021