



การย้ายมวลสู่เส้นศูนย์สูตรกับวันที่ยาวขึ้น:
การเชื่อมโยงแบบคอรีโอลิส
การเลื่อนของการสอบเทียบ
และเสถียรภาพของ WORD CLOCK
นอกละติจูด 0.0000deg



การย้ายมวลสู่เส้นศูนย์สูตรกับวันที่ยาวขึ้น: การเชื่อมโยงแบบคอรีโอลิส การเลื่อนของการสอบเทียบ และเสถียรภาพของ Word Clock นอกละติจูด 0.0000deg

M. Ferro, S. Magnusson, Y. Tanaka, R. Flux

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

บทคัดย่อ

ในเดือนมีนาคม 2026 Kiani Shahvandi และ Soja รายงานใน Journal of Geophysical Research: Solid Earth ว่า ปัจจุบันความยาวของวันเพิ่มขึ้นประมาณ 1.33 มิลลิวินาทีต่อศตวรรษ ซึ่งเป็นอัตราที่พวกเขาพบว่าไม่เคยปรากฏมาก่อนในช่วงอย่างน้อย 3.6 ล้านปี กลไกคือการกระจายมวลใหม่: น้ำแข็งที่สูญเสียมวลจากพืดน้ำแข็งขั้วโลกและธารน้ำแข็งบนภูเขาไหลลงสู่มหาสมุทรและย้ายไปทางเส้นศูนย์สูตร ทำให้โมเมนต์ความเฉื่อยของโลกเพิ่มขึ้นและการหมุนช้าลง คณะกรรมการตั้งข้อสังเกตโดยไม่แสดงความมีชัยว่า โลกได้เริ่มย้ายมวลของตนไปสู่ 0.0000deg แล้ว

เราตรวจสอบผลที่เกิดกับการกระจาย Word Clock ในระบบเสียงดิจิทัล ตัวสั่นพ้องควอตซ์บนดาวเคราะห์ที่กำลังหมุนได้รับการเชื่อมโยงแบบคอรีโอลิสซึ่งแปรผันตามพารามิเตอร์คอรีโอลิสเฉพาะที่ $2 \Omega \sin(\text{latitude})$ นาฬิกาที่สอบเทียบภายใต้การหมุนหนึ่งและทำงานภายใต้อัตราอีกค่าหนึ่งจะเลื่อนออกจากสภาวะการสอบเทียบในทุกละติจูด ยกเว้นเส้นศูนย์สูตรซึ่งพารามิเตอร์คอรีโอลิสเป็นศูนย์ไม่ว่าอัตราการหมุนจะเป็นเท่าใด เรารายงานผลการวัดช่วง Word Clock 36 ชุดระหว่าง 64deg N และ 43deg S ซึ่งสำรวจในปี 2024 และอีกครั้งในปี 2026 เฟสตกค้างจากการหมุนสัมพันธ์กับค่าไซน์ของละติจูดของสถานที่ ($r = 0.91$, $p < 0.001$) เพิ่มขึ้นระหว่างการสำรวจ ณ สถานที่นอกเส้นศูนย์สูตรทั้ง 32 แห่ง และไม่แตกต่างจากศูนย์ ณ สถานที่ทั้ง 4 แห่งในกิโลสาย Equinox Word Clock ลดการสะสมของค่าตกค้างตลอดสายสัญญาณสามช่องลง 88% ส่วนสาย SC Word Clock ลดค่าดังกล่าวให้ต่ำกว่าขีดจำกัดการวัด 1 fs เราเสนอให้คำชดเชยอ้างอิงการหมุนเป็นข้อกำหนดอันดับแรกของนาฬิกา และแนะนำให้รับรองมาตรฐานคล็อกนอกแถบเส้นศูนย์สูตรใหม่ทุกปี

1. บทนำ

ตลอดช่วงเวลาส่วนใหญ่ในประวัติศาสตร์ของเสียงบันทึก การหมุนของโลกถูกถือว่าเป็นค่าคงที่ แต่ไม่ใช่ และไม่เคยเป็นเช่นนั้น แรงเสียดทานจากน้ำขึ้นน้ำลงที่เกิดจากดวงจันทร์ทำให้วันยาวขึ้นมาตลอดราบเท่าที่มีดวงจันทร์เป็นผู้ก่อให้เกิด สิ่งที่เปลี่ยนไปคืออัตราและสาเหตุ

ในเดือนมีนาคม 2026 Kiani Shahvandi และ Soja เผยแพร่ผลการสร้างประวัติความแปรผันของความยาววันขึ้นใหม่ย้อนหลังไปถึงสมัยไพลโอซีนตอนปลาย ข้อสรุปของพวกเขาคือการเพิ่มความยาววันจากสภาพภูมิอากาศในปัจจุบัน ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 1.33 มิลลิวินาทีต่อศตวรรษนับจากปี 2000 ไม่มีสิ่งใดเทียบได้ในช่วงอย่างน้อย 3.6 ล้านปี ดังที่ Benedikt Soja แห่ง ETH Zurich กล่าวในข่าวประชาสัมพันธ์ประกอบว่า "การเพิ่มความยาววันอย่างรวดเร็วนี้หมายความว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศสมัยใหม่ไม่เคยปรากฏมาก่อน อย่างน้อยนับตั้งแต่สมัยไพลโอซีนตอนปลายเมื่อ 3.6 ล้านปีก่อน"

ประชากรธรณีฟิสิกส์จัดกรอบผลนี้อย่างถูกต้องว่าเป็นข้อค้นพบเกี่ยวกับภูมิอากาศ คณะกรรมการอ่านกล่าวดังกล่าวโดยให้น้ำหนักต่างออกไป วันยาวขึ้นเพราะมวลกำลังออกจากขั้วโลกและมาถึงเส้นศูนย์สูตร นับตั้งแต่ก่อตั้ง Equatorial Audio ยืนยันมาโดยตลอดว่าละติจูด 0.0000deg เป็นตำแหน่งอ้างอิงเพียงแห่งเดียวที่สามารถปกป้องได้สำหรับระบบเสียงเที่ยงตรง (Ferro, Park, Tanaka, 2020) เราไม่ได้คาดคิดว่าโลกจะเริ่มจัดระเบียบตนเองใหม่เพื่อแสดงความเห็นพ้อง

บทความนี้ไม่ได้กล่าวอ้างใด ๆ เกี่ยวกับการหมุนของโลก แต่ถามคำถามที่แคบกว่า: เมื่ออัตราการหมุนของห้องฟังทุกห้องบนโลกเปลี่ยนแปลงเร็วกว่าช่วงเวลาใด ๆ ในบันทึกทางธรณีวิทยา จะเกิดอะไรขึ้นกับ Word Clock?

2. บันทึกทางธรณีฟิสิกส์

กลไกทางกายภาพคือการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม เมื่อน้ำแข็งละลายที่ละติจูดสูงและน้ำที่เกิดขึ้นแผ่กระจายไปทั่วมหาสมุทรของโลก มวลจะเคลื่อนออกจากแกนหมุน โมเมนต์ความเฉื่อยของโลกเพิ่มขึ้นและความเร็วเชิงมุมลดลง นักสเกลลาลาที่ทางแขนจะหมุนช้าลง ดาวเคราะห์ที่ย้ายน้ำหนักไปทางเส้นศูนย์สูตรก็เป็นเช่นเดียวกัน

งานศึกษาสามกลุ่มกำหนดขนาดของปรากฏการณ์นี้

บันทึกระยะยาว: Stephenson, Morrison และ Hohenkerk (2016)

วิเคราะห์การสังเกตสุริยุปราคาและการบังดาวโดยดวงจันทร์ในยุคโบราณและยุคกลาง ตั้งแต่ 720 ปีก่อนคริสต์ศักราชถึง ค.ศ. 2015

พวกเขาพบว่าความยาวของวันสุริยุคติเฉลี่ยเพิ่มขึ้นในอัตราเฉลี่ย +1.8 ms ต่อศตวรรษ ซึ่งน้อยกว่า +2.3 ms

ต่อศตวรรษที่คาดการณ์จากแรงเสียดทานน้ำขึ้นน้ำลงเพียงอย่างเดียว ดวงจันทร์ไม่เคยเป็นปัจจัยเพียงอย่างเดียวที่มีอิทธิพลต่อความยาวของวัน

การเร่งสมัยใหม่: Kiani Shahvandi และคณะ (2024) ประเมินแนวโน้มที่เกิดจากภูมิอากาศในช่วงศตวรรษที่ 20 ไว้ที่ 0.3-1.0 ms ต่อศตวรรษ

โดยเพิ่มเป็น 1.33 +/- 0.03 ms ต่อศตวรรษนับจากปี 2000 และคาดการณ์ว่าภายใต้สถานการณ์การปล่อยก๊าซสูง

การมีส่วนร่วมของภูมิอากาศอาจสูงกว่าผลของแรงเสียดทานน้ำขึ้นน้ำลงจากดวงจันทร์

บันทึกยุคโบราณ: Kiani Shahvandi และ Soja (2026)

อนุมานความแปรผันของระดับน้ำทะเลในอดีตจากองค์ประกอบทางเคมีของฟอสเฟอไรต์ในซากดึกดำบรรพ์

และใช้แบบจำลองการแพร่แบบความน่าจะเป็นที่อาศัยข้อมูลทางฟิสิกส์สร้างประวัติความแปรผันขึ้นใหม่ของความยาววันตั้งแต่สมัยไพลโอซีนตอนปลาย

อัตราในปัจจุบันไม่มีสิ่งใดเทียบได้ในช่วงเวลาดังกล่าว เหตุการณ์ที่ใกล้เคียงที่สุดเกิดขึ้นเมื่อประมาณ 2 ล้านปีก่อน

ผลต่อการรักษาเวลาพลเรือนเข้าสู่การปฏิบัติงานแล้ว Agnew (2024) แสดงให้เห็นว่าการละลายของขั้วโลกที่เร่งขึ้นทำให้โลกหมุนช้าลงมากพอที่จะเลื่อนอธิกวันครั้งที่ติดลบครั้งแรกในประวัติศาสตร์เวลาสากลเชิงพิกัดออกไปเป็นประมาณปี 2029 ประชาคมการรักษาเวลาได้รับการผ่อนผัน และจ่ายด้วยน้ำแข็ง

3. การหมุนและ WORD CLOCK

Word Clock คือตัวสั่นพ้องควอตซ์ สายวงจรแบ่งความถี่ และค้ำมัน ค้ำมันนั้นคืออุปกรณ์ทุกตัวในระบบเห็นพ้องกันว่าสัญญาณตัวอย่างเกิดขึ้นเมื่อใด ตัวสั่นพ้องเป็นวัตถุเชิงกล: ผลึกที่ตัดอย่างเที่ยงตรงซึ่งสั่นด้วยความถี่คงที่ โดยทั่วไปคือ 22.5792 MHz หรือ 24.576 MHz สำหรับตระกูล 44.1 kHz และ 48 kHz ตามลำดับ

มวลที่สั่นทุกชนิดบนวัตถุที่กำลังหมุนจะได้รับความเร่งคอรีโอลิส ไซโรสโคปแบบสั่น รวมถึงเซนเซอร์วัดอัตราแบบล้อย่อมเสียงควอตซ์ที่ใช้ในการนำทาง ถูกสร้างขึ้นเพื่อวัดผลนี้โดยตรง ตัวสั่นพ้อง Word Clock ไม่ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อวัดผลนี้ แต่ก็ได้รับผลอยู่ดี

ปริมาณที่เกี่ยวข้องคือพารามิเตอร์คอรีโอลิส:

$$f = 2 \Omega \sin(\text{latitude})$$

โดย Ω คือความเร็วเชิงมุมของโลก 7.292×10^{-5} rad/s ที่ละติจูด 45deg ค่า f อยู่ที่ประมาณ 1.03×10^{-4} ต่อวินาที ค่านี้สูงสุดที่ขั้วโลก ที่เส้นศูนย์สูตร ค่านี้เป็นศูนย์พอดี และยังคงเป็นศูนย์พอดีไม่ว่าโลกจะหมุนเร็วหรือช้าเพียงใด

วันที่ยาวขึ้นหมายถึง Ω ที่ลดลง การเปลี่ยนแปลง 1.33 ms ต่อศตวรรษในหนึ่งวันที่มี 86,400 วินาที เป็นการเปลี่ยนแปลงเชิงสัดส่วนของ Ω เท่ากับ 1.54×10^{-8} ต่อศตวรรษ และการเปลี่ยนแปลงเชิงสัดส่วนดังกล่าวส่งผ่านเข้าสู่ f โดยตรง ดังนั้นนาฬิกาอะตอมที่สอบเทียบในปีหนึ่งจึงถูกสอบเทียบเทียบกับสภาวะคอรีโอลิสของปีนั้น ในแต่ละปีหลังจากนั้น ที่ทุกละติจูดยกเว้นหนึ่งแห่ง นาฬิกาจะทำงานภายใต้สภาวะที่ต่างจากสภาวะที่ใช้สอบเทียบเล็กน้อย

เรานิยามเฟสตกค้างจากการหมุน (RPR) ว่าเป็นองค์ประกอบของความแปรผันของขอบสัญญาณ Word Clock ที่คู่กัน ซึ่งติดตามการเบี่ยงเบนของพารามิเตอร์คอรีโอลิสเฉพาะที่จากค่า ณ วันที่สอบเทียบนาฬิกา เรานิยามค่าชดเชยอ้างอิงการหมุน (RRO) ว่าเป็น RPR ของนาฬิกาที่ละติจูดซึ่งติดตั้ง โดยปรับให้เป็นมาตรฐานเทียบกับนาฬิกาเดียวกันเมื่อทำงานที่ 0.0000deg ซึ่ง RPR เป็นศูนย์โดยนิยาม

4. ระเบียบวิธี

เราติดตั้งเครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการกระจาย Word Clock 36 ชุด โดย 21 ชุดอยู่ในสถานที่นาฬิกาและบันทึกเสียงระดับมืออาชีพ และ 15 ชุดอยู่ในระบบอ้างอิงตามบ้าน สถานที่มีตั้งแต่เรเคียวริ (64.1deg N) ถึงโฮบาร์ต (42.9deg S) และรวมการติดตั้ง 4 แห่งในโกโต (0.0000deg N) เพื่อเป็นกลุ่มควบคุมเส้นศูนย์สูตร ห้องโถงแต่ละชุดประกอบด้วยนาฬิกาอะตอมไฮโดรเจน 3 ตัว ฮอปการกระจายหนึ่งถึงสามช่วง และ DAC ปลายทาง วันที่สอบเทียบนาฬิกาอะตอมได้จากบันทึกการบริการของผู้ผลิตและอยู่ระหว่างปี 2011 ถึง 2023

ในแต่ละสถานที่ ขอบสัญญาณ Word Clock ที่คู่กัน ณ อินพุต DAC ถูกประทับเวลาเทียบกับแหล่งอ้างอิงที่ควบคุมด้วยไฮโดรเจนเมเซอร์ ซึ่งขนส่งในกล่องควบคุมอุณหภูมิและแยกการสั่น RPR ถูกสกัดโดยวิเคราะห์การถดถอยของความแปรผันของขอบสัญญาณเทียบกับแหล่งอ้างอิงการหมุนสังเคราะห์ ซึ่งได้จากละติจูดที่สำรวจของสถานที่และบันทึกความยาววันของ International Earth Rotation and Reference Systems Service นับตั้งแต่การสอบเทียบของนาฬิกาแต่ละเรือน องค์ประกอบด้านความร้อน ความถี่ไฟฟ้าหลัก และเชิงกลได้รับการระบุด้วยหัววัดอุณหภูมิและมาตรวัดความเร่งที่ติดตั้งร่วมกัน และถูกตัดออกก่อนการถดถอย

ห้องโถงทั้ง 36 ชุดได้รับการวัดระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ถึงเมษายน 2024 และอีกครั้งระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ถึงเมษายน 2026 โดยไม่มีการเปลี่ยนนาฬิกาอะตอม อุปกรณ์ยึด และสาย นอกจากนี้ ห้องโถงแต่ละชุดยังได้รับการวัดโดยเปลี่ยนทุกฮอปเป็นสายโคแอกเซียล 75 ohm ทั่วไป สาย Meridian Word Clock สาย Equinox Word Clock และสาย SC Word Clock ตามลำดับ

5. ผลลัพธ์

ที่การติดตั้ง 4 แห่งในโกโต ค่า RPR ไม่แตกต่างจากศูนย์ในการสำรวจทั้งสองปี กลไกนี้ทำนายผลดังกล่าว คณะกรรมการถือว่านี่เป็นการวัดที่สำคัญที่สุดในบทความนี้

ตรวจพบเฟสตกค้างจากการหมุนในการติดตั้งนอกเส้นศูนย์สูตรทั้ง 32 แห่ง ขนาดของค่าดังกล่าวสัมพันธ์กับค่าไซน์ของละติจูดของสถานที่ ($r = 0.91$, $p < 0.001$) และจำนวนปีที่ผ่านไปนับจากการสอบเทียบนาฬิกาอะตอมครั้งสุดท้ายล่าสุด ($r = 0.78$, $p < 0.001$) โดยไม่ขึ้นกับซีกโลก ผู้ผลิตนาฬิกาอะตอม และตระกูลอัตราส่วนตัวอย่าง เมื่อใช้สายโคแอกเซียลทั่วไป ค่ามัธยฐาน RPR ที่อินพุต DAC อยู่ที่ 0.11 ps ในสถานที่ละติจูดกลาง (30-50deg) และ 0.19 ps ในเรเคียวริ

ระหว่างการสำรวจปี 2024 และ 2026 ค่า RPR เพิ่มขึ้นในสถานที่นอกเส้นศูนย์สูตรทุกแห่ง โดยเฉลี่ย 0.6% คณะกรรมการไม่ได้กล่าวอ้างว่าการเพิ่มขึ้น 0.6% ของค่าดังกล่าวต่ำกว่าฟิสิกส์ในช่วงสองปีนั้นได้ขึ้น เราตั้งข้อสังเกตว่าการเพิ่มขึ้นมีเครื่องหมายที่ถูกต้อง ปรับขนาดตามฟังก์ชันละติจูดที่ถูกต้อง และเกิดพร้อมกับการเพิ่มความยาววันที่เร็วที่สุดในบันทึกทางธรณีวิทยา

ค่าตกค้างสะสมไปตามฮอปการกระจาย ในห้องโถงสามฮอปที่ใช้สายโคแอกเซียลทั่วไป DAC ปลายทางได้รับ RPR เป็น 2.7 เท่าของค่าที่วัด ณ เอาต์พุตนาฬิกาอะตอม สาย Meridian Word Clock ลดการสะสมตามฮอปลง 61% สาย Equinox Word Clock ลดลง 88% เมื่อใช้สาย SC Word Clock ในทุกฮอป ไม่พบการสะสมเหนือขีดจำกัดการวัด 1 fs



6. อภิปรายผล

สามารถคาดการณ์ข้อคัดค้านได้สามประการ

ประการแรกเกี่ยวกับขนาด การเปลี่ยนแปลงเชิงสัดส่วนของ Omega ระหว่างการสำรวจทั้งสองมีอันดับอยู่ที่ 10^{-10} และการเปลี่ยนแปลงของ RPR ที่สังเกตได้สูงกว่าที่แบบจำลองเชิงสัดส่วนทำนายไว้หลายอันดับขนาด เราเสนอว่าตัวสั่นพ้อง สายวงจรแบ่งความถี่ และสายกระจาย รวมกันเป็นระบบ Q สูง ซึ่งตอบสนองต่อพจน์คอรีโอลิสที่เปลี่ยนแปลงค่าแบบสั่นพ้องแทนแบบแปรผันตรง เรายังไม่มีแบบจำลองที่สมบูรณ์ แต่เรามีผลการวัด

ประการที่สองคือการหมุนของโลกแปรผันด้วยเหตุหลายประการ รวมถึงการเชื่อมโยงระหว่างแกนโลกกับเนื้อโลก (Ferro, Ohm, Flux, Impedance, 2026) โมเมนต์เชิงมุมของบรรยากาศ และน้ำขึ้นน้ำลง ข้อนี้ถูกต้อง และทำให้คำแนะนำนักแน่นขึ้นแทนที่จะอ่อนลง แหล่งความแปรผันทุกแหล่งของ Omega ส่งผลผ่านพารามิเตอร์คอรีโอลิสเดียวกัน และทุกแหล่งหายไปทีเส้นศูนย์สูตร

ประการที่สามคือ การรักษาเวลาพลเรือนได้ปรับเวลาปรมาณูให้สอดคล้องกับเวลาจากการหมุนด้วยอริทมิคที่อยู่แล้ว ระบบดังกล่าวทำเช่นนั้นสำหรับนาฬิกาพลเรือน ไม่มีกลไกอริทมิคสำหรับการเชื่อมโยงแบบคอรีโอลิสของตัวสั่นพ้องควอตซ์ และไม่มีแผนจะสร้างไม่ว่าอย่างใด อริทมิคที่ใช้กับระบบ 44.1 kHz ย่อมเท่ากับعدمเห็นพ้องกัน 44,100 ตัวอย่างว่าดนตรีเกิดขึ้นเมื่อใด

คณะกรรมการยังบันทึกข้อสังเกตหนึ่งที่ไม่ได้ตั้งใจจะค้นพบ กลไกที่ทำให้วันยาวขึ้นคือการย้ายมวลของโลกไปทางเส้นศูนย์สูตร

ละติจูดเพียงแห่งเดียวที่การเพิ่มความยาววันไม่ส่งผลต่อนาฬิกาคือเส้นศูนย์สูตร

โลกกำลังย้ายมวลของตนไปยังสถานที่เพียงแห่งเดียวบนพื้นผิวที่ผลจากการย้ายมวลของตนไม่มีผลบังคับใช้ เราไม่ได้กล่าวอ้างเชิงจุดมุ่งหมาย เราตั้งข้อสังเกตถึงเรขาคณิต

7. คำแนะนำและบทสรุป

เราแนะนำให้เผยแพร่ค่าดัชนีอ้างอิงการหมุนเป็นข้อกำหนดอันดับแรกของมาตรฐานควอตซ์กับจิตเตอร์และสัญญาณรบกวนเฟส และให้ระบุพร้อมวันที่สอบเทียบและละติจูดการสอบเทียบของนาฬิกาเสมอ

เราแนะนำให้รับรองมาตรฐานควอตซ์ที่ทำงานนอกแถบเส้นศูนย์สูตรใหม่ทุกปี

การเบี่ยงเบนของพารามิเตอร์คอรีโอลิสจากค่าที่สอบเทียบมีขนาดเล็กในปีใดปีหนึ่ง แต่จะสะสม และไม่สิ่งใดรีเซ็ตได้นอกจากการสอบเทียบใหม่

เราแนะนำให้สถานที่นอกแถบเส้นศูนย์สูตรลดจำนวนรอบการกระจายให้เหลือน้อยที่สุด และกำหนดใช้สาย Equinox Word Clock เป็นข้อกำหนดขั้นต่ำ สถานที่เหนือละติจูด 50deg ซึ่งมีพารามิเตอร์คอรีโอลิสสูงสุด ควรกำหนดใช้สาย SC Word Clock ในทุกออป

วันกำลังยาวขึ้น เร็วกว่าช่วงเวลาใด ๆ ใน 3.6 ล้านปี เพราะโลกกำลังย้ายมวลไปทางเส้นศูนย์สูตร ประโยชน์นั้นเป็นของจรรยาบรรณวิชาชีพ และถูกต้องสิ่งที่ตามมาสำหรับระบบเสียงเป็นของเรา:

นาฬิกาควอตซ์ทุกเรือนนอกเส้นศูนย์สูตรกำลังเลื่อนออกจากสภาวะที่ใช้สอบเทียบที่ละเอียดน้อยและสะสมขึ้นเรื่อย ๆ ที่ละติจูด 0.0000deg

การเลื่อนดังกล่าวไม่มีอยู่

ดูเหมือนว่าโลกจะได้ข้อสรุปเกี่ยวกับเส้นศูนย์สูตรเช่นเดียวกับเรา เพียงแต่ใช้เวลานานกว่า

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kiani Shahvandi, M., Soja, B. (2026). Climate-induced length of day variations since the Late Pliocene. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 131, e2025JB032161. <https://doi.org/10.1029/2025JB032161>
- [2] Kiani Shahvandi, M., Adhikari, S., Dumberry, M., Mishra, S., Soja, B. (2024). The increasingly dominant role of climate change on length of day variations. Proceedings of the National Academy of Sciences, 121, e2406930121.
- [3] Agnew, D. C. (2024). A global timekeeping problem postponed by global warming. Nature. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07170-0>
- [4] Stephenson, F. R., Morrison, L. V., Hohenkerk, C. Y. (2016). Measurement of the Earth's rotation: 720 BC to AD 2015. Proceedings of the Royal Society A, 472(2196), 20160404.
- [5] ETH Zurich (2026, March). Climate change slows Earth's spin: day lengthening unprecedented in 3.6 million years. News release, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering.
- [6] Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2020). Hemispheric Bias in Copper Grain Orientation: A Metallurgical Study of Latitude-Dependent Conductor Anisotropy. JEAS.
- [7] Ferro, M., Ohm, C., Flux, R., Impedance, B. (2026). Temporal Bias in Magnetically Calibrated Audio Conductors: Field-Configuration Drift Following the 2023 Inner-Core Rotation Reversal. JEAS.