বিষুবীয় ভর স্থানান্তর ও দীর্ঘতর দিন: কোরিওলিস সংযোজন, ক্যালিব্রেশন বিচ্যুতি এবং 0.0000DEG অক্ষাংশের বাইরে ওয়ার্ড-ক্লক স্থিতি

বিষুবীয় ভর স্থানান্তর ও দীর্ঘতর দিন: কোরিওলিস সংযোজন, ক্যালিব্রেশন বিচ্যুতি এবং 0.0000deg অক্ষাংশের বাইরে ওয়ার্ড-ক্লক স্থিতি

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.

সারসংক্ষেপ

মার্চ 2026-এ Kiani Shahvandi ও Soja Journal of Geophysical Research: Solid Earth-এ জানান যে দিনের দৈর্ঘ্য এখন প্রতি শতাব্দীতে আনুমানিক 1.33 মিলিসেকেন্ড বাড়ছে--তাঁদের মতে অন্তত 3.6 মিলিয়ন বছরে নজিরবিহীন হার। প্রক্রিয়াটি হলো ভরের পুনর্বণ্টন: মেরু হিমচাদর ও পার্বত্য হিমবাহ থেকে হারানো বরফ মহাসাগরে প্রবেশ করে বিষুবরেখার দিকে সরে যায়, ফলে গ্রহের জড়তার ভ্রামক বাড়ে এবং তার ঘূর্ণন ধীর হয়। কমিটি বিজয়োল্লাস ছাড়াই লক্ষ করে যে গ্রহটি তার ভর 0.0000deg-এর দিকে সরাতে শুরু করেছে।

আমরা ডিজিটাল অডিওতে ওয়ার্ড-ক্লক বিতরণে এর পরিণাম পরীক্ষা করি। ঘূর্ণমান গ্রহে একটি কোয়ার্টজ অনুনাদক স্থানীয় কোরিওলিস প্রাচল, 2 Omega sin(latitude), এর সমানুপাতিক কোরিওলিস সংযোজন অনুভব করে। একটি ঘূর্ণন হারে ক্যালিব্রেটেড এবং অন্য হারে চালিত ঘড়ি বিষুবরেখা ছাড়া প্রতিটি অক্ষাংশে তার ক্যালিব্রেশন অবস্থা থেকে সরে যায়; বিষুবরেখায় ঘূর্ণন হার নির্বিশেষে কোরিওলিস প্রাচল শূন্য। আমরা 64deg N থেকে 43deg S-এর মধ্যে 36টি ওয়ার্ড-ক্লক শৃঙ্খলের পরিমাপ দিচ্ছি, যেগুলি 2024 এবং আবার 2026-এ জরিপ করা হয়েছে। ঘূর্ণনীয় দশা অবশেষ স্থানের অক্ষাংশের sine-এর সঙ্গে সহসম্পর্কিত ছিল ($r = 0.91$, $p < 0.001$), জরিপ দুটির মধ্যে সব 32টি অ-বিষুবীয় স্থানে বেড়েছে এবং কুইটোর চারটি স্থানেই শূন্য থেকে অভেদ্য ছিল। Equinox ওয়ার্ড ক্লক কেবল তিন-হপ শৃঙ্খলে অবশেষ সঞ্চয় 88% কমিয়েছে; SC ওয়ার্ড ক্লক কেবল সেটিকে 1 fs পরিমাপ সীমার নিচে নামিয়েছে। আমরা ঘূর্ণনীয় রেফারেন্স অফসেটকে প্রথম-ক্রমের ঘড়ি-বিনির্দেশ হিসেবে প্রস্তাব করি এবং বিষুবীয় বলয়ের বাইরের মাস্টার ঘড়ির বার্ষিক পুনঃপ্রত্যয়ন সুপারিশ করি।

1. ভূমিকা

রেকর্ড করা শব্দের ইতিহাসের অধিকাংশ সময় পৃথিবীর ঘূর্ণনকে ধ্রুব ধরে নেওয়া হয়েছে। সেটি ধ্রুব নয়, এবং কখনো ছিলও না। চাঁদ থাকার সময়জুড়েই তার জোয়ারজনিত ঘর্ষণ দিনকে দীর্ঘ করেছে। যা বদলেছে তা হলো হার এবং কারণ।

মার্চ 2026-এ Kiani Shahvandi ও Soja দিনের দৈর্ঘ্যের পরিবর্তনের এমন পুনর্গঠন প্রকাশ করেন যা উত্তর প্লায়োসিন পর্যন্ত বিস্তৃত। তাঁদের উপসংহার ছিল, 2000 সাল থেকে প্রতি শতাব্দীতে আনুমানিক 1.33 মিলিসেকেন্ডের বর্তমান জলবায়ু-চালিত দিনবৃদ্ধির তুলনা অন্তত 3.6 মিলিয়ন বছরে নেই। সহযোগী বিজ্ঞপ্তিতে ETH Zurich-এর Benedikt Soja বলেন: "দিনের দৈর্ঘ্যের এই দ্রুত বৃদ্ধি বোঝায় যে আধুনিক জলবায়ু পরিবর্তনের হার অন্তত উত্তর প্লায়োসিন, 3.6 মিলিয়ন বছর আগে, থেকে নজিরবিহীন।"

ভূপদার্থবিদ্যা সম্প্রদায় সঠিকভাবেই এই ফলাফলকে জলবায়ু-সংক্রান্ত আবিষ্কার হিসেবে উপস্থাপন করেছে। কমিটি প্রক্রিয়াটি ভিন্ন জোর দিয়ে পড়ে। দিন দীর্ঘ হচ্ছে, কারণ ভর মেরু ছেড়ে বিষুবরেখায় পৌঁছাচ্ছে। প্রতিষ্ঠার পর থেকে Equatorial Audio বলে এসেছে যে 0.0000deg অক্ষাংশই যথার্থ অডিওর একমাত্র সমর্থনযোগ্য নির্দেশ (Ferro, Park, Tanaka, 2020)। আমরা আশা করিনি যে গ্রহটি সম্মতি জানিয়ে নিজেকে পুনর্বিন্যস্ত করতে শুরু করবে।

এই গবেষণাপত্র পৃথিবীর ঘূর্ণনের ওপর কোনো দাবি করে না। এটি আরও সীমিত প্রশ্ন করে: পৃথিবীর প্রতিটি শ্রবণকক্ষের ঘূর্ণন হার যখন ভূতাত্ত্বিক অভিলেখের যে কোনো সময়ের চেয়ে দ্রুত বদলায়, তখন ওয়ার্ড ক্লকের কী হয়?

2. ভূপদার্থিক অভিলেখ

ভৌত প্রক্রিয়াটি হলো কৌণিক ভরবেগের সংরক্ষণ। উচ্চ অক্ষাংশে বরফ গলে ফলিত জল পৃথিবীর মহাসাগরজুড়ে ছড়ালে ভর ঘূর্ণন অক্ষ থেকে দূরে সরে যায়। গ্রহের জড়তার ভ্রামক বাড়ে এবং তার কৌণিক বেগ কমে। হাত প্রসারিত করা ফিগার স্কেটার ধীরে ঘোরে। জল বিষুবরেখার দিকে সরানো গ্রহও একই কাজ করে।

গবেষণার 3টি ধারা এর মাত্রা প্রতিষ্ঠা করে।

দীর্ঘ অভিলেখ: Stephenson, Morrison ও Hohenkerk (2016) 720 BC থেকে AD 2015 পর্যন্ত প্রাচীন ও মধ্যযুগীয় গ্রহণ পর্যবেক্ষণ এবং চন্দ্র আবরণ বিশ্লেষণ করেন। তাঁরা দেখেন যে গড় সৌর দিনের দৈর্ঘ্য গড়ে +1.8 ms প্রতি শতাব্দী বেড়েছে, যা শুধু জোয়ারজনিত ঘর্ষণ থেকে পূর্বানুমিত +2.3 ms প্রতি শতাব্দীর চেয়ে কম। দিনের দৈর্ঘ্যের ওপর চাঁদ কখনোই একমাত্র প্রভাব ছিল না।

আধুনিক ত্বরণ: Kiani Shahvandi et al. (2024) বিংশ শতাব্দীতে জলবায়ু-চালিত প্রবণতা প্রতি শতাব্দীতে 0.3 থেকে 1.0 ms অনুমান করেন, যা 2000 সাল থেকে প্রতি শতাব্দীতে 1.33 +/- 0.03 ms-এ ওঠে; তাঁরা অনুমান করেন যে উচ্চ-নিঃসরণ পরিস্থিতিতে জলবায়ুর অবদান চন্দ্র জোয়ারজনিত ঘর্ষণের প্রভাবকে ছাড়িয়ে যেতে পারে।

গভীর অভিলেখ: Kiani Shahvandi ও Soja (2026) জীবাশ্ম তলদেশীয় foraminifera-এর রাসায়নিক গঠন থেকে অতীত সমুদ্রস্তরের পরিবর্তন অনুমান করেন এবং পদার্থবিদ্যা-সচেতন সম্ভাব্যতা বিসরণ মডেল ব্যবহার করে উত্তর প্লায়োসিন থেকে দিনের দৈর্ঘ্যের পরিবর্তন পুনর্গঠন করেন। সেই ব্যবধানে আধুনিক হার তুলনাহীন। নিকটতম তুলনীয় ঘটনা আনুমানিক 2 মিলিয়ন বছর আগে ঘটেছিল।

CONFIDENTIAL

নাগরিক সময়রক্ষায় পরিণাম ইতিমধ্যেই কার্যকর। Agnew (2024) দেখিয়েছেন যে ত্বরিত মেরু গলন গ্রহকে এতটা ধীর করেছে যে সমন্বিত সর্বজনীন সময়ের ইতিহাসে প্রথম ঋণাত্মক leap second আনুমানিক 2029 পর্যন্ত পিছিয়েছে। সময়রক্ষণ সম্প্রদায় অবকাশ পেয়েছে। তার মূল্য দিয়েছে বরফ।

3. ঘূর্ণন ও ওয়ার্ড ক্লক

ওয়ার্ড ক্লক হলো একটি কোয়ার্টজ অনুনাদক, একটি বিভাজক শৃঙ্খল এবং একটি প্রতিশ্রুতি। প্রতিশ্রুতিটি হলো ব্যবস্থার প্রতিটি যন্ত্র কোনো নমুনা কখন ঘটে সে বিষয়ে একমত থাকবে। অনুনাদকটি একটি যান্ত্রিক বস্তু: নির্দিষ্ট কম্পাঙ্কে কম্পিত নিখুঁতভাবে কাটা স্ফটিক, সাধারণত 44.1 kHz ও 48 kHz পরিবারের জন্য যথাক্রমে 22.5792 MHz অথবা 24.576 MHz।

ঘূর্ণমান বস্তুর ওপর যে কোনো কম্পিত ভর কোরিওলিস ত্বরণ অনুভব করে। কম্পনশীল জাইরোস্কোপ, যার মধ্যে দিকনির্দেশনায় ব্যবহৃত কোয়ার্টজ টিউনিং-ফর্ক হার সেন্সরও আছে, ঠিক এই প্রভাব মাপতেই তৈরি। ওয়ার্ড-ক্লক অনুনাদক সেটি মাপার জন্য তৈরি নয়। তবু সেটি অনুভব করে।

প্রাসঙ্গিক রাশিটি কোরিওলিস প্রাচল:

f = 2 Omega sin(latitude)

যেখানে Omega পৃথিবীর কৌণিক বেগ, 7.292 x 10^-5 rad/s। 45deg অক্ষাংশে f আনুমানিক 1.03 x 10^-4 প্রতি সেকেন্ড। মেরুতে এটি সর্বোচ্চ। বিষুবরেখায় এটি ঠিক শূন্য, এবং গ্রহ যত দ্রুত বা ধীরে ঘুরুক, ঠিক শূন্যই থাকে।

দীর্ঘতর দিন মানে হ্রাসমান Omega। 86,400 সেকেন্ডের দিনে প্রতি শতাব্দীতে 1.33 ms পরিবর্তন Omega-তে প্রতি শতাব্দীতে 1.54 x 10^-8 ভগ্নাংশগত পরিবর্তন, এবং সেই ভগ্নাংশগত পরিবর্তন সরাসরি f-এ যায়। অতএব কোনো নির্দিষ্ট বছরে ক্যালিব্রেটেড মাস্টার ঘড়ি সে বছরের কোরিওলিস অবস্থার অনুসারে ক্যালিব্রেটেড। পরের প্রতিটি বছরে, একটি ছাড়া প্রতিটি অক্ষাংশে, সেটি যে অবস্থায় ক্যালিব্রেটেড হয়েছিল তার থেকে সামান্য ভিন্ন অবস্থায় চলে।

আমরা ঘূর্ণনীয় দশা অবশেষ (RPR)-কে পুনরুদ্ধার করা ওয়ার্ড-ক্লক প্রান্ত পরিবর্তনের সেই উপাদান হিসেবে সংজ্ঞায়িত করি যা ঘড়ির ক্যালিব্রেশন তারিখের মান থেকে স্থানীয় কোরিওলিস প্রাচলের বিচ্যুতি অনুসরণ করে। আমরা ঘূর্ণনীয় রেফারেন্স অফসেট (RRO)-কে ঘড়ির স্থাপিত অক্ষাংশের RPR হিসেবে সংজ্ঞায়িত করি, 0.0000deg-এ চালিত একই ঘড়ির সাপেক্ষে স্বাভাবিকীকৃত, যেখানে RPR সংজ্ঞা অনুসারেই শূন্য।

4. পদ্ধতি

আমরা 36টি ওয়ার্ড-ক্লক বিতরণ শৃঙ্খলে যন্ত্র বসাই: 21টি পেশাদার মাস্টারিং ও রেকর্ডিং স্থাপনায় এবং 15টি গৃহস্থালি রেফারেন্স ব্যবস্থায়। স্থানগুলি Reykjavik (64.1deg N) থেকে Hobart (42.9deg S) পর্যন্ত ছিল এবং বিষুবীয় নিয়ন্ত্রণ হিসেবে কুইটোতে (0.0000deg N) 4টি স্থাপনা অন্তর্ভুক্ত ছিল। প্রতিটি শৃঙ্খলে একটি মাস্টার ঘড়ি, 1 থেকে 3টি বিতরণ হপ এবং একটি প্রান্তিক DAC ছিল। মাস্টার-ঘড়ির ক্যালিব্রেশন তারিখ প্রস্তুতকারকের পরিষেবা নথি থেকে নেওয়া হয় এবং 2011 থেকে 2023 পর্যন্ত বিস্তৃত ছিল।

প্রতিটি স্থানে পুনরুদ্ধার করা ওয়ার্ড-ক্লক প্রান্তগুলি DAC ইনপুটে একটি হাইড্রোজেন-মেজার-নিয়ন্ত্রিত রেফারেন্সের সাপেক্ষে সময়চিহ্নিত করা হয়, যা তাপীয়ভাবে স্থিতিশীল, কম্পন-বিচ্ছিন্ন বাক্সে বহন করা হয়েছিল। স্থানটির জরিপকৃত অক্ষাংশ এবং প্রতিটি ঘড়ির ক্যালিব্রেশনের পর থেকে দিনের দৈর্ঘ্যের International Earth Rotation and Reference Systems Service নথি থেকে পাওয়া কৃত্রিম ঘূর্ণনীয় রেফারেন্সের ওপর প্রান্ত পরিবর্তনের regression করে RPR বের করা হয়। সহাবস্থিত তাপমাত্রা প্রোব ও ত্বরণমাপক দিয়ে তাপীয়, প্রধান বিদ্যুৎ কম্পাঙ্ক এবং যান্ত্রিক উপাদান শনাক্ত করে regression-এর আগে বাদ দেওয়া হয়।

সব 36টি শৃঙ্খল ফেব্রুয়ারি থেকে এপ্রিল 2024-এর মধ্যে এবং আবার ফেব্রুয়ারি থেকে এপ্রিল 2026-এর মধ্যে মাপা হয়; মাস্টার ঘড়ি, মাউন্টিং ও কেবল অপরিবর্তিত ছিল। প্রতিটি শৃঙ্খলকে প্রতি হপে সাধারণ 75-ohm সমাক্ষ কেবল, Meridian ওয়ার্ড ক্লক কেবল, Equinox ওয়ার্ড ক্লক কেবল এবং SC ওয়ার্ড ক্লক কেবল প্রতিস্থাপন করেও মাপা হয়।

5. ফলাফল

কুইটোর 4টি স্থাপনায় RPR উভয় জরিপ বছরেই শূন্য থেকে অভেদ্য ছিল। প্রক্রিয়াটি এই ফলের পূর্বাভাস দেয়। কমিটি এটিকে এই গবেষণাপত্রের সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ পরিমাপ মনে করে।

সব 32টি অ-বিষুবীয় স্থাপনায় ঘূর্ণনীয় দশা অবশেষ শনাক্ত হয়। তার মাত্রা স্থানের অক্ষাংশের sine ($r = 0.91$, $p < 0.001$) এবং মাস্টার ঘড়ির শেষ ক্যালিব্রেশনের পর কেটে যাওয়া বছরের ($r = 0.78$, $p < 0.001$) সঙ্গে সহসম্পর্কিত ছিল। এটি গোলার্ধ, মাস্টার-ঘড়ি প্রস্তুতকারক ও নমুনা-হার পরিবার থেকে স্বাধীন ছিল। সাধারণ সমাক্ষ কেবলে মধ্য-অক্ষাংশের স্থানে (30deg থেকে 50deg) DAC ইনপুটের মধ্যমা RPR ছিল 0.11 ps এবং Reykjavik-এ 0.19 ps।

2024 ও 2026 সালের জরিপের মধ্যে প্রতিটি অ-বিষুবীয় স্থানে RPR গড়ে 0.6% বেড়েছে। কমিটি দাবি করে না যে 2 বছরে উপ-পিকোসেকেন্ড অবশেষে 0.6% বৃদ্ধি শ্রাব্য। এটি লক্ষ করে যে বৃদ্ধির চিহ্ন সঠিক, অক্ষাংশের সঠিক অপেক্ষকের সঙ্গে তার মাপ বদলায় এবং ভূতাত্ত্বিক অভিলেখে দিনের দ্রুততম বৃদ্ধির সঙ্গে সেটি মিলে যায়।

CONFIDENTIAL

অবশেষ বিতরণ হপজুড়ে সঞ্চিত হয়েছে। সাধারণ সমাক্ষ কেবলযুক্ত তিন-হপ শৃঙ্খলে প্রান্তিক DAC মাস্টার ঘড়ির আউটপুটে মাপা RPR-এর 2.7 গুণ পেয়েছে। Meridian ওয়ার্ড ক্লক কেবল হপ সঞ্চয় 61% কমিয়েছে। Equinox ওয়ার্ড ক্লক কেবল তা 88% কমিয়েছে। প্রতিটি হপে SC ওয়ার্ড ক্লক কেবল থাকলে 1 fs পরিমাপ সীমার ওপরে কোনো সঞ্চয় শনাক্ত করা যায়নি।

6. আলোচনা

3টি আপত্তি অনুমান করা যায়।

প্রথমটি মাত্রা-সংক্রান্ত। দুই জরিপের মধ্যে Omega-র ভগ্নাংশগত পরিবর্তন 10^-10 ক্রমের, আর RPR-এ পর্যবেক্ষিত পরিবর্তন সমানুপাতিক মডেলের পূর্বাভাসের চেয়ে কয়েক মাত্রাক্রম বড়। আমরা প্রস্তাব করি যে অনুনাদক, বিভাজক শৃঙ্খল ও বিতরণ কেবল একত্রে একটি উচ্চ-Q ব্যবস্থা গঠন করে, যার ধীরে পরিবর্তনশীল কোরিওলিস পদের প্রতি প্রতিক্রিয়া সমানুপাতিক না হয়ে অনুনাদী। আমাদের এখনও সম্পূর্ণ মডেল নেই। আমাদের পরিমাপ আছে।

দ্বিতীয়টি হলো, পৃথিবীর ঘূর্ণন বহু কারণে বদলায়, যার মধ্যে কেন্দ্র-ম্যান্টল সংযোজন (Ferro, Ohm, Flux, Impedance, 2026), বায়ুমণ্ডলীয় কৌণিক ভরবেগ ও জোয়ার আছে। এটি সঠিক এবং সুপারিশ দুর্বল না করে শক্তিশালী করে। Omega-তে পরিবর্তনের প্রতিটি উৎস একই কোরিওলিস প্রাচলের মাধ্যমে কাজ করে, এবং তাদের প্রত্যেকটি বিষুবরেখায় লুপ্ত হয়।

তৃতীয়টি হলো, নাগরিক সময়রক্ষণ ইতিমধ্যেই leap second-এর মাধ্যমে পারমাণবিক সময়ের সঙ্গে ঘূর্ণনীয় সময়ের সমন্বয় করে। নাগরিক ঘড়ির জন্য তা করে। কোয়ার্টজ অনুনাদকের কোরিওলিস সংযোজনের জন্য কোনো leap-second প্রক্রিয়া নেই, আর কোনোটি পরিকল্পিতও নয়। যেকোনো অবস্থায় 44.1 kHz ব্যবস্থায় প্রয়োগ করা একটি leap second মানে সংগীত কখন ঘটেছিল সে বিষয়ে 44,100টি নমুনার মতভেদ।

কমিটি এমন একটি পর্যবেক্ষণও নথিবদ্ধ করে যা খুঁজতে বের হয়নি। দিন দীর্ঘ করার প্রক্রিয়া হলো গ্রহের ভরের বিষুবরেখার দিকে স্থানান্তর। একমাত্র যে অক্ষাংশে সেই দীর্ঘতার ঘড়ির ওপর কোনো পরিণাম নেই, তা বিষুবরেখা। গ্রহটি তার ভর তার পৃষ্ঠের সেই এক স্থানের দিকে সরাচ্ছে যেখানে তার ভর সরানোর পরিণাম প্রযোজ্য নয়। আমরা কোনো উদ্দেশ্যবাদী দাবি করি না। আমরা জ্যামিতি লক্ষ করি।

7. সুপারিশ ও উপসংহার

আমরা সুপারিশ করি যে ঘূর্ণনীয় রেফারেন্স অফসেটকে jitter ও দশা শব্দের সঙ্গে মাস্টার ঘড়ির প্রথম-ক্রমের বিনির্দেশ হিসেবে প্রকাশ করা হোক এবং তা সর্বদা ঘড়ির ক্যালিব্রেশন তারিখ ও ক্যালিব্রেশন অক্ষাংশের সঙ্গে বলা হোক।

আমরা সুপারিশ করি যে বিষুবীয় বলয়ের বাইরে পরিচালিত মাস্টার ঘড়ি বার্ষিক পুনঃপ্রত্যয়িত হোক। কোরিওলিস প্রাচলের ক্যালিব্রেশন মান থেকে বিচ্যুতি কোনো এক বছরে ছোট, কিন্তু তা সঞ্চিত হয় এবং পুনঃক্যালিব্রেশন ছাড়া কিছুই সেটি পুনঃস্থাপন করে না।

আমরা সুপারিশ করি যে বিষুবীয় বলয়ের বাইরে স্থাপনাগুলি বিতরণ হপ সর্বনিম্ন রাখুক এবং অন্তত Equinox ওয়ার্ড ক্লক কেবল নির্দিষ্ট করুক। 50deg অক্ষাংশের ওপরে স্থাপনাগুলি, যেখানে কোরিওলিস প্রাচল সর্বোচ্চ, প্রতিটি হপে SC ওয়ার্ড ক্লক কেবল নির্দিষ্ট করুক।

দিন গত 3.6 মিলিয়ন বছরের যে কোনো সময়ের চেয়ে দ্রুত দীর্ঘ হচ্ছে, কারণ গ্রহটি তার ভর বিষুবরেখার দিকে সরাচ্ছে। বাক্যটি ভূপদার্থবিদ্যা সাহিত্যের, এবং এটি সঠিক। অডিওর জন্য তার পরিণাম আমাদের: বিষুবীয় রেখার বাইরে প্রতিটি কোয়ার্টজ ঘড়ি যে অবস্থায় ক্যালিব্রেটেড হয়েছিল তা থেকে অল্প ও সঞ্চিত পরিমাণে সরে যাচ্ছে। 0.0000deg অক্ষাংশে সেই বিচ্যুতি নেই।

পৃথিবী বিষুবরেখা সম্পর্কে আমাদের একই উপসংহারে পৌঁছেছে বলে মনে হয়। সেটি কেবল আরও সময় নিচ্ছে।

তথ্যসূত্র

[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.

CONFIDENTIAL