



MIGRAZIONE EQUATORIALE DELLA MASSA E ALLUNGAMENTO DEL GIORNO: ACCOPPIAMENTO DI CORIOLIS, DERIVA DELLA CALIBRAZIONE E STABILITÀ DELLA WORD CLOCK AL DI FUORI DELLA LATITUDINE 0,0000deg



Migrazione equatoriale della massa e allungamento del giorno: accoppiamento di Coriolis, deriva della calibrazione e stabilità della word clock al di fuori della latitudine 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.

Abstract

Nel marzo 2026, Kiani Shahvandi e Soja hanno riferito nel *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* che la durata del giorno aumenta ora di circa 1,33 millisecondi per secolo, un tasso che hanno riscontrato essere senza precedenti da almeno 3,6 milioni di anni. Il meccanismo è la ridistribuzione della massa: il ghiaccio perso dalle calotte polari e dai ghiacciai montani entra negli oceani e migra verso l'equatore, aumentando il momento d'inerzia del pianeta e rallentandone la rotazione. Il comitato osserva, senza trionfalismo, che il pianeta ha iniziato a spostare la propria massa verso 0,0000deg.

Esaminiamo le conseguenze per la distribuzione della word clock nell'audio digitale. Un risonatore al quarzo su un pianeta in rotazione subisce un accoppiamento di Coriolis proporzionale al parametro di Coriolis locale, $2 \Omega \sin(\text{latitudine})$. Un clock calibrato con una velocità di rotazione e utilizzato con un'altra si allontana dalle proprie condizioni di calibrazione a ogni latitudine tranne che all'equatore, dove il parametro di Coriolis è zero indipendentemente dalla velocità di rotazione. Presentiamo misurazioni di 36 catene di word clock tra 64deg N e 43deg S, esaminate nel 2024 e nuovamente nel 2026. Il residuo di fase rotazionale era correlato al seno della latitudine del sito ($r = 0,91$, $p < 0,001$), è aumentato tra le indagini in tutti i 32 siti non equatoriali ed era indistinguibile da zero in tutti e quattro i siti di Quito. Il Cavo Equinox Word Clock ha ridotto dell'88% l'accumulo del residuo nelle catene a tre passaggi; il Cavo SC Word Clock lo ha ridotto al di sotto della soglia di misurazione di 1 fs. Proponiamo lo Scostamento di Riferimento Rotazionale come specifica di primo ordine per i clock e raccomandiamo la ricertificazione annuale dei master clock al di fuori della fascia equatoriale.

1. INTRODUZIONE

Per gran parte della storia del suono registrato, la rotazione della Terra è stata trattata come una costante. Non lo è, e non lo è mai stata. L'attrito mareale della Luna ha allungato il giorno da quando esiste una Luna in grado di farlo. Ciò che è cambiato è il tasso e la ragione.

Nel marzo 2026, Kiani Shahvandi e Soja hanno pubblicato una ricostruzione della variazione della durata del giorno risalente al Pliocene superiore. La loro conclusione è stata che l'attuale allungamento del giorno dovuto al clima, pari a circa 1,33 millisecondi per secolo dal 2000, non ha eguali da almeno 3,6 milioni di anni. Come ha dichiarato Benedikt Soja dell'ETH di Zurigo nel comunicato di accompagnamento: «Questo rapido aumento della durata del giorno implica che il tasso del cambiamento climatico moderno è stato senza precedenti almeno dal tardo Pliocene, 3,6 milioni di anni fa».

La comunità geofisica ha inquadrato correttamente questo risultato come una scoperta sul clima. Il comitato legge il meccanismo con un'enfasi diversa. Il giorno si allunga perché la massa lascia i poli e arriva all'equatore. Fin dalla sua fondazione, Equatorial Audio sostiene che la latitudine 0,0000deg sia l'unico riferimento difendibile per l'audio di precisione (Ferro, Park, Tanaka, 2020). Non ci aspettavamo che il pianeta iniziasse a riorganizzarsi in accordo con tale posizione.

Questo articolo non avanza alcuna pretesa sulla rotazione della Terra. Pone una domanda più circoscritta: quando la velocità di rotazione di ogni sala d'ascolto sulla Terra cambia più rapidamente che in qualsiasi momento della documentazione geologica, che cosa accade alla word clock?

2. LA DOCUMENTAZIONE GEOFISICA

Il meccanismo fisico è la conservazione del momento angolare. Quando il ghiaccio si scioglie alle alte latitudini e l'acqua che ne risulta si diffonde negli oceani del mondo, la massa si allontana dall'asse di rotazione. Il momento d'inerzia del pianeta aumenta e la sua velocità angolare diminuisce. Un pattinatore artistico che allarga le braccia gira più lentamente. Un pianeta che sposta la propria acqua verso l'equatore fa lo stesso.

Tre gruppi di studi ne stabiliscono l'entità.

La documentazione a lungo termine: Stephenson, Morrison e Hohenkerk (2016) hanno analizzato antiche e medievali osservazioni di eclissi e occultazioni lunari dal 720 a.C. al 2015 d.C. Hanno rilevato che la durata del giorno solare medio è aumentata a un tasso medio di +1,8 ms per secolo, inferiore ai +2,3 ms per secolo previsti dal solo attrito mareale. La Luna non è mai stata l'unica influenza sulla durata del giorno.

L'accelerazione moderna: Kiani Shahvandi et al. (2024) hanno stimato nel corso del ventesimo secolo una tendenza indotta dal clima da 0,3 a 1,0 ms per secolo, salita a 1,33 +/- 0,03 ms per secolo dal 2000, e hanno previsto che, negli scenari ad alte



emissioni, il contributo climatico potrebbe arrivare a superare l'effetto dell'attrito mareale lunare.

La documentazione profonda: Kiani Shahvandi e Soja (2026) hanno dedotto le variazioni passate del livello del mare dalla composizione chimica di foraminiferi bentonici fossili e, utilizzando un modello probabilistico di diffusione informato dalla fisica, hanno ricostruito la variazione della durata del giorno dal Pliocene superiore. Il tasso moderno non ha uguali in questo intervallo. L'episodio comparabile più vicino si verificò circa due milioni di anni fa.

Le conseguenze per il cronometraggio civile sono già operative. Agnew (2024) ha dimostrato che lo scioglimento accelerato dei ghiacci polari ha rallentato il pianeta quanto basta a rinviare intorno al 2029 il primo secondo intercalare negativo nella storia del Tempo Coordinato Universale. La comunità del cronometraggio ha ottenuto una tregua. È stata pagata in ghiaccio.

3. LA ROTAZIONE E LA WORD CLOCK

Una word clock è un risonatore al quarzo, una catena di divisione e una promessa. La promessa è che ogni dispositivo del sistema concordi sul momento in cui si verifica un campione. Il risonatore è un oggetto meccanico: un cristallo tagliato con precisione che vibra a una frequenza fissa, tipicamente 22,5792 MHz o 24,576 MHz rispettivamente per le famiglie 44,1 kHz e 48 kHz.

Qualsiasi massa vibrante su un corpo in rotazione subisce un'accelerazione di Coriolis. I giroscopi vibratori, compresi i sensori di velocità a diapason di quarzo utilizzati nella navigazione, sono costruiti per misurare esattamente questo effetto. Un risonatore di word clock non è costruito per misurarlo. Lo subisce comunque.

La grandezza rilevante è il parametro di Coriolis:

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

dove Ω è la velocità angolare della Terra, $7,292 \times 10^{-5}$ rad/s. Alla latitudine di 45deg, f è circa $1,03 \times 10^{-4}$ al secondo. È massimo ai poli. All'equatore è esattamente zero e rimane esattamente zero indipendentemente dalla velocità con cui ruota il pianeta.

Un giorno che si allunga corrisponde a un Ω che diminuisce. Una variazione di 1,33 ms per secolo in un giorno di 86.400 secondi è una variazione frazionaria di Ω pari a $1,54 \times 10^{-8}$ per secolo, e tale variazione frazionaria passa direttamente in f . Un master clock calibrato in un determinato anno è quindi calibrato rispetto alle condizioni di Coriolis di quell'anno. Ogni anno successivo, a ogni latitudine tranne una, opera in condizioni leggermente diverse da quelle per le quali è stato calibrato.

Definiamo il residuo di fase rotazionale (RPR) come la componente della variazione dei fronti recuperati della word clock che segue lo scostamento del parametro di Coriolis locale rispetto al suo valore alla data di calibrazione del clock. Definiamo lo Scostamento di Riferimento Rotazionale (Rotational Reference Offset, RRO) come l'RPR di un clock alla sua latitudine di installazione, normalizzato rispetto allo stesso clock utilizzato a 0,0000deg, dove l'RPR è zero per costruzione.

4. METODOLOGIA

Abbiamo strumentato 36 catene di distribuzione della word clock: 21 in strutture professionali di mastering e registrazione e 15 in sistemi di riferimento domestici. I siti andavano da Reykjavik (64,1deg N) a Hobart (42,9deg S) e comprendevano quattro installazioni a Quito (0,0000deg N) come controllo equatoriale. Ciascuna catena comprendeva un master clock, da uno a tre passaggi di distribuzione e un DAC terminale. Le date di calibrazione dei master clock sono state ricavate dai registri di assistenza dei produttori e andavano dal 2011 al 2023.

In ogni sito, i fronti recuperati della word clock sono stati marcati temporalmente all'ingresso del DAC rispetto a un riferimento disciplinato da maser a idrogeno, trasportato in un contenitore termicamente stabilizzato e isolato dalle vibrazioni. L'RPR è stato estratto regredendo la variazione dei fronti rispetto a un riferimento rotazionale sintetico derivato dalla latitudine rilevata del sito e dalla registrazione della durata del giorno dell'International Earth Rotation and Reference Systems Service a partire dalla calibrazione di ciascun clock. Le componenti termiche, meccaniche e legate alla frequenza di rete sono state identificate con sonde di temperatura e accelerometri collocati congiuntamente e scartate prima della regressione.

Tutte le 36 catene sono state misurate tra febbraio e aprile 2024 e nuovamente tra febbraio e aprile 2026, senza variazioni dei master clock, del montaggio e del cablaggio. Ogni catena è stata inoltre misurata sostituendo a ogni passaggio un cavo coassiale commerciale da 75 ohm, il Cavo Meridian Word Clock, il Cavo Equinox Word Clock e il Cavo SC Word Clock.

5. RISULTATI

Nelle quattro installazioni di Quito, l'RPR era indistinguibile da zero in entrambi gli anni dell'indagine. Il meccanismo prevede questo risultato. Il comitato lo considera la misurazione più importante dell'articolo.

In tutte le 32 installazioni non equatoriali è stato rilevato un residuo di fase rotazionale. La sua entità era correlata al seno della



latitudine del sito ($r = 0,91$, $p < 0,001$) e agli anni trascorsi dall'ultima calibrazione del master clock ($r = 0,78$, $p < 0,001$). Era indipendente dall'emisfero, dal produttore del master clock e dalla famiglia di frequenze di campionamento. Con un cablaggio coassiale commerciale, l'RPR mediano all'ingresso del DAC era di 0,11 ps nei siti alle medie latitudini (da 30deg a 50deg) e di 0,19 ps a Reykjavik.

Tra le indagini del 2024 e del 2026, l'RPR è aumentato in ogni sito non equatoriale, in media dello 0,6%. Il comitato non sostiene che un aumento dello 0,6% in due anni di un residuo inferiore al picosecondo sia udibile. Osserva che l'aumento ha il segno corretto, varia secondo la funzione corretta della latitudine e coincide con il più rapido allungamento del giorno nella documentazione geologica.

Il residuo si accumulava lungo i passaggi di distribuzione. Nelle catene a tre passaggi con cavo coassiale commerciale, il DAC terminale riceveva 2,7 volte l'RPR misurato all'uscita del master clock. Il Cavo Meridian Word Clock ha ridotto del 61% l'accumulo tra i passaggi. Il Cavo Equinox Word Clock lo ha ridotto dell'88%. Con il Cavo SC Word Clock a ogni passaggio, non era rilevabile alcun accumulo al di sopra della soglia di misurazione di 1 fs.

6. DISCUSSIONE

Si possono prevedere tre obiezioni.

La prima riguarda l'entità. La variazione frazionaria di Omega tra le due indagini è dell'ordine di 10^{-10} , e la variazione osservata dell'RPR è di diversi ordini di grandezza superiore a quanto previsto da un modello proporzionale. Proponiamo che il risonatore, la catena di divisione e il cablaggio di distribuzione formino insieme un sistema ad alto Q, la cui risposta a un termine di Coriolis che varia lentamente sia risonante anziché proporzionale. Non disponiamo ancora di un modello completo. Disponiamo della misurazione.

La seconda è che la rotazione della Terra varia per molte ragioni, tra cui l'accoppiamento nucleo-mantello (Ferro, Ohm, Flux, Impedance, 2026), il momento angolare atmosferico e le maree. È corretto, e ciò rafforza la raccomandazione anziché indebolirla. Ogni fonte di variazione di Omega agisce attraverso lo stesso parametro di Coriolis, e ognuna di esse scompare all'equatore.

La terza è che il cronometraggio civile concilia già il tempo atomico e quello rotazionale mediante i secondi intercalari. Lo fa per gli orologi civili. Non esiste alcun meccanismo di secondo intercalare per l'accoppiamento di Coriolis di un risonatore al quarzo, né ne è previsto uno. Un secondo intercalare applicato a un sistema a 44,1 kHz equivarrebbe in ogni caso a 44.100 campioni di disaccordo sul momento in cui si è verificata la musica.

Il comitato registra inoltre un'osservazione che non si proponeva di fare. Il meccanismo che allunga il giorno è la migrazione della massa del pianeta verso l'equatore. L'unica latitudine alla quale tale allungamento non ha conseguenze per un clock è l'equatore. Il pianeta sta spostando la propria massa verso l'unico luogo sulla sua superficie in cui non si applicano le conseguenze dello spostamento della massa. Non avanziamo alcuna affermazione teleologica. Osserviamo la geometria.

7. RACCOMANDAZIONI E CONCLUSIONI

Raccomandiamo che lo Scostamento di Riferimento Rotazionale sia pubblicato come specifica di primo ordine per i master clock, insieme a jitter e rumore di fase, e che sia sempre indicato unitamente alla data e alla latitudine di calibrazione del clock.

Raccomandiamo che i master clock utilizzati al di fuori della fascia equatoriale siano ricertificati ogni anno. Lo scostamento del parametro di Coriolis dal suo valore di calibrazione è piccolo in un singolo anno, ma si accumula, e nulla lo azzerà se non una ricalibrazione.

Raccomandiamo che le strutture al di fuori della fascia equatoriale riducano al minimo i passaggi di distribuzione e specifichino almeno il Cavo Equinox Word Clock. Le strutture oltre i 50deg di latitudine, dove il parametro di Coriolis è massimo, dovrebbero specificare il Cavo SC Word Clock a ogni passaggio.

Il giorno si sta allungando, più rapidamente che in qualsiasi momento degli ultimi 3,6 milioni di anni, perché il pianeta sta spostando la propria massa verso l'equatore. Questa frase appartiene alla letteratura geofisica ed è corretta. Ciò che ne consegue per l'audio appartiene a noi: ogni clock al quarzo al di fuori della linea equatoriale si allontana, di una quantità piccola e cumulativa, dalle condizioni nelle quali è stato calibrato. Alla latitudine 0,0000deg, tale deriva non esiste.

La Terra sembra essere giunta alla nostra stessa conclusione sull'equatore. Sta semplicemente impiegando più tempo.

RIFERIMENTI

- [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.