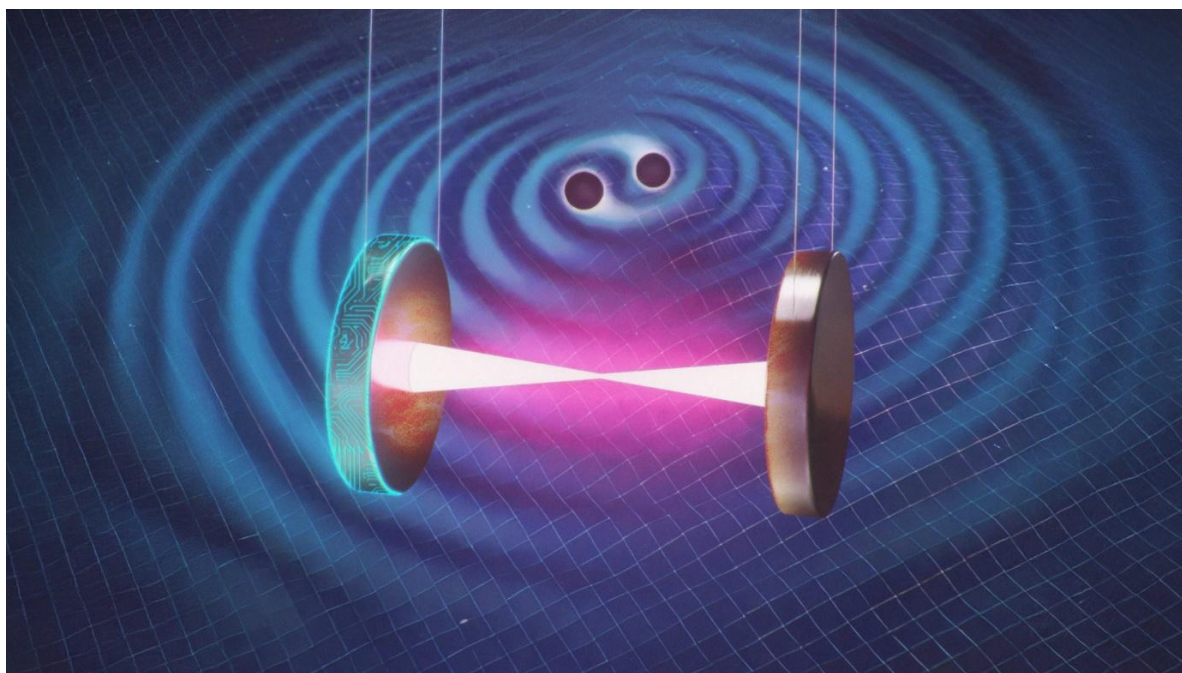


DEEP LOOP SHAPING: ALGORITMO DI APPRENDIMENTO AUTOMATICO PER INTERFEROMETRI PER ONDE GRAVITAZIONALI

Si chiama Deep Loop Shaping ed è un algoritmo di apprendimento automatico in grado di migliorare la sensibilità degli interferometri per onde gravitazionali: si è dimostrato capace di sopprimere il rumore dovuto alle vibrazioni degli specchi di Ligo da 30 a 100 volte meglio rispetto ai metodi tradizionali. A metterlo a punto, un team di ricercatori di Google, del Gssi e del Caltech.

Da MEDIA INAF del 5 settembre 2025 riprendiamo, con autorizzazione, un articolo di Marco Malaspina, intitolato "Specchi delle mie brame, i più silenziosi del reame".



Rappresentazione artistica del modo in cui gli osservatori di onde gravitazionali vengono utilizzati per scrutare l'universo. Sullo sfondo, due buchi neri in orbita distorcono il tessuto dello spazio-tempo, emettendo onde gravitazionali. In primo piano, un rilevatore concettuale, molto simile a Ligo, utilizza un raggio laser tra due specchi per misurare queste perturbazioni infinitesimali, svelando i segreti delle collisioni cosmiche. Crediti: Google DeepMind

Se volete vedere i “righelli” più sensibili al mondo, è nelle campagne attorno a Livingston e a Hanford – cittadine americane che si trovano rispettivamente in Louisiana e nello stato di Washington – che dovete cercare. È lì che si trovano gli interferometri per onde gravitazionali di Ligo: strumenti in grado di registrare una variazione di lunghezza pari a una frazione del diametro d'un protone. Sensibili al punto da aver consentito, a partire dal 2015, di rivelare le infinitesimali distorsioni nel

tessuto dello spaziotempo dovute alle onde gravitazionali emesse dalla fusione di coppie di buchi neri. Da allora a oggi, insieme agli interferometri Virgo (in Italia) e Kagra (in Giappone), di eventi simili – comprese le fusioni fra un buco nero e una stella di neutroni e, almeno in un caso, fra due stelle di neutroni – ne hanno registrati centinaia. Attualmente procedono al ritmo, in media, di una rivelazione ogni tre giorni.

Un risultato pazzesco, dal punto di vista scientifico e tecnologico. Ma i fisici non si accontentano. Vogliono di più. E per avere di più occorre ridurre il rumore, in particolare quello dovuto ai movimenti degli specchi sospesi degli interferometri. Ebbene, potrebbero esserci riusciti. Grazie all'intelligenza artificiale: un nuovo algoritmo descritto oggi su *Science* da una collaborazione fra scienziati di Google, del Caltech e dell'italiano Gran Sasso Science Institute (Gssi) ha infatti dimostrato di poter ridurre le vibrazioni degli specchi di Ligo da 30 a 100 volte meglio rispetto ai metodi tradizionali di soppressione del rumore.

Quale rumore? Quando si parla di sensibilità attorno ai millesimi del diametro d'un protone, qualunque cosa si muova è fonte di rumore, dai microsismi alle vibrazioni prodotte dal passaggio d'un tir. Tutte sorgenti che i ricercatori di Ligo, Virgo e Kagra hanno imparato a domare quasi alla perfezione. *Quasi*, appunto: il loro incubo sono le onde. Ma non quelle gravitazionali: le "banali" onde del mare. Onde che fanno vibrare gli specchi. Nonostante entrambi gli osservatori di Ligo si trovino relativamente lontani dalla costa, le onde sono per gli specchi una fra le fonti più potenti di disturbo.

«È come se i rilevatori di Ligo si trovassero su una spiaggia», dice uno degli autori dello studio pubblicato su *Science*, **Christopher Wipf**, del Caltech. «Lo sciabordio dell'acqua attorno alla Terra è incessante, e le onde oceaniche creano vibrazioni lente e a bassissima frequenza che disturbano pesantemente entrambe le strutture di Ligo».

Una fra le tecniche principali per ridurre il disturbo è il controllo attivo del rumore. Come la *noise cancellation* delle moderne cuffie audio. E in effetti il principio è identico: immettere nel sistema una vibrazione con la stessa ampiezza ma con fase opposta rispetto al disturbo che si vuole cancellare.

«Immaginate di essere seduti in spiaggia con le cuffie per la cancellazione del rumore. Un microfono capta i suoni dell'oceano e un controller invia un segnale all'altoparlante per contrastare il rumore delle onde. È un po' ciò che facciamo per controllare il rumore dell'oceano e altri rumori sismici che scuotono il terreno di Ligo», spiega Wipf. Tuttavia, esattamente come nel caso delle cuffie con cancellazione del rumore, c'è un piccolo prezzo da pagare. «Se avete mai ascoltato queste cuffie in un luogo silenzioso, potreste aver notato un leggero sibilo, dovuto al fatto che il microfono ha un suo rumore intrinseco. È questo rumore autoindotto ciò che vogliamo eliminare a Ligo».

Come fare? Come spesso avviene nella scienza, occorre anzitutto saper mettere insieme la squadra giusta. E nel team di Ligo-Virgo-Kagra c'è un fisico – si chiama **Jan Harms**, lavora in Italia, al Gran Sasso Science Institute – che un'idea al riguardo ce l'ha: coinvolgere quelli di Google DeepMind, il mitico gruppo di esperti di intelligenza artificiale di Alphabet che già ha in portfolio successi che hanno fatto la storia recente della scienza, a partire da AlphaFold. «Realizzare un sistema di controllo basato sul *machine learning* in un rivelatore di onde gravitazionali è stata un'impresa



ardua. Ho iniziato questa ricerca nel 2014 a Urbino con uno studente di dottorato», ricorda Harms, «cercando di raggiungere un obiettivo che alla fine ha richiesto quattro anni di lavoro con circa 15 esperti di livello mondiale nel campo del *machine learning* e delle onde gravitazionali».

Ai maghi di DeepMind, fra i quali **Brendan Tracey** e **Jonas Buchli**, non pare vero. Anzitutto si fanno dare tutti i dati possibili, poi li usano per “allenare” – mettendole in competizione fra loro – numerose varianti d’algoritmi di riduzione del rumore: una tecnica di *machine learning* nota come apprendimento per rinforzo. «È un metodo che richiede un lungo *training*», spiega uno dei coautori dello studio, **Rana Adhikari** del Caltech. «Noi abbiamo fornito i dati per l’allenamento e Google DeepMind ha fatto le simulazioni. In pratica, lanciavano decine di simulatori di Ligo in parallelo. Si può pensare al *training* come a un gioco: più si riesce a attenuare il rumore, più punti si ottengono; al contrario, se il rumore aumenta si riceve una penalità. I “giocatori” che vincono passano alla fase successiva e continuano a sfidarsi al “gioco di Ligo”. Il risultato è bellissimo: un algoritmo per sopprimere il rumore dello specchio».

L’algoritmo così messo a punto lo hanno chiamato *Deep Loop Shaping* ed è stato messo alla prova su Ligo per circa un’ora, verificando che funziona bene sia nelle simulazioni sia nell’apparato sperimentale reale, ottenendo i risultati promettenti di cui dicevamo sopra: *Deep Loop Shaping* riduce il rumore fino a 30-100 volte rispetto ai controllori esistenti. Non solo: come sottolinea il Gssi, oltre a migliorare notevolmente le osservazioni di onde gravitazionali da fonti lontane e deboli, i ricercatori ritengono che *Deep Loop Shaping* sarà essenziale per la realizzazione di futuri rivelatori come l’Einstein Telescope in Europa o Cosmic Explorer negli Stati Uniti. Inoltre, l’ambito di applicabilità del sistema non si limita agli interferometri: *Deep Loop Shaping* fa parte di un campo di ricerca che sviluppa controlli di alta precisione per la navigazione dei veicoli sulla Terra e nello spazio, la produzione di chip, la robotica.

«Grazie a questa scoperta abbiamo dimostrato che il *machine learning* può controllare gli interferometri in tempo reale, strumenti che realizzano le misurazioni più sensibili e precise mai ottenute», conclude un altro dei coautori dello studio, **Tomislav Andric**, del Gssi. «L’utilizzo di questo metodo con Virgo e, in futuro, con Einstein Telescope, ci permetterà di raggiungere la loro piena potenzialità e di scoprire segnali che altrimenti rimarrebbero nascosti. Questo passo amplia gli orizzonti di ciò che possiamo fare con i rivelatori di onde gravitazionali, rendendo più alla portata una sfida scientifica estremamente complessa. Riducendo il rumore, amplifichiamo il volume dell’universo e lo ascoltiamo con maggiore chiarezza».

Marco Malaspina

<https://www.media.inaf.it/2025/09/05/ligo-deep-loop-shaping/>

Jonas Buchli, Brendan Tracey, Tomislav Andric, Christopher Wipf, Yu Him Justin Chiu, Matthias Lochbrunner, Craig Donner, Rana X. Adhikari, Jan Harms, Iain Barr, Roland Hafner, Andrea Huber, Abbas Abdolmaleki, Charlie Beattie, Joseph Betzwieser, Serkan Cabi, Jonas Degrove, Yuzhu Dong, Leslie Fritz, Anchal Gupta, Oliver Groth, Sandy Huang, Tamara Norman, Hannah Openshaw, , Jameson Rollins, Greg Thornton, George van den Driessche, Markus Wulfmeier, Pushmeet Kohli, Martin Riedmiller, The LIGO Instrument Team, “Improving cosmological reach of a gravitational wave observatory using Deep Loop Shaping”, *Science*, 4 Sep 2025, Vol 389, Issue 6764, pp. 1012-1015

Press release del Gran Sasso Science Institute

<https://www.gssi.it/communication/news-events/item/25900-ai-turns-up-the-volume-on-the-universe>

