Un circuito cerebrale su neuroni laser

I 240 neuroni dei gangli della base diventano laser eccitabili. Con ingressi deboli il circuito non decide, con ingressi forti decide sempre, anche senza motivo.

Gioele Chiarolanza Nadirion

Smentita per il canale

modello di neurone pubblicato (SIMPEL) · 1 ns = 20 ms di membrana · seed 20–25 · etichetta TEORIA

0/6	6/6	~104 ms	81 fJ
decisioni con ingresso alla scala originale	decisioni senza nessun ingresso alle scale ×5 e ×10	recupero del laser in tempo equivalente, contro ~15 ms di un neurone del circuito	energia di uno spike laser (riferimento dell'articolo: 88 fJ)

SOMMARIO

Il circuito D3 dei gangli della base, validato con criteri scritti prima, sceglie un'azione per accumulo di evidenza. Ci siamo chiesti se continui a funzionare quando i suoi 240 neuroni diventano **laser eccitabili**, con il modello pubblicato SIMPEL (Shastri e colleghi) di un laser a due sezioni, e con la scala dei tempi fissata dalla fisica: 1 ns del laser corrisponde a 20 ms di membrana. Sotto soglia il laser è esattamente un neurone a integrazione e scarica, con la stessa costante di tempo del circuito; differisce nello spike e soprattutto nel **recupero**, che dura circa 104 ms equivalenti contro circa 15 di un neurone del circuito. Il risultato: il canale non decide mai alla scala originale (0 su 6) e, se si amplificano gli ingressi, decide sempre, anche senza ingresso (6 su 6). Nessun fattore di scala soddisfa entrambe le condizioni. La smentita riguarda questo modello del neurone: un chip laser misurato (Shi e colleghi, 2023) si ricarica circa quattro volte più in fretta.

1 La domanda

È il legame fra la linea sui substrati fisici e la missione: se un circuito cerebrale validato funziona su neuroni fatti di luce, con il loro rumore e le loro imperfezioni. La porta logica fotonica (NR-07) aveva

risposto no per la logica digitale; qui la domanda è diversa, perché un neurone non deve essere una porta logica.

2 Scelte approvate prima

- Neurone: laser a due sezioni, guadagno e assorbitore saturabile, dal modello SIMPEL (Shastri e colleghi, arXiv 1409.7030). Modello pubblicato, non scritto da noi.
- Circuito di riferimento: il D3 già adottato (NR-05).
- Scala dei tempi fissata dalla fisica, non tarata: 1 ns del laser = 20 ms di membrana.
- Stesse soglie del D3; robustezza ed energia solo descrittive.
- Collegamenti «trasmetti e pesa»: una guida comune, pesi ad anelli, fotodiodo bilanciato, pesi a 7 bit.

3 Verificare il neurone prima del circuito

Al primo run, alla corrente indicata nell'articolo, il laser **pulsava da solo**. La diagnosi, con ipotesi scritte prima, ha trovato che l'emissione spontanea sbianca l'assorbitore e che nel modello la soglia di autopulsazione è 15,717 mA; l'autore ha scelto di polarizzare appena sotto. Al secondo run i sette casi qualitativi di prova (fra cui risposta tutto-o-niente, integrazione, perdita, inibizione e periodo refrattario) sono tutti superati e l'energia dello spike è 81 fJ contro gli 88 dell'articolo, ma i ritardi risultano circa dimezzati e la soglia di una delle varianti del laser è più bassa del 41%. Un modello alternativo era incompleto (coefficienti da «comunicazione privata»), un altro troppo pesante: si è tornati a SIMPEL e **ogni esito porta l'etichetta TEORIA**, perché il modello del neurone non è riprodotto quantitativamente.

grandezza	neurone laser	neurone del D3
distanza riposo–soglia	0,7% del guadagno	20 mV
valore dopo lo spike	27% del riposo, circa −2058 mV equivalenti	−60 mV
ritardo di emissione	0,67 ns = 13,3 ms equivalenti	0
refrattario assoluto	0,04 ns = 0,8 ms	2 ms
recupero fra due spike	circa 5 ns = circa 100 ms equivalenti	circa 15 ms

4 Il circuito non sceglie: scatta

Con le costanti misurate sul modello completo, senza tarature, un canale del circuito **non decide mai**: 0 decisioni su 20, per qualunque forza dell'evidenza. Tutte le popolazioni sparano fra 7 e 11 Hz equivalenti quasi indipendentemente dall'ingresso: è il tetto imposto dal lento recupero del laser. Per decidere il talamo deve raggiungere 13,3 Hz.

L'autore ha scelto una taratura con un solo parametro, un fattore di scala comune su tutti gli ingressi, e una regola scritta prima: il più piccolo fattore per cui il canale decide con evidenza forte in almeno 5 seed su 6 **e** resta zitto senza ingresso.

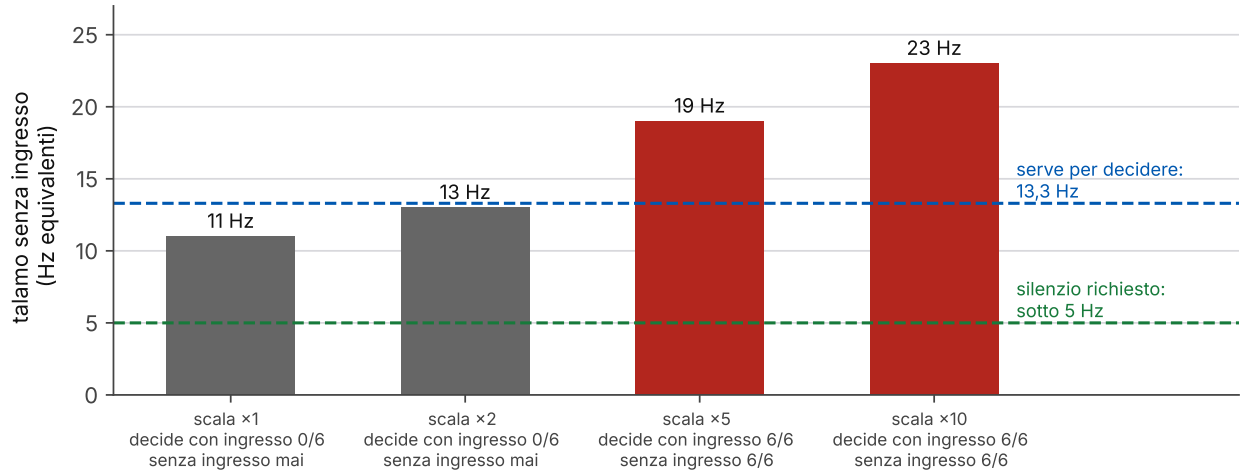

Figura 1. Frequenza del talamo senza alcun ingresso al variare del fattore di scala, seed 20–25, e decisioni con e senza ingresso. Alle scale ×1 e ×2 il circuito non decide mai, né con né senza ingresso, e il talamo senza ingresso è già a 11–13 Hz, sopra i 5 Hz richiesti; alle scale ×5 e ×10 decide sempre, sempre nello stesso istante, per qualunque ingresso e anche senza. Nessuna scala soddisfa entrambe le condizioni.

Il motivo è che il GPi, la struttura che frena il talamo, non riesce più a frenarlo: tutte le popolazioni sono al tetto di frequenza del laser, quindi l'equilibrio fra freno e spinta, che nel circuito biologico dipende dall'evidenza, scompare.

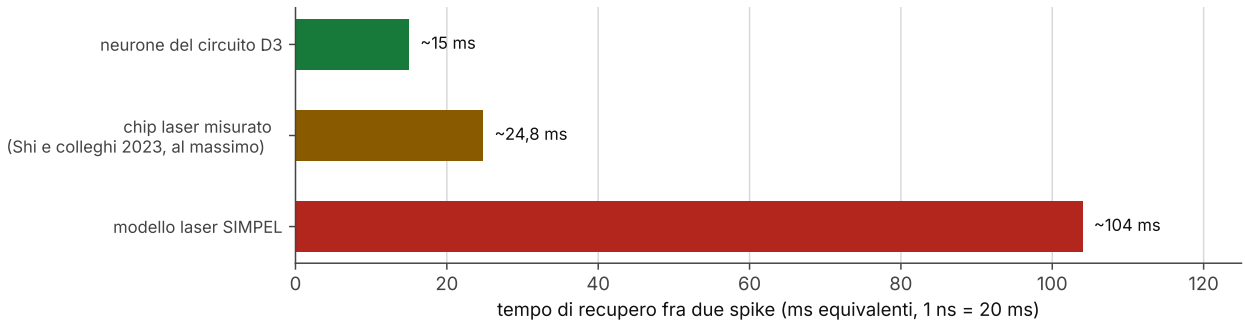

Figura 2. Tempo di recupero fra due spike, in millisecondi equivalenti. Il modello SIMPEL si ricarica in circa 104 ms equivalenti (5,2 ns), sette volte più lentamente di un neurone del circuito. Un chip laser misurato (Shi e colleghi, 2023) si ricarica in meno di 1,24 ns, cioè meno di circa 25 ms equivalenti.

5 Previsioni scritte prima

1. (23 settembre) Senza variazione fra dispositivi il circuito regge; si rompe fra il 2 e il 5% di variazione. **Smentita.**

2. (aggiornata prima del codice) Probabile fallimento già al punto nominale, per il periodo refrattario. **Confermata.**

6 Cosa dimostra e cosa no

Dimostra che il circuito dei gangli della base non funziona su neuroni laser descritti dal modello SIMPEL con la scala dei tempi fissata dalla fisica, e individua il motivo nel rapporto fra il tempo di recupero del neurone e i tempi del circuito.

Non dimostra che un circuito cerebrale non possa girare su neuroni laser. Il colpevole è il lento recupero del guadagno **nel modello**; un chip reale si ricarica circa quattro volte più in fretta. Per riaprire la domanda servirebbe un modello completo, pubblicato e riprodotto, con un recupero rapido, oppure una misura su un dispositivo reale.

La lezione ha guidato il lavoro successivo sui neuroni ionici (NR-09): per un circuito non conta la velocità assoluta del neurone, ma il **rapporto** fra i suoi tempi e quelli del circuito.

> **Limiti.** Un solo canale del circuito, un solo fattore di scala, nessuna variazione fra dispositivi; modello del neurone non riprodotto quantitativamente (ritardi dimezzati, soglia diversa); fra i due livelli di simulazione resta una differenza di frequenza del 13–20% la cui causa è aperta. Il banco completo del D3 non è stato eseguito.

Riferimenti

- Shastri, B. J. e colleghi. SIMPEL: circuit model for photonic spike processing laser neurons. arXiv 1409.7030.
- Nahmias, M. A. e colleghi (2013). A leaky integrate-and-fire laser neuron for ultrafast cognitive computing. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 19, 1800212 (non letto: a pagamento).
- Puts e colleghi (2024). arXiv 2404.12771.
- Shi e colleghi (2023). *Photonics Research* 11, 1382.
- Zhang e colleghi (2022). *Optica* 9, 579.
- Herculano-Houzel, S. (2011). Scaling of brain metabolism with a fixed energy budget per neuron. *PLoS ONE* 6, e17514.
- Documenti interni: whitepaper WP-P2; scheda `photonics/registry/p2_gangli_fotonici.yaml`.

Come citare

Chiarolanza, G. (2026). Un circuito cerebrale su neuroni laser. Nadirion, rapporto di ricerca NR-08, 23–24 settembre 2026. https://nadirion.eu/ricerche/neuroni-laser/

Rapporto tecnico di Nadirion, non sottoposto a revisione paritaria. I criteri di ogni test sono stati scritti prima di eseguirlo; i risultati negativi sono riportati come quelli positivi. I test misurano ruoli funzionali.