Un circuito cerebrale su neuroni ionici

Con l'aiuto degli autori abbiamo riprodotto il loro modello di neurone ionico. Funziona come nell'articolo, ma non è un mattone adatto a un circuito; e un secondo dispositivo, misurato, non produce affatto spike nel circuito che abbiamo provato.

Gioele Chiarolanza Nadirion

Smentita

simulazione, non misura · 2 modelli pubblicati · criteri scritti prima · verifiche di robustezza · nessun chip fabbricato

6/6	0,16%	1,624 s	0/37
modi di scarica dell'articolo riprodotti, dopo la correzione dell'interpolazione	larghezza della finestra di scarica continua rispetto alla soglia, contro il 10% richiesto	tempo di memoria del nanocanale calcolato dal modello, contro 1,62 s dell'articolo	configurazioni del circuito a nanocanali in cui il potenziale oscilla

SOMMARIO

Dopo luce e laser (NR-07, NR-08) abbiamo posto la stessa domanda ai dispositivi **iontronici**, in cui la corrente è portata da ioni in un liquido, come nei neuroni veri: un circuito cerebrale validato può girare su neuroni fatti così? Prima di ogni simulazione abbiamo scritto due criteri: il modello deve riprodurre le figure del proprio articolo, e il neurone deve essere **utilizzabile**, cioè rispondere in modo graduato fino ad almeno 40 Hz su un intervallo di corrente largo almeno il 10% della soglia. Il primo modello, il circuito a canali conici del gruppo di Utrecht, inizialmente si bloccava dopo due spike. Abbiamo scritto agli autori: la causa era l'**interpolazione** della conduttanza, diversa fra Mathematica e il nostro codice proprio nel punto che decide se il neurone scarica. Con la loro correzione il modello riproduce tutti e sei i modi di scarica dell'articolo, ma scarica in modo continuo solo fra 19,03 e 19,06 pA, lo 0,16% della soglia, e al massimo a 23,5 Hz: **non utilizzabile**, come previsto il primo giorno. Gli autori ci hanno suggerito un secondo dispositivo, un microcanale riempito di microsfere di silice, misurato in laboratorio e mai provato in un circuito a spike. Il suo modello è riprodotto bene, ma nel circuito costruito con tutti i rapporti di quello originale il potenziale **non oscilla**, mentre lo stesso circuito con la forma

della conduttanza conica scarica come nell'articolo. Lungo la strada abbiamo trovato e corretto quattro errori nostri nel primo circuito.

1 La domanda

Il circuito D3 dei gangli della base continua a funzionare se i suoi neuroni diventano neuroni ionici? Il lavoro sui laser (NR-08) ha insegnato che conta il **rapporto** fra i tempi del neurone e quelli del circuito, non la velocità assoluta. Per questo il criterio di utilizzabilità, scritto prima, ha due parti: (1) frequenza graduata fino ad almeno 40 Hz su un intervallo di corrente largo almeno il 10% della soglia; (2) tempo di recupero dopo uno spike al massimo 0,2 volte il tempo di integrazione del neurone (nei neuroni del circuito di riferimento vale 0,1). Se il neurone fallisce, il circuito non si simula.

2 Il primo modello: canali conici bipolari

Dei tre candidati trovati in letteratura, uno solo aveva un modello completo: il circuito a quattro canali conici di Kamsma e colleghi (Utrecht, 2023 e 2024). Il 27 settembre la nostra implementazione riproduceva ogni canale, ma il circuito faceva al massimo due spike e poi restava bloccato. Sei ipotesi di errore nostro, scritte prima, erano tutte smentite. Abbiamo chiuso la linea come «smentita per i modelli disponibili» e scritto agli autori, mandando il codice.

Gli autori hanno risposto due volte in pochi giorni. La seconda volta hanno trovato la causa: la conduttanza dei canali è calcolata su una griglia di tensioni e poi **interpolata**. Loro usano l'interpolazione predefinita di Mathematica, una cubica locale sui quattro punti più vicini; noi usavamo la spline cubica di SciPy. Le due differiscono proprio dove la conduttanza cambia di colpo, ed è lì che si decide se il neurone scarica. Ci hanno mandato il nostro file con la loro correzione, unica differenza.

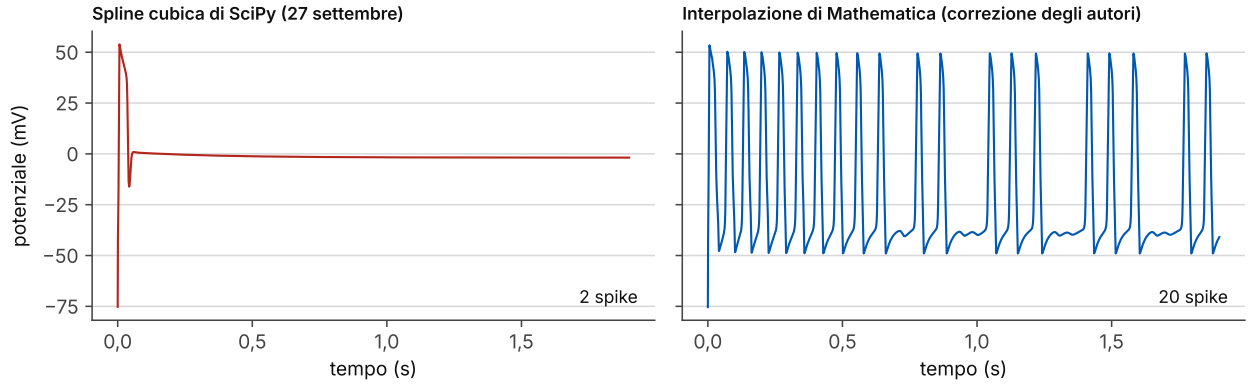

Figura 1. Lo stesso circuito, alla stessa corrente di 19,05 pA, con le due interpolazioni della conduttanza tabulata; tutto il resto è identico. Simulazione rieseguita il 2 ottobre 2026.

Con la correzione, e con due errori nostri corretti e dichiarati (uno script che saltava proprio la corrente di 19,05 pA; una prova programmata con due impulsi positivi invece di uno negativo e uno positivo), il modello riproduce tutti e sei i modi di scarica della figura 2 dell'articolo: 20 spike in 1,9 s come nella figura, riposo a −75,4 mV contro −74, picco a +53,4 contro +51. Il modo misto compare a 19,0275 pA invece di 19,02, uno spostamento di 0,0075 pA che dichiariamo.

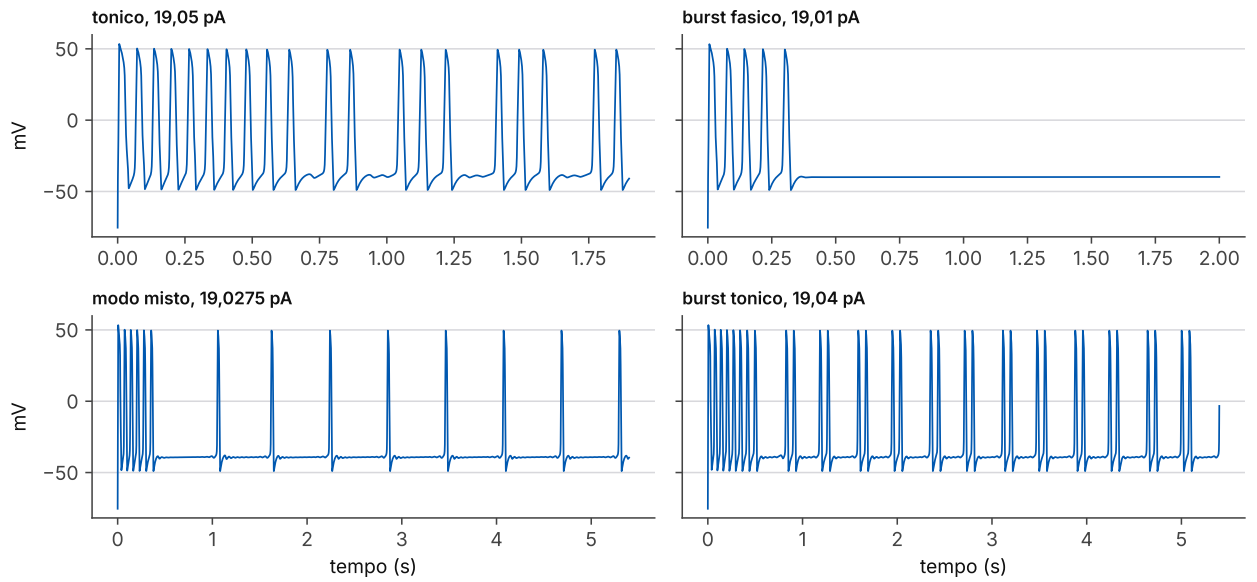

Figura 2. Quattro dei sei modi di scarica dell'articolo, riprodotti con il modello corretto: scarica tonica, burst fasico (5 spike come nella figura), modo misto e burst tonico.

Il neurone è utilizzabile?

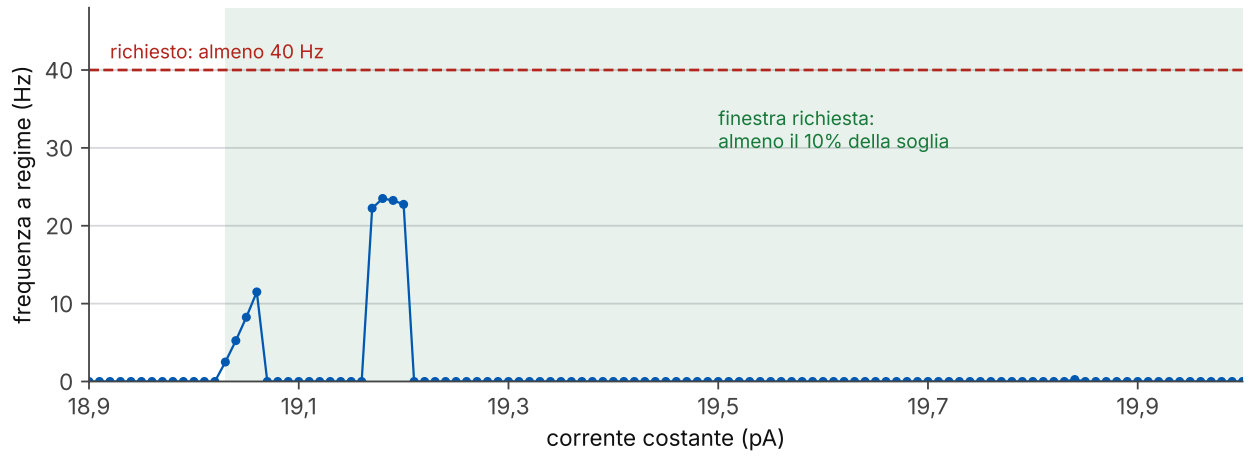

Figura 3. Frequenza di scarica a regime al variare della corrente, a passi di 0,01 pA fra 18,9 e 20 pA (la curva completa va da 0 a 40 pA). La scarica continua esiste solo fra 19,03 e 19,06 pA e in una seconda finestra intorno a 19,2 pA. La fascia verde è l'intervallo graduato che il criterio richiede.

parte	criterio scritto prima	misura	esito
1	fino ad almeno 40 Hz su almeno il 10% della soglia	finestra di 0,03 pA, cioè lo 0,16% della soglia; al massimo 23,5 Hz	fallita
2	recupero / integrazione al massimo 0,2	integrazione in 0,044 ms; misura del recupero non affidabile (vedi limiti)	non valutata

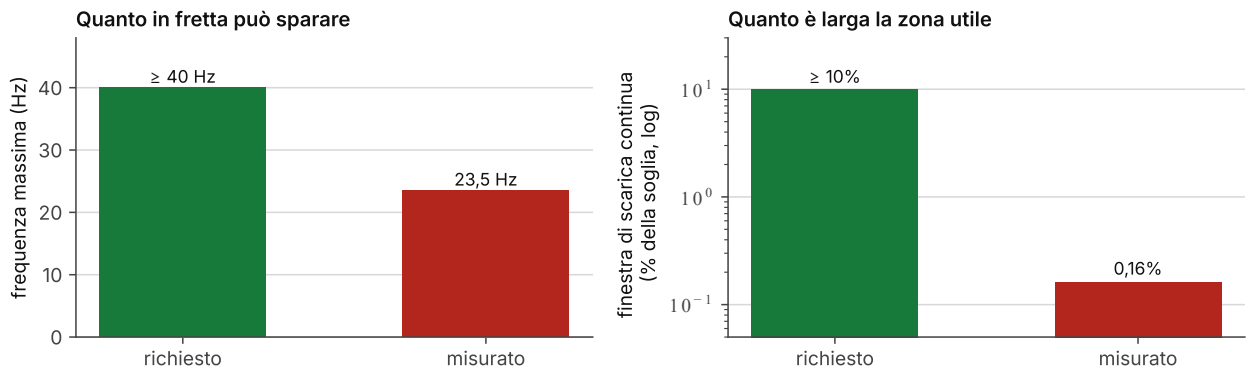

Figura 4. Il criterio di utilizzabilità confrontato con le misure sul modello riprodotto: frequenza massima e larghezza della finestra di scarica continua (scala logaritmica).

È un risultato pulito: non più «non riusciamo a farlo funzionare», ma «funziona come nell'articolo, e non è adatto a fare da mattone per un circuito». Non è una critica al modello, i cui autori dichiarano chiaramente che i modi di scarica sono separati da 0,01–0,1 pA.

3 Il secondo modello: nanocanali colloidali misurati

Gli autori ci hanno suggerito un dispositivo diverso, con una rettificazione più forte: un microcanale riempito di microsfere di silice cariche (Kamsma, Kim e colleghi, PNAS 2024), costruito e misurato in laboratorio, con un modello analitico completo. Non era mai stato provato in un circuito a spike. Lo abbiamo provato prima di rispondere, con gli stessi criteri.

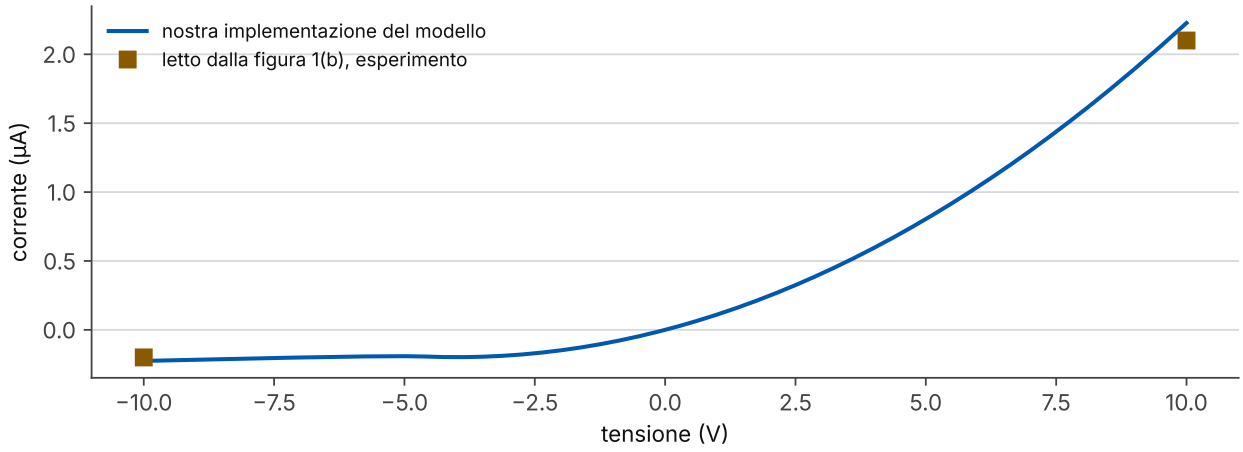

Figura 5. Corrente stazionaria del nanocanale calcolata con la nostra implementazione del modello, sull'intervallo della figura 1(b) dell'articolo; i quadrati sono i valori della curva sperimentale letti dalla figura.

Il modello è riprodotto: il tempo di memoria del canale vale **1,624 s** contro 1,62 dell'articolo, e la rettificazione fra +10 e −10 V vale 9,9 contro 11 misurato. (Una prima verifica dava 4,2: avevamo letto male l'intervallo della figura, ±5 V invece di ±10 V. È registrato.)

L'articolo non propone un circuito a spike, quindi il circuito è una scelta nostra, approvata prima: lo stesso schema a quattro canali dell'articolo del 2024, con i canali conici sostituiti da nanocanali, il più lento dei quali è il dispositivo misurato. La conduttanza del nanocanale ha la **stessa forma** di quella dei canali conici, con il gomito a 1,5 V invece di 0,15 V: per questo tutte le tensioni del circuito sono moltiplicate per 10. Lunghezza e sezione di ciascun canale sono scelte in modo da rispettare insieme i rapporti dei tempi e delle conduttanze del circuito originale.

Il primo circuito, costruito il 2 ottobre, era sbagliato in quattro modi, e nessuno dava un messaggio d'errore: il circuito semplicemente non oscillava. I canali erano montati al contrario (i due articoli usano convenzioni di segno opposte); il canale veloce era il più debole invece del più forte; la capacità era dieci volte troppo grande, calcolata con la conduttanza di un altro canale; le correnti provate non arrivavano alla soglia. Quei risultati sono ritirati, e con essi una nostra prima spiegazione («il nanocanale rettifica in modo graduale»), che era falsa.

Prima di provare il nanocanale nel circuito corretto abbiamo fatto un **controllo positivo**: lo stesso circuito, con le stesse scale, ma con la forma della conduttanza dei canali conici. Riproduce l'articolo: riposo a −0,754 V (−75,4 mV per 10) e scarica in una finestra dello 0,15% della soglia, come lo 0,16% del modello originale. Il circuito e il modo di contare gli spike vedono le scariche quando ci sono.

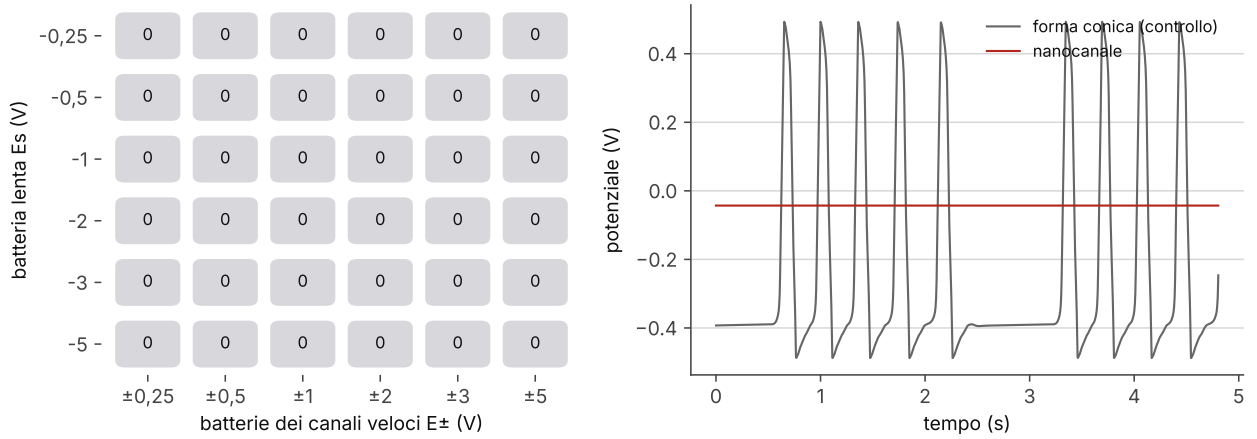

Figura 6. A sinistra: numero massimo di picchi di almeno 50 mV a regime, per ciascuna delle 36 combinazioni di batterie e 200 correnti fino oltre la soglia equivalente. A destra: lo stesso circuito alla corrente equivalente ai 19,05 pA dell'articolo, con la forma conica (controllo) e con i nanocanali.

Con i nanocanali, invece, il potenziale **non oscilla** in nessuna delle 37 configurazioni di batterie provate (le batterie dell'articolo scalate e una griglia di 36), 200 correnti ciascuna fino oltre la soglia equivalente: 7400 simulazioni, nessun picco. Anche nella scansione fine attorno alla soglia equivalente, 401 correnti a passi dello 0,05%, dove il controllo scarica, il nanocanale non oscilla; l'esito non cambia calcolando la conduttanza esattamente a ogni passo né a 300 K invece di 293,15 K.

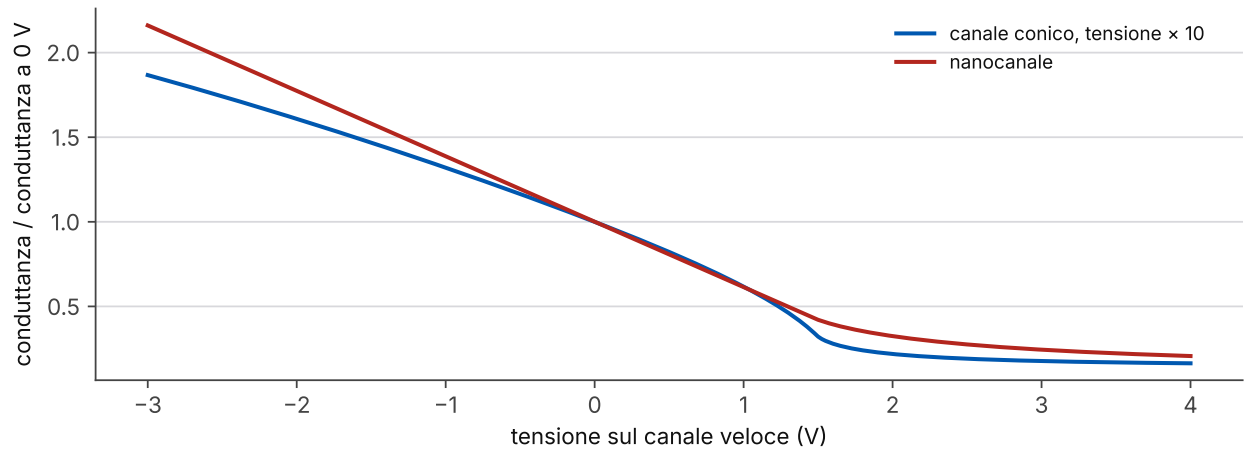

Figura 7. Conduttanza del canale veloce in funzione della tensione: il canale conico (tensione moltiplicata per 10) e il nanocanale coincidono fino al gomito; oltre il gomito il canale conico si spegne di più (0,22 contro 0,32 della conduttanza a riposo a 2 V).

Per capire quale differenza conti abbiamo provato, in modo esplorativo, circuiti ibridi. Basta dare la forma conica ai soli due canali veloci perché il circuito scarichi; dandola al solo canale lento o al solo lentissimo, no. Il punto decisivo è quindi quanto il canale veloce si **spegne** oltre il gomito: il nanocanale conserva circa il 45% di conduttanza in più, e lo spike non trova lo stato che lo chiude. Abbiamo chiesto agli autori se esistono parametri del dispositivo che lo facciano spegnere di più.

4 Cosa dimostra e cosa no

Dimostra che i due modelli completi di neurone ionico oggi disponibili, riprodotti con l'aiuto degli autori, non danno un neurone utilizzabile come mattone di un circuito: il primo scarica solo in una finestra minuscola, il secondo, nel circuito provato, non scarica affatto.

Non dimostra nulla contro la fisica dei dispositivi ionici. Mostra quanto contino dettagli che gli articoli non riportano (l'interpolazione), che un circuito progettato per un dispositivo non si trasferisce automaticamente a un altro, e che un esito negativo vale solo se un controllo positivo mostra che la prova sa vedere il positivo.

> **Limiti.** Simulazione, non misura. Il circuito del nanocanale è una combinazione nostra di parti pubblicate; gli ibridi sono un'analisi esplorativa, fuori dal protocollo. Temperatura (293,15 K) e densità di carica alla base (6,3 mM) del nanocanale sono scelte nostre, da confermare con gli autori. La misura del tempo di recupero del neurone conico non è affidabile: un secondo attraversamento di 0 mV compare già al ritardo più breve provato (0,5 ms) e non abbiamo verificato che sia uno spike completo; per questo la parte 2 del criterio non è valutata, e la parte 1 basta per l'esito. Nessun dispositivo è stato fabbricato.

5 Ringraziamenti

Ringraziamo T. M. Kamsma (Università di Utrecht), con il consenso scritto del 6 ottobre 2026, per aver risposto alle nostre domande, per la correzione dell'interpolazione e per aver suggerito il modello dei nanocanali. Dopo aver letto il nostro rapporto ha scritto che il fallimento del criterio di utilizzabilità gli sembra del tutto sensato; ha aggiunto di non aver ancora studiato i nanocanali in un circuito a spike e di non poter dire nulla di fondato sul nostro risultato con i nanocanali, che resta nostro e non verificato da lui.

Riferimenti

- Kamsma, T. M., Boon, W. Q., Spitoni, C. e van Roij, R. (2023). Unveiling the capabilities of bipolar conical channels in neuromorphic iontronics. *Faraday Discuss.* 246, 125 (arXiv 2303.04277).
- Kamsma, T. M., Rossing, E. A., Spitoni, C. e van Roij, R. (2024). Advanced iontronic spiking modes with multiscale diffusive dynamics in a fluidic circuit. *Neuromorph. Comput. Eng.* 4, 024003 (arXiv 2401.14921).
- Kamsma, T. M., Boon, W. Q., ter Rele, T., Spitoni, C. e van Roij, R. (2023). Iontronic neuromorphic signaling with conical microfluidic memristors. *Phys. Rev. Lett.* 130, 268401.

- Kamsma, T. M., Kim, J., Kim, K., Boon, W. Q., Spitoni, C., Park, J. e van Roij, R. (2024). Brain-inspired computing with fluidic iontronic nanochannels. *PNAS* 121, e2320242121 (arXiv 2309.11438).
- Kamsma, T. M., van Roij, R. e Spitoni, C. (2024). A simple mathematical theory for Simple Volatile Memristors and their spiking circuits. *Chaos, Solitons & Fractals*, doi 10.1016/j.chaos.2024.115320.
- Documenti interni: whitepaper WP-P3 e WP-P3bis; schede `iontronics/registry/p3_gangli_ionici.yaml` e `p3bis_nanocanali.yaml`; registri in `iontronics/risultati/`.

Come citare

Chiarolanza, G. (2026). Un circuito cerebrale su neuroni ionici. Nadirion, rapporto di ricerca NR-09, 27 settembre – 2 ottobre 2026. https://nadirion.eu/ricerche/neuroni-ionici/

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.