

ENERGIA DAL RUMORE

**I microsensori sono quasi una realtà ma debbono essere alimentati
così si studiano generatori che catturano l'energia nell'ambiente**

LUCA GAMMAITONI

LE ATMOSFERE DEL POP PSICHEDELICO anni sessanta stonano un po' con l'ambiente high-tech che mi circonda mentre attraverso il corridoio d'ingresso di Astrid, l'imponente centro di ricerca voluto dal governo di Hong Kong per sostenere lo sviluppo e l'innovazione delle aziende locali. Il collega che mi accompagna canticchia distrattamente la canzone dei Beach Boys, poi ha come un'illuminazione, mi guarda e sorride: «Let's take it as a benevolent sign: good vibrations». In effetti non ha tutti i torti, mi sta conducendo a visitare il suo laboratorio dove studiano come sfruttare le vibrazioni di sistemi meccanici per produrre l'energia elettrica necessaria all'alimentazione di dispositivi elettronici miniaturizzati. In particolare Ivan Sham Man Lung si occupa di costruire un dispositivo che possa alimentare un sensore di pressione inserito dentro uno pneumatico di automobile. Mi spiega che c'è un grande interesse industriale dietro questo progetto. Tra pochi anni sarà obbligatorio installare in ogni ruota di automobile un sistema capace di misurare in tempo reale la pressione della gomma e trasferire questa informazione al sistema di controllo della guida. Alcune auto di lusso hanno già installato questo dispositivo. Il problema è che attualmente tale sistema viene alimentato a batterie, le quali sono montate direttamente sul sensore. Le batterie hanno il non trascurabile inconveniente di esaurire la loro capacità in tempo troppo breve rispetto alla durata media di uno pneumatico. Aumentarne la capacità significa aumentarne il volume e il peso, e questo diventa poco pratico per il piccolo sensore che si trova all'interno della gomma. L'idea di Ivan è di sostituire la batteria con un piccolo generatore elettrico che, sfruttando il moto della ruota mentre l'auto cammina, sia in grado di convertire questa energia cinetica in energia elettrica capace di alimentare il sensore di pressione e il trasmettitore radio incorporato. Il tutto entro poco più di un centimetro cubo di volume. Una bella sfida tecnologica con profonde implicazioni anche dal punto di vista più prettamente scientifico.

Nel nostro laboratorio (NiPS - Noise in Physical Systems) presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Perugia, abbiamo iniziato a occuparci del problema di sfruttare le vibrazioni meccaniche già da qualche anno. Il nostro interesse non è motivato tanto da ragioni applicative (che pure esistono e per seguire le quali abbiamo creato uno spin-off universitario chiamato Wise-

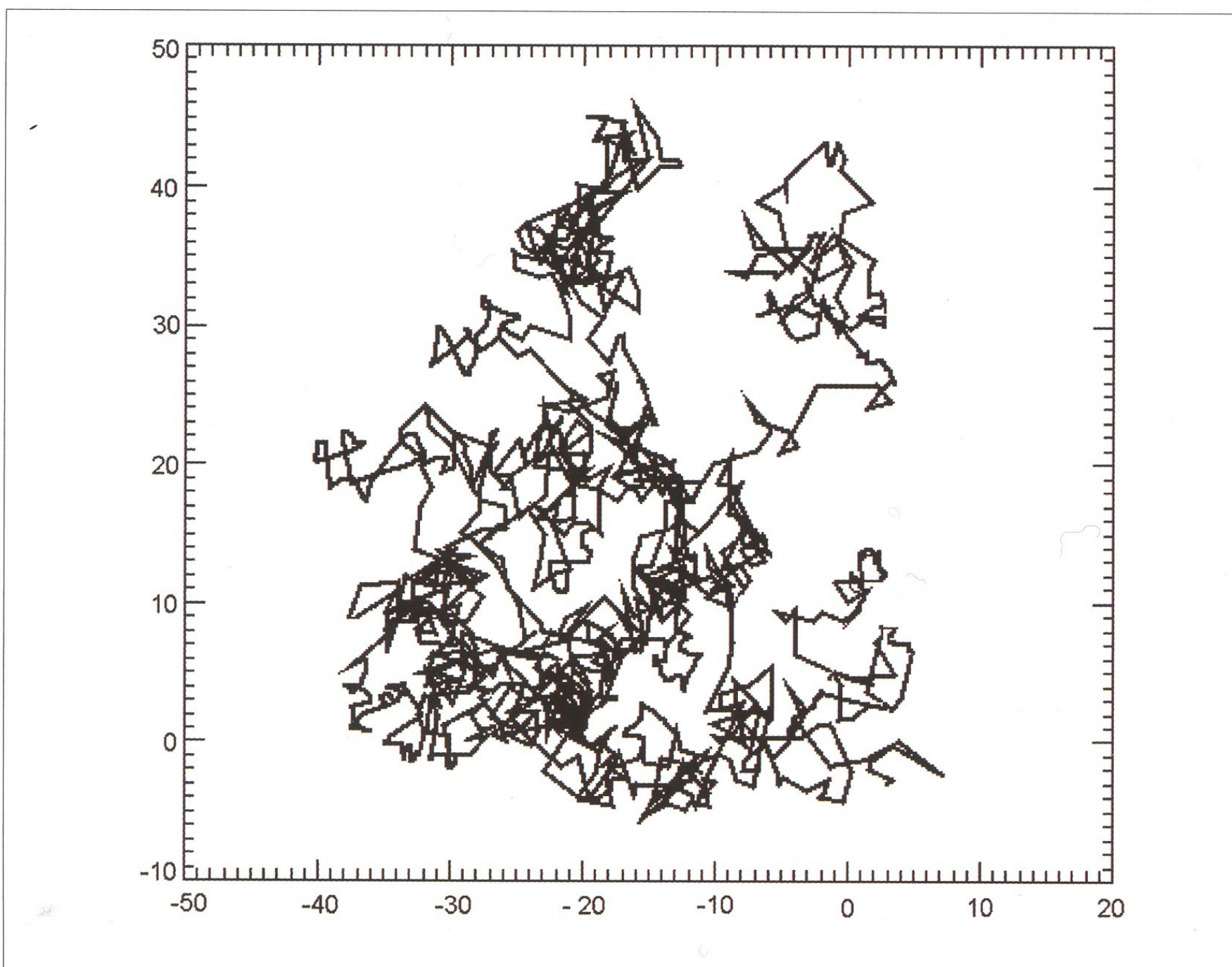


Figura 1. Moto Browniano in due dimensioni. La traiettoria è composta da tratti rettilinei, in cui il granello di polline si muove indisturbato, interrotti da cambi casuali di direzione in occasione degli urti con le molecole del liquido.

power) quanto dall'osservazione che lo studio del moto più o meno disordinato di sistemi materiali alle micro e nano scale è un tema che si trova al crocevia di alcuni importanti aspetti della fisica contemporanea. Com'è noto, un qualunque corpo materiale che si trovi a una temperatura diversa dallo zero assoluto è dotato di una propria energia interna che si manifesta, tra l'altro, sotto forma di moto incessante degli atomi che compongono il corpo. Tale moto a seconda che si tratti di un solido cristallino, un amorfo o un fluido assume caratteristiche diverse ma tutte accomunate dal fatto che il moto degli atomi componenti è più o meno casuale, cioè dotato di un certo grado di disordine. L'esempio più famoso di tale comportamento è rappresentato dal cosiddetto *moto Browniano* che prende il nome dal botanico scozzese Robert Brown (1773-1858). Il moto Browniano si riferisce al moto delle molecole di un liquido e può essere evidenziato osservando una particella materiale molto leggera che galleggia sulla superficie del liquido stesso. Brown utilizzò un granello di polline in sospensione acquosa. Il polline è sufficientemente grande da poter essere osservato quasi a occhio nudo e sufficientemente leggero da

poter essere spinto dagli urti delle molecole del liquido. Il moto del granello di polline appare del tutto casuale: tende a cambiare direzione di continuo ed è caratterizzato da brusche spinte e altrettanto improvvise frenate. La traiettoria, illustrata in figura 1, è irregolare perché il granello viene colpito a ogni istante da una miriade di molecole provenienti da molte direzioni diverse che si urtano continuamente tra loro e con il granello stesso. Tutto questo disordine osservato non è altro che la manifestazione dell'energia che le molecole hanno, per il fatto che il liquido si trova a una certa temperatura. Come abbiamo accennato, questi moti disordinati avvengono in qualunque sistema materiale, anche nei solidi che sono in genere caratterizzati da una disposizione più o meno ordinata e stabile degli atomi. Se l'ordine con cui questi sono disposti si estende per una certa distanza possiamo parlare di sistema cristallino, altrimenti si parla di sistema amorfo. Comunque sia, anche gli atomi di un solido si muovono in maniera casuale, perlopiù oscillando attorno alle loro posizioni di equilibrio. Fino a oggi è stato piuttosto difficile percepire questa attività perché a temperatura ambiente tale moto è di piccola ampiezza e impossibile da

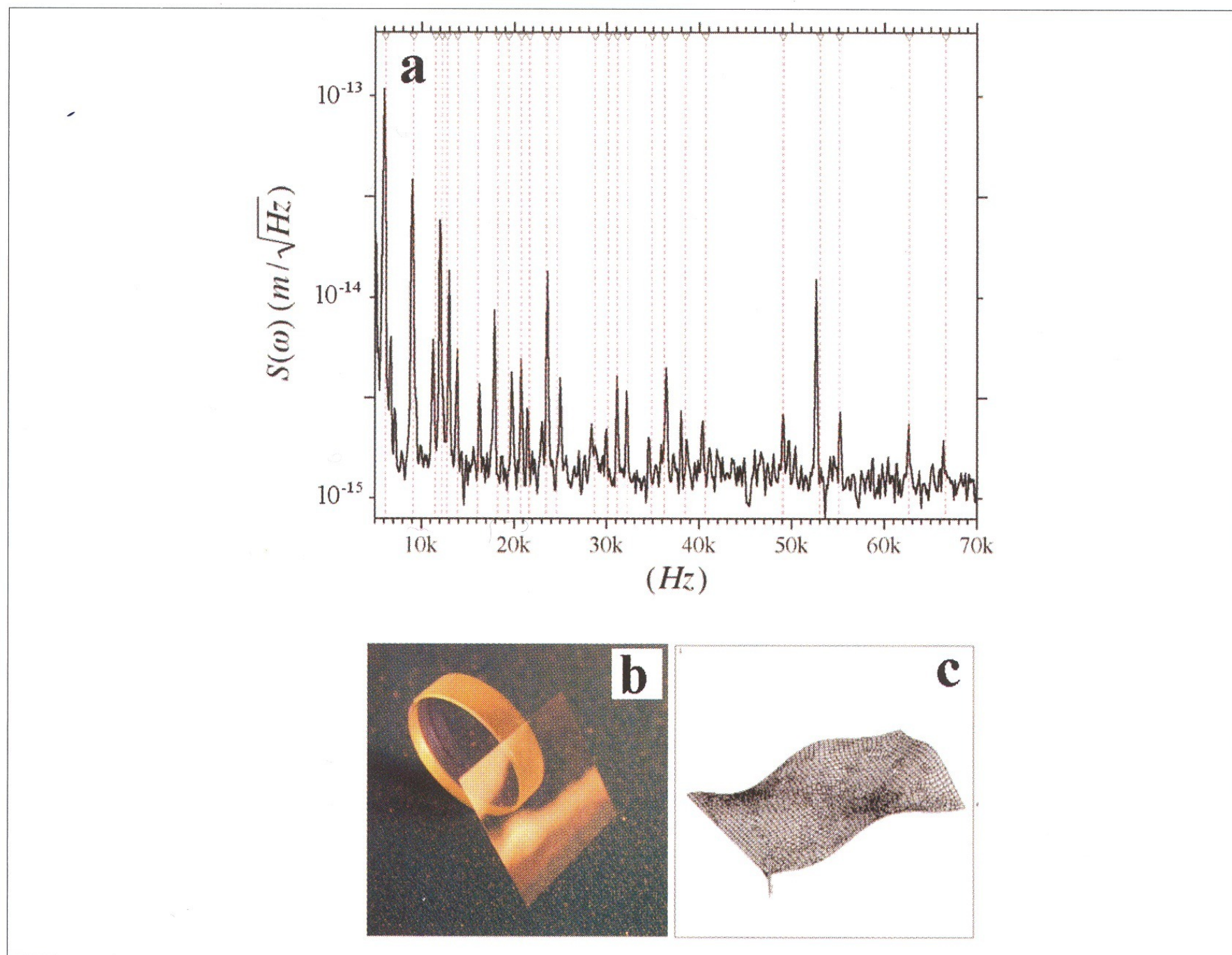


Figura 2. Misura del rumore termico a temperatura ambiente in una lamina quadrata di silicio con lati di 5 cm e spessore di 100 micron, agganciata per un angolo, sotto vuoto. A) Densità spettrale di potenza $S(\omega)$ della posizione dell'estremità libera della lamina. B) Fotografia della lamina appoggiata ad uno specchio da laboratorio. C) Rappresentazione dei modi normali della lamina ottenuta con il metodo degli elementi finiti.

visualizzare anche con normali microscopi. Tuttavia in tempi recenti, con opportuni strumenti è stato possibile misurare direttamente gli effetti di questi moti sulla struttura complessiva del solido. In figura 2a è illustrato il risultato di una misura dell'ampiezza del moto di una lamina di silicio (figura 2b), sottile appena 100 micron. La lamina si muove compiendo delle oscillazioni periodiche secondo i suoi modi normali di oscillazione (figura 2c) così che il moto risultante è la composizione di questi modi elementari. Ciascun modo è caratterizzato da una diversa frequenza e in figura 2a è riportata l'ampiezza di movimento di una vasta area della lamina per ciascuna frequenza. Questa rappresentazione del moto, frequenza per frequenza, prende il nome di *rappresentazione spettrale* ed è utile perché permette di visualizzare a colpo d'occhio com'è distribuita l'energia interna tra i diversi modi di oscillazione: più alto è il valore corrispondente a una certa frequenza maggiore sarà l'energia in quel modo. Questi *modi normali* sono la manifestazione macroscopica della risultante del moto collettivo dei singoli atomi del solido che

essendo legati tra loro da forze elettriche, finiscono per influenzare il moto degli atomi adiacenti. È interessante osservare che la misura illustrata in figura 2 conferma il fatto che per i sistemi materiali che si trovano a temperatura diversa dallo zero assoluto lo stato naturale non è quello di quiete, quanto quello di essere perennemente in moto come conseguenza dell'energia termica immagazzinata nei loro componenti elementari.

Per la natura casuale e sostanzialmente disordinata di tale moto si usa attribuire a questo fenomeno il nome di «rumore termico».

Il termine rumore usato in questo contesto non deve stupire. L'idea di rumore è tradizionalmente associata a un disturbo acustico, un qualunque suono irregolare e sgradevole viene facilmente etichettato come rumore. In effetti il rumore termico di cui abbiamo appena accennato condivide con il concetto acustico di rumore molte delle caratteristiche fondamentali. Come abbiamo visto nel caso della misura sulla lamina sottile in figura 2, questa viene messa in vibrazione proprio dal suo stesso rumore termico. Queste vibrazioni sono in

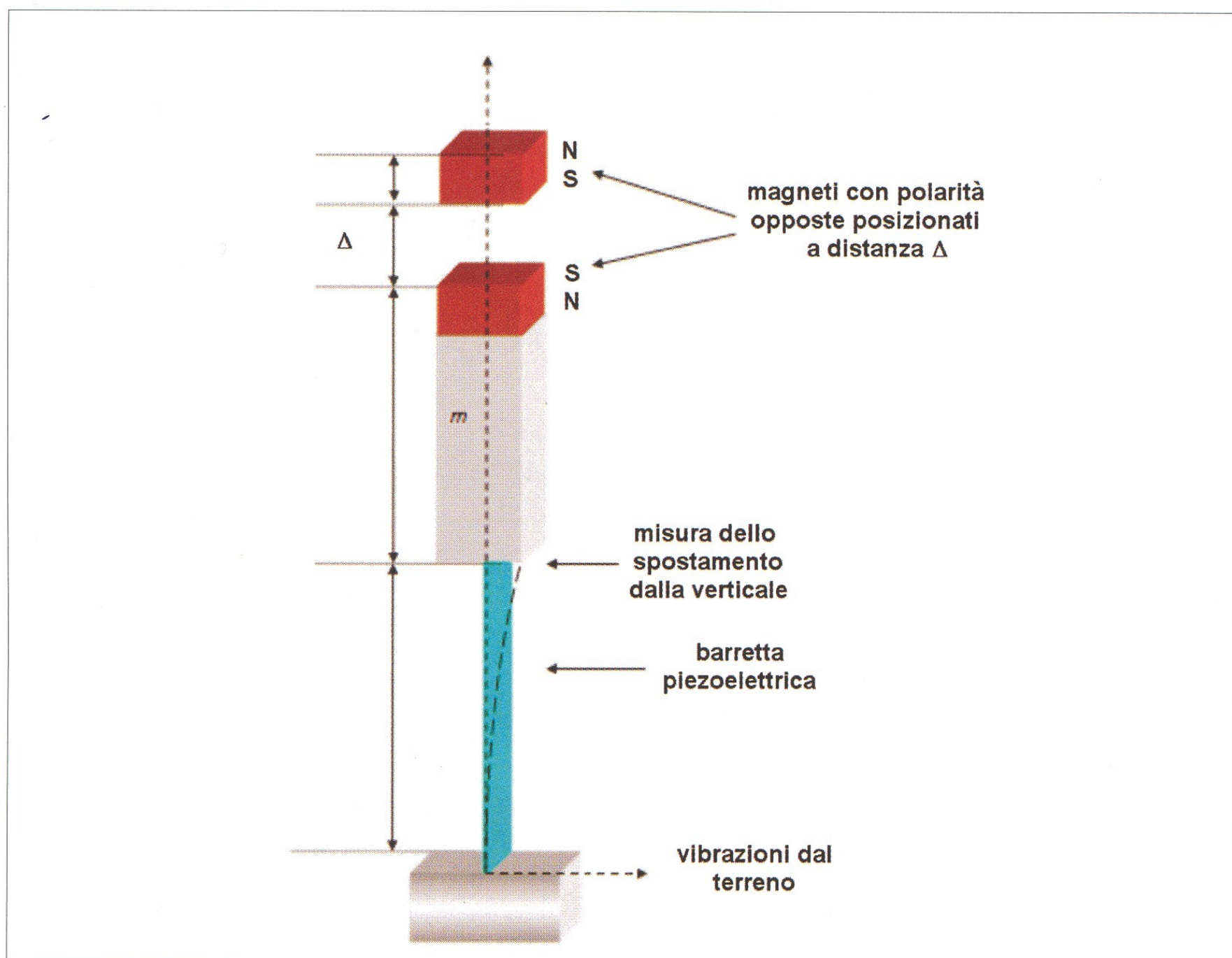


Figura 3. Schema dell'apparato sperimentale impiegato per studiare gli effetti di non linearità nella produzione di energia elettrica da vibrazioni. Un pendolo invertito è costituito da una barretta piezoelettrica posta verticalmente e caricata con una massa sulla cui sommità è stato fissato un magnete. A una distanza Δ viene fissato un altro magnete che esercita una forza repulsiva sul primo e induce una dinamica bistabile sul pendolo.

tutto e per tutto analoghe a quelle di oggetti comuni (un tavolo, una corda di chitarra, un piatto di batteria) che vengono percossi, vibrazioni queste che si trasmettono tramite l'aria e sono la causa del suono che udiamo. Un piatto acustico da batteria, per esempio, se percosso emette vibrazioni che noi percepiamo come il caratteristico suono che ci è familiare. Ebbene se il piatto non è percosso e lasciato a riposo, ciò non di meno esso vibrerà emettendo un suono (in genere diverso da quello della percussione) di piccolissima ampiezza e non udibile. Questo suono è il rumore termico proprio del piatto. Ogni oggetto ha un suo rumore termico caratteristico, ma solitamente inudibile. In sostanza se noi disponessimo di microfoni amplificatori eccezionalmente sensibili potremmo sentire il suono emesso dagli oggetti che ci circondano e causato dalla agitazione termica degli atomi loro componenti: questo è il rumore termico nella sua manifestazione acustica.

Il nostro laboratorio dispone di questi speciali microfoni sensibilissimi per poter ascoltare il rumore termico di alcuni, per la verità ancora pochi

e selezionati, oggetti. Non si tratta di microfoni nel senso tradizionale del termine ma di speciali apparecchiature progettate apposta per rilevare vibrazioni di piccolissima ampiezza: gli interferometri laser. La traccia audio che si può ascoltare nel nostro sito internet (<http://www.nipslab.org/files/tn-audio.wav>), è un esempio di rumore termico emesso a temperatura ambiente da una lamina rettangolare di silicio simile a quella in figura 2. La lamina è stata agganciata per un'estremità e lasciata libera di vibrare sotto l'effetto del proprio rumore termico. La posizione della punta della lamina è stata misurata mediante un interferometro laser ed il segnale così ottenuto è stato codificato in un file .wav. Il suono che si può ascoltare è quello che sentiremmo se avessimo un orecchio sensibile a vibrazioni oltre mille miliardi di volte più piccole di quelle usuali.

Per molto tempo il rumore è stato solo un fastidio da evitare, un disturbo nelle telecomunicazioni e un limite alla possibilità di effettuare misure con elevata precisione. Solo negli ultimi venti anni è stato rivalutato per le sue molteplici potenzialità in

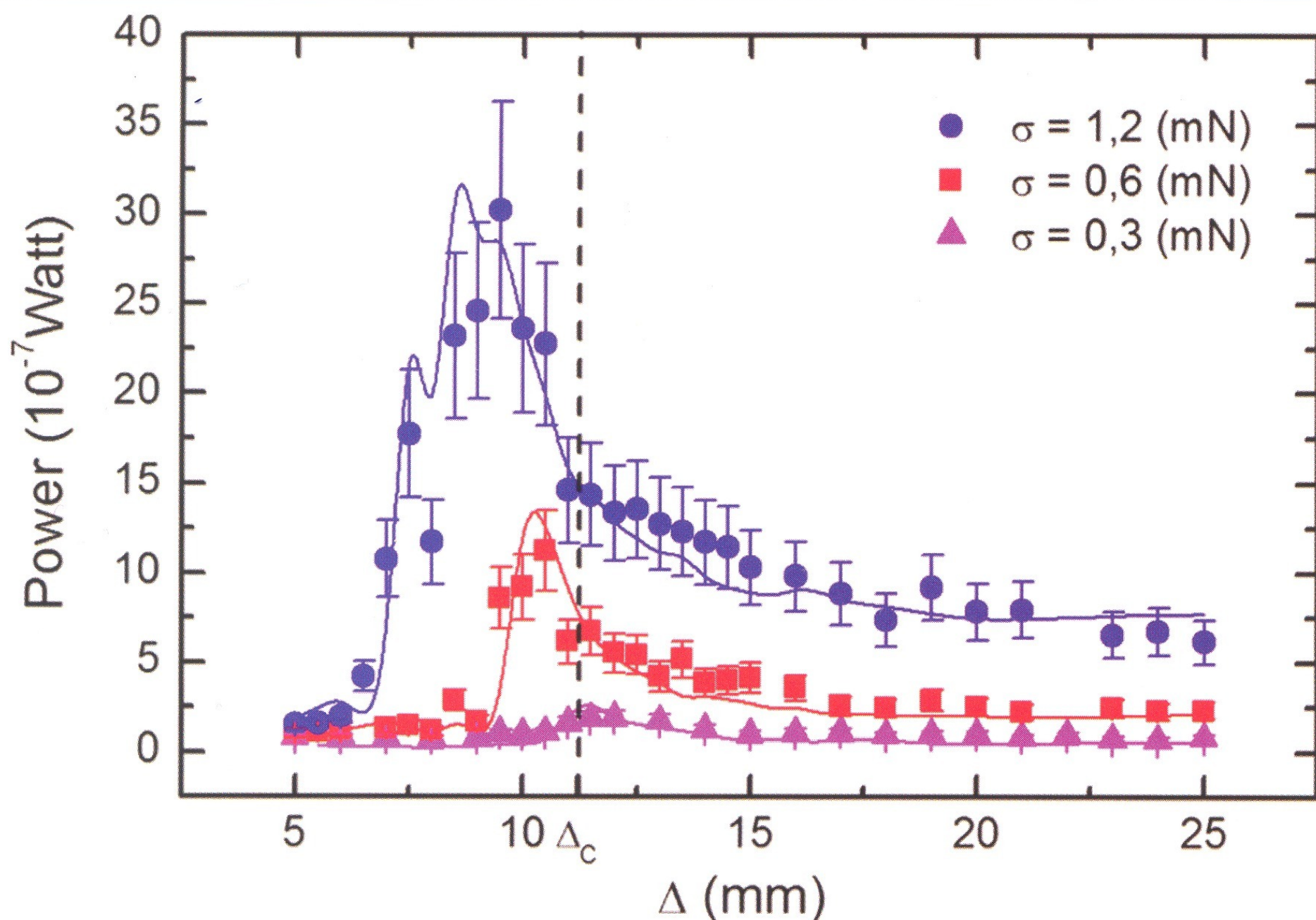


Figura 4. Potenza elettrica (in Watt) prodotta dalla barretta piezoelettrica soggetta a vibrazioni della base, in funzione della distanza Δ tra i magneti, per tre diversi valori della deviazione standard s (in milli Newton) delle vibrazioni casuali (distribuite gaussianamente).

ambiti che vanno dalla fisica alla biologia. In questa prospettiva, recentemente il nostro laboratorio ha proposto di utilizzare il rumore come sorgente di energia per alimentare dispositivi microelettronici¹. È curioso osservare che il concetto di energia viene ancora una volta evocato nella storia per motivi del tutto pratici. La nozione di *energia* è stata infatti introdotta nella fisica in modo più o meno compiuto soltanto a partire dalla rivoluzione industriale. La sua definizione in termini di «capacità di compiere lavoro» la dice lunga sulla sua origine pratica. Infatti, è proprio la necessità di rendere ragione dei principi di funzionamento delle macchine termiche introdotte a partire dalla seconda metà del Settecento che stimola l'attività scientifica verso una più precisa definizione dell'energia. Questa, originariamente associata al moto di oggetti macroscopici, viene per la prima volta estesa ai componenti microscopici di questi da Gottfried Leibniz che utilizzò il termine latino *vis viva*, ritenendola inoltre una quantità soggetta a conservazione. La necessità di spiegare gli effetti dell'attrito, che nei corpi in movimento produce la diminuzione della velocità del corpo e contemporaneamente ne innalza la temperatura, ha spinto

Leibniz a prendere in considerazione l'idea che il calore non fosse altro che una manifestazione dell'energia contenuta nel moto dei componenti elementari del sistema. L'attrito gioca in questo caso il ruolo di distributore di energia: dall'energia cinetica del sistema in movimento al calore, inteso come energia cinetica degli atomi componenti il corpo stesso. Questa idea è sopravvissuta per oltre trecento anni praticamente immutata, senza che nessuno abbia mai veramente tentato di spiegare come realmente tale distribuzione di energia abbia luogo. Per incontrare un serio passo avanti nella storia dell'attrito e dell'energia dobbiamo aspettare almeno fino al Novecento, dopo che Albert Einstein e Marian Smoluchowski sviluppano una teoria matematica in grado di descrivere fenomeni altamente irregolari aprendo così la strada a quella che oggi prende il nome di teoria dei processi stocastici. Un importante risultato noto come teorema di fluttuazione-dissipazione introdotto inizialmente da Nyquist nel 1928 e poi dimostrato da Herbert B. Callen e Theodore A. Welton² nel 1951 consente di mettere in relazione i fenomeni di attrito o, come si dice di solito, i fenomeni dissipativi con la manifestazione dell'energia ci-

netica dei componenti elementari di un sistema, ovvero con il rumore (o come talvolta si dice: la fluttuazione). Grazie a questo risultato apparve chiaro che la dissipazione di energia cinetica per mezzo di attrito fosse intrinsecamente legata alla presenza di energia cinetica microscopica, ovvero calore del corpo, sotto forma di rumore termico (fluttuazione)³. Questo importante risultato svela qualche tessera del puzzle che lega l'energia al rumore ma il disegno generale rimane ancora oscuro. Per la verità dalla metà del secolo scorso qualche tentativo per giungere ad una spiegazione più soddisfacente è stato fatto ma senza grande successo. Un esempio importante dei problemi con cui si ha a che fare è rappresentato dal cosiddetto problema di Fermi-Pasta-Ulam⁴. Per dirla in breve, se si cerca di costruire un modello di solido cristallino al computer e si prova a riprodurre il fenomeno della dissipazione dell'energia, ovvero della distribuzione di energia cinetica da pochi gradi di libertà (come quella concentrata nel solo moto del centro di massa) a molti gradi di libertà (come quella distribuita sotto forma di calore a tutti gli atomi componenti) si incontrano numerose difficoltà che rendono tale modello inadeguato a spiegare ciò che invece si osserva negli esperimenti. Una difficoltà importante è rappresentata dal fatto che nel modello al computer il sistema non raggiunge mai un equilibrio termico rappresentato da un'equa distribuzione dell'energia cinetica tra tutti i suoi gradi di libertà (o modi normali) ma, al contrario, le differenze iniziali continuano a ripresentarsi anche a distanza di molto tempo. È come se scaldando un corpo solido in un'area limitata questa differenza di temperatura non tendesse a scomparire col passare dei minuti (come invece si osserva sempre negli esperimenti) ma tendesse a ripresentarsi inalterata dopo diverso tempo.

Il problema di Fermi-Pasta-Ulam ci riporta alla questione del rapporto tra rumore ed energia. Come si vede tale questione non è ancora del tutto chiara anche se oggi abbiamo fatto dei seri passi avanti su come si possa trasformare energia in rumore e viceversa. Il viceversa è il motivo per cui oggi ci occupiamo di rumore, ovvero siamo interessati a trasformare in energia elettrica il rumore, inteso come vibrazioni microscopiche di sistemi materiali. Il primo candidato che viene in mente è ovviamente il rumore termico. Poiché, come abbiamo detto, qualunque sistema materiale che si trovi ad una determinata temperatura possiede una certa quantità di energia sotto forma di rumore termico, sembrerebbe ragionevole pensare di sfruttare tale energia per compiere del lavoro

utile. È un po' come ai tempi della rivoluzione industriale quando nelle grandi caldaie delle officine si bruciava carbone per produrre la «forza lavoro» necessaria a muovere le macchine. Anche in questo caso in fondo si tratta di trasformare calore (qui inteso come fluttuazioni casuali degli atomi di un solido) in lavoro (compiuto dal generatore elettrico che crea una differenza di potenziale capace di muovere gli elettroni attraverso il conduttore). Tuttavia esiste un'importante limitazione nella possibilità di trasformare calore (e quindi rumore termico) in lavoro dovuta al secondo principio della termodinamica, formulato in modo compiuto anche grazie al notevole sforzo di sistemazione compiuto da William Thomson (Lord Kelvin) nella seconda metà dell'Ottocento. Per approfondire questo aspetto è interessante la lettura di una celebre lezione di R. Feynman intitolata *Ratchets and Pawls*.⁵ A noi basta qui osservare che se il sistema è all'equilibrio termico – altro concetto che necessita ancora di approfondimenti nella Fisica contemporanea – allora non è possibile utilizzare il rumore termico del sistema per estrarre energia elettrica. Non ci resta quindi che ricorrere a sistemi che si trovino fuori dall'equilibrio termico e, per nostra fortuna, il mondo abbonda di sistemi fuori dall'equilibrio. Un esempio di trasformazione di moti casuali (fuori dall'equilibrio termico) in energia elettrica è rappresentato dal celebre meccanismo inventato nel 1770 dall'orologiaio svizzero Abraham-Louis Perrelet. Il principio base è ben noto: i movimenti più o meno accidentali del polso (energia cinetica) vengono utilizzati per ricaricare un meccanismo a molla (energia potenziale) che poi scaricandosi consente all'orologio di funzionare (ancora energia cinetica). Nel nostro caso siamo interessati a dispositivi molto più piccoli dell'orologio da polso: minuscoli dispositivi elettronici, non più grandi di un granello di polvere e praticamente invisibili all'occhio, il cui scopo principale è quello di misurare grandezze fisiche e trasmetterle a una centrale collocata a qualche metro di distanza. Sono i cosiddetti *wireless microsensors*: nei prossimi anni ne sentiremo parlare parecchio. Verranno utilizzati per monitorare le condizioni di salute di persone e animali, per tenere d'occhio la statica di edifici e monumenti, per controllare l'illuminazione, il riscaldamento, l'umidità e il condizionamento delle nostre abitazioni nonché per rimanere in contatto più o meno ininterrotto con i nostri cari. Questi piccolissimi sensori per poter funzionare hanno necessità di essere alimentati con energia elettrica. Le tradizionali batterie sono inutilizzabili, sia perché non è facile fare batterie

efficienti così piccole e poi perché dopo un po' di tempo queste inevitabilmente esauriscono la loro energia. A motivo della piccolezza dei sensori e del fatto che questi saranno distribuiti in vaste aree, non si può certo pensare di prelevarli per cambiare loro le batterie esaurite. L'idea alla quale molti ricercatori stanno oggi lavorando è quella di sostituire le batterie con dei microgeneratori di energia elettrica, capaci di produrre l'energia elettrica necessaria trasformando l'energia vibratoriale presente nell'ambiente. In effetti si tratta di sfruttare l'energia cinetica che questi sensori assorbono nel luogo dove si trovano (movimento del corpo umano in cui sono inseriti, vibrazioni delle superfici solide dove sono appoggiati, moto del liquido dove sono immersi) e riuscire a trasformarla in modo efficiente così da poterla sfruttare per il funzionamento dei sensori stessi.

La particolarità del metodo utilizzato nel nostro laboratorio consiste nell'utilizzare delle parti mobili che si muovano secondo oscillazioni non-lineari⁶, a differenza dei sistemi tradizionali che utilizzano invece oscillatori lineari. Un oscillatore lineare è limitato dal fatto di poter rispondere soltanto a vibrazioni in un ristretto intervallo di frequenze nei dintorni della propria frequenza di risonanza. Un oscillatore non lineare, per converso, non ha una propria frequenza di risonanza ma risponde in modo diverso a seconda dell'ampiezza delle vibrazioni a cui è sottoposto. Per dimostrare il vantaggio che si ottiene utilizzando oscillatori non-lineari abbiamo realizzato un esperimento costruendo un semplice generatore elettrico che sfrutta l'effetto piezoelettrico per trasformare oscillazioni in corrente elettrica. Per meglio evidenziare i benefici della non linearità abbiamo utilizzato un pendolo invertito costituito da una barretta piezoelettrica posta verticalmente e caricata con una massa sulla cui sommità è stato fissato un magnete (figura 3). Ad una distanza Δ viene fissato un altro magnete che esercita una forza repulsiva sul primo. A seconda della distanza Δ tra i due magneti, il pendolo compie oscillazioni lineari oppure non-lineari. Quando Δ è grande il pendolo compie piccole oscillazioni attorno alla verticale (modo lineare). Al decrescere di Δ la forza di repulsione tra i due magneti produce un'alterazione della forza di richiamo del pendolo che passa da lineare a non-lineare. Il potenziale che governa la dinamica passa da monostabile (armonico) a bistabile. Se a parità di vibrazioni della base su cui è appoggiato il pendolo misuriamo la quantità di potenza elettrica prodotta dalla barretta piezoelettrica che viene piegata dall'effetto delle oscillazio-

ni del pendolo otteniamo un grafico come quello illustrato in figura 4. Come si può vedere esiste una distanza ottimale tra i due magneti per cui la potenza erogata dal generatore raggiunge il massimo. Tale valore è approssimativamente il 400% di ciò che si otterrebbe con il pendolo oscillante in condizioni lineari (quando è molto grande Δ).

Il vantaggio dell'oscillatore non-lineare consiste prevalentemente nella sua capacità di rispondere a vibrazioni in un ampio intervallo di frequenze. Tornando all'esempio dell'orologio di Perrelet, è un po' come se il meccanismo che fa ricaricare l'orologio potesse sfruttare non soltanto il moto più o meno periodico che fa il braccio quando ruota il polso, ma anche ogni altro movimento che ci capita di compiere ogni giorno, come preparare un cocktail shakerato oppure accarezzare un bimbo. A causa di questa maggiore sensibilità a moti con caratteristiche tra loro diverse abbiamo chiamato il nostro approccio «tecnologia wisepower», ovvero della potenza saggia. La presunta saggezza di questa tecnologia deriva anche dal fatto che essa abbraccia un nuovo paradigma nell'alimentazione di dispositivi elettronici mobili: anziché utilizzare batterie, ovvero grandi pacchetti di energia immagazzinata che vengono prodotti in gigantesche centrali, collocate in luoghi distanti, si propende per la trasformazione di piccole quantità di energia che si trova nel luogo in cui serve e che viene convertita nell'istante in cui serve. È facile comprendere come questo sia nei fatti un approccio più sostenibile al problema della gestione dell'energia: nelle nostre intenzioni un piccolo contributo a un pianeta più vivibile.

Luca Gammaitoni, Dipartimento di Fisica, Università di Perugia.

¹ L. Gammaitoni; F. Cottone; I. Neri; H. Vocca, *Noise Harvesting*, ICNF 2009 - 20th International Conference on Noise and Fluctuations, Vol 1129, 1, p.651-654, (2009)

² H. B. Callen and T. A. Welton, *Phys. Rev.* **83**, 34 (1951)

³ U. Marini Bettolo Marconi et al., Fluctuation-Dissipation: Response Theory in Statistical Physics, *Physics Reports* vol. 461, p. 111 (2008)

⁴ *Il contributo di Enrico Fermi ai sistemi non lineari: l'influenza di un articolo mai pubblicato*, M. Falcioni, A. Vulpiani, in AA VV 'Conoscere Fermi', p. 274, eds. C. Bernardini and L. Bonolis (Editrice Compositori, Bologna 2001)

⁵ R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics* (Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1966), Vol. I, Chapter 46.

⁶ Nonlinear Energy Harvesting, F. Cottone; H. Vocca; L. Gammaitoni, *Phys. Rev. Lett.*, Vol 102, 080601, (2009)