

MICROMOTORI A PROPULSIONE BATTERICA

ROBERTO DI LEONARDO^{1,2}, LUCA ANGELANI^{1,2}, GIANCARLO RUOCCO²

¹ Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per i Processi Chimico-Fisici, Roma, Italia

² Dipartimento di Fisica, "Sapienza" Università di Roma, Roma, Italia

L'agitazione caotica di microrganismi autopropellenti può essere rettificata e sfruttata per la propulsione di strutture microfabbricate con opportune geometrie asimmetriche. Il micromotore a propulsione batterica nasce dall'incontro tra la meccanica statistica fuori dall'equilibrio, le nanotecnologie e la microbiologia, aprendo la strada verso nuove tecnologie alla frontiera tra discipline diverse.

Lo studio della materia vivente deve essere considerato oramai come una parte sostanziale della moderna definizione di fisica. Non soltanto perché i fisici possono contribuire a creare nuove tecnologie e modelli interpretativi per l'indagine di problemi biologici, ma anche perché la materia vivente e i successi quantitativi della biologia molecolare, della biochimica e della genetica, possono servire alla risoluzione di numerosi problemi fisici. Nello sforzo di estendere il nostro dominio al mondo fisico microscopico ci accorgiamo spesso di avere molto

da imparare da chi quel mondo lo ha conquistato molto tempo prima di noi: i batteri. Vogliamo qui affrontare il problema di generare movimento alle microscale, ovvero di come azionare macchine e dispositivi in grado di svolgere un compito determinato all'interno di un volume di qualche picolitro. Non si tratta di sola micromanipolazione, ovvero del controllo della materia su scala micrometrica mediante campi di forza esterni, come micropipette, campi elettrici, magnetici o ottici, ma della possibilità di costruire micro-dispositivi

autonomi che racchiudano in sé tutto ciò che occorre al loro funzionamento, che siano cioè autopropellenti. Tale compito diventa ancora più difficile quando ci accorgiamo che le tecniche di autopropulsione che abbiamo sviluppato nel nostro mondo macroscopico si rivelano del tutto inutili in un mondo senza inerzia, come appare un liquido sulla scala dei micrometri. Al diminuire della scala spaziale l'attrito viscoso diventa predominante sull'inerzia e solo la costante applicazione di una forza può mantenere un corpo in movimento. La

situazione è ulteriormente complicata dalla "reversibilità" delle equazioni idrodinamiche a bassi numeri di Reynolds per cui una deformazione reciproca non può produrre uno spostamento netto. Per fare un esempio, la capasanta è un mollusco di qualche centimetro che riesce a nuotare richiudendo rapidamente la conchiglia ed espellendo un getto di acqua nella direzione opposta al moto. A causa della reversibilità idrodinamica una micro-capasanta ritornerebbe esattamente al punto di partenza una volta riaperta la conchiglia. Questo risultato è noto in micro-idrodinamica come "teorema della capasanta" [1] ed esclude la possibilità di autopropulsione attraverso deformazioni reciproche, ovvero deformazioni cicliche per cui è necessario ripercorrere tutte le configurazioni a ritroso per tornare nello stato di partenza. I batteri autopropellenti hanno escogitato

uno stratagemma molto semplice ed ingegnoso per eludere i vincoli del "teorema della capasanta". Il trucco consiste nel ruotare un filamento elicoidale, il flagello, producendo una deformazione ciclica continua e non reciproca. Dopo un giro completo, infatti, l'elica si ritrova al punto di partenza e il batterio avrà percorso uno spostamento netto. Il motore flagellare che aziona l'elica è un vero gioiello di nanotecnologia, misura non più di 50 nm di diametro ed è composto di circa 20 parti diverse. Può ruotare in senso antiorario e orario ad una frequenza dell'ordine di 100 Hz con una efficienza stimata dell'ordine del 90%. Il motore flagellare è uno dei motori biologici più potenti e la possibilità di costruire dispositivi artificiali con un paragonabile grado di perfezione è ancora molto remota. D'altra parte estrarre da una cellula un motore flagellare funzionante è un'impresa

troppo sofisticata vista la complessità strutturale del motore. Una possibile alternativa è allora quella di utilizzare l'intera cellula, con il suo motore flagellare già assemblato, e con la possibilità aggiuntiva di sfruttare le capacità sensoriali del batterio. In un certo senso si può dire che ci troviamo in una situazione simile a quella che ha caratterizzato il periodo storico pre-industriale. In mancanza di una tecnologia che ci permetta di costruire artificialmente macchine micrometriche della perfezione di quelle viventi, possiamo sfruttare i microrganismi come veri e propri micro-animali da soma del XXI secolo. Di recente è stata dimostrata la possibilità di movimentare delle microstrutture mediante l'adesione di uno strato di batteri motili ("tappeto batterico") sulla superficie di vari oggetti sintetici come microsferi di latex (polistirene) [2] o strutture di PDMS (polidimetilsiloxano) [3].



Le proprietà fototattiche dei batteri possono essere utilizzate per controllare e guidare tali strutture con la luce [4, 5]. È stato dimostrato, ad esempio, come un'alga biflagellata (*Chlamydomonas reinhardtii*) possa trasportare un carico ancorato chimicamente alla parete cellulare. Le proprietà fototattiche della cellula possono essere utilizzate per guidarne il percorso attraverso campi ottici esterni, ma a questo punto è forse più conveniente utilizzare la luce stessa per trasportare direttamente il carico con tecniche di intrappolamento ottico. Uno dei maggiori problemi nello sfruttamento del lavoro batterico consiste, infatti, nel guidare le cellule in un moto direzionale predeterminato. In un ambiente omogeneo i batteri nuotano in maniera caotica, esplorando l'ambiente circostante alla ricerca di condizioni più favorevoli. Fin dalle prime osservazioni di Leeuwenhoek, una sospensione di batteri autopropellenti colpisce da subito per l'attività frenetica che si osserva (*"Il movimento nell'acqua della maggior parte di questi animaculi era così rapido, e così variamente diretto verso l'alto, verso il basso e orizzontalmente che confesso di non aver potuto far altro che meravigliarmene."*), un'attività che appare senza scopo e che, se potessimo rettificare, potrebbe essere sfruttata per scopi per noi molto più utili. Chi è abituato a manipolare la materia non vivente sa però che estrarre lavoro da un sistema caotico isolato è un'impresa senza speranza, come stabilito dal secondo principio della termodinamica. Se così non fosse un battello potrebbe navigare semplicemente convertendo l'agitazione termica delle molecole d'acqua in energia cinetica. D'altra parte i cammini casuali delle cellule in un bagno batterico assomigliano a prima vista ai moti di agitazione termica delle molecole di un gas. Abbiamo dunque speranza di estrarre lavoro dall'agitazione disordinata della materia vivente? In altre parole, possiamo

realizzare un micro-dispositivo che sia spinto dal movimento batterico in un moto unidirezionale e riproducibile senza ricorrere all'ausilio di campi di forza esterni? Queste domande sono inevitabilmente connesse con il problema più fondamentale di quali siano le condizioni necessarie per l'emergere di un comportamento ordinato attraverso un meccanismo di auto-organizzazione. In questo senso le simmetrie giocano un ruolo fondamentale. Come già riconosciuto da Curie: *"Les effets, ce sont les phénomènes qui nécessitent toujours, pour se produire, une certaine dissymétrie. Si cette dissymétrie n'existe pas, le phénomène est impossible. Ceci nous empêche souvent de nous égarer à la recherche de phénomènes irréalisables"*[6]. In sostanza, effetti asimmetrici riproducibili necessitano sempre di corrispondenti cause asimmetriche. Se tali asimmetrie non esistono il fenomeno è irrealizzabile. In particolare, il fenomeno che intendiamo produrre consiste nella rotazione spontanea e unidirezionale di un sistema nanofabbricato immerso in un bagno batterico. Questo fenomeno viola tre simmetrie principali: a) simmetria per inversione dell'asse temporale, b) simmetria per riflessione attraverso un piano contenente l'asse di rotazione z, c) simmetria per rotazioni di 180° attorno a un asse perpendicolare a z. In altre parole, un moto rotatorio che osservato dall'alto avviene in senso antiorario, avverrebbe in senso orario se osservato: a) a ritroso nel tempo, b) riflesso in uno specchio contenente l'asse di rotazione, c) dal basso. Se il nostro dispositivo apparisse simmetrico sotto almeno una delle trasformazioni a), b) o c), non sarebbe in grado di rompere la corrispondente simmetria spontaneamente in una maniera predicibile e riproducibile. La rottura della simmetria temporale richiede necessariamente di avere a che fare con un sistema fuori

dall'equilibrio. Le sospensioni di batteri autopropellenti sono proprio un esempio di fluido complesso fuori dall'equilibrio. Sebbene, a prima vista, il moto dei batteri assomigli alla dinamica caotica delle molecole in un gas, le traiettorie dei batteri sono generate da leggi dinamiche irreversibili. L'azione costante dei motori flagellari produce una forza propulsiva che spinge il corpo cellulare contro la resistenza viscosa del fluido in cui è immerso. Tali forze propulsive agiscono come un campo di forze esterne non conservativo, producendo quindi una dinamica che non è simmetrica per inversione dell'asse temporale. In particolare, i batteri *Escherichia coli* sono spinti da flagelli azionati da motori rotatori bidirezionali. Quando tutti i motori ruotano in senso antiorario (se osservati da dietro) la cellula viene spinta in un moto traslatorio quasi rettilineo. Tale moto è interrotto da eventi di "tumble" durante i quali uno o più motori invertono il senso di rotazione provocando uno svolgimento del fascio flagellare e una conseguente orientazione casuale del corpo cellulare. Per quanto riguarda le simmetrie spaziali, la natura chirale del flagello rompe evidentemente la simmetria per riflessione b) ma non quella per ribaltamento c). Quest'ultima simmetria deve essere quindi esplicitamente rotta progettando dei componenti di forma asimmetrica. In un primo lavoro di simulazione numerica abbiamo creato un modello di batteri autopropellenti in interazione con ruote dentate di forma asimmetrica [7]. Il modello utilizzato per rappresentare il singolo batterio è quello di corpo rigido allungato (aspect ratio 1/2) costituito da 2 centri di interazione equidistanziati lungo il corpo. Ogni batterio interagisce con gli altri tramite forze repulsive generate da potenziali sferici a corto raggio tra i centri di interazione dei batteri. Ogni batterio è altresì dotato di forza

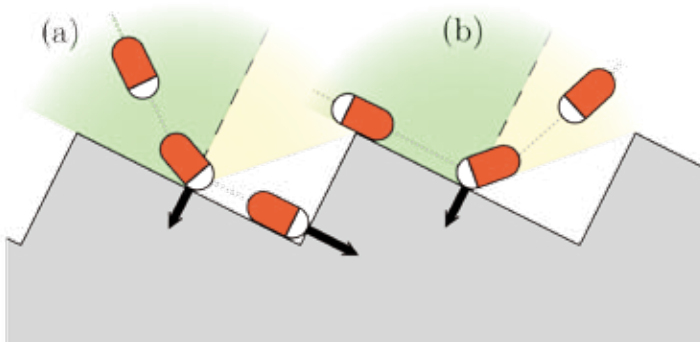


Fig. 1 Meccanismo di incastro e spinta di un singolo batterio sulla ruota. A causa dell'asimmetria del bordo della ruota, i batteri che provengono con un angolo nella regione verde, rimangono incastrati sullo spigolo e contribuiscono a far ruotare il dispositivo. Quelli che provengono dalla regione arancione scivolano via dalla ruota lungo il bordo.

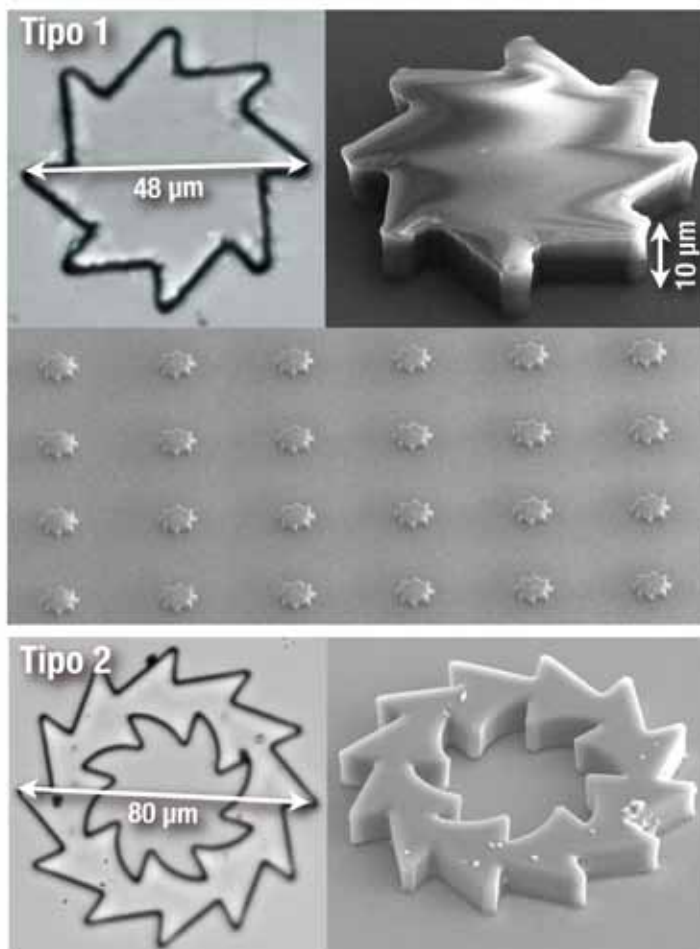


Fig. 2 In alto a sinistra un'immagine al microscopio ottico di una micro-ruota di 48 µm in soluzione acquosa. A fianco e di sotto le stesse ruote ancorate al substrato sacrificale viste al microscopio elettronico. In basso, da sinistra a destra, immagini al microscopio ottico ed elettronico di ruote cave di 80 µm.

autoprolusiva lungo la sua direzione assiale ed è soggetto al fenomeno del "tumbling" che ne modifica, a frequenza fissata, la direzione di moto in maniera casuale. La dinamica è caratterizzata dall'assenza dei termini inerziali per cui le equazioni del moto esprimono una relazione lineare tra le velocità dei corpi sospesi nel fluido (batteri e micro-oggetti) e le forze in gioco. Per simulare l'interazione tra i batteri e l'oggetto esterno è stato messo a punto un codice basato sulla repulsione con potenziale continuo a corto raggio tra il singolo batterio ed i lati dell'oggetto. Ci si è concentrati prevalentemente su oggetti esterni costituiti da rotelle con denti di forma asimmetrica, ancorati al centro e liberi di ruotare intorno al proprio asse. Facendo partire la simulazione abbiamo osservato l'innescò di un moto spontaneo delle micro-rotelle, sostenuto dalla spinta dei batteri sul bordo sagomato degli oggetti. Gli oggetti ruotano infatti con una velocità angolare fluttuante intorno ad un valor medio non nullo di una decina di gradi al secondo. Da un punto di vista microscopico l'effetto osservato di rotazione unidirezionale si può comprendere analizzando le collisioni dei batteri con il bordo dell'oggetto. A causa della forma asimmetrica di quest'ultimo, i batteri, a seconda dell'angolo di incidenza, tenderanno ad allontanarsi velocemente da esso oppure a rimanere incastrati tra i denti ed esercitare quindi una forza persistente sulla rotella (vedi fig. 1). Sono proprio tali forze nette unidirezionali che sospingono l'oggetto in moto rotatorio, il cui verso è legato alla particolare simmetria dei bordi (simmetrie opposte generano moti rotatori in direzioni opposte). Il fenomeno è risultato essere indipendente dai dettagli del problema (aspect ratio dei batteri, concentrazione della soluzione, particolare forma dei denti asimmetrici, dimensioni della ruota), con solo possibili differenze

quantitative nei vari casi. Si tratta quindi di una fenomenologia robusta, basata esclusivamente sulle proprietà generali di non-equilibrio del bagno e di asimmetria dell'ambiente, che potrebbe essere osservata in svariate situazioni e sistemi reali.

I risultati numerici ci hanno incoraggiato nella ricerca di collaborazioni esterne per realizzare un primo prototipo sperimentale del "micromotore a batteri" [8]. Le moderne tecniche di nanolitografia consentono di fabbricare facilmente strutture quasi planari di dimensioni micrometriche. Nel nostro caso, ruote dentate di varia forma e dimensione, composte da una resina epossidica (SU-8), sono state realizzate nei laboratori BIONEM dell'Università Magna Graecia di Catanzaro¹. Array di 10000 ruote identiche vengono "stampati" mediante processi di litografia elettronica ed ottica su di un substrato "sacrificale" di Polimetilmetacrilato (PMMA) (vedi fig. 2). Le micro-ruote vengono successivamente staccate sciogliendo lo strato di PMMA in acetone, e disperse in soluzione acquosa. La parte microbiologica è stata curata da ricercatori del Dipartimento di Scienze di Sanità Pubblica della «Sapienza»², che hanno messo a punto una procedura di crescita e un buffer che esaltassero le caratteristiche di motilità di un ceppo batterico di *Escherichia coli* (MG1655). Una goccia contenente una sospensione di micro-rotelle in bagno batterico viene sospesa dal pozzetto concavo di un vetrino per microscopia lasciando una intercapedine di aria tra l'interfaccia del liquido e il vetrino copri oggetto. Le ruote sedimentano

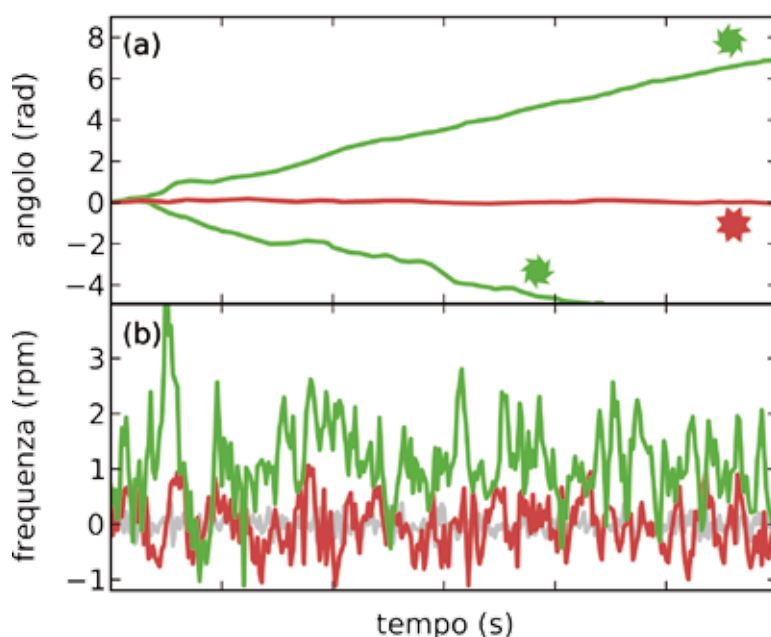


Fig. 3 (a) Angolo percorso in funzione del tempo relativo a due ruote asimmetriche (linee verdi) con diversa orientazione, e una ruota simmetrica (linea rossa). (b) Frequenza di rotazione istantanea in giri al minuto per una ruota asimmetrica (linea verde) e una simmetrica (linea rossa). Sebbene le fluttuazioni nelle due curve siano confrontabili, a differenza della ruota simmetrica, le ruote asimmetriche presentano un valore medio di velocità angolare diverso da zero. In grigio le fluttuazioni termiche di una ruota asimmetrica in un buffer privo di batteri.

¹ E. Di Fabrizio, F. De Angelis, F. Mecarini, BIONEM Labs (Catanzaro).

² V. Iebba, M. P. Conte e S. Schippa, Dipartimento di Scienze di Sanità Pubblica, Sapienza (Roma).

sull'interfaccia liquido-aria dove sono libere di ruotare. Quando la concentrazione raggiunge un valore abbastanza elevato (10^{10} batteri/ml), l'azione cooperativa dei batteri produce un momento torcente sufficiente a ruotare le micro-ruote con una frequenza di circa 1 rpm. Essendo sospese su un'interfaccia liquido-aria, il contributo dell'attrito viscoso sulla base della rotella è trascurabile, per cui possiamo stimare il momento torcente applicato dai batteri assumendo un coefficiente d'attrito rotazionale pari alla metà di quello di un disco lontano da interfacce. In tale approssimazione una frequenza rotazionale di 1 rpm corrisponde a un momento torcente di circa $10 \text{ pN } \mu\text{m}$. La direzione di rotazione può essere oraria o antioraria rispettivamente per le due possibili orientazioni del bordo asimmetrico dell'oggetto. La [fig. 3](#) riporta l'angolo di rotazione in funzione del tempo per ruote asimmetriche di opposta orientazione e per una ruota simmetrica. Fluttuazioni nel numero e nella disposizione locale dei batteri sui contorni delle ruote producono grosse fluttuazioni nella velocità angolare sia delle ruote simmetriche che di quelle asimmetriche come mostrato in [fig. 3](#). Una ruota asimmetrica in un buffer privo di batteri presenta delle fluttuazioni browniane di entità molto minore. La dinamica di rotazione osservata somiglia molto alle previsioni numeriche [7] come evidenziato dal confronto in [fig. 4](#). La velocità di nuoto di un singolo batterio fornisce un limite massimo per la velocità lineare del bordo di una ruota. Nel nostro caso il bordo delle micro-ruote gira con una velocità lineare di soli $2.5 \mu\text{m}$ al secondo contro una velocità media di nuoto dei batteri di $20 \mu\text{m}$ al secondo. Col passare del tempo la concentrazione di "cibo" diminuisce mentre quella di sottoprodotti del metabolismo cellulare aumenta. I batteri perdono progressivamente la loro motilità

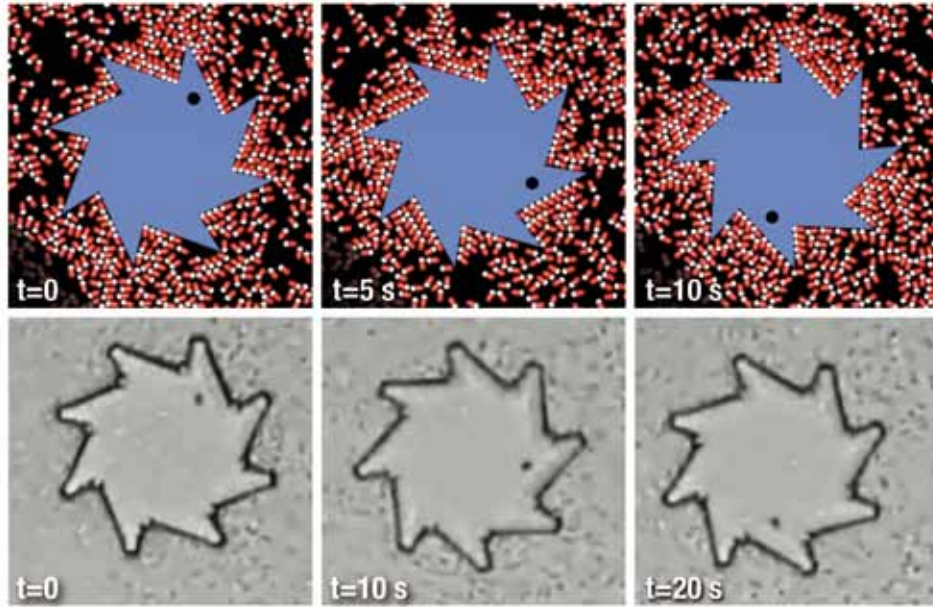


Fig. 4 Confronto tra le configurazioni istantanee relative a tre tempi successivi di ruote asimmetriche ottenute in simulazione (in alto) e osservate nell'esperimento (in basso).

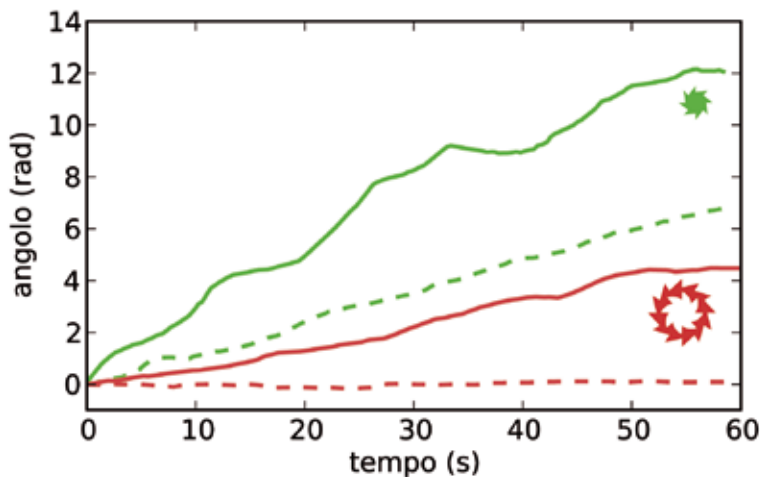


Fig. 5 Effetto della concentrazione batterica sulla dinamica di rotazione di due tipi di ruote asimmetriche (vedi [fig. 2](#)). Nelle soluzioni più concentrate si osservano velocità di rotazione maggiori accompagnate da fluttuazioni più ampie e persistenti, legate alle dinamiche collettive dei batteri ad alta densità.

e infine muoiono. Altri fenomeni quali l'aggregazione tra batteri e la formazione di biofilm fissano un limite alla durata di funzionamento dei dispositivi a propulsione batterica. Anche se possiamo pensare a diverse strategie per ritardare questi processi, un tempo di vita finito è un prezzo da pagare inevitabilmente se vogliamo costruire un micromotore autonomo, che contenga in sé tutto ciò che è necessario al suo funzionamento, senza bisogno di sorgenti energetiche esterne. Abbiamo costruito ruote di diversa geometria per studiare il ruolo della forma. Ad esempio ruote aventi lo stesso diametro di 48 μm ma con un numero maggiore di denti presentano un comportamento molto simile. Sebbene le variazioni nella velocità angolare possano essere grandi anche tra ruote con la stessa geometria e nello stesso bagno, tuttavia le velocità di rotazione massime non sembrano dipendere molto dalla geometria a parità di dimensioni. La presenza di grosse fluttuazioni nella velocità angolare rende anche difficile valutare in maniera quantitativa il ruolo della concentrazione. Tuttavia quando la concentrazione raggiunge valori molto elevati (circa 10^{11} batteri/ml), i batteri iniziano a manifestare comportamenti collettivi su larga scala che si traducono in una maggiore velocità di rotazione delle microstrutture. In particolare abbiamo osservato ruote di tipo I in una sospensione batterica di 7×10^{10} batteri/ml ruotare a velocità di 2 rpm e cioè a circa il doppio della velocità osservata a concentrazioni più basse (fig. 5). La dinamica delle microstrutture in sospensioni molto dense è però caratterizzata anche da fluttuazioni nella velocità angolare (o equivalentemente nel momento torcente) più persistenti e di maggiore entità. Aumentando le dimensioni delle ruote potremmo aspettarci che il momento torcente aumenti come il quadrato

delle dimensioni lineari poiché sia il perimetro, e quindi il numero di batteri che spingono, che il braccio del momento aumentano linearmente con la taglia del sistema. D'altra parte la mobilità rotazionale delle ruote decresce come l'inverso del cubo delle dimensioni lineari. Di conseguenza ci aspettiamo che la velocità di rotazione decresca come l'inverso del raggio della ruota. Pertanto nel progettare ruote di dimensioni maggiori (80 μm , vedi fig. 2) abbiamo cercato di ridurre le forze di attrito, scavando un buco al centro del disco, e di aumentare il momento delle forze sagomando anche il bordo interno con un profilo a dente di sega. Siamo riusciti a produrre una rotazione unidirezionale di queste ruote più grandi soltanto in sospensioni molto dense e con una frequenza rotazionale di 0.7 rpm (fig. 5) e cioè meno della metà della velocità di rotazione delle ruote più piccole, il che dimostra che il nostro argomento di scala per le velocità angolari fornisce delle previsioni solo qualitativamente corrette. È interessante notare come un simile fenomeno di rettificazione di un moto caotico sarebbe irrealizzabile in un bagno termico all'equilibrio a causa dei vincoli imposti dal secondo principio della termodinamica. In una celebre lezione, Richard Feynman dimostra come l'analisi di un dispositivo elementare, la ruota a dente di arresto ("ratchet and pawl"), possa fornire una spiegazione semplice, in termini di collisioni molecolari, del secondo principio [9]. L'argomento si sviluppa a partire dal tentativo di costruire un dispositivo in grado di estrarre lavoro da un bagno termico mantenuto a temperatura costante, in evidente violazione del secondo principio. Il dispositivo consiste in una ruota dentata di forma asimmetrica, vincolata a ruotare in un'unica direzione da un dente di arresto, e sollecitata dagli urti delle molecole di un gas. La geometria

asimmetrica della ruota costituisce un primo ingrediente essenziale per ottenere un movimento direzionale. Le leggi della dinamica, che governano l'interazione tra la ruota e le molecole del gas, sono infatti invarianti per inversione spaziale: se la ruota fosse simmetrica allora, per ogni possibile traiettoria del sistema in cui la ruota si muove in senso orario, ne esisterebbe una riflessa in cui la ruota si muove in senso antiorario. Le due traiettorie sono ugualmente probabili e in media la ruota non girerà né a destra né a sinistra. In realtà Feynman dimostra ingegnosamente che anche una ruota asimmetrica con dente di arresto non può ruotare in una direzione definita rettificando l'agitazione termica del gas. Le ragioni profonde di ciò risiedono in un'altra simmetria, forse più nascosta di quella per inversione spaziale, ma altrettanto fondamentale: la simmetria per inversione temporale. Gli urti fra le molecole del gas, e fra queste e la ruota dentata sono perfettamente compatibili con le leggi fisiche della dinamica se osservati a ritroso nel tempo. Di nuovo la presenza di una simmetria garantisce un bilancio equo tra le traiettorie in cui la ruota gira in un verso e quelle, simmetriche rispetto al tempo, in cui la ruota gira in senso opposto. La possibilità di ottenere un movimento direzionale richiede allora una duplice rottura di simmetria, spaziale e temporale. La combinazione di asimmetria spaziale e non-equilibrio è dunque alla base del cosiddetto "effetto ratchet", ovvero la possibilità di estrarre lavoro dall'agitazione disordinata dei costituenti elementari di un sistema fuori dall'equilibrio. L'effetto ratchet gioca un ruolo fondamentale in numerosi fenomeni fisici e biologici, quali ad esempio i motori molecolari. In passato sono state escogitate molte strategie per ottenere sistemi fuori dall'equilibrio come ad esempio l'applicazione di campi esterni dipendenti dal tempo o la variazione

ciclica della temperatura. Il nostro esperimento propone una nuova realizzazione dell'effetto ratchet dove i batteri giocano il ruolo di "molecole" intrinsecamente fuori equilibrio. Un ambiente asimmetrico può essere usato per rompere le rimanenti simmetrie spaziali e permettere l'emergere di un moto ordinato e riproducibile che possa servire come meccanismo propulsivo per micro-dispositivi completamente autonomi. Le applicazioni più promettenti sono senza dubbio legate alla micro-movimentazione di dispositivi per microfluidica o micro-robot autopropellenti per utilizzi biologici, medici o micro-ingegneristici. Ci possiamo tuttavia anche porre la domanda più impegnativa del possibile utilizzo dei motori batterici come sorgente energetica su scala macroscopica.

Il "micromotore a propulsione batterica" è solo un esempio di come l'incontro tra la fisica e la biologia non solo offra un'opportunità unica ai fisici di dare contributi quantitativi alla biologia, ma di come la fisica stessa possa arricchirsi quando il comportamento "inusuale" della materia "attiva" biologica stimola i ricercatori a pensare in modi nuovi.

Ringraziamenti

Ringraziamo per il supporto alle ricerche il CNR, il Dipartimento di Fisica della Sapienza, l'Istituto Italiano di

Tecnologia e il CINECA. Desideriamo inoltre ringraziare tutti i ricercatori che hanno partecipato alla realizzazione del prototipo di micromotore a batteri: M. P. Conte, F. De Angelis, D. Dell'Arciprete, E. Di Fabrizio, V. Iebba, F. Mecarini e S. Schippa.

Bibliografia

- [1] E. M. Purcell, "Life at low Reynolds number", *Am. J. Phys.*, 45 (1976) 3.
- [2] B. Behkam and M. Sitti, "Effect of quantity and configuration of attached bacteria on bacterial propulsion of microbeads", *Appl. Phys. Lett.*, 93 (2008) 223901.
- [3] N. Darnton, L. Turner, K. Breuer, H. C. Berg, "Moving fluid with bacterial carpets", *Biophys. J.*, 86 (2004) 1863.
- [4] D. B. Weibel, et al., "Microoxen: Microorganisms to move microscale loads", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 102 (2005) 11963.
- [5] E. Steager, C. B. Kim, J. Patel, S. Bith, C. Naik, "Control of microfabricated structures powered by flagellated bacteria using phototaxis", *Appl. Phys. Lett.*, 90 (2007) 263901.
- [6] P. Curie, "Sur la symétrie dans les phénomènes physiques, symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique", *J. Phys. (Paris)*, 3 (1894), 393.
- [7] L. Angelani, R. Di Leonardo, G. Ruocco, "Self-starting micromotors in a bacterial bath", *Phys. Rev. Lett.*, 102 (2009) 048104.
- [8] R. Di Leonardo et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 107 (2010) 9541.
- [9] R. P. Feynman, L. B. Leighton, and M. Sands, "The Feynman Lectures on Physics" Vol. I (Addison Wesley, Reading, MA) 1966, Chapt. 46.

Roberto Di Leonardo

Roberto Di Leonardo è Ricercatore del CNR presso l'Unità di Roma dell'Istituto per i Processi Chimico-Fisici. Nato a Pescara nel 1973, frequenta i corsi di laurea e dottorato in Fisica a L'Aquila, svolgendo attività di ricerca su liquidi sottoraffreddati e transizione vetrosa. A partire dal 2005 la sua attività di ricerca si concentra sull'utilizzo della luce come strumento di manipolazione della materia sulla scala del micrometro e nel 2007 riceve il Premio "Le Scienze" per le applicazioni delle trappole ottiche alla meccanica statistica, materia soffice e microfluidica.

Luca Angelani

Luca Angelani è Ricercatore del CNR presso l'Unità di Roma dell'Istituto per i Processi Chimico-Fisici. Nato a Roma nel 1969, laureato in Fisica alla "Sapienza" di Roma, dottorato a L'Aquila, successivamente ha svolto attività di ricerca a Trento e Roma. I suoi interessi scientifici riguardano la fisica dei sistemi disordinati, dai vetri ai liquidi e recentemente sistemi biologici e materia attiva, integrando metodi teorici e numerici. Attualmente è responsabile della linea di ricerca del CNR "Dinamica dei sistemi disordinati: materia soffice e biologica".

Giancarlo Ruocco

Giancarlo Ruocco è Professore di Struttura della Materia presso il Dipartimento di Fisica della "Sapienza", Università di Roma. Nato a Roma nel 1959, si laurea in Fisica nel 1981, diviene prima Ricercatore (1984) e poi Professore Associato (1992) all'Università di L'Aquila. I suoi interessi scientifici riguardano i liquidi, i vetri e la materia soffice. Nel 2000 diviene Professore Ordinario alla "Sapienza", nel 2004 fonda il Centro di Ricerca "Soft" dell'INFM, di cui è Direttore fino al 2008. Dal 2007 è Direttore del Dipartimento di Fisica della "Sapienza".