La candela

L'inviato del "News" chiese: — Che ne pensate di loro, signor Nathen? Sono pacifici? Sono simili all'uomo?

— Molto simili, — disse il giovanotto magro.

Fuori la pioggia scorreva lungo le grandi vetrate con un battito sordo e insistente, offuscando la vista sull'aeroporto dove *loro* dovevano atterrare. Sul cemento la pioggia rimbalzava nelle pozzanghere. [...] Il "News" chiese: — Come avete fatto a captare immagini televisive invece di voci?

— Non per caso — spiegò Nathen, paziente. — Avevo identificato una trama di esplorazione televisiva e non ho avuto che da ricavare le immagini. Le immagini sono comprensibili in qualsiasi linguaggio. [...]

— Un'impressione, — disse l'uomo del "Times". — Solo un'impressione. [...] Qualcosa nel loro modo di muoversi... [...] Siete sicuro di averli stabilizzati alla velocità giusta? — Nathen incrociò le mani davanti a sé e le fissò attentamente.

— Non lo so. Se accelero il nastro, si mettono tutti a correre e cominci a chiederti perché gli abiti non svolazzano dietro a loro, perché le porte si chiudono così in fretta eppure non le senti sbattere, perché le cose cadono in terra in una frazione di secondo. Se invece rallento, sembrano tutti nuotatori subacquei. [...]

La voce ricominciava a giungere dall'altoparlante. [...] Per un momento ci fu solo la voce di Bud che parlava nello strano linguaggio, e poi, lontanissima e chiara nella cuffia, udì la voce registrata del linguista [...]

— Il radar non rivela nessuna costruzione o forma di vita civilizzata vicine. L'atmosfera intorno a noi risulta spessa come colla. Tremenda pressione gassosa, bassa gravità, non uno spiraglio di luce. Non ce l'avevate descritta così. [...] Un semicerchio di colline intorno all'orizzonte. Un grande lago melmoso brulicante di esseri che nuotano. Gigantesche foglie bianche tutt'intorno alla nave e mostri enormi, incredibilmente grassi, che si attaccano e si divorano da ogni parte. [...]

Il "Times" pensò confusamente all'era carbonifera. Era chiaro che Nathen aveva capito qualcosa che lui non aveva capito.

— Dove sono? – gli domandò il "Times" sottovoce.

Nathen puntò il dito sull'antenna degli indicatori di posizione. Il "Times" seguì con lo sguardo le linee immaginarie convergenti fuori dalle vetrate, sull'assolato aeroporto, sulla distesa deserta, sul cemento che asciugava e l'erba che ondeggiava, fin dove s'incontravano.

Dove le linee s'incontravano. L'astronave era lì! [...]

— Dove siete? — chiedeva l'astronave. — Presto, presto, stiamo sprofondando! [. . .]

Nathen rise ancora, seccamente, mentre afferrava il microfono. — Tirateli fuori! Non c'è un lago o un fiume nel raggio di centinaia di miglia!

Un brivido d'irrealtà corse lungo la schiena del "Times." [. . .]

— Ma dove sono allora? Perché non possiamo vedere la loro astronave? — Nathen fece scattare il microfono con un gesto in cui c'era tutta l'amarezza del suo disappunto.

— Ci vorrà una lente d'ingrandimento per trovarli.

* * *

È un conciso estratto di *Le immagini non mentono* (*Pictures don't lie*) di Katherine McLean, un racconto di oltre 40 anni fa, che mi è sembrato potesse bene introdurre il tema di questa puntata: l'effetto di un cambiamento di scala nei fenomeni fisici e nella biologia.

Ancora una volta si tratta di un tema immenso, sul quale si sono scritti dei libri, e sul quale potrò quindi solo spigolare. Prenderò alcune idee proprio da un libro abbastanza recente: *Dimensioni e vita*, edito in Italia da Zanichelli. Gli autori sono un ingegnere (T. A. McMahon) e un biologo (J. T. Bonner). Il libro è ricco di esempi e corredato da molti dati, per cui è anche utile per consultazione; temo invece che la parte fisica, ovviamente non marginale, non riuscirà troppo chiara a chi non sia del mestiere, perché molte cose sono date per scontate.

Già nella seconda pagina della prefazione si ricorda, attraverso un altro classico quale *Crescita e forma* di D'Arcy Thompson, che l'atto di nascita del nostro tema risale — tanto per cambiare — a Galileo. Le prime due giornate dei *Discorsi* sono in gran parte dedicate alla resistenza dei materiali, e all'effetto che deriva, nelle costruzioni artificiali come nei prodotti della natura, dal cambiamento delle proporzioni:

> "Or vegghino come dalle cose sin qui dimostrate apertamente si raccoglie l'impossibilità del poter non solamente l'arte, ma la natura stessa, crescer le sue macchine a vastità immensa: sì che impossibil sarebbe fabbricar navilii, palazzi o templi vastissimi, li cui remi, antenne, travamenti, catene di ferro, ed in somma le altre lor parti, consistessero; come anco non potrebbe la natura far alberi di smisurata grandezza, poiché i rami loro, gravati dal proprio peso, finalmente si fiaccherebbero; e parimente sarebbe impossibile far strutture di ossa per uomini, cavalli o altri animali, che potessero sussistere e far proporzionatamente gli uffizii loro, mentre tali animali si dovesser agumentare ad altezze immense . . . "

Galileo illustra il concetto con una figura dove rappresenta due ossi (credo due femori): uno di un animale piccolo e l'altro allungato di tre volte, ma ispessito assai di più; in modo, dice Galileo, "che potesse nel suo animale grande far l'uffizio proporzionato a quel dell'osso minore nell'animal più piccolo ..."

Il ragionamento è piuttosto semplice se si pensa alla resistenza dell'osso alla *compressione*, che serve per reggere il peso del corpo, oppure allo sforzo muscolare occorrente per sollevarlo. Se guardiamo a due animali l'uno doppio dell'altro, le loro masse e i loro pesi stanno nel rapporto 1:8. Viceversa la resistenza delle ossa, e la forza che possono esercitare i muscoli, sono proporzionali alle loro sezioni, e perciò sono queste che debbono restare nel rapporto 1:8. Ciò si ottiene non semplicemente raddoppiando i diametri (il che darebbe un rapporto 1:4) ma accrescendoli nel rapporto $\sqrt{8} = 2^{3/2}$. Dunque lo spessore delle ossa e dei muscoli deve crescere più che in proporzione alle dimensioni del corpo: con la potenza 3/2, che Galileo avrebbe chiamata "proporzione sesquialtera."

A dire il vero, misurando la figura di Galileo si trova che l'osso tre volte più lungo non ha un diametro $3^{3/2} \simeq 5.2$ volte l'altro, ma piuttosto 9 volte maggiore, ossia in proporzione del quadrato. Come mai? Il fatto è che Galileo si preoccupa non già della resistenza alla compressione, ma di quella alla flessione; e dimostra che uguale resistenza alla flessione si ottiene quando il diametro cresce appunto col quadrato della lunghezza.

Se si guardano i grafici riportati da McMahon e Bonner, si vede che la legge della potenza 3/2 si avvicina assai meglio alla realtà: qual è la spiegazione? Posso solo fare una congettura: nei casi considerati il rischio di una rottura dell'osso per eccessivo sforzo di flessione è trascurabile rispetto ad altre esigenze. Infatti i grafici si riferiscono in un caso a vertebre, dove la flessione è certamente inessenziale, dato che si tratta di ossi assai corti; nell'altro a omeri di antilopi, quindi ossa lunghe e sottili, dove la flessione potrebbe avere importanza, ma ne ha di più la capacità dei muscoli di reggere l'animale e soprattutto di consentirgli gli slanci durante la corsa. Se la forza dei muscoli fosse insufficiente, l'antilope cadrebbe in ginocchio, ben prima di subire fratture.

Controprova: se ne dovrebbe concludere che i grossi erbivori adattati alla corsa, e quindi con ossa relativamente sottili (potenza 3/2) siano a rischio di fratture in caso di traumi. È ben noto che questo è ad es. il caso dei cavalli.

Lo stesso argomento che abbiamo portato per le ossa degli animali, si applica al tronco e ai rami degli alberi, ma non posso sviluppare il discorso: preferisco passare a un argomento più interessante, anche se più complesso.

* * *

Consideriamo il volo degli uccelli: ci sono stili di volo molto diversi, e sono legati alle dimensioni. I colibrì sono capaci di restare sospesi in aria, fermi, battendo le ali. Passeri, allodole e balestrucci hanno un volo intermittente: battono le ali per un po', poi le richiudono e viaggiano come proiettili; dopo di che riaprono le ali e riguadagnano quota. Perciò la loro traiettoria di volo è un saliscendi continuo. Oche e cigni riescono a percorrere centinaia di chilometri battendo regolarmente le ali. Infine i rapaci e i grandi uccelli marini fanno frequente ricorso al volo planato.

La ragione principale del diverso comportamento è semplicemente che gli uccelli più grandi non possono permettersi un volo continuo, e tanto meno l'assetto sospeso dei colibrì: non hanno, nei loro motori muscolari, la potenza sufficiente. Vediamo perché, cominciando dal normale volo battente delle oche.

In questo tipo di volo, in aria ferma, la forza di sostentamento (portanza) è data da una corrente d'aria diretta verso il basso, che si produce quando il profilo alare incontra l'aria nella quale l'uccello si muove (nel sistema di riferimento del volatile, è l'aria che corre incontro alle sue ali). Il meccanismo è lo stesso che tiene in volo un aereo, con la differenza che nel caso degli uccelli le ali svolgono una doppia funzione: oltre la portanza, debbono anche assicurare la spinta in avanti, che negli aerei è prodotta dalle eliche o dalle turbine. Per far questo, i muscoli alari debbono fare un certo lavoro per unità di tempo, che ha due componenti con andamento diverso: quello per vincere la resistenza all'avanzamento cresce molto con la velocità (all'incirca con la terza potenza); invece quello che produce la portanza decresce con la velocità (inversamente). Si capisce che qui non posso entrare in una spiegazione dettagliata del perché: accontentiamoci di vederne le conseguenze.

Un dato uccello avrà muscoli capaci di una certa potenza massima (qualcosa fra 10 e 20 W per kg di massa corporea). La prima conseguenza ovvia è che non potrà volare né a velocità molto bassa, perché solo per reggersi in aria gli occorrerebbe una potenza che non è in grado di sviluppare, né a velocità molto alta, perché la resistenza all'avanzamento richiede una potenza troppo grande. Ci sarà dunque un intervallo di velocità possibili, che però non è lo stesso per tutti gli uccelli.

Supponiamo infatti di raddoppiare tutte le sue dimensioni: la massa e il peso diventano 8 volte maggiori, e quindi di altrettanto deve crescere la portanza. Questa è proporzionale alla superficie alare, che è ora 4 volte maggiore, e al quadrato della velocità: perché resti la stessa, occorre dunque che la velocità aumenti di $\sqrt{2}$, ossia circa del 40%. Questa prima legge (velocità di crociera che cresce come la radice quadrata delle dimensioni) è ben verificata sperimentalmente: gli uccelli più grandi volano più veloci, non perché sono più "bravi," ma perché *debbono* essere più veloci per reggersi in aria.

A dire il vero un uccello grande può guadagnare qualcosa aumentando l'apertura alare più di quanto darebbe una semplice similitudine geometrica: questo infatti succede, ma non oltre un certo limite, perché l'aumento dell'apertura alare fa crescere lo sforzo richiesto allo scheletro per sopportare il carico dovuto al battito delle ali. Per semplicità supponiamo quindi che si possa mantenere una similitudine geometrica.

Vediamo ora la potenza richiesta: si ottiene dal prodotto resistenza $\times$ velocità, e si dimostra che la prima è proporzionale alla portanza, ossia al peso, ossia alla massa. Ne segue che la potenza occorrente *per unità di massa* è proporzionale alla velocità, ossia cresce come la radice quadrata delle dimensioni. Conclusione: un uccello più grande ha bisogno di una potenza specifica (per unità di massa) maggiore di uno più piccolo.

Ne consegue che un uccello troppo grande non è in grado di sviluppare la potenza necessaria per il volo battente, e se è ancora più grande non è neppure in grado di staccarsi da terra. Ecco perché gli uccelli grandi debbono farsi aiutare dalle correnti ascendenti, sulle scogliere, sui monti, o anche in zone pianeggianti quando il sole ha scaldato il terreno.

Uccelli piccoli, come i passeri, hanno invece un certo margine di potenza, e succede che possono sfruttarlo per consumare meno, al modo seguente. In primo luogo, possono lanciarsi a una velocità maggiore di quella necessaria per reggersi in aria, e quindi guadagnare quota; dopo di che sfruttano il "volo balistico" ad ali ripiegate, quindi a bassa resistenza, durante il quale non consumano energia. Non è affatto ovvio che questa strategia sia vantaggiosa, ma a conti fatti (bisogna fare i conti!) si vede di sì.

Infine, i colibrì. Sono così leggeri che possono reggersi con un meccanismo diverso, simile a quello degli elicotteri: semplicemente usando le ali a mo' di ventilatore, per spingere l'aria direttamente verso il basso.

* * *

Si può discutere il problema del volo da un altro punto di vista, ma per far questo dobbiamo prima trattare della *legge di Kleiber*. Come legge empirica, questa dice che il metabolismo basale, ossia il calore prodotto a riposo per unità di tempo, cresce — almeno per i mammiferi — con la potenza di esponente $3/4$ della massa. (Si noterà che l'esponente è minore di 1, il che esprime il fatto ben noto che gli animali più piccoli consumano proporzionalmente di più.)

La prima cosa che viene in mente è di cercare una spiegazione di questa legge, verificata dal toporagno all'elefante, vale a dire per 5 ordini di grandezza della massa. L'ipotesi più ovvia è che il metabolismo basale sia proporzionale alla superficie del corpo, in quanto misura la perdita di calore attraverso la pelle; ma i modelli che si possono fare di come va la relazione fra massa e superficie danno tutti un esponente troppo basso, tra $5/8 \simeq 0.63$ e $2/3 \simeq 0.67$, e le misure indicano un esponente vicino al valore più basso. Dunque il metabolismo basale cresce più rapidamente della superficie; non sembra che se ne conosca una spiegazione convincente (a me non pare adeguata quella proposta da McMahon e Bonner, ma lo spazio non mi consente di dare maggiori ragguagli).

Un altro fatto ben noto è che anche il consumo *massimo* di ossigeno cresce all'incirca allo stesso modo (anche se le misure sono molto più incerte). Gli autori commentano: "Non c'è un motivo logico per cui il consumo massimo di ossigeno debba essere circa 10 volte il tasso basale, invece di, ad esempio, 2 o 100 volte. [...] Varrebbe la pena capire come fa una cellula a sapere se appartiene a un cane grande o piccolo, e come fa ad aggiustare di conseguenza il proprio metabolismo basale."

Torniamo ora agli uccelli in volo. Abbiamo visto che la potenza specifica minima cresce con la radice quadrata della lunghezza; se la esprimiamo in funzione della massa, troviamo che ne dipende pochissimo: così poco che è ragionevole semplificare dicendo che non dipende dalla massa. Al contrario, il metabolismo basale specifico *descresce*, e mettendo insieme le due cose si trova che mentre un colibrì in volo deve aumentare il proprio metabolismo di circa 3 volte, per un uccello che pesi qualche kg, come un avvoltoio, si arriva a 20 volte. Per quello che abbiamo detto sopra, lo sforzo metabolico richiesto a un colibrì per volare è modesto, mentre un avvoltoio non è in grado di sopportarlo se non per breve tempo. Caso estremo è l'albatro (*Diomedea exulans*), con una diecina di chili di peso, e un'apertura alare di oltre 3 metri. Ho letto che viene attirato dai marinai con esche di carne, e non è più in grado di alzarsi in volo dal ponte della nave. Riaffiora un vago ricordo liceale:

"Because I had killed the albatross ..."

* * *

Non credo di essere riuscito a dare neppure una pallida idea di tutto quello che si può ricavare ragionando sui cambiamenti di scala. Soprattutto, non ho spazio per spiegare una della frasi chiave del racconto che ho citato all'inizio:

> "Se accelero il nastro, si mettono tutti a correre [...] Se invece rallento, sembrano tutti nuotatori subacquei."

Mi consolo rubando la battuta finale di un film famoso: "Domani è un altro giorno." A domani.