

Spigolature astronomiche*

A cura di Annibale D'Ercole

INAF · Osservatorio di astrofisica e scienza dello spazio di Bologna (OAS)

Giochi d'aria e d'acqua e loro spiegazioni (spesso sbagliate): Bernoulli vs Coandă

Annibale D'Ercole

ALL'INIZIO del secolo scorso l'ingegnere aeronautico rumeno Henri Marie Coandă (1886-1972), durante alcuni esperimenti da lui condotti, ebbe modo di scoprire un effetto (detto appunto *effetto Coandă*) che può essere definito nei seguenti termini: la tendenza di un flusso di fluido (sia gassoso che liquido) ad aderire e scorrere lungo superfici piane e convesse.

Prima di approfondire i dettagli e le implicazioni di questo effetto è necessario operare una breve digressione riguardante l'*adesione* e la *viscosità* di un fluido. Quest'ultima rappresenta l'attrito interno dovuto alle interazioni tra le molecole che lo compongono, e determina la maggiore o minore facilità di scorrimento di uno strato di fluido rispetto ad uno strato adiacente (uno sciroppo è più viscoso dell'acqua che a sua volta è più viscosa dell'aria). Se il fluido scorre lungo una superficie rigida si parla anche di *adesione* a questa superficie in quanto le molecole del fluido e le molecole della superficie con cui interagiscono sono diverse (le pareti interne di un bicchiere rimangono bagnate anche dopo averne bevuto il contenuto proprio a causa dell'adesione).

Torniamo ora all'effetto Coandă, illustrato in dettaglio in FIG. 1. In FIG. 1a è schematizzato un generatore di un flusso d'aria che si propaga liberamente. A causa della viscosità gli strati di aria ambiente a contatto con il flusso vengono trascinati da quest'ultimo rimanendovi intrappolati. Nelle regio-

ni vicine al flusso si produce dunque una sorta di "manicotto" con carenza d'aria ed una conseguente diminuzione di pressione. Supponiamo ora che il flusso si generi vicino ad una superficie estesa. La zona di bassa pressione situata sopra il getto viene rapidamente compensata dall'atmosfera circostante che riempie continuamente il "vuoto" creato. Ciò non può avvenire con la stessa efficienza nella zona confinata tra il getto e la superficie a causa della difficoltà dell'atmosfera ad accedervi. In questa regione, quindi, la pressione è inferiore rispetto alla zona sopra il getto. In questa situazione, la maggiore pressione nella parte superiore schiaccia il getto contro la superficie (FIG. 1b) lungo cui continua a scorrere (FIG. 1c). Nel caso il piano presenti una convessità il flusso, invece di proseguire in modo rettilineo, deflette seguendo la curvatura del piano stesso (FIG. 1d) sempre a causa della pressione dell'aria ambiente sovrastante.

Questo effetto ha applicazioni pratiche nella vita quotidiana. Come mostrato in FIG. 1, ad esempio, esistono appositi erogatori di aria condizionata che, sfruttando l'effetto Coandă, fanno scorrere il flusso freddo lungo il soffitto e (d'inverno) quello caldo lungo il pavimento. Si ottiene così una climatizzazione uniforme evitando fastidiosi getti diretti verso il centro della stanza come accade con gli erogatori "normali".

Quanto detto dell'aderenza di un flusso ad una superficie vale anche nel caso di un liquido. Si consideri una vasca da bagno piena d'acqua fino ad un certo livello, e supponiamo di immettere da una delle due estremità un flusso d'acqua (eventualmente colorata per poterla distinguere) attraverso un orifizio praticato nella parete della vasca al di sotto della superficie dell'acqua nella vasca. Il getto orizzontale sarà attratto da tale superficie o dal fondo della vasca a seconda di quale dei due è più vicino. Questo accade frequentemente nel caso di tubi di scarico che sversano in un fiume. Il flusso immesso può risalire in superficie formando una sorta di bollore, oppure inabissarsi e scorrere rasentando il fondo.

* Questa rubrica (giunta alla sua 82ª puntata) si propone di presentare in modo sintetico e, per quanto possibile, autoconsistente argomenti che stanno alla base della conoscenza astronomica, spesso trascurati nella letteratura divulgativa, in quanto ritenuti di conoscenza generale oppure troppo difficili o troppo noiosi da presentare ad un pubblico non specialistico. Questi "fondamenti di astronomia", volutamente trattati in uno spazio limitato, possono essere letti a due livelli; eventuali approfondimenti per i lettori che desiderino ampliare la conoscenza dell'argomento vengono esposti in carattere corsivo e incorniciati. Si suggerisce questa rubrica, quindi, a studenti dei vari tipi e livelli di scuole. Le *Spigolature astronomiche* si possono trovare anche in rete, nel sito Web del «Giornale di Astronomia», <http://giornaleastronomia.difa.unibo.it/giornale.html>.

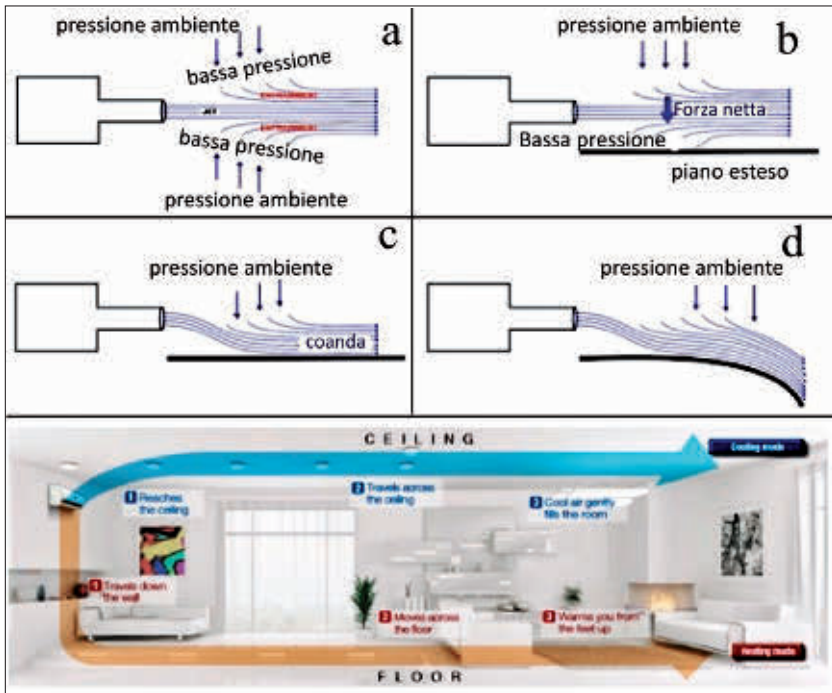


FIG. 1. a) Rappresentazione schematica di un generatore di flusso. L'aria dell'ambiente a contatto con il flusso viene parzialmente trascinata via a causa della viscosità, generando una regione di bassa pressione attorno al getto. b) Una superficie posta vicino al flusso crea una depressione nello spazio tra i due e il flusso è "schiacciato" contro la superficie (pannelli c e d). Il pannello in basso mostra un'applicazione dell'effetto Coandă per il condizionamento termico dei locali.

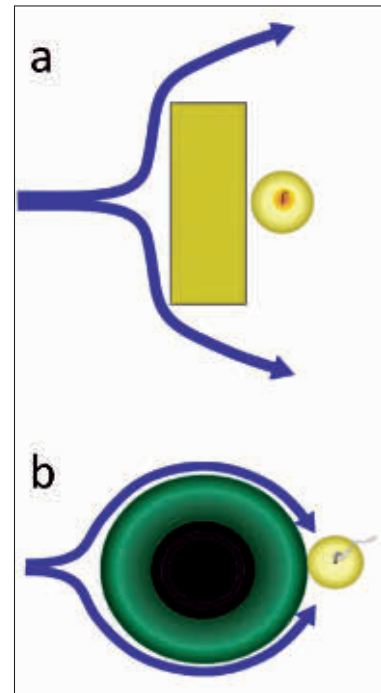


FIG. 2. a) un flusso d'aria (linee blu) viene deviato da un ostacolo esteso e non raggiunge la candela posta dietro di esso (prospettiva dall'alto). b) Se l'ostacolo è cilindrico il flusso ne segue la superficie e giunge a spegnere la candela.

Abbiamo fin qui considerato superfici piane. Possiamo ora evidenziare l'effetto Coandă in presenza di superfici curve mediante un semplice esperimento casalingo. Immaginiamo di voler spegnere una candela con un soffio interponendo uno schermo piatto tra noi e la candela stessa. Evidentemente lo schermo ostacolerà il flusso d'aria generato dal nostro soffio, e la candela rimarrà accesa (FIG. 2a). Ma se sostituiamo lo schermo con un ostacolo cilindrico – ad esempio una bottiglia – e soffiamo contro di esso, la candela si spegnerà (FIG. 2b). Infatti, per via dell'effetto Coandă, il flusso d'aria segue la curvatura della bottiglia fino a raggiungere la candela.

Qualcosa di simile accade anche per i liquidi. La FIG. 3b mostra un flusso d'acqua colpire tangenzialmente un cilindro e seguirne per un certo tratto la superficie deviando dalla sua traiettoria iniziale. Tale flusso si comporta in maniera del tutto simile al soffio indirizzato verso la bottiglia mostrato in FIG. 2b. Per questo motivo nella stragrande maggioranza dei siti e di testi la curvatura del flusso d'acqua viene attribuita all'effetto Coandă. Tuttavia quest'ultimo, come abbiamo visto, è basato sull'interazione del flusso con il fluido circostante, ma un getto d'acqua attraversa l'aria senza trascinarne apprezzabilmente gli strati a contatto. L'acqua, in realtà, segue la superficie a causa dell'adesione. Possiamo immaginare il getto come composto da vari strati sovrapposti; quello a diretto contatto con la superficie si "incolla" al cilindro per via dell'adesione e ha una velocità nulla mentre gli strati superiori

hanno velocità progressivamente maggiori.¹ Tutti gli strati sono tenuti uniti dalla viscosità e il getto, nel suo insieme, si propaga seguendo la curvatura della superficie.

Il ruolo della (mancanza di) viscosità è evidenziato dalla FIG. 3a raffigurante un flusso di sabbia che, al pari di quello d'acqua, colpisce tangenzialmente il cilindro. La sabbia è composta da piccolissimi granelli che non interagiscono tra loro tramite forze molecolari e non generano viscosità. Ognuno di essi rimbalza sulla superficie, e il flusso nel suo insieme, in questo caso, si allontana dal cilindro.

Adeguandoci alla letteratura sull'argomento, nel prosieguo denoteremo anche noi il fenomeno della curvatura di un getto liquido illustrato in FIG. 3b come effetto Coandă anche se, come abbiamo visto, la viscosità opera in maniera diversa rispetto a quanto illustrato in FIG. 2b e basato sul meccanismo "originale" di Coandă mostrato in FIG. 1.

È possibile approfondire alcuni aspetti dell'effetto Coandă mediante un altro esperimento domestico di facilissima realizzazione. Si tenga un cucchiaino per la punta del manico senza stringere eccessivamente in modo che, pendendo verticalmente, abbia un certo margine di oscillazione come fosse un pen-

¹ L'esistenza di un sottile strato di flusso aderente alla superficie è facilmente verificabile. Infatti, pur soffiando (parallelamente) su uno scaffale non si riesce a rimuovere tutta la polvere, ma solo quella accumulata oltre il sottile spessore dello strato aderente del soffio.

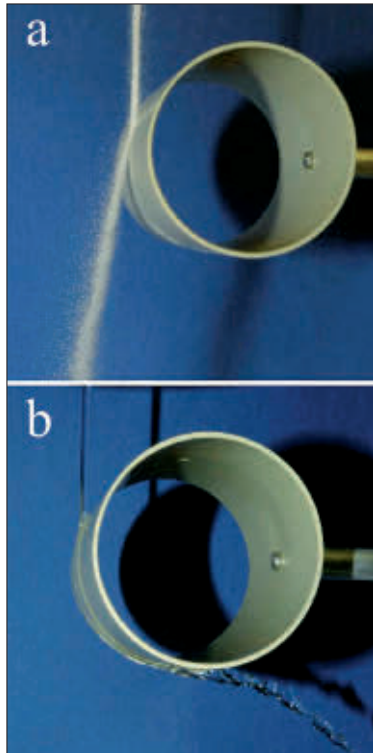


FIG. 3. Il pannello superiore mostra un getto di sabbia che, una volta colpita una superficie cilindrica, se ne allontana. Nel pannello inferiore, invece, un getto d'acqua aderisce alla superficie a causa della viscosità, e la percorre per un certo tratto prima di staccarsene.

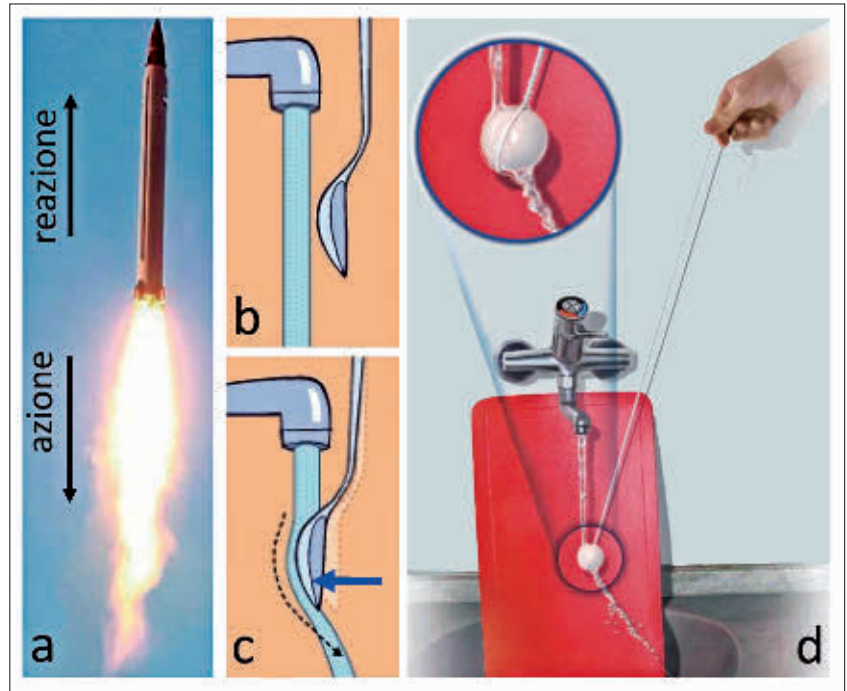


FIG. 4. a) Un esempio della terza legge di Newton (ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria). Il missile procede in avanti come reazione all'azione dei gas espulsi indietro a grande velocità. b) Un cucchiaino viene lasciato pendere con il bordo convesso rivolto verso un getto d'acqua. c) Una volta a contatto con il cucchiaino il getto aderisce alla sua superficie deviando verso destra. Il cucchiaino reagisce spingendo verso sinistra. d) lo stesso esperimento eseguito con una pallina da pingpong. La figura evidenzia la resistenza opposta dalla pallina al distacco dal flusso d'acqua nonostante la non trascurabile tensione del filo a cui è legata.

dolo. Mettendo a contatto il lato convesso del cucchiaino con il getto d'acqua da un rubinetto vedremo che il cucchiaino risulta "attratto" dall'acqua e bisogna esercitare un leggero sforzo per allontanarlo (FIG. 4). La spiegazione risiede nel principio di azione e reazione dato dalla terza legge di Newton: ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria (quando un cannone spara, all'impulso in avanti comunicato al proiettile corrisponde il rinculo all'indietro del cannone stesso). Il getto d'acqua, incontrando il cucchiaino, non scende più in modo rettilineo ma devia da un lato. Il cucchiaino reagisce spingendo nella direzione opposta alla deviazione, ossia in direzione dell'acqua (si vedano i vari pannelli della FIG. 4 per i dettagli).

Oltre l'effetto Coandă – e ben più popolare di quest'ultimo – un altro fenomeno coinvolge i flussi di fluido: il *principio di Bernoulli*, dal nome del suo scopritore, il matematico svizzero Daniel Bernoulli (1700-1782). Qui ne diamo una descrizione estremamente succinta, mentre una esposizione (un po') meno superficiale verrà data nel livello avanzato. Immaginiamo un ventilatore che produce una corrente d'aria "cilindrica" (FIG. 5). Consideriamo un piccolo elemento² d'aria che si muove lungo la cor-

rente e che abbia pressione p , densità ρ e velocità v . La traiettoria seguita da questo elemento è detta *linea di flusso*. È possibile che la corrente d'aria (e con essa le linee di flusso che la compongono) venga disturbata dalla presenza di qualche oggetto solido e defletta dalla traiettoria iniziale. Questo comporta una variazione di p e v degli elementi di fluido lungo la linea di flusso. La densità, invece, rimane invariata perché si assume che il fluido sia incompressibile.³ Il principio di Bernoulli stabilisce che, nonostante le variazioni suddette, la somma della pressione e dell'energia cinetica di un elemento di fluido rimanga costante, ossia

$$p + 0,5 \rho v^2 = c, \quad (1)$$

dove c è, appunto, una costante. Risulta allora chiaro che nei tratti in cui il fluido rallenta la sua pressione aumenta, e viceversa.

Un congegno di uso quotidiano che si basa sull'equazione di Bernoulli è dato dallo spruzzino di profumo (FIG. 6) che è dotato di un tubicino la cui estremità inferiore è immersa nel profumo che si trova a pressione ambiente. Comprime la pompetta, produciamo un flusso d'aria che passa attraverso una strettoia lambendo l'estremità superiore

² Una particella di fluido idealizzata è sufficientemente piccola da essere individuata da una singola coordinata spaziale, ma grande al punto di contenere un grande numero di molecole.

³ Quest'ultima assunzione risulta alquanto ovvia per un liquido come l'acqua, mentre può risultare sorprendente per un gas come l'aria (ne parleremo nel livello avanzato).

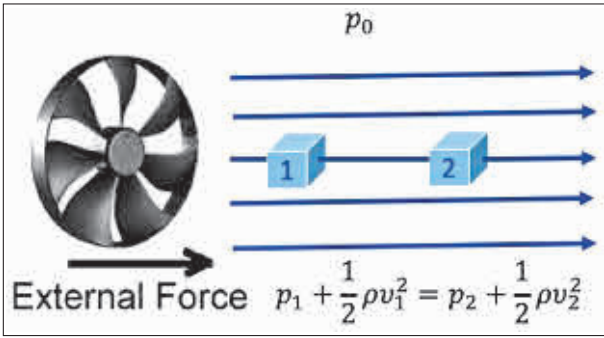


FIG. 5. Una ventola produce un getto d'aria che si propaga attraverso l'atmosfera la cui pressione è p_0 . Ogni singolo elemento del flusso (qui schematizzato da un cubetto) segue una determinata traiettoria (linea di flusso) rappresentata in questo semplice caso da una linea azzurra orizzontale. A seconda delle condizioni del flusso, è possibile che lungo una traiettoria cambino la pressione e la velocità (si veda la FIG. 15). Tuttavia, il principio di Bernoulli assicura che la somma della pressione e dell'energia cinetica di un elemento lungo la sua linea di flusso rimane costante.

del tubicino. A causa della strettoia l'aria aumenta la sua velocità (per via dell'effetto Venturi che discuteremo nel livello avanzato) e diminuisce la sua pressione per la legge di Bernoulli. Il profumo allora viene aspirato lungo il tubicino a causa della differenza di pressione alle sue estremità ed espulso in forma nebulizzata assieme al flusso d'aria.

Un meccanismo simile è stato utilizzato per alcuni anni nella realizzazione delle automobili di Formula 1 tramite l'applicazione di *minigonne*, strisce sottili applicate lungo le fiancate dell'auto con una larghezza che giunge fino a lambire l'asfalto. Si viene così a creare una sorta di tunnel tra il fondo dell'auto e il suolo dove va ad infilarsi l'aria quando la macchina corre. Sagomando opportunamente il fondo dell'auto in modo da creare una strozzatura del tunnel (FIG. 7) si ottiene, come per lo spruzzino, un aumento della velocità e una diminuzione della pressione del flusso d'aria. La maggiore pressione dell'atmosfera sovrastante l'auto "schiaffa" quest'ultima aumentandone l'aderenza alla pista. Quando la macchina percorre una curva è sottoposta ad una forza centrifuga che la spingerebbe fuori strada se non fosse ostacolata dall'attrito dovuto all'aderenza degli pneumatici. L'effetto suolo (così viene detto il meccanismo appena descritto), aumentando tale aderenza, permette di affrontare curve a velocità più elevate del normale. Tuttavia nel 1983 le minigonne furono bandite per la loro pericolosità.

È ora necessario sottolineare a proposito del principio di Bernoulli un punto generalmente equivocado in moltissimi testi e siti web che pertanto propongono spiegazioni sbagliate per un certo nume-

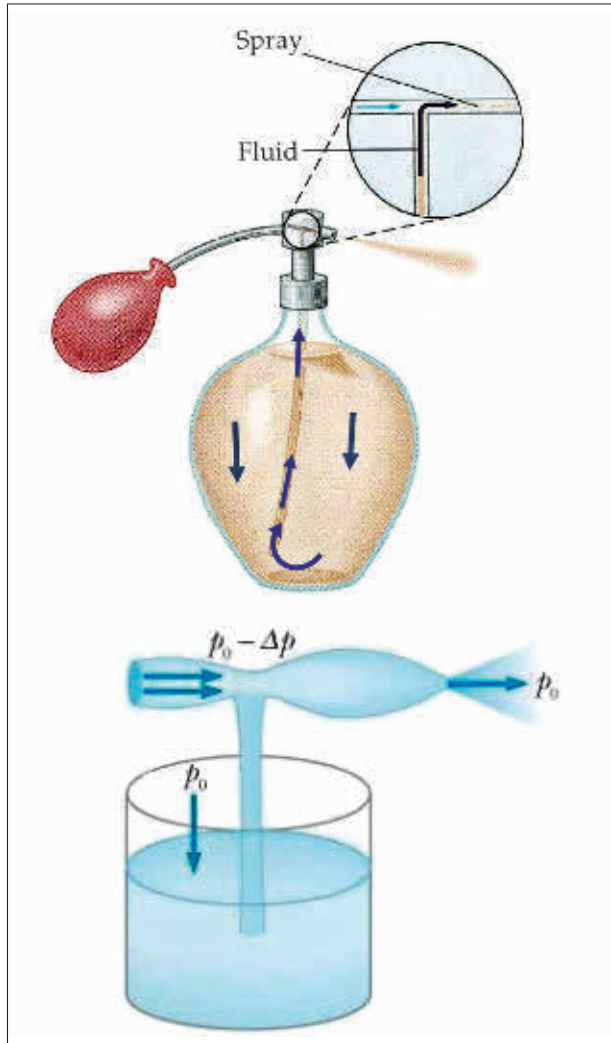


FIG. 6. Funzionamento di uno spruzzino per il profumo. Nella strettoia del condotto orizzontale si crea una diminuzione di pressione Δp che provoca l'aspirazione del profumo (si veda il testo per i dettagli).

ro di fenomeni, alcuni dei quali discuteremo tra poco. È molto importante chiarire che l'equazione di Bernoulli vale per una singola linea di flusso, e non è lecito confrontare pressioni e/o velocità tra linee

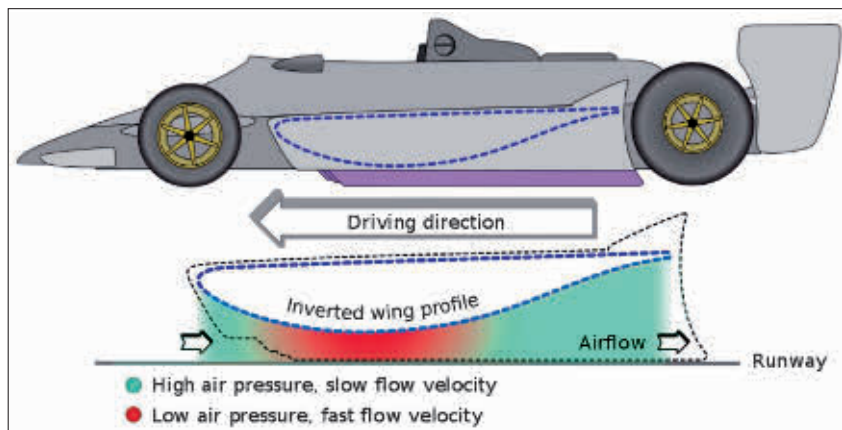


FIG. 7. Meccanismo per aumentare l'aderenza al terreno di un'automobile di F1. La minigonna laterale è trasparente per permettere la visione del fondo dell'auto che non è piatto ma sagomato in maniera da produrre una depressione nella regione rossa evidenziata nel pannello inferiore (si veda il testo).

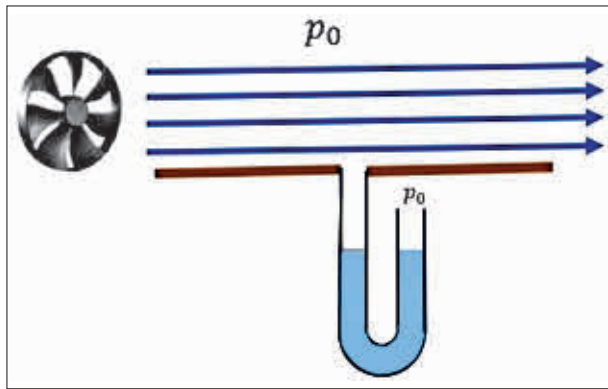


FIG. 8. Esperimento che dimostra come la pressione di un flusso sia la stessa dell'atmosfera attraverso cui si propaga. Consideriamo una superficie estesa (vista "di taglio" nella figura e rappresentata dai segmenti marroni) con un foro in comunicazione con un tubo a forma di U contenente dell'acqua. La pressione nei due rami del tubo è pari a quella atmosferica p_0 . Il livello dell'acqua è pertanto lo stesso in entrambi i rami. Se ora produciamo un flusso d'aria che "scivoli" lungo la superficie, la pressione nel ramo del tubo collegato al foro diventa uguale a quella del flusso. Se quest'ultima fosse inferiore a p_0 , l'acqua tenderebbe a salire lungo il ramo collegato al foro. Questo tuttavia non accade, a dimostrazione del fatto che la pressione del flusso è pari a p_0 .

di flusso diverse, a meno che non abbiano tutte un'unica origine fisica e valga per tutte, quindi, lo stesso valore della costante c nell'eq. (1). Nel caso del ventilatore in FIG. 5, per esempio, sarebbe sbagliato sostenere che la pressione della corrente è inferiore a quella dell'aria dell'ambiente p_0 sulla base del fatto che quest'ultima ha $v = 0$. La maggiore velocità del flusso è dovuta all'azione del ventilatore e non va a scapito della sua pressione che si mantiene circa uguale a quella ambiente. Se così non fosse la maggiore pressione ambiente "strozzerebbe" il getto che non avrebbe modo di propagarsi. La FIG. 8 illustra un semplice esperimento che dimostra come la pressione del getto sia circa la stessa dell'atmosfera circostante.

In base all'equivoco appena descritto, spesso il principio di Bernoulli viene utilizzato a sproposito al posto dell'effetto Coandă per spiegare alcuni fenomeni fisici. Il più semplice di questi si verifica

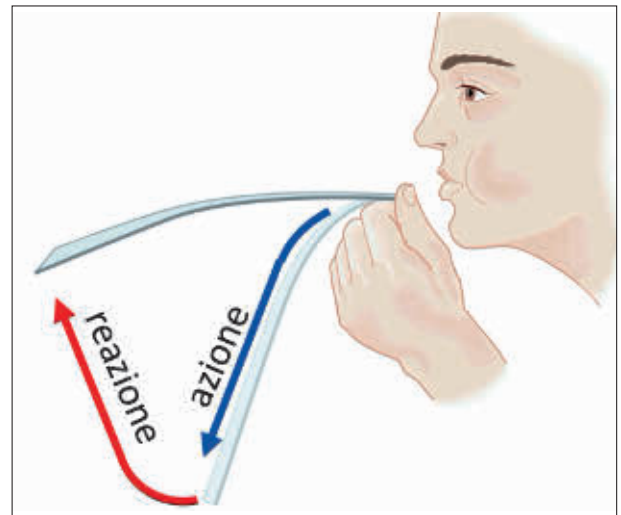


FIG. 9. Sollevamento di un foglio di carta ottenuto soffiando sopra di esso. Questo risultato non è dovuto all'equazione di Bernoulli ma all'effetto Coandă e al principio di azione e reazione (si veda il testo).

quando si soffia su un foglio di carta una cui estremità è tenuta vicino al labbro inferiore della bocca. Il foglio è incurvato verso il basso, ma se soffiato orizzontalmente tende a sollevarsi (FIG. 9). Questo viene generalmente spiegato sottolineando che il getto, per via della sua velocità, ha una pressione inferiore a quella ambiente per il principio di Bernoulli e quindi la pressione dell'aria sottostante il foglio prevale e il foglio si solleva. Questa spiegazione è erronea perché, per quanto discusso più sopra, il getto d'aria che esce dalla bocca ha una pressione uguale a quella ambiente. La riprova che è sbagliato invocare il principio di Bernoulli la si ottiene semplicemente chinandosi in maniera che il foglio penda verticalmente in tutta la sua lunghezza. In questo caso soffiare verso il basso parallelamente al foglio non lo farà muovere. Il sollevamento in realtà avviene perché il getto segue la curvatura del foglio per effetto Coandă e deflette verso il basso; per il principio di azione e reazione il foglio si solleva verso l'alto.

Un altro semplice esempio il cui andamento è generalmente (ed erroneamente) attribuito al principio di Bernoulli è il seguente. Consideriamo due lattine vuote di una qualsiasi bevanda poste a breve distanza e produciamo un flusso d'aria (p.e. con un asciugacapelli o soffiando con una cannuccia) tra le due (FIG. 10a). Le due lattine si avvicineranno fino a toccarsi. La spiegazione che spesso viene data è che il flusso, a causa della sua velocità, ha una pressione inferiore a quella ambiente per via del principio di Bernoulli, e l'aria circostante è pertanto in grado di spingere le lattine una contro l'altra. Questa

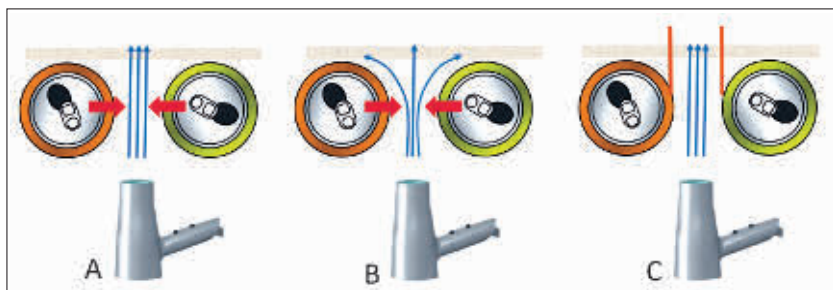


FIG. 10. a) Illustrazione di due lattine poste a breve distanza tra le quali viene fatto passare un flusso d'aria tramite un asciugacapelli. b) Parte delle linee di flusso (freccie azzurre) del "jet" seguono in parte la curvatura delle lattine per effetto Coandă. c) Alle lattine sono applicati due cartoncini (indicati da linee marroni) per contrastare l'effetto Coandă e forzare le linee di flusso a seguire un andamento rettilineo. Le frecce rosse indicano lo spostamento dei barattoli a causa del flusso d'aria secondo i sostenitori della spiegazione basata sull'equazione di Bernoulli (a) o sull'effetto Coandă (b) (si veda il testo). I segmenti in alto rappresentano un leggero rilievo (un righello, il bordo di un quaderno, ecc.) atto ad impedire che i barattoli si spostino in avanti a causa del flusso.

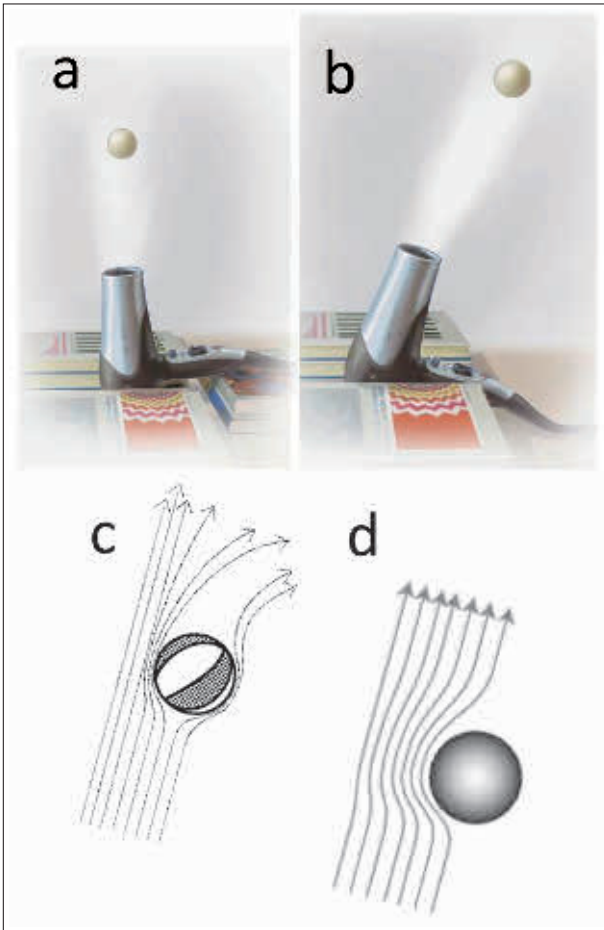


FIG. 11. a) una pallina da pingpong è sostenuta a mezz'aria dal getto verticale di un asciugacapelli. b) La pallina tende a rimanere all'interno del getto anche quando quest'ultimo è inclinato e ci si aspetterebbe che la pallina cada in terra a causa della gravità. c) Spiegazione (corretta) del fenomeno. Quando la pallina si avvicina al bordo del getto, una parte di questo devia verso destra per effetto Coandă e la pallina, per reazione, spinge verso sinistra rimanendo "incollata" al getto. d) Spiegazione (sbagliata): per il principio di Bernoulli la pressione del getto è inferiore a quella ambiente che rappresenta un "argine" per la pallina.

spiegazione, tuttavia, può essere facilmente confutata applicando lungo ciascuna lattina un rettangolo di cartoncino rigido circa della stessa altezza delle lattine e disponendo quest'ultime in maniera che i due cartoncini siano paralleli e formino una sorta di canale (FIG. 10c). Il passaggio del flusso d'aria questa volta produrrà un effetto trascurabile. Le due lattine, dunque, non si avvicinano a causa del principio di Bernoulli, ma per via dell'effetto Coandă. In assenza dei cartoni, infatti, il flusso segue la curvatura delle due lattine provocando una loro reazione in senso opposto, e causandone così l'avvicinamento (FIG. 10b). La presenza dei cartoni, invece, inibisce l'effetto Coandă e le lattine non si muovono.

Vi sono altri esempi in cui il principio di Bernoulli viene scorrettamente evocato a scapito dell'effetto Coandă. Si consideri una pallina da pingpong fatta fluttuare in aria tramite il getto di un asciugacapelli. Quest'ultimo è tenuto in basso con il getto diretto verso l'alto verticalmente. Naturalmente l'intensità del getto diminuisce con la distanza dall'asciugaca-

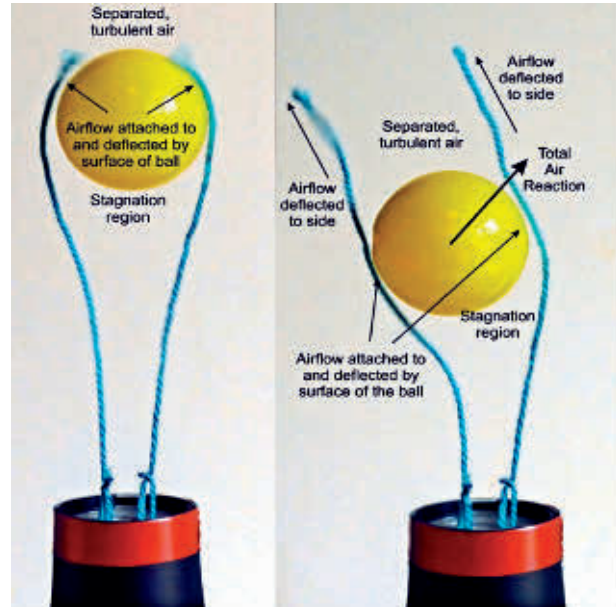


FIG. 12. Espediente casalingo per evidenziare nei pressi di una pallina da pingpong l'andamento delle linee di flusso generate da un asciugacapelli. Due fili sottili vengono applicati all'uscita dell'asciugacapelli. Questi fili seguono ed evidenziano l'andamento delle linee di flusso.

PELLI. Se poniamo una pallina nel getto essa si posiziona ad un'altezza in cui il suo peso è pareggiato dalla forza del getto stesso (FIG. 11a), "ballando" un poco su e giù a causa delle turbolenze. Sorprendentemente, se ora ruotiamo l'asciugacapelli in modo che il getto segua una direzione diagonale, la pallina rimane intrappolata nel flusso senza cadere in terra, come invece ci si aspetterebbe (FIG. 11b). La spiegazione più popolare (quasi unanime) è attribuita al principio di Bernoulli (FIG. 11d). Il flusso avrebbe una pressione minore di quella ambiente che quindi costituirebbe una barriera per la fuoriuscita della pallina. Questa interpretazione, come abbiamo già mostrato, è errorea. La spiegazione è invece data ancora una volta dall'effetto Coandă. Si riproduce infatti una condizione simile a quella del cucchiaio discussa più sopra. Quando la pallina si sposta di lato a causa della gravità, parte del flusso centrale che le passa accanto viene deviato lateralmente e la pallina, per il principio di azione e reazione, rimane "incollata" al getto (FIG. 11c). Per visualizzare il comportamento delle linee di flusso vicino alla pallina è sufficiente applicare due fili leggeri all'uscita dell'asciugacapelli. I fili si sollevano seguendo le linee di flusso. Come mostrato in FIG. 12, i fili contornano la pallina in maniera simmetrica quando quest'ultima è al centro del flusso, ma deviano quando essa è spostata lateralmente. Dal momento che la pallina è leggera, è sufficiente che solo una piccola parte del flusso defletta, mentre la maggior parte prosegue normalmente.

Un esempio ancora più esplicito dell'efficacia dell'effetto Coandă è dato da una palla o un disco sostenuti in aria da un getto d'acqua. In particolare, come si nota in FIG. 13, il disco non si assesta in cima



FIG. 13. Disco mantenuto fluttuante ad una certa altezza da un getto d'acqua verticale grazie all'effetto Coandă. Il getto non colpisce il disco alla base ma lateralmente, provocandone la rotazione (freccia verde). L'acqua segue il bordo del disco per un certo tratto, e poi viene scagliata verso destra (freccia gialla). Per reazione il disco spinge verso il getto (freccia rossa) rimanendovi "aderente". Versioni animate di questo esperimento si possono trovare sul web.

al getto, ma lateralmente. Il getto, infatti, complice anche la rotazione della ruota, devia fortemente dalla sua traiettoria inducendone nella ruota una reazione opposta sufficiente a mantenerla aderente al getto stesso.

Concludiamo questa (incompleta) rassegna di fenomeni quotidiani dovuti all'interazione di oggetti con fluidi descrivendo l'effetto Magnus. Questo effetto si realizza quando un cilindro o una sfera ruotanti su sé stessi subiscono una forza laterale ortogonale all'asse di rotazione mentre si muovono relativamente ad un fluido. Benché il suo nome possa essere sconosciuto ai più, le conseguenze di questo effetto sono note a tutti gli appassionati di calcio (o di altri sport che prevedano l'utilizzo di una palla quali, ad esempio, tennis, pingpong, golf). Si tratta del cosiddetto "tiro ad effetto" (FIG. 14a) con cui i calciatori comunicano al pallone una traiettoria arcuata invece che rettilinea.⁴ Anche in questo caso alcune fonti attribuiscono la causa dell'effetto Magnus al principio di Bernoulli ed altre all'effetto Coandă. La FIG. 14b illustra il primo caso; essa raffigura la situazione dal punto di vista di un osservatore che si muove insieme al pallone. In questo sistema di riferimento il pallone (che in realtà si muove verso sinistra) appare fermo e l'atmosfera lo "investe" muovendosi verso destra. Il pallone è inoltre assunto ruotare in senso orario. In assenza di viscosità non ci sarebbe alcuna interazione della palla con l'aria.⁵

⁴ Naturalmente un pallone, come qualunque altro oggetto, una volta lanciato in aria compie una traiettoria parabolica. Il termine "rettilinea" utilizzato nel testo fa riferimento alla componente orizzontale del moto, l'unica ad essere interessata dall'effetto Magnus (se l'asse di rotazione è ortogonale al terreno).

⁵ È noto che una pallina immersa in un flusso ideale privo di viscosità non subisce alcuna spinta e rimane ferma. Questa condizione va sotto il nome di paradosso di d'Alembert dal nome del matematico (e non solo) francese Jean-Baptiste d'Alembert (1717-1783) che per primo lo evidenziò.

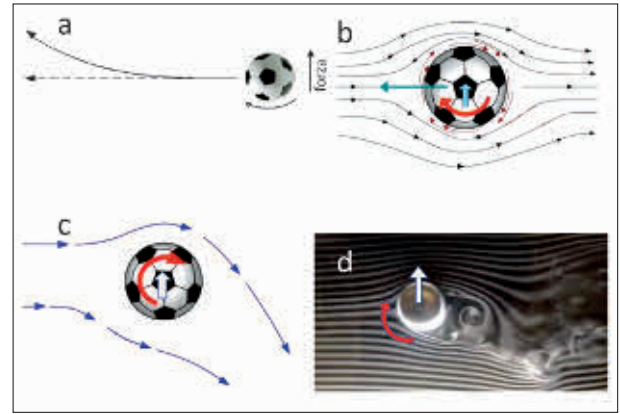


FIG. 14. a) "Tiro ad effetto" di un pallone rotante che segue una traiettoria curva per effetto Magnus. b) Spiegazione in base al principio di Bernoulli: le velocità aumentano lungo le linee di flusso che lambiscono la parte superiore del pallone e si riducono lungo le linee che sfiorano la parte inferiore; questa differenza di velocità implica una differenza di pressione che spinge il pallone lateralmente (la freccia orizzontale indica la velocità del pallone nel riferimento in cui l'atmosfera è ferma). c) Spiegazione basata sull'effetto Coandă: la rotazione produce una asimmetria nell'aggiramento del flusso attorno al pallone provocando una deviazione del flusso stesso e una spinta in senso opposto da parte del pallone. d) Linee di flusso in una galleria del vento interagenti con un cilindro rotante.

La viscosità è tuttavia presente, e la sua azione è tale per cui la velocità dell'aria aumenta lungo le linee di flusso che sfiorano la parte di superficie della palla che ruota in modo concorde alla corrente; per l'equazione di Bernoulli, allora, la pressione diminuisce in questa regione. Al contrario, la superficie che si muove contro la corrente tende a rallentare la corrente stessa, e la pressione aumenta. Tra i due lati della palla si crea allora una differenza di pressione che induce la sfera a deflettere dalla traiettoria rettilinea.

Altri autori, tuttavia, ritengono che l'effetto Magnus sia un'ulteriore manifestazione dell'effetto Coandă. Le linee di flusso tangenti il lato del pallone che si muove nella stessa direzione dell'aria vengono, per così dire, "agganciate" da quest'ultimo a causa della viscosità e facilitate nel loro moto di aggiramento fino al momento del distacco (si ricordi l'esempio della pallina di pingpong o del disco rotante). Il distacco è invece anticipato nel lato opposto, dove il moto del flusso è contrastato dalla rotazione del pallone (approfondiremo questo punto nel livello avanzato). Questa asimmetria produce una deviazione netta della corrente e il pallone subisce una forza nella direzione opposta per via della terza legge di Newton (FIG. 14c). La deviazione della scia è evidente nel fotogramma di FIG. 14d che mostra l'andamento delle linee di flusso (evidenziate da filamenti di fumo opportunamente immesso) in una galleria del vento dove è presente un cilindro in rotazione. In conclusione, pur non potendo escludere un contributo da parte dell'equazione di Bernoulli, l'effetto Magnus appare principalmente dovuto all'effetto Coandă.

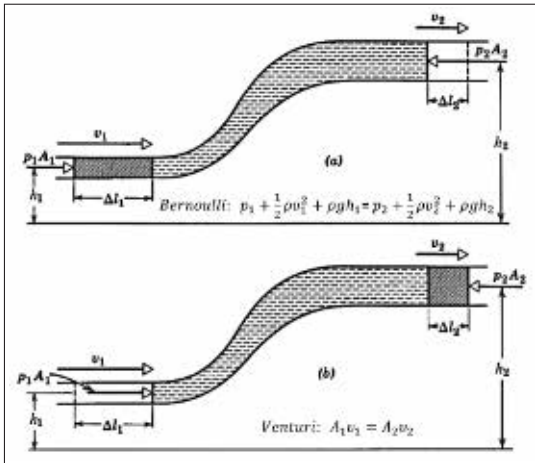


FIG. 15. Il moto di un fluido lungo un tubo di flusso conserva la sua energia durante il percorso secondo la formula di Bernoulli riportata nel pannello a). La stessa quantità di materia che entra nel punto 1 (evidenziata dalla regione in grigio scuro nel pannello a) deve uscire in 2 (evidenziata in grigio scuro nel pannello b). Questa conservazione della massa è esplicitata dall'equazione di Venturi riportata nel pannello b). In entrambi i pannelli A rappresenta l'area della sezione del flusso.

Consideriamo una particella di fluido² che, per semplicità, immaginiamo cubica con lato unitario (p.e. 1 mm) e di conseguenza volume unitario $V = 1 \text{ mm}^3$. La sua massa sarà allora, in opportune unità, $m = \rho V = \rho$. Come sappiamo, la pressione che il volumetto esercita sul gas circostante è data dai continui urti esercitati dalle molecole che lo compongono e che si muovono in maniera disordinata con una certa velocità media: maggiore è questa velocità, maggiore è la violenza degli urti, e maggiore è la pressione p . Quest'ultima può allora intendersi come una sorta di misura dell'energia interna del volumetto. Se poi il volumetto si muove con velocità v , esso acquisisce anche un'energia cinetica "ordinata" $0,5 \rho v^2$. Infine, la particella è in possesso di un'energia potenziale $\rho g h$, dove g è l'accelerazione di gravità (pari a 980 cm s^{-2}) e h è la sua altezza da terra. Il teorema di Bernoulli stabilisce che questi tre termini possono cambiare durante il tragitto della particella lungo la sua linea di flusso, ma la loro somma rimane costante (FIG. 15):

$$p + 0,5 \rho v^2 + \rho g h = \text{cost.} \quad (2)$$

In tutti gli esempi discussi in questa nota i flussi si mantengono sostanzialmente sempre alla stessa quota. Il termine di energia potenziale rimane dunque invariato e può essere inglobato nella costante presente nell'eq. (2). Questo giustifica la scrittura dell'eq. (1).

In parole, il teorema di Bernoulli esprime la conservazione dell'energia. Ma per essere valido devono valere le seguenti tre condizioni: 1) il flusso deve essere stazionario, ossia le linee di flusso non devono cambiare "forma" nel tempo, ma devono rimanere fisse come fossero binari; 2) il fluido deve essere

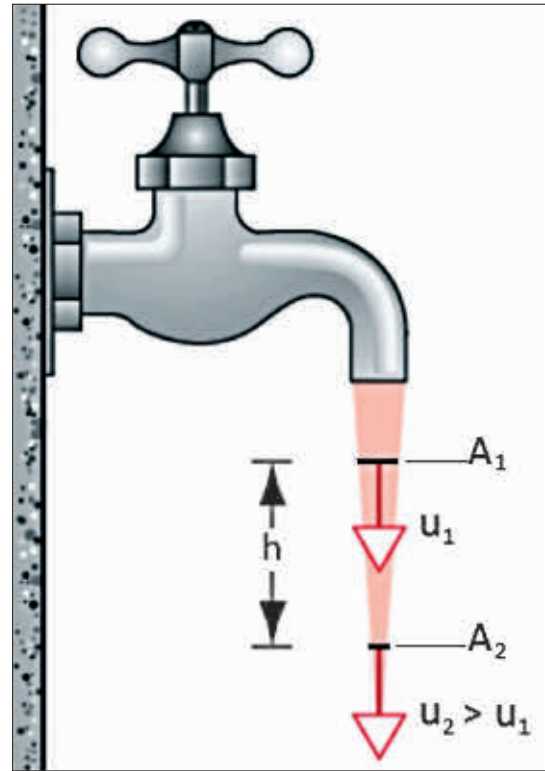


FIG. 16. Il restringimento di un flusso d'acqua da un rubinetto è dovuto all'effetto Venturi (si veda il testo).

inviscido, ossia privo di viscosità, per evitare dissipazione di energia dovuta all'attrito; 3) il fluido deve essere incompressibile, ossia la densità deve rimanere costante. Nel caso di un gas, in verità, ogni suo elemento durante il moto interagisce con quelli circostanti comprimendoli o dilatandoli, ma si può dimostrare che questi effetti sono trascurabili per velocità non superiori ad un terzo della velocità del suono (pari, per l'aria, a circa 340 m/s). Dunque, entro questo limite, anche un gas può essere considerato incompressibile.

Se il teorema di Bernoulli esprime la conservazione dell'energia, la conservazione della massa è rappresentata dal teorema di Venturi (che abbiamo già incontrato nel livello base a proposito dello spruzzino di profumo). Immaginiamo un flusso di fluido che scorre in un tubo che vada via via restringendosi. Dal momento che il moto è stazionario, la massa del fluido nel tubo deve rimanere costante, e perciò la massa in uscita nel punto 2 (la cui sezione ha area A_2) deve venire rimpiazzata da quella in entrata nel punto 1 la cui sezione è A_1 . Qui la massa m_1 che entra durante l'intervallo di tempo Δt è pari a ρV_1 , dove il volume (cilindrico) V_1 è dato da $A_1 \Delta l_1 = A_1 v_1 \Delta t$ (FIG. 15). In conclusione, la massa in entrata è $m_1 = \rho A_1 v_1 \Delta t$ ed un'analoga formula vale per la massa in uscita m_2 . Dall'uguaglianza $m_1 = m_2$ otteniamo l'equazione di Venturi

$$A_1 v_1 = A_2 v_2. \quad (3)$$

Una semplicissima verifica del teorema di Venturi la possiamo ottenere lasciando scorrere un “filo” d’acqua da un rubinetto di casa (FIG. 16). Esso si assottiglia verso il basso perché l’acqua, scendendo, aumenta la sua velocità e la sezione del flusso deve diminuire in base all’eq. (3).

Passiamo ora ad approfondire un aspetto dell’effetto Coandă, ossia quanto efficientemente un flusso segue la curvatura della superficie lungo cui scorre senza staccarsene. Consideriamo dapprima il caso di un getto liquido che scorre lungo una superficie cilindrica – come illustrato in FIG. (3) – ricorrendo ad una semplice analogia. Immaginiamo un’automobile che stia percorrendo una curva. Se la velocità v è eccessiva o la curva è troppo stretta l’automobile va presto fuori strada. Anche lo stato degli pneumatici gioca un suo ruolo: se sono lisci e consumati favoriranno l’uscita di strada. Fuor di metafora, se versiamo velocemente del vino esso si dirigerà ordinatamente dalla bottiglia al bicchiere perché l’adesione (gli pneumatici) non riuscirà a trattenerlo. Ma se la bottiglia è poco inclinata il vino sarà in grado di “curvare” attorno all’orlo del collo della bottiglia (in base all’effetto Coandă) e scorrere lungo la sua parete esterna sgocciolando.⁶ Per evitare questo inconveniente viene utilizzato il “salvagocce”, un tubicino metallico molto sottile che termina a punta e che viene applicato all’uscita della bottiglia; questo beccuccio rende estremamente difficile al vino operare una “curva” così stretta da rimanere aderente alla parete esterna (FIG. 17).

In generale, i flussi che percorrono una superficie cilindrica sono destinati, prima o poi, a staccarsene. Il motivo di tale distacco è complesso ed è legato all’innesco di turbolenze. Noi qui ci limiteremo a dire che gli strati più vicini alla superficie tendono a rallentare maggiormente e sempre più man mano che procedono a causa della resistenza di attrito. Si forma quindi una regione sempre più spessa che agisce da ostacolo al flusso retrostante che continua a giungere. Quest’ultimo dunque deve “scavalcare” l’ostacolo per poter proseguire, e così facendo si distacca dalla superficie. Un trattamento semplificato delle equazioni idrodinamiche porta alla seguente relazione:

$$p_s = p_0 - \frac{\rho v^2 a}{R}, \quad (4)$$

dove p_0 e p_s sono, rispettivamente, la pressione atmosferica e la pressione al contatto con la superfi-

⁶ Significativamente, nella letteratura anglosassone questo fenomeno è indicato come “teapot effect” (effetto teiera) mentre, nel rispetto delle nostre abitudini mediterranee, noi abbiamo preferito un esempio con una bottiglia di vino.

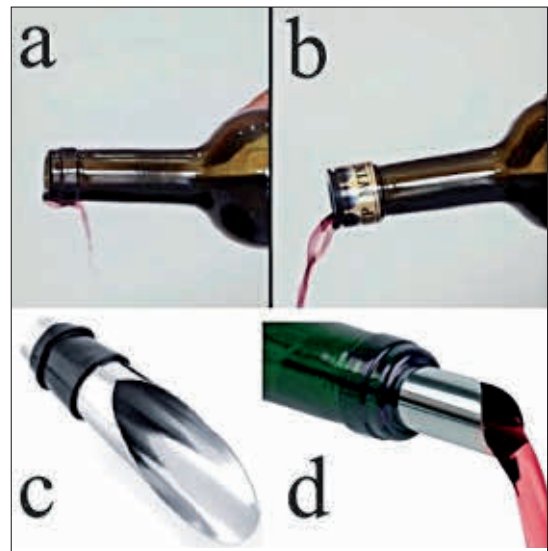


FIG. 17. a) Se versiamo il vino lentamente, esso ha il tempo di girare attorno all’orlo della bottiglia per effetto Coandă per poi scivolare lungo la parete esterna e sgocciolare via. b) Un aumento di velocità del getto evita questo inconveniente che può essere scongiurato anche applicando un salvagocce (pannelli c e d).

cie. R e a rappresentano il raggio del cilindro e il diametro iniziale del getto. Come sappiamo dall’effetto Coandă, p_s è inferiore a p_0 e il flusso rimane schiacciato contro la superficie. Tuttavia, quando la velocità degli strati prossimi alla superficie rallentano fin quasi a fermarsi, abbiamo $p_s \approx p_0$ e il getto si stacca dalla superficie. Se invece v è elevato, possiamo ottenere $p_s < 0$ che non ha, evidentemente, senso fisico. Esso sta semplicemente a significare che l’eq. (4) perde di significato perché il flusso aderisce assai brevemente (oppure affatto) alla superficie. Anche il rapporto a/R gioca un ruolo rilevante. Se $a/R \ll 1$ il flusso è molto “sottile” e “vede” la curvatura della superficie abbastanza piccola da poter essere seguita agevolmente ritardando il momento del distacco. Nel caso contrario il distacco è anticipato. Dunque, l’eq. (4) racchiude tra l’altro tutte le caratteristiche principali del teapot effect.

Fin qui abbiamo trascurato il “gioco d’aria” forse più importante, ossia il volo aereo. Alcuni lo attribuiscono al principio di Bernoulli, altri fanno riferimento all’effetto Coandă. In realtà il primo è trascurabile e il secondo è assente. Non possiamo affrontare questo problema in questa sede perché lo spazio a disposizione è terminato, ma speriamo di aver istillato nel lettore una curiosità sufficiente a spingerlo ad approfondire l’argomento per proprio conto.

Annibale D’Ercole si è laureato in Fisica all’Università di Roma “La Sapienza”. Astronomo associato presso l’INAF · Osservatorio di astrofisica e scienza dello spazio di Bologna (OAS), si occupa di simulazioni numeriche di idrodinamica, applicate alle nebulose e al gas interstellare delle galassie. È autore di numerosi articoli divulgativi pubblicati presso questa e altre riviste.