

All'Ames Fluid
Mechanics Laboratory della
NASA, linee di flusso
di un pigmento in un canale
d'acqua interagiscono
con un modello di aereo.

FISICA

L'enigma della portanza

Ancora non abbiamo una teoria completa
che spieghi perché gli aerei stanno in aria

di Ed Regis

N

el dicembre 2003, per commemorare il centenario del primo volo dei fratelli Wright, il «New York Times» ha pubblicato un articolo intitolato *Staying Aloft; What Does Keep Them Up There?* (Rimanere in alto; che cosa li tiene lassù?). Il pezzo era incentrato su una semplice domanda: che cosa tiene in volo gli

aerei? Per rispondere, il giornale si era rivolto a John D. Anderson, Jr., curatore specializzato in aerodinamica al National Air and Space Museum e autore di diversi testi sull'argomento. La risposta di Anderson, però, era stata che ancora non tutti concordano su che cosa generi la forza aerodinamica nota come portanza. «Non c'è una spiegazione semplice, di una sola riga», aveva detto. Si danno varie risposte, a volte con «fervore religioso».

A più di 15 anni da quella dichiarazione vengono fornite ancora spiegazioni diverse su che cosa generi la portanza, ognuna con la propria schiera di accessi difensori. A questo punto della storia del volo, la situazione è curiosa. Dopo tutto i processi naturali dell'evoluzione, senza una mente a guidarli, procedendo a caso e senza conoscere la fisica, hanno risolto eoni fa il problema meccanico della portanza aerodinamica per gli uccelli in volo. Perché è così difficile per gli scienziati spiegare che cosa tiene in volo gli uccelli, nonché gli aerei di linea?

Alla confusione si aggiunge il fatto che sono date spiegazioni sulla portanza a due diversi livelli di astrazione: quello tecnico e quello non tecnico. Sono complementari, non realmente contraddittori, ma hanno finalità diverse. Il primo costituisce una teoria strettamente matematica, fatta di equazioni, simboli, simulazioni al computer e numeri. In questo ambito non c'è veramente disaccordo su quali siano le equazioni appropriate o le loro soluzioni; l'obiettivo della teoria matematica tecnica è formulare previsioni accurate e proiezioni utili agli ingegneri aeronautici impegnati nella complessa progettazione di aerei.

Da sole, però, le equazioni non sono spiegazioni, e non lo sono nemmeno le loro soluzioni. C'è un secondo livello di analisi, non tecnico, che ha lo scopo di fornirci una spiegazione fisica, in termini quotidiani, della portanza. L'obiettivo dell'approccio non tecnico è darci una comprensione intuitiva delle forze e dei fattori reali che sono all'opera nel tenere un aereo in volo. Questo ap-

Ed Regis è autore di dieci libri di argomento scientifico, tra cui *Monsters: The Hindenburg Disaster and the Birth of Pathological Technology* (Basic Books, 2015). Ha anche 1000 ore di volo come pilota privato.



proccio non è fatto di numeri e di equazioni, bensì di concetti e principi familiari e comprensibili ai non specialisti.

È a questo secondo livello non tecnico che ci sono le controversie. In genere per spiegare la portanza sono proposte due diverse teorie, e i sostenitori delle due fazioni sostengono i rispettivi punti di vista in articoli, libri e siti web. Il problema è che ognuna di queste due teorie non tecniche è di per sé corretta, ma nessuna delle due è una spiegazione completa della portanza, che fornisca una descrizione completa di tutte le forze, fattori e condizioni fisiche fondamentali che costituiscono la portanza aerodinamica, senza lasciare nessuna questione in sospeso, inspiegata o trascurata. Può esistere una simile teoria completa?

Due teorie in competizione

La spiegazione di gran lunga più popolare della portanza è il teorema di Bernoulli, un principio individuato dal matematico svizzero Daniel Bernoulli nel suo trattato del 1738 *Hydrodynamica*. Bernoulli proveniva da una famiglia di matematici; suo padre Johann diede importanti contributi al calcolo infinitesimale e suo zio Jakob coniò il termine «integrale». Molti contributi di Daniel Bernoulli hanno a che fare con i fluidi: l'aria è un fluido, e il teorema che porta il suo nome è comunemente espresso in termini fluidodinamici. In parole povere, la legge di Bernoulli dice che la pressione di un fluido diminuisce quando ne aumenta la velocità, e viceversa.

IN BREVE

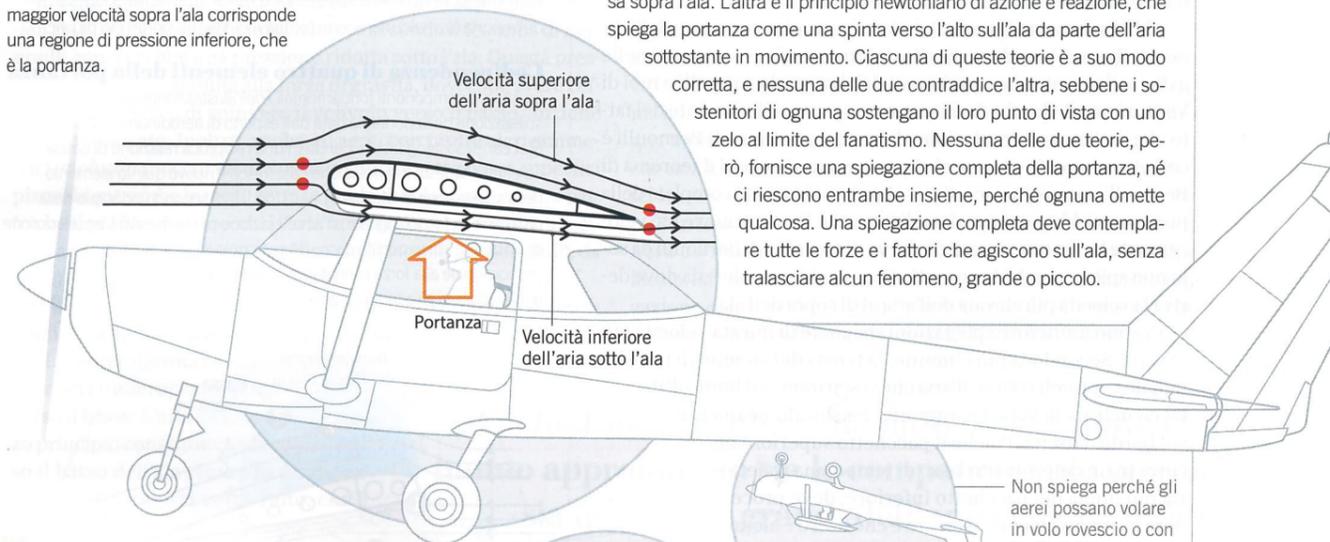
A livello strettamente matematico, gli ingegneri sanno come progettare aerei che rimangono in volo, ma le equazioni non spiegano perché si verifica il fenomeno della portanza aerodinamica.

Ci sono due teorie in competizione che descrivono le forze e i fattori in gioco nella portanza; entrambe spiegano questo fenomeno in modo incompleto.

Di recente gli esperti di aerodinamica hanno tentato di chiarire la questione, tuttavia continuano a non trovare un punto di accordo comune.

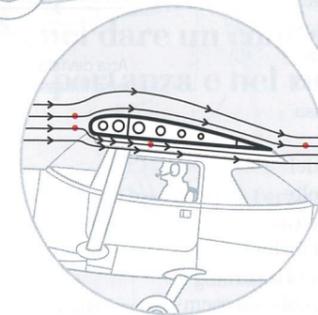
Il teorema di Bernoulli

Applicato a un'ala di aeroplano – tecnicamente chiamata profilo aerodinamico – il teorema di Bernoulli tenta di spiegare la portanza come conseguenza della curvatura della superficie superiore dell'ala. L'idea è che, per via di questa curvatura, l'aria che si muove lungo la parte superiore dell'ala proceda più velocemente dell'aria che passa lungo la superficie inferiore dell'ala, che è piatta. Il teorema di Bernoulli afferma che alla maggior velocità sopra l'ala corrisponde una regione di pressione inferiore, che è la portanza.



Ma...

Sebbene il teorema di Bernoulli sia sostanzialmente corretto, ci sono vari motivi per cui questo principio non costituisce una spiegazione completa della portanza. È un dato di fatto empirico che l'aria si muove più velocemente lungo una superficie curva, ma il teorema da solo non spiega perché ciò accada né perché la velocità più alta sopra l'ala provochi una pressione più bassa. E, parlando da un punto di vista pratico, un aereo la cui ala ha la superficie superiore curva – o anche superfici piatte sia sopra che sotto – è in grado di volare invertito, purché il profilo alare incontri l'aria in arrivo a un angolo appropriato.



Non spiega perché gli aerei possano volare in volo rovescio o con le ali piatte.

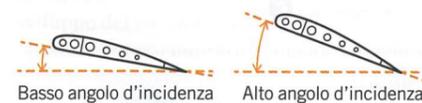
Non chiarisce del tutto la zona di bassa pressione sopra l'ala.



Non spiega perché due particelle debbano raggiungere contemporaneamente il bordo d'uscita; in realtà l'aria che passa sopra si muove persino più velocemente della particella «accoppiata».

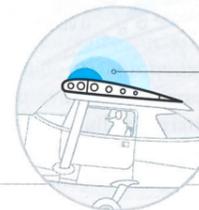
Il terzo principio della dinamica

L'aria ha massa. Quindi il terzo principio della dinamica formulato da Newton direbbe che la spinta verso il basso data dall'ala si traduce in una spinta uguale e contraria verso l'alto. Questa spiegazione newtoniana della portanza si applica ad ali di qualsiasi forma, curve o piatte, simmetriche o meno, e vale per gli aerei che volano invertiti o normalmente (il fattore essenziale è un angolo di incidenza adeguato). Per questi motivi, è una spiegazione della portanza più completa e universalmente applicabile di quella di Bernoulli.

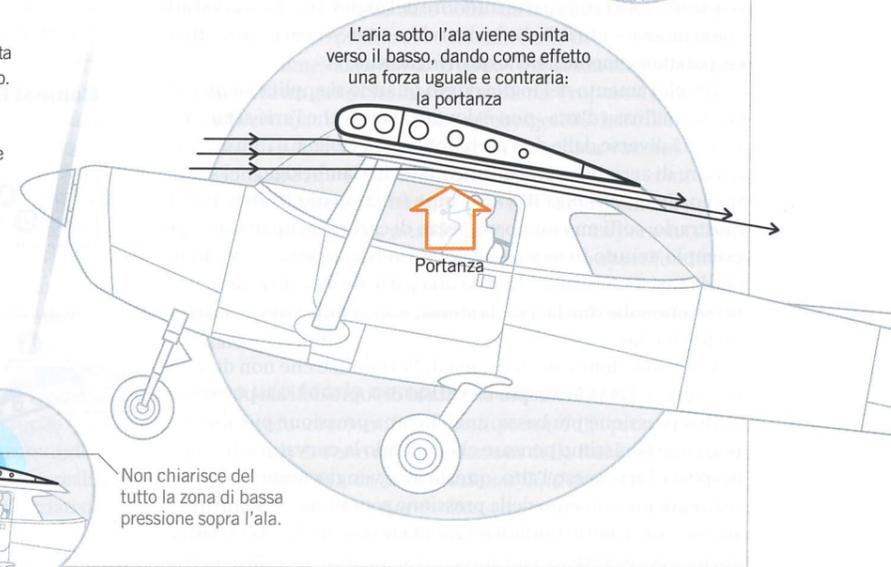


Ma...

Preso da solo, il principio di azione e reazione non riesce a spiegare la pressione più bassa sopra l'ala, che esiste in quella regione indipendentemente dal fatto che il profilo aerodinamico sia incurvato o meno.



Non chiarisce del tutto la zona di bassa pressione sopra l'ala.

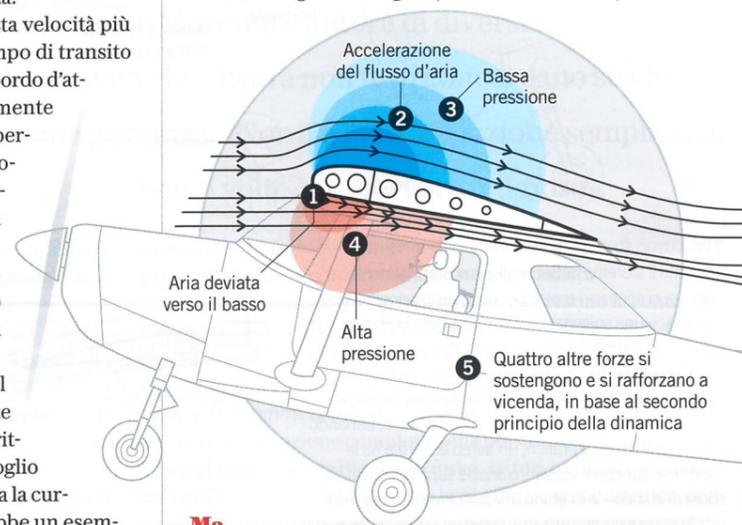


Il quinto elemento

Gli approcci scientifici alla progettazione degli aeromobili si basano su simulazioni di fluidodinamica e su equazioni che tengono pienamente conto dell'effettiva viscosità dell'aria reale. Sebbene non abbiamo ancora un'unica spiegazione fisica qualitativa soddisfacente della portanza, alcuni recenti tentativi ci stanno portando più vicino.

Codipendenza di quattro elementi della portanza

Le quattro componenti fondamentali (nell'illustrazione) secondo la spiegazione della portanza data dall'esperto di aerodinamica Doug McLean si sostengono a vicenda in una reciproca relazione di causa ed effetto. Questa interrelazione costituisce il nuovo quinto elemento della spiegazione di McLean, che si fonda sul secondo principio della dinamica: la forza è uguale all'accelerazione per la massa. L'accelerazione di un corpo - o, in questo caso, di un piccolo volume di fluido - è proporzionale alla forza esercitata su di esso. L'interazione di ogni volume d'aria con tutti gli altri dà luogo ai quattro elementi e rende possibile il volo.

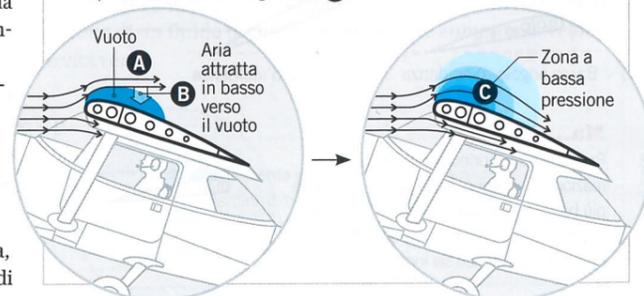


Ma...

Sebbene McLean affermi che la pressione ridotta sopra e aumentata sotto l'ala risultano dal fatto che il profilo alare è «completamente circondato da aria in movimento», questo non spiega come si formi inizialmente la bassa pressione in alto.

Come si forma la bassa pressione sopra l'ala

Mark Drela, esperto di fluidodinamica, ha cercato di affrontare quello che sfuggì a Newton e a Bernoulli: come nasce la zona di bassa pressione, o vuoto parziale, sopra l'ala. L'aria sopra l'ala fluisce momentaneamente all'indietro (A), formando un vuoto; questo vuoto tira con forza l'aria verso il basso (B), riempiendo quindi ed eliminando per la maggior parte - ma non del tutto - il vuoto. Rimane solo il vuoto sufficiente per spingere l'aria nel percorso curvo che segue l'ala (C).



Il teorema di Bernoulli tenta di spiegare la portanza come conseguenza della curvatura della superficie superiore di un profilo aerodinamico, il nome tecnico di un'ala di aeroplano. Secondo questa idea, la forma curva fa sì che l'aria che passa lungo la parte superiore dell'ala si muova più velocemente di quella che passa lungo la superficie inferiore, che è piatta. Il teorema di Bernoulli afferma che la maggior velocità sopra l'ala è associata a una regione di pressione più bassa, che è la portanza.

Abbiamo enormi quantità di dati empirici provenienti dalle linee di flusso (linee di particelle di fumo) negli esperimenti nelle gallerie del vento, da esperimenti di laboratorio su ugelli e tubi di Venturi e così via, che forniscono una prova schiacciante del fatto che, nella sua formulazione di base, il principio di Bernoulli è corretto e vero. Ci sono però diverse ragioni per cui il teorema di Bernoulli non costituisce di per sé una spiegazione completa della portanza. Sebbene sia un dato di fatto che l'aria si muove più velocemente lungo una superficie curva, il teorema di Bernoulli da solo non spiega perché le cose stiano così, cioè non dice da dove deriva la velocità più elevata dell'aria al di sopra dell'ala.

Ci sono numerose spiegazioni sbagliate di questa velocità più elevata. Secondo la più comune, la teoria del «tempo di transito uguale», i piccoli volumi d'aria che si separano sul bordo d'attacco dell'ala devono ricongiungersi simultaneamente sul bordo d'uscita. Poiché il pacchetto superiore percorre in un determinato lasso di tempo una traiettoria più lunga del pacchetto inferiore, deve procedere più velocemente. L'errore è che non c'è alcun motivo fisico per cui i due pacchetti debbano raggiungere il bordo d'uscita simultaneamente. E infatti così non è: il fatto empirico è che l'aria in alto si muove molto più velocemente di quanto possa spiegare la teoria del tempo di transito uguale.

C'è anche una famigerata «dimostrazione» del principio di Bernoulli, che viene ripetuta in molte trattazioni divulgative, in video di YouTube e addirittura in qualche libro di testo. Si tratta di tenere un foglio di carta di taglio davanti alla bocca e di soffiare sopra la curva formata dal foglio. Il foglio si alza e questo sarebbe un esempio dell'effetto Bernoulli. Il risultato opposto dovrebbe verificarsi quando soffia sulla parte inferiore del foglio: la velocità dell'aria che si muove sotto il foglio lo dovrebbe tirare verso il basso. Invece, paradossalmente, anche qui il foglio sale.

Il sollevamento del foglio curvo quando si applica su una sua faccia un flusso d'aria «non è dovuto al fatto che l'aria si muove a velocità diverse dalle due parti», chiarisce Holger Babinsky, professore di aerodinamica all'Università di Cambridge, nel suo articolo *How Do Wings Work?* (Come funzionano le ali?). Per dimostrarlo, soffiare lungo un pezzo di carta non incurvato - per esempio, tenuto in modo che penda verticalmente - e vedremo che la carta non si muove né da una parte né dall'altra, perché «la pressione sulle due facce è la stessa, nonostante l'ovvia differenza di velocità».

Il secondo limite del teorema di Bernoulli è che non dice come o perché la velocità più elevata al di sopra dell'ala porti con sé una pressione più bassa, anziché una pressione più alta. Si potrebbe benissimo pensare che, quando la curvatura di un'ala sposta l'aria verso l'alto, questa aria venga compressa, con conseguente aumento della pressione sopra l'ala. Di solito questa sorta di «collo di bottiglia» rallenta le cose nella vita ordinaria, anziché accelerarle. Su un'autostrada, quando due o più corsie di

traffico si uniscono in una sola, le automobili non accelerano di certo; c'è invece un rallentamento di massa e forse anche un ingorgo. Le molecole d'aria che volano sopra un'ala non si comportano così, ma il teorema di Bernoulli non dice perché.

Il terzo problema ci dà la motivazione più decisiva per non considerare il teorema di Bernoulli come spiegazione completa della portanza: un aereo la cui ala ha la superficie superiore curva può benissimo volare capovolto. Nel volo rovescio la superficie curva dell'ala diventa la superficie inferiore, e secondo il teorema di Bernoulli genererebbe una pressione ridotta sotto l'ala. Questa pressione più bassa, aggiunta alla forza di gravità, dovrebbe avere l'effetto complessivo di spingere il velivolo verso il basso, anziché tenerlo sollevato. Inoltre, anche gli aerei con profili alari simmetrici, cioè con una curvatura uguale sopra e sotto o con superfici piane da entrambe le parti, sono in grado di volare capovolti, a patto che il profilo alare incontri l'aria in arrivo con un angolo di incidenza appropriato. Questo significa che il teorema di Bernoulli, da solo, non basta a spiegare questi fatti.

L'altra teoria della portanza si basa sul terzo principio della dinamica formulato da Isaac Newton, il principio di azione e reazione. La teoria afferma che un'ala mantiene in aria un aeroplano spingendo l'aria verso il basso. L'aria ha massa, e dal terzo principio consegue che la spinta verso il basso dell'ala risulta in una spinta uguale e opposta verso l'alto, che è la portanza. Questa spiegazione newtoniana vale per ali di qualsiasi forma, curve o piatte, simmetriche o meno, per aerei in volo diritto o rovescio. Inoltre le forze all'opera ci sono familiari dall'esperienza; per esempio quando sporgiamo una mano da un'auto in movimento e la incliniamo verso l'alto l'aria viene deviata verso il basso e la mano si alza. Per queste ragioni, il terzo principio della dinamica è una spiegazione della portanza più universale e generale rispetto al teorema di Bernoulli.

Ma, preso da solo, il principio di azione e reazione non riesce a spiegare la pressione inferiore al di sopra dell'ala, che esiste indipendentemente dal profilo alare ricurvo o no. È solo quando un aereo atterra e si ferma che la regione di pressione più bassa sopra l'ala viene meno, torna alla pressione ambiente e diventa uguale sopra e sotto. Ma finché un aereo vola questa regione di bassa pressione è un elemento ineludibile della portanza aerodinamica, e deve essere spiegata.

Basi storiche

Né Bernoulli né Newton cercavano di spiegare che cosa tenga in volo gli aerei, naturalmente, perché vissero molto prima dello sviluppo del volo meccanico. Le loro leggi e teorie sono state applicate al nuovo contesto da quando i fratelli Wright hanno volato, il che ha reso serio e pressante capire la portanza aerodinamica.

La maggior parte di queste spiegazioni teoriche provengono dall'Europa. Nei primi anni del Novecento diversi scienziati britannici proposero descrizioni tecniche e matematiche della portanza che trattavano l'aria come un fluido perfetto, quindi incompressibile e con viscosità nulla. Si trattava di ipotesi irrealistiche, ma forse comprensibili, considerando che gli scienziati dovevano affrontare il nuovo fenomeno del volo meccanico controllato e motorizzato. Inoltre queste ipotesi rendevano l'impianto mate-

matico più semplice e lineare di quanto non sarebbe stato diversamente, ma questa semplicità aveva un prezzo: per quanto le descrizioni dei profili alari che si muovono in gas ideali potessero avere successo dal punto di vista matematico, empiricamente rimanevano difettose.

In Germania, uno degli scienziati che si applicarono al problema della portanza fu niente meno che Albert Einstein. Nel 1916 pubblicò un breve articolo sulla rivista «Die Naturwissenschaften», intitolato *Elementare Theorie der Wasserwellen und des Fluges* (Teoria elementare delle onde dell'acqua e del volo), che cercava di spiegare come funzionasse la portanza delle ali delle macchine volanti e degli uccelli in volo. «Su queste domande regna molta oscurità», scriveva Einstein. «Infatti devo ammettere che non ho mai trovato una risposta semplice, nemmeno nella letteratura specializzata».

Einstein procedeva poi a dare una spiegazione che presupponeva un fluido incompressibile e privo di attrito, cioè un fluido ideale. Senza menzionare esplicitamente Bernoulli, dava una spiegazione coerente con il principio di Bernoulli affermando che la pressione del fluido è maggiore dove la velocità è minore, e vice-

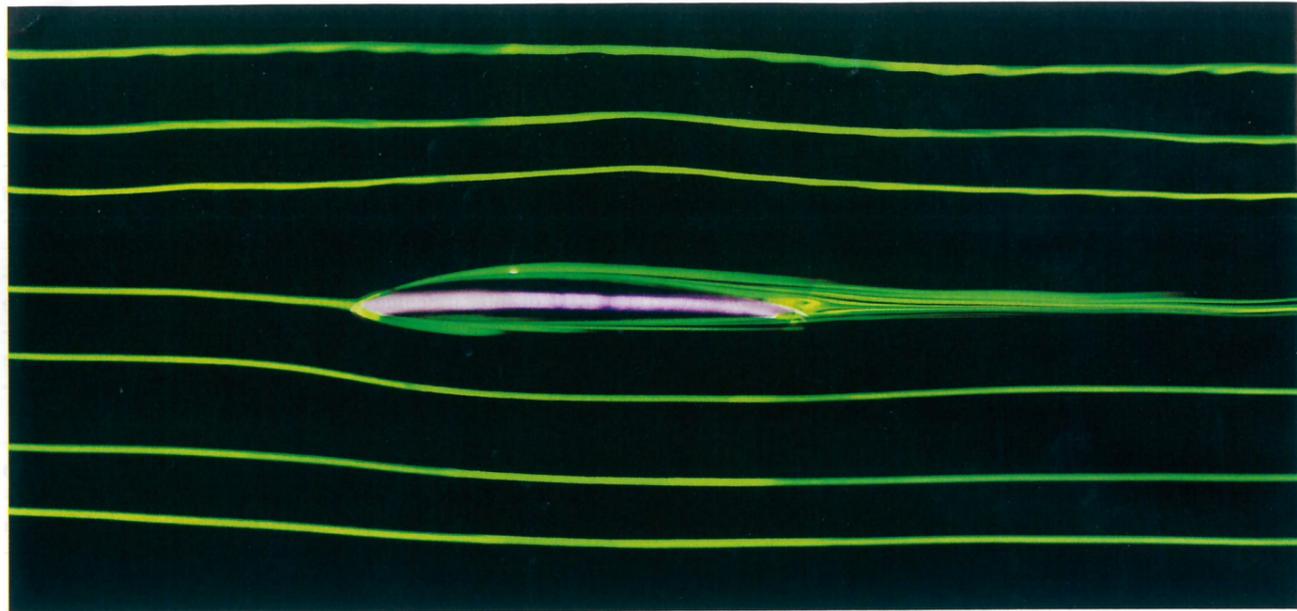
Anche Einstein, che ci ha dato teorie nuove che hanno approfondito sia le componenti più piccole sia quelle più grandi dell'universo, ha fallito nel dare un contributo alla comprensione della portanza e nel realizzare un profilo alare utile

versa. Per sfruttare queste differenze di pressione, Einstein proponeva un profilo alare con un rigonfiamento in alto in modo che la sagoma aumentasse la velocità del flusso d'aria al di sopra del rigonfiamento e quindi vi diminuisse la pressione.

Probabilmente Einstein pensava che la sua analisi basata su un fluido ideale potesse valere altrettanto bene per i fluidi del mondo reale. Nel 1917, sulla base della sua teoria, il grande fisico tedesco progettò un profilo aerodinamico che in seguito divenne conosciuto come «ala a dorso di gatto» per la sua somiglianza con la schiena di un gatto che inarca la schiena. Propose il progetto all'azienda aeronautica LVG (Luftverkehrsgesellschaft) di Berlino, che lo sfruttò per costruire una nuova macchina volante. Un pilota collaudatore riferì che il velivolo dondolava in aria come «un'anatra incinta». Molto più tardi, nel 1954, Einstein definì la sua escursione nell'aeronautica una «follia giovanile». La persona che ci ha dato teorie radicalmente nuove, che hanno approfondito sia le componenti più piccole sia quelle più grandi dell'universo, fallì nel dare un contributo alla comprensione della portanza e nel realizzare un profilo alare utile.

Verso una teoria completa della portanza

Gli approcci scientifici contemporanei alla progettazione aeronautica si devono alle simulazioni della fluidodinamica computazionale (CFD, da *computational fluid dynamics*) e alle cosiddette equazioni di Navier-Stokes, che tengono pienamente conto dell'effettiva viscosità dell'aria reale. Le soluzioni di queste equazioni e i risultati delle simulazioni della CFD forniscono previsioni



Un esperimento in acqua all'Ames Fluid Mechanics Laboratory della NASA usa un colorante fluorescente per visualizzare il campo di flusso attorno a un'ala di aeroplano. Le linee di flusso, che si spostano da sinistra a destra e si incurvano quando incontrano l'ala, aiutano a illustrare la fisica della portanza.

sulla distribuzione della pressione e sull'andamento dei flussi d'aria, nonché risultati quantitativi che sono alla base dei più avanzati progetti aeronautici. Tuttavia da soli non danno una spiegazione fisica qualitativa della portanza.

Negli ultimi anni, però, Doug McLean, importante esperto di aerodinamica, ha cercato di andare al di là del puro formalismo matematico e di affrontare le relazioni di causa ed effetto fisiche che spiegano la portanza in tutte le sue manifestazioni reali. McLean, che ha trascorso la maggior parte della sua carriera come ingegnere alla Boeing Commercial Airplanes, dove si è specializzato nello sviluppo di simulazioni CFD, ha pubblicato le sue nuove idee nel testo del 2012 *Understanding Aerodynamics: Arguing from the Real Physics* (Comprendere l'aerodinamica: Ragionare a partire dalla fisica reale).

Considerando che il libro ha oltre 500 pagine di dense analisi tecniche, è sorprendente vedere che include una sezione (la 7.3.3) intitolata *A Basic Explanation of Lift on an Airfoil, Accessible to a Non-technical Audience* (Una spiegazione elementare della portanza di un profilo aerodinamico, accessibile a non addetti ai lavori). Produrre queste 16 pagine non è stato per nulla facile per McLean, un maestro dell'argomento; anzi, è stata «probabilmente la parte del libro più difficile da scrivere», confessa l'autore. «Ho perso il conto delle volte che l'ho rivista. Non ne ero mai del tutto soddisfatto».

La complessa spiegazione della portanza data da McLean inizia con l'assunto di base di tutta l'aerodinamica ordinaria: l'aria intorno a un'ala agisce come «un materiale continuo che si deforma per seguire i contorni del profilo aerodinamico». Questa deformazione ha la forma di un'alta fascia di fluido sia sopra sia sotto l'ala. «Il profilo aerodinamico influisce sulla pressione su una vasta area in quello che viene chiamato un campo di pressione», scrive McLean. «Quando si produce la portanza, sopra il profilo alare si forma sempre una nube diffusa di bassa pressione, e in genere se ne forma una di alta pressione al di sotto. Dove queste nubi tocca-

no il profilo alare generano la differenza di pressione che esercita la portanza sullo stesso profilo alare».

L'ala spinge l'aria verso il basso e ha come effetto di deviare verso il basso il flusso d'aria. L'aria sopra l'ala viene accelerata secondo il principio di Bernoulli. Inoltre c'è un'area di alta pressione sotto l'ala e una di bassa pressione sopra. Sono quindi quattro le componenti necessarie nella spiegazione che McLean dà della portanza: una deviazione verso il basso del flusso d'aria, un aumento della velocità del flusso d'aria, una zona di bassa pressione e una zona di alta pressione.

Ma sono le interazioni tra questi quattro elementi l'aspetto più nuovo e originale della trattazione di McLean. «Si sostengono a vicenda in rapporti di causa ed effetto reciproci e nessuno esisterebbe senza gli altri», scrive. «Le differenze di pressione esercitano la forza di portanza sul profilo aerodinamico, mentre la deviazione verso il basso e le variazioni di velocità del flusso mantengono le differenze di pressione». È questa interrelazione che costituisce un quinto elemento della spiegazione di McLean: la reciprocità tra gli altri quattro. In un certo senso queste quattro componenti appaiono collettivamente e si sostengono a vicenda con atti simultanei di creazione e di causalità reciproche.

Sembra quasi che ci sia qualcosa di magico in questa sinergia. Il processo descritto da McLean sembra quello di quattro agenti attivi che si tirano su l'un l'altro per mantenersi in aria collettivamente. O, come dichiara l'autore stesso, è un caso di «causa ed effetto circolari». Come è possibile che ogni elemento dell'interazione sostenga e rafforzi tutti gli altri? E che cosa provoca questa reciproca interazione dinamica? Ecco la risposta di McLean: il secondo principio della dinamica.

Questo principio afferma che l'accelerazione di un corpo, o di un minuscolo volume di fluido, è proporzionale alla forza esercitata su di esso. «Il secondo principio della dinamica ci dice che quando una differenza di pressione applica una forza netta su un volume di fluido, deve causare una variazione nella velocità o

nella direzione (o entrambe) del movimento del volume», spiega McLean. Ma, reciprocamente, la differenza di pressione dipende dall'accelerazione del volume ed esiste a causa sua.

Stiamo forse ottenendo qualcosa in cambio di niente? McLean dice di no: se l'ala fosse a riposo, non esisterebbe nessuna parte di questo insieme di attività che si alimentano a vicenda. Il fatto che l'ala si stia muovendo nell'aria, invece, e che ogni volume di fluido interagisca con tutti gli altri, fa apparire questi elementi che dipendono l'uno dall'altro e li mantiene per tutta la durata del volo.

Attivare la reciprocità della portanza

Subito dopo la pubblicazione di *Understanding Aerodynamics*, McLean si è reso conto di non aver pienamente considerato tutti gli elementi della portanza aerodinamica, perché non ha spiegato in modo convincente che cosa provoca il cambiamento delle pressioni sull'ala rispetto alla pressione ambiente. Così nel novembre 2018 l'ingegnere ha pubblicato un articolo in due parti su «The Physics Teacher» in cui ha proposto «una spiegazione fisica esauriente» della portanza aerodinamica.

Sebbene l'articolo riformuli in larga misura le precedenti argomentazioni di McLean, cerca anche di aggiungere una spiegazione migliore di che cosa sia il campo di pressione non sia uniforme e assuma la forma fisica che assume. Più in dettaglio, la nuova spiegazione introduce un'interazione reciproca a livello di campo di flusso in cui il campo di pressione non uniforme è il risultato di una forza applicata, la forza verso il basso esercitata sull'aria dal profilo aerodinamico.

Si può essere più o meno d'accordo se la sezione 7.3.3 e l'articolo di approfondimento di McLean siano riusciti a fornire una descrizione completa e corretta della portanza. C'è più di un motivo per cui è difficile produrre un resoconto chiaro, semplice e soddisfacente della portanza aerodinamica. Per cominciare, i flussi di fluidi sono più complessi e più difficili da comprendere rispetto ai movimenti degli oggetti solidi, soprattutto quelli che si separano sul bordo d'attacco dell'ala e sono soggetti a forze fisiche diverse lungo la parte superiore e inferiore. Alcune delle controversie sulla portanza non riguardano i fatti in sé, quanto il modo in cui vadano interpretati questi fatti, e qui possono esserci questioni impossibili da decidere per via sperimentale.

A ogni modo sono ormai poche le questioni di rilievo che richiedono ancora una spiegazione. La portanza, come ricorderete, è il risultato delle differenze di pressione tra la parte superiore e quella inferiore di un profilo alare. Abbiamo già una spiegazione accettabile per quello che accade nella parte inferiore di un profilo aerodinamico: l'aria in arrivo spinge l'ala sia verticalmente (producendo la portanza) che orizzontalmente (producendo la resistenza). La spinta verso l'alto esiste sotto forma di una pressione più alta sotto l'ala, e questa pressione più alta è il risultato di una semplice azione e reazione newtoniana.

Le cose sono però ben diverse sulla parte superiore dell'ala, dove c'è una regione di pressione più bassa che contribuisce alla portanza aerodinamica. Ma se non è spiegata né dal principio di Bernoulli né dal terzo principio della dinamica, che cosa la spiega? Dagli studi nella galleria del vento sappiamo che l'aria sopra l'ala aderisce strettamente alla curvatura del profilo alare. Ma per-

ché le particelle d'aria che si muovono sulla superficie superiore dell'ala devono seguire la sua curvatura verso il basso? Perché non possono separarsene e muoversi in linea retta?

Mark Drela, professore di fluidodinamica al Massachusetts Institute of Technology e autore di *Flight Vehicle Aerodynamics*, offre una risposta: «Se per un istante questi piccoli volumi d'aria volassero via tangenti alla superficie superiore del profilo alare, sotto di loro si formerebbe letteralmente un vuoto», spiega. «Questo vuoto li risucchierebbe fino a riempirsi, cioè fino a quando non si muovono nuovamente seguendo il profilo alare. È questo il meccanismo fisico che costringe i piccoli volumi di aria a muoversi lungo la forma del profilo aerodinamico. Rimane un leggero vuoto parziale che li mantiene in un percorso incurvato».

Il fatto che questi piccoli volumi vengano abbassati rispetto ai loro vicini più in alto è ciò che crea l'area di pressione più bassa sopra l'ala. Ma c'è anche un altro fenomeno che accompagna questa azione: la maggior velocità del flusso d'aria sopra l'ala. «La pressione ridotta sopra un'ala che genera portanza "tira orizzontalmente" le particelle d'aria in arrivo da davanti, che hanno così una veloci-

In un certo senso le quattro componenti della portanza appaiono collettivamente e si sostengono a vicenda con atti simultanei di creazione e di causalità reciproche. Sembra quasi che ci sia qualcosa di magico in questa sinergia

tà più elevata quando arrivano sopra l'ala», dice Drela. «Quindi l'aumento di velocità sopra l'ala che dà portanza può essere visto come un effetto collaterale della pressione ridotta in quella zona».

Ma, come sempre, quando si tratta di spiegare la portanza a livello non tecnico, un altro esperto avrà un'altra risposta. Babinsky di Cambridge dice: «Mi piace non essere d'accordo con il mio stimato collega Mark Drela, ma se la spiegazione fosse la creazione di un vuoto, sarebbe difficile spiegare perché a volte il flusso si separi ugualmente dalla superficie. Però ha ragione su tutto il resto. Il problema è che non esiste una spiegazione semplice e veloce».

Lo stesso Drela ammette che per alcuni aspetti la sua spiegazione non sia soddisfacente. «Un problema palese è che non esiste spiegazione che verrà accettata universalmente», afferma. E quindi questo dove ci lascia? In effetti, al punto di partenza, con John D. Anderson, che affermava: «Non c'è una spiegazione semplice, di una sola riga».

PER APPROFONDIRE

How Do Wings Work? Babinsky H., in «Physics Education», Vol. 38, n. 6, pp. 497-503, novembre 2003.

The Enigma of the Aerofoil: Rival Theories in Aerodynamics, 1909-1930. Bloor D., University of Chicago Press, 2011.

Understanding Aerodynamics: Arguing from the Real Physics. McLean D., Wiley, 2012.

You Will Never Understand Lift. Garrison P., in «Flying», giugno 2012.

Flight Vehicle Aerodynamics. Drela M., MIT Press, 2014.

Le origini del primo aeroplano a motore pilotato. Culick F.E.C., in «Le Scienze» n. 133, settembre 1979.