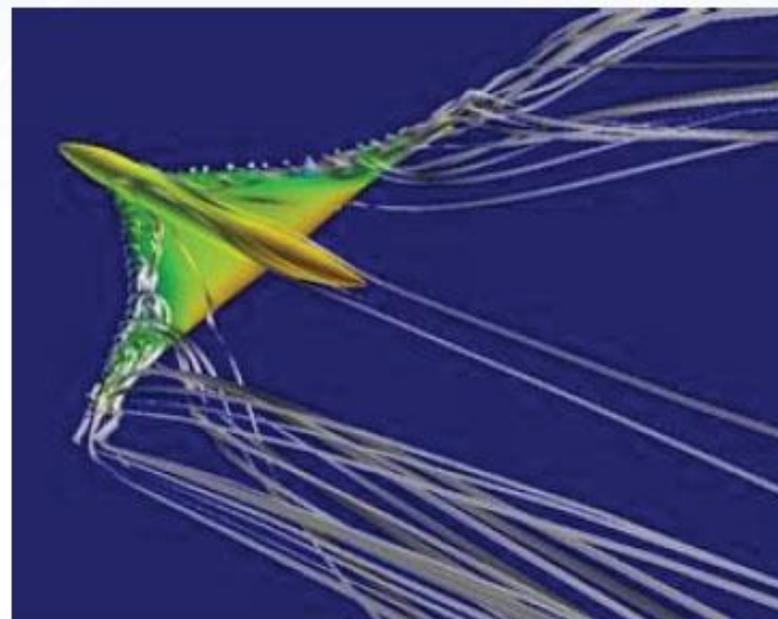


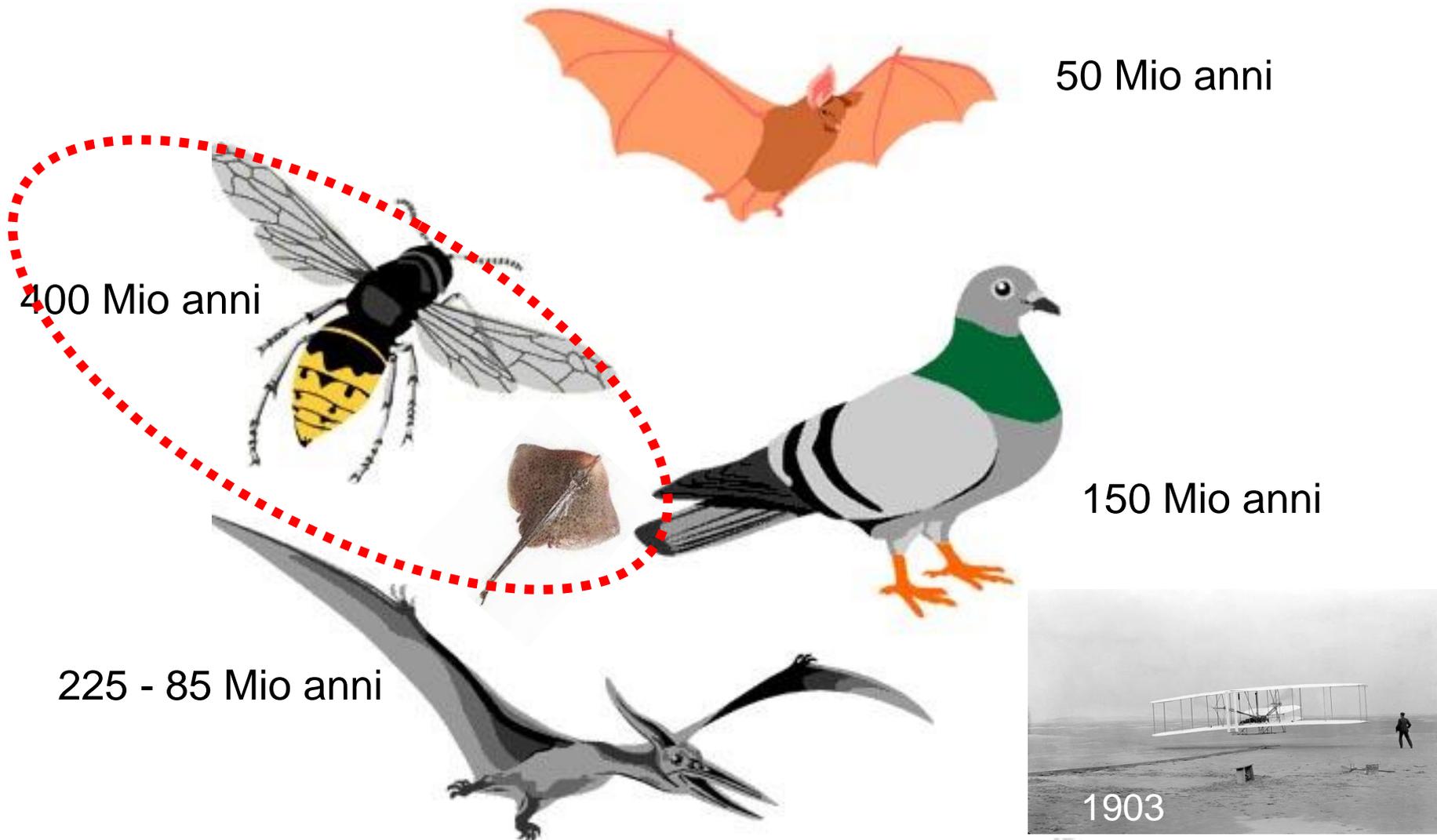


Fisica dell'aerodinamica



Agno, 21 Maggio 2015

L'EVOLUZIONE DEL VOLO AUTO - PROPULSIVO



« Evoluzione convergente »

LE ALI DI UN B747

SUPERFICIE DELLE ALI: 511 m²

PESO AL DECOLLO: 360 t

CARICO ALARE : 708 kg / m²

Letto acqua: 900 kg / 4 m² = 242 kg / m²

Persona in piedi: 70 kg / 180cm² = 3900 kg / m²

I piedi sostengono un peso molto superiore di quanto sostiene l'ala di un aereo!

CONSUMO DI CARBURANTE

B747:

12 000 litri di cherosene / ora = 10 t / h

M = 300 t a metà di un volo transatlantico

Consumo / ora → 3% del suo peso !

Colibri:

**M = 26 g → consuma il suo proprio peso in
miele al giorno**

Consumo / ora → 4% del suo peso !



Come si paragona il volo con la locomozione in automobile?

CONSUMO DI CARBURANTE

Automobile: $v = 100 \text{ km/h}$ consumo = 5.7 L/h → 5.7 L/100 km

B747: $v = 900 \text{ km/h}$ consumo = 12000 L/h → 1330 L/100km

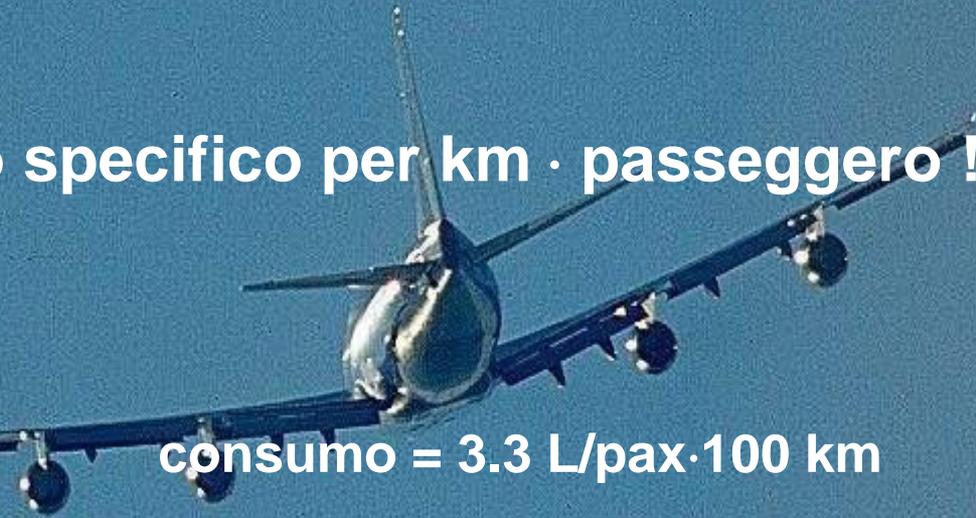
Meglio: consumo specifico per km · passeggero !

B747 (400 PAX): consumo = $3.3 \text{ L/pax} \cdot 100 \text{ km}$

Automobile (2 PAX): consumo = $3.0 \text{ L/pax} \cdot 100 \text{ km}$

Consumo specifico di carburante + / - uguale!

Ma...B747 10 x più veloce di un automobile...



CONSUMO DI CARBURANTE

Uccelli migratori...

PICCOLI PASSERI EUROPEI MIGRANO PER L'AFRICA IN INVERNO

LA STERNA ARTICA MIGRA DAL POLO AL POLO DUE VOLTE / ANNO

La Cutrettola:



$M = 30 \text{ g}$ $v = 60 \text{ km/h}$

....brucia 10 g traversando 1600 km della Sahara...

consumo $\rightarrow 0.6 \text{ g} / 100 \text{ km}$

(4000 g / 100 km auto)

Conclusione?

Volare è ...

**... un modo di locomozione rapido
... ed efficace!**

Come sollevare e sostenere un oggetto che pesa 560 t come un A380?

L' ORIGINE DELLA PORTANZA

1 Atmosfera = 1013 mb

(1b : 10^4 kg/m²)

$P_{\min} \approx 810$ mb

Ciclone: ≈ 990 mb

Anticiclone: ≈ 1020 mb

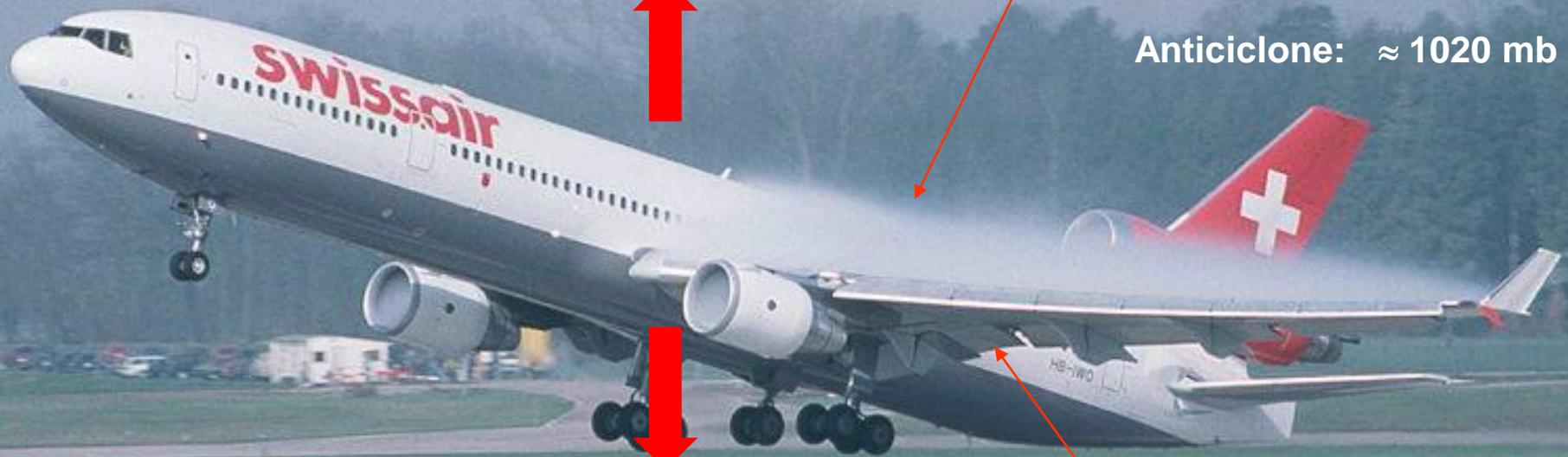
Portanza



Peso



$P_{\max} \approx 1050$ mb



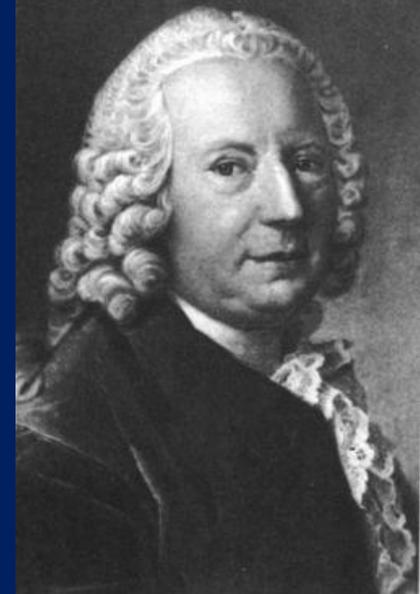
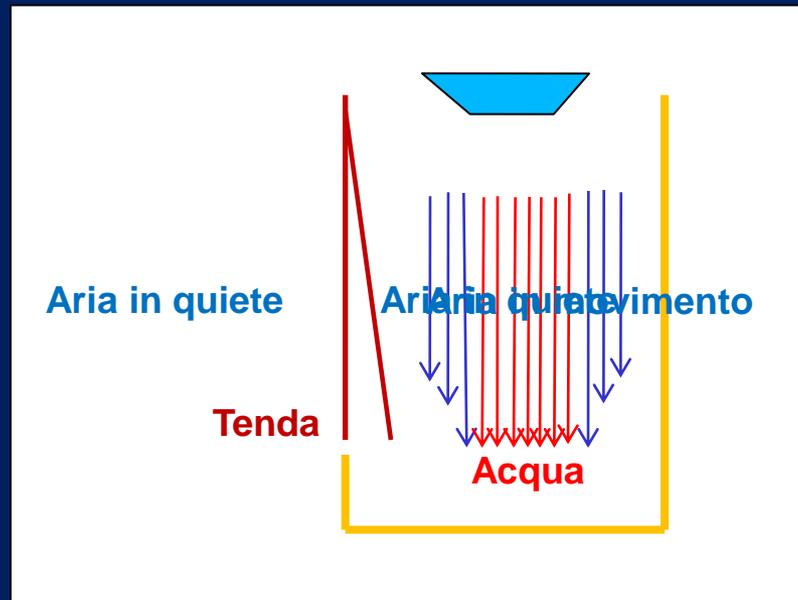
...con una differenza di pressione del 10% l'ala può sollevare 1000 kg/ m²

Come si crea questa differenza di pressione ?

LA LEGGE DI BERNOULLI

...dove, in un flusso d'aria aumenta la velocità,
diminuisce la pressione

Esempio: la tenda della doccia !!!



Daniel Bernoulli
Basilea 1700 - 1782

UNA SPIEGAZIONE COMUNE



$$p + \frac{1}{2} \overset{\text{densità}}{d} \cdot v^2 = \text{const.}$$

Legge di Bernoulli

L'aria dell'estradosso raggiunge il flusso dell'intradosso al stesso tempo al bordo d'uscita

...e quindi il profilo alare con la sua curvatura costringe l'aria a lambire il dorso con maggiore velocità

...e quindi crea una diminuzione di pressione sul dorso

...e la differenza di pressione crea la portanza

“Principio degli uguali tempi di transito”

LA SPIEGAZIONE POPOLARE

C172 in “volo lento”

$v = 104 \text{ km/h}$;

$M = 10^3 \text{ kg}$;

$W = Mg = 1 \times 10^4 \text{ N}$



$S = 16 \text{ m}^2$, $\Delta v/v = 1.5\%$; $\Delta p/p = 0.6\%$

$L \approx 2.6 \times 10^2 \text{ N}$...ossia soltanto 2% del peso !!

© 2003 AOPA

aopaonlinegallery

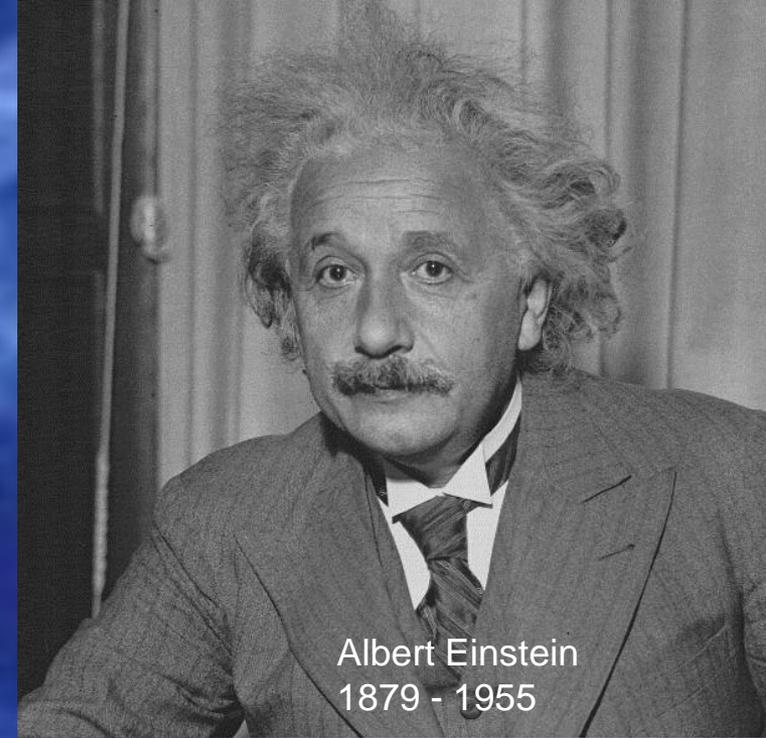
I principio degli uguali tempi di transito non è coretto!

ALBERT EINSTEIN

....era consulente durante WW I della tedescha “ Luftverkehrsgesellschaft.”

Sviluppavo profili d'ali secondo il principio del “tempo di percorso uguale”

...l'aereo era un flop...



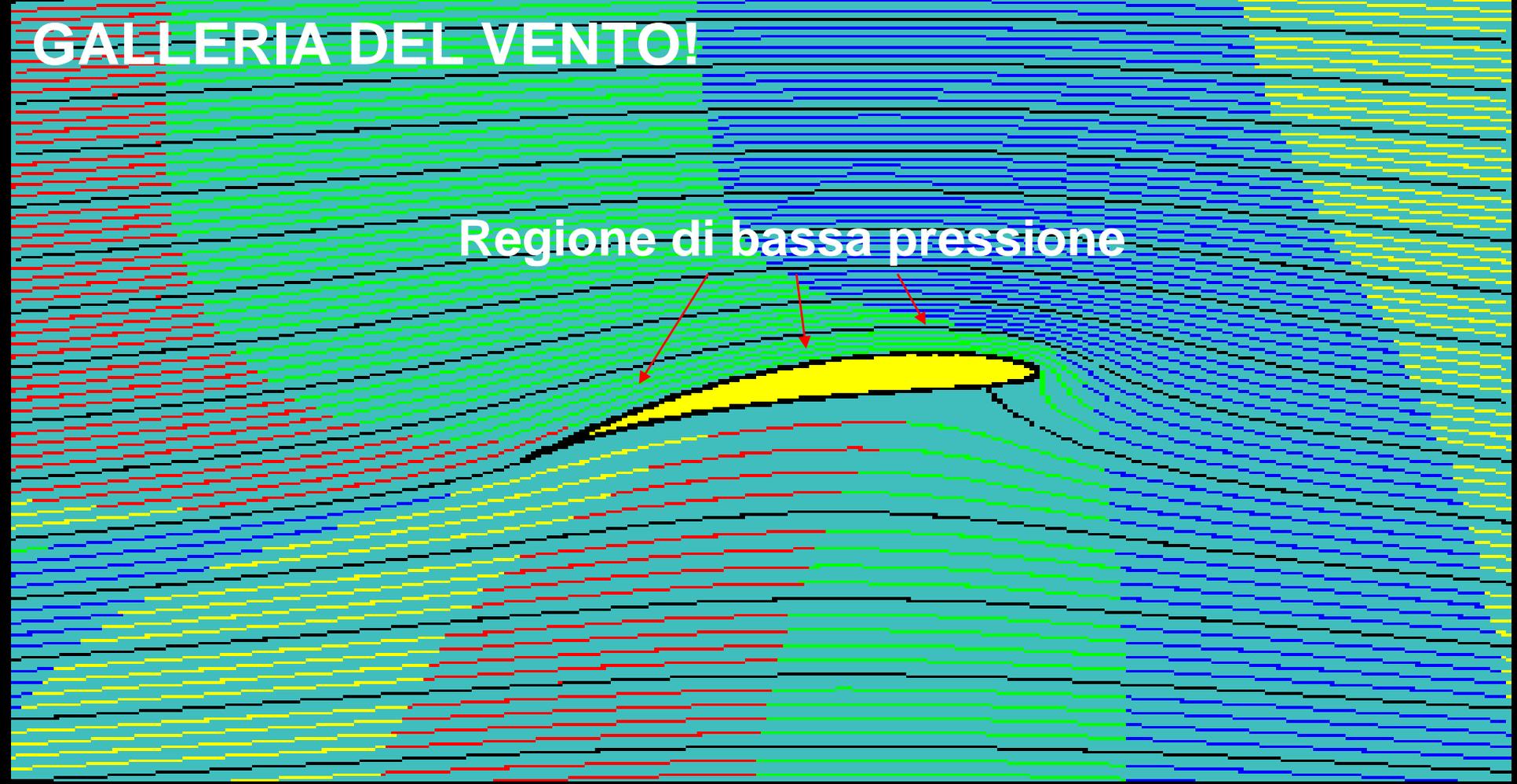
Albert Einstein
1879 - 1955

“Anche se è probabilmente vero che il principio del volo può essere semplicemente spiegato con la legge di Bernoulli, è comunque certamente non saggio costruire un'ala in questo modo....”

...per vedere perché, andiamo in una galleria del vento!

GALLERIA DEL VENTO!

Regione di bassa pressione



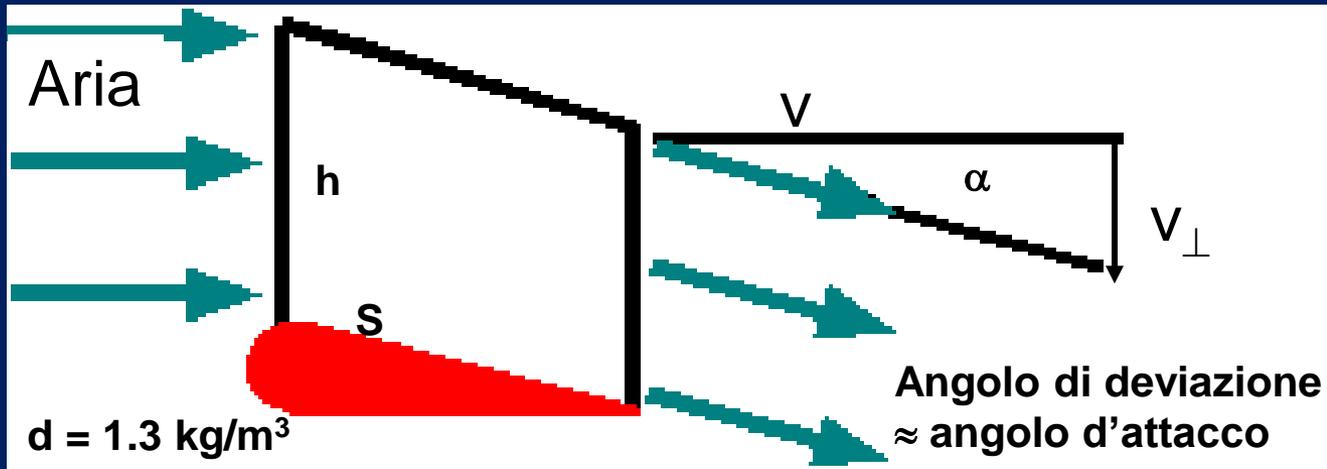
Il flusso d'aria sull' estradosso del profilo è molto più veloce rispetto a quello dell'intradosso

L'aria sotto l'ala ritarda

L'aria è deviata verso il basso sull'angolo d'uscita del profilo

ENTRA NEWTON!

LA PORTANZA SPIEGATA "ALLA NEWTON"



La portanza è proporzionale:

- alla massa dell'aria deviata verso il basso

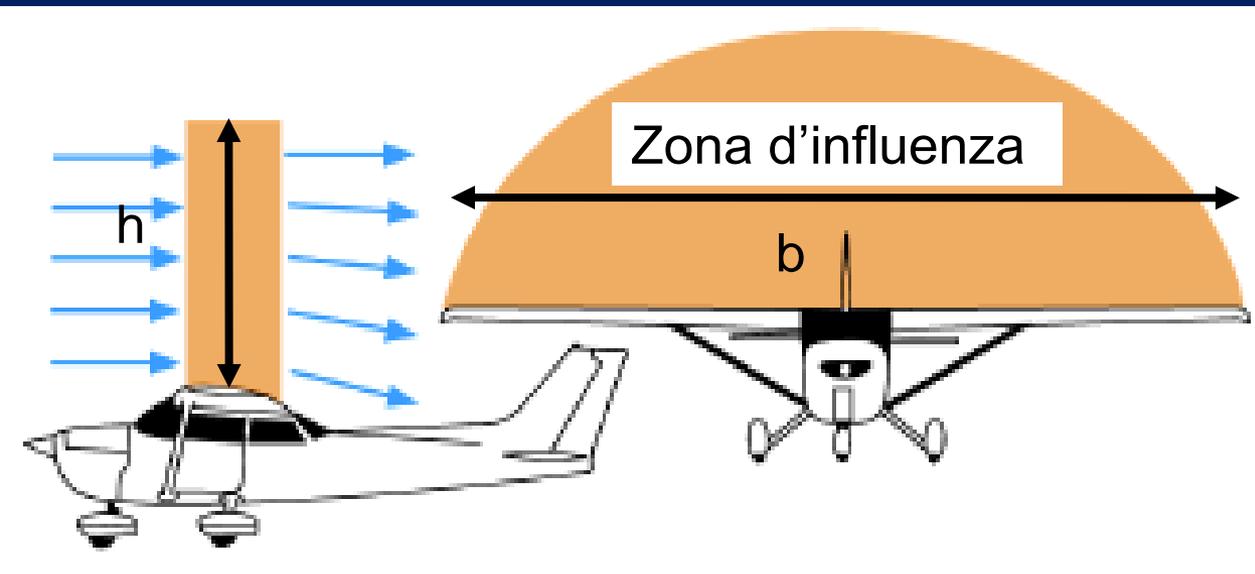
$$L \propto (h \cdot S \cdot d \cdot v) \times (v \cdot \alpha)$$

$$L \propto \frac{1}{2} c_l \cdot S \cdot d \cdot v^2$$

- alla componente verticale della velocità di quell'aria.

Quanta aria è deviata verso il basso???

QUANTA ARIA È DEVIATA VERSO IL BASSO?



$$L \propto S \cdot d \cdot \alpha \cdot v^2$$

b : apertura alare

h : altezza

Rondine : $v_{\perp} = 7 \text{ km/h}$; $b = 0.3 \text{ m} \rightarrow h = 14 \text{ cm}$; aria $\downarrow = 20 \text{ g/s}$

C150 : $v_{\perp} = 18 \text{ km/h}$; $b = 10 \text{ m} \rightarrow h = 3 \text{ m}$; aria $\downarrow = 1.6 \text{ t/s}$

B747 : $v_{\perp} = 76 \text{ km/h}$; $b = 70 \text{ m} \rightarrow h = 30 \text{ m}$; aria $\downarrow = 140 \text{ t/s}$



TANTA ARIA È DEVIATA VERSO IL BASSO!!!

UNA BILACIA A TERRA MISUREBBE IL PESO DELL'AEREO!!

RIASSUNTO INTERMEDIARIO

Le ali deviano una massa d'aria importante verso il basso

La portanza è proporzionale -

alla superficie dell'ala

$$L = \frac{1}{2} c_L \cdot d \cdot S \cdot v^2$$

alla velocità² “check your air speed !”

alla densità dell'aria

all'angolo d'attacco “check your attitude !”

alla forma del profilo

II CARICO ALARE

... è uno dei fattori principali nel progetto di un velivolo

$$L = W = \frac{1}{2} c_l d S v^2$$

C_l : coeficiente di portanza ($\propto \sin\alpha$)

d : 1.25 kg/m³ aria @ l.m.

0.31 kg/m³ 39,000 ft



$$\frac{W}{S} = \frac{1}{2} c_l d v^2 \approx 0.4 v^2$$

Carico alare

* @ S.L. and $\alpha = 3^\circ$

II CARICO ALARE

$$\frac{W}{S} = 0.4 v^2$$

L.M.

... più grande è il carico alare, più veloce vola l'uccello / l'aereo!



Passero:	M = 30g	S = 100 cm ²	W/S = 4 kg/m ²	v = 36 km/h
C172:	M = 1.3t	S = 16 m ²	W/S = 80 kg/m ²	v = 180 km/h
B747:	M = 300 t	S = 511 m ²	W/S = 580 kg/m ²	v = 450 km/h

FALCO

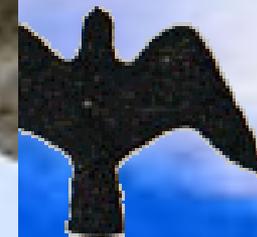
PICCIONE



24 km/h



31 km/h



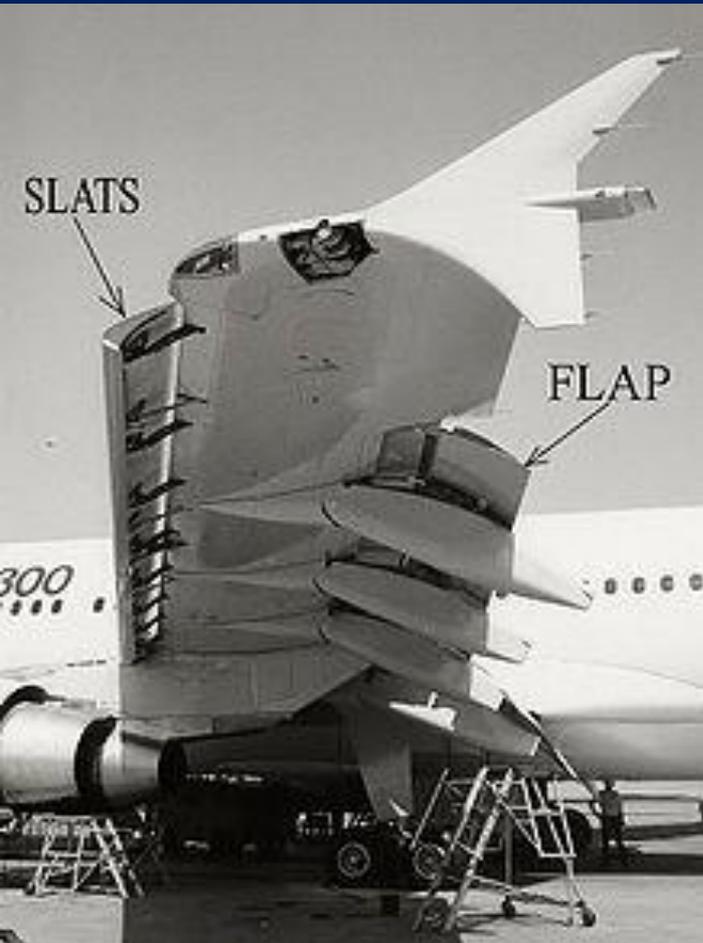
51 km/h

Per volare più lentamente, si aumenta la superficie alare!

$$\frac{W}{S} = 0.4 v^2$$

L.M.

Per volare più lentamente, si aumenta la curvatura dell'ala !



Airbus 330: con « flaps » e « slats »

Il pterodattilo



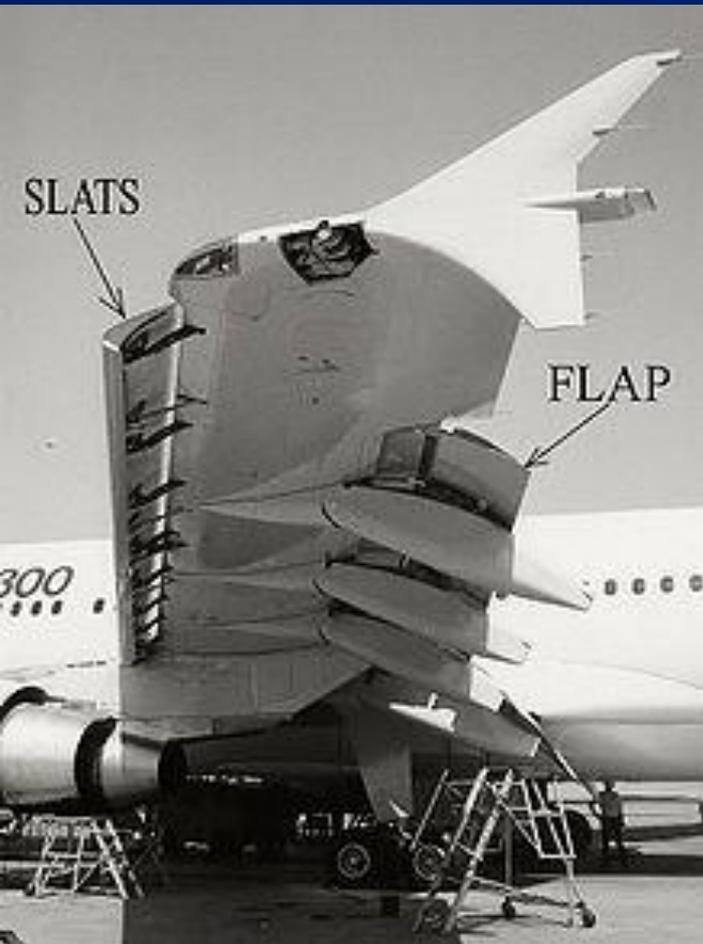
...estendeva un' ala supplementare al bordo d'attacco durante il decollo / atterraggio

... e aumentava la portanza del 30%

.. era capace di decollare con brezza leggera

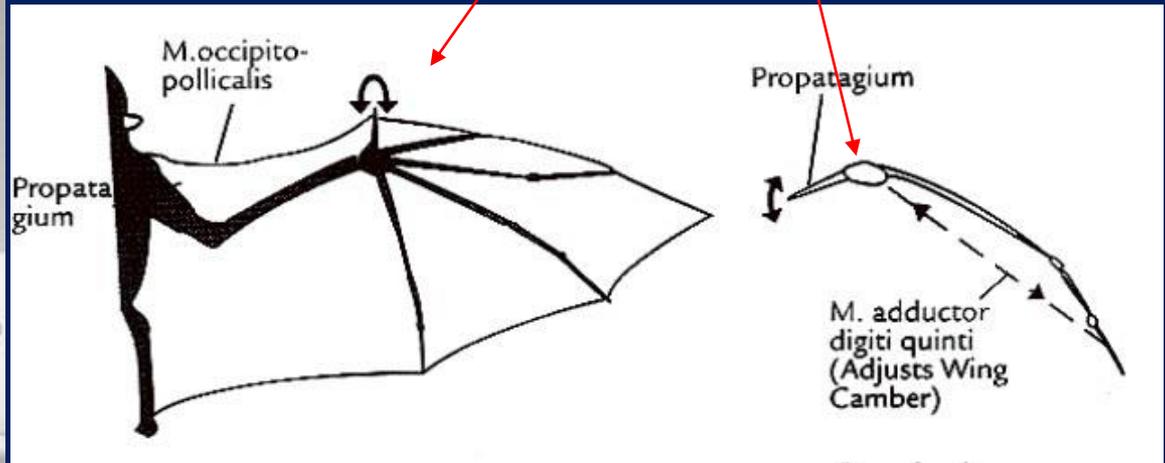
$$\frac{W}{S} \propto c_{LV}^2$$

Per volare più lentamente, si aumenta la curvatura dell'ala !



Airbus 330: con « flaps » e « slats »

Pipistrelli cambiano con il pollice la curvatura del profilo d'ala



$$\frac{W}{S} \propto C_L v^2$$

VOLO ZURIGO - MONTREAL

Consumo di carburante 10 t / h → peso diminuisce!

Carico alare diminuisce !

Per stare a una quota costante → velocità deve diminuire!

Ma...velocità più economica: $v_{opt} = \text{Mach } 0.82 = 900\text{km/h}$

$$\frac{W}{S} = 0.31 \cdot d \cdot v^2$$

→ Salire verso aria meno densa! ~ 800 ft/h

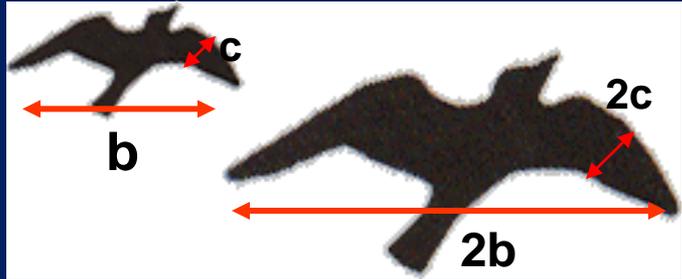
« STEP CLIMB »

Irlanda: 30.000 ft $M = 320 \text{ t}$ $d = 0.466 \text{ kg/m}^3$

Terranova: 35.000 ft $M = 250 \text{ t}$ $d = 0.364 \text{ kg/m}^3$

Velocità di crociera a livello di mare: $v_{s.l.} = 450 \text{ km/h}$ ($d_{s.l.} = 1.25 \text{ kg/m}^3$)

CARICO ALARE ... E PESO



b: apertura alare $\propto b$

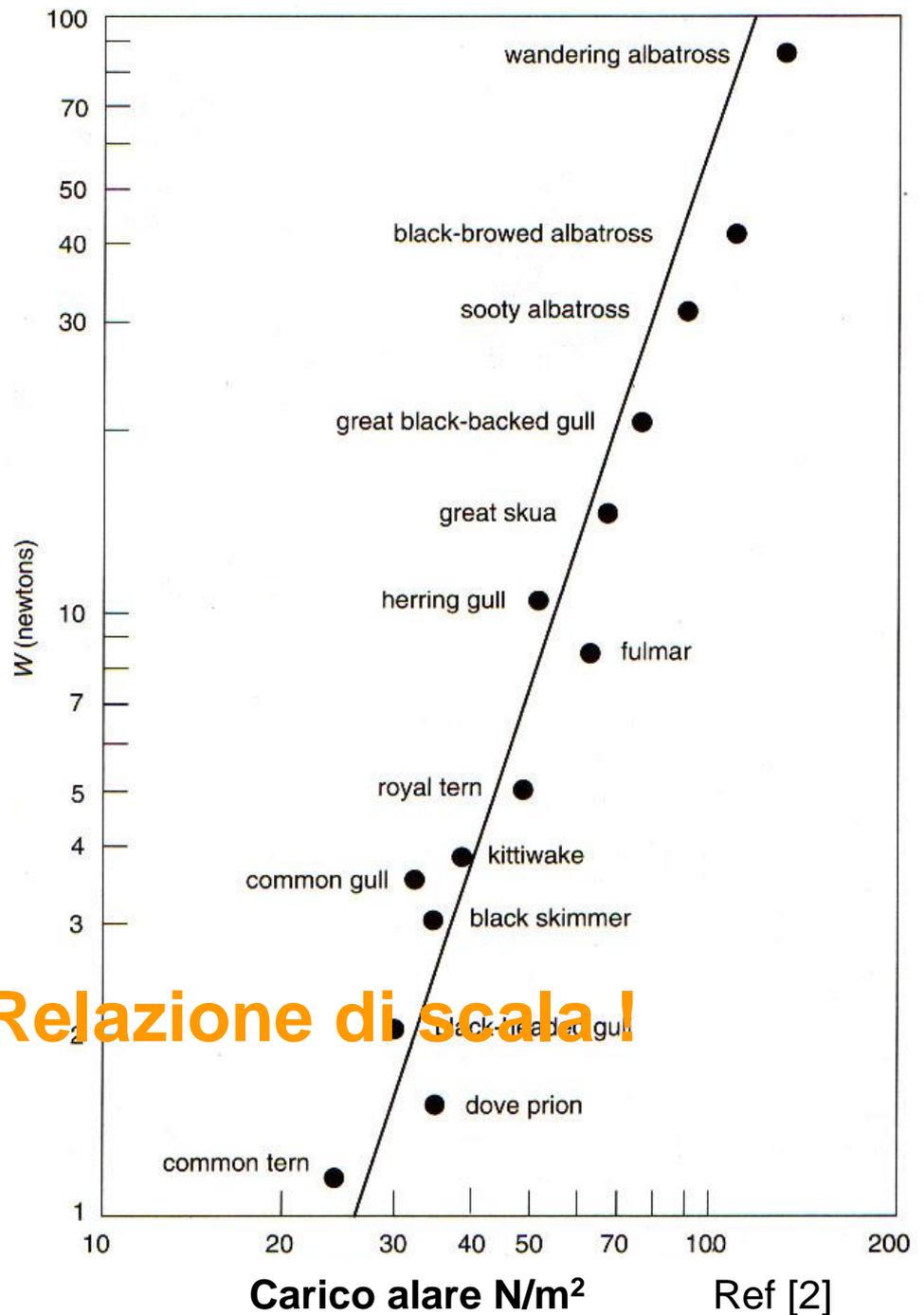
c: corda $\propto b$

t: spessore $\propto b$

S $\propto b^2$

W $\propto b^3$

$$\frac{W}{S} \propto b \propto \sqrt[3]{W}$$



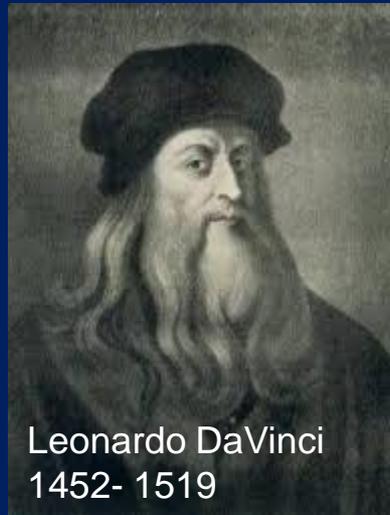
....PESO E VELOCITÀ

$$\frac{W}{S} \propto \sqrt[3]{W} \propto v^2$$



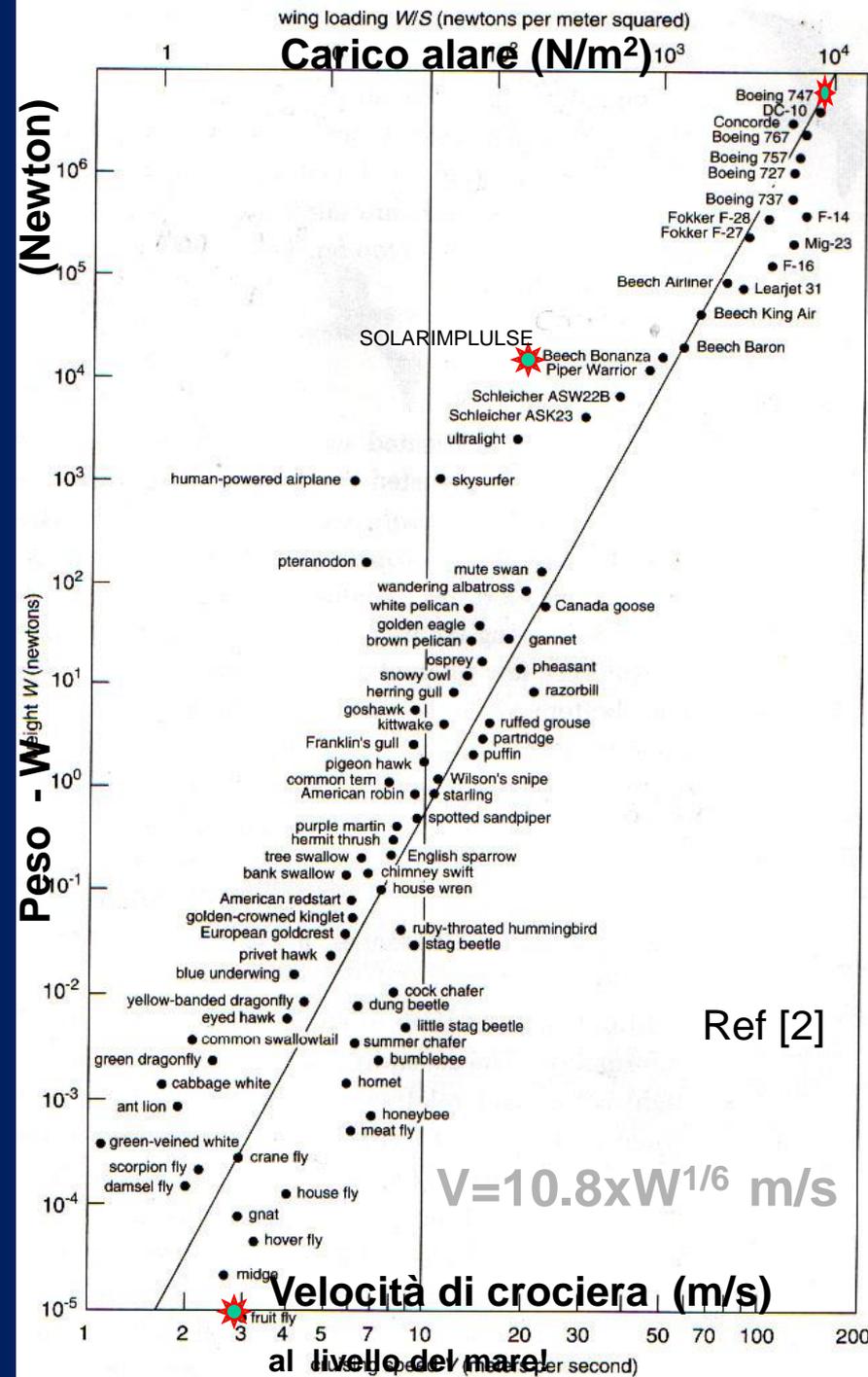
$$v \propto W^{1/6}$$

Leonardo: $v \propto \sqrt[3]{W}$!!!



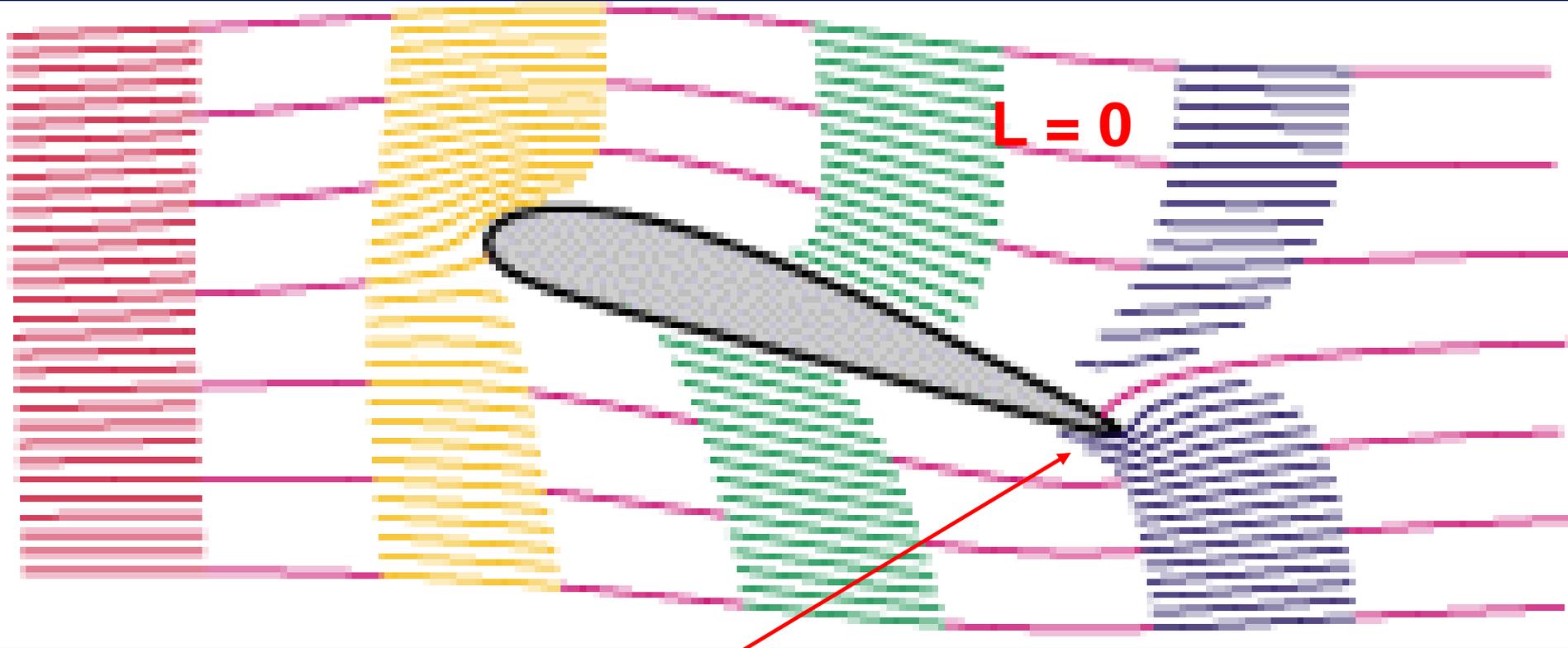
Valido su una gamma di 12 ordini di grandezza ...in peso

B747 è un uccello "ordinario" !



LA SPIEGAZIONE AEORODINAMICA DELLA PORTANZA

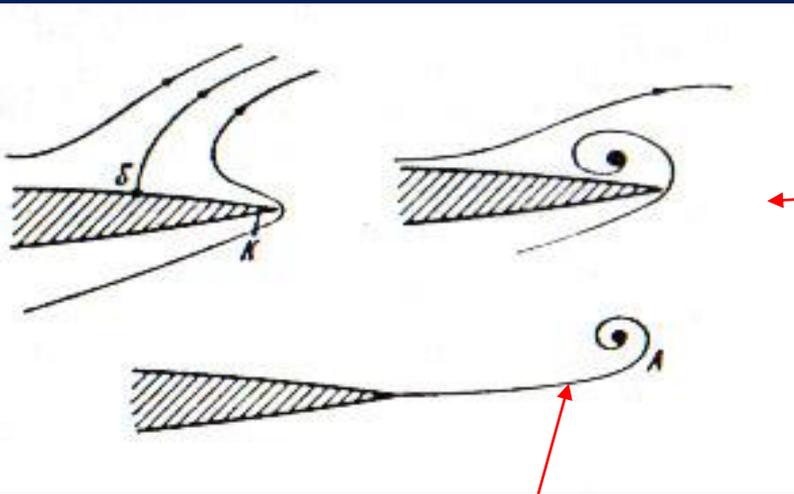
Quando l'ala comincia di muoversi nell'aria...



- Velocità infinita al bordo d'uscità!
- Pressione \sim zero al bordo d'uscità!
- Portanza = zero

Non piace alla natura!

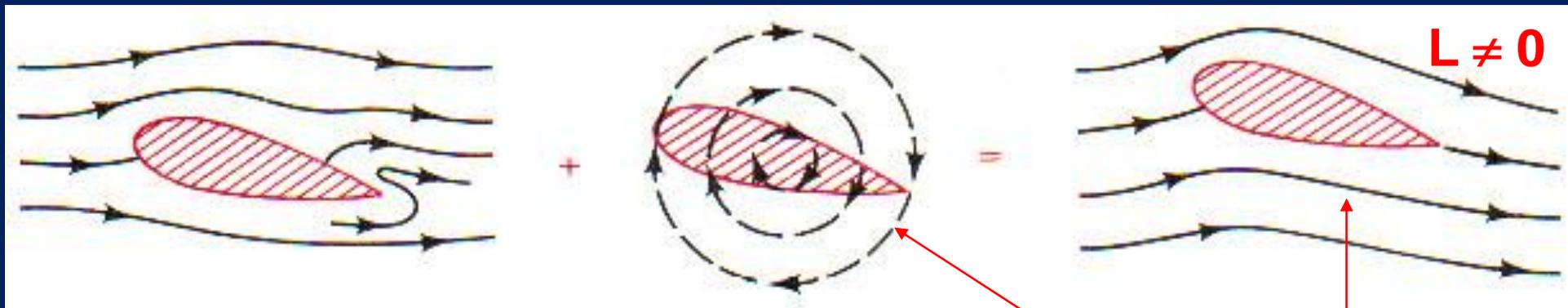
LA SPIEGAZIONE AEORODINAMICA DELLA PORTANZA



Un vortice si crea

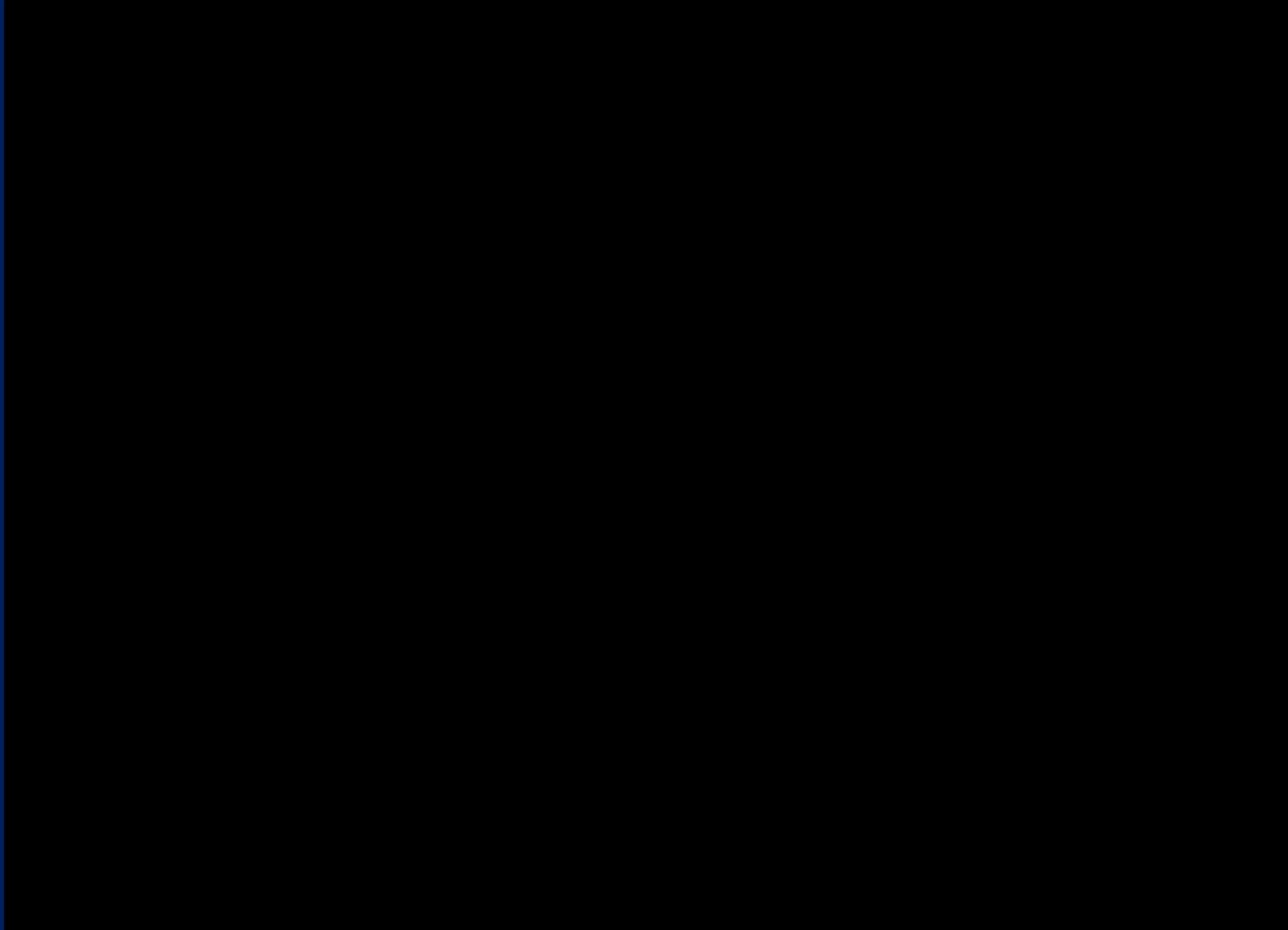
Il vortice di “avviamento” è buttato nel corrente (Kutta – Joukowski)

...ma un vortice a bisogno di un altro (...opposto)



...un altro vortice si forma intorno all'ala → Circolazione → Portanza!

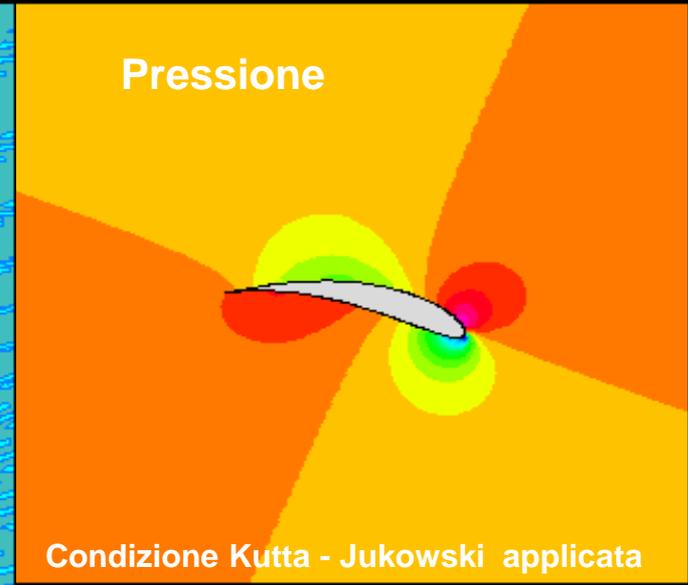
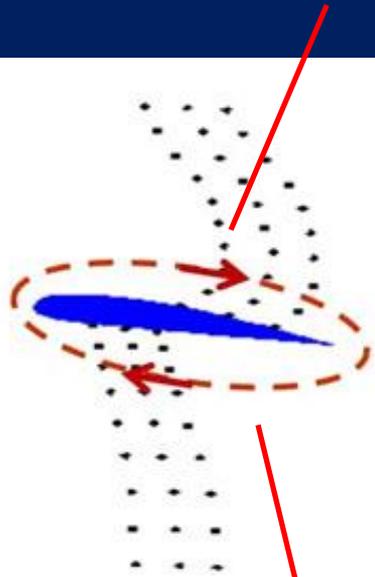
LA SPIEGAZIONE AEORODINAMICA DELLA PORTANZA



www.youtube.com/watch?v=Vp0QS7YBudw

LA SPIEGAZIONE AEORODINAMICA DELLA PORTANZA

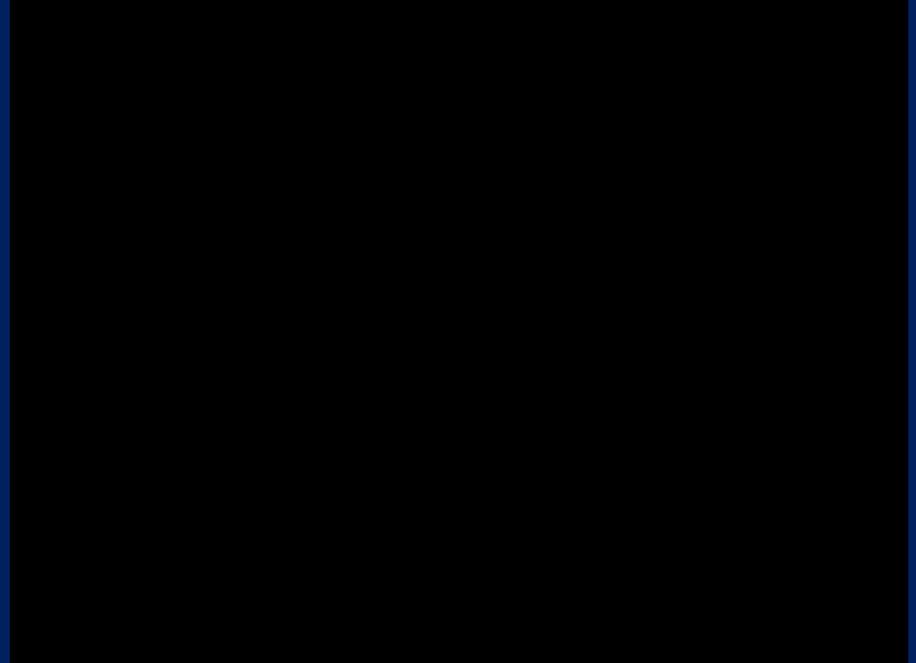
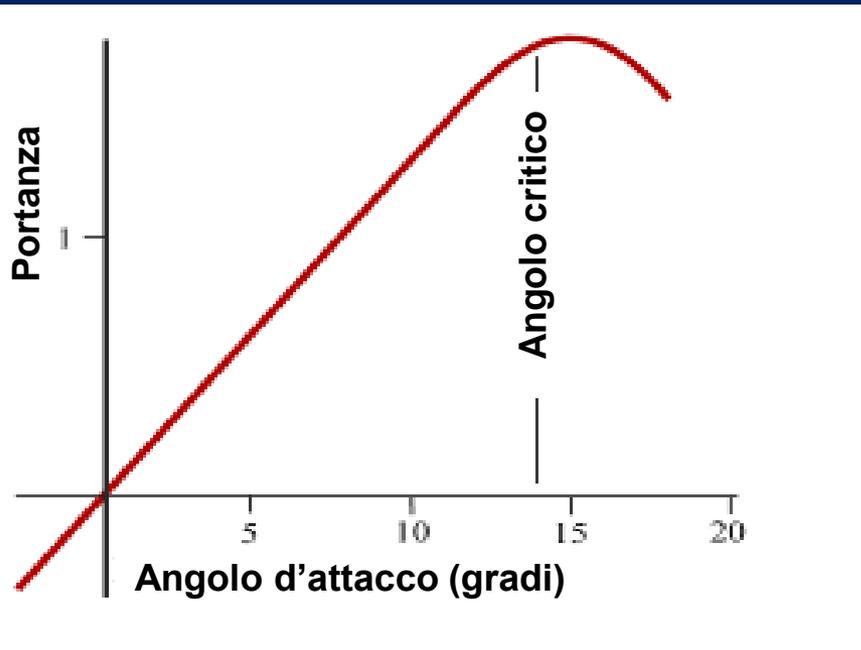
Con circolazione → portanza & campo di moto dell'aria corretto!



$$L = d \cdot v \cdot b \cdot \Gamma = \frac{1}{2} c_l \cdot d \cdot S \cdot v^2$$

+ grande la deviazione del flusso
+ grande la portanza !

PORTANZA , ANGOLO D'ATTACCO E LO STALLO

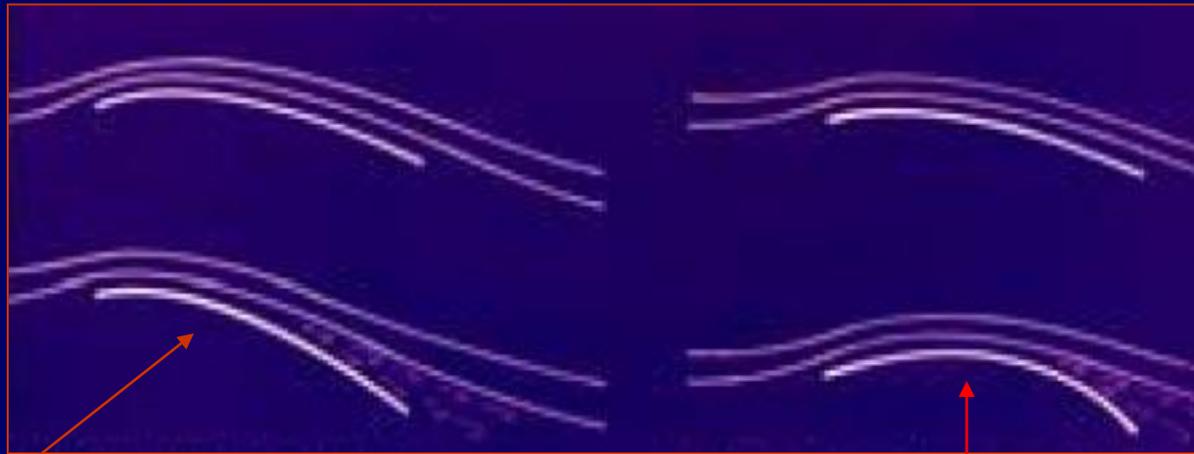


Sensori al bordo d'attacco dell'ala che avvertono il pilota della prossimità dello stallo

PIPISTRELLI: ALI FLESSIBILI & INTELLIGENTI !



Sensori ultrasensibili assistano nelle manovre complesse del volo e per evitare lo stallo !



Angolo d'attacco troppo grande

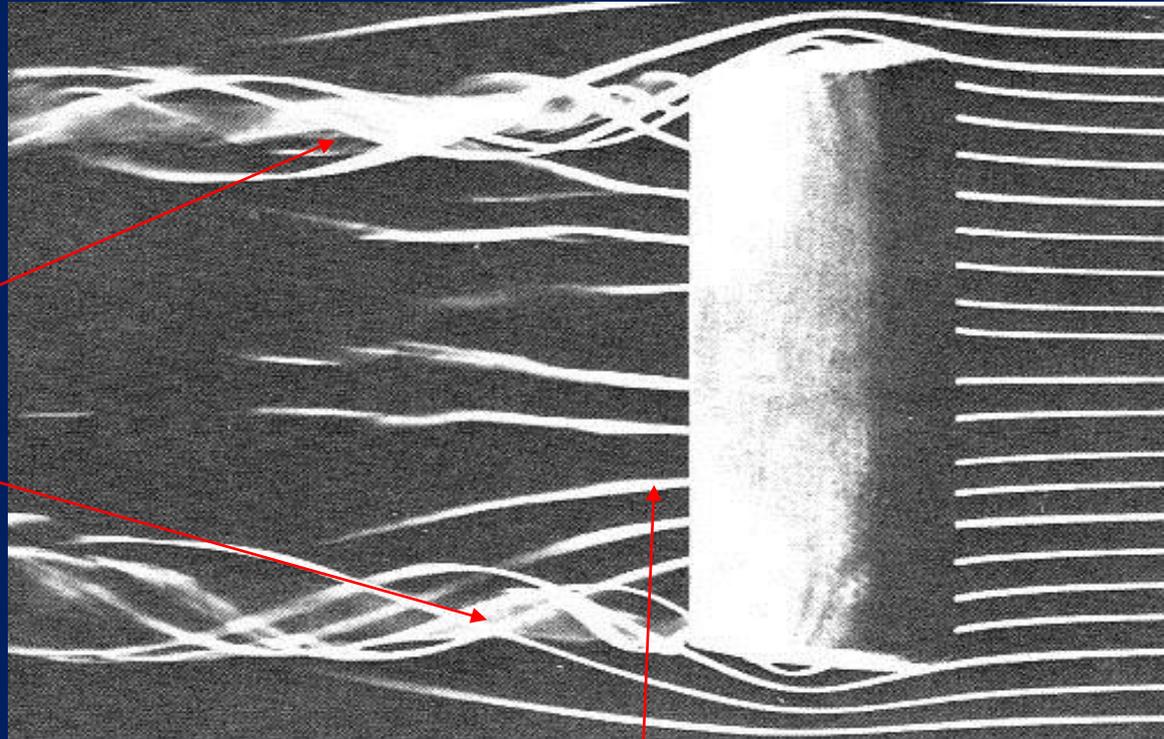
Curvature dell'ala troppo grande

Esperimenti con pipistrelli con ali "rasate" rilevano l'importanza di questi sensori!

...MA IL VOLO SI SVOLGE IN 3 DIMENSIONI !

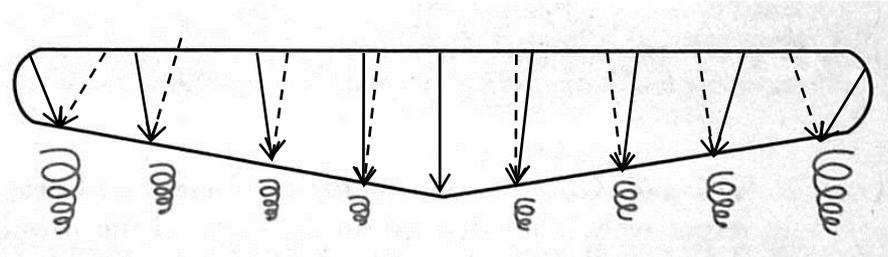
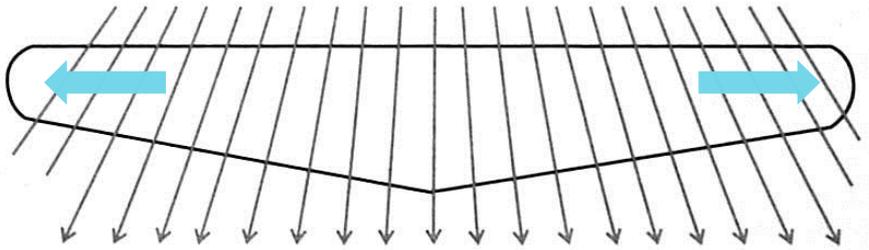
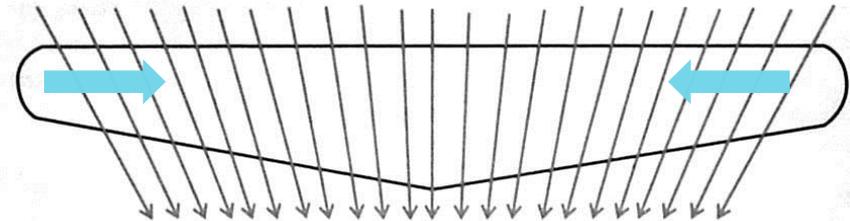
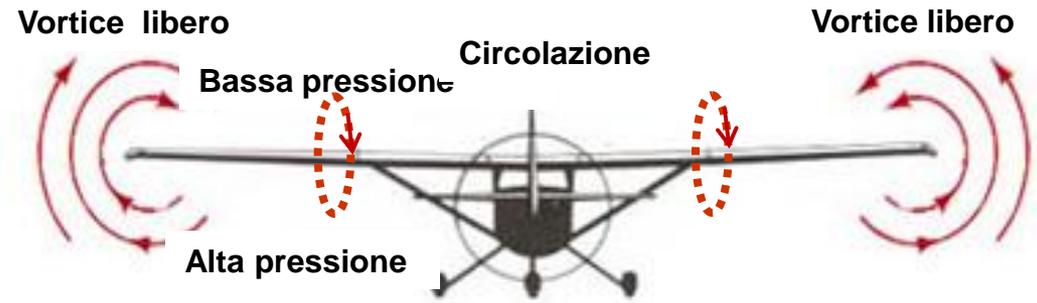
...Ritorniamo nella galleria del vento !

**Due vortici liberi
all'estremità dell'ala**



**...lungo all bordo d'uscita si sviluppa un
tappeto vorticoso ("sistema vorticoso")**

L'ALA IN 3 DIMENSIONI



Schiera di vortici controrotanti ai due lati

Sopra l'ala :

flusso d'aria convergente

Sotto l'ala:

flusso d'aria divergente

Bordo d'uscita:

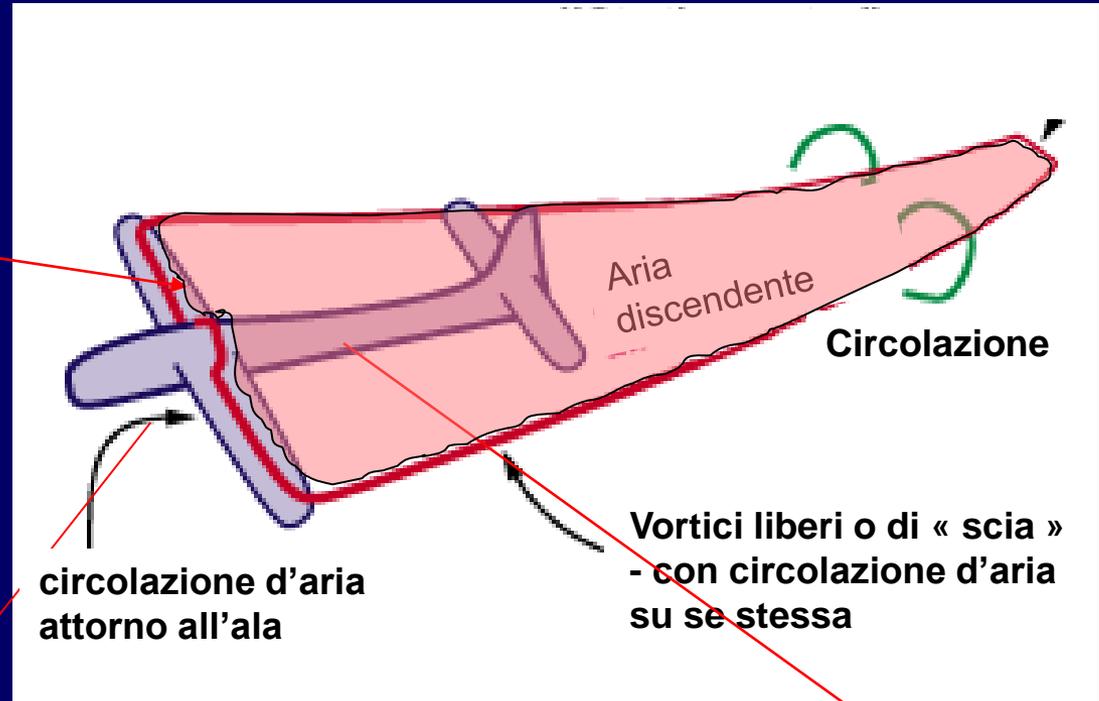
Torsione del flusso d'aria

Campo di vortici lungo l'ala

L'IMMAGINE COMPLETA

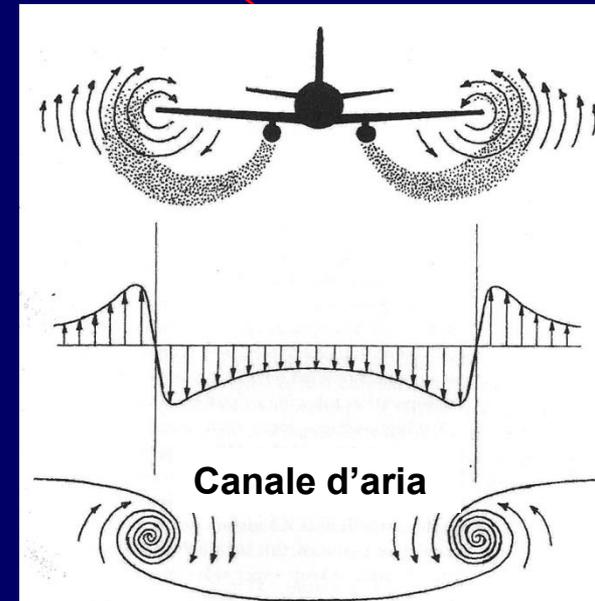
Circolazione

Bernoulli → Portanza



Aria deviata verso il basso all'interno del tappeto vorticoso

→ Spiegazione Newtoniana della portanza !



EXPLORE NO BARR



VORTICI D'ESTREMITÀ E TURBOLENZA DI SCIA



...contengono un contributo d'energia cinetica importante

...e creano una resistenza "indotta"

$$R_i = \frac{M^2}{d \cdot v^2 \cdot b^2}$$

Turbolenza di scia + gas di scarico = scia di condensazione

- vortici e resistenza aumentano con il peso
- sono più importanti a bassa velocità → al decollo e all'atterraggio !

Con quale effetto?

LA TURBOLENZA DI SCIA...

...è una conseguenza inevitabile della portanza

...è un fenomeno impressionante ...ma anche molto pericoloso!

Estensione dietro un grande aereo > 25 km

Sistema vorticoso si stabilisce dopo 2' minuti 300 m sotto la quota

Raffiche di scia istantanee > +/-100 km/h !



(picc. aerei costruiti per 40km/h al mass.)

Carico strutturale > 10 g !

Ratea di rollio > 80° /s !

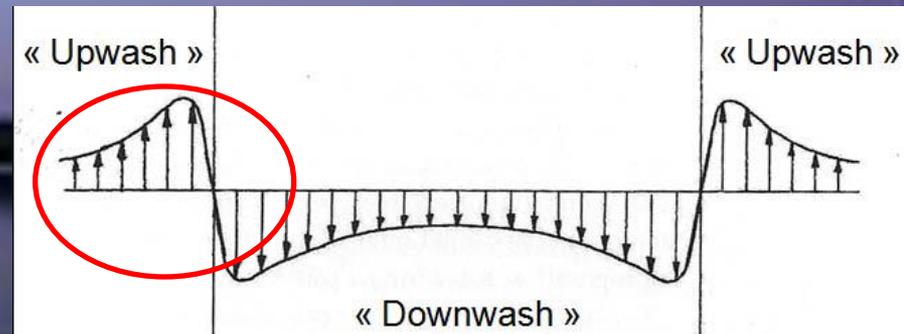
Separazione Radar (Heavy/Light) in volo:	> 9.6 km
al decollo :	> 2 – 3 minuti

VOLARE IN FORMAZIONE

L'aria al di là della punta dell'ala torna in su

Uccelli ala ad ala aumentano l'autonomia del 70%

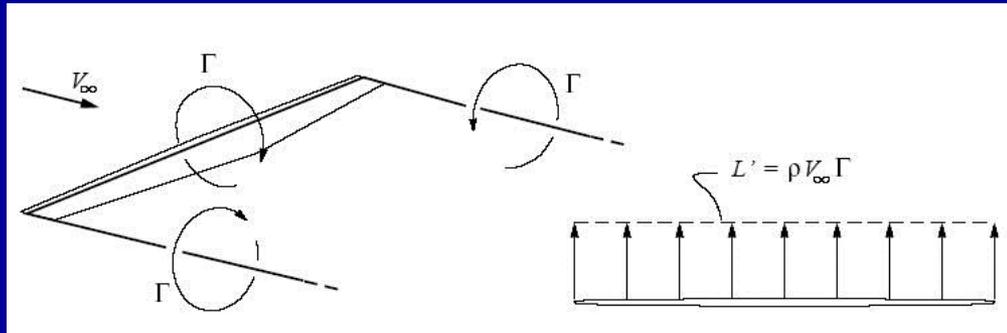
Nel futuro: voli di linea transatlantici in formazione ?



SOLARIMPULSE

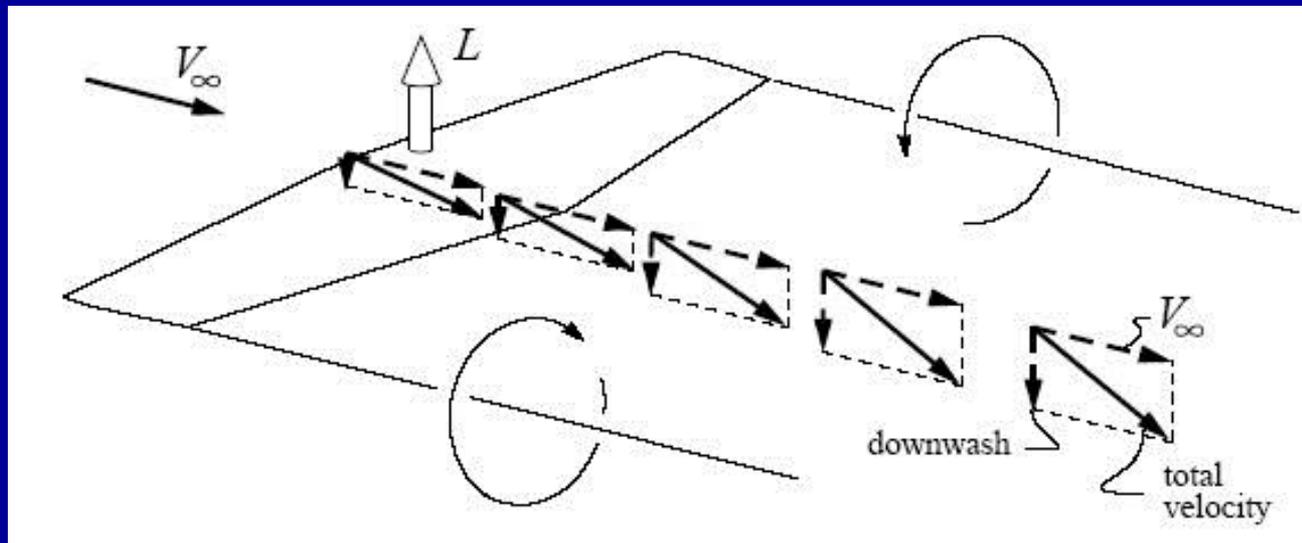
$$R_i = \frac{M^2}{d \cdot v^2 \cdot b^2}$$

LA DESCRIZIONE MATEMATICA DELLA PORTANZA



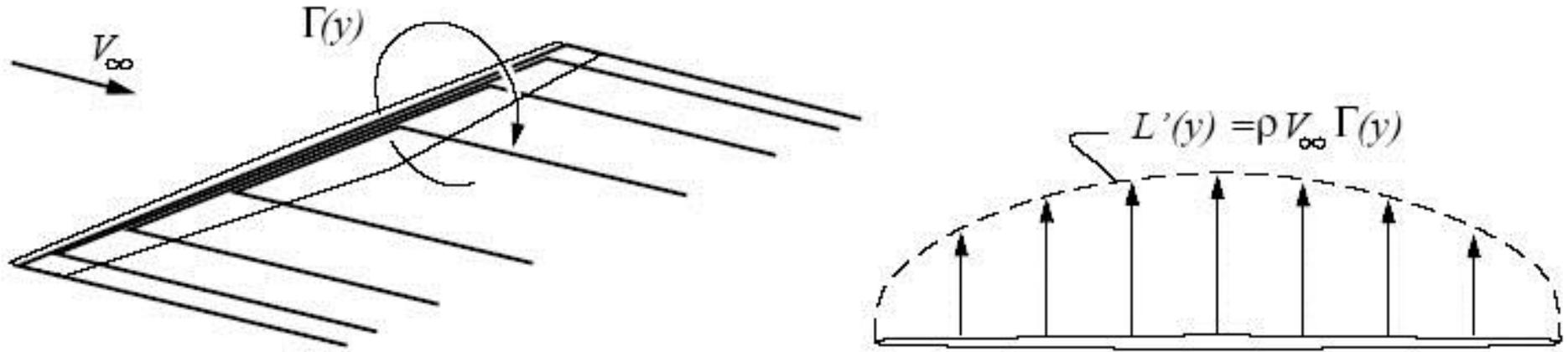
- linea vorticoso (lifting - line vortex)
- 2 vortici di scia
- → vortice “ferro di cavallo” !

Analogia:....un corrente elettrico crea un campo magnetico! (Biot Savart)



Downwash!

DESCRIZIONE MATEMATICA DELLA PORTANZA



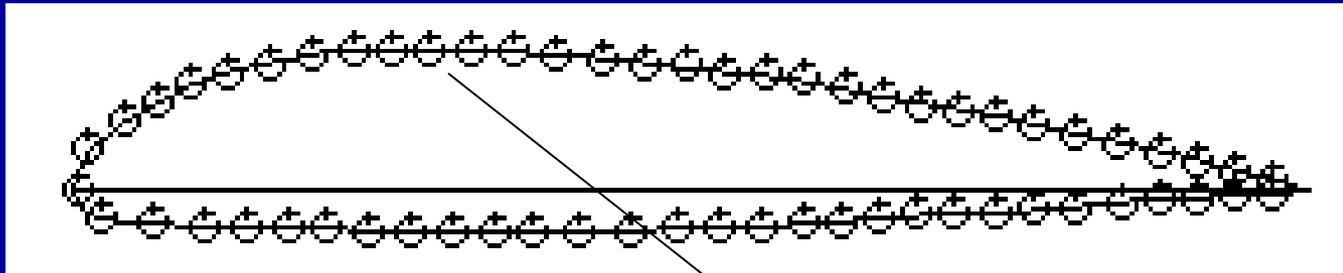
Sistema vorticoso di “ferri di cavallo”

→ schiera di vortici liberi

→ distribuzione di portanza realista

→ “downwash” realista

DESCRIZIONE MATEMATICA DELLA PORTANZA



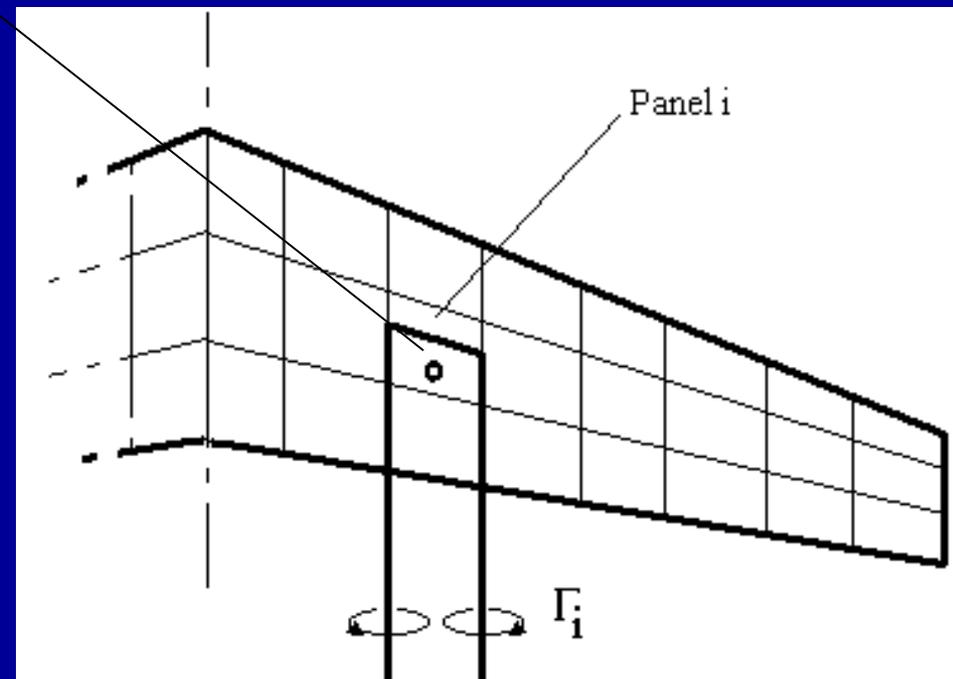
Condizione di Kutta - Jukowski applicata

Griglia di pannelli vorticosi in 3D

→ calcolo elementi finiti

Risulta in un flusso uniforme
intorno al profilo

→ portanza & downwash &
resistenza indotta ok



Il meglio che si può fare!

È QUESTO TUTTO?

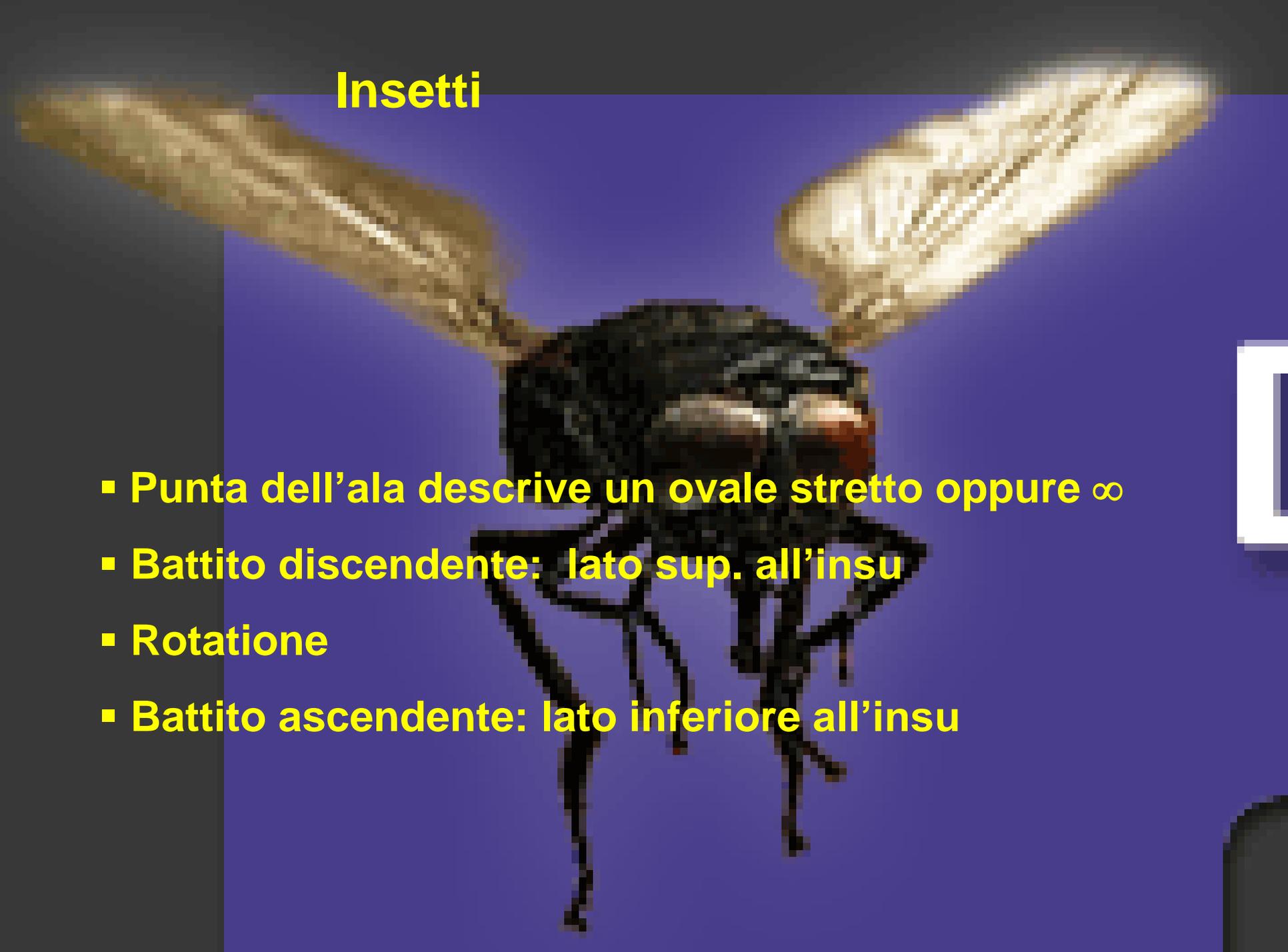
NO!

...PER NOI INSETTI C'È ANCORA UN'ALTRA STORIA!



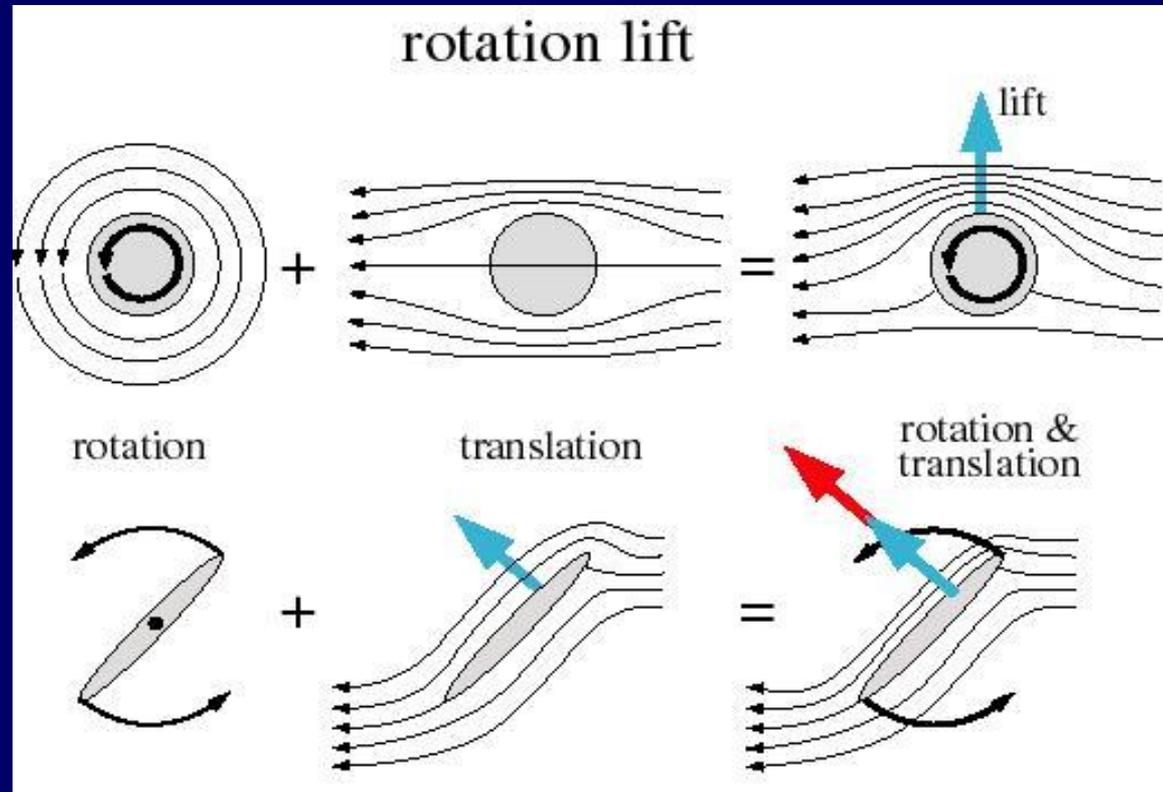
Insetti

- Punta dell'ala descrive un ovale stretto oppure ∞
- Battito discendente: lato sup. all'insu
- Rotazione
- Battito ascendente: lato inferiore all'insu





ROTAZIONE & CIRCOLAZIONE



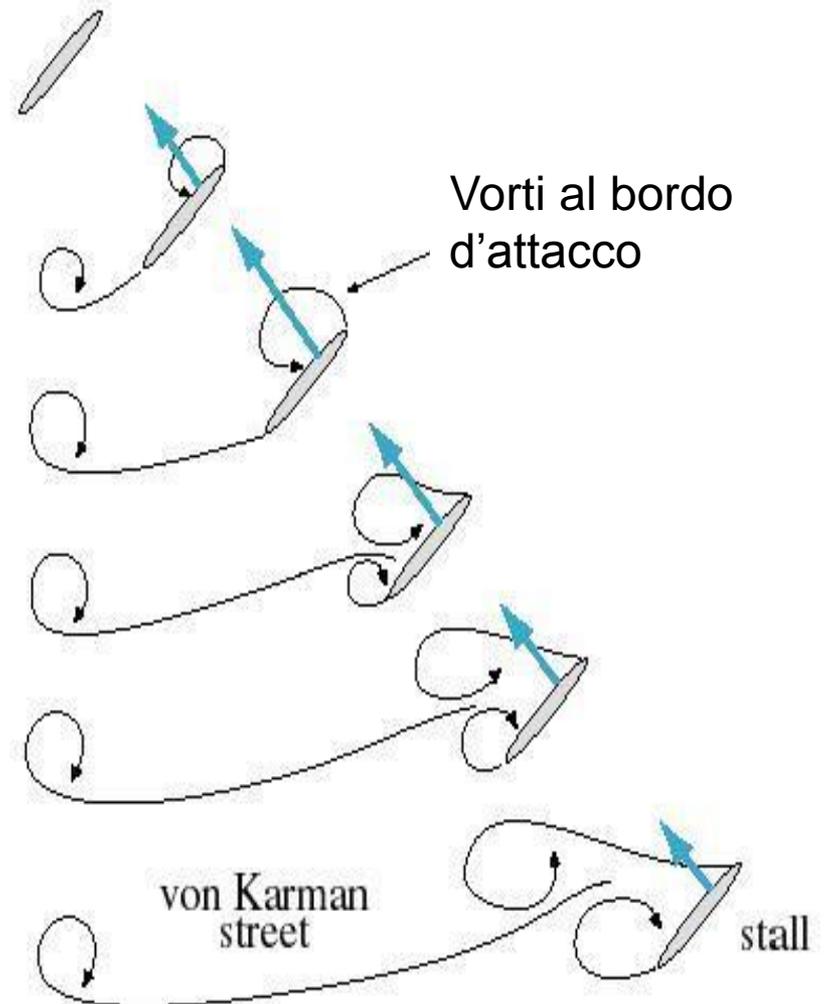
- a la fine del battito l'ala torna e rovescia
- « backspin » → **portance!**
- ..è la contribuzione più importante a la portanze totale!

STALLO RITARDATO



- angolo d'attacco estremo!
→ **stallo!!**
- creazione di un vortice al
bordo d'attacco → **portanze**

Delayed Stall



CONCLUSIONI

Volare è un modo di locomozione rapido ed efficace

Con una differenza di pressione del 10% l'ala può sollevare $1t / m^2$

La portanza dipende della quantità d'aria deviata (\sim del peso/s)

Esiste una relazione tra peso e velocità valida per tutto ciò che vola !

Le scie di condensazione ci rimembrano: vortici \leftrightarrow portanza

Gli insetti sono artisti che combinano tutti elementi del volo!



Inventare un velivolo è niente. Ne costruire uno è un primo passo. Ma volare è tutto!

O. Lilienthal

BIBLIOGRAFIA & LINKS

- [1] K. Padian; <http://www.UCMP.berkeley.edu>
- [2] H. Tennekes, The Simple Science of Flight, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- [3] D. Anderson and S. Eberhardt, Understanding Flight, McGraw-Hill
- [4] Fundamentals of Aerodynamics, J. D. Anderson, McGraw-Hill
- [5] Theoretical Aerodynamics, L.M. Milne-Thomson, Dover, New York
- [6] Fundamentals of Fluid Mechanics, B. Munson, D. Young, T. Okiishi, John Wilwy & Sons
- [7] <http://www.aa.washington.edu/faculty/eberhardt/lift.htm>
- [8] <http://www.monmouth.com/~jsd/how/htm/airfoils.htm>
- [9] <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane>
- [10] <http://www.avweb.com/articles/liftsuck.html>
- [11] <http://www.rz.uni-frankfurt.de/~weltner/Mis6/mis6.htm>
- [12] http://www.idra.unige.it/~irro/lecture_e.html