

## Vantaggi del potersi spostare in aria Adattamento al volo nei Vertebrati

Sfuggire rapidamente a predatori non in grado di volare

Sorvolo di aree potenzialmente dannose

E, per i migliori volatori:

• Accesso a fonti di cibo altrimenti non raggiungibili

Risparmio energetico

• Possibilità di migrare secondo le stagioni

• Incremento dell'areale di distribuzione grazie al superamento di barriere altrimenti insormontabili



## I Vertebrati hanno sviluppato modi diversi di sfruttare il mezzo aereo

Forme passive:

### Paracadutismo

Rallentare la caduta per mezzo di espansioni cutanee o strutture analoghe, seguendo una traiettoria che ha un'angolazione maggiore od uguale a 45 gradi

*Non richiede modifiche metaboliche e bastano minime modifiche strutturali*

### Planata

trasformare la caduta in un movimento trasversale con un'angolazione inferiore ai 45 gradi. Permette di coprire distanze anche molto grandi rispetto alle dimensioni dell'animale

*Non richiede modifiche metaboliche e occorrono modifiche strutturali molto limitate*

### Volo

Poter risalire rispetto al substrato di partenza, dirigersi e manovrare perfettamente in aria

**Richiede profonde modifiche strutturali e metaboliche**



**Attualmente gli Uccelli sono i Vertebrati meglio adattati al volo, ma una grande varietà di gruppi ha sviluppato adattamenti a muoversi nell'aria.**

### **Pesci:**

Gli Exocetidi sono in grado di compiere lunghe planate fuori dall'acqua, sfruttando le pinne pettorali come ali, sospinti da vibrazioni del lobo inferiore della coda.

*Thoracopterus*, un pesce del Triassico Superiore presentava lo stesso adattamento.

Il piccolo "pesce accetta" *Gasteropelecus*, pare invece che faccia dei veri piccoli voli, battendo freneticamente le pinne pettorali. Il pesciolino, visto di lato, sembra avere un pancione, ma in realtà sono muscoli sviluppatissimi per battere le pinne ad elevata frequenza. Visto di fronte sarebbe molto sottile.



Fra gli Anfibi non si contano molti adattamenti allo sfruttamento del mezzo aereo, tuttavia alcune rane tropicali sono in grado di planare grazie ad una struttura che in origine serviva a nuotare

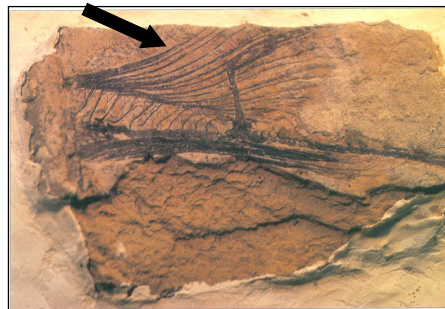
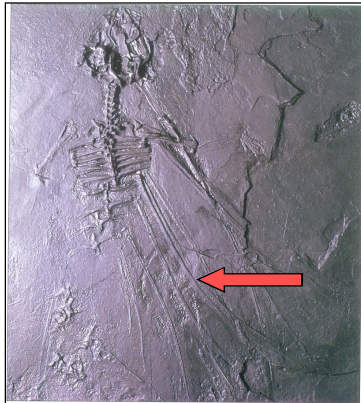
*Rhacophorus* è una raganella arboricola che sfrutta le ampie membrane interdigitali come paracadute quando si lancia da un ramo all'altro.

### **La lucertola agamide *Draco***

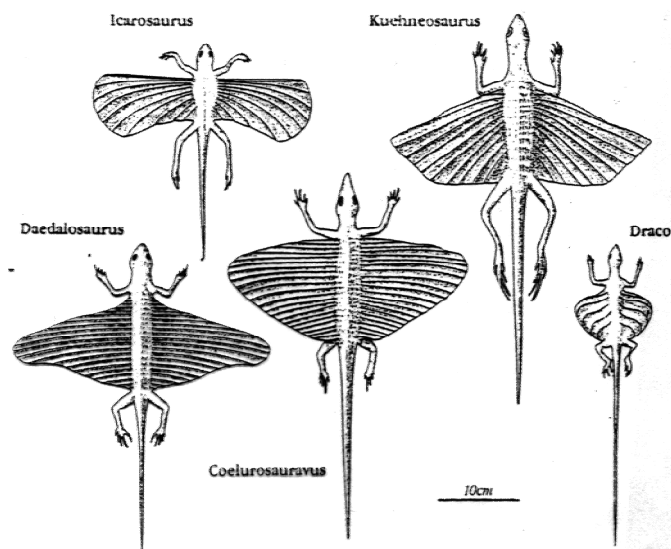
in *Draco*, le costole allungate servono a sostenere una duplicatura cutanea che viene estesa quando l'animale si lancia da un ramo per effettuare lunghe planate

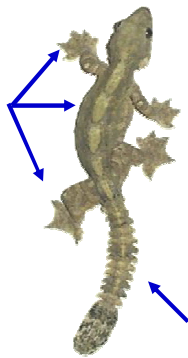


*Coelurosauravus* è un piccolo rettile del Permiano caratterizzato da numerose sottili espansioni ossee sotto le "ascelle" ossia all'attaccatura degli arti anteriori



*Icarosaurus* è un rettile del Triassico in cui sono le costole stesse ad essere estremamente allungate





Il gecko *Ptychozoon* possiede delle espansioni cutanee ai lati del corpo e degli arti che fungono da paracadute

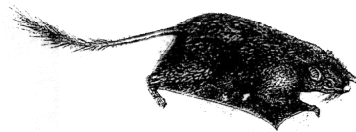


Il "serpente volante" *Chrysopelea* espande le costole per appiattirsi ed è in grado di planare efficacemente in caduta libera quando si lancia dai rami degli alberi, riuscendo anche a regolare la traiettoria con ondulazioni del corpo

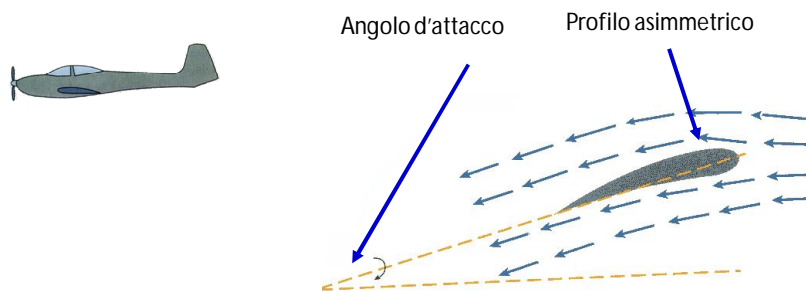
Diversi gruppi di Mammiferi sia Marsupiali che Placentali mostrano spiccati adattamenti al volo planato, senza contare i pipistrelli che sono dei perfetti volatori attivi.



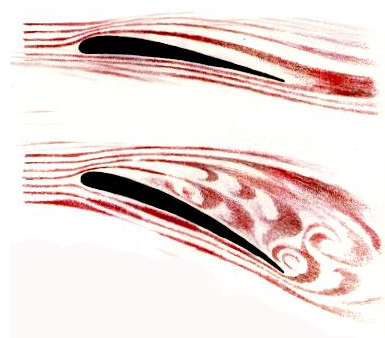
Lo scoiattolo volante può planare per tratti lunghissimi e dirigere il suo "volo" con grande raffinatezza



*Eomys* un piccolo roditore dell'Eocene, era provvisto di una duplicatura cutanea (patagio) tesa fra gli arti. Mancando di modificazioni scheletriche, non avremmo mai potuto sapere quanto fu precoce l'adattamento al volo planato nei Mammiferi se *Eomys* non fosse stato ritrovato in un giacimento fossilifero in cui si conservano anche le parti molli.

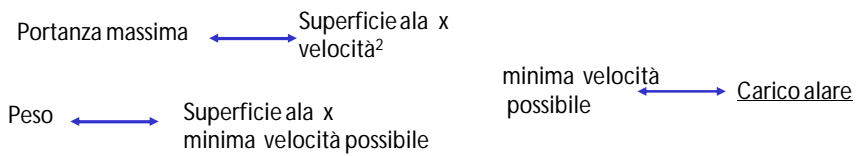


Un uccello od un aereo in volo sono sostenuti da forze create dal flusso d'aria lungo le ali, queste ultime hanno un profilo atto a generare PORTANZA, Quest'ultima si ottiene spingendo l'aria verso il basso. Maggiore è l'**angolo d'attacco**, maggiore sarà la portanza generata, entro certi limiti....



Se l'angolo d'attacco diviene eccessivo, il flusso d'aria si stacca dalla superficie dorsale dell'ala la portanza si riduce bruscamente, si verifica lo STALLO e l'aereo, o l'uccello, cominciano a cadere





$$\text{Carico alare} = \frac{V}{\text{peso} \times (\text{superficie alare})^2}$$



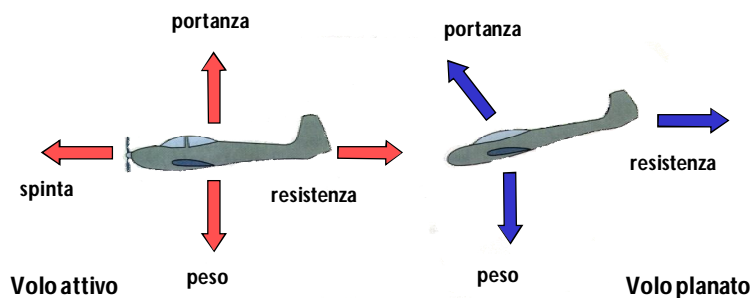
< il carico alare  
< velocità necessaria  
per restare in volo



> il carico alare  
> velocità necessaria  
per restare in volo

Resistenza di forma  $\longleftrightarrow$  Potenza di forma di più ad alte velocità

Resistenza indotta  $\longleftrightarrow$  Potenza indotta di più a basse velocità



**Sia nel volo attivo che nella planata, tutte le velocità critiche: velocità di stallo, velocità minima, velocità massima di crociera, sono sempre in funzione del CARICO ALARE.**

**Se si vuole planare lentamente occorrono [ali grandi](#), se si vuole planare velocemente sono meglio [ali piccole](#).**



### **CARATTERI ANATOMICI DI UN VOLATORE ATTIVO**

- 1) Superficie portante opportunamente sagomata (ala)
- 2) profilo ad aerofoil della superficie alare
- 3) ampia possibilità di movimento dell'arto trasformato in ala
- 4) Ancoraggio solido dell'ala allo scheletro assile in modo da evitare dislocazioni ed evitare compressione della cassa toracica (che ostacolerebbe la respirazione).
- 5) ampie aree di inserzione per una potente muscolatura alare.
- 6) accorgimenti per risparmiare peso



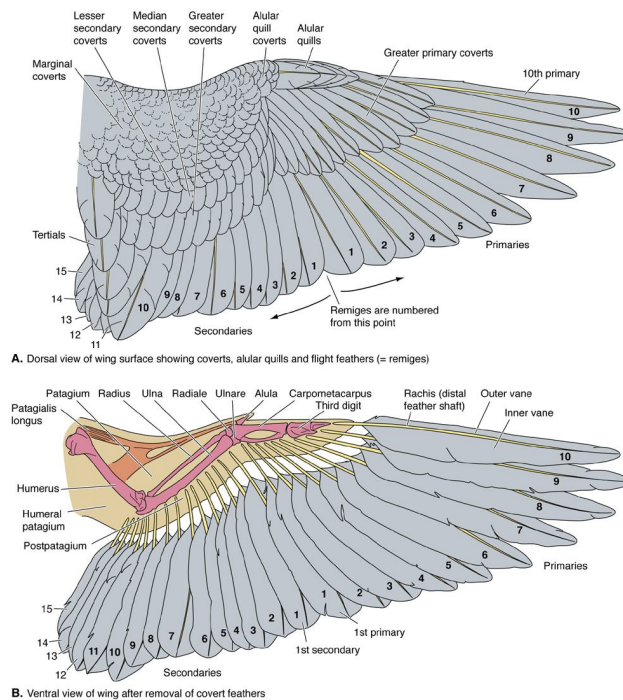
## REQUISITI FISIOLGICI DI UN VOLATORE ATTIVO

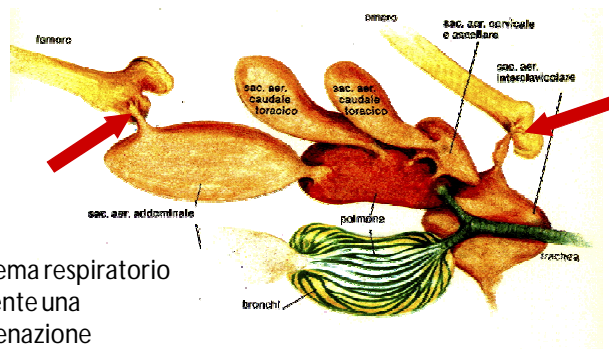
Un volatore attivo deve possedere un tasso metabolico molto elevato e costante per poter disporre dell'energia necessaria per volare.

Di conseguenza deve essere *endotermo*, ossia in grado di produrre energia e mantenere costante la temperatura corporea mediante processi fisiologici interni.

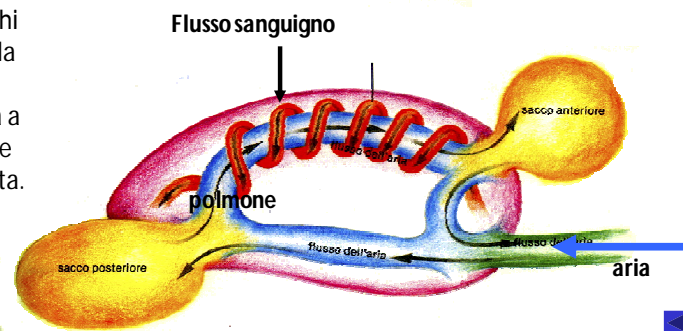
Gli attuali animali endotermi sono generalmente provvisti di isolamento cutaneo (piume e peli) per ostacolare la dispersione del calore corporeo.

Per volare sono richieste eccellenti coordinazione neuromuscolare e percezione dello spazio tridimensionale, Gli uccelli hanno un'ottima vista ed i pipistrelli un raffinato meccanismo di ecolocazione.





Il sistema respiratorio consente una ossigenazione efficiente, e i sacchi aerei favoriscono la respirazione e mantengono l'aria a pressioni adeguate anche ad alta quota.



Possiamo fare delle distinzioni riguardo al volo degli Uccelli:

**Volo Veleggiato** (passivo in massima parte), sfrutta le correnti aeree per il sostentamento, la salita o per dirigersi con uno sforzo minimo.

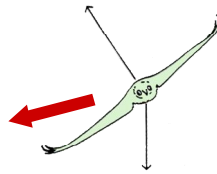
**Volo Battuto** (attivo), l'energia per il sostentamento e la propulsione provengono dalla contrazione muscolare.

### Veleggiatori termici

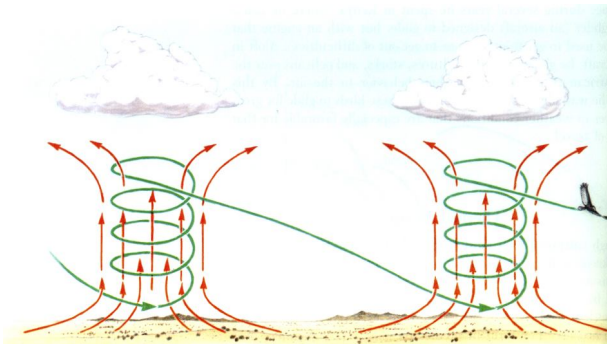
Possono restare in aria e guadagnare quota senza altro sforzo che quello per tenere tese le ali

Se la velocità di risalita dell'aria supera quella di caduta dell'uccello in aria ferma, esso guadagnerà quota ad una velocità pari alla differenza fra le due

Per restare nella corrente, bisogna saper compiere i cerchi lentamente, per non generare troppa resistenza indotta che aumenterebbe la velocità di caduta, di conseguenza occorre un [basso carico alare](#)



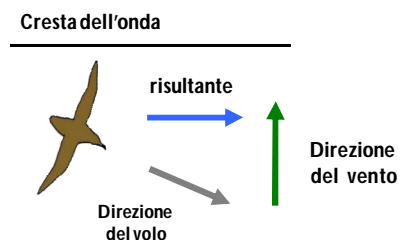
L'inclinazione genera una forza centripeta che mantiene l'uccello all'interno del vortice



### Veleggiatori costieri

Sfruttano le correnti che si formano in presenza di dislivelli esposti al vento, come scogliere e grosse onde oceaniche.

Il vento costiero è veloce, quindi i veleggiatori costieri devono planare velocemente in modo da non essere sospinti indietro dal vento. Occorre quindi, un maggiore carico alare per planare più velocemente.



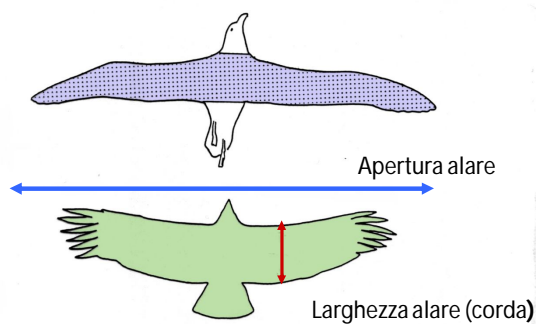
Le due differenti strategie si riflettono nella ampiezza dell'ala

A parità di dimensioni veleggiatori termici devono avere ali più ampie rispetto al corpo (un minore carico alare) di quelle dei veleggiatori costieri, perché devono planare più lentamente di questi ultimi.

Le diverse modalità di volo si riflettono nella forma dell'ala che può essere descritta tramite un valore l'ALLUNGAMENTO ALARE, definito così:

$$\text{Allungamento alare} = \frac{\text{apertura alare}}{\text{larghezza alare (corda)}}$$

Più il valore dell'allungamento alare sarà alto, più l'ala sarà lunga e stretta e viceversa



### SPIRITO SANTO

Alcuni piccoli veleggiatori, come il gheppio, bilanciano la loro velocità di planata con quella di risalita dell'aria, riuscendo a restare immobili, sospesi in aria

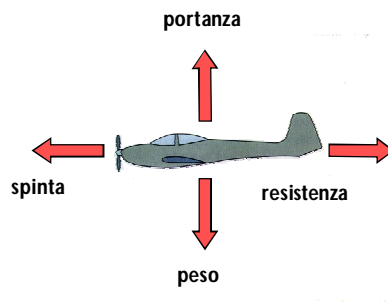


### ANCORARSI ALL'ACQUA

Altri piccoli veleggiatori stanno sospesi a pelo d'acqua e vi immergono periodicamente i piedi. Essi tengono le ali tese, in modo che il corpo sia sostenuto dal vento, la cui spinta all'indietro, è controbilanciata dalla resistenza dell'acqua.

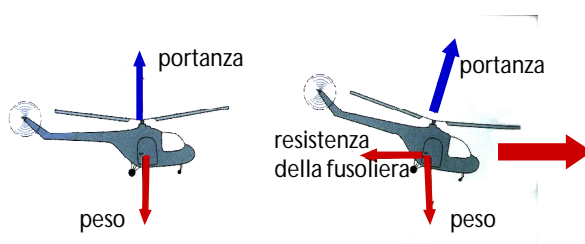
## Volo attivo

**Volo Battuto** (attivo), l'energia per il sostentamento e la propulsione provengono dalla contrazione muscolare.



Serve un motore...  
Ossia qualcosa che fornisca il flusso d'aria come le correnti d'aria per i veleggiatori

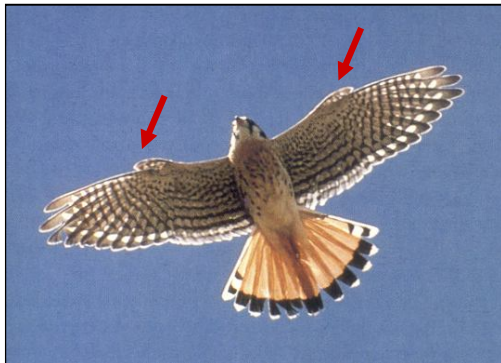
## Volo battuto



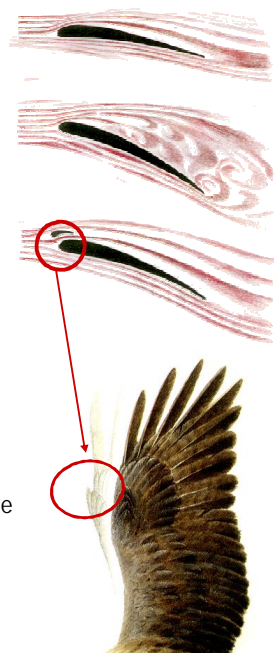
La meccanica del volo battuto è più simile a quella dell'elicottero, che a quella dell'aereo. Infatti le ali dell'uccello devono comportarsi come le pale dell'elicottero, generando sia portanza che spinta.



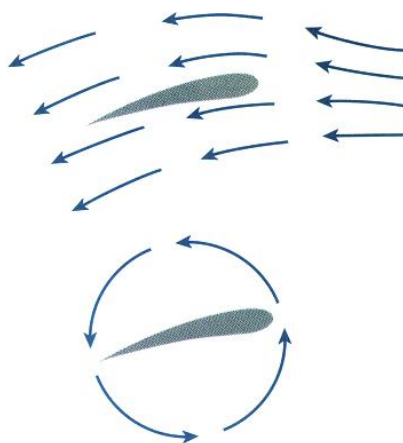
## alula



Permette di aumentare l'angolo di attacco, riducendo la turbolenza che porterebbe allo stallo

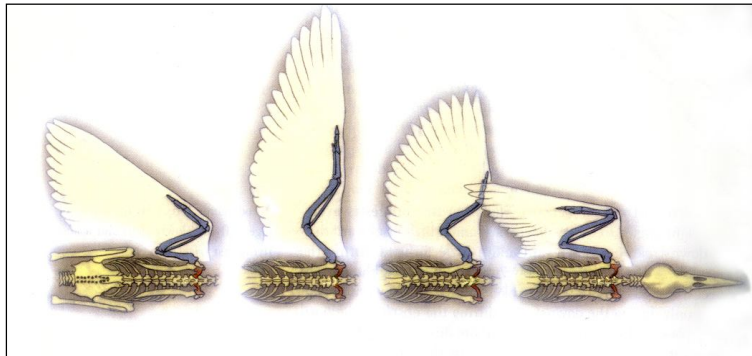


Per comprendere la dinamica del volo battuto bisogna considerare il fatto che un flusso d'aria (che può dare portanza) può essere generato dal movimento stesso delle ali e non necessariamente dalla massa d'aria.



### Volo battuto rapido lineare

Caratteristico dei grossi pipistrelli e della maggior parte degli uccelli di dimensioni medio-grandi



Il corpo è tenuto in posizione orizzontale

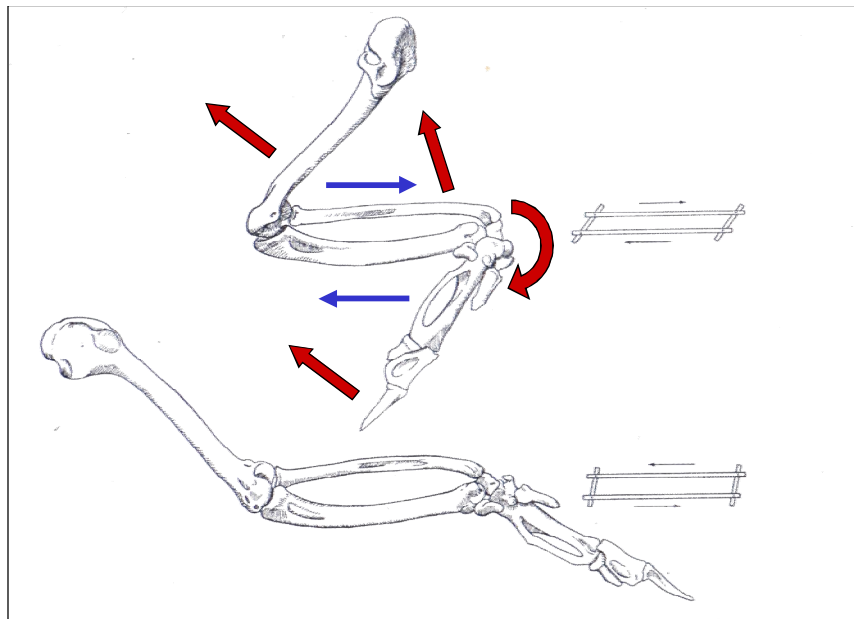
Le ali battono dall'alto verso il basso

La velocità del corpo fornisce il flusso d'aria sufficiente a generare portanza

La parte prossimale dell'ala produce portanza sia nella fase attiva, ossia in avanti che in fase di recupero perché è sempre orientata in senso anteroposteriore

La propulsione in avanti è generata dalla metà distale dell'ala che "rema" ossia preme in fase attiva contro la massa d'aria ed ha una fase di recupero in cui offre la minor resistenza possibile al flusso d'aria

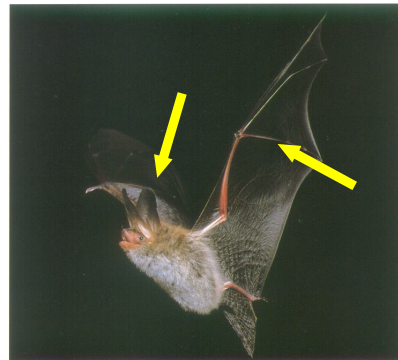
La posizione della metà prossimale dell'ala cambia pochissimo durante la battuta, la porzione distale viene flessa all'altezza dell'articolazione del carpo.



Il movimento di flessione è automatico e obbligato, evita dislocazioni e consente di risparmiare energia

I pipistrelli volano con un rapido volo battuto, solo i più grandi effettuano delle planate

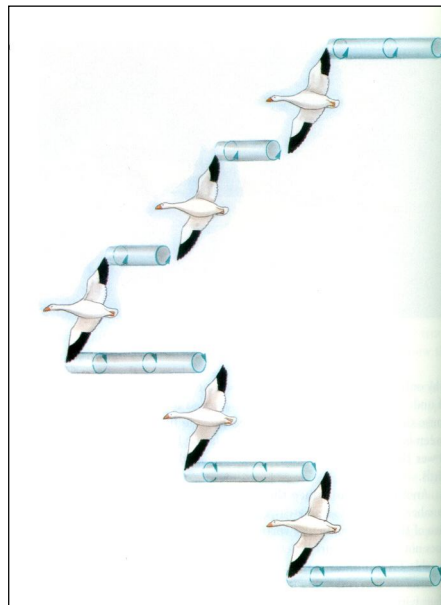
La superficie portante è un **patagio** piuttosto delicato e flessibile, il mantenimento del profilo alare è garantito dalle lunghe dita



Anche il cinto pettorale dei pipistrelli forma un anello robusto ed il funzionamento dei muscoli è analogo a quello degli uccelli



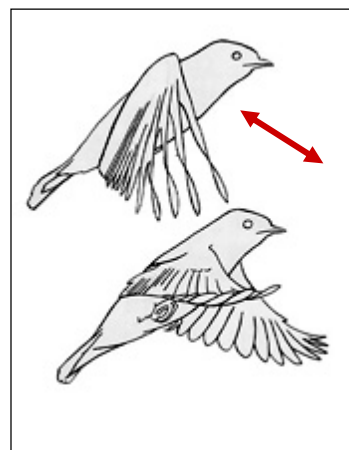
questo è sfruttato nel volo in stormo per creare portanza posizionandosi alla giusta distanza ed angolatura, diminuendo di conseguenza la portanza che deve essere generata tramite la forza muscolare.



Volo battuto lento ascendente e discendente in uccelli di piccole dimensioni

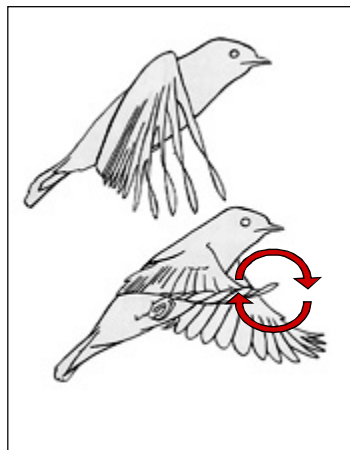
Molti uccelli di piccole dimensioni, specialmente in aree alberate, compiono voli brevi che includono fasi di ascensione o discesa molto ripide

In questi casi la velocità del volo è bassa, ma le ali battono molto rapidamente in modo da avere un adeguato flusso d'aria sulle ali. L'asse del corpo è inclinato a 45° o quasi verticale, per cui le ali, rispetto alla direzione del volo, battono quasi in avanti-indietro anziché sopra-sotto.

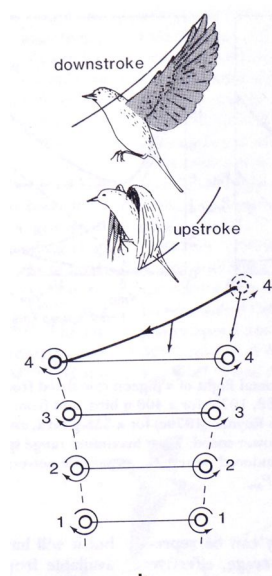


L'estremità dell'ala descrive una traiettoria ovale schiacciata o dei piccoli cerchi.

La fase in cui l'ala viene portata in avanti è la fase attiva, ed ha un angolo di attacco positivo, in cui viene generata una notevole portanza e spinta propulsiva,



la fase in cui l'ala viene portata indietro è solo una fase di recupero in cui non si hanno significative interazioni con il flusso d'aria, per ridurre l'inerzia (quindi il costo energetico) di questa fase, gli uccelli piegano le ali per diminuire la resistenza dell'aria. I muscoli elevatori dell'ala sono molto meno sviluppati degli adduttori

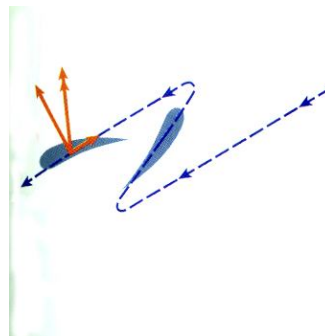


Volo battuto lento ascendente e discendente in uccelli di medie dimensioni

Molti buoni volatori di medie dimensioni possono effettuare lo stesso tipo di volo ascendente o discendente specialmente in fase di atterraggio/decollo. Piccioni, gabbiani, anatre ecc.

**Avendo dimensioni più grandi, il movimento delle ali sarà più lento, e contemporaneamente il carico alare sarà maggiore rispetto ad es. ai piccoli passeriformi**

L'alto carico alare e la frequenza moderata del battito esclude la possibilità di una fase di recupero completamente passiva, perché l'uccello non riuscirebbe a generare portanza continua e sufficiente



Il problema viene risolto in questo modo:  
La fase di recupero comprende tre momenti:

1) L'ala viene flessa in modo che l'estremità scorra vicino al corpo

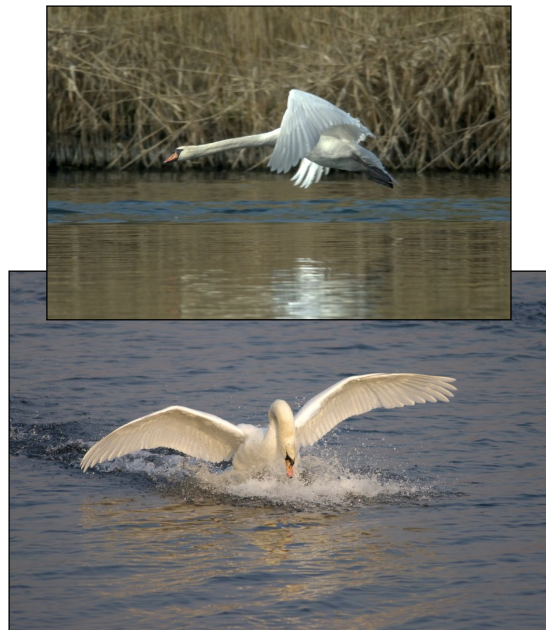
**2 La metà distale dell'ala ( e solo quella) viene rovesciata in modo che la superficie ventrale si trovi rivolta verso l'alto (la rotazione avviene a livelli del carpo)**

**Le singole penne remiganti ruotano individualmente come le strisce di una tenda veneziana così da agire come superfici portanti aerodinamiche (airfoil) con un'angolo di attacco positivo, ma l'aria può scorrere fra le penne**

**Altri uccelli, specialmente se di grandi dimensioni e con alto carico alare, non sono in grado di compiere ascensioni e discese lente con inclinazione ripida e devono decollare ed atterrare secondo un angolo poco pronunciato,**



**spesso devono aiutarsi correndo per generare la portanza sufficiente al decollo o atterrare in acqua per ammortizzare l'impatto.**



*E queste ...*

Volo stazionario in aria ferma (Hovering)

Specializzazione del volo battuto

Se l'uccello è di dimensioni piccole possono restare immobili in aria

Solitamente per accedere al nettare dei fiori o cibo che non è raggiungibile in altro modo

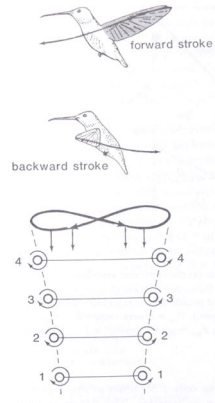
Colibrì, pochi altri uccelli e alcuni pipistrelli

Il corpo è in posizione subverticale

Di conseguenza le ali si muovono avanti-indietro anziché alto-basso

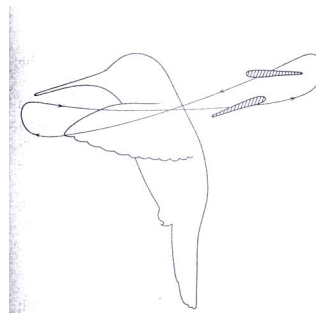
Le punte delle ali descrivono un otto orizzontale (o simbolo di infinito...)

Il movimento delle ali crea un vortice d'aria diretto verso il basso che sostiene l'uccello.



**Nella fase di spinta in avanti  
le ali hanno un'angolo di  
attacco positivo**

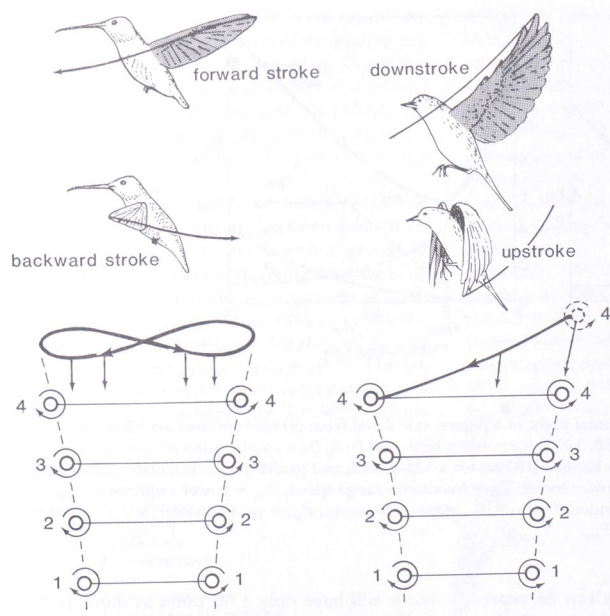
**Generano una portanza notevole  
diretta ad angolo retto rispetto al  
flusso d'aria, ma con una  
notevole componente verticale**



Al limite anteriore estremo del colpo d'ala, quest'ultima viene rovesciata in modo che la superficie ventrale sia rivolta in alto poi portata indietro di nuovo con un'angolo d'attacco positivo Generando portanza con una forte componente verticale

Il rovesciamento dell'ala avviene all'altezza dell'articolazione con il cinto mentre l'ala stessa è piuttosto rigida a livello del gomito, somigliando funzionalmente più all'ala di un insetto che a quella di un uccello.

Le componenti orizzontali della spinta tendono a elidersi a vicenda e l'animale rimane fermo in aria, Variando leggermente l'intensità di uno dei movimenti rispetto all'altro, l'uccello può far prevalere una delle due componenti così da potersi spostare orizzontalmente in avanti o all'indietro secondo necessità

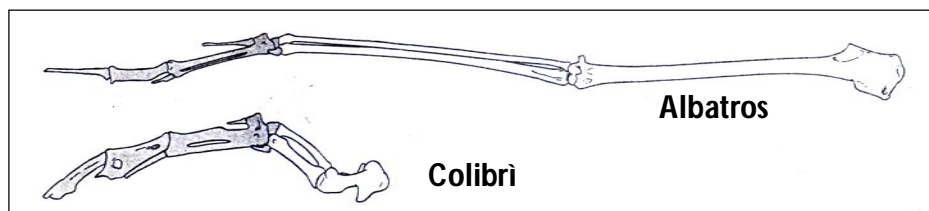


**Quando l'animale non effettua questo tipo di volo stazionario, vola di volo battuto normale tenendo il corpo orizzontale.**

**Gli hovers, non sono in grado di veleggiare perché hanno un carico alare molto elevato e planano solo per brevissimi tratti in fase di discesa.**

Dato che il corpo è fermo rispetto alla massa d'aria, l'uccello deve muovere le ali molto velocemente in modo da creare un moto d'aria sufficientemente veloce per generare portanza intorno alle penne. Per questo le ali sono corte, in modo da non avere un eccessivo momento inerziale.

**La parte corrispondente alla mano è molto lunga, mentre la porzione prossimale (che si muove più lentamente) è breve**



Poiché anche la fase di recupero è attiva e genera molta portanza, i muscoli elevatori dell'ala sono in proporzione molto più sviluppati che negli altri uccelli.  
Il consumo energetico (considerando anche la frequenza del battito) provocato da questo tipo di volo è elevatissimo.

I pipistrelli che effettuano il volo stazionario in aria ferma, non sono in grado di rovesciare l'ala all'altezza dell'articolazione con il cinto, per cui compiono l'inversione a livello del carpo come gli uccelli in fase di volo battuto lento, solo molto più velocemente

Altri complessi movimenti sono utilizzati per controllare la posizione, virare ecc. Impiegando sia le remiganti che le timoniere, ma la storia è lunga...