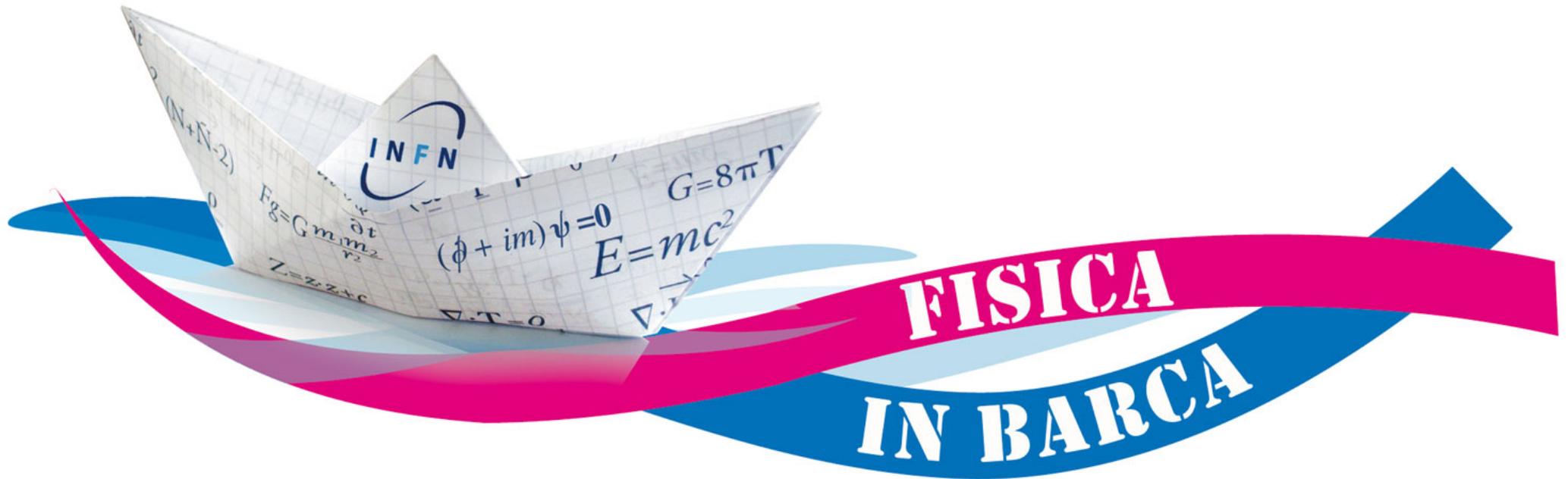
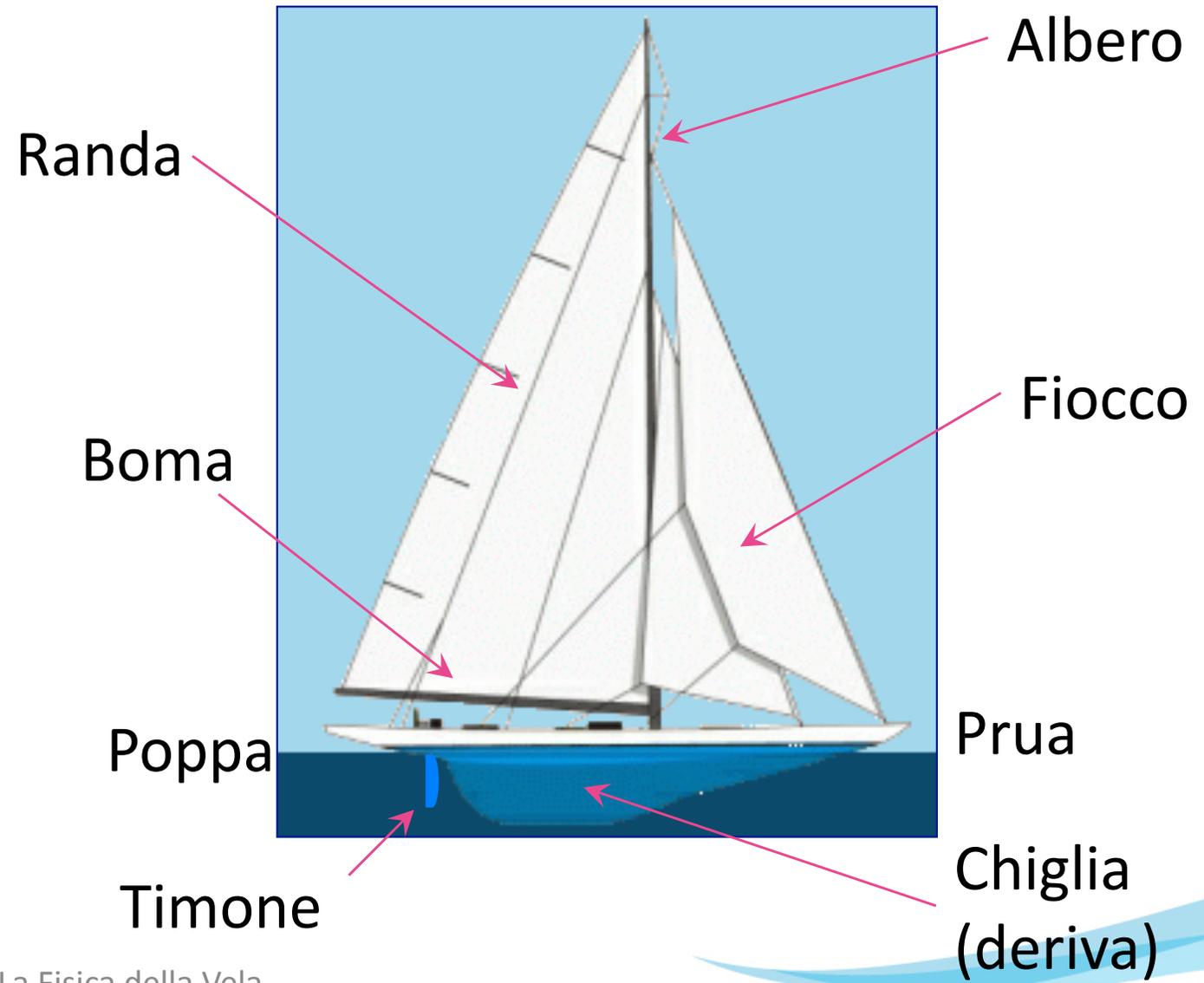


La Fisica della Vela





Nomenclatura





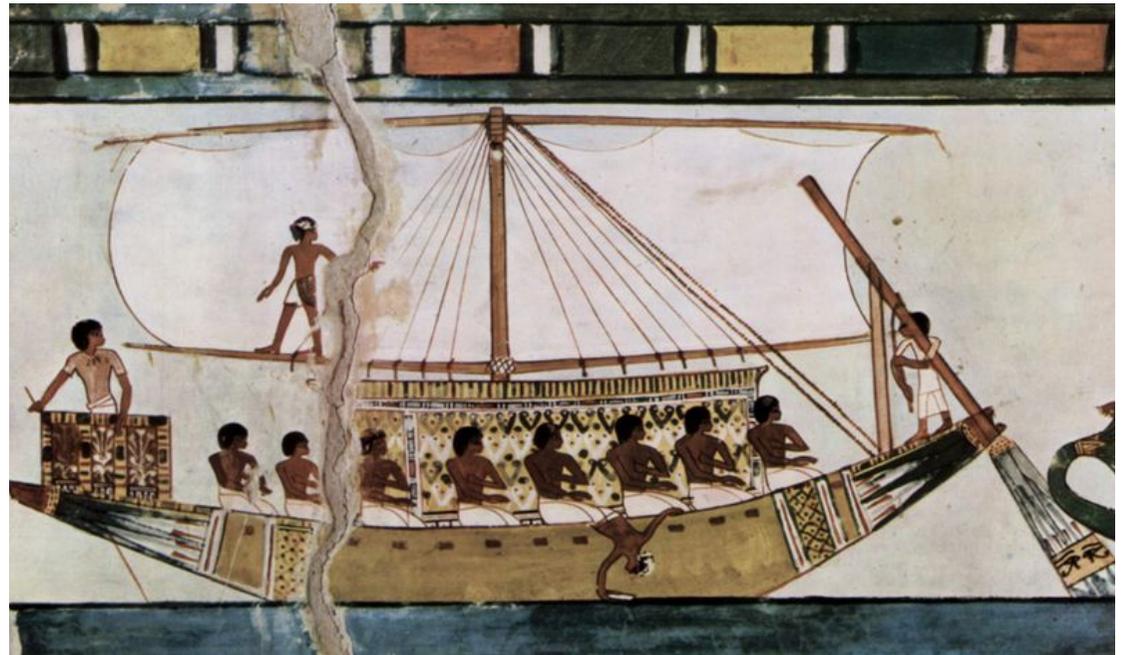
La Spinta del Vento

- Che un oggetto possa essere **trascinato dal vento** fa parte dell'esperienza di tutti:
 - Abbiamo sicuramente visto **fogli di giornale** o altre carte muoversi con il vento.
 - Abbiamo sicuramente constatato che è più facile muoversi in **bicicletta** con il **vento nella schiena** piuttosto che con il **vento contro**.



La Spinta del Vento (II)

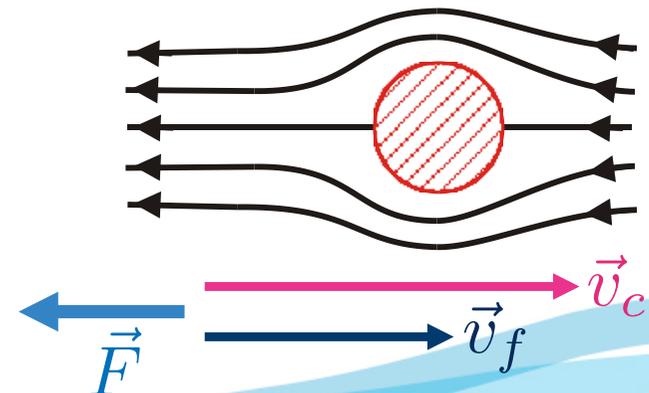
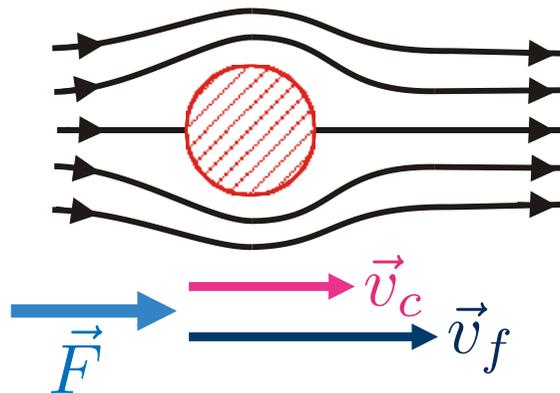
- La possibilità di muovere **imbarcazioni** mediante l'utilizzo delle **vele** è nota dai **tempi antichi** (si pensi a Ulisse, agli egiziani o ai babilonesi, più di 5000 anni fa).
 - Tuttavia nei tempi antichi le barche si muovevano soltanto **nella direzione del vento** ed era necessario attendere il vento giusto per iniziare il viaggio.





Come Funziona?

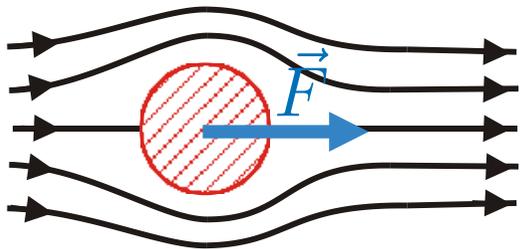
- Un corpo immerso in un fluido, che si muove a velocità v_f diversa dalla velocità del corpo v_c , è soggetto a una forza – detta **forza di trascinamento** o forza di **resistenza fluidodinamica** (aerodinamica o idrodinamica) – dovuta alla **viscosità** del fluido.
 - La forza di trascinamento dipende dalla **differenza di velocità** tra il corpo e il fluido.
 - Se le due **velocità** sono **uguali**, la **forza** di trascinamento è **nulla**.
 - Se le due velocità sono diverse la forza ha **verso** tale da **tendere ad avvicinare le due velocità**.



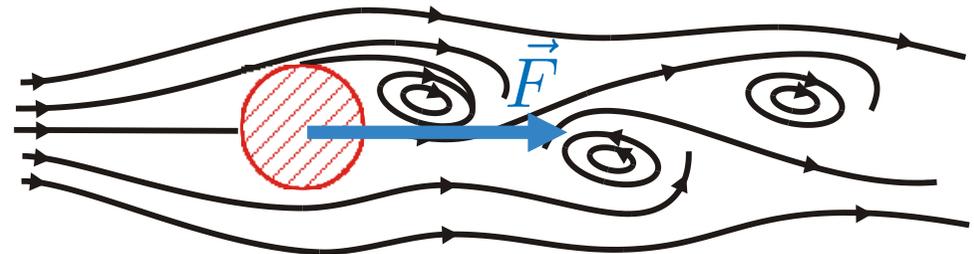


Come Funziona? (II)

- L'intensità della forza di trascinamento **dipende** in modo **non semplice** dalla differenza di velocità, in quanto, al variare della velocità può anche cambiare il **regime** del flusso.
 - Nel regime **laminare** l'intensità della forza è **proporzionale alla differenza di velocità**.
 - In certi regimi **turbolenti** l'intensità della forza è **proporzionale al quadrato della differenza di velocità**.

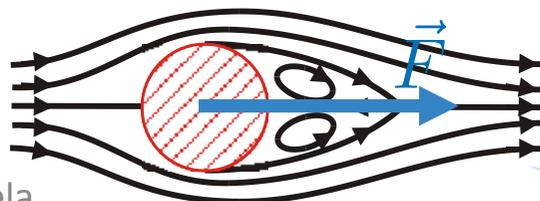


Regime laminare



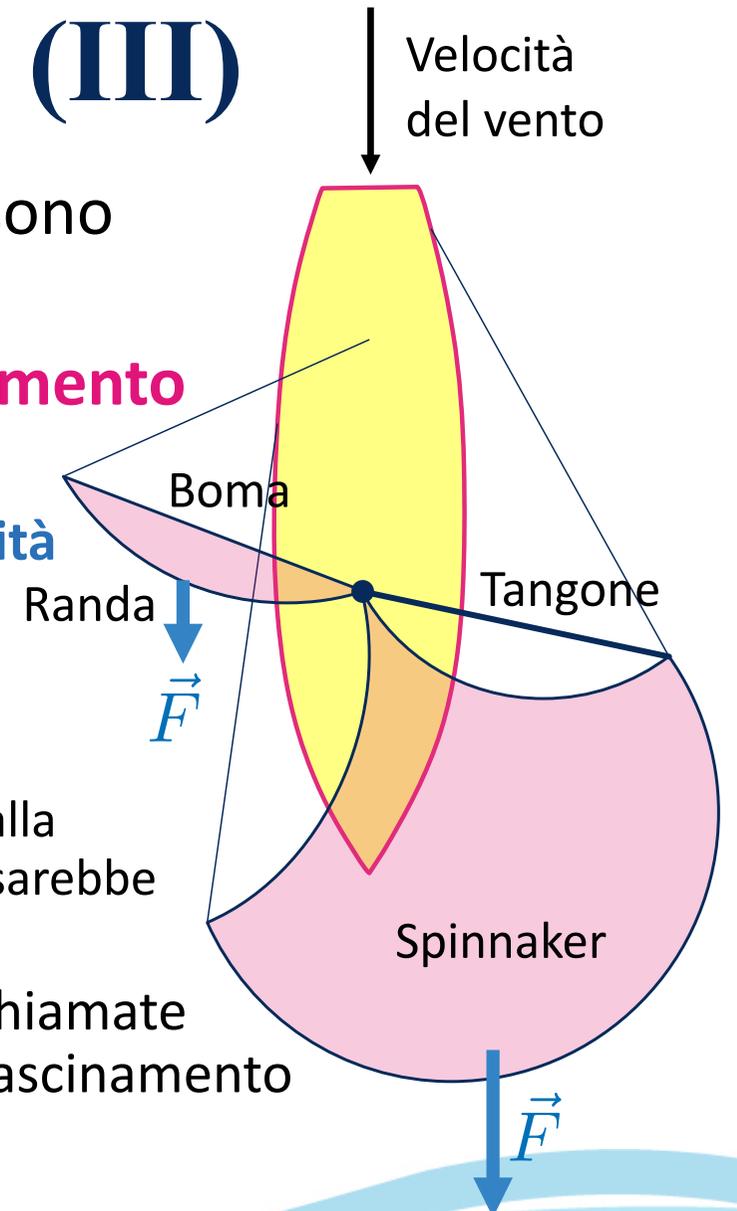
Regime vorticoso stazionario

Regime vorticoso periodico



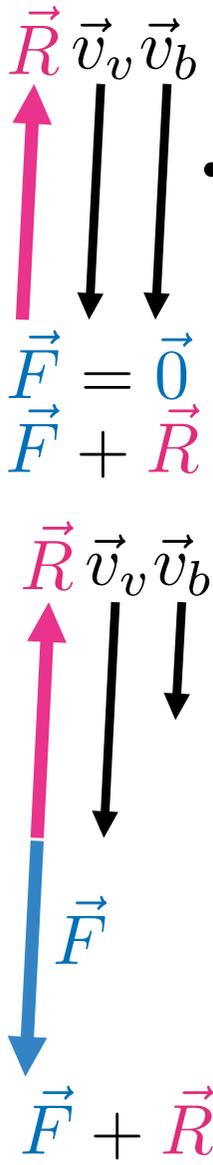
Come Funziona? (III)

- Nell'andatura con **vento in poppa**, le vele sono "trascinate" dal vento.
- Le **vele** sono soggette alla **forza di trascinamento** o forza di **resistenza aerodinamica**.
 - La **forza** è **nulla** se le vele hanno la **stessa velocità** dell'aria.
 - La barca **non può viaggiare con velocità superiore alla velocità del vento**.
 - Se la barca si muovesse a velocità superiore alla velocità dell'aria, la resistenza aerodinamica sarebbe diretta indietro e rallenterebbe la barca.
 - Vele "a palloncino", di **grande area**, chiamate "**spinnaker**" aumentano la forza di trascinamento e dunque la velocità della barca.

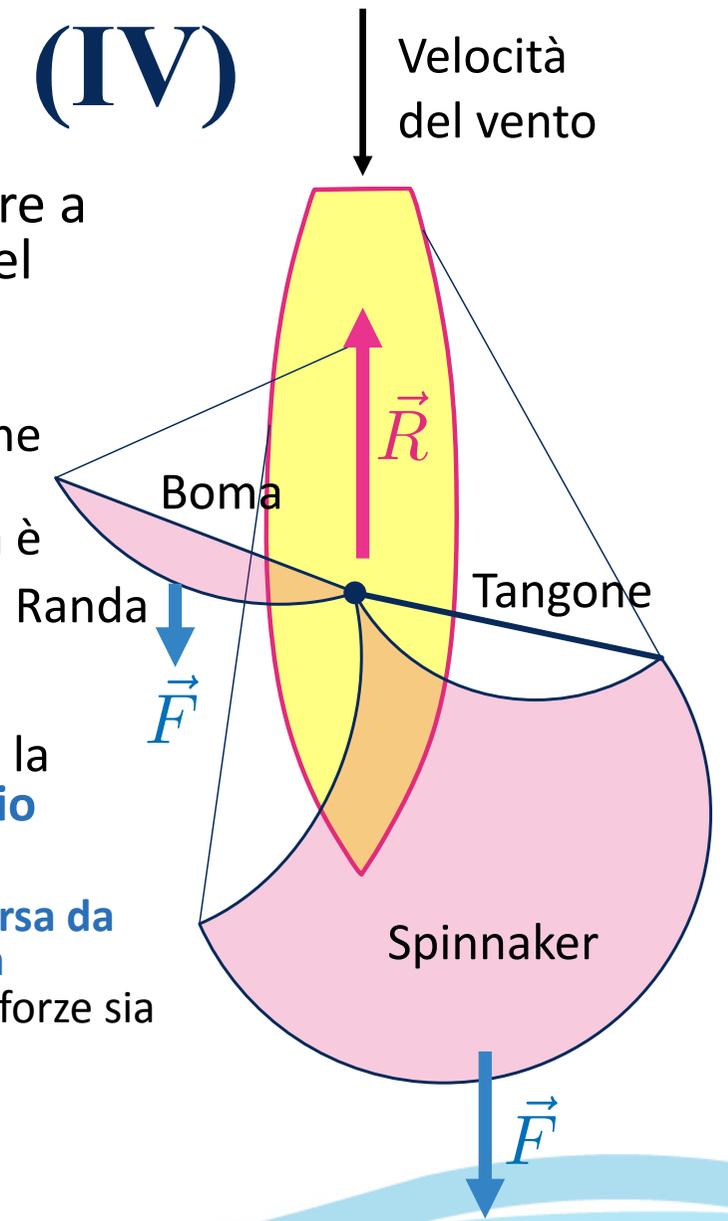




Come Funziona? (IV)



- Con il vento in poppa una barca viaggia sempre a velocità **inferiore** (**non uguale**) alla velocità del vento.
 - Se la barca ha la **stessa velocità del vento**, la **resistenza aerodinamica** delle vele all'aria – che trascina la barca in avanti – è **nulla**, mentre la **resistenza idrodinamica** dello scafo nell'acqua è diretta **indietro**:
 - La **risultante** delle due forze è diretta indietro e rallenta la barca.
 - Per procedere a **velocità costante** occorre che la **risultante** delle forze sia **nulla** (per il **II principio della dinamica**):
 - È necessaria una **resistenza aerodinamica diversa da zero** per **equilibrare la resistenza idrodinamica dell'acqua**, in modo che la risultante delle due forze sia nulla.
 - È necessario che la barca si muova con velocità **inferiore** alla velocità del vento.

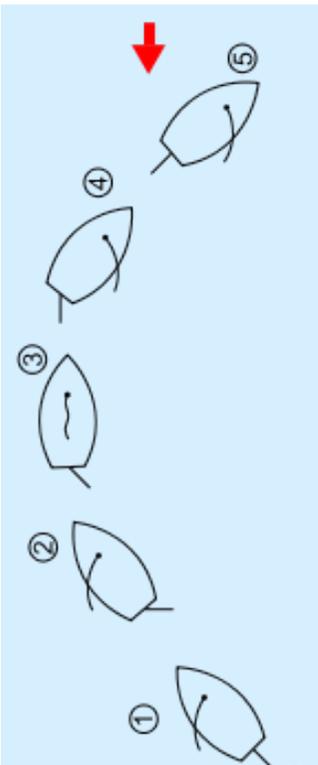




Come Funziona? (V)

- Al contrario, **non è possibile** che una barca **viaggi** in direzione **esattamente opposta** (antiparallela) a quella del **vento**.

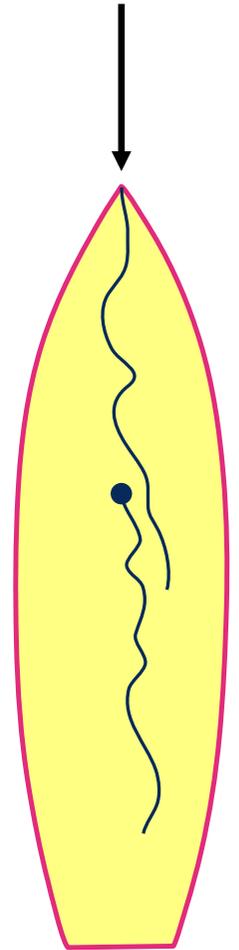
Virata



- Se la barca rimane, per un certo intervallo di tempo, con la prua al vento, le vele sventolano e la barca si ferma (**stallo**).

- La **forza** di trascinamento del vento agisce con **verso opposto alla velocità** della barca e dunque **decelera** la barca.
- È una condizione che si cerca di evitare.
- È una condizione che si presenta per brevi momenti e con la **barca in movimento** (p. es. nella **virata**).

Velocità del vento



Stallo



Vento in Poppa



Domenico Galli - La Fisica della Vela



Abbiamo Capito Tutto?

- Finora abbiamo capito che:
 - Una barca è **trascinata** dal vento a causa della **resistenza aerodinamica** delle vele.
 - Una barca si muove sempre a **velocità inferiore alla velocità del vento**.
 - Quando una barca si muove di **moto uniforme** la resistenza aerodinamica del vento sulle vele equilibra la resistenza idrodinamica dell'acqua sullo scafo, in modo che la **risultante delle forze sia nulla**.
 - Una barca **non può viaggiare** in direzione esattamente opposta (**antiparallela**) alla direzione del vento.
- Abbiamo capito tutto?



Tre Domande e Tre Risposte: Non Abbiamo Capito Tutto!

- Può una barca a vela muoversi **verso il vento**?
 - **Sì**, può muoversi fino a circa **40°-25°** (dipendentemente dal tipo di barca) rispetto alla direzione da cui proviene il vento.
- Può una barca a vela muoversi con **velocità maggiore della velocità del vento**?
 - **Sì**, fino a **1.5** volte.
- Perché certe barche navigano **preferibilmente verso il vento**?
 - Perché in questo modo possono andare **più veloci**.





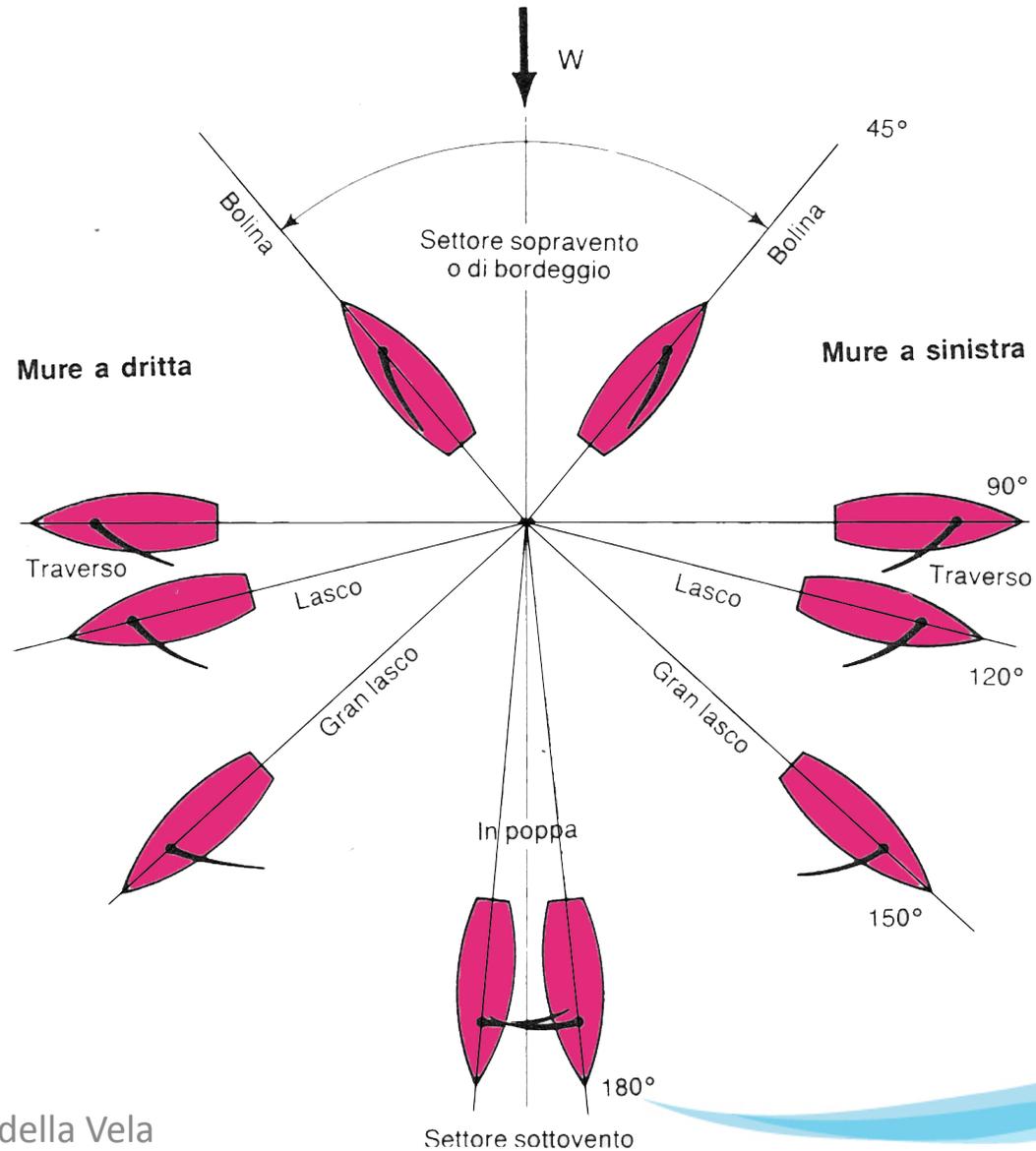
Come è Possibile?

- In sintesi, la risposta alle 3 domande sta nel fatto che:
 - Una barca a vela può avere un'andatura diversa da quella che abbiamo visto (**vento in poppa**), che è detta **andatura di bolina**.
 - Nell'andatura di bolina la forza che muove la barca **non** è più la **forza di trascinamento** o **resistenza aerodinamica**.
 - Nell'andatura di bolina la barca è mossa da un altro tipo di **forza**, detta **portanza** (la stessa che sostiene gli aerei in volo).



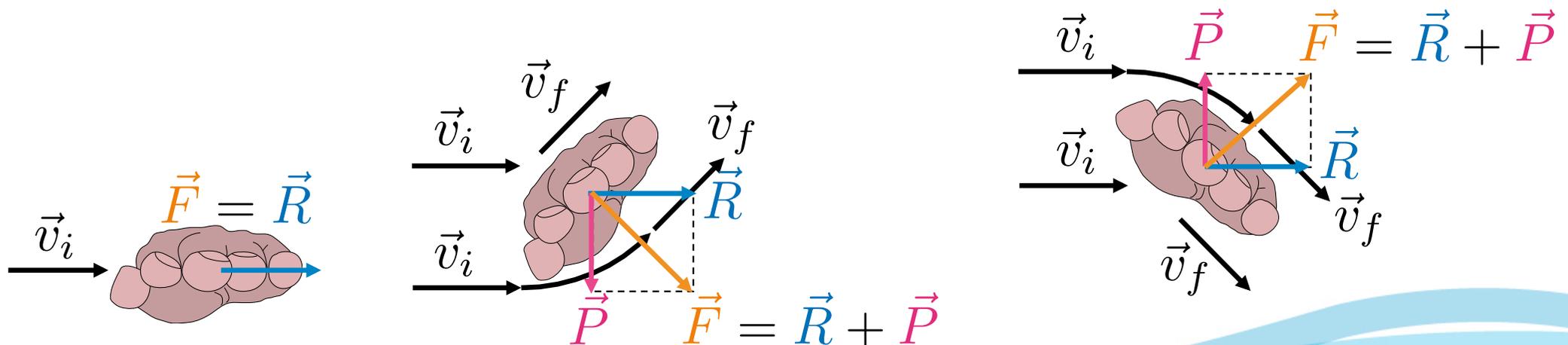


Nomenclatura (Andature)



La Portanza

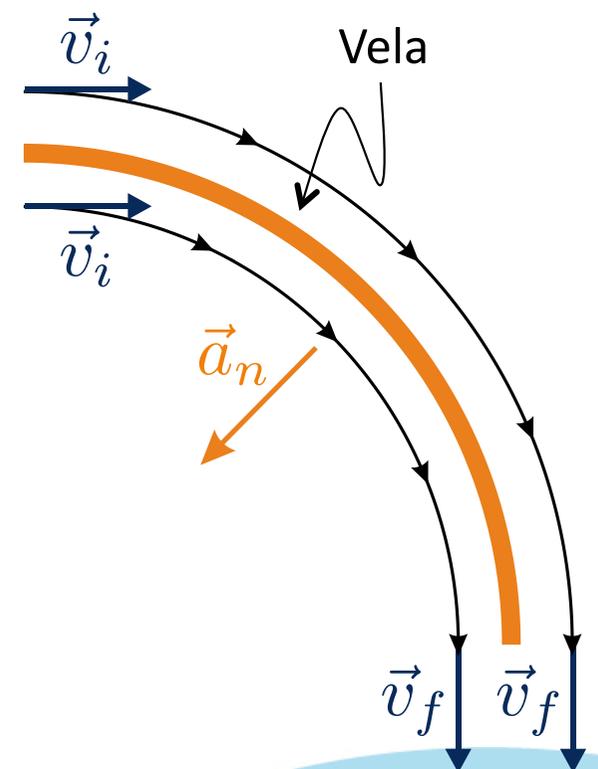
- Si può sperimentare facilmente l'effetto della portanza tenendo una **mano tesa fuori dal finestrino di un'auto** in moto.
 - Se la mano è **orizzontale** si sente soltanto la forza di **trascinamento** diretta verso dietro.
 - Se si **inclina** la mano si sente anche una seconda forza diretta verso l'alto o verso il basso (**portanza**).



Origine della Portanza: la Deflessione dell'Aria

- Consideriamo, per semplicità, una **vela** con superficie cilindrica (in arancione nel disegno).
- In prossimità della vela – **sia internamente, sia esternamente** – supponiamo che l'aria si muova parallelamente alla superficie.
- Le **particelle di aria** si muovono perciò di **moto circolare**.
- Ogni particella in moto circolare possiede un'**accelerazione centripeta**, diretta verso il centro di curvatura, **anche se il moto è uniforme**.
- L'accelerazione centripeta è **proporzionale al quadrato della velocità v** e **inversamente proporzionale al raggio di curvatura r** :

$$\vec{a}_n = \frac{v^2}{r} \hat{n}$$

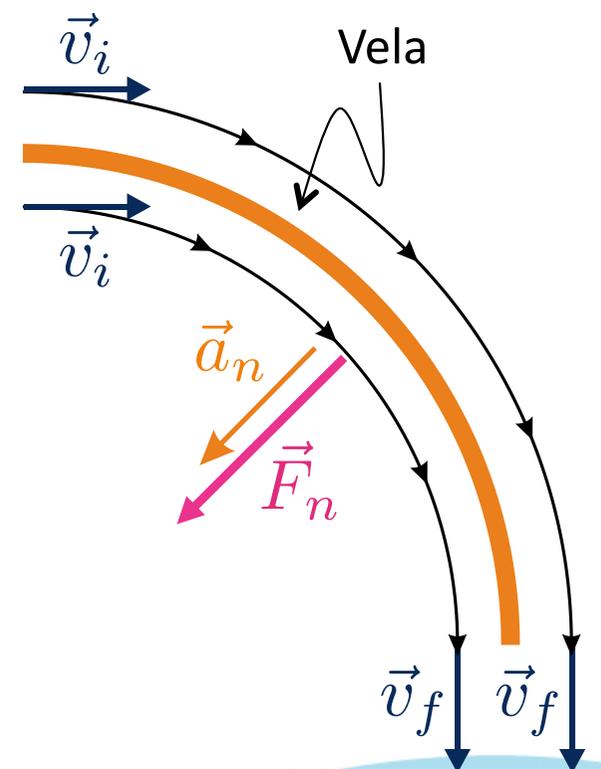


Origine della Portanza: la Deflessione dell'Aria (II)

- Se le particelle di aria accelerano, evidentemente – per il **Secondo Principio della Dinamica** – a esse è applicata una **forza** che determina l'accelerazione.
- La forza è proporzionale all'accelerazione e ha la stessa direzione e lo stesso verso:

$$\vec{F}_n = m\vec{a}_n = m \frac{v^2}{r} \hat{n}$$

- La forza sulle particelle di aria non può che essere esercitata dalla vela.
- Ne concludiamo che **la vela esercita sull'aria una forza centripeta**:
 - La forza è **proporzionale** alla **massa di aria deflessa** e al **quadrato della sua velocità** e **inversamente proporzionale** al **raggio di curvatura**.



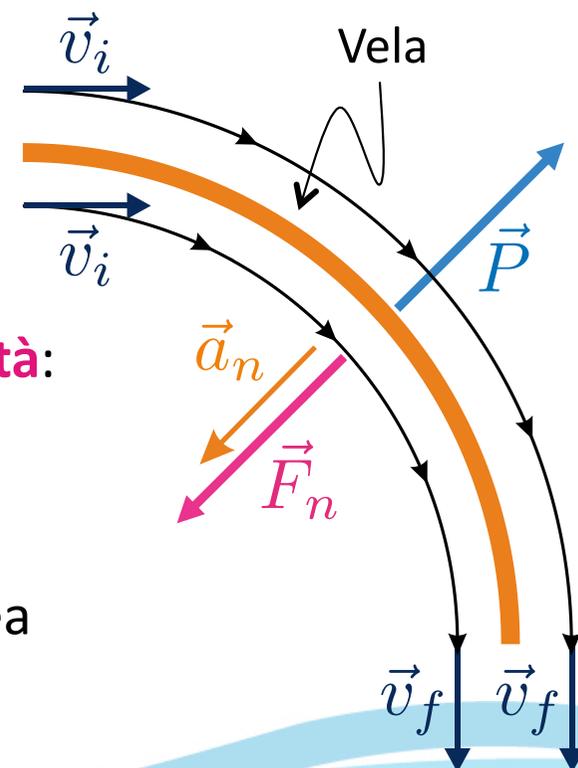
Origine della Portanza: la Deflessione dell'Aria (III)

- Per il **III principio della dinamica** (“principio di azione e reazione”), se la vela esercita sull'aria una forza centripeta allora **l'aria esercita sulla vela una forza centrifuga (portanza)**.
- Nella realtà le cose sono un po' più complicate (il flusso dell'aria non è laminare, ci sono vortici le vele o le ali hanno profili diversi) ma la sostanza non cambia:

- La **portanza** è **proporzionale** al **quadrato della velocità**:

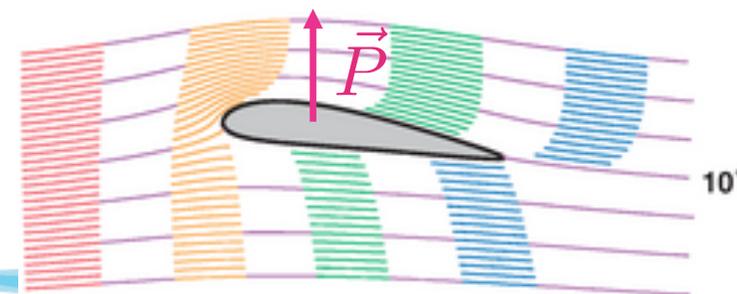
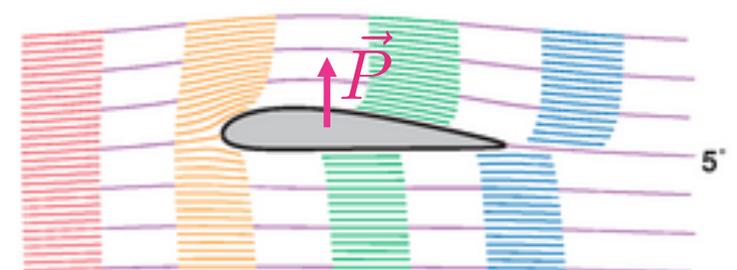
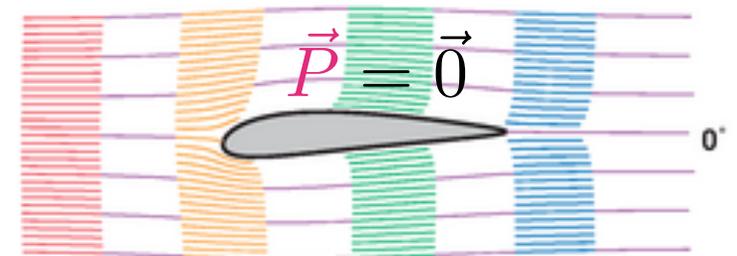
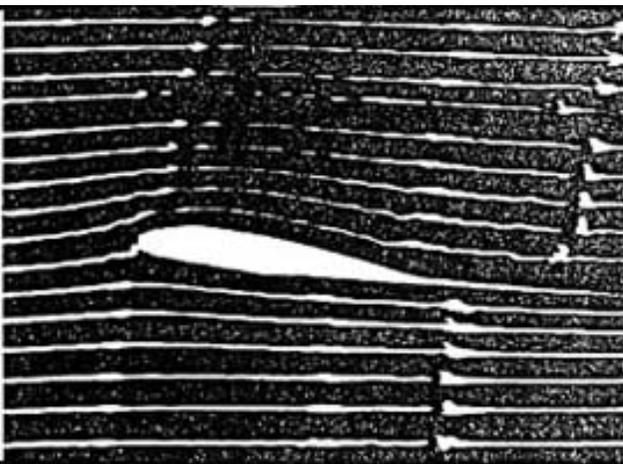
$$P = C_l \frac{\rho v^2}{2} A$$

dove ρ è la densità dell'aria, v la sua velocità, A è l'area dell'ala (vela) e C_l un coefficiente adimensionale (**coefficiente di portanza**).



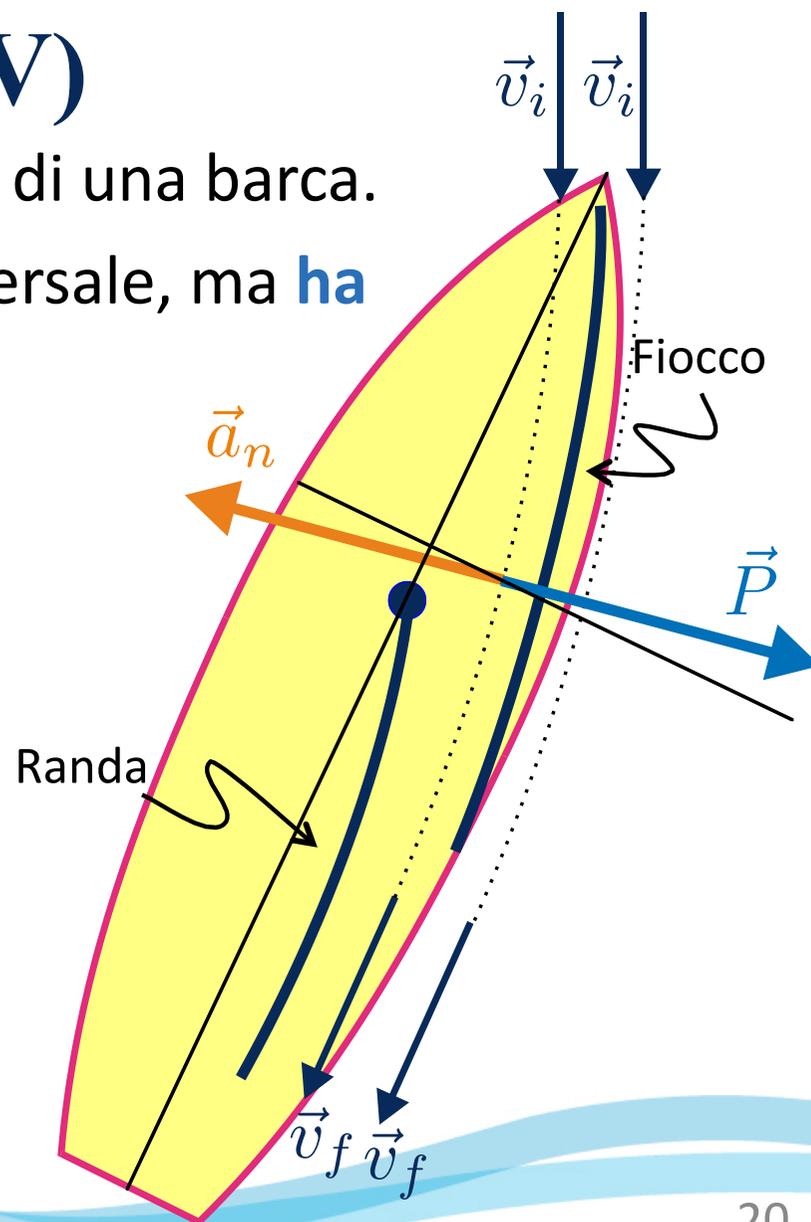
Origine della Portanza: la Deflessione dell'Aria (IV)

- Deflessione dell'aria da parte di un'ala (disegno a 3 diversi angoli di attacco e fotografia con filetti di fumo).



Origine della Portanza: la Deflessione dell'Aria (V)

- **Deflessione** dell'aria da parte delle **vele** di una barca.
- Si osservi che **la portanza P** non è trasversale, ma **ha anche una componente in avanti**.
- Si ricordi inoltre che **la portanza P** è **proporzionale** al **quadrato della velocità del vento** (rispetto alla barca).





Origine della Portanza – Descrizioni

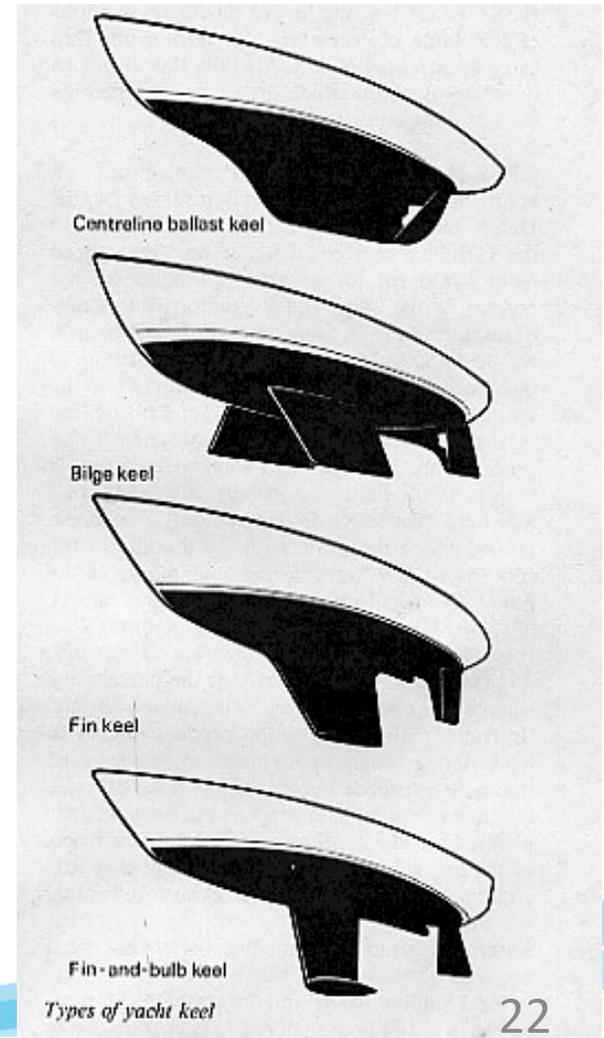
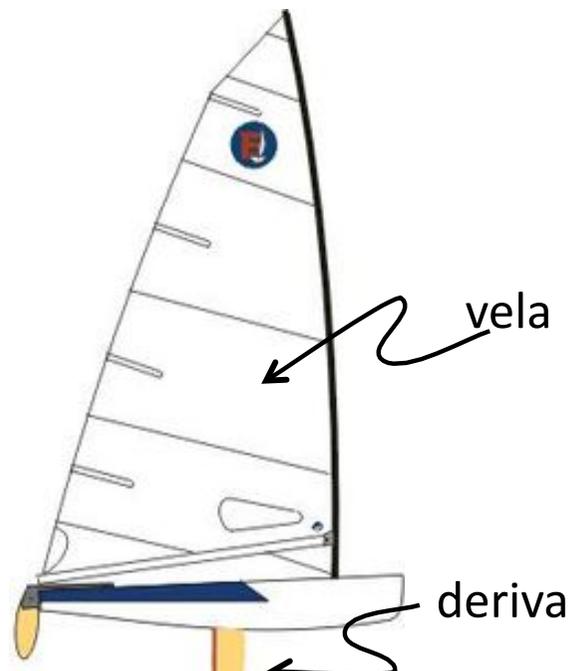
Fisicamente Errate

- Si trovano molte descrizioni diverse sull'origine della portanza.
- Sfortunatamente molte descrizioni che si possono trovare nelle **enciclopedie**, nei **siti Web** e persino in alcuni **libri di testo** sono **ERRATE** e causano confusione. Le descrizioni errate si possono classificare nelle seguenti categorie:
 - Descrizione mediante l'«ugual tempo di transito», il «percorso più lungo» e l'equazione di Bernoulli.
 - Descrizione mediante il tubo di Venturi.
 - Descrizione mediante il modello dell'aria che rimbalza sull'ala.
- Gli autori di queste descrizioni applicano in maniera **errata** le leggi di Newton e di Bernoulli.
- Per un approfondimento divulgativo (in inglese) si veda il sito della NASA:
 - <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/bernnew.html>
- Si veda anche l'articolo sull'American Journal of Physics:
 - K. Weltner, *A comparison of explanations of the aerodynamic lifting force*, Am. J. Phys., **55** (1), January, 1987.



Due “Ali” in ogni Barca

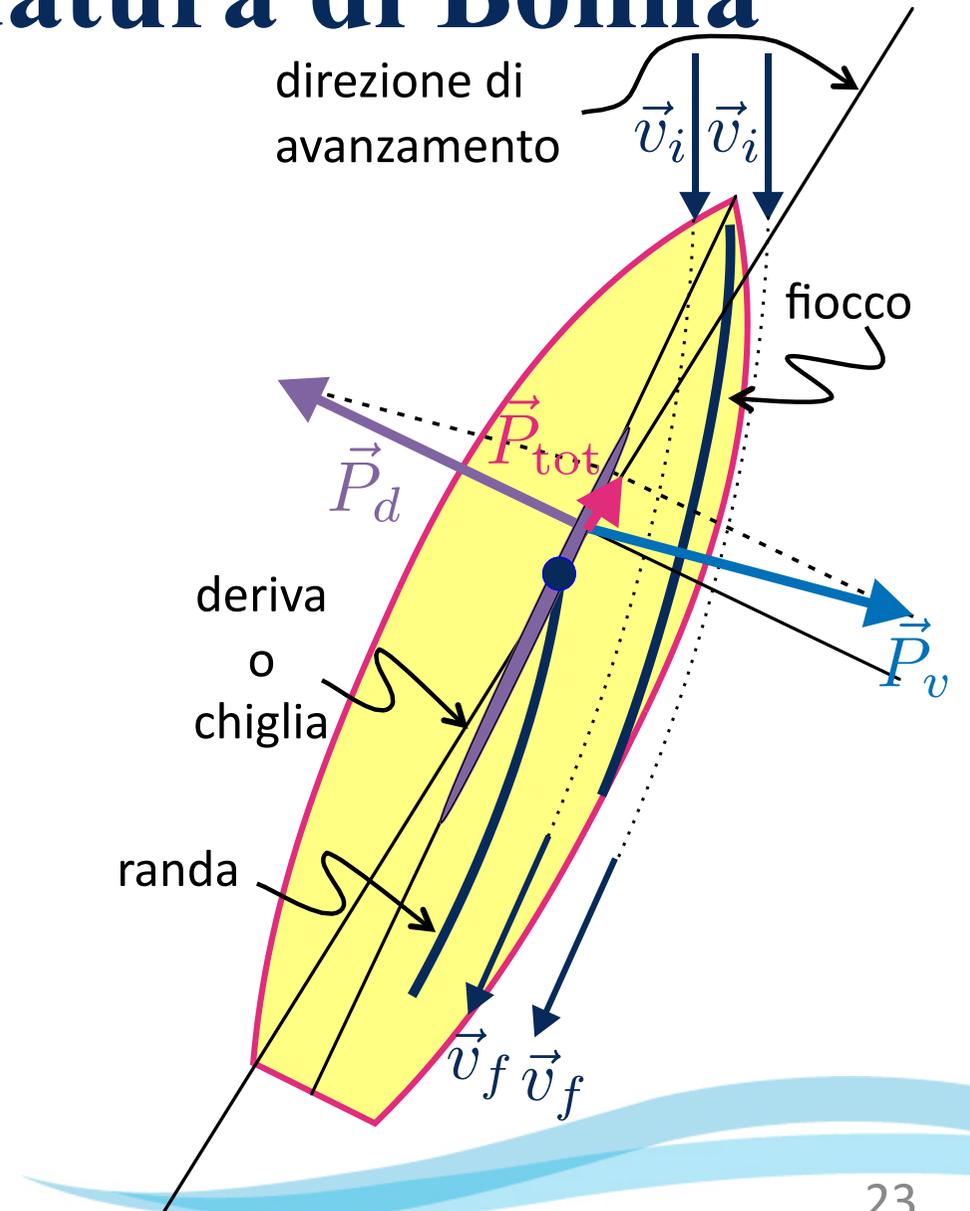
- Per risalire il vento una barca necessita di **due** tipi di superfici **aerodinamiche** (vele o ali):
 - Un tipo è costituito dalle **vele** vere e proprie, e interagiscono con l’aria.
 - L’altro tipo è costituito dalla **deriva** in certe barche o la **chiglia** in altre barche e interagiscono con l’acqua.



Le Forze nell'Andatura di Bolina

- La **risultante** della portanza delle vele e della portanza della deriva:

$$\vec{P}_{tot} = \vec{P}_d + \vec{P}_v$$
 è una **forza diretta in avanti**.
- Quando la barca è a regime (cioè si muove di **moto uniforme**) tale forza P_{tot} equilibra le forze di resistenza.



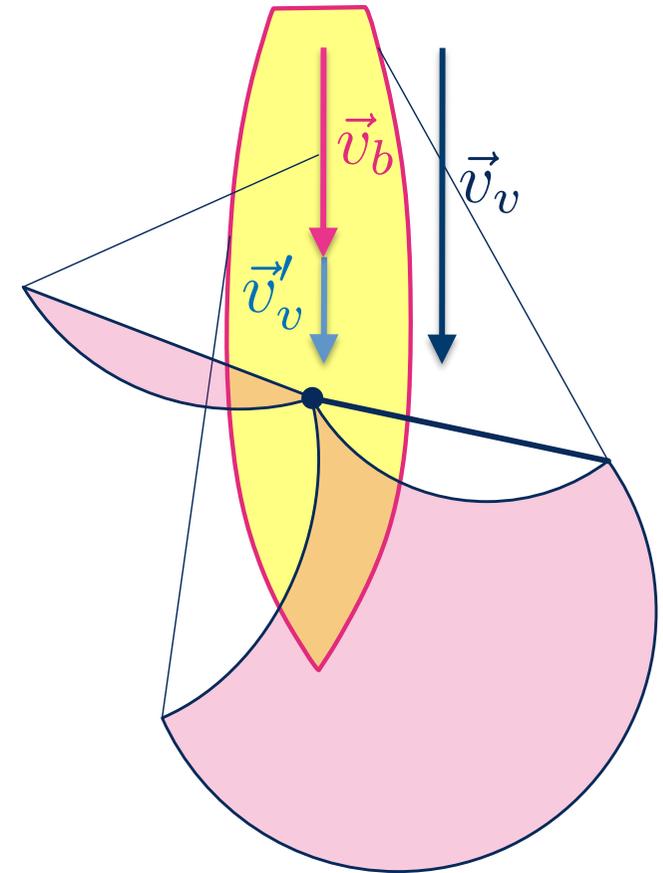
Il Vento Apparente

- Viaggiando con un motoscafo a motore con **calma di vento** si **percepisce un vento proveniente da prua**.
 - Questo perché l'aria è in **quiete** nel **Sistema di Riferimento** (SdR) della Terra o dell'acqua, ma è in **moto** nel **SdR** del motoscafo.

- In presenza di un vento reale, la velocità v'_v del vento nel SdR della barca ("**vento apparente**"), è la **differenza** tra la velocità v_v del vento nel SdR della Terra ("**vento reale**") e la velocità v_b della barca nel SdR della Terra:

$$\vec{v}'_v = \vec{v}_v - \vec{v}_b$$

- La composizione delle velocità è evidente nel caso di vento in poppa.



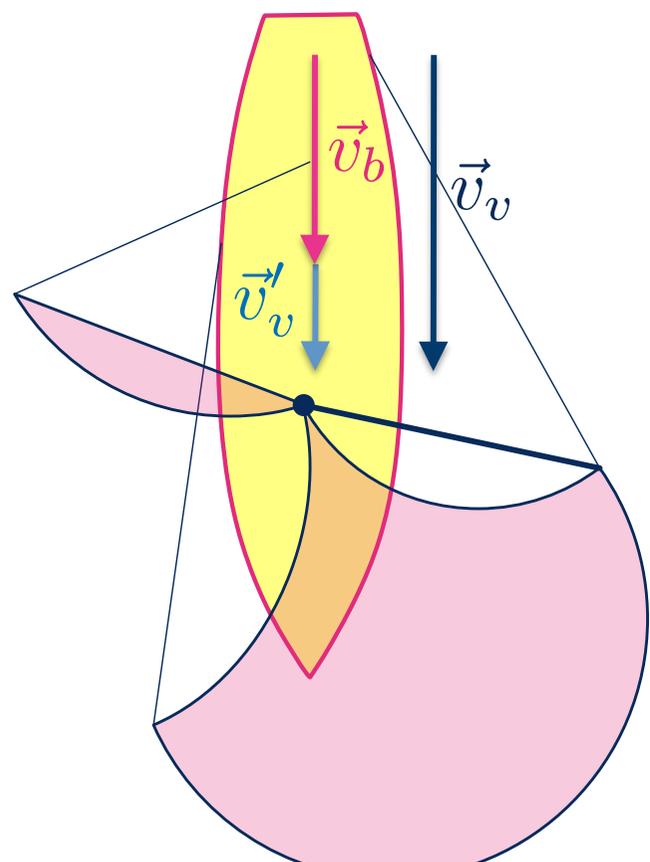


Il Vento Apparente (II)

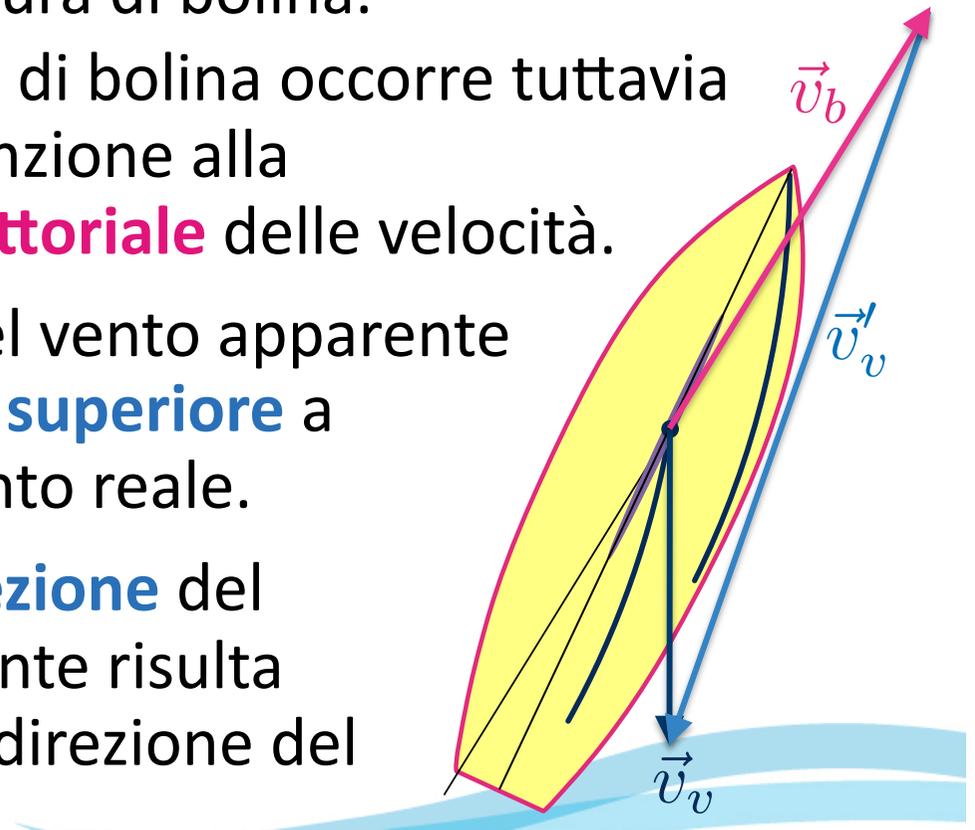
- La composizione delle velocità:

$$\vec{v}'_v = \vec{v}_v - \vec{v}_b$$

deve ovviamente essere la stessa nell'andatura con vento in poppa e nell'andatura di bolina.



- Nell'andatura di bolina occorre tuttavia prestare attenzione alla **differenza vettoriale** delle velocità.
- La velocità del vento apparente risulta perciò **superiore** a quella del vento reale.
- Inoltre la **direzione** del vento apparente risulta diversa dalla direzione del vento reale.



Il Vento Apparente (III)

- Poiché:
 1. Il vento può avere una velocità apparente **molto superiore** alla velocità reale;
 2. La **portanza** è proporzionale al **quadrato della velocità apparente** del vento;
- Si può capire come sia possibile che una barca viaggi (di bolina o di traverso) con **velocità superiore** alla **velocità del vento**.
- Si capisce anche come di **bolina** o di **traverso** la velocità possa essere **superiore** all'andatura con **vento in poppa**.





Vela sul Ghiaccio

- Basso attrito radente.
- Effetto vento apparente.
- Questo veicolo si può muovere tipicamente a **2-3 volte la velocità del vento** e fino a **60 nodi**.
 - *International DN Ice Yacht Racing Association*, <http://www.idniyra.org/>.





Conclusioni

- Abbiamo visto in questa presentazione le forze che muovono una barca a vela. In particolare abbiamo visto:
 - Che nell'andatura con **vento in poppa** una barca è mossa dalla **resistenza** o **forza di trascinamento** delle vele.
 - Che nell'andatura di **bolina** una barca è mossa dalla **portanza** delle vele e della deriva.





Domenico Galli

Dipartimento di Fisica, Università di Bologna

E-mail:

domenico.galli@unibo.it
domenico.galli@bo.infn.it

Web:

<http://www.unibo.it/docenti/domenico.galli>
<https://lhcbweb.bo.infn.it/GalliDidattica>