

Fisica tra le onde



Marco La Commara
Dipartimento di Fisica - Università di Napoli "Federico II"
I.N.F.N. - Sezione di Napoli



La Spinta del Vento

- È *esperienza comune* che un oggetto possa essere **trascinato dal vento**:
 - Fogli di giornale o altre carte si muovono con il vento.
 - È più facile muoversi in bicicletta con il vento nella schiena piuttosto che con il vento contro.



La Spinta del Vento

- La possibilità di muovere imbarcazioni mediante l'utilizzo delle **vele** è nota dai tempi antichi (si pensi ai fenici, agli egiziani, etc.. più di 5000 anni fa!!)
 - Però... le barche si muovevano **solo nella direzione del vento**
ed era necessario attendere il vento giusto per intraprendere il viaggio...

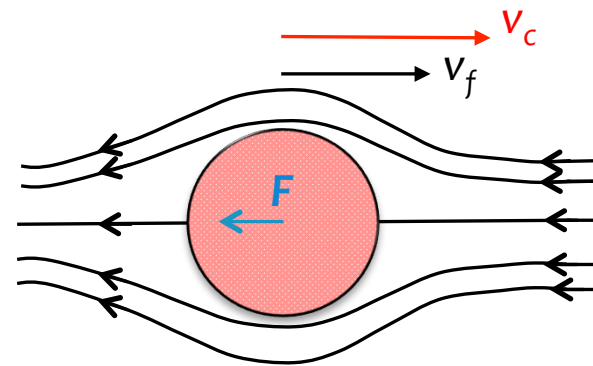
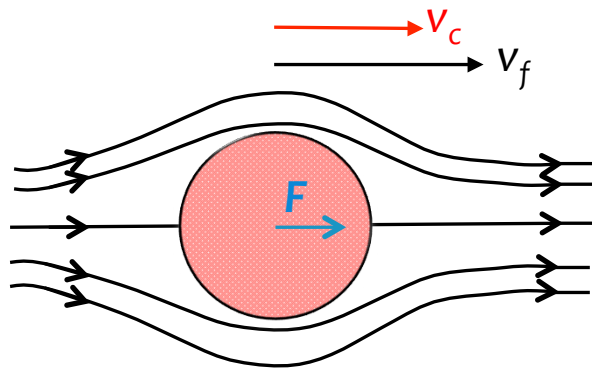


Come Funziona?

- Un corpo con velocità v_c , immerso in un fluido, che si muove a velocità $v_f \neq v_c$, è soggetto ad 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** tra le velocità v_f e v_c .

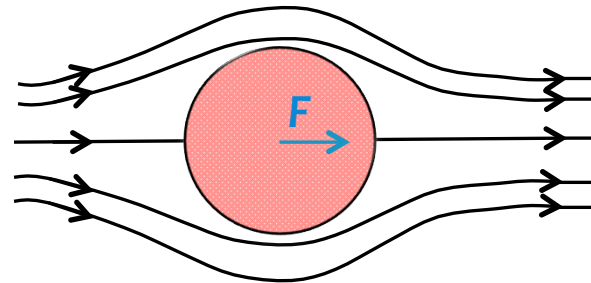
- Se $v_c = v_f \rightarrow$ **la forza di trascinamento** è **nulla**
- Se $v_c \neq v_f \rightarrow$ **la forza di trascinamento** ha verso tale da fare avvicinare le due velocità



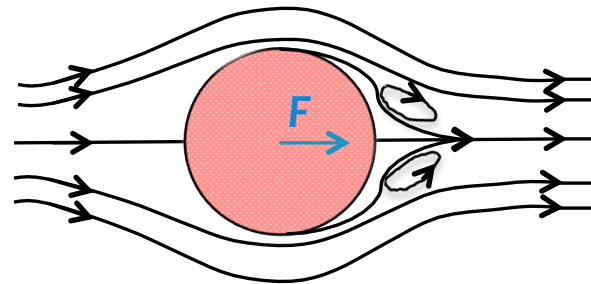
Come Funziona?

- L'intensità della **forza di trascinamento** dipende in modo non semplice dalla differenza di velocità, poiché al variare della velocità può cambiare il **regime** di flusso...

in regime laminare $F \propto |v_f - v_c|$



in regimi turbolenti $F \propto (v_f - v_c)^2$



Come Funziona?

- Nell'andatura con **vento in poppa** le vele vengono “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 forza di trascinamento sarebbe diretta all'indietro e rallenterebbe la barca (ma questo lo sappiamo già!!!)

Vele a palloncino di grande area (**spinnaker**) aumentano la forza di trascinamento e dunque la velocità della barca

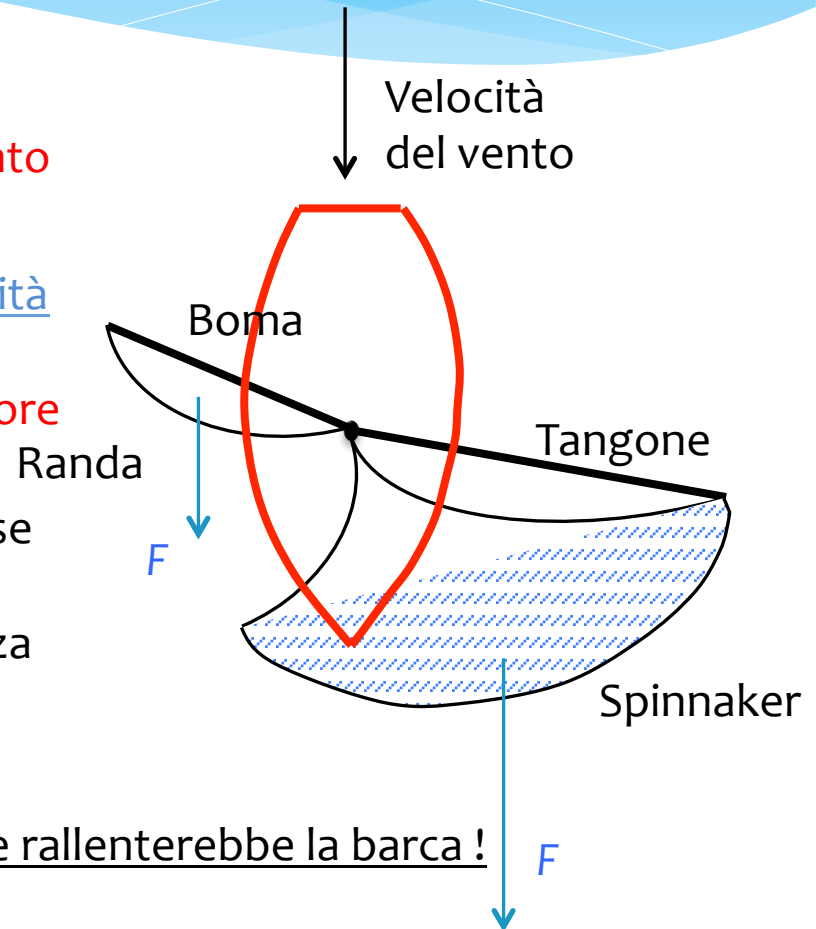


Come Funziona?

- Nell'andatura di **poppa**, le vele sono "trascinate" dal vento.
- Le vele sono spinte dalla **forza di trascinamento** o di **resistenza aerodinamica**.
- La forza **è nulla** se le vele hanno la **stessa velocità** dell'aria, ovvero del vento.
- La barca **non** può viaggiare **con velocità maggiore della velocità del vento!**
 - Se infatti la barca si muovesse a velocità superiore alla velocità dell'aria, la resistenza aerodinamica sarebbe...



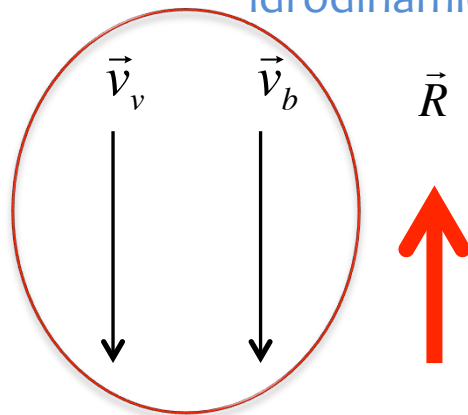
... diretta all' indietro (!) e rallenterebbe la barca !



Vele "a palloncino" di **grande area** (**spinnaker**) aumentano la forza di trascinamento e quindi la velocità della barca

Come Funziona?

- Col **vento in poppa**, una barca viaggia sempre con velocità **minore** (**non uguale!**) della velocità del vento.
 - se avesse la **stessa velocità del vento**, la forza di **resistenza aerodinamica F** (sulle vele) sarebbe **nulla** mentre sarebbe diretta all'**indietro** quella di **resistenza idrodinamica R** (sullo scafo)

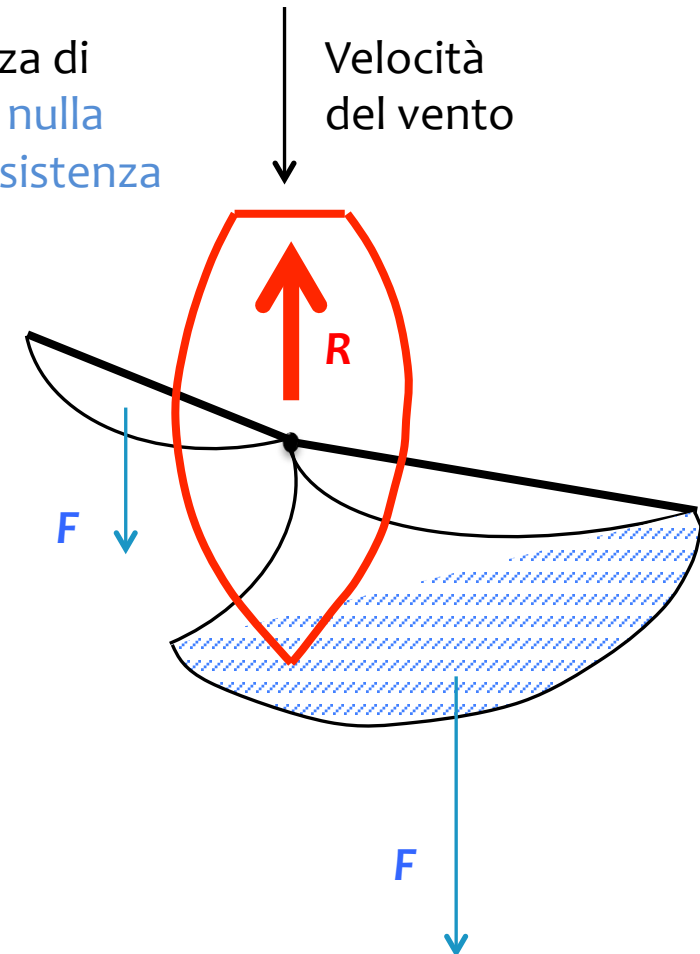


$$\vec{F} = \vec{0}$$

$$\vec{F} + \vec{R} \neq \vec{0}$$

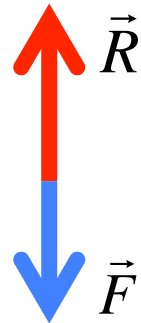
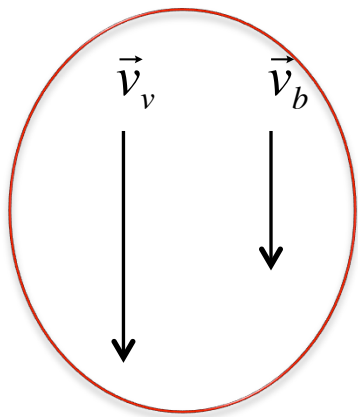


La risultante delle due forze sarebbe diretta indietro e rallenterebbe la barca!!!

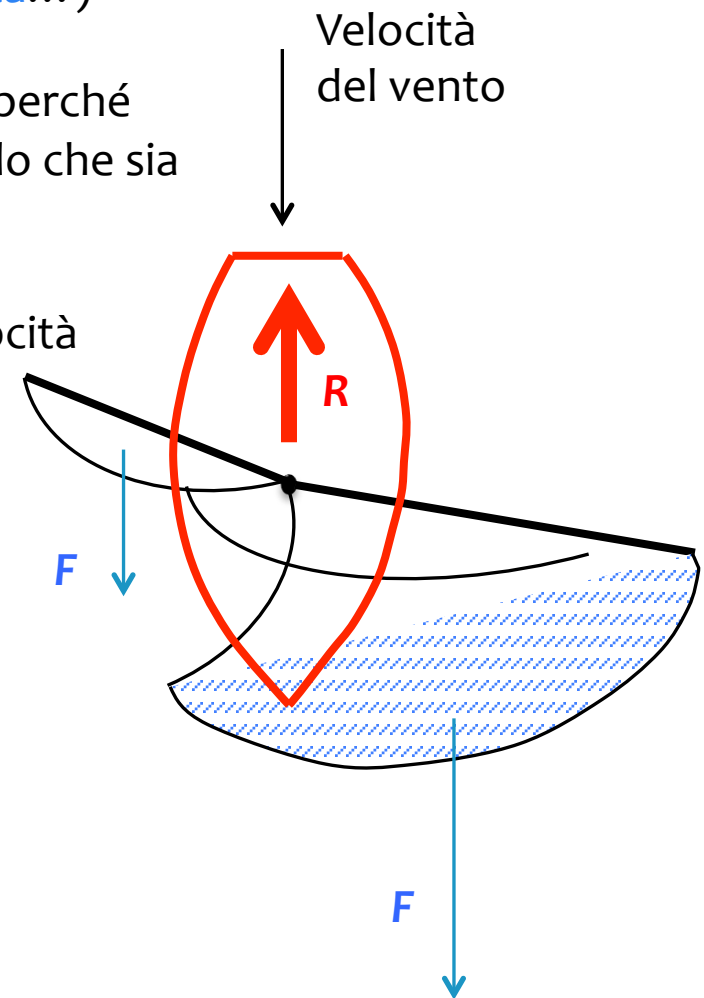


Come Funziona?

- Per procedere a **velocità costante** occorre che la risultante delle forze sia nulla (Il **principio della dinamica...**)
 - allora è necessaria una resistenza aerodinamica **F** perché sia equilibrata la resistenza idrodinamica **R**, in modo che sia **nulla la somma** delle due forze.
 - Quindi è necessario che la barca si muova con velocità **inferiore** alla velocità del vento!!



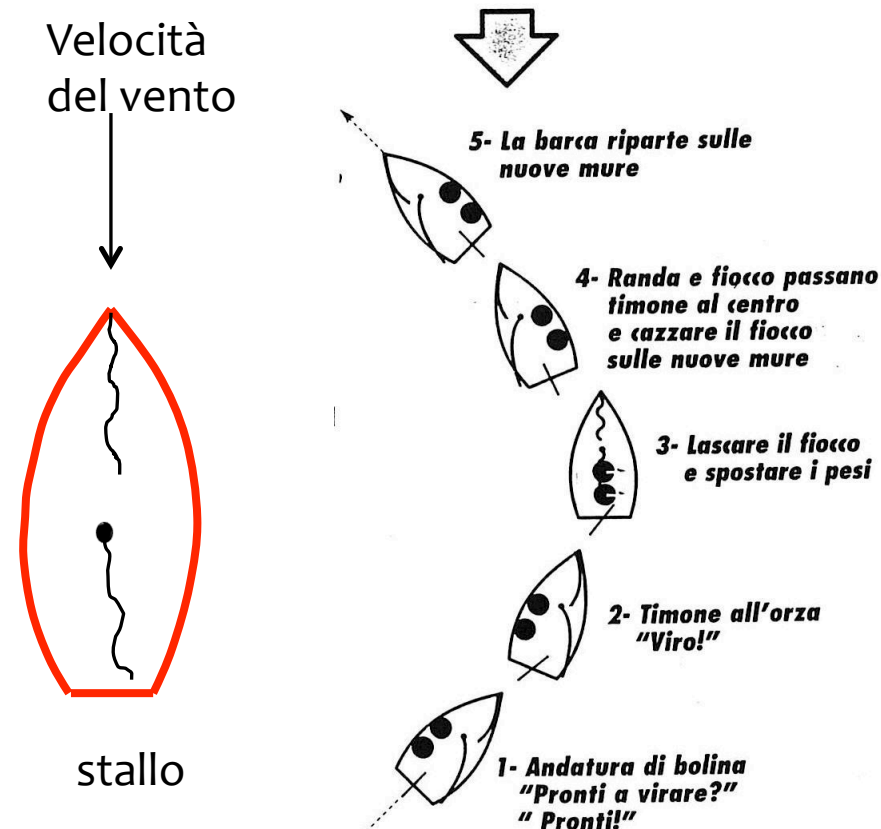
$$\vec{F} + \vec{R} = \vec{0}$$



Come Funziona?

- Al contrario, **non** è possibile che una barca viaggi in verso **opposto** a quello del vento..
 - Se la barca volge la prua al vento **le vele sventolano e la barca si ferma (stallo)**

- la **forza di trascinamento** del vento è **opposta** alla velocità e decelera la barca
- è una condizione che si cerca di evitare
- situazione che si presenta per brevi istanti e con la barca in movimento (p.es. nella **virata**)



Vento in Poppa



Abbiamo capito tutto?

- Finora abbiamo capito che una barca a vela:
 - è **trascinata** dal vento a causa della **resistenza aerodinamica delle vele**.
 - si muove sempre a **velocità inferiore** a quella del vento.
 - se il moto è uniforme (*la risultante delle forze agenti sulla barca è nulla*) la resistenza aerodinamica del vento sulle vele **equilibra** la resistenza idrodinamica dell'acqua sullo scafo
 - **Non** può viaggiare in direzione **esattamente opposta** alla direzione del vento
 - Può una barca muoversi **verso il vento**?
 - Sì, fino a **circa 40°-25°** rispetto alla direzione del vento!
 - Può viaggiare con **velocità maggiore del vento**?
 - Sì, **fino a 1,5 volte!**
 - Perché certe barche **navigano preferibilmente verso il vento**?
 - Perché in tal modo **possono andare più veloci!!!**

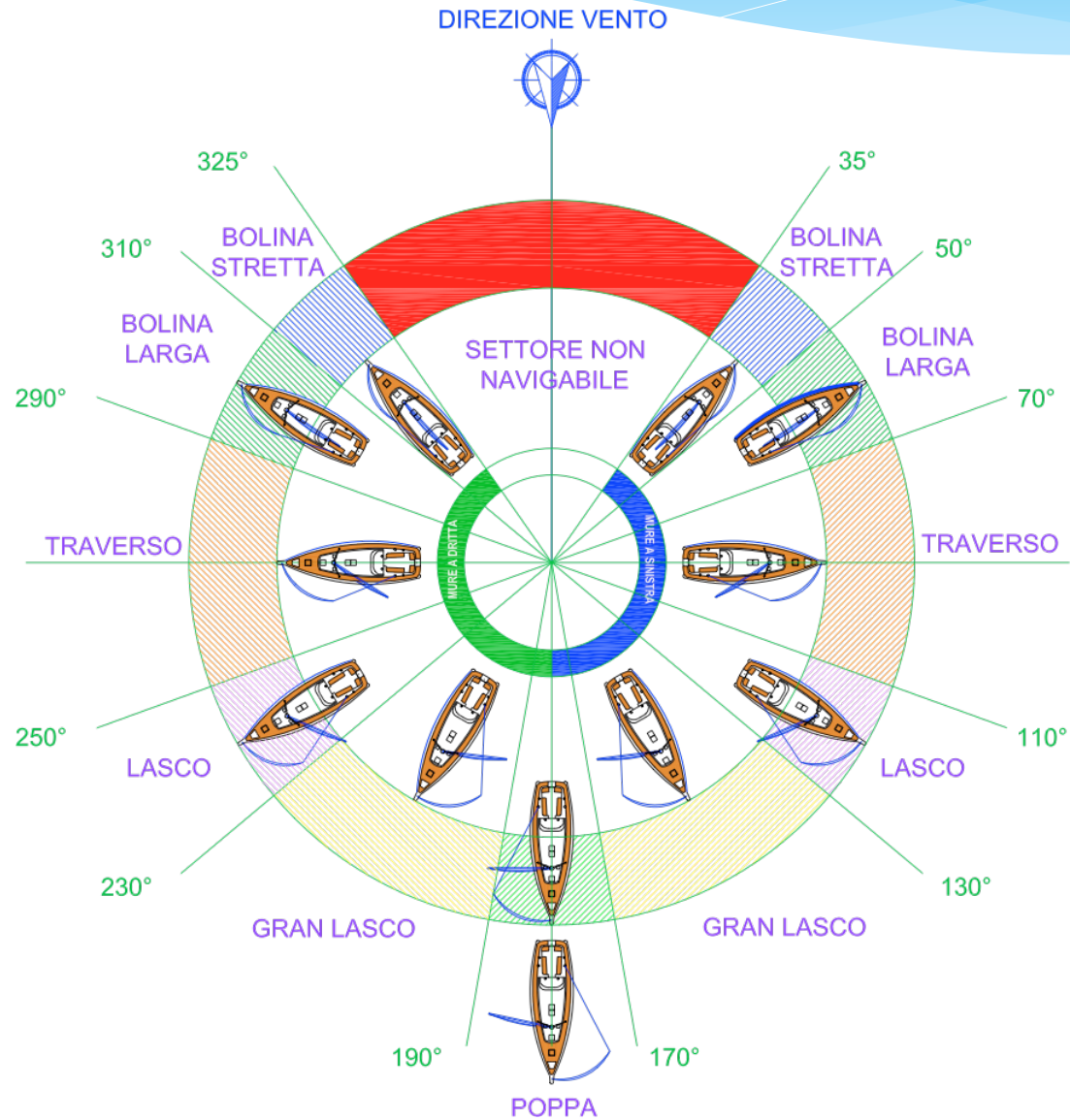
NON abbiamo capito proprio tutto tutto...

Com'è possibile?

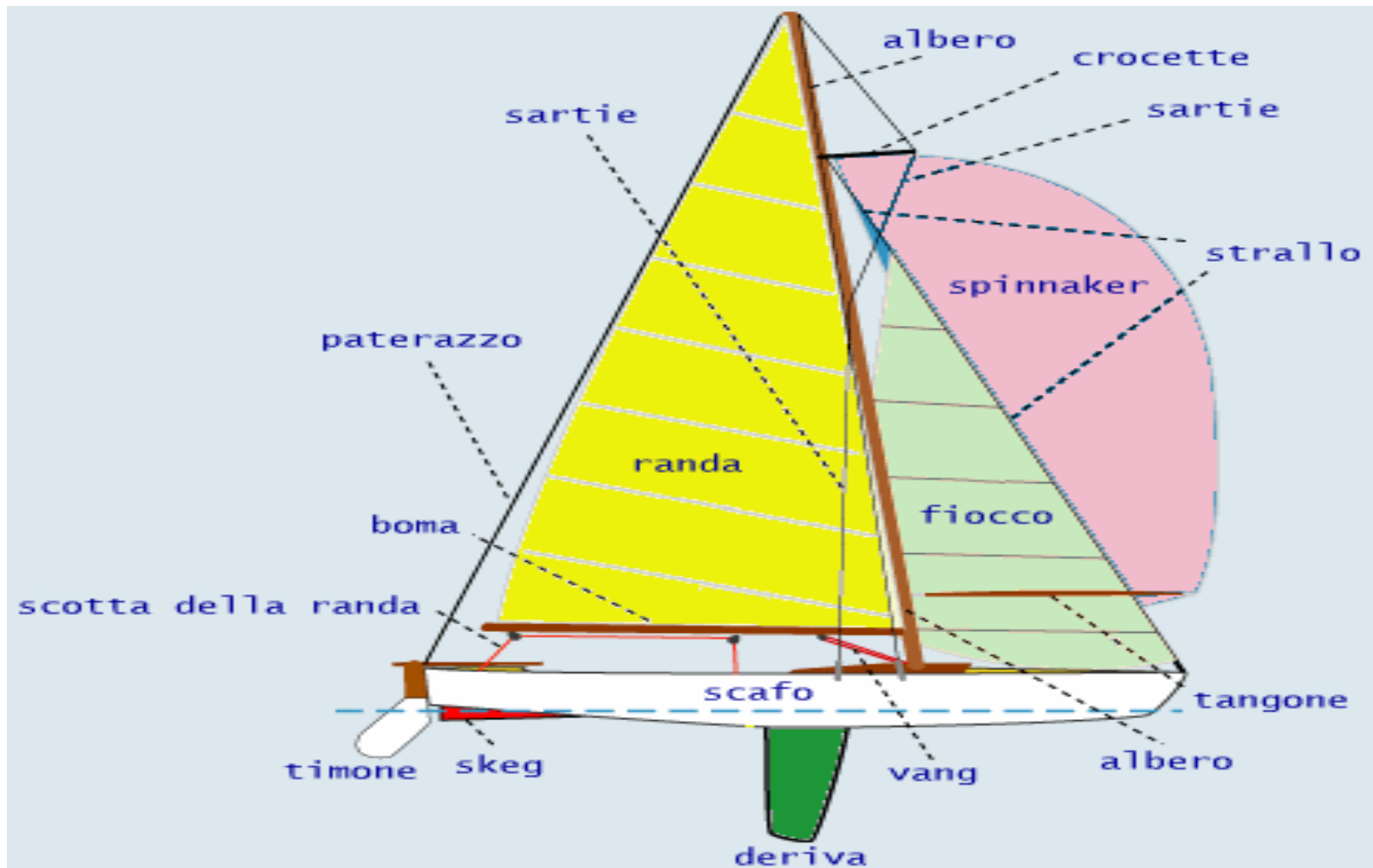
- In sintesi la risposta alle tre domande precedenti sta nel fatto che:
 - Una barca a vela può avere un'andatura diversa da quella che abbiamo visto finora (**vento in poppa**), che è detta **andatura di bolina**.
 - nell'andatura di bolina la forza che muove la barca **non** è più la **forza di trascinamento** 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)



Nomenclatura



La Portanza

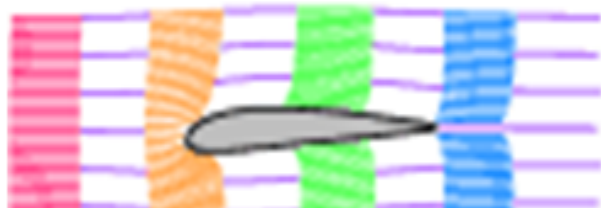
- L'effetto della portanza si può sperimentare facilmente tenendo una **mano tesa fuori del finestrino di un'auto in moto**.
 - Se la mano è **orizzontale** si sente soltanto la **forza di trascinamento** (diretta all'indietro).
 - Se la mano è **inclinata** si sente anche una seconda forza diretta verso l'alto oppure verso il basso (**portanza**).

Perché l'aeroplano riesce a volare..?

Un'ala genera portanza per il suo profilo **asimmetrico**. Per la spiegazione di questo effetto si può ricordare il **teorema di Bernoulli**. La **differenza di velocità** fra la faccia superiore e quella inferiore dell'ala determina una differenza di pressione che genera la portanza.

La Portanza

Non funziona se il profilo è simmetrico: se non vi è differenza di velocità fra le due facce della superficie il teorema di Bernoulli non prevede differenza di pressione e quindi non si ha portanza.



$\alpha = 0^\circ$



$\alpha = 5^\circ$



$\alpha = 10^\circ$

Se $\alpha \neq 0^\circ$

si ha una portanza generata dalla differenza di velocità determinata dall'angolo di incidenza.

Aumentando l'angolo α di incidenza la velocità sulla faccia inferiore diminuisce generando portanza.

Nella figura le bande colorate sono impulsi di fumo immessi nella galleria del vento ad uguali intervalli di tempo.

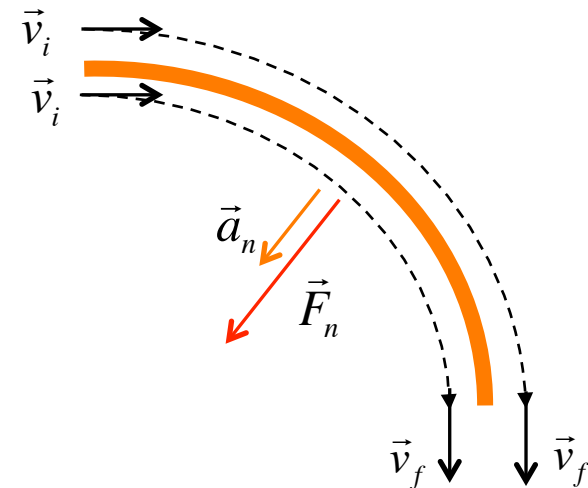
Origine della portanza: la deflessione dell'aria

- se le particelle d'aria accelerano, evidentemente –per il II principio della dinamica – a esse è applicata una **forza** che determina tale accelerazione.
- la forza è proporzionale all'accelerazione ed ha stessa direzione e stesso verso:

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

- la forza sulle molecole d'aria non può che essere esercitata dalla vela.
- dunque la vela esercita sull'aria una **forza centripeta**:

➤ **direttamente proporzionale** alla **massa d'aria deflessa** e al **quadrato della sua velocità** e **inversamente proporzionale** al **raggio di curvatura**.



Origine della portanza: la deflessione dell'aria

- Per il **III principio della dinamica**, se la vela esercita sull'aria una forza centripeta, allora l'aria esercita sulla vela una forza centrifuga (**portanza**)
- In realtà le cose sono più complesse... (il flusso non è laminare, il moto è vorticoso..) ma la sostanza non cambia:
- la **portanza** è **proporzionale** al **quadrato della velocità**:

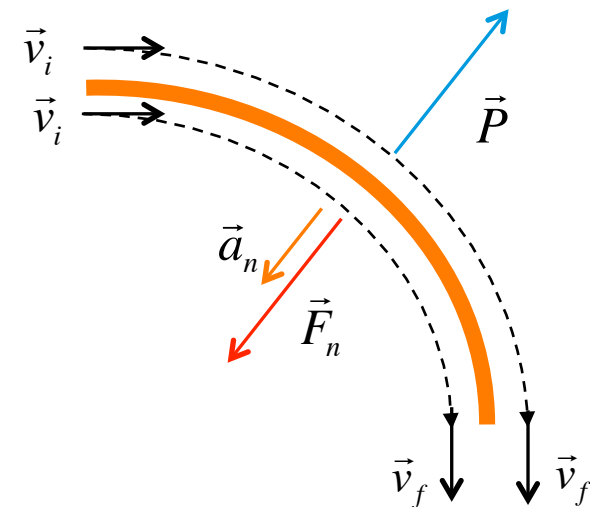
$$|\vec{P}| = C_l \frac{\rho v^2}{2} A$$

ρ densità dell'aria

v velocità dell'aria

A area della vela

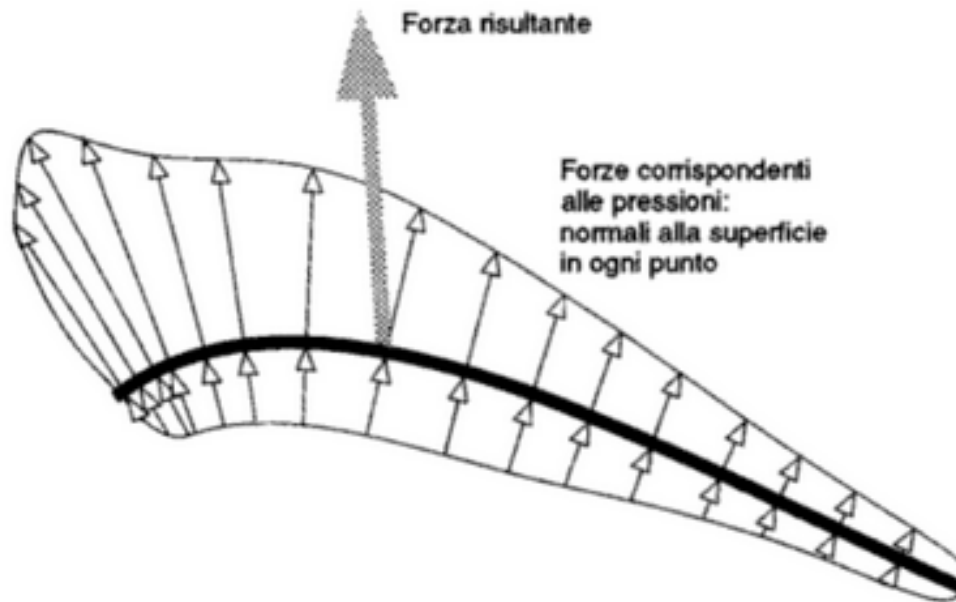
C_l **coeff. di portanza** (adimensionale)



Origine della portanza: la deflessione dell'aria

Questo fenomeno è noto come **effetto COANDA**:

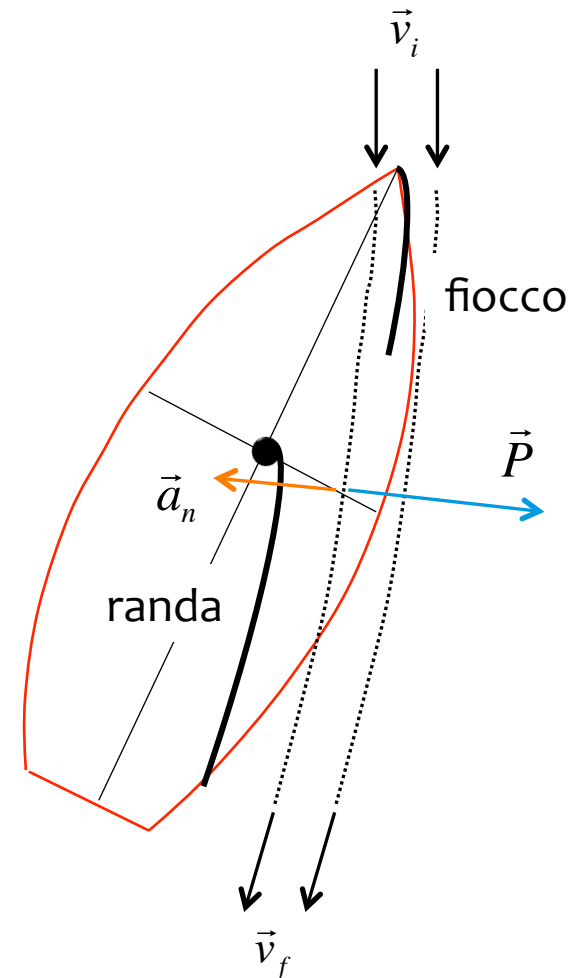
Un fluido viscoso in moto laminare su una superficie curva tende a **seguire il profilo della superficie** e all'uscita si muove lungo la tangente al bordo di uscita.



Le particelle di aria seguono la **curvatura della vela**. Questo determina una **variazione della loro quantità di moto** e quindi una **forza**. La risultante di tutte queste forze elementari è una forza aerodinamica che dà luogo alla **portanza**.

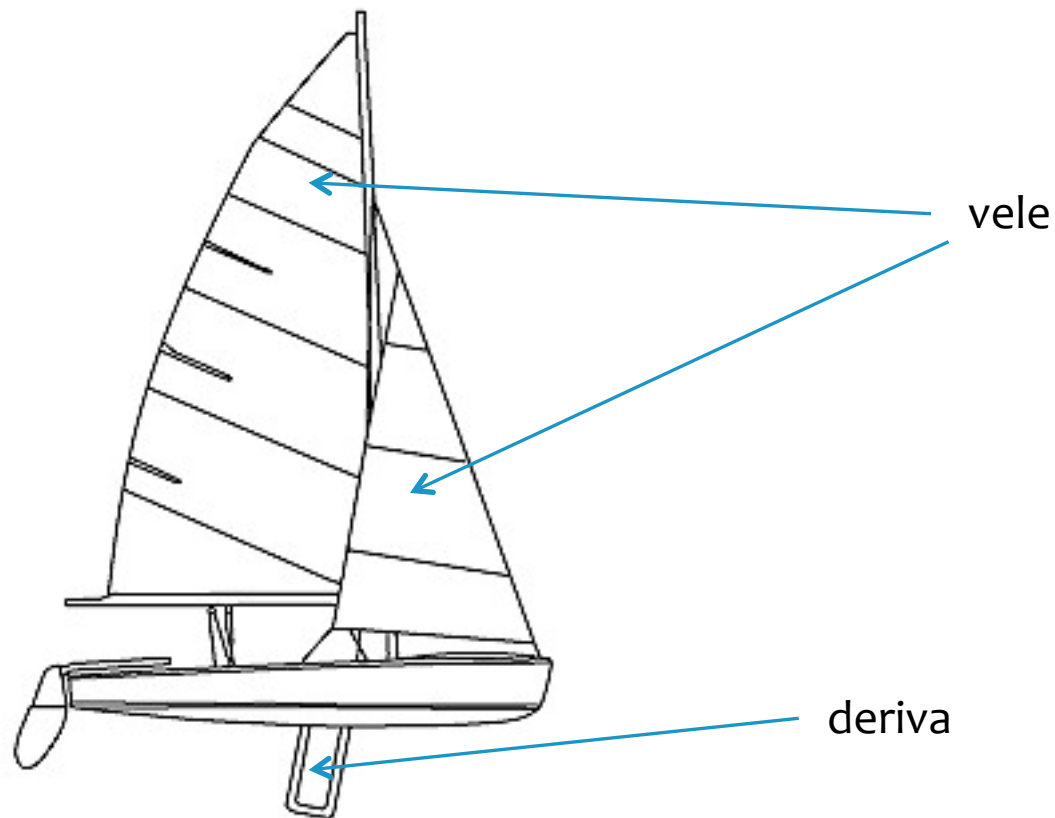
Origine della portanza: la deflessione dell'aria

- **Deflessione** dell'aria da parte della **vela**
- la portanza **P** non è trasversale: ha **anche una componente in avanti!**
- Si ricordi che è **proporzionale** al **quadrato della velocità del vento** (rispetto alla barca)



due 'ali' in ogni barca

- Per risalire il vento una barca necessita di **due** tipi di superfici fluidodinamiche:
 - le **vele** (in aria)
 - la **deriva** (in acqua)



Le vele di oggi sono progettate e costruite con materiali adatti a sfruttare al meglio l'effetto Coanda



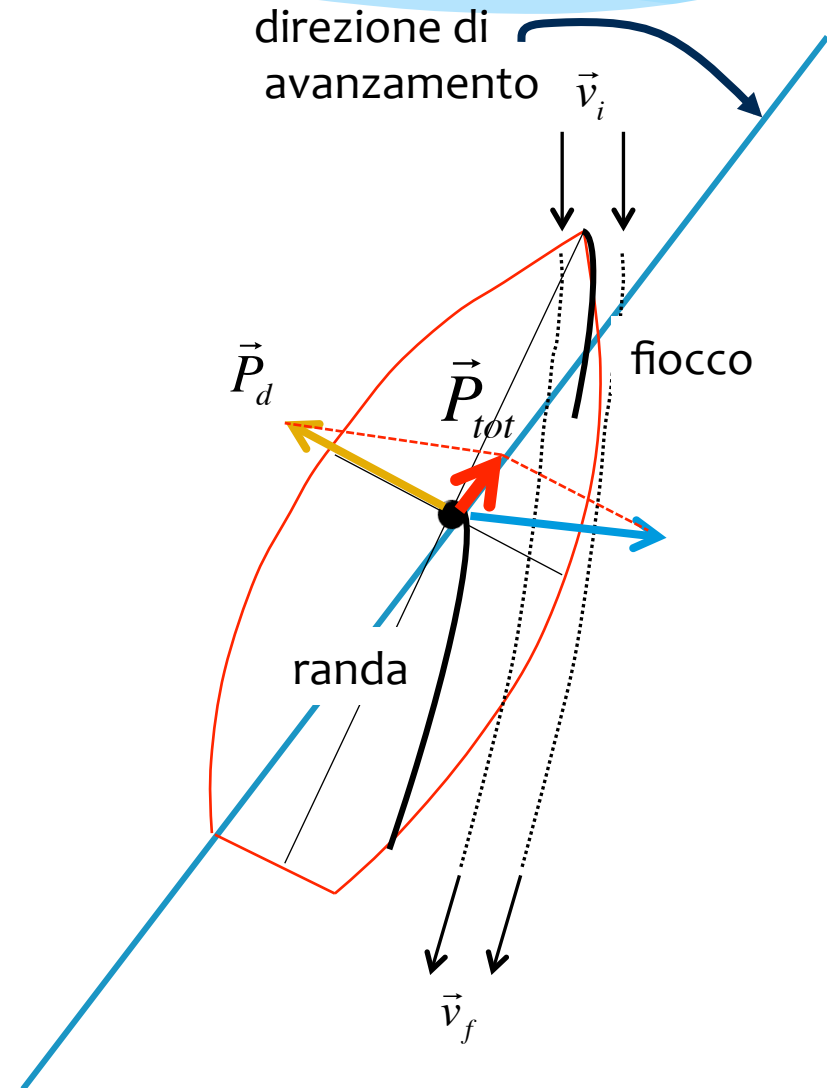
le forze nell'andatura di bolina

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

$$\vec{P}_{tot} = \vec{P}_v + \vec{P}_d$$

è diretta **in avanti!**

quando la barca è a regime (**moto uniforme**)
la forza **P_{tot}** equilibra le forze di resistenza



il vento apparente

- se viaggiamo su un motoscafo a motore con calma di vento si percepisce un vento proveniente da prua
 - infatti l'aria è in quiete nel SdR (sistema di riferimento) della terra o dell'acqua ma è in moto nel SdR del motoscafo

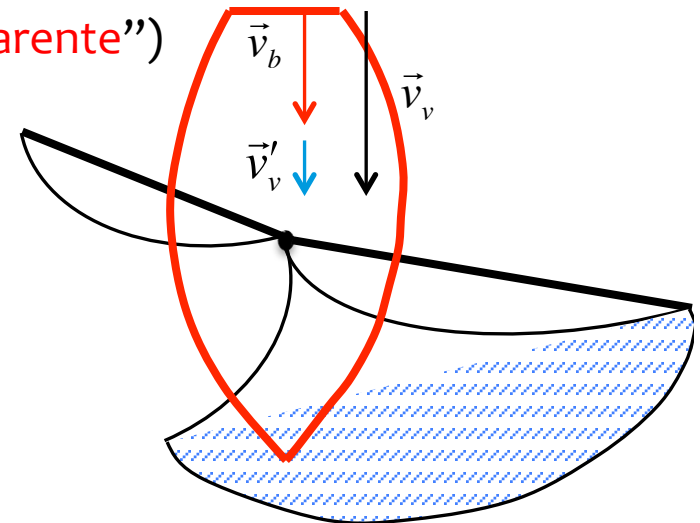
\vec{v}_v velocità del vento nel SdR della Terra (“vento reale”)

\vec{v}_b velocità della barca nel SdR della Terra

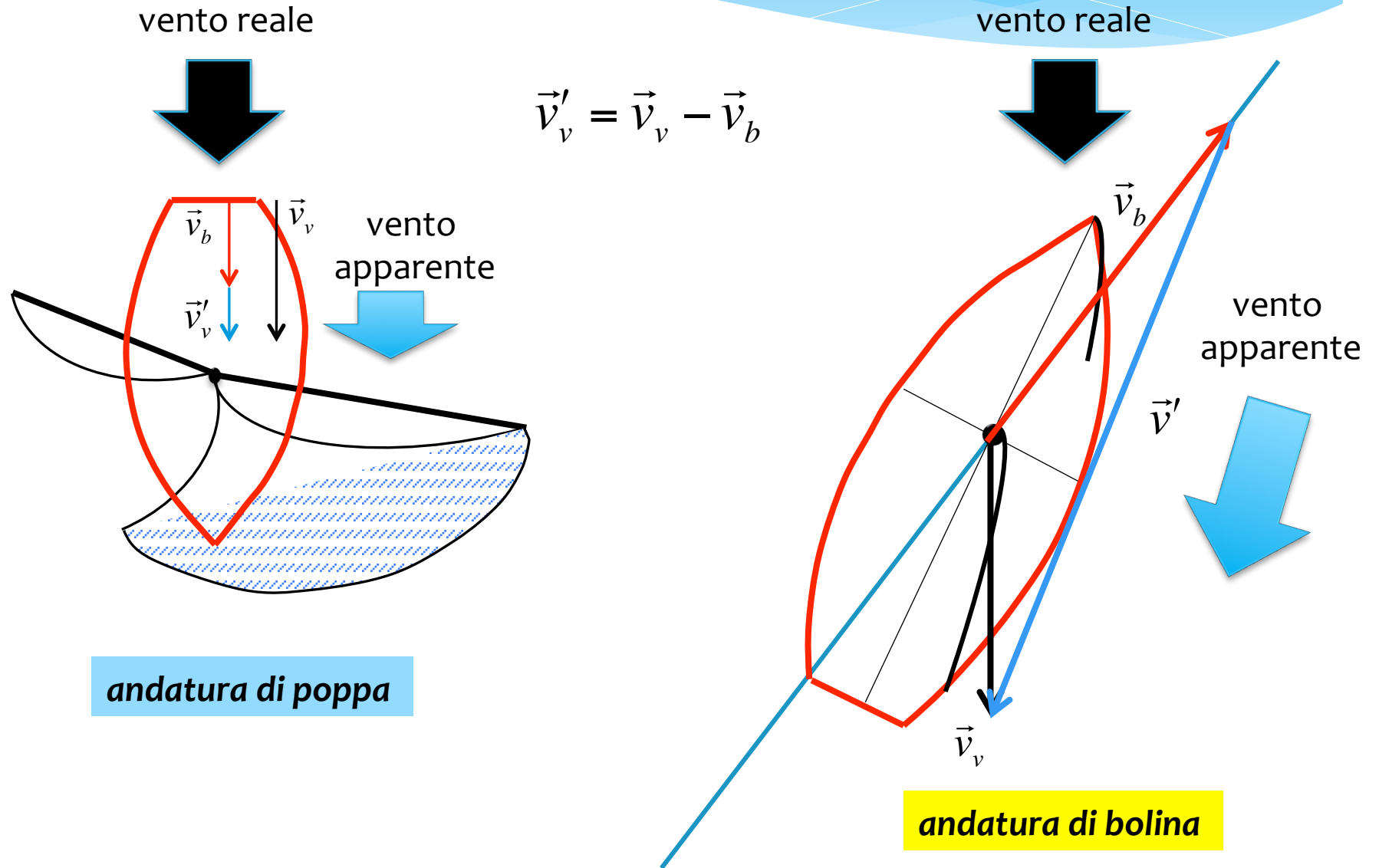
\vec{v}'_v velocità del vento nel SdR della barca (“vento apparente”)

La relazione tra le tre velocità è (composizione vettoriale):

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



il vento apparente



il vento apparente

Allora, poiché:

1. il vento può avere una velocità apparente **molto superiore** della velocità reale;
2. la **portanza** è proporzionale al **quadrato della velocità apparente** del vento;

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

A blue arrow points to the v^2 term in the equation, which is circled in red.

- Una barca può viaggiare (di bolina o di traverso) con **velocità superiore alla velocità del vento!**
- di **bolina** o di **traverso** la velocità può essere (anche molto) **maggiore** rispetto all'andatura di **poppa!**



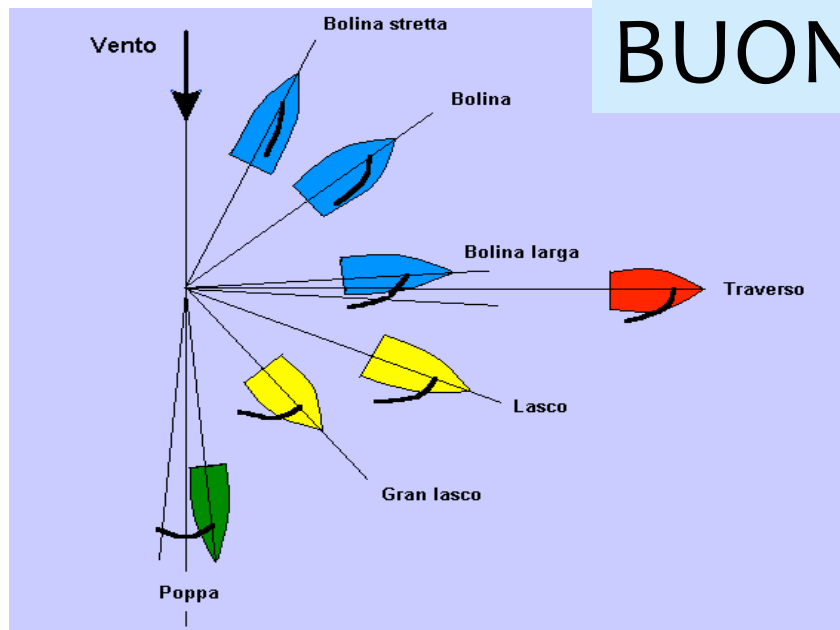
bolina



conclusioni

Abbiamo esaminato le forze che muovono una barca a vela

- Nell'andatura di **poppa** una barca è mossa dalla **forza di trascinamento** delle vele (**resistenza aerodinamica**)
- Nell'andatura di **bolina** una barca è mossa dalla **portanza** delle vele e della deriva



BUON VENTO !!

