

La Fisica delle Bollicine

Ovvero

Vita, morte e miracoli di una bollicina



Rino Castaldi
Sommelier
Delegazione di Livorno



Seconda fermentazione



180 g

92 g

88g

24 g/L di zucchero

$$C_{\text{CO}_2} \approx 12 \text{ g/L}$$

legge di Henry:

$$C_{\text{CO}_2} = k P_{\text{CO}_2}$$

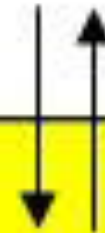
$$P_{\text{CO}_2} \approx 6 \text{ atm (a } 10^\circ\text{C)}$$

Concentrazione di $\text{CO}_2 \approx 9 \text{ g}/(0,75 \text{ L})$
 $\approx 5 \text{ L}$ di gas in bottiglia di $0,75 \text{ L}$ a 1 atm ,

Tappo ermetico

$$P_{\text{CO}_2} \approx 6 \text{ atm.}$$

CO_2 Gas



$$C_{\text{CO}_2} = k P_{\text{CO}_2}$$

CO_2
liquido

Finito lo zucchero i lieviti muoiono

Autolisi

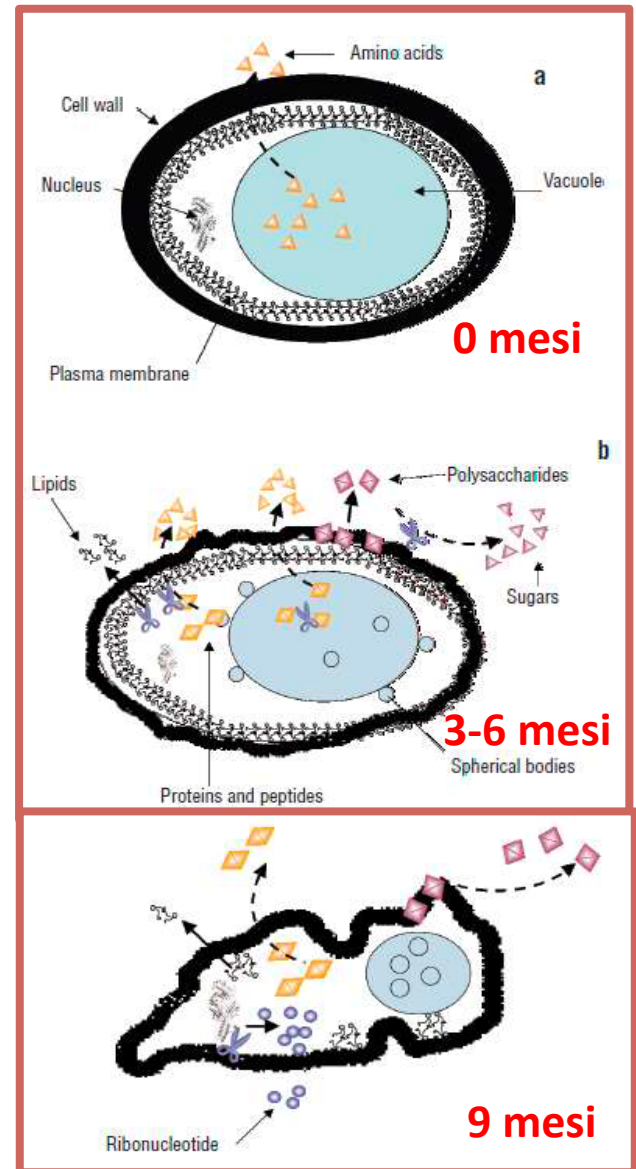
Provoca il rilascio di sostanze che determinano i caratteri sensoriali dello spumante:

- ✓ Polisaccaridi
 - ✓ Proteine
 - ✓ Amminoacidi
 - ✓ Peptidi
 - ✓ Derivati degli acidi nucleici
 - ✓ Acidi grassi
- (Alexandre e Guillox, 2006)

È un fenomeno lento e dipende da molti fattori (Alexandre e Guillox, 2006): Temperatura, pH, Ceppo di lievito...

Il processo inizia dopo 2-4 mesi dalla rifermentazione (Charpentier e Feuillat, 1993) ma può ritardare fino a 9 mesi (Alexandre e Guillox, 2006)

Il quantitativo di amminoacidi e proteine rilasciati dipende dal ceppo e dal tempo di contatto



Autolisi: impatto sulla qualità

Azioni svolte dalle sostanze rilasciate nel corso dell'autolisi:

Origin	Compound type	Proven or potential impact on sparkling wine	References
Cell content	Nucleoside	Flavouring agent	Leroy et al. (1990) Charpentier et al. (2005) Courtis et al. (1998)
	Nucleotide		
	Amino acid	Aroma precursors	
	Peptide		
	Protein	Sweet and bitter taste	Malvy et al. (1994)
Protein	Sweet and bitter taste	Polo et al. (1992)	
	Foam quality		
	Lipids	Foam quality	Gallart et al. (2002)
Cell wall	Glucan	Foam quality	Andres-Lacueva et al. (1997) Moreno-Arribas et al. (2000)
	Mannoprotein	Increase in mouthfeel	Bertuccioli and Ferrari (1999)

Alexandre e Guillox, 2006

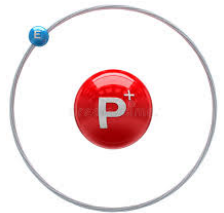
In particolare, le mannoproteine accrescono il corpo dello spumante (Bertuccioli e Ferrari 1999), aumentano l'intensità e la percezione dell'aroma e danno morbidezza.

Molte di queste macromolecole (polisaccaridi, proteine, aromi vari etc.) sono dei

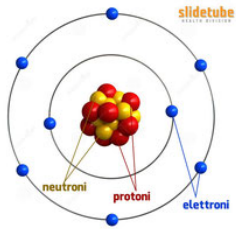
tensioattivi

La forma dell'acqua

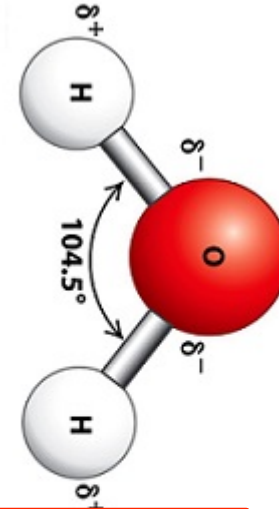
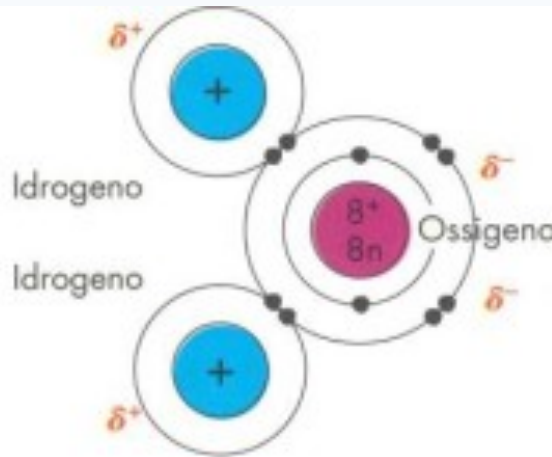
molecola polare



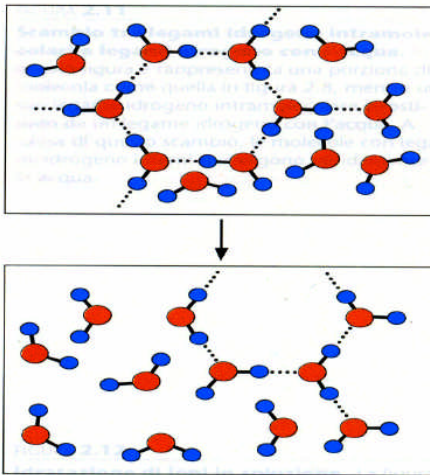
Idrogeno
→ Elio



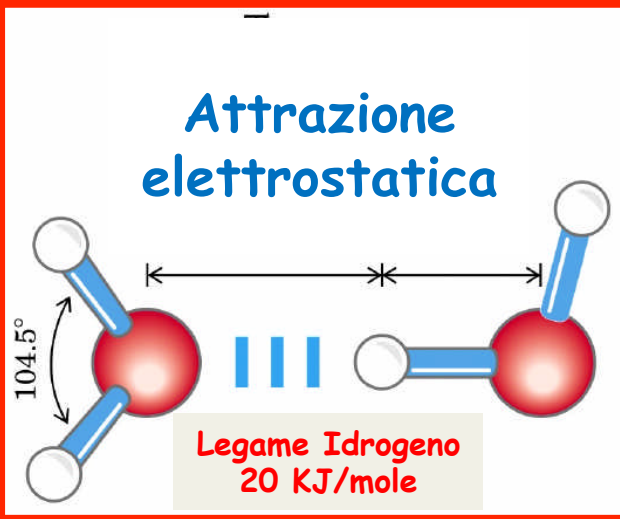
Ossigeno
→ Neon



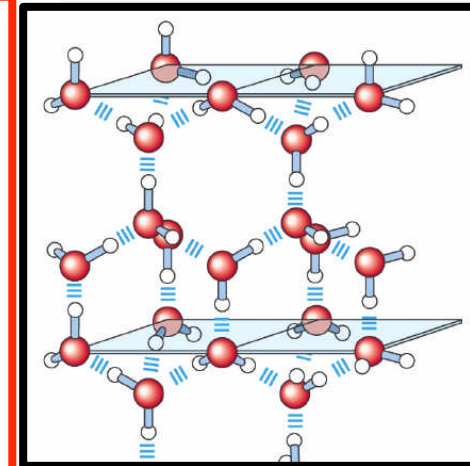
H₂O
Legame
Covalente
460 KJ/mole



Temperatura > 0° e < 100°
liquido

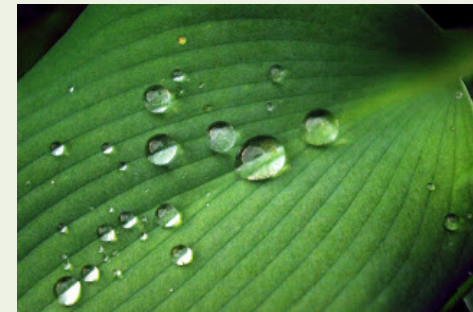
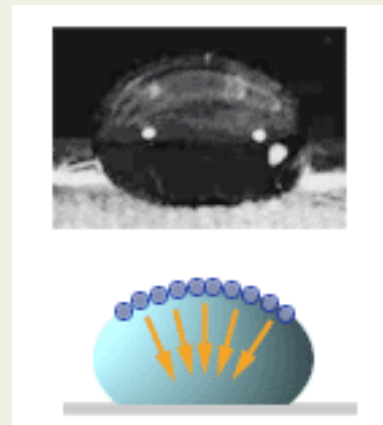
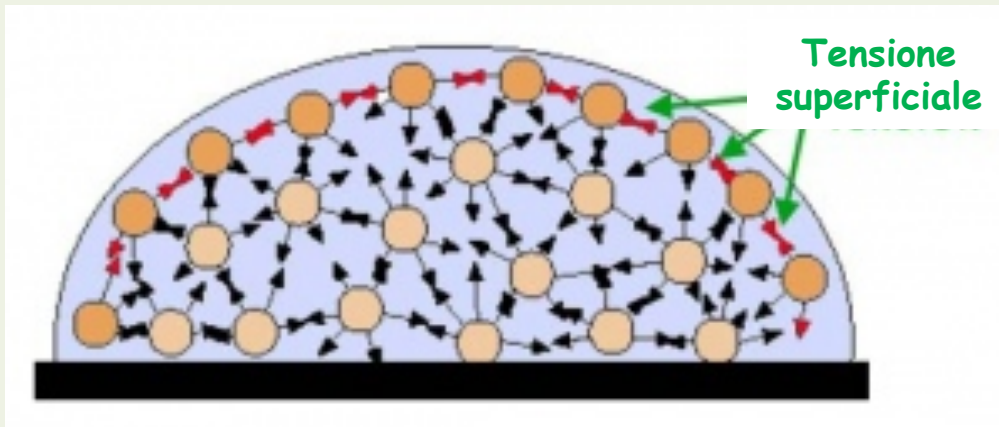
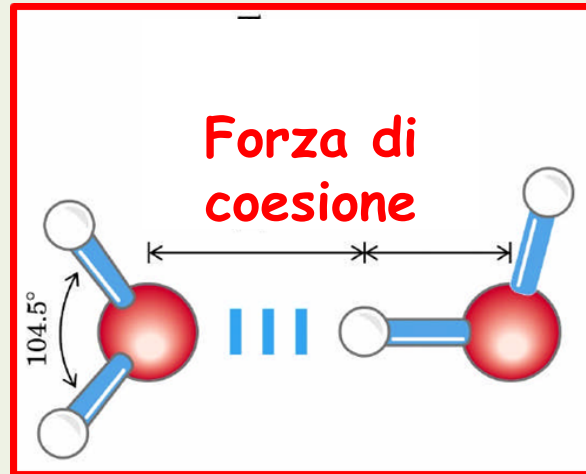
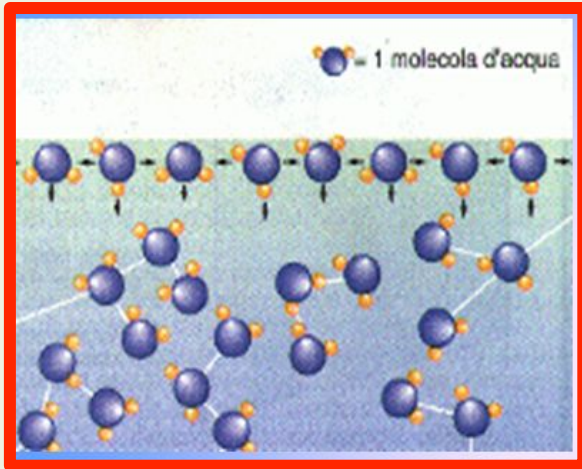


Forza di coesione



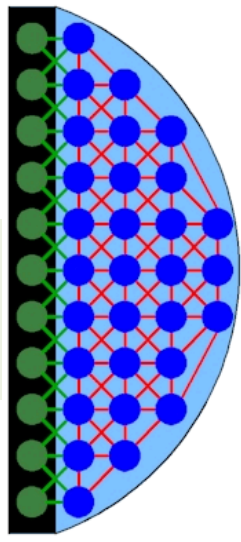
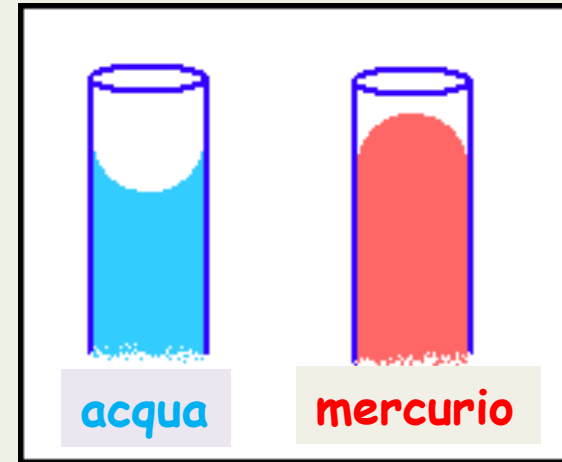
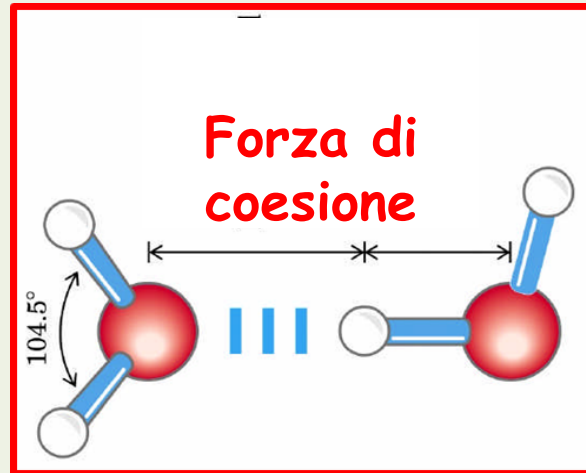
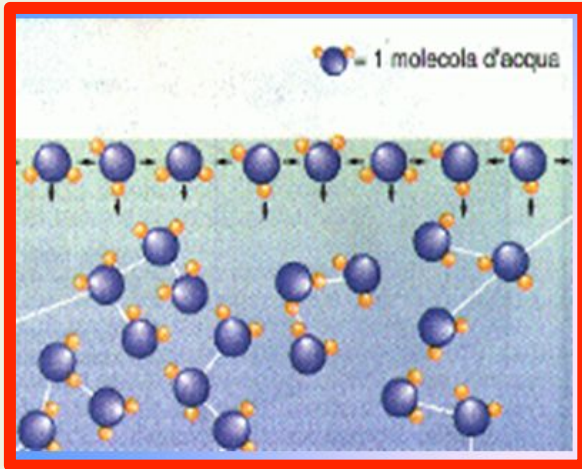
Temperatura ≤ 0°
ghiaccio

Forze di coesione → Tensione superficiale



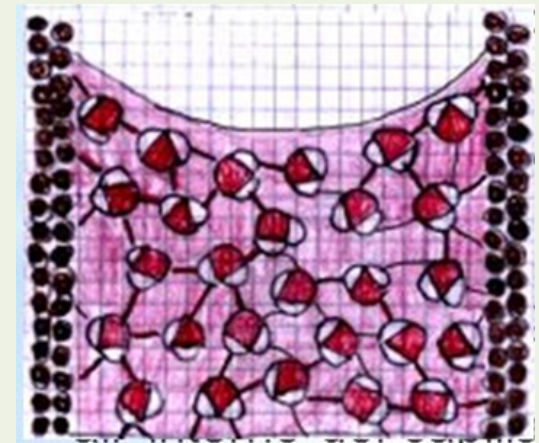
Sulla superficie dell'acqua le forze di coesione fra le molecole tendono a farle rimanere unite creando una sorta di membrana elastica e creando la formazione di gocce.

Forze di adesione → Capillarità



Solido
forze
adesione

Liquido
forze
coesione



La capillarità dell'acqua è dovuta alle forze di adesione tra le molecole di acqua e quelle del capillare quando queste sono più forti delle forze di coesione tra le molecole dell'acqua.

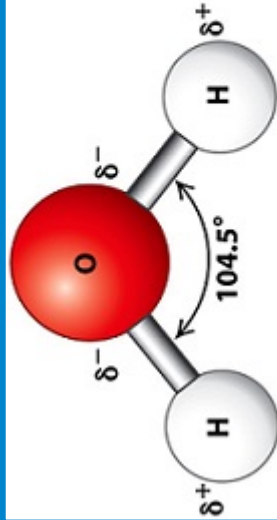
Tensioattivi o Surfattanti

(surface active agent)

testa polare (idrofila)

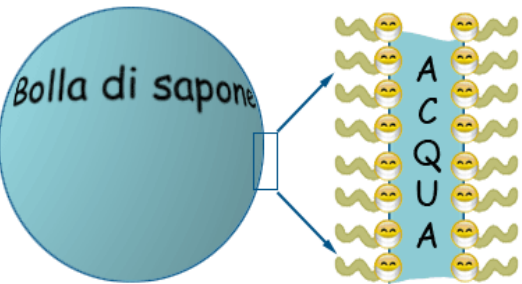


coda apolare (idrofoba)

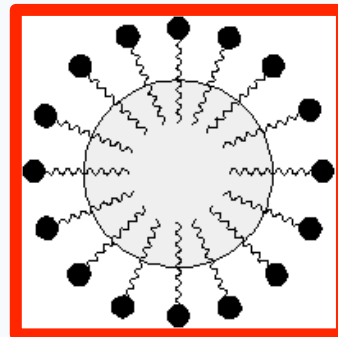


macromolecole (sapone, proteine...)
testa polare (idrofila)
coda apolare (idrofoba o lipofila)

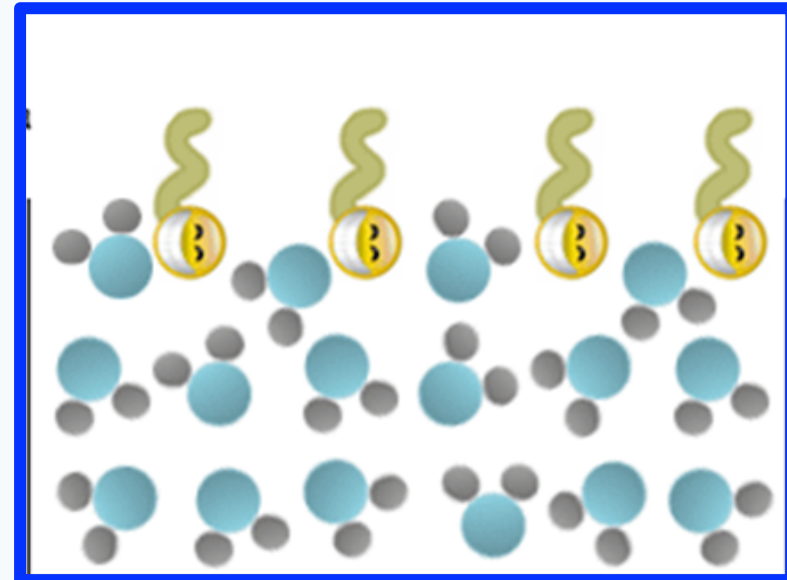
hanno la proprietà di abbassare la tensione superficiale di un liquido,
sono composti organici con un gruppo,
testa, polare ed una coda non polare



Bolla di sapone: sottile pellicola d'acqua col sapone che riduce fino a 1/3 la tensione superficiale dell'acqua e stabilizza la bolla



Bollicina di CO₂ attira tensioattivi che riducono la tensione superficiale del liquido e stabilizzano la bolla



Stappiamo !



$$P \approx 6 \text{ atm} \rightarrow 1 \text{ atm}$$

La C_{CO_2} nel liquido diventa sovrasatura

$P \approx 1 \text{ atm.}$
aria



CO_2
 $C_{CO_2} \approx 12 \text{ g/L}$

liquido

legge di Henry:

$$C_{CO_2} = k P_{\text{aria}}$$

Concentrazione di CO_2

$$C_{CO_2} \approx 9 \text{ g}/0,75 \text{ L} \rightarrow 1,5 \text{ g}/0,75 \text{ L}$$

$\approx 5 \text{ L di gas} \rightarrow \approx 0,8 \text{ L}$

Fuoriescono $\approx 4,2 \text{ L di } CO_2$ da bottiglia di $0,75 \text{ L}$

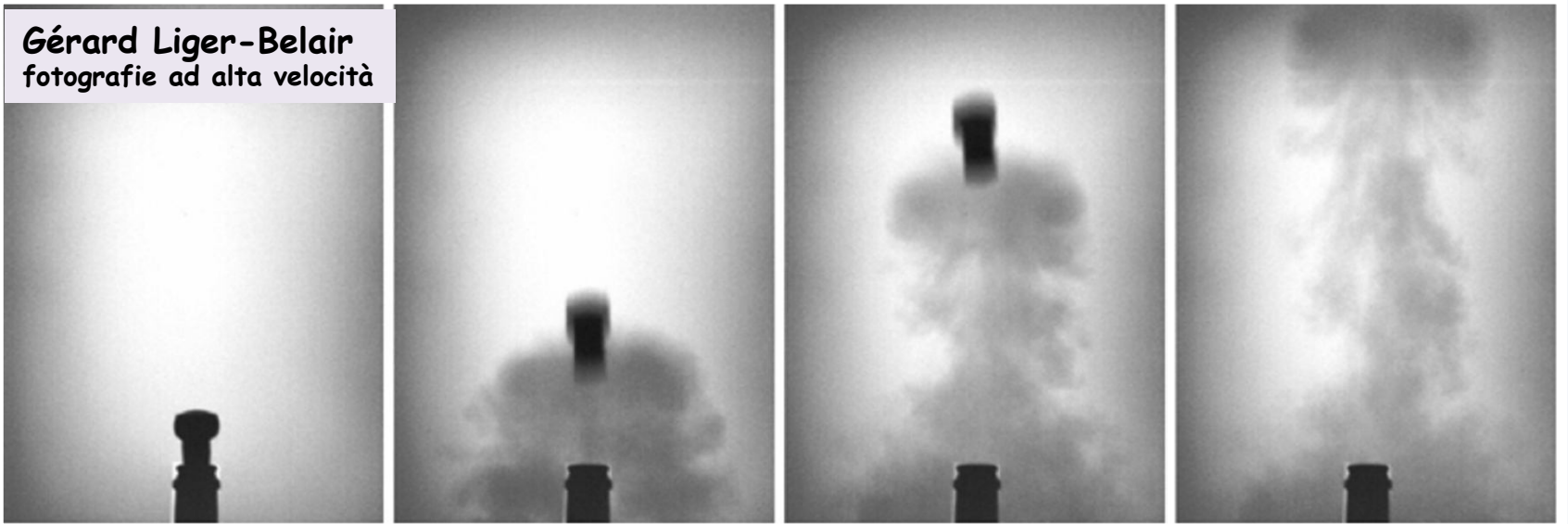
Non fatelo!!



50 Km/h

Dispersione di preziosa CO_2
Dispersione di preziosi aromi
Dispersione di prezioso liquido

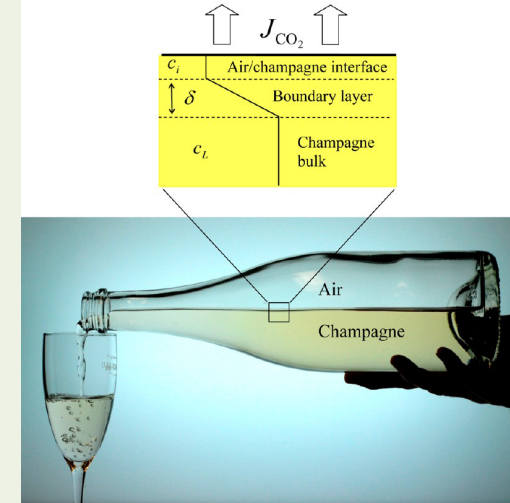
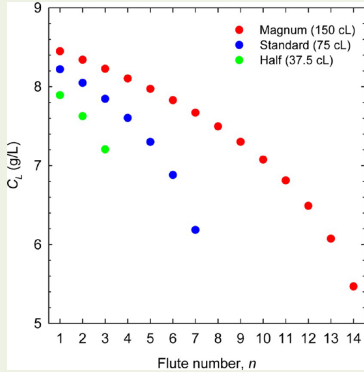
Gérard Liger-Belair
fotografie ad alta velocità



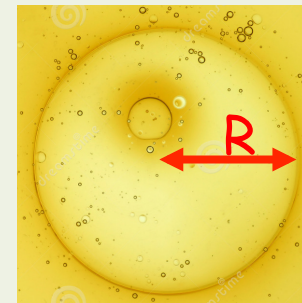
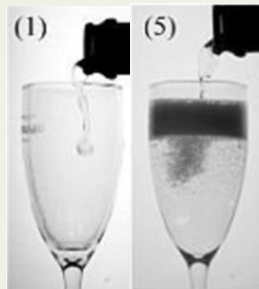
Perdita di CO_2 durante il servizio

More on the Losses of Dissolved CO_2 during Champagne Serving: Toward a Multiparameter Modeling

Gérard Liger-Belair,^{*,†,‡} Maryline Parmentier,[‡] and Clara Cilindre^{†,‡}



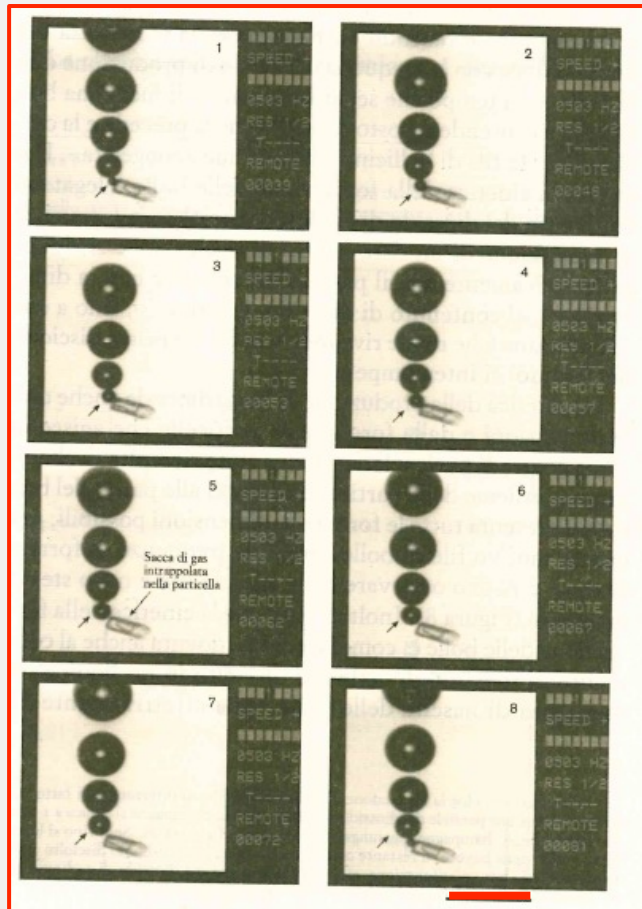
**80% di CO_2 va perduta per diffusione diretta.
Ma il restante 20%   pi  che sufficiente !
Una sola fl te (~ 0,1 L):
 $R \sim 500 \mu m$ pu  generare ~ 1 milione di bollicine**



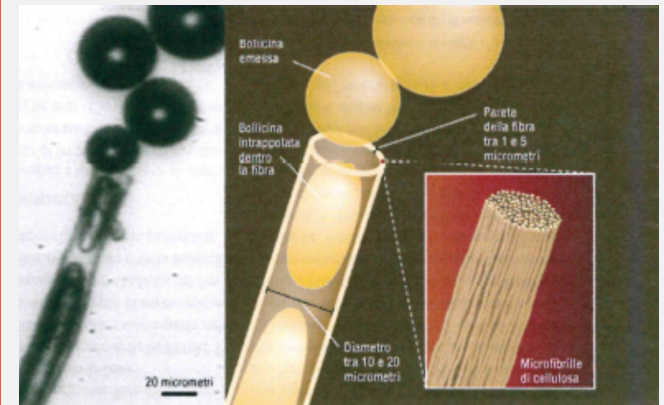
Gerard Liger-Belair

Nascita di una Bollicina

La bollicina nasce e si sviluppa da un sito di nucleazione cioè da una microcavità di gas (aria) intrappolato dal liquido al momento della mescita.



Sequenza (10 ms) della nascita delle bolle (— scala 100 μm)

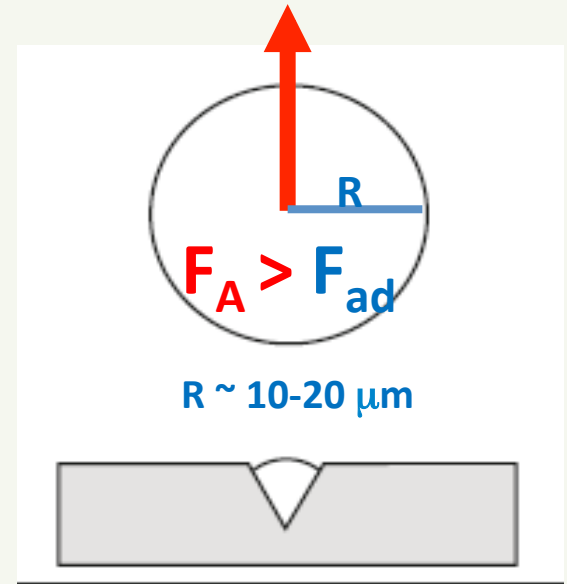


Normalmente i siti di nucleazione sono piccole bolle d'aria intrappolate in fibre di cellulose, per esempio lasciate dall'asciugatura del bicchiere.

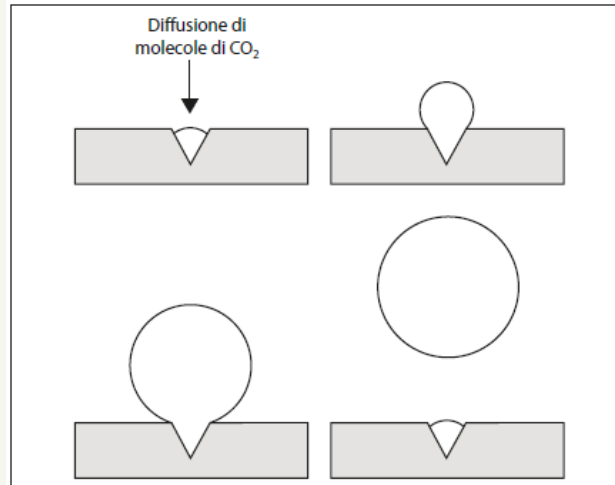
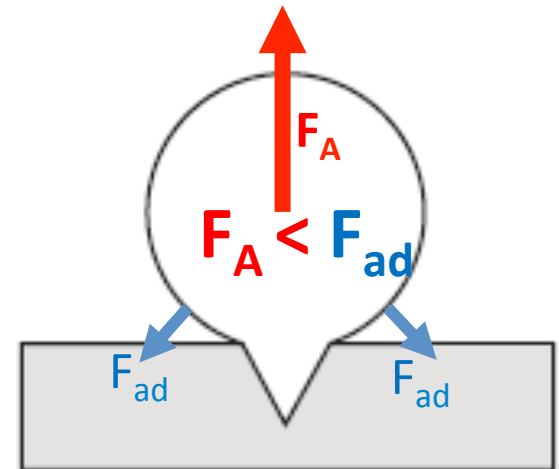
Gérard Liger-Belair,
"Bollicine" Einaudi editore

Nascita di una Bollicina

Interviene Archimede

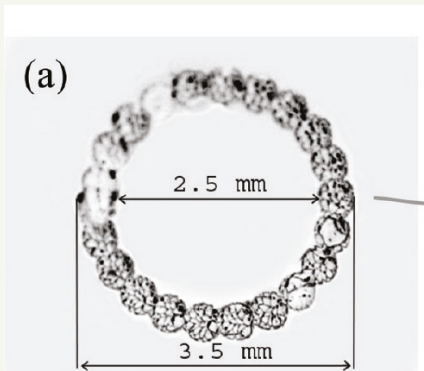


$$F_A = g (\rho_{\text{liq.}} - \rho_{\text{CO}_2}) V$$



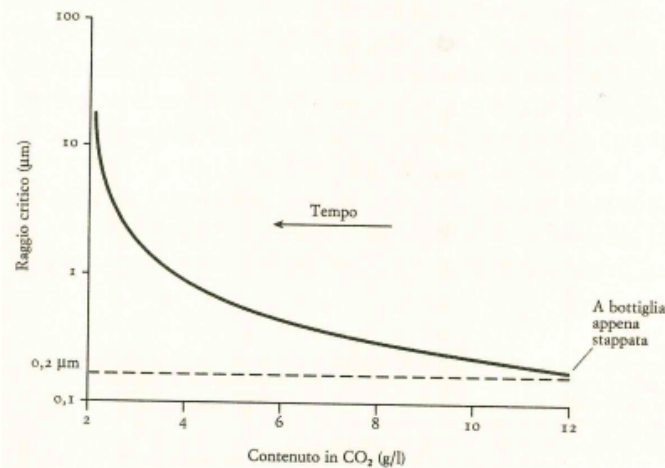
Formazione delle bollicine di CO₂ da microcavità di gas (Casey 1987)

Per studiare la produzione di bollicine si incide un anello di piccole microcavità sul fondo della flûte: siti regolari di nucleazione delle bollicine.

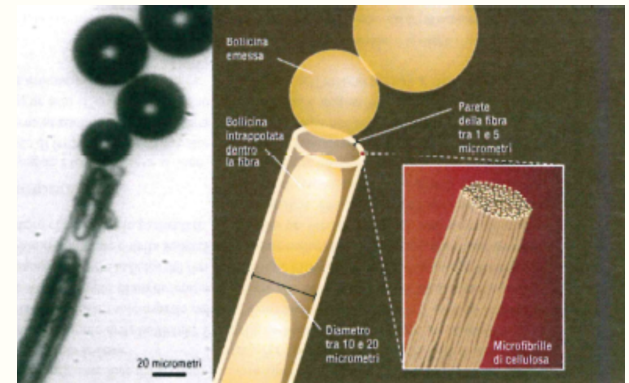


Nascita di una Bollicina

Siti di nucleazione: piccole bolle d'aria intrappolate in fibre di cellulose o in altre microcavità. La bolla iniziale deve avere dimensioni maggiori di $2 \mu\text{m}$, valore che aumenta al decrescere della concentrazione di CO_2 . Per questo motivo, al passare del tempo, alcuni siti cessano di produrre bollicine.

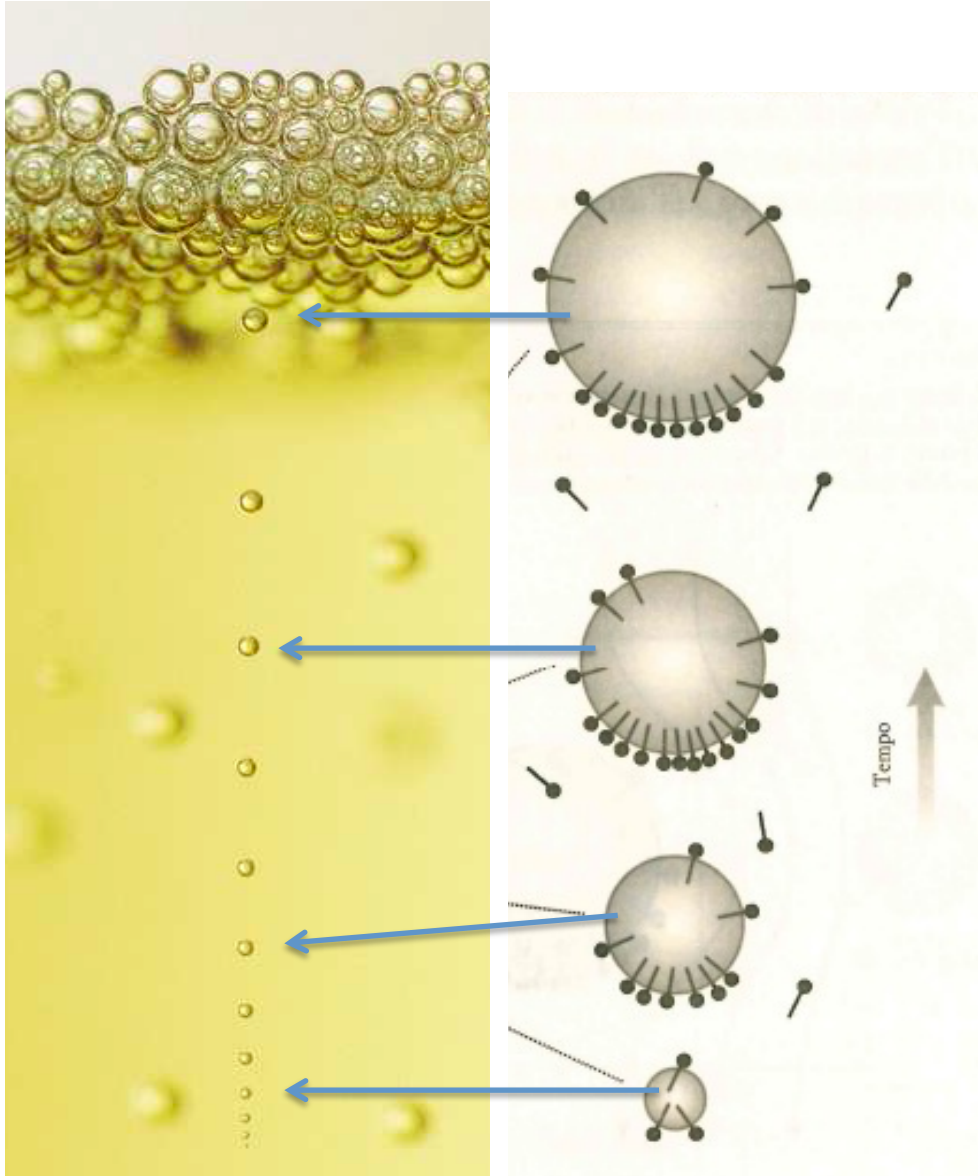


Crescita delle dimensioni del sito di nucleazione al decrescere della concentrazione di CO_2 (g/L)



Gérard Liger-Belair,
"Bollicine" Einaudi editore

La vita della bollicina



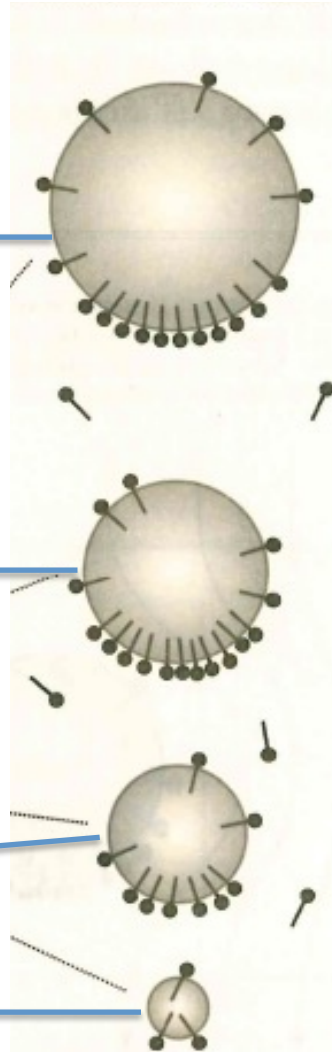
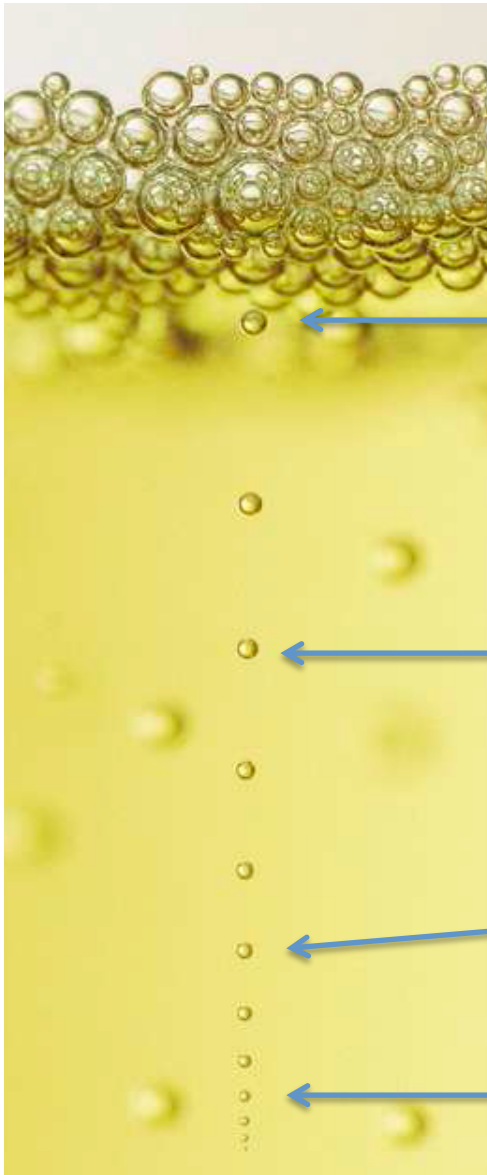
Dal sito di nucleazione si staccano in media 20-30 bollicine/sec. con diametro di 10-20 μm e salgono verso la superficie aumentando notevolmente di dimensione.

Durante la salita la bolla si riveste di tensioattivi che si dispongono sulla parete della bolla con la parte idrofoba immersa nella bolla e la parte idrofila nel liquido.

La quantità e la qualità di questi tensioattivi (polisaccaridi, mannoproteine e altre macromolecole organiche) che determinano la qualità del vino, determinano anche il movimento della bolla, il suo tasso di crescita e la sua persistenza quando arriva in superficie.

Maggiore è la quantità di queste molecole tensioattive, maggiore è la stabilità della bolla e della sua traiettoria (forma catenelle in linea retta), minore è il suo tasso di crescita (bollicine piccole), maggiore è la forza di coesione che rallenta la velocità di risalita e infine maggiore è la sua persistenza quando arriva in superficie.

Crescono,.... ma non troppo!



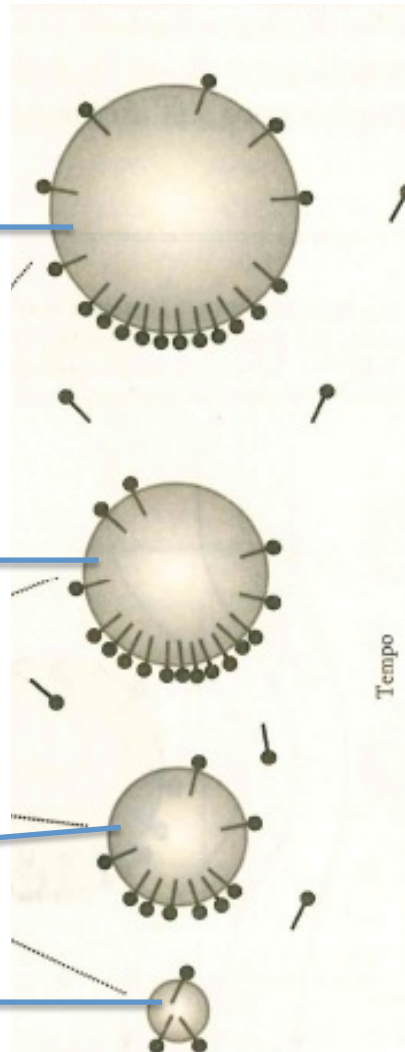
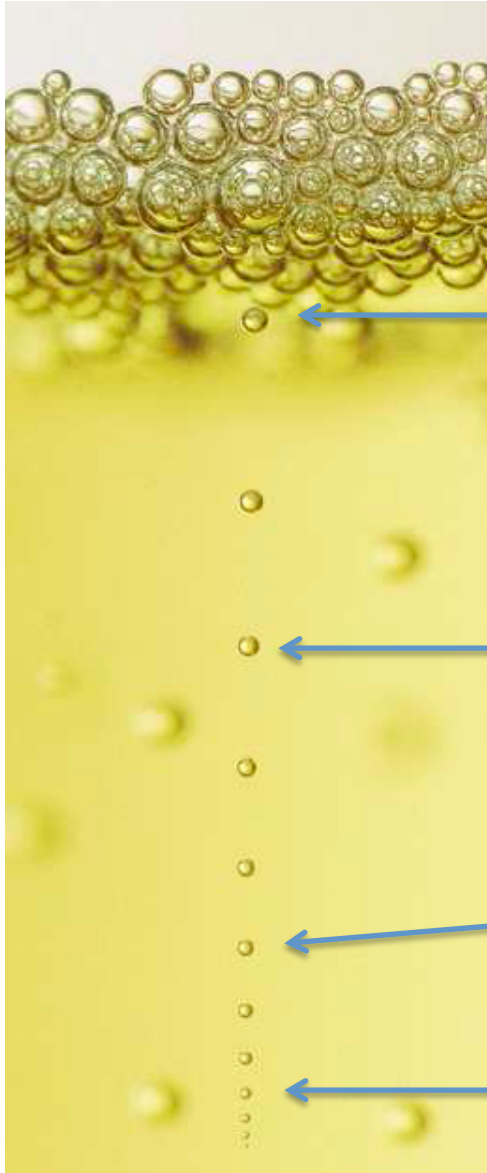
La bollicina salendo verso la superficie cresce da un diametro di 10-20 μm fino a $\sim 500 \mu\text{m}$ dopo $\sim 5 \text{ cm}$. Il volume aumenta di un milione di volte per diffusione di CO_2 nella bolla (la CO_2 e' molto sovrasatura).

Il tasso di crescita (e quindi le dimensioni finali della bolla) dipende dalla concentrazione della CO_2 ma anche dalla quantità di tensioattivi presenti e quindi dalla qualità del vino.

I tensioattivi formano un rivestimento della bolla irrigidendola, una specie di scudo protettivo che tende a impedirne la crescita: aumentando di volume la densità di tensioattivi sulla superficie diminuisce, la tensione superficiale localmente aumenta e quindi tende a comprimere la bolla.

Nella birra, rispetto allo champagne, ci sono centinaia di volte più proteine (tensioattive) rilasciate dai cereali con cui è fatta e quindi il tasso di crescita è molto inferiore (~ 3 volte). Viceversa in acqua senza tensioattivi il tasso di crescita della bolla è molto maggiore.

Accelerazione controllata...



Aumentando il volume aumenta proporzionalmente anche la forza della spinta di Archimede e quindi aumenta anche la sua velocità (si noti l'aumento della distanza delle bolle con la distanza percorsa), **ma l'accelerazione dipende dalla quantità di tensioattivi presenti nel vino.**

Una bollicina in ascesa continua a rivestirsi di tensioattivi per cui aumenta forza di adesione della bolla rispetto al liquido con tensioattivi.

Questa forza di adesione (attrito) si oppone alla forza di Archimede senza riuscire a controbilanciarla, se non quando la bolla è molto piccola.

In acqua senza tensioattivi una bollicina risale accelerando e raggiunge (dopo circa 5 cm) una velocità di circa 30 mm/sec. Se la bollicina è completamente irrigidita di tensioattivi (come quasi e' nella birra) la velocità che raggiunge è circa la metà (15 mm/sec.)

Nello champagne la bollicina si ricopre solo parzialmente di tensioattivi e lo scorrere del liquido intorno alla bolla fa accumulare i tensioattivi sul fondo lasciando la parte superiore più libera (vedi figura). La velocità che raggiunge è pertanto intermedia tra quella in l'acqua e nella birra.

..... non sbandano !



Le bollicine nello champagne (e anche nella birra) salgono verso la superficie in linea retta creando catenelle ordinate e stabili nonostante i moti convettivi e turbolenti del liquido creato da loro stesse (vedi foto qui sotto).

Se il liquido fosse senza tensioattivi le bolle sarebbero molto instabili e non riuscirebbero a mantenersi in linea retta mentre salgono verso l'alto.



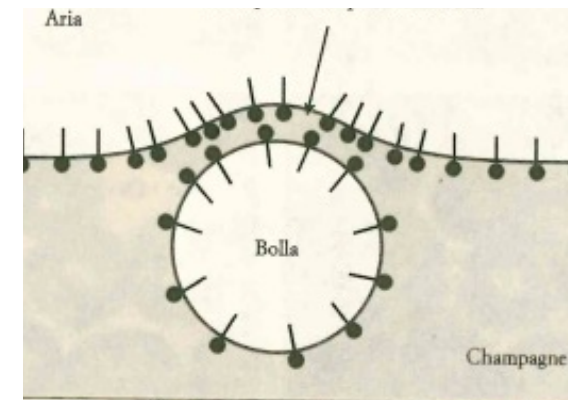
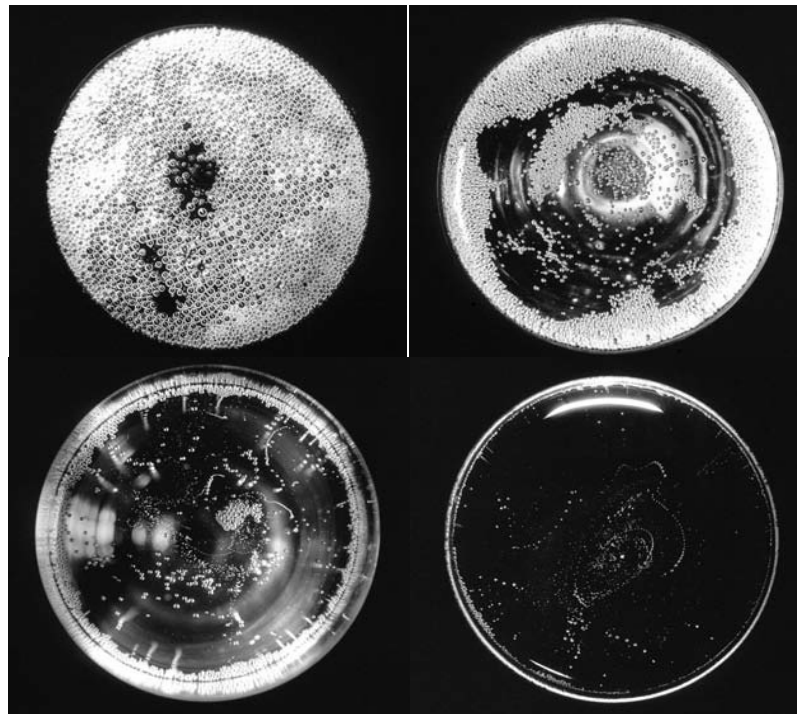
Tomografia laser con aggiunta di traccianti
G.Polidori, P.Jeandet,
G.Liger-Belair
Le Scienze, Dicembre 2009

Se per qualche ragione una bolla viene deformata e spinta leggermente fuori dalla propria traiettoria il rivestimento tensioattivo (anche se è rivestita solo la parte del fondo) la irrigidisce e tende a far mantenere alla bolla la sua direzione verticale spingendola indietro in fila con le altre.

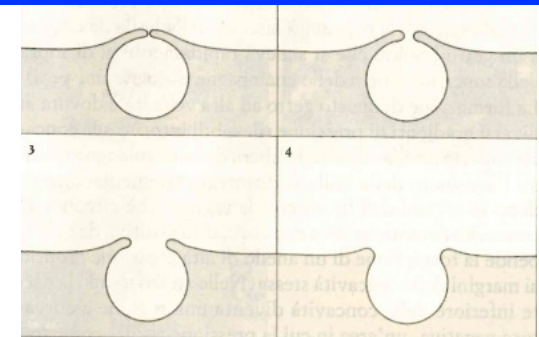
.....e vivono a lungo !



Subito dopo che la champagne è stata versata si forma in superficie uno strato di spuma che scompare in pochi secondi: le bollicine collassano a valanga disintegrandosi a catena. Si forma poi un unico **strato di bollicine che migrano verso il bordo** della flûte creandovi una specie di collare. Il lungo tempo di permanenza di queste bollicine prima di esplodere **dipende dalla presenza di tensioattivi che irrigidiscono la bolla e la superficie.**



Senza tensioattivi la bolla esplose subito (per esempio in acqua pura)



Gérard Liger-Belair,
"Bollicine" Einaudi editore

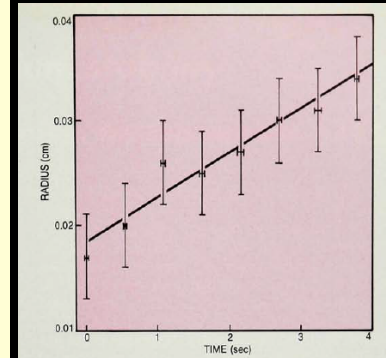
Through a Beer Glass Darkly

N.E.Shafer, R.N.Zare, Phys. Today 44,48(1991)

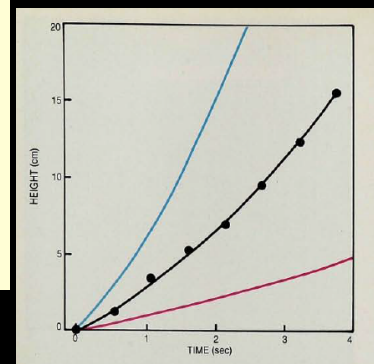


Anche le bollicine della birra crescono e accelerano mentre risalgono verso la superficie ma molto meno che nello champagne: presenza di molti più tensioattivi (molte più proteine dalla fermentazione del malto (orzo o altri cereali))

Le bollicine nella birra salgono anch'esse in linea retta e sono molto persistenti perché vengono stabilizzate dai tensioattivi che le ricoprono quasi completamente, irrigidendole.



$$R(t) = R_0 + v_R t$$
$$R_0 = 180 \pm 40 \mu\text{m}$$
$$v_R = 40 \pm 10 \mu\text{m/sec}$$



Ricapitolando:

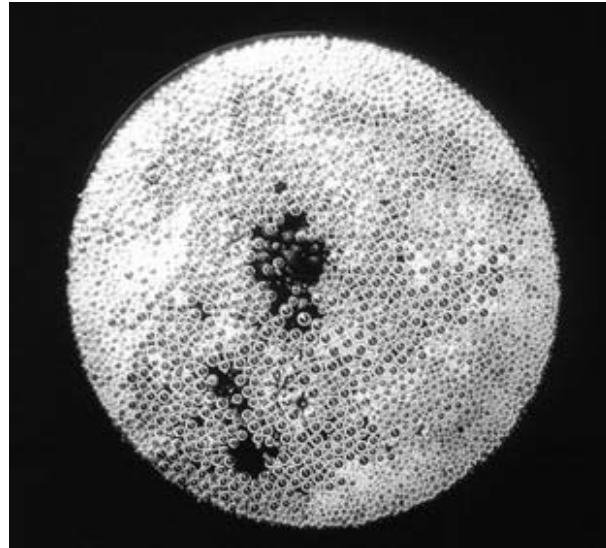


In un buon Champagne:

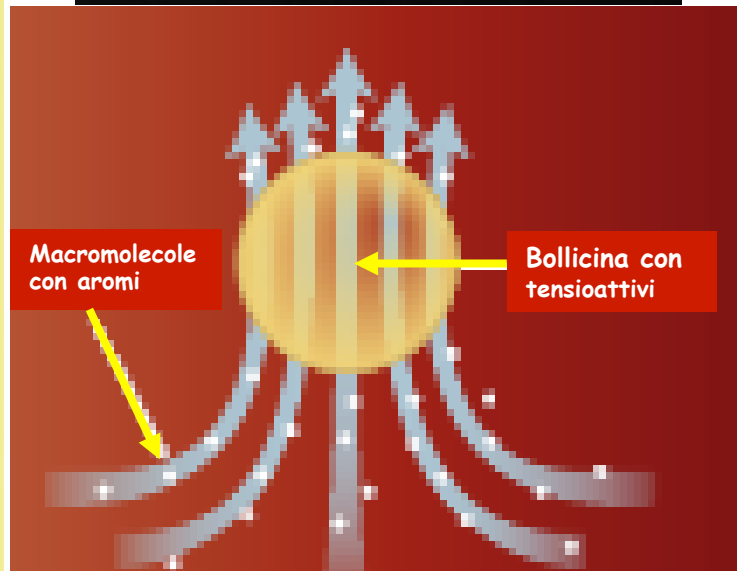
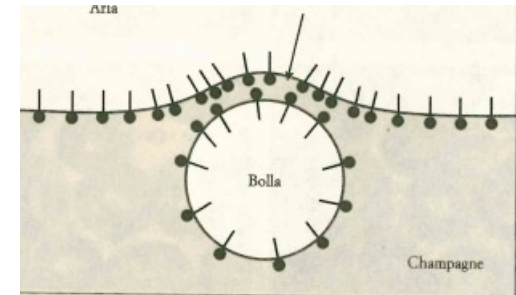
- Perlage finissimo
- Velocità della bollicina moderata
- Catenelle stabili e ben allineate
- Persistenza della bolla in superficie

**e non è solo per un fatto estetico
(seppur importante)**

Piccoli ascensori



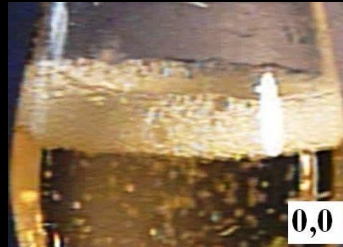
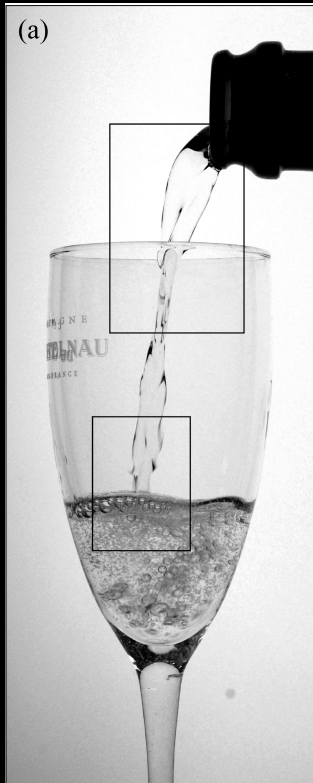
la bollicina salendo verso la superficie non solo si riveste di mannoproteine, polisaccaridi, e altre macromolecole tensioattive ma trascina verso la superficie anche altri tipi di macromolecole di aromi e di sapori.



Le migliaia di bollicine in ascesa trasportano tensioattivi e aromi sulla superficie dove si addensano gradualmente in concentrazioni sempre più elevate. Quando poi le bollicine collassano irradiano nell'aria la fragranza dei profumi e dei sapori che rendono unica l'esperienza sensoriale a chi dedusta lo champagne.

Si forma la spuma

Versando lo champagne nella flûte si crea della turbolenza che crea uno spesso strato di spuma



Le bollicine di questa spuma collassano a valanga: l'esplosione di una induce l'esplosione di quelle vicine dando origine a disintegrazioni a catena.

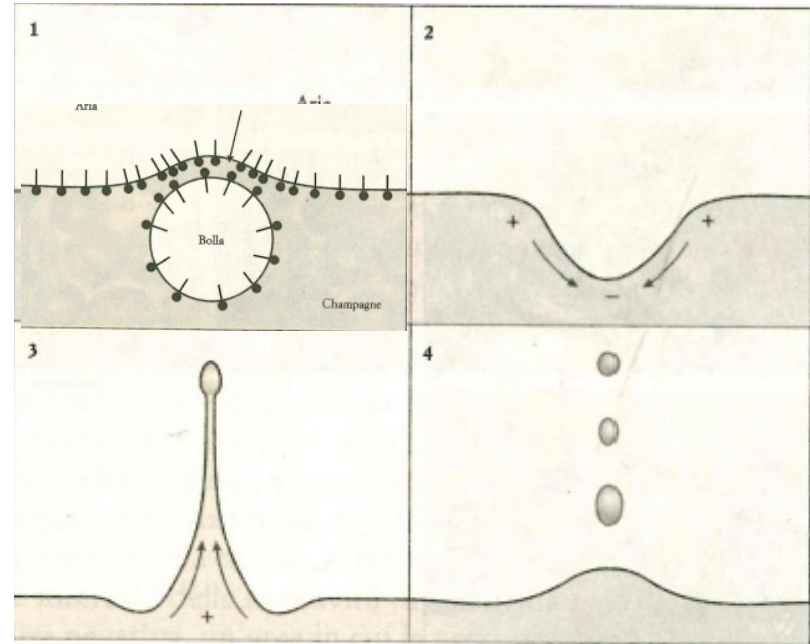
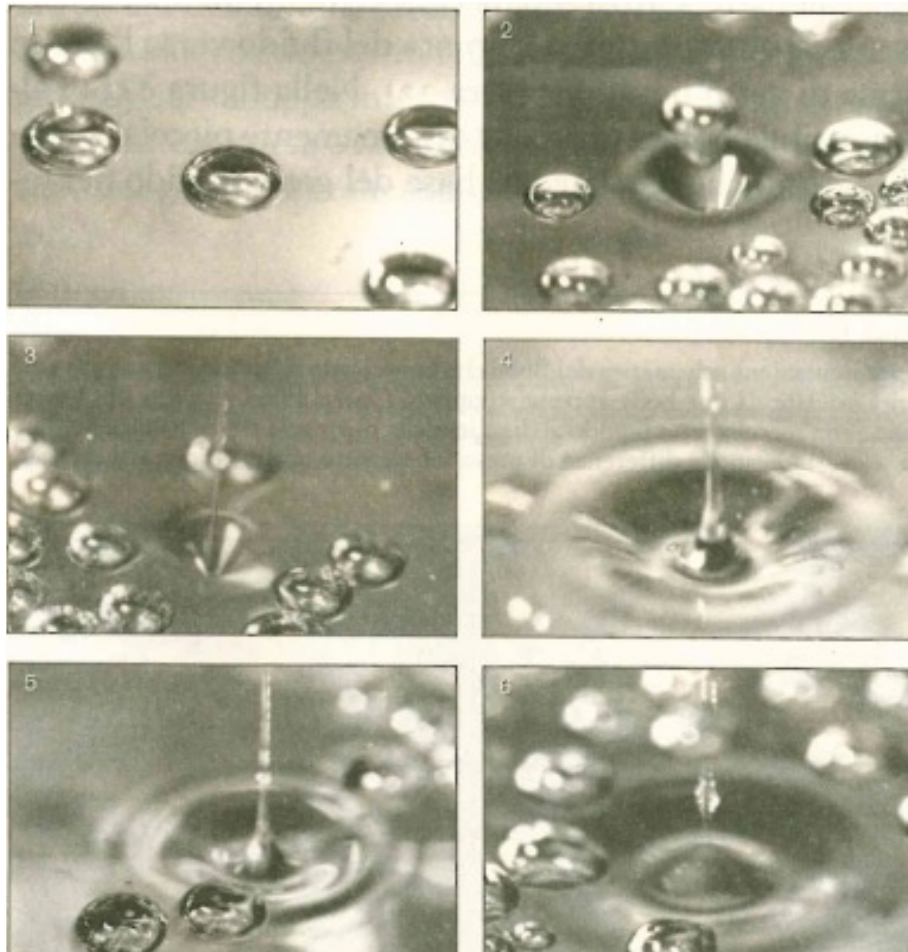


Il collasso di centinaia di bollicine irradia tutto intorno una nuvola di microscopiche goccioline che esalta l'esperienza sensoriale di chi degusta lo champagne.
(Alain Cornu/Collezione CIVC)



.....e la bollicina esplode !

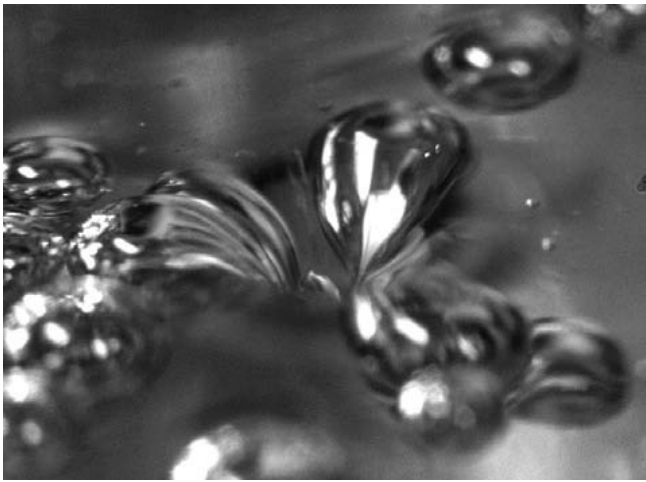
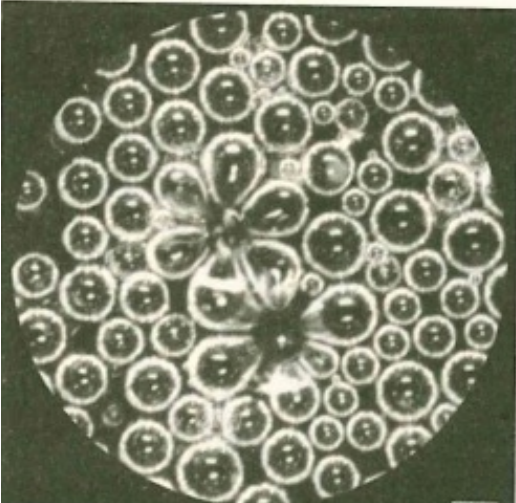
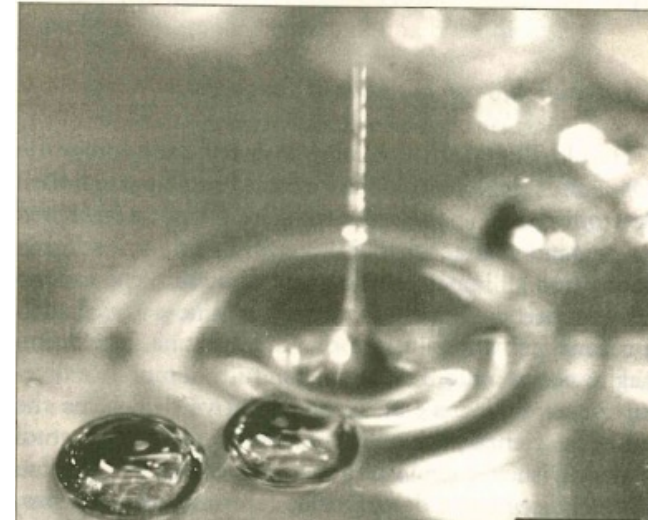
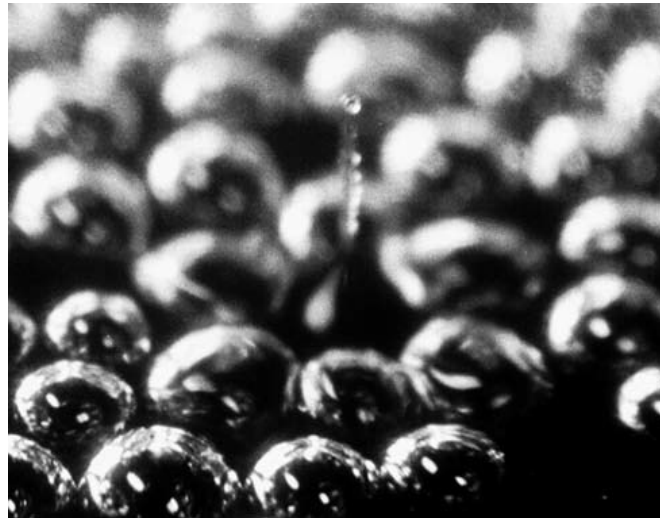
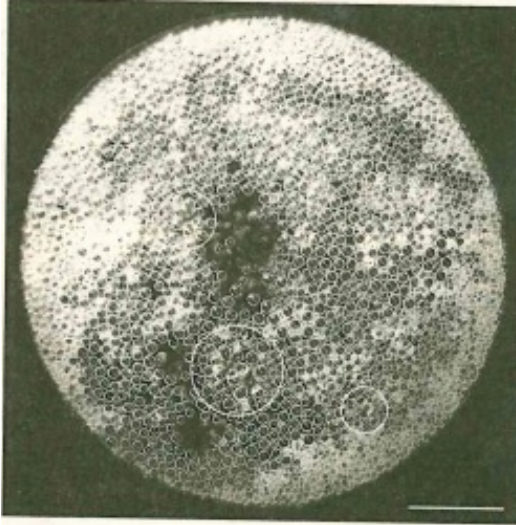
Quando la bollicina raggiunge la superficie, la forza di Archimede cerca di spingerla fuori dal liquido, ma la forza di adesione e l'irrigidimento della superficie dovuta ai tensioattivi tendono a mantenere la bollicina in vita (come in una bolla di sapone). Lentamente lo spessore tra bollicina e aria diventa sempre più sottile fino a $0,1\mu\text{m}$ e alla fine la bolla si rompe e collassa. Si crea allora una cavità con una differenza di pressione che richiama liquido verso il fondo. Si genera quindi un flusso che determina un getto di liquido verso l'alto. Il getto di liquido si dissolve poi in molte goccioline microscopiche di solo un centinaio di μm . Il tutto in $100\ \mu\text{s}$.



Sequenza temporale della rottura di una bollicina di champagne. L'intervallo tra un fotogramma e l'altro è di $0,5\ \text{msec}$.

Gérard Liger-Belair
Microfotografie ad alta velocità

.....e la bollicina esplode !



Le bollicine nella flûte scoppiano a centinaia con un bellissimo effetto estetico e una miriade di microscopiche goccioline del getto zimpillano piacevolmente diffondendo aromi. Poi, in bocca, le bollicine continuano a scoppiettare sulla lingua liberando aromi e sapori e accentuando le percezioni sensoriali.

Gérard Liger-Belair
Microfotografie ad alta velocit 

Non si deve assolutamente ruotare il bicchiere come si fa con i vini fermi: le bollicine fanno tutto il lavoro concentrando sulla superficie sapori e aromi che poi diffondono nel vostro naso e nella vostra bocca.

Non ruotare la flûte di champagne!



Champagne



Vino bianco



Vino rosso

- Si corre il rischio di riportare in soluzione nel liquido gli aromi e i sapori che sono stati portati in superficie.
- Si creano moti vorticosi che disperdono velocemente la CO_2 .

Lasciate lavorare le Bollicine !

YOUTHFUL RADIANCE

2-3 years old

MATURE BALANCE

from 3-4 to 6-8 years old

COMPLETENESS AND COMPLEXITY

more than 6-8 years old



Chardonnay

LIVELINESS, MINERALITY

Meunier

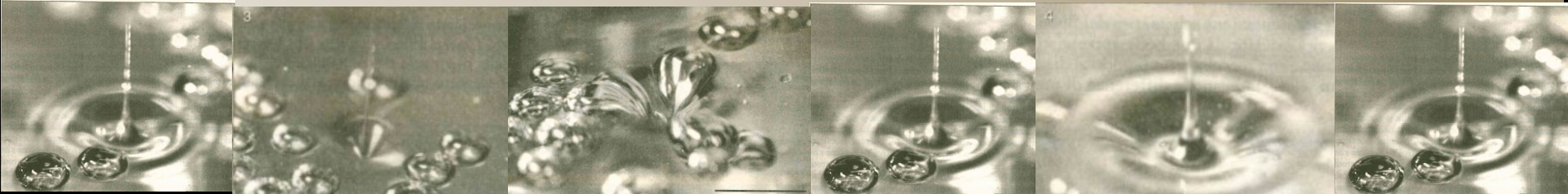
FRUITY CHARACTER AND ROUNDNESS OF FLAVOUR

Pinot noir

BODY AND STRUCTURE



Aroma chart available for download from the media library at www.champagne.com



Conclusioni

ESAME VISIVO	Limpidezza	
	Trasparenza	
	Colore	Tonalità
		Intensità
	Fluidità	
	Effervescenza	Grana del Perlage
Persistenza del Perlage		

EFFERVESCENZA: (Grana del Perlage)

Molto fine	Grana di minuscole dimensioni, di assoluta finezza, per spumanti di gran classe
Mediamente fine	Grana di media dimensione
Grossolana	Grana di grande dimensione

EFFERVESCENZA: (Persistenza del Perlage)

Molto persistente	Risalita delle catenelle lenta ma continua, evidente in spumanti di gran pregio
Mediamente persistente	Discreta durata del perlage
Evanescente	Assoluta mancanza di perlage

Grana del Perlage

Il tasso di crescita (e quindi le dimensioni finali della bolla) dipende dal valore della concentrazione della CO_2 , ma anche dalla quantità di tensioattivi presenti e quindi dalla qualità del vino. I tensioattivi formano un rivestimento della bolla irrigidendola, una specie di scudo protettivo che tende a contrastarne la crescita.

Qualità del Perlage

Aumentando il volume aumenta proporzionalmente anche la forza della spinta di Archimede e quindi aumenta anche la sua velocità ma il tasso di aumento della velocità (accelerazione) dipende dalla quantità di tensioattivi presenti nel vino e quindi dalla qualità del vino.

Qualità del Perlage

Le bollicine nello champagne **salgono in linea retta** creando catenelle ordinate e stabili nonostante i moti convettivi e turbolenti del liquido. Questo comportamento dipende dalla presenza dei tensioattivi e quindi dalla qualità del vino.

Persistenza del Perlage

Si forma un unico strato di bollicine che poi migrano verso il bordo della flûte creandovi una specie di collare. Il lungo tempo di persistenza di queste bollicine prima di esplodere dipende dalla presenza di tensioattivi che irrigidiscono sia la bolla che la superficie del liquido, e quindi dipende dalla qualità del vino.

Conclusioni

Per una corretta valutazione dello champagne è importante mettersi nelle condizioni in cui la CO₂ possa svolgere tutta l'effervescenza di cui è potenzialmente capace. Questo è importante non solo per l'esame visivo ma anche e soprattutto per gli esami olfattivo, gustativo e retro olfattivo.

La capacità delle bollicine di far emergere le macromolecole dei profumi, degli aromi e dei sapori dello champagne sulla superficie della flûte, per poi diffonderli nel naso e in bocca, esalta al massimo le percezioni sensoriali della degustazione.

E' quindi imperativo:

- non disperdere la CO₂ con un cattivo servizio troppo lento,
- usare una flûte ben pulita alla stessa temperature dello champagne,
- evitare che ci siano grassi sulla flûte (rossetto, aver mangiato patatine fritte...)

Se si prendono queste precauzioni un perlage di ottima qualità è sicuramente indice di un ottimo champagne con tanti profumi, aromi e sapori.

Comunque, un esame visivo in cui si riscontri la presenza di un buon perlage è la migliore premessa per poter valutare al meglio la qualità dello champagne in degustazione.

Fa bene dunque FISAR a richiedere nell'esame visivo la corretta valutazione della grana del perlage e la persistenza delle bollicine e della "collarete".

ESAME VISIVO	Limpidezza	
	Trasparenza	
	Colore	Tonalità
		Intensità
	Fluidità	
	Effervescenza	Grana del Perlage
		Persistenza del Perlage

EFFERVESCENZA: (Grana del Perlage)

Molto fine	Grana di minuscole dimensioni, di assoluta finezza, per spumanti di gran classe
Mediamente fine	Grana di media dimensione
Grossolana	Grana di grande dimensione

EFFERVESCENZA: (Persistenza del Perlage)

Molto persistente	Risalita delle catenelle lenta ma continua, evidente in spumanti di gran pregio
Mediamente persistente	Discreta durata del perlage
Evanescente	Absoluta mancanza di perlage

Grazie dell'Attenzione





Gérard Liger-Belair
BOLLICINE

La scienza e lo champagne

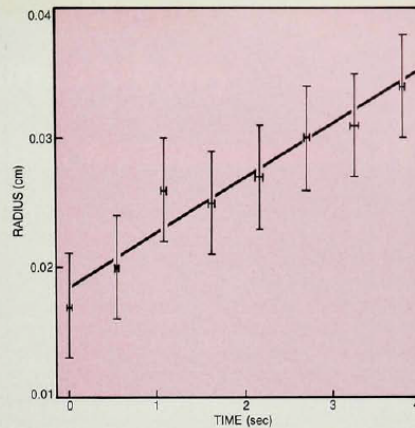
ET

Einaudi

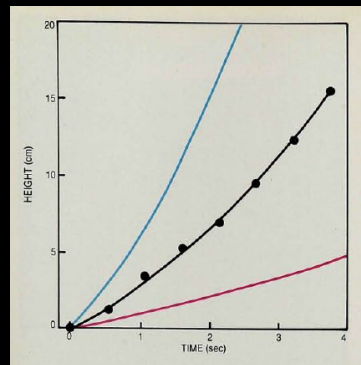




N.E.Shafer, R.N.Zare
Through a Beer Glass Darkly,
 Phys. Today 44,48(1991)



Radius of a rising beer bubble changes as a function of time. The smooth line is the best fit of the radius to $r = r_0 + v_r t$, where v_r is the rate of increase of the radius. The fit gives $r_0 = 0.018 \pm 0.004$ cm and $v_r = 0.004 \pm 0.001$ cm/sec. The error bars represent one standard deviation. The large uncertainty for r is caused by the finite resolution of the photographic process used in the technique for measuring the radius. **Figure 3**



Height of a bubble in a glass of beer as a function of time, as determined from an enlarged version of figure 2. The data points are roughly one standard deviation in size. The black curve is the expected trajectory of a beer bubble if one assumes that the drag force F_d follows that of a rigid sphere with $r_0 = 0.0143$ cm and $v_r = 0.0042$ cm/sec. If one assumes the same values for r_0 and v_r , but that the drag force follows either Stokes's law $F_d = 6\pi\mu v_r r$ (blue) or Oseen's law $F_d = 6\pi v_r r(1 + \frac{3}{16}R)$ (red), the calculated trajectories do not match the observed ones. **Figure 4**

$$\frac{dN_{\text{bubble}}}{dt} = \left(\frac{P_{\text{bubble}}}{k_B T_{\text{bubble}}} \right) \frac{dV_{\text{bubble}}}{dt}$$

$$= \left(\frac{P_{\text{bubble}}}{k_B T_{\text{bubble}}} \right) 4\pi r^2 \frac{dr}{dt}$$

$$\frac{dN_{\text{bubble}}}{dt} = \gamma(4\pi r^2)$$

$$r = r_0 + v_r t$$

$$F_b = V_{\text{bubble}} (\rho_{\text{beer}} - \rho_{\text{bubble}}) g$$

$$\approx V_{\text{bubble}} \rho_{\text{beer}} g$$

$$F_b \approx \frac{4\pi r^3}{3} \rho_{\text{beer}} g$$

$$M_{\text{bubble}} \frac{d^2 z}{dt^2} = F_b + F_d \left(\frac{dz}{dt}, r \right)$$

$$F_d \left(\frac{dz}{dt}, v_r t + r_0 \right) = \frac{-4\pi(v_r t + r_0)^3}{3} \rho_{\text{beer}} g$$