

La fluidodinamica: cos'è e a cosa serve. Esempi tratti dalla vita di tutti i giorni e non.

Simone Zuccher

E-mail: zuccher@sci.univr.it

Web page: <http://profs.sci.univr.it/~zuccher/>

Liceo Scientifico “E. Medi” e
Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali – Università di Verona

Conferenze per i genitori degli studenti e non
11 Febbraio 2008

Outline

1 Cos'è e a cosa serve?

- Alcune definizioni, esempi preliminari
- Domande & risposte
- Dove entra la fluidodinamica

2 Il modello

- Le equazioni di Navier-Stokes
- Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

3 Diversi approcci

- Experimental Fluid Dynamics
- Analytical Fluid Dynamics
- Computational Fluid Dynamics

4 Esempi

- Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Outline

1 Cos'è e a cosa serve?

- Alcune definizioni, esempi preliminari
- Domande & risposte
- Dove entra la fluidodinamica

2 Il modello

- Le equazioni di Navier-Stokes
- Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

3 Diversi approcci

- Experimental Fluid Dynamics
- Analytical Fluid Dynamics
- Computational Fluid Dynamics

4 Esempi

- Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Outline

1 Cos'è e a cosa serve?

- Alcune definizioni, esempi preliminari
- Domande & risposte
- Dove entra la fluidodinamica

2 Il modello

- Le equazioni di Navier-Stokes
- Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

3 Diversi approcci

- Experimental Fluid Dynamics
- Analytical Fluid Dynamics
- Computational Fluid Dynamics

4 Esempi

- Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Outline

1 Cos'è e a cosa serve?

- Alcune definizioni, esempi preliminari
- Domande & risposte
- Dove entra la fluidodinamica

2 Il modello

- Le equazioni di Navier-Stokes
- Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

3 Diversi approcci

- Experimental Fluid Dynamics
- Analytical Fluid Dynamics
- Computational Fluid Dynamics

4 Esempi

- Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Outline

1 Cos'è e a cosa serve?

- Alcune definizioni, esempi preliminari
- Domande & risposte
- Dove entra la fluidodinamica

2 Il modello

- Le equazioni di Navier-Stokes
- Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

3 Diversi approcci

- Experimental Fluid Dynamics
- Analytical Fluid Dynamics
- Computational Fluid Dynamics

4 Esempi

- Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

...partiamo dall'*abc*

Etimologia

Fluidodinamica: composto di *fluido* e *dinamica*.

...partiamo dall'abc

Etimologia

Fluidodinamica: composto di *fluido* e *dinamica*.

Definizione di fluido

Si dice di qualsiasi sostanza che si presenti nello stato liquido o aeriforme. Qualsiasi sostanza allo stato fluido, in cui le molecole non hanno una posizione reciproca fissa.

...partiamo dall'abc

Etimologia

Fluidodinamica: composto di *fluido* e *dinamica*.

Definizione di dinamica

Parte della meccanica che studia il moto dei corpi in relazione alle forze che lo producono.

...partiamo dall'*abc*

Etimologia

Fluidodinamica: composto di *fluido* e *dinamica*.

Definizione di *fluido-dinamica*

Branca della fisica che studia il movimento dei fluidi.

Ok, ma in pratica?

Dal caffè e i biscotti...

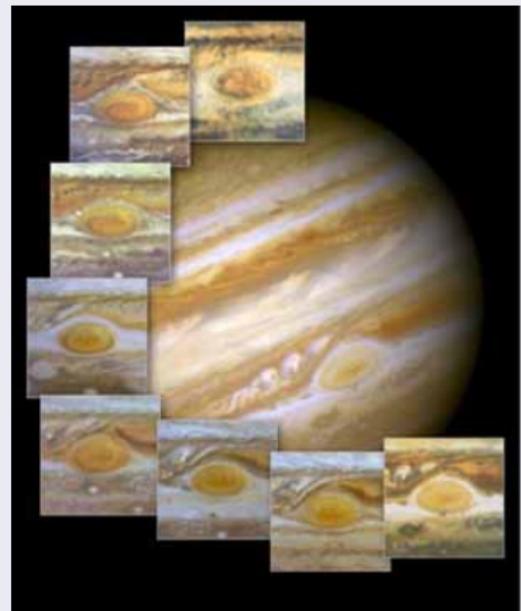


Ok, ma in pratica?

Dal caffè e i biscotti...



...alle tempeste di Giove



Outline

1 Cos'è e a cosa serve?

- Alcune definizioni, esempi preliminari
- **Domande & risposte**
- Dove entra la fluidodinamica

2 Il modello

- Le equazioni di Navier-Stokes
- Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

3 Diversi approcci

- Experimental Fluid Dynamics
- Analytical Fluid Dynamics
- Computational Fluid Dynamics

4 Esempi

- Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Domande/risposte (1/2)

D: Perché gli uccelli volano in formazione a "V"?



Domande/risposte (1/2)

D: Perché gli uccelli volano in formazione a "V"?



R: Perché sanno del "vortice di estremità"



Domande/risposte (2/2)

D: Perché la pallina da golf è piena di sfaccettature?

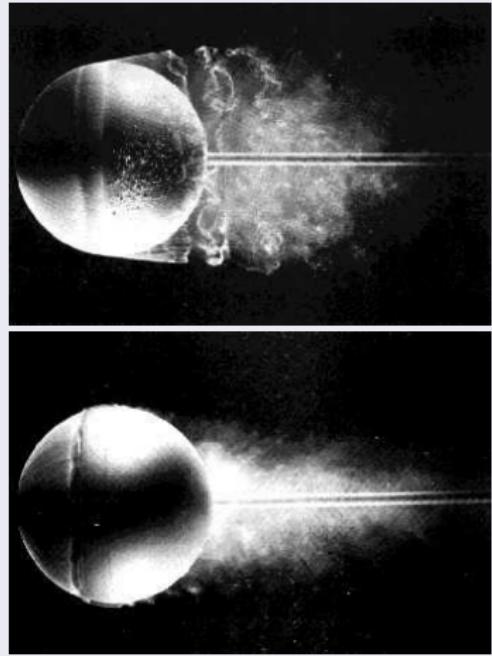


Domande/risposte (2/2)

D: Perché la pallina da golf è piena di sfaccettature?



R: Separazione del flusso
(laminare/turbolento)



Outline

1 Cos'è e a cosa serve?

- Alcune definizioni, esempi preliminari
- Domande & risposte
- **Dove entra la fluidodinamica**

2 Il modello

- Le equazioni di Navier-Stokes
- Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

3 Diversi approcci

- Experimental Fluid Dynamics
- Analytical Fluid Dynamics
- Computational Fluid Dynamics

4 Esempi

- Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Meteorologia



Cos'è e a cosa serve?
oooooooo●oooooooo

Il modello
ooooo

Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
ooooooo

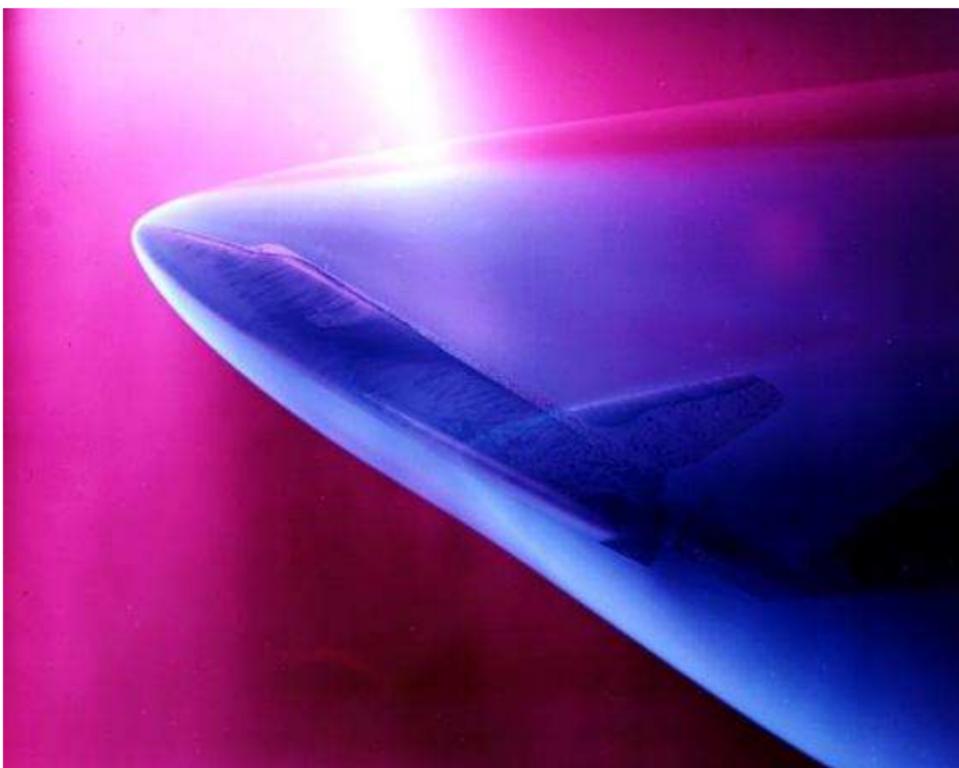
Aerodinamica



Combustione



Aero-termodinamica



Geologia



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooo●ooo

Il modello
ooooo

Diversi approcci
oooooooooo

Esempi
ooooooo

Idrodinamica



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooo●oo

Il modello
ooooo

Diversi approcci
oooooooooo

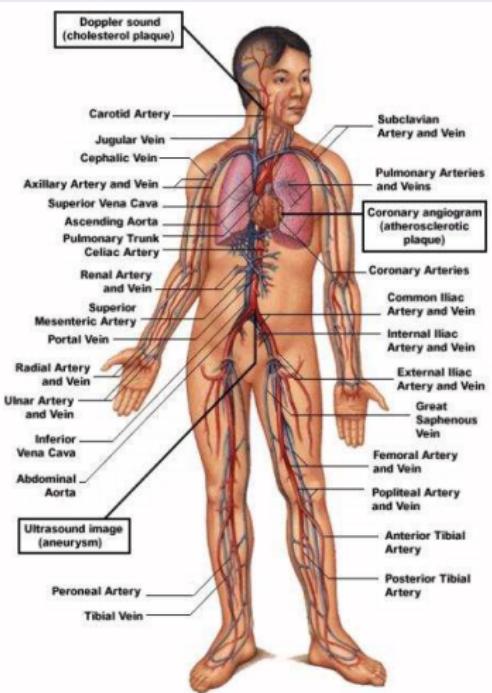
Esempi
ooooooo

Traffico e dinamica delle folle



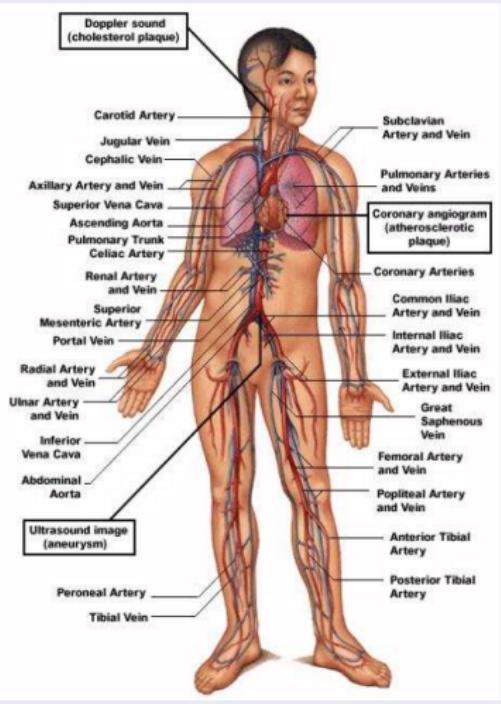
Bio-fluidodinamica

Fluidi umani

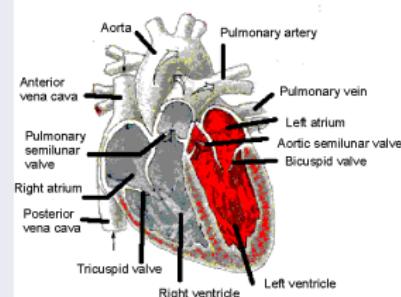


Bio-fluidodinamica

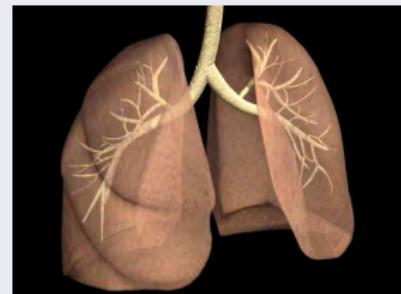
Fluidi umani



Emodinamica



Polmoni/aerosol



La fluidodinamica **è bella!**



Outline

1 Cos'è e a cosa serve?

- Alcune definizioni, esempi preliminari
- Domande & risposte
- Dove entra la fluidodinamica

2 Il modello

- **Le equazioni di Navier-Stokes**
- Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

3 Diversi approcci

- Experimental Fluid Dynamics
- Analytical Fluid Dynamics
- Computational Fluid Dynamics

4 Esempi

- Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Claude-Louis Navier e Sir George Gabriel Stokes

Claude-Louis Navier

(10 Febbraio 1785 – 21 Agosto 1836)



Claude-Louis Navier e Sir George Gabriel Stokes

Claude-Louis Navier

(10 Febbraio 1785 – 21 Agosto 1836)



Sir George Gabriel Stokes

(13 Agosto 1819 – 1 Febbraio 1903)



Le equazioni di Navier-Stokes

Conservazione della massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

Conservazione della quantità di moto:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) + \nabla p = \nabla \cdot \mathbb{S}(\mathbf{V}) + \rho \mathbf{f}$$

Conservazione dell'energia:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{V}) + p \nabla \cdot \mathbf{V} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \mathbb{S}(\mathbf{V}) : \mathbb{E}(\mathbf{V})$$

Equazioni di stato:

$$p = p(e, \rho), \quad T = T(e, \rho)$$

Le equazioni di Navier-Stokes

Conservazione della massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

Conservazione della quantità di moto:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) + \nabla p = \nabla \cdot \mathbb{S}(\mathbf{V}) + \rho \mathbf{f}$$

Conservazione dell'energia:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{V}) + p \nabla \cdot \mathbf{V} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \mathbb{S}(\mathbf{V}) : \mathbb{E}(\mathbf{V})$$

Equazioni di stato:

$$p = p(e, \rho), \quad T = T(e, \rho)$$

Le equazioni di Navier-Stokes

Conservazione della massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

Conservazione della quantità di moto:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) + \nabla p = \nabla \cdot \mathbb{S}(\mathbf{V}) + \rho \mathbf{f}$$

Conservazione dell'energia:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{V}) + p \nabla \cdot \mathbf{V} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \mathbb{S}(\mathbf{V}) : \mathbb{E}(\mathbf{V})$$

Equazioni di stato:

$$p = p(e, \rho), \quad T = T(e, \rho)$$

Le equazioni di Navier-Stokes

Conservazione della massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

Conservazione della quantità di moto:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) + \nabla p = \nabla \cdot \mathbb{S}(\mathbf{V}) + \rho \mathbf{f}$$

Conservazione dell'energia:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{V}) + p \nabla \cdot \mathbf{V} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \mathbb{S}(\mathbf{V}) : \mathbb{E}(\mathbf{V})$$

Equazioni di stato:

$$p = p(e, \rho), \quad T = T(e, \rho)$$

Outline

1 Cos'è e a cosa serve?

- Alcune definizioni, esempi preliminari
- Domande & risposte
- Dove entra la fluidodinamica

2 Il modello

- Le equazioni di Navier-Stokes
- Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

3 Diversi approcci

- Experimental Fluid Dynamics
- Analytical Fluid Dynamics
- Computational Fluid Dynamics

4 Esempi

- Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

- Nel Maggio 2000 il Clay Mathematics Institute (Cambridge, MA, USA) istituisce il *Millennium Prize*: un **milione di dollari** per ognuno dei sette problemi considerati **important classic questions that have resisted solution over the years**.

Tra questi, ci sono le equazioni di Navier-Stokes:

[...] Although these equations were written down in the 19th Century, our understanding of them remains minimal. The challenge is to make substantial progress toward a mathematical theory which will unlock the secrets hidden in the Navier-Stokes equations.

- Il premio per le equazioni di Navier-Stokes va a chi riesce a dimostrare:

- Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
- Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$
- Breakdown of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
- Breakdown of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$

Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

- Nel Maggio 2000 il Clay Mathematics Institute (Cambridge, MA, USA) istituisce il *Millennium Prize*: un **milione di dollari** per ognuno dei sette problemi considerati **important classic questions that have resisted solution over the years**.

Tra questi, ci sono le equazioni di Navier-Stokes:

[...] Although these equations were written down in the 19th Century, our understanding of them remains minimal. The challenge is to make substantial progress toward a mathematical theory which will unlock the secrets hidden in the Navier-Stokes equations.

- Il premio per le equazioni di Navier-Stokes va a chi riesce a dimostrare:

- Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
- Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$
- Breakdown of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
- Breakdown of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$

Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

- Nel Maggio 2000 il Clay Mathematics Institute (Cambridge, MA, USA) istituisce il *Millennium Prize*: un **milione di dollari** per ognuno dei sette problemi considerati **important classic questions that have resisted solution over the years**.

Tra questi, ci sono le equazioni di Navier-Stokes:

[...] Although these equations were written down in the 19th Century, our understanding of them remains minimal. The challenge is to make substantial progress toward a mathematical theory which will unlock the secrets hidden in the Navier-Stokes equations.

- Il premio per le equazioni di Navier-Stokes** va a chi riesce a dimostrare:

- Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
- Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$
- Breakdown of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
- Breakdown of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$

Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

- Nel Maggio 2000 il Clay Mathematics Institute (Cambridge, MA, USA) istituisce il *Millennium Prize*: un **milione di dollari** per ognuno dei sette problemi considerati **important classic questions that have resisted solution over the years**.

Tra questi, ci sono le equazioni di Navier-Stokes:

[...] Although these equations were written down in the 19th Century, our understanding of them remains minimal. The challenge is to make substantial progress toward a mathematical theory which will unlock the secrets hidden in the Navier-Stokes equations.

- Il premio per le equazioni di Navier-Stokes** va a chi riesce a dimostrare:

- Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
- Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$
- Breakdown of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
- Breakdown of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$

Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

- Nel Maggio 2000 il Clay Mathematics Institute (Cambridge, MA, USA) istituisce il *Millennium Prize*: un **milione di dollari** per ognuno dei sette problemi considerati **important classic questions that have resisted solution over the years**.

Tra questi, ci sono le equazioni di Navier-Stokes:

[...] Although these equations were written down in the 19th Century, our understanding of them remains minimal. The challenge is to make substantial progress toward a mathematical theory which will unlock the secrets hidden in the Navier-Stokes equations.

- Il premio per le equazioni di Navier-Stokes** va a chi riesce a dimostrare:

- Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
- Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$
- Breakdown of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
- Breakdown of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$

Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

- Nel Maggio 2000 il Clay Mathematics Institute (Cambridge, MA, USA) istituisce il *Millennium Prize*: un **milione di dollari** per ognuno dei sette problemi considerati **important classic questions that have resisted solution over the years**.

Tra questi, ci sono le equazioni di Navier-Stokes:

[...] Although these equations were written down in the 19th Century, our understanding of them remains minimal. The challenge is to make substantial progress toward a mathematical theory which will unlock the secrets hidden in the Navier-Stokes equations.

- Il premio per le equazioni di Navier-Stokes va a chi riesce a dimostrare:
 - Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
 - Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$
 - Breakdown of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
 - Breakdown of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$

Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

- Nel Maggio 2000 il Clay Mathematics Institute (Cambridge, MA, USA) istituisce il *Millennium Prize*: un **milione di dollari** per ognuno dei sette problemi considerati **important classic questions that have resisted solution over the years**.

Tra questi, ci sono le equazioni di Navier-Stokes:

[...] Although these equations were written down in the 19th Century, our understanding of them remains minimal. The challenge is to make substantial progress toward a mathematical theory which will unlock the secrets hidden in the Navier-Stokes equations.

- Il premio per le equazioni di Navier-Stokes va a chi riesce a dimostrare:
 - Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
 - Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$
 - Breakdown of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
 - Breakdown of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$

Approcci alternativi

...le equazioni di NS sono molto complesse, ma noi vogliamo comunque risolvere dei problemi pratici (aerodinamica, combustione, etc.). Quali alternative?

- **Experimental Fluid Dynamics (EFD)**: risolviamo direttamente le equazioni "in natura". **Problema**: costi, pericolosità, isolare solo ciò che interessa.
- **Analytical Fluid Dynamics (AFD)**: semplifichiamo le equazioni fino a quando siamo in grado di risolverle in modo agevole (o quasi).
Problema: che termini "scarto"? Spesso passaggi elaborati.
- **Computational Fluid Dynamics (CFD)**: risolviamo numericamente con più o meno "forza bruta" le equazioni di Navier-Stokes. **Problema**: per problemi veri costo computazionale elevatissimo, praticamente impossibile.

Approcci alternativi

...le equazioni di NS sono molto complesse, ma noi vogliamo comunque risolvere dei problemi pratici (aerodinamica, combustione, etc.). Quali alternative?

- **Experimental Fluid Dynamics** (EFD): risolviamo direttamente le equazioni "in natura". **Problema:** costi, pericolosità, isolare solo ciò che interessa.
- **Analytical Fluid Dynamics** (AFD): semplifichiamo le equazioni fino a quando siamo in grado di risolverle in modo agevole (o quasi).
Problema: che termini "scarto"? Spesso passaggi elaborati.
- **Computational Fluid Dynamics** (CFD): risolviamo numericamente con più o meno "forza bruta" le equazioni di Navier-Stokes. **Problema:** per problemi veri costo computazionale elevatissimo, praticamente impossibile.

Approcci alternativi

...le equazioni di NS sono molto complesse, ma noi vogliamo comunque risolvere dei problemi pratici (aerodinamica, combustione, etc.). Quali alternative?

- **Experimental Fluid Dynamics** (EFD): risolviamo direttamente le equazioni "in natura". **Problema:** costi, pericolosità, isolare solo ciò che interessa.
- **Analytical Fluid Dynamics** (AFD): semplifichiamo le equazioni fino a quando siamo in grado di risolverle in modo agevole (o quasi).
Problema: che termini "scarto"? Spesso passaggi elaborati.
- **Computational Fluid Dynamics** (CFD): risolviamo numericamente con più o meno "forza bruta" le equazioni di Navier-Stokes. **Problema:** per problemi veri costo computazionale elevatissimo, praticamente impossibile.

Approcci alternativi

...le equazioni di NS sono molto complesse, ma noi vogliamo comunque risolvere dei problemi pratici (aerodinamica, combustione, etc.). Quali alternative?

- **Experimental Fluid Dynamics** (EFD): risolviamo direttamente le equazioni "in natura". **Problema:** costi, pericolosità, isolare solo ciò che interessa.
- **Analytical Fluid Dynamics** (AFD): semplifichiamo le equazioni fino a quando siamo in grado di risolverle in modo agevole (o quasi).
Problema: che termini "scarto"? Spesso passaggi elaborati.
- **Computational Fluid Dynamics** (CFD): risolviamo numericamente con più o meno "forza bruta" le equazioni di Navier-Stokes. **Problema:** per problemi veri costo computazionale elevatissimo, praticamente impossibile.

Outline

1 Cos'è e a cosa serve?

- Alcune definizioni, esempi preliminari
- Domande & risposte
- Dove entra la fluidodinamica

2 Il modello

- Le equazioni di Navier-Stokes
- Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

3 Diversi approcci

- **Experimental Fluid Dynamics**
- Analytical Fluid Dynamics
- Computational Fluid Dynamics

4 Esempi

- Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

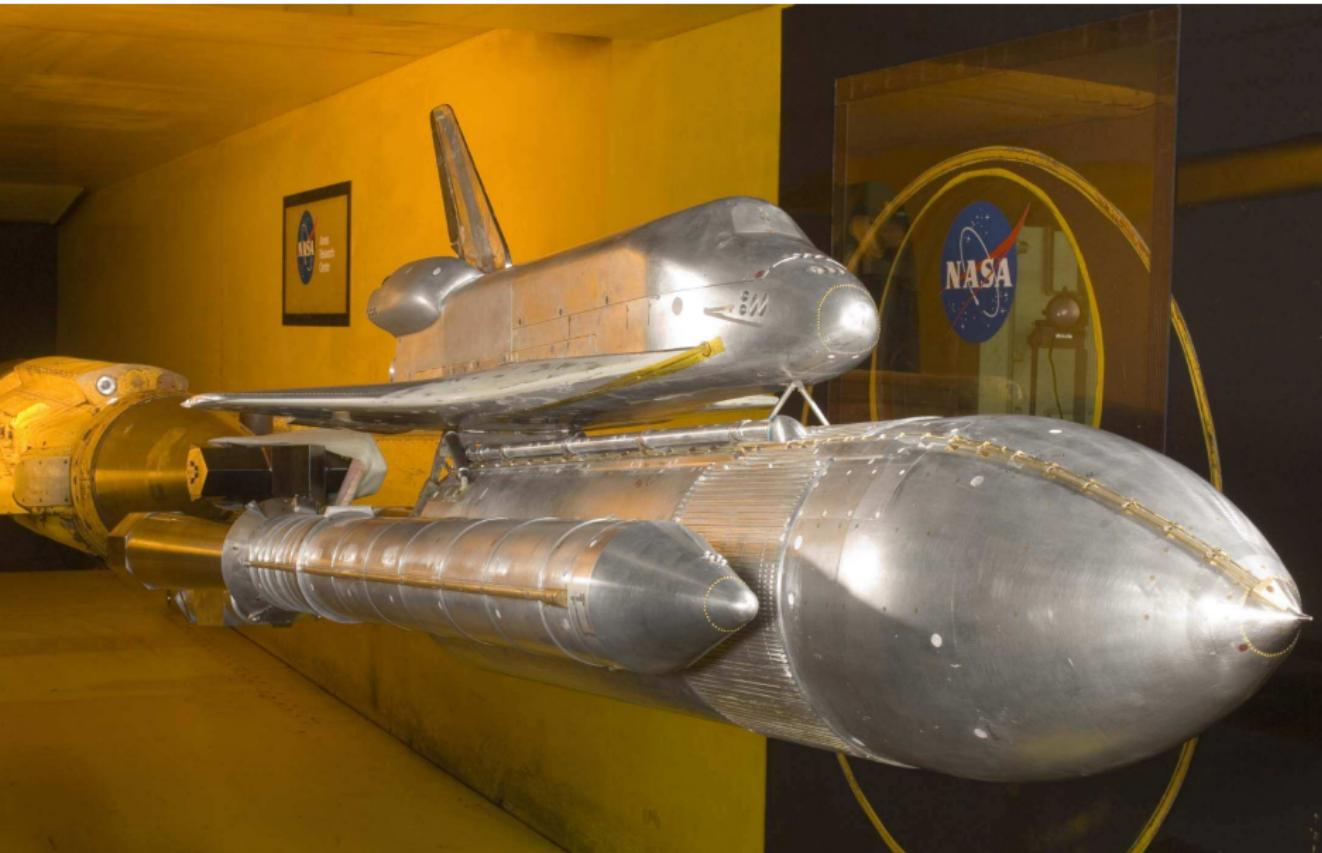
Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooo

Il modello
ooooo

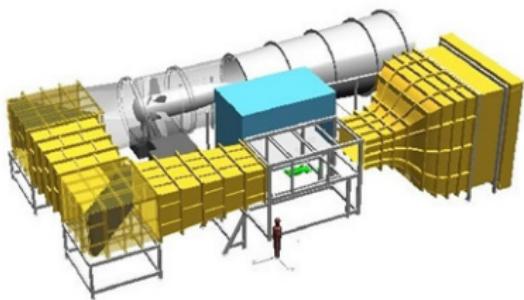
Diversi approcci
○●○○○○○○○

Esempi
○○○○○○○

Esperimenti e facilities (1/2)

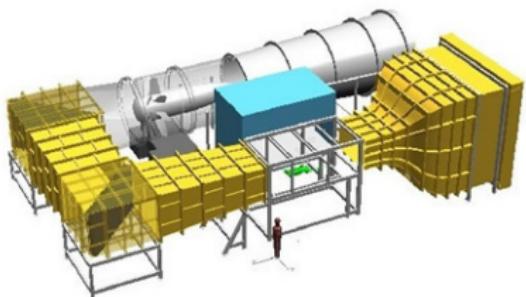


Esperimenti e facilities (2/2)



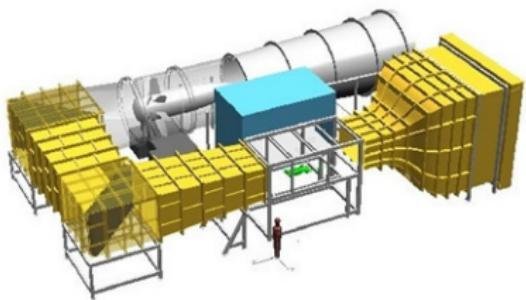
- Obiettivo: costruire un apparato (=facility + modello) per **riprodurre la fisica del problema reale**.
- **Gallerie del vento** a bassa velocità, alta velocità, transoniche, supersoniche, ipersoniche, criogeniche, orizzontali o verticali, di piccole o grandi dimensioni.
- **Gallerie "ad acqua"** (= bassa velocità).
- **Vasche** per problemi di idrodinamica.

Esperimenti e facilities (2/2)



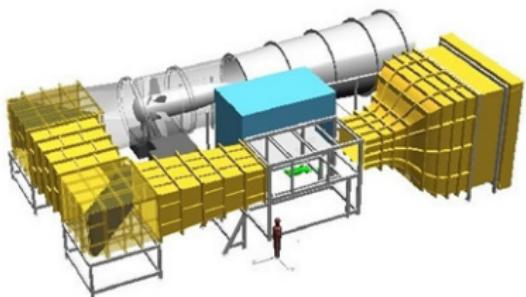
- Obiettivo: costruire un apparato (=facility + modello) per **riprodurre la fisica del problema reale**.
- **Gallerie del vento** a bassa velocità, alta velocità, transoniche, supersoniche, ipersoniche, criogeniche, orizzontali o verticali, di piccole o grandi dimensioni.
- **Gallerie "ad acqua"** (= bassa velocità).
- **Vasche** per problemi di idrodinamica.

Esperimenti e facilities (2/2)



- Obiettivo: costruire un apparato (=facility + modello) per **riprodurre la fisica del problema reale**.
- **Gallerie del vento** a bassa velocità, alta velocità, transoniche, supersoniche, ipersoniche, criogeniche, orizzontali o verticali, di piccole o grandi dimensioni.
- **Gallerie “ad acqua”** (= bassa velocità).
- **Vasche** per problemi di idrodinamica.

Esperimenti e facilities (2/2)



- Obiettivo: costruire un apparato (=facility + modello) per **riprodurre la fisica del problema reale**.
- **Gallerie del vento** a bassa velocità, alta velocità, transoniche, supersoniche, ipersoniche, criogeniche, orizzontali o verticali, di piccole o grandi dimensioni.
- **Gallerie “ad acqua”** (= bassa velocità).
- **Vasche** per problemi di idrodinamica.

Outline

1 Cos'è e a cosa serve?

- Alcune definizioni, esempi preliminari
- Domande & risposte
- Dove entra la fluidodinamica

2 Il modello

- Le equazioni di Navier-Stokes
- Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

3 Diversi approcci

- Experimental Fluid Dynamics
- **Analytical Fluid Dynamics**
- Computational Fluid Dynamics

4 Esempi

- Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Fluidodinamica analitica



Soluzioni note in forma chiusa

- Per **geometrie semplici** e **flussi laminari** le equazioni di NS si semplificano di molto (parecchi termini nulli, altri trascurabili) e permettono **soluzione in forma chiusa**.
- **Esempio:** flusso tra **due lastre infinite e parallele**, a distanza h , di cui una è ferma e l'altra trascinata con velocità V .
Le equazioni di NS si riducono a $\frac{d^2u}{dy^2} = 0$ con condizioni al contorno $u = 0$ per $y = 0$ e $u = V$ per $y = h$. Integrando 2 volte si ottiene $u(y) = V\frac{y}{h}$.
- Per **integrare le equazioni semplificate** spesso sono necessari passaggi laboriosi, cambi di variabili, etc. (= **la soluzione non è immediata**).

Soluzioni note in forma chiusa

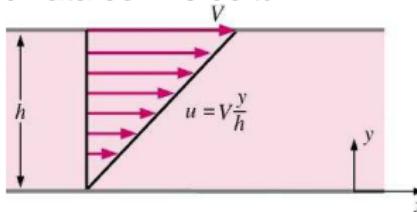
- Per **geometrie semplici** e **flussi laminari** le equazioni di NS si semplificano di molto (parecchi termini nulli, altri trascurabili) e permettono **soluzione in forma chiusa**.
- **Esempio:** flusso tra **due lastre infinite e parallele**, a distanza h , di cui una è ferma e l'altra trascinata con velocità V .

Le equazioni di NS si riducono a $\frac{d^2u}{dy^2} = 0$ con condizioni al contorno $u = 0$ per $y = 0$ e $u = V$ per $y = h$. Integrando 2 volte si ottiene $u(y) = V\frac{y}{h}$.

- Per **integrare le equazioni semplificate** spesso sono necessari passaggi laboriosi, cambi di variabili, etc. (= **la soluzione non è immediata**).

Soluzioni note in forma chiusa

- Per **geometrie semplici e flussi laminari** le equazioni di NS si semplificano di molto (parecchi termini nulli, altri trascurabili) e permettono **soluzione in forma chiusa**.
- Esempio:** flusso tra **due lastre infinite e parallele**, a distanza h , di cui una è ferma e l'altra trascinata con velocità V .

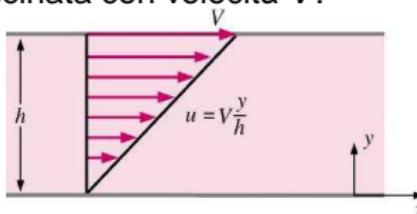


Le equazioni di NS si riducono a $\frac{d^2 u}{dy^2} = 0$ con condizioni al contorno $u = 0$ per $y = 0$ e $u = V$ per $y = h$. Integrando 2 volte si ottiene $u(y) = V \frac{y}{h}$.

- Per **integrare le equazioni semplificate** spesso sono necessari passaggi laboriosi, cambi di variabili, etc. (= **la soluzione non è immediata**).

Soluzioni note in forma chiusa

- Per **geometrie semplici e flussi laminari** le equazioni di NS si semplificano di molto (parecchi termini nulli, altri trascurabili) e permettono **soluzione in forma chiusa**.
- Esempio:** flusso tra **due lastre infinite e parallele**, a distanza h , di cui una è ferma e l'altra trascinata con velocità V .

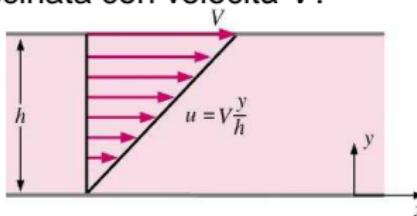


Le equazioni di NS si riducono a $\frac{d^2 u}{dy^2} = 0$ con condizioni al contorno $u = 0$ per $y = 0$ e $u = V$ per $y = h$. Integrando 2 volte si ottiene $u(y) = V \frac{y}{h}$.

- Per **integrale le equazioni semplificate** spesso sono necessari passaggi laboriosi, cambi di variabili, etc. (= la soluzione non è immediata).

Soluzioni note in forma chiusa

- Per **geometrie semplici e flussi laminari** le equazioni di NS si semplificano di molto (parecchi termini nulli, altri trascurabili) e permettono **soluzione in forma chiusa**.
- Esempio:** flusso tra **due lastre infinite e parallele**, a distanza h , di cui una è ferma e l'altra trascinata con velocità V .



Le equazioni di NS si riducono a $\frac{d^2 u}{dy^2} = 0$ con condizioni al contorno $u = 0$ per $y = 0$ e $u = V$ per $y = h$. Integrando 2 volte si ottiene $u(y) = V \frac{y}{h}$.

- Per **integrare le equazioni semplificate** spesso sono necessari passaggi laboriosi, cambi di variabili, etc. (= **la soluzione non è immediata**).

Outline

1 Cos'è e a cosa serve?

- Alcune definizioni, esempi preliminari
- Domande & risposte
- Dove entra la fluidodinamica

2 Il modello

- Le equazioni di Navier-Stokes
- Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

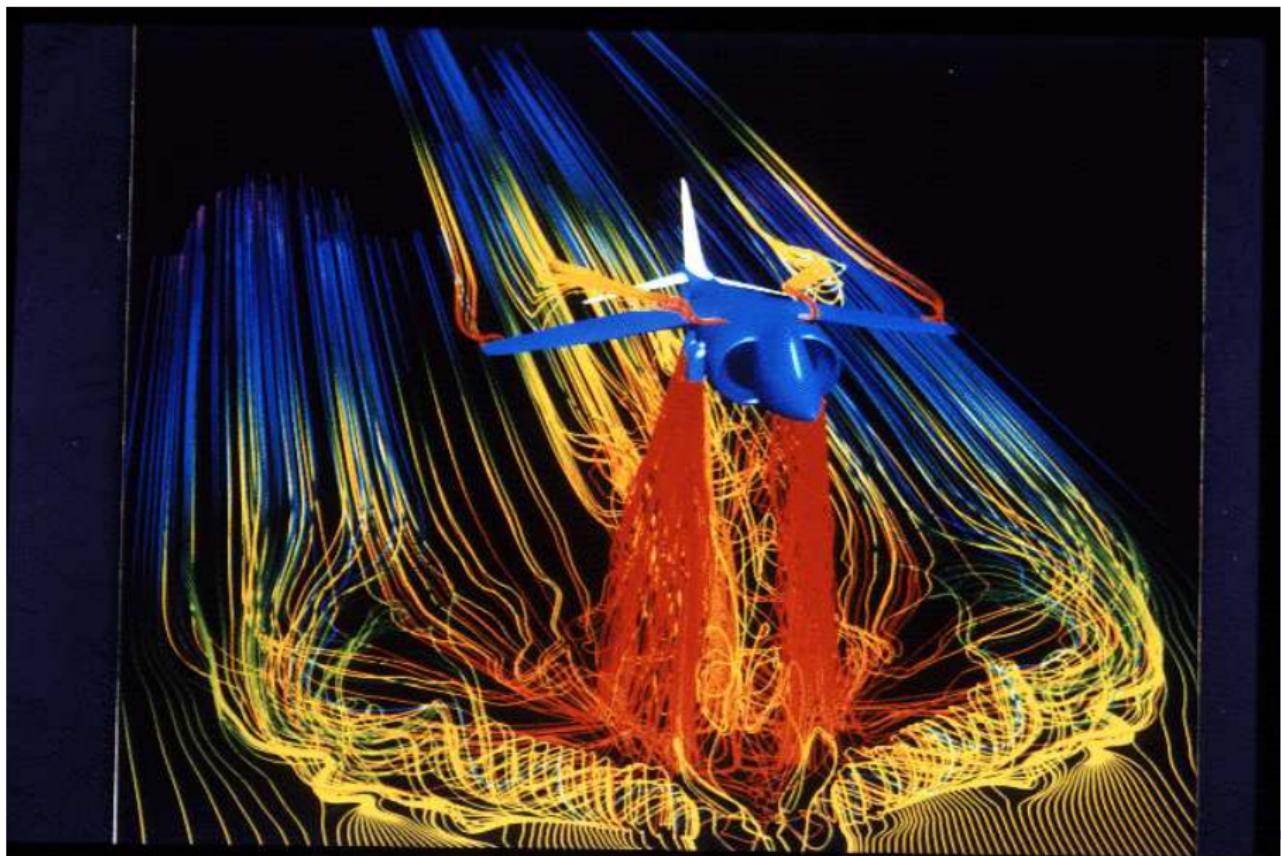
3 Diversi approcci

- Experimental Fluid Dynamics
- Analytical Fluid Dynamics
- Computational Fluid Dynamics

4 Esempi

- Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Fluidodinamica numerica (1/2)



Fluidodinamica numerica (2/2)

- Branca della fluidodinamica che utilizza **metodi numerici, potenza di calcolo e algoritmi efficienti** per risolvere ed analizzare **problemi pratici** di interesse ingegneristico.
- Limite: anche con equazioni semplificate e supercomputer ad alta velocità, **solo soluzioni approssimate**. Per geometrie complesse, soluzione dettagliata ancora impossibile (per esempio del flusso completo attorno ad un velivolo). La **validazione** del codice avviene tramite gli **esperimenti**.
- Quando le lunghezze caratteristiche del fenomeno hanno uno spettro molto ampio (turbolenza) la **soluzione numerica** diventa **problematica** perché la **griglia** deve essere sufficientemente **raffinata** da catturare tutti i fenomeni connessi.

Fluidodinamica numerica (2/2)

- Branca della fluidodinamica che utilizza **metodi numerici, potenza di calcolo e algoritmi efficienti** per risolvere ed analizzare **problemi pratici** di interesse ingegneristico.
- Limite: anche con equazioni semplificate e supercomputer ad alta velocità, **solo soluzioni approssimate**. Per geometrie complesse, soluzione dettagliata ancora impossibile (per esempio del flusso completo attorno ad un velivolo). La **validazione** del codice avviene tramite gli **esperimenti**.
- Quando le lunghezze caratteristiche del fenomeno hanno uno spettro molto ampio (turbolenza) la **soluzione numerica** diventa **problematica** perché la **griglia** deve essere sufficientemente **raffinata** da catturare tutti i fenomeni connessi.

Fluidodinamica numerica (2/2)

- Branca della fluidodinamica che utilizza **metodi numerici, potenza di calcolo e algoritmi efficienti** per risolvere ed analizzare **problemi pratici** di interesse ingegneristico.
- Limite: anche con equazioni semplificate e supercomputer ad alta velocità, **solo soluzioni approssimate**. Per geometrie complesse, soluzione dettagliata ancora impossibile (per esempio del flusso completo attorno ad un velivolo). La **validazione** del codice avviene tramite gli **esperimenti**.
- Quando le lunghezze caratteristiche del fenomeno hanno uno spettro molto ampio (turbolenza) la **soluzione numerica** diventa **problematica** perchè la **griglia** deve essere sufficientemente **raffinata** da catturare tutti i fenomeni connessi.

Come se non bastasse...

...facciamoci del male:

- In molti casi (e.g. combustione) è necessario risolvere **simultaneamente alle equazioni di Navier-Stokes altre equazioni** (tipicamente di convezione/diffusione). Queste possono descrivere reazioni chimiche, la concentrazione delle specie, scambi di calore complessi, etc.
- Si vorrebbero simulare **flussi multifase** (compresenza di fase liquida/gassosa, solida/gassosa o liquida/solida), **fluidi non-Newtoniani** (sangue), etc.
- Insomma... la questione della soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes nei casi di interesse pratico (ingegneristico) è **piuttosto complessa** e non c'è limite al peggio...

Come se non bastasse...

...facciamoci del male:

- In molti casi (e.g. combustione) è necessario risolvere **simultaneamente alle equazioni di Navier-Stokes altre equazioni** (tipicamente di convezione/diffusione). Queste possono descrivere reazioni chimiche, la concentrazione delle specie, scambi di calore complessi, etc.
- Si vorrebbero simulare **flussi multifase** (compresenza di fase liquida/gassosa, solida/gassosa o liquida/solida), **fluidi non-Newtoniani** (sangue), etc.
- Insomma... la questione della soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes nei casi di interesse pratico (ingegneristico) è **piuttosto complessa** e non c'è limite al peggio...

Come se non bastasse...

...facciamoci del male:

- In molti casi (e.g. combustione) è necessario risolvere **simultaneamente alle equazioni di Navier-Stokes altre equazioni** (tipicamente di convezione/diffusione). Queste possono descrivere reazioni chimiche, la concentrazione delle specie, scambi di calore complessi, etc.
- Si vorrebbero simulare **flussi multifase** (compresenza di fase liquida/gassosa, solida/gassosa o liquida/solida), **fluidi non-Newtoniani** (sangue), etc.
- Insomma... la questione della soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes nei casi di interesse pratico (ingegneristico) è **piuttosto complessa** e non c'è limite al peggio...

Come se non bastasse...

...facciamoci del male:

- In molti casi (e.g. combustione) è necessario risolvere **simultaneamente alle equazioni di Navier-Stokes altre equazioni** (tipicamente di convezione/diffusione). Queste possono descrivere reazioni chimiche, la concentrazione delle specie, scambi di calore complessi, etc.
- Si vorrebbero simulare **flussi multifase** (compresenza di fase liquida/gassosa, solida/gassosa o liquida/solida), **fluidi non-Newtoniani** (sangue), etc.
- Insomma... la questione della soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes nei casi di interesse pratico (ingegneristico) è **piuttosto complessa** e non c'è limite al peggio...

Outline

1 Cos'è e a cosa serve?

- Alcune definizioni, esempi preliminari
- Domande & risposte
- Dove entra la fluidodinamica

2 Il modello

- Le equazioni di Navier-Stokes
- Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

3 Diversi approcci

- Experimental Fluid Dynamics
- Analytical Fluid Dynamics
- Computational Fluid Dynamics

4 Esempi

- Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooooooo

Il modello
oooooo

Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
o●oooooo

Per strada...



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooo

Il modello
ooooo

Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
oo●oooo

In cucina...



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooooooo

Il modello
ooooo

Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
ooo●ooo

Per le pulizie...



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooooooo

Il modello
ooooo

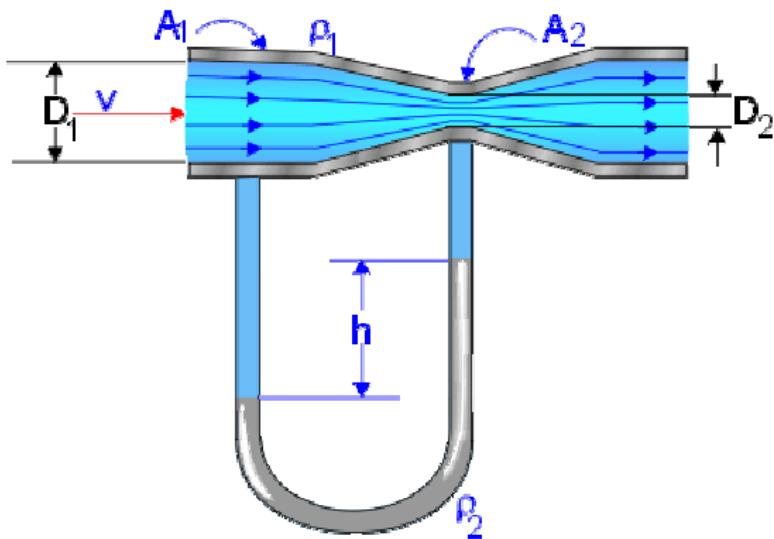
Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
oooo●ooo

In giardino...



Effetto Venturi



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooooooo

Il modello
ooooo

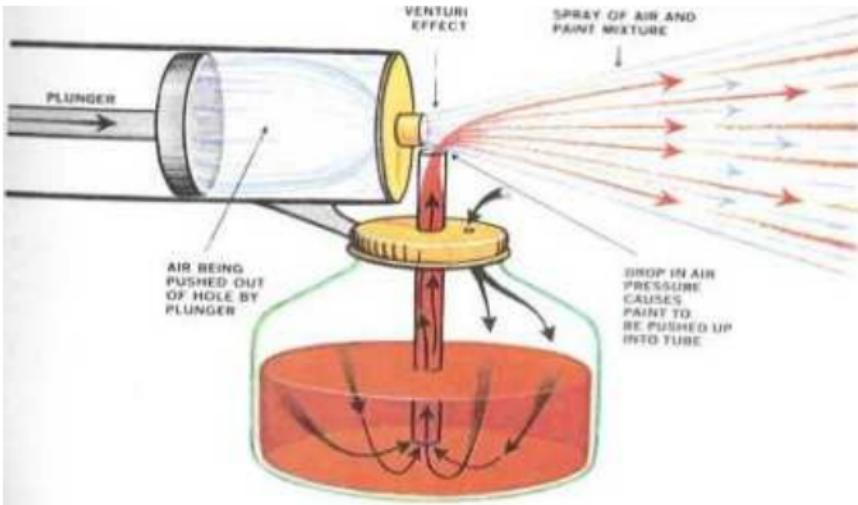
Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
oooooo•

Per verniciare...



Svelato il trucco...



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooooooo

Il modello
ooooo

Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
ooooooo

In cantina...



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooooooo

Il modello
oooooo

Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
ooooooo

In caduta libera...



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooooooo

Il modello
ooooo

Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
ooooooo

Sugli sci...



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooooooo

Il modello
oooooo

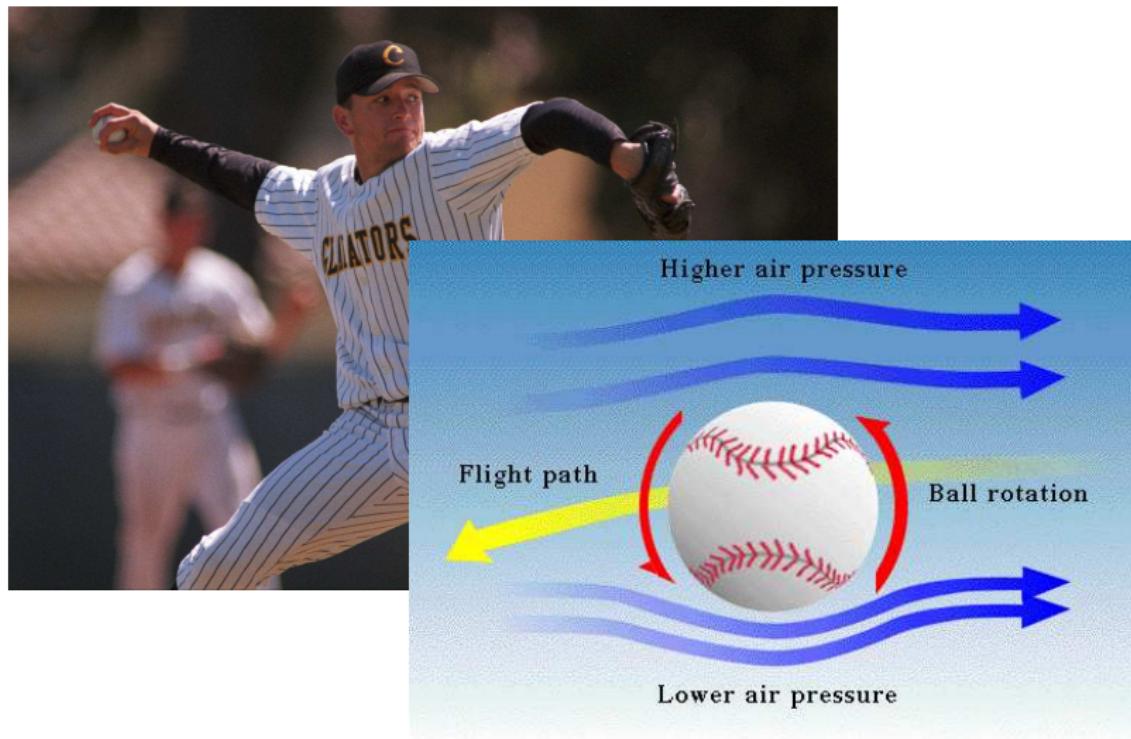
Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
ooooooo

Palle ad effetto...



...svelato il trucco



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooooooo

Il modello

Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
oooooo

In mare...



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooooooo

Il modello
ooooo

Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
ooooooo

In mare...



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooooooo

Il modello
oooooo

Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
ooooooo

In acqua...



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooooooo

Il modello
oooooo

Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
ooooooo

In bici...



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooooooo

Il modello ooooo

Diversi approcci

Esempi

In pista...



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooo

Il modello
ooooo

Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
ooooooo

In pista...



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooooooo

Il modello
ooooo

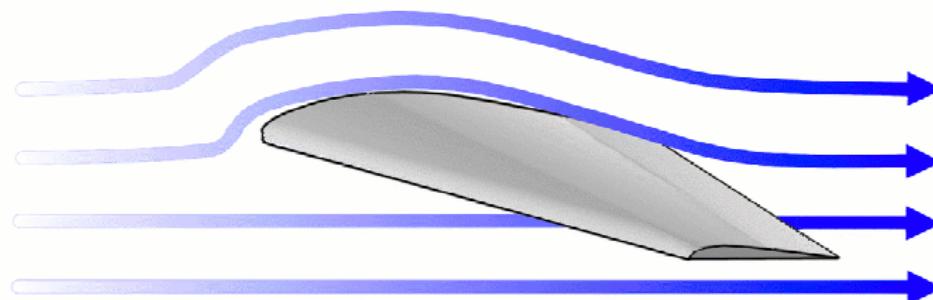
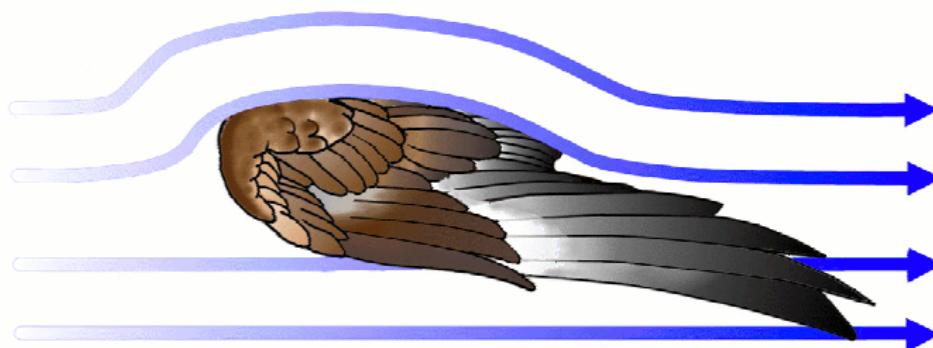
Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
ooooooo

In volo...



Si, ma come fa?



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooooooo

Il modello
ooooo

Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
ooooooo

In volo...



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooo

Il modello
ooooo

Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
ooooooo

In volo...



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooooooo

Il modello
oooooo

Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
ooooooo

In volo...



Conclusioni

La fluidodinamica è:

- **bella**
- interessante
- intrigante
- affascinante
- utile
- quasi onnipresente

Conclusioni

La fluidodinamica è:

- **bella**
- **interessante**
- **intrigante**
- **affascinante**
- **utile**
- **quasi onnipresente**

Conclusioni

La fluidodinamica è:

- **bella**
- **interessante**
- **intrigante**
- **affascinante**
- **utile**
- **quasi onnipresente**

Conclusioni

La fluidodinamica è:

- **bella**
- **interessante**
- **intrigante**
- **affascinante**
- **utile**
- **quasi onnipresente**

Conclusioni

La fluidodinamica è:

- **bella**
- **interessante**
- **intrigante**
- **affascinante**
- **utile**
- **quasi onnipresente**

Conclusioni

La fluidodinamica è:

- **bella**
- **interessante**
- **intrigante**
- **affascinante**
- **utile**
- **quasi onnipresente**

Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooooooo

Il modello
ooooo

Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
ooooooo

Domande?

