

Analysis of the Forces Acting on Particles in Homogeneous Isotropic Turbulence

Candidato: Stefano Olivieri

Relatori: prof. J.O. Pralits, prof. L. Brandt

Università degli Studi di Genova
Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden

13 Dicembre 2013

Introduzione

- ▶ **particelle** disperse in **turbolenza**
- ▶ Applicazioni:
 - ▶ dispersione aerosol
 - ▶ formazione gocce di pioggia
 - ▶ traccianti in tecniche di misura fluidodinamiche
 - ▶ combustione
 - ▶ microrganismi in ambienti acquatici (es.: plancton)



Introduzione II

- ▶ Fenomeno bifase
 - ▶ fluido: **fase continua**
 - ▶ particelle: **fase dispersa**

- ▶ Turbolenza Omogenea Isotropa:
 - ▶ scelta perché rappresentativa per la ricerca di base e perché si studiano fenomeni alle piccole scale → universalità
 - ▶ caratteristiche principali: dominio tridimensionale con condizioni al contorno periodiche, proprietà statistiche indipendenti da posizione, direzione e tempo

- ▶ Ipotesi sulle particelle:
 - ▶ **sferiche**
 - ▶ **piccole** rispetto alla struttura del flusso
 - ▶ in regime **diluito**

- ▶ *One-way coupling*: flusso → particelle (ma non viceversa)

Dinamica Particelle

- ▶ Forze agenti sulla particella:

$$m_p \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \mathbf{F}_{SD} + \mathbf{F}_{PG} + \mathbf{F}_{Gr} + \mathbf{F}_{AM} + \mathbf{F}_{Ba} \quad (1)$$

dove:

- ▶ \mathbf{F}_{SD} *Stokes Drag*
 - ▶ \mathbf{F}_{PG} *Pressure Gradient*
 - ▶ \mathbf{F}_{Gr} *Gravity*
 - ▶ \mathbf{F}_{AM} *Added Mass*
 - ▶ \mathbf{F}_{Ba} *Basset History force*
-
- ▶ Frequentemente alcune forze sono trascurate
 - ▶ semplicità analitica
 - ▶ minori costi computazionali→ approssimazione

Scopo del lavoro:

- ▶ sviluppare un codice in grado di **tenere in conto tutte le forze agenti sulle particelle**
- ▶ effettuare una campagna di simulazioni per **ottenere una classificazione sistematica del contributo delle differenti forze** al variare dei parametri caratteristici (*Indagine Parametrica*)
- ▶ investigare il problema della *sedimentazione* di particelle tipo plancton in flusso turbolento omogeneo isotropo

Dinamica Particelle II

- ▶ La dinamica della particella è regolata dall'equazione di Maxey-Riley:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{V}}{dt} = & \overbrace{\frac{1}{\tau_p}(\mathbf{u} - \mathbf{V})}^{\mathbf{a}_{SD}} + \overbrace{\frac{\rho_f}{\rho_p} \frac{D\mathbf{u}}{Dt}}^{\mathbf{a}_{PG}} + \overbrace{\left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right)\mathbf{g}}^{\mathbf{a}_{Gr}} + \\ & \underbrace{\frac{1}{2} \frac{\rho_f}{\rho_p} \left(\frac{D\mathbf{u}}{Dt} - \frac{d\mathbf{V}}{dt} \right)}_{\mathbf{a}_{AM}} + \underbrace{\sqrt{\frac{9}{2\pi} \frac{\rho_f}{\rho_p} \frac{1}{\tau_p}} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} \frac{d}{d\tau}(\mathbf{u} - \mathbf{V}) d\tau}_{\mathbf{a}_{Ba}} \quad (2) \end{aligned}$$

dove $\tau_p = \frac{2}{9} \frac{r_p^2}{\nu} \frac{\rho_p}{\rho_f}$: *tempo di rilassamento* della particella

- ▶ Valida se $d_p \ll \eta$ e $Re_p = \frac{(V-U)d_p}{\nu} \ll 1$

Maxey, M. R. and Riley, J. J., "Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow" (1983).

Dinamica Particelle: Forza di Basset

- ▶ In particolare, difficoltà legate al termine integrale di Basset:

$$\mathbf{a}_{\text{Ba}} = C_{\text{Ba}} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} \frac{d}{d\tau} (\mathbf{u} - \mathbf{V}) d\tau$$

(dove $C_{\text{Ba}} = \sqrt{\frac{9}{2\pi} \frac{\rho_f}{\rho_p} \frac{1}{\tau_p}}$)

- ▶ Dipende da tutta la storia del moto \rightarrow onere computazionale
 - ▶ La funzione *kernel* $K_{\text{Ba}}(\tau) = \frac{1}{\sqrt{t-\tau}}$ presenta una singolarità per $\tau = t \rightarrow$ problema per metodi numerici
-
- ▶ Implementazione e testing di un metodo numerico recentemente sviluppato per la valutazione di tale termine:

Hinsberg et al, "An efficient, second order method for the approximation of the Basset history force" (2011).

Metodo: Quadro Generale

Flusso

- ▶ Approccio Euleriano
- ▶ Equazioni di Navier-Stokes
- ▶ DNS, Metodo Pseudospettrale

Particelle

- ▶ Approccio Lagrangiano
- ▶ Equazione di Maxey-Riley
- ▶ *Lagrangian Particle Tracking*

Risultati: Sommario

1. *Indagine Parametrica* del contributo delle differenti forze
 2. *Sedimentazione* di particelle tipo plancton
- ▶ Procedura generale:
 - ▶ raggiungimento turbolenza pienamente sviluppata senza la presenza delle particelle
 - ▶ rilascio di N_p particelle con distribuzione casuale uniforme ed opportuna inizializzazione sulle velocità
 - ▶ evoluzione delle particelle per un tempo T
 - ▶ postprocessamento → grandezze statistiche

Indagine Parametrica

- ▶ Scopo: descrivere in maniera sistematica il contributo delle differenti forze
 - ▶ Parametri caratteristici:
 - ▶ **rapporto di densità** $R = \frac{\rho_p}{\rho_f}$
 - ▶ **numero di Stokes** $St_K = \frac{\tau_p}{\tau_K}$ (definito con la scala di Kolmogorov)
- Gravità trascurata per diminuire il numero di variabili indipendenti
- ▶ 10 casi (100000 particelle per ogni caso) :

| $R \backslash St_K$ | 0.01 | 0.1 | 1 | 10 |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|
| 0.1 | 1 | | | |
| 1 | 2 | 5 | | |
| 10 | 3 | 6 | 8 | |
| 1000 | 4 | 7 | 9 | 10 |

Contributi Forze

- ▶ Per un'indicazione del contributo delle differenti forze, dividiamo l'equazione di Maxey-Riley per l'accelerazione totale della particella:

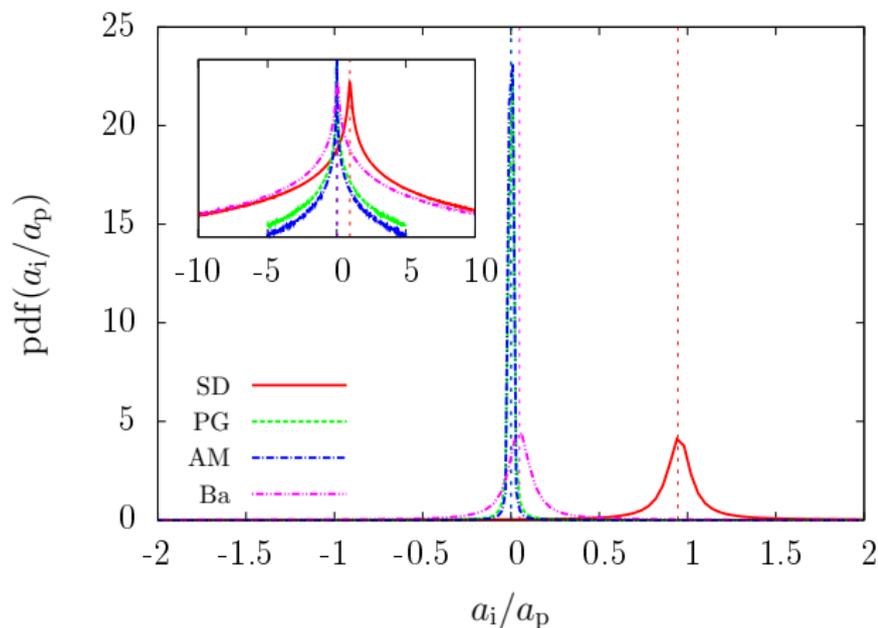
$$1 = \frac{a_{SD}}{a_p} + \frac{a_{PG}}{a_p} + \frac{a_{Gr}}{a_p} + \frac{a_{AM}}{a_p} + \frac{a_{Ba}}{a_p}$$

e calcoliamo la *p.d.f.* di ciascuno di tali rapporti

Contributi Forze II

Esempio caso particelle *pesanti* ($R = 1000$, $St_K=1$):

- ▶ Stokes Drag forza predominante, valor medio vicino a 1



Contributi Forze III

Dalle p.d.f. analizzate:

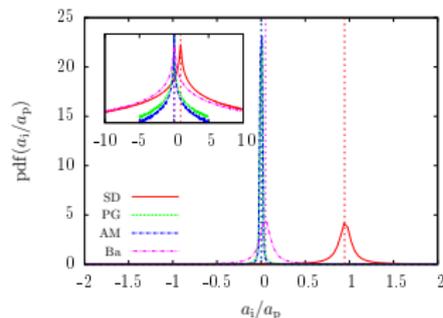
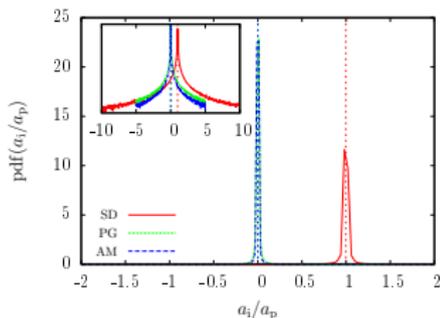
1. **Alti rapporti di densità ($R = 1000$):**
Termine predominante: Stokes Drag
2. **Particelle *neutrally-buoyant* ($R = 1$):**
Termine predominante: Pressure Gradient
3. **Rapporti di densità intermedi ($R = 10$):**
Nessun termine predominante, cross-over
4. **Forza di Basset** sempre non trascurabile ed altamente intermittente

Ruolo della forza di Basset

- ▶ Cosa cambia se si trascura Basset?

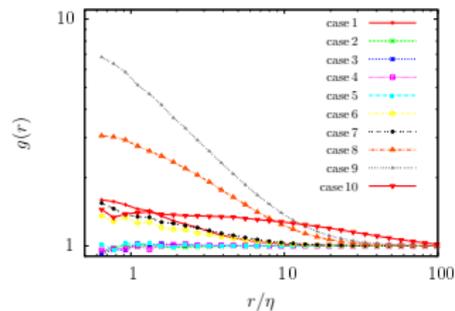
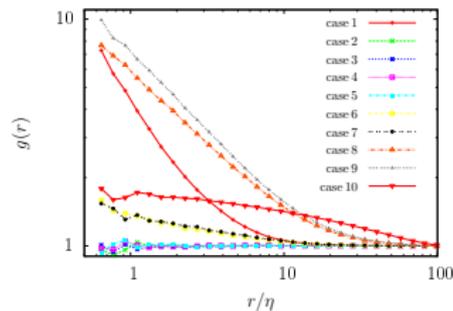
Confronto per il caso precedente:

- ▶ Contributo Basset $\simeq 10\%$ (\rightarrow valore medio SD varia da 1 a 0.9)
- ▶ Influenza sulla dispersione statistica di SD

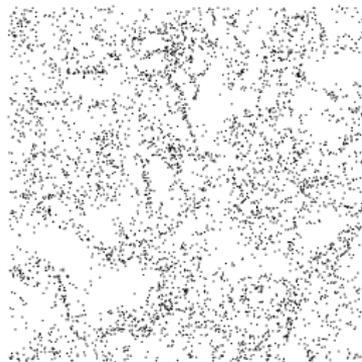
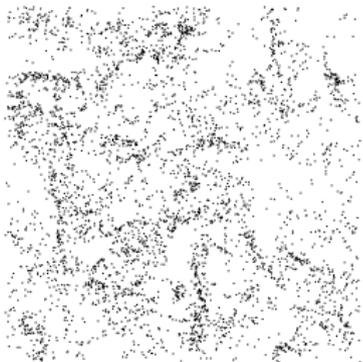


$R = 1000, St_K = 1$ (caso 9)

Accumulo



- ▶ Radial Distribution Function $g(r)$ per quantificare l'accumulo
- ▶ Massimo effetto per $St_K = 1$
- ▶ La presenza di Basset **attenua** sempre l'effetto



Sedimentazione di Particelle tipo Plancton

- ▶ La turbolenza (omogenea isotropa) ha un effetto sulla sedimentazione media delle particelle?
- ▶ Confronto **velocità di sedimentazione media** con **velocità terminale** per particelle rappresentative del **plancton** in ambiente oceanico
Effetto noto per particelle pesanti: sedimentano più velocemente (Wang and Maxey)
- ▶ Valori rappresentativi:

| Case | $\frac{\rho_p}{\rho_f}$ | ϵ_T [m^2/s^3] | d_p [μm] |
|------|-------------------------|----------------------------|-------------------|
| A | 1.05 | 10^{-4} | ~ 100 |
| B | 1.01 | $3 \cdot 10^{-6}$ | 100 |

con $\nu = 10^{-6} m^2/s$, $g = 9.81 m/s^2$. Equivalenti a:

| Case | $\frac{\rho_p}{\rho_f}$ | St_K | $\frac{V_T}{u_K}$ |
|------|-------------------------|---------|-------------------|
| A | 1.05 | 0.01561 | 0.0133 |
| B | 1.01 | 0.00096 | 0.0419 |

$V_T = \tau_p(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p})g$: *velocità terminale* in fluido in quiete

600000 particelle (divise in 3 popolazioni con gravità in differenti direzioni per accelerare convergenza)

- ▶ Calcolo di $\frac{\overline{\langle V_S \rangle} - V_T}{|V_T|}$: **variazione trascurabile** (ordine dell'errore statistico)

Conclusioni

- ▶ Indagine Parametrica → variazione del contributo delle forze al variare dei parametri caratteristici (R e St_K)
- ▶ Importanza della forza di Basset
 - ▶ per un'analisi dinamica più dettagliata
 - ▶ per cogliere un clustering più realistico
 - ▶ *S.Olivieri, F. Picano, G. Sardina, L. Brandt, "The effect of the Basset history force on particle clustering in Homogeneous and Isotropic Turbulence", submitted to Applied Physics Letters (2013)*
- ▶ Sviluppi futuri
 - ▶ ricerca specifica sul termine di Basset
 - ▶ caratterizzazione particelle per applicazioni ecologiche