

# Universe Sciences and Super Computing

R. Capuzzo Dolcetta  
Sapienza, Univ. di Roma  
*CINECA, 25/3/2018*

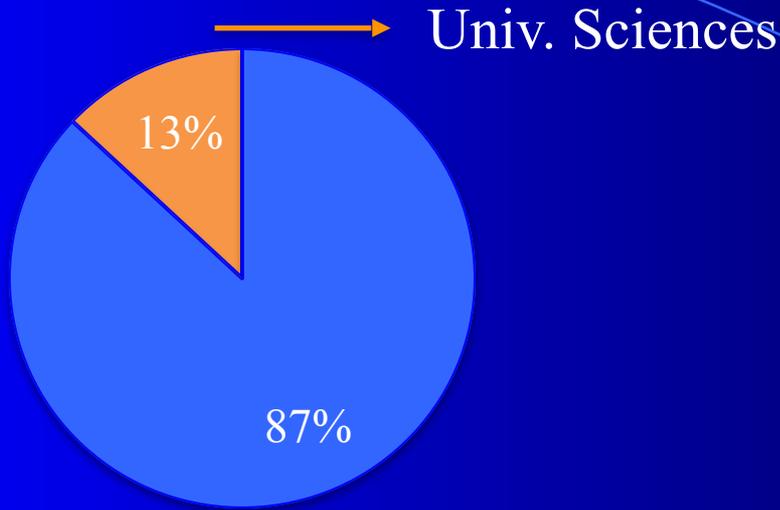


SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

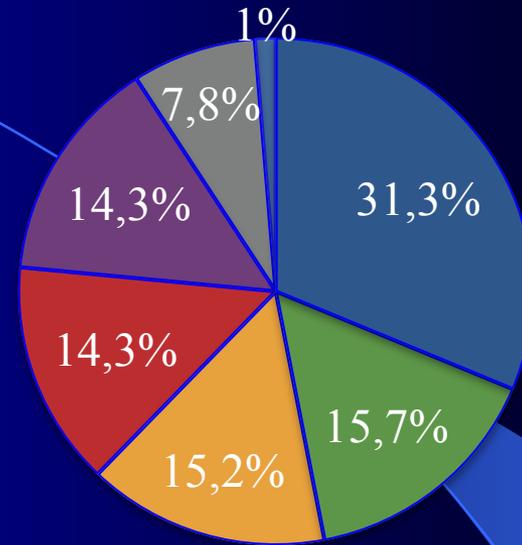
Universe Sciences =

astro-physics/chemistry/biology;  
solar system; stellar, galactic and extragalactic  
astronomy, planetary systems, cosmology,  
space science, instrumentation

*Verso l'insediamento ...*



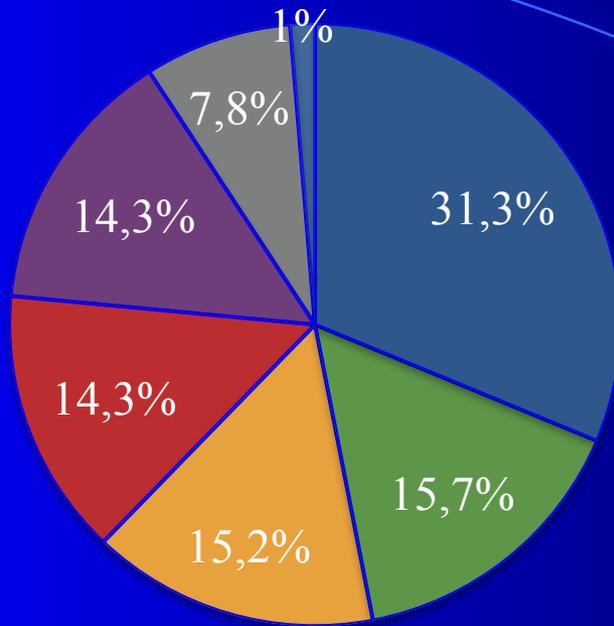
15 Tier 0 calls  
Period 2010 - 2017



Distribution by research areas  
(last 5 Tier 0 calls)

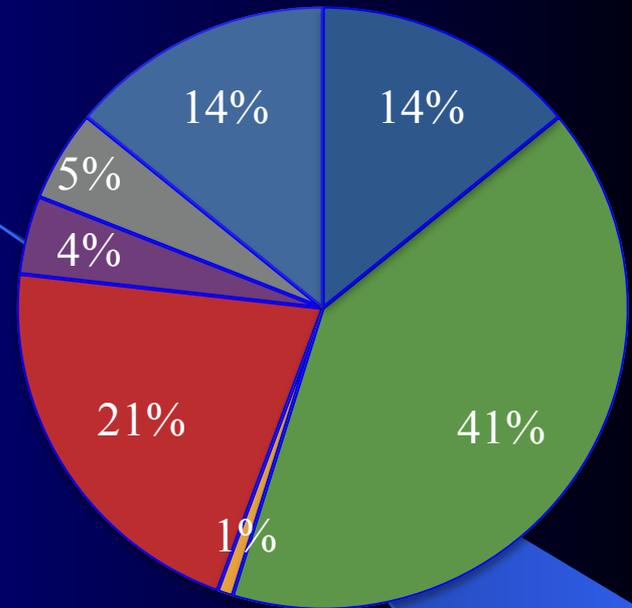
1. Chemical Sciences and Materials
2. Engineering
3. Universe Sciences
4. Biochemistry and Life Sciences
4. Fundamental Constituents of Matter
5. Earth System Sciences
6. Mathematics and Computer Sciences

*Verso l'insediamento ...*



**Distribution by research areas  
(last 5 Tier 0 calls)**

1. Chemical Sciences and Materials
2. Engineering
3. Universe Sciences
4. Biochemistry and Life Sciences
4. Fundamental Constituents of Matter
5. Earth System Sciences
6. Mathematics and Computer Sciences



**Distribution of scientific/teaching  
staff in Italian universities**

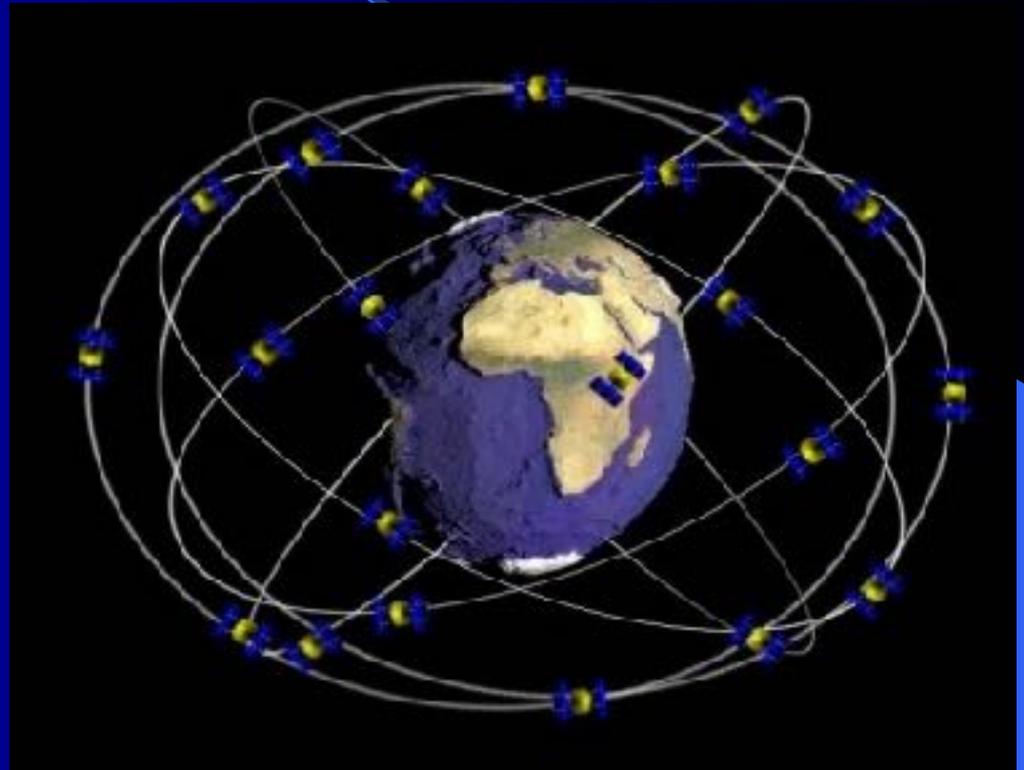
1. Engineering
2. Biochemistry and Life Sciences
3. Chemical Sciences and Materials
4. Mathematics and Computer Sciences
5. Earth System Sciences
6. Fundamental Constituents of Matter
7. Universe Sciences

Due to that in the prolific field of computational Astrophysics and Cosmology *gravity* plays an overwhelming role the best is

- availability of massively parallel, hybrid machine of the kind of Piz Daint:

many nodes each hosting some high level GPUs

# La gravità *terrestre*



Newtoniana e relativistica

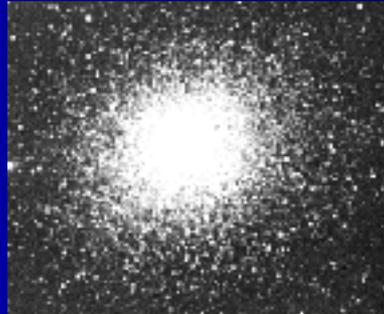
$N \leq 10$

Meccanica celeste



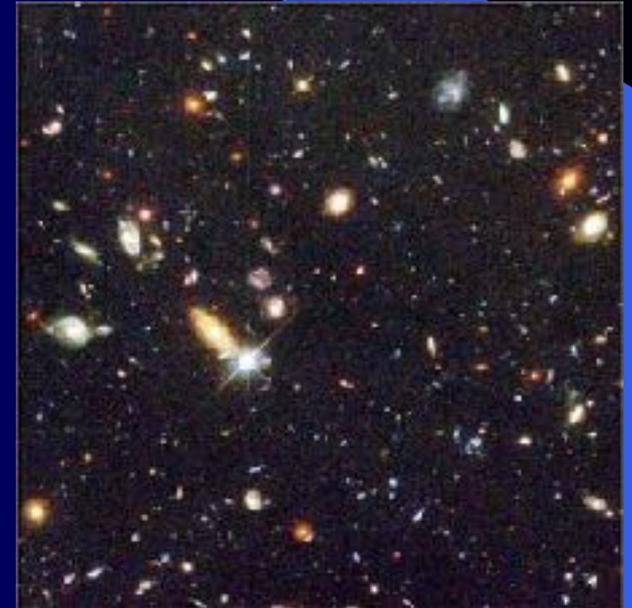
$N \leq 10^{12}$

Dinamica stellare



$N \rightarrow \infty$

Grande scala,  
cosmologia



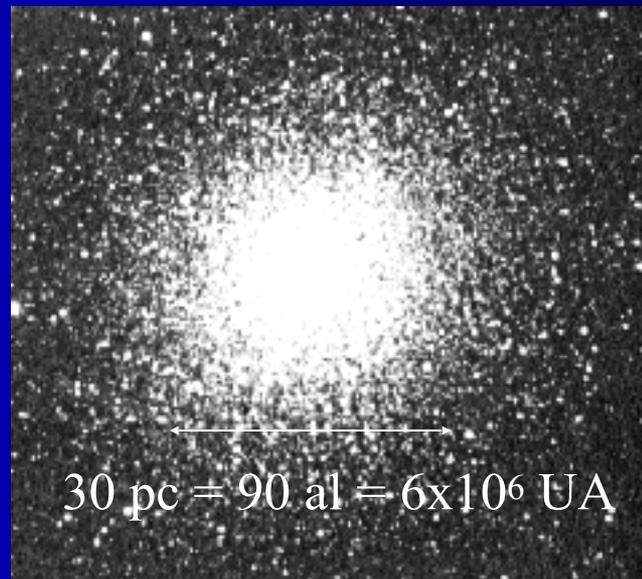
Peculiarità dell' astrofisica è il ruolo dell' auto-gravità (self-gravity)

$$\alpha \equiv \text{auto grav/ ext grav}$$



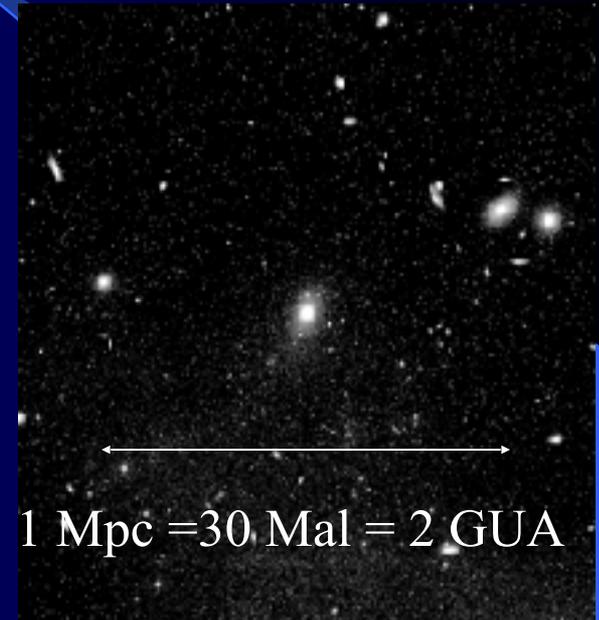
lago di Garda

$$\alpha \sim 10^{-8}$$



AG: M 13

$$\alpha \sim 10^{-2}$$



Ammasso di galassie

$$\alpha \sim 10^{-2}$$

I sistemi auto-gravitanti sono difficili da studiare per la *doppia divergenza* di  $U_{ij} \propto 1/r_{ij}$



1) divergenza *UV* ( $\lim_{r_{ij} \rightarrow 0} U_{ij} = \infty$ )

$$\Rightarrow \Delta t \rightarrow 0$$

2) divergenza *IR* ( $U_{ij}$  non si annulla mai)

$$\Rightarrow O(N^2)$$

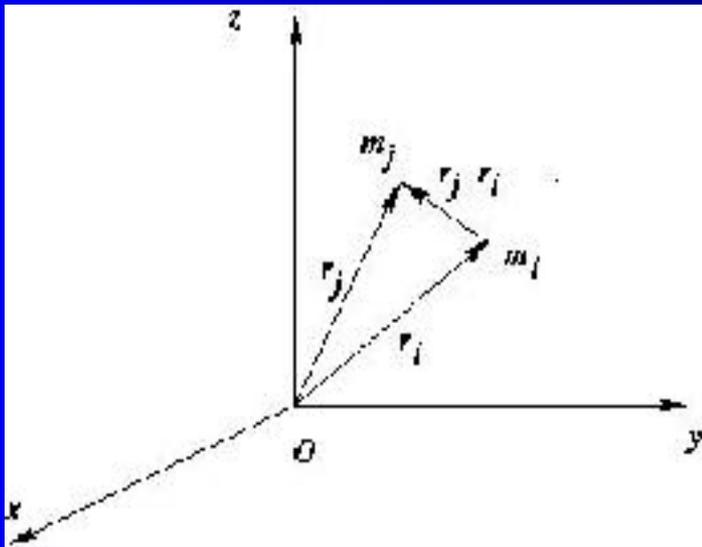


Problema a scale spazio-temporali multiple



Impossibile usare metodi perturbativi

# Il problema gravitazionale classico degli $N$ corpi (sistema *secco*)



$$\ddot{\mathbf{r}}_i = -G \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{m_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^3} (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)$$

$$\mathbf{r}_i(0) = \mathbf{r}_{i0}$$

$$\dot{\mathbf{r}}_i(0) = \dot{\mathbf{r}}_{i0}$$

Indipendentemente da  $N$ , ci sono 10 integrali primi

Soluzioni analitiche solo per  $N=2$ .

## Il sistema:

- è di complessità  $O(N^2)$ ;
- è lontano dalla linearità;
- ha pochi vincoli nello spazio delle fasi.

## Il premio Oscar (re di Svezia):

Dato un sistema di punti di massa che si attraggono secondo la legge di Newton, nell'ipotesi di non avere collisioni, trovare per le coordinate un'espressione in serie di una funzione nota del tempo, convergente uniformemente.

- Il premio fu vinto da H. Poincaré, con un articolo che portò alla **teoria del caos**. Piccole differenze nelle c.i. portano a grandi differenze nell'evoluzione secolare degli  $N$  corpi.
- La soluzione per  $N=3$  del problema del bando venne nel 1912 da K. Sundman che dimostrò l'esistenza di sviluppo in serie di potenze di  $t^{1/3}$ .
- Il risultato di Sundman generalizzato a ogni  $N$  nel 1991 da Q. Wang.

I sistemi astrofisici reali non sono semplici  $N$  corpi...  
Una fase *condensata* (\*s) è immersa in una *diluita* (g)

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v},$$

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p - \rho \nabla (U_g + U_*),$$

$$\rho \frac{du}{dt} = -p \nabla \cdot \mathbf{v} - \Lambda + \Gamma,$$

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = -\nabla (U_g + U_*) (i = 1, \dots, N),$$

$$\nabla^2 U_g = -4\pi G \rho,$$

$$f(p, \rho, T) = 0.$$

eq. di continuità g

eq. del moto del gas g+\*

eq. dell'energia g

eq. del moto stelle g+\*

eq. di Poisson g

eq. di stato g

- forza di pressione force  $\nabla p$  (short-range)
- forza di gravità force  $\nabla U$  (long-range)

$$\nabla U_*(\mathbf{r}) = -G \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|^3} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_j)$$

Sistemi astrofisici 3D auto-gravitanti  
sono ben rappresentabili lagrangianamente  
(sistemi di *particelle*:  $*=N$  corpi,  $g$ =SPH)  
...tuttavia...

- fluttuazioni su piccola scala di  $p(\mathbf{r})$  introducono grandi fluttuazioni of  $\nabla p$   
↓  
*Basso costo computaz.;*  
*bassa precisione*
- la forza di volume richiede  $\propto (N_{\text{SPH}} + N_*)^2$  valutazioni  
↓  
*Alto costo computaz.;*  
*alta precisione*

# Profiling in una simulazione tipica

<i>task</i>	<i>tempo di Cpu</i>
valutazione delle forze gravitazionali, $O(N^2)$	<b>60%</b>
val. delle quantità fluido-dinamiche, $O(n^2)$	<b>25%</b>
integraz. temporale, $O(N)$	<b>15%</b>

la distanza euclidea...

$$|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$$

è uno dei problemi...

Si usano vari algoritmi: Erone, Bombelli, Newton,  
dispendiosi computazionalmente...

Problema 1: *valutazione della forza*  $F_{ij} = \nabla U_{ij}$

*35 flop*

con un PE da  $v=1$  Gflop/sec,  
 $t_{ij} = 3.5 \times 10^{-8} \text{ sec}$

$n_f = n.$  di op. *per* passo  
temporale

$$n_f = \binom{N}{2} 35 \text{ flop} = \frac{N(N-1)}{2} 35 \text{ flop}$$

$$t = n_f / v$$

$$\nearrow N=1000 \rightarrow n_f = 1.5 \times 10^7 \text{ flop}$$

$$t = 1.8/100 \text{ sec}$$

$$\rightarrow N=10^5 \rightarrow n_f = 1.5 \times 10^{11} \text{ flop}$$

$$t = 180 \text{ sec} = 3 \text{ min}$$

$$\searrow N=10^{11} \rightarrow n_f = 1.5 \times 10^{23} \text{ flop}$$

$$t = 1.8 \times 10^{14} \text{ sec} = 5.7 \text{ Myr!}$$

## Problema 2 : *lunghezza delle simulazioni*

*Coarse-grain: rilassamento violento*  $t_{cross}$

*Fine-grain: rilassamento “collisionale”*

$t_{rel}$

→  $10 t_{cross}$  ammasso aperto

→  $1000 t_{cross}$  ammasso globulare

→  $4 \times 10^8 t_{cross}$  galassia

$$t_{rel} \cong \frac{1}{10 \log_e N} N t_{cross}$$

L'età di un a. globulare ( $\sim 12$  Gyr) is  $\approx 2 \times 10^5 t_{cross} \approx 200$

$t_{rel} \Rightarrow 720$  anni di simulazione!



+



=



2 quadcore Xeon  
da 2 Ghz

2 TESLA C1060

Potenza:  
~ 12 Gflops (CPU)  
~ 2 Tflops (GPU)

Costo:  
~ 7000 euro  
~ 1000 W