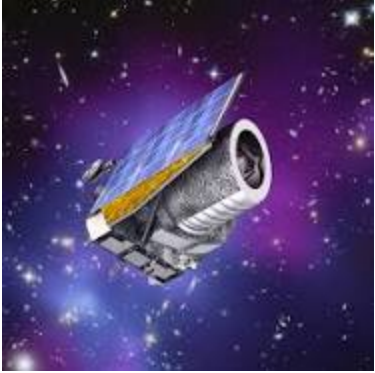
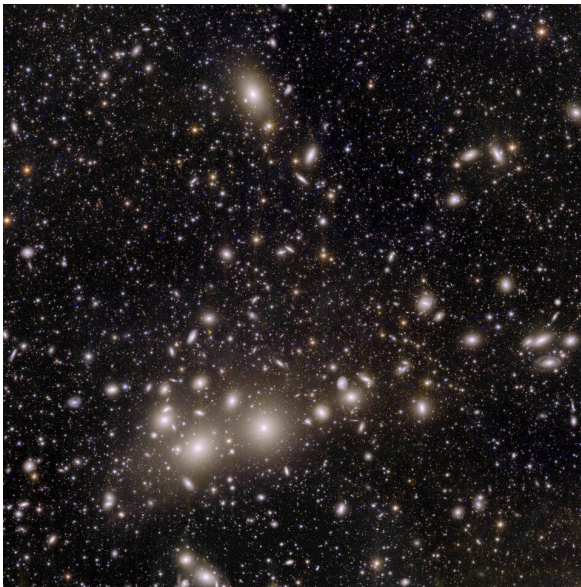


## Cosmologia con conteggi di Ammassi di Galassie per Euclid:



La missione Euclid è un progetto dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) con lo scopo di mappare la geometria dell'Universo oscuro. Lanciato il 1 Luglio 2023, il telescopio spaziale Euclid misurerà la distribuzione e la forma di miliardi di galassie, permettendo agli scienziati di studiare la materia oscura e l'energia oscura che influenzano l'espansione dell'Universo.

[https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Euclid](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Euclid)



### Gli Ammassi di Galassie

Gli ammassi di galassie sono le strutture più grandi dell'Universo legate gravitazionalmente, contenenti centinaia o addirittura migliaia di galassie. La loro esistenza e proprietà forniscono importanti indizi sulla formazione delle strutture nell'Universo e sulla natura della materia oscura e dell'energia oscura. La survey Euclid sarà in grado di identificare centinaia di migliaia di ammassi di galassie, osservandone l'evoluzione fin dalla nascita di queste strutture cosmiche.

[https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Euclid/Euclid\\_s\\_view\\_of\\_the\\_Pers\\_eus\\_cluster\\_of\\_galaxies](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Euclid/Euclid_s_view_of_the_Pers_eus_cluster_of_galaxies)

### Cluster Cosmology

La cluster cosmology, è un campo di studio che utilizza gli ammassi di galassie come strumenti per comprendere le proprietà fondamentali dell'Universo. Essendo gli ammassi di galassie le strutture più grandi dell'Universo legate gravitazionalmente, la loro formazione e distribuzione e' molto sensibile alla cosmologia dell'Universo, inclusi i parametri che descrivono la materia oscura, le proprietà dell'Universo primordiale, e l'energia oscura.

Trieste in particolare gioca un ruolo di primo piano all'interno della collaborazione Euclid (ma non solo) per quanto riguarda la cosmologia con ammassi di galassie.

### Esercizio: Analisi di un Catalogo di Ammassi di Galassie

L'esercizio proposto consiste nell'analizzare un catalogo di ammassi di galassie con caratteristiche simili a quelli che saranno osservati dalla missione Euclid. Il catalogo fornisce la massa (in masse solari) per ogni ammasso, per tre bin di redshift ed il volume di Universo associato a ciascun bin (in  $h^{-3} \text{ Mpc}^3$ ).

#### Parte 1: Visualizzazione e Analisi dei Dati

Scaricare il catalogo degli ammassi di galassie e analizzarne i dati, prestando particolare attenzione alla distribuzione delle masse degli ammassi. Si suggerisce di utilizzare scale logaritmiche per verificare la distribuzione dei dati.

#### Parte 2: Analisi della Halo Mass Function (HMF)

Gli studenti dovranno analizzare ogni bin di redshift individualmente e confrontare la distribuzione osservata delle masse degli ammassi (Halo Mass Function, HMF) con la distribuzione teorica predetta da diversi parametri cosmologici per verificarne la dipendenza.

Per questo scopo, si consiglia di utilizzare la libreria Python colossus:

<https://bdiemer.bitbucket.io/colossus/>

Si consideri come esempio il seguente codice:

```
from colossus.cosmology import cosmology

from colossus.lss import mass_function

params = {'flat': True, 'H0': 67.77, 'Om0': 0.31, 'Ob0': 0.049,
'sigma8': 0.81, 'ns': 0.96}

cosmology.addCosmology('myCosmo', params)

cosmo = cosmology.setCosmology('myCosmo')

mfunc = mass_function.massFunction(m_arr, z, mdef='vir',
model='despali16', q_out='dndlnM')
```

### Per approfondire:

- `mdef = 'vir'` definisce una particolare definizione di massa (viriale) per gli aloni di materia (la rappresentazione matematica dell'oggetto astrofisico ammasso di galassie).
- `model = 'despali16'` specifica un particolare modello di Halo Mass Function da utilizzare.
- I parametri cosmologici *params* descrivono le proprietà fondamentali dell'Universo considerato nel modello, come la geometria piatta (flat), la costante di Hubble ( $H_0$ ), la densità di materia totale ( $\Omega_{m0}$ ), la densità di barioni ( $\Omega_{b0}$ ), l'ampiezza delle fluttuazioni di densità su scale di  $8 h^{-1}$  Mpc ( $\sigma_8$ ), e l'indice spettrale delle fluttuazioni primordiali di densità ( $n_s$ ).

Questo frammento di codice permette di calcolare la densità di aloni osservati (`mfunc`) a un determinato redshift  $z$  per ogni valore di massa `m_arr` (in masse solari) per unità di volume osservato (in  $h^{-3} \text{ Mpc}^3$ ) e per bin logaritmico (naturale) di massa ( $dn/d\ln M$ ).

Gli studenti dovranno confrontare le predizioni teoriche con gli istogrammi dei conteggi osservati per valutare la corrispondenza tra i modelli cosmologici e i dati reali.

## Parte 3: Inferenza Bayesiana sui parametri cosmologici

### Modelli flat $\Lambda$ CDM

Dopo aver confrontato le predizioni teoriche della Halo Mass Function (HMF) con i dati osservati e aver verificato un accordo relativamente buono tra i modelli cosmologici di riferimento (quelli inseriti nel pezzo di codice di cui sopra) e i dati, è possibile procedere con una fase di inferenza bayesiana sui parametri cosmologici. Questo passaggio permette di affinare ulteriormente la nostra comprensione dei parametri che governano l'Universo.

Per l'inferenza bayesiana, si assuma che il numero di oggetti osservato in un determinato bin di massa sia una realizzazione poissoniana del numero teorico atteso predetto dalla HMF.

I maggiori parametri di interesse per questa analisi sono  $\sigma_8$  e  $\Omega_{m0}$ , per i quali si possono inizialmente assumere priori piatti (flat priors `[0.1, 1.1]`). I restanti parametri cosmologici possono essere fissati ai valori vincolati dalla survey Planck:  $H_0: 67.77$ ,  $\Omega_{b0}$ :

$0.049$ , e  $n_s: 0.95$ .

parametri  
fissati

parametri da  
stimare

Analizzare inizialmente i tre bin di redshift individualmente. L'analisi deve essere condotta individualmente per i tre bin di redshift. Ha senso combinarli per un'analisi congiunta?

### Suggerimento:

Per quanto "rapide" (confrontata ad un'analisi cosmologica standard), queste catene sono comunque mediamente costose dal punto di vista computazionale. Una catena di 1000 steps con una ventina di walkers sul mio portatile richiede circa 0.5-1 ora. Consigliamo caldamente quindi di verificare nel dettaglio la corretta implementazione della likelihood prima di lanciare catene corpose.

### Curvatura dell'Universo

Espandiamo l'analisi a modelli cosmologici in cui la geometria dell'universo non è necessariamente piatta. In questi modelli, oltre ai parametri  $\Omega_m0$  (densità di materia) e  $\sigma_8$  (ampiezza delle fluttuazioni della materia su scala di 8 Mpc/h), vogliamo considerare anche la densità di energia oscura  $\Omega_{de}0$ .

### Per approfondire:

- $\Omega_{de}0$  rappresenta la densità di energia oscura nel modello cosmologico e gioca un ruolo chiave nello spiegare l'espansione accelerata dell'Universo dedotta dalle osservazioni cosmologiche. Un universo piatto (flat) implica che la somma delle densità di materia ( $\Omega_m0$ ), radiazione (trascurabile al giorno d'oggi), ed energia oscura ( $\Omega_{de}0$ ) sia uguale a 1. Permettendo variazioni contemporanee dei parametri  $\Omega_m0$  ed  $\Omega_{de}0$  consente di vincolare la curvatura dell'Universo.

Per analizzare scenari non piatti, è possibile modificare il dizionario dei parametri cosmologici nel seguente modo:

```
params = {'flat': False, 'H0': 67.77, 'Ode0': 0.69, 'Om0': 0.31, 'Ob0': 0.048254, 'sigma8': 0.81, 'ns': 0.96}
```

Nell'analizzare questi modelli si ipotizzi di voler utilizzare i risultati di esperimenti precedenti, che hanno ottenuto vincoli su  $\Omega_m$  ben approssimati da una distribuzione gaussiana con media = 0.7 e deviazione standard = 0.05.

Che vincoli otteniamo sulla densità di energia associata alla curvatura dell'Universo:

$$\Omega_k = 1 - \Omega_m - \Omega_\Lambda$$

(Dove  $\Omega_m = \Omega_m$  ,  $\Omega_\Lambda = \Omega_\Lambda$  )