

# Cosmologia: història i actualitat.

Jordi Miralda Escudé, professor ICREA

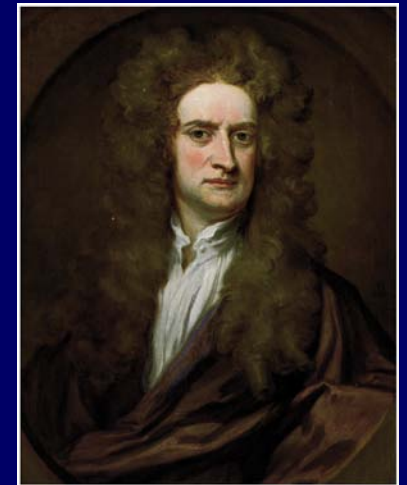
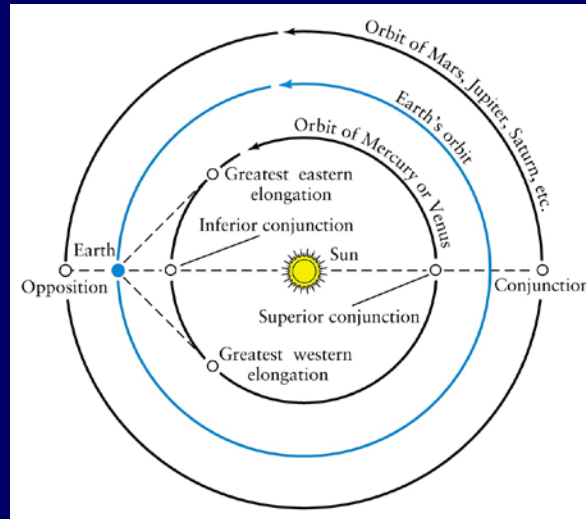
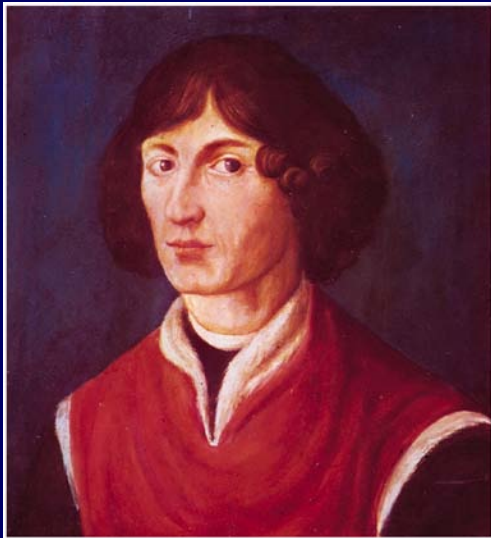
Institut de Ciències del Cosmos, Universitat de Barcelona

UCE, Prada de Conflent, 19-8-2022

# Què és la cosmologia?

La ciència que estudia tot el cosmos a gran escala.

Clau de la ciència: les observacions es contrasten amb les teories.



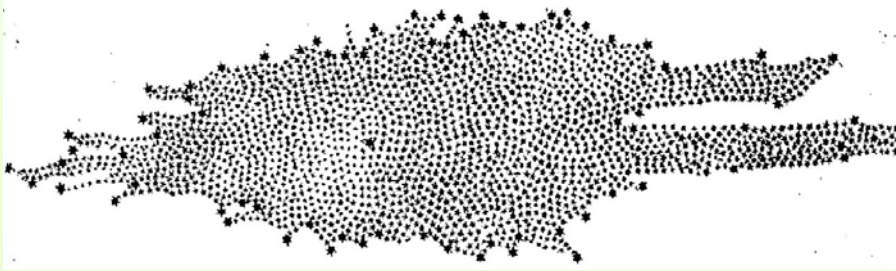
Al principi el cosmos era el Sol, la Lluna, els planetes i les estrelles. Hi havia un món celestial, immutable i perfecte, separat del terrenal, caòtic.

Model heliocèntric (Copèrnic): la Terra no és el centre de l'Univers, sinó un dels planetes que gira al voltant del Sol.

Newton: la gravetat que fa caure un objecte a la Terra és la mateixa que determina els moviments dels planetes.

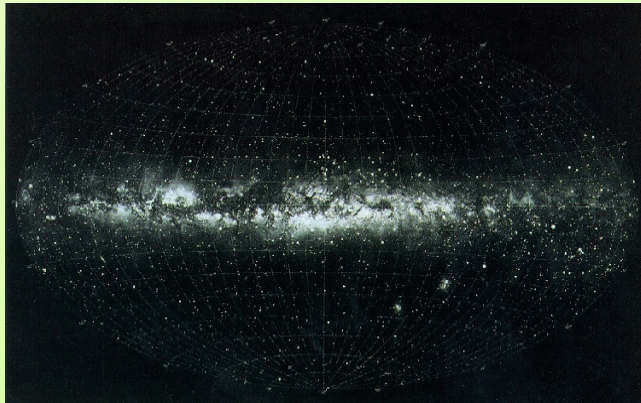
El sol és només un estel, entre milers de milions que formen la Via Làctia.

# Idees sobre el cosmos ara fa uns 100 anys: observacions



William Herschel 1785

- La Via Làctia té forma de disc, el Sol és aprop del centre.
- Alguns cúmuls globulars i sistemes estel·lars com els Núvols de Magallanes orbiten la Via Làctia.
- Però què són les nebuloses de llum difusa, com la galàxia d'Andròmeda? Altres galàxies? Fins on s'estén l'Univers?



El cel visual.



Galàxia d'Andròmeda.

# Idees sobre el cosmos ara fa uns 100 anys: Teoria



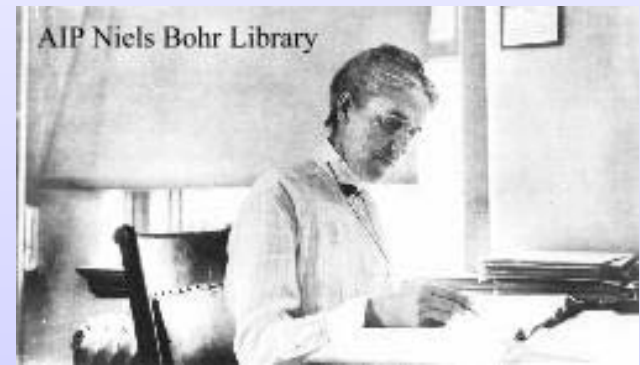
Einstein de visita al Tibidabo, amb Antoni Utrillo i Josep Puig i Cadafalch, febrer 1923.

- Einstein formula la teoria de la relativitat, que descriu la gravetat com la curvatura de l'espai-temps.
- La curvatura de l'espai-temps determina les òrbites de la matèria i la llum. La massa i energia dicten com s'ha de curvar l'espai-temps.
- Aquesta teoria prediu no només els moviments en sistemes finits com el Sistema Solar o la Via Làctia, sinó que es pot aplicar per entendre l'evolució de tot l'Univers.
- La Teoria de la Relativitat General, formulada el 1916, és a dia d'avui la teoria bàsica que utilitzem en cosmologia, i el fonament del model de l'expansió de l'Univers i el Gran Esclat.

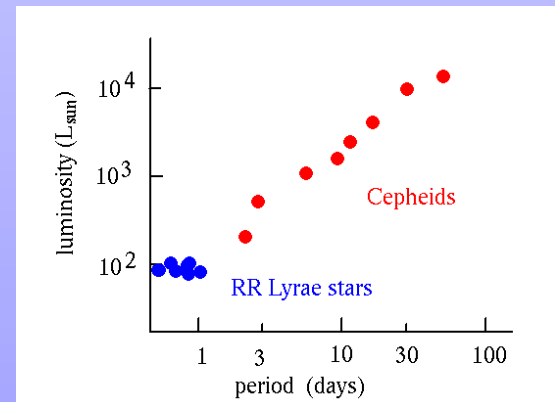
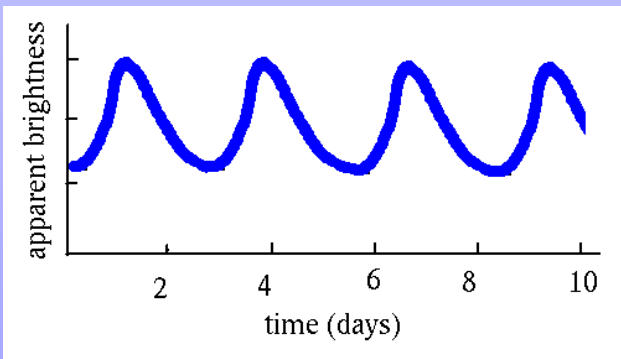


# Més observacions:

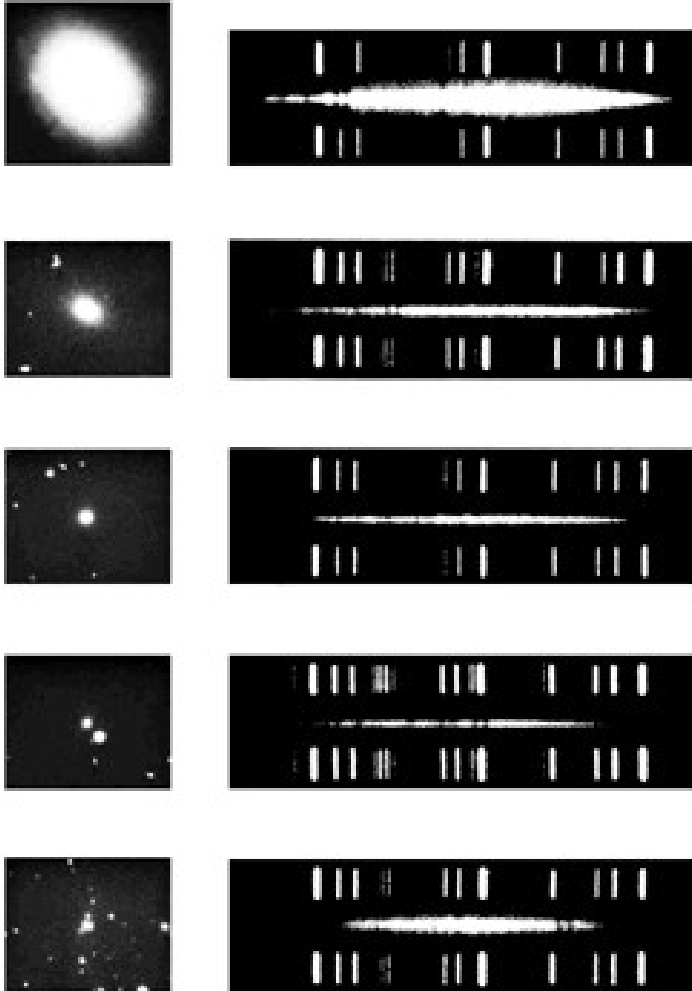
## Henrietta Leavitt i les variables Cefeides als Núvols de Magallanes.



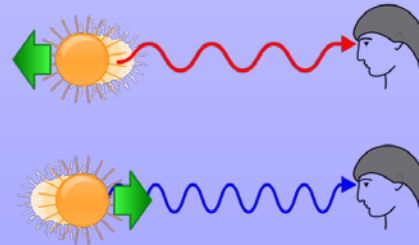
- Leavitt va mesurar la variació de les estrelles Cefeides als Núvols de Magallanes, establint una relació empírica entre el període de variabilitat i la lluminositat que permet mesurar distàncies.
- Amb aquest mètode, Edwin Hubble (1924) va mesurar la distància a la galàxia d'Andròmeda, demostrant que és una galàxia semblant a la Via Làctia, i que el mètode servia per determinar distàncies fins a galàxies molt més llunyanes.



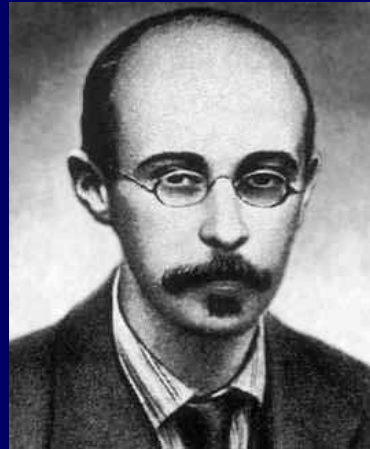
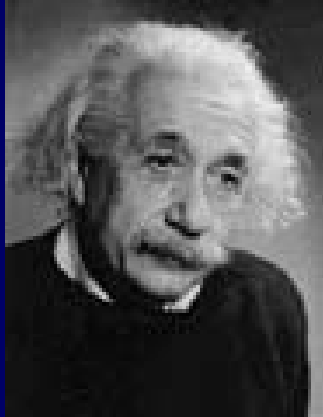
# Velocitats de galàxies: Mesures del decalatge cap al roig.



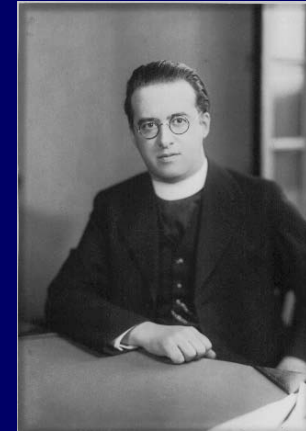
- Efecte Doppler: Quan un objecte s'allunya de nosaltres, la longitud d'ona s'allarga, es decala cap al roig. Quan un objecte s'acosta, la longitud d'ona s'escurça, es decala cap al blau.
- Vesto Slipher va demostrar, entre 1912 i 1921, que la majoria de galàxies s'allunyen de nosaltres a grans velocitats.



# La Teoria de la Relativitat i l'expansió de l'Univers



Alexander Friedman



Georges Lemaitre

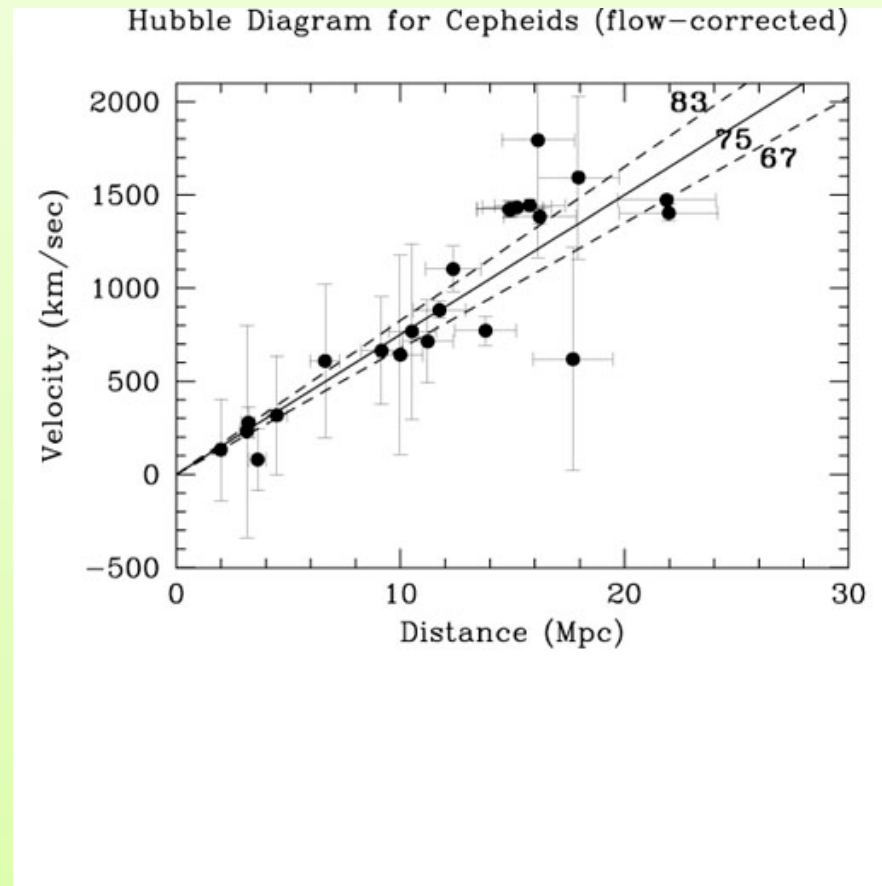
- Einstein no seguia els descobriments sobre galàxies, i tenia en ment la idea d'un Univers estàtic.
- Alexander Friedman fou el primer en trobar la solució més simple de la Teoria de la Relativitat per un *Univers homogeni i isòtrop* a gran escala: l'Univers no pot ser estàtic, ha d'estar en expansió o contracció. Einstein ho va menystenir. Friedman va morir el 1925.
- Georges Lemaitre va proposar que les grans velocitats mesurades per Slipher augmentaven en proporció amb la distància, i que l'Univers està en expansió. Va proposar la Teoria de "l'àtom primordial" com a principi de l'expansió.

# L'expansió de l'Univers



Edwin Hubble

- Llei de Hubble: les galàxies s'allunyen de nosaltres a una velocitat proporcional a la seva distància (excepte per velocitats peculiars causades per agrupacions de galàxies). Això s'interpreta com l'expansió de l'Univers.
- El mèrit del descobriment de l'expansió es reparteix entre diverses persones: Henrietta Leavitt, Vesto Slipher, Georges Lemaitre, Edwin Hubble.
- La connexió d'observacions i teoria (Einstein, Friedman, Lemaitre) va costar, però és essencial.



Freedman et al. 2001



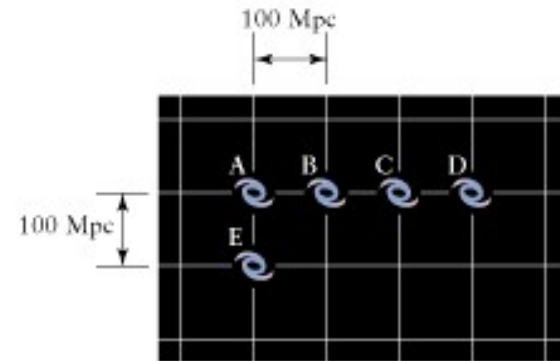
# El Gran Esclat: l'expansió no té centre ni vores

- No és una expansió centralitzada de galàxies a través de l'espai, sinó un eixamplament del mateix espai.

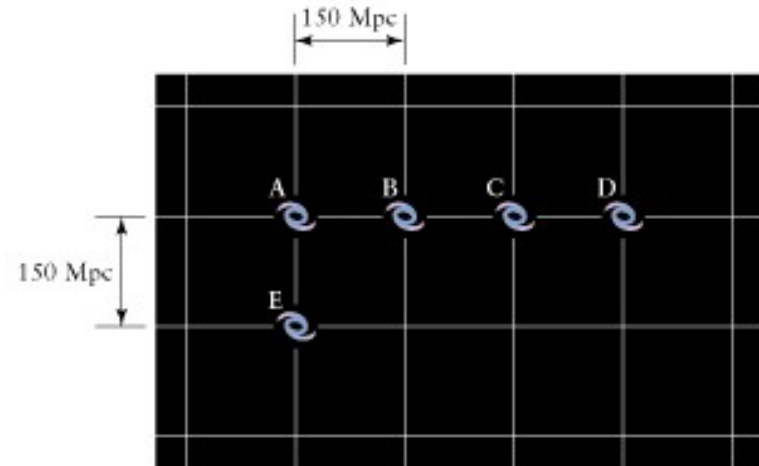
L'expansió es descriu mitjançant un *factor d'escala* que augmenta amb el temps.

El decaïment de la llum segueix el factor d'escala.

Si la matèria es conserva, l'expansió s'inicia en un Gran Esclat. No és una explosió! És un esclat que es produeix arreu de l'espai, de forma independent i simultània.



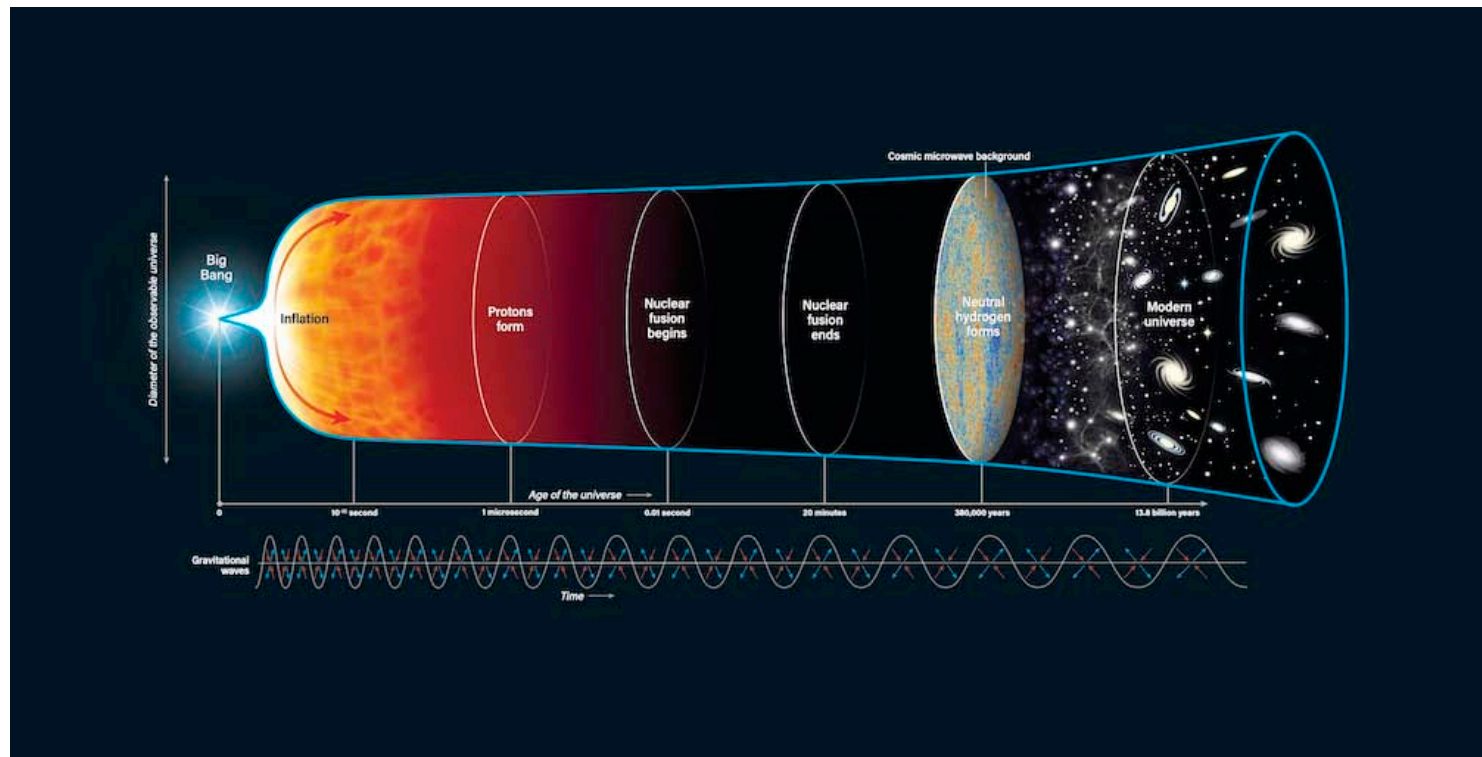
a



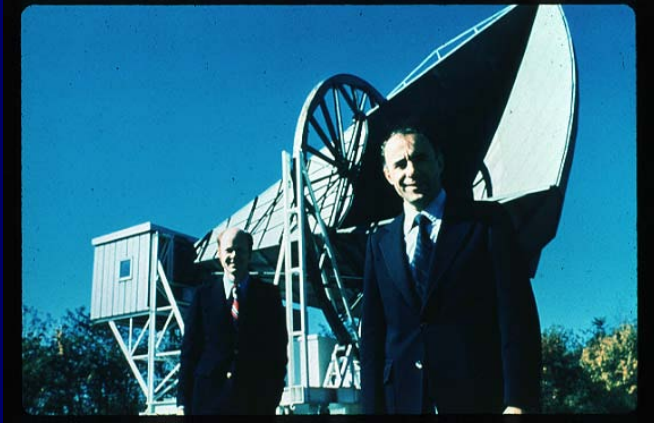
b

# Descobriments de la cosmologia moderna

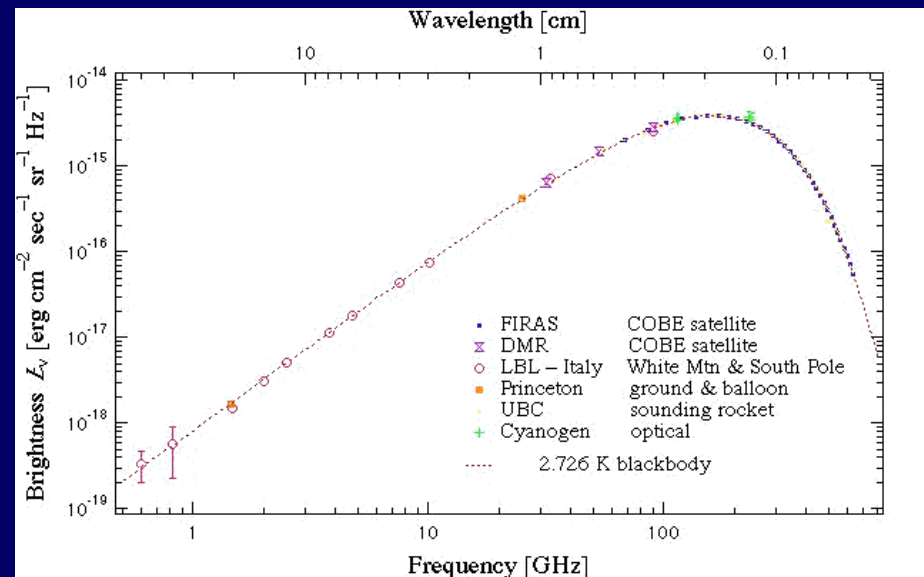
- La radiació còsmica de fons, fòssil del Gran Esclat, descoberta el 1964.
- La matèria fosca.
- Les fluctuacions en la radiació còsmica de fons i l'origen de les galàxies: fluctuacions primordials de l'Univers.
- L'acceleració de l'expansió en la història recent de l'Univers: energia fosca, o constant cosmològica.
- Història de l'Univers:



# Descobrimet de la radiació còsmica de microones (1965)

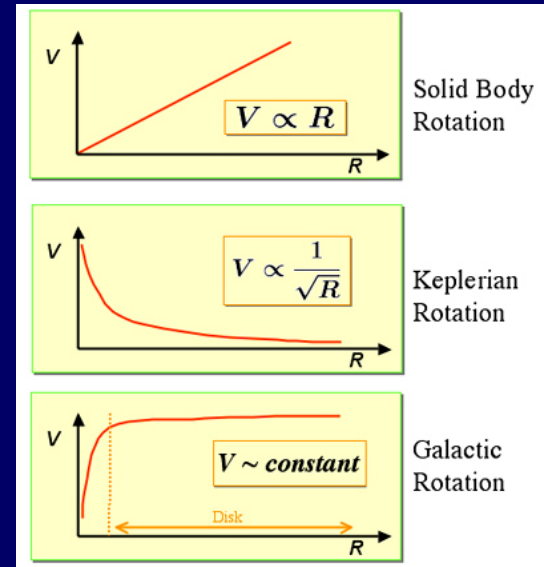
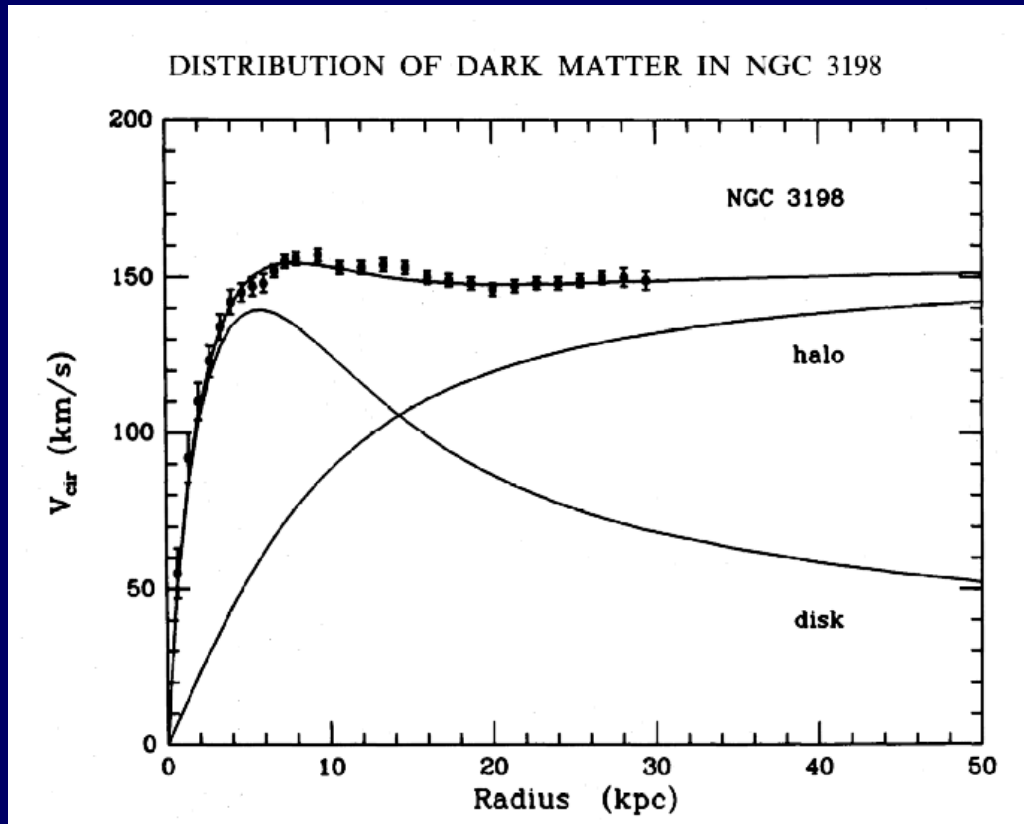


- Del cel ens arriba en totes direccions radiació tèrmica a 3 graus Kelvin.
- Això va confirmar el Gran Esclat com la teoria correcta de l'expansió.



Espectre de cos negre mesurat per la missió COBE

# Primera evidència de la matèria fosca: Corbes de rotació de galàxies

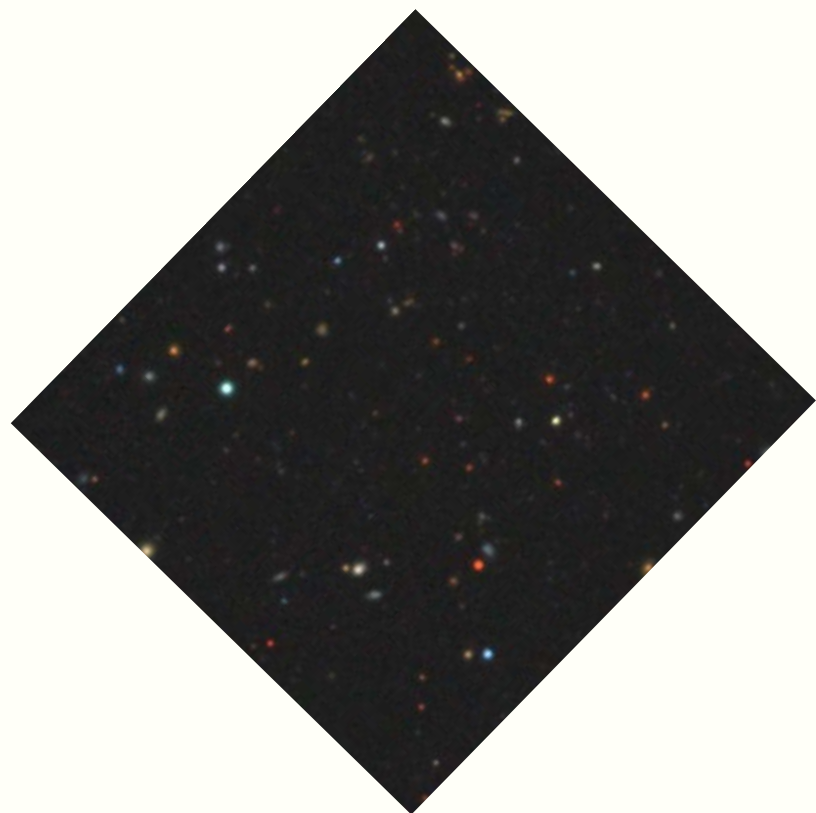


Sistemes esfèrics:  
 $V^2(r) = GM(r)/r$

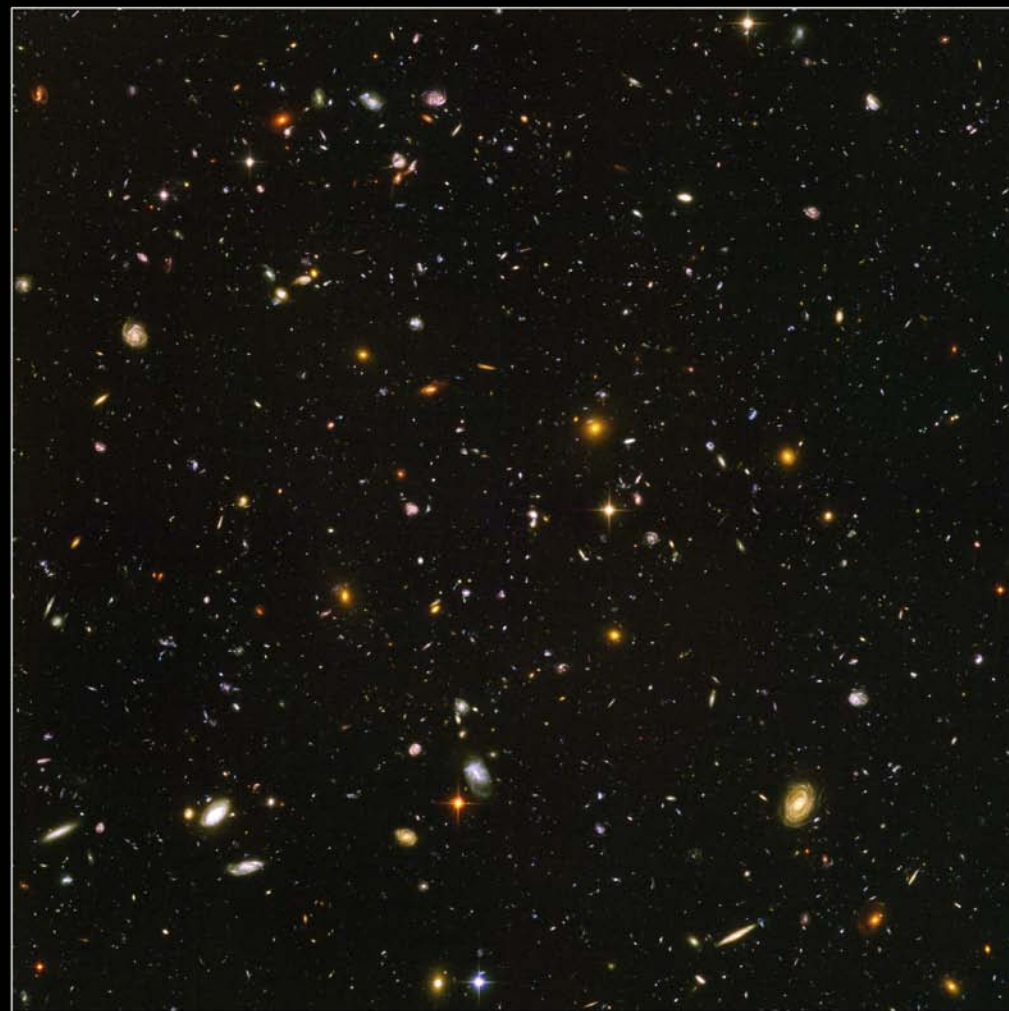
Avui dia hi ha evidència redundant de la matèria fosca: cúmuls de galàxies, lents gravitatòries, fluctuacions en la radiació còsmica...



# El camp profund de Hubble.



La mateixa àrea de cel en el Legacy  
Survey

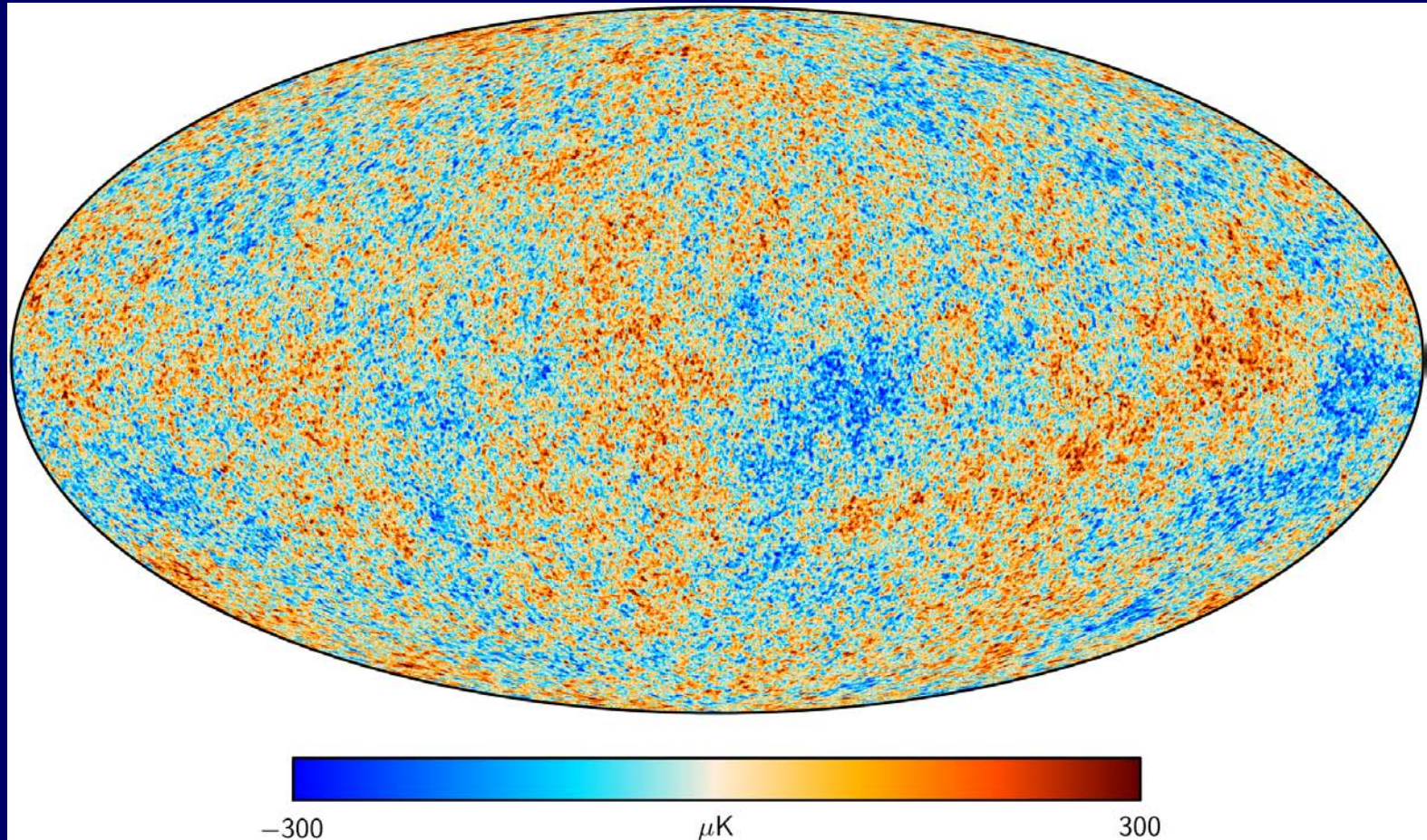


**Hubble Ultra Deep Field**  
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and the HUDF Team

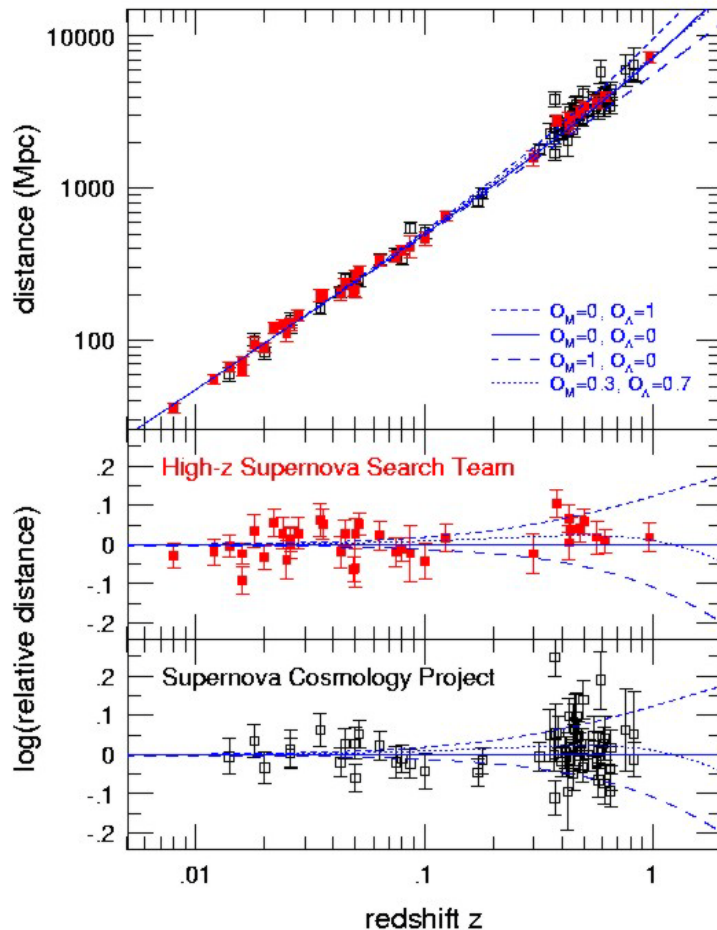
STScI-PRC04-07a

Mapa de la missió Planck de les fluctuacions primordials en la radiació còsmica de fons (després de restar el dipol i l'emissió de la Via Làctia).



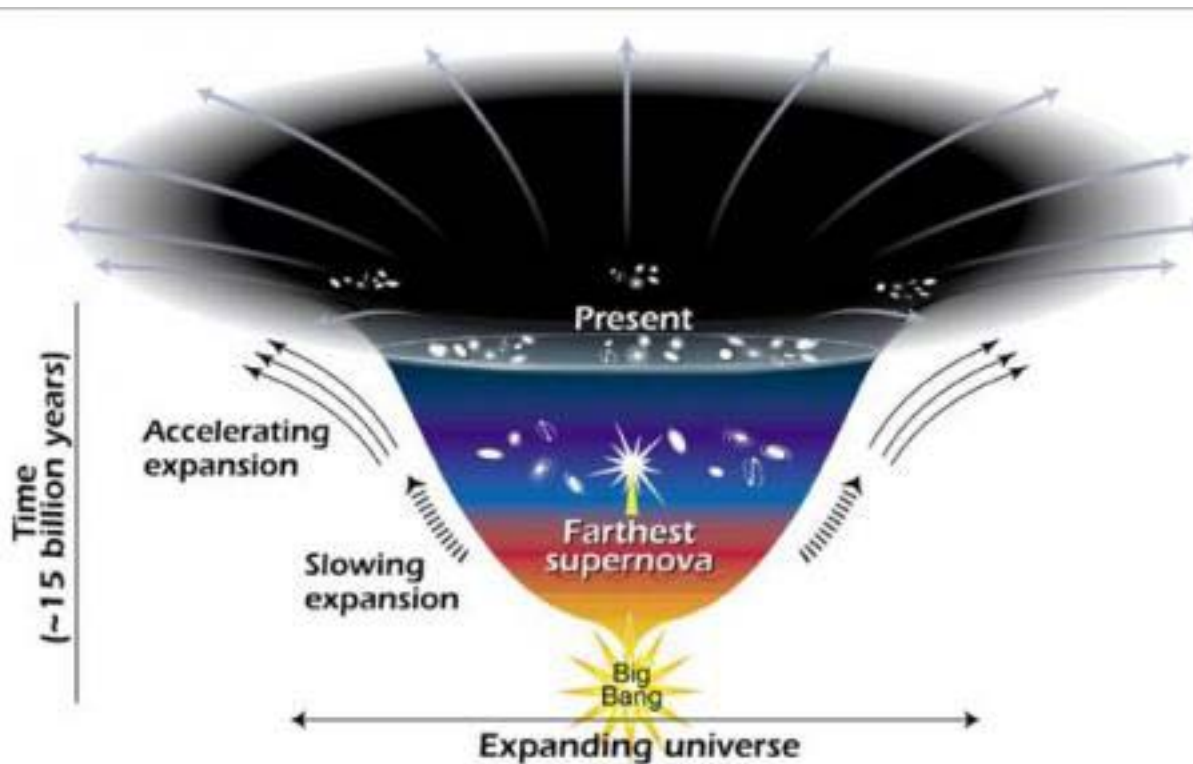


# Diagrama de Hubble de les supernoves: Una forma de detectar l'expansió accelerada.



- Les supernoves que va estudiar Jeroni Muñoz serveixen ara per mesurar l'expansió de l'Univers, amb un mètode que segueix la mateixa idea que les Cefeides de Henrietta Leavitt.
- A petites distàncies, es compleix la llei de Hubble, però a grans distàncies la llei es desvia d'una forma que indica que, en els últims 5000 milions d'anys, l'expansió ja no es frena sinó que s'accelera.

# L'expansió accelerada de l'Univers: energia fosca.

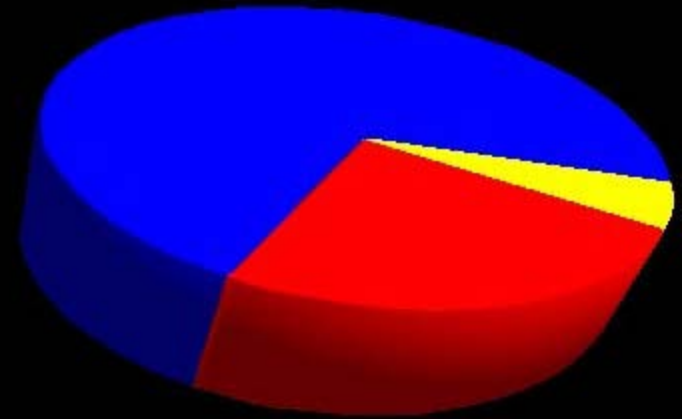




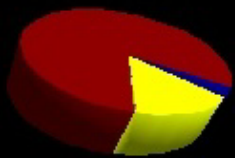
# El mal anomenat “tortell còsmic”

(Lewis Carroll)

- Idea confusa:
  - 70% energia del buit
  - 25% matèria fosca
  - 5% matèria normal
- Realitat:
  - 16% de matèria és normal, 84% és fosca.
  - L’energia fosca canvia la seva proporció amb el temps.



size =  $\frac{1}{4}$



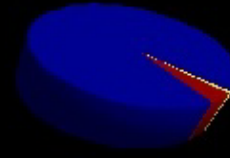
size =  $\frac{1}{2}$



size = 1



size = 2



size = 4



time

# Resum

- Des del descobriment de l'expansió de l'Univers, la teoria del Gran Esclat, basada en la Relativitat General, ha sigut corroborada per una gran diversitat d'observacions. Tot i això, és una teoria incompleta que ens condueix a moltes qüestions clau:
  1. Què és la matèria fosca? Tenim molta evidència que existeix, que no interactua, moltes hipòtesis però no sabem què és!
  2. D'on van sortir les fluctuacions inicials que han format les galàxies?
  3. Com va començar l'expansió? Podem comprovar el Gran Esclat fins a una fracció de segon... però no entenem com va començar tot (hipòtesi favorita: la inflació).
  4. Energia fosca, o constant cosmològica: per què l'expansió de l'Univers ha canviat de desaccelerada a accelerada en la seva història recent?