

# L'expansion de l'univers

De surprises en surprises...

# Début XXe

- Univers = notre voie lactée
- Statique
- Histoire inconnue
  - Personne n'imagine même qu'il évolue et donc qu'il ait une histoire, un âge, un avenir
  - Même Einstein...
  - Révolution de pensée similaire à l'évolution de la vie sur Terre (Darwin)

# Einstein

- Relativité générale : 1915
  - Loi de l'univers dans son ensemble, masse et énergie
  - Mais les solutions ne sont pas stables : l'univers devrait s'effondrer sur lui-même à cause de la gravité
  - En 1917, Einstein ajoute une « constante cosmologique »  $\Lambda$  (énergie du vide)
    - « La plus grande bêtise de sa vie »
- Expansion = une des preuves de la validité de cette loi



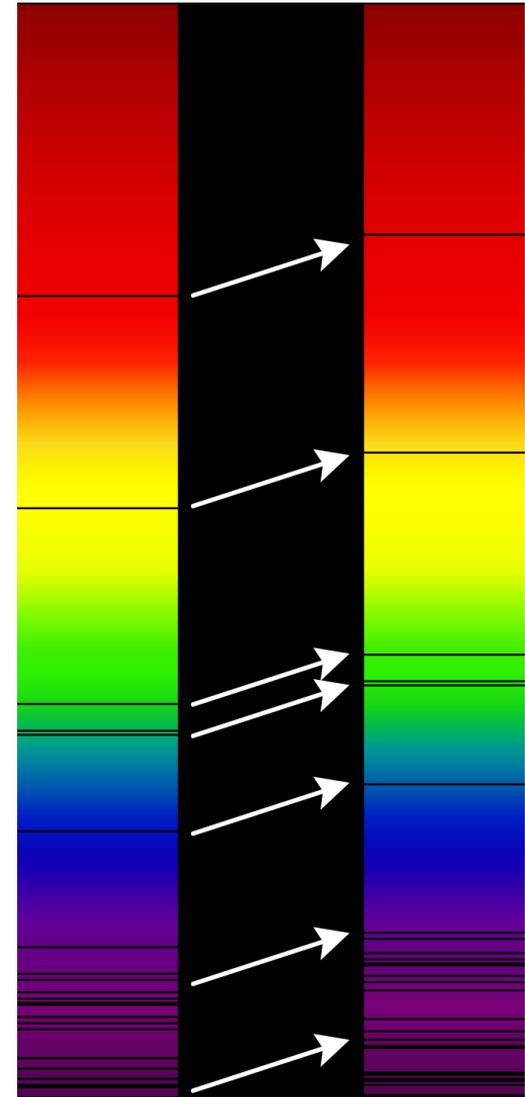
# Hubble

- 1924 mesure les distances de « nébuleuses »
- Grâce aux céphéides
  - Etoiles variables de type delta Cephei (Leavitt 1908)
- Elles sont en dehors de notre galaxie

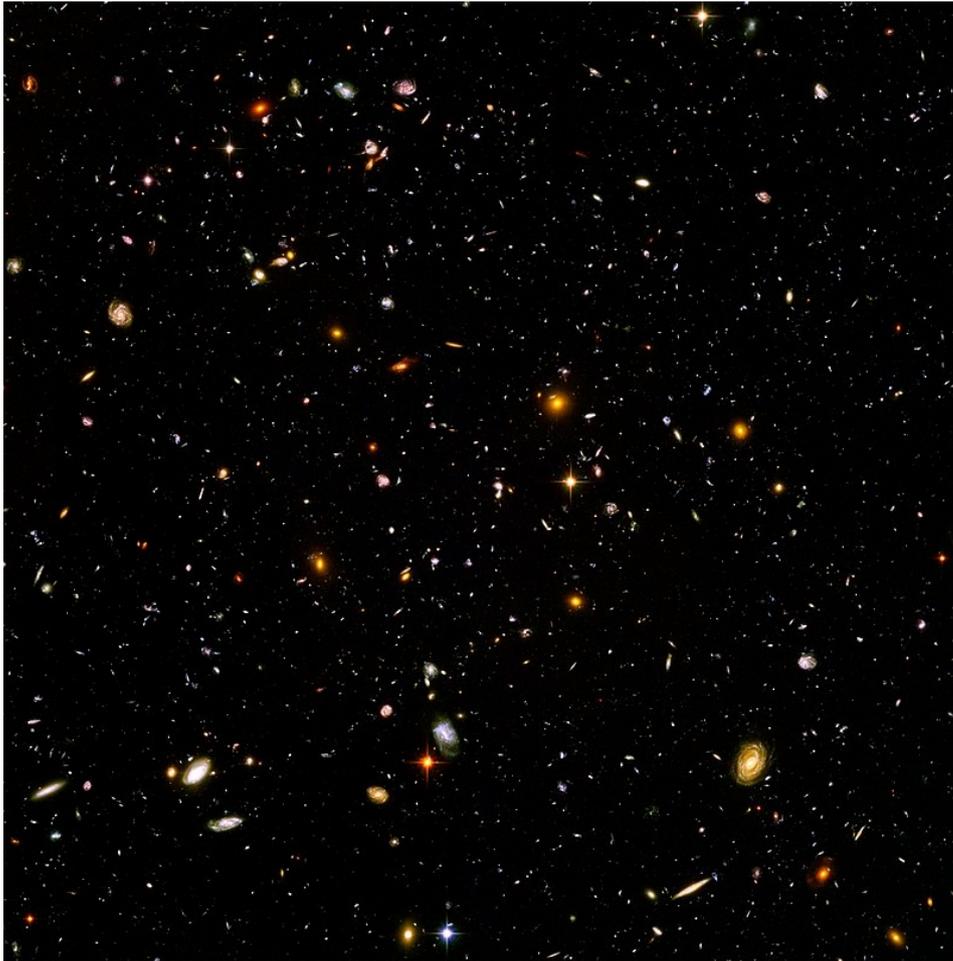


# Décalage vers le rouge

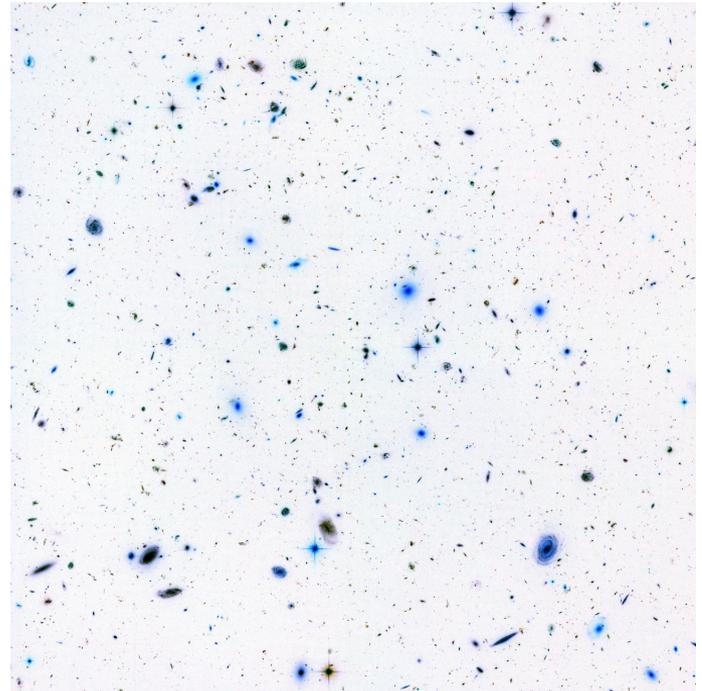
- Les atomes absorbent des rayons lumineux à des énergies (longueur d'onde) bien précises
- 1929 Hubble mesure les spectres de galaxies lointaines => décalage vers le rouge
- Combiné à la distance => plus la galaxie est loin, plus les raies sont décalées donc plus elle s'éloigne vite



# • Hubble Ultra Deep Field (1995)



- Dominante rouge
- Inversion des couleurs (gimp)



# Loi de Hubble-Lemaître

- 1929 loi de Hubble (renommée en 2018 Hubble-Lemaître)
- $v = Hd$  (H constante de Hubble)
- Trouvée par le calcul en 1927 par Lemaître, utilisant un modèle d'univers
  - Mais article original en français, traduit seulement en 1931 par Lemaître et autocensuré

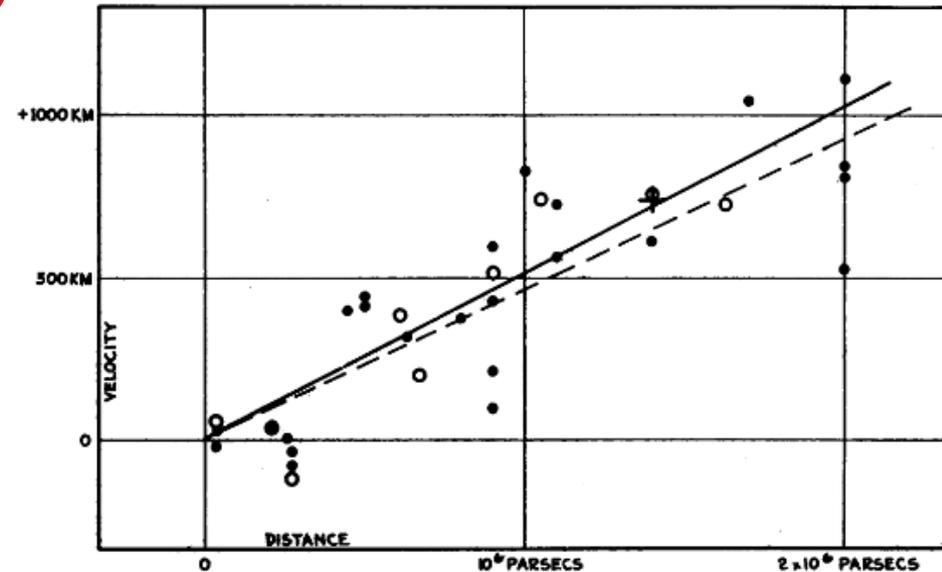
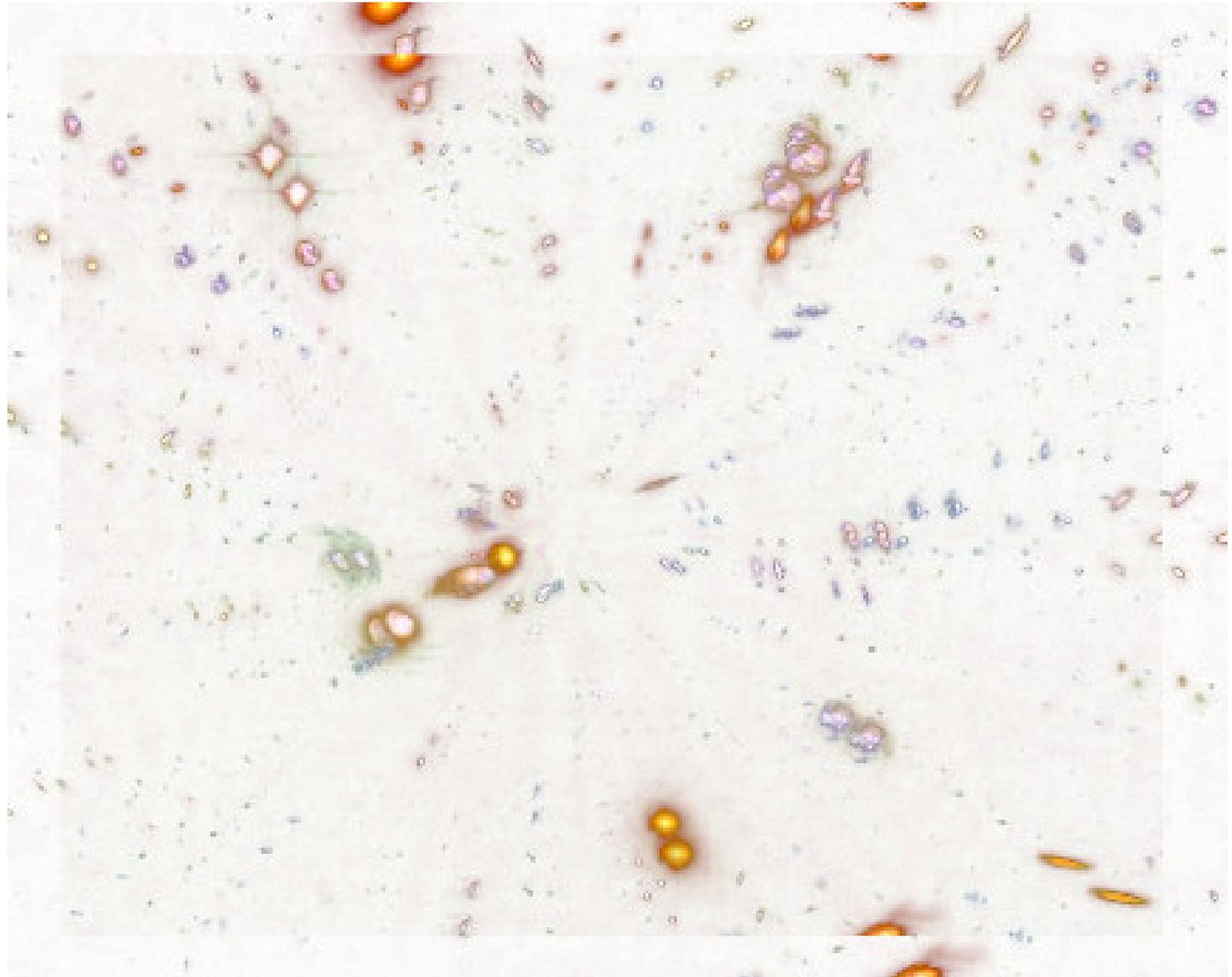


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

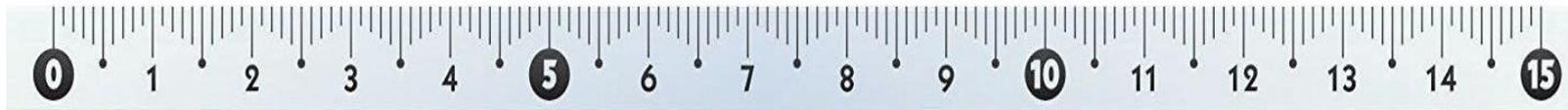
# Illustration

- Extrait HUDF
- Fond blanc
- Agrandissement
- Addition avec originale



# Interprétations

- Effet Doppler => nous serions au centre de l'univers ; après Copernic et Galilée bof bof
- Vitesse de la lumière variable ?
- Effet gravitationnel ?
- Univers en expansion ?
  - Plus la lumière a voyagé longtemps, plus elle a subi le décalage
  - Effet identique en tout point de l'univers



# ... début de l'histoire de l'histoire de l'univers

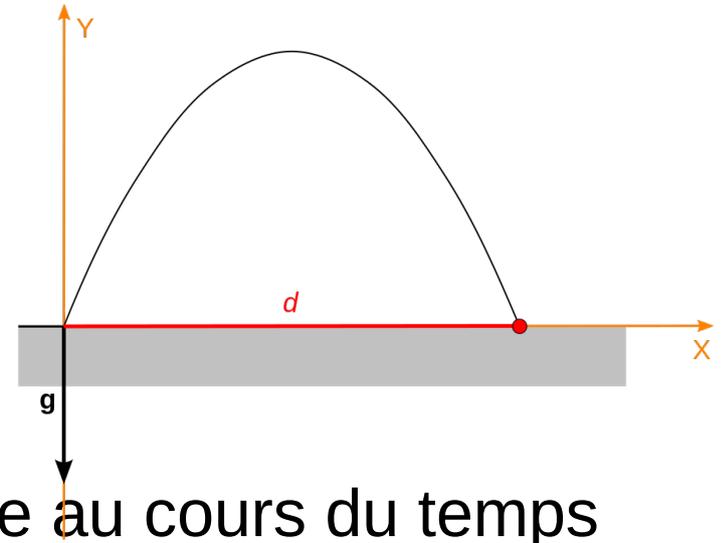
- Si l'univers est en expansion, **il a été plus petit, plus dense et plus chaud dans le passé**
  - Naissance : Big Bang
  - Âge ?
  - Avenir ?
- Friedmann : l'expansion est une solution pour que l'univers actuel existe sans s'être effondré sous la gravité

# Et après ?

- Plus rien jusqu'en 1998

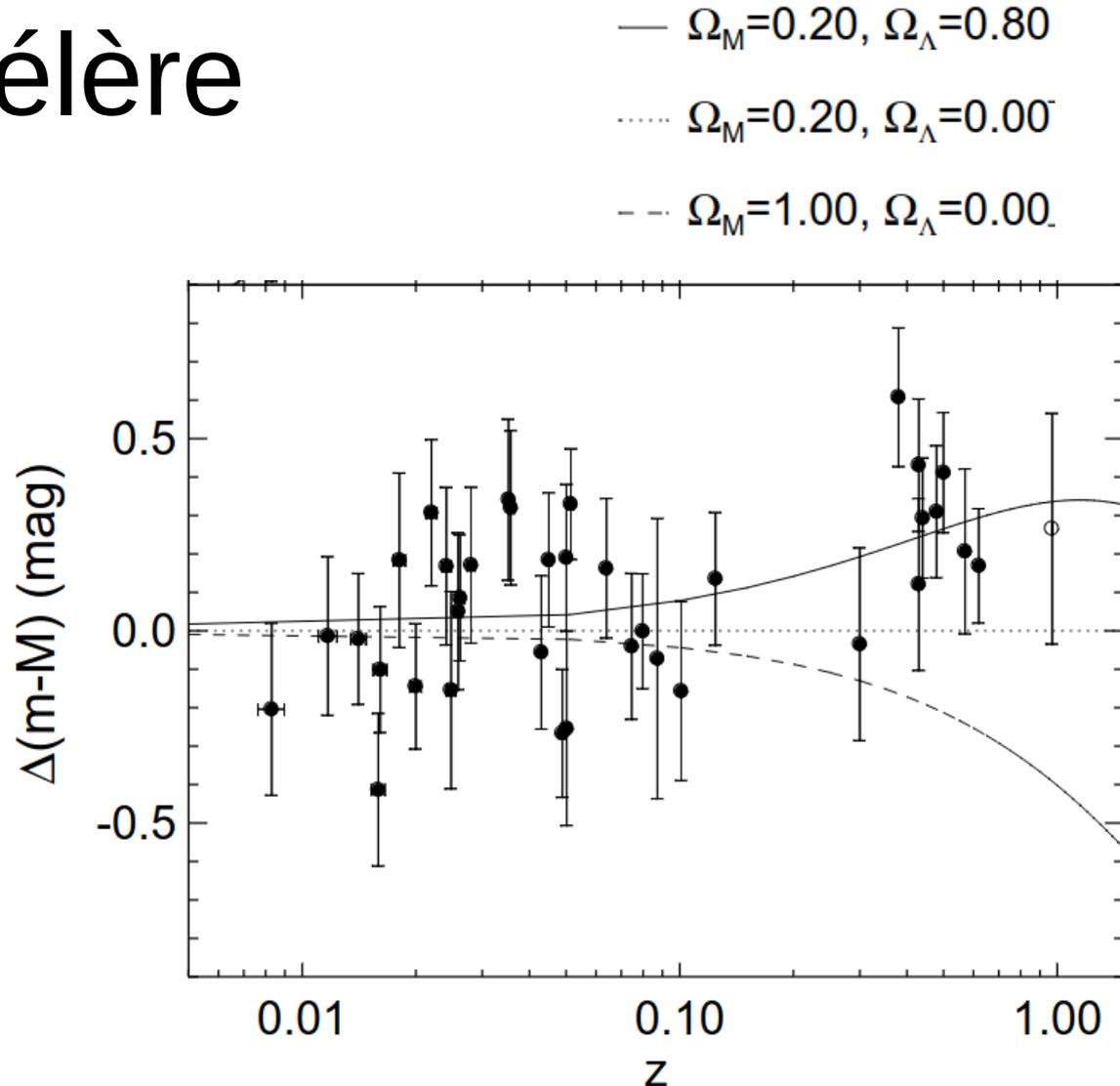
# L'inconstance de la constante...

- En 1998, deux équipes d'astrophysiciens menées, l'une par Saul Perlmutter, l'autre par Brian P. Schmidt et Adam Riess, réalisent des mesures sur de lointaines supernovæ (type 1a)
- Ils s'attendent à trouver un **ralentissement** de l'expansion
  - Vitesse initiale due au Big Bang
  - Gravité = ralentissement
  - Diminution de la constante de Hubble au cours du temps



# L'expansion accélère

- Les plus lointaines supernovae sont trop peu lumineuses
  - Donc plus loin qu'attendu
- Correspond à un modèle d'univers avec 20 % de masse et 80 % d'énergie sombre
- Sombre = inconnu...
- Accélération depuis 5 MdA



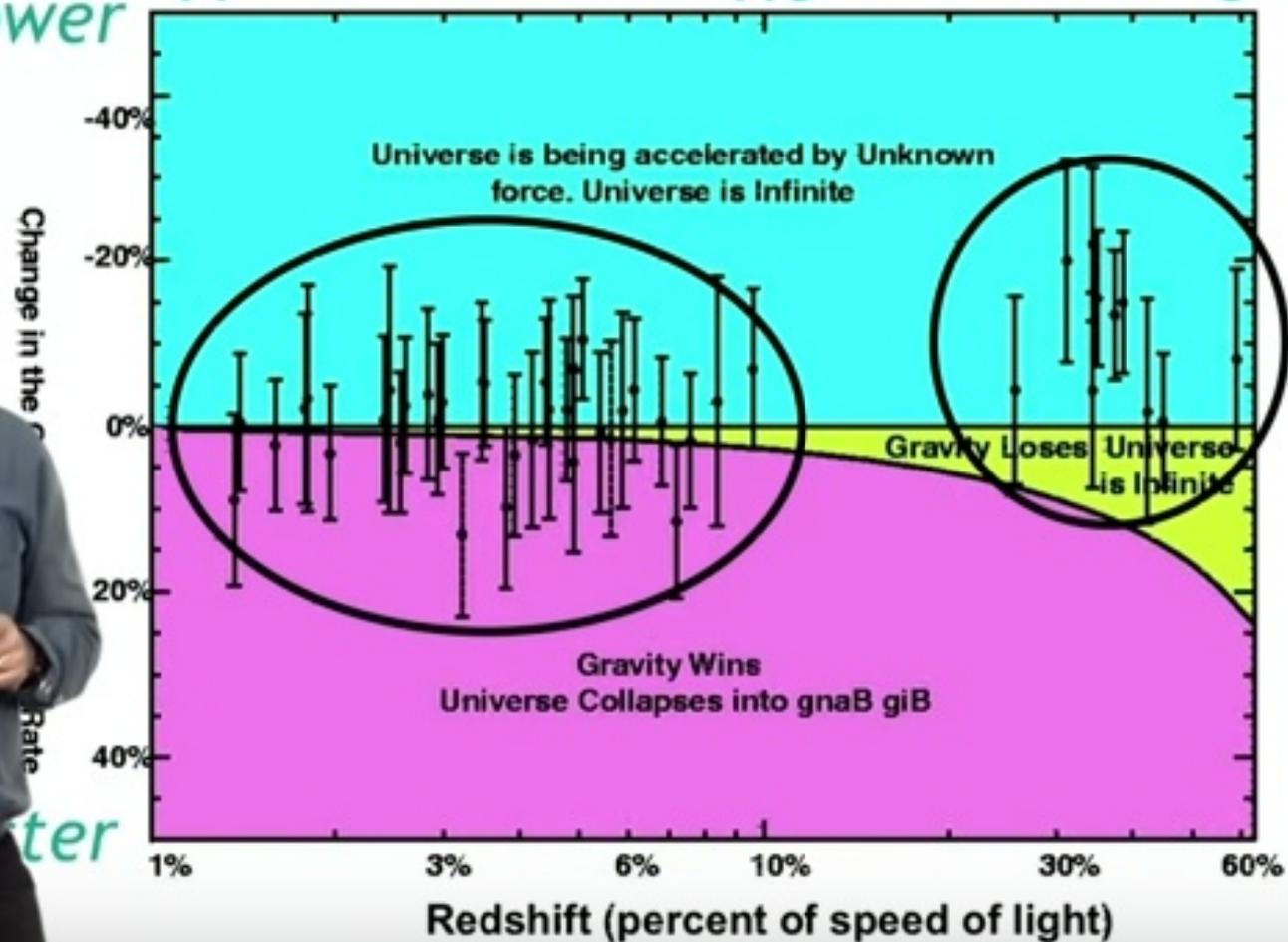
# Time (Billions of Years)

Slower

.1

1.5

8

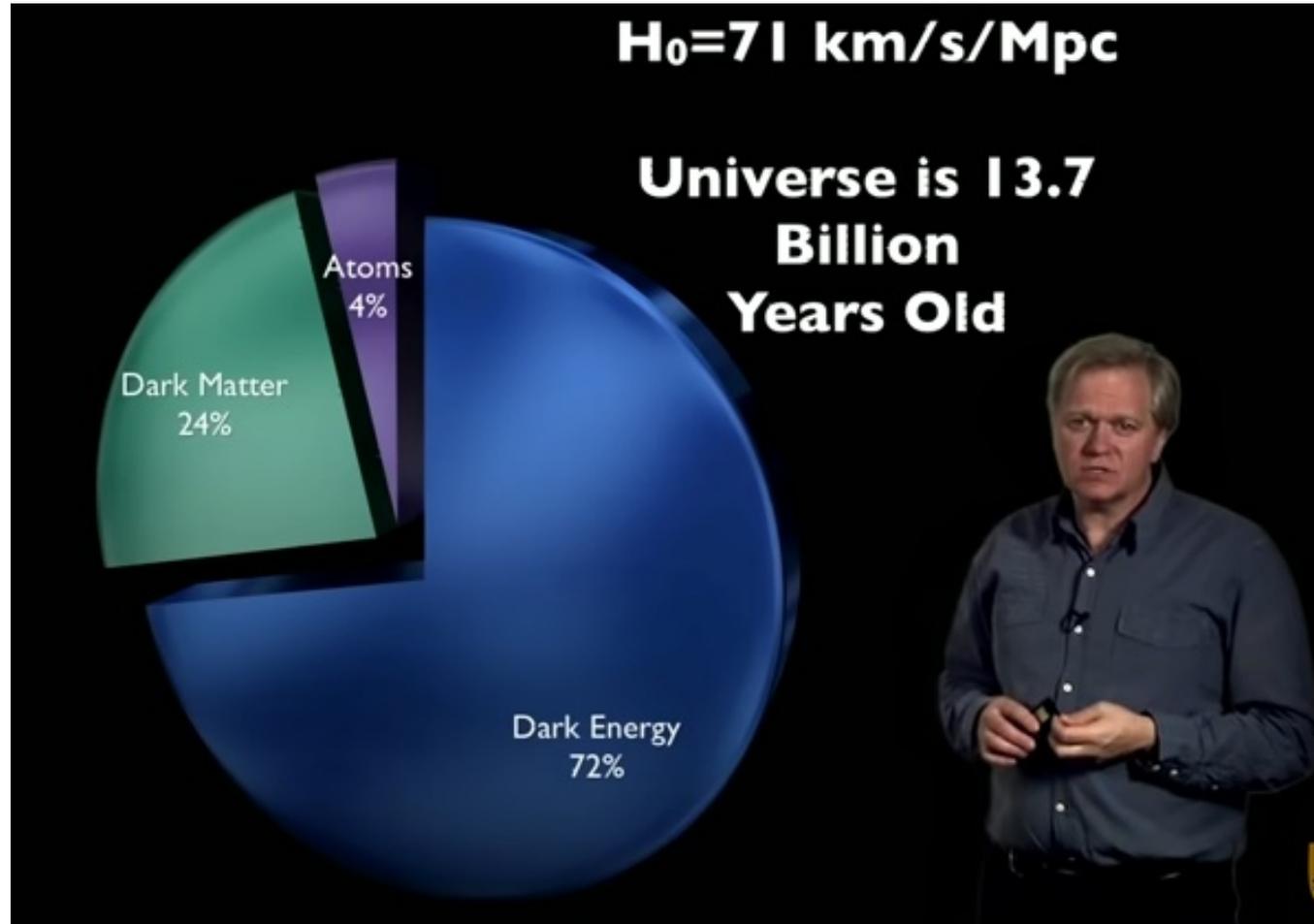


# Prix Nobel

- Expansion accélérée  $\Rightarrow \Lambda$  strictement positif
- L'Univers contiendrait une mystérieuse énergie noire produisant une force répulsive qui contrebalance le freinage gravitationnel
  - L'énergie sombre a un effet constant
  - La gravité a un effet qui diminue (masse constante)
  - $\Rightarrow$  l'énergie sombre gagne
- Pour ces travaux, Perlmutter, Schmidt et Riess reçoivent conjointement le Prix Nobel de physique en 2011

# Que contient l'univers ?

- Modèle avec beaucoup d'inconnues
- Mais conforme à énormément d'observations



# Accélération infinie ?

- L'expansion peut accélérer jusqu'à plus que la vitesse de la lumière
  - On verra de moins en moins de choses
  - Y compris le Fond Diffus Cosmologique (CMB cosmic microwave background), les galaxies lointaines...
  - Jusqu'à seulement notre supergalaxie locale (Andromède + Voie Lactée + ...)
  - Chômage pour les cosmologistes !

- Mais comment va finir l'univers ?
- Big Crunch : expansion puis contraction => KO
- Big Freeze : expansion infinie, univers froid et vide
- Big Rip : expansion avec augmentation de l'énergie noire supérieure à celle de l'espace => densité d'énergie noire tend vers infini => déchirement des atomes



# Références

- 1777 variables in the magellanic clouds H. Leavitt 1908  
<https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1908AnHar..60...87L>
- Hubble 1929 « A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae »  
<https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.15.3.168>
- Why is the Universe accelerating? Brian Schmidt : <https://www.youtube.com/watch?v=55pcpTjd3BY>
- Wikipedia [https://fr.wikipedia.org/wiki/Expansion\\_de\\_l%27Univers](https://fr.wikipedia.org/wiki/Expansion_de_l%27Univers)
- Christophe Galfard « L'univers à portée de main » chapitres II.7 l'expansion et VI.5 l'énergie sombre
- Wikipedia [https://fr.wikipedia.org/wiki/Acc%C3%A9l%C3%A9ration\\_de\\_l%27expansion\\_de\\_l%27Univers](https://fr.wikipedia.org/wiki/Acc%C3%A9l%C3%A9ration_de_l%27expansion_de_l%27Univers)
- Supernovae de type 1a Qfastro [https://www.qfastro.club/doku.php?id=cr:2022-11-18#les\\_supernovae\\_de\\_type\\_ia\\_frederic](https://www.qfastro.club/doku.php?id=cr:2022-11-18#les_supernovae_de_type_ia_frederic)
- Riess <https://arxiv.org/abs/astro-ph/9805201>
- Perlmutter <https://arxiv.org/abs/astro-ph/9812133>