

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left( \frac{M_p^2 R}{2} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 c_i L_i - L_{SM} \right)$$

$$L_1 = M^3 \pi, \quad L_2 = (\nabla_\mu \pi)(\nabla^\mu \pi)$$

$$L_3 = (\square \pi)(\nabla_\mu \pi)(\nabla^\mu \pi) / M^3$$

$$L_4 = (\nabla_\mu \pi)(\nabla^\mu \pi) [2(\square \pi)^2 - 2\pi_{;\mu\nu}\pi^{;\mu\nu} - R(\nabla_\mu \pi)(\nabla^\mu \pi)/2] / M^6$$



# Le télescope LSST

*à la poursuite de l'énergie noire et de la matière noire*

SAF – 13 avril 2019

Jérémy Neveu



Jérémy Neveu – LAL



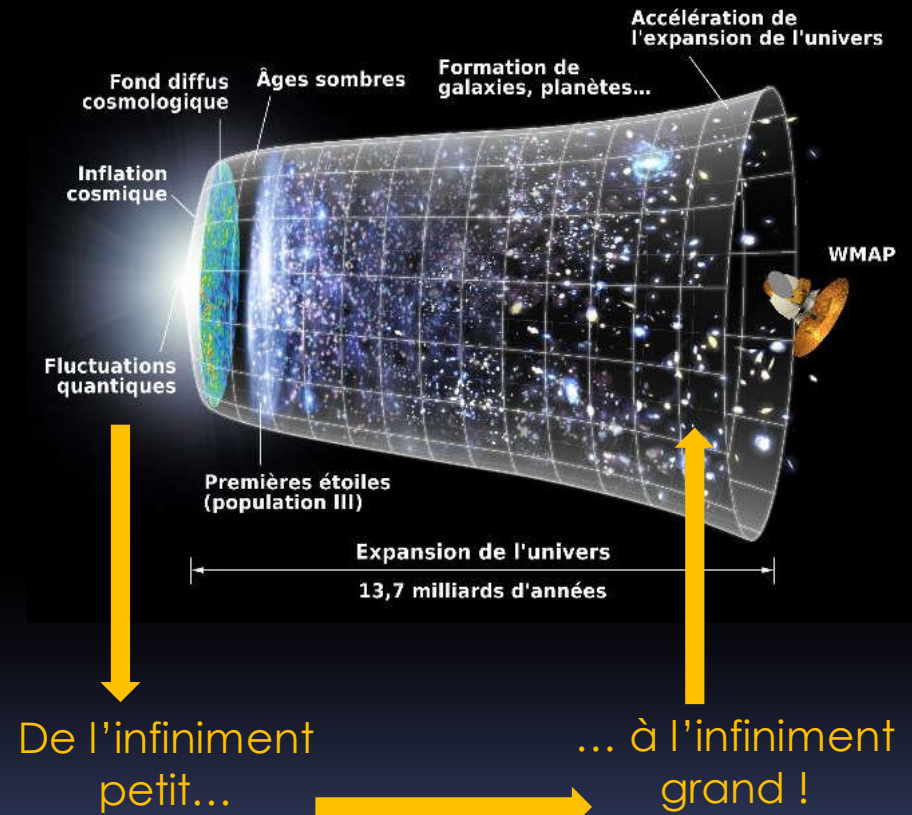
SAF - Commission de Cosmologie

13/04/2019

1

# Remarques introductives

- **Cosmologie** : science qui étudie l'Univers dans sa totalité (ses constituants, son évolution, son histoire)
- Ce que l'on sait aujourd'hui:
  - L'Univers est né il y a 13 milliards d'années (scénario du Big Bang)
  - Il grandit: on parle « d'expansion de l'Univers »
  - L'observation de son évolution montre qu'il est composé de :
    - 5 % de matière ordinaire (vous, moi, étoiles, planètes...)
    - 25% de matière noire (une matière encore inconnue mais invisible)
    - 70 % d'énergie noire: encore plus mystérieux...
- **Comment cela est-il mesuré et comment faire mieux avec LSST ?**

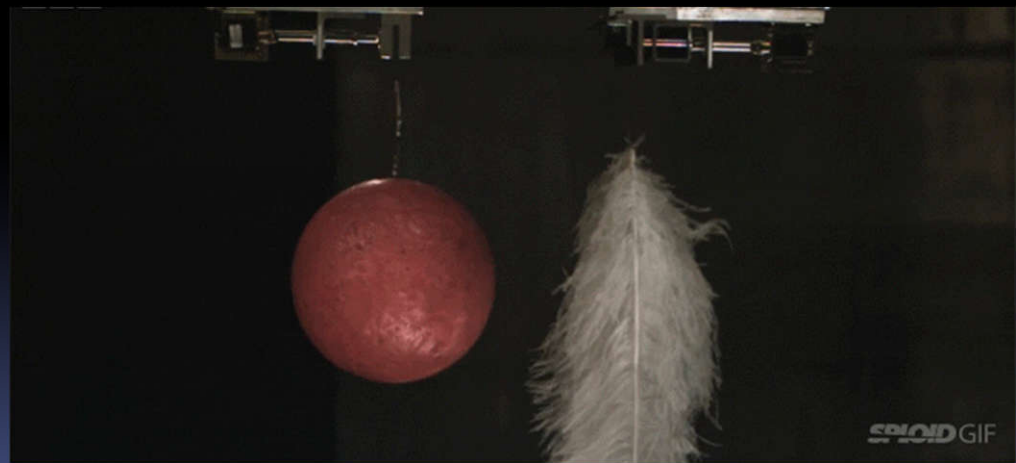


Pourquoi un nouveau télescope ?

# LE COTE OBSCUR DE L'UNIVERS

# La gravitation

- La gravité est la **cause de la chute** des objets vers la Terre
- A partir de la mesure de la chute des corps et de l'observation des planètes, en 1687 Newton met la gravitation en équation:
  - C'est la loi de **la gravitation universelle**





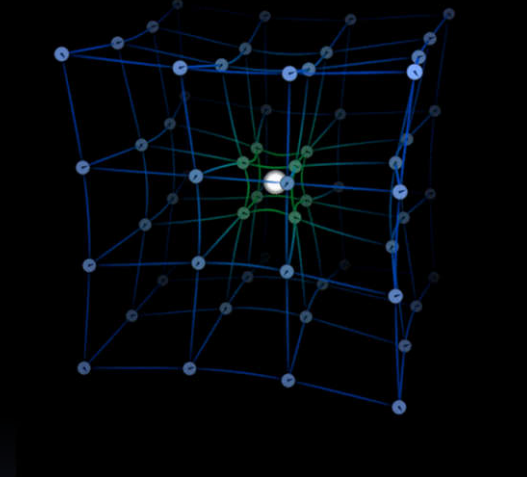
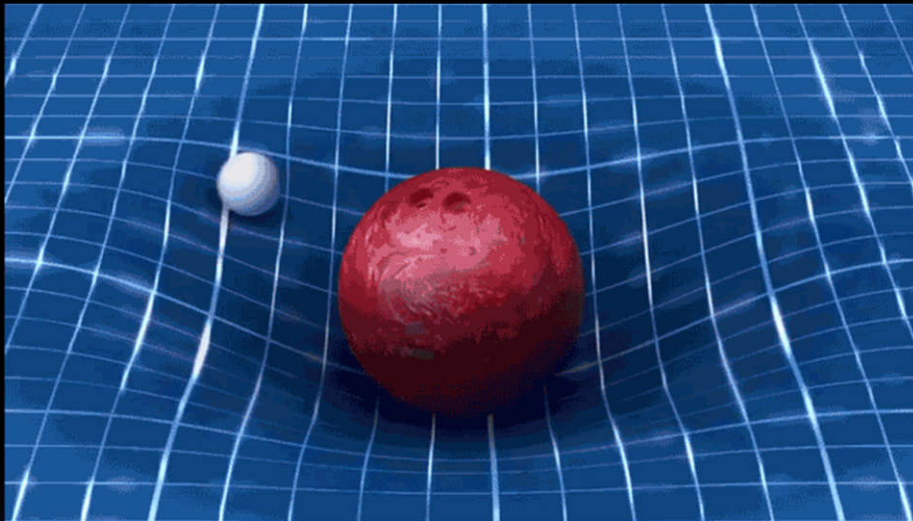
# La gravitation

- La loi de la gravitation universelle décrit la gravité comme une **force qui attire les objets entre eux** :
  - Son intensité est proportionnelle à la masse des objets
  - Elle diminue avec le carré de la distance entre les objets
- Mais **la trajectoire** d'un objet ne dépend pas que de la gravité... mais aussi de sa **vitesse** :
  - La trajectoire est le résultat de la compétition entre la gravité et la vitesse
- Exemple : lancer d'un objet
  - Vitesse de départ
  - Angle de départ



# La gravitation

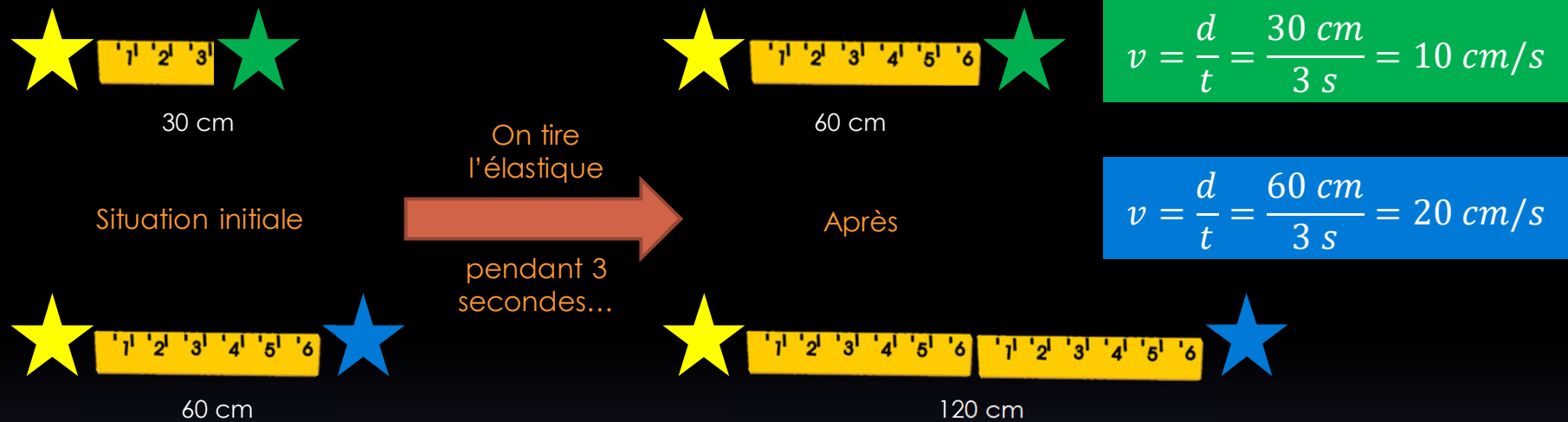
- Théorie moderne de la gravitation : la **Relativité Générale**
  - La force newtonienne est décrite par la courbure de l'espace temps



- Appliquée à l'Univers entier,
  - Alexander Friedmann montre en 1921 que l'Univers peut être en expansion
  - Georges Lemaître prédit en 1925 que **si l'Univers grandit, alors les objets s'éloignent d'autant plus vite qu'ils sont lointains**

# Quel veut dire l'idée de Lemaître?

- *Si l'Univers grandit, alors les objets s'éloignent d'autant plus vite qu'ils sont lointains (Lemaître - 1925)*

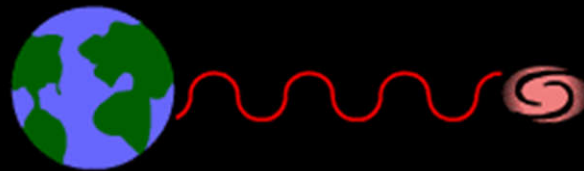
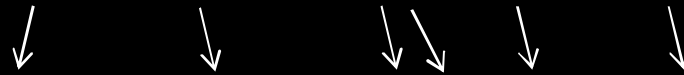
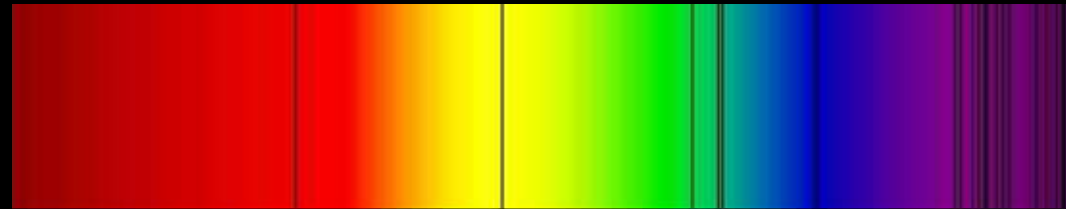


- Par conséquent, il faut mesurer la distance et la vitesse des objets dans le ciel.
- Mais **lesquels et comment ?**

# Mesurer la vitesse des nébuleuses

Raies d'absorption dans le spectre :  
signature des éléments chimiques qui  
composent l'étoile (son « code barre »)

Spectre de  
référence



# Mesurer la vitesse des galaxies



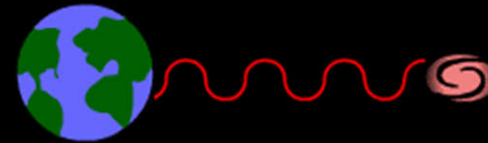


# Mesurer la vitesse des galaxies



# La découverte de l'expansion de l'Univers

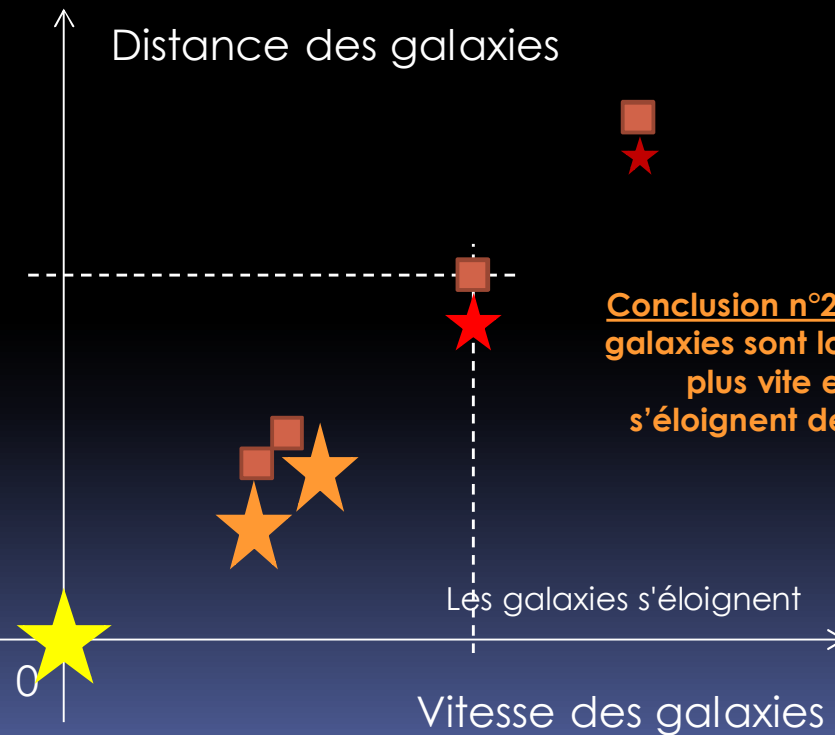
**Objectif :** mesurer la distance des galaxies et leur vitesse par rapport à nous



**Conclusion n°1:** Il n'existe presque pas de galaxies se rapprochant de nous

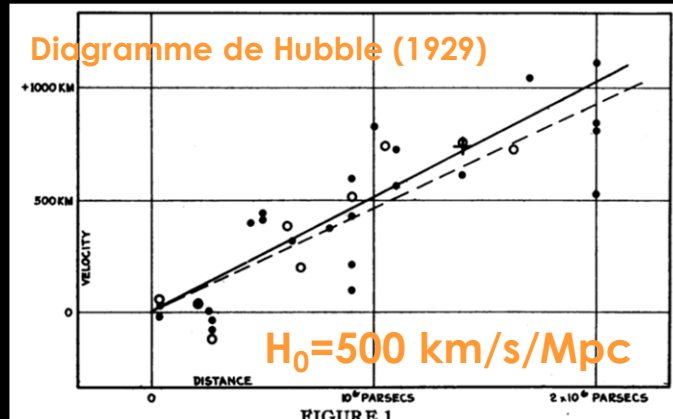


Les galaxies se rapprochent



**Conclusion n°2:** plus les galaxies sont lointaines, plus vite elles s'éloignent de nous !

# La découverte de l'expansion de l'Univers



Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted against distances estimated from involved stars and mean luminosities of nebulae in a cluster. The black discs and full line represent the solution for solar motion using the nebulae individually; the circles and broken line represent the solution combining the nebulae into groups; the cross represents the mean velocity corresponding to the mean distance of 22 nebulae whose distances could not be estimated individually.

- **Conclusion globale : l'Univers est en expansion**

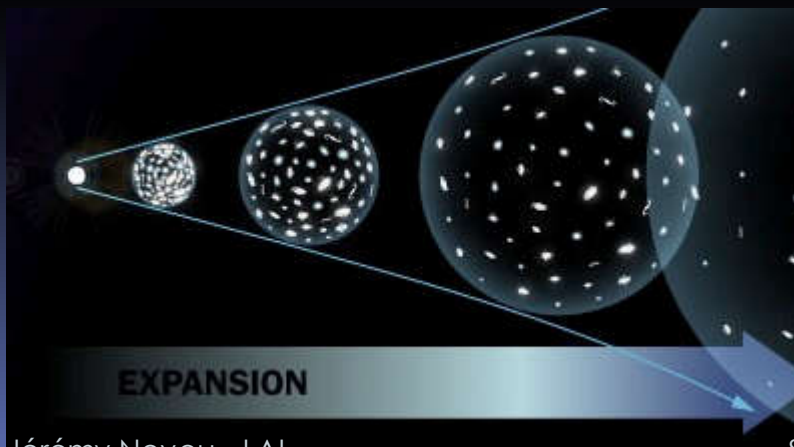
- L'hypothèse de Lemaître est vérifiée
- L'Univers s'étire...
- ... donc avant il était plus petit.

- Il existe donc un début à l'Univers :

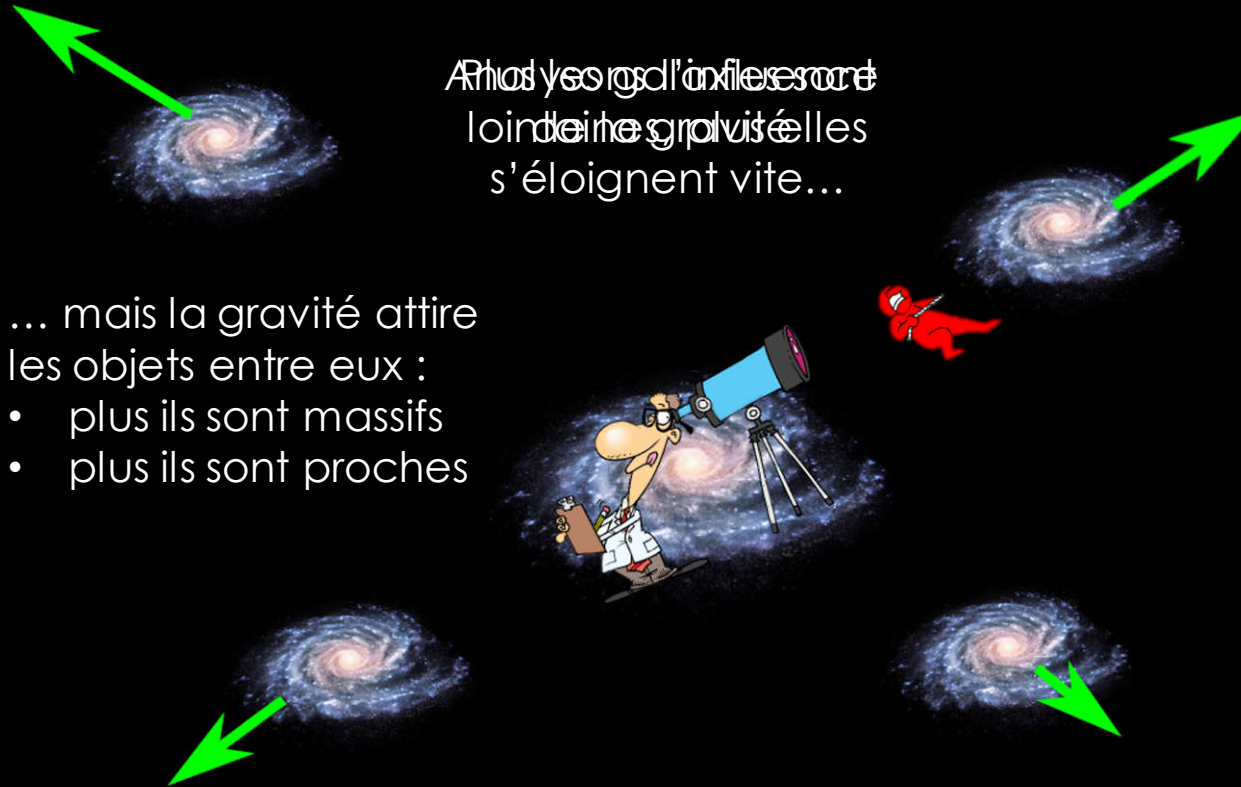
- Nouvelle hypothèse de Lemaître: **l'atome primitif (1933-1945)**

- Confirmation de la théorie du **Big Bang** avec :

- La découverte du **fonds diffus cosmologique** par Penzias et Wilson
- La mesure des **abondances** relatives des éléments légers



# Et la gravité dans tout ça ?



Plus les galaxies sont lointaines, plus elles s'éloignent vite...

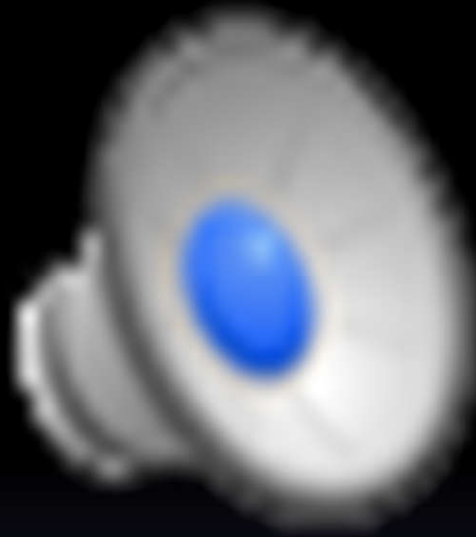
... mais la gravité attire les objets entre eux :

- plus ils sont massifs
- plus ils sont proches

**Conclusion n°1 :** la gravité freine l'expansion de l'Univers

**Conclusion n°2 :** plus l'Univers contient de matière, plus il est massif et moins l'Univers s'étend rapidement

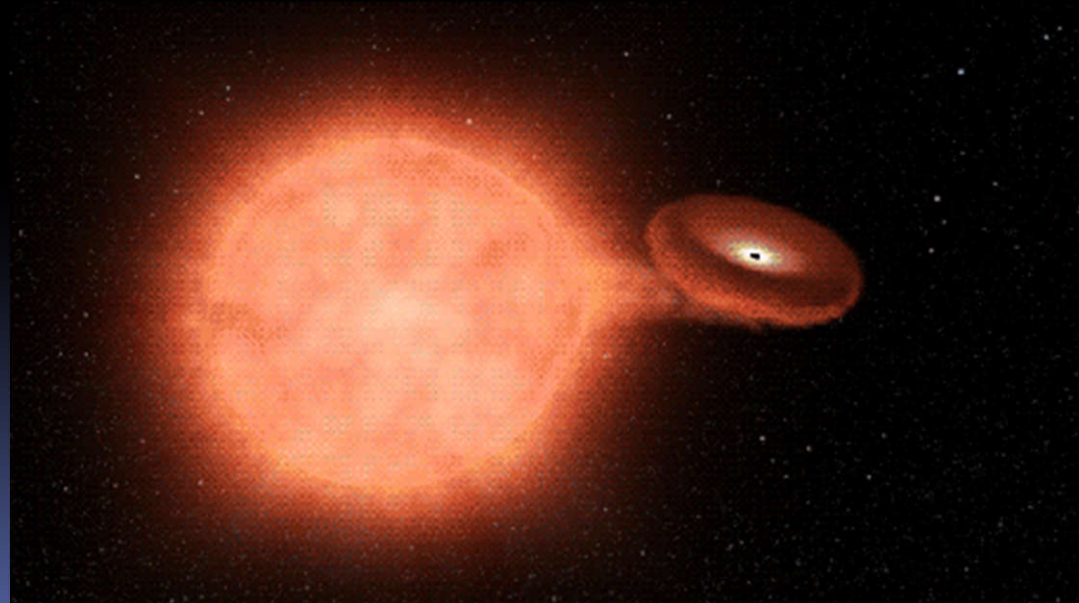
# La vitesse d'expansion de l'Univers



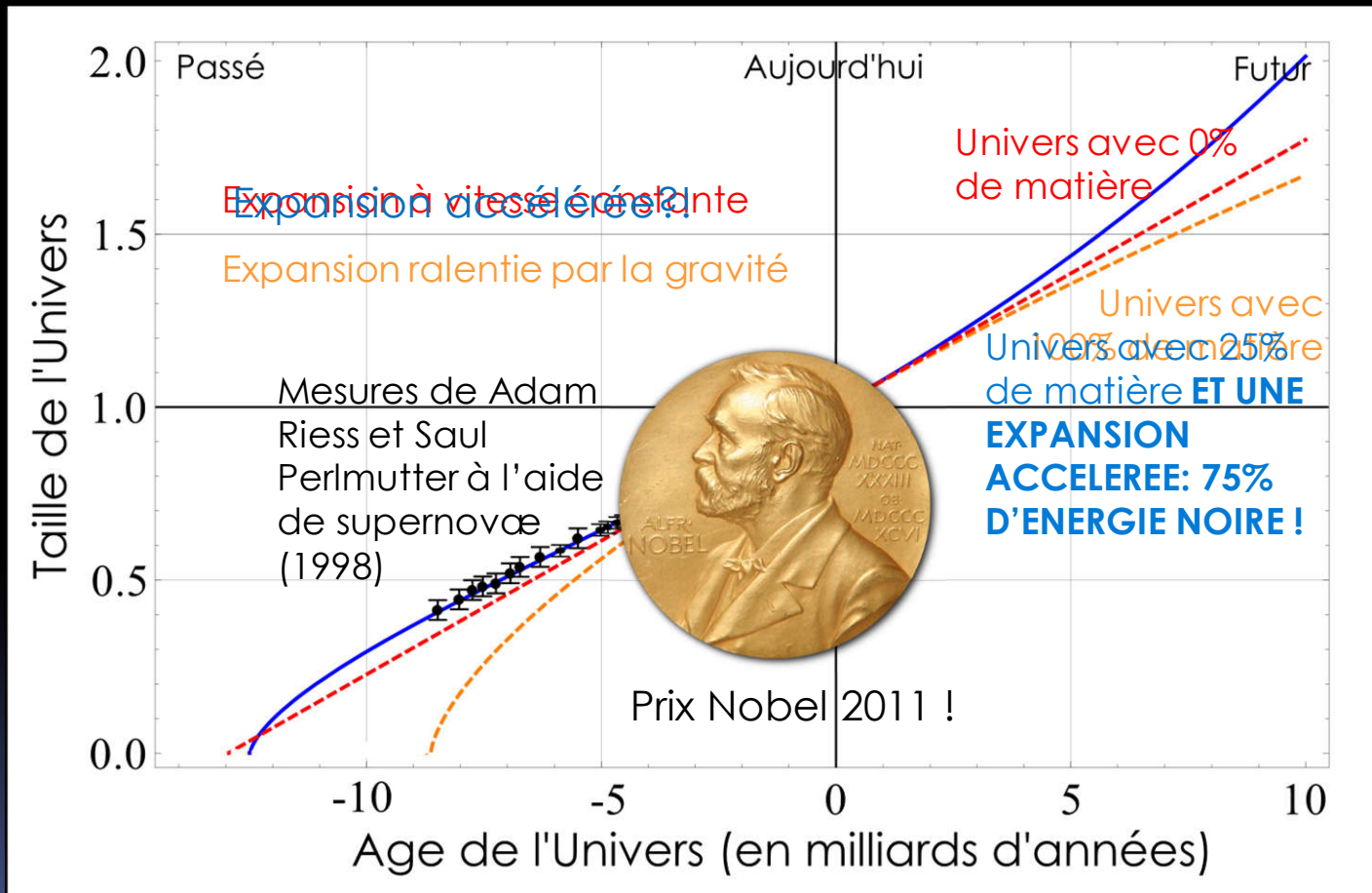


# La vitesse d'expansion de l'Univers

- A cause de la gravité, la vitesse d'expansion de l'Univers doit décroître avec le temps... **mesurons la** !
- Pour mesurer précisément la vitesse d'expansion de l'Univers au cours du temps, il faut observer des **objets de référence** le plus loin possible
- **Supernovæ de type Ia** (explosions d'étoile très lumineuses)



# La vitesse d'expansion de l'Univers



# La vitesse d'expansion de l'Univers

Mesures de Adam Riess et Saul Perlmutter à l'aide de supernovæ (1998)

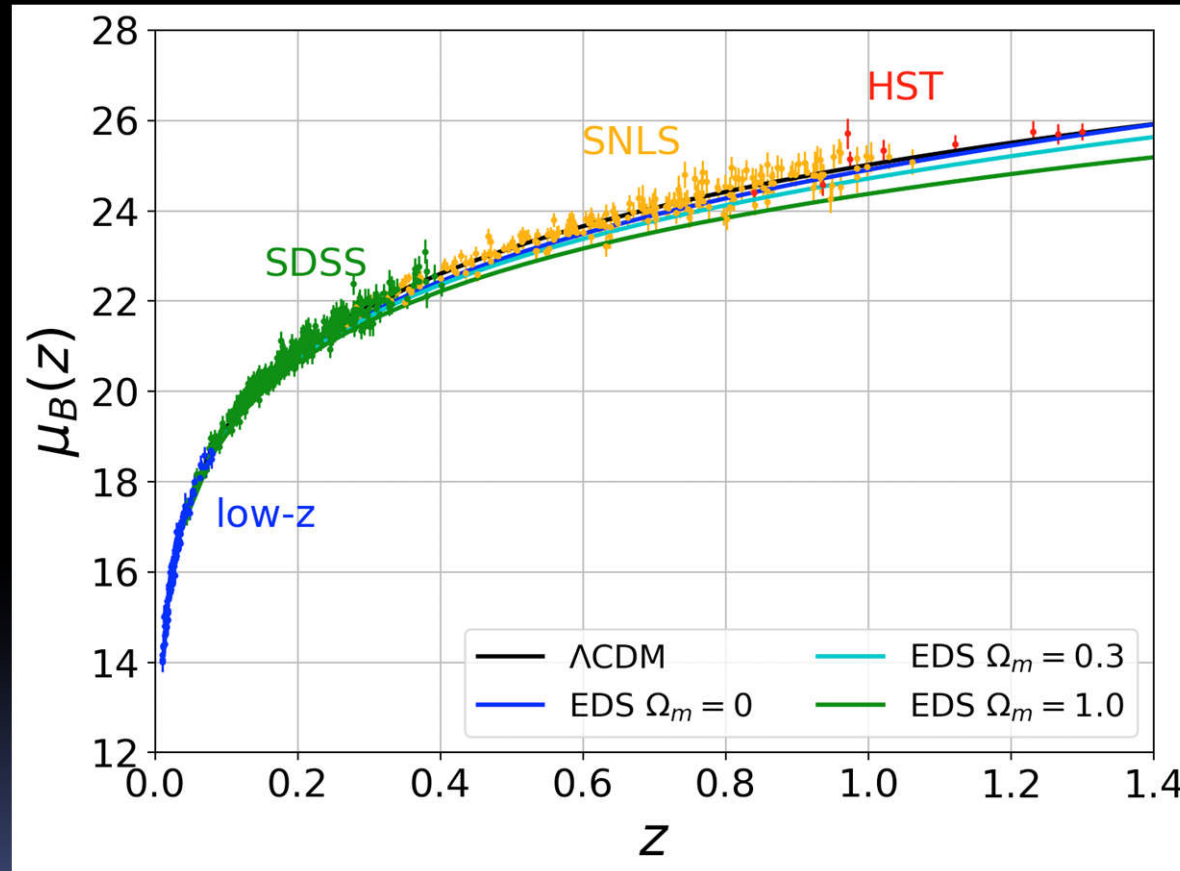


**Prix Nobel 2011**

**Univers avec 30% de matière ET UNE EXPANSION ACCELEREE :  
70% D'ENERGIE NOIRE !**

# La vitesse d'expansion de l'Univers

Mesures récentes avec les supernovae de type Ia (JLA, 2014)



**Univers sans énergie noire exclu !**

# L'énergie noire

- Bilan : l'énergie noire
  - **Accélère** l'expansion de l'Univers
  - Possède un rapport  **$w = \text{pression/densité} \sim -1$**  aujourd'hui
  - Et c'est tout ce qu'on sait...
- Quelle la **nature fondamentale** de l'énergie noire ?  
On ne sait toujours pas :
  - Énergie du vide ?
  - Propriété intrinsèque de l'Univers qui n'a pas d'explication ?
  - Quatrième dimension ?
  - Lois de la gravité fausses aux échelles de l'Univers ?
- On continue les recherches pour **mesurer précisément** l'accélération de l'expansion et trancher entre ces hypothèses... et c'est en partie le **rôle de LSST**



# Et la matière noire ?

- Les premiers indices de l'existence d'une matière obscure date des années 1930 en mesurant la **vitesse des galaxies dans les amas** :

$$\frac{\text{Masse mesurée par les vitesses}}{\text{Masse lumineuse}} \sim 400$$

- Confirmation après-guerre avec les **courbes de rotation des galaxies** :

$$\frac{\text{Masse mesurée par les vitesses}}{\text{Masse lumineuse}} \sim 12$$

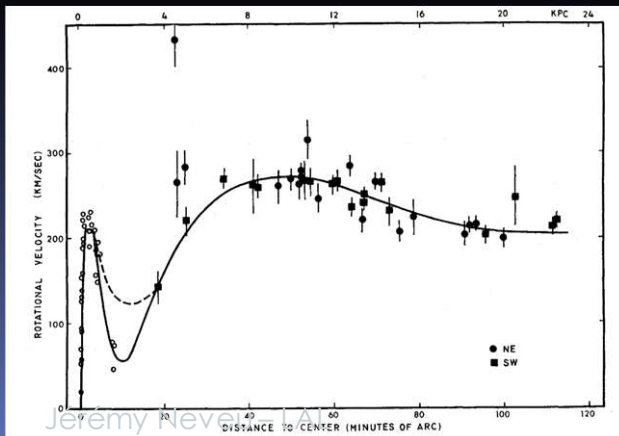
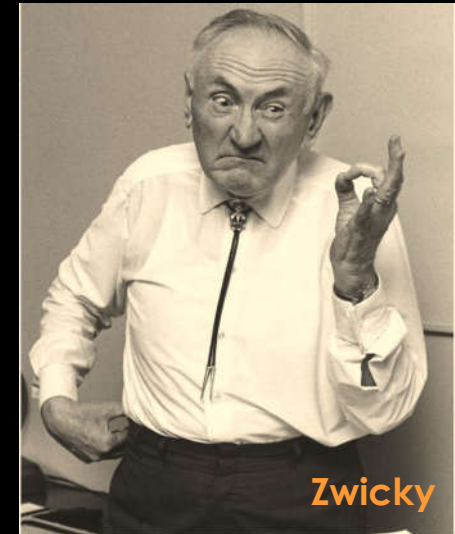


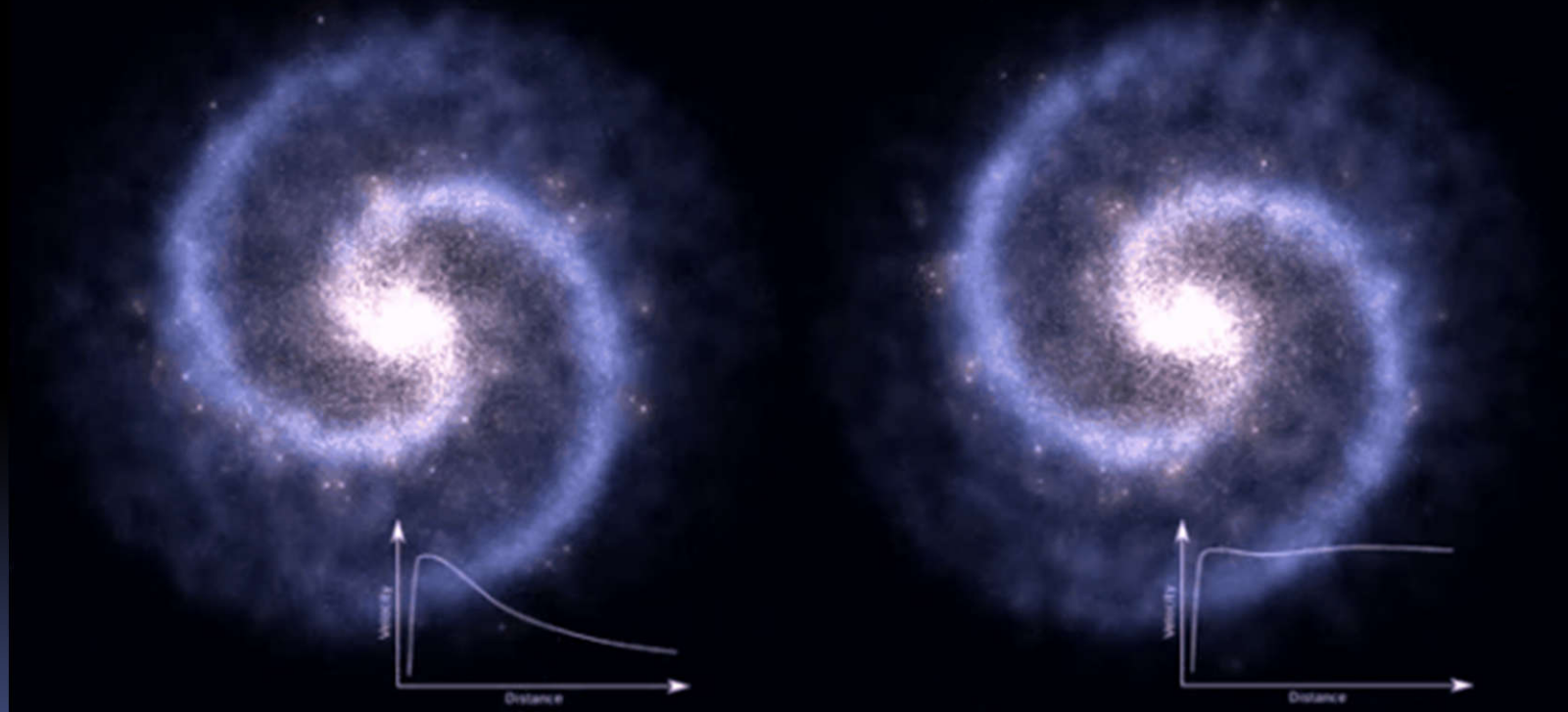
TABLE 5  
MASS-LUMINOSITY RATIOS FOR M31

$R$ (min. of arc) (1)	$R$ (kpc) (2)	$\int M$ to $R$ ( $10^{10} M_{\odot}$ ) (3)	$\int L$ to $R$ ( $10^{10} L_{\odot}$ ) (4)	$\int M/L$ to $R$ (5)
15. ....	3	$0.416 \pm 0.4^*$	0.42	$1.0 \pm 1^{\dagger}$
30. ....	6	$3.64 \pm 0.8$	0.64	$5.7 \pm 1$
45. ....	9	$8.73 \pm 0.9$	0.83	$10 \pm 1$
60. ....	12	$12.7 \pm 0.5$	0.99	$13 \pm 0.5$
90. ....	18	$15.9 \pm 1$	1.30	$12 \pm 0.8$
120. ....	24	$18.3 \pm 1$	1.37	$13 \pm 0.7$

# Et la matière noire ?

Sans matière noire

Avec matière noire



# Et la matière noire ?

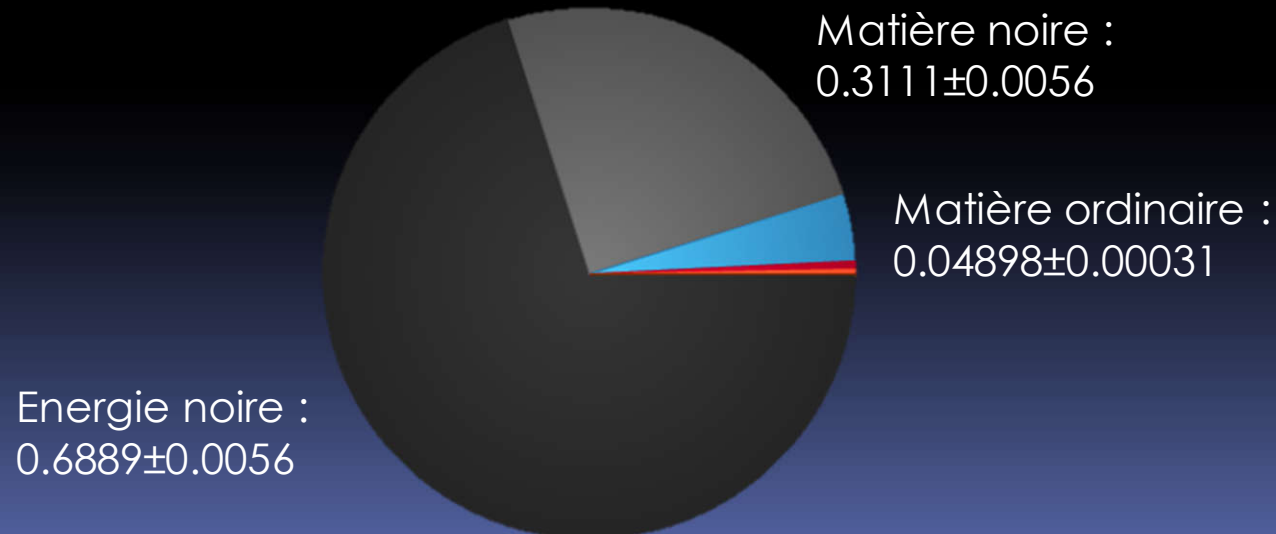
# Et la matière noire ?

- Bilan : la matière noire est
  - **Pesante** : elle a une action gravitationnelle
  - **Obscure** : aucune (ou très faible) interaction avec la matière et la lumière autre que gravitationnelle
- Quelle la **nature fondamentale** de la matière noire ?  
On ne sait toujours pas... non plus :
  - Nouvelles particules (WIMPs  $\sim 100 m_p$ , axions  $\sim 10^{-15} m_p$ ) ?
  - Trous noirs ( $\sim 30 M_\odot$ ) ?
  - Lois de la gravité fausses aux échelles galactiques (MOND) ?
- On continue les recherches pour **mesurer précisément** les propriétés de la matière noire... et c'est aussi en partie le **rôle de LSST** !

# Statut des mesures actuelles

- Résultats de la collaboration Planck (2018) :

Parameter	Plik best fit	Plik [1]	CamSpec [2]	([2] - [1])/σ <sub>1</sub>	Combined
$\Omega_b h^2$ .....	0.022383	$0.02237 \pm 0.00015$	$0.02229 \pm 0.00015$	-0.5	$0.02233 \pm 0.00015$
$\Omega_c h^2$ .....	0.12011	$0.1200 \pm 0.0012$	$0.1197 \pm 0.0012$	-0.3	$0.1198 \pm 0.0012$
$100\theta_{MC}$ .....	1.040909	$1.04092 \pm 0.00031$	$1.04087 \pm 0.00031$	-0.2	$1.04089 \pm 0.00031$
$\tau$ .....	0.0543	$0.0544 \pm 0.0073$	$0.0536^{+0.0069}_{-0.0077}$	-0.1	$0.0540 \pm 0.0074$
$\ln(10^{10} A_s)$ .....	3.0448	$3.044 \pm 0.014$	$3.041 \pm 0.015$	-0.3	$3.043 \pm 0.014$
$n_s$ .....	0.96605	$0.9649 \pm 0.0042$	$0.9656 \pm 0.0042$	+0.2	$0.9652 \pm 0.0042$

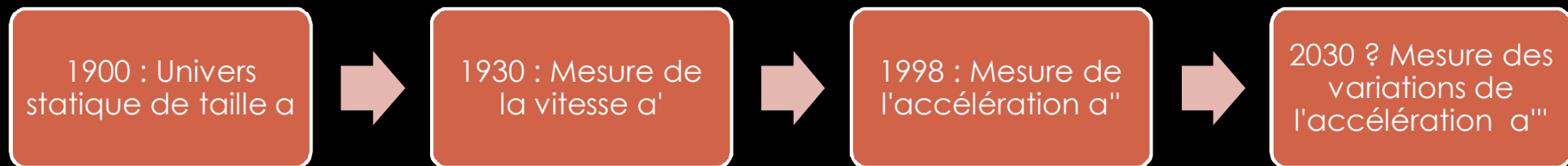




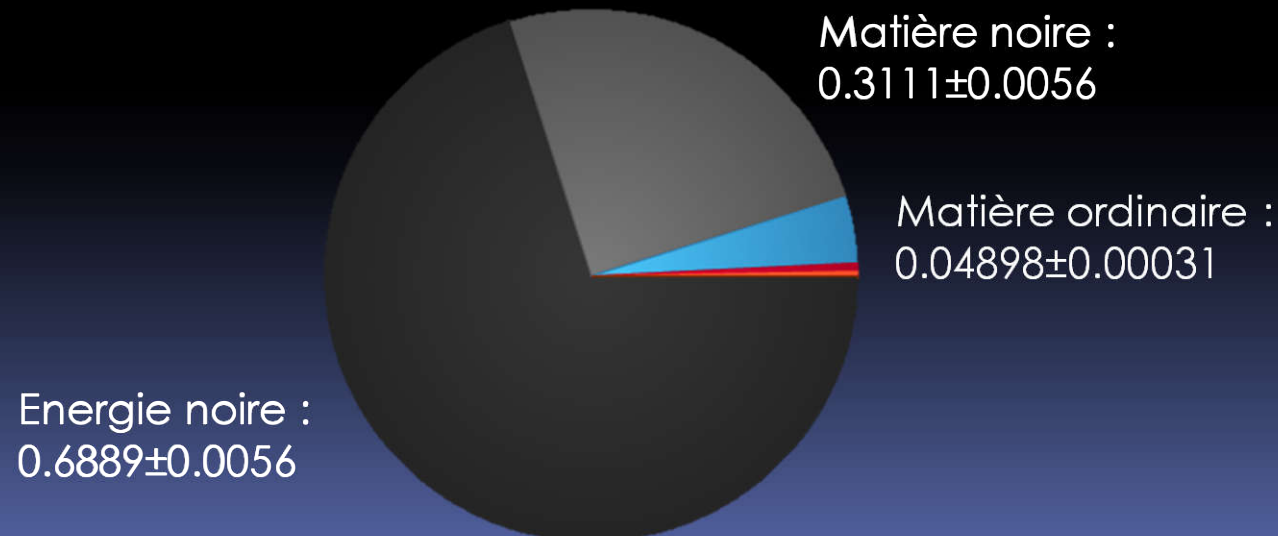
# Statut des mesures actuelles

- Pour aller au delà :

- Mesure des **variations d'accélération** de l'expansion de l'Univers



- **Cartographie exhaustive** de la présence de matière noire dans l'Univers observable → The Dark Matter Telescope → **LSST**



Un télescope robotique pour arpenter l'Univers

# LE TÉLESCOPE LSST

# Le télescope LSST

## *Large Survey Synoptic Telescope*

- Proposition précurseure de J.A. Tyson en 2000

### The Dark Matter Telescope

J. Anthony Tyson<sup>1</sup>, David M. Wittman<sup>1</sup>, and J. Roger P. Angel<sup>2</sup>

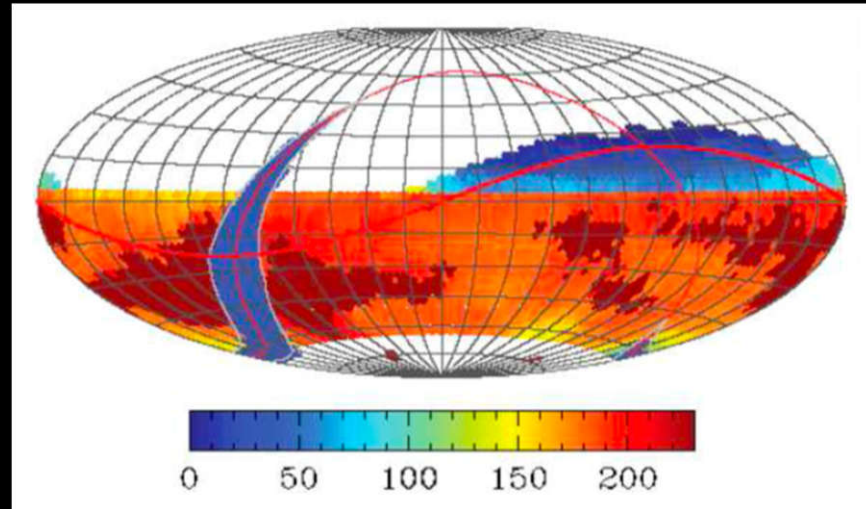
<sup>1</sup> Bell Labs, Lucent Technologies, Murray Hill, NJ 07979, USA

<sup>2</sup> Steward Observatory, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721, USA

**Abstract.** Weak gravitational lensing enables direct reconstruction of dark matter maps over cosmologically significant volumes. This research is currently telescope-limited. The Dark Matter Telescope (DMT) is a proposed 8.4 m telescope with a  $3^\circ$  field of view, with an etendue of  $260 \text{ m}^2 \text{ deg}^2$ , ten times greater than any other current or planned telescope. With its large etendue and dedicated observational mode, the DMT fills a nearly unexplored region of parameter space and enables projects that would take decades on current facilities. The DMT will be able to reach  $10\sigma$  limiting magnitudes of 27-28 magnitude in the wavelength range  $.3 - 1 \mu\text{m}$  over a  $7 \text{ deg}^2$  field in 3 nights of dark time. Here we review its unique weak lensing cosmology capabilities and the design that enables those capabilities.

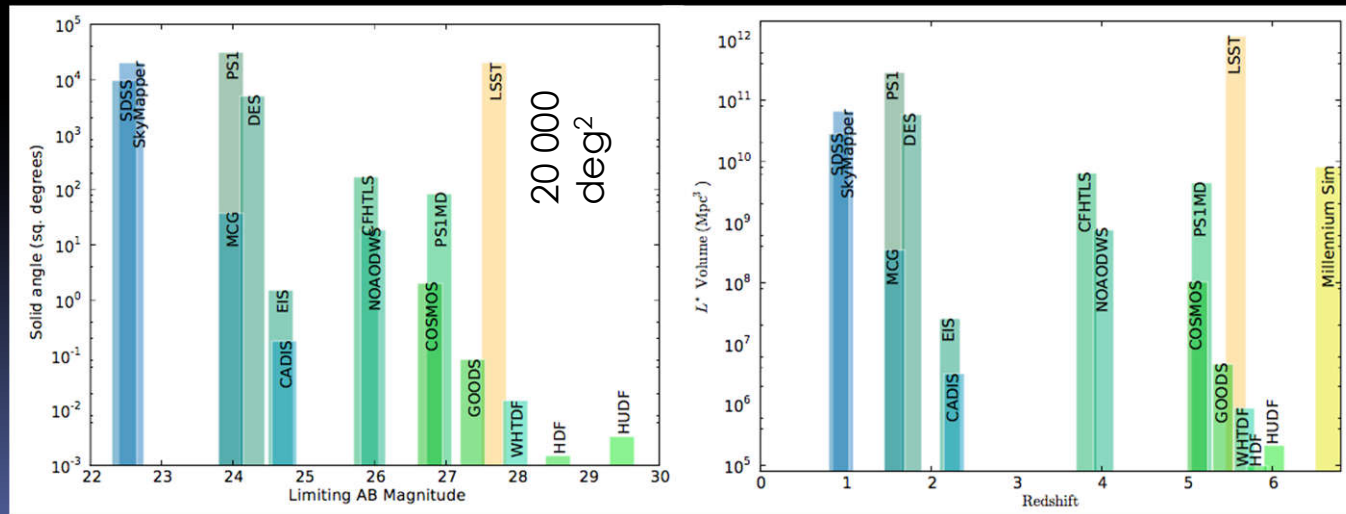
# Le télescope LSST

- Large :
  - Tout le ciel austral observe en **3-4 nuits**
  - Jusqu'à une magnitude (brillance)  **$r < 27.5$**



Nombre requis de visite dans la bande r

Environ 1000 visites par region du ciel



# Le télescope LSST



10<sup>0</sup> 22 23 24 25 26 27 28 29 30  
Limiting AB Magnitude

10<sup>0</sup> 0 1 2 3 4 5 6  
Redshift



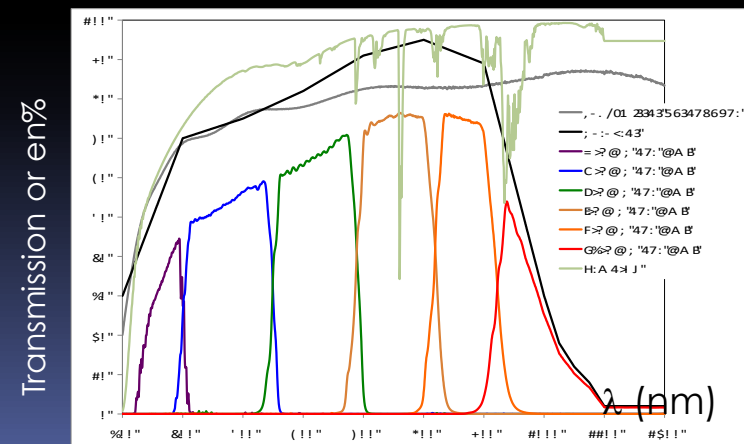
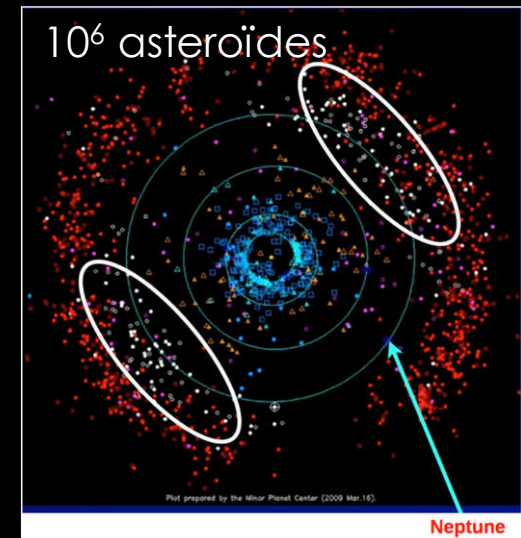
# Le télescope LSST

## ■ Synoptic :

- “Avoir une **vue d'ensemble** des différentes composantes d'un objet”
- Instrument **multi-sondes** avec de multiples objectifs scientifiques
- 6 filtres large bande ( $350 < \lambda < 1200\text{nm}$ )
- Résolution temporelle de  $\sim 4$  jours



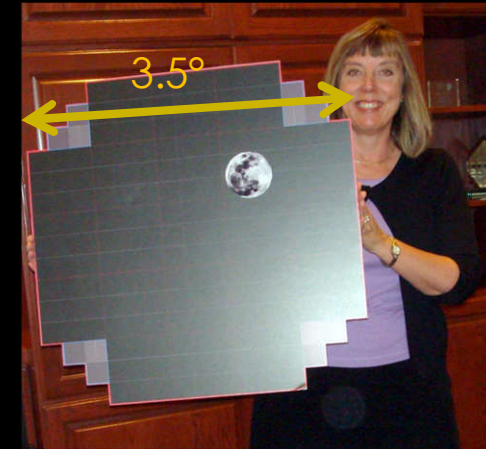
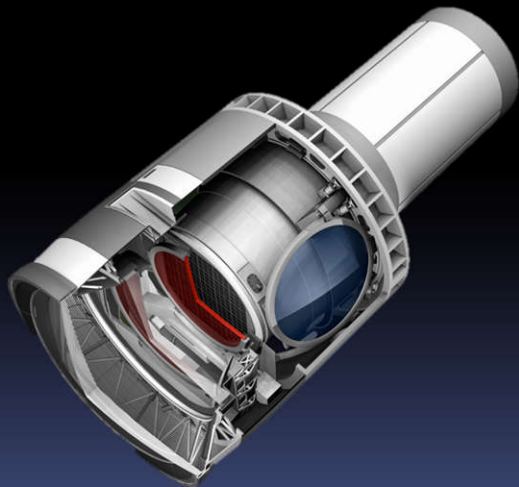
Jérémy Neveu – LAL



# Le télescope LSST

## ■ Survey :

- Caméra grand champ de **3.2 Gpix**
- Entièrement automatisé
- Quantité astronomique de **données**

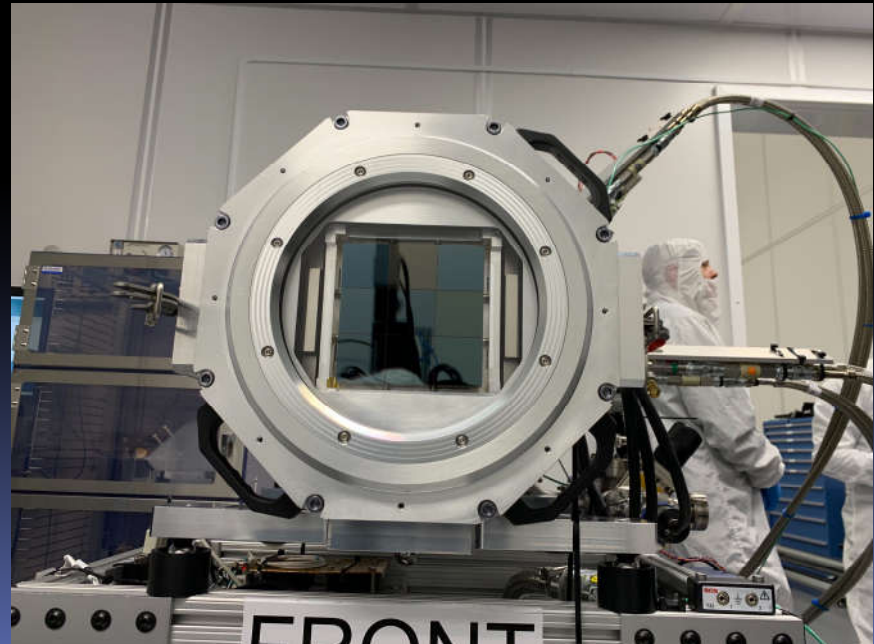
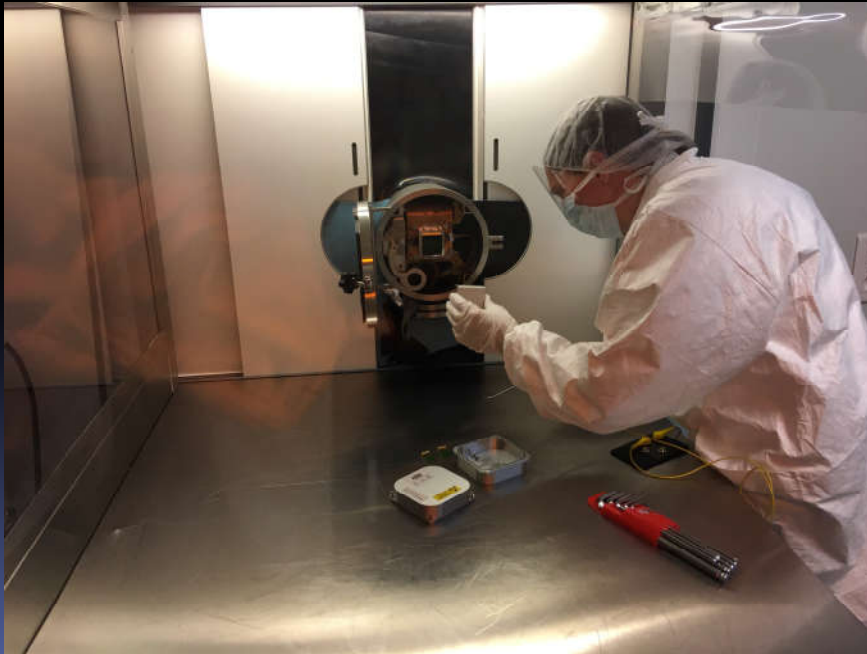
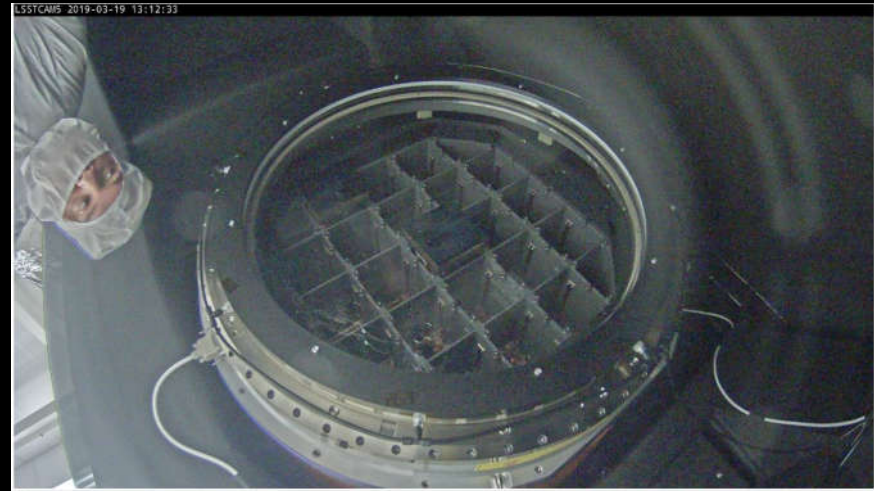


X 189 pour 1 image  
= 15 TB/nuit  
= **500 PB en 10 ans**  
**+100 PB de catalogue**



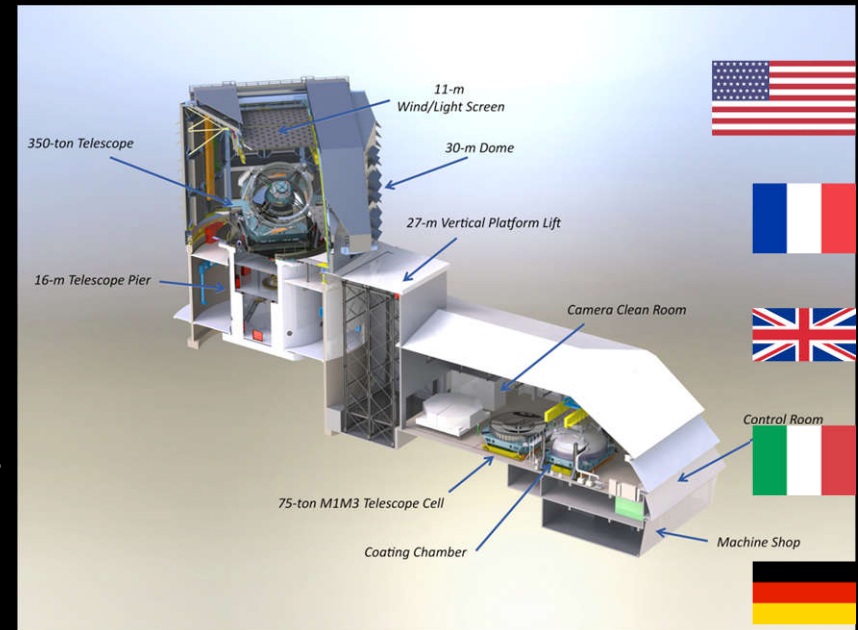
# Le télescope LSST

- Les 189 CCDs :
  - 4k x 4k pixels  $10\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$
  - 100 000 \$ pièce
  - Regroupés en raft de 9 CCDs
  - Lus en parallèle en 2 s



# Le télescope LSST

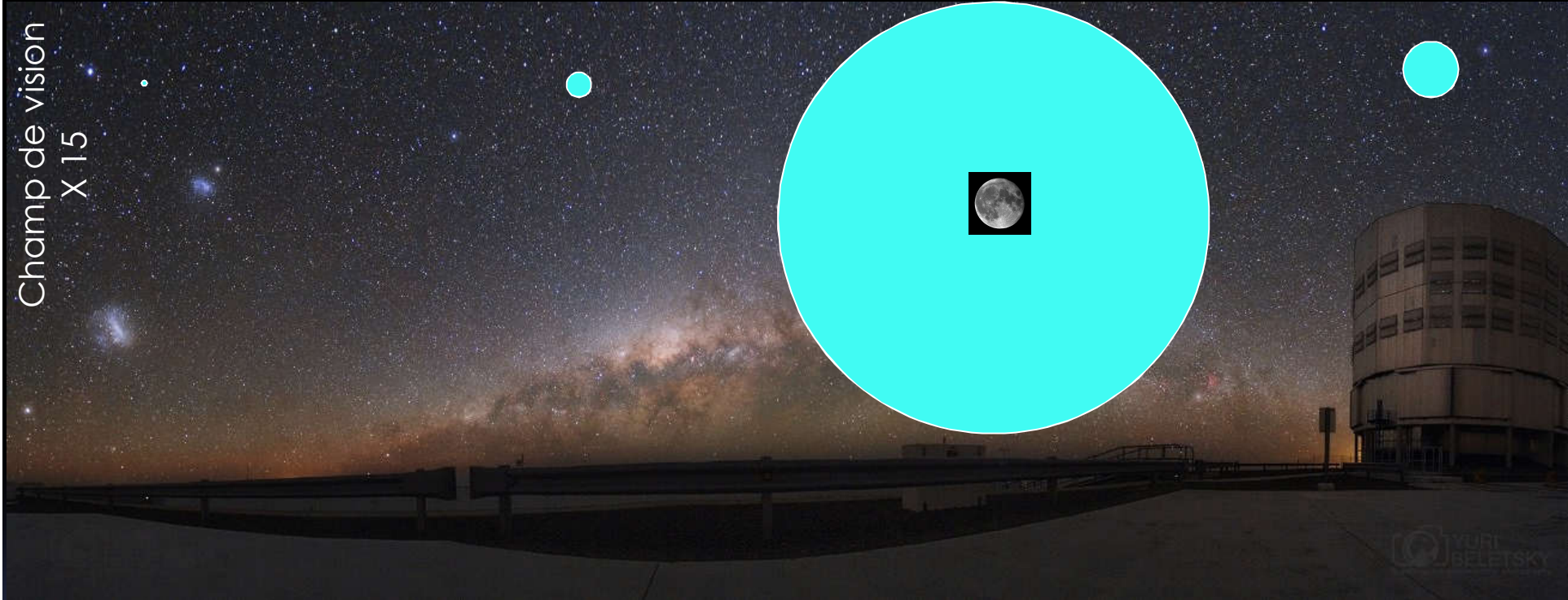
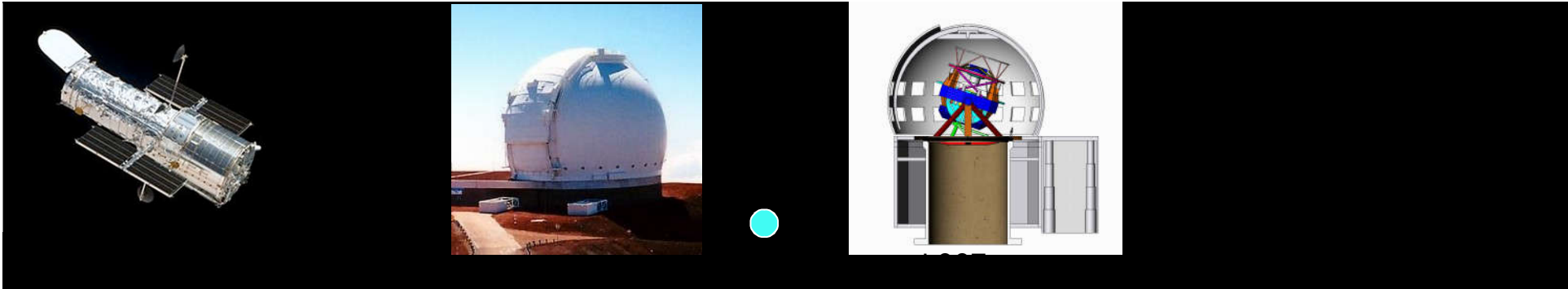
- **T**élescope :
  - En construction au **Chili**
  - **8.4m** de diamètre
  - Formule optique compacte  $f/D \sim 1$
  - **10 années** de fonctionnement financées



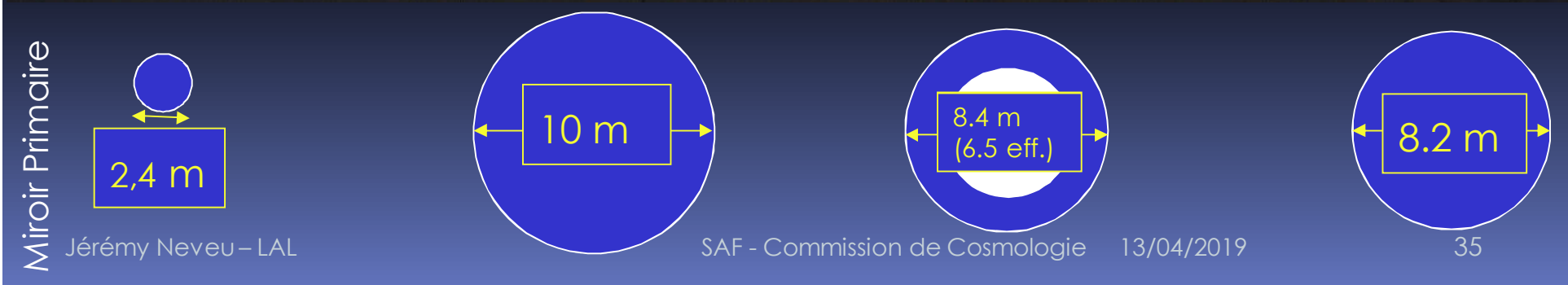
# Le télescope LSST







Champ de vision  
X 15



Miroir Primaire

Jérémy Neveu - LAL

SAF - Commission de Cosmologie 13/04/2019

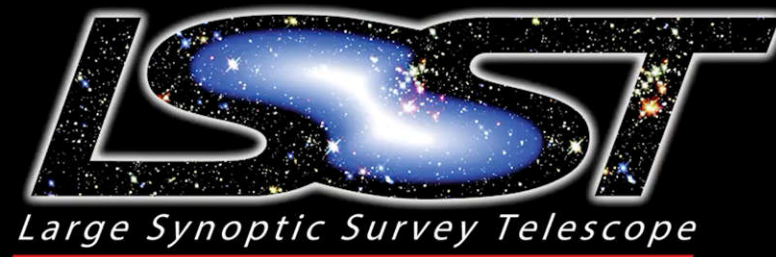
35

# Le télescope LSST



*Crédit : Gianluca Lombardi*

# Le télescope LSST





# Le télescope LSST

Chambre d'aluminage livrée  
au Cerro Pachon 01/2019



Départ des miroirs M1M3 pour  
le Chili 26/03/2019




# Le télescope LSST

Réunion de collaboration 02/2019 à UC Berkeley



# Le télescope LSST : timeline



Future milestones		Completion date
First calibration data from Auxiliary Telescope		August 2019
First on-sky and calibration images with ComCam		February 2020
First on-sky and calibration images with Camera+Telescope		November 2020
Start Science Verification mini-Surveys		March 2021
Start of the Science Program		November 2022

Traquer l'énergie noire et la matière noire

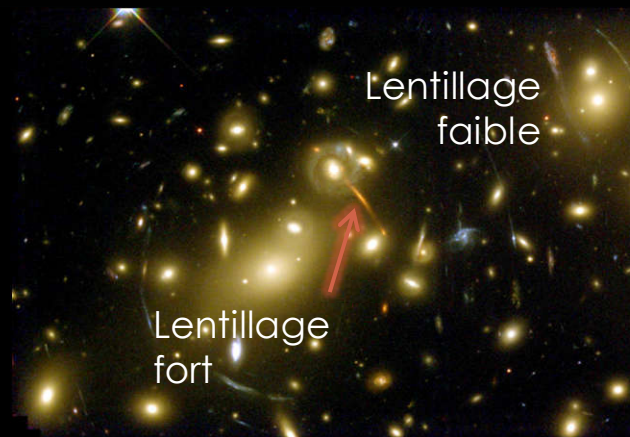
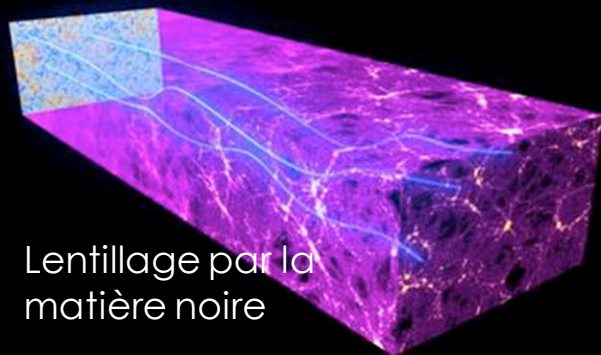
# LA COSMOLOGIE AVEC LSST

# La cosmologie avec LSST

- Contraindre l'équation d'état de l'énergie noire
- Contraindre et cartographier la matière noire
- Instrument multi-sondes:
  - Répartition des grandes structures, lentillage gravitationnel, supernovae
  - Corrélations croisées entre sondes

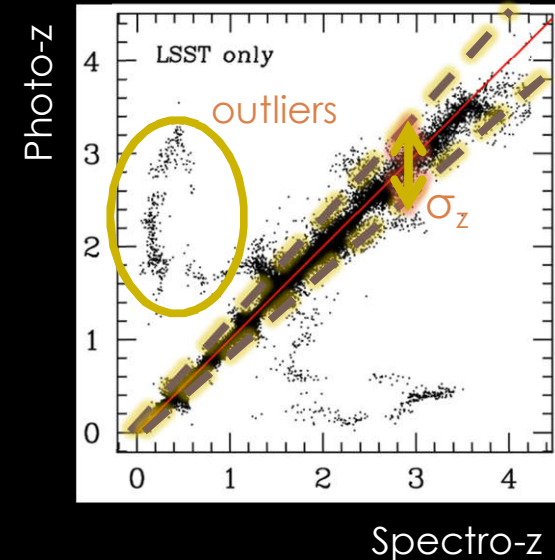
$$w = \frac{p}{\rho} \approx -1$$

$$w = w_0 + w_a \frac{z}{1+z}$$

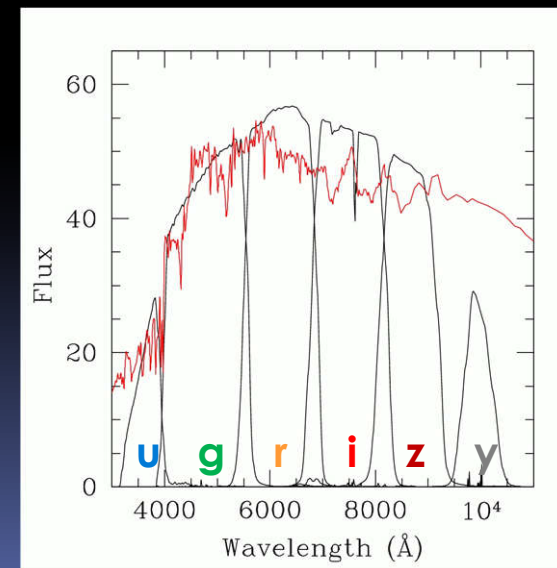


# Photometric redshifts

- **Éléments essentiels** pour toutes les sondes cosmologiques :
  - Estimation du redshift sans spectroscopie
  - Avec les 6 filtres colorés de LSST et des modèles de spectre de galaxies
  - La balance des couleurs renseigne sur le redshift
- **Performances requises :**
  - $\sigma_z/(1+z) < 0.05$  avec un objectif à 0.02
  - Fraction des outliers à  $3\sigma$  sous les 10% à tout  $z$
  - Biais sur le redshift  $< 0.003$
- Nécessité d'avoir un relevé spectroscopique complémentaire pour contraindre la relation couleur-redshift
- **Étalonnage photométrique au mmag :**
  - Prise en compte de la transmission atmosphérique en temps réel
  - Utilisation du catalogue d'étoiles de Gaia ?



[Jain et al., arXiv:1501.07897]

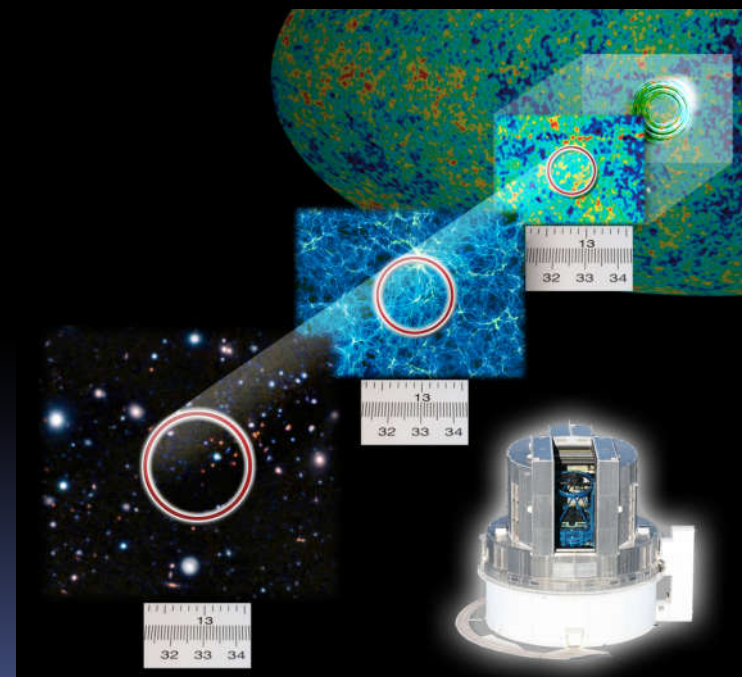
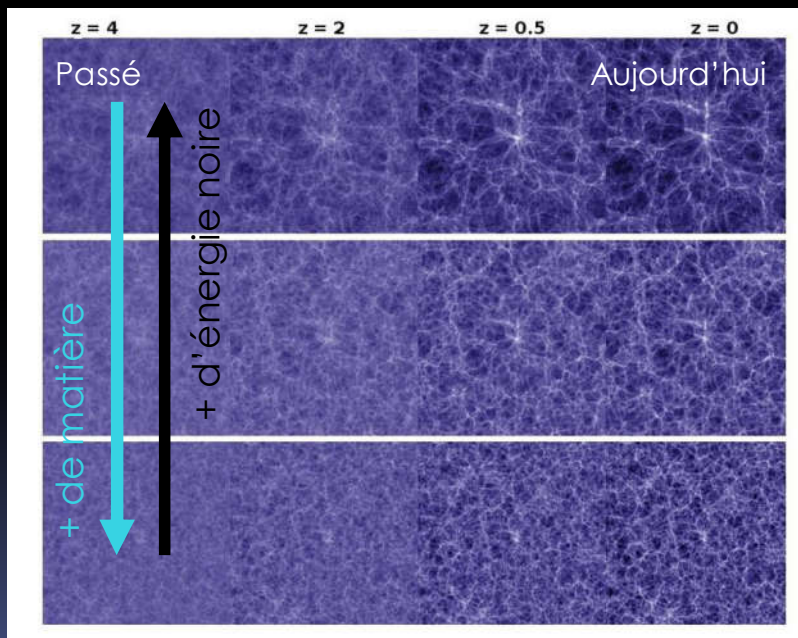




# Distribution des grandes structures

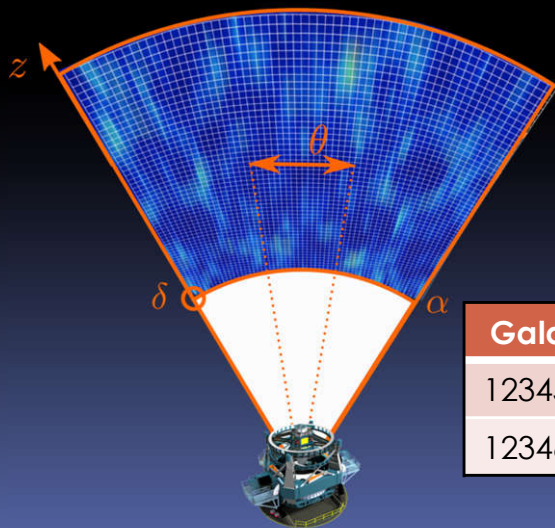
- La **répartition statistique** des galaxies renseigne sur l'équilibre entre la force attractive de la gravité et la force répulsive de l'énergie noire
- Echelle de distance caractéristique entre galaxies : les **oscillations acoustiques de baryons (BAO)** → **référence de longueur**

[Angulo et al., (2008)]

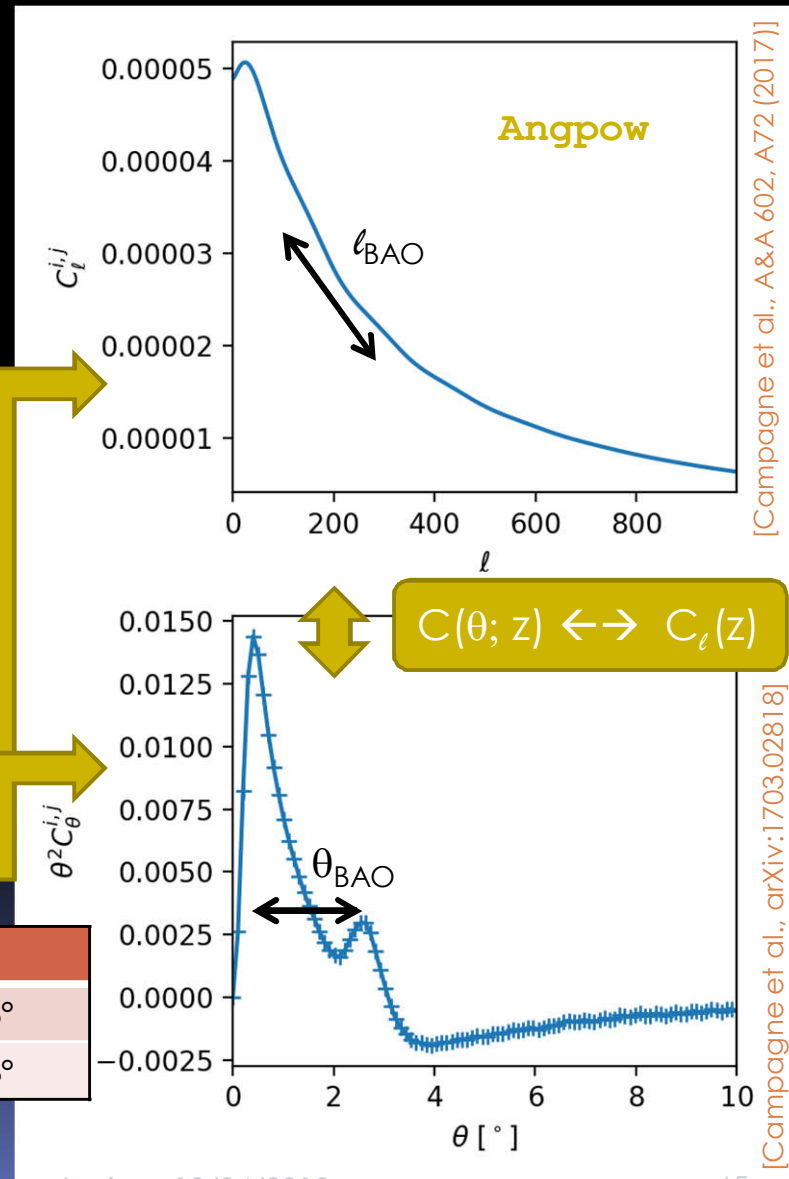


# Distribution des grandes structures

- L'information en distance est « **floutée** » à cause de l'imprécision des redshifts photométriques
- Plus pratique d'utiliser la **géométrie sphérique** : statistiques dans des sphères
  - Fonctions d'angles sur le ciel
  - Répartition en coquilles sphériques par redshift
- Code **Angpow** pour calculer ces observables <https://gitlab.in2p3.fr/campagne/AngPow>



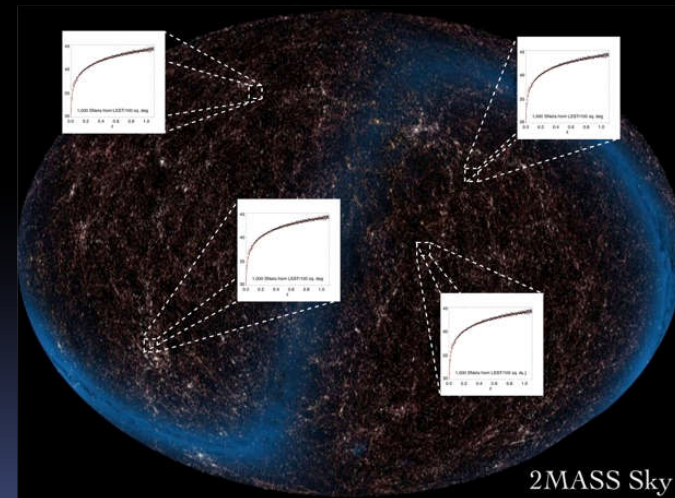
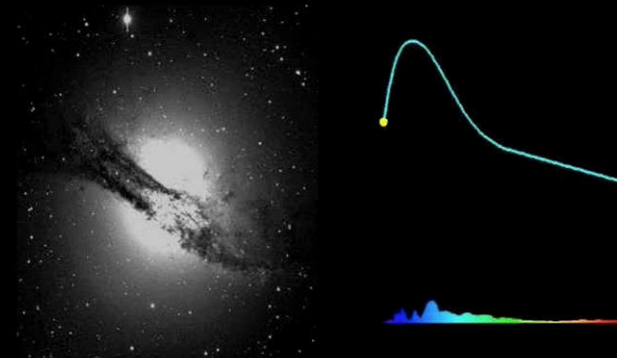
Galaxy	z	$\alpha$	$\delta$
12345	1.01	-42.22°	-73.56°
12346	0.57	10.49°	-52.08°
...			





# Supernovae de type Ia

- Avec LSST :  **$10^6$  supernovae** attendues,  $10^5$  suffisamment bien mesurées pour les études cosmologiques
  - Seule une petite fraction auront été observées avec un spectroscopie
- Tests d'homogénéité et d'isotropie de l'Univers
- Etudes détaillées de l'influence de la **galaxie hôte** et de l'évolution des supernovae avec le redshift
- BAO de supernovae ?



# Supernovae de type Ia

Day 000



# Lentillage gravitationnel



[www.spacetelescope.org](http://www.spacetelescope.org)

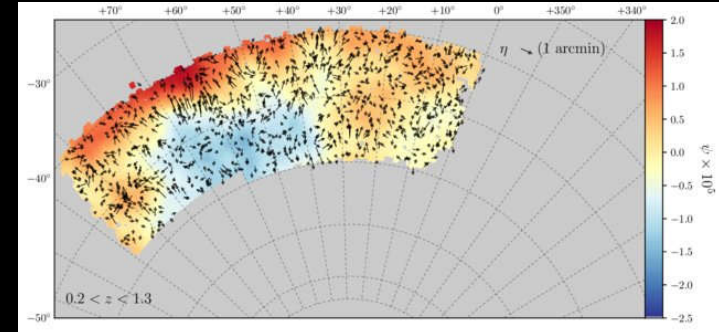
# Weak lensing



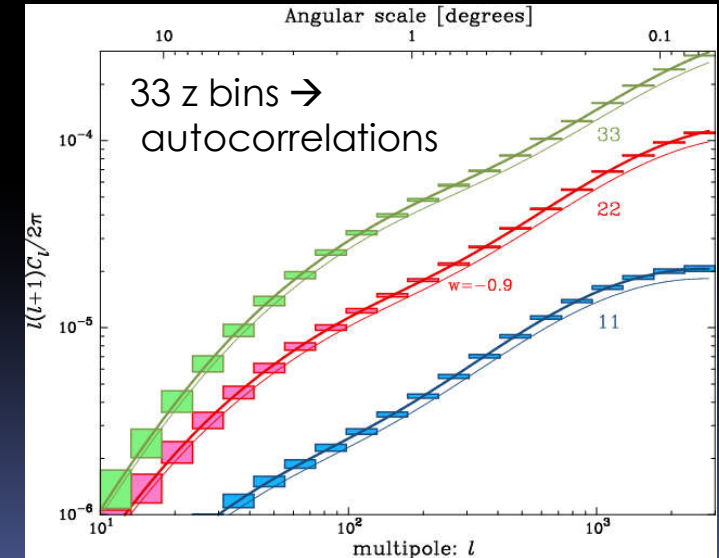
[www.spacetelescope.org](http://www.spacetelescope.org)

# Lentillage faible

- **Plusieurs possibilités complémentaires :**
  - Lentillage galaxie-galaxie : mesure directe des halos de matière noire
  - Amas de galaxies : tests de la gravitation
  - Lentillage : cisaillement et magnification
- **Cartes de cisaillement :**
  - Corrélations entre cartes pour différentes couches en redshift → **tomographie de l'Univers gravitationnel**
  - Contrôle des erreurs de mesure
- Principales difficultés :
  - PSF: biais, variation avec la longueur d'onde
  - Séparation étoile/galaxie
  - Estimation des redshifts photométriques

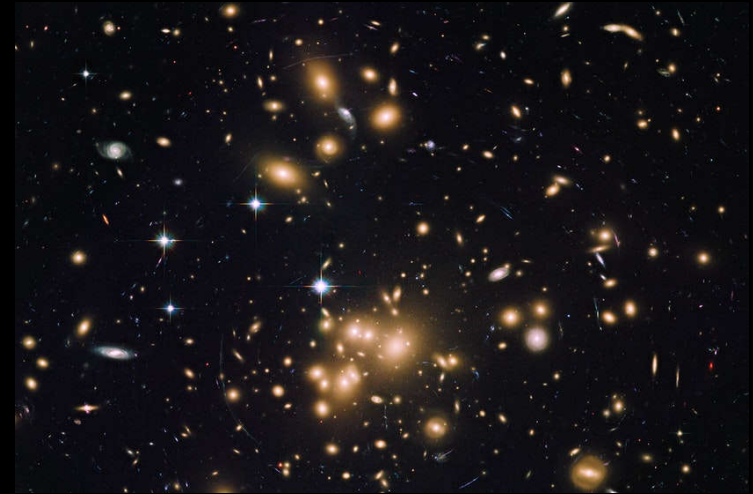


DES Y1 data – lensing potential  $0.2 < z < 1.3$



# Autres sondes cosmologiques

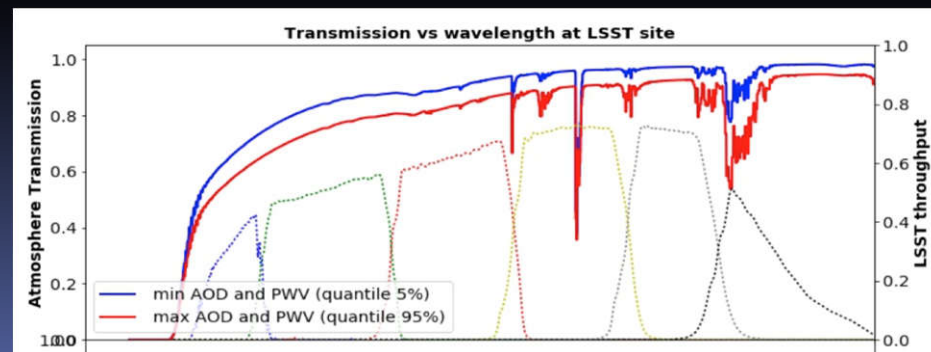
- Amas de galaxies :
  - Comptage des amas
  - Distribution des amas
  - Profils de densité
  
- Lentillage gravitationnel fort :
  - Mesure de distances
  - Mesure de la constante de Hubble  $H_0$





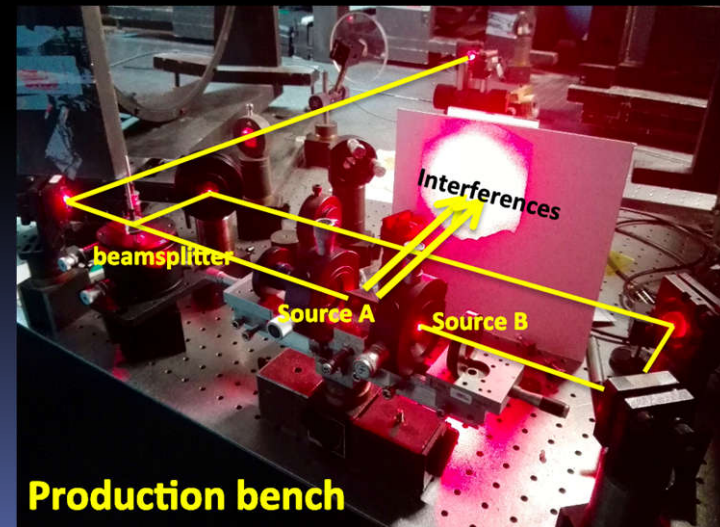
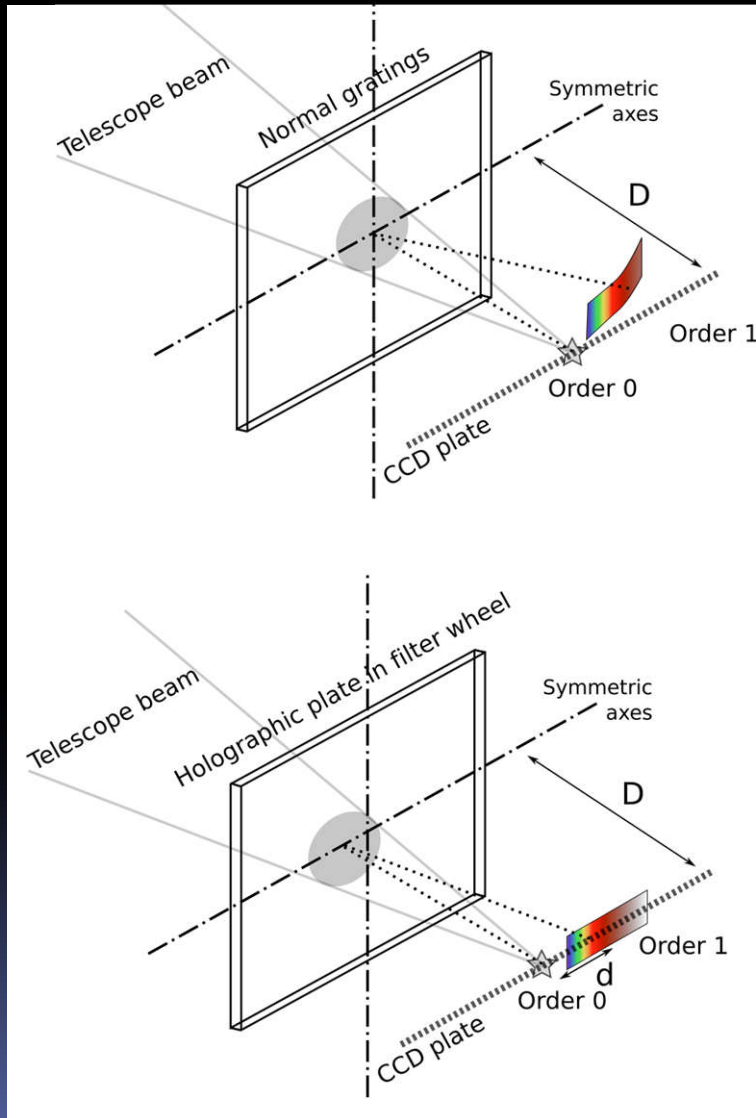
# Calibration : transmission atmosphérique

- Mesure en temps réel de la **transmission atmosphérique** avec un télescope auxiliaire
  - 1.2 m de diamètre,  $f/D=18$
  - Spectrographe sans fente
- **Méthode** : mesurer le spectre d'étoiles dont le spectre hors atmosphère est connu (télescope Hubble...) pour en déduire l'absorption atmosphérique
- **Inconvénient** : usage du spectrographe comme imageur → faisceau convergent
- **Solution** : des hologrammes !





# Calibration : transmission atmosphérique

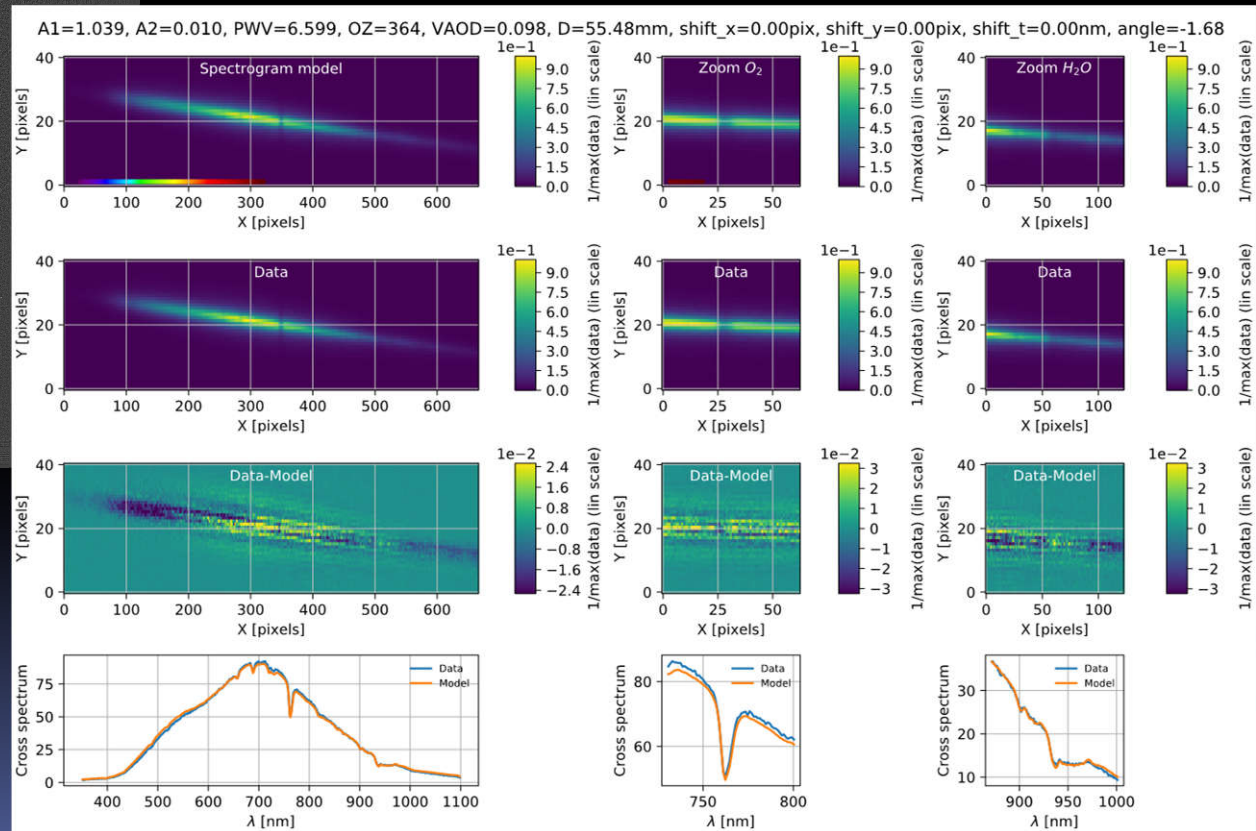
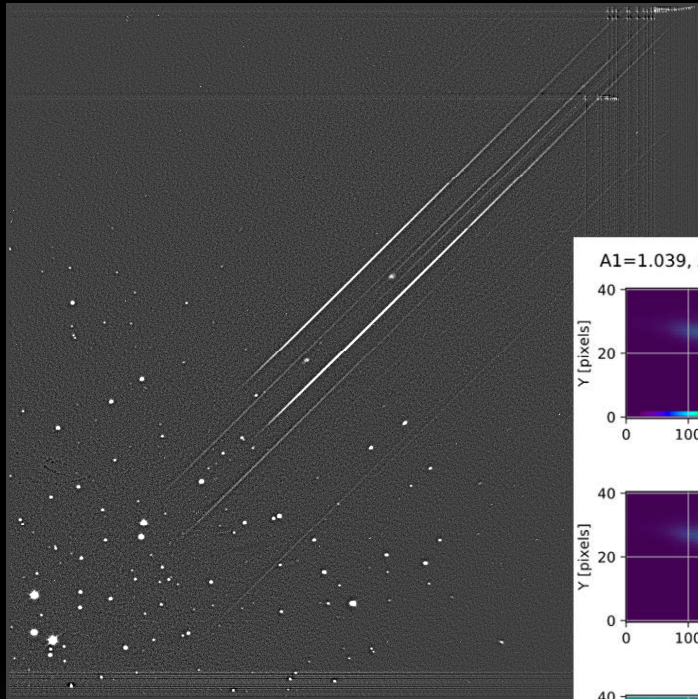


# Calibration : transmission atmosphérique



# Calibration : transmission atmosphérique

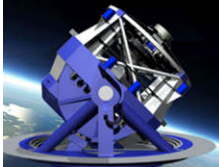
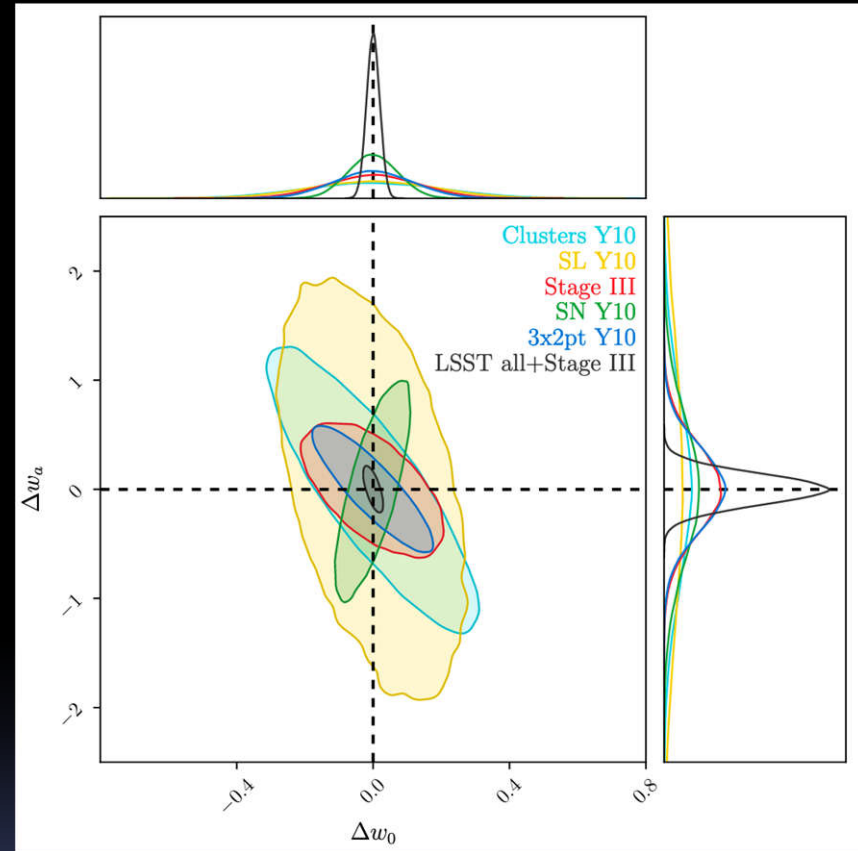
<https://github.com/LSSTDESC/Spectractor>





# Conclusions

- **LSST, un télescope ultime pour la cosmologie au sol ?**
  - Caméra CCD la plus grande possible
  - Multi-sondes
  - Très faibles erreurs sur les paramètres de l'équation d'état de l'énergie noire
- **Pour aller plus loin :**
  - Combinaison des données avec DESI, Euclid, Planck, ...
  - Un LSST2 équipé d'un spectromètre ?



$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left( \frac{M^2 R}{2} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 c_i L_i - L_{SM} \right)$$

$$L_1 = M^3 \pi, \quad L_2 = (\nabla_\mu \pi)(\nabla^\mu \pi)$$

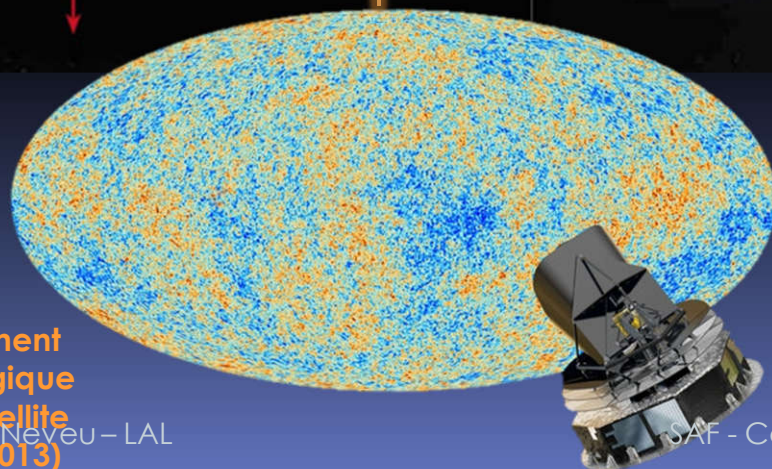
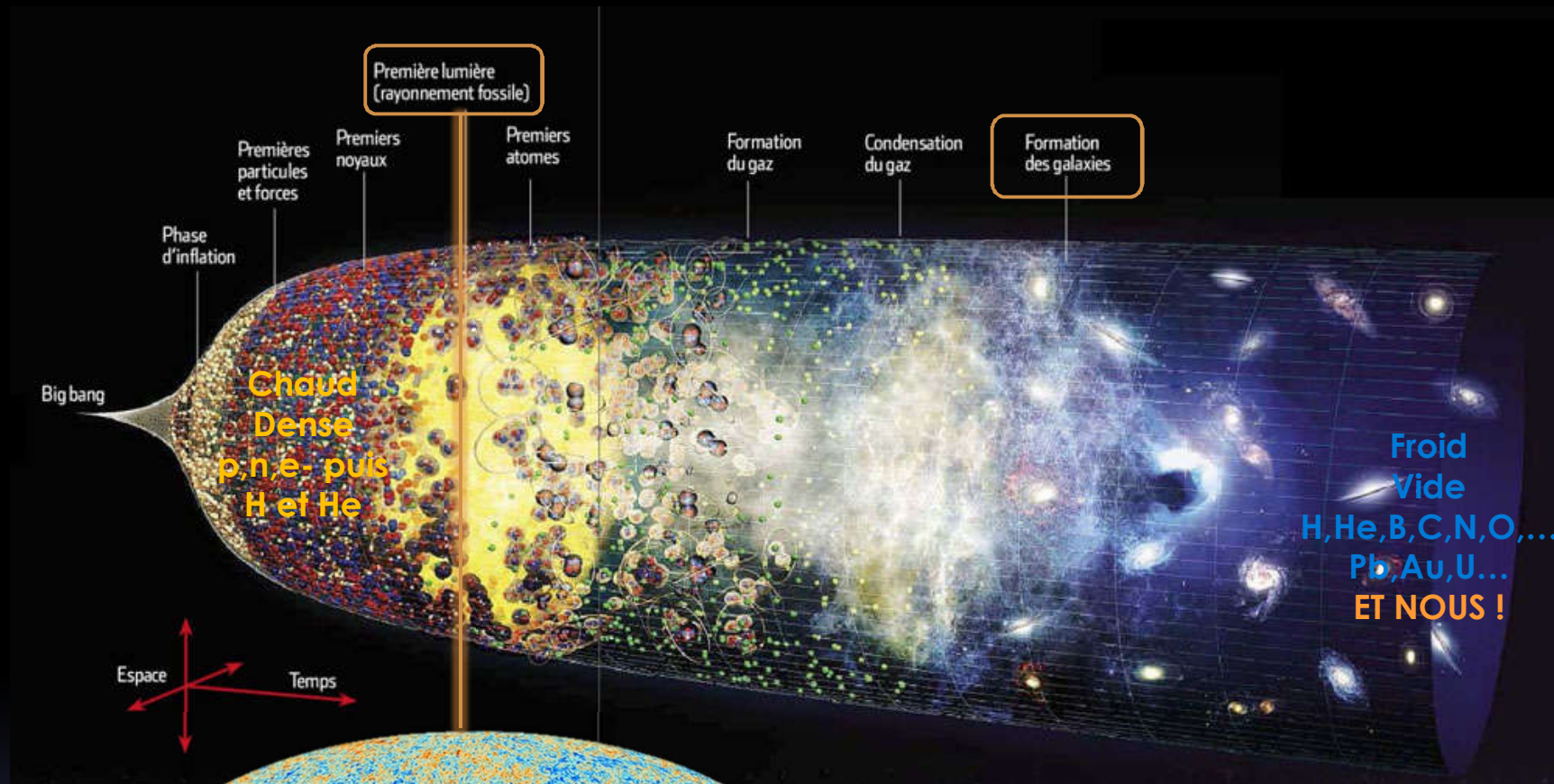
$$L_3 = (\square \pi)(\nabla_\mu \pi)(\nabla^\mu \pi) / M^3$$

$$L_4 = (\nabla_\mu \pi)(\nabla^\mu \pi) [2(\square \pi)^2 - 2\pi_{;\mu\nu}\pi^{;\mu\nu} - R(\nabla_\mu \pi)(\nabla^\mu \pi)/2] / M^6$$





# La Théorie du Big Bang



Carte du rayonnement cosmologique par le satellite Planck (2013)

Jeremy Neveu - LAL

Sur la carte de température, des points chauds et des points froids :  
**les germes des futures galaxies**

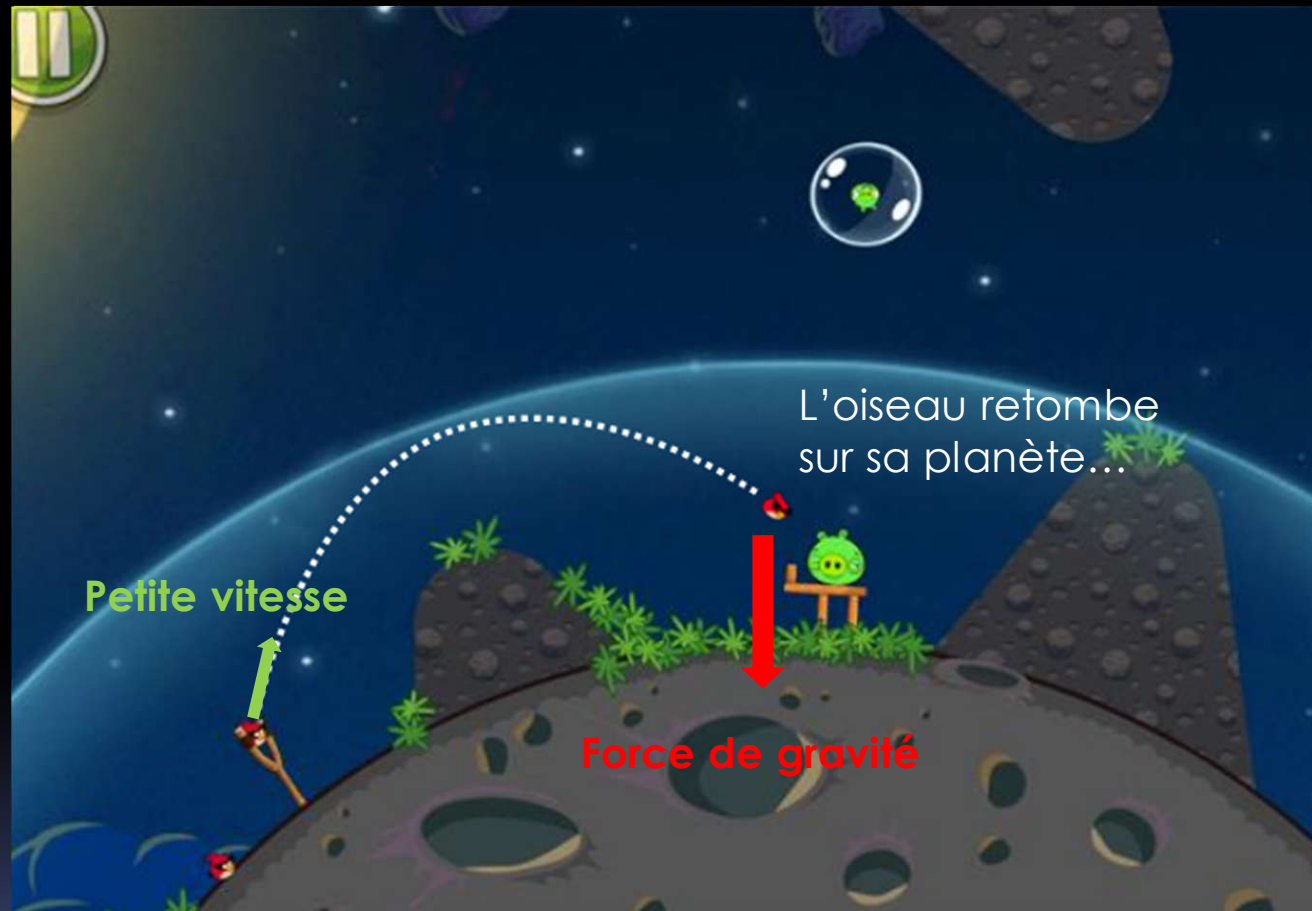


# La gravité c'est quoi ?

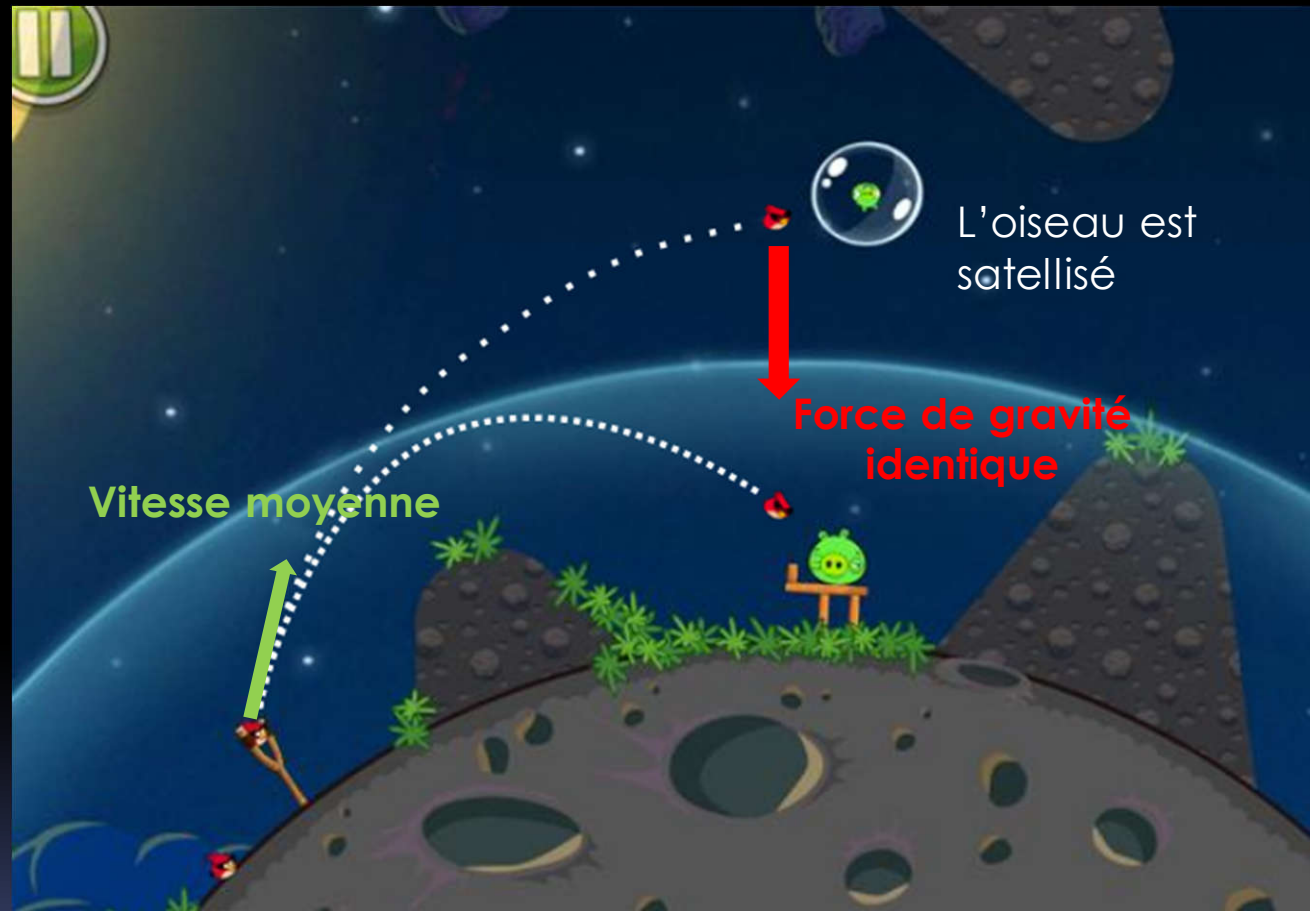
- Ces effets sont connus depuis longtemps sur Terre :
  - les objets tombent vers le sol
  - et nous aussi...



# Jouons un peu



# Jouons un peu

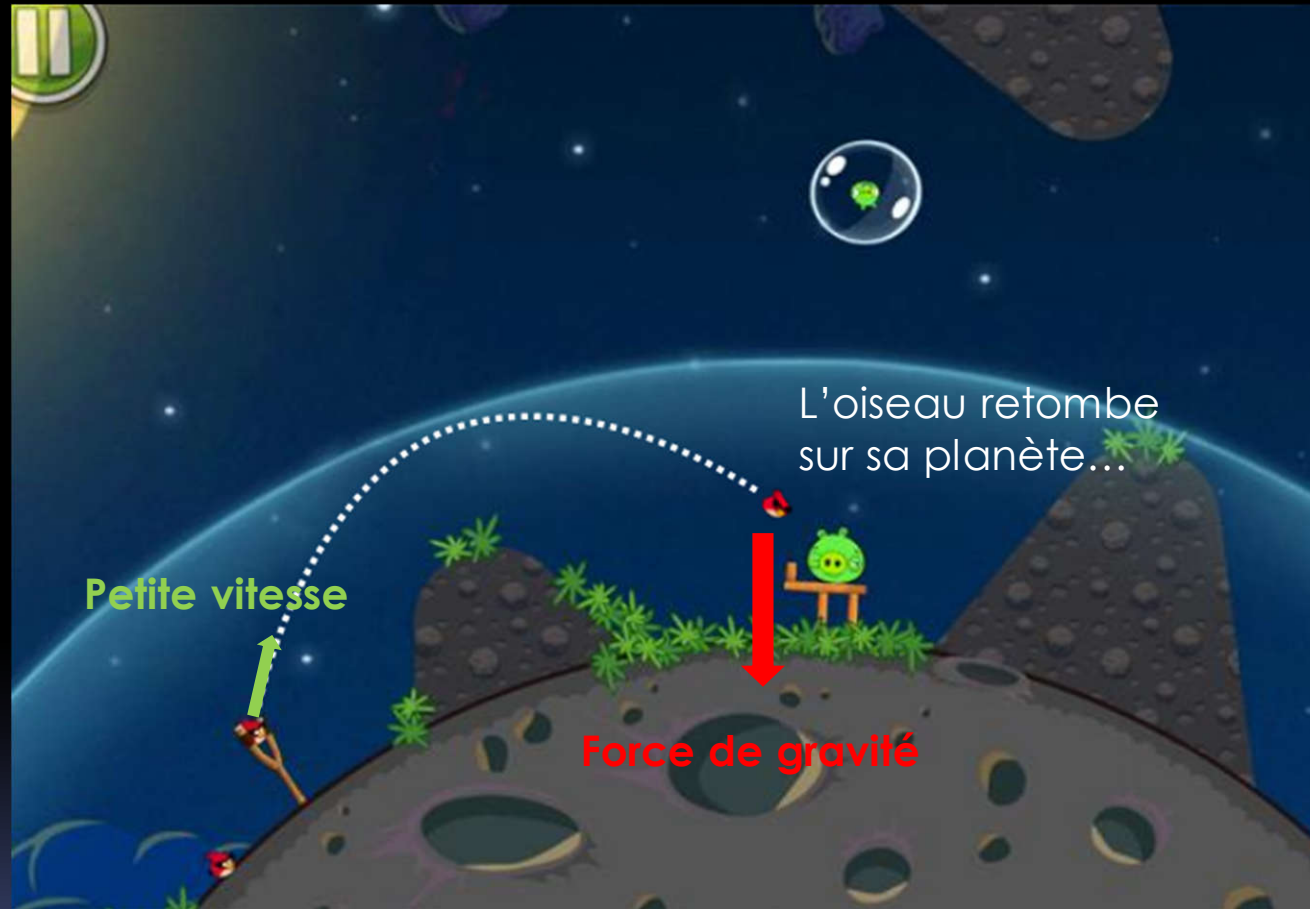


# Jouons un peu



**Changeons maintenant un autre paramètre : la masse de la planète**

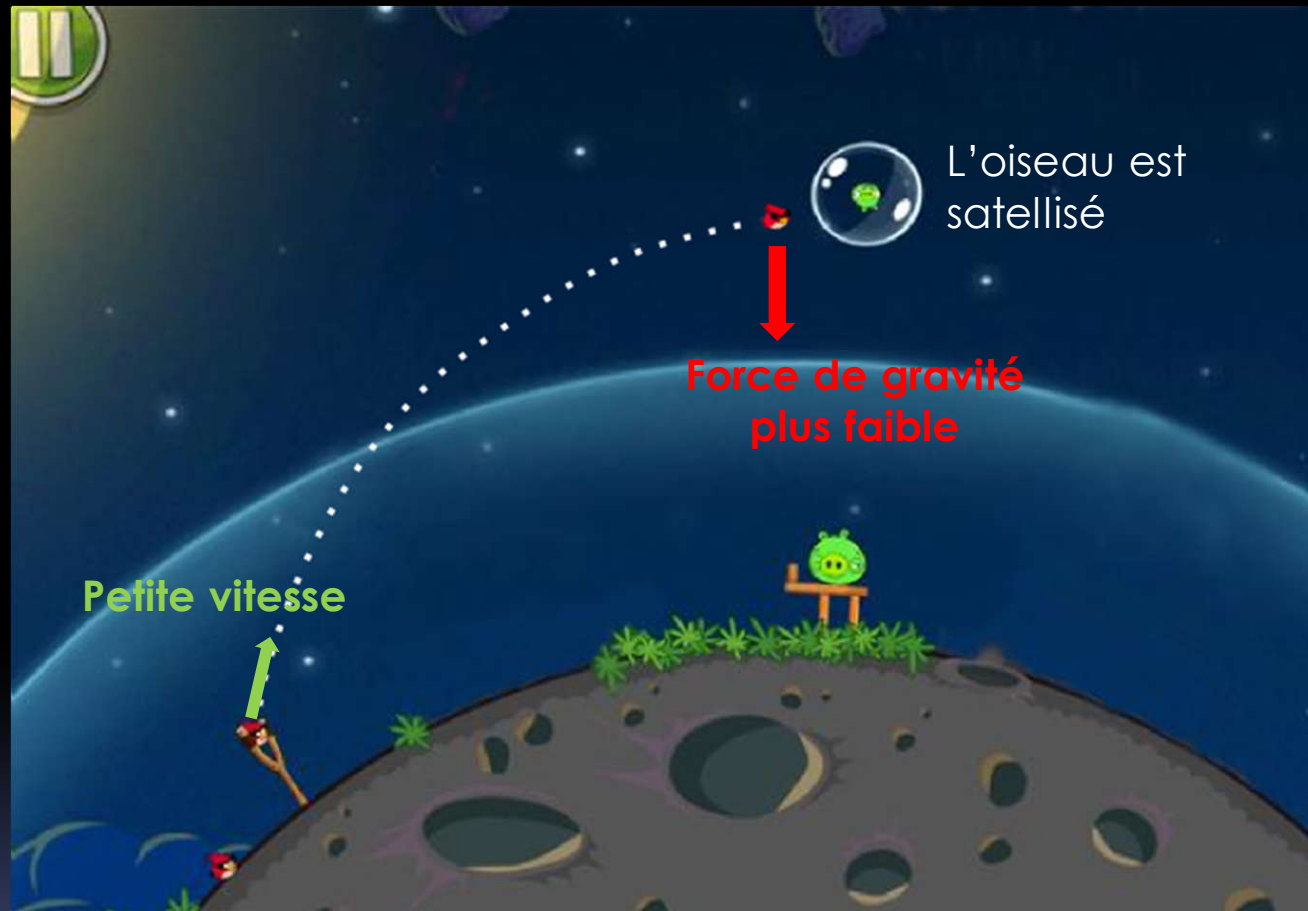
# Jouons un peu



Repartons de la première situation...



# Jouons un peu



... et allégeons la planète !

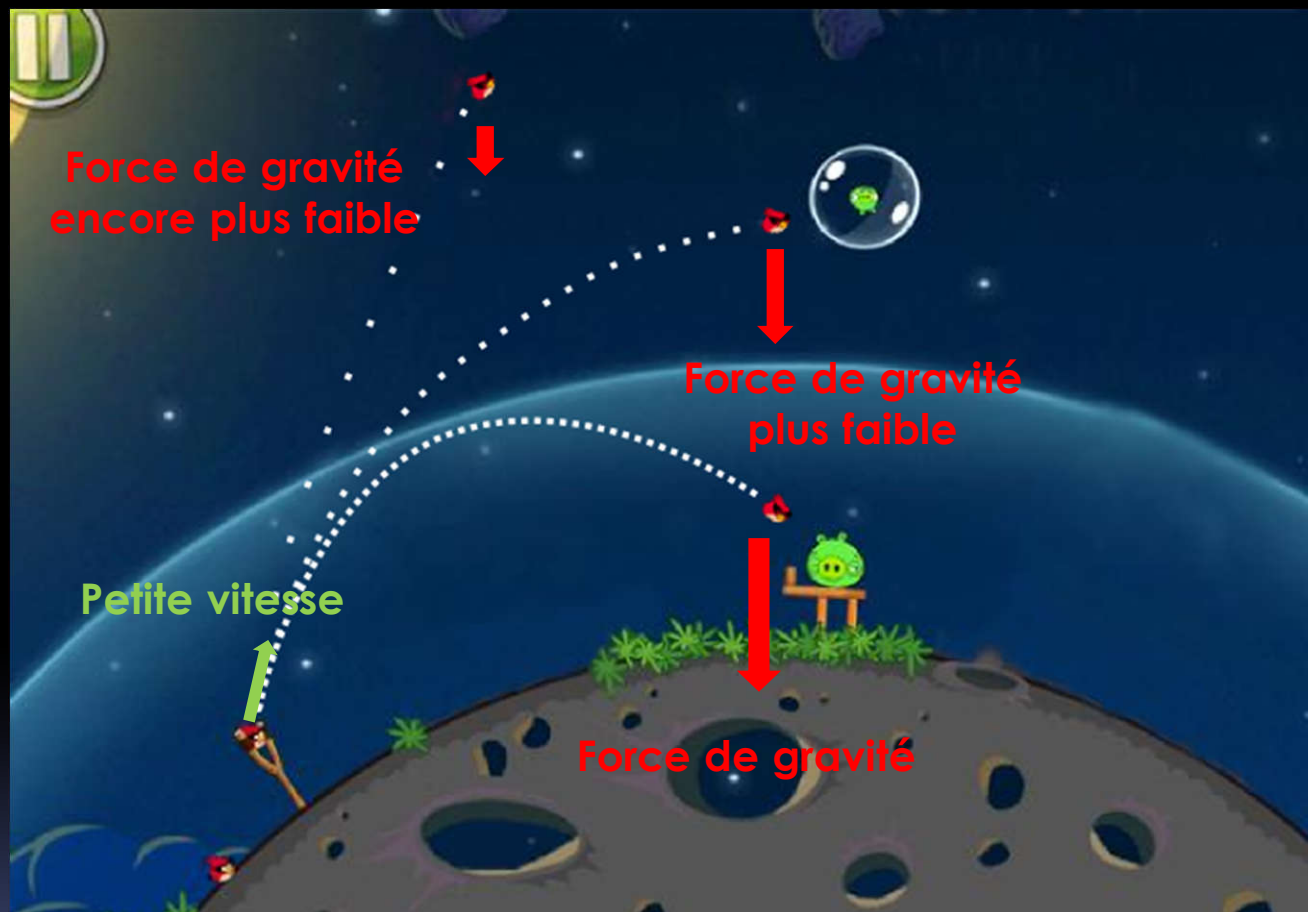


# Jouons un peu



... et encore plus!

# Jouons un peu



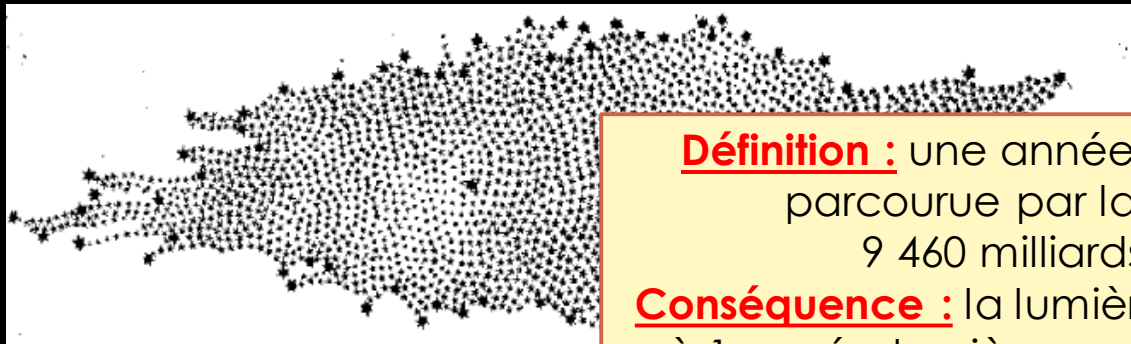
# L'énergie noire

- C'est la Force obscure qui contre la gravité et fait accélérer l'expansion de l'Univers



# Ce que l'on pensait à l'aube du XXe siècle

- Une longue histoire:
  - quelle est la place de l'homme dans l'Univers?



Notre Galaxie vue par  
Caroline Herschel en

**Définition :** une année-lumière est la distance parcourue par la lumière en un an:  
9 460 milliards de kilomètres

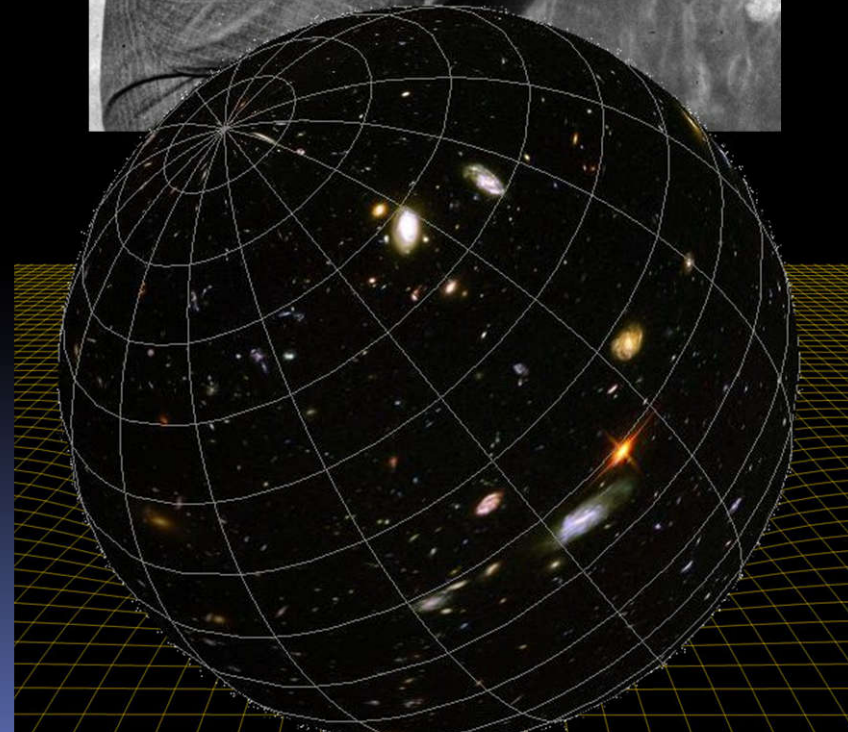
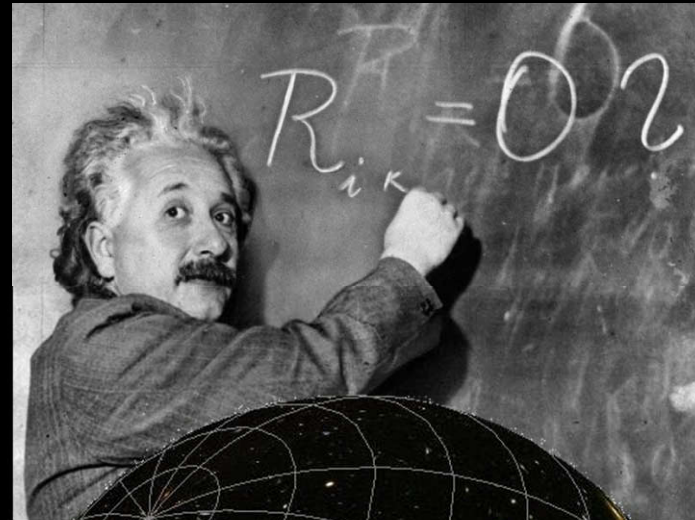
**Conséquence :** la lumière venant d'un objet situé à 1 année-lumière a mis un an à nous parvenir  
Regarder loin, c'est regarder dans le passé

- Dans les années 1910 l'Univers était :

- L'Univers est **limité à notre Galaxie**, la Voie Lactée:
  - taille inférieure à < 300 000 années-lumière (estimation de l'époque)
  - limitation due aux instruments d'observation de l'époque
- **Statique** : rien ne bouge
- **Eternel** : aucun astre n'évolue, naît ou s'éteint

# Les précurseurs

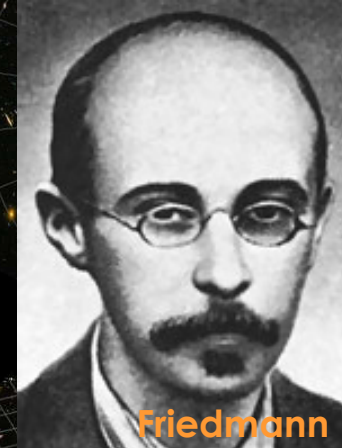
- **Le premier de tous** : Albert Einstein et la théorie de la Relativité Générale
  - Nouvelle théorie de la gravitation
  - Lie la gravitation à la déformation de l'espace-temps par la matière
- Succès de la théorie pour expliquer l'orbite de Mercure...
- ... puis a l'idée d'appliquer sa théorie à l'Univers en entier
  - Trouve une solution d'Univers statique et éternel
  - ... mais sphérique !





# Les précurseurs

- La brèche est ouverte : jouons un peu avec l'Univers !
  - Théories de De Sitter, Friedmann et Lemaître
- Alexander Friedmann (1888-1925)
  - Des solutions non statiques existent
  - L'Univers peut être en expansion => **il peut grandir ou rétrécir**
  - Il peut être sphérique ou même hyperbolique (1922 et 1924)
- Georges Lemaître (1894-1966)
  - Le grand maître de la cosmologie !
  - Trouve les mêmes solutions que Friedmann
  - Que l'Univers peut être plat aussi...
  - **Et que si l'Univers grandit, alors les objets s'éloignent d'autant plus vite qu'ils sont lointains (1925)**





# La question des nébuleuses

- Pendant que certains se posent des questions sur la forme de l'Univers...
- ... d'autres se demandent ce que sont les « nébuleuses ».

Toute première photo d'Orion



Henry Draper, 11" telescope, 50 minutes, 1880

Médaille d'or de la Royal Astronomical Society  
en 1884 (téléscope 36")



- Des systèmes solaires en formation ? Des poches de gaz intra-galactique ?  
D'autres galaxies ? **Faisons des mesures !**



# La question des nébuleuses

- **Henrietta Levitt (1868 – 1921) :**  
calculatrice à Harvard,  
découvre en 1908 une relation  
entre la luminosité et la période  
d'étoiles variables nommées  
**Céphéides**
- 1777 étoiles analysées sur  
plaques photographiques
- **Harlow Shapley (1885 - 1972) :**  
1916: mesure la distance d'une  
Céphéide dans la Voie Lactée
- La relation **luminosité – distance**  
des Céphéides est ainsi  
étalonnée



# La question des nébuleuses

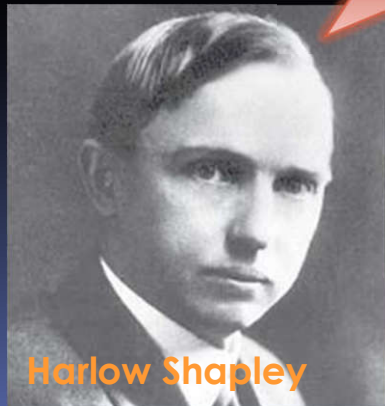
- **Question 1** : à quelle distance sont les nébuleuses ?
- **Question 2** : les nébuleuses font-elle vraiment partie de notre Voie Lactée ou sont-elles à l'extérieur ?
- 1920 : le Grand Débat entre Harlow Shapley et Heber Curtis
  - N'aboutit à rien: il faut des mesures !



Photographie de la "Grande Nébuleuse d'Andromède" (1899)

Les nébuleuses sont intra-galactiques

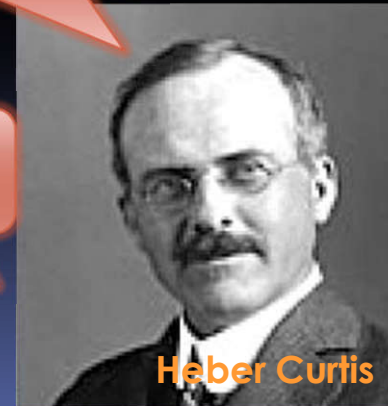
Les nébuleuses sont extra-galactiques



Harlow Shapley

J'ai raison.

Non c'est moi.

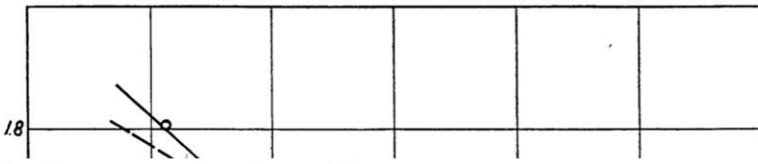
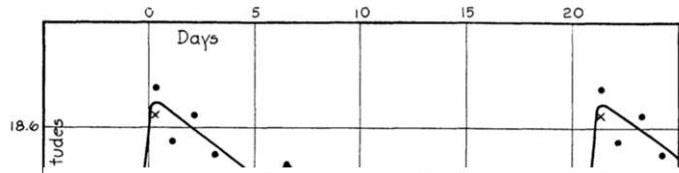


Heber Curtis





# Observation de NGC6822 par E. Hubble



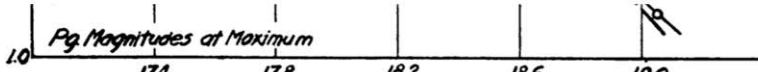
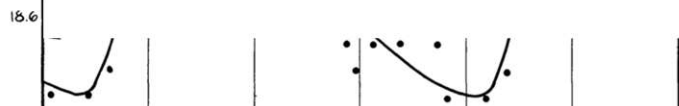
mag. The resulting values of the modulus and the distance are

$$m - M = 21.65$$

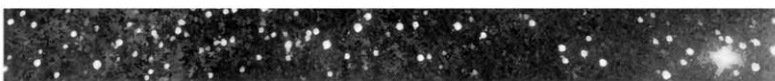
$$\pi = 0''.00000468$$

$$\text{Distance} = 214,000 \text{ parsecs}$$

$$= 700,000 \text{ light-years}$$



Edwin Hubble mesure que la Nébuleuse NGC6822 se situe finalement à 700 000 années-lumière de nous... **c'est une autre galaxie!!**  
 Les astronomes en découvrent ensuite d'autres galaxies et veulent maintenant mesurer leurs propriétés : masse, distance, vitesse par rapport à nous...



N.G.C. 6822

N.G.C. 6822

Photographed at the 42-foot focus of the 100-inch Hooker telescope on July 10, 1923. Exposure 3<sup>h</sup>30<sup>m</sup> on a Seed 30 plate. Enlargement 2.5 times original negative.

Negative print of Plate XIV. Variable stars are designated by Arabic figures; nebulae involved in or superposed on the cluster by Roman numerals.

on-  
ken  
rve

# Observation de M31 par E. Hubble

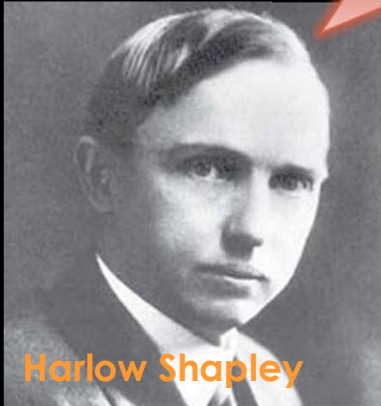




# Le Grand Débat est clos

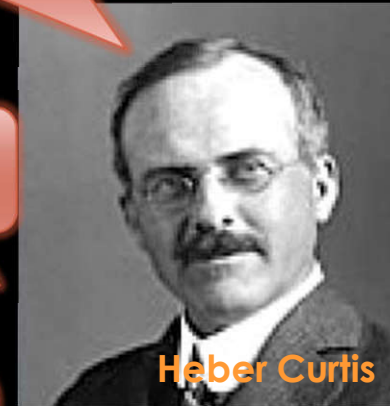
Les nébuleuses sont  
intra-galactiques

Les nébuleuses sont  
extra-galactiques



J'ai raison.

Non c'est  
moi.

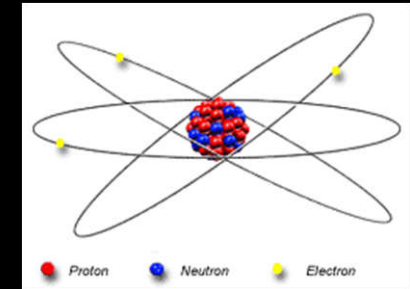


NGC6822: 700 000 al (1925)  
Andromède: 900 000 al (1929)  
Curtis a raison. Désolé Harlow...



# La Théorie du Big Bang

La réponse viendra de la **physique nucléaire**

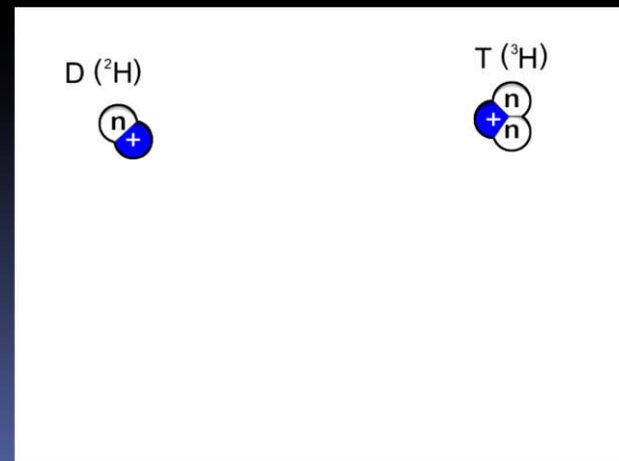
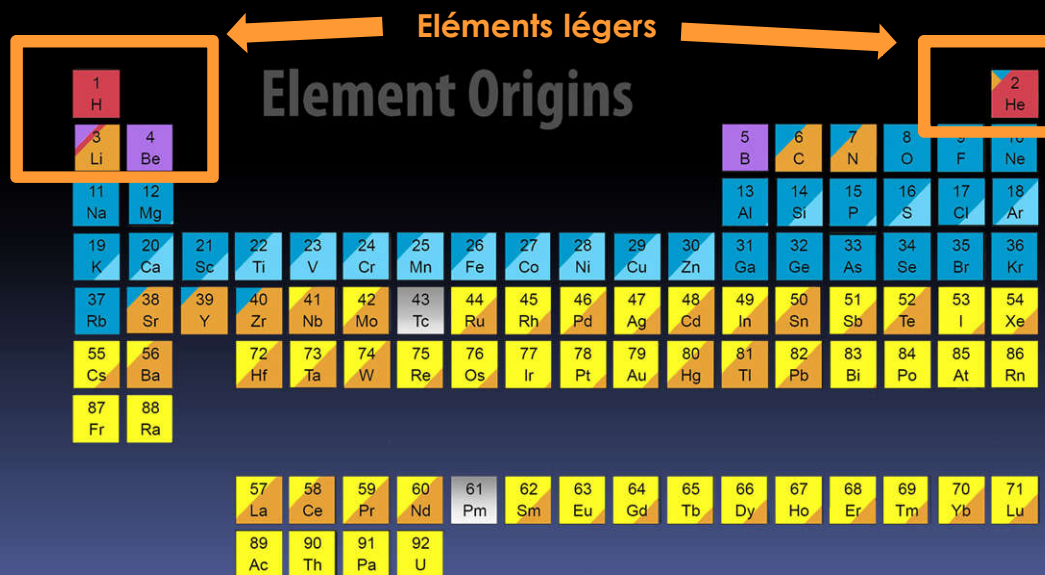


- Fred Hoyle :

- L'Univers est stationnaire et éternel
- Les éléments chimiques ont **tous été forgés au cœur des étoiles**

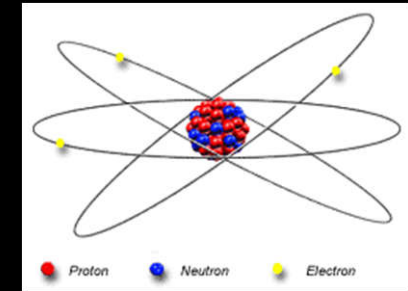
- Gamow, Alpher, Herman :

- L'Univers est né d'une matière primitive
- Était très dense et **très chaud : lien entre la cosmologie et la physique des particules**
- Forge les éléments chimiques **légers** à partir des neutrons, protons et électrons



# La Théorie du Big Bang

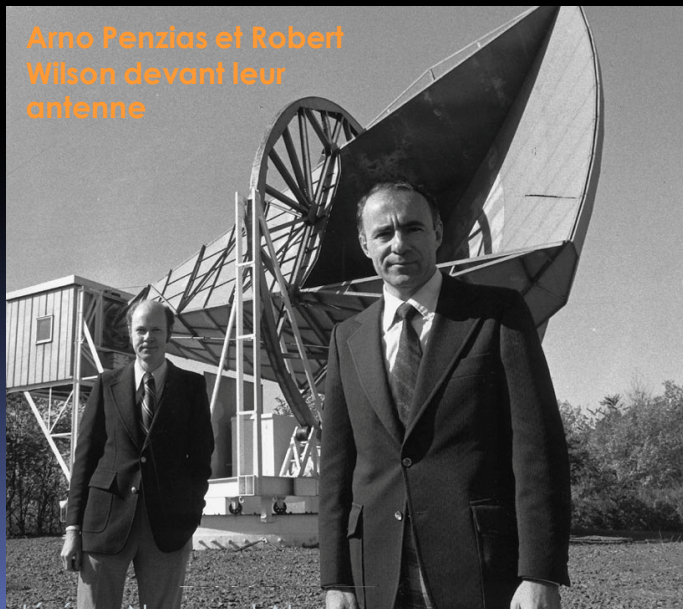
La réponse viendra de la **physique nucléaire**



- Gamow, Alpher, Herman :

- Prédissent l'existence d'une lumière émise lorsque les électrons sont combinés aux noyaux atomiques
- Rayonnement de température  $3000^{\circ}\text{K}$  émis 300 000 ans après le Big Bang
- Aujourd'hui **refroidi à  $2,7^{\circ}\text{K}$  et baignant tout l'Univers**

**Définition:**  $0^{\circ}\text{K}$  définit la température du zéro absolu, valant aussi  $-273,15^{\circ}\text{C}$



Arno Penzias et Robert Wilson devant leur antenne

Jérémy Neveu - LAL

- Penzias et Wilson :

- 1965 : découverte d'un rayonnement à  **$3,5 \pm 1,0^{\circ}\text{K}$**  baignant tout l'Univers... Bingo ! Et Nobel en 1978...
- Lemaître apprend la nouvelle à l'hôpital deux semaines avant sa mort : « Je suis content, au moins maintenant on a la preuve. »

- Fred Hoyle :

- 1964 : démontre lui-même que les étoiles ne peuvent avoir forgé tout l'hélium de l'Univers

- **La Théorie du Big Bang est validée !**