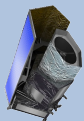


Euclid
ESA/ESA/CNRS



Aix-Marseille
université

Les causeries du mercredi

Lumière sur l'Univers sombre

Arnaud Chapon

Centre de Physique des Particules de Marseille, CNRS/IN2P3, Marseille, France

19 juin 2013



- 1 La cosmologie : archéologie de l'Univers
- 2 Les échelles de l'Univers
- 3 Relativité générale et matière noire
- 4 Lentilles gravitationnelles (WL)
- 5 L'Univers est en expansion
- 6 Accélération de l'expansion de l'Univers
- 7 Les oscillations baryoniques acoustiques (BAO)
- 8 La mission spatiale EUCLID
- 9 Performances et perspectives
- 10 Caractérisation et calibration de l'instrument NISP

La cosmologie : archéologie de l'Univers

Cosmologie \equiv étude de l'Univers et des lois qui le gouvernent :

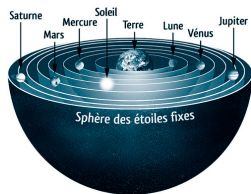
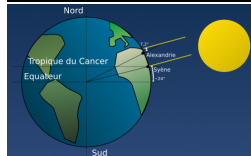
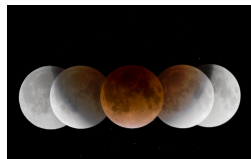
- ses propriétés : Que voit-on de l'Univers ?
- sa composition : De quoi est-il fait ?
- son évolution : Pourquoi et comment s'est-il formé et évolue-t-il ?

L'Histoire de la cosmologie date du début de l'Humanité.

La cosmologie : archéologie de l'Univers

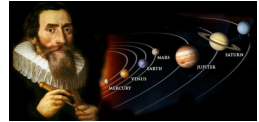
- Antiquité : Idée que la Terre est ronde :

- ▶ Aristote le démontre au IV^{ème} siècle avant notre ère par l'ombre ronde que la Terre fait sur la Lune lors des éclipses de cette dernière,
- ▶ Eratosthène en mesure le diamètre un siècle plus tard.
- ▶ En revanche, on pense toujours la Terre au centre de l'Univers, comme l'a décrit Ptolémée au II^{ème} siècle...



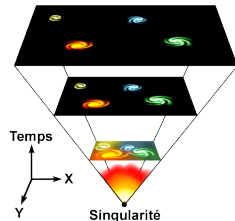
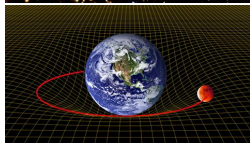
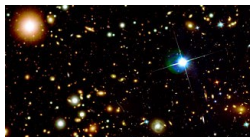
La cosmologie : archéologie de l'Univers

- Renaissance : Naissance du système héliocentrique :
 - ▶ Introduit en 1513 par Copernic et défendu par Galilée, le modèle héliocentrique met le Soleil au centre de l'Univers,
 - ▶ Durant la même période Kepler formalise mathématiquement le mouvement des astres,
 - ▶ Au XVII^{ème} siècle, la théorie de la gravitation de Newton permet de comprendre la cause du mouvement des astres : la gravité,
 - ▶ Au XVIII^{ème} siècle, la cosmologie s'étend au-delà du système solaire avec l'idée que le Soleil ne pourrait être qu'une étoile parmi d'autres...



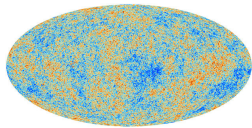
La cosmologie : archéologie de l'Univers

- La cosmologie moderne émerge de deux évènements majeurs :
 - ▶ en 1924, Hubble découvre l'existence de galaxies autre que la nôtre,
 - ▶ en 1917, Einstein propose le premier modèle cosmologique moderne en se basant sur sa théorie de la relativité générale. Son univers est homogène, fini et statique. Mais ce n'est pas la seule solution possible...
 - ▶ Friedmann et Lemaître proposent un Univers en expansion, à partir d'une singularité initiale : le Big-Bang !

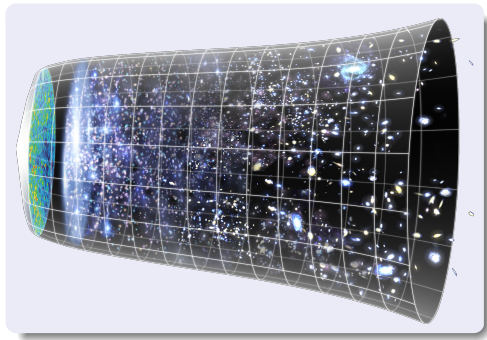


La cosmologie : archéologie de l'Univers

- Ce que l'on sait aujourd'hui :
 - ▶ l'Univers est homogène et isotrope à grande échelle (principe cosmologique),
 - ▶ la masse des galaxies et des clusters de galaxies est dominée par une composante non-lumineuse (matière noire),
 - ▶ l'expansion de l'Univers est accélérée (énergie noire),
 - ▶ le modèle le plus simple qui décrit ces observations est appelé modèle standard de la cosmologie, Λ CDM.



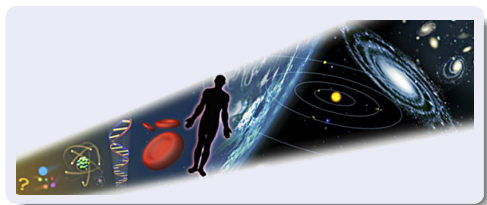
La cosmologie : archéologie de l'Univers



But de la cosmologie :

- raconter 13.7 milliards d'années d'histoire de l'Univers,
- décrire et interpréter son organisation à "très grande échelle", les interactions et les processus qui la gouvernent.

Les échelles de l'Univers



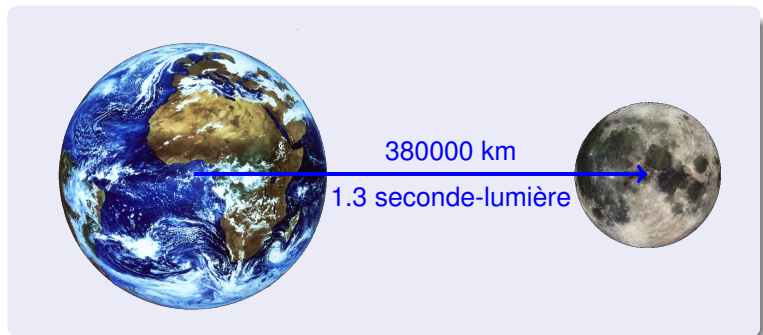
Comment ?

- en effectuant des relevés précis des étoiles et des galaxies qui composent l'Univers à différentes échelles de distances.

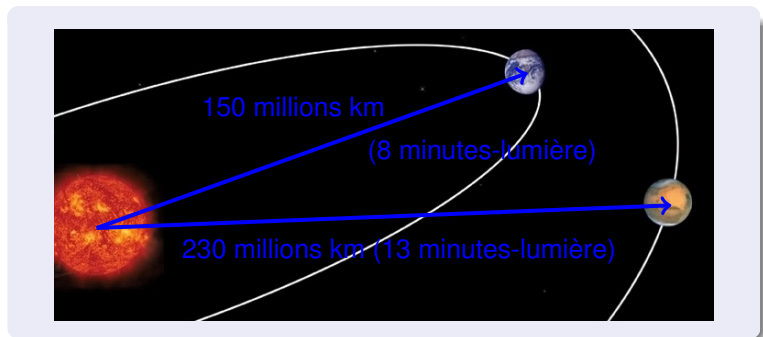
Voir loin, c'est voir le passé, car :

- la lumière ne se propage pas de façon instantanée d'un point à un autre,
- les particules de lumière (les photons) se déplacent à 300000 km/s.

Les échelles de l'Univers



Les échelles de l'Univers

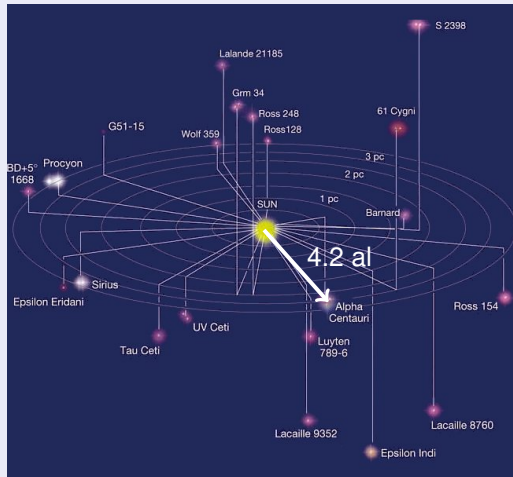


Les échelles de l'Univers



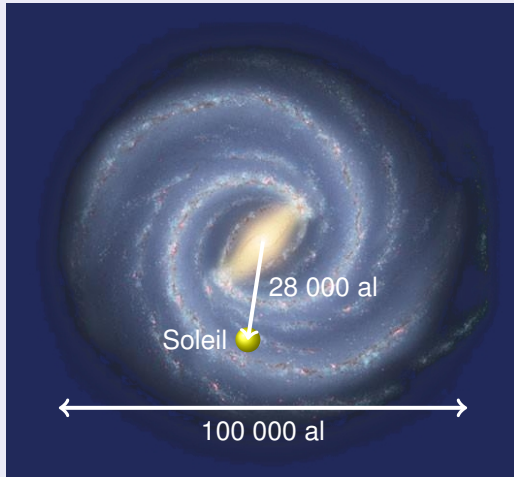
Les échelles de l'Univers

1 année-lumière (al) = 9461 milliards km



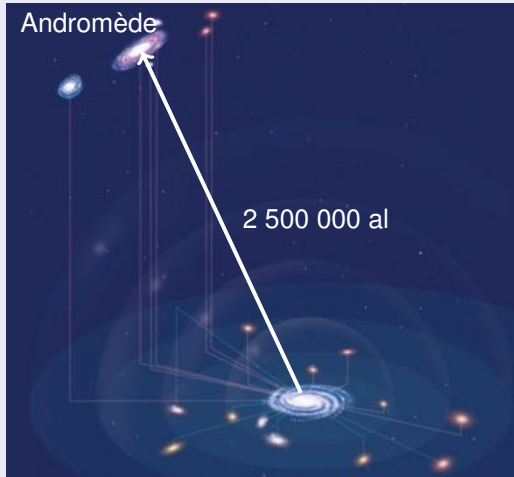
Les échelles de l'Univers

1 année-lumière (al) = 9461 milliards km



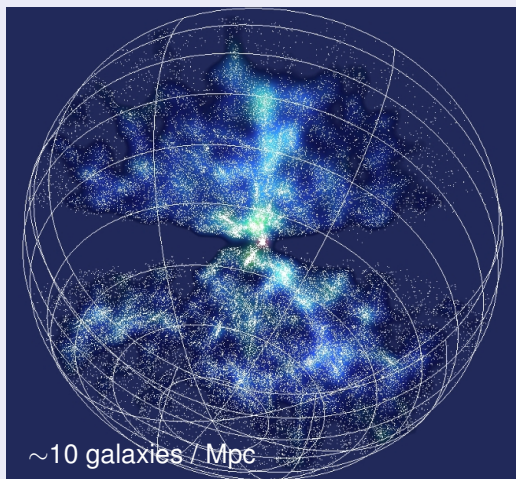
Les échelles de l'Univers

1 année-lumière (al) = 9461 milliards km



Les échelles de l'Univers

1 mégaparsec (Mpc) = 3.26×10^6 al



Les échelles de l'Univers

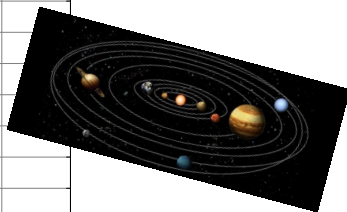
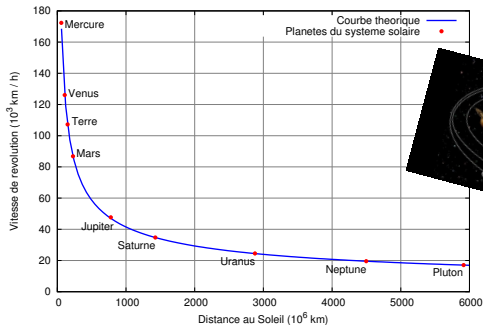
Les observations cosmologiques actuelles s'appuient sur des **milliards de galaxies**. Pour leur donner un sens, il faut considérer que :

- l'Univers est **homogène** : ses propriétés sont les mêmes dans toutes les directions de l'espace,
- les forces de la nature sont **universelles** : elles s'appliquent à tous les corps et sont les mêmes partout dans l'Univers,
- en particulier, c'est le cas de la **gravitation**, seule force fondamentale qui s'applique à grande échelle.

Relativité générale et matière noire

La gravitation :

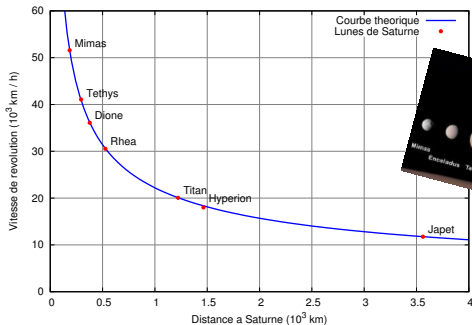
- est une force **attractive**,
- s'applique aux **objets massifs**,
- est telle que la vitesse de rotation d'un objet massif autour d'un autre décroît avec la distance.



Relativité générale et matière noire

La gravitation :

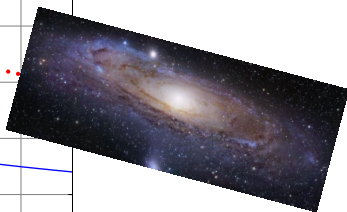
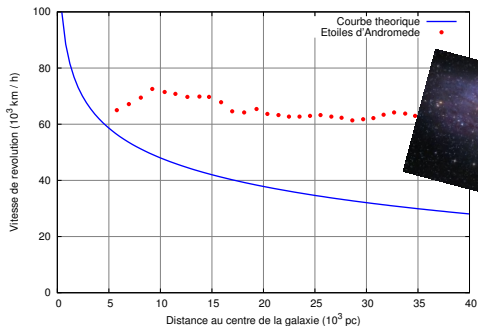
- est une force **attractive**,
- s'applique aux **objets massifs**,
- est telle que la vitesse de rotation d'un objet massif autour d'un autre décroît avec la distance.



Relativité générale et matière noire

La gravitation :

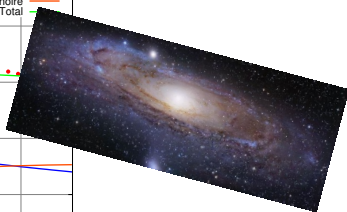
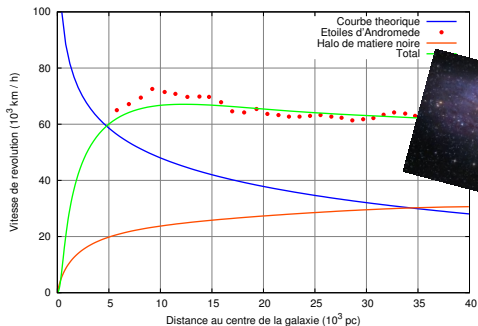
- est une force **attractive**,
- s'applique aux **objets massifs**,
- est telle que la vitesse de rotation d'un objet massif autour d'un autre décroît avec la distance.



Relativité générale et matière noire

La gravitation :

- est une force **attractive**,
- s'applique aux **objets massifs**,
- est telle que la vitesse de rotation d'un objet massif autour d'un autre décroît avec la distance.



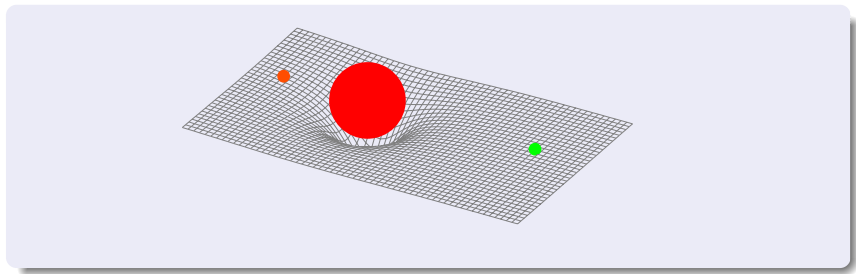
Relativité générale et matière noire

La vitesse de révolution des étoiles dans les galaxies spirales est plus grande qu'attendue par la théorie de la relativité générale:

- soit la théorie de la relativité générale, qui décrit la gravitation, est fausse,
 - soit il existe une matière que l'on ne voit pas et qui accélère la révolution des étoiles périphériques dans les galaxies : **la matière noire**.
-
- Si la matière noire existe, comment la détecter ?

Relativité générale et matière noire

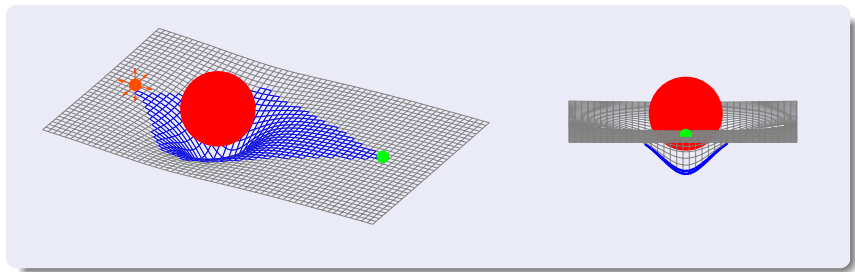
Un objet massif crée une déformation de l'espace-temps :



⇒ Théorie de la **relativité générale**.

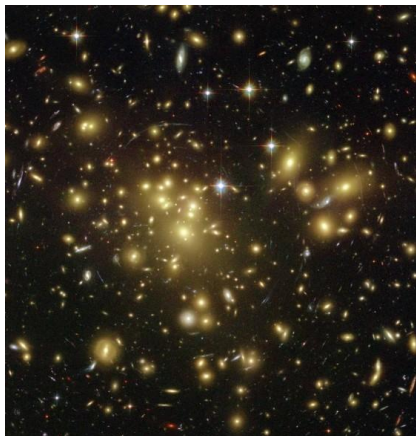
Relativité générale et matière noire

Les rayons lumineux suivent cette déformation :



⇒ Phénomène de **lentille gravitationnelle**.

Lentilles gravitationnelles (WL)

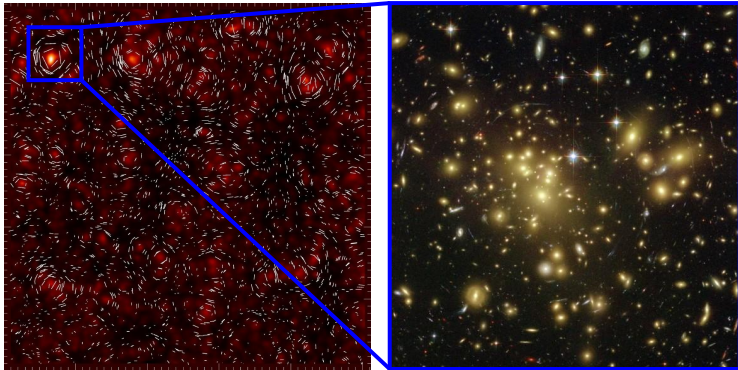


Effet d'une lentille gravitationnelle:

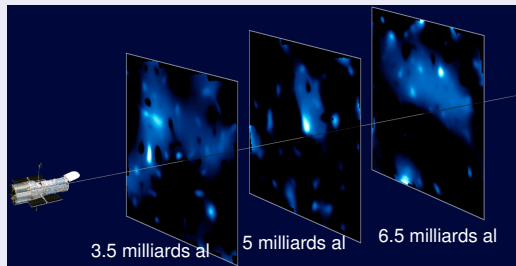
- allongement infime des galaxies,
- invisible sur les galaxies individuelles

Lentilles gravitationnelles (WL)

Déflexion cohérente des rayons lumineux sur un grand nombre de galaxies :



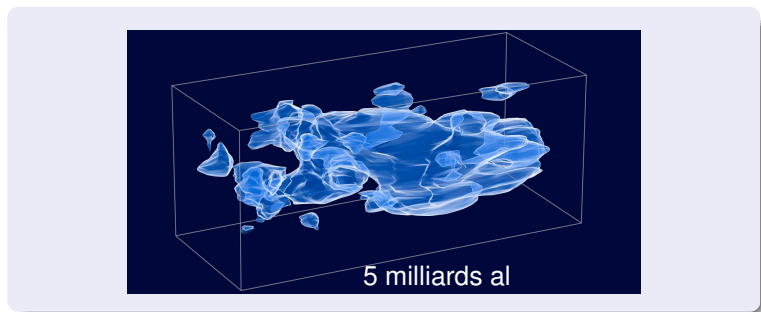
Lentilles gravitationnelles (WL)



⇒ Détection indirecte de la présence de matière noire :

- mesure précise de la **forme apparente** des galaxies,
- mesure précise de la **distance** des galaxies.

Lentilles gravitationnelles (WL)

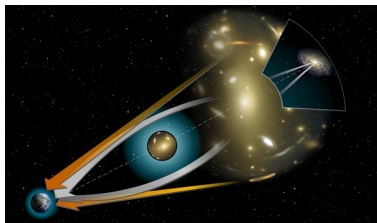


- ⇒ Détection indirecte de la présence de matière noire :
- mesure précise de la **forme apparente** des galaxies,
 - mesure précise de la **distance** des galaxies.

Lentilles gravitationnelles (WL)

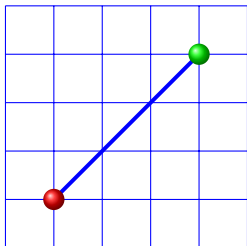
Les lentilles gravitationnelles :

- s'appuient sur la théorie de la relativité générale d'Einstein,
- permettent de détecter la matière noire par déflexion des objets visibles,
- permettent de reconstruire la répartition de la matière noire dans l'Univers, en fonction du temps.



Ces mesures montrent que la matière noire est **5 fois plus abondante** que la matière ordinaire (\equiv visible) !

L'Univers est en expansion

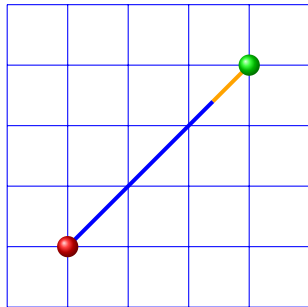


A un instant donné

Matière noire et matière ordinaire :

- sont massives,
- engendrent des interactions gravitationnelles,
- devraient contribuer à contracter l'Univers.

L'Univers est en expansion



Plus tard...

1929: Edwin Hubble constate que l'Univers est en **expansion**

- plus les galaxies sont lointaines, plus elles s'éloignent de nous:

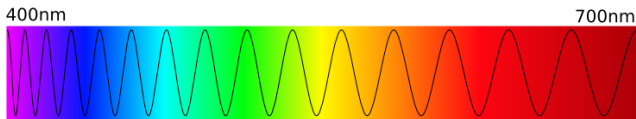
$$v = H_0 \times d$$

où H_0 est la constante de Hubble

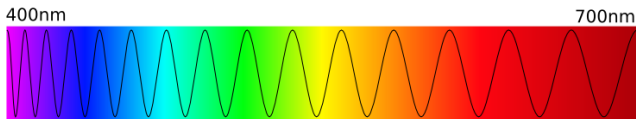
L'Univers est en expansion

Conséquences :

- les objets s'éloignent les uns des autres,
- **attention**, ils ne bougent pas : c'est l'Univers qui grandit !
- le spectre de lumière des objets observés est décalé vers le rouge.



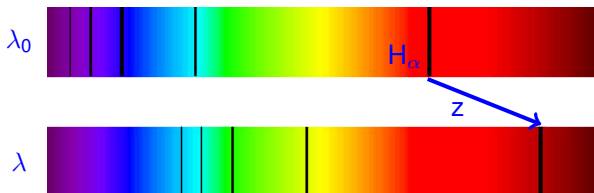
L'Univers est en expansion



L'Univers est en expansion

Le décalage vers le rouge (\equiv *redshift* z) d'un objet lumineux traduit la **vitesse** à laquelle sa distance par rapport au point d'observation grandit :

$$1 + z = \frac{\lambda}{\lambda_0}$$



L'Univers est en expansion

Le décalage vers le rouge (\equiv *redshift* z) d'un objet lumineux traduit la **vitesse** à laquelle sa distance par rapport au point d'observation grandit :

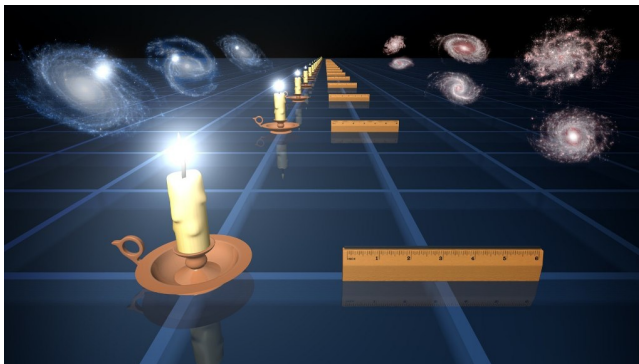
$$1 + z = \frac{\lambda}{\lambda_0}$$

Reste à lier cette vitesse à l'âge de l'Univers ? Mesure précise de distances :

- observation d'objets de **même luminosité intrinsèque** :
- si l'Univers est en expansion, les objets lointains seront moins brillants que si l'Univers était statique.

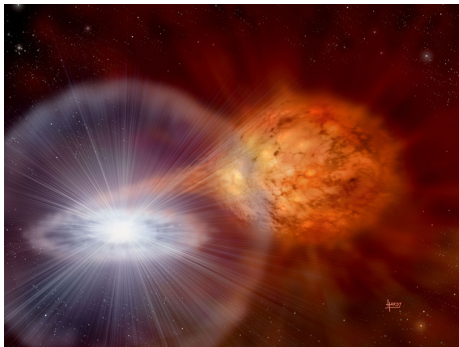
L'Univers est en expansion

On parle alors de **chandelles standards**...



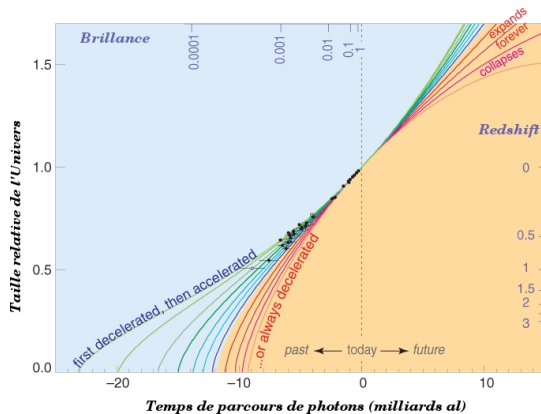
L'Univers est en expansion

Les **Supernovae de type Ia** ont une luminosité intrinsèque connue et la même partout dans l'Univers...



Ce sont des chandelles standards !

Accélération de l'expansion de l'Univers

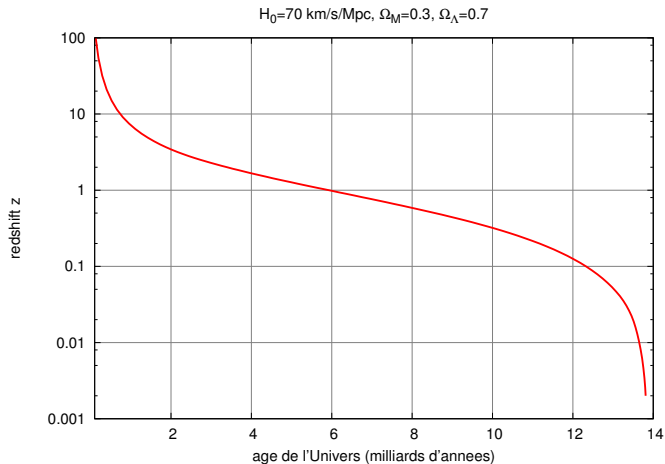


1998: Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess montrent que l'Univers est en fait en **expansion accélérée**:

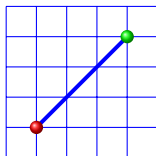
- les objets s'éloignent de plus en plus vite les uns des autres

L'accélération de l'expansion de l'Univers est confirmée avec un degré de confiance de 99.999%...

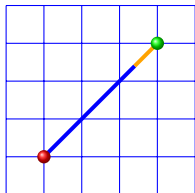
Accélération de l'expansion de l'Univers



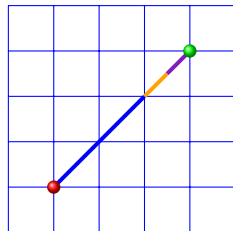
Accélération de l'expansion de l'Univers



A un instant donné



Plus tard



Plus tard avec accélération de l'expansion de l'Univers

S'il y a une accélération, *quelque chose* qui nous est encore inconnu doit en être la cause... les observations montrent que ce *quelque chose* représente **70% du contenu énergétique de l'Univers !**

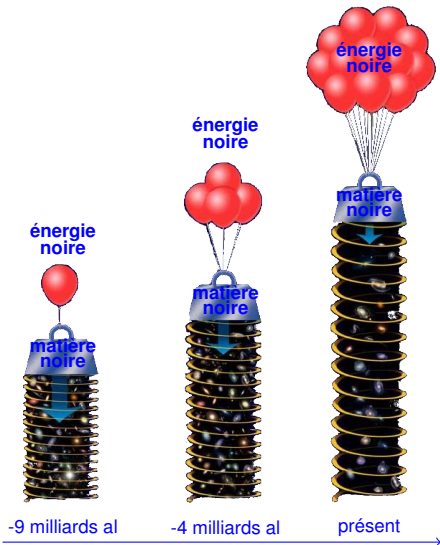
Accélération de l'expansion de l'Univers

L'une des plus grandes énigmes de la Physique actuelle :

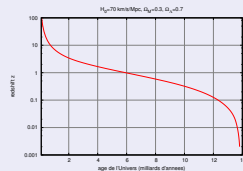
Pourquoi l'expansion de l'Univers s'accélère-t-elle ?

- Une nouvelle substance/interaction de nature inconnue, l'**énergie noire**, s'oppose à la gravitation aux très grandes échelles de l'Univers ?
- Les lois de la gravitation, telles qu'elles sont formulées dans la théorie d'Einstein, ne sont plus valides aux très grandes échelles de l'Univers ?

Accélération de l'expansion de l'Univers



La domination de
l'**énergie noire**
vis-à-vis des autres
composantes de
l'Univers est
contemporaine !



Les oscillations baryoniques acoustiques (BAO)

Univers primordial homogène

(D. Eisenstein)

- Quatres espèces:
 - ▶ matière noire
 - ▶ matière baryonique
 - ▶ photons
 - ▶ neutrinos

- Perturbation primordiale adiabatique

Les oscillations baryoniques acoustiques (BAO)

Emission du fond diffus cosmologique (CMB)

(D. Eisenstein)

- Neutrinos rapides
⇒ pas stoppés par la gravité
- Matière noire
⇒ surdensités
- Perturbation dominée par le couplage photons/baryons
⇒ onde acoustique

Les oscillations baryoniques acoustiques (BAO)

Formation du pic acoustique (BAO)

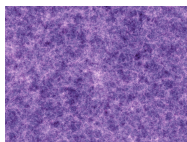
(D. Eisenstein)

- Combinaison électrons/protons
⇒ découplage photons/matière
- Attraction mutuelle entre matière noire et matière baryonique
⇒ pic BAO

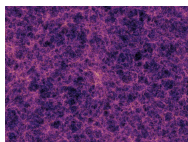
Les oscillations baryoniques acoustiques (BAO)

- Effets infimes sur l'histoire de l'expansion de l'Univers,
- Effets infimes sur l'histoire de la formation des structures.

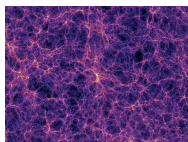
- Mesure précise des redshifts !



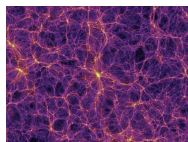
$z = 18.3$



$z = 5.7$



$z = 1.4$



$z = 0$

Les oscillations baryoniques acoustiques (BAO)

- Effets infimes sur l'histoire de l'expansion de l'Univers,
- Effets infimes sur l'histoire de la formation des structures.

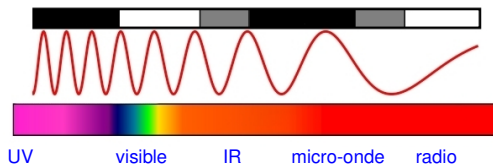
- **Mesure précise des redshifts !**

Observation de l'évolution de la distribution et la structuration :

- de la matière noire et des galaxies,
- depuis aujourd'hui, jusqu'à la période de transition où la matière noire dominait l'énergie sombre.

La mission spatiale EUCLID

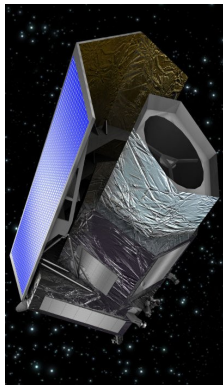
- Instruments de haute précision et observation de centaines de millions de galaxies :
 - ▶ Photométrie visible : effet de lentille gravitationnelle (\Rightarrow matière noire),
 - ▶ Photométrie IR : BAO (\Rightarrow distance des galaxies),
 - ▶ Spectroscopie IR : décalage spectral (\Rightarrow découpage de l'Univers en tranches de temps).
- Observer l'Univers jusqu'à $z=2$, lorsqu'il était âgé de 4 milliards d'années.



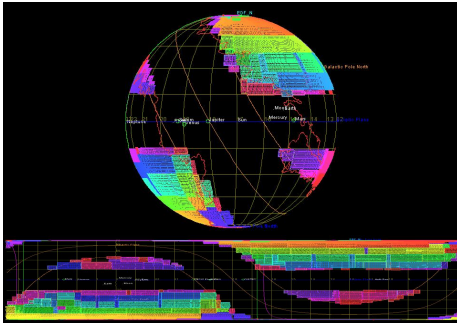
La mission spatiale EUCLID

La mission spatiale EUCLID consiste à :

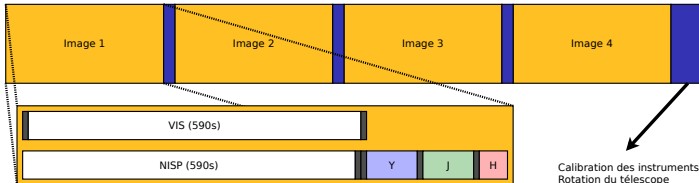
- envoyer dans l'espace un télescope de 1.2m de diamètre,
- faire de l'imagerie visible et infrarouge,
- faire de la spectroscopie infrarouge,
- observer un **très grand nombre de galaxies**.



La mission spatiale EUCLID



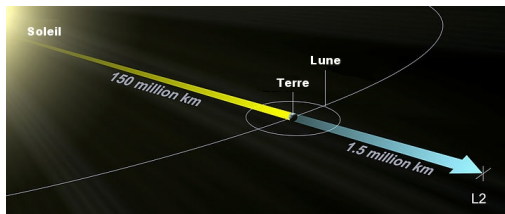
- poses de 1 heure,
- 4 images par pose,
- mission de 6 ans,
- couverture de 1/3 du ciel :
 - ▶ hors du plan du système solaire,
 - ▶ hors du plan de la galaxie.



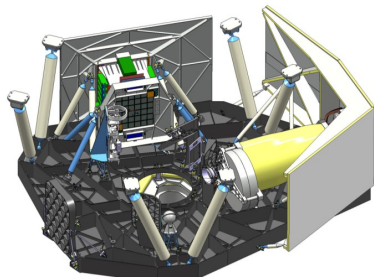
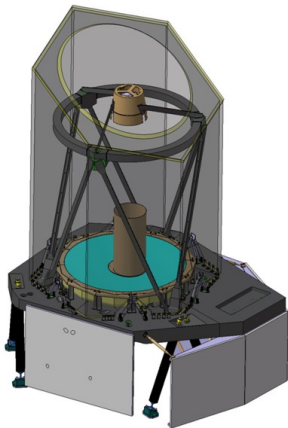
La mission spatiale EUCLID

En quelques chiffres :

- ~1000 membres répartis dans ~110 laboratoires,
- 13 pays européens contributeurs (et participation des Etats-Unis),
- un budget total de 800 millions d'euros,
- un lancement à l'horizon 2020 !

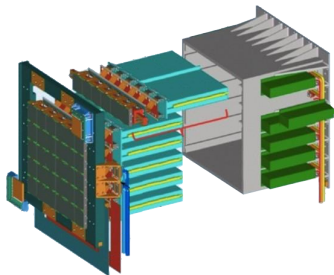


La mission spatiale EUCLID



- stabilisation de la visée du télescope sur une durée de 600s,
- champ d'observation commun aux instruments visible et IR : 0.54 deg^2

La mission spatiale EUCLID



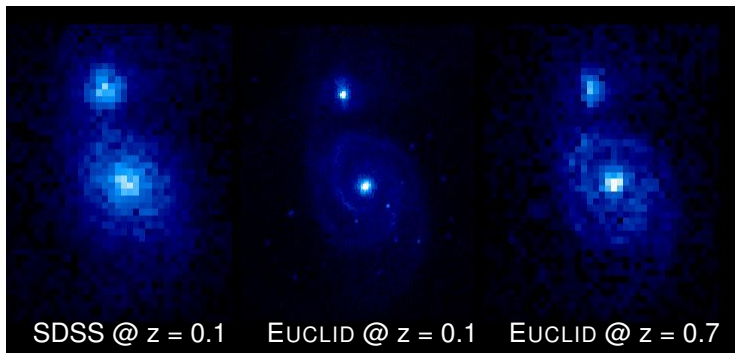
Instrument VIS :

- 36 détecteurs CCD
- 16 méga-pixels
- $550 \text{ nm} < \lambda < 900 \text{ nm}$
- $\text{magAB} = 24.5$
- 65 Go/jour

Lentilles gravitationnelles faibles (WL) :

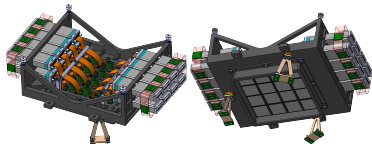
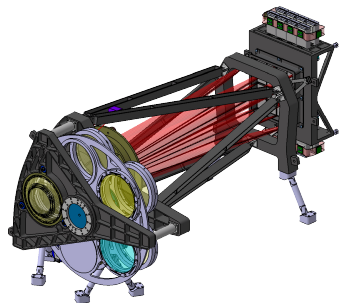
- 1.5 milliards de galaxies
- Forme précise des galaxies

La mission spatiale EUCLID



EUCLID a la même résolution à $z \sim 1$
que les meilleurs relevés au sol à $z \sim 0.1$...

La mission spatiale EUCLID



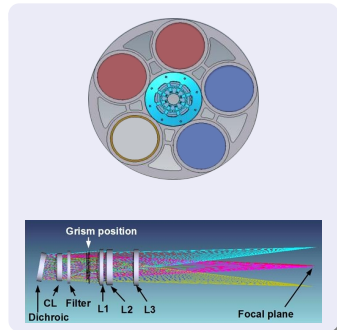
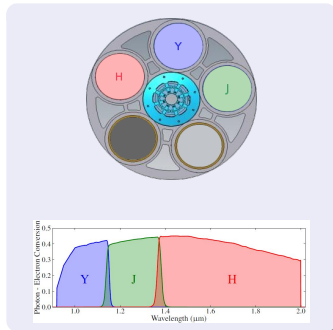
Instrument NISP :

- roue à filtres et grims,
- 16 détecteurs HgCdTe

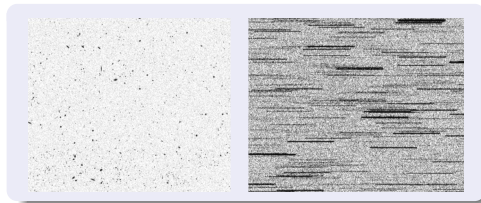
⇒ Spectro-photométrie IR

- $\lambda = 2 \mu\text{m}$
- redshift $z = 3$
- ~ 2 milliards d'années

La mission spatiale EUCLID



Photométrie
IR



Spectroscopie
IR

La mission spatiale EUCLID

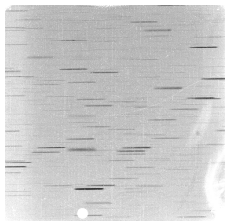
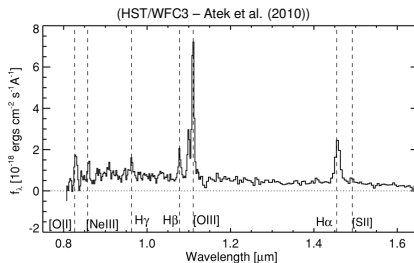


image de spectroscopie
infra-rouge



extraction des spectres de galaxies

Oscillations baryoniques acoustiques (BAO) :

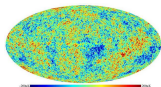
- 50 millions de redshifts de galaxies
- mesure des redshifts z ($\epsilon = 10^{-3}$)
- $z \in [0.7:2.1]$
- contraintes sur $d_A(z)$ et $H(z)$

Performances et perspectives

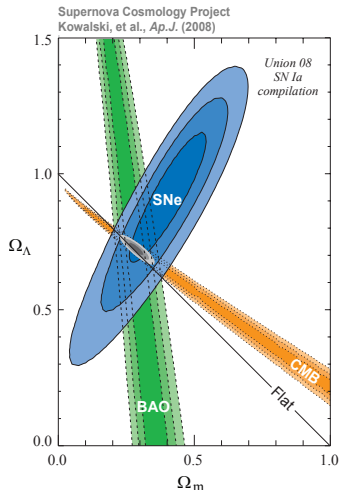
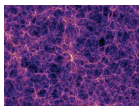
- Observation des Supernovae



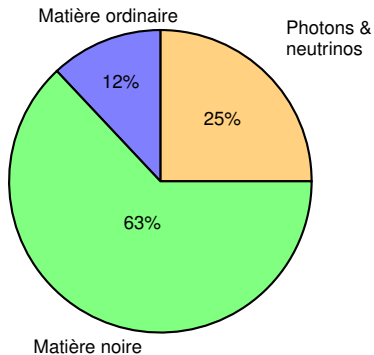
- Mesure du fond cosmologique



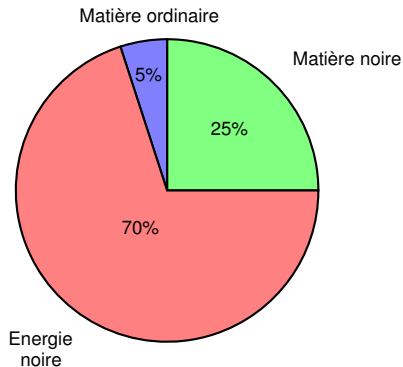
- Etude de la formation des structures à très grandes échelles



Performances et perspectives



Il y a 13.7 milliards d'années



Actuellement

Performances et perspectives

EUCLID : unique mission spatiale conçue pour comprendre l'origine de l'accélération de l'expansion de l'Univers

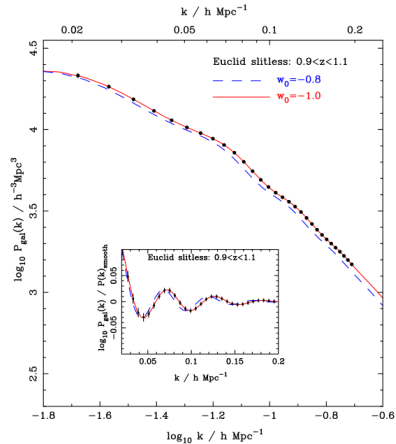
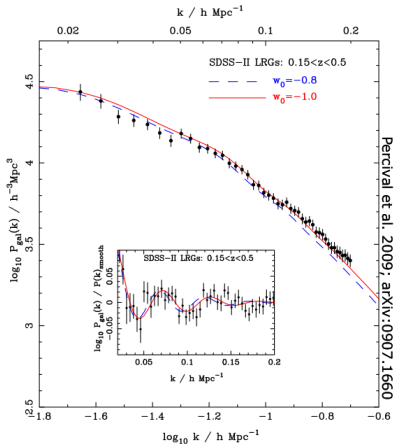
- deux sondes primaires: WL et BAO
- même volume cosmique ($z \rightarrow 2$)
- grand nombre d'objets et précision en z inégalée

Cartographie 3D du ciel jusqu'à $z = 2$:

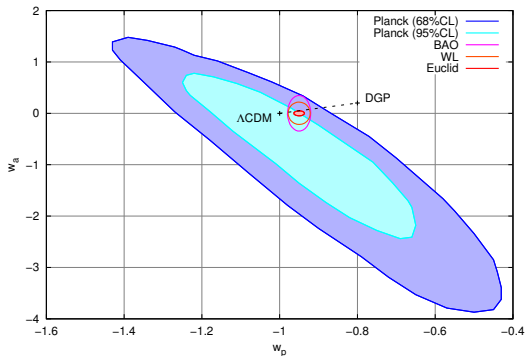
- analogue et complémentaire à Planck pour l'Univers à grand z
- défi de tous les secteurs du modèle cosmologique

Une nouvelle ère \Rightarrow celle de la cosmologie de précision

Performances et perspectives



Performances et perspectives



- Equation d'état de l'énergie noire :

$$w(a) = w_p + w_a(a_p - a)$$

$$\text{avec } a = \frac{1}{1+z}$$

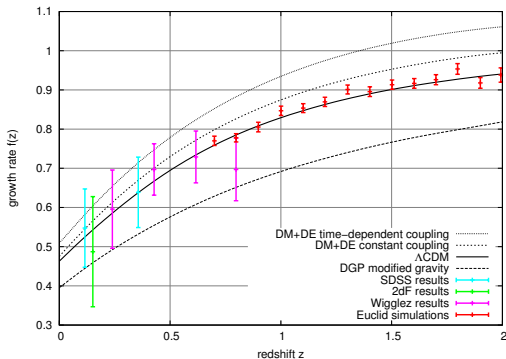
- Figure de mérite (1σ) :

$$FoM = \frac{1}{\Delta w_p \times \Delta w_a}$$

FoM:

EUCLID: 10 \rightarrow 4000

Performances et perspectives


 γ :

 EUCLID: 0.2 \rightarrow 0.01

- Taux de croissance des structures :

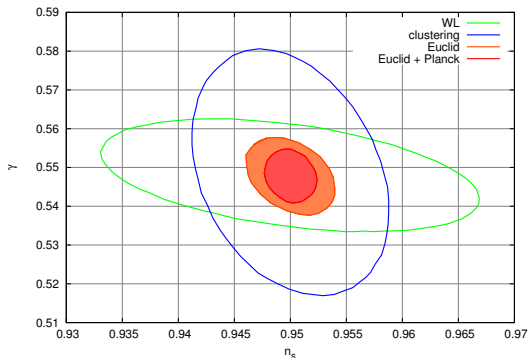
$$f(z) = \Omega_m(z)^\gamma$$

avec $\gamma = 0.55$ dans la théorie de la RG (Λ CDM)

- $\gamma \neq 0.55$:

Origine de l'accélération de l'expansion de l'Univers \neq Energie noire

Performances et perspectives



f_{NL} :

EUCLID: 100 \rightarrow 2

- Conditions initiales de l'Univers (perturbation = champ gaussien aléatoire adiabatiques et isentropiques :

$$\langle \hat{\rho}(\vec{k}, t) \hat{\rho}(\vec{k}', t) \rangle = k^{n_s-1} \delta^{(3)}(\vec{k} - \vec{k}')$$

où n_s est l'index de la loi de puissance

- f_{NL} :

effet non gaussien

Performances et perspectives

Parametre	Modification gravitation	Matière noire noire	Conditions initiales	Energie noire		
	γ	m_ν / eV	f_{NL}	w_p	w_a	FoM
Current	0.200	0.580	100.0	0.100	1.500	10
EUCLID (BAO+WL)	0.010	0.027	5.5	0.015	0.150	430
EUCLID + Planck	0.007	0.019	2.0	0.007	0.035	4020
Amélioration	30	30	50	>10	>50	>300

Ce tableau n'a de sens que si les erreurs systématiques sont faibles

Performances et perspectives

Parametre	Modification gravitation	Matière noire noire	Conditions initiales	Energie noire		
	γ	m_ν / eV	f_{NL}	w_p	w_a	FoM
Current	0.200	0.580	100.0	0.100	1.500	10
EUCLID (BAO+WL)	0.010	0.027	5.5	0.015	0.150	430
EUCLID + Planck	0.007	0.019	2.0	0.007	0.035	4020
Amélioration	30	30	50	>10	>50	>300

Ce tableau n'a de sens que si les erreurs systématiques sont faibles
EUCLID est dessiné pour cela !

Performances et perspectives

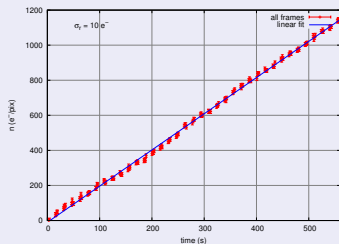
- 1 L'accélération de l'expansion de l'Univers est-elle due à :
 - ▶ une constante cosmologique ?
 - ▶ un champ scalaire dynamique ?
- 2 La relativité générale est-elle modifiée aux échelles cosmologiques ?
- 3 Quelles sont la nature et les propriétés de l'énergie noire ?
 - ▶ quintessence ?
 - ▶ modification de la gravitation ?
 - ▶ action gravitationnelle du vide quantique ?
- 4 Quelles sont les conditions initiales à l'origine des structures ?

Lancement prévu en 2020... à suivre !

Caractérisation et calibration de l'instrument NISP

Caractéristiques des détecteurs H2RG de l'instrument NISP

- efficacité quantique $>75\%$
[0.9:2.3] μm
- très bas bruit, comparable au bruit de lecture,
- lecture non destructive.



Limitations liées à une mission spatiale :

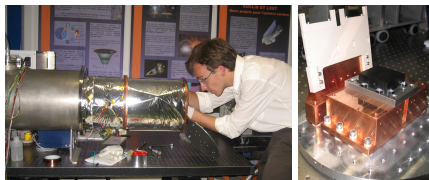
- **téléométrie**
 ⇒ optimisation de la quantité et de la qualité des informations transférées :
 - ▶ détection de mauvais pixels,
 - ▶ soustraction des bruits,
 - ▶ correction de la non-linéarité,
 - ▶ détection et soustraction des cosmiques.
- **temps de mission**
 ⇒ utilisation des rotations du satellite pour la calibration des détecteurs :
 - ▶ mesure du courant d'obscurité,
 - ▶ mesure des corrections de non-linéarité

Caractérisation et calibration de l'instrument NISP

Caractérisation de détecteurs IR à pixels

- détecteur H2RG¹ + Sidecar (CPPM/IPNL)
- caractérisation de détecteurs HgCdTe à pixels (R&T CNES/Sofradir)
- qualification des détecteurs de vol d'EUCLID (ESA/Teledyn)

- Développement et caractérisation d'un banc de test



- Caractérisation des détecteurs² :

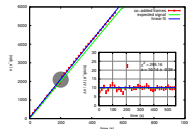
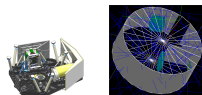
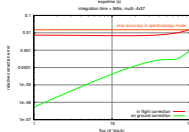
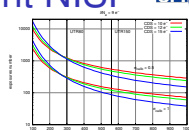
- ▶ signal d'obscurité,
- ▶ bruit de lecture,
- ▶ gain, capacité inter-pixels,
- ▶ linéarité,
- ▶ rémanence,
- ▶ efficacité quantique,
- ▶ réponse intra-pixel...

¹ Nucl. Inst. Meth. A 694 : 95–100, 2012

² Characterization plan and performances of H2RG detectors of the NISP instrument, 2013

Caractérisation et calibration de l'instrument NISP

- optimisation de la calibration en bruit du détecteur³:
 - ▶ faisabilité pendant la rotation du satellite (300s)
 - ▶ extrapolation aux images de spectroscopie (565s)
- correction de non-linéarité⁴:
 - ▶ développement d'une méthode originale au sol
 - ▶ réduction de l'erreur systématique
- mesure de l'impact des cosmiques sur les redshifts⁵:
 - ▶ simulation GEANT4 pour l'estimation des secondaires
 - ▶ moins de 1% des raies H $_{\alpha}$ affectées
- construction d'un test de χ^2 en vol⁶:
 - ▶ réduction des erreurs systématiques
 - ▶ détection des mauvais pixels



³Dark current calibration procedures studies for the NISP instrument, 2012

⁴Non-Linearity correction and correction procedures studies for the NISP instrument, 2013

⁵Cosmic impact on NISP spectroscopic performance, 2013

⁶The readout processing : fit error and chi2 justification, 2013