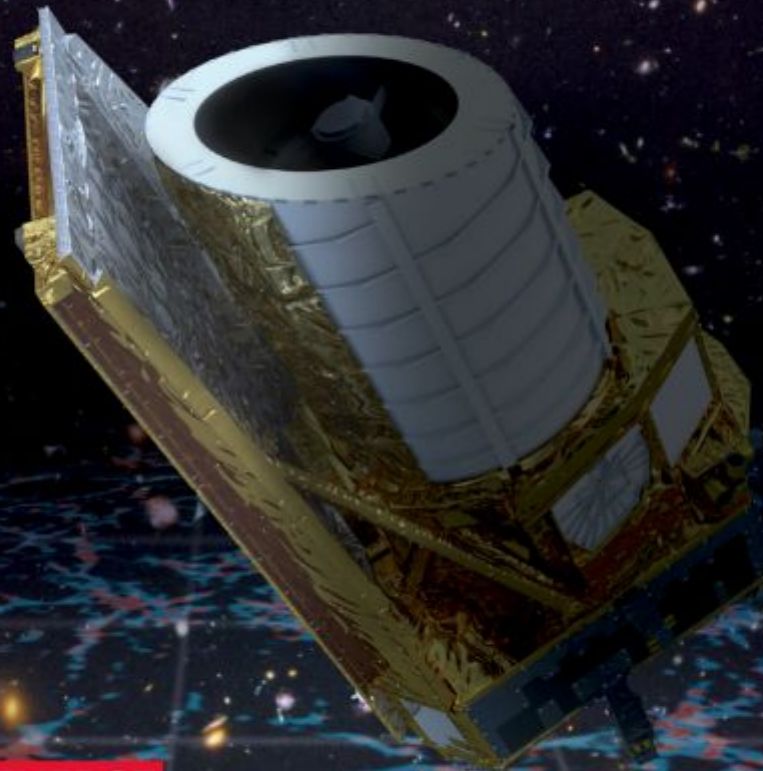


Euclid: la face sombre de l'Univers

Yannick Copin — Institut de Physique des Deux Infinis — Université de Lyon



euclid

EXPLORING THE DARK UNIVERSE



Plan

- Mesurer l'Univers
 - ◆ Quelques notions de cosmologie
 - ◆ Les sondes cosmologiques
- Le projet Euclid
 - ◆ Objectifs scientifiques & design
 - ◆ La mission

Mesurer l'Univers

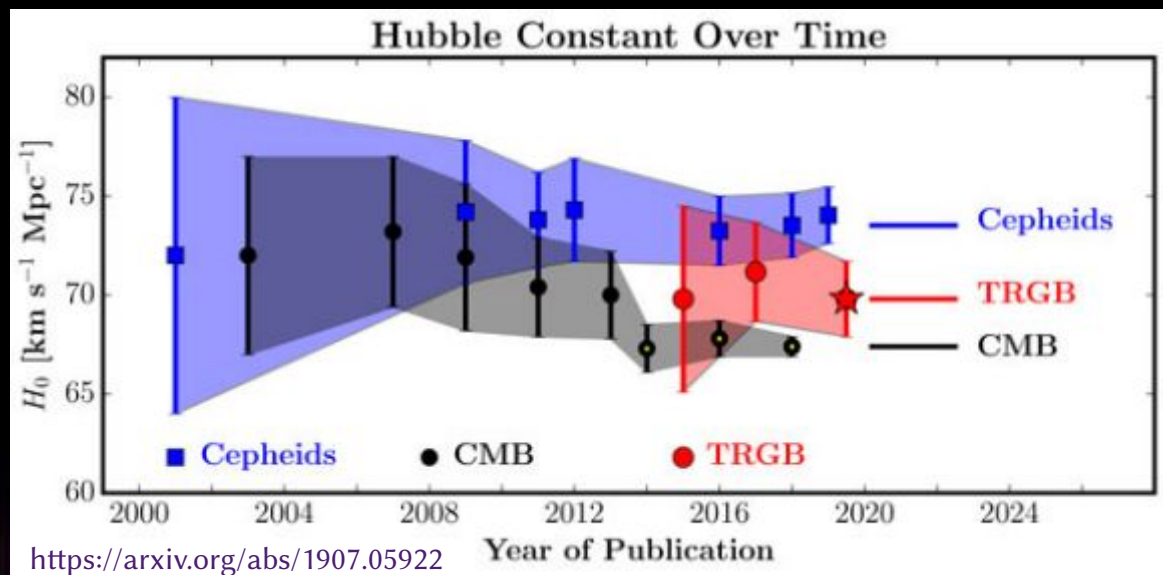
Éléments de cosmologie

Éléments de cosmologie - expansion

$$c = 300\,000 \text{ km/s} = 300 \text{ Mpc/Gans}$$

$$1 \text{ pc} = 3,26 \text{ al} = 3 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

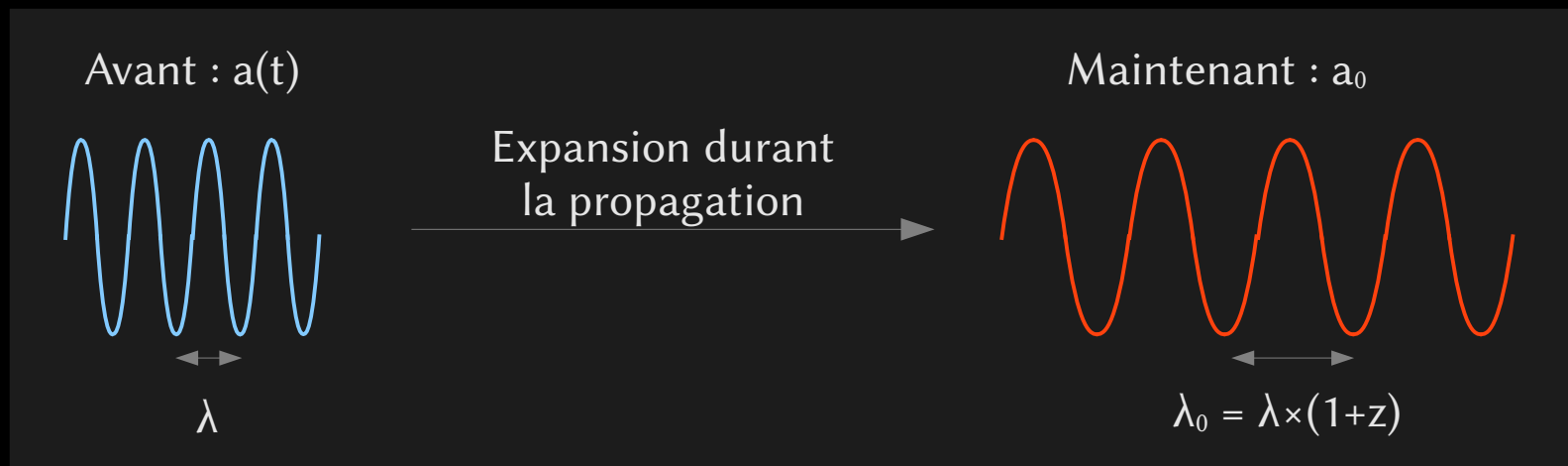
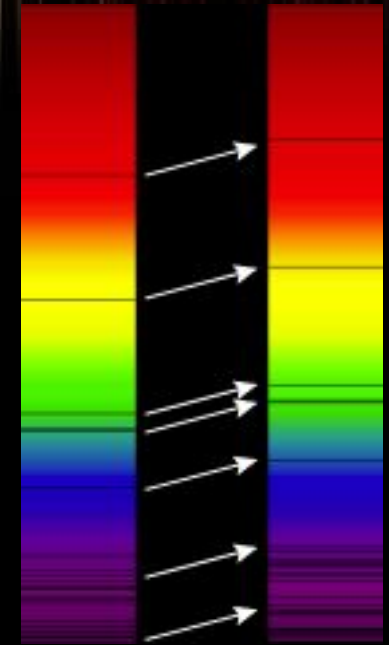
- L'Univers est en **expansion**
 - ◆ Loi de Hubble-Lemaître (1927) : $v_{\text{rec}} \approx H_0 \times D$
 - ◆ Les *distances cosmologiques* sont proportionnelles au **facteur d'échelle** $a(t)$ qui croît avec le temps
 - ◆ **Constante de Hubble** : $H_0 \hat{=} (\dot{a}/a)_{t=t_0} \approx 70 \pm 3 \text{ km/s/Mpc}$



Tension sur H_0

Éléments de cosmologie - redshift

- **Redshift** : $z \hat{=} (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{émis}}) / \lambda_{\text{émis}}$
 - ◆ Quantité purement **observationnelle**
 - ◆ 3 origines physiques *distinctes*
 - ▶ Doppler, champ gravitationnel et cosmologie
- **Cosmologie** : $1 + z = \lambda_{\text{obs}} / \lambda_{\text{émis}} = a_0 / a$



Éléments de cosmologie - RG

Aux g^{des} échelles, l'Univers est dominé par la **gravité**

- ◆ Théorie de la relativité générale (1915)
- ◆ Relation entre le **contenant** (l'espace-temps, $G_{\mu\nu}$) et le **contenu** (tenseur « énergie-impulsion », $T_{\mu\nu}$)

$G_{\mu\nu}$

$T_{\mu\nu}$

Équation du champ
d'Einstein

- ◆ Possibilité d'une **constante cosmologique** Λ

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

ou

$$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

- ◆ **Difficile** à résoudre dans le cas général, plus facile dans le cas particulier d'un **Univers** « **homogène isotrope** » (principe cosmologique)

Éléments de cosmologie - Friedmann

Équations de Friedmann (1922, métrique FLRW)

$$H^2 \stackrel{\text{def}}{=} \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3c^2} \rho + \frac{\Lambda c^2}{3} - \frac{k c^2}{a^2}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2} (\rho + 3p) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

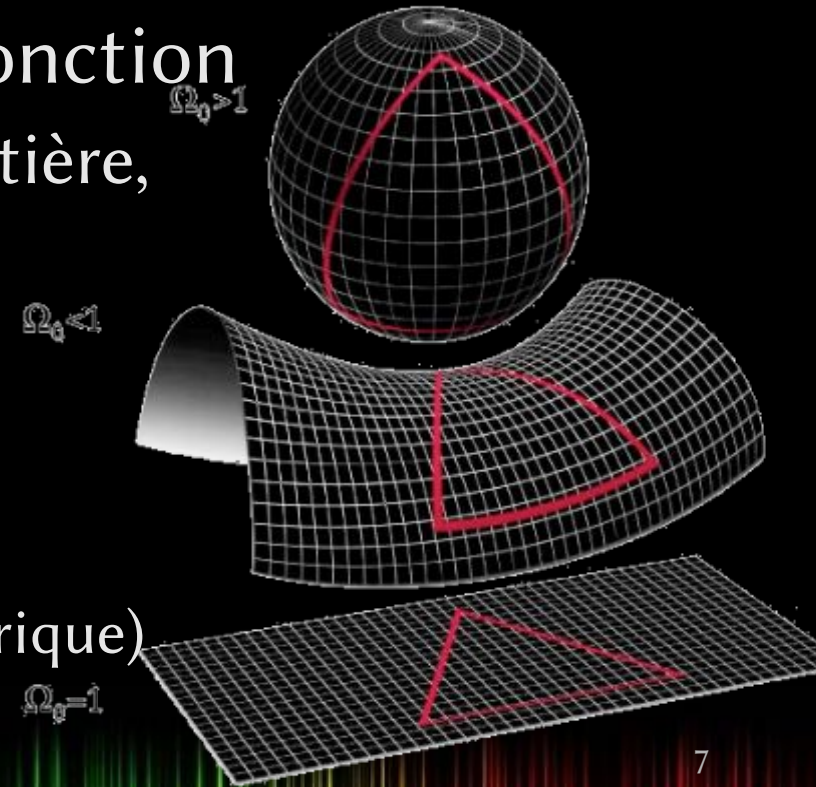
- Histoire de l'expansion $a(t)$ en fonction

- ◆ des **composantes énergétiques** (matière, radiation, énergie sombre, etc.)

- ◆ de la **constante cosmologique Λ**

- ◆ de la **courbure de l'Univers** :

- ▶ $k = 0$ (plat), -1 (hyperbolique), $+1$ (sphérique)



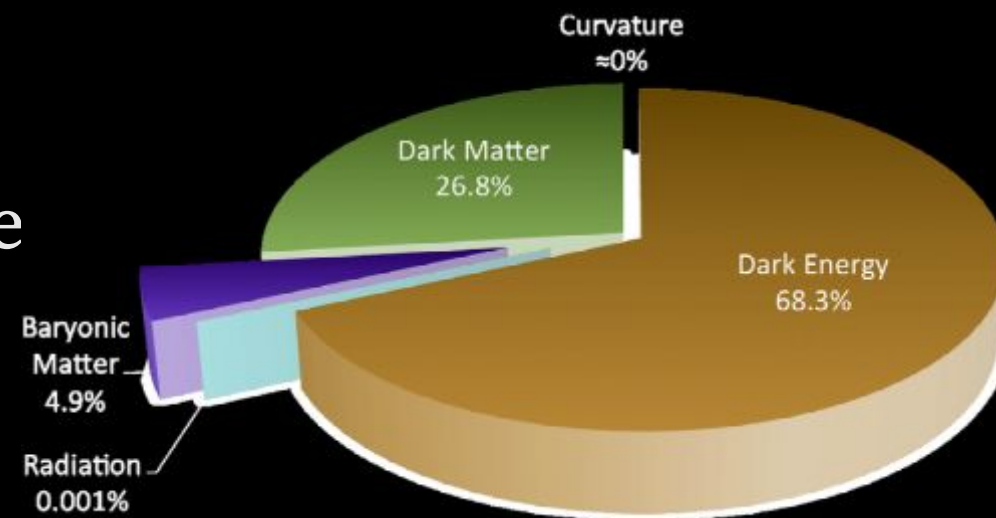
Modèle de concordance Λ CDM

L'éq. de Friedmann se réécrit :

$$\Omega_{\text{Total}} \hat{=} \Omega_{\text{Matière}} + \Omega_{\text{Radiation}} + \Omega_{\Lambda} + \dots = 1 - \Omega_k$$

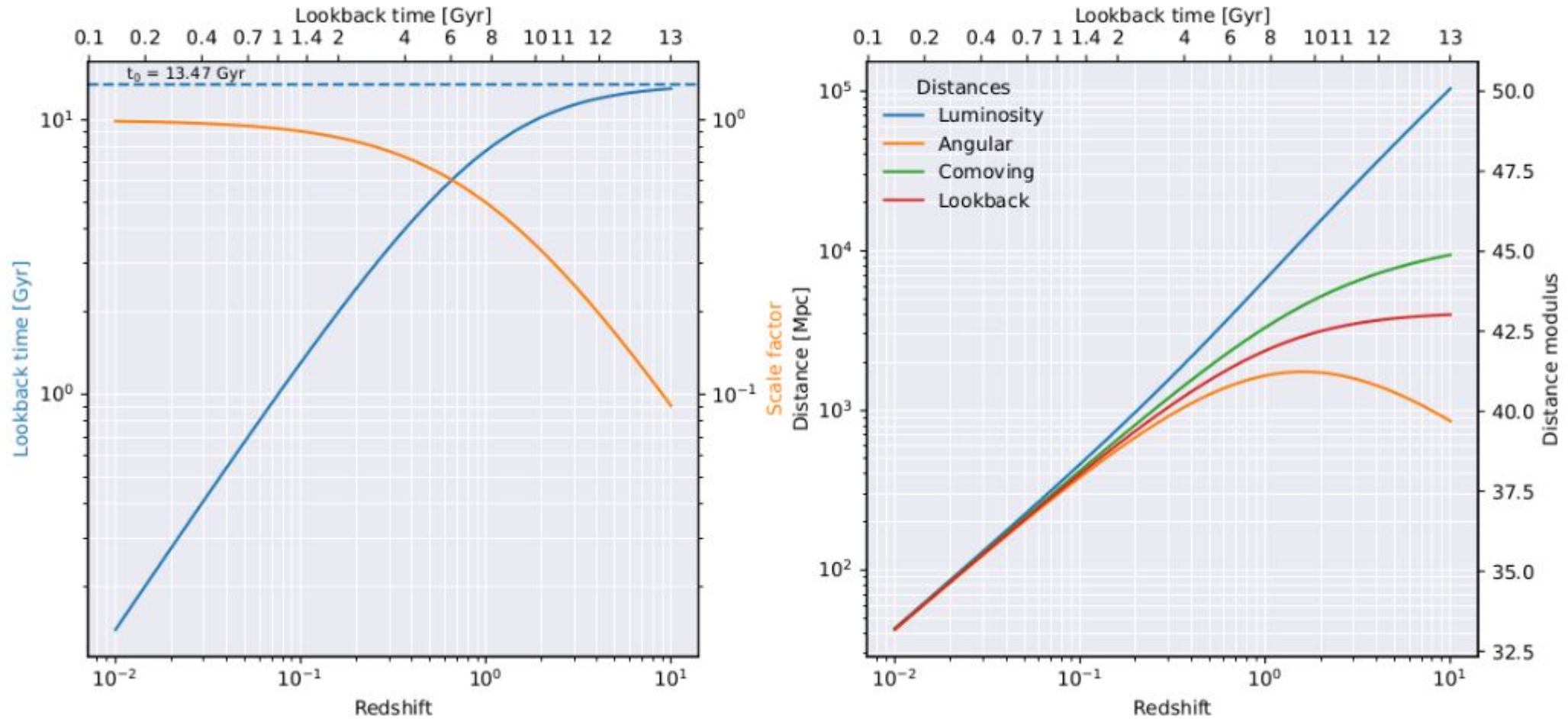
Contenu énergétique **actuel**

- Énergie sombre ($\Omega_{\Lambda} \sim 70\%$) vs. matière ($\Omega_M \sim 30\%$)
- Matière « sombre froide » ($\Omega_{\text{CDM}} \sim 25\%$) vs. baryonique ($\Omega_b \sim 5\%$)
- Radiations et courbure négligeables : $\Omega_R, \Omega_k \approx 0$

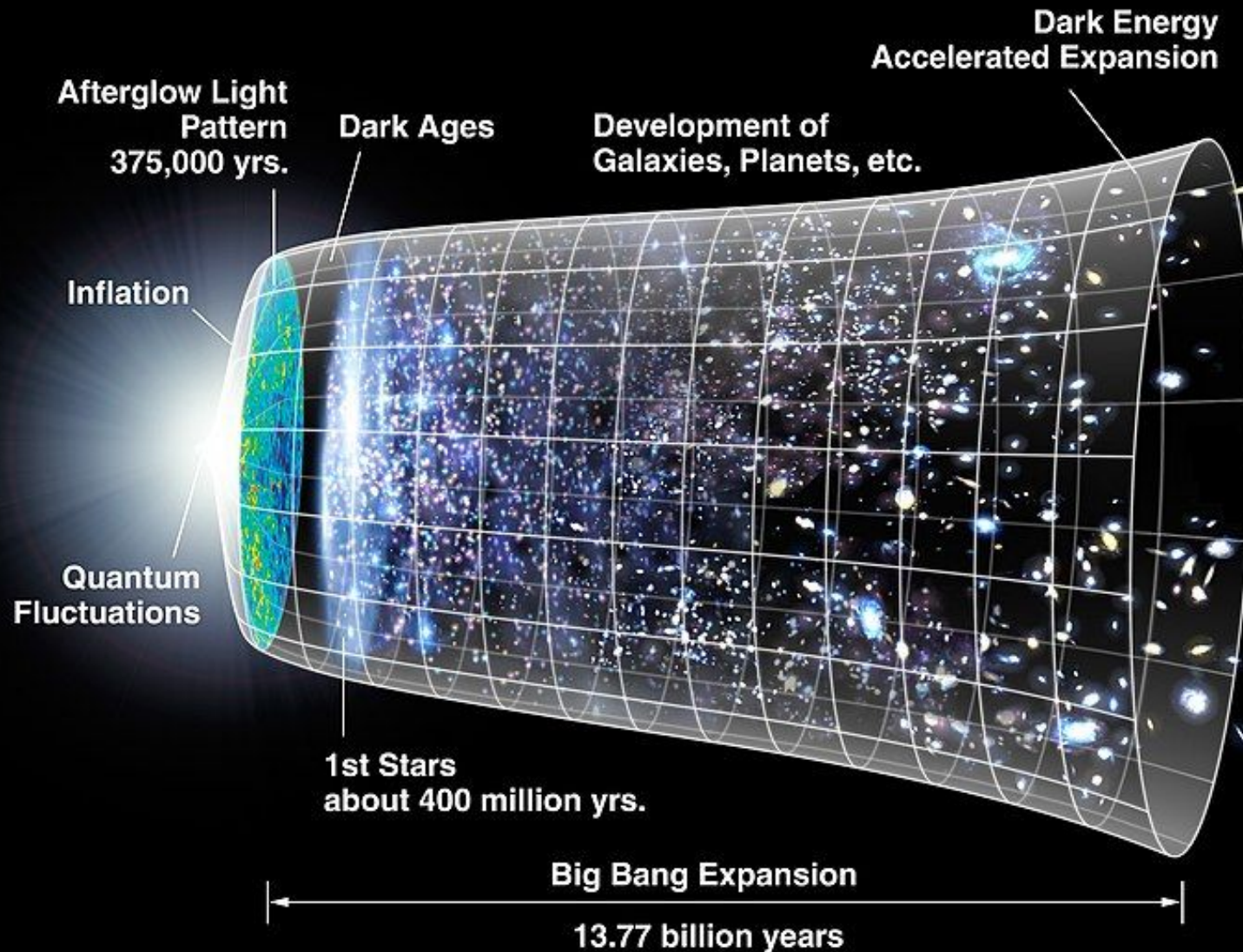


Modèle Λ CDM

$$\Omega_M = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7, h = 0.7$$



Histoire de l'Univers



Mesurer l'Univers

Les sondes cosmologiques

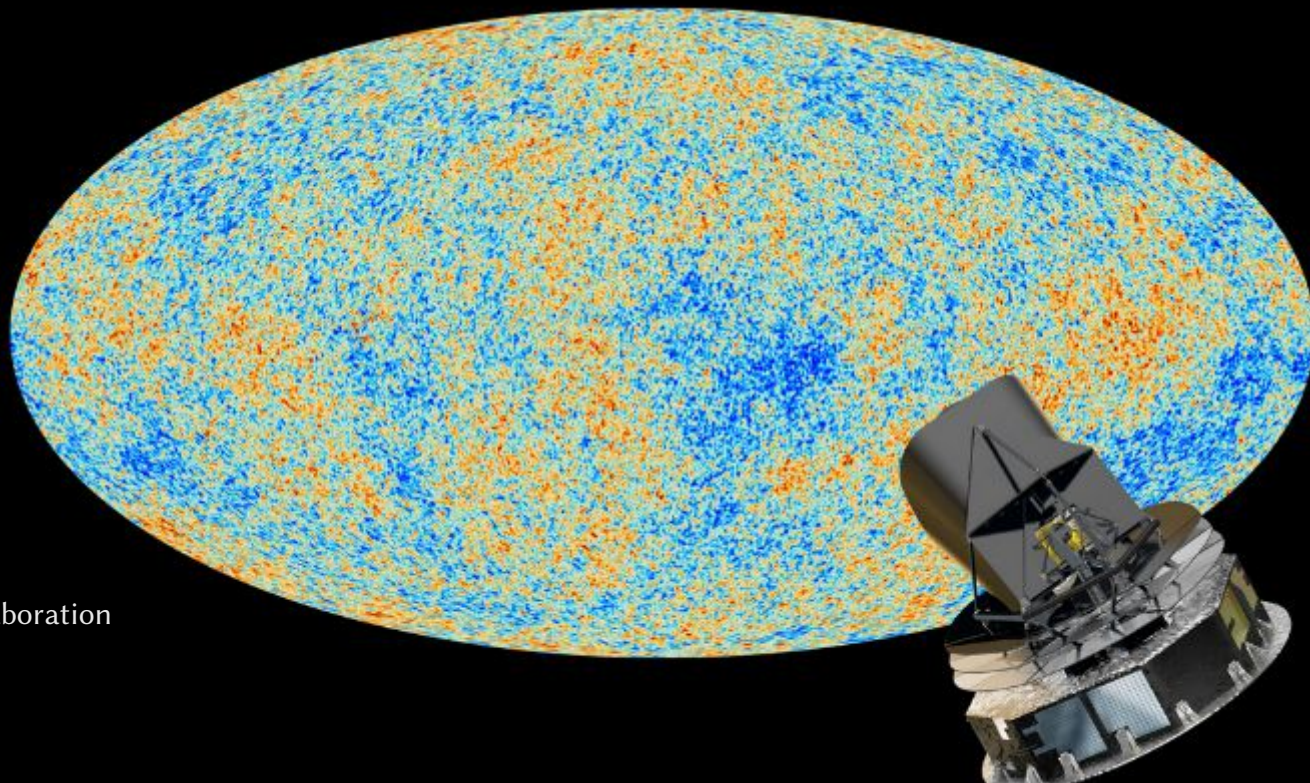
Comment mesurer l'Univers ?

- La **théorie du Big Bang** est décrite par quelques paramètres cosmologiques (6+) : Ω_M , Ω_Λ , k , etc.
- Ces paramètres influent sur la **composition**, l'**évolution** et la **structuration** de l'Univers
 - ◆ Histoire de l'expansion $a(t)$, formation et évolution des grandes structures, nucléosynthèse, etc.
- Les **sondes cosmologiques** permettent de contraindre ces paramètres cosmologiques, p.ex.
 - ◆ Fond diffus cosmologique (*Cosmological Microwave Background*)
 - ◆ Supernovæ thermonucléaires (*SNe Ia*)
 - ◆ **Lentillage gravitationnel faible** (*Weak Lensing*)
 - ◆ **Oscillations acoustiques des baryons** (*Baryons Acoustic Oscillations*)

Le fond diffus cosmologique

L'Univers en expansion était auparavant plus dense et chaud

- ◆ **Découplage matière/lumière** (~380 000 ans) : à $T \sim 3000 \text{ K}$, l'Univers devient transparent
- ◆ Les photons reliques se propagent jusqu'à nous, « refroidis » ($\times 1100$) par l'expansion \rightarrow **rayonnement à 3 K** (mm)



Les supernovæ de type Ia

- Dilution du flux

$$f = L / (4\pi D_L^2)$$

- Chandelles

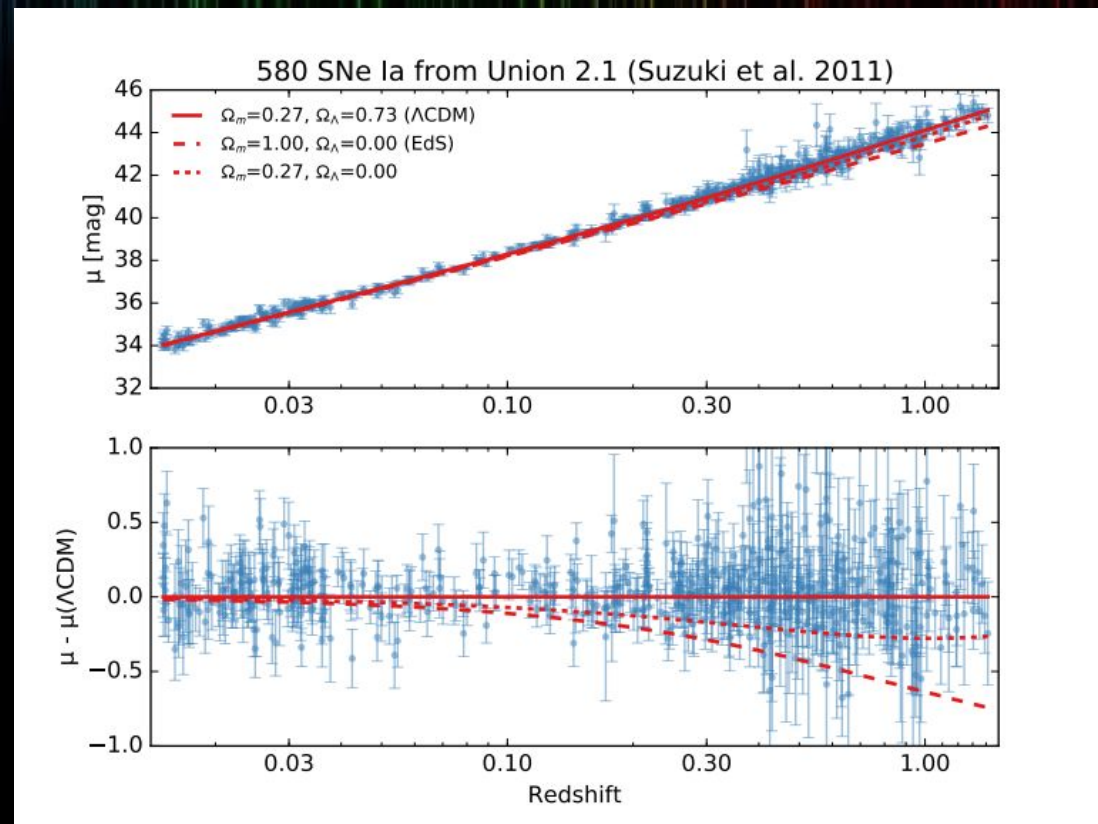
standard(isables) : L

connu *a priori*

→ Diagramme de

Hubble :

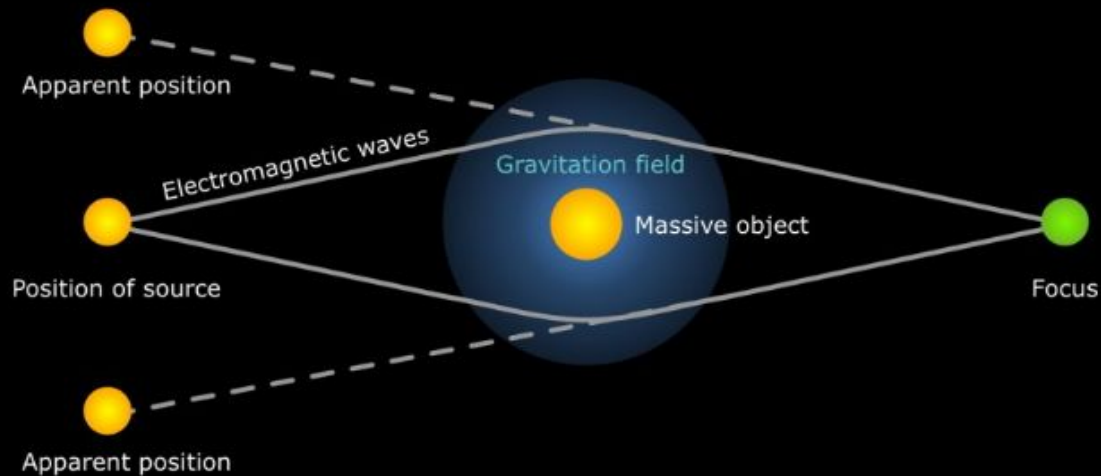
$D_L(z, \text{param. cosmo.})$



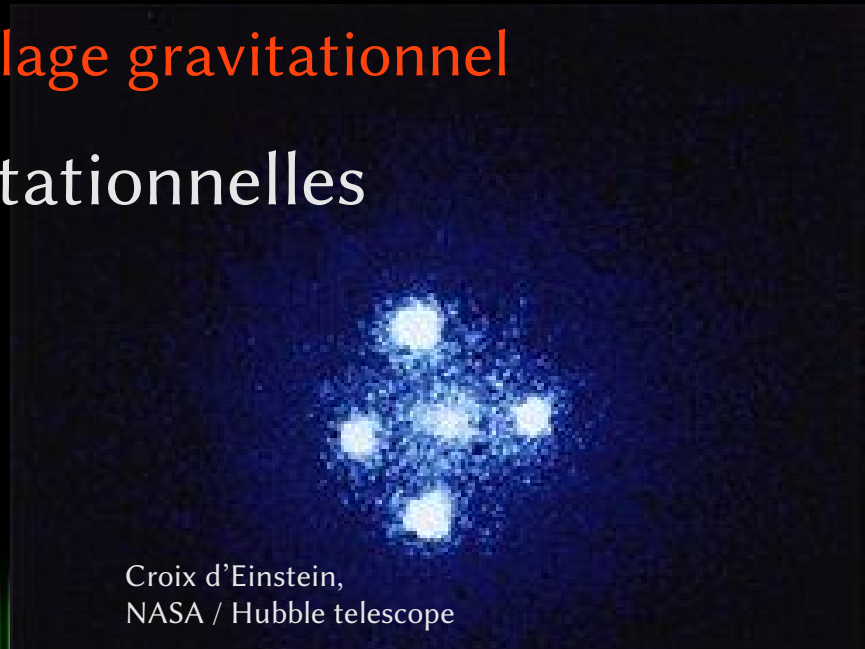
- Trace l'**histoire de l'expansion** $a(t)$ de l'Univers
 - ◆ Découverte de l'**expansion accélérée** de l'Univers (1998)

Constante cosmologie Λ ou « énergie sombre » ?

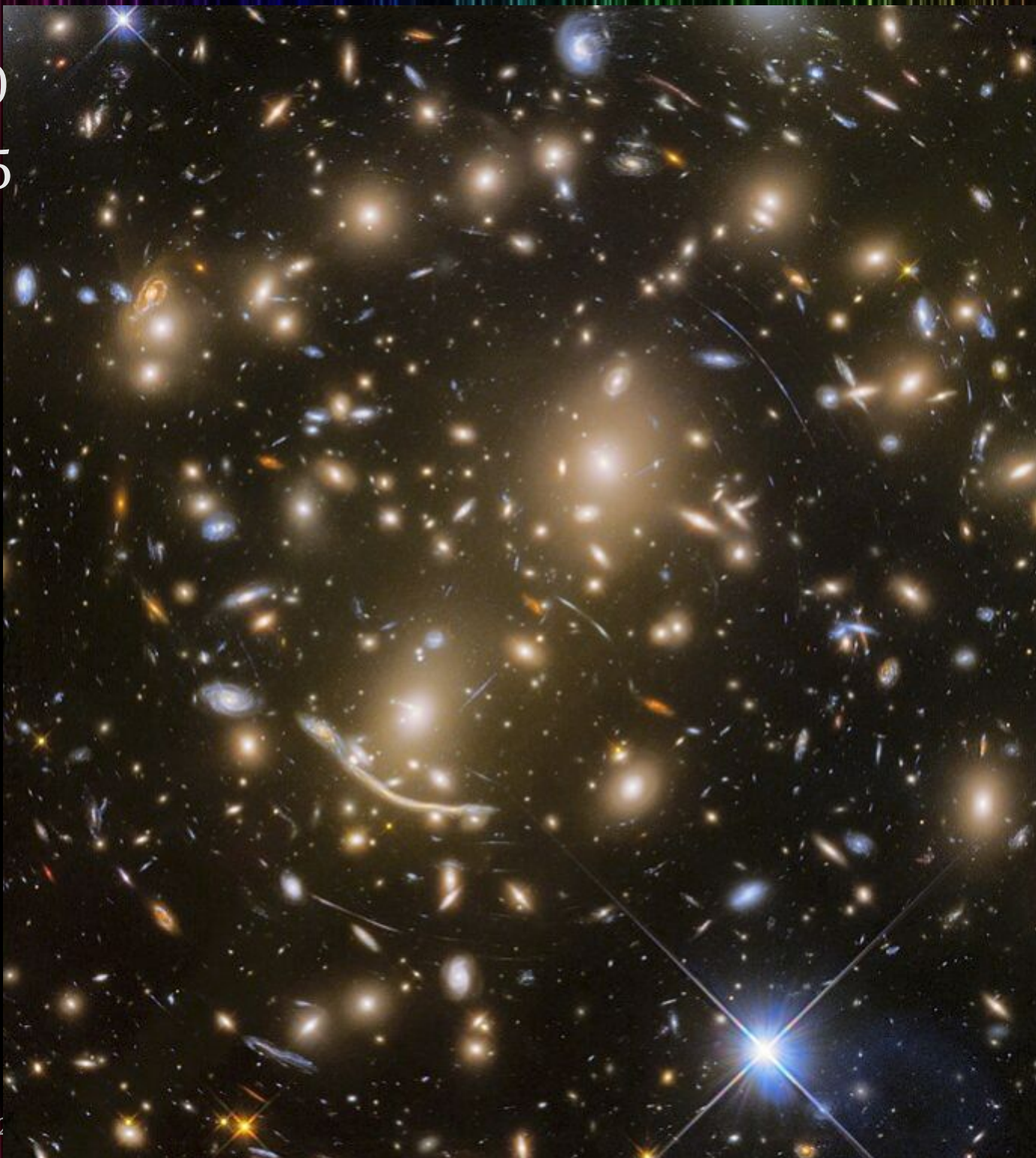
Le lentillage gravitationnel



- La masse déforme l'espace-temps
 - ◆ Les images sont déformées par **lentillage gravitationnel**
- Différents types de lentilles gravitationnelles
 - ◆ Micro-lentillage (→ exo-planète)
 - ◆ Lentillage fort →
 - ◆ **Lentillage faible**



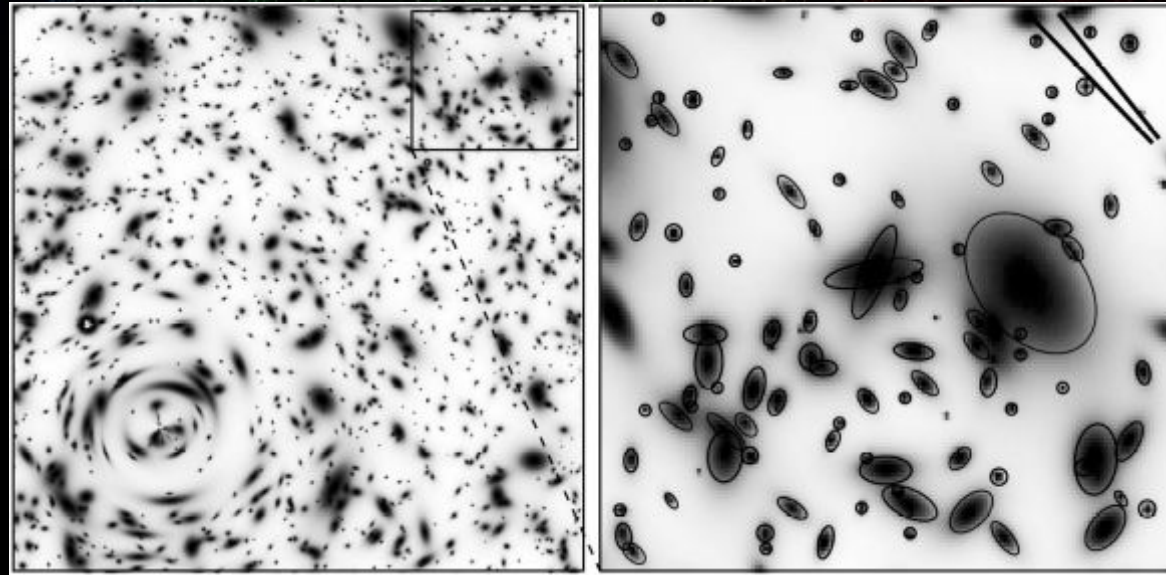
Abell 370
 $z=0.375$



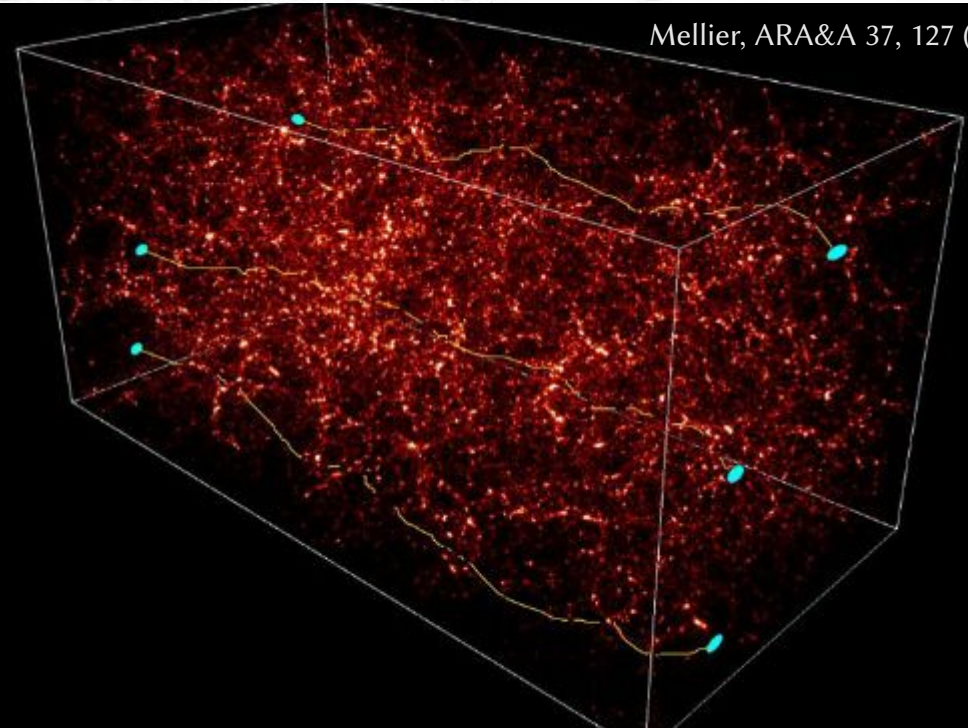
NASA, ESA/Hubble, HST Frontier Fields

Lentillage gravitationnel faible

- **Mesure statistique**
 - ◆ Effet $< 1\%$ → **large échantillon** de galaxies
 - ◆ **Stabilité** des mesures
- Sensible à toute la masse le long de la ligne de vue
 - ◆ **Cartographie « 4D »** de la matière (sombre)
- Taux de croissance des structures
 - ◆ **Gravité vs. expansion**

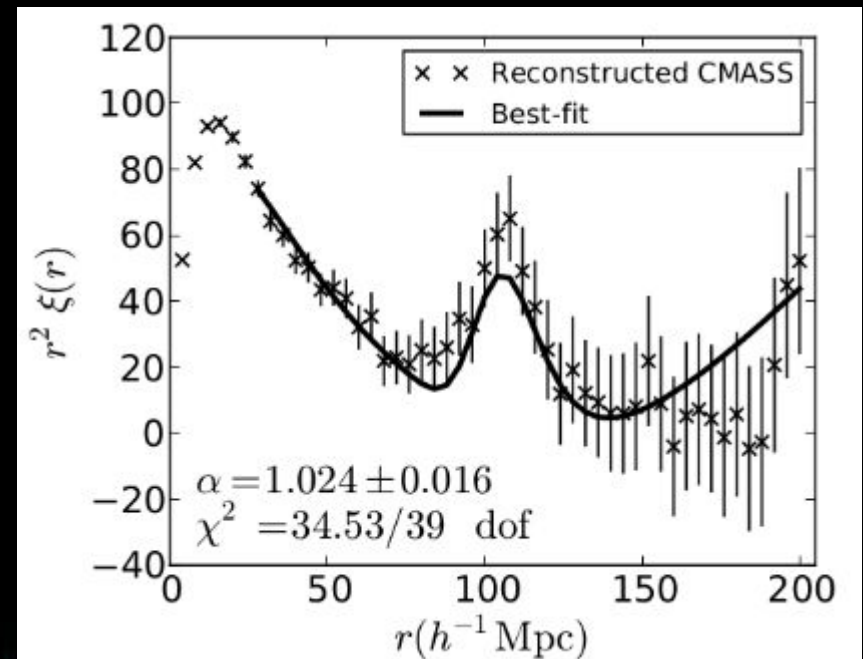


Mellier, ARA&A 37, 127 (1999)



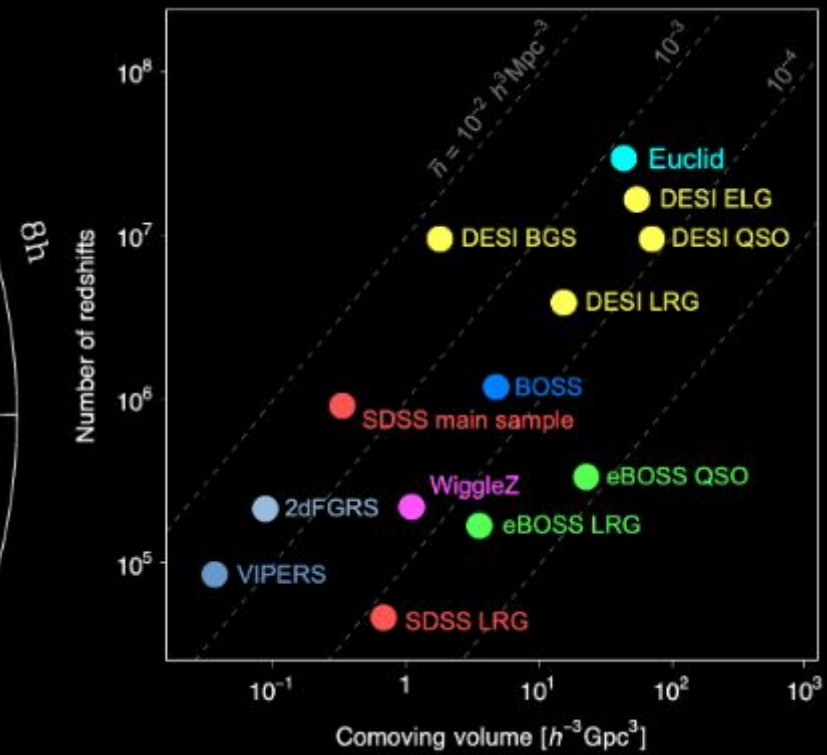
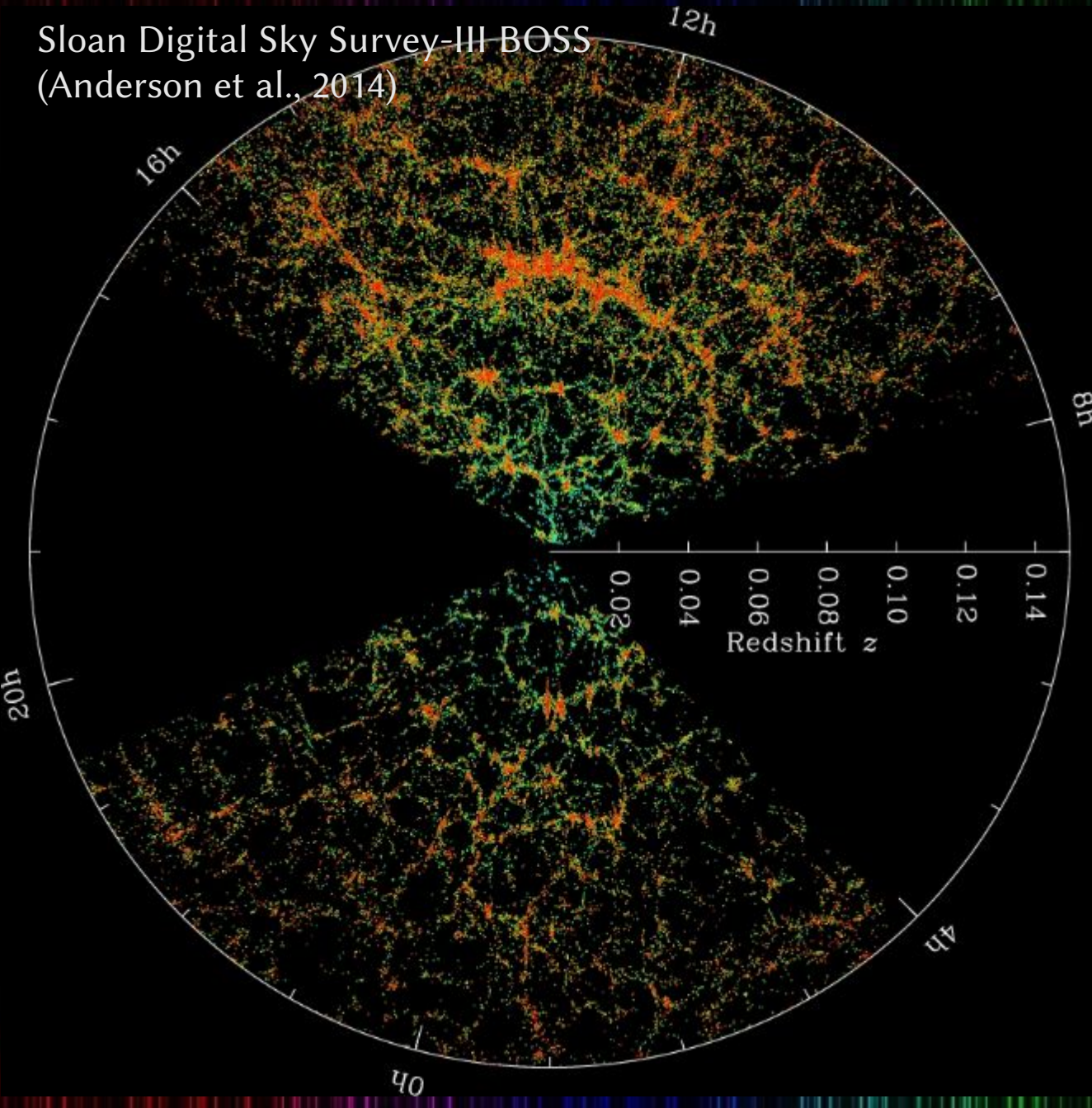
Oscillations acoustiques des baryons

- Après le **découplage matière/rayonnement** (CMB), la matière s'accumule dans les **surdensités acoustiques**
 - ◆ Cette (légère) accumulation est perceptible dans la **distribution statistique des galaxies** (baryons)
 - ▶ Faible excès de probabilité de paires de galaxies distantes de ~ 150 Mpc
- Observations : acquisition de très grands **catalogues de galaxies**
 - ◆ Coordonnées et redshifts
 - ◆ Calculs statistiques massifs



Grand sondage de galaxies

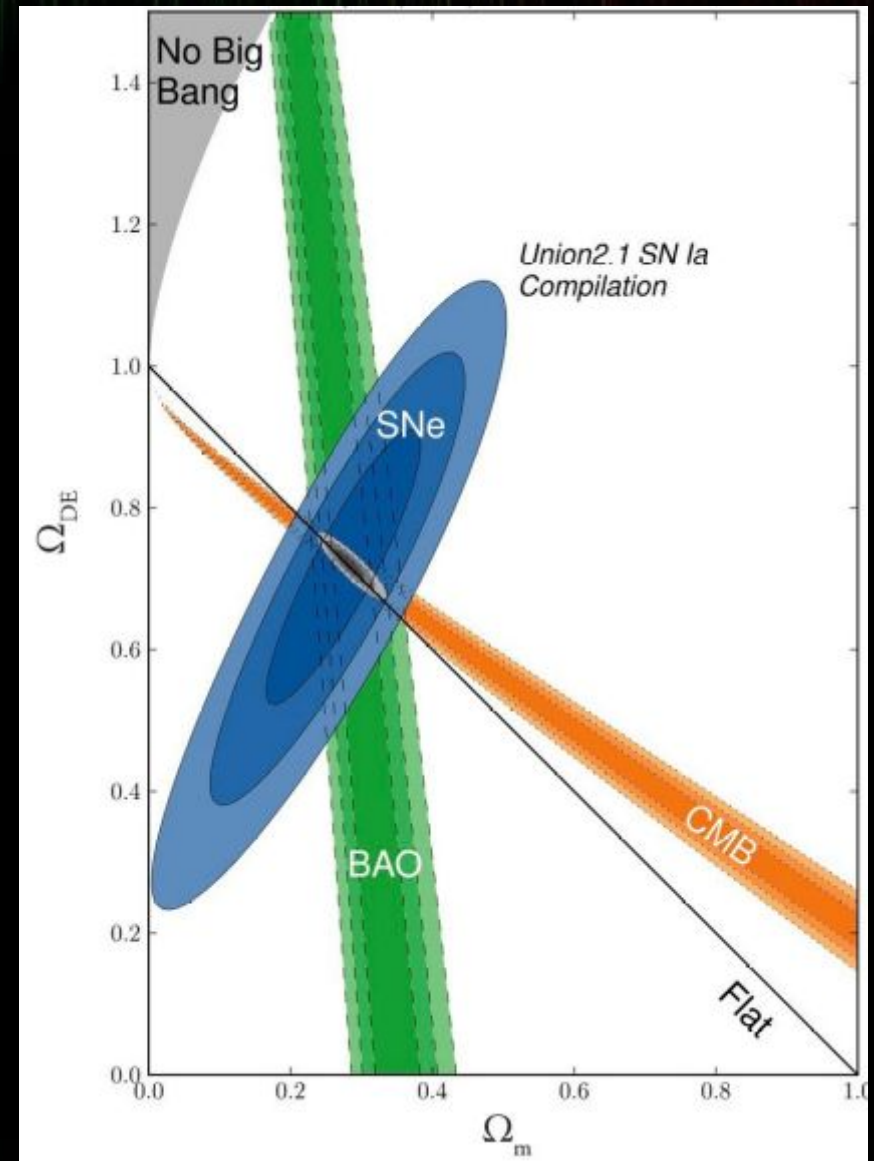
Sloan Digital Sky Survey-III BOSS
(Anderson et al., 2014)



Modèle de concordance Λ CDM

Suzuki et al. 2012, ApJ. 746, 85

- Toutes les sondes s'accordent sur des **paramètres communs**
 - ◆ C^{te} cosmo. : $\Omega_\Lambda \sim 70\%$
 - ◆ Matière sombre : $\Omega_{\text{CDM}} \sim 25\%$
 - ◆ Baryons : $\Omega_b \sim 5\%$
 - ◆ Radiations négligeables
 - ◆ Univers plat
- **Tension sur H_0** :
 - ◆ Univers proche : 73 ± 1 km/s/Mpc
 - ◆ Univers lointain : 67 ± 0.5 km/s/Mpc



Le projet Euclid

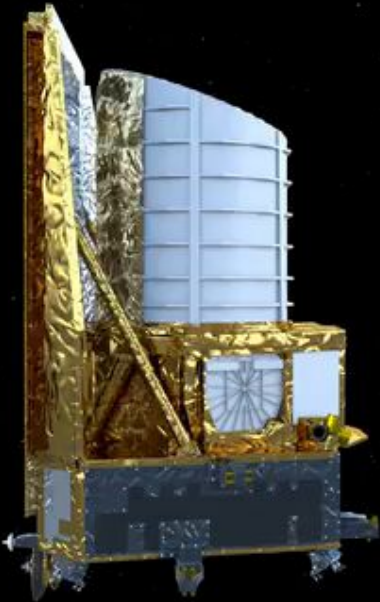
Objectifs scientifiques & design

La mission Euclid

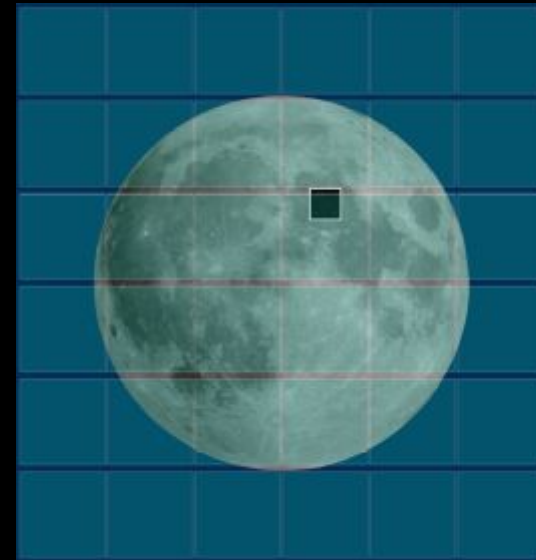
- Objectif principal : **propriétés des secteurs sombres**
 - ◆ Λ ou énergie sombre ?
 - ◆ Répartition de la matière sombre ?
 - ◆ RG ou gravité modifiée ?
- Méthodes principales
 - ◆ **BAO** : mesurer position et redshift des galaxies
 - ◆ **WL** : mesurer la forme des galaxies
- Observations
 - ◆ **1/3 du ciel jusqu'à $z \sim 2$**
 - ◆ **$\sim 1,5 \cdot 10^9$ galaxies, $\sim 3,5 \cdot 10^7$ redshifts**
- Consortium Euclid
 - ◆ 2^e mission **classe M** du programme Cosmic Vision de l'ESA
 - ◆ 21 pays (EU, USA, CA, JP)
 - ◆ >3500 personnes, 300 organismes
 - ◆ Budget : 1.4 G€

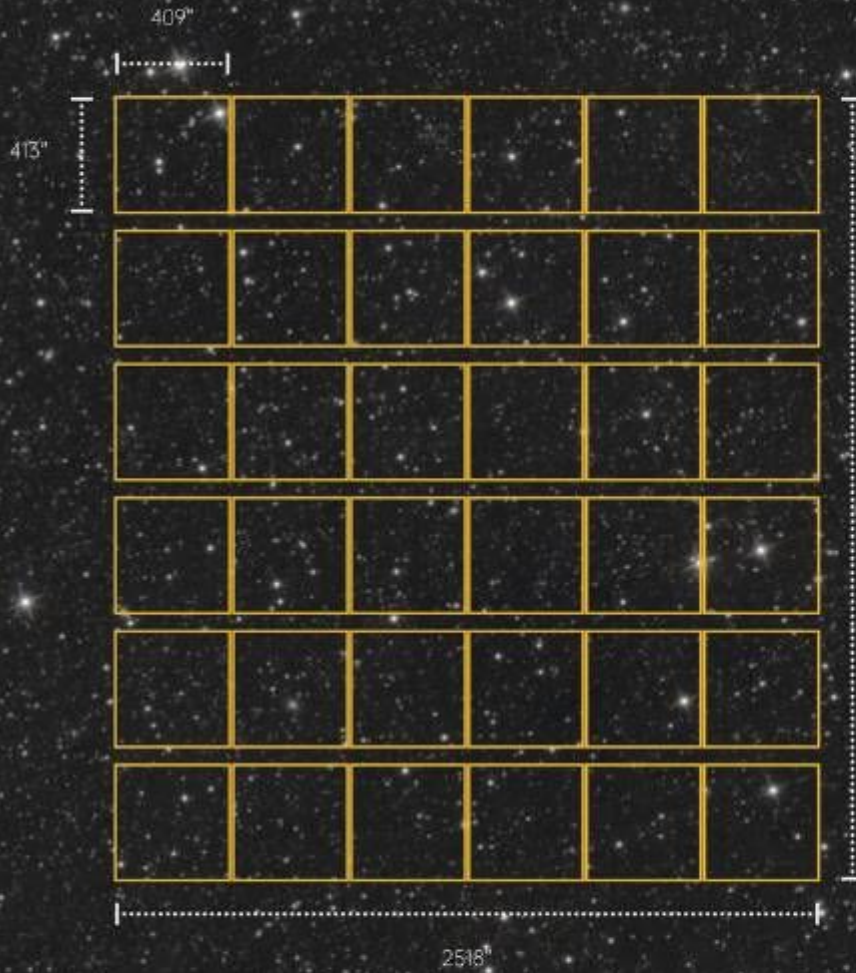


Télescope



- Une des **meilleures optiques spatiales** (civiles)
 - ◆ PSF fine (0''14) et stable
- Très grand champ de vue :
 $\sim 0.5 \text{ deg}^2$
- Diamètre : **1.2 m**





EUCLID VIS

100"



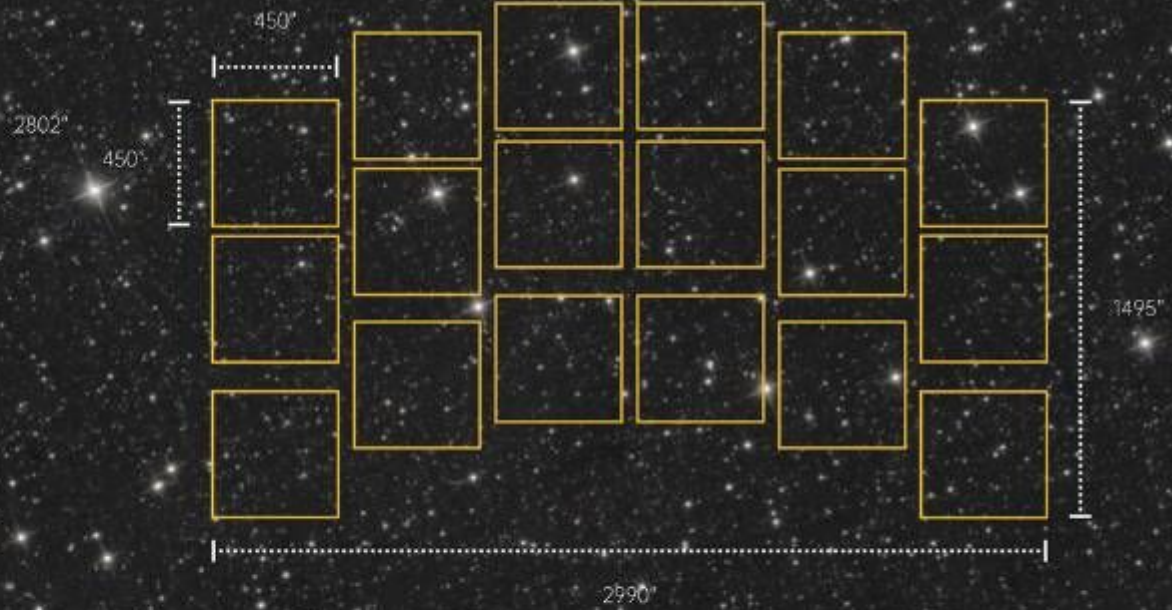
JWST NIRCam



HST WFC3/UVIS



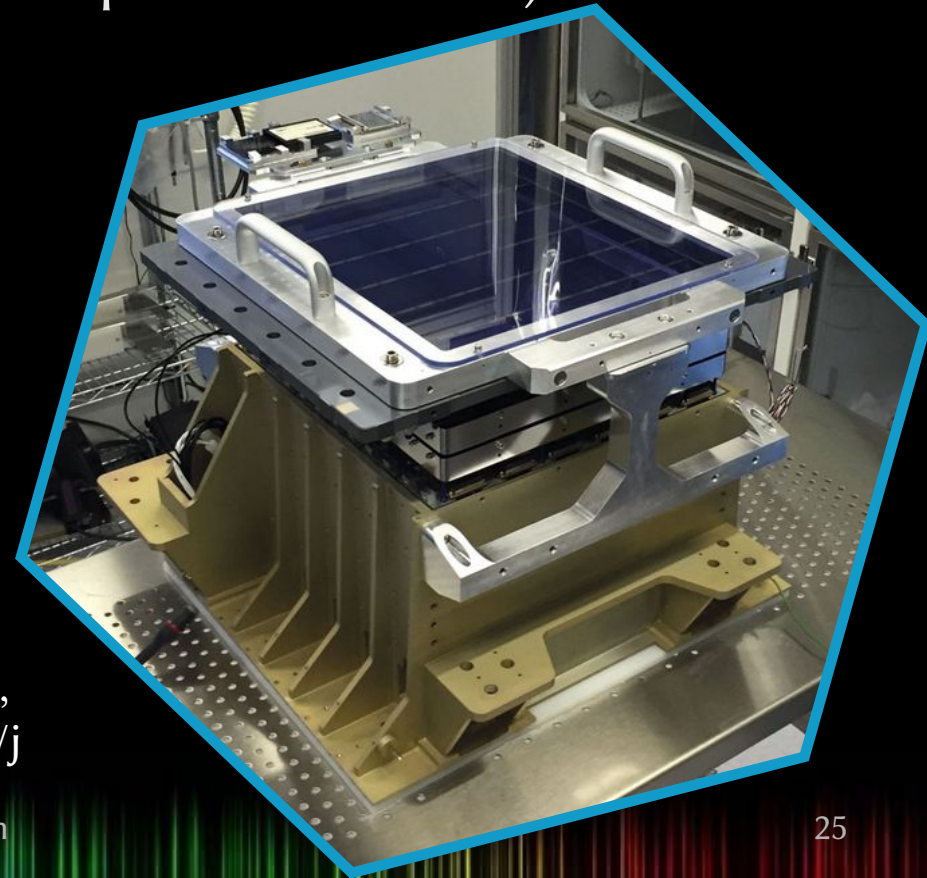
HST WFC3/IR



ROMAN WFI (planned 2027)

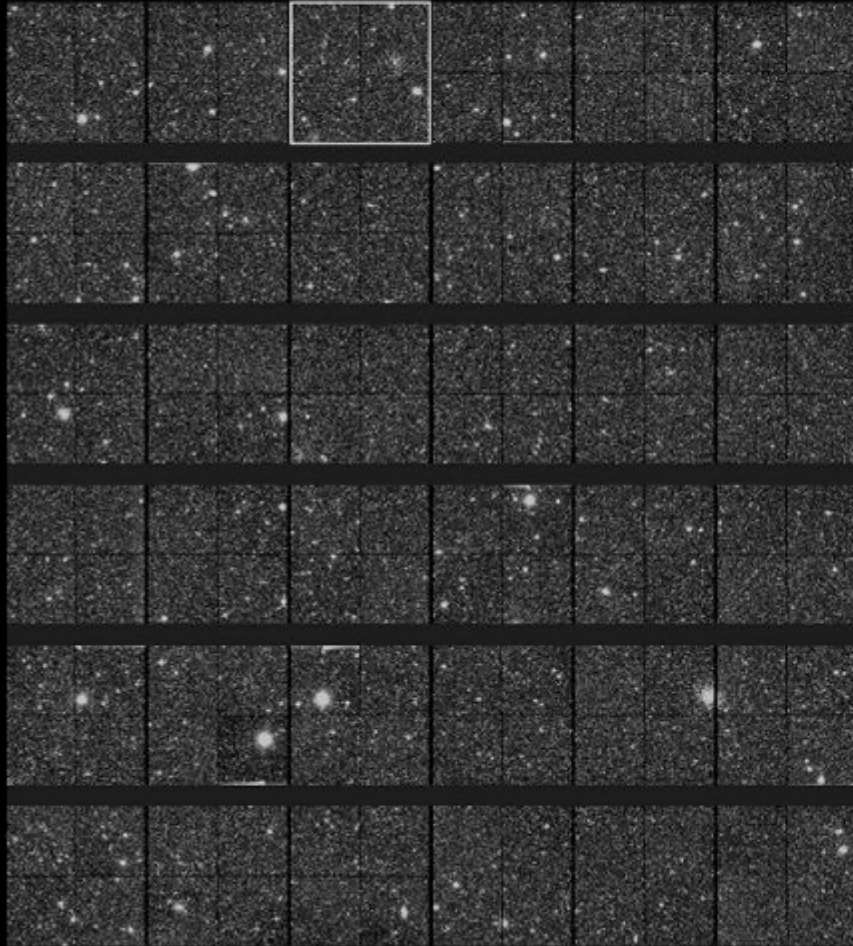
Imageur visible (VIS)

- **Objectifs** : grand champ, précision des images, stabilité optique
- **Détecteurs** : 36 CCDs de $4k \times 4k = 610 \text{ Mpx}$
 - ◆ Champ de vue $0.78 \times 0.73 \text{ deg}^2 = (25 \text{ kpx de } 0.1 \text{ arcsec})^2$
 - ◆ Domaine spectral : $0.53 - 0.92 \mu\text{m}$
- Temps de pose : 566 s



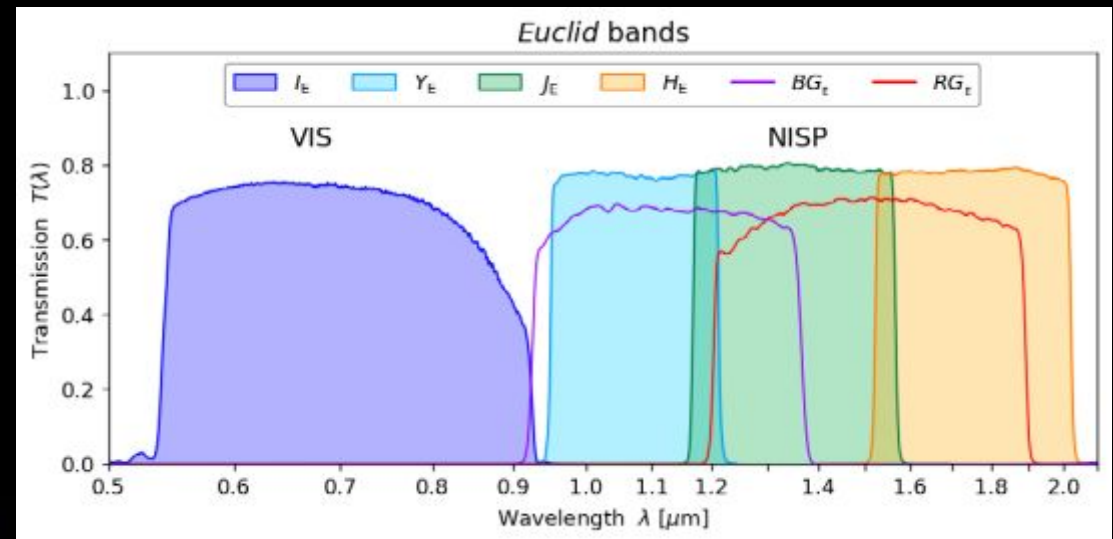
VIS : 200 W, 110 kg, $0.8 \text{ m} \times 0.8 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$,
plan focal à 140 K, 600 Gb/j

EARLY COMMISSIONING TEST IMAGE, VIS INSTRUMENT

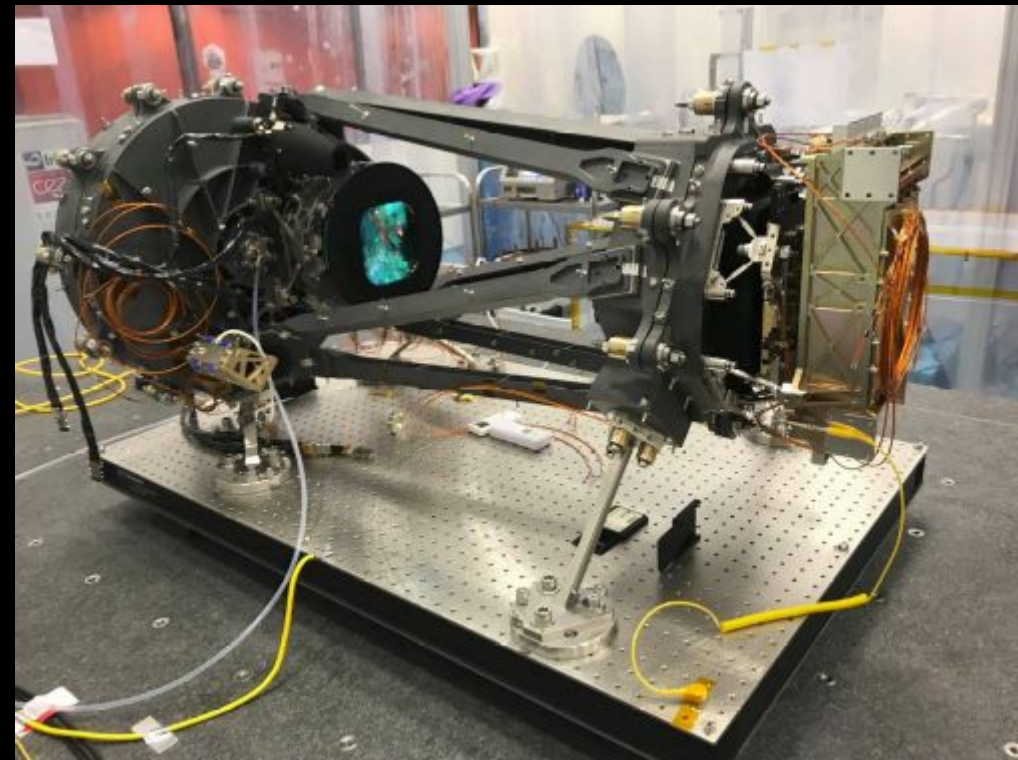
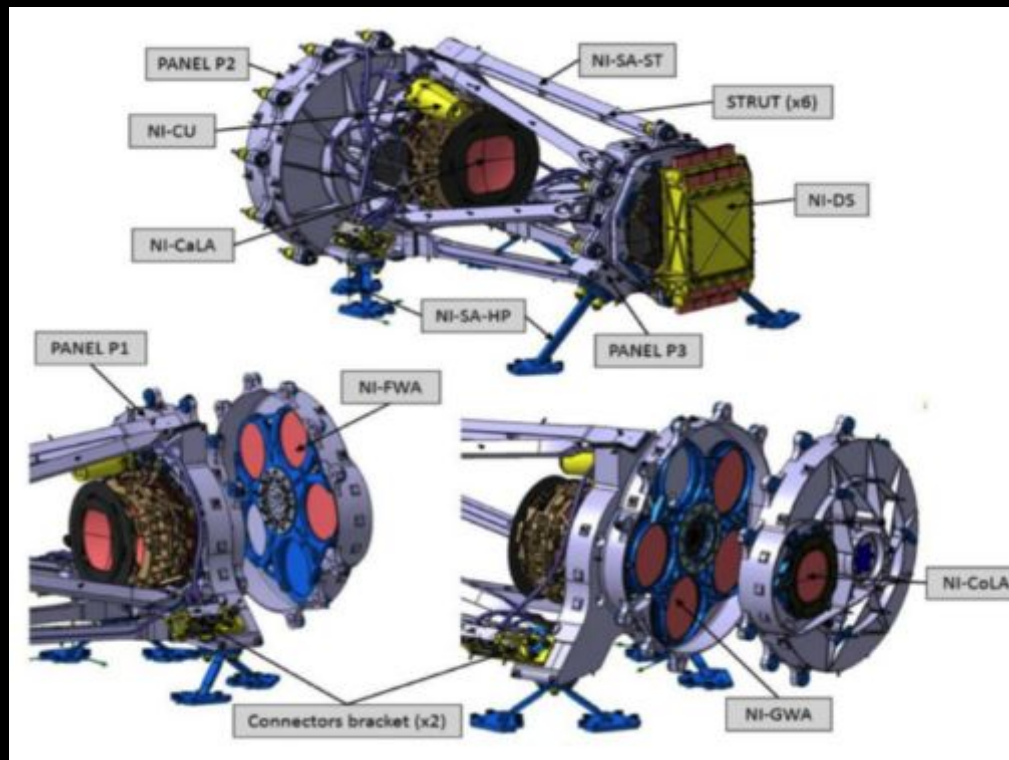


Near Infrared Spectro-Photometer (NISP)

- Un **double instrument proche IR**
 - ◆ Un **imageur** 3 bandes YJH
 - ◆ Un **spectro-imageur** 2 bandes (R & B)
- **Détecteurs** : 16 HgCdTe de $2k \times 2k = 67$ Mpx
 - ◆ Domaine spectral : **0.9 – 2.0 μm**
 - ◆ Champ de vue $0.76 \times 0.72 \text{ deg}^2 = (8 \text{ kpx de } 0.3 \text{ arcsec})^2$
- Temps de pose :
 - ◆ Photo : 87 s
 - ◆ Spectro : 550 s

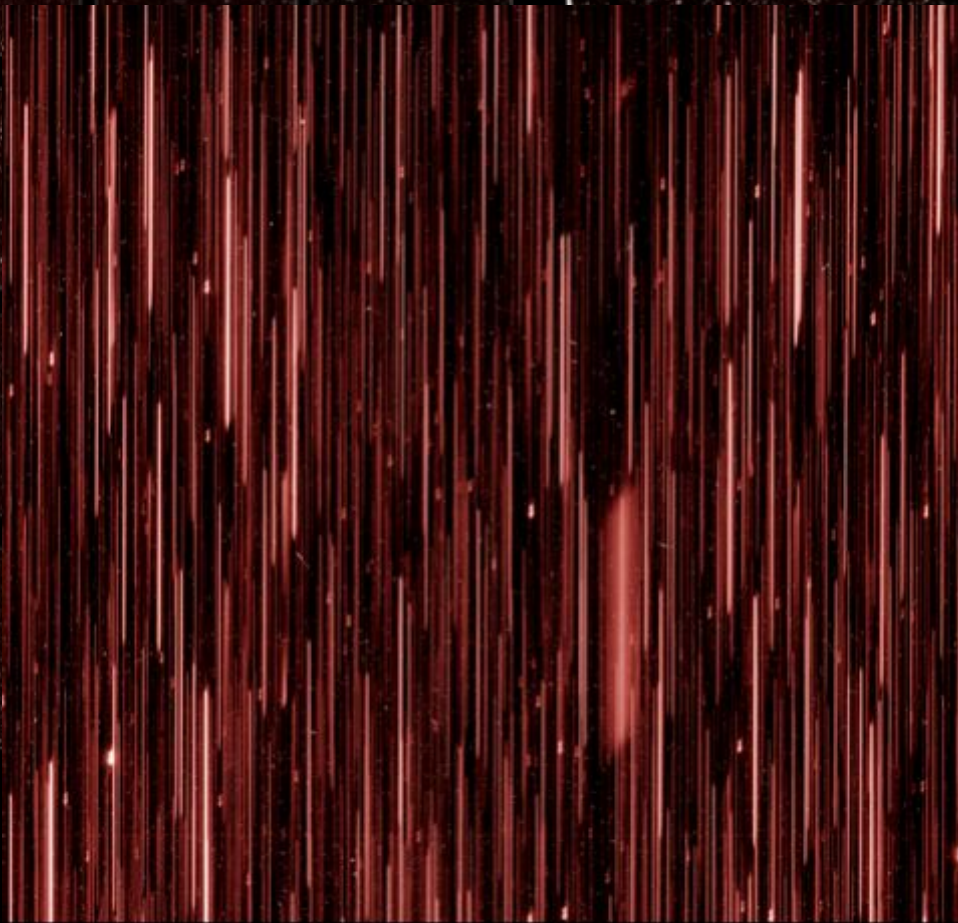
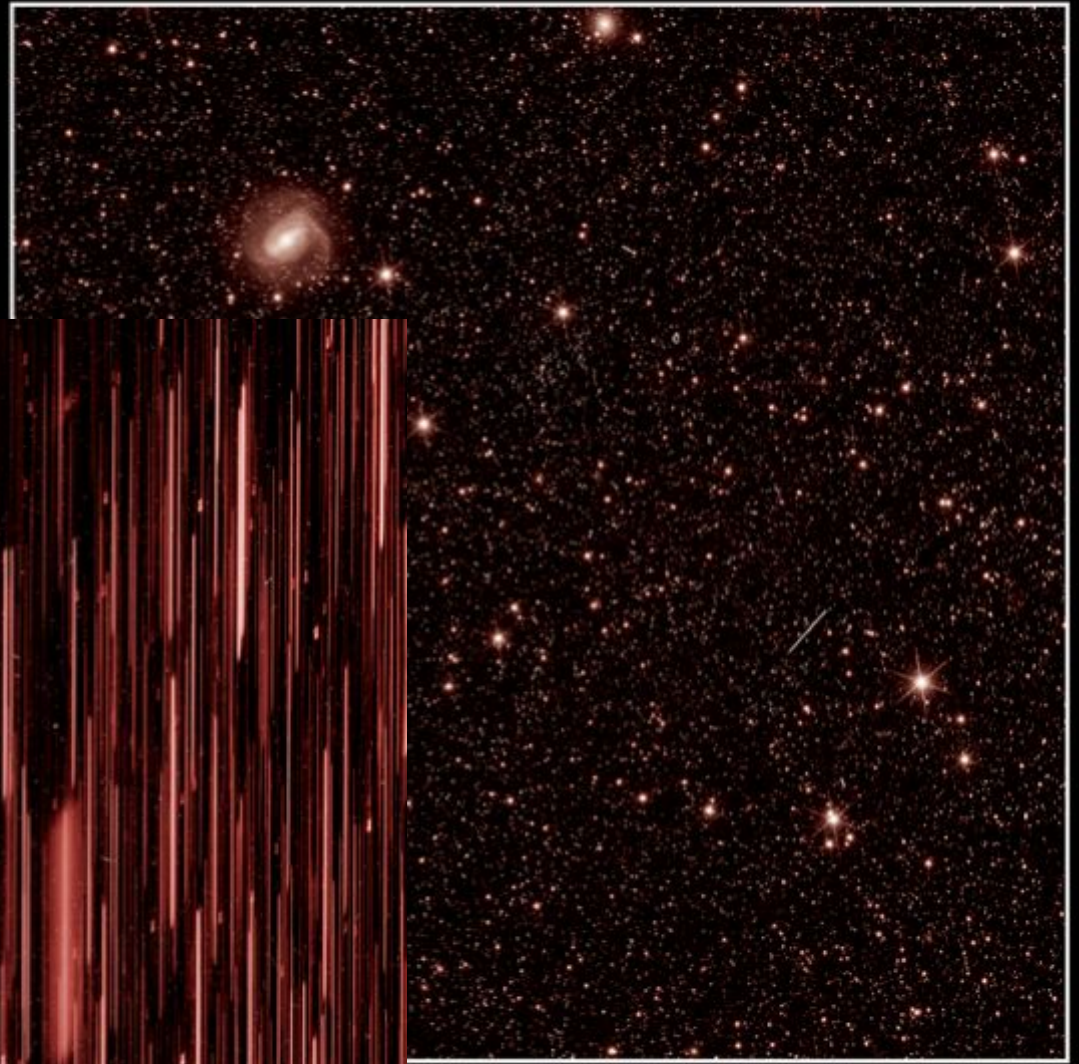
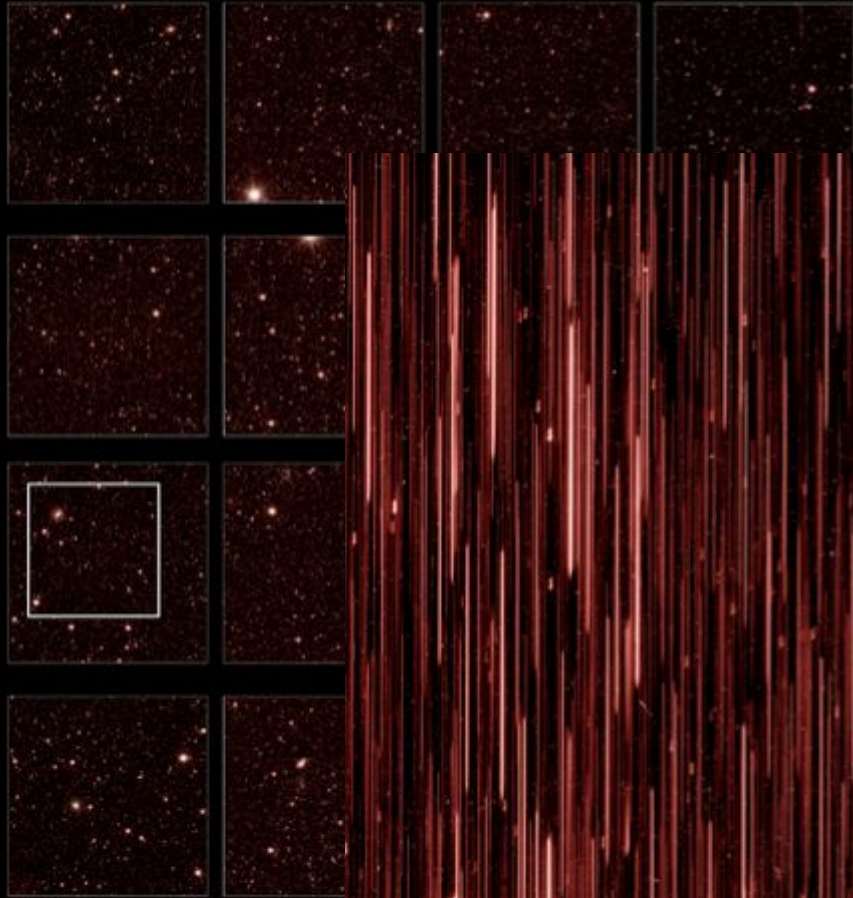


Near Infrared Spectro-Photometer (NISIP)



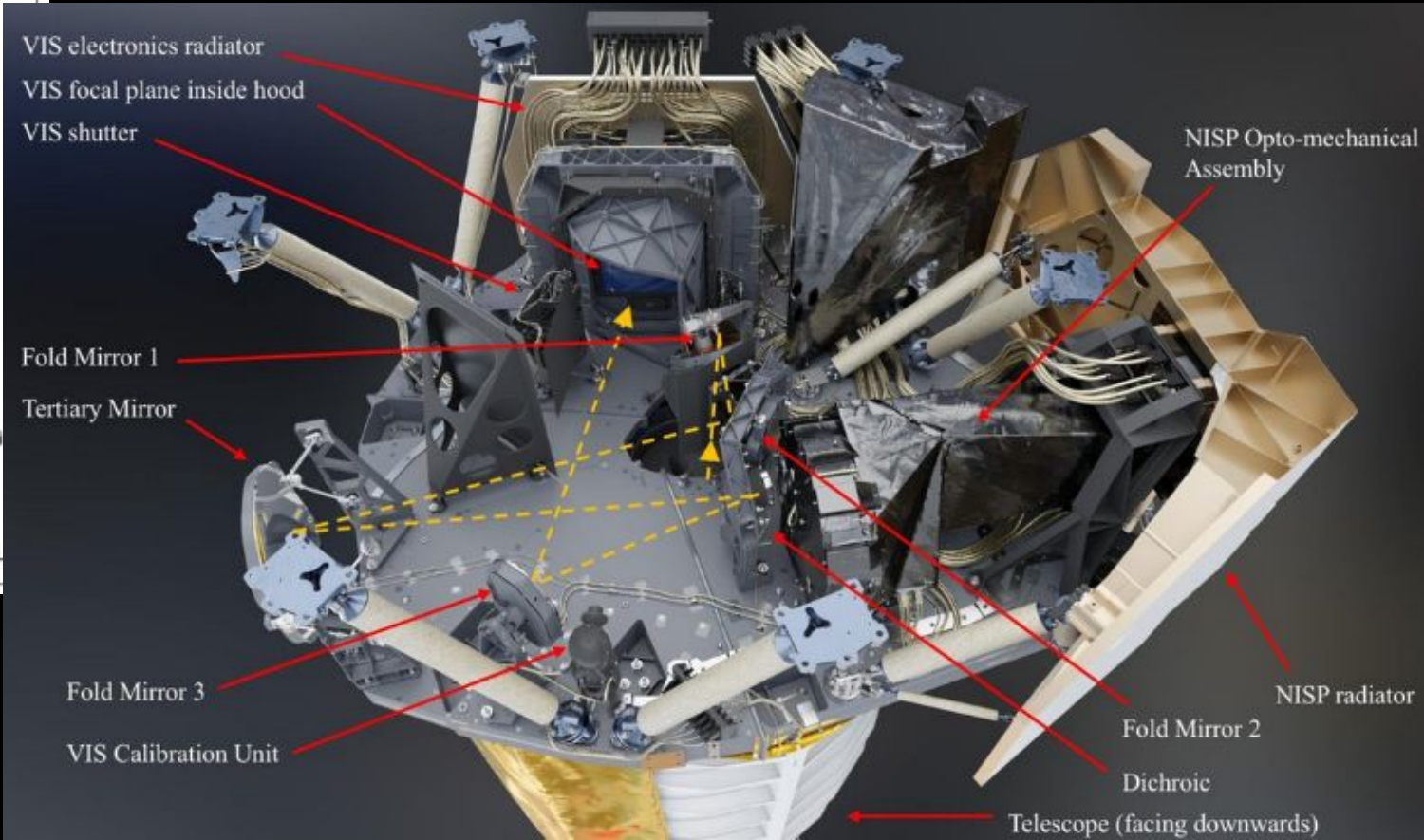
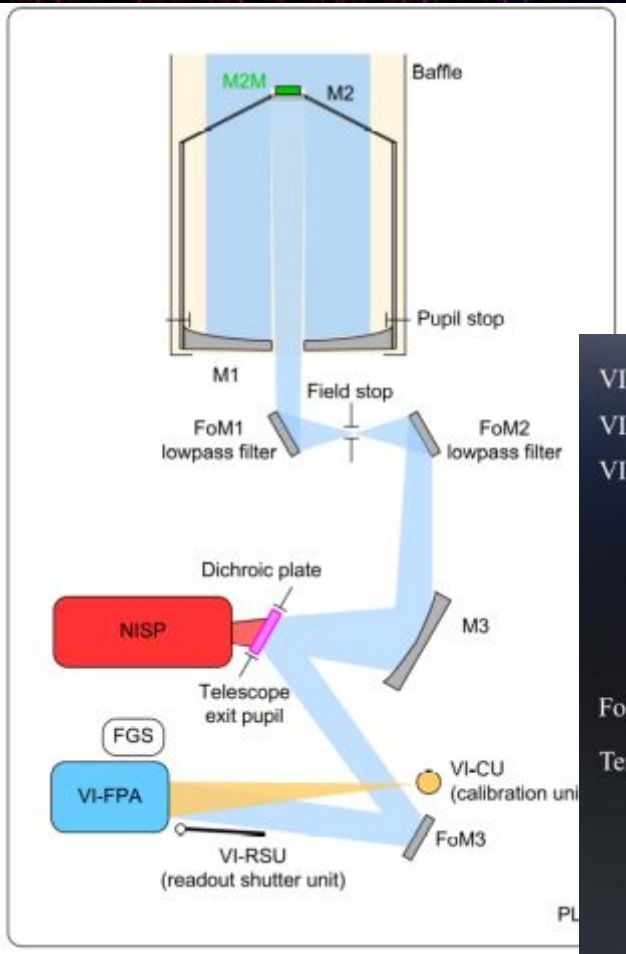
NISIP : 200 W, 160 kg, 1 m × 0.5 m × 0.5 m,
plan focal à 90 K, 240 Gbits/j
Réalisé sous la dir. du Lab. Astro. Marseille

EARLY COMMISSIONING TEST IMAGE, NISP INSTRUMENT

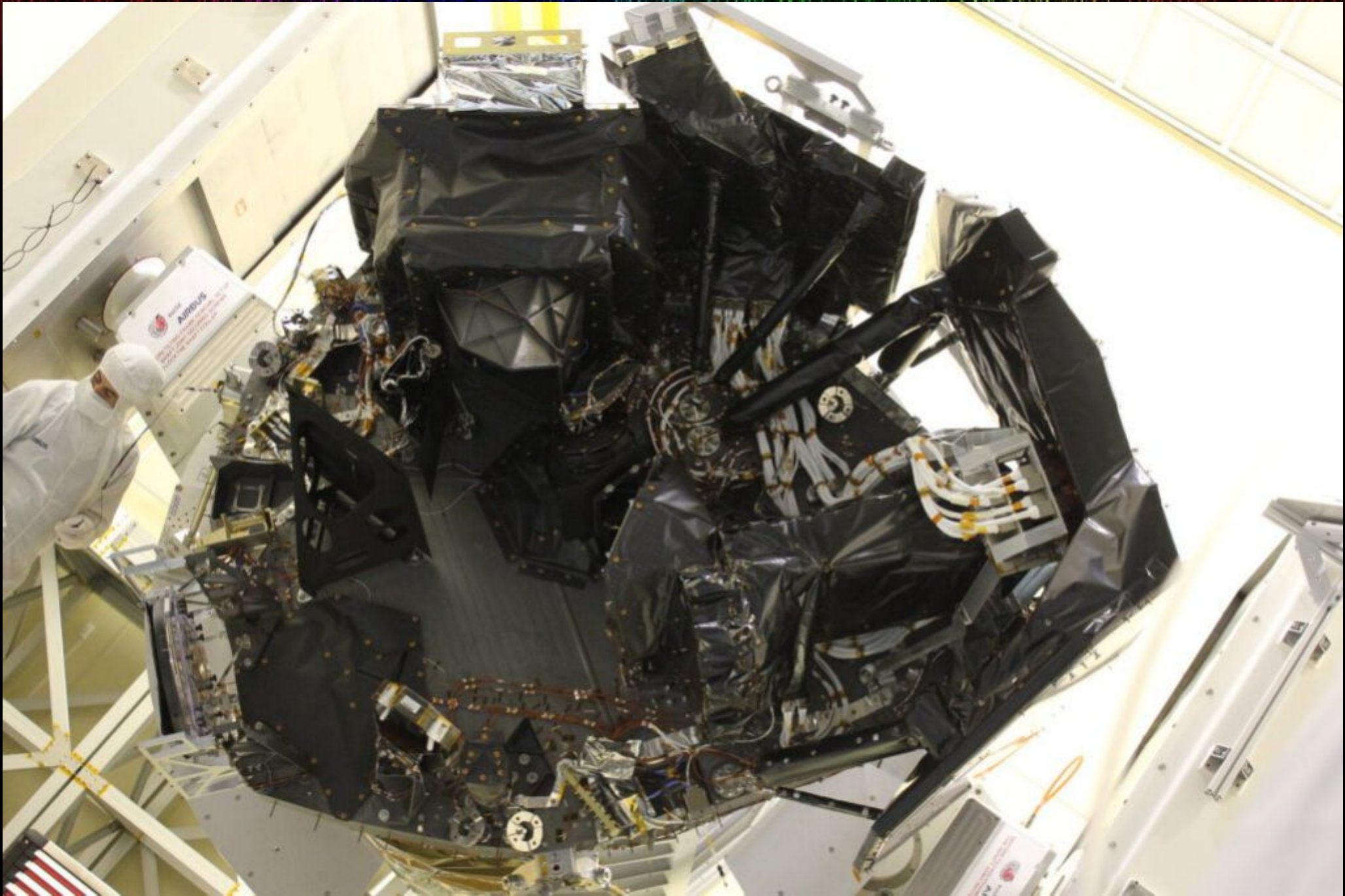


Early commissioning test image, NISP instrument (grism mode)

Payload Module

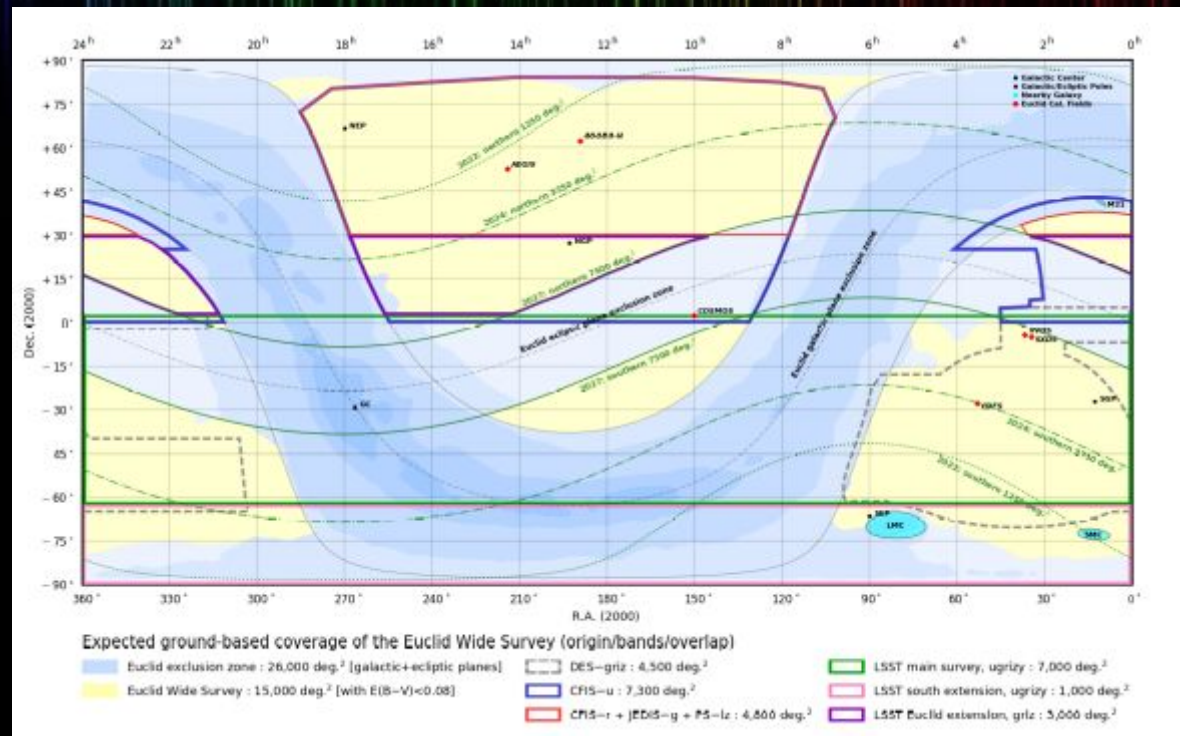


Airbus Defence and Space



EXT

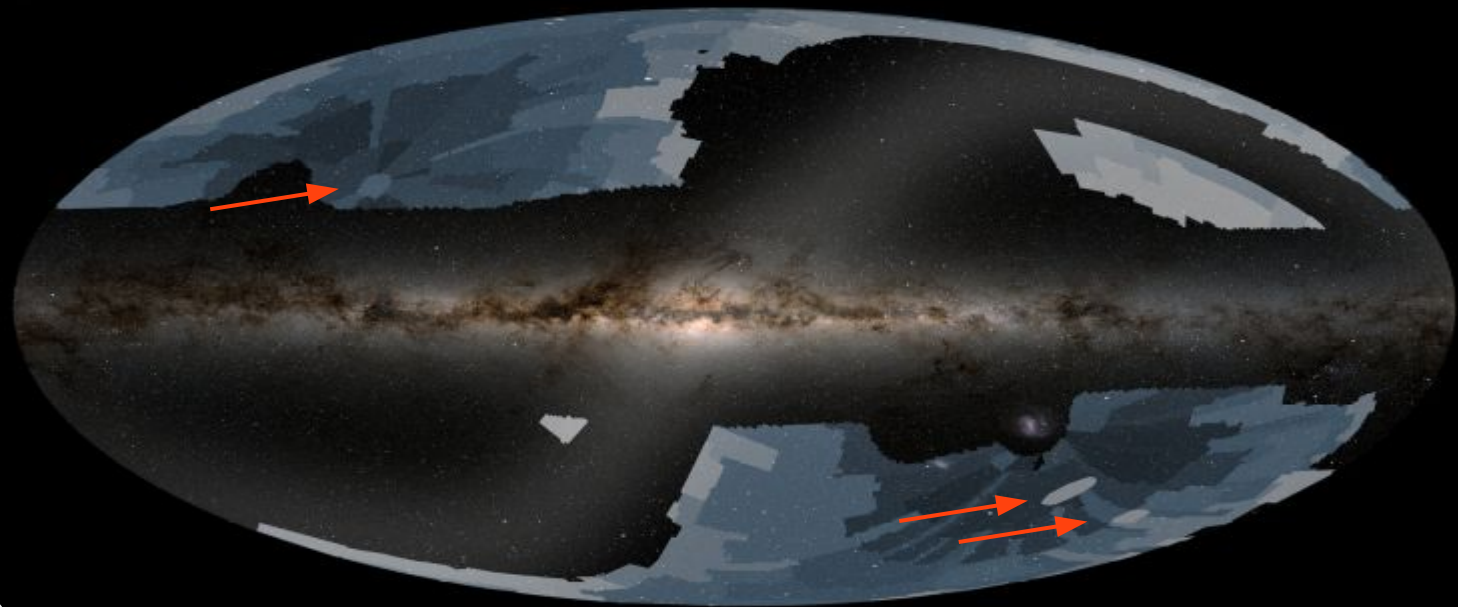
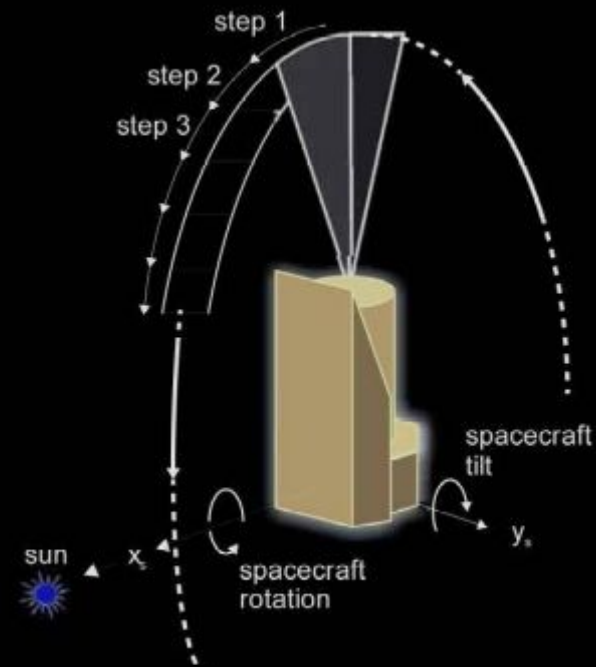
- La mission Euclid requiert des observations complémentaires obtenues du sol ou de l'espace



- ◆ Astrométrie : GAIA
- ◆ Photométrie visible : SDSS, CFHT, DES, LSST, etc.
- ◆ Spectroscopie : BOSS, DESI, etc.
- Inversement, ces sondages bénéficieront d'Euclid

Le sondage

- Relevé « **wide** » : 14 kdeg^2 (1/3 ciel)
 - ◆ Zones exclues : Voie Lactée, plan de l'écliptique
 - ◆ 4 poses par pointé (légèrement décalées)



- Relevé « **deep** » : 53 deg^2
- Mission de 6 ans (jusqu'à 14 ans ?!)



Le traitement des données

- MOC (Darmstadt) & SOC (Madrid)
 - ◆ réception, formattage, métadata
 - ◆ ~20 pointés / jour
 - ▶ 160 VIS, 350 NISP, 370 Go
- Consortium : traitement des données
 - ◆ 9 Science Data Centers
 - ▶ dont CC-IN2P3 Villeurbanne
- Communauté scientifique
 - ◆ Archives internes et publiques
 - ◆ Au final : ~20 Po de données



Le projet Euclid

La mission

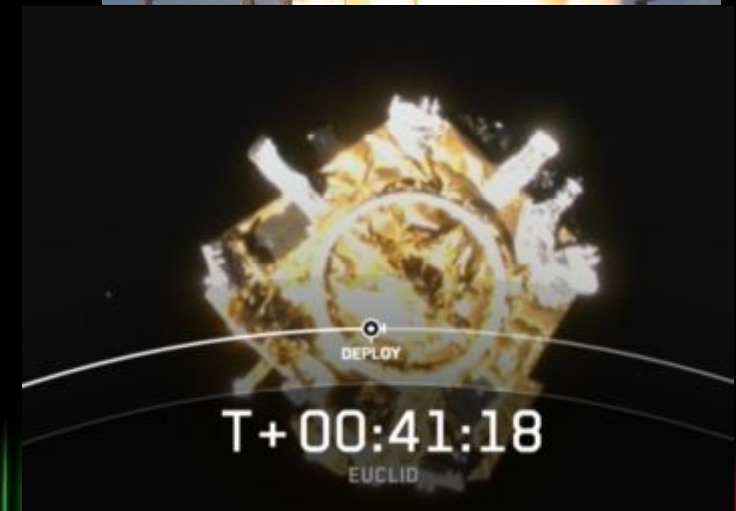
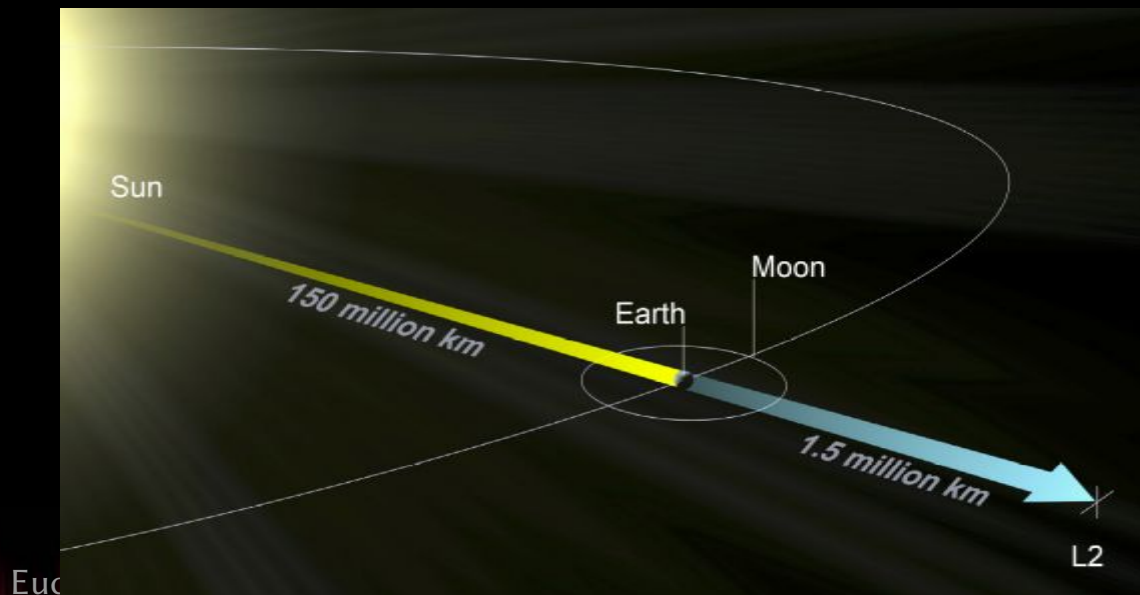
Le satellite Euclid

- 4.7 m de haut, 3.7 m de diamètre
 - ◆ Puissance : 2 kW
- Masse : 2000 kg
 - ◆ Charge utile : 800 kg
 - ◆ Module de service : 900 kg
 - ◆ Propergol : 210 kg
- Transfert : 55 Mb/s, 826 Gb/j
 - ◆ Mémoire : 4 Tb
- Industriels
 - ◆ Satellite : Thales-Alenia Sp.
 - ◆ Charge utile : Airbus Def. & Sp.

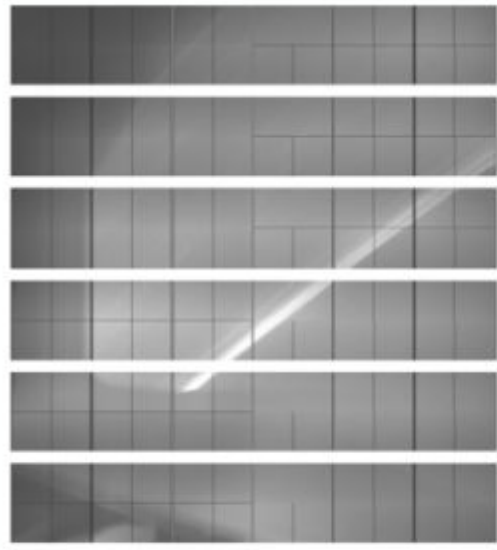


Lancement le 1^{er} juillet 2023

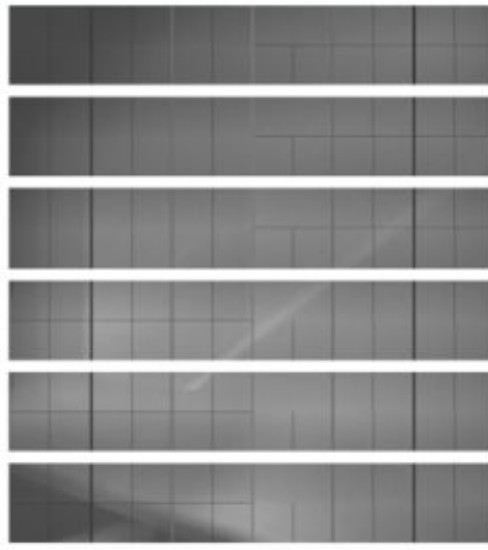
- Cap Canaveral
 - ◆ **Falcon 9** (Space X)
- Direction : **point L2 Terre-Soleil**
 - ◆ Distance : $1.5 \cdot 10^6$ km
 - ◆ Orbite semi-stable (correction tous les 28 j)
 - ◆ En compagnie de JWST & Gaia



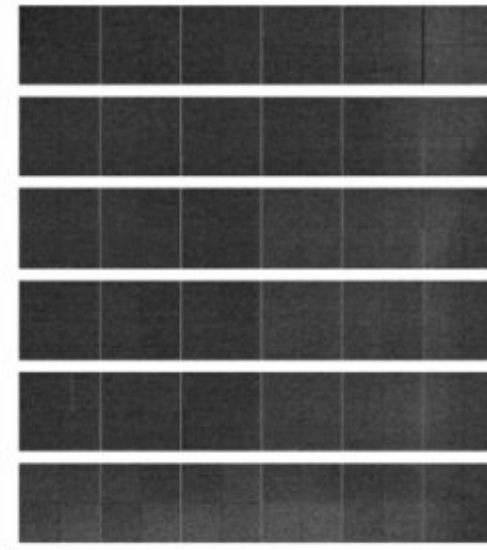
Lumière parasite sur VIS



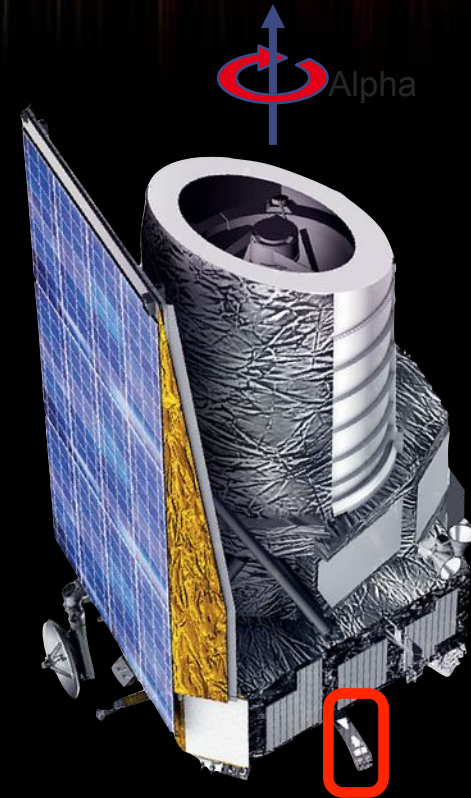
Alpha Angle: +4.5 deg



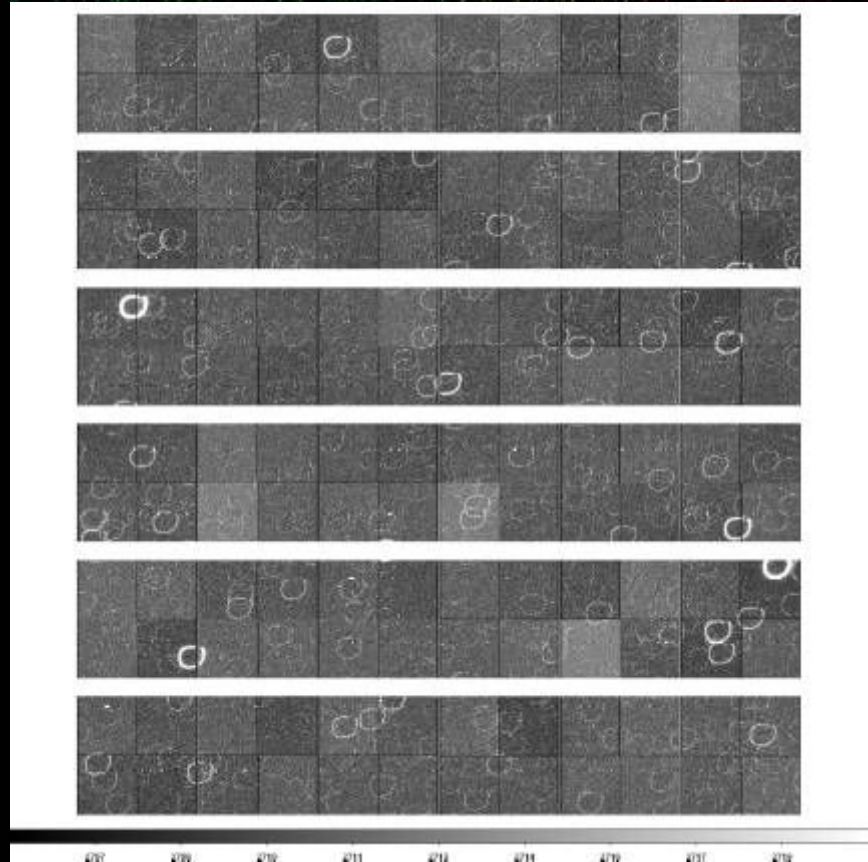
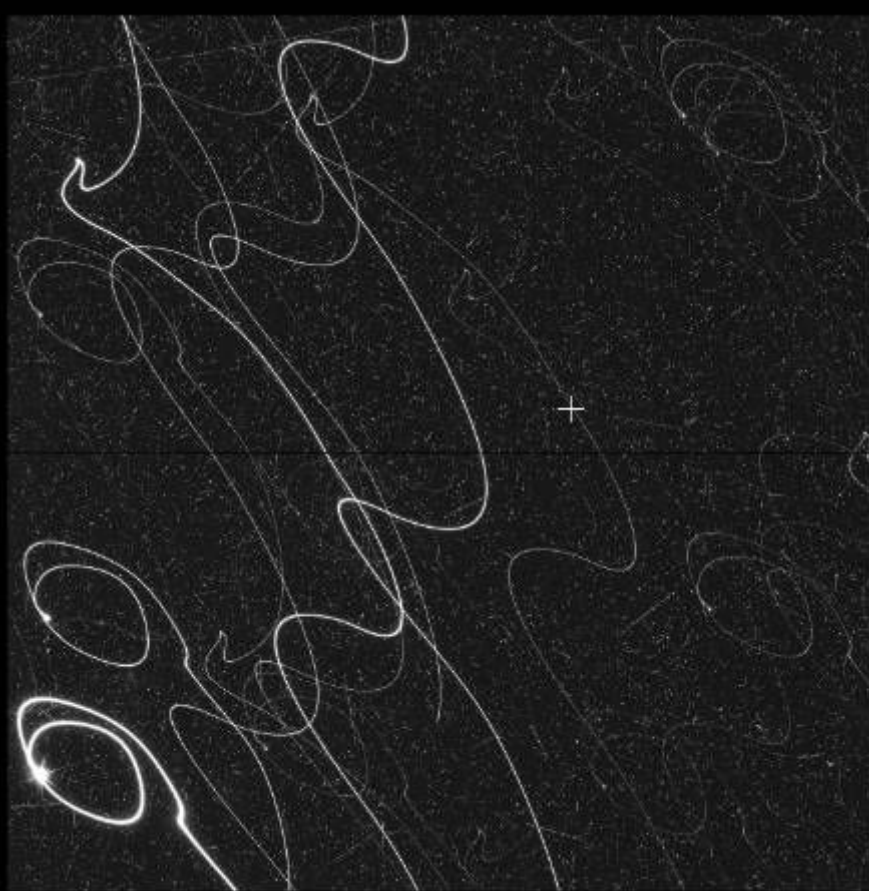
Alpha Angle: 0 deg



Alpha Angle: -4.5 deg



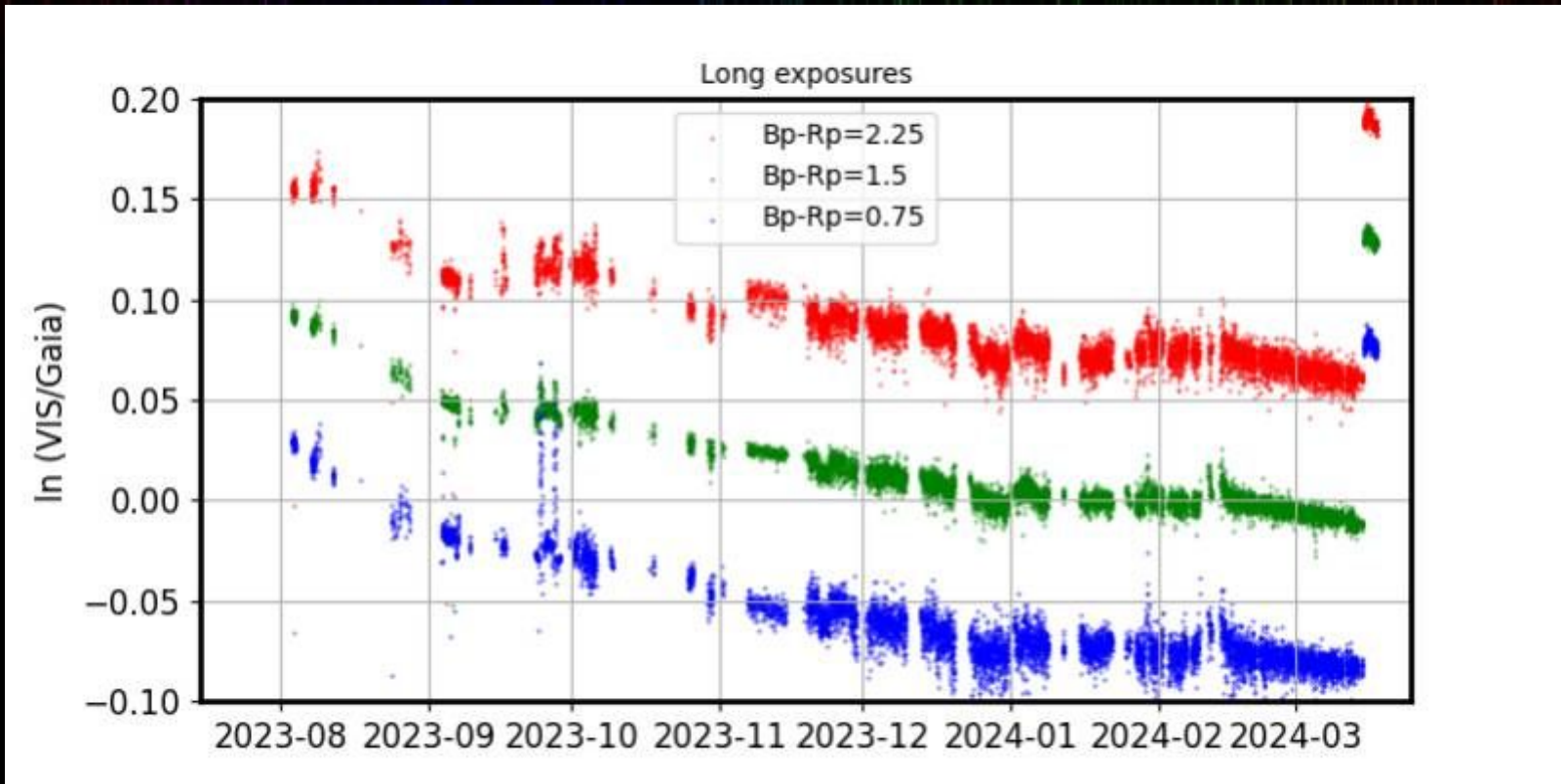
Problème de guidage fin



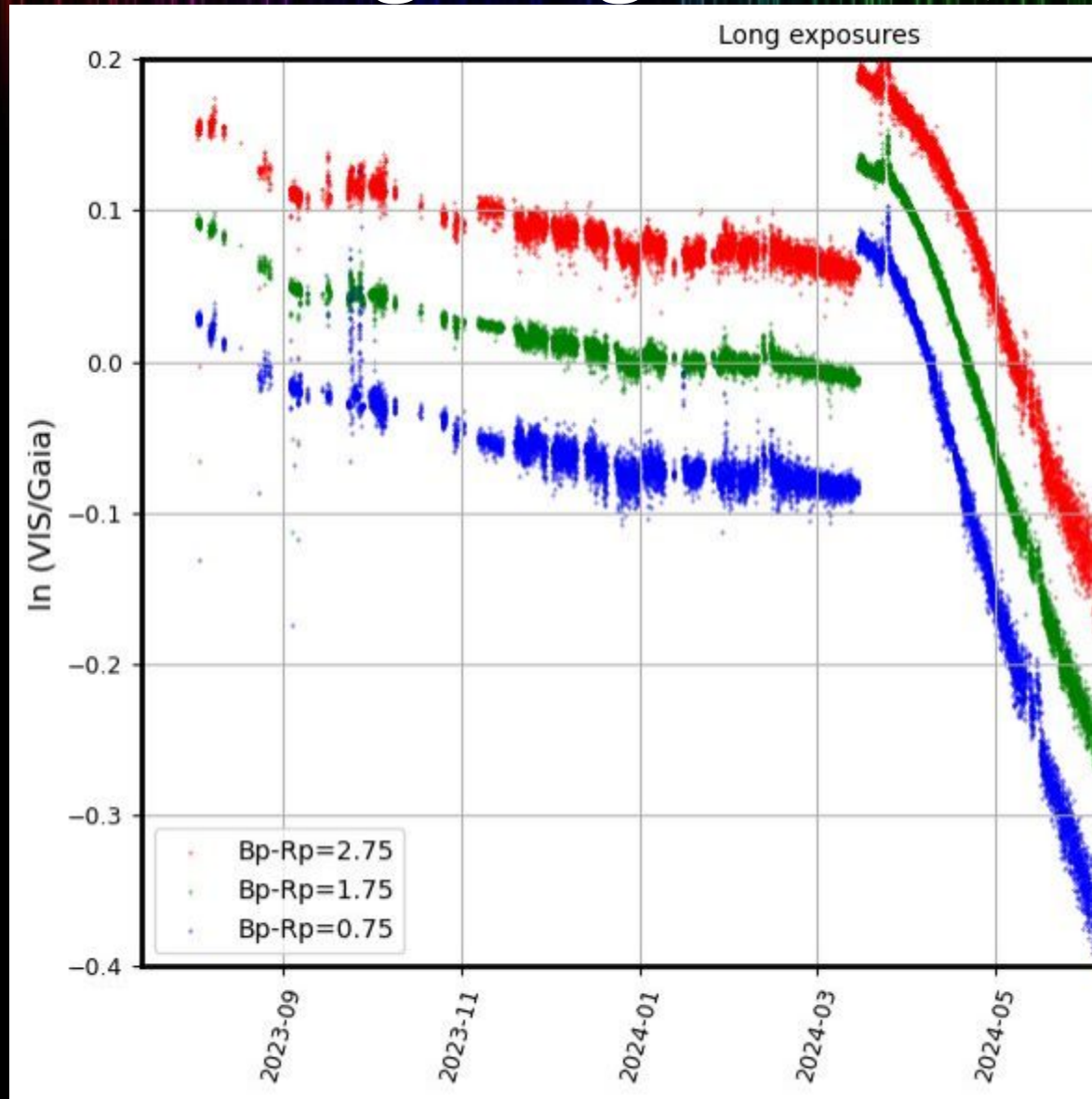
Précision relative de pointage
après correction : ~ 0.035 arcsec (1/3 pix VIS)
(exigence : < 75 mas)



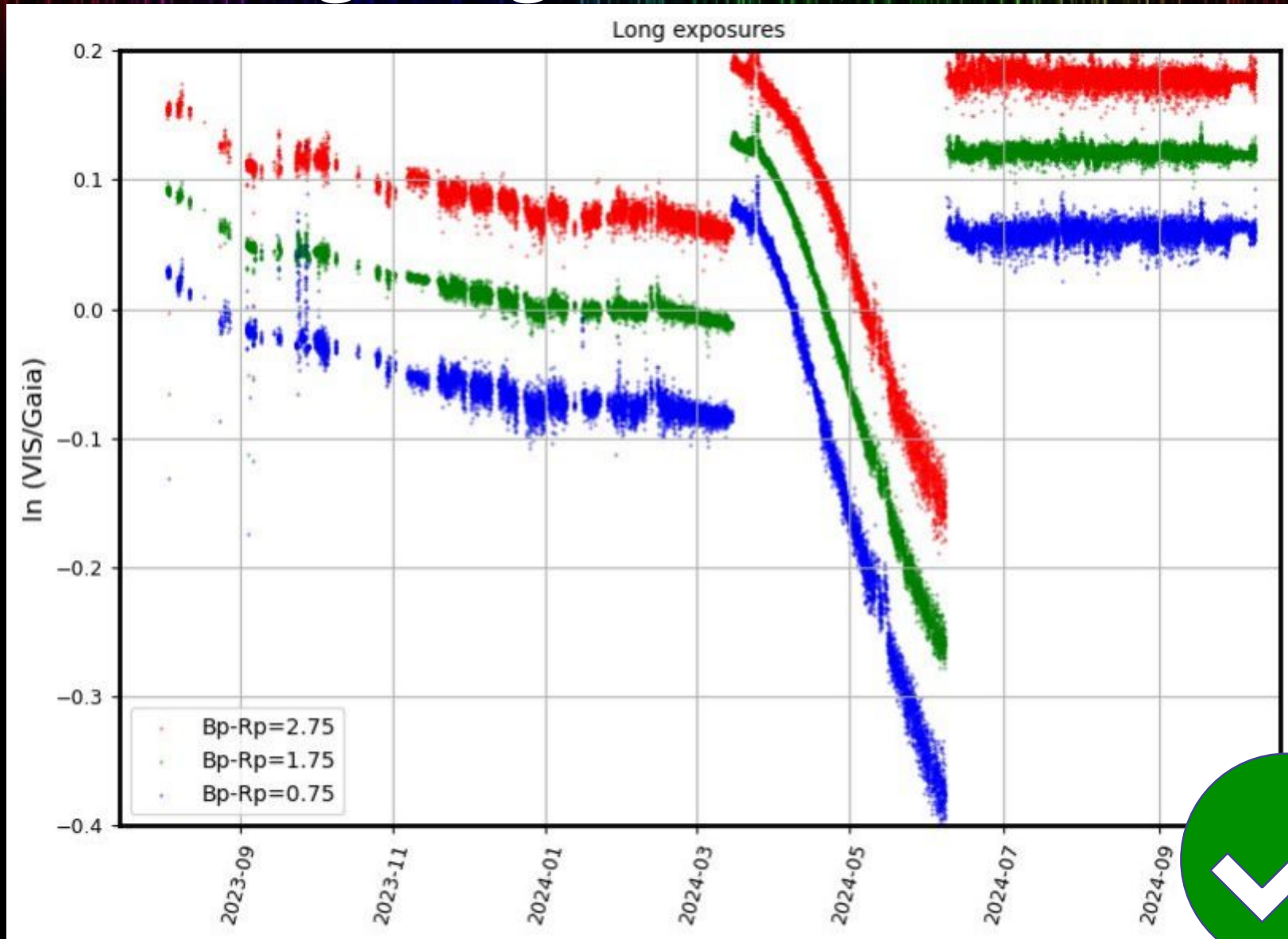
Dégivrage ciblé (FoM3)



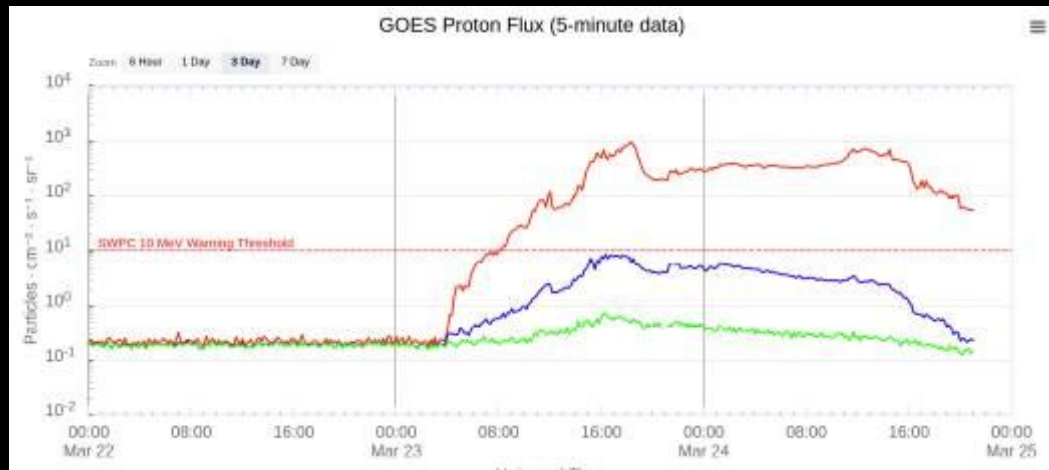
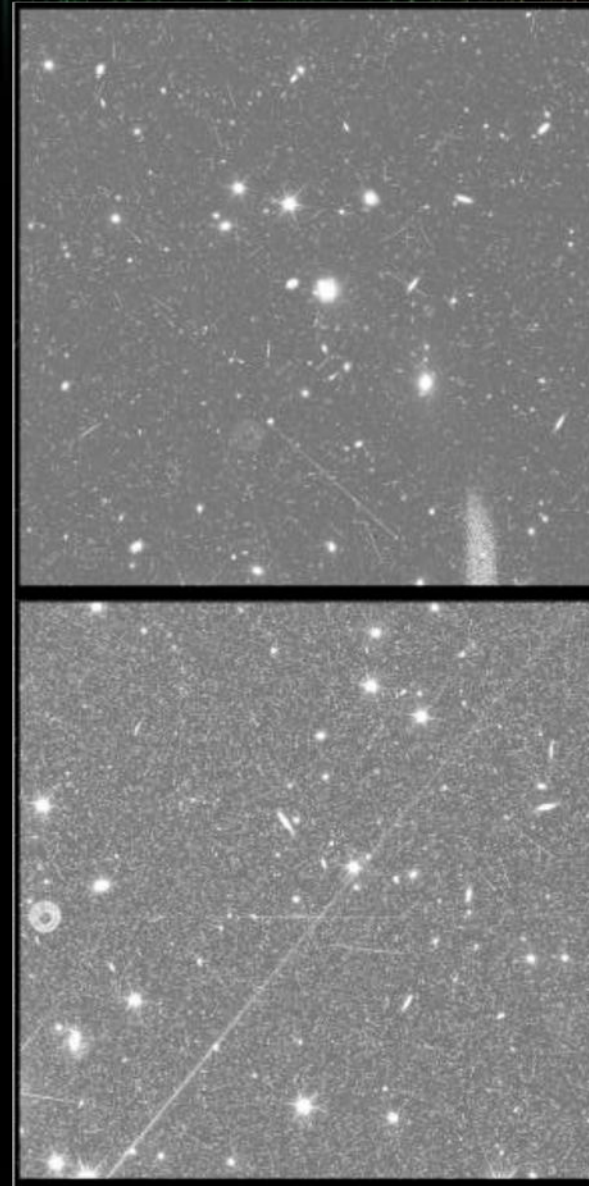
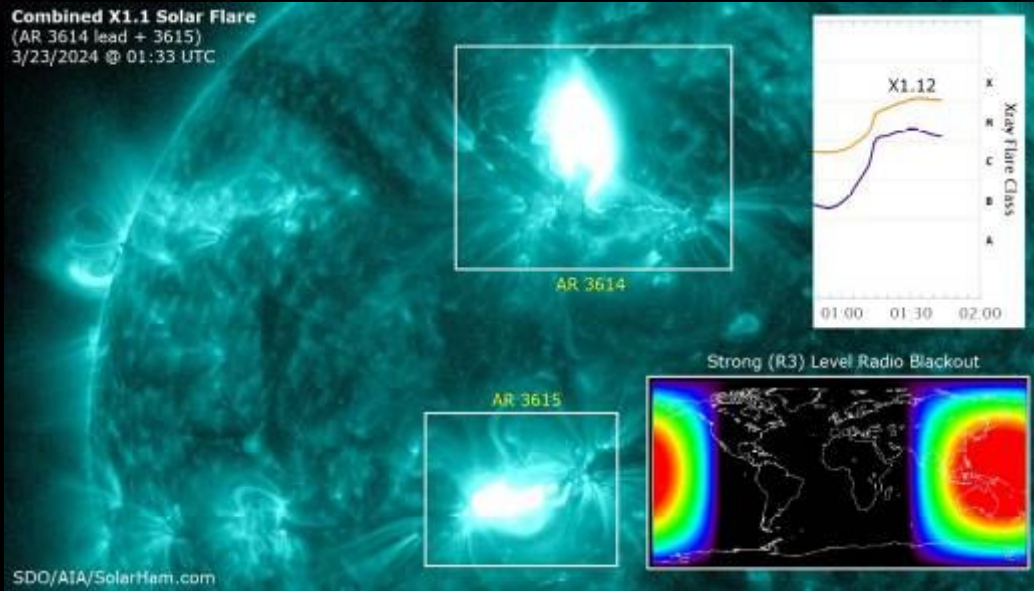
Dégivrage ciblé (FoM3)



Dégivrage ciblé (FoM3)



Tempêtes solaires



Le projet Euclid

Early Release Observations

Early Release Observations

- Mettre en évidence les **performances techniques**
- Observations à la fois **intéressantes** scientifiquement et **spectaculaires** pour le public
 - ◆ Observations standard, réparties sur une seule journée
 - ◆ Traitement spécifique des données
 - ◆ Images **RGB = H/Y/VIS**



Galaxie spirale IC 342



Galaxie irrégulière NGC 6822



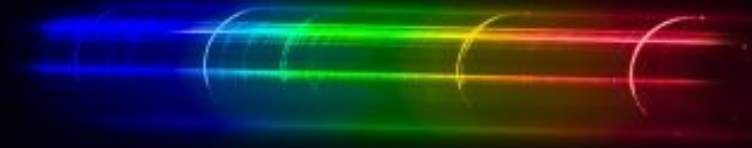
Amas globulaire NGC 6397



Nébuleuse de la tête de cheval

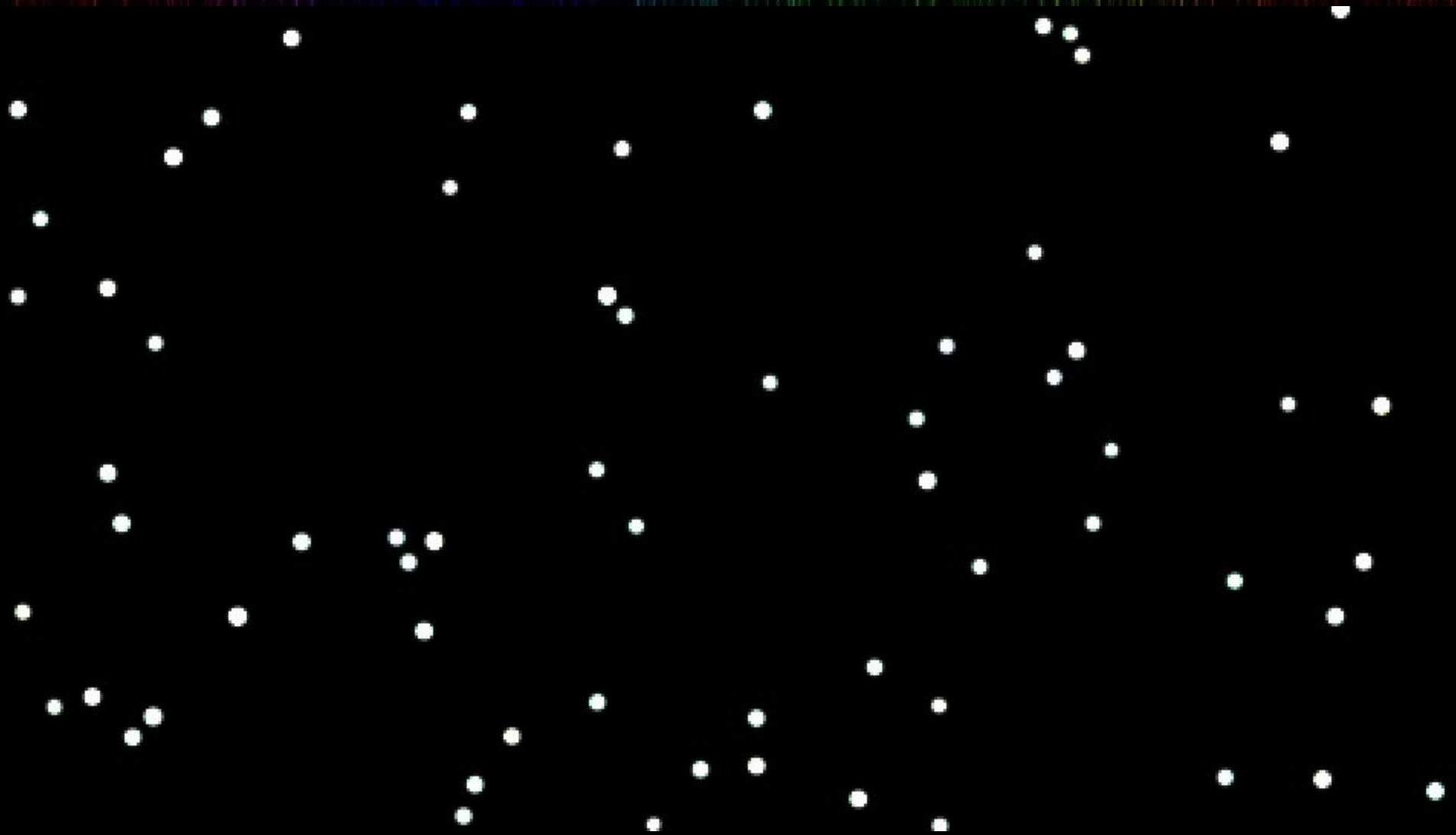


Spectroscopie sans fente

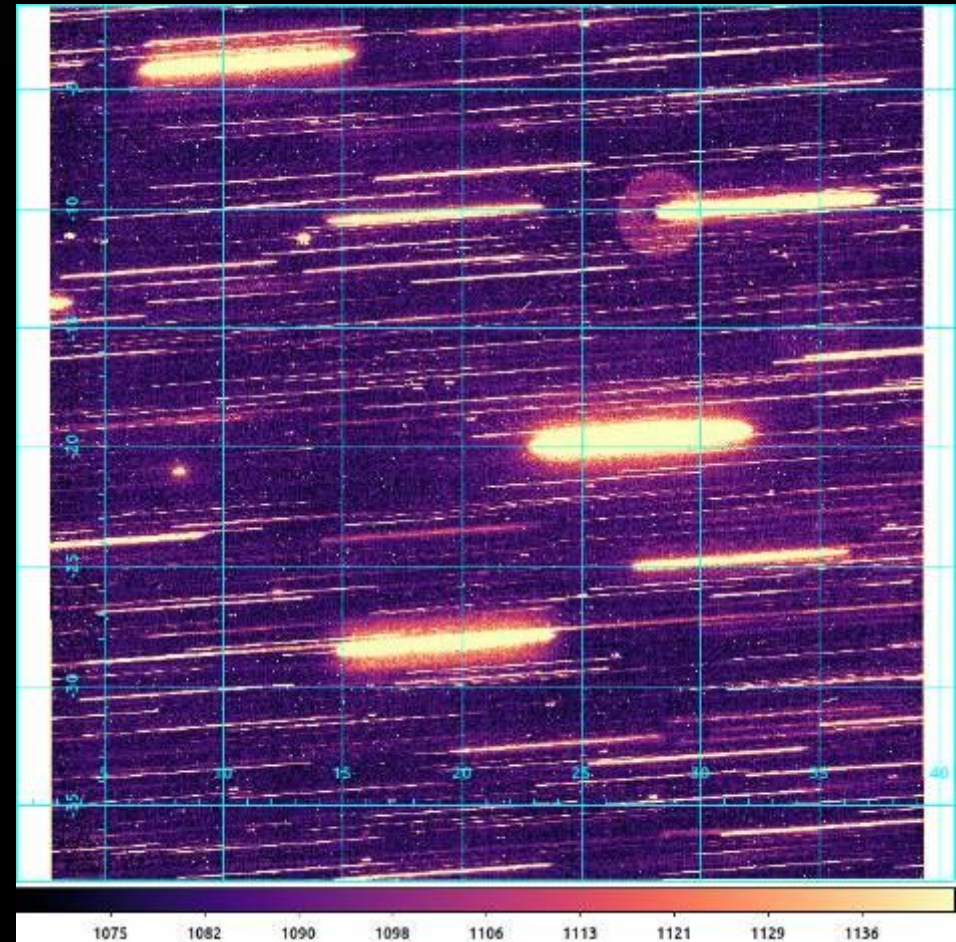
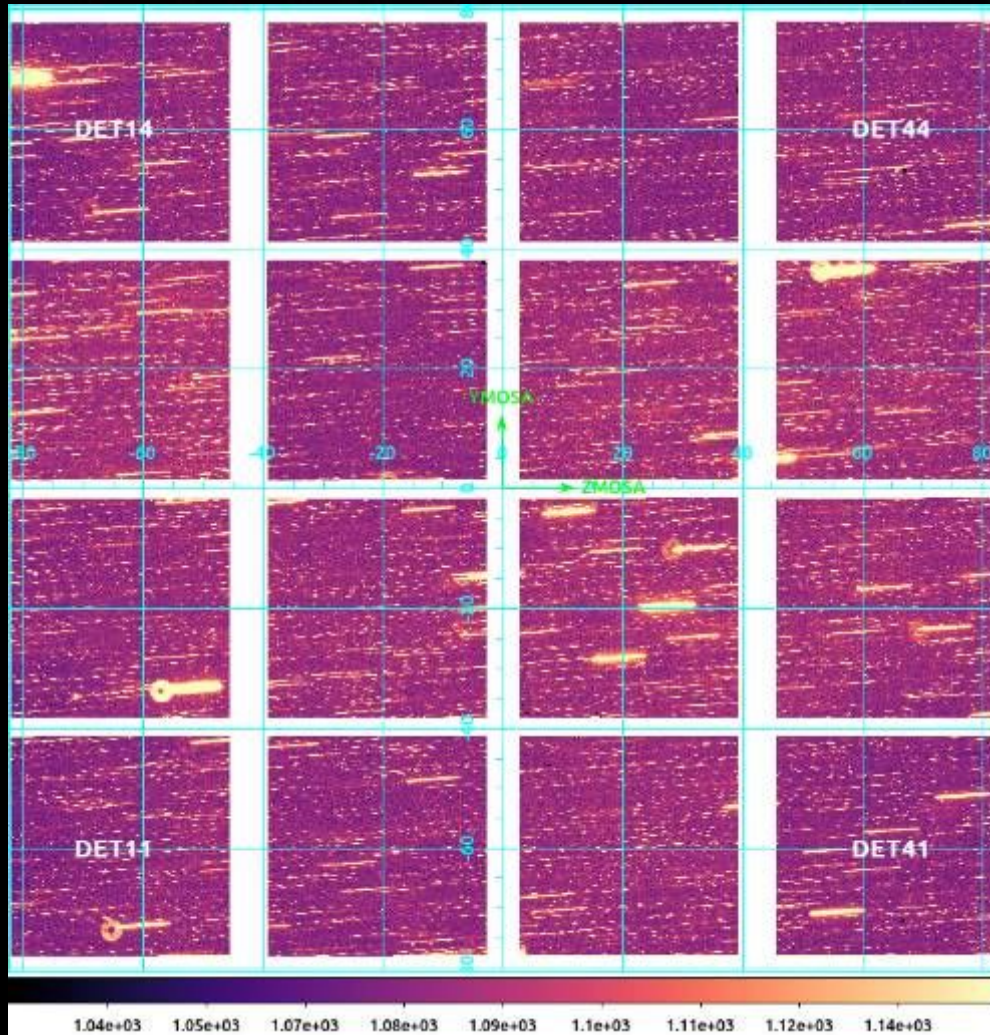


Constantine Emmanouilidi / APOD 131115

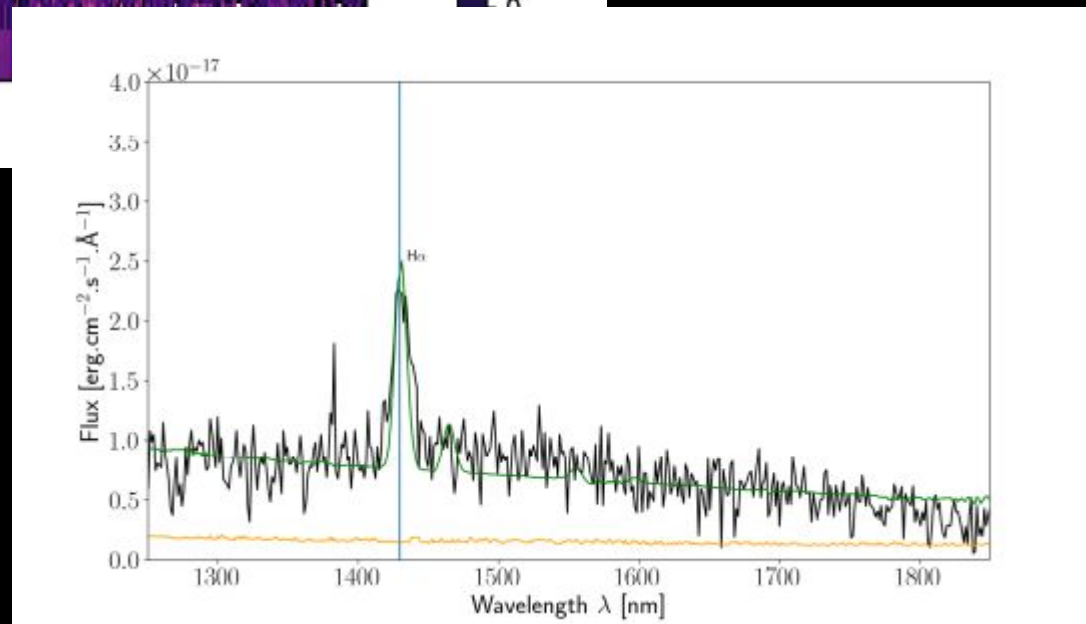
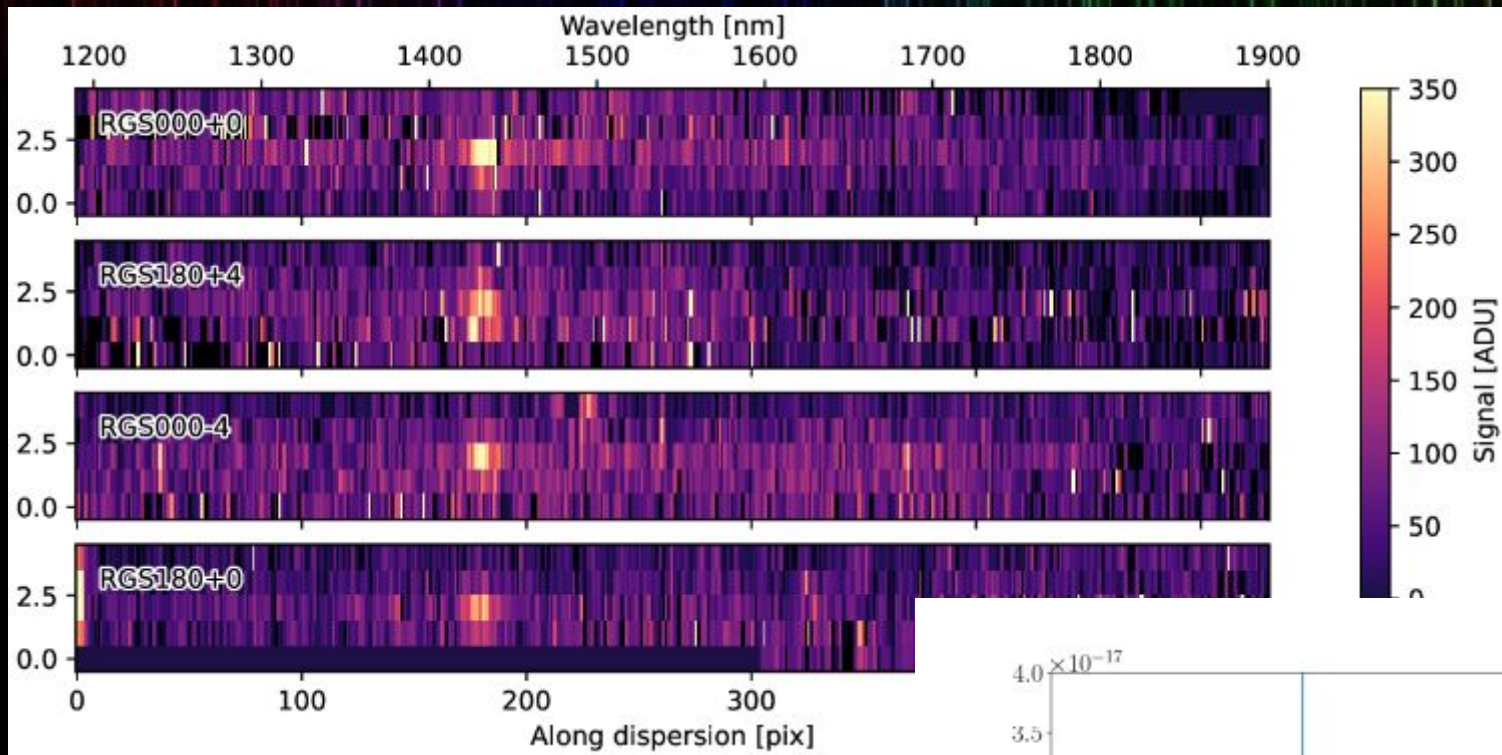
Imagerie dispersée



NISP spectro exposure (RGS000-4)



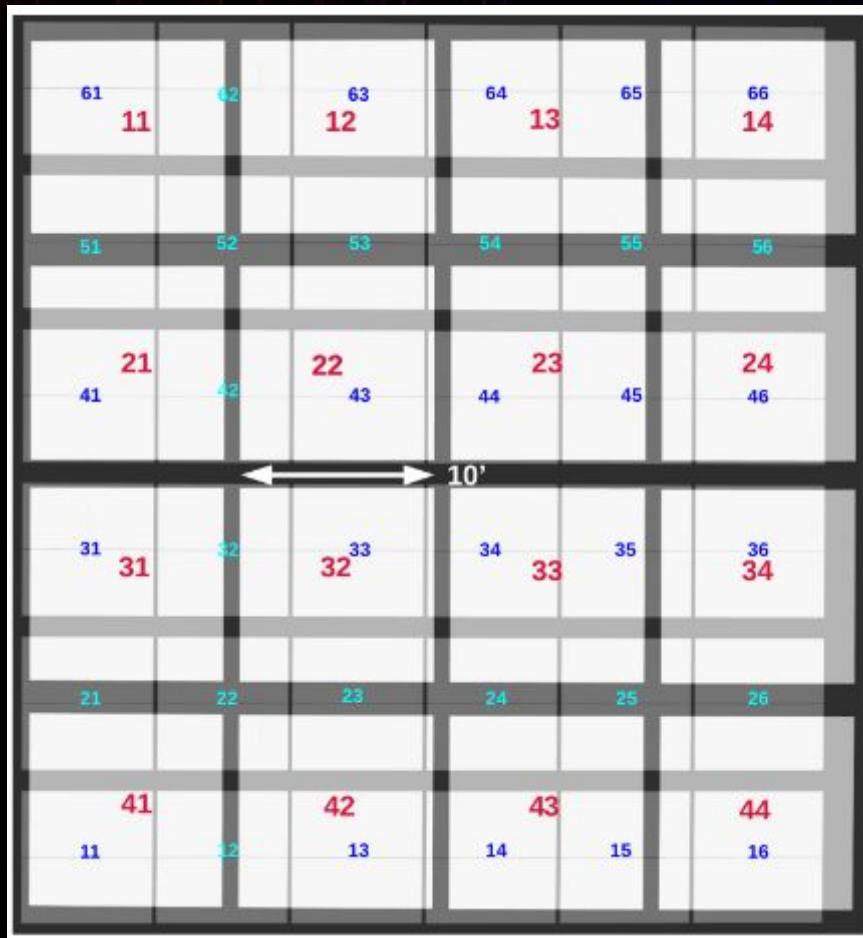
A galaxy at $z=1.1783$



Conclusion

- **Cosmologie de précision** « depuis 1998 »
 - ◆ Les différentes sondes donnent des résultats cohérents : le **modèle de concordance Λ CDM**
 - ◆ Aucune observation en contradiction majeure
- La « **malédiction** » du modèle de concordance
 - ◆ « *Il y a seulement 2 problèmes avec Λ CDM : Λ et CDM* »
 - ▶ Deux piliers de la théorie (**énergie** et matière sombres, soit 95 % du contenu de l'Univers) ont une origine physique inconnue
 - ▶ Le modèle d'inflation est très incertain (et éventuellement insondable)
- **La mission Euclid** sonde les secteurs sombres de l'Univers
 - ◆ Performances instrumentales *nominales* (ou mieux)
 - ◆ Le traitement des données est un acteur clé

Backup



Common instrumental view to the sky of the VIS and NISP instruments

