

# Galaxies et amas de galaxies comme lentilles gravitationnelles

Raphaël Gavazzi

28 janvier 2019

INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE DE PARIS

Unité mixte de recherche 7095



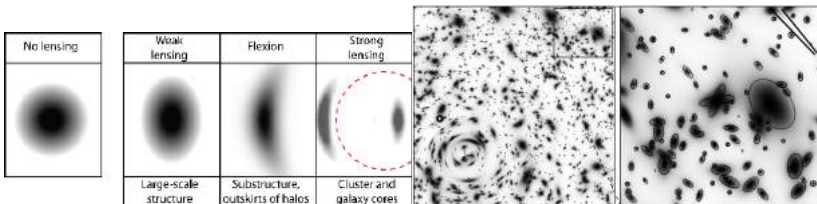
CNRS - Sorbonne Université

# Sommaire

- 1 Introduction**
- 2 Observations
- 3 Simulations
- 4 Halos de matière noire
- 5 Conclusion

# Optique gravitationnelle

## Ses différentes manifestations



# Optique gravitationnelle

## Quelques bases

Equation des lentilles : plan image  $\rightarrow$  plan source

$$\vec{\beta} = \vec{\theta} - \vec{\alpha} \equiv \vec{\theta} - \vec{\nabla}\psi(\vec{\theta})$$

Angle de déflexion lié au potentiel gravitationnel  $\Phi$ ,

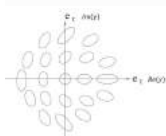
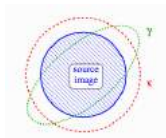
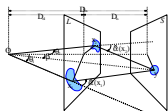
$$\hat{\alpha} = \frac{2}{c^2} \int \nabla_{\perp} \Phi dl \xrightarrow{\text{pt mass}} \frac{4GM}{c^2} \frac{\vec{\theta}}{|\vec{\theta}|^2}$$

$$\psi(\vec{\theta}) = \frac{2}{c^2} \frac{D_{ls} D_{ol}}{D_{os}} \phi(\vec{\theta})$$

Déflexions  $\rightarrow$  masse requiert distances!

Localement, déformations :  $d\beta_i = \mathcal{A}_{ij} d\theta_j$

$$\mathcal{A}_{ij} = \frac{\partial \vec{\beta}}{\partial \vec{\theta}} = (\delta_{ij} - \psi_{,ij}) \equiv \begin{pmatrix} 1 - \kappa - \gamma_1 & -\gamma_2 \\ -\gamma_2 & 1 - \kappa + \gamma_1 \end{pmatrix}$$



$$\gamma = \gamma_1 + i\gamma_2$$

# Applications

## Sonde privilégiée pour sonder la matière noire

### Abordé ici

- Profil de densité des halos (galaxies et amas) et nature de matière noire
- Relation  $M_*$  (“proxy”) et  $M_{\text{halo}}$
- Cartographie de la masse projetée (convergence)

### Mais aussi...

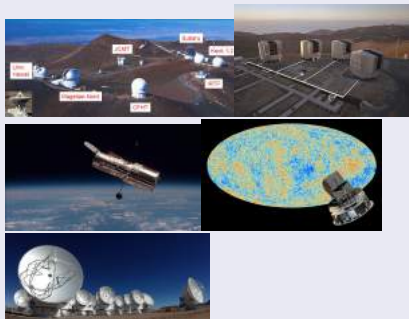
- Distribution masse à grande échelle (cisaillement cosmique)...  
**la prochaine fois !**
- Les sous-structures (sombres) (aka satellites manquants)
- Décalages temporels et mesures de  $H_0$
- $\mu$ -lensing : exo-planètes et structure des quasars.

# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Observations**
  - Données
  - Morphométrie
- 3 Simulations
- 4 Halos de matière noire
- 5 Conclusion

# Observations

## Actuel

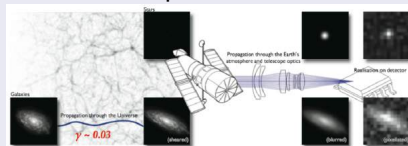


## Futur

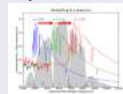
Projets **Euclid**, LSST, WFIRST

## Analyse statistique

morphométrie :



Redshifts photométriques :



événements rares :



# Grands relevés

toujours plus large, toujours plus profond...

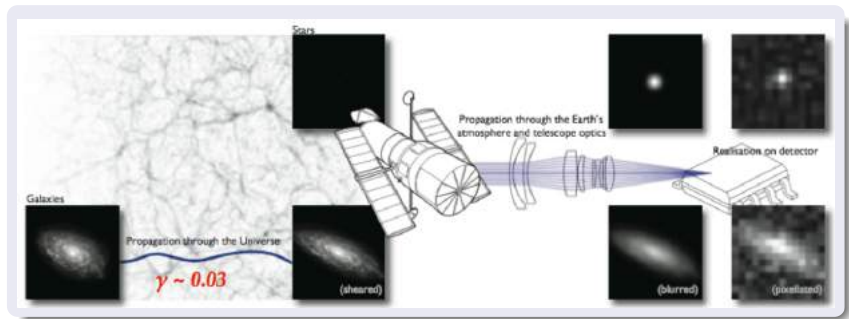
Pour vaincre le bruit sur signaux faibles, sonder des échelles toujours plus grandes et des structures plus lointaines et détecter des événements rares.

Survey	Date	Area [deg <sup>2</sup> ]	$n_{\text{gal}}$ [arcmin <sup>-2</sup> ]
CFHTLenS	2003-2007	170	14
DLS	2001-2006	25	20
COSMOS	2005	1.6	80
SDSS	2000-2012	11,000	2
KiDS	2011-	1,500	7-8
HSC	2015-	1,500	~ 20
DES	2012-2018	5,000	5-6
LSST	2021-	15,000	~ 20
Euclid	2021-2026	15,000	~ 25
WFIRST-AFTA	2024-	2,500	?



# Morphométrie

Pas de cisaillement sans ellipticités *propres*



# Morphométrie

## Résultats qualitatifs

- Méthode KSB basée sur les moments de la brillance de surface des sources : très rapide mais peu stable
- **Améliorations** : ~~Méthode~~ approche *forward-model* supposant une forme analytique simple du profil (SExtractor & PSFEx, Bertin 2010). Rapide et robuste.

[http://amalgam.iap.fr/wordpress/?page\\_id=147](http://amalgam.iap.fr/wordpress/?page_id=147)



# Morphométrie

## Résultats quantitatifs : Challenge GREAT3

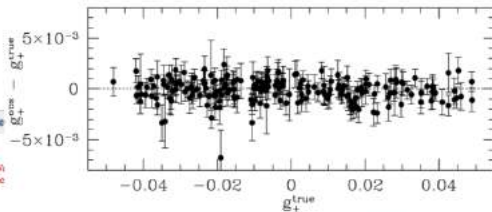


Home Get Data Overall Leaderboard Archived Challenge

The Great-3 challenge is now complete and the winners decided. We deactivated the post-challenge leaderboards, so no more submissions can be

### Overall Leaderboard

Name	Notes	Score	Number of entries
<a href="#">sFIT</a>	Modified DLS stackfit algorithm	80001	182
<a href="#">Amalgam@IAP</a>	Some fellows developing software based around SExtractor and PSFex for real-life shape measurements.	80000	215
<a href="#">CEA-EPFL</a>	The team wants to investigate if we could improve shear estimation by combining gfit with sparse representation methods.	72000	340
<a href="#">MegaLUT</a>	Evolutions of the MegaLUT technique : how far can we go with SExtractor + Machine Learning ?	52000	234
<a href="#">Fourier_Quad</a>	Our team uses the quadrupole moments of the spectral density of galaxy images in Fourier space to measure shear.	32000	36
<a href="#">EPFL_gfit</a>	Using the gfit shear measurement method, testing how far one can go by using forward model fitting + new approaches for bias reduction	24000	124



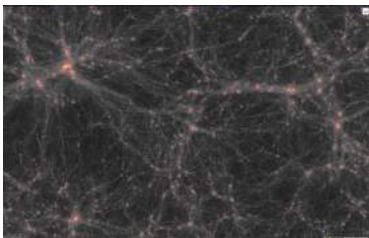
- $\gamma - \gamma_{\text{true}} = m\gamma_{\text{true}} + c$ . Simulations simples !
- $m \sim 3 \times 10^{-3}$  et  $c \sim 3 \times 10^{-4}$  ( $c$  aligné avec  $\gamma_{\text{PSF}}$ ).
- Satisfaisant pour  $\sim 100$  amas dès lors que  $\text{SNR } \nu \gtrsim 15$ .
- Proche des  $|m| < 10^{-3}$  et  $|c| < 10^{-4}$  pour *Euclid*, *LSST*.

# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Observations
- 3 Simulations**
- 4 Halos de matière noire
- 5 Conclusion

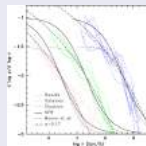
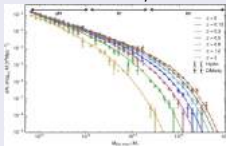
# Simulations cosmologiques

Matière noire pure : évolution non linéaire des structures



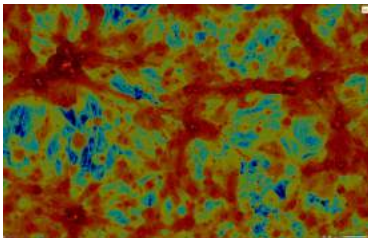
## Halos de matière noire

Fonction de masse, profil de densité, forme des halos



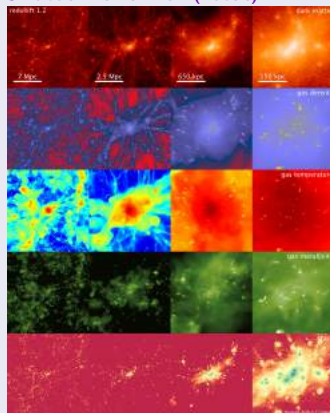
# Simulations hydrodynamiques cosmologiques

Gastrophysique !



## DM, gaz et étoiles

### Simulation Horizon-AGN (Dubois)



# Tracé de rayons dans la simulation Horizon-AGN

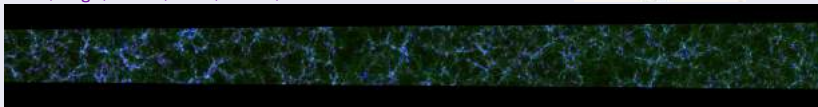
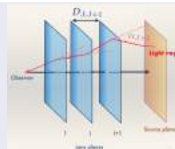
Effets des baryons sur les observables lensing

D'intérêt cosmologique :

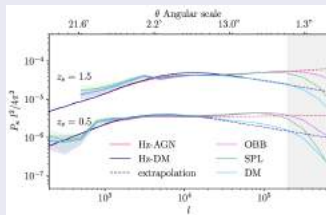
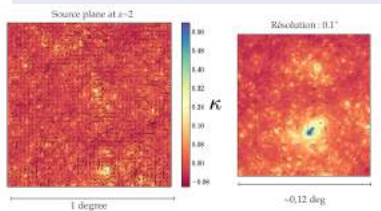
$L = 100 \text{ Mpc}$ ,  $\delta_x = 1 \text{ kpc}$

Bon compromis taille/résolution

Gouin, Laigle, Dubois, Codis, Pichon, Devriendt...



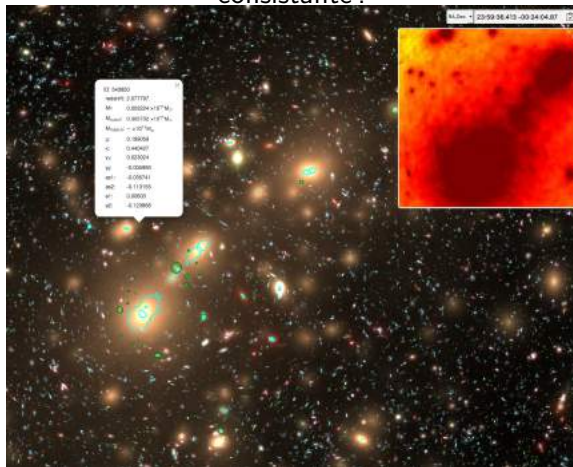
## Résultats



# Tracé de rayons dans la simulation Horizon-AGN

## Images lentillées (→ "End-to-End")

Lumière émise par les étoiles des galaxies est défléchiée de manière consistante !





# Sommaire

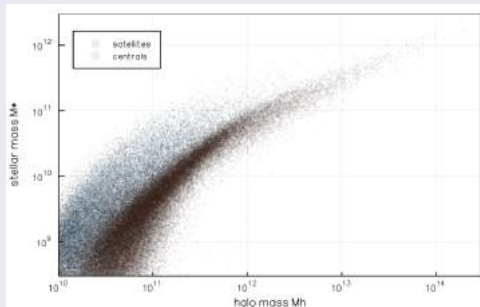
- 1 Introduction
- 2 Observations
- 3 Simulations
- 4 Halos de matière noire**
  - Enjeux
  - Modélisation
  - Galaxies
  - Amas
- 5 Conclusion

# Les halos de matière noire

Relation halo hôte et galaxies  $M_* - M_{\text{halo}}$

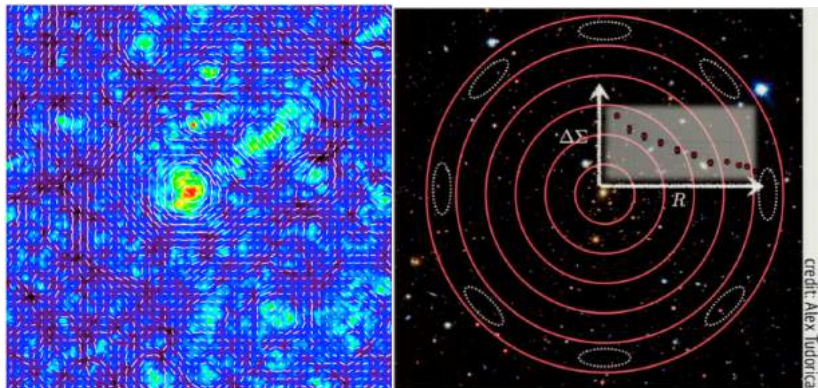
## Théorie vs Observations

- Simulations :  $\Lambda\text{CDM} \xrightarrow{\text{N-body}} M_{\text{halo}} \xrightarrow{\text{hydro}} M_* \rightarrow L$
- Observations :  $F \xrightarrow{z} L \rightarrow M_* \xrightarrow{\text{lensing, (HOD)}} M_{\text{halo}}$
- Lentilles donnent  $p(M_h, \dots | M_*, \dots)$



# Modélisation

Weak lensing : des ellipticités à la distribution de masse



$$\kappa(\vec{\theta}) = \int_{\mathbb{R}^2} K(\vec{\theta} - \vec{\vartheta})^* \gamma(\vec{\vartheta}) d^2 \vec{\vartheta} \quad \text{avec} \quad K(\vec{\theta}) = \frac{-1}{\pi(\theta_1 - i\theta_2)^2}$$

# Modélisation

## Images multiples au cœur des amas

### MACSJ0416 : Before HFF ...

#### Previous GL Analysis :

Zitrin et al. 2013, *ApJ*, 762, 30

- 34 SL multiple images
- no WL data

#### PreHFF GL analysis :

Jehnsen et al. 2014, *arXiv 1405.0222*

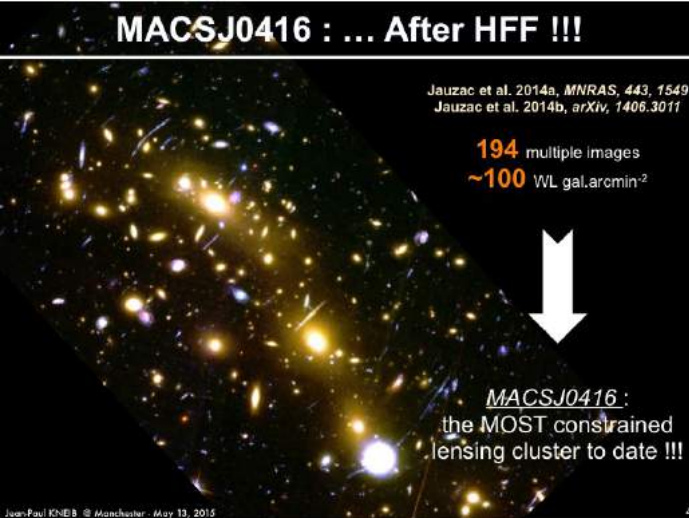
Coe et al. 2014, *arXiv 1405.0011*

Richard, Jauzac et al. 2014, *MNRAS*,  
444, 266

- 47 SL multiple images
- ~50 WL gal.arcmin<sup>-2</sup>

# Modélisation

## Images multiples au cœur des amas



**MACSJ0416 : ... After HFF !!!**

Jauzac et al. 2014a, *MNRAS*, 443, 1549  
Jauzac et al. 2014b, *arXiv*, 1406.3011

**194** multiple images  
**~100** WL gal.arcmin<sup>-2</sup>

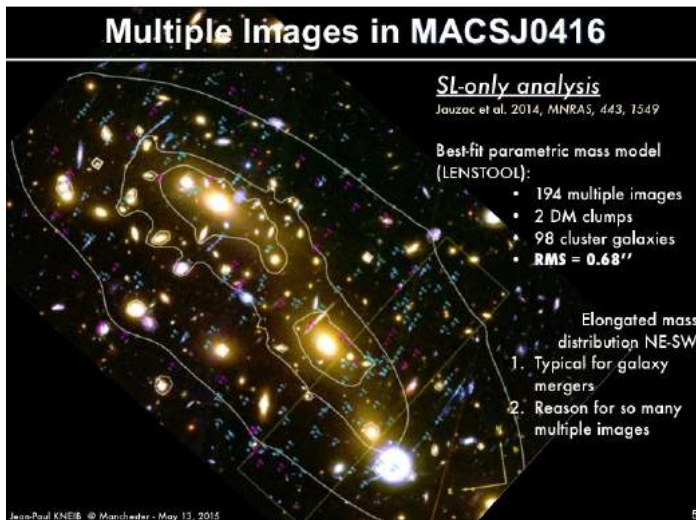
**MACSJ0416 :**  
the MOST constrained  
lensing cluster to date !!!

Juan-Paul KNEB @ Manchester · May 13, 2015

4

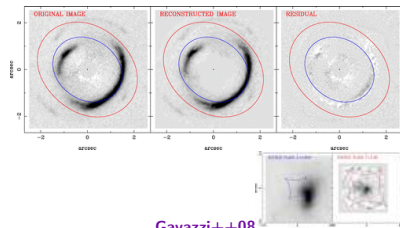
# Modélisation

## Images multiples au cœur des amas



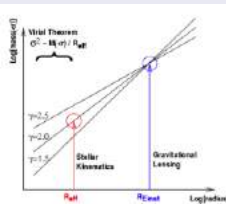
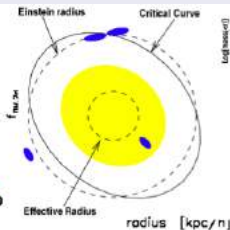
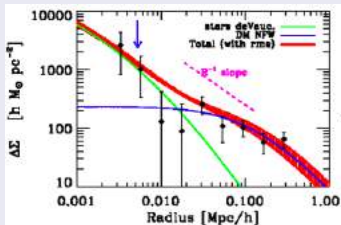
# Modélisation

## Ajustement bayésien de potentiels paramétriques



Gavazzi+08

## Addition WL (et équ. de Jeans) possible



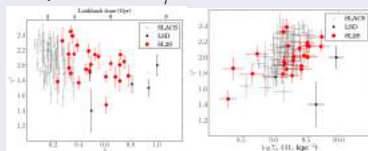
# Pente du profil de densité totale

Combinaison SL et cinématique stellaire dans  $R_{\text{eff}}$

## Données SLACS+SL2S

$$\gamma' = \frac{d \log \rho_{\text{tot}}}{d \log r} \sim 2.08 \pm 0.02$$

Dispersion  $\sigma_{\gamma'} = 0.12 \pm 0.02$

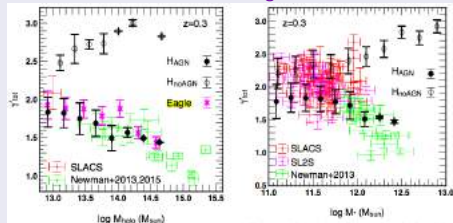


Modeste évolution en redshift  
 $d\gamma'/dz = 0.10 \pm 0.12$  (au moins depuis  $z \sim 0.8$ )

## Simulations hydro RAMSES@IAP

Excellent accord si feedback AGN

Horizon-AGN : Dubois, Peirani, Laigle, Codis, Pichon,...

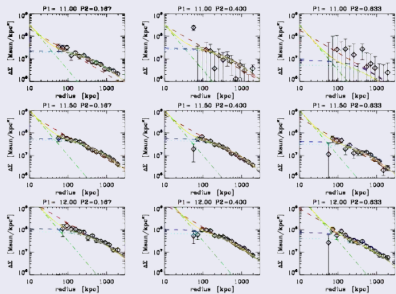




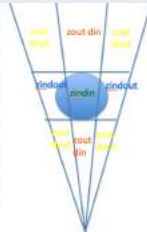
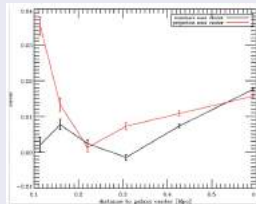
# Relation Masse stellaire – Masse du Halo

## Galaxy-Galaxy lensing

### Galaxies de champ CFHT



### Galaxies d'amas

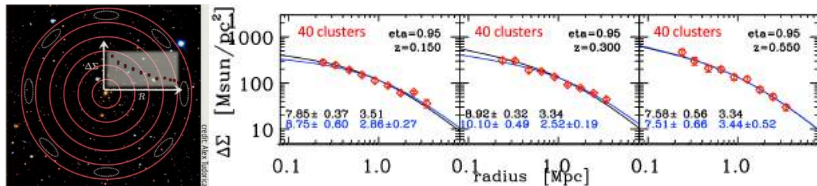


~ 80% de la masse *stripped*

# Projet AMALGAM

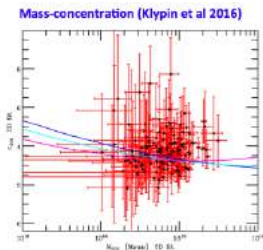
120 amas à  $0.1 \leq z \leq 0.7$

Contraste de densité  $\Delta\Sigma(R) = \frac{M(<R)}{\pi R^2} - \Sigma(R) \propto \gamma_t(R)$



- Masse typique  $M_{200c} \sim 8 \times 10^{14} M_{\odot}$
- haut rapport SNR (3%) sur le profil moyen (1-12 par amas)
- Relation masse concentration OK

RG, A Donnarumma, E Bertin <http://amalgam.iap.fr/>



# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Observations
- 3 Simulations
- 4 Halos de matière noire
- 5 Conclusion**

# Conclusion

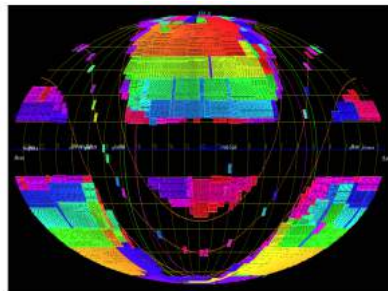
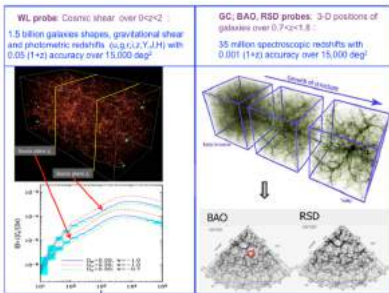
- Bilan détaillé de la masse autour des galaxies et amas
- Perspective d'avoir la masse des amas à quelques %
- Centre halos compatible NFW,  $\exists$  possibilité cœur ( $\lesssim 20$  kpc)
- Intrication DM, baryons, requiert combinaison : SL, WL (+dynamique, SZ, X)
- Simulations Hydro prédisent la bonne relation  $M_* - M_{\text{halo}}$

## Cisaillement cosmique

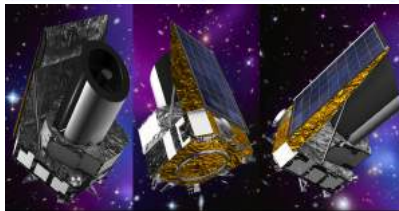
- contraintes fortes sur quantité matière noire  $\Omega_m$  (et  $\sigma_8$ ).
- Sonde unique énergie noire (expansion).

# Conclusion

## La mission Euclid



Map covered by the Euclid mission at completion (it ends in galactic coordinates) - Courtesy Euclid Consortium/ESA Science Service Advisory Group



SURVEYS				
	Area (deg <sup>2</sup> )		Description	
Wide Survey	<b>15,000 deg<sup>2</sup></b>		Step and scan with 4 dither pointings per step.	
Deep Survey	<b>40 deg<sup>2</sup></b>		In at least 2 patches of $> 10$ -deg <sup>2</sup> 2 magnitudes deeper than wide survey	
Wavelength range	550–900 nm	Y (920–1340nm), red	J (1146–1372 nm), red	H (1372–2000nm), 1300–2000 nm
Sensitivity	24.5 mag 10x extended source	24 mag 5x point source	24 mag 5x point source	24 mag 5x point flux 3 $\times 10^{16}$ erg cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> 3.5x unresolved flux 2% of $> 10^{17}$ galaxies