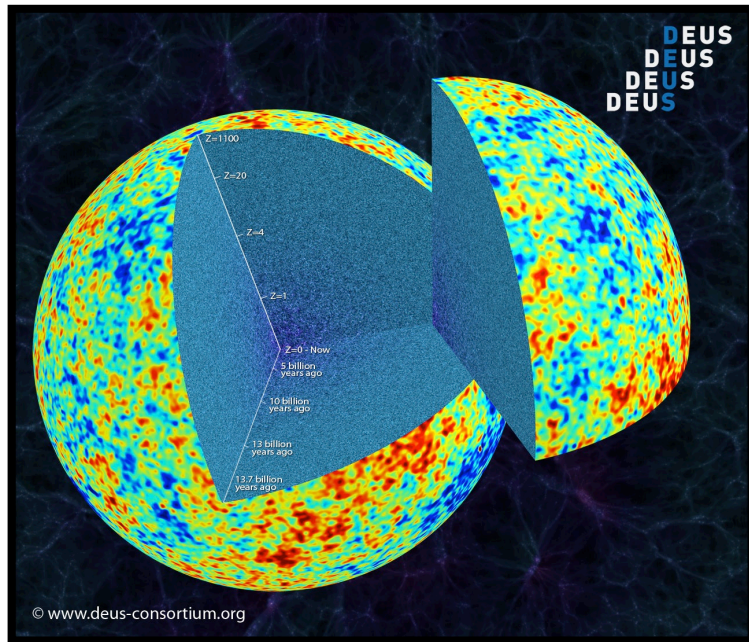


SONDER L'ENERGIE NOIRE EN S'AIDANT DU CALCUL SCIENTIFIQUE



Première simulation de Tout l'Univers Observable



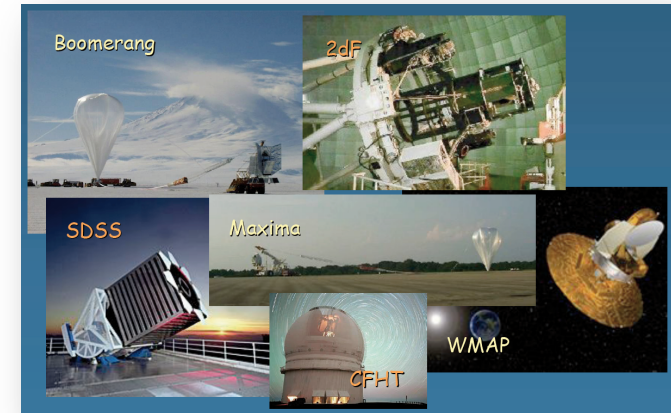
Comparaison des champs de Matière suivant l'Energie Noire

Jean-Michel Alimi
Laboratoire Univers et Théories
DEUS* (Dark Energy Universe Simulation)
www.deus-consortium.org

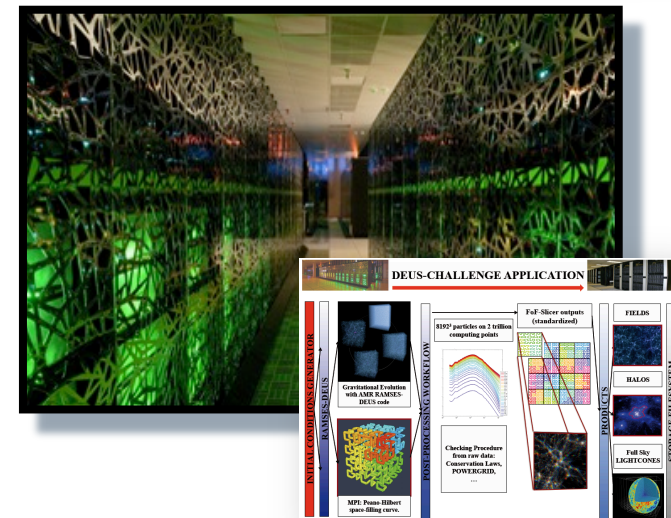
L'Énergie Noire: Un défi majeur de la (Astro)Physique.

A l'aube d'un nouveau paradigme cosmologique.

- De nombreuses observations cosmologiques confortent aujourd'hui l'idée que **l'expansion récente de notre Univers est accélérée**.
- Quelle est l'origine de cette accélération ? Quelle est la nature de **l'énergie noire** ?
- Comment discriminer parmi les nombreux modèles d'énergie noire ? Au delà de la dynamique de l'Univers selon les observations des SN, CMB ... **La structuration de l'Univers (effondrement gravitationnel non-linéaire)**, le « meilleur » marqueur cosmologique !
- **Simuler mais comment ? Avons nous les moyens de conclure ? (Grand Projets Observationnels: Euclid, SNLS...)**



Cosmologie de Précision

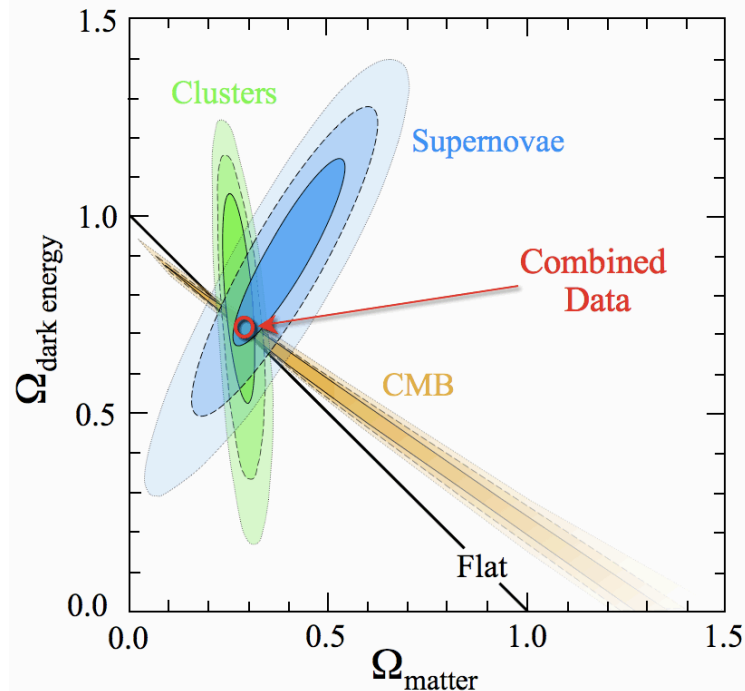


Ressources et Applications

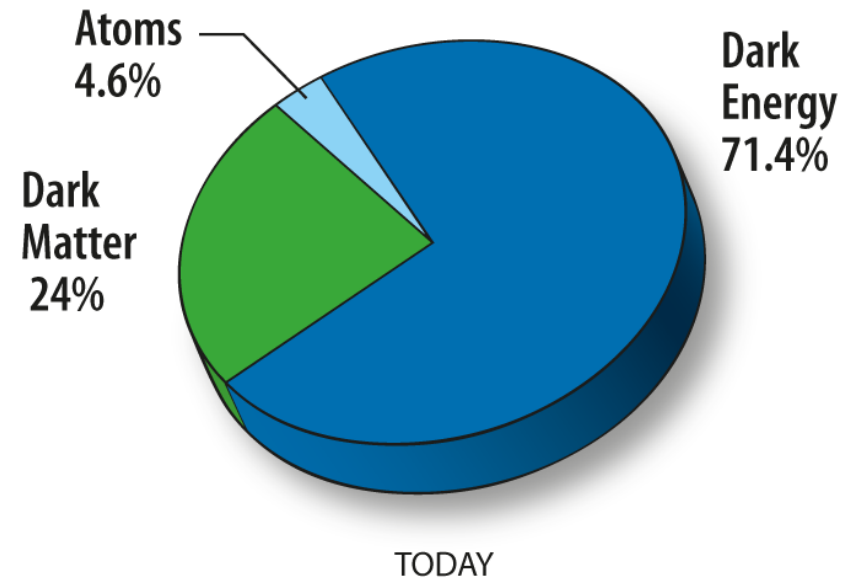
L'Énergie Noire: Évidences Observationnelles

Combinaison des mesures de distance (courbure) et des mesures de quantité d'énergie

Complémentarité Cosmique

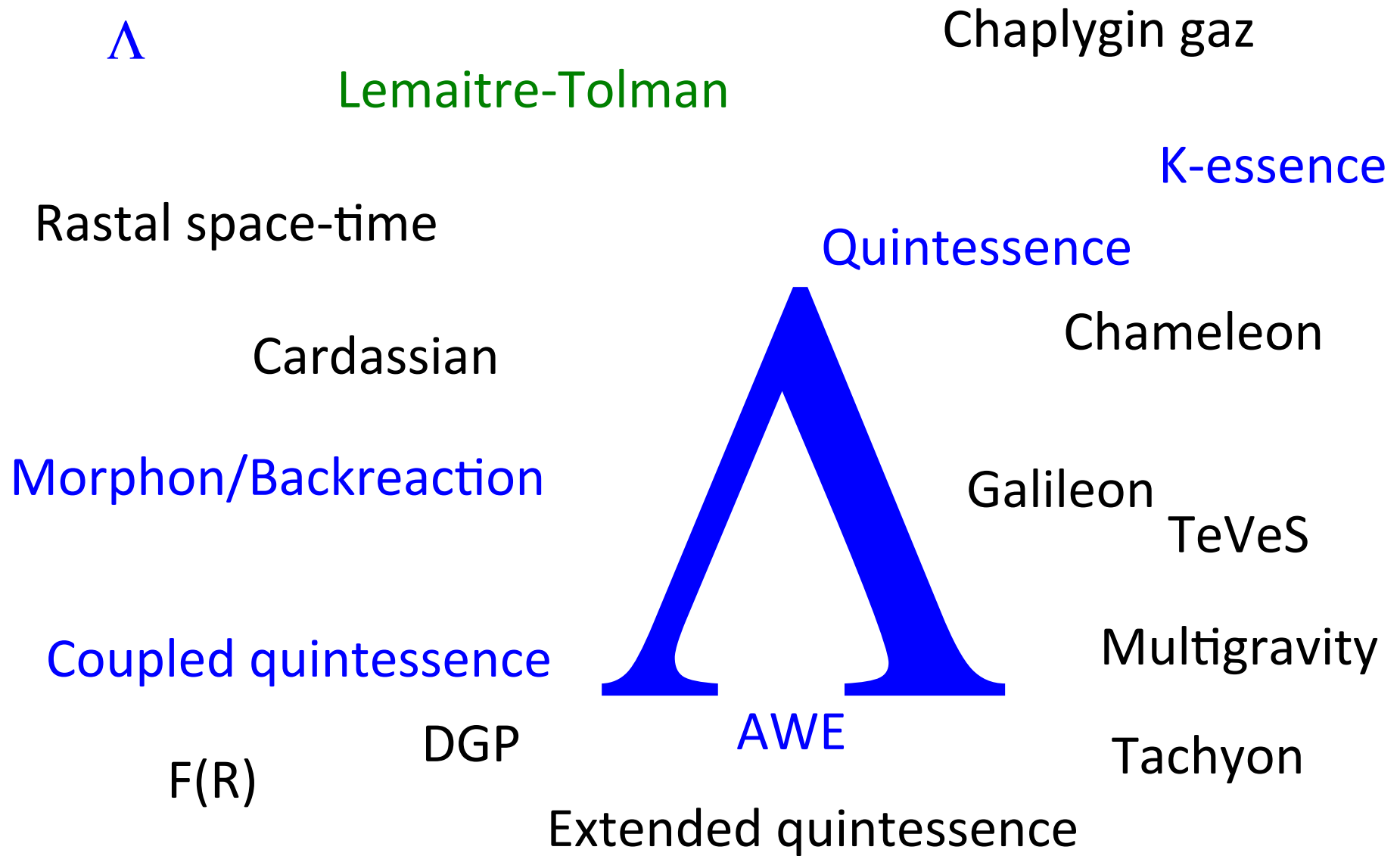


L'Univers est essentiellement invisible



Matière noire ?! **Accélération Cosmique ?!** **Energie Noire ?!**

Nature de l'Énergie Noire ? Interprétations Théoriques



Nature de l'Énergie Noire ? Interprétations Théoriques

L'interprétation théorique interroge notre Paradigme Cosmologique

- Principe de Covariance
- Principe d'Équivalence
- Principe Cosmologique : La dynamique de l'Univers est donnée seulement à travers $a(t)$

} RG

$$G_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G\rho}{3}, \quad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P)$$

Nouvelle Composante énergétique (ρ) qui s'ajoute à la ML et à la MN:

$$G_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} [T_{\mu\nu}^{SM} + T_{\mu\nu}^{DM} + T_{\mu\nu}^{DE}]$$

Violation de la condition forte d'énergie

$$\ddot{a} > 0 \text{ si } p < -\frac{\rho}{3}$$

Au delà du Modèle Standard de l'infiniment petit

Extensions de la RG, **au delà du principe d'équivalence**

$$\tilde{G}_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}^{Matter}$$

Une extension à la RG peut être réécrite comme un modèle effectif de type « Friedmann ».

$$w(z) = \frac{\tilde{P}}{\tilde{\rho}}$$

Interprétation Géométrodynamique de l'énergie noire

L'hypothèse "Théorie De la Relativité Générale d'Einstein" est conservée

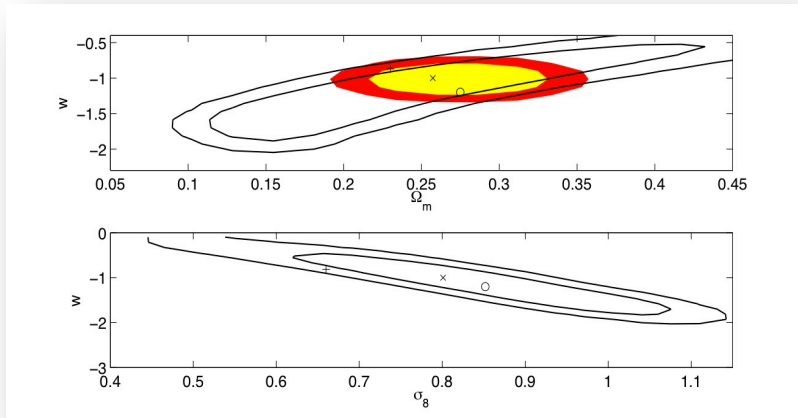
Au delà du principe cosmologique
(Énergie noire comme un effet des inhomogénéités)

Nouveau statut de l'Observateur

Nombreux modèles concurrents: 3 « interprétations »

Nature de l'Énergie Noire et « Modèles Réalistes ».

Motivations théoriques et observationnelles (équation d'état de l'énergie noire) se rejoignent dans la notion de **modèles réalistes** !



Analyse Monte-Carlo: Surface de confiance 1σ et

2σ dans les plans w - Ω_m (haut) et w - σ_8 (bas)

WMAP7-yr data : ligne solide

Sn UNION data : région rouge et jaune

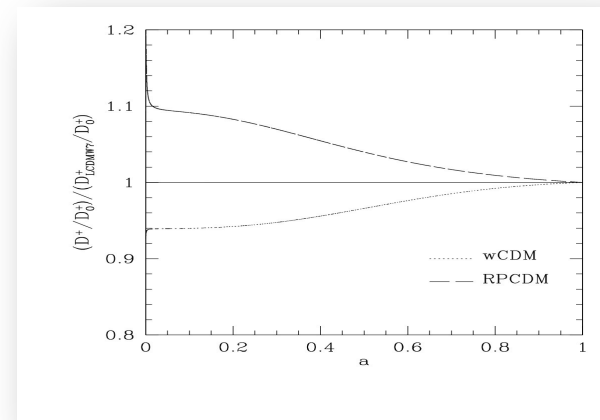
RPCDM (+), Λ CDM-W7 (x) et wCDM (o).

SNe Ia data impose les contraintes sur Ω_m et Ω_{DE}

CMB impose les contraintes sur $\Omega_b, \Omega_{CDM}, \sigma_8$

Conclusion: σ_8 et Ω_m légèrement plus bas que pour Λ CDM (low slope) mais les contraintes sont serrées

Parameters	Λ CDM	RPCDM	SUCDM	W'CDM
H_0 (km/s/Mpc)	72	72	72	72
Ω_{cdm}	0.26	0.23	0.25	0.275
$\Omega_b h^2$	0.02273	0.02273	0.02273	0.02258
σ_8^{lin}	0.8	0.66	0.73	0.852
α	0	0.5	1	/
λ (eV)	2.4×10^{-3}	4.9	2.1×10^3	/
A_s	2.1×10^{-9}	2.0×10^{-9}	2.1×10^{-9}	/
n_s	0.951 (0.963)	0.951 (0.963)	0.951	0.963
w_0	-1	-0.87	-0.94	-1.2
w_1	0	0.08	0.19	0



Nature de l'Énergie Noire et Structuration de l'Univers.

Les modèles réalistes sont (par construction) « dégénérés » sur la dynamique globale (SN), et faiblement perturbée (CMB) de l'Univers. Mais qu'en est il de la structuration cosmique ?

**Quelle est l'empreinte de l'énergie noire sur la structuration cosmique ?
Réciproquement, la structuration de l'Univers peut-elle nous permettre
d'inférer la nature de l'énergie noire ?**

Comment lever la dégénérescence de ces modèles ?

**L'effondrement gravitationnel non-linéaire est il (totalement) indépendant
de la cosmologie, de la nature de l'énergie noire ?**

**La structuration conserve - t- elle la mémoire des conditions initiales
voir de toute l'histoire de l'évolution (linéaire) ?**

Comment sonder la Cosmologie ?

Comment conclure sur la nature de l'énergie noire ?

**Pour répondre à ces questions les simulations numériques hautes performances
seront spécialement utiles**

Formation des grandes structures et modélisation numérique

La structuration résulte de l'effondrement, de la matière (noire + baryon) tout au long de l'histoire de l'Univers.

L'équation Vlasov-Poisson est difficile à résoudre directement du fait de sa dimensionalité (EDP 6D) et du mélange (multistreaming) lors de la croissance des structures par instabilité de Jeans.

Discrétisation en terme de « pseudo » particules qui évoluent selon les caractéristiques du système V-P.
Code N-Corps Particule Grille (Particle-Mesh)

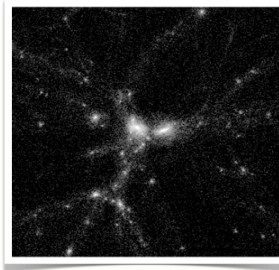
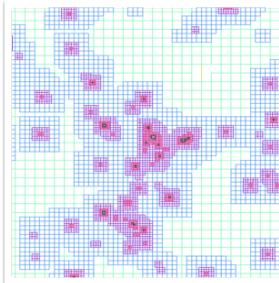
Défi: Maximum de résolutions en masse et spatiale.

Résoudre la structure interne des halos – N Grand

Suivre la dynamique multi-échelle sur le plus grand des volumes – Δx petit

Bon Moyen: Raffinement de la Grille, là où cela est nécessaire;
PM-AMR

(Quid des régions sous denses?)



Λ CDM / Phantom Model



Dark Energy Univers Simulation

Grand ensemble de SN capable de suivre la formation de halos de $10^{11} h^{-1} M_0$ à plus de $10^{16} h^{-1} M_0$ sur des volumes de la taille de l'environnement d'un groupe de galaxies au volume de TOUT l'Univers Observable avec une résolution spatiale de $2.5 h^{-1} \text{ kpc}$ à $40 h^{-1} \text{ kpc}$ et cela pour plusieurs modèles d'énergie noire (réalistes): ΛCDM , RPCDM , SUCDM , WCDM ...

Computing Volume ($h^{-1} \text{ Mpc}$) ³	Spatial Resolution ($h^{-1} \text{ kpc}$)	Mass of Particle ($h^{-1} M_\odot$)	Number of Particles	Initial Redshift	Cosmological Model	Computer (# of cores)
162^3	2.5	$2 \cdot 10^9$	512^3	90	Λ , SU, RP	Titane (64)
162^3	2.5	$2.5 \cdot 10^8$	1024^3	130	Λ , SU, RP	BlueGene/P (4096)
648^3	20	$1.5 \cdot 10^{11}$	512^3	55	Λ , SU, RP	Ressources locales
648^3	10	$1.7 \cdot 10^{10}$	1024^3	90	Λ , SU, RP	BlueGene/P (4096)
648^3	5	$2 \cdot 10^9$	2048^3	90	Λ , SU, RP	BlueGene/P (32768)
1296^3	40	10^{12}	512^3	40	Λ , SU, RP	Ressources locales
2592^3	40	10^{12}	1024^3	55	Λ , SU, RP	BlueGene/P (4096)
2592^3	20	$1.5 \cdot 10^{11}$	2048^3	55	Λ , RP	BlueGene/P (24576)
5184^3	40	10^{12}	2048^3	40	Λ , RP	BlueGene/P (24576)
10368^3	40	10^{12}	4096^3	100	Λ , RP, w	Curie Thin (9504)
21000^3	40	10^{12}	8192^3	100	Λ , RP, w	Curie Thin (76032)

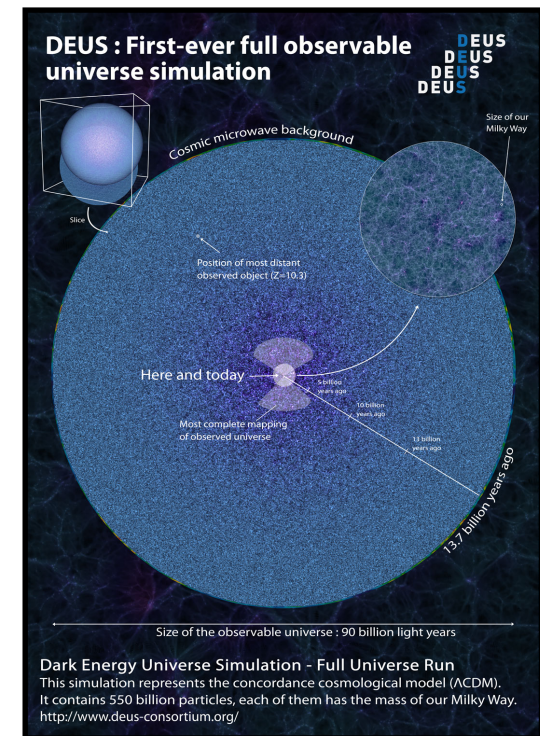
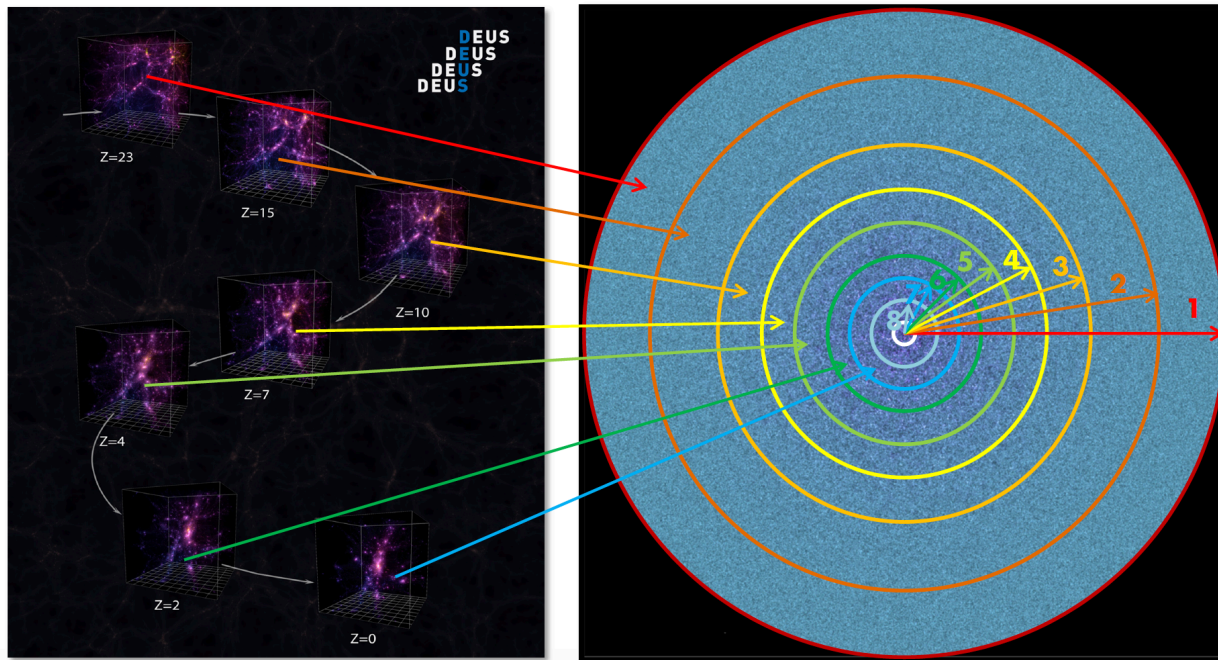
Reconstruire la distribution de matière dans l'espace des « redshifts » .

Le cône de lumière à l'issue de la simulation

- L'évolution des particules se déroule dans un volume comobile
- A chaque pas de temps, pour un observateur donné, une co-quille du cône de lumière est extraite.
- Le cône est reconstruit en additionnant toutes les coquilles à la fin de la simulation (particules et champs).

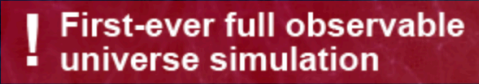
Construction of light cones

➡ Data preselection for a given observer assuming not huge deflections



DEUS DataBase

<http://www.deus-consortium.org/deus-data/>



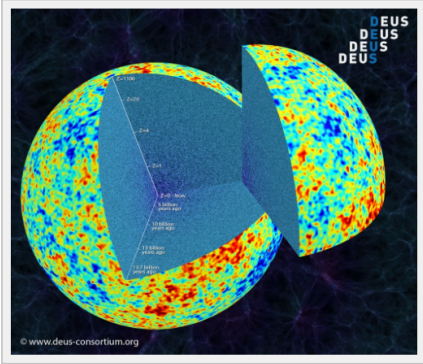
[Home](#) [Science](#) [Simulations](#) [Data](#) [Gallery](#) [Publications](#) [Consortium](#) [Press](#)

Navigation

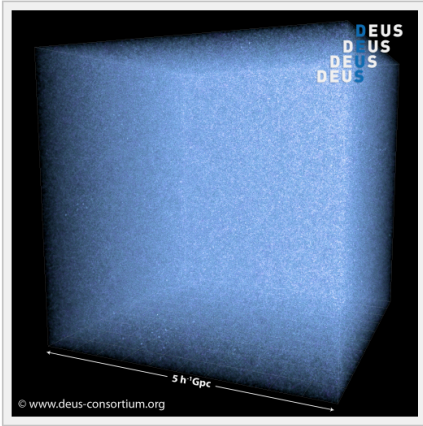
- **Data presentation**
- Redshift Space
- Comoving Space
- Documentation

DEUS Library

Here a small introduction about the data + schema to show difference between snapshots/Comoving Space and cones/Redshift Space



© www.deus-consortium.org



© www.deus-consortium.org

Redshift Space

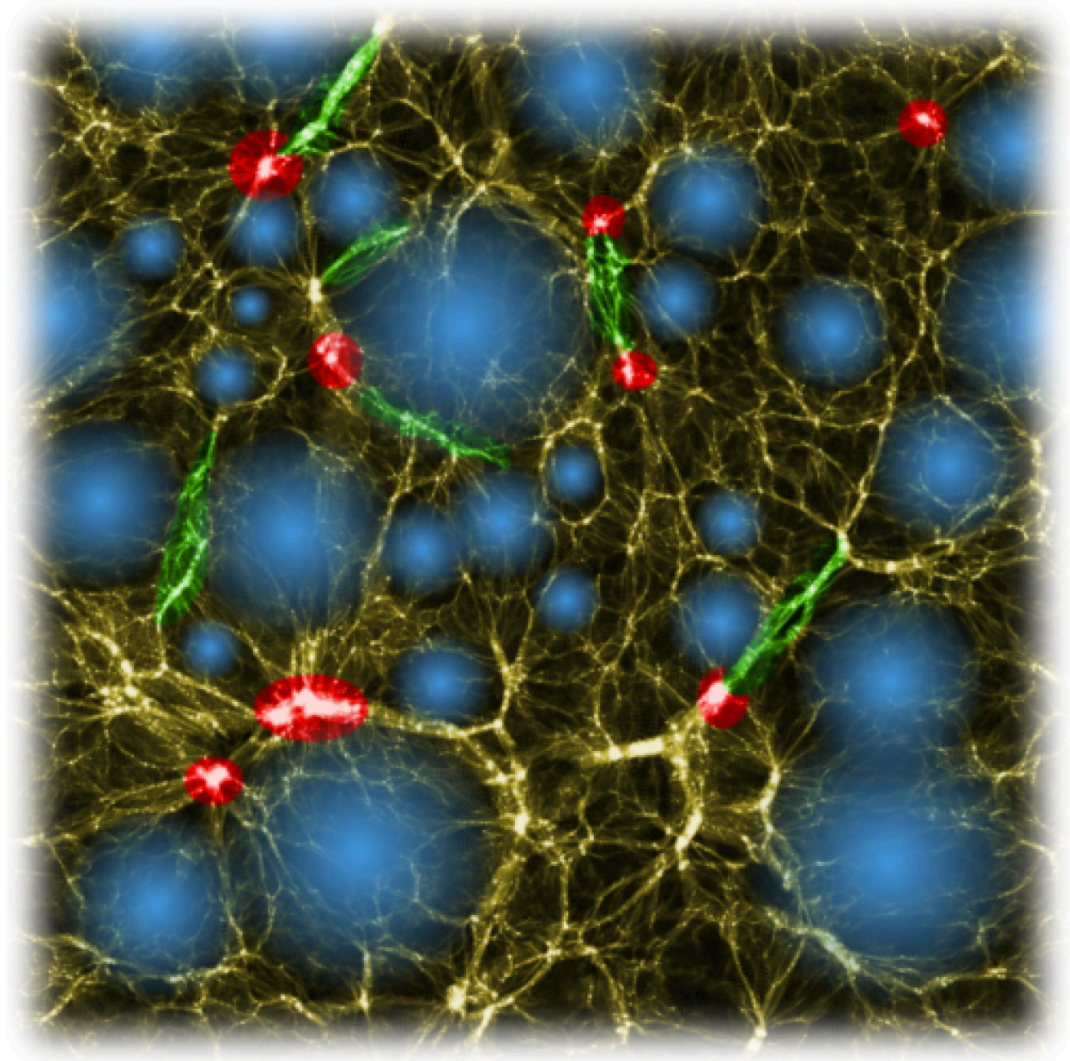
Comoving Space

Complexité des structures cosmiques

Structuration of the Universe

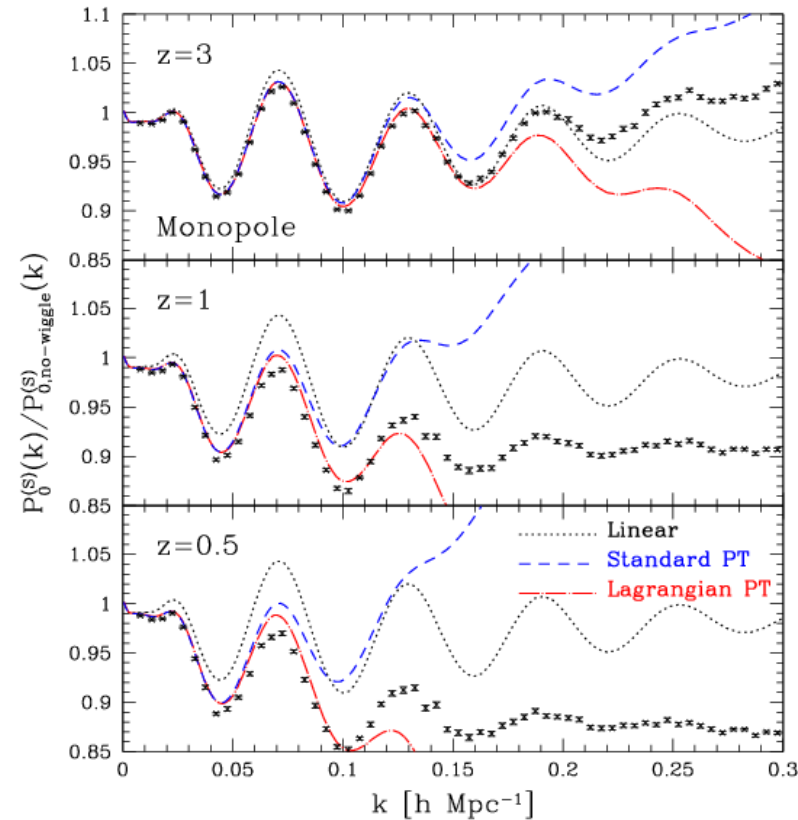
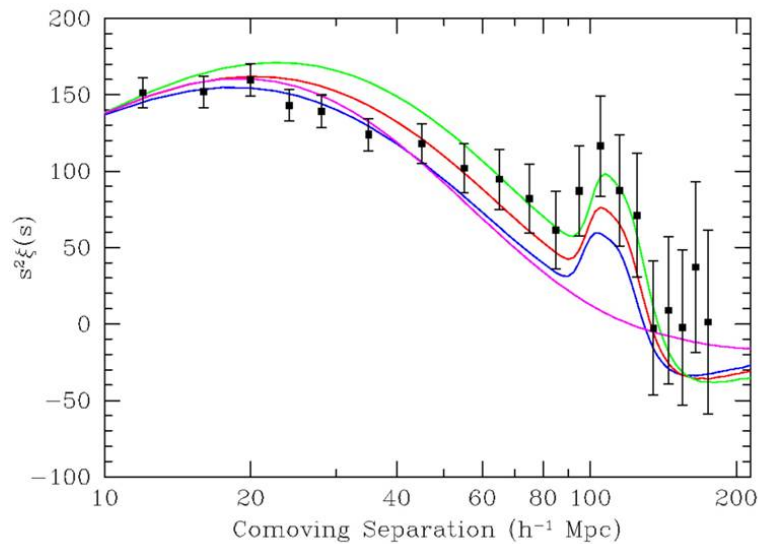
Slice of $162 h^{-1}\text{Mpc}$ from DEUS simulations

- full matter field (DM)
- halos
- filaments
- cosmic voids :
 $\rho_m < \bar{\rho}_m$.



Evaluation des Sondes Cosmologiques

Baryonic Acoustic Oscillations: Objectif majeur de nombreux projets observationnel / Sonde cosmologique puissante



Baryon Acoustic Oscillations in 2D: Modeling Redshift-space Power Spectrum from Perturbation Theory - **Taruya**, Atsushi *et al.* Phys.Rev. D82 (2010) 063522 arXiv:1006.0699 [astro-ph.CO]

Baryonique Acoustic Oscillations

« Perturbation theory reloaded. II Nonlinear bias, baryon acoustic oscillations, and **Millenium Simulation** in real space », D. Jeong and E. Komatsu, ApJ, 691:569–595, 2009 January 20

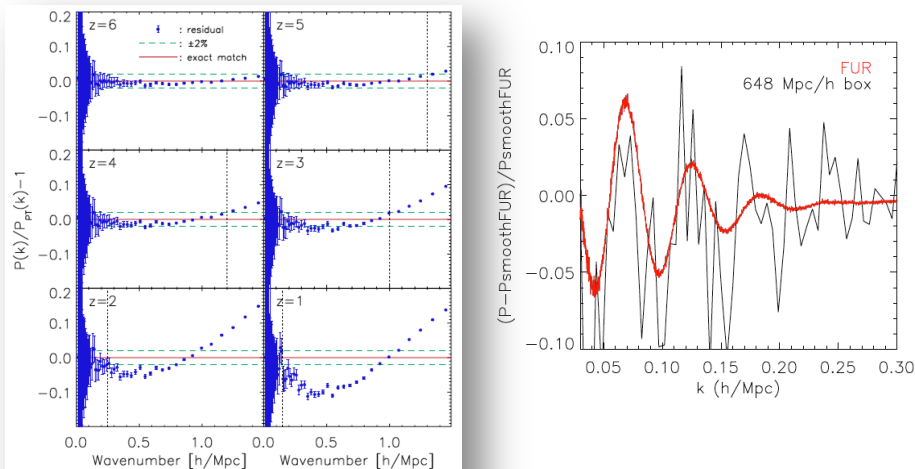
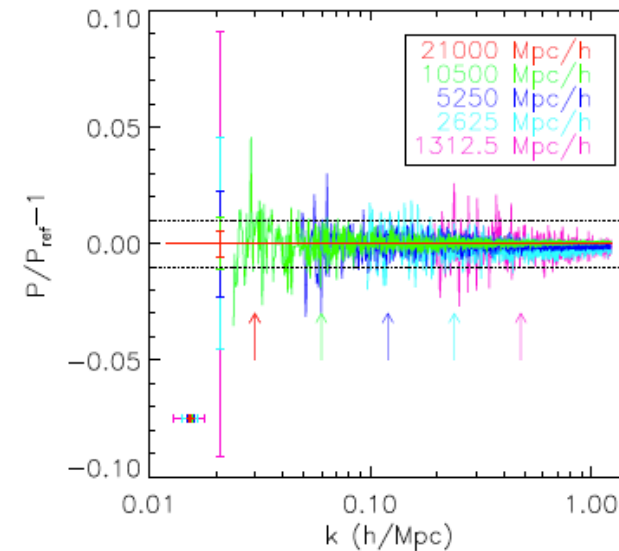


Figure 3. Fractional difference between the matter power spectra from the third-order PT and that from the Millennium Simulation, $P_m^{sim}(k)/P_m^{PT} - 1$ (dots with error bars). The solid lines show the perfect match, while the dashed lines show $\pm 2\%$ accuracy. We also show $k_{max}(z)$, below which we trust the prediction from the third-order PT, as a vertical dotted line.



L'erreur statistique sur un mode est inversement proportionnelle à L_{box} . Lorsque la taille de la boîte de calcul atteint la taille de l'Univers observable, la fluctuation statistique sur l'échelle de la boîte se réduit à la « variance cosmique ».

$$\sigma(k) \propto \sqrt{\frac{1}{N_k}} \propto \sqrt{\left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2} \propto \frac{1}{k L_{Box}}$$

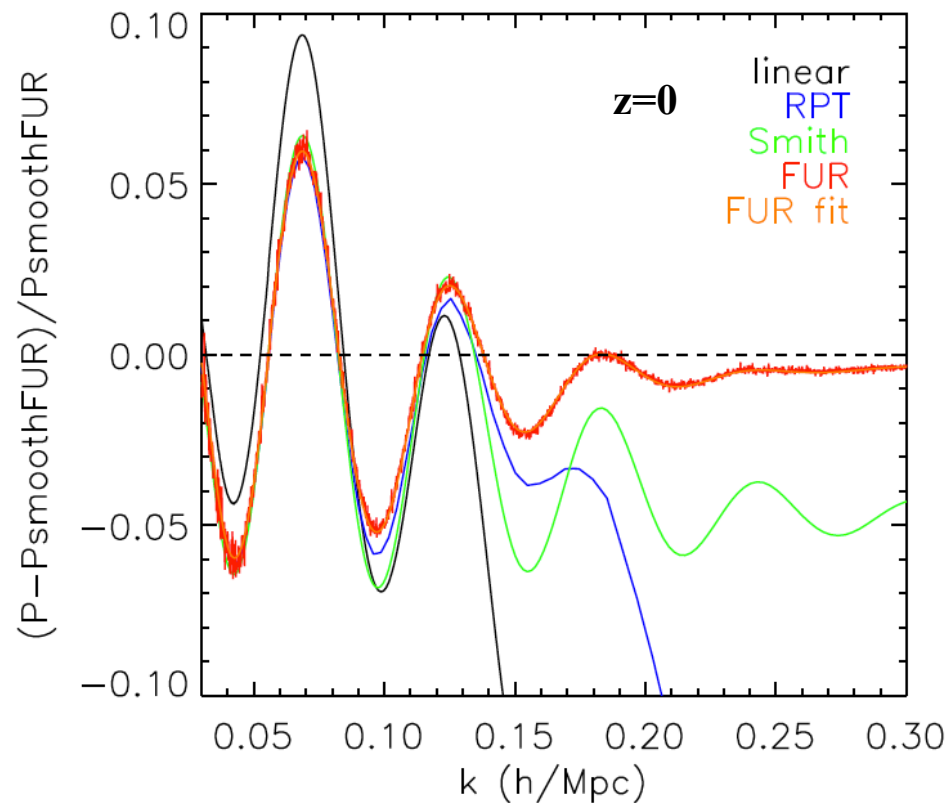
La taille de l'Univers observable ($\sim 21 h^{-1} \text{ Gpc}$) contient aujourd'hui plus de 150 fois l'échelle des « BAO »

Grand Volume de Simulation !

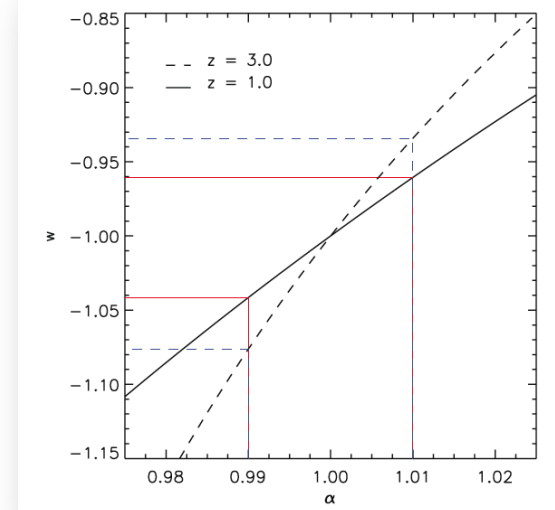
Grand ensemble de réalisations statistiques de volume intermédiaires

Deus PUR Blot et al MNRAS 2015

Evolution non linéaire des « BAO » : Sonde de l'énergie noire



« The detectability of BAO in future galaxy survey », R.E. Angulo, C.M. Baugh, C.S. Frenk & C.G Lacey, MNRAS, 383:755-776, 2008



Une erreur de 1% entraine une erreur de 4% environ sur w

Erreur Relative comparée au BAO de DEUS FUR à $z=0$

- Théorie linéaire : 3% erreur sur le 1^{er} pic + chute après 0.13 h/Mpc
- Halofit: 4-5% en deça de BAO DEUS FUR dans le domaine 0.15-0.3 h/Mpc + amplitude too large
- RegPT: very accurate up to 0.15 h/Mpc + chute après 0.15 h/Mpc
- Rapport des pics : Taux de croissance, modèle cosmologique.

Deus, Rasera, et al MNRAS 2013

Proposition de Nouvelles Sondes Cosmologiques

Spherical Compensated Regions

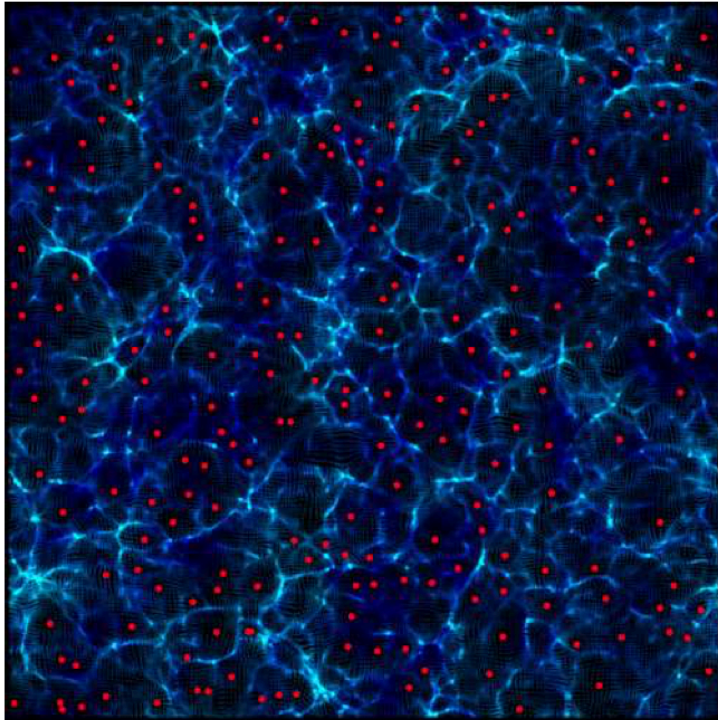


FIGURE 3.7 – illustration de la position des centres de régions sous-denses (points rouges) obtenue à partir de la simple méthode de comparaison locale de la densité de chaque cellule avec ses voisines. Cette image est obtenue dans une boîte de taille $L_{box} = 648 h^{-1}\text{Mpc}$ avec $N_{part} = 256^3$ particules à $z = 0$. La tranche est d'épaisseur $5 h^{-1}\text{Mpc}$.

Mass (spherical) Contrast Profil (stacking procedure)

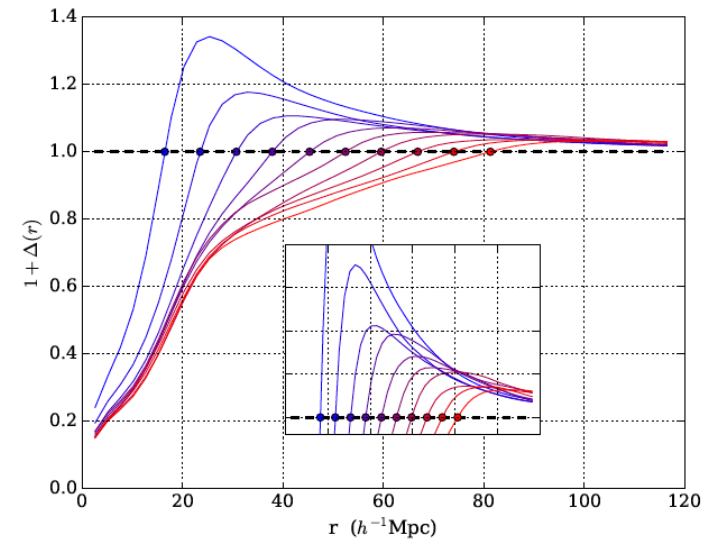


Figure: Compensated profiles around minima = cosmic voids

Proposition de Nouvelles Sondes Cosmologiques

Spherical Compensated Regions

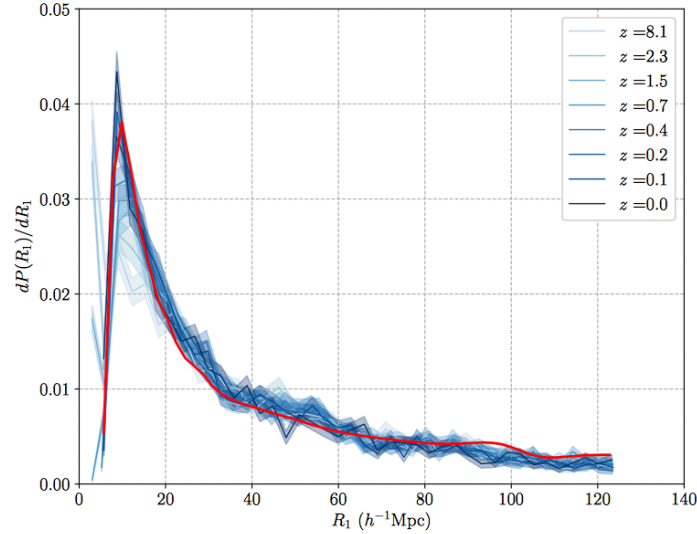


Figure 6. The compensation radius probability distribution $dP(R_1)$ for Λ CDM cosmology computed from 10000 profiles build around haloes at various redshift ($z = 8$ to $z = 0$) in the reference simulation (blue lines). This figure has been obtained from 10000 halos of mass $M_h = 3.0 \pm 0.075 \times 10^{13} h^{-1} M_\odot$. The shaded region around each curve is the Poisson noise computed in radial bins of size $dR_1 = 3.5 h^{-1} \text{Mpc}$. The red line is the initial Gaussian distribution given by Eq. (43). The conservation of R_1 insures the conservation of its probability distribution. The height of the central threshold v_0 has been chosen in agreement with the halo masses ($3.0 \times 10^{13} h^{-1} M_\odot$) used to construct the compensated regions.

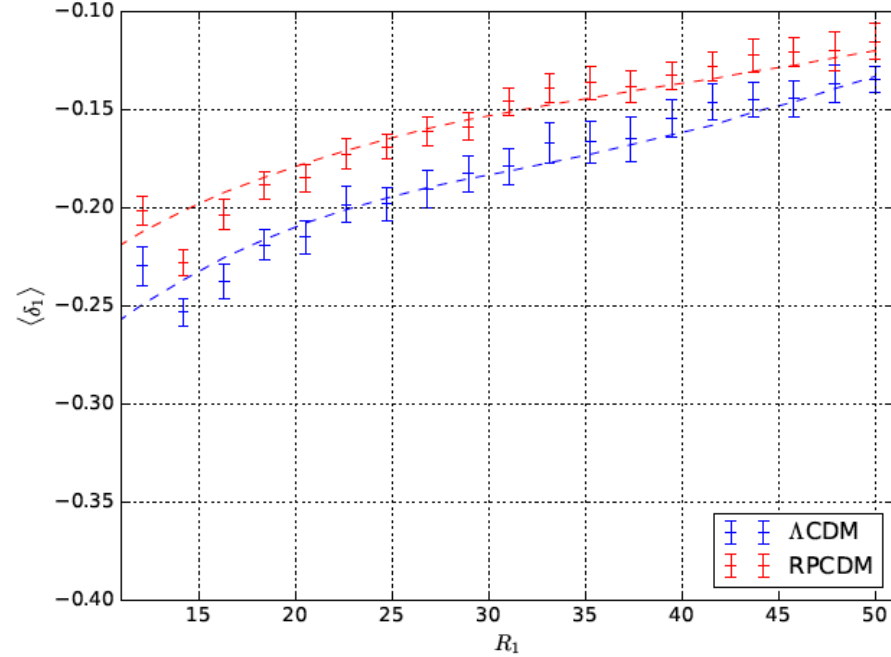
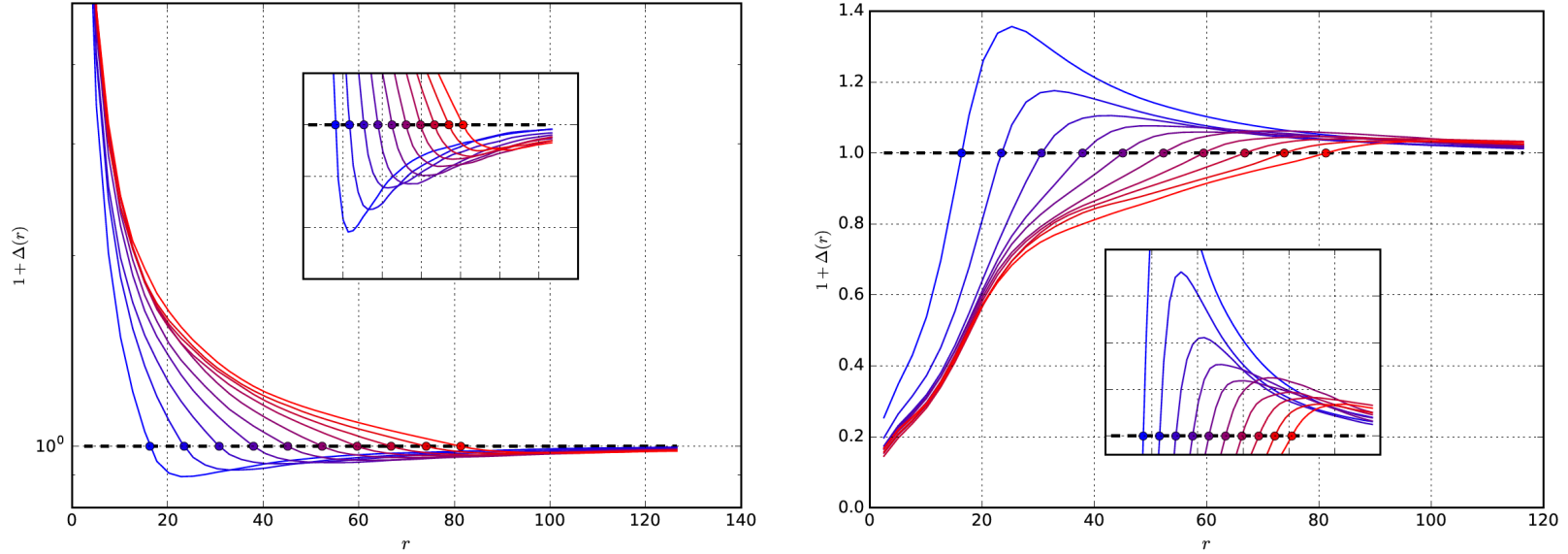


Figure: $\langle \delta_1 | R_1 \rangle$ at $z = 0$

Proposition de Nouvelles Sondes Cosmologiques

Spherical Compensated Regions

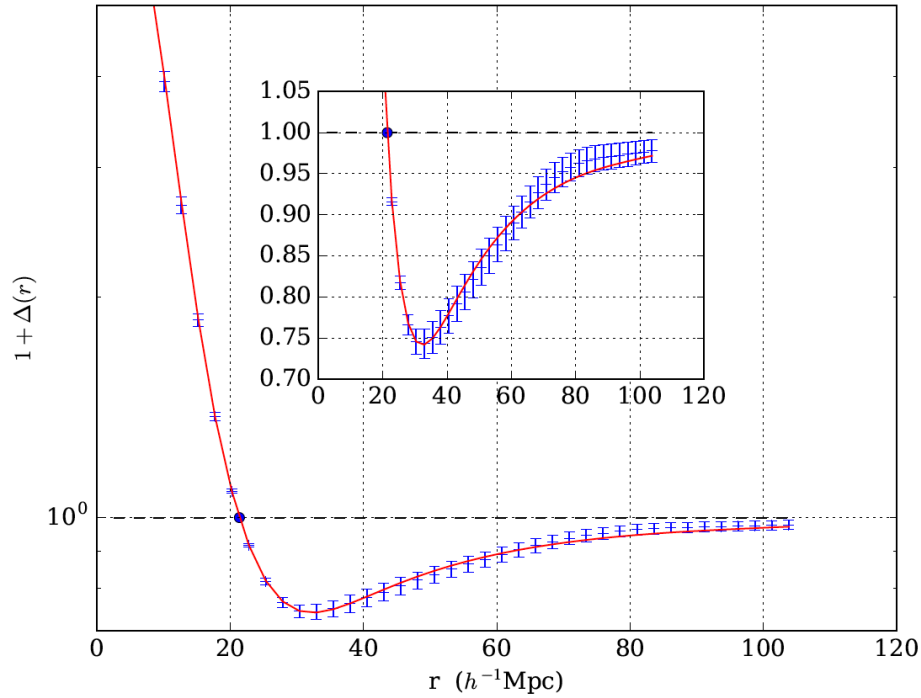


(a) Plot of the stacked average profiles around halos with a mass $M_h \sim 3.0 \times 10^{13} h^{-1} \text{Mpc}$ at $z = 0$ in the **reference simulation**. (b) Same as in left plot for under central massive regions, i.e. cosmic voids

Figure 1. Radial average mass contrast profiles at $z = 0$. Each curve corresponds to a given compensation radius R_1 from 15 to $80 h^{-1} \text{Mpc}$. Whereas each single individual profile is far from a smooth curve, the stacked profiles present a global shape with well defined properties. From the zoomed plots of profiles, we can clearly distinguish the various compensation radii.

Proposition de Nouvelles Sondes Cosmologiques

Spherical Compensated Regions



CoSpheres et Survey

Figure 18. Mass contrast profile from central halos of mass $M_h \sim 3.0 \times 10^{13} h^{-1} M_\odot$ computed from the *halo field* at $z = 0$. This profile is obtained by considering a biased field traced by DM halos weighted by their mass. The mean density $\bar{\rho}$ is estimated from the ratio between the total mass of halos and the volume of the simulations. The red curve is the theoretical reconstruction using CoSphere formalism as discussed in Section 3.4

De Fromont & Alimi,
MNRAS 2017, arxiv:1709.04490

Accompagnements des Grands Projets.

Integrated Sachs Wolfe Effect ! Mesurer les variations temporelles du pot. gravitationnel

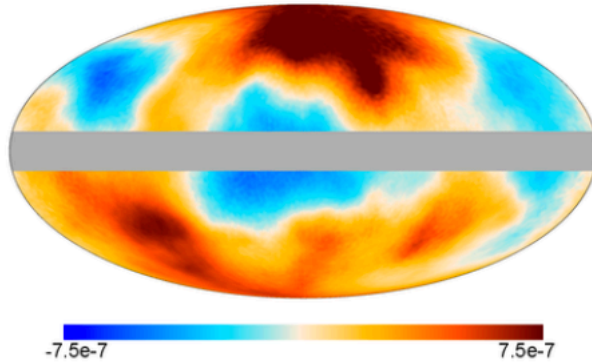


Fig. 21. Map of the recovered ISW from the 2MPZ catalogue. Units are in Kelvin.

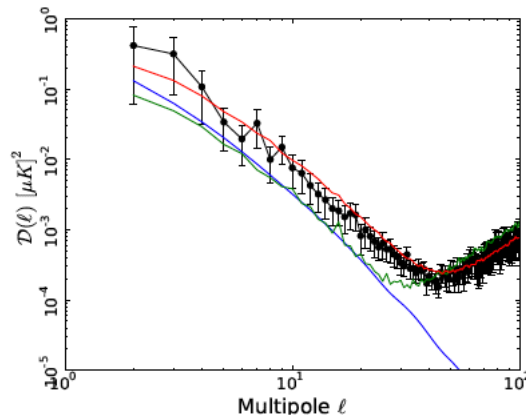


Fig. 22. Comparison of the ISW recovered angular power spectrum from 2MPZ data (black solid circles) with theoretical expectations (blue solid line) and the average of ideal (green solid line) and realistic (red solid line) simulations of our density-to-potential inversion algorithm (see text for details).

Planck 2015 results. XXI. The integrated Sachs-Wolfe effect

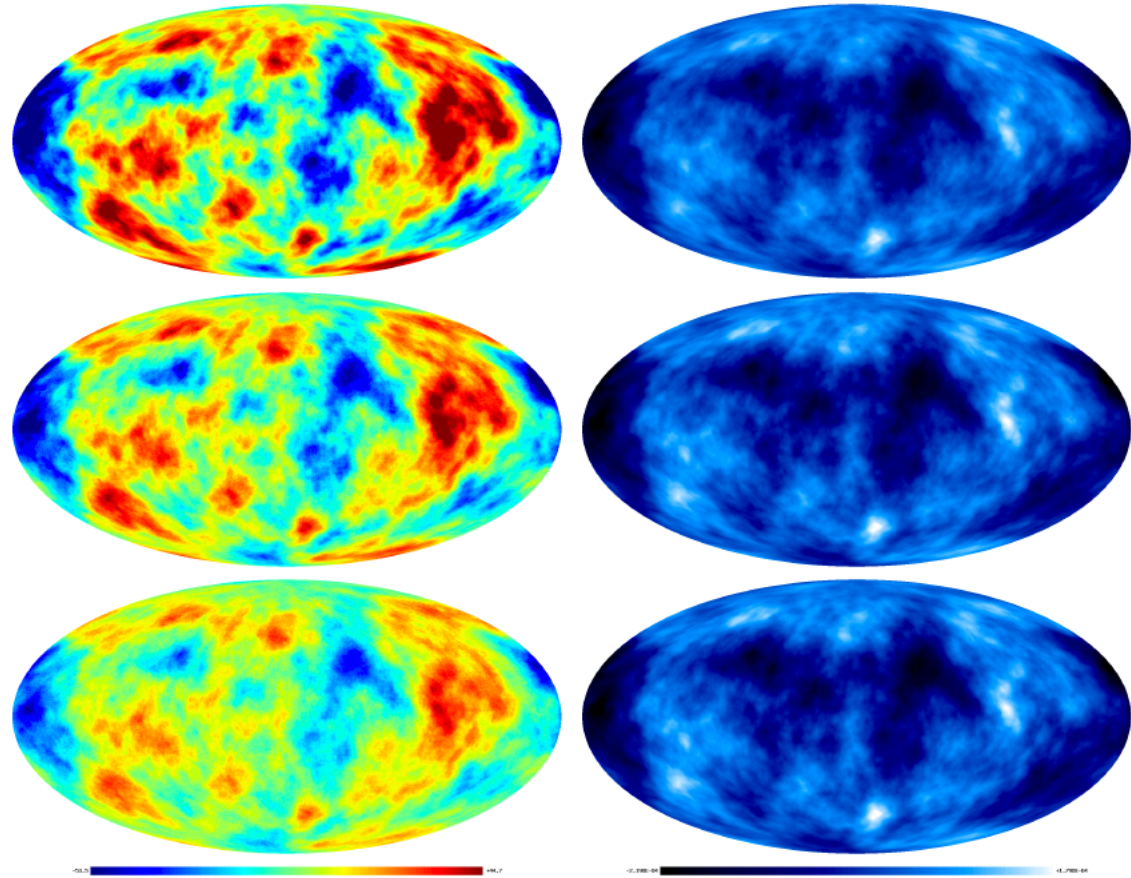


Figure 1: Full-sky maps of the ISW temperature anisotropy (left panels, in units of μK) and lensing potential (right panels) extracted from the DEUS FUR for (from top to bottom) RCDM, ΛCDM , and $w\text{CDM}$ models. As usual, the temperature dipole is not shown since its observation is difficult due to the large kinematic dipole. For a better comparison we therefore also subtract the lensing dipole even though it is taken into account in our analysis.

DEUS Temperature Anisotropy, Lensing Potential

Accompagnements des Grands Projets.

Integrated Sachs Wolfe Effect / Rees Sciama Effect !

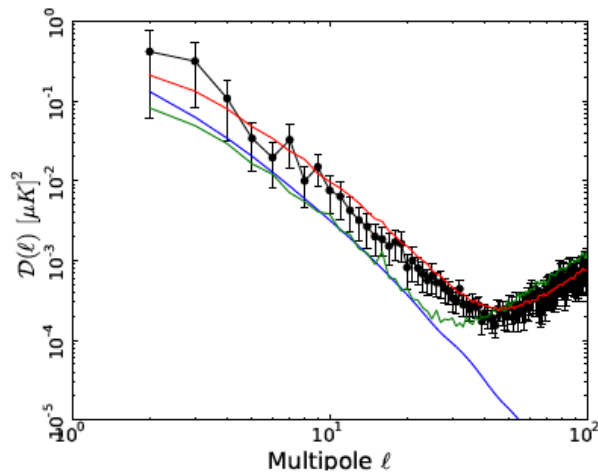


Fig. 22. Comparison of the ISW recovered angular power spectrum from 2MPZ data (black solid circles) with theoretical expectations (blue solid line) and the average of ideal (green solid line) and realistic (red solid line) simulations of our density-to-potential inversion algorithm (see text for details).

Planck !

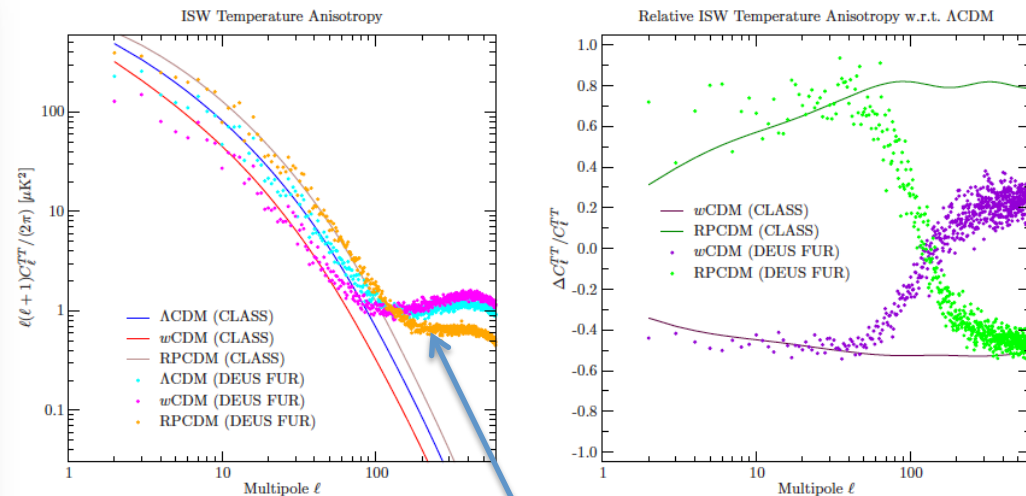
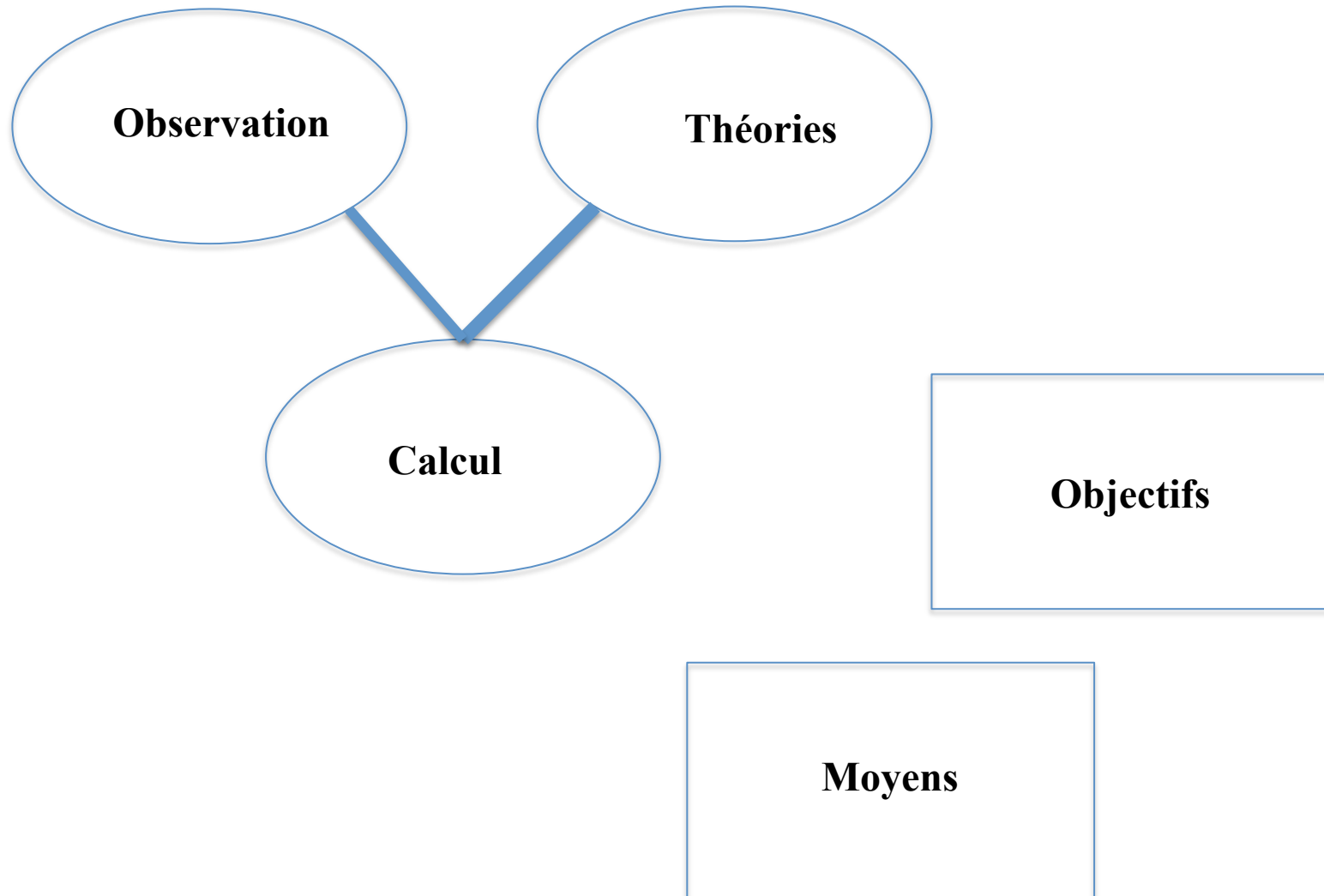


Figure 2: Angular power spectra of the ISW signal.

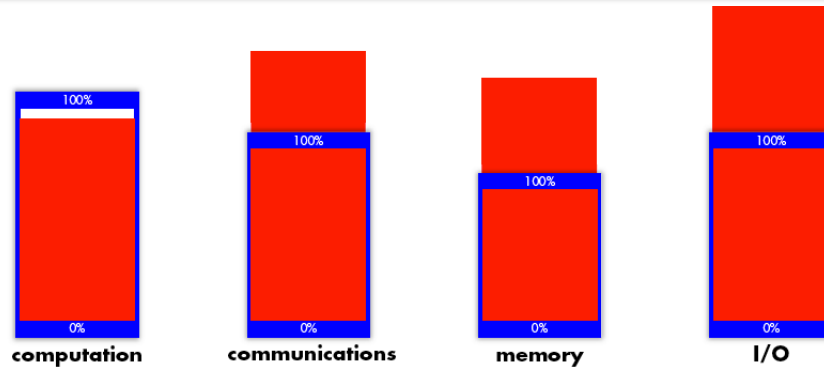
Accès aux échelles Non-Linéaires !
Dépendance selon l'énergie Noire
Rees Sciama effect

Quelques Recommandations !



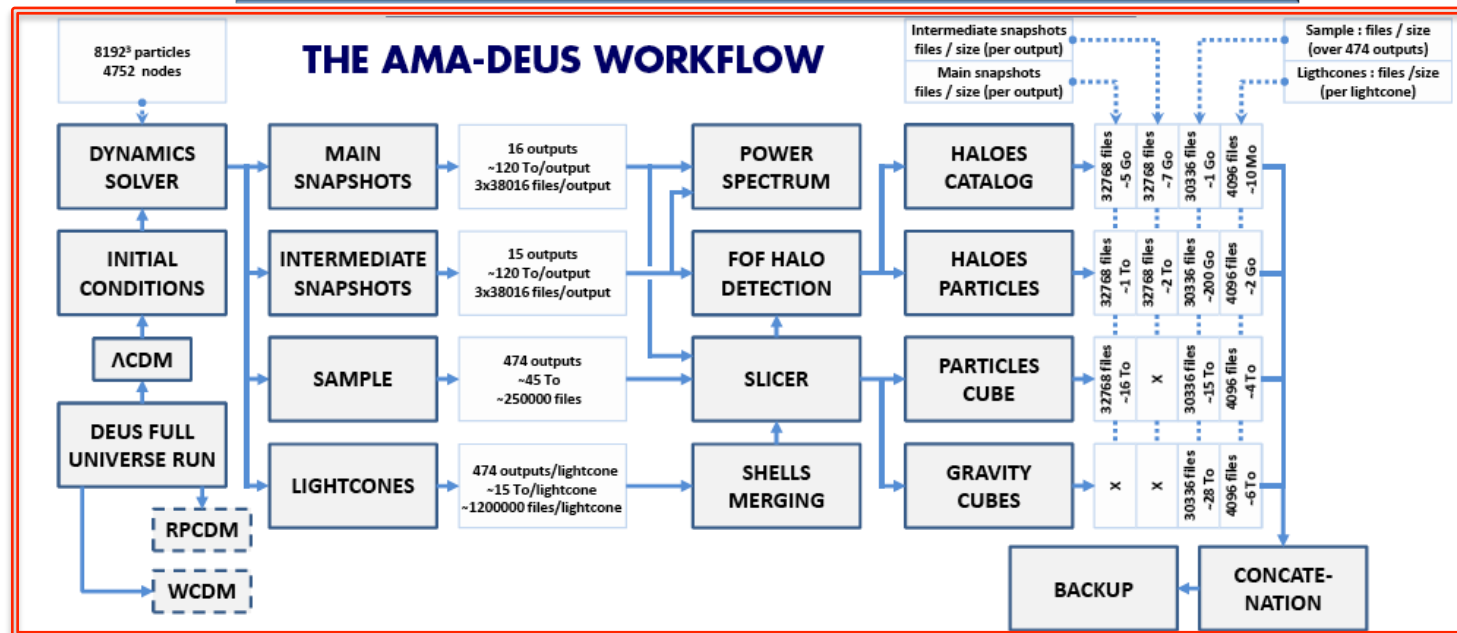
Quelques Recommandations !

architecture performances
simulation requirements



Tout doit être spécialement optimisés au même instant, avec inévitablement de l'optimisation dépendante de l'architecture du système de calcul.

Absolute nécessité d'une Application Globale



Quelques Recommandations !

Validation des Modèles:

Erreurs Numériques :

Résolution Spatiale et en Masse

Erreurs Statistiques :

Taille de Boite, Nombre de Modes, Covariance Cosmique

Ressources: Matériel, Logiciel, Humain (nombreuses compétences)

Calcul Dynamique:

Le Solver, il y a aujourd'hui bien d'autres épreuves

Analyse Post Calcul Dynamique:

Couteuse (CPU, Mémoire) et Complexe

Nécessité de nouveaux Algorithmes de calcul

Domain Specific Langage: DSL, Métaprogrammation

Intelligence Artificielle, Machine Learning.

Projet Numérique: Commensurable à un (*petit*) Projet Observationnel de notre discipline.