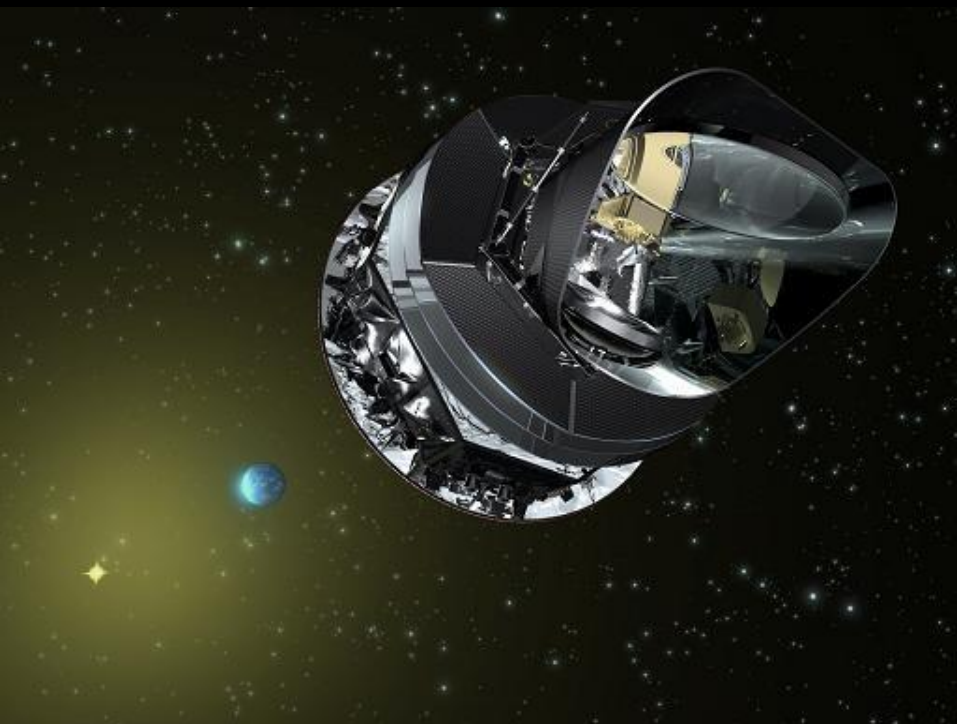




Missions Planck et Herschel



esquisse d'un premier bilan

André Gilloire

Association Observation radio – Pleumeur-Bodou

SAF Commission radioastronomie

Club d'Astronomie du Trégor



Planck et Herschel: deux missions-phare de la science spatiale européenne

Planck et Herschel sont des radiotélescopes spatiaux millimétriques adaptés à l'étude du rayonnement thermique

Planck : relevé extrêmement précis et détaillé du rayonnement de fond cosmologique sur l'ensemble de la sphère céleste

Herschel : observation fine d'objets célestes dans le domaine de l'infrarouge lointain: régions de formation et de naissance d'étoiles; évolution des galaxies

Missions totalement réussies : grand succès pour l'ESA et moisson très riche de données scientifiques

Max Planck et William Herschel: deux grands scientifiques européens

Plan de l'exposé

Déroulement des missions

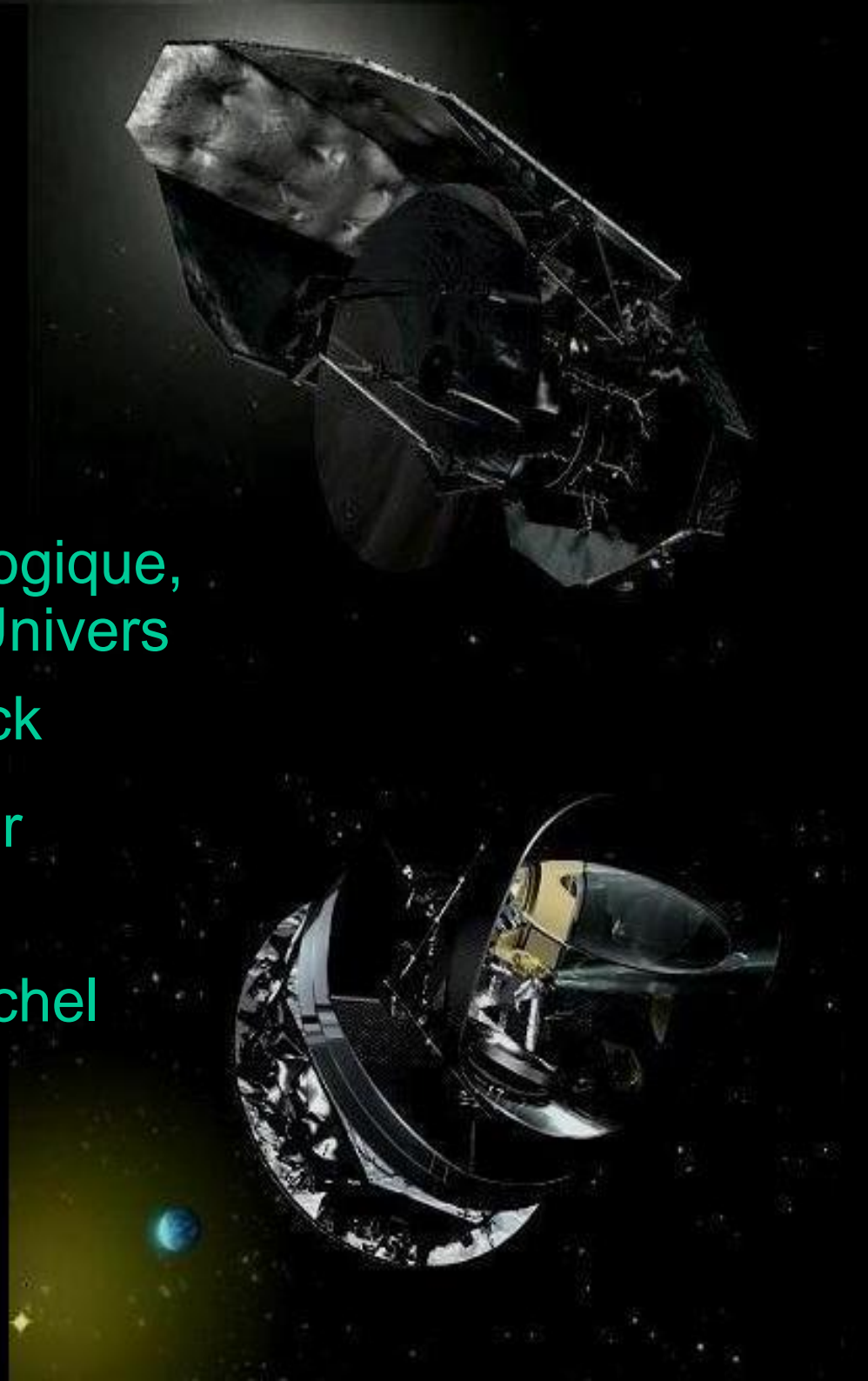
Le rayonnement de fond cosmologique,
le « Big Bang » et l'histoire de l'Univers

Des résultats de la mission Planck

L'astronomie infrarouge: observer
les objets froids de l'Univers

Des résultats de la mission Herschel

Conclusion



Déroulement des missions

Lancement des deux satellites par Ariane 5 depuis Kourou le 14 Mai 2009

Acheminement et positionnement très précis au voisinage du point de Lagrange L2

Début de mission opérationnelle :

Herschel: 14 Juin 2009

Planck: 3 Juillet 2009

Fin de mission par épuisement réserve d'hélium réfrigérant:

Herschel: 30 Avril 2013

Planck: Janvier 2012 (HFI), prolongé jusqu'à Août 2013 (LFI)



Mise en place sur Ariane 5 avant le lancement



Planck (dans container)
surmonté de Herschel

Herschel en chiffres

Hauteur : 7 m

Largeur : 4,30 m

Masse : 3,25 t

Planck en chiffres

Hauteur : 4,20 m

Largeur : 4,20 m

Masse : 1,8 t



Coiffe montée 10 Mai 2009

Lanceur Ariane 5 ECA

Hauteur : ~50 m

Masse au lancement : 750 t

Poussée au décollage : 1300 t

Charge utile (orbite elliptique) : 10 t

vol VA188



En route vers L2 !



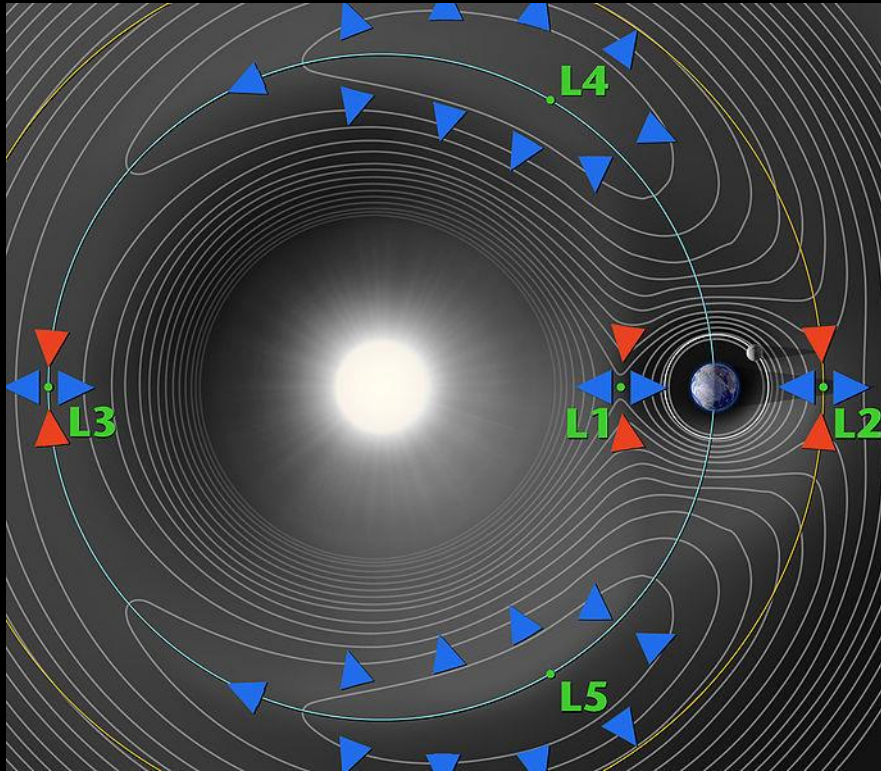
Sur le pas de tir, 13 Mai 2009



Lancement parfait, 14 Mai 15h12

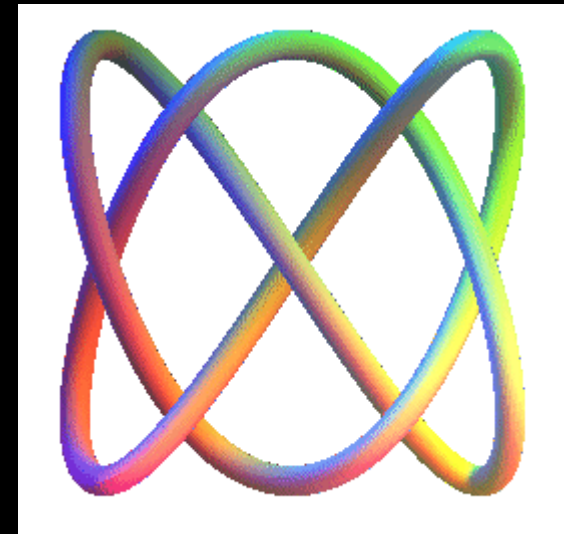
Crédits photos: ESA-ARIANESPACE

Mise à poste au point de Lagrange L2



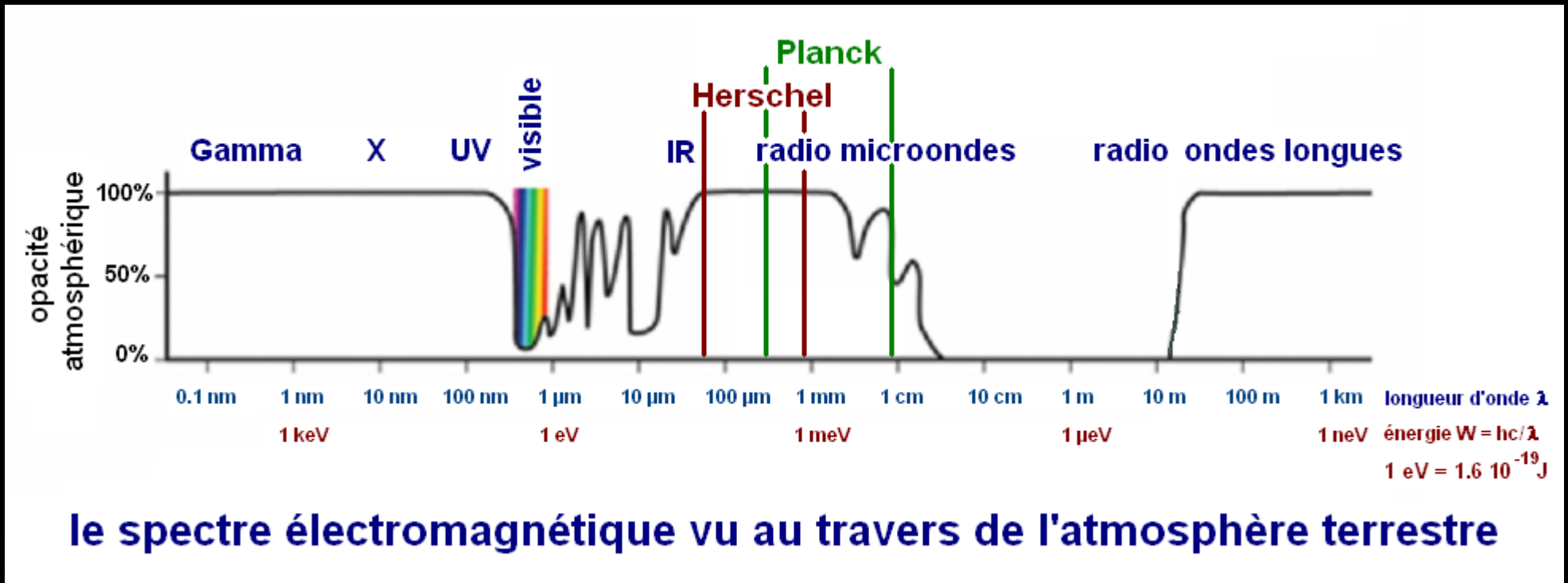
Intérêt : **stabilité naturelle** (peu de consommation de carburant pour rester à la bonne place), **assez loin de la Terre** pour échapper à la pollution électromagnétique terrestre

L2: point d'équilibre métastable du champ de gravitation du système Terre-Soleil, situé à **1,5 million km** de la Terre, en opposition par rapport au Soleil



Trajectoire autour de L2 (figure de Lissajous)

Pourquoi des observatoires dans l'espace ?

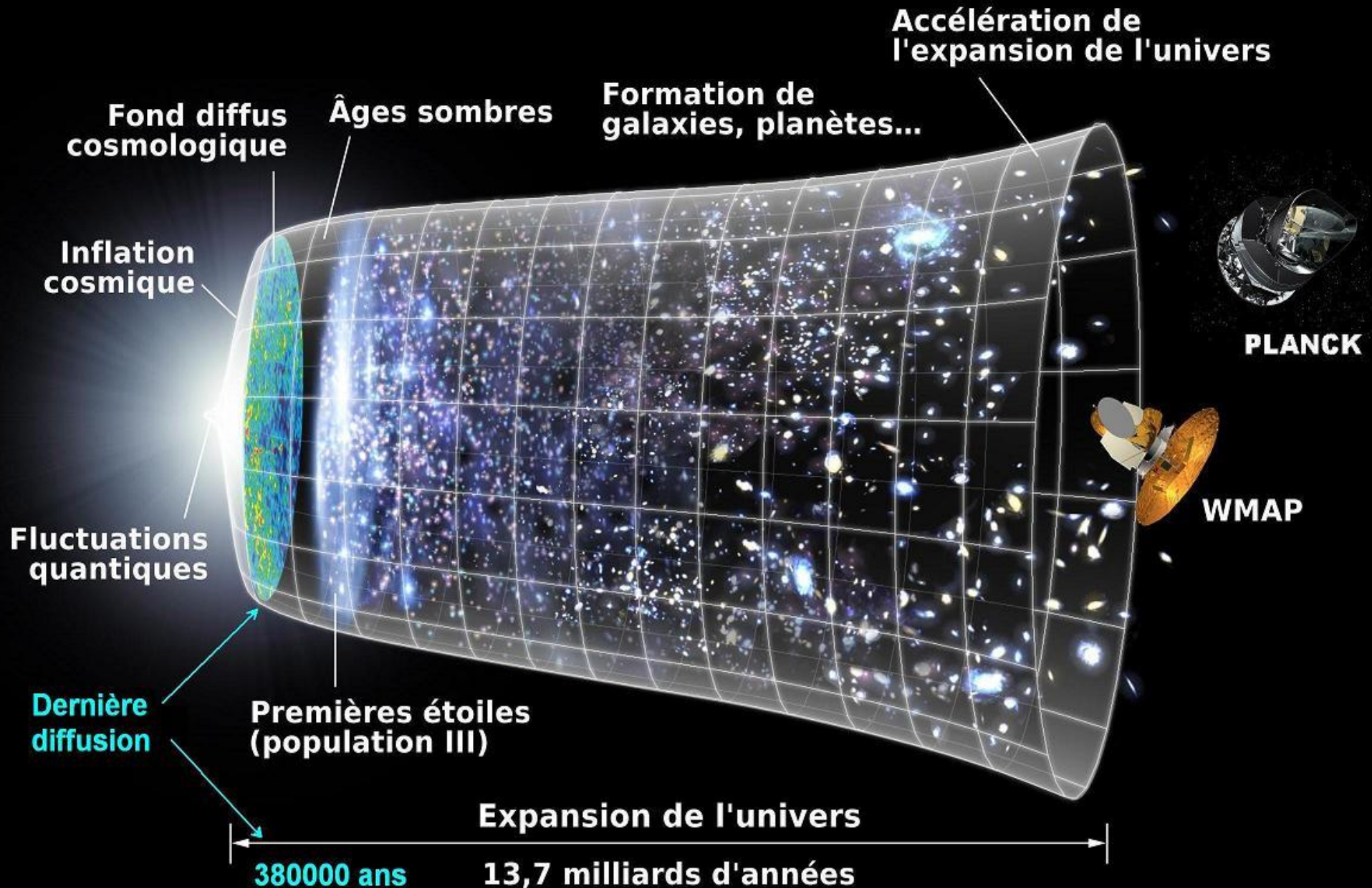


- s'affranchir de l'absorption des ondes par l'atmosphère terrestre
- « propreté » électromagnétique de l'environnement dans l'espace
- pas d'occultation du « champ visuel » autour de L2: on « voit » tout le ciel

**Planck: le relevé « ultime »
du rayonnement de fond cosmologique**



rayonnement de fond cosmologique, « Big Bang » et histoire de l'Univers



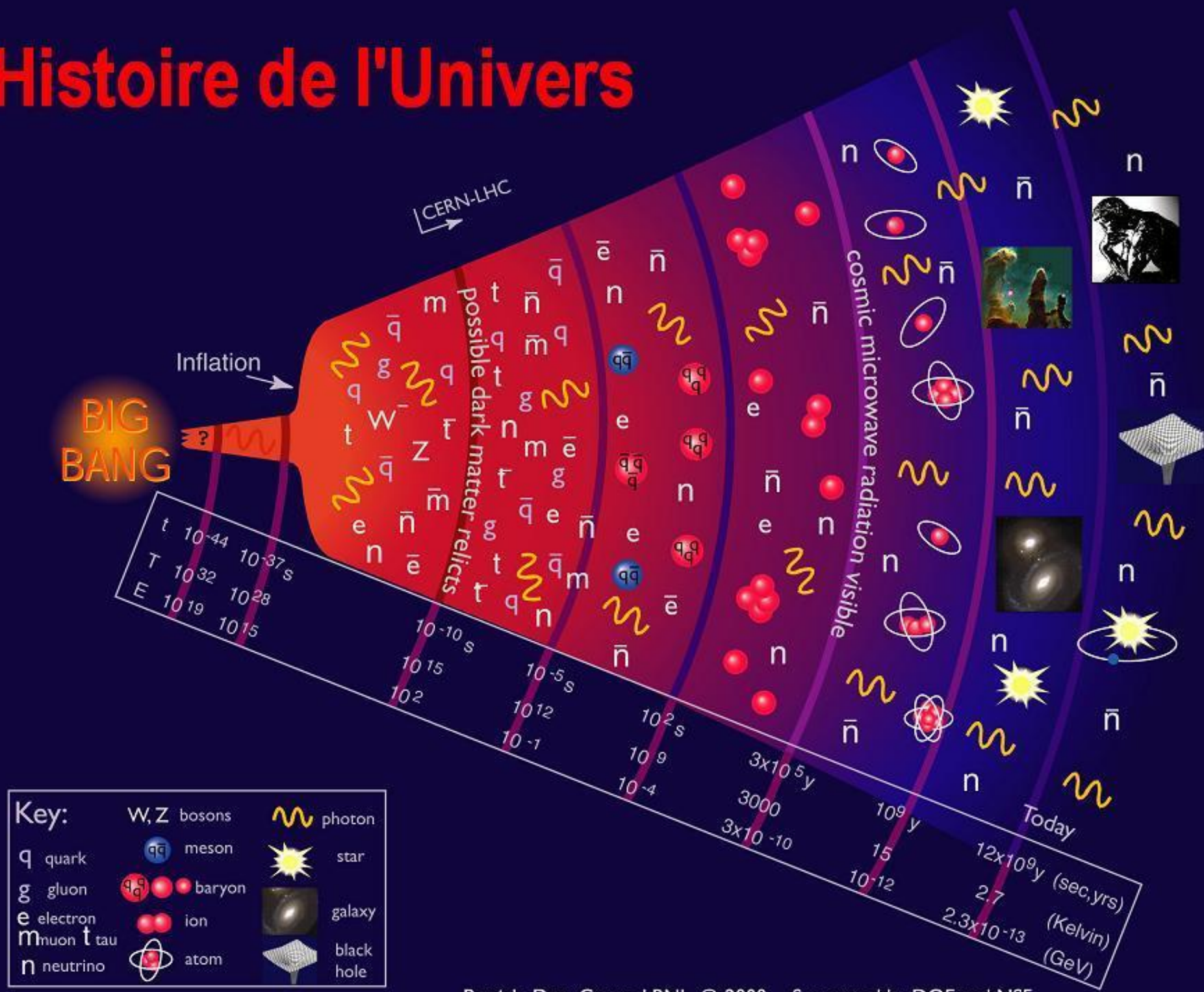
Modèle standard de l'Univers

L'Univers n'est ni statique ni éternel. Il a un début: le « Big Bang » et une évolution : son expansion (et sa structuration)

Ce modèle est validé par trois faits majeurs:

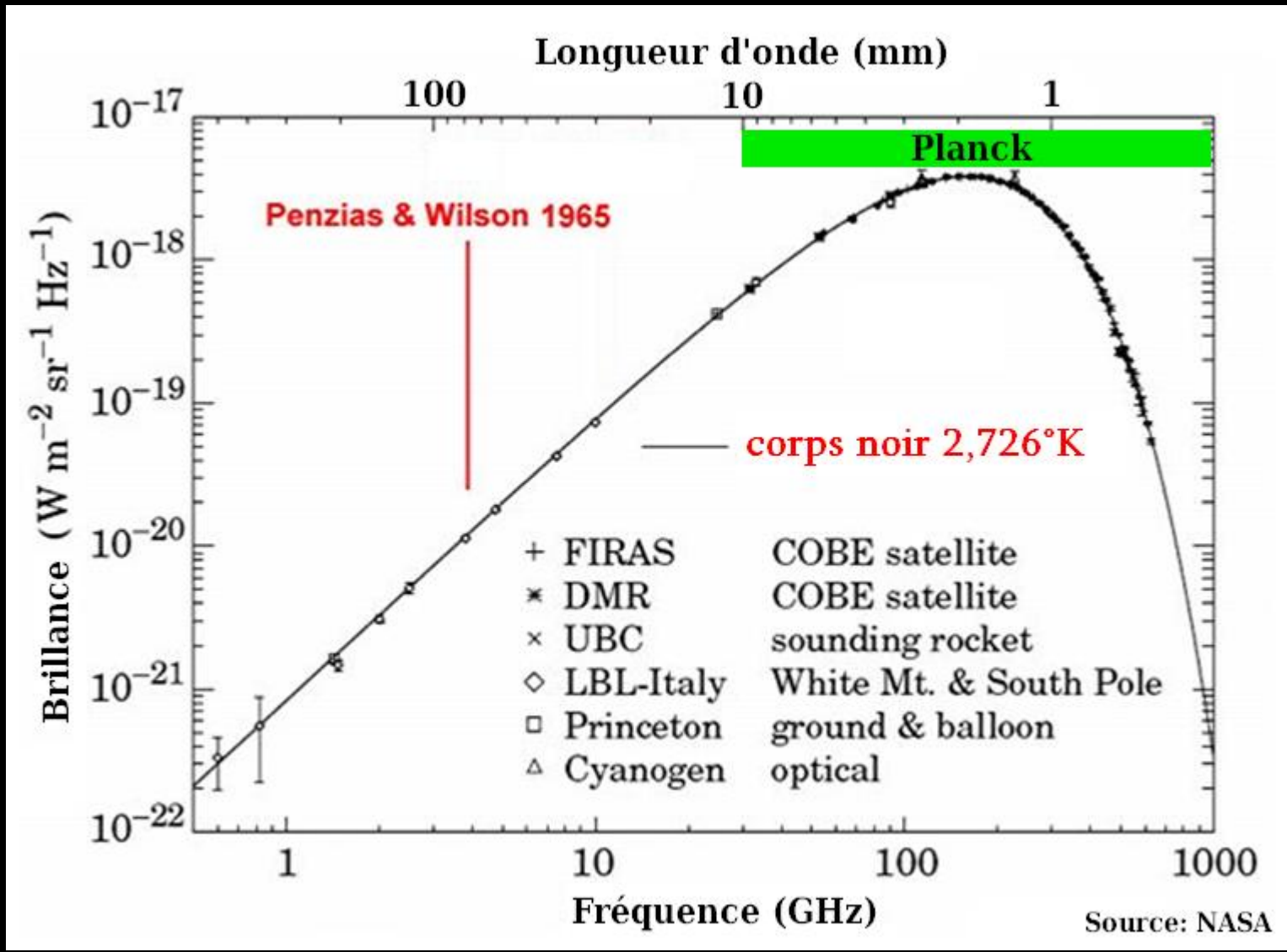
- la découverte du décalage vers le rouge (*redshift*) affectant les objets éloignés
- la découverte du rayonnement de fond cosmologique (appelé aussi fond diffus cosmologique ou *Cosmic Microwave Background: CMB*)
- la vérification de l'abondance relative H / He ($\sim 75 / 25 \%$) liée à la nucléosynthèse primordiale

Histoire de l'Univers



Modèle standard et apparition du rayonnement de fond cosmologique

- l'Univers, très chaud juste après le Big Bang, se refroidit progressivement
- après 380 000 ans la température atteint 3000°K: la matière se dé-ionise et l'Univers devient transparent (dernière diffusion)
- le rayonnement de fond cosmologique se propage librement et remplit tout l'espace
- il contient l'empreinte thermique des germes des grandes structures de l'Univers

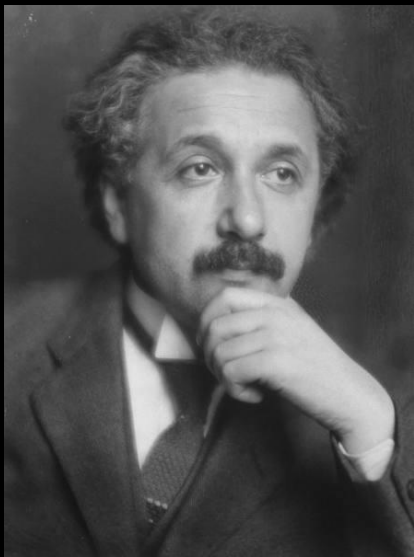


Avec le « refroidissement » accompagnant l'expansion de l'Univers, la température du rayonnement diminue: actuellement **2,726°K** et sa longueur d'onde augmente

Un peu d'Histoire... les travaux pionniers

Début du XX^{ème} siècle: la cosmologie est balbutiante: conception erronée de l'Univers, statique et limité à notre Galaxie

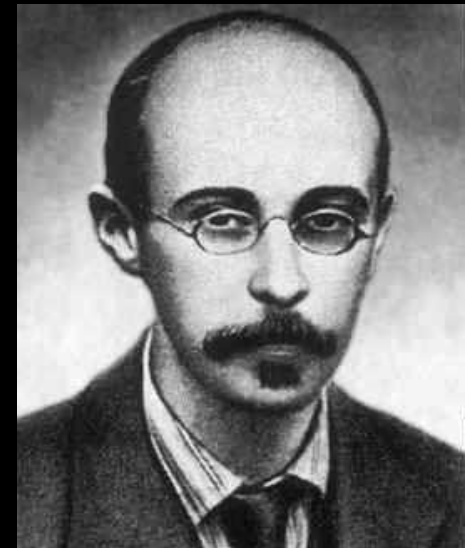
1912: **Vesto Slipher** (USA) observe la vitesse radiale de « nébuleuses » spirales (dont M31) qu'il identifie ensuite comme des objets distants hors de la Voie Lactée



1915: **Albert Einstein** publie la **théorie de la Relativité Générale**, puis en 1917 des « considérations cosmologiques » sur cette nouvelle théorie de la gravitation: **Univers statique**, qui nécessite l'emploi d'une **constante cosmologique** (sa « plus grande bêtise » !)

Histoire: l'expansion de l'Univers

1922: **Alexander Friedmann** (Russie) prédit à partir des équations de la Relativité Générale un **Univers en expansion** (idée alors refusée par Einstein)



1927: indépendamment de Friedmann, **Georges Lemaître** (Belgique) établit une solution d'Univers en expansion, et obtient à partir des mesures de Slipher sur les galaxies le **rapport entre distance et vitesse d'éloignement**

1929: **Edwin Hubble** (USA) établit que **les galaxies entraînées par l'expansion de l'Univers s'éloignent les unes des autres à une vitesse proportionnelle à leur distance**; coefficient: « **constante de Hubble** »



Histoire: le « Big Bang »

1945: **Georges Lemaître** publie « **L'hypothèse de l'atome primitif** », idée déjà en germe dans les travaux publiés en 1927.



1948: **George Gamow** (USA) et **Ralph Alpher** montrent que les **proportions actuelles d'hydrogène et d'hélium** dans l'Univers s'expliquent par des **réactions primordiales de nucléosynthèse** à très haute température (1 milliard de degrés)

Les contradicteurs dans les années 1960: **Thomas Gold** (USA), **Hermann Bondi** et **Fred Hoyle** (UK), et récemment **Jayant V. Narlikar**, partisans d'un **Univers stationnaire** avec création spontanée de matière...

La découverte du rayonnement cosmologique

Existence du rayonnement prédite par Gamow, qui lui attribue une température de corps noir de 5 °K

1965: découverte fortuite par Arno Penzias et Robert Wilson (USA), ingénieurs à la Bell Telephone, en testant une antenne-cornet micro-ondes à 4080 MHz

Le rayonnement observé est isotrope, non polarisé et invariant au cours du temps
Température estimée: $3,5 \text{ °K} \pm 1 \text{ °K}$



Découverte majeure du XX^{ème} siècle : prix Nobel 1978

Interprétation théorique par Robert Dicke (USA) et collègues:

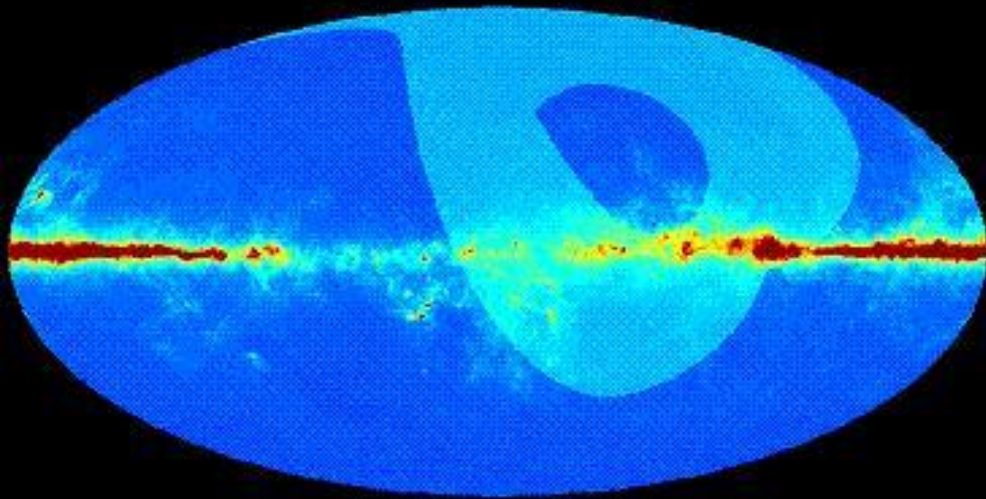
- évoquent un Univers contracté à $T > 10^{10} \text{ °K}$ puis s'étendant en se refroidissant adiabatiquement jusqu'à l'état actuel
- donnent à l'Univers l'âge de 10^{10} ans

Observations partielles du rayonnement

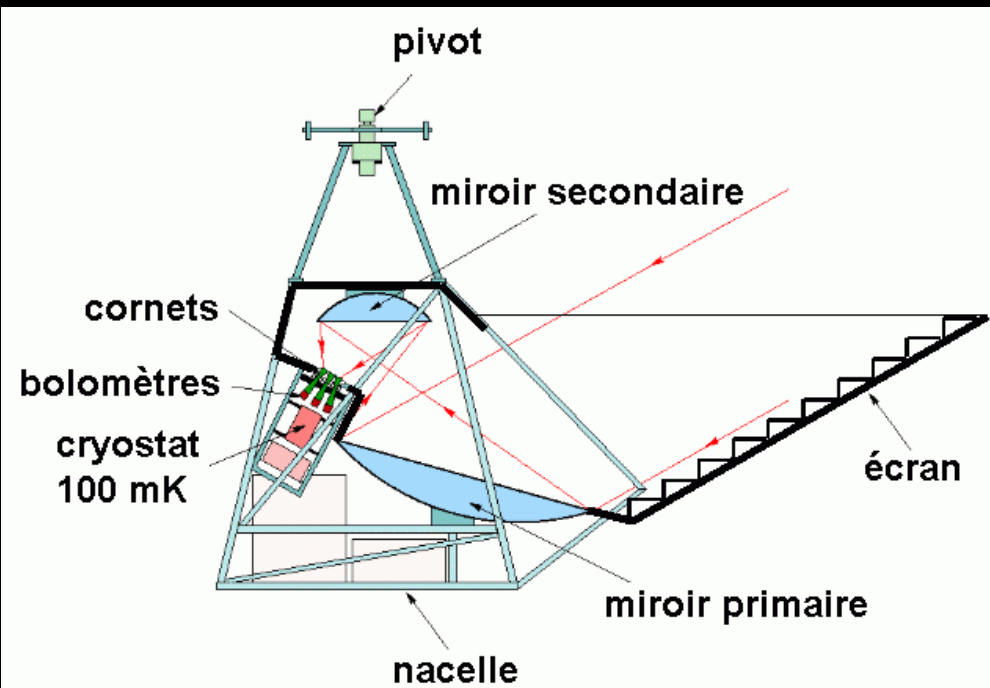
Après 1965: diverses campagnes de mesure sur des parties du ciel depuis le sol, des ballons ou des fusées-sondes

Expérience **ARCHEOPS** (Février 2002) sous ballon: a couvert 30% du ciel en micro-ondes de 0,4mm à 2mm

A permis de tester des options technologiques pour Planck: système de refroidissement, détecteurs à basse température



Partie du ciel couverte en bleu clair



Observations complètes depuis l'espace

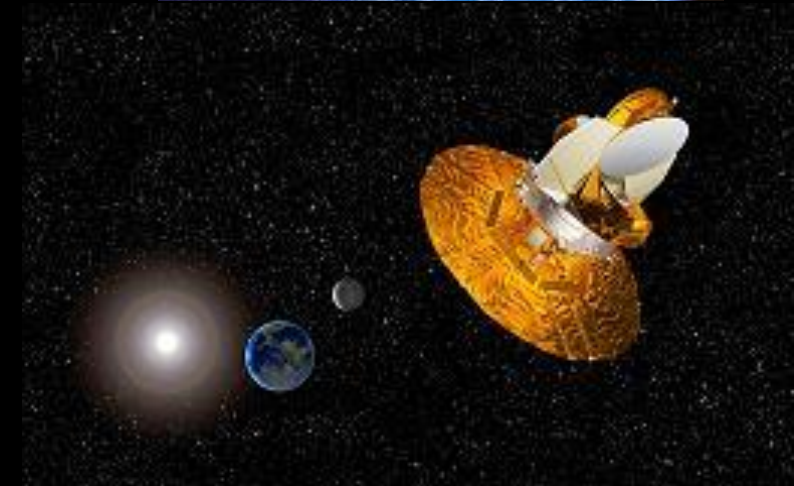
Trois « surveys » du ciel dans son ensemble réalisés

COBE: *Cosmic Background Explorer*
(NASA, 1992): première carte complète
de température, peu détaillée

Concepteurs George Smoot et John Mather, prix
Nobel 2006



WMAP: *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (NASA, 2001):
mission très fructueuse: carte
beaucoup plus précise (0,2° angle),
données de polarisation



PLANCK (ESA, 2009): gain d'un ordre de grandeur sur la
qualité des mesures, bande très élargie: 30 GHz à 860 GHz

Qu'observe-t-on sur tout le ciel?

Radiométrie microondes

- > Puissance reçue dans toutes les directions de l'espace
- > Anisotropies (inhomogénéités angulaires) de température sur une plage de ± 1 mK, résolution 2 μ K (Planck)

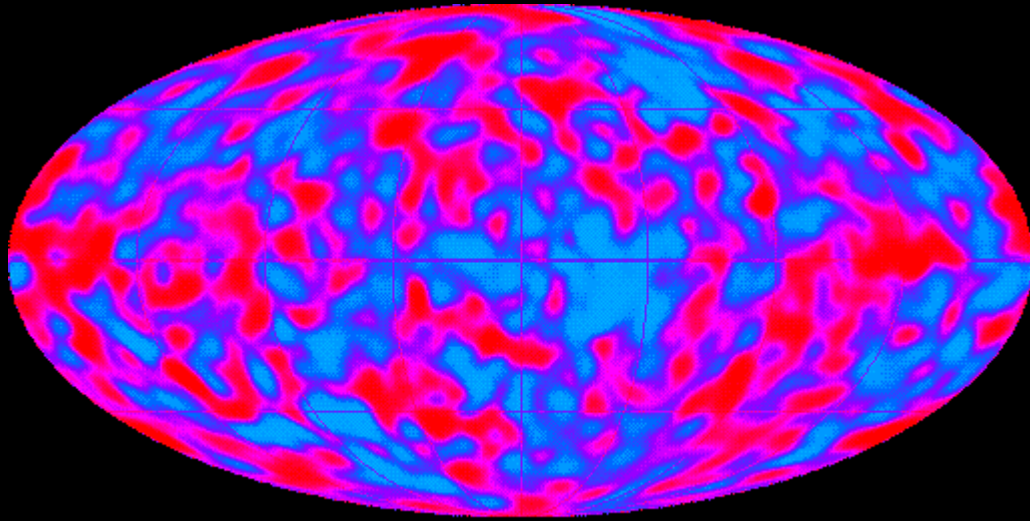
Polarimétrie microondes

- > Anisotropies de l'orientation du champ électro-magnétique

Traitement des données

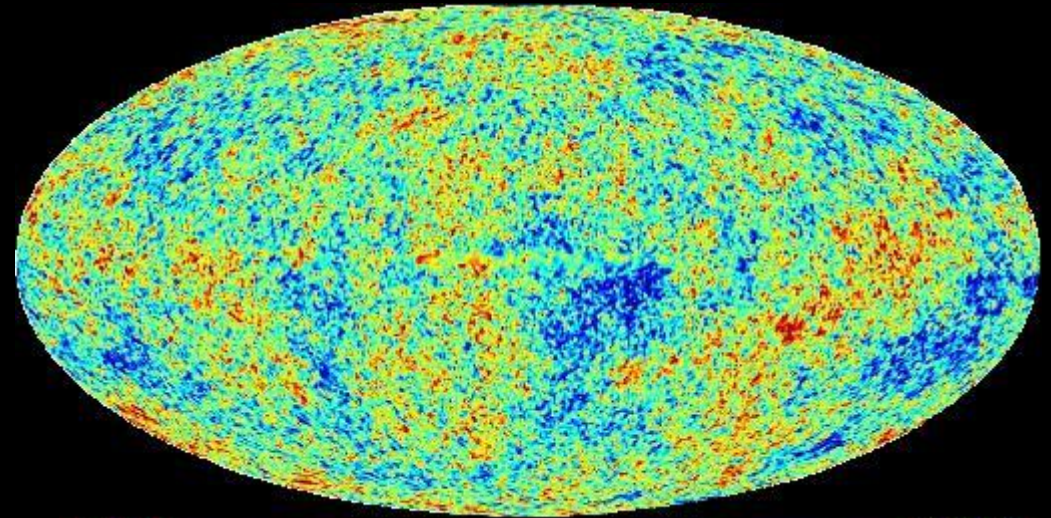
- > Analyse sur plusieurs bandes de fréquences et différentes échelles de résolution angulaire
- > Elimination complexe des contributions de l'« avant-plan » (bruit instrumental, notre Galaxie, effet SZ des amas)

Ecart / 2,726°K




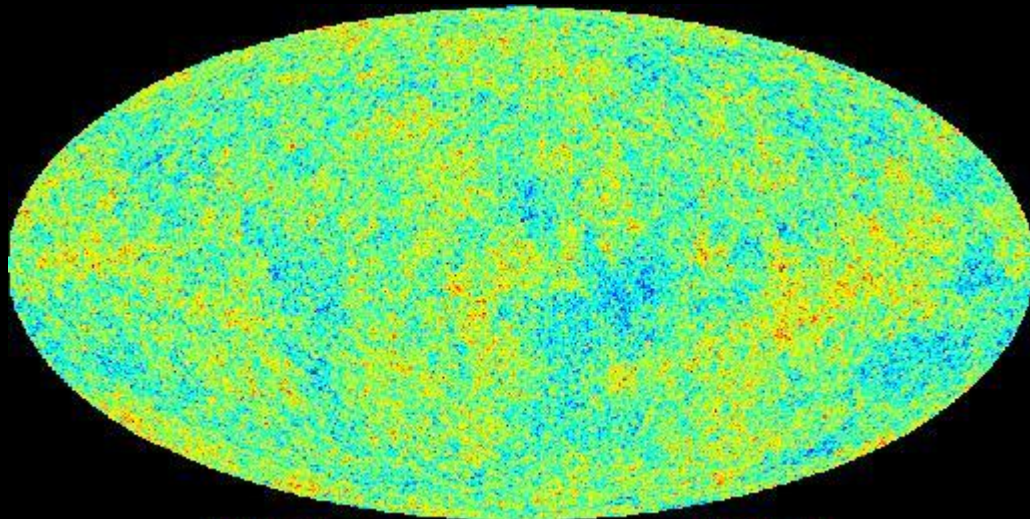
COBE

Echelle inconnue, assumée de $-200 \mu\text{K}$ (bleu) à $+200 \mu\text{K}$ (rouge)



WMAP

$-200 \mu\text{K}$  $+200 \mu\text{K}$



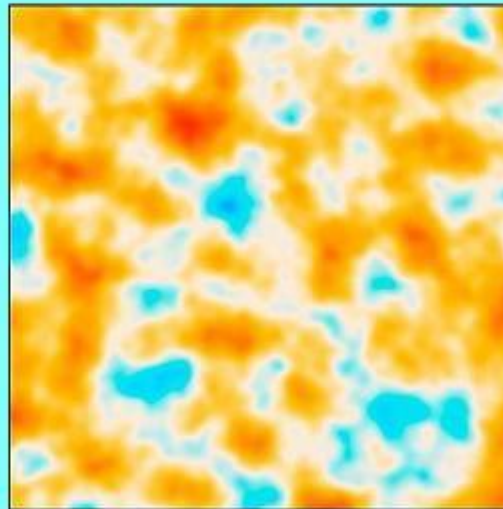
Planck

$-500 \mu\text{K}$  $500 \mu\text{K}$

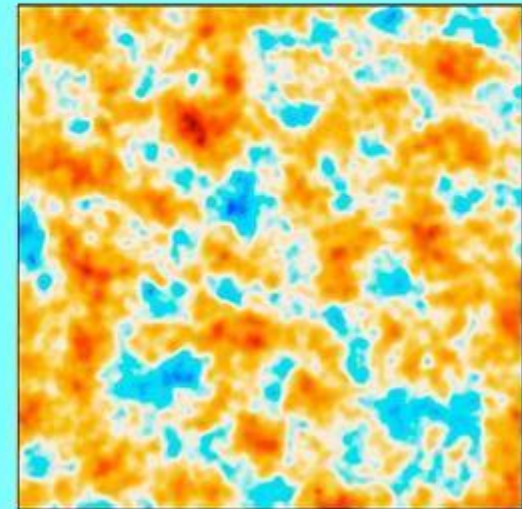
Anisotropies angulaires de température vues par COBE, WMAP et Planck



COBE



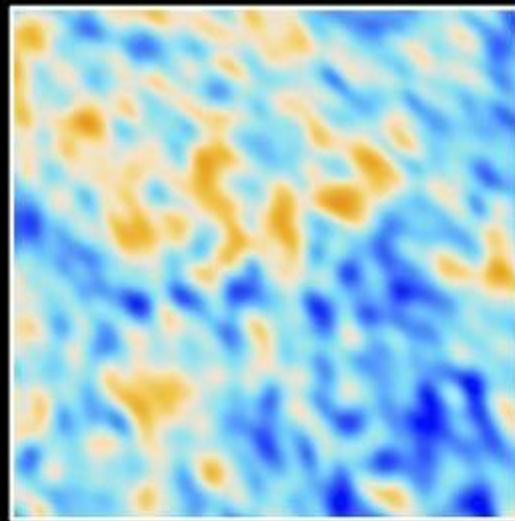
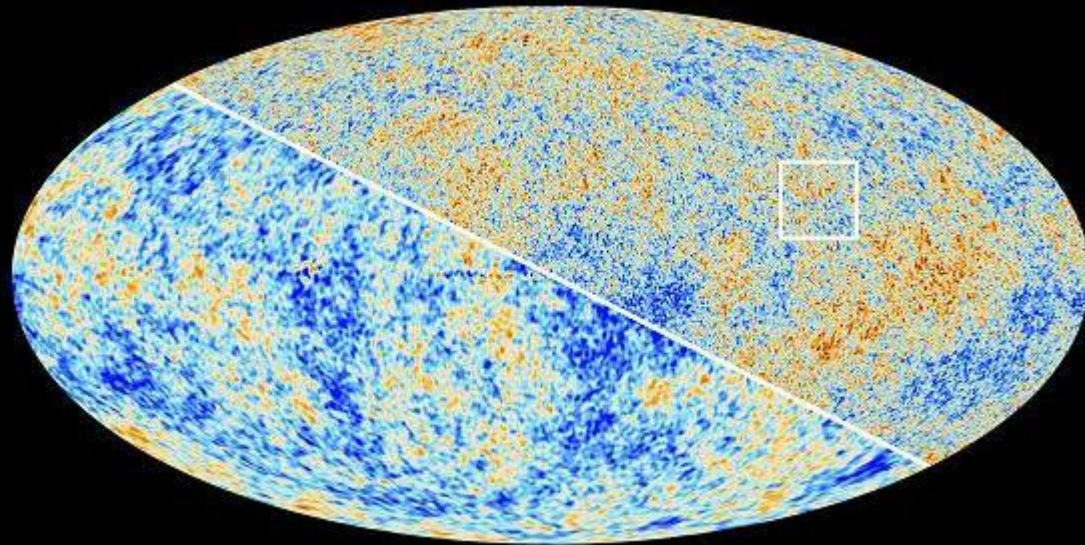
WMAP



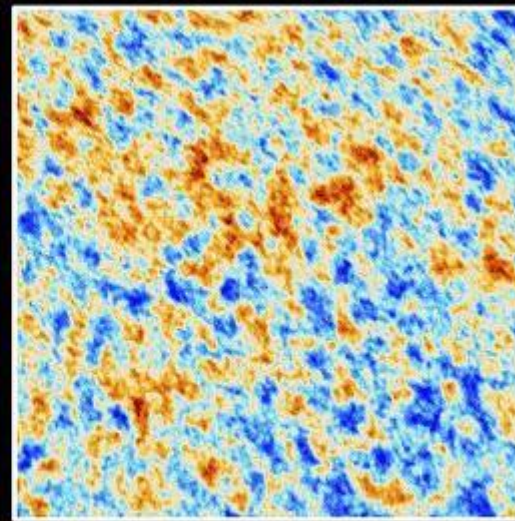
Planck

(Supposés) Taille zone $5^\circ \times 5^\circ$ – Echelle Δ .températures $-500 \mu\text{K}$ à $+500 \mu\text{K}$

Comparaison WMAP - Planck



WMAP



Planck

Planck vs. WMAP: gain en résolution angulaire ~ 10

Comment Planck a construit la carte des températures en balayant le ciel

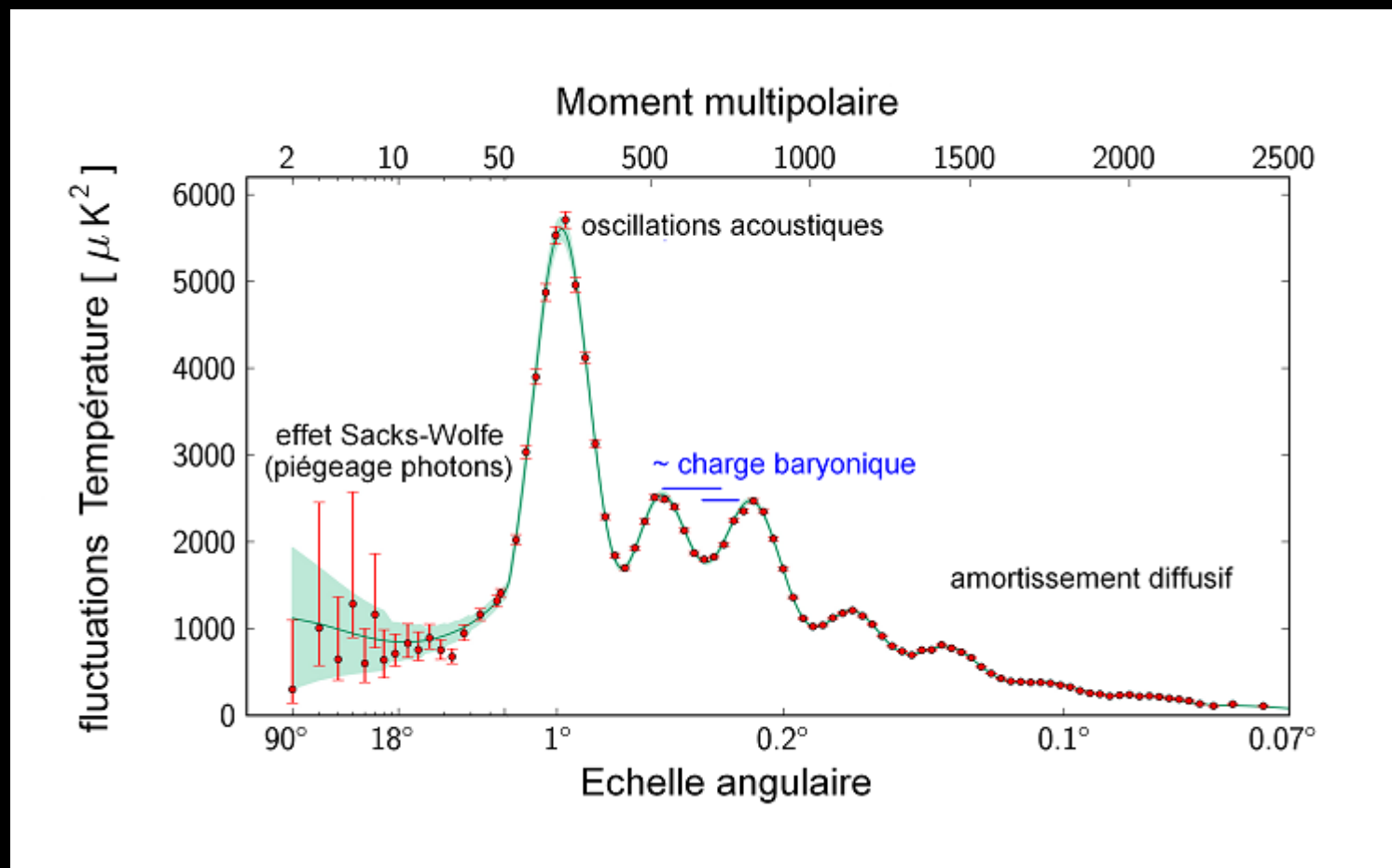
5 relevés complets du fond diffus cosmologique de 2009 à 2012

Animation : Planck balaye le ciel (très accéléré, faisceau très élargi)

Les paramètres réels

- 1 tour du satellite sur lui-même en 1 minute
- largeur du faisceau: quelques minutes d'angle à 860 GHz
- ▶ un balayage complet du ciel en 6 mois

Planck: spectre de puissance angulaire



- mesures fournies par les instruments de Planck
- ajustement excellent du modèle cosmologique standard sur les mesures aux moyennes et petites échelles angulaires

Fluctuations mesurées sur les grandes échelles angulaires plus faibles que prévu ► remise en cause possible du modèle

Pics du spectre de puissance angulaire

- compétition entre pression du rayonnement (tendance à lisser l'anisotropie) et condensation gravitationnelle de la matière – les baryons (tendance à accentuer l'anisotropie)
-> apparition d'oscillations acoustiques et de modes résonnants correspondant aux pics
- échelle angulaire du premier pic ~ courbure de l'Univers
- rapport amplitudes pics pair / impair ~ densité baryonique
- troisième pic ~ densité de matière noire

Comment obtient-on ce spectre ?

Représentation des données sur une base de fonctions angulaires discriminantes: les **harmoniques sphériques** ici du rang 2 au rang 2500

Analogue à **l'analyse de Fourier** des séries de données sur la base des fonctions sinusoïdales

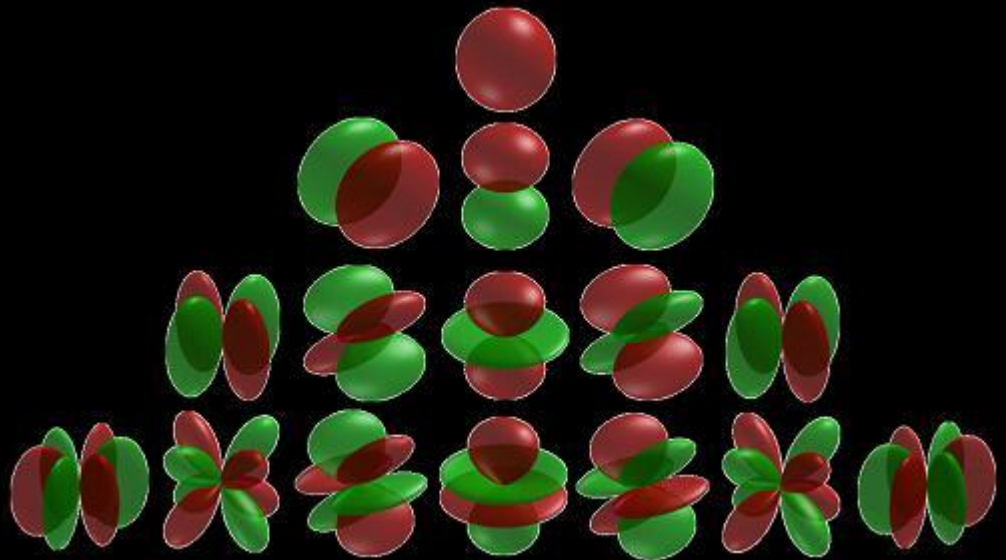
Les données Planck sont préalablement triées: choix de fréquences et zones angulaires favorables

Animation : construction du spectre

Premiers harmoniques sphériques

Parties rouges: fonction positive

Parties vertes: fonction négative



Interprétation du spectre angulaire

Source fondamentale d'informations sur:

- l'évolution de l'Univers avant l'apparition du fond diffus cosmologique
 - l'origine des grandes structures: amas de galaxies, filaments...
 - les propriétés globales de l'Univers: « paramètres cosmologiques » tels que géométrie, densité...
- Géométrie: confirmation que l'Univers est « plat »
 - Densité de matière critique confirmée (contribution CMB $\sim 6 \cdot 10^{-5}$)
 - Densité baryonique (noyaux atomiques)

Animation

Voir pages web sur le fond diffus cosmologique du laboratoire APC, Paris 7

Polarisation du fond diffus

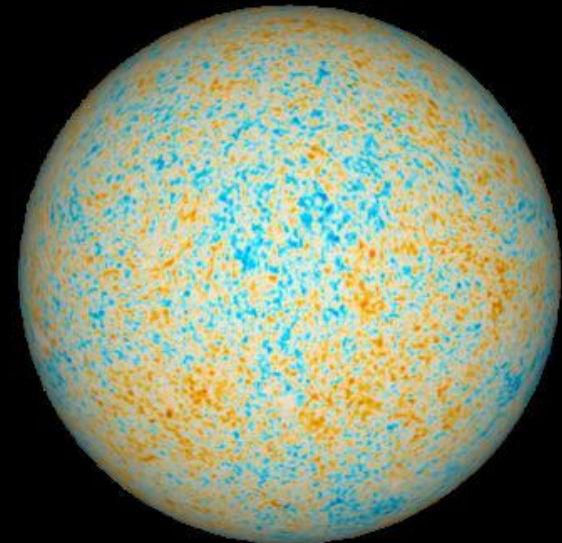
ondes électromagnétiques transversales (E, H)

Interaction avec les électrons: diffusion Thomson → polarisation

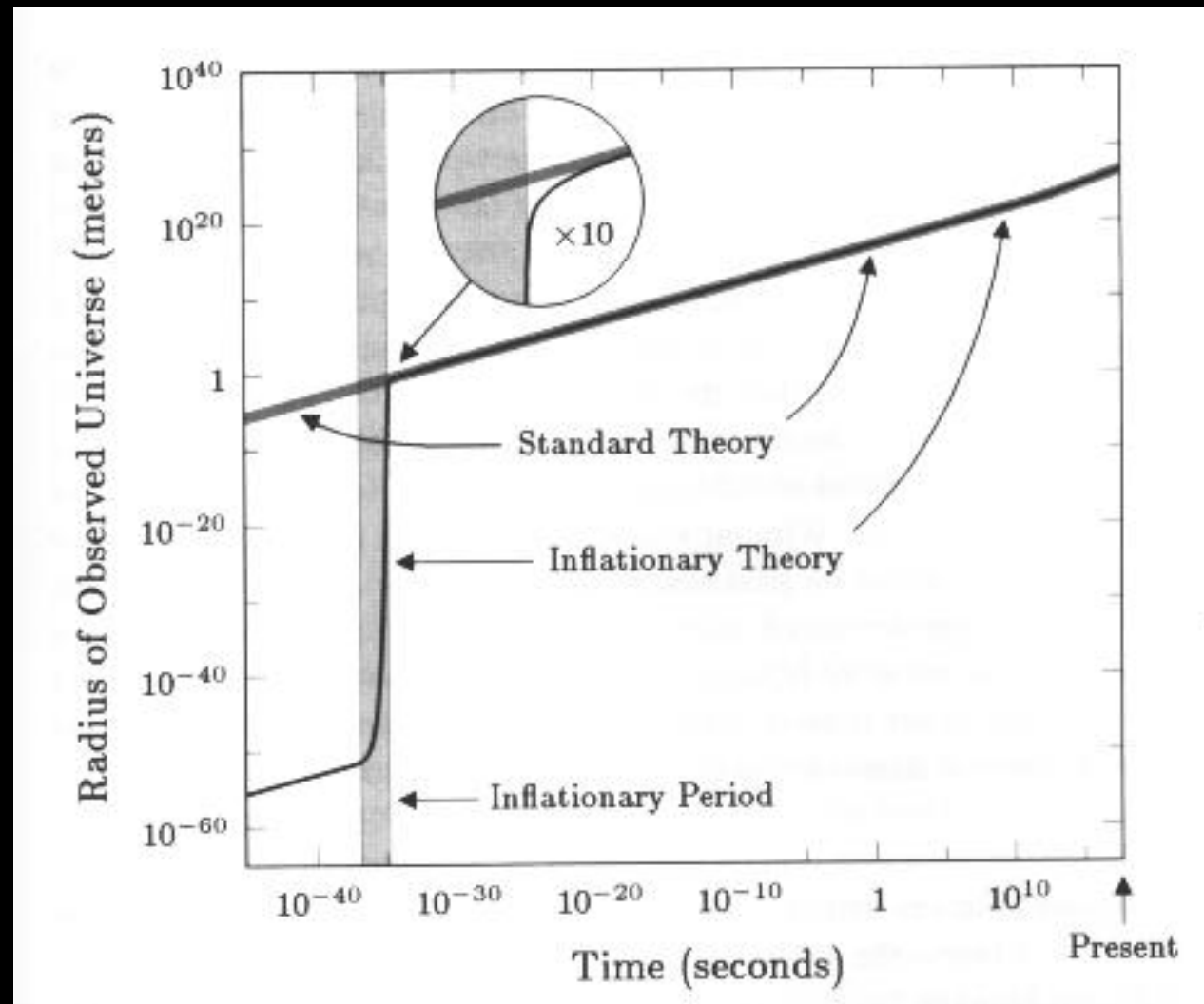
ondes gravitationnelles primordiales et mouvements de matière
→ polarisation corrélée au spectre de puissance angulaire

► apport d'informations sur l'Univers de la dernière diffusion, l'inflation primordiale et aussi sur le champ magnétique galactique

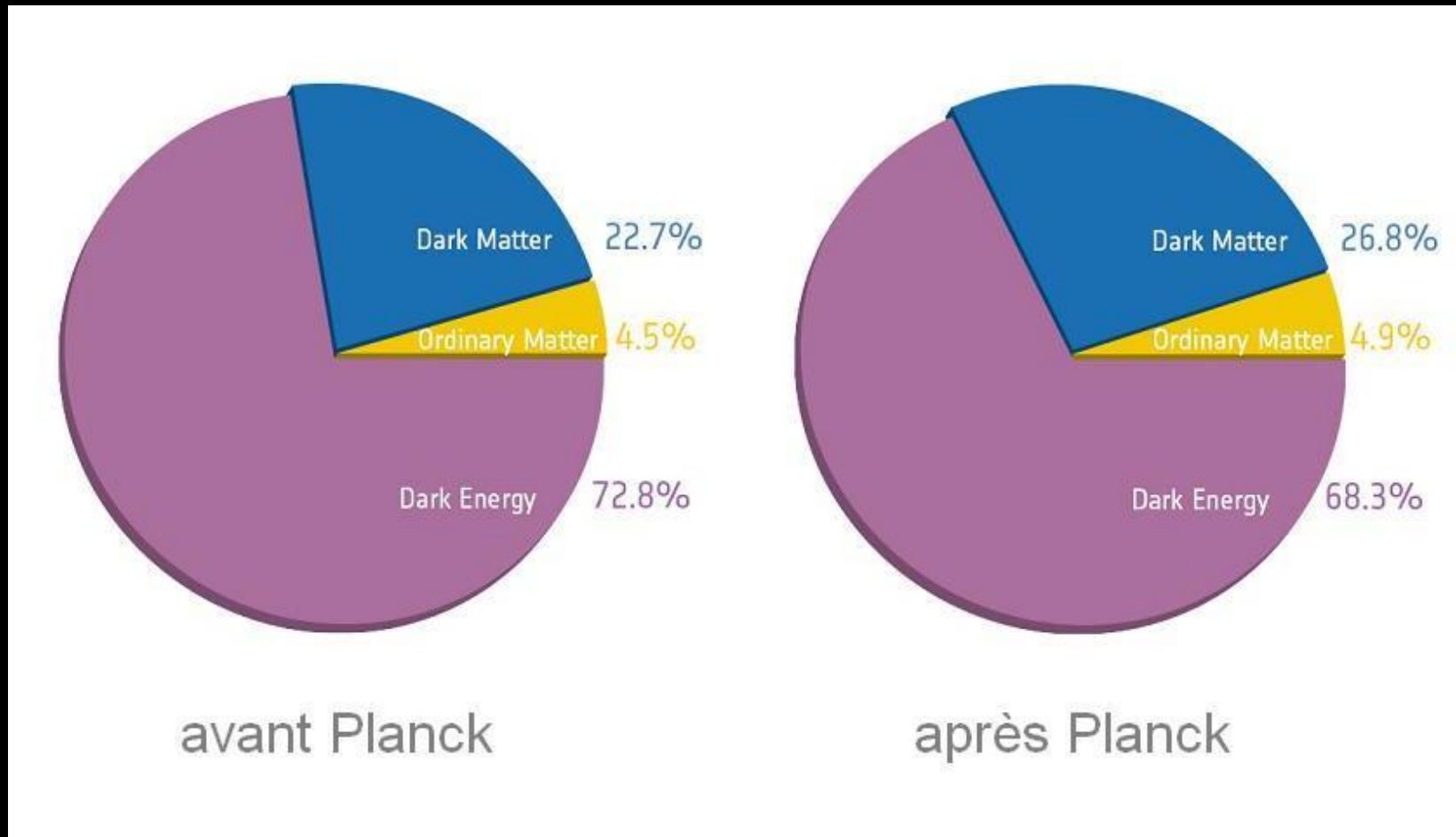
Relevé Planck de la polarisation
aux petites échelles angulaires



Inflation primordiale et modèle ϕ -CDM



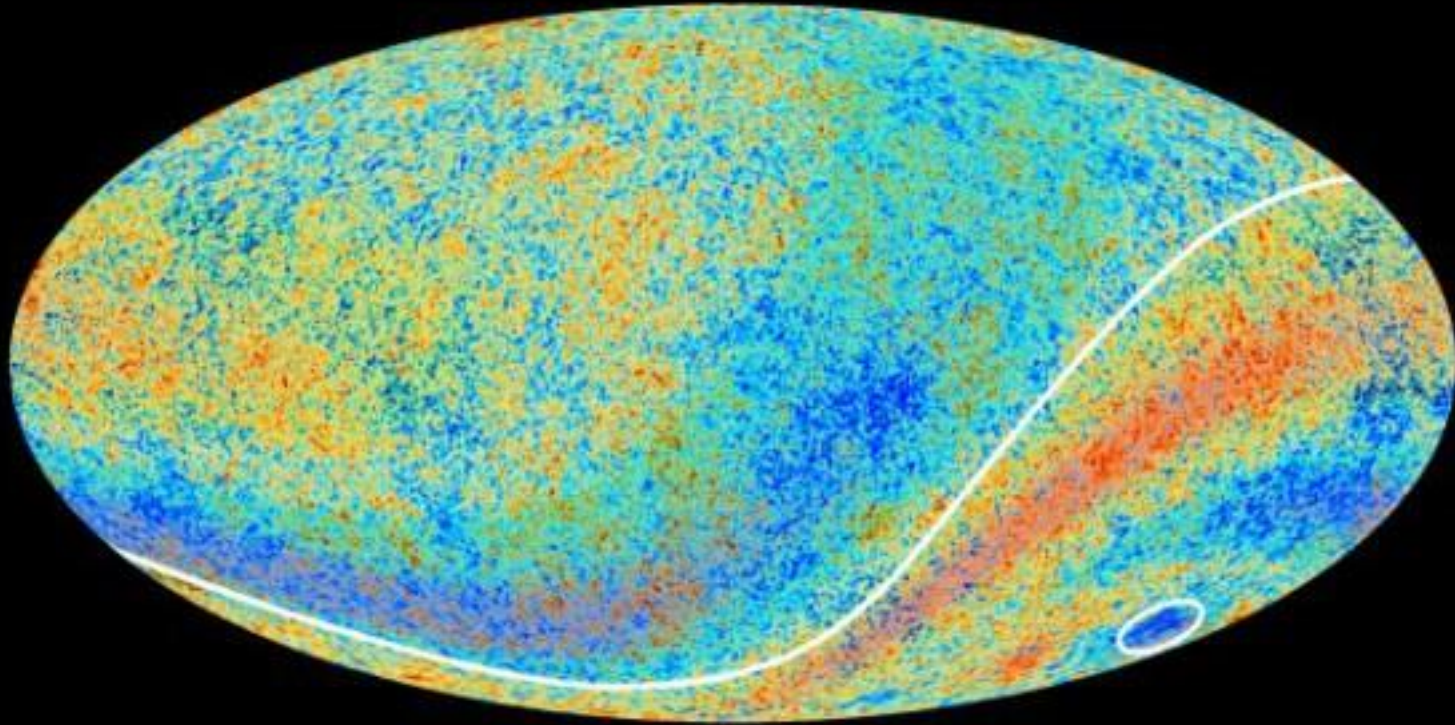
La nouvelle « recette » de l'Univers



Les proportions des trois ingrédients de base ont notablement changé...

► l'Univers serait un peu plus « vieux » : 13,8 milliards années

Anomalies du fond diffus confirmées



- asymétrie de température: hémisphère Sud plus « chaud »
- tache froide plus étendue que prévu au Sud-Est

Quelques résultats complémentaires



Nuage de gaz entre les amas Abell 399 et Abell 401

En orange: contribution de l'effet SZ vu par Planck superposée à l'image dans le visible depuis le sol

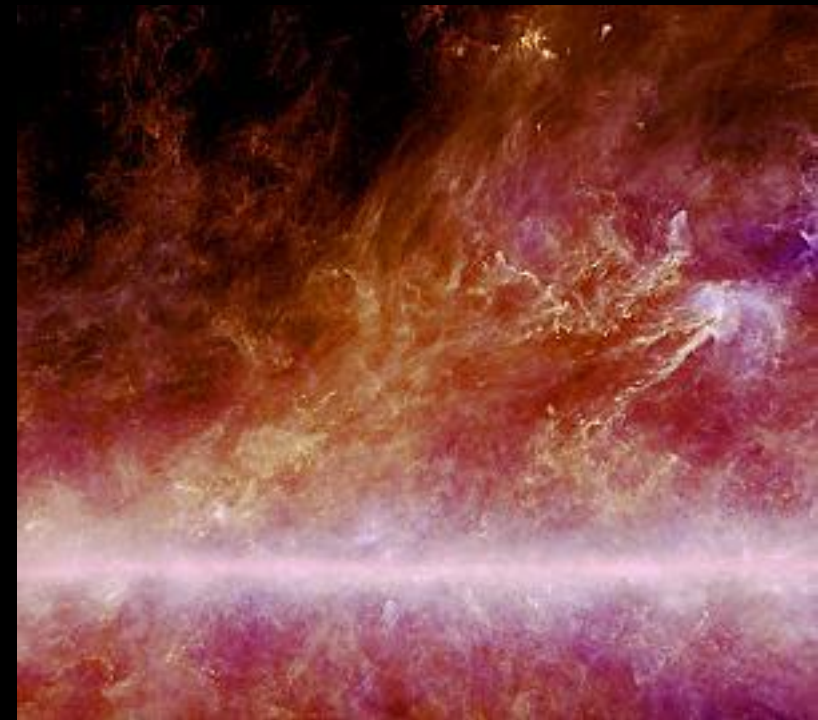
Dimensions 10 millions AL

Distance au Soleil 1 milliard AL

Filaments et structures de poussière ± chauds
Images superposées Planck (HFI) et IRAS (100 μ)

Distance au Soleil ~500 AL

Bande claire: émission plus chaude du plan galactique



Les coulisses de Planck

- Radiotélescope millimétrique à haute résolution
- Deux instruments ultra-sensibles et très précis couvrant de 30 GHz (1cm) à 860 GHz (350 μ)
- Système de refroidissement ultra-performant maintient les capteurs à 0,1K



Optique: télescope grégorien « offset »



Miroir primaire 1,75 x 1,50 m

Résolution angulaire:

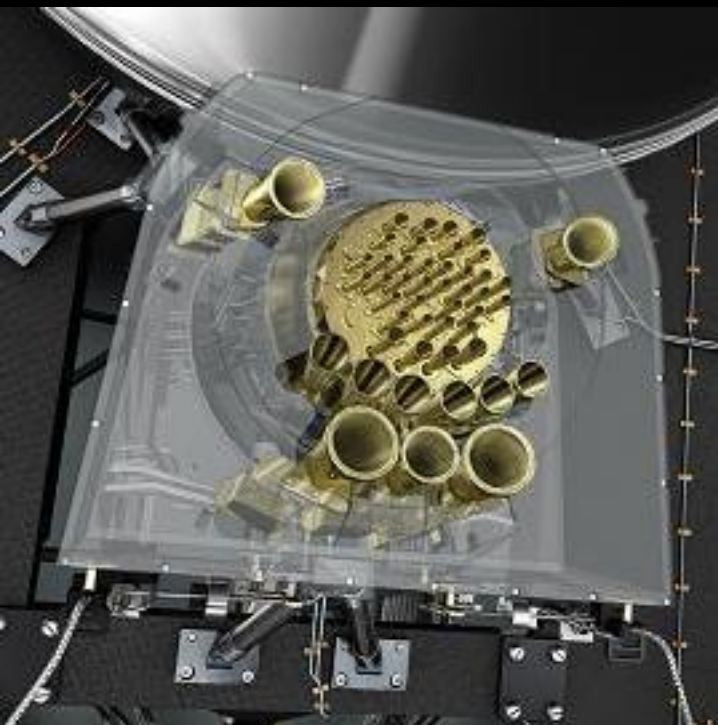
30' à 30 GHz

5' à 857 GHz

Structure miroirs en
composite nid d'abeille

Optique « bafflée » par un
écran thermique

Deux instruments couvrent le spectre

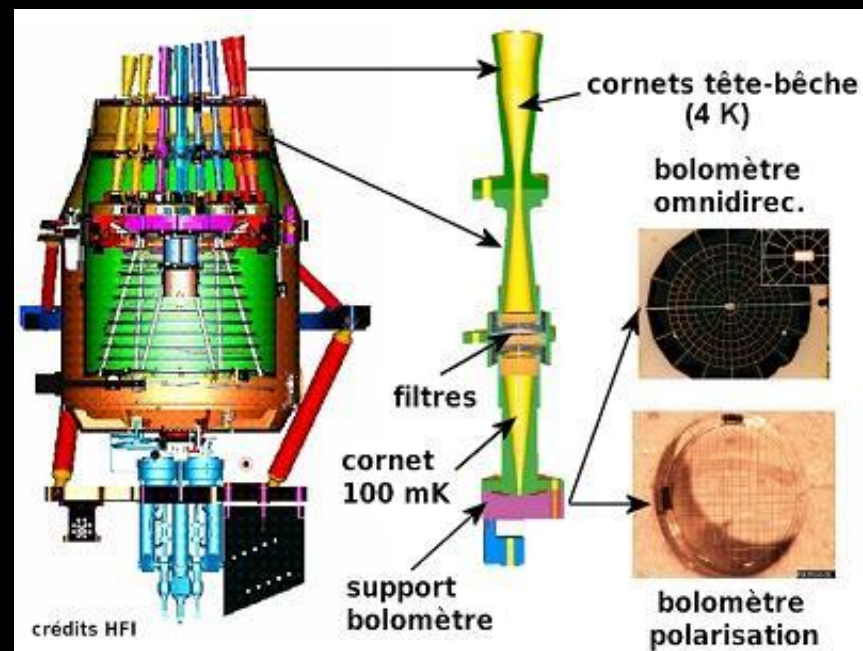


Maquette du plan focal

High Frequency Instrument HFI

6 bandes de 100 GHz à 857 GHz $\Delta f/f$ 33%
Résolution 5' aux bandes hautes
Sensibilité 2,5 μK aux bandes basses
Détecteurs: 48 bolomètres refroidis à 0,1K

Schéma instrument HFI

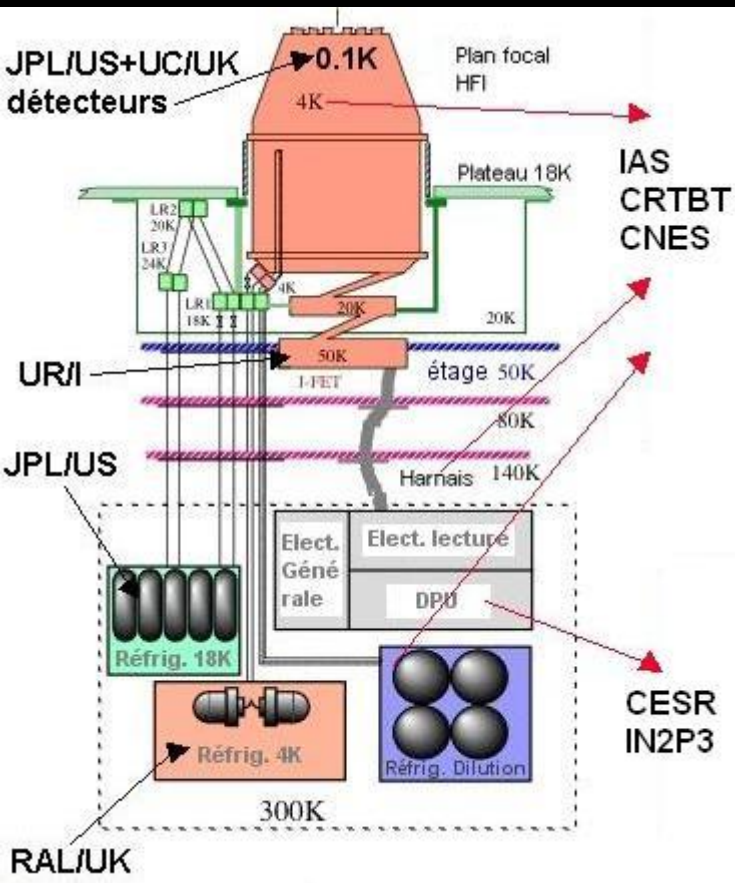


Low Frequency Instrument LFI

3 bandes de 30 GHz à 70 GHz $\Delta f/f$ 20%
Résolution 33' à 14'
Sensibilité 2 μK à 30 GHz
Détecteurs: amplis HEMT refroidis à 20K

Systeme de refroidissement

Bolometres HFI à 0,1K → systeme tres sophistique à 4 etages



0,1K: dilution Hélium-3 dans Hélium-4

4K: détente J-T Hélium-4

20K: détente J-T Hydrogene

> 50K: passif (structure)

Réserves He prévues pour 15 mois minimum, ont duré 2 ans et demie jusqu'à Janvier 2012



Coopération internationale
Nombreux contributeurs

Partie tres froide (4K et 0,1K)
Taille ~ 40cm



**Herschel: un regard acéré
vers les objets froids de l'Univers**

L'astronomie infrarouge

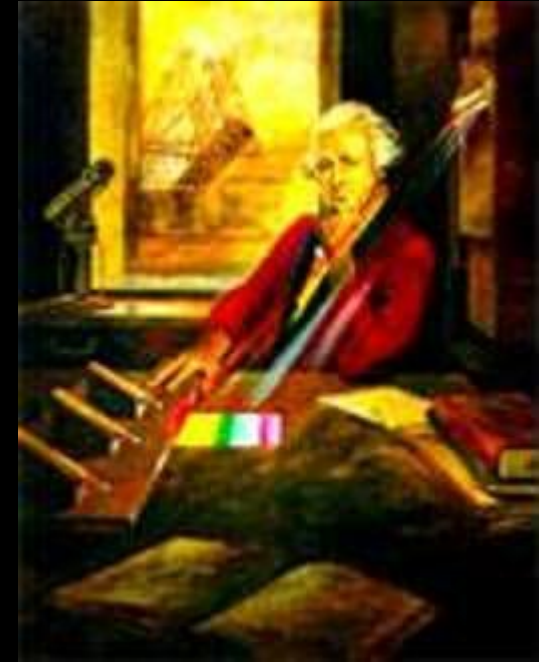
Tout corps ayant une température supérieure à 0°K (-273,15°C) émet un rayonnement électromagnétique

Rayonnement infrarouge : en-deçà du visible de 0,8 μ à ~ 0,3 mm

IR proche du visible découvert par Herschel en 1800 : les « rayons calorifiques »

Astronomie IR très limitée jusqu'à 1950

- absorption par l'atmosphère au-delà de quelques microns
- pas de détecteurs performants
- bruit de fond thermique non maîtrisé



William Herschel

L'astronomie infrarouge moderne

Nouvelles technologies: spatial, micro-ondes, capteurs ...
l'astronomie IR se développe rapidement

Plusieurs **missions spatiales:** IRAS, ISO (ESA), SPITZER (NASA)...

→ **grand nombre de sources IR** répertoriées dans l'Univers

L'astronomie IR s'intéresse aux « **objets froids** »

- nuages de gaz et de poussières au voisinage des étoiles ou se réchauffant par effet dynamique: « pouponnières d'étoiles »
- planètes
- rayonnement d'objets lointains fortement « red-shifté »

Le (radio)télescope spatial Herschel

Plus grand télescope spatial à ce jour: miroir primaire de 3,50m (Hubble: 2,40m)

Pour voir plus net et plus loin: résolution et sensibilité très supérieures aux missions précédentes

Spectre IR-radio: de 60μ à 670μ

Enjeux scientifiques

- étudier le mécanisme de formation des étoiles
- observer la formation des galaxies, les noyaux galactiques...
- observer à haute résolution des objets proches (planètes...)



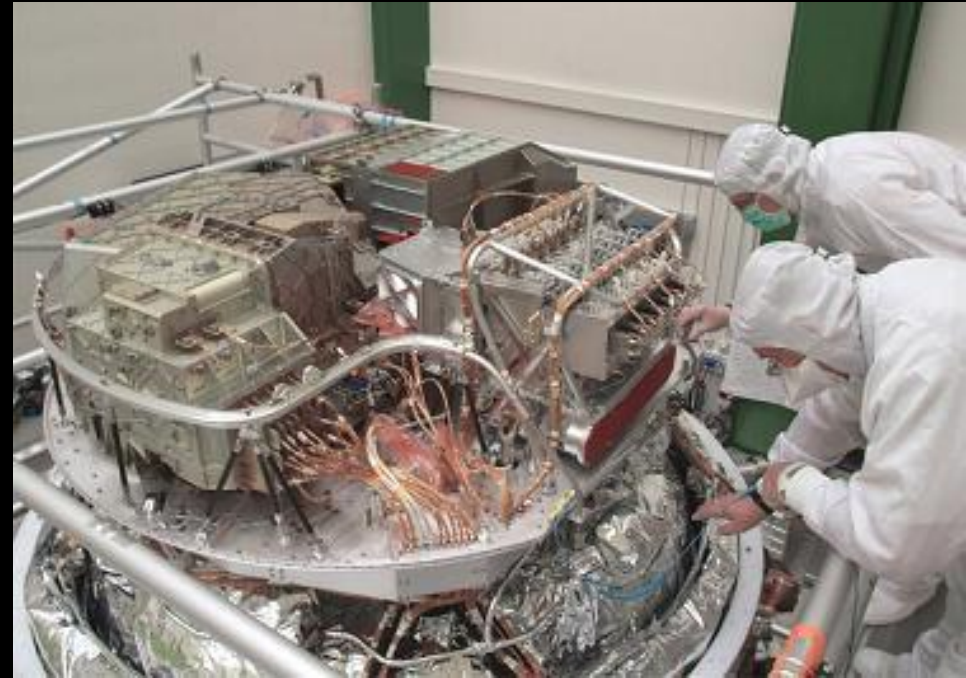
Vue générale – optique Cassegrain et baffle thermique au premier plan

Les instruments d'Herschel

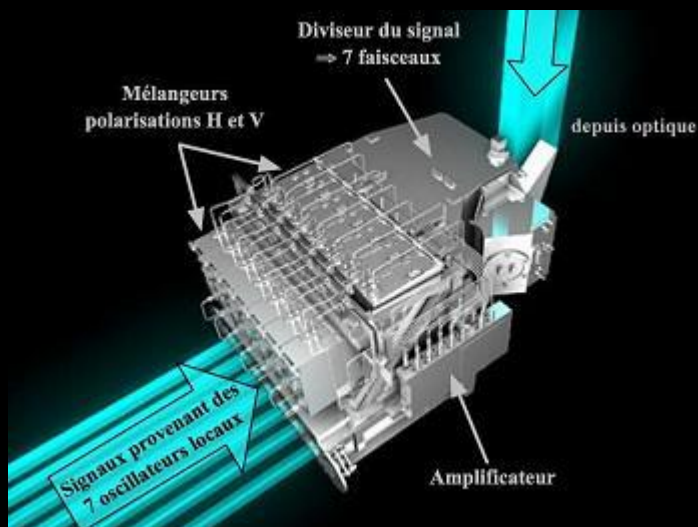
PACS: imageur et spectromètre dans la bande 60μ à 210μ

SPIRE: imageur et spectromètre dans la bande 250μ à 500μ

HIFI: spectromètre hétérodyne haute résolution ($13''$ à $40''$) dans la bande 160μ à 625μ



Intégration des trois instruments



HIFI: chemins des signaux

Capteurs: matrices de bolomètres refroidis à $0,3K$



Systeme de refroidissement passif

Au lancement: le cryostat contient 2300l de He3 superfluide à 1,65K

Basse température maintenue par évaporation → limitation durée de vie † 29 Avril 2013... comme prévu!

Détecteurs placés à l'intérieur du cryostat

Température bolomètres PACS et SPIRE maintenue à 0,3K par dispositifs additionnels (?)

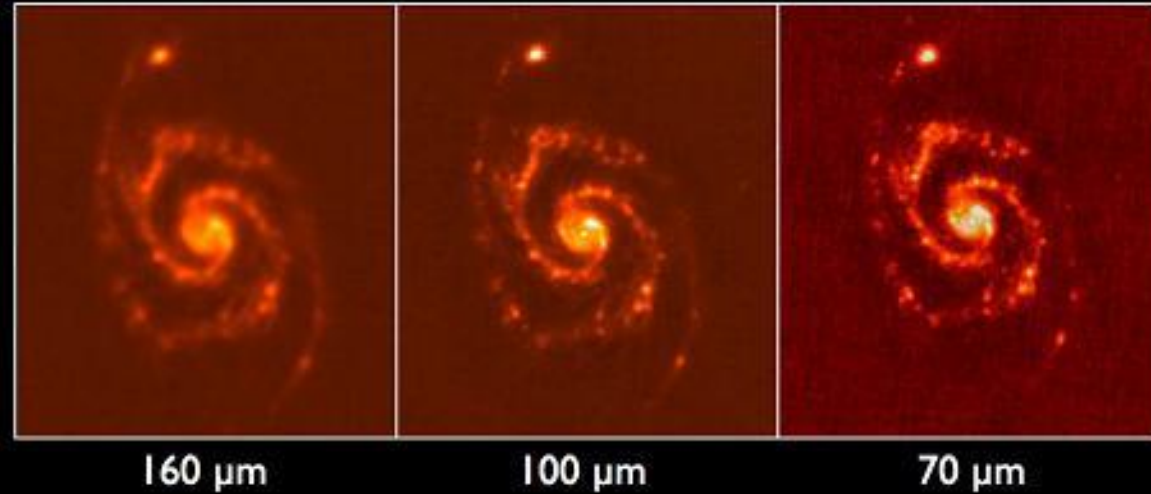




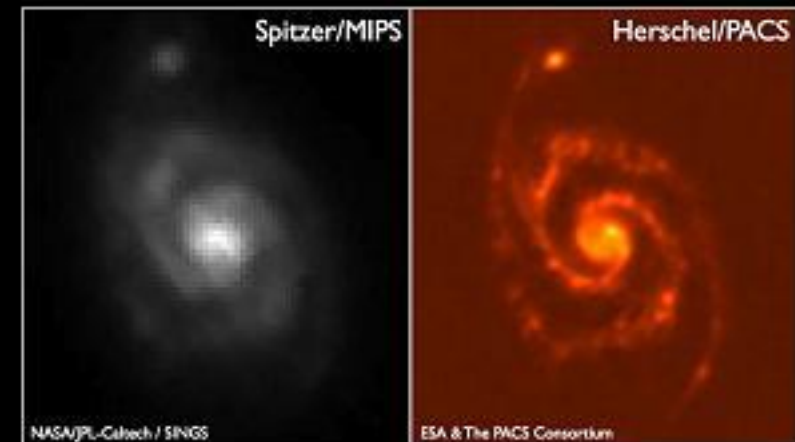
Quelques observations obtenues
au cours de la vie de Herschel



Herschel/PACS Images of M51 ("Whirlpool Galaxy")



© ESA & The PACS Consortium



Spiral Galaxy M51 ("Whirlpool Galaxy") in the Far Infrared (160 μ m)

Images M51 superposées à 160 μ , 100 μ , 70 μ
Les taches bleues sont des zones chaudes
de formation active d'étoiles.

Progrès des
performances



3 Septembre 2009

Images PACS et
SPIRE combinées

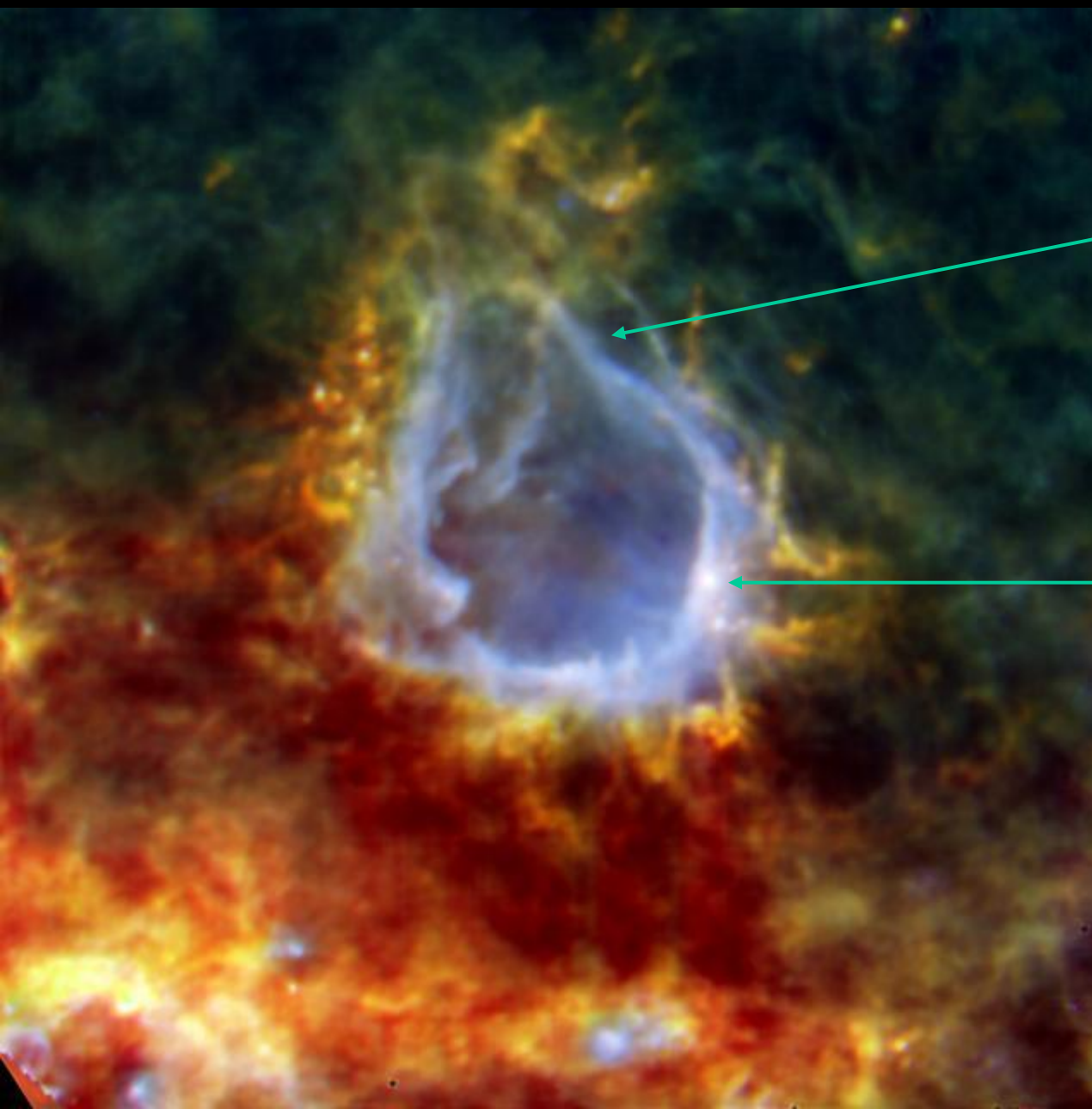
Réservoir de gaz froid
dans la Croix du Sud

Structures
filamenteuses chaudes
où se forment
simultanément de
nombreuses étoiles

6 Mai 2010

« Bulle galactique » RCW120
distance au Soleil ~ 4300 AL

Images PACS et
SPIRE combinées



Matière de la bulle
soufflée par
rayonnement étoile au
centre (invisible)

« Etoile impossible » en
gestation $8 M_{\odot}$ pourrait
grossir jusqu'à $150 M_{\odot}$
sauf si accrétion stoppée
par pression de radiation

Nébuleuse Tête de Cheval Constellation d'Orion, 1300 AL

2010 & 2013

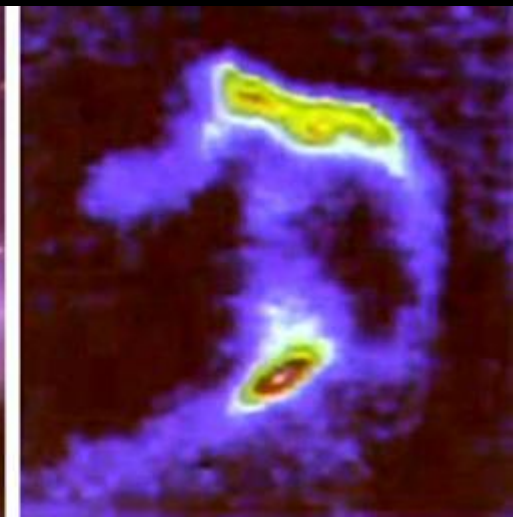
Images PACS et
SPIRE combinées



Hubble IR proche
1,1 μ et 1,6 μ

Image composite 70 μ , 140 μ et 250 μ

Visible (Hubble) à G
IR (Herschel) à D
Zones actives
observables en IR



Massacre de comètes autour de Fomalhaut

11 Avril 2012

« Jeune » étoile, $2M_{\odot}$

Image PACS 70μ



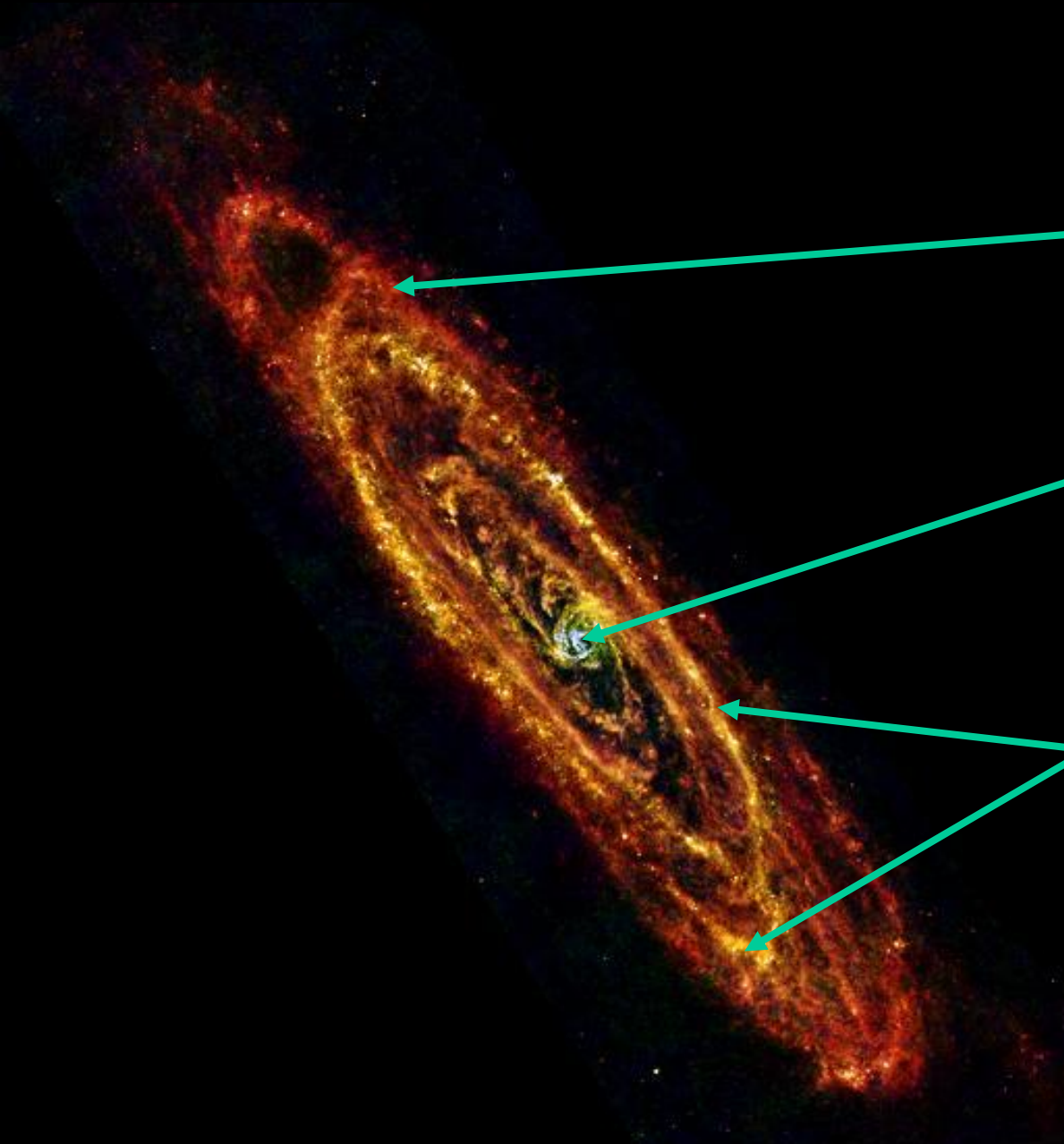
La ceinture de poussières serait produite par de nombreuses collisions quotidiennes de comètes

L'étroitesse de la ceinture et son excentricité pourraient être dues à une planète orbitant autour de l'étoile

Galaxie d'Andromède M31
image 1° x 3°

28 Janvier 2013

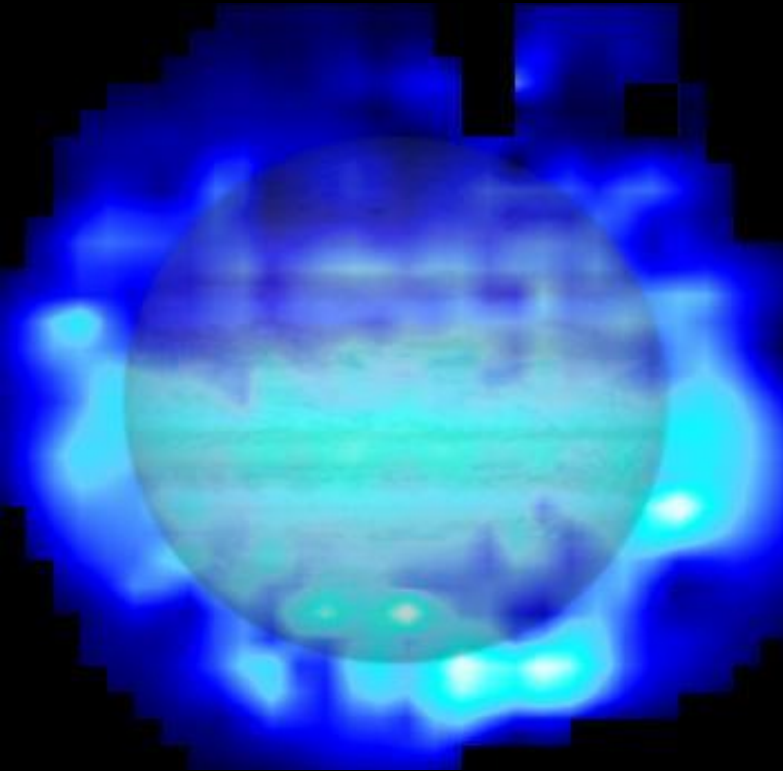
Image PACS et
SPIRE combinées



Poussière froide

Bulbe central chaud
peuplé d'étoiles anciennes

Structures en arc brillantes:
zones de formation d'étoiles



Vapeur d'eau dans la haute atmosphère de Jupiter (Herschel confirme observation ISO):

conséquence de l'impact de la comète Shoemaker-Lévy, 9 Juillet 1994

provenance planétaire exclue; dissymétrie: trois fois plus d'eau dans l'hémisphère Sud

PACS & SPIRE 160, 250 & 350 μ

PACS 66,4 μ + visible (planète)

Nuage de vapeur d'eau très chaude autour de l'étoile géante en fin de vie IRC+10216

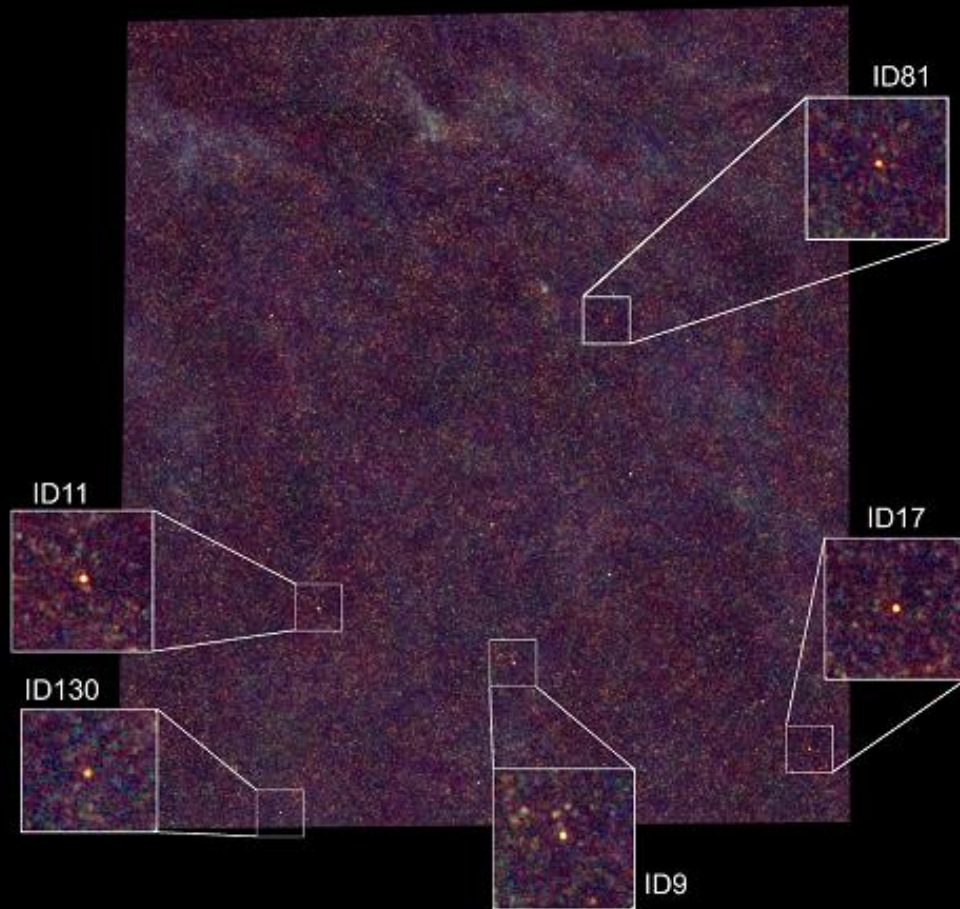
H₂O due à effet des ultraviolets produits par les étoiles environnantes: molécules CO et SiO cassées, O libre puis O+H₂ → H₂O



Herschel détecte 5 nouvelles galaxies lointaines grâce aux « loupes cosmiques »

4 Nov. 2010

SPIRE & PACS, 100-500 μ



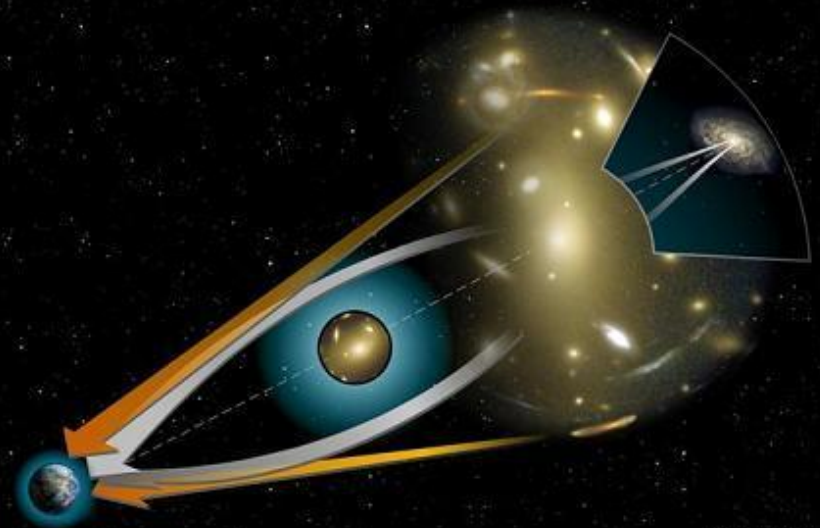
Galaxies éloignées de ~ 10 GAL très peu lumineuses mais observables grâce à l'effet de lentille gravitationnelle

Projet ATLAS*: inventaire par Herschel des galaxies lointaines

→ sera repris par ALMA

* Astrophysical TeraHertz Large Area Survey

Effet de lentille gravitationnelle



Conclusions

Succès complet pour les deux missions:

- ▶ des résultats scientifiques de premier ordre
- ▶ du « grain à moudre » pour les scientifiques pendant des années
- ▶ grand succès pour L'ESA, maître d'ouvrage

Coût relativement élevé (~1,8 Md Euro pour les deux missions) mais retombées bénéfiques pour l'industrie de pointe européenne, et renforcement de la coopération scientifique internationale, notamment européenne

L'Astronomie-Astrophysique confirme une fois de plus son statut de « Big Science » : grands programmes, instruments très élaborés et coûteux, équipes nombreuses: des centaines de scientifiques et de nombreux ingénieurs ont préparé, organisé et suivi chacune des missions

Perspectives

Exploitation des données Planck et Herschel:

- ▶ modifications du modèle standard (?)
- ▶ confirmation (?) d'observations WMAP « montrant » des traces d'avant le « Big Bang », qui ne serait pas le « temps zéro » !
(*Conformal Cyclic Cosmology* : Penrose et Gurzadyan, <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1011/1011.3706.pdf>):

- ▶ meilleure connaissance de l'Univers:
inventaire des amas de galaxies (sur effet SZ),
galaxies lointaines à fort Z, etc

Futures sondes, et au sol ALMA:

- ▶ poursuite de l'observation d' « objets froids » dans l'infra-rouge lointain: étoiles en formation, recherche d'exo-planètes, etc

Bibliographie

Enormément d'informations sur Internet
très bien documentées et illustrées:

- ▶ ESA (sites spécialisés Planck et Herschel), CNRS/INSU (observatoires), CNES, CEA, IAS...
- ▶ bons articles assez complets sur Wikipédia
- ▶ sites spécialisés habituels dont ceux de membres SFA bien connus...
- ▶ sites de passionnés souvent intéressants

Articles scientifiques en ligne: Arxiv, A&A...
assez ouvert

Sites de congrès: voir notamment 47th ESLAB
« The Universe as seen by Planck », Avril 2013
http://www.rssd.esa.int/index.php?project=PLANCK&page=47_ESLAB

Revue d'amateurs: l'Astronomie, Ciel et Espace, Astronomie magazine ...

**"Ce qui est incompréhensible c'est
que le monde soit compréhensible"**

