

Comment faire de la physique dans l'espace?

M. Sauvage

Pourquoi faire de la physique dans l'espace?

Pourquoi l'espace?

* L'accès à l'espace est cher:

- * Projet Herschel+Planck: 2 G€, presque autant que le LHC (3 G€).
- * Successeur du HST: 3 G€ à ce jour, besoin de 3 G€ pour finir la mission, le congrès américain propose d'annuler la mission.

* Peu de projets voient le jour:

- * Dernier appel de l'agence spatiale Européenne, pression de 40 pour 1.

* L'espace est difficile d'accès.

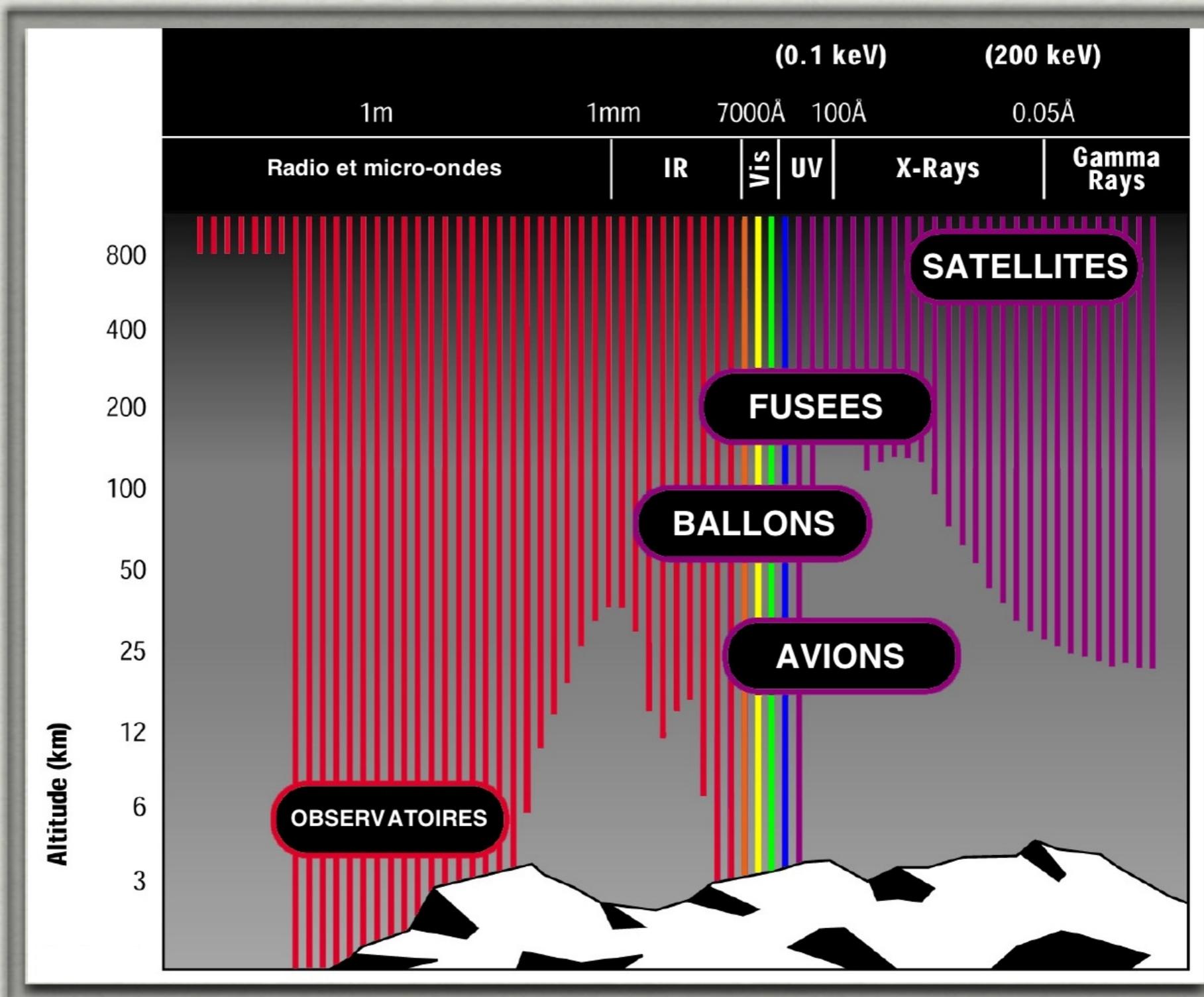


Destruction des satellites Cluster lors du lancement d'Ariane-501

Pourquoi aller dans l'espace?

- * L'atmosphère nous protège de rayonnements dangereux, voire mortels:
 - * UV, X, Gamma.
 - * Elle nous en isole aussi, et nous ne pouvons pas les observer.
- * L'atmosphère absorbe certains rayonnements inoffensifs mais intéressants pour l'astronomie:
 - * Infrarouge et une partie du domaine sub-millimétrique.
- * L'atmosphère émet (émission thermique, raies):
 - * Dans l'infrarouge elle peut être 10^6 fois plus lumineuse que les sources astronomiques.

L'atmosphère comme limite



Transmission de l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde. Le graphe ne représente pas l'émission de l'atmosphère, très importante dans le domaine IR

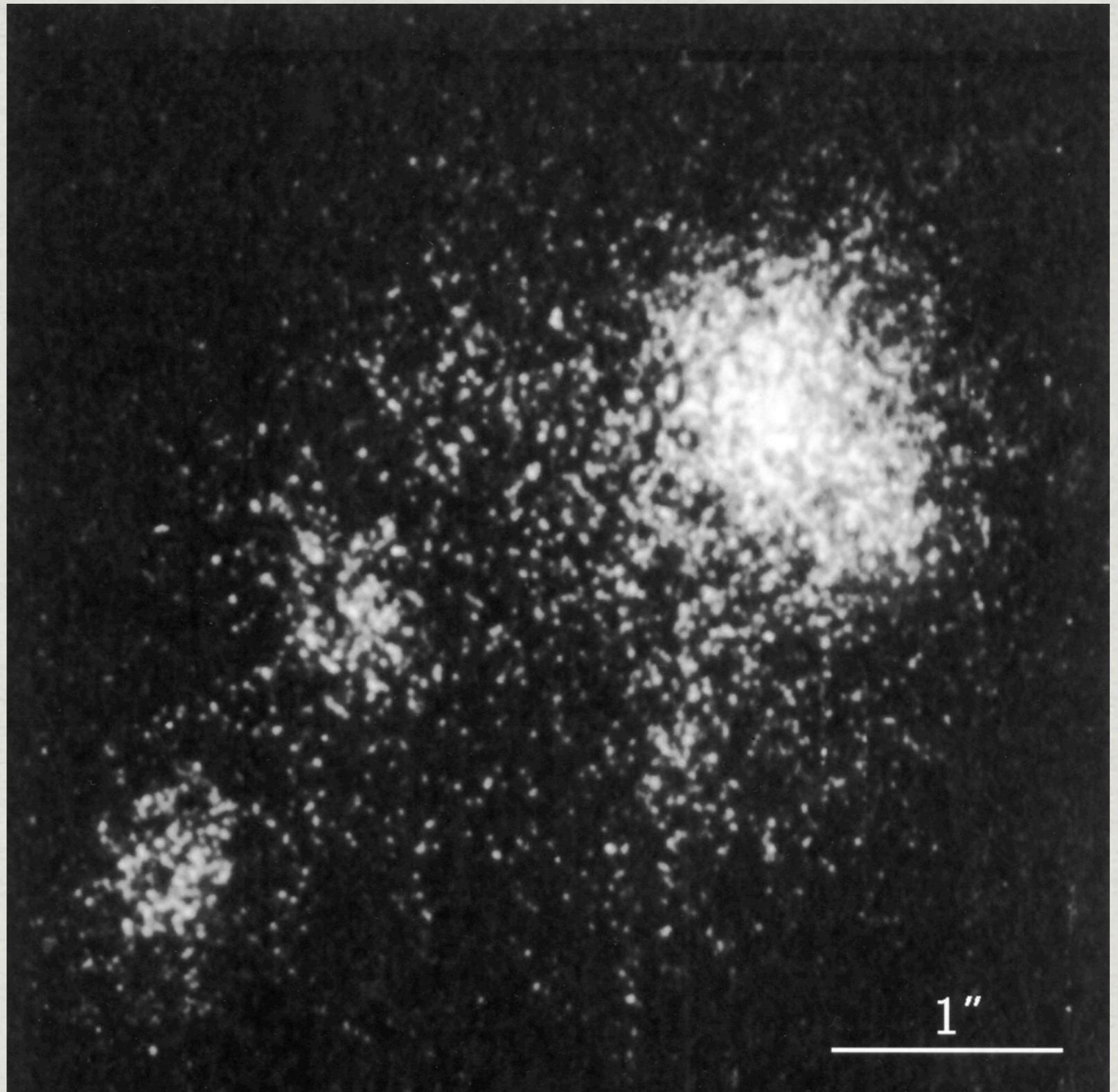
- * L'atmosphère nous protège de rayonnements dangereux, voire mortels:
 - * UV, X, Gamma.
 - * Elle nous en isole aussi, et nous ne pouvons pas les observer.
- * L'atmosphère absorbe certains rayonnements inoffensifs mais intéressants pour l'astronomie:
 - * Infrarouge et une partie du domaine sub-millimétrique.
- * L'atmosphère émet (émission thermique, raies):
 - * Dans l'infrarouge elle peut être 10^6 fois plus lumineuse que les sources astronomiques.
- * L'atmosphère est turbulente:
 - * Elle limite notre résolution spatiale.

Imagerie en mode Speckle du système R136 dans le grand nuage de Magellan, avec un télescope de 3.6m.

Les taches correspondent au déplacement des images des sources dû à la turbulence atmosphérique.

Dans de bonnes conditions atmosphériques, la largeur à mi-hauteur de la PSF optique au VLT ($\varnothing 8.2\text{m}$) s'approche seulement de celle du HST ($\varnothing 2.4\text{m}$).

Solution: optique adaptative, mais technique complexe et champ d'application limité.



- * La gravité est par définition importante en tout point du globe:
 - * Les capacités de chute libre sont très limitées (volume et temps).
- * L'activité associée à la planète est incessante:
 - * Activité sismique naturelle.
 - * Effets de marée sur les très grands équipements (CERN).
 - * Radioactivité et autres interactions avec la matière.
- * La Terre tourne:
 - * Il est très difficile de faire des mesures temporelle de long terme depuis le sol.

Au LHC, les marées doivent être prises en compte dans la détermination des propriétés des faisceaux.

The phenomenon of tides in the ocean due to the influence of the Moon (and to a lesser extent that of the Sun) is well known. They cause the level of water on the edge of the sea to rise and fall with a cycle of some 12 hours.

The ground is also subject to the effect of lunar attraction because the rocks that make it up are elastic. At the new Moon and when the Moon is full, the Earth's crust rises by some 25 cm in the Geneva area under the effect of these 'ground tides'.

This movement causes a variation of 1 mm in the circumference of the LHC (for a total circumference of 26.6 km). This variation in its circumference produces changes in beam energy of up to two tenths of one in a thousand!

It may seem small, but measurements in the LHC are so precise that the beam energy must be known down to two hundredths of one in a thousand, ten times smaller than the effect of ground tides.

Thus, physicists must take the Moon into account in their measurements.

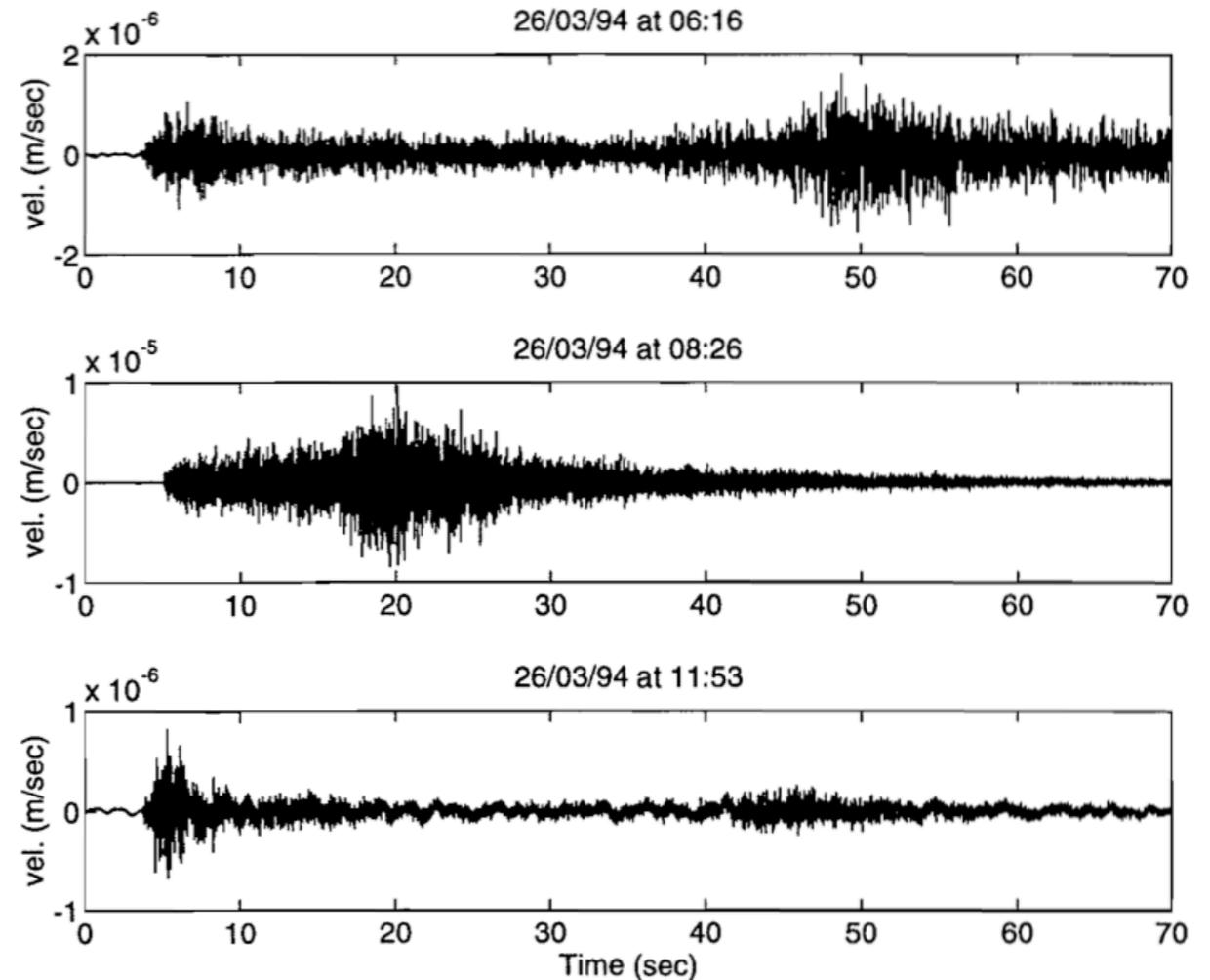


Figure 9: Examples of micro-earthquakes recorded at Paranal during the night of March 25/26, 1994. The curves represent the chronogram of the ground velocity in the vertical direction.

Au Paranal (VLT) les micro-tremblements de terre sont permanents, et perturbent les mesures d'interférométrie.

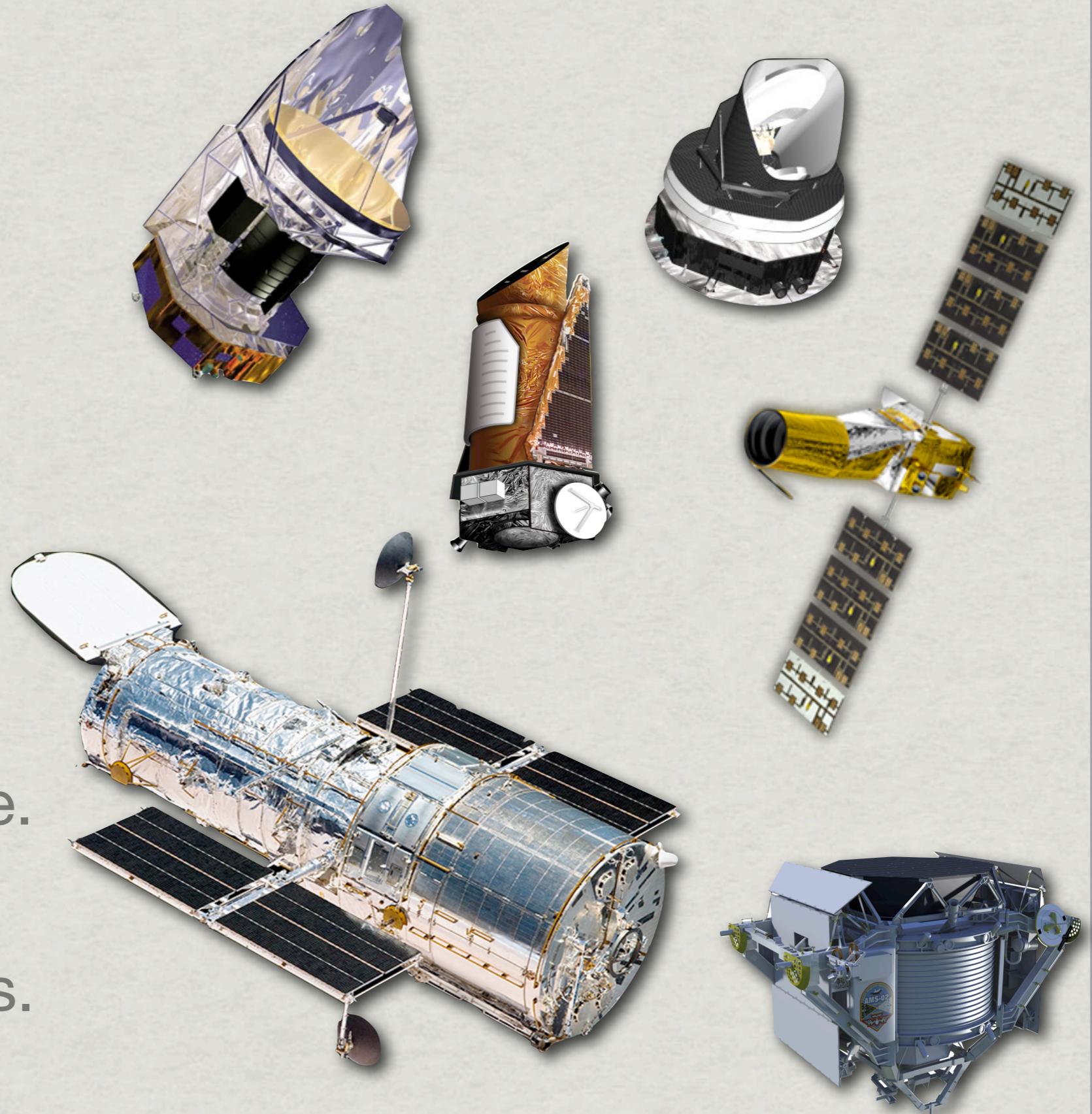
- * La physique ne figure pas au rang des premières préoccupations de l'Humanité:
 - * Pollution lumineuse qui réduit les capacités des sites d'observation.
 - * Bataille (perdue d'avance) pour les domaines millimétrique et centimétrique (domaines utilisés par les téléphones portables entre autres).

Pourquoi l'espace?

- * S'affranchir de l'atmosphère pour accéder de façon optimale à tout le spectre électromagnétique.
- * Travailler en l'absence quasi totale de gravité pour tester des principes fondamentaux de physique.
- * Obtenir un laboratoire le plus stable et propre possible pour utiliser des instruments en limite de leur capacité.

Satellites en exploitation

- * **Herschel et Planck:** domaine IR/Submm.
- * **Kepler, Corot:** exo-planètes, photométrie de précision.
- * **HST:** NIR, visible, UV, haute résolution spatiale.
- * **AMS:** étude des rayons cosmiques.

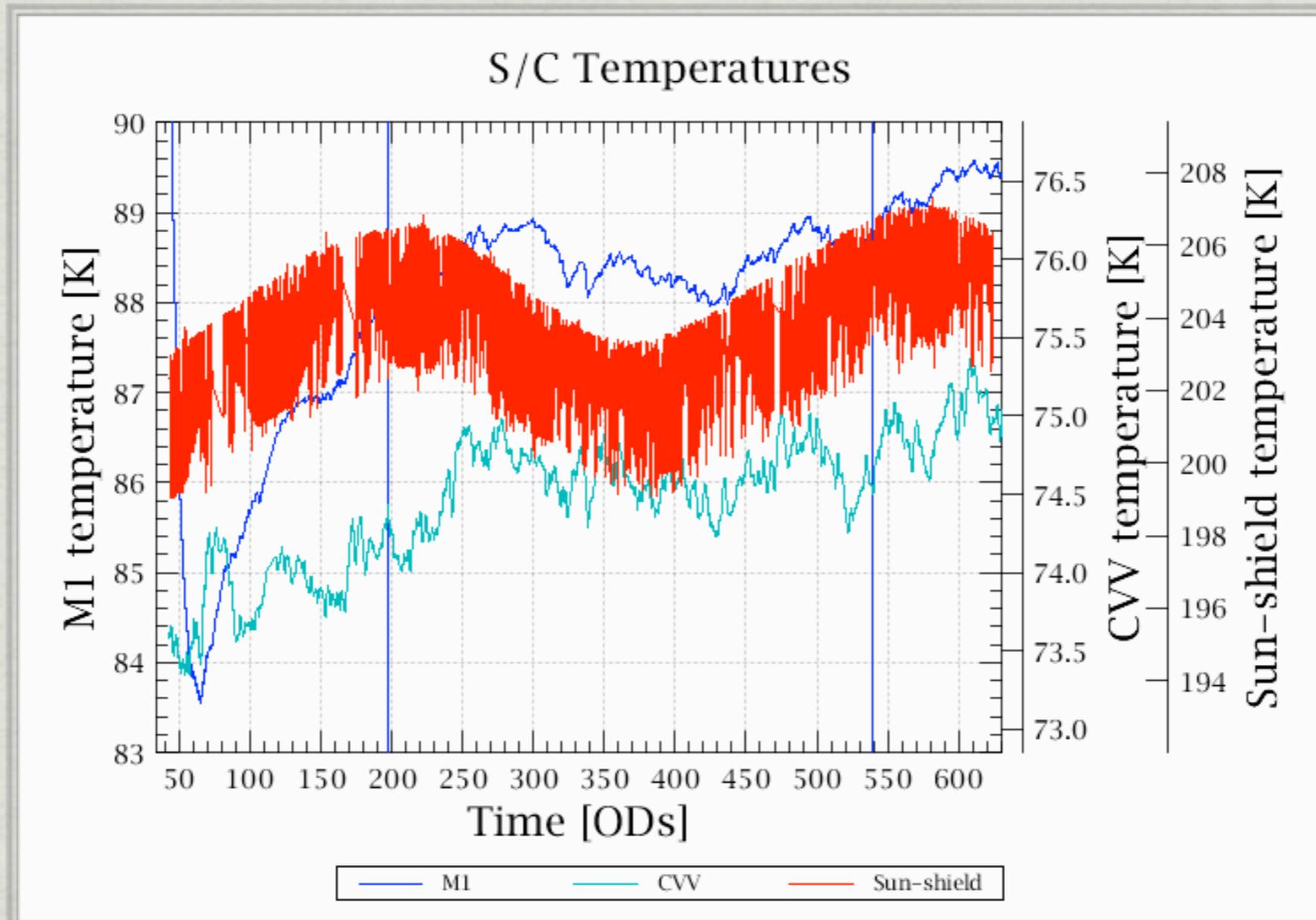


Quelques idées préconçues sur l'espace...

- * L'espace accessible (interplanétaire) est loin d'être aussi froid qu'on peut le penser:
 - * Au niveau de l'orbite de la Terre un objet éclairé par le soleil peut atteindre des températures de l'ordre de 200 K, à l'ombre sa température serait de l'ordre de 80 K.
 - * Les gradients thermiques sur un satellite sont extrêmement forts et peuvent induire des effets de vieillissement prématuré des matériels, ou des difficultés à contrôler son pointage.
 - * Beaucoup d'expériences nécessitent de plus basses températures (détecteurs, bruit de fond) et doivent embarquer leur propres systèmes cryogéniques.



Les premiers panneaux solaires du HST, vieillis par la succession du passage "jour/nuit" en orbite basse terrestre.

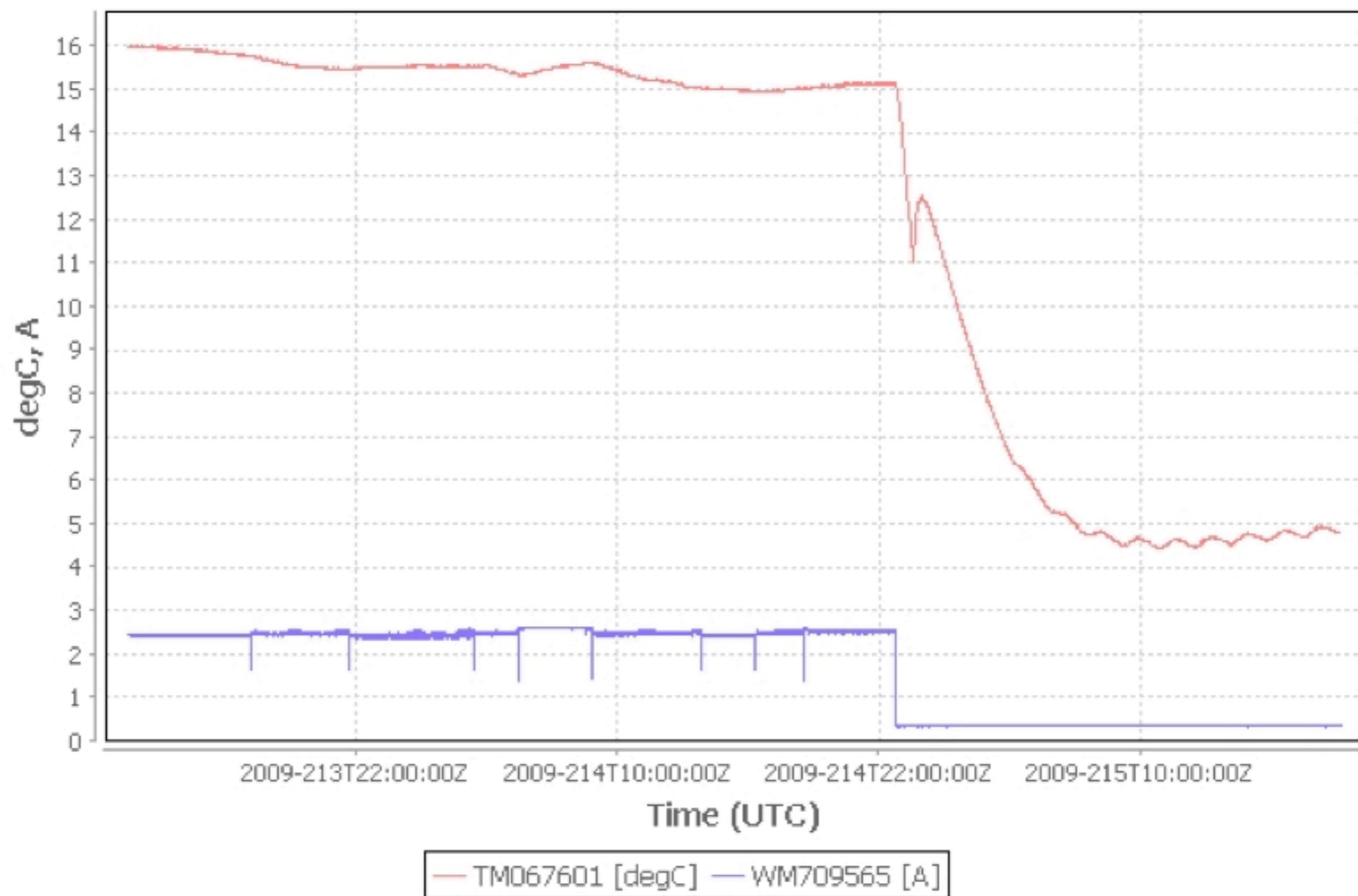


Variation de la température du satellite Herschel (orbite L2) en fonction de la saison (du fait de l'excentricité de l'orbite terrestre, 0.017).

L'espace est vide

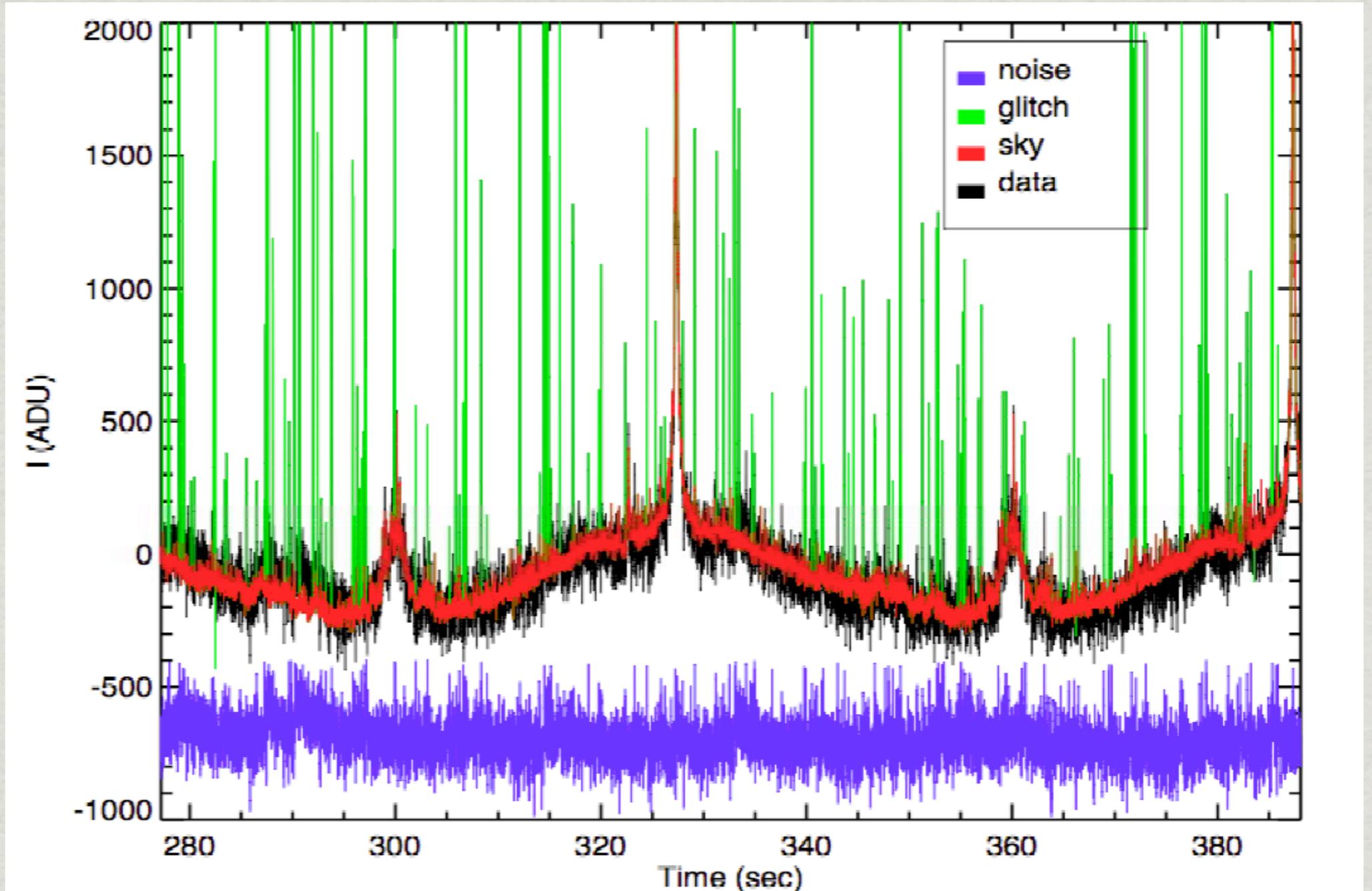
- * Si l'espace est effectivement vide par rapport au meilleur des vides terrestres, il est plein de particules absentes de nos laboratoires:
 - * Electrons et noyaux du vent solaire.
 - * Noyaux du rayonnement cosmique.
- * Le bombardement de particules chargées est intensif quelque soit l'orbite choisie:
 - * Ceintures de radiation terrestres en orbite basse.
 - * Eruptions solaire en orbite haute.
 - * On a rarement la possibilité de blinder les instruments (contrainte de poids).

LCU Current & temperatures doy 214



Le 3 Aout 09, 81 jours après le lancement, un simple impact de rayon cosmique dans un composant non protégé de l'instrument Herschel/HIFI a détruit l'un des boitiers d'électronique, rendant l'instrument inutilisable.

Le software de bord a du être modifié et l'instrument fonctionne maintenant sur sa voie de secours (six mois d'interruption sur une mission de 3.5 ans...).



Signal brut du canal à 353 GHz de Planck/HFI, montrant la fréquence des impacts de particules chargées (cosmiques, rayonnement solaire).

15% des données sont rejetées à cause de ces impacts.

- * L'énergie solaire est certes disponible sans obstacle mais:
 - * Au delà de l'orbite de Mars, le flux d'énergie est insuffisant pour alimenter les satellites, la seule alternative est d'utiliser la fission, d'où de sérieux problèmes de sécurité au lancement.
 - * Pour les satellites dans le voisinage terrestre il faut vérifier l'absence de trop longues périodes d'éclipse par la terre.
 - * Les puissances disponibles pour les instruments restent (très) faibles. Elles se comptent en kW (5 kW à 150 Å pour le HST).

Comment faire de la physique dans l'espace?

- * Toute la science spatiale est le fait des grandes agences.
 - * NASA, ESA les deux agences d'échelle continentale.
 - * JAXA au japon, CNES en France, DLR en Allemagne, ASI en Italie.
 - * Il n'y a plus de programme scientifique spatial Russe.
 - * Les pays émergents (Chine, Inde, Brésil) n'ont que de très faibles contribution aux programmes spatiaux à caractère scientifique.

* Prospective

- * C'est la phase de définition du programme des agences. Il s'agit de déterminer quels devront être les grands axes des expériences spatiales des 10 prochaines années.

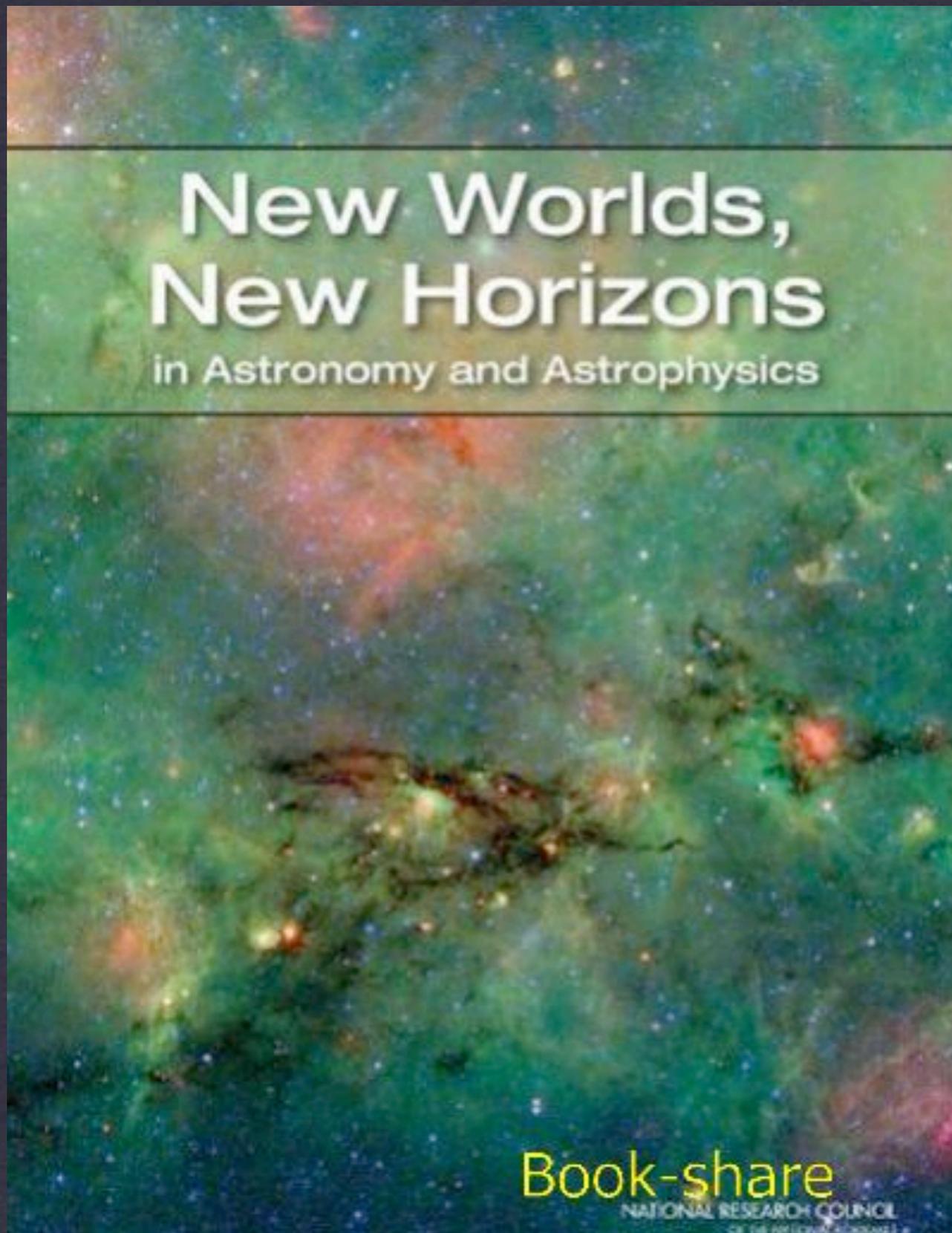
* Compétition

- * Une fois les axes thématiques définis, les agences déterminent un calendrier des missions (enveloppe financière, dates de lancement) ce qui les amène à publier (tous les 3 à 5 ans) des appels d'offre.

* Réalisation

- * Un projet sélectionné par une agence entre en phase de réalisation (5 à 10 ans).

- * Il s'agit évidemment d'une intense période de lobbying.
 - * En Europe on ne parle pas encore de missions.
 - * Des projets sont évidemment en gestation.
 - * Aux USA on effectue un classement des missions possibles.
 - * L'ordre de priorité est donc clairement établi à la fin de la phase de prospective.
- * Les différences tiennent beaucoup aux modes de financement des agences:
 - * Annuel pour la NASA, pluri-annuel garanti pour l'ESA.
- * Les agences nationales procèdent de même.



Cosmic Vision

Space Science for Europe 2015-2025



European Space Agency
Agence spatiale européenne

LES DEUX PROGRAMMES PRINCIPAUX

USA 2012-2021 - UE 2015-2025

- * Une fois le programme défini, les agences publient des appels d'offre. Ils contiennent:
 - * Un cadrage financier qui permet de déterminer l'ampleur de la mission.
 - * Une date de lancement ainsi qu'un lanceur (définition des coûts associés au lancement et de la masse de charge utile disponible).
 - * Eventuellement des précisions sur le type de science (exploration du système solaire, astronomie, physique fondamentale).
 - * Parfois des choix de technologies à mettre en jeu pour les plateformes satellites lorsque l'agence entend développer un savoir-faire particulier (exemple: vol en formation).

- * Il s'agit de la phase 0 d'un projet.
- * Elle peut faire l'objet d'un soutien d'une agence nationale.
- * Elle peut être le fait d'un petit groupe de chercheurs:
 - * Pour une mission de classe M (< 500 M€), les propositions rassemblent de l'ordre de 50 à 100 chercheurs (avec un noyau dur d'une dizaine de personnes).
- * La concurrence est rude (40 réponses à l'appel d'offre M3 pour 2022).

- * La sélection se passe en général en plusieurs temps, par décimations successives.
- * Au dernier appel M3, 4 missions ont été sélectionnées:
 - * LOFT (timing X), EChO (atmosphères exoplanètes), MarcoPolo-R (retour d'échantillon astéroïde) et STE-QUEST (test du principe d'équivalence).
- * Ces missions vont entrer dans une phase de définition:
 - * Financée par les agences
 - * L'objectif est d'étudier en détail les parties techniques de la mission et de démontrer sa faisabilité (coût et durée de développement).
- * A la fin de cette phase (1 à 2 ans) une seule mission sera sélectionnée...

* Dernière étape de sélection: passage en phase d'implémentation:

* C'est le cas des missions M1 et M2 de l'ESA. Trois projets sont en concurrence:

- * Euclid: mesure de l'équation d'état de l'Energie Noire.
- * Plato: exo-planètes.
- * Solar Orbiter: comme son nom l'indique.

* Comment se fait cette sélection?

- * Nous devons démontrer la faisabilité de l'expérience par des mesures sur des prototypes, des simulations numériques.
- * Nous devons avoir des solutions techniques qualifiées pour le spatial.
- * Nous devons démontrer que les coûts de développement et d'exploitation du projet restent dans l'enveloppe accordée.
- * Des considérations politiques et de prestige entrent évidemment en ligne de compte...

Après la sélection...

- * Les phases qui précèdent la sélection sont surtout une affaire de chercheurs (avec des ingénieurs pour identifier les verrous techniques).
- * Après la sélection une expérience spatiale rassemble:
 - * des chercheurs pour continuer à définir les performances requises et les modes d'utilisations, mais aussi pour inventer les détecteurs.
 - * des électroniciens,
 - * des mécaniciens pour la conception physique,
 - * des spécialistes en cryogénie,
 - * des opticiens,
 - * des informaticiens,
 - * ...

- * Travailler dans le domaine spatial, c'est suivre des règles différentes de la plupart des domaines de la physique.
- * Quand une agence sélectionne un projet, elle ne "signe pas un chèque" à une équipe scientifique.
- * Elle achète un concept, et contracte des équipes pour le mettre en oeuvre:
 - * des scientifiques pour réaliser des instruments et produire des données.
 - * des industriels pour réaliser le satellite lui-même.
 - * de nombreuses étapes de revue vont jalonner le processus de développement, avec parfois le sentiment que la science est complètement perdue de vue.

- * Le processus de développement d'une instrumentation spatiale obéit à beaucoup plus de règles et de contraintes que n'importe quel autre développement:
 - * On demande aux instruments de pouvoir fonctionner longtemps (au moins 2 à 3 ans au sol, souvent le double dans l'espace) sans panne.
 - * Tout système doit être doublé pour permettre de faire face aux imprévus.
 - * Les composants électroniques doivent être durcis aux radiations.
 - * Tout écart aux règles doit faire l'objet de dérogations (long processus technico-administratif).

- * Certaines solutions techniques sont interdites parce que trop risquées ou inefficaces:
 - * Eviter les pièces mobiles qui peuvent se bloquer.
 - * Attention aux poussières (lubrifiants, peintures).
 - * Pas question de ventiler les électroniques qui chauffent, pas de refroidissement par convection, uniquement par radiation.
- * Des contraintes "matérielles" influencent les choix scientifiques:
 - * Euclid: la stratégie de relevé du ciel n'est pas optimisée du point de vue scientifique, mais du point de vue des déplacements pour minimiser le poids du carburant embarqué!
- * Certaines contraintes semblent contradictoires:
 - * Au prix du kilo à satelliser, on diminue la masse des instruments, mais cela le fragilise, or il faut qu'ils tiennent les vibrations du lancement.



Test de vibration du satellite Herschel complet

Conclusion:

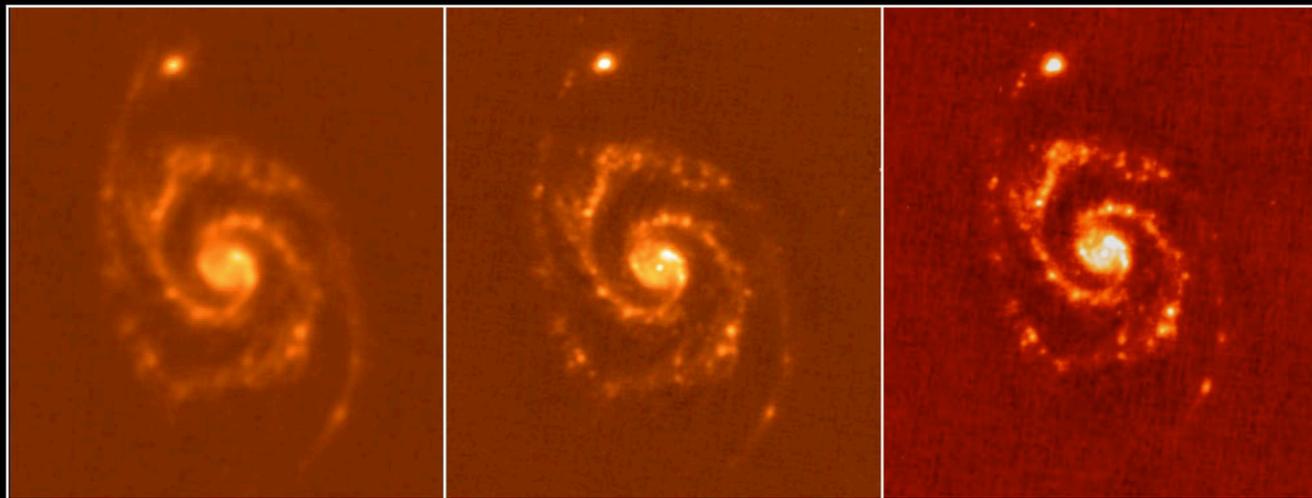
Il faut:

- de la conviction pour entraîner une communauté avec soi
- de la ténacité pour porter un projet pendant de longues années

mais...



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



160 μm

100 μm

70 μm