

Comment faire de la physique dans l'espace?

Stéphane Schanne

*chercheur au Service d'Astrophysique (UMR AIM)
à l'IRFU du CEA Saclay*

*avec remerciements
à Marc Sauvage pour sa contribution*

*conférence aux « Rencontres de l'infiniment grand
à l'infiniment petit »*

2014 07 24 - 10h - bât Condorcet, APC



15-25 juillet 2014
Orsay - Palaiseau - Paris - Saclay

**Rencontres
DE L'INFINIMENT
GRAND
à l'infiniment petit**

2014 : Promotion Frédéric et Irène Joliot-Curie

Visites de labos,
conférences, débats

- Comprendre l'infiniment petit
- Les noyaux et leurs interactions
- Des particules aux étoiles jusqu'au cosmos
- Mesurer l'infiniment petit, observer l'infiniment grand
- Applications médicales
- Maîtriser l'énergie
- Enregistrer, analyser, découvrir

NIVEAU L3

Web : <http://indico.in2p3.fr/event/rencontres-physique-infinis>
Contact : secretariat-infinis@in2p3.fr



Pourquoi aller dans l'espace?

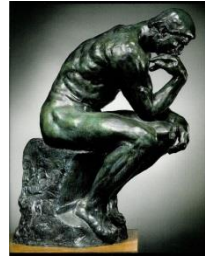
Pourquoi aller dans l'Espace?

Socrate "Imaginez des prisonniers nés dans une caverne souterraine, qui ont derrière eux un feu, et sont enchainés de telle sorte telle qu'ils ne puissent voir que le mur d'en face, sur lequel se projettent les ombres de marionnettes manipulées dans leur dos".

Ne connaissant que ce monde, ils pensent que ces ombres sont réelles.



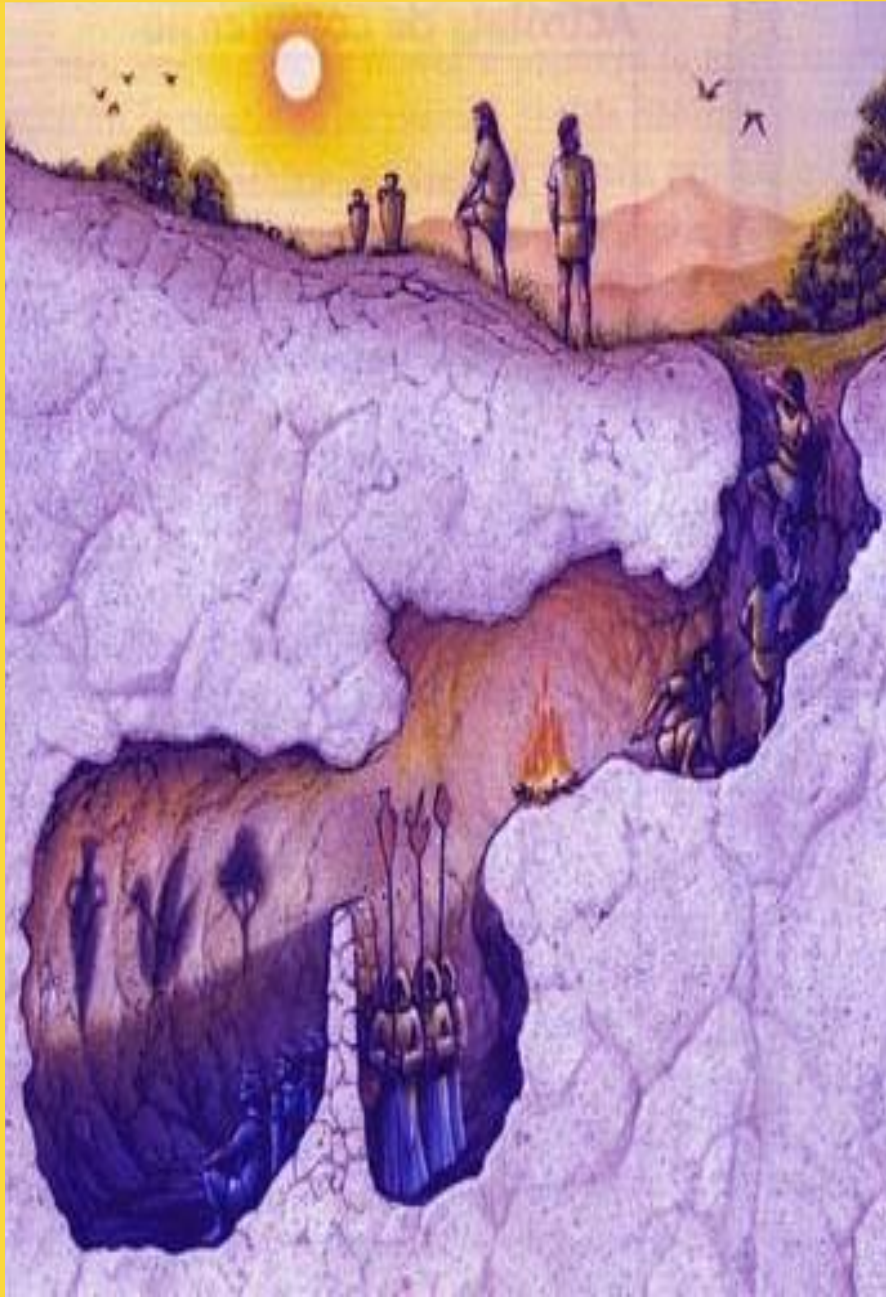
Ces prisonniers sont semblables à nous!



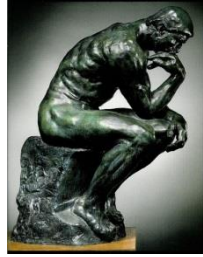
l'Humanité vit sur Terre sur une surface de 510 Mm² (510 □ de 1000 km) dont 150 Mm² de terre émergée (50 h/km²)

- La Caverne est la condition humaine.
- Les Ombres sont nos opinions, fondés sur nos sens et la force de l'habitude.

Pourquoi aller dans l'Espace?



***Nous libérer des chaînes
Changer de perspective
Dépasser nos limites***



- Explorer au-delà de nos frontières
- Prendre de la hauteur pour mieux comprendre
- Voir ce qu'il y a au-delà de la Terre
- Comprendre la Cave ultime: l'Univers où nous vivons

Aller dans l'Espace pour dépasser nos limites

Quelles limites?

*Aller dans l'Espace
pour dépasser nos limites*

L'atmosphère comme limite

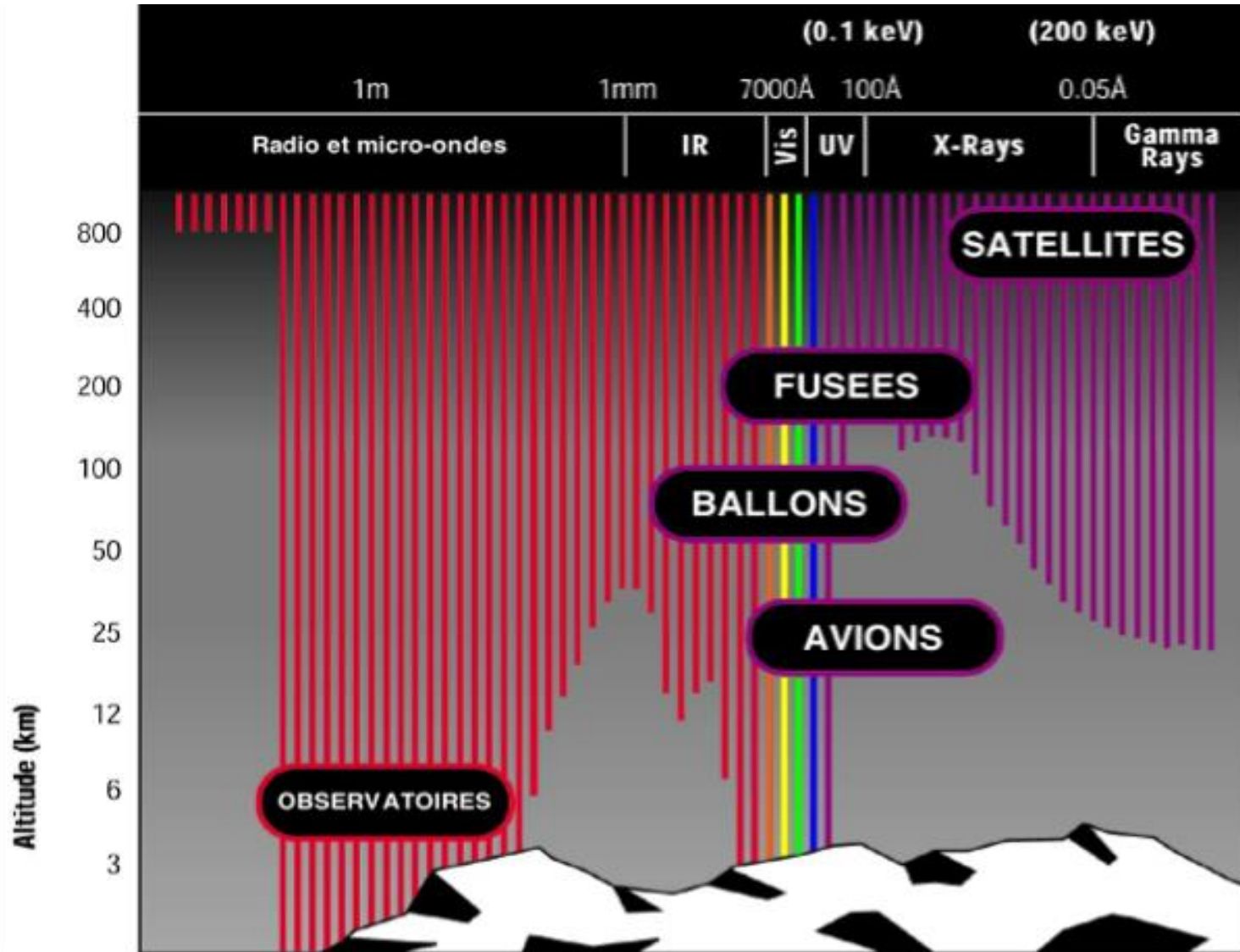
L'atmosphère comme limite

- **L'atmosphère est un vrai bouclier**
 - 80% de la masse à < 20 km
 - Pression au sol 1013 hPa
⇒ 10 tonnes d'air par m^2
- **L'atmosphère nous protège de rayonnements dangereux, voire mortels:**
 - Rayons cosmiques
(protons, particules chargées, ...)
*Découverte des rayons cosmiques :
en 1912, Victor Hess, avec un
électromètre à bord d'un ballon,
mesure l'augmentation de l'ionisation
en fonction de l'altitude.*
 - Photons (rayons UV, X, Gamma)
- **L'atmosphère absorbe aussi certains rayonnements inoffensifs mais intéressants pour l'astronomie**
 - Infrarouge, le sub-millimétrique
- **L'atmosphère nous isole de ces rayonnements**
 - Nous ne pouvons pas les observer depuis la Terre.



L'atmosphère comme limite

Altitude où le rayonnement est atténué de moitié



- **La surface de la Terre émet**

**La Terre reçoit du rayonnement du Soleil (visible, à basse entropie)
et le réémet comme rayonnement infra-rouge (à haute entropie)**

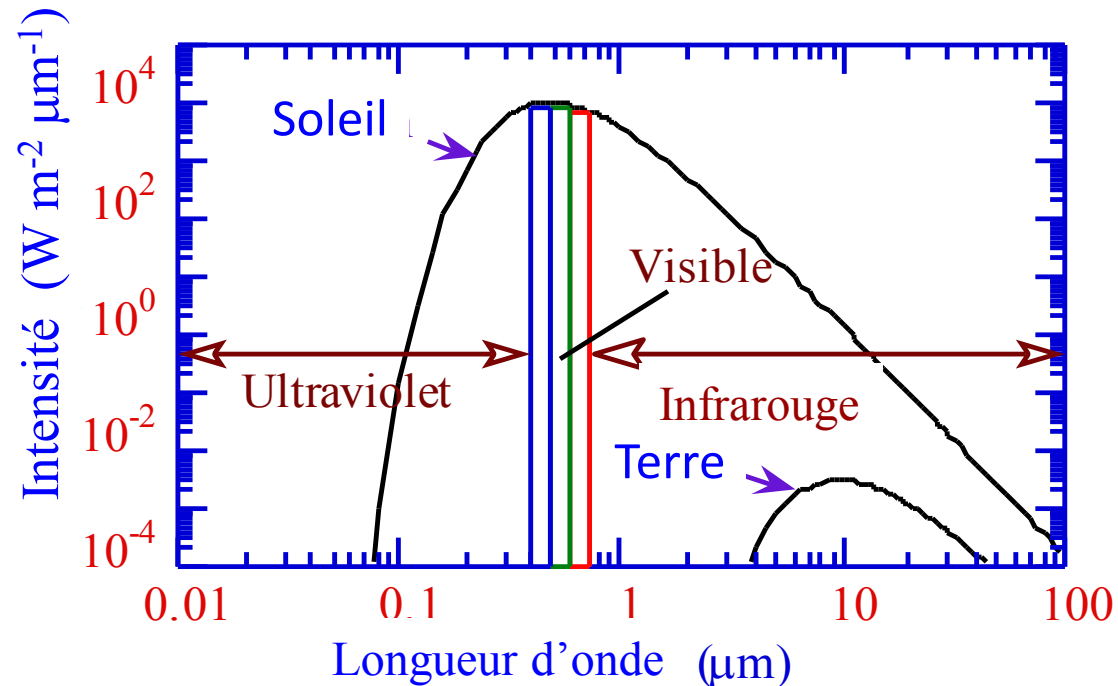
La vie sur Terre puise sa source dans la négentropie du Soleil...

Pic de l'émission d'un corps noir (loi de Wien)

$$\lambda_p (\mu\text{m}) \approx \frac{2897}{T(\text{K})}$$

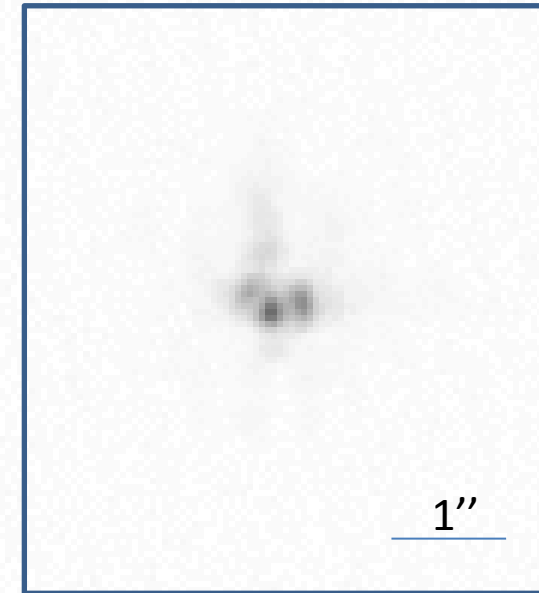
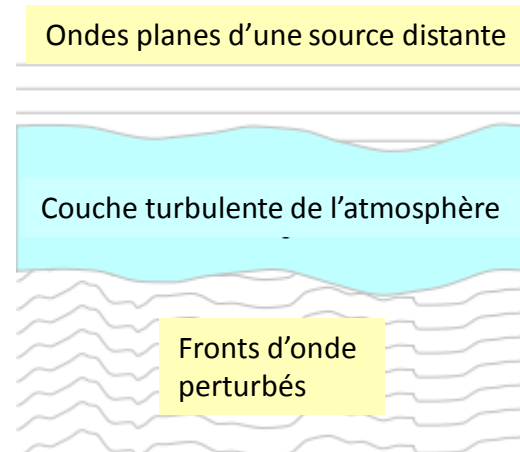
Photosphère du Soleil
 $\lambda_p = 2897/5800 \text{ K}$
 $= 0.5 \mu\text{m}$ (jaune)

Surface de la Terre
 $\lambda_p = 2897/288 \text{ K}$
 $= 10.1 \mu\text{m}$ (IR)



**Dans l'infrarouge l'atmosphère peut être
10⁶ fois plus lumineuse que les sources astronomiques.**

- **L'atmosphère est turbulente**



- Déplacements d'image d'une source
- Limitation de résolution spatiale (longue pose => tâche)
- **mode « speckle »**, Images successives rapides et correction avant sommation,
 - Uniquement pour sources relativement brillantes.
- **Optique adaptative**, Analyse du front d'onde d'une étoile artificielle (laser). Calcul temps-réel et rétroaction par vérins pour déformer le miroir du télescope.
 - Technique complexe, limitée à une partie du champ de vue.
 - Le résolution du VLT ($\emptyset 8.2\text{m}$) s'approche seulement de celle du HST ($\emptyset 2.4\text{m}$)
 - E-ELT ($\emptyset 40\text{m}$) n'est envisageable qu'avec optique adaptative complexe

Aller dans l'espace...

Mais où commence l'espace?

L'exosphère

- Collisions entre particules sont négligeables
- Dernière couche de l'atmosphère (> 700 km)
- Densité très faible
 - à 700 km : 10^6 particules/cm³
 - à 5000 km : 100 particules/cm³
= densité du milieu interplanétaire
 - au sol:

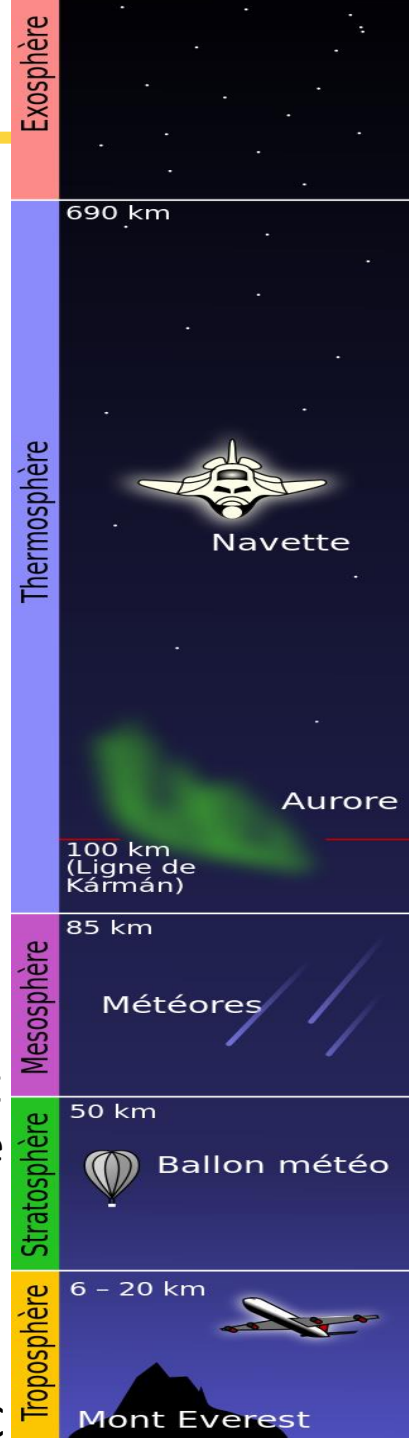
$$\frac{(1.2 \text{ g/l})}{(1000 \text{ cm}^3/\text{l})} \times \frac{(6 \times 10^{23} \text{ part/mol})}{(29 \text{ g/mol})} = 2.5 \cdot 10^{19} \text{ part/cm}^3$$

Intérêt pour les satellites:

- Frottements deviennent faibles
- Durée de vie orbitale très augmentée

> 700 km, des centaines d'années

à 350 km, nécessaire de corriger l'orbite de la station ISS



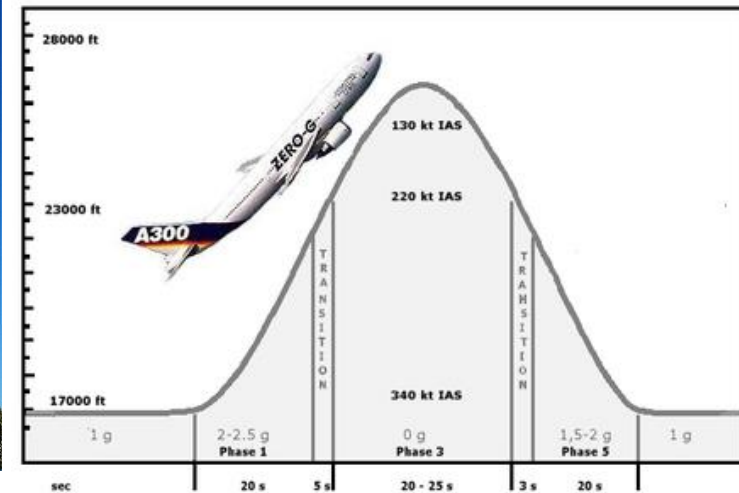
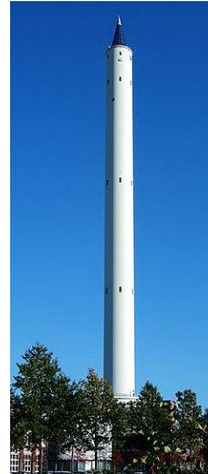
*Aller dans l'Espace
pour dépasser nos limites*

La Terre comme limite

- **La gravité de la Terre est importante à sa surface**

- **Les capacités en chute libre, limitées en volume et temps**

- 5 s dans une tour (Brême, 110 m)
- 25 s en vol parabolique



- **Le poids limite la taille des expériences (ex: structure de support des télescopes)**

ex: E-ELT de l'ESO, > 2025:
structure 2800 t, Ø40m total, 800 miroirs,
optique adaptative avec 6000 actionneurs à 1 kHz,



- **L'activité de la Terre est incessante**

- **Activité sismique**

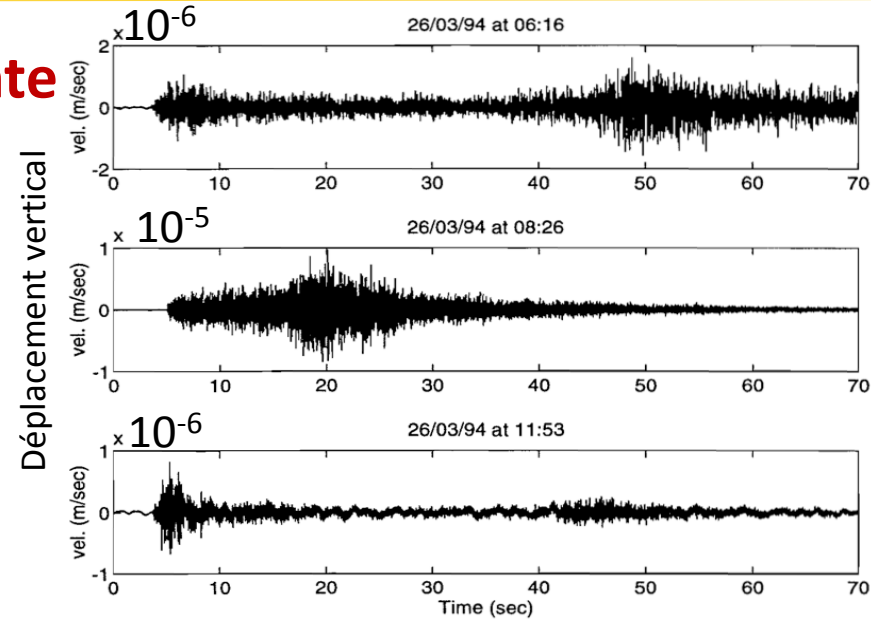
Micro-tremblements de Terre au Mount Paranal (VLT) perturbent les mesures d'interférométrie.

- **Effets de marée sur les très grands équipements**

L'effet de marée de la Lune fait remonter la croûte terrestre de 25 cm et allonge la circonférence du LHC au CERN de 1 mm sur 27 km.

L'énergie du faisceau varie de 200 ppm
Pour être connue aux 20 ppm requis, l'effet de marée doit être modélisé.

- **Radioactivité et interactions avec la matière (rayonnement thermique, magnétisme, ...)**



- **La rotation de la Terre limite le temps d'observation**
 - Soleil, Lune (en plus de la météo!)
 - Difficile d'observer une source à long terme depuis le sol
- **La proximité de la Terre limite le champ de vue**
 - Seule une partie du ciel est visible à un moment donnée
 - Difficile d'observer un grand champ de vue depuis le sol

Un satellite peut scruter le ciel complet en quelques jours

Cartographie des étoiles de la galaxie (HIPARCOS, GAIA)

Cartographie du fond diffus cosmologique (COBE, WMAP, PLANCK)

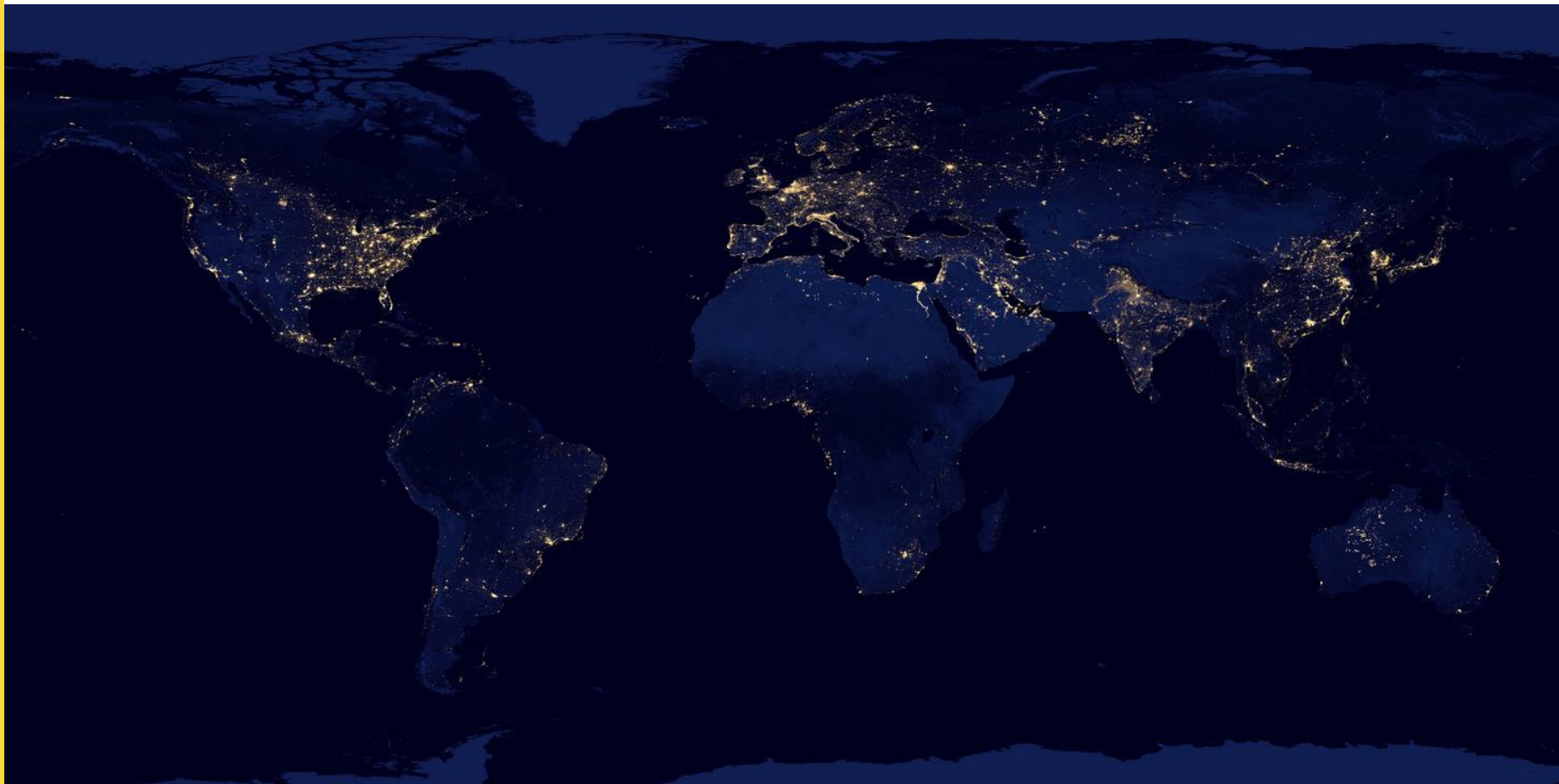
Détection de sursauts gamma (SWIFT, SVOM)

- **La taille de Terre est finie**
 - **La taille des instruments est limité par l'espace disponible**
Va-t-on construire un accélérateur plus grand que le LHC (27 km circonf.)?
 - **La distance maximale entre deux points de mesure est fixée**
Expériences de neutrinos opèrent sur la taille du diamètre terrestre

*Aller dans l'Espace
pour dépasser nos limites*

L'homme comme limite

- **La physique n'est pas la préoccupation première de l'humanité**
 - La pollution électromagnétique réduit le domaine de fréq. observable (ondes millimétrique et centimétriques: téléphones portable, TV sat)
 - La pollution lumineuse réduit les capacités des sites d'observation



Faire de la Physique dans l'Espace pour explorer d'autres domaines

Quels domaines?

*Aller dans l'Espace
pour dépasser nos limites*

Le domaine de l'espace accessible

- **Conquête par l'Homme**

Missions sur la Lune, Vols habités, Station Spatiale Internationale, Futures missions sur Mars?
L'homme comme conquérant de nouveaux mondes.

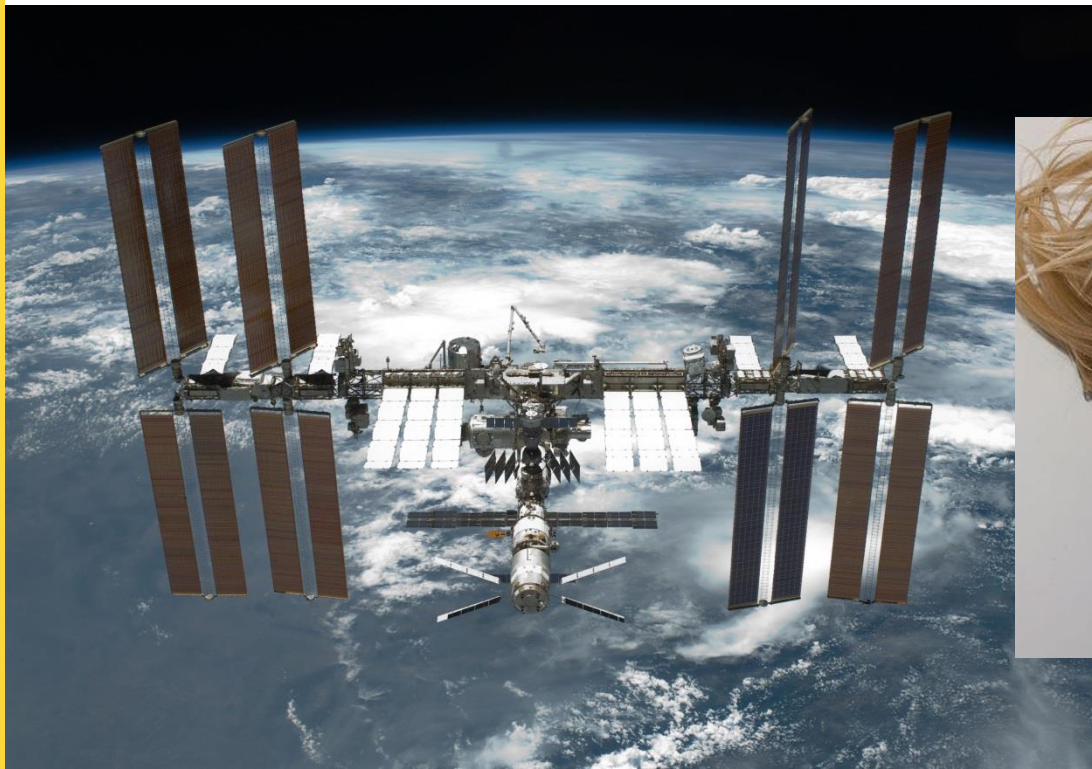
Etudes des limites de l'homme (physiologie et psychologie en environnement spatial)

- **Science du vivant**

Comportement du vivant en micro-gravité, et sous radiations spatiales

- **Physique des matériaux, physique des fluides**

Etudes en micro-gravité, sous radiations, contraintes thermiques, Fabrication sous micro-gravité



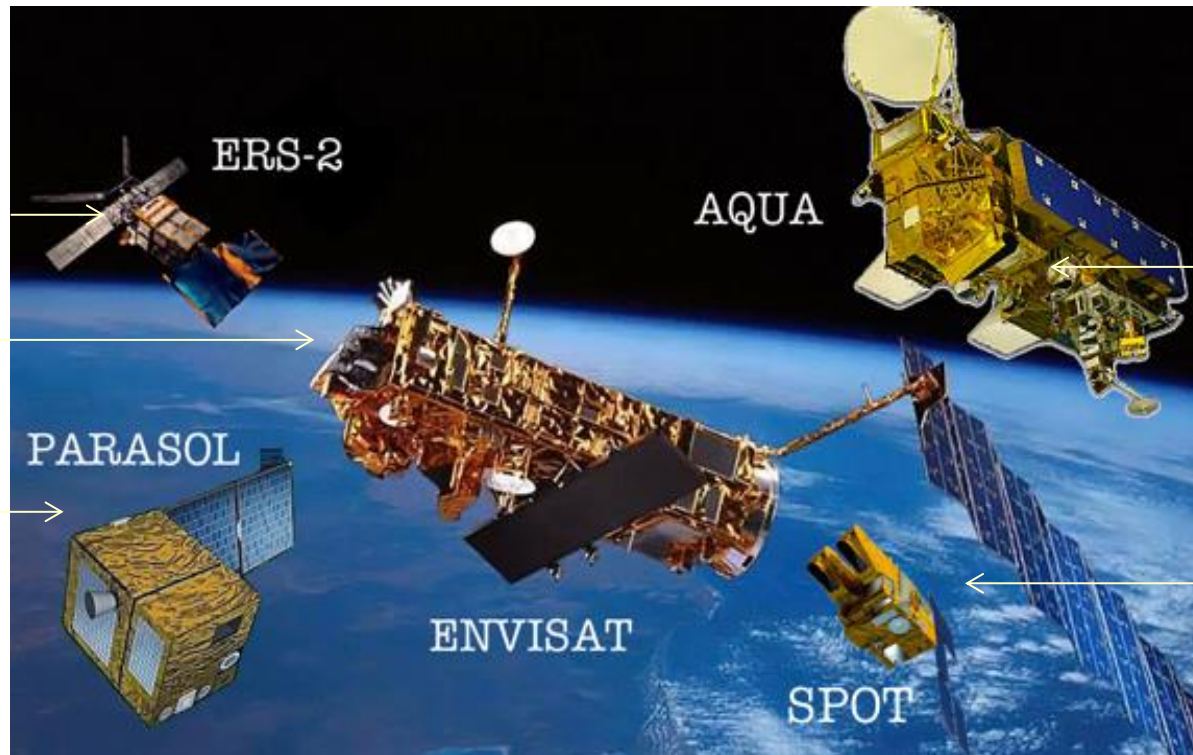
- **Sciences de la Terre**
Imagerie par satellite en orbite basse (optique, IR, radar), cartographie, monitoring de l'environnement (cycle de l'eau, glace, végétation, impact de l'homme)
- **Sciences de l'Atmosphère**
Mesures atmosphériques (nuages, ozone, pollution)
- **Physique spatiale**
ionosphère, magnétosphère, plasmas spatiaux, vent solaire, météo spatiale

Exemples:

ERS2
ESA, 1995-2011

ENVISAT
ESA, 2002-2012
8,2 t, orbite basse

PARASOL
CNES, 2004-2013
atmosphère



AQUA
NASA, 1999
cycle de l'eau

SPOT-5
CNES, 2002
imagerie

- **Sciences de la Terre**

Imagerie par satellite en orbite basse (optique, IR, radar), cartographie, monitoring de l'environnement (cycle de l'eau, glace, végétation, impact de l'homme)

- **Sciences de l'Atmosphère**

Mesures atmosphériques (nuages, ozone, pollution)

- **Physique spatiale**

ionosphère, magnétosphère, plasmas spatiaux, vent solaire, météo spatiale

- **Géodésie**

cartographie du champ gravitationnel de la Terre.
Monitoring de l'orbite d'un satellite asservi autour d'une masse inertielle.



GOCE, ESA 2009-2013

Source <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/goce>

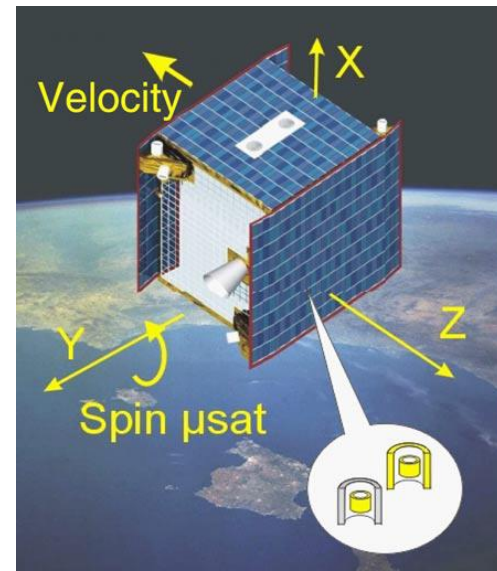


- **Test du principe d'équivalence**

Relativité Générale : masse grave = masse inertielle (vérifié actuellement à 10^{-13})

MICROSCOPE : Micro-Satellite pour l'Observation du Principe d'Equivalence

- Précision visée de 10^{-15}
- Principe: 2 masses de densité différente, soumises au seul champ de gravité de la Terre. Mesure de la différence de vitesse de chute des deux masses par accéléromètre. Une différence indiquerait une violation du principe d'équivalence. Micro propulseurs à gaz annulent toute influence autre que celle de la gravité.
- Développé par le CNES et l'ONERA
- Lancement prévu en 2016

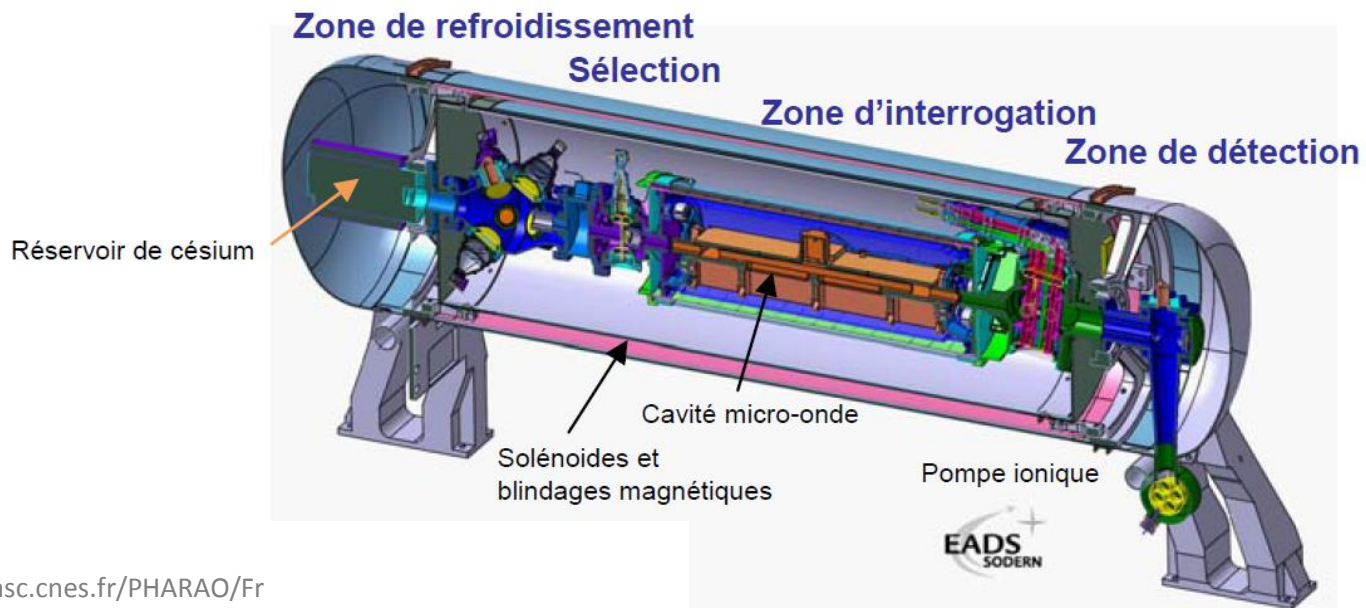


- **Mesure de l'écoulement du temps**

Relativité Générale : Horloges retardées, si en mouvement ou en gravitation forte
Comparaison des mesures d'horloges en orbite et sur Terre

PHARAO : Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite

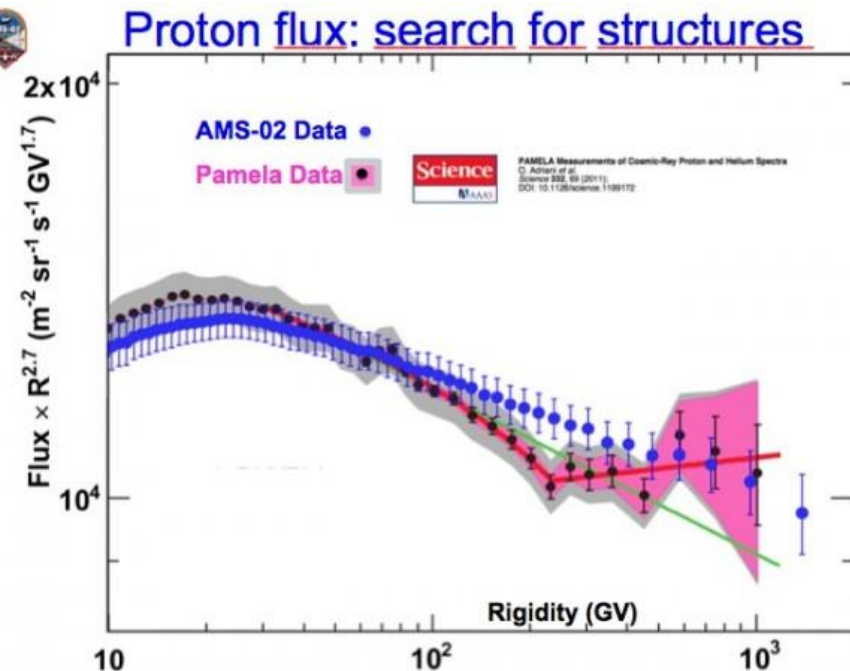
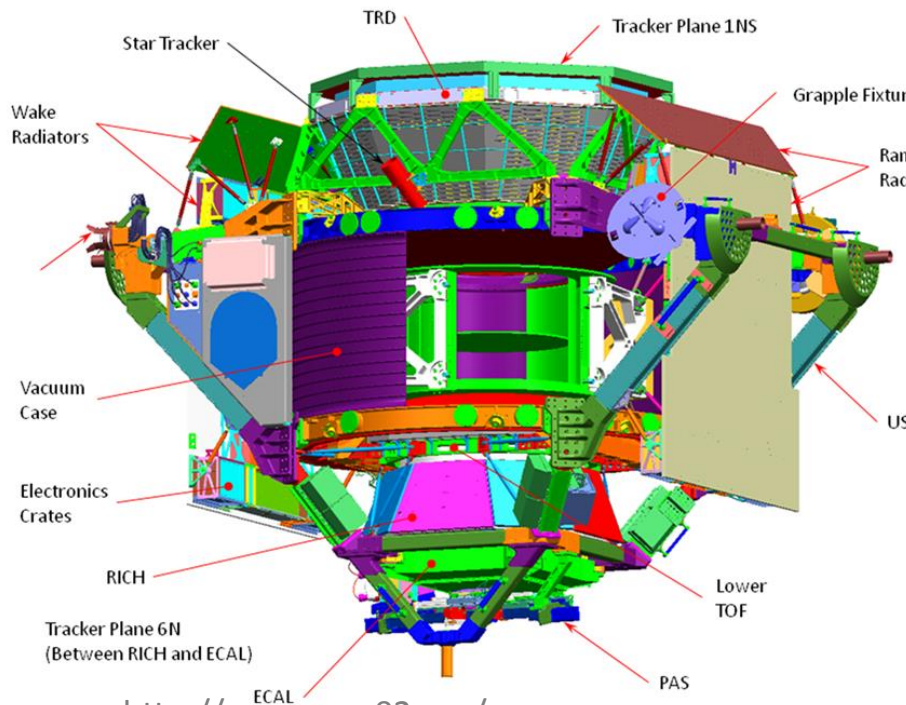
- Horloge à atomes de Cs ultra-froids (μK) dans l'ultra-vide
- Mesure des durées de transition entre deux niveaux quantiques d'atomes excités
- Précision de la seconde à 10^{-16}
- Test d'universalité de la mécanique quantique (variation de la const de structure fine?)
- Développement au CNES et ENS Paris, modèle de vol livré
- Installation prévue en 2016 sur station ISS
- Partie du réseau ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) pour atteindre précision 10^{-17}



et recherche d'antimatière

AMS-02 Expérience de physique des particules, installée en mai 2011 sur l'ISS

- **Time of flight detector (ToF)** mesure le moment d'arrivée d'une particule chargée
- **Détecteur de Radiation de transition (TRD)** identification électrons/protons à haute E
- **Aiment permanent de 1.5 kGauss** (3000 x champ terrestre) incurve leurs trajectoires
- **Tracker au Silicium (DSSD)** mesure leur courbure et quantité de mouvement
- **Imageur Tcherenkov (RICH)** mesure leur vitesse
- **Calorimètre Electromagnétique (ECAL)** mesure l'énergie des électrons
- **Anticoïncidence** rejette des événements latéraux



*Aller dans l'Espace
pour dépasser nos limites*

***Le domaine de l'espace accessible
aux robots***

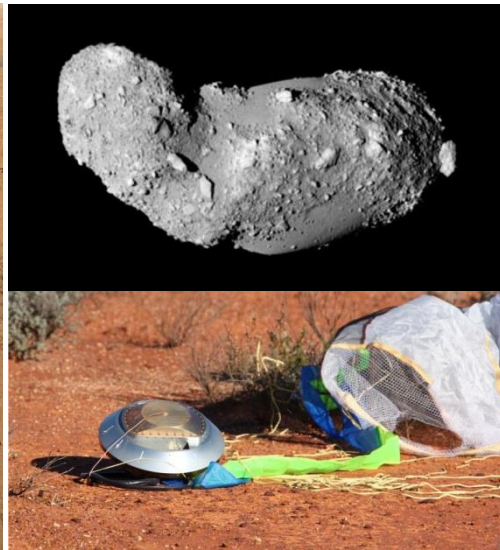
- **Planétologie,**
 - Exploration de **planètes, lunes, astéroïdes, comètes**
 - Mesures in situ (géologie, rech. eau, habitabilité, exobiologie) ex: Curiosity
 - Retour d'échantillons ex: Hayabusa
- Toute les planètes ont eu leur visite (+/-). Passionnant, mais j'arrête là.
- Quelques prochaines missions:
 - Rosetta sur Comète Churiamov-Gerasimenko (ESA, lancé 2004 *arrivée 2014)
 - NewHorizon sur Pluton et Charon (NASA, 2016)
 - BeppiColombo sur Mercure (ESA, 2017)
 - JUICE sur les lunes de Jupiter (Mission L1 ESA, lancement 2022 *arrivée 2030)

Exemples:

Curiosity, 2012 (Mars)



Hayabusa, 2005 (Astéro)



Rosetta, 2014 (Comète)



*Aller dans l'Espace
pour dépasser nos limites*

***Le domaine de l'espace inaccessible
autrement que par l'observation***

Étude des astres inaccessibles

autrement que par leur observation et modélisation

- **Hypothèse:**

La Physique est universelle

- **Principe:**

- **Les lois de la Physique**

- **déterminées *ici***

- **sont appliquées aux objets *là bas***

- **Vérification de la cohérence**

- ⇒ **Compréhension de l'objet *là bas*, ou**

- ⇒ **Modification des lois de la Physique**

Étude des astres inaccessibles autrement que par leur observation et modélisation

- **Les Messagers des Astres**

- **Rayons cosmiques**

- **Particules (protons, noyaux), Neutrinos**

- Ondes gravitationnelles

- Par des masses en mouvement (fusion d'étoiles neutrons, ...)

- Photons

- Sonder le spectre électromagnétique

- **Détecter les messagers**

- Observatoires (Télescopes et Détecteurs spécialisés)

- **Décoder leur message**

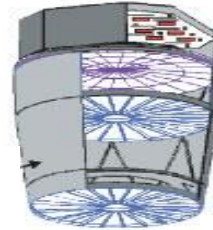
- Modélisation des sources, du parcours des messagers, de l'instrument de détection

Rayons cosmiques d'énergie extrême

Particule d'énergie
extrême $E > 3 \times 10^{19}$ eV

(proton, neutrino...) JEM-EUSO

interagit avec un
noyau atomique
dans l'atmosphère



Focalisation par lentilles de Fresnel,
Imagerie par photomultiplicateurs

200 Kpix, résolution 0.7 km, timing 2 μ s

Prévu sur ISS en 2017.

Atmosphère comme calorimètre

- masse d'air 10^{12} t.
- surface sol $\varnothing 250$ km (> 50 x Auger)

Fluorescence
de l'air en UV

Gerbe étendue
de particules
dans l'atmosphère

粒子数

空気シャワー

Étude des astres inaccessibles autrement que par leur observation et modélisation

- **Les Messagers des Astres**
 - **Rayons cosmiques**
 - Particules (protons, noyaux), Neutrinos
 - **Ondes gravitationnelles**
 - Par des masses en mouvement (fusion d'étoiles neutrons, ...)
 - Photons
 - Sonder le spectre électromagnétique
- Détecter les messagers
 - Observatoires (Télescopes et Détecteurs spécialisés)
- Décoder leur message
 - Modélisation des sources, du parcours des messagers, de l'instrument de détection

Ondes gravitationnelles

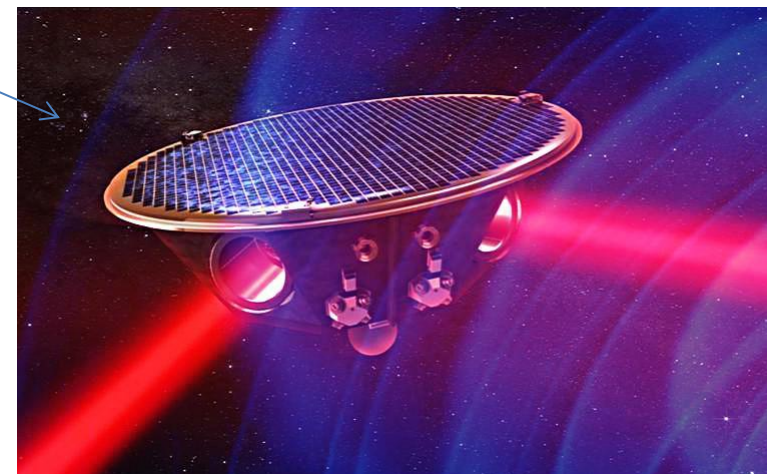
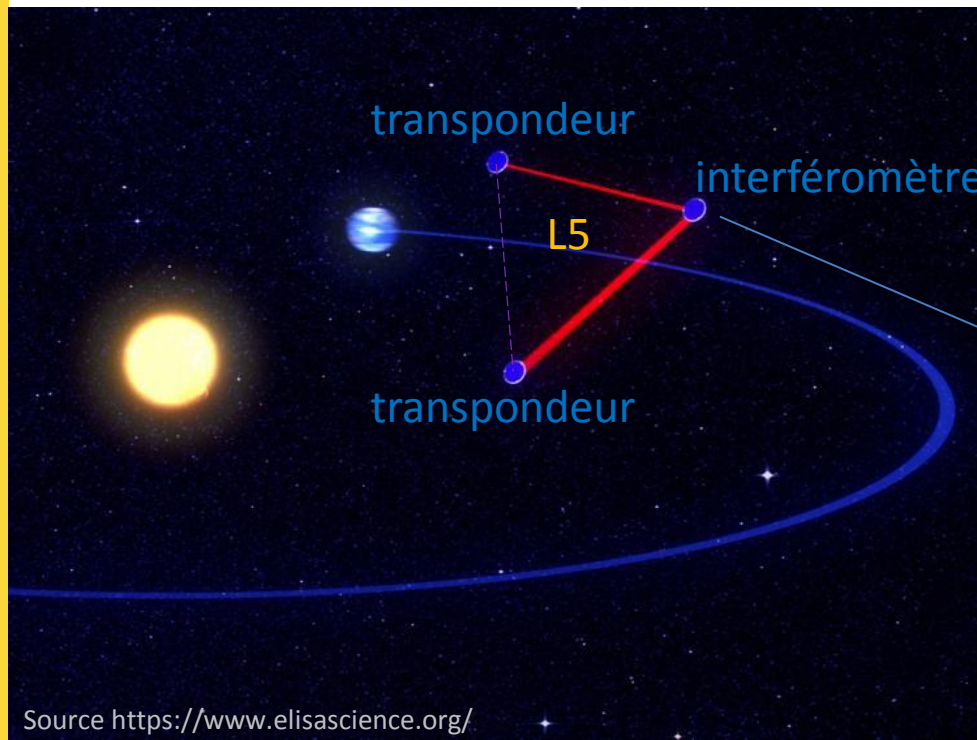
- Déformations de l'espace-temps qui se propagent (Relativité Générale)
- Émissions attendue par beaucoup de sources Galactiques,
 - coalescence d'étoiles à neutrons, systèmes binaires →
 - propagation fréq ~ 1 mHz (0.1 mHz-100 mHz)
 - longueur d'onde ~ 1 M km (inaccessible sur Terre)
- eLISA : concept de mission (Mission ESA L3, 2032)
 - Interféromètre Spatial avec 2 bras lasers
 - Mesure changement de distance entre 3 masses inertielles dans



3 satellites en orbite autour de L5

Technique très complexe

*Optique, Système de ref gravitationel
LISA Pathfinder prévue pour 2015*



Étude des astres inaccessibles autrement que par leur observation et modélisation

- **Les Messagers des Astres**
 - **Rayons cosmiques**
 - Particules (protons, noyaux), Neutrinos
 - **Ondes gravitationnelles**
 - Par des masses en mouvement (fusion d'étoiles neutrons, ...)
 - **Photons**
 - Sonder le spectre électromagnétique
- **Détecter les messagers**
 - **Observatoires (Télescopes et Détecteurs spécialisés)**
- **Décoder leur message**
 - **Modélisation des sources, du parcours des messagers, de l'instrument de détection**

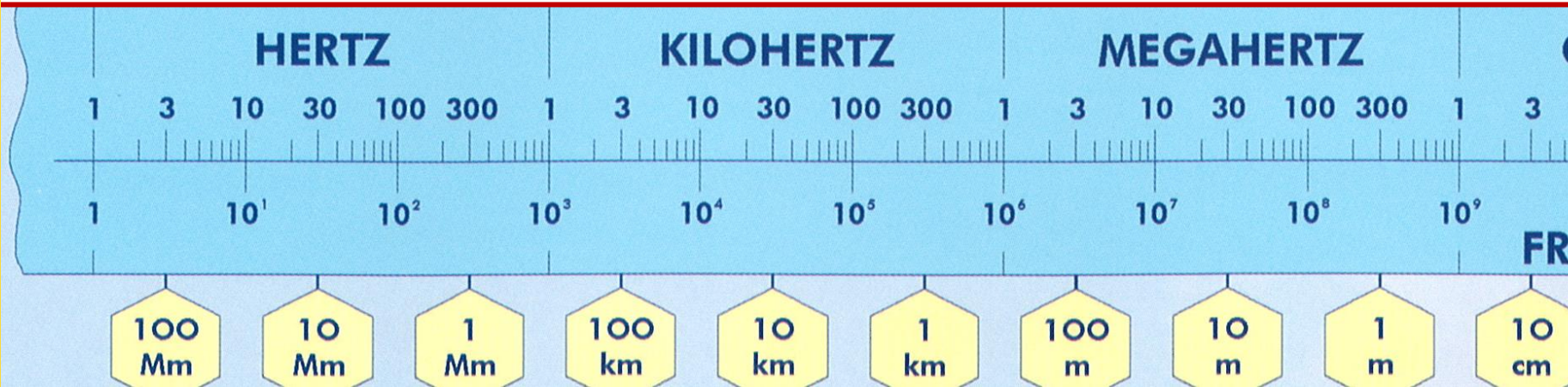
- **Sensibilité, permet de voir des sources faibles, nécessite:**
 - Grande surface de détection
 - Peu de bruit
- **Imagerie**
 - Champ de vue (portion du ciel visible)
 - Résolution spatiale (taille du pixel)
- **Spectroscopie**
 - **Domaine spectral (bande d'énergie)**
 - Résolution spectrale (résolution en énergie)
- **Timing**
 - Mode image: temps de pose
 - Mode photon: datation des photon
 - Datation absolue (Temps Universel), datation relative entre photons
 - Traitement de Coïncidences fortuites, Événements multiples, etc...
 - Temps-mort
- **Temps-réel**
 - Capacité d'analyse et de décision autonome à bord
 - Délais de traitement et de communication au sol pour des observations de suivi par d'autres moyens

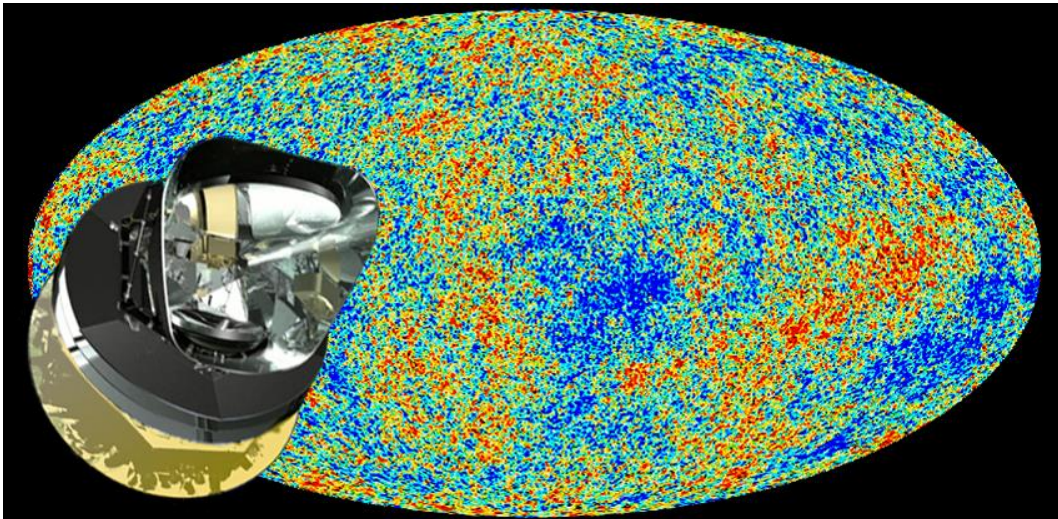
Un observatoire ne peut pas être bon dans tous les domaines à la fois

100%

OPACITE DE L'ATMOSPHERE AUX ONDES ELECTROMAGNETIQUES

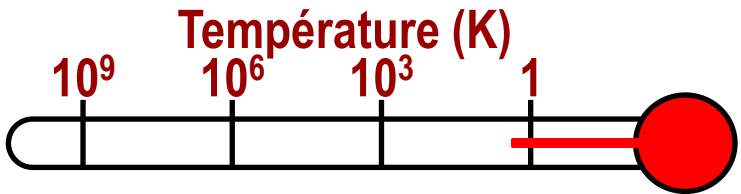
0%



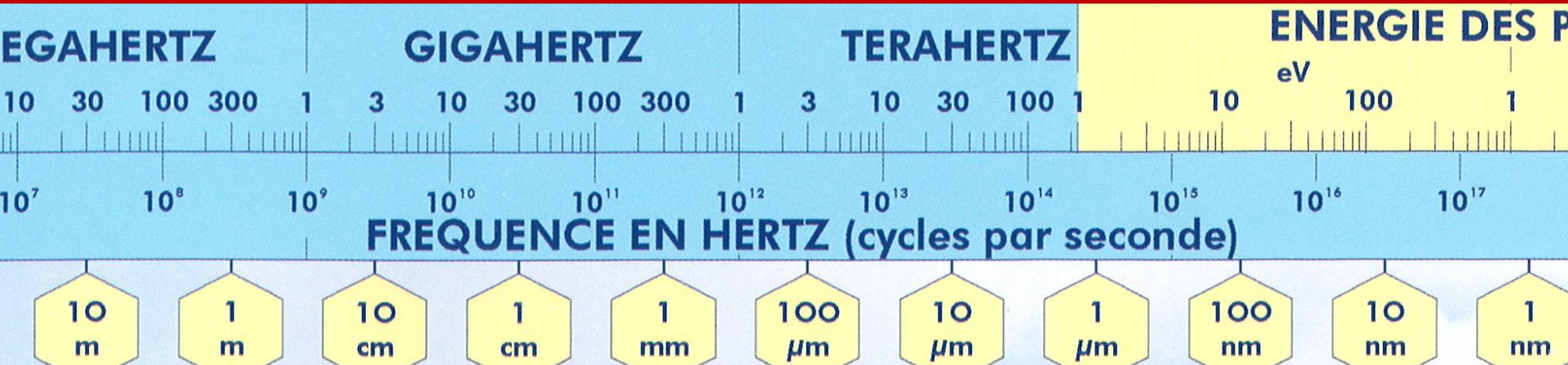


Fond Diffus Cosmologique

corps noir à 2.7 K
anisotropies $\sim 10^{-5}$



PLANCK (ESA, 2009-2013) $355-10\ 000\ \mu\text{m}$

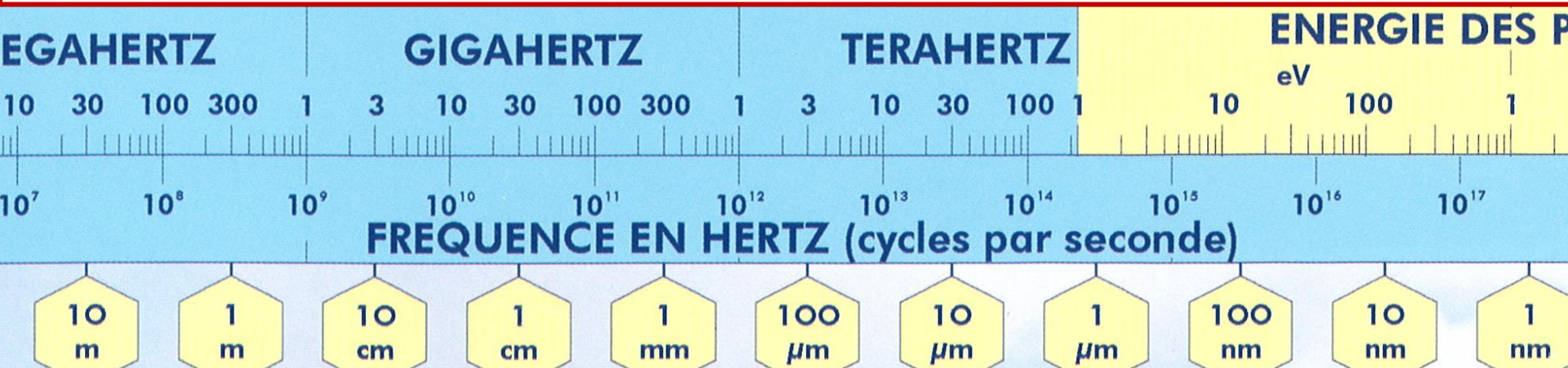
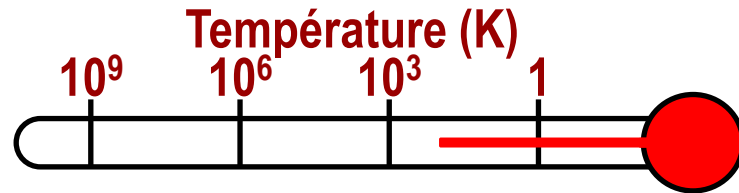


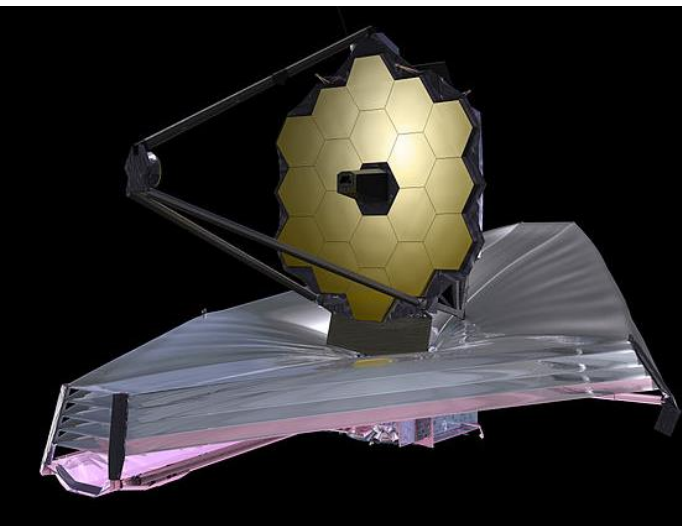


HERSCHEL (ESA, 2009-2013)

55-670 μm

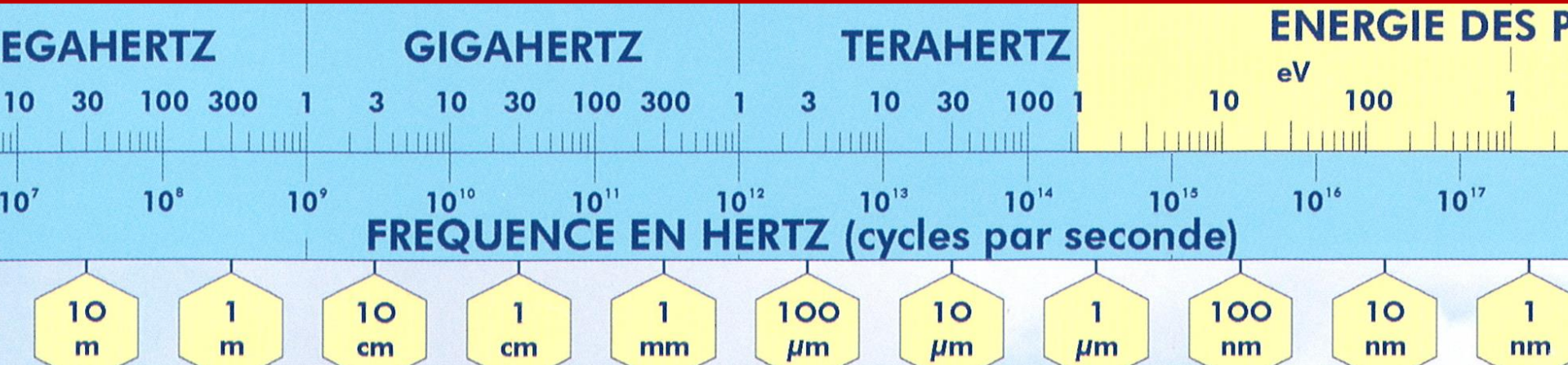
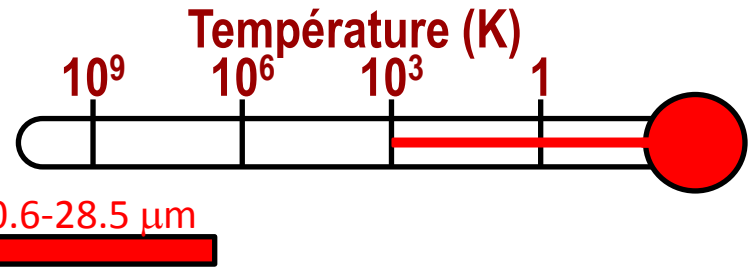
**Gaz froid du milieu interstellaire,
Filaments de matière qui condensent en étoiles**

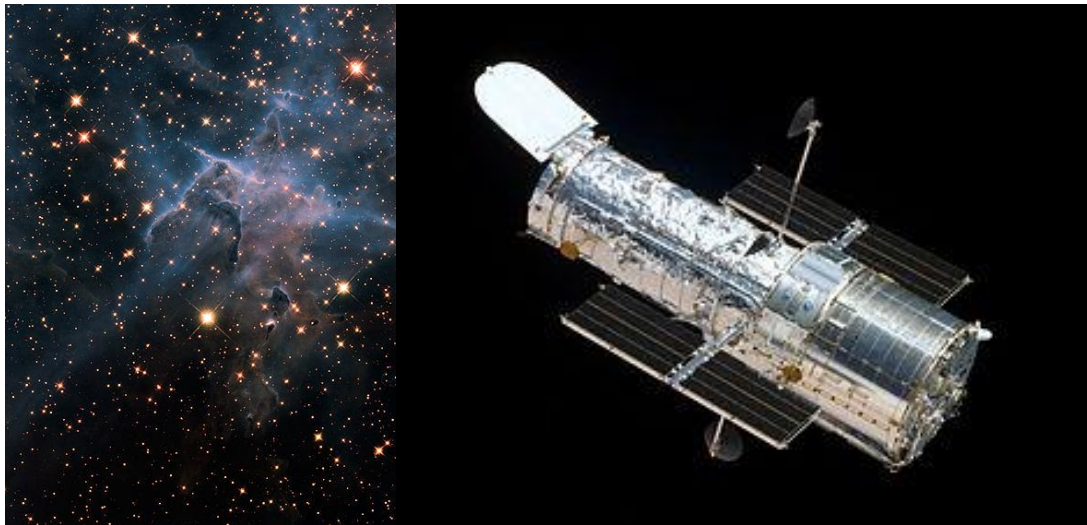




JWST (NASA+ESA > 2018)

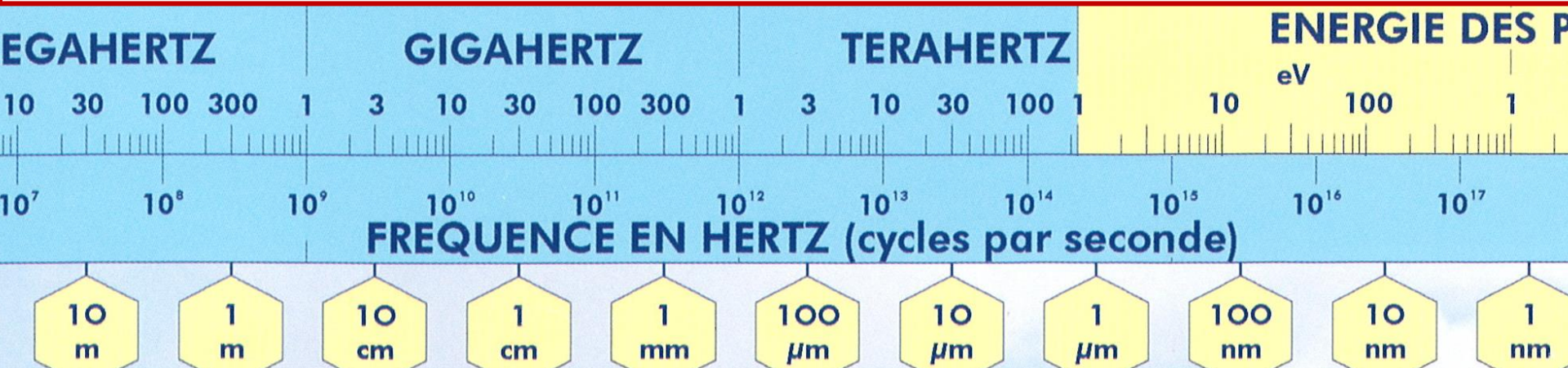
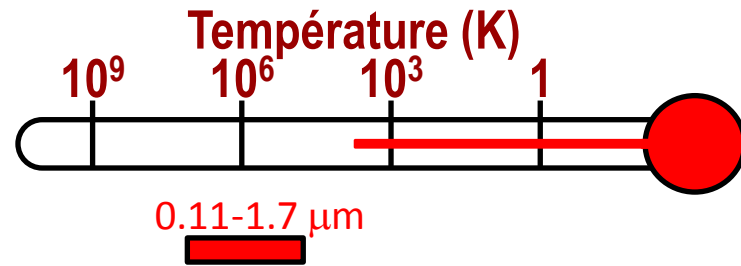
**Objets lointains,
Galaxies
décalées vers le rouge**





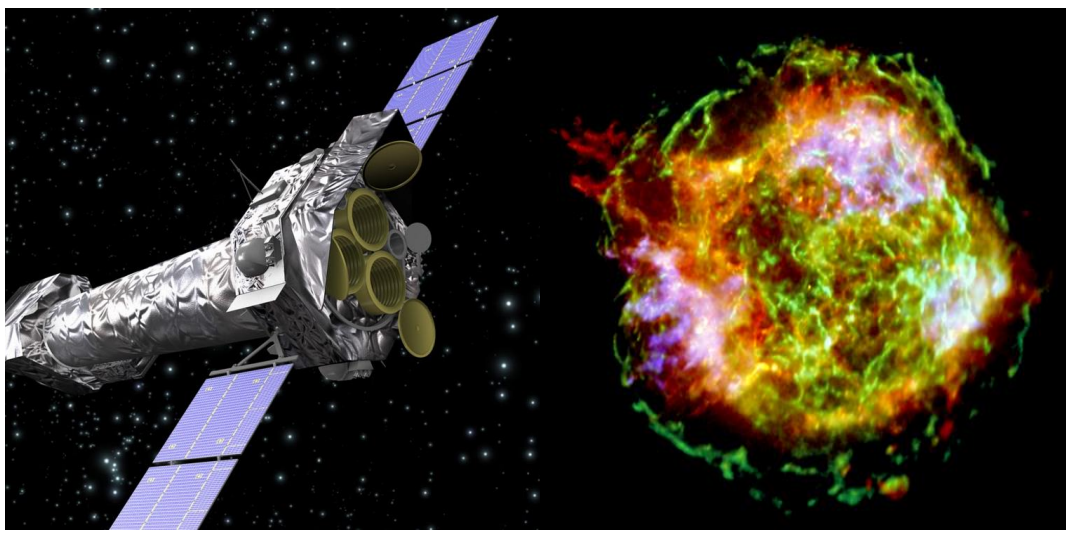
HST (NASA, 1990)

**Etoiles, galaxies,
dans le visible,
IR et UV proche**





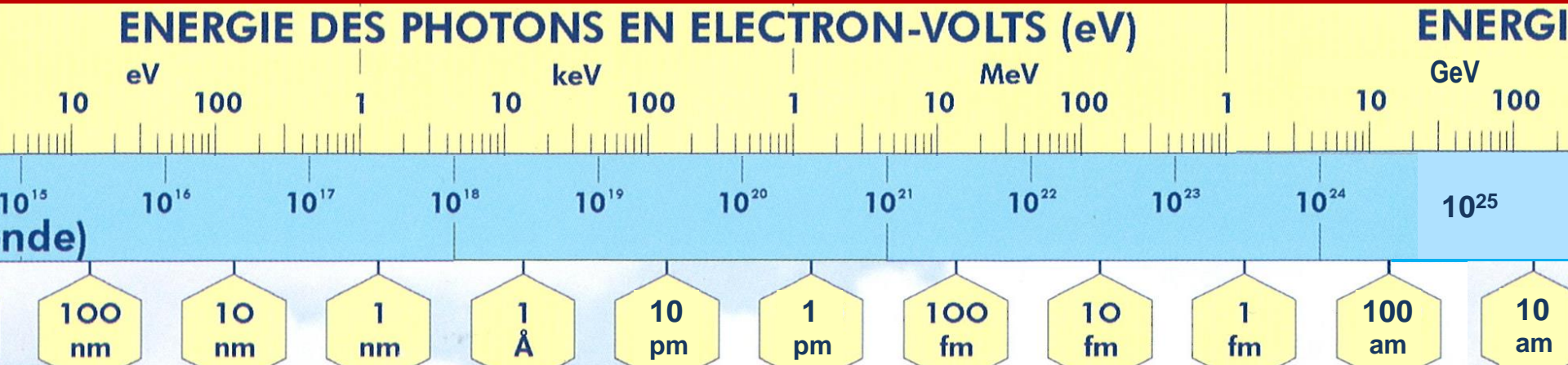
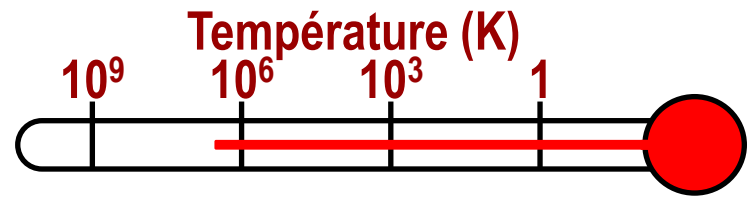
OPACITE DE L'ATMOSPHERE AUX ONDES ELECTROMAGNETIQUES



**Explosion de supernova,
et autres
sources de rayons X**

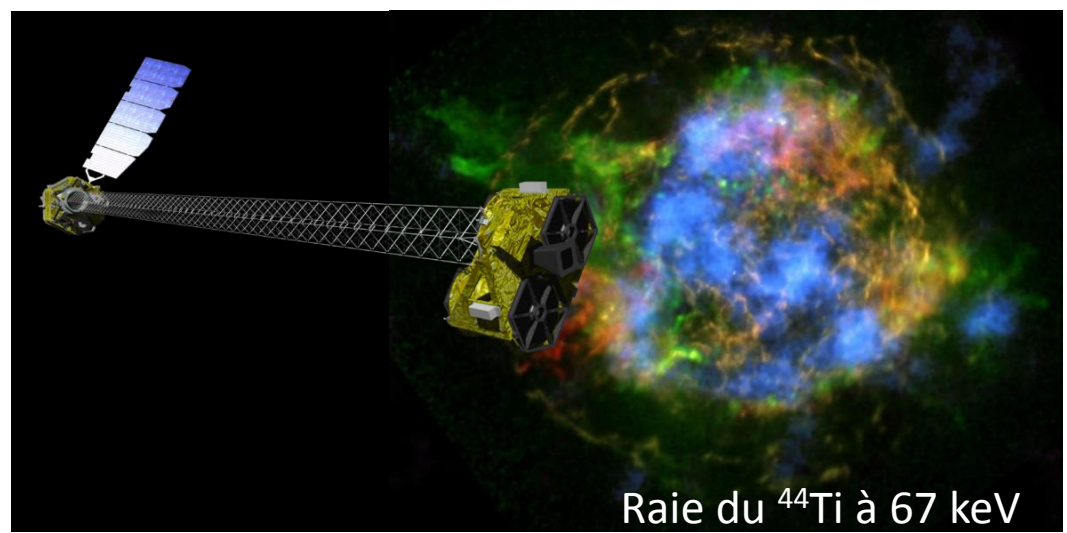
XMM Newton (ESA, 1999)

0.2-12 keV





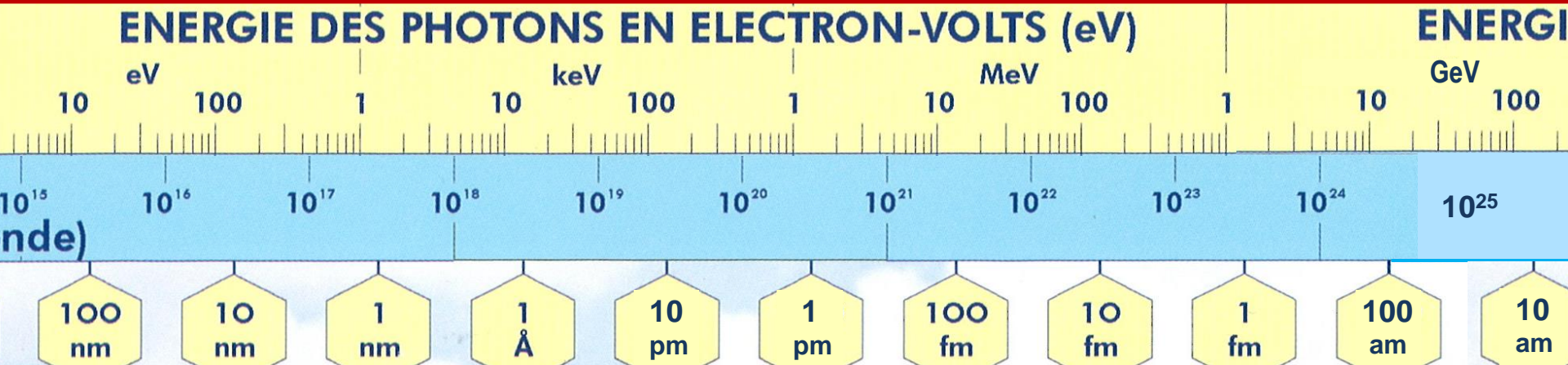
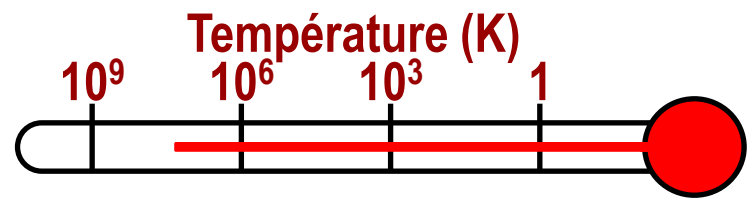
OPACITE DE L'ATMOSPHERE AUX ONDES ELECTROMAGNETIQUES



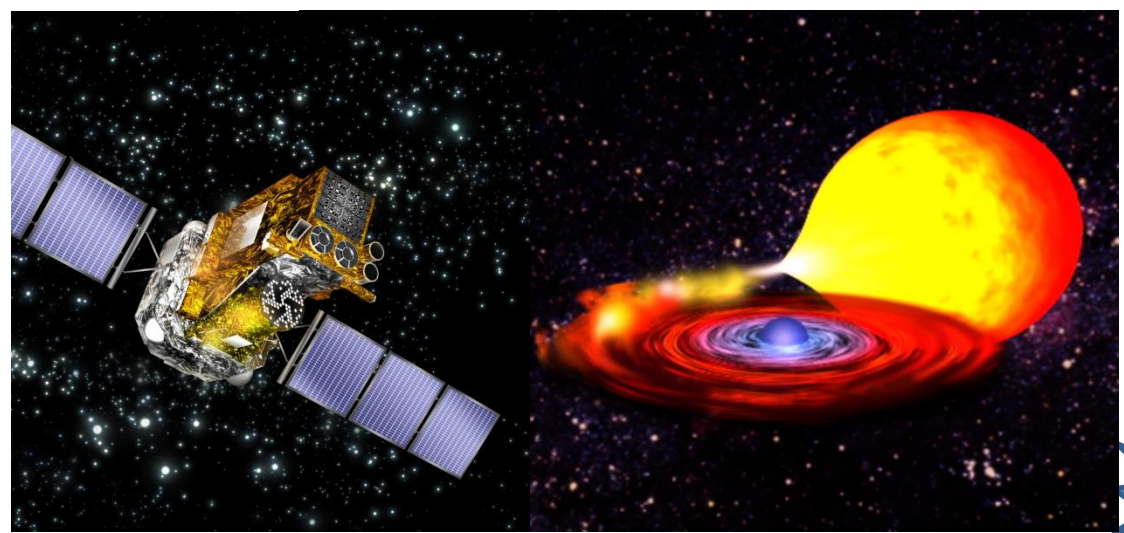
NuSTAR (NASA, 2012)

5-80 keV

Explosion de supernova
et autres
sources en rayons X
et gamma mous



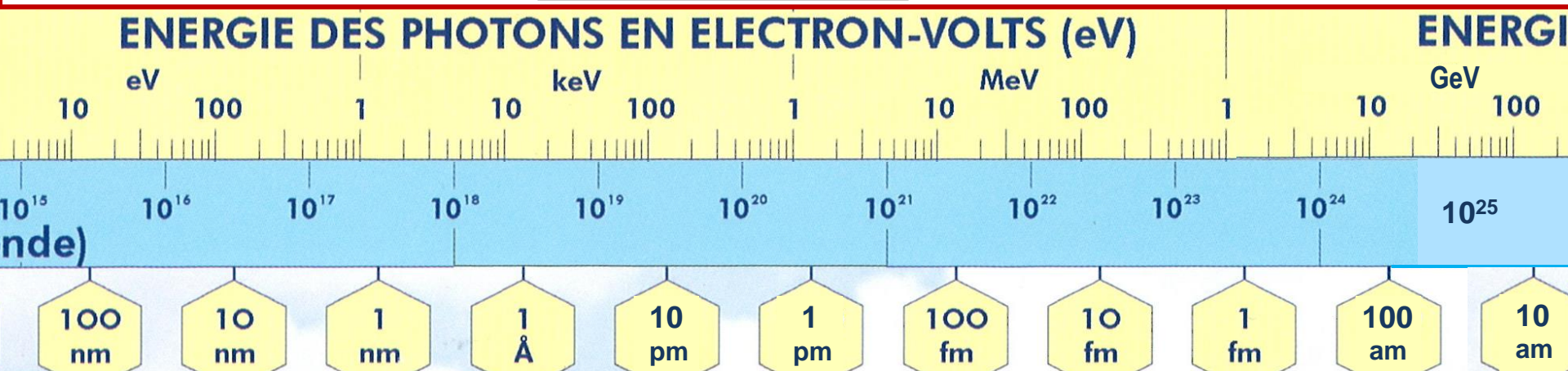
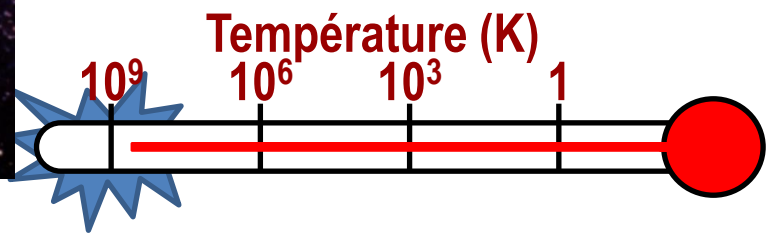
OPACITE DE L'ATMOSPHERE AUX ONDES ELECTROMAGNETIQUES



Accrétion de matière
autour de trous noirs,
et autres sources gamma

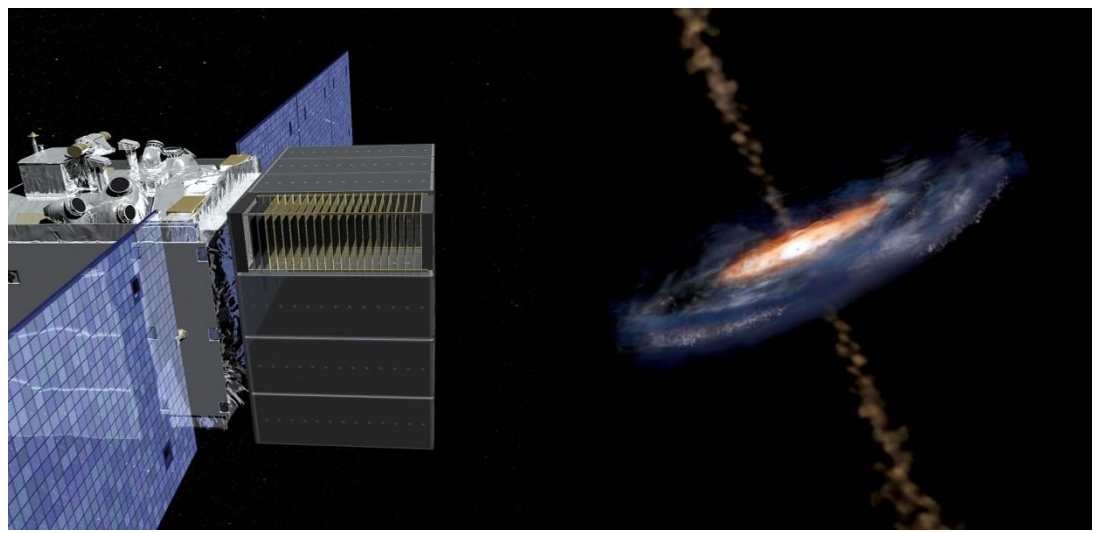
INTEGRAL (ESA, 2002)

20-8000 keV





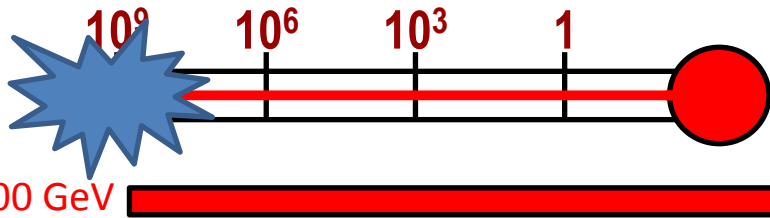
OPACITE DE L'ATMOSPHERE AUX ONDES ELECTROMAGNETIQUES



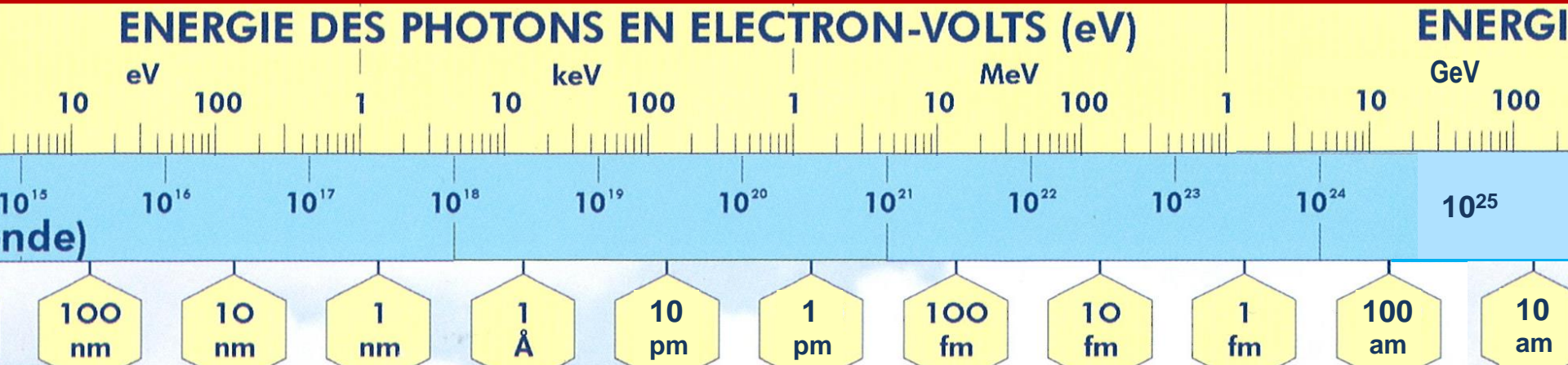
FERMI (NASA, 2008)

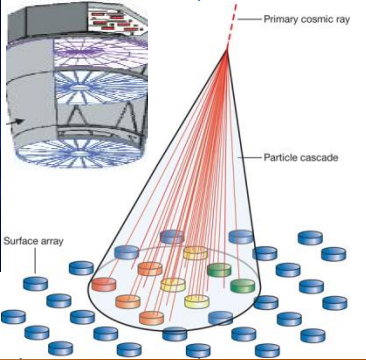
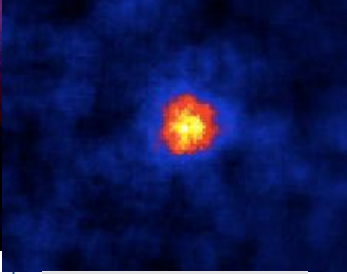
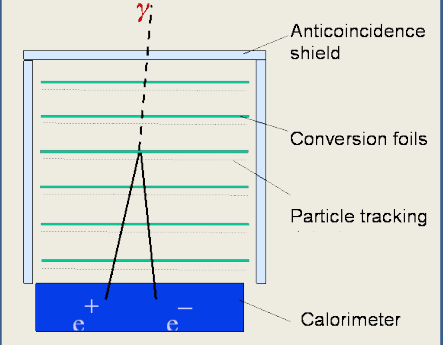
**Noyaux actifs de galaxies,
et autres sources gamma
à haute énergie**

**Emission non Thermique
(synchrontron, compton inv)**



30 MeV-300 GeV





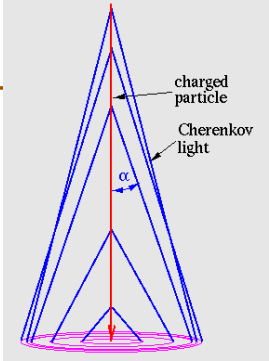
Nébuleuse et Pulsar du Crabe (en visible, X, et TeV)



FERMI



HESS

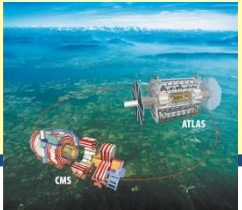


AUGER / EUSO

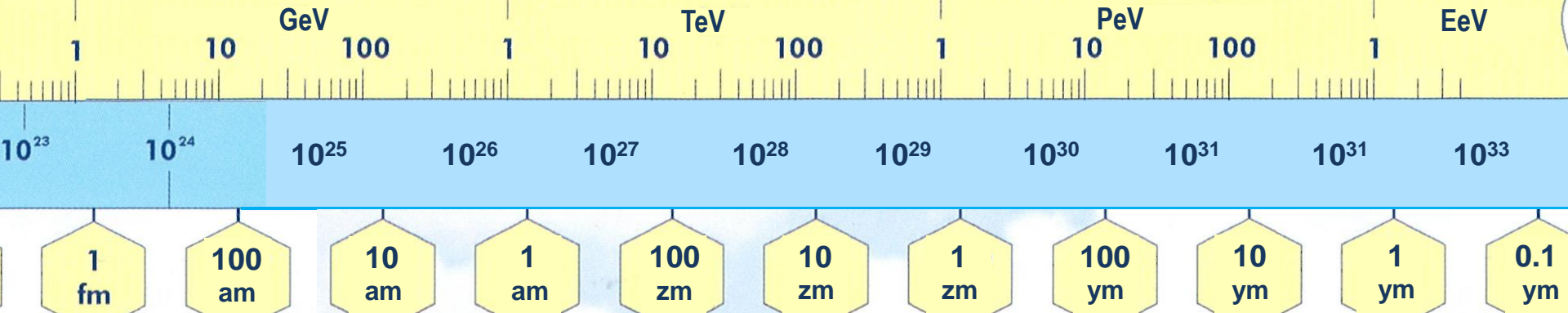
Rayons cosmiques

LHC au CERN
14 TeV

Rayons cosmiques d'ultra haute énergie (des particules!)



ENERGIE DES PHOTONS EN ELECTRON-VOLTS (eV)

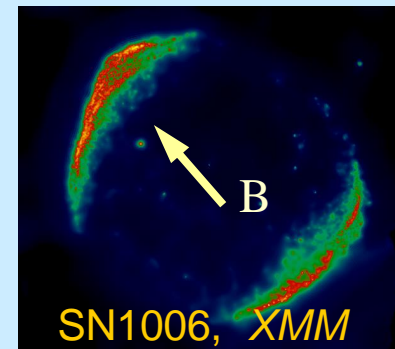
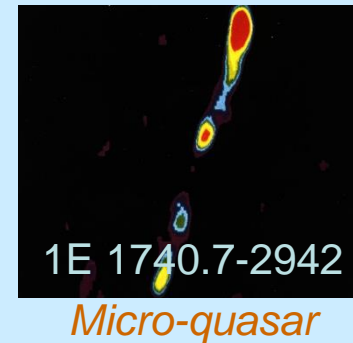
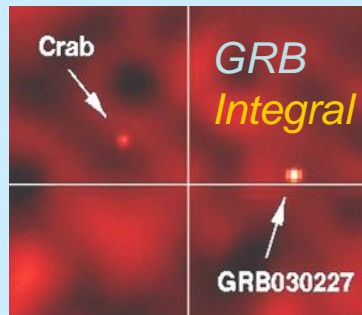


Faire de la Physique dans l'Espace, un exemple concret

***Astronomie gamma
avec le Télescope SPI
sur le satellite INTEGRAL***

Sources de rayons γ étudiées

- **Pulsars / nébuleuses synchrotron**
électromagnétisme extrême
- **Systèmes binaires**
(étoile à neutron ou trou noir + compagnon)
et Trous noirs supermassifs (AGN)
disques d'accrétion et jets
- **Sursauts gamma (GRB)**
jets relativistes, chocs
- **Supernovas (explosions d'étoiles)**
nucléosynthèse : raies gamma
- **Vestiges de supernovas**
accélération de « rayons cosmiques »



**Toutes ces sources produisent des particules chargées accélérées.
Interactions électromagnétique, nucléaire, ou processus phys. h. én.
=> Emission de photons non thermiques (dont rayons gamma)**

INTEGRAL *INTE*rnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory

imageur IBIS



Observatoire spatial γ européen

- 1989 : proposition à l'ESA
- 1993 : sélection par l'ESA
- 2002 : lancement
- aujourd'hui : 12 ans en opérations

Télescopes à masque codés (on ne peut focaliser les rayons γ)

- Imageur IBIS (ISGRI)
 - optimisé pour sources compactes:
 - excellente résolution angulaire

$$\Delta R \sim 12 \text{ arcmin}$$

$$15 \text{ à } 800 \text{ keV} \quad \Delta E = 15 \text{ keV @ } 100 \text{ keV}$$

- Spectromètre SPI
 - optimisé pour études de raies:
 - excellente résolution en énergie

$$20 \text{ keV à } 8 \text{ MeV} \quad \Delta E = 2 \text{ keV @ } 511 \text{ keV}$$

$$\Delta R \sim 2.6^\circ$$

ISGRI
(CdTe)

spectromètre SPI

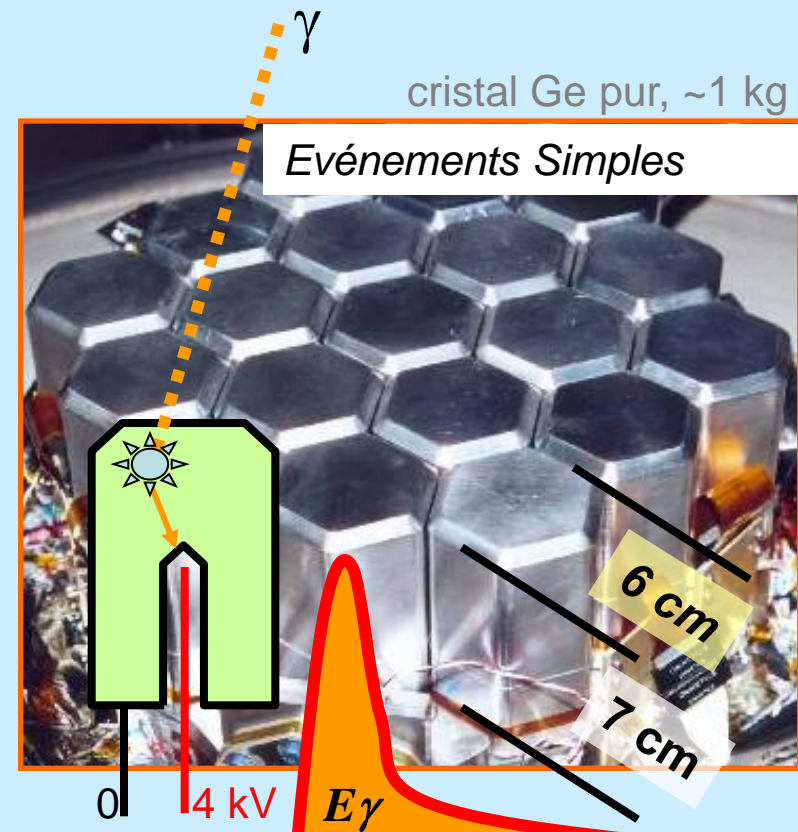
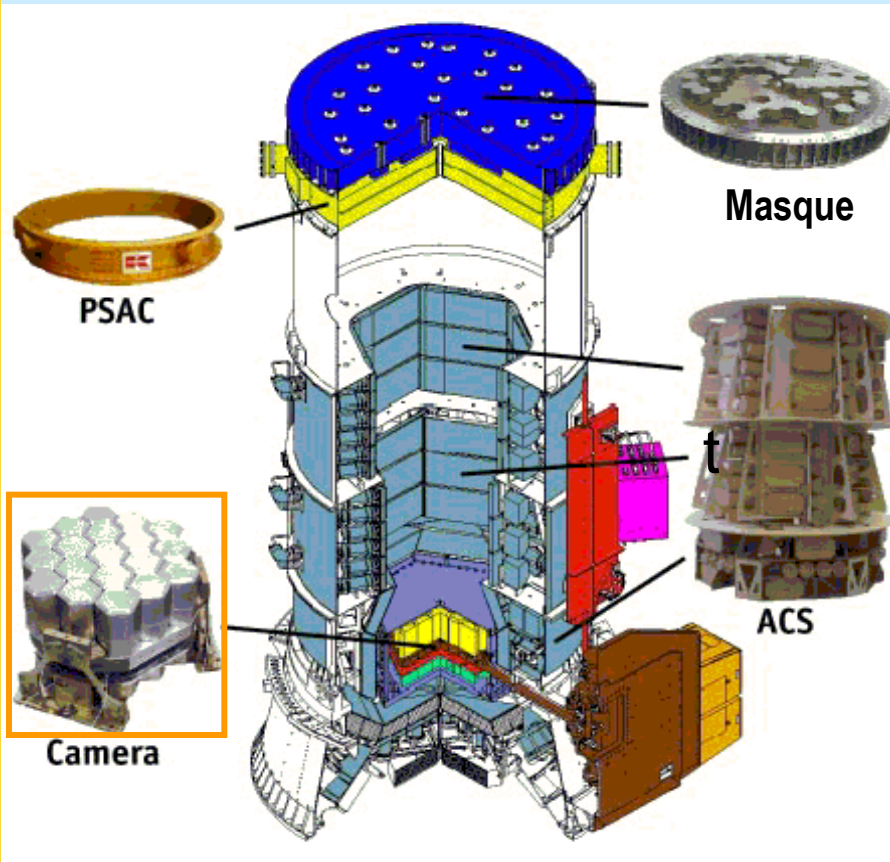
+ Moniteur X (Jem-X)
+ Moniteur de particules (IREM)
+ Caméra visible (OMC)

SPI : Spectromètre pour INTEGRAL

Spectro(-imageur) gamma
20 keV – 8 MeV

Caméra (IRAP, Toulouse)

- détecteurs 19 germanium (508 cm²)
- refroidis ~80 K (cryogénie)
- résolution spectrale : 2 keV à 511 keV
*dégradée par cosmiques (pièges),
récupérée par recuits tous les 6 mois*



Maître d'œuvre : CNES

PI franco-allemand : IRAP + MPE

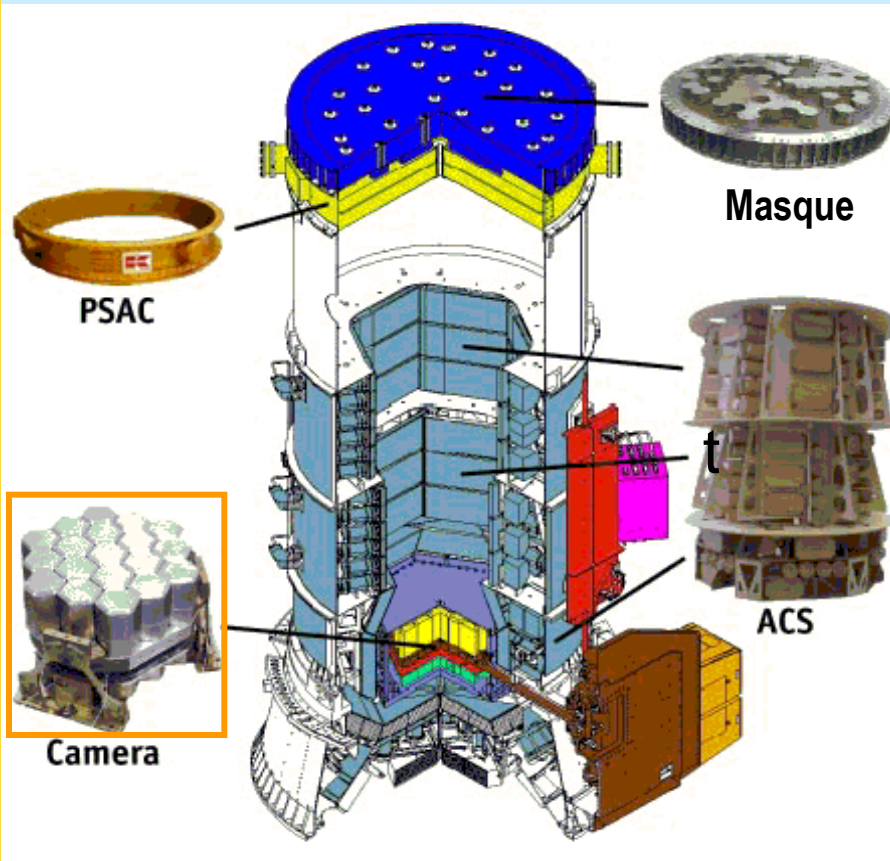
Vedrenne et al, A&A (2003)

Dimensions: 238 cm(H) x 110 cm(Ø)

Poids: 1300 kg; Puissance: 373 W; Débit: 20 kbit/s

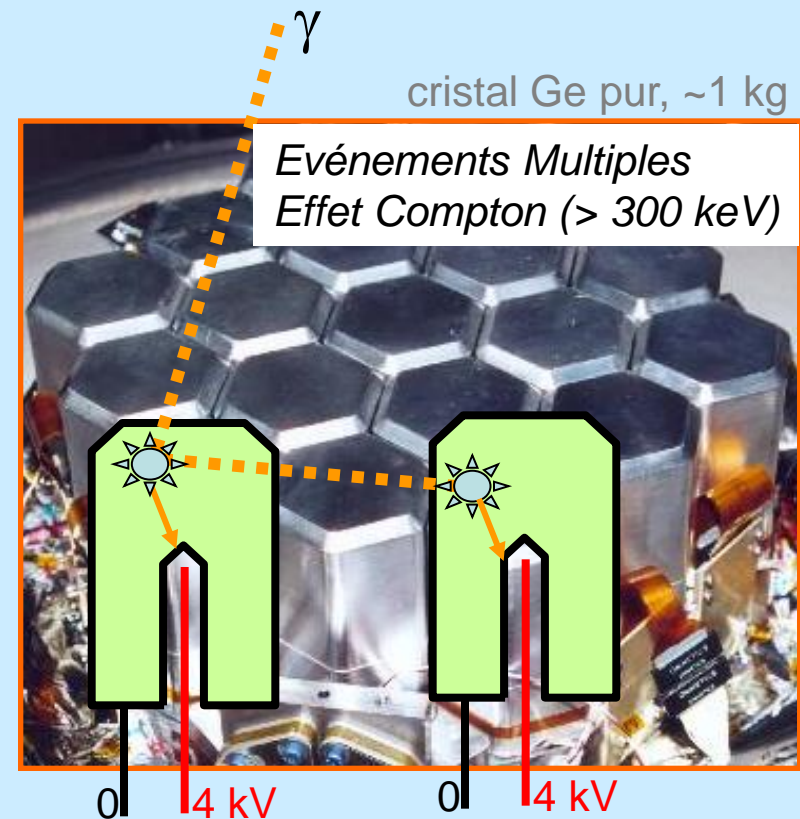
SPI : Spectromètre pour INTEGRAL

Spectro(-imageur) gamma
20 keV – 8 MeV



Caméra (IRAP, Toulouse)

- détecteurs 19 germanium (508 cm²)
- refroidis ~80 K (cryogénie)
- résolution spectrale : 2 keV à 511 keV
*dégradée par cosmiques (pièges),
récupérée par recuits tous les 6 mois*



Maître d'œuvre : CNES

PI franco-allemand : IRAP + MPE

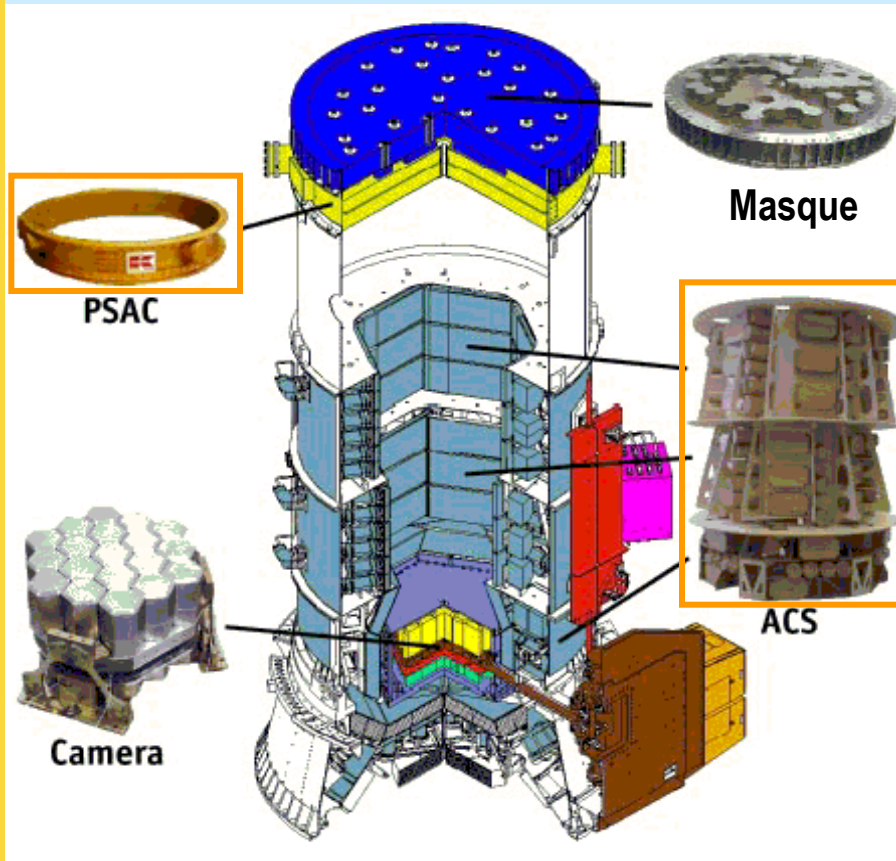
Vedrenne et al, A&A (2003)

Dimensions: 238 cm(H) x 110 cm(\varnothing)

Poids: 1300 kg; Puissance: 373 W; Débit: 20 kbit/s

SPI : Spectromètre pour INTEGRAL

Spectro(-imageur) gamma
20 keV – 8 MeV



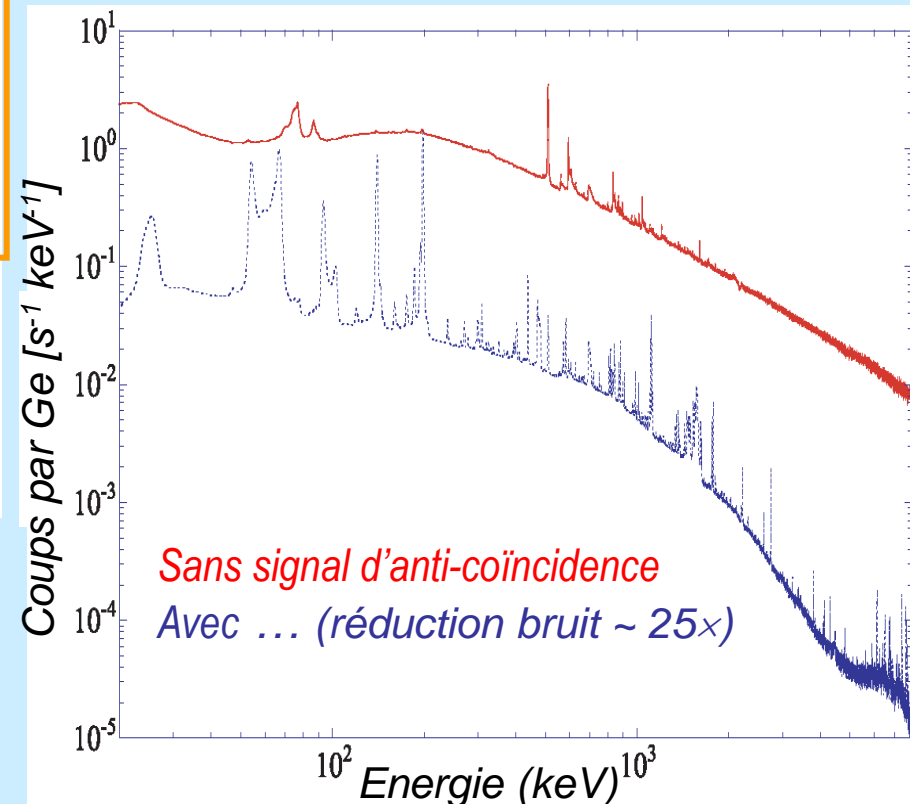
Anti-coïncidence active

- Puits ACS (MPE)

91 cristaux de scintillateur BGO
(rejet événements latéraux > 80 keV)

- PSAC

Scintillateur plastique sous le masque
(rejet activation masque)



Maître d'œuvre : CNES

PI franco-allemand : IRAP + MPE

Vedrenne et al, A&A (2003)

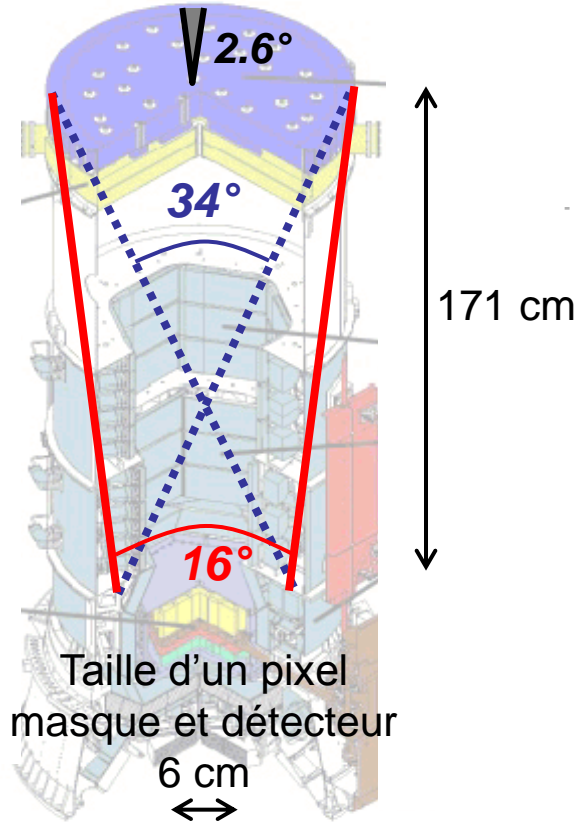
Dimensions: 238 cm(H) x 110 cm(Ø)

Poids: 1300 kg; Puissance: 373 W; Débit: 20 kbit/s

SPI : Spectromètre pour INTEGRAL

Spectro(-imageur) gamma
20 keV – 8 MeV

géométrie



Masque codé

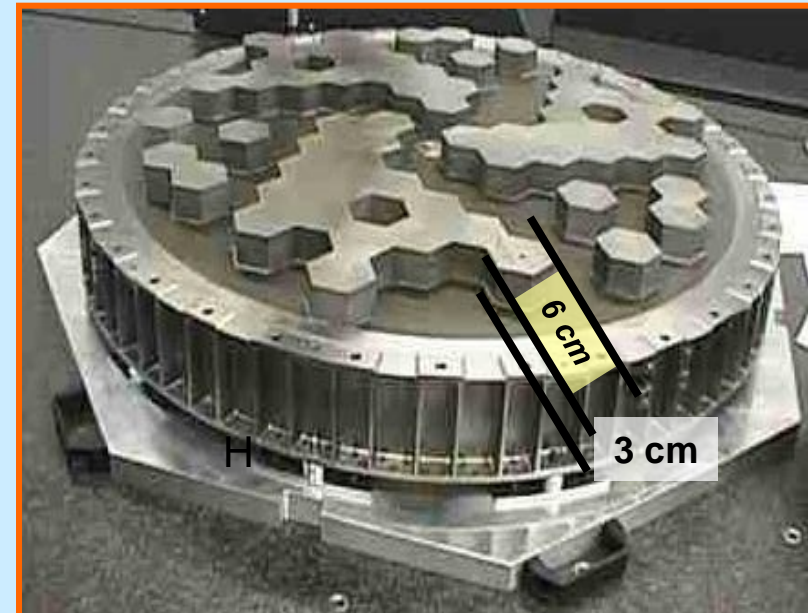
- 63 pavés de Tungstène (W)
épais (3 cm), opaques (95% à 1.3MeV)
- 64 éléments transparents

Géométrie → Capacités d'imagerie :

résolution angulaire : ~ 2.6°

champ de vue total : 34°

totallement codé : 16°



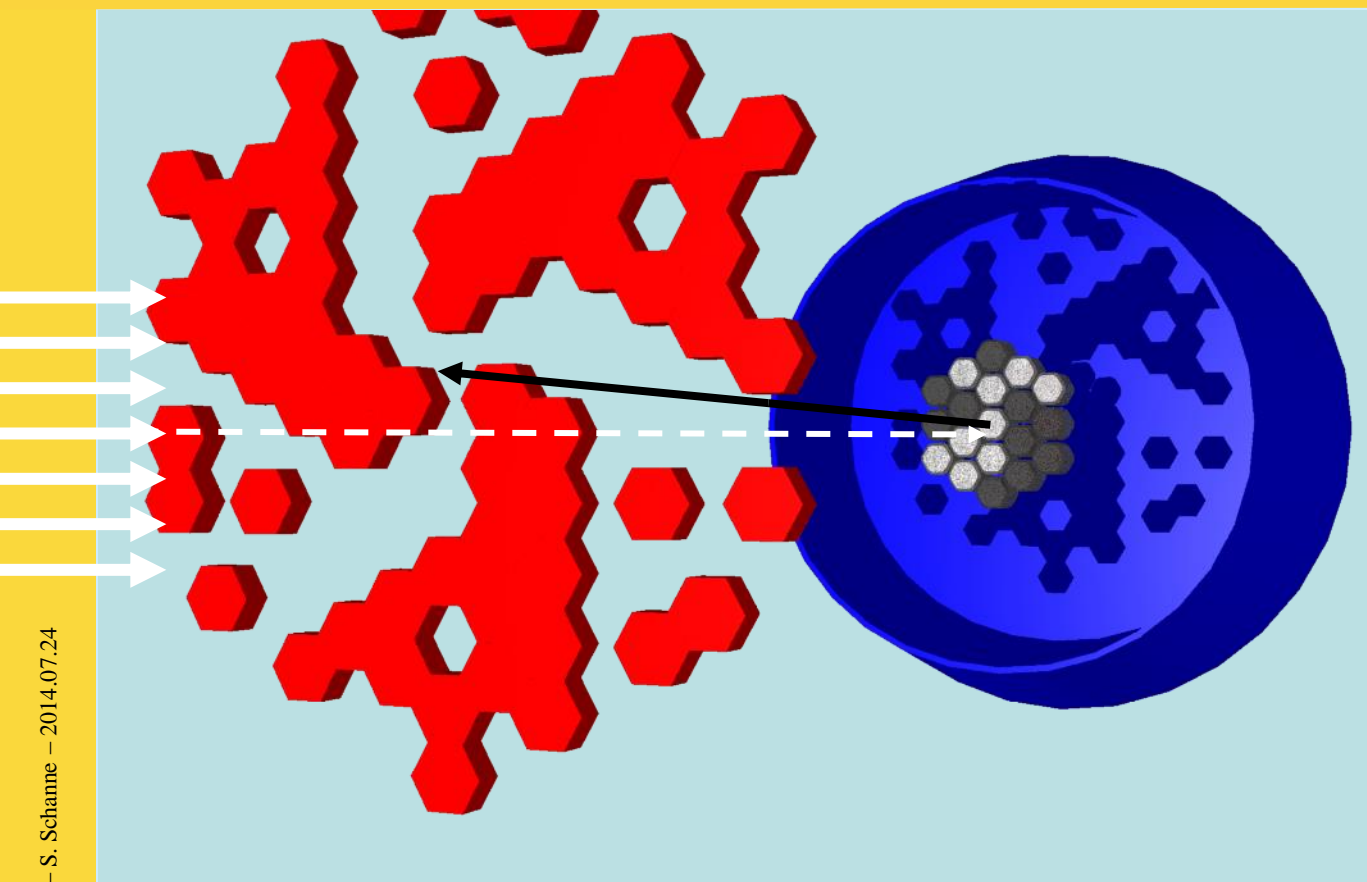
Maître d'œuvre : CNES

PI franco-allemand : IRAP + MPE

Vedrenne et al, A&A (2003)

Dimensions: 238 cm(H) x 110 cm(Ø)

Poids: 1300 kg; Puissance: 373 W; Débit: 20 kbit/s

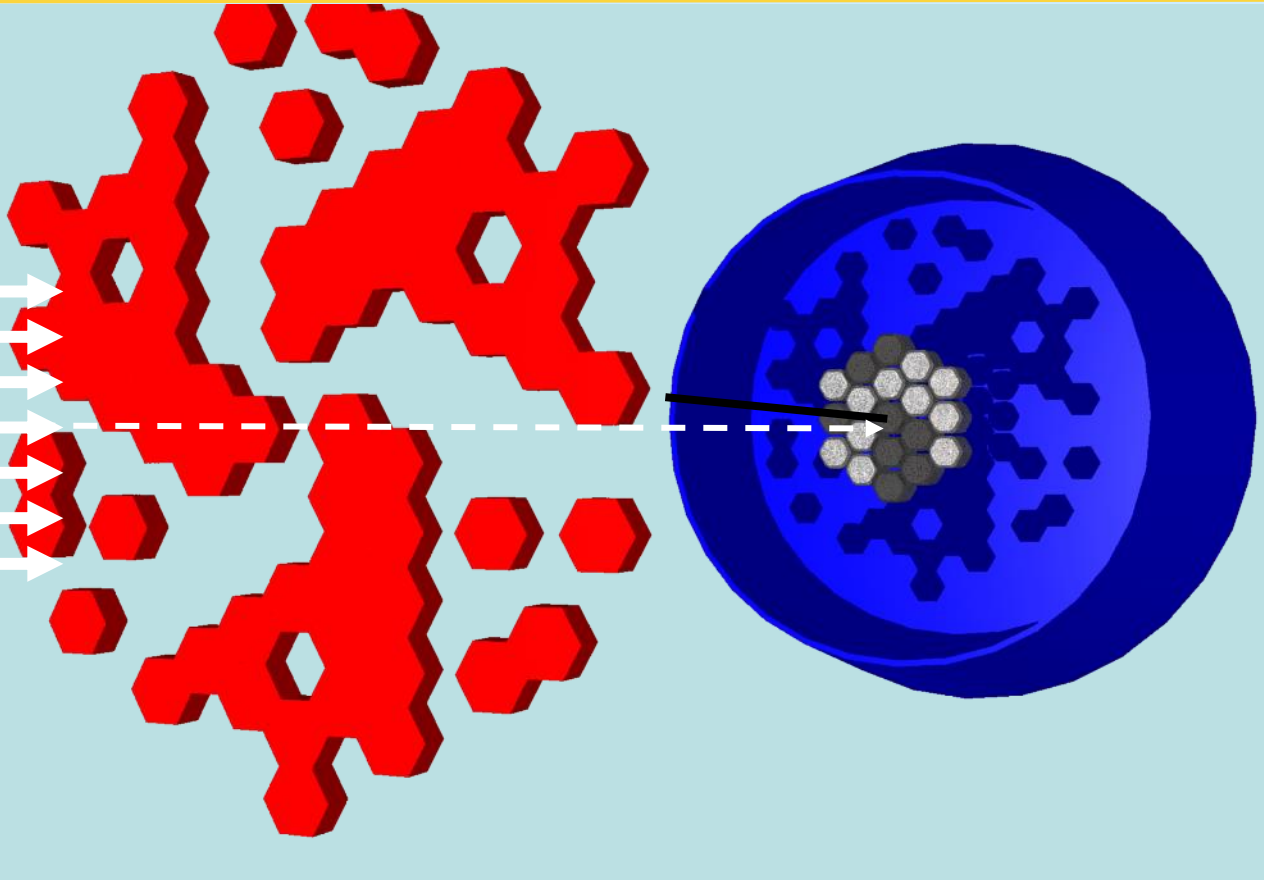


modulation spatiale:

Une source projette l'ombre du masque sur plan détecteur.

Motif projeté
⇒ direction de source

- **Déconvolution** de l'image détecteur par le motif du masque.
- Repointage du satellite après chaque pose de 30 min (« dithering ») permet d'avoir virtuellement plus de détecteurs



modulation spatiale:

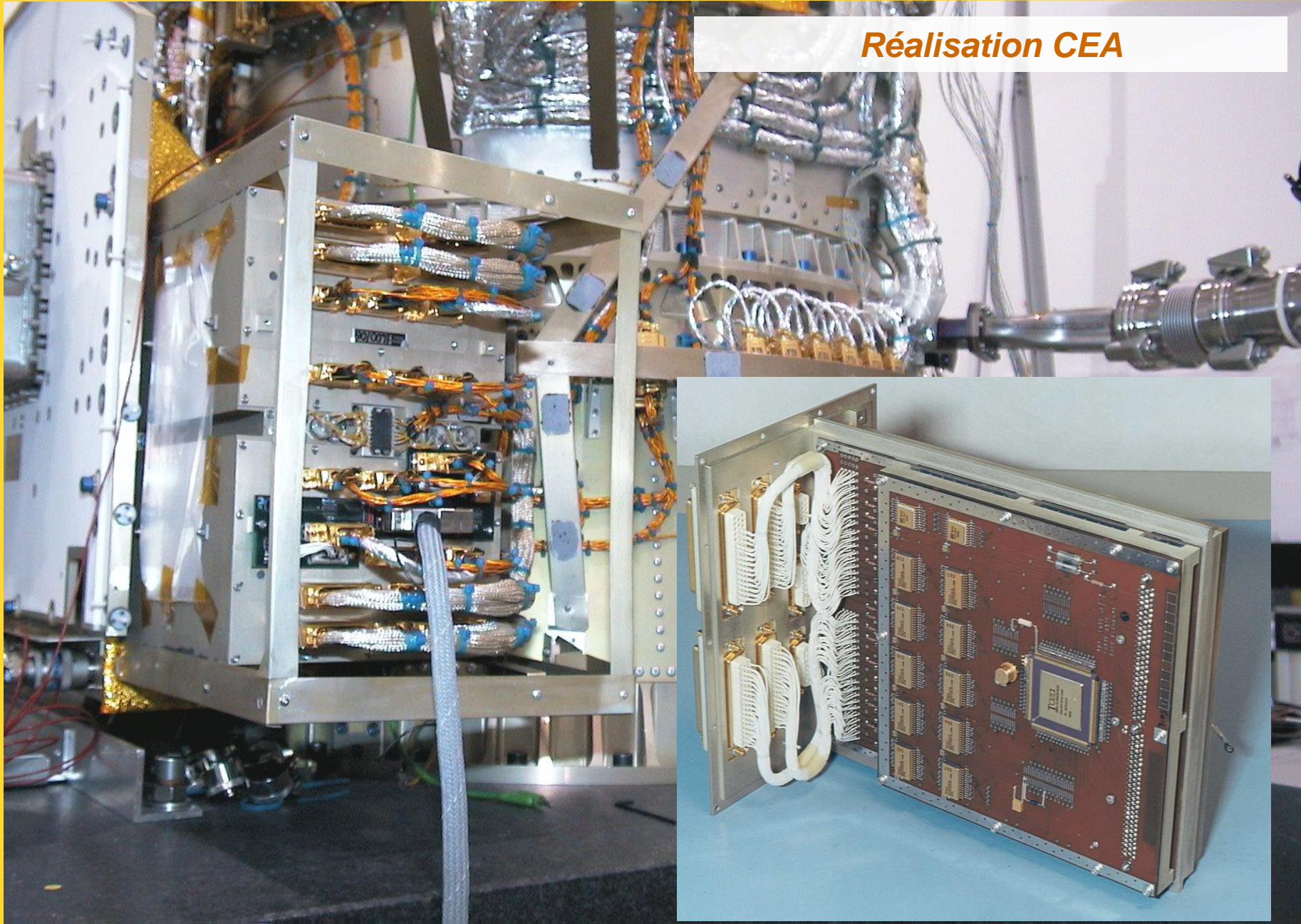
Une source projette l'ombre du masque sur plan détecteur.

Motif projeté
⇒ direction de source

- **Déconvolution** de l'image détecteur par le motif du masque.
- Repointage du satellite après chaque pose de 30 min (« dithering ») permet d'avoir virtuellement plus de détecteurs

Electronique numérique de SPI

Réalisation CEA



Etalonnage de SPI au sol

*valider réponse instrumentale générée par simulation Monte Carlo
sur toute la gamme d'énergie (20 keV-8 MeV) sous divers angles d'incidence*

CEA de Bruyères le Châtel (2001)

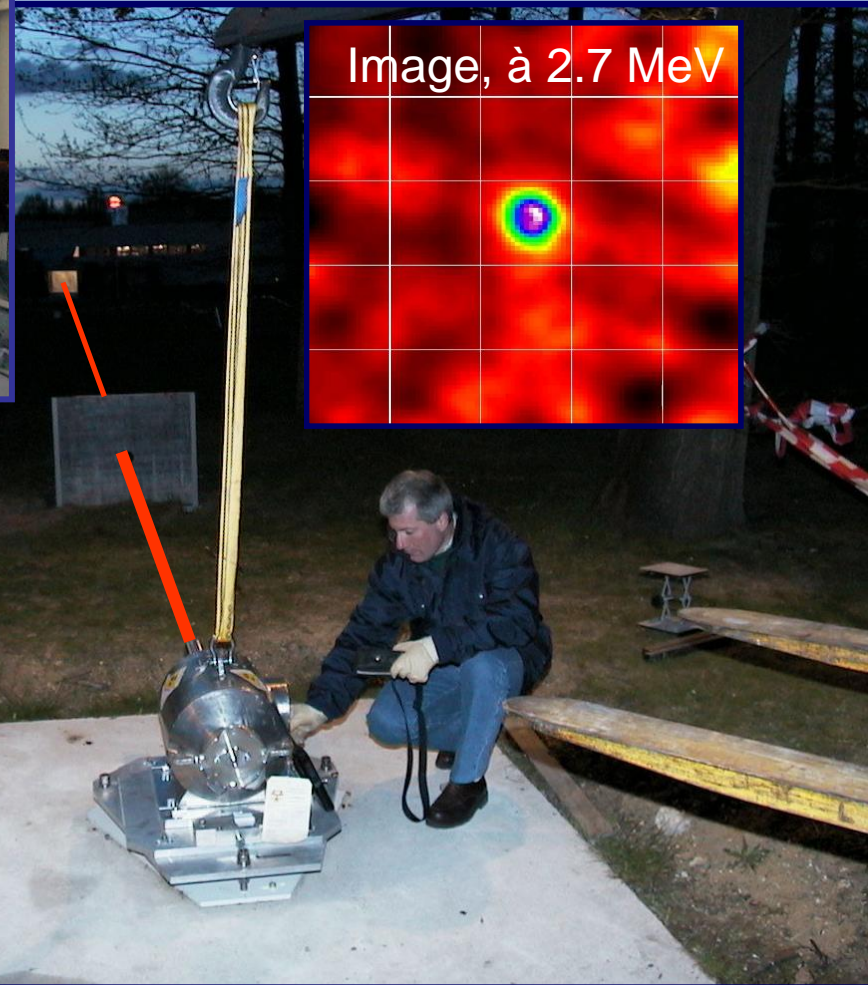
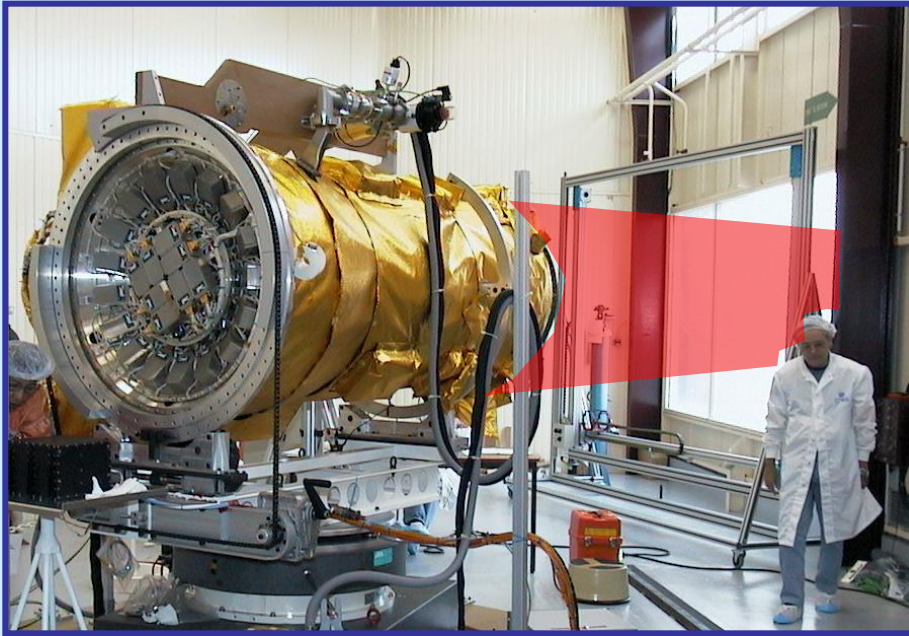
- salle blanche
- accélérateur
- sources radioactives



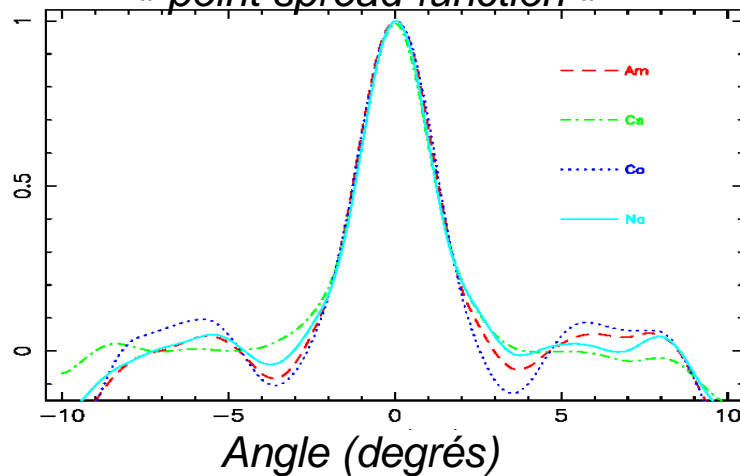
Etalonnage de SPI au sol

Test d'imagerie d'une source haute intensité à 125 m

^{24}Na fabriquée à Saclay / demi-vie 15 h
0.1 Curie / conteneur 550 kg

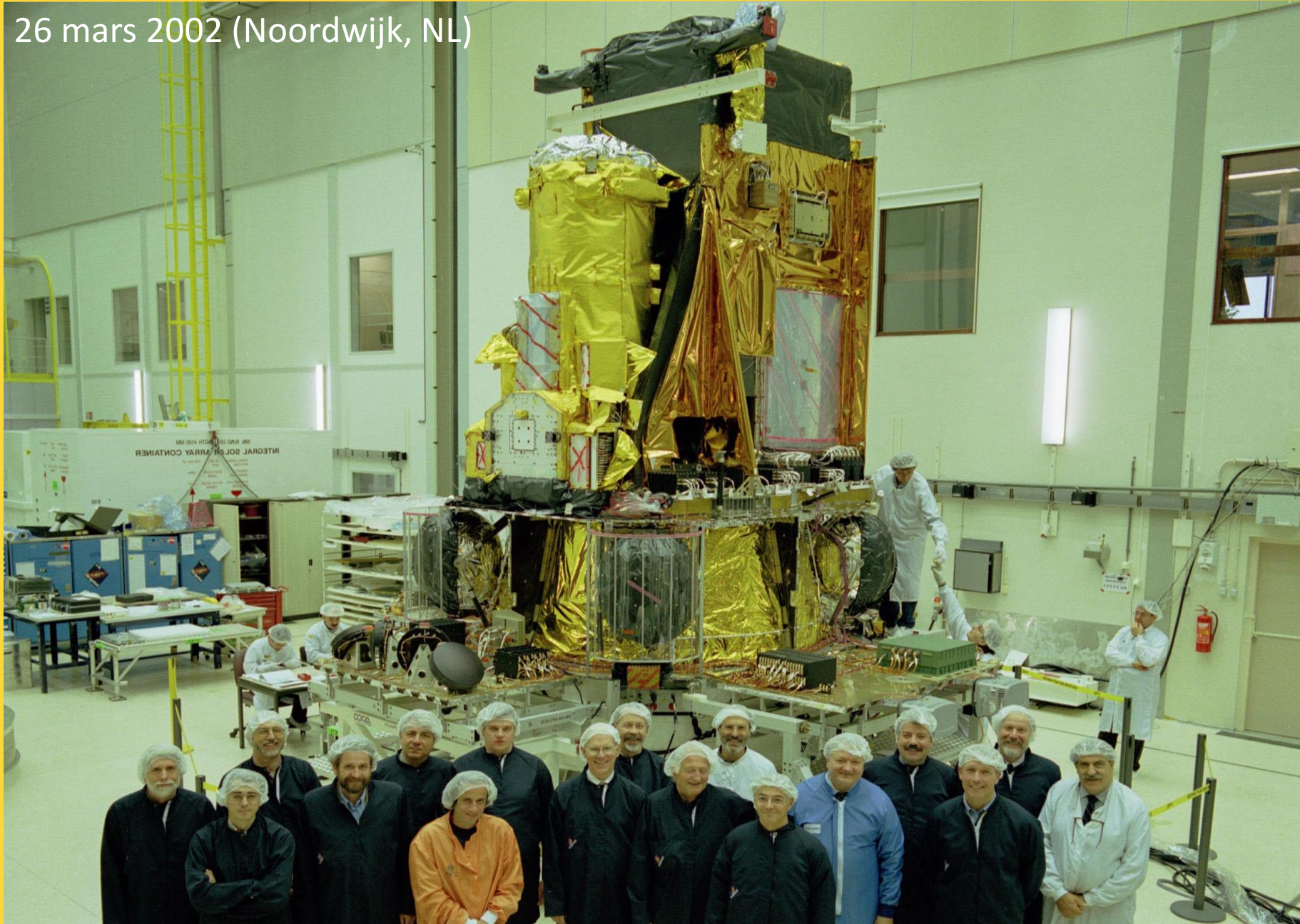


Résolution angulaire = 2.6°
« point spread-function »



Test d'INTEGRAL à l'ESTEC

26 mars 2002 (Noordwijk, NL)



Arrivée par Antonov à Baïkonour

24 août 2002 (Baïkonour, KZ)



Intégration au 4^{ème} étage de la fusée

2 oct 2002 (Baïkonour, KZ)



Assemblage de la fusée

10 oct 2002 (Baïkonour, KZ)



Déplacement au pas de tir

12 oct 2002 (Baïkonour, KZ)



Mise à la verticale

15 oct 2002 (Baïkonour, KZ)

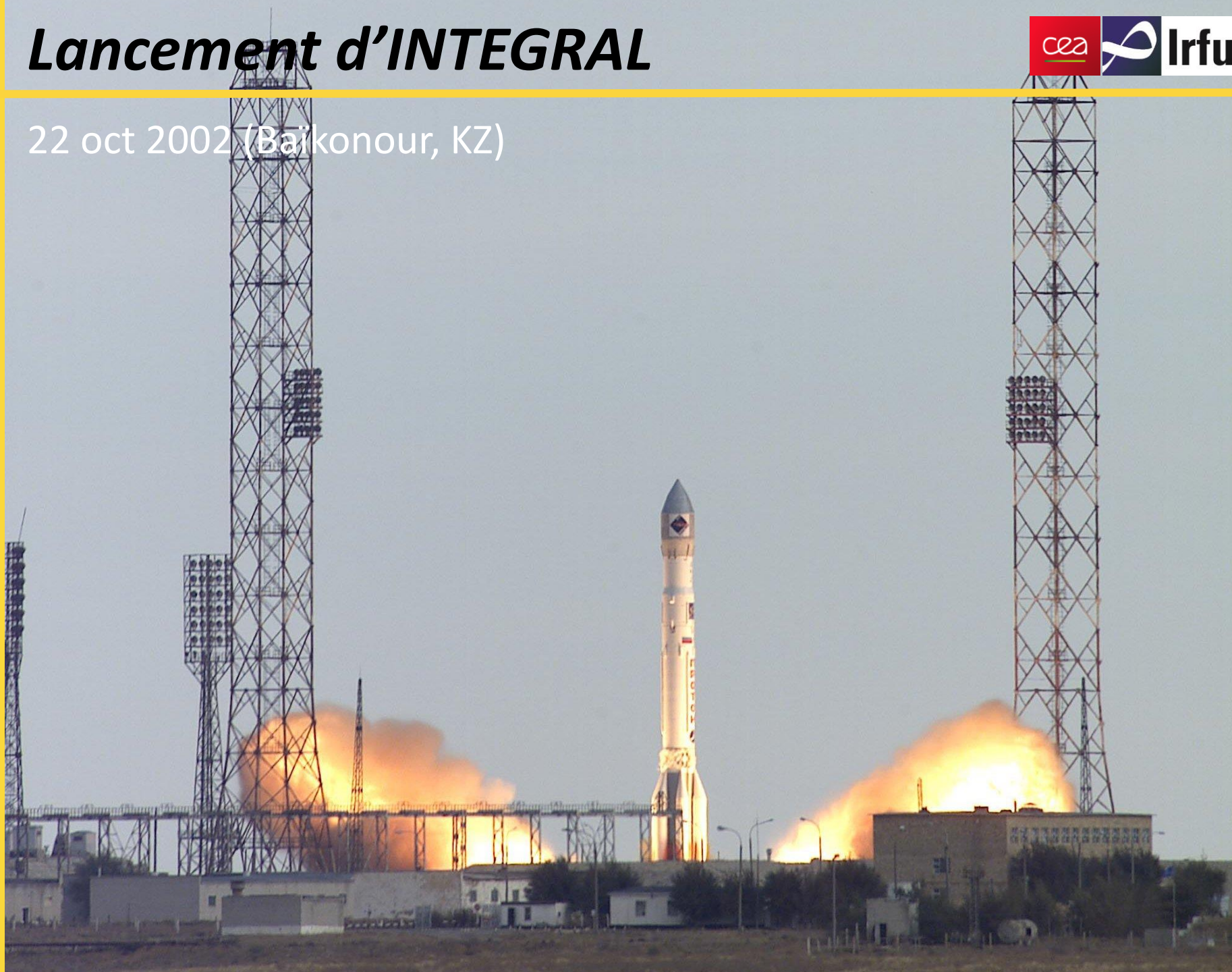
Proton:

700 t, 57 m, 4 étages,
>300 vols depuis 40 ans,
fiabilité > 96%



Lancement d'INTEGRAL

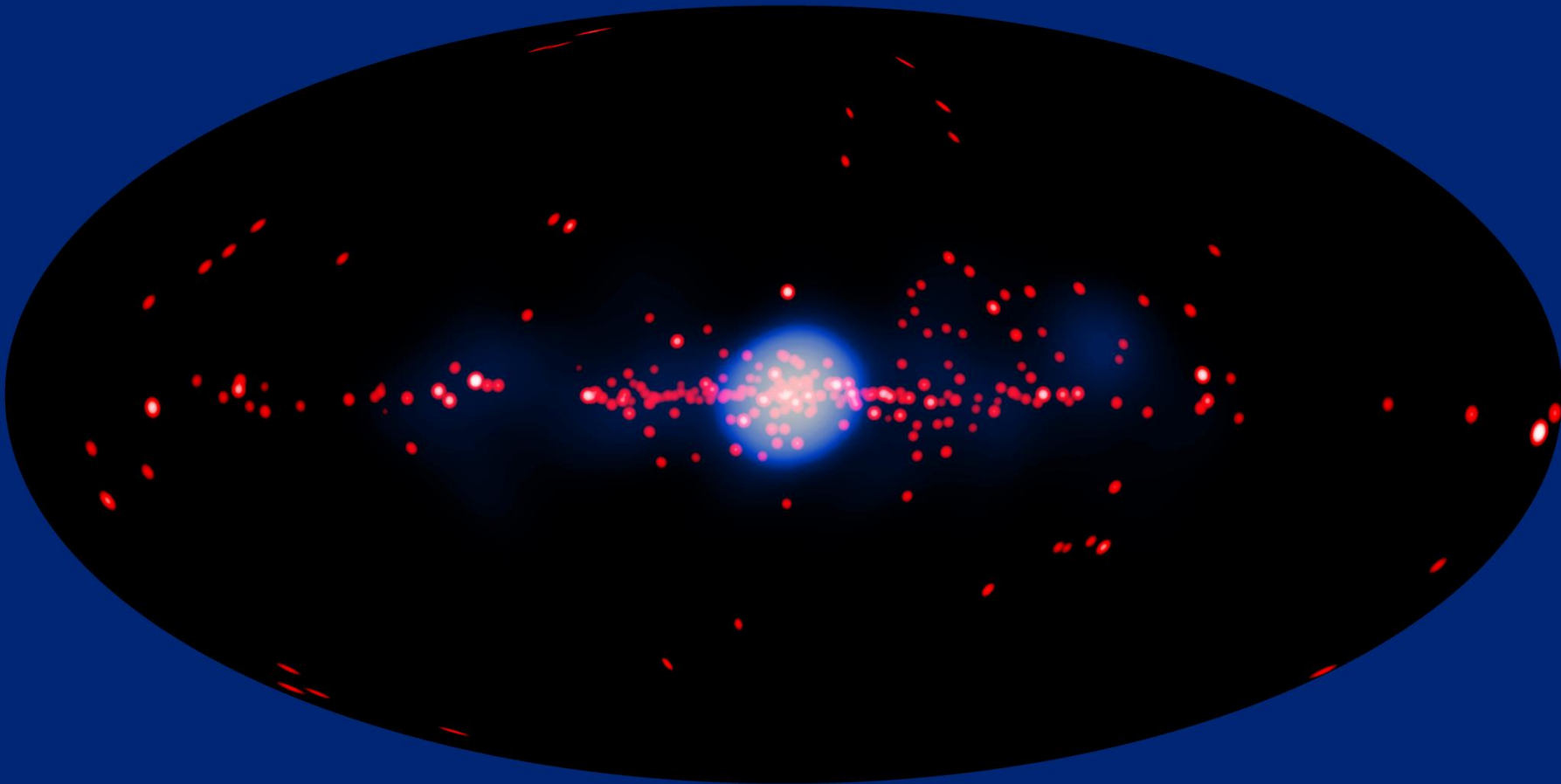
22 oct 2002 (Baïkonour, KZ)



Le ciel vu par SPI après 8 ans

Carte en coordonnées galactiques

- émission diffuse à 511 keV dans la région du bulbe galactique
annihilation de positrons d'origine inconnue
- **254 source ponctuelles détectées (25- 50 keV)**



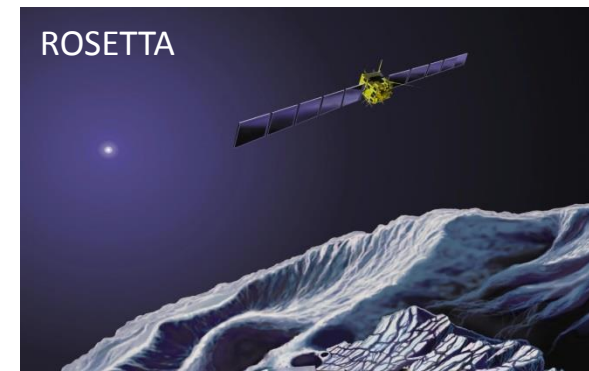
Opérations dans l'Espace

Entre idéal et la réalité...

Quelques idées préconçues :

- ***L'énergie solaire abonde dans l'espace***
- ***L'espace est très froid***
- ***L'espace est vide***

- **L'énergie solaire est certes disponible sans obstacle, cependant:**
 - En orbite basse, l'éclipse du soleil doit rester courte
 - Les panneaux solaires ne délivrent pas de grande puissance. Puissances disponibles pour les instruments faible:
 - des dizaines de W sur des minisatellites
 - 373 W pour SPI sur INTEGRAL
 - bons 5 kW pour le HST
 - copieux 110 kW au total sur ISS !
 - Au delà de l'orbite de Mars, le flux d'énergie solaire (en $1/R^2$) devient faible. Seule alternative Générateur Radio-Isotopique, (fission), problèmes de sécurité au lancement.
 - ex: ROSETTA, l'ESA a préféré garder d'énormes panneaux solaires (850 W au total à 3.4 UA).



L'espace intergalactique est à 3 K

- Photons du plasma primordial du Big-Bang, décalés vers le rouge ($z=1000$)

L'espace accessible (interplanétaire) est loin d'être aussi froid qu'on peut le penser:

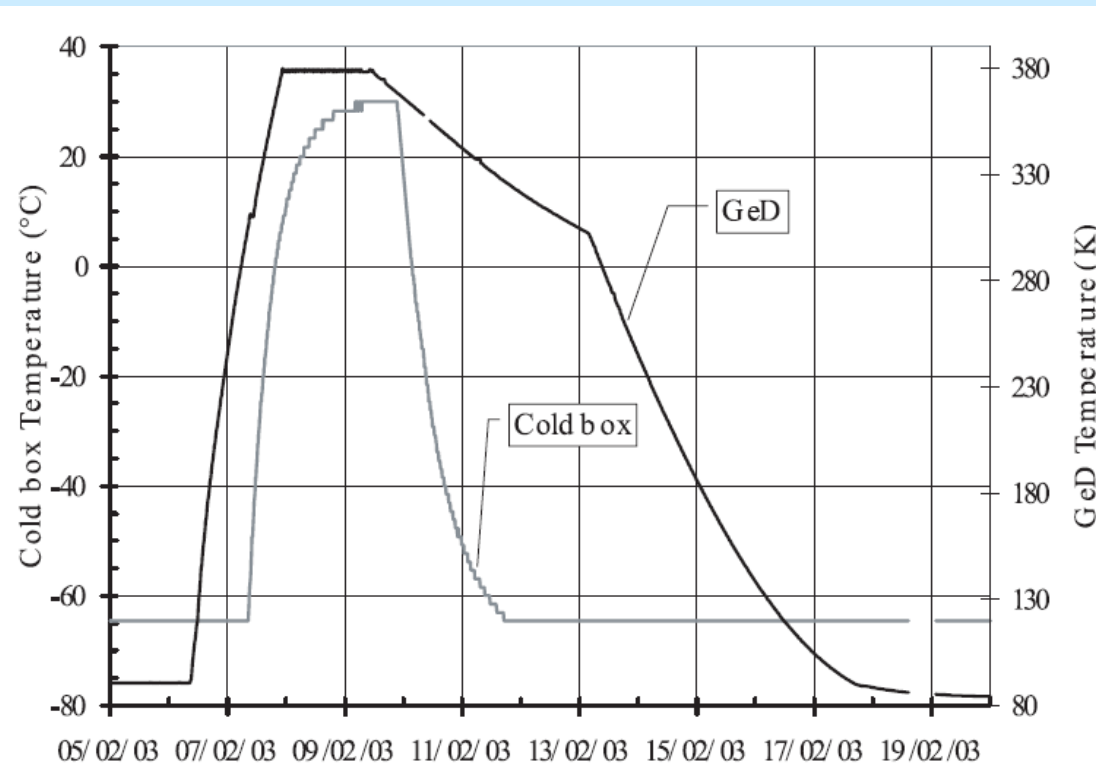
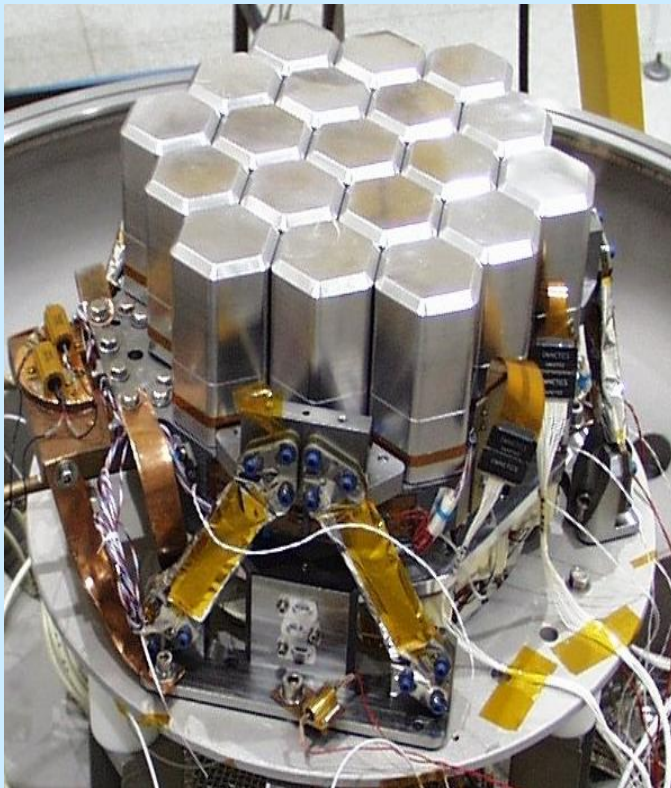
- A l'orbite de la Terre un objet atteint $T = 80 \text{ K}$ à l'ombre, et 200 K si éclairé par le Soleil
- **Gradients thermiques** extrêmement forts, Difficultés à contrôler le pointage d'un instrument; **Vieillesse** prématuré des matériaux. \longrightarrow
- L'électronique des instruments chauffe, **Radiateurs** pointés vers le froid pour évacuer les calories. Refroidissement passif atteint en orbite basse typiquement -30°C (250 K).
- Beaucoup d'expériences nécessitent de **plus basses températures** (fonctionnement du détecteurs, réduction bruit de fond), Utilisation de **machines cryogéniques**.



Premiers panneaux solaires du **HST** vieillis par le passage jour/nuit en orbite basse terrestre

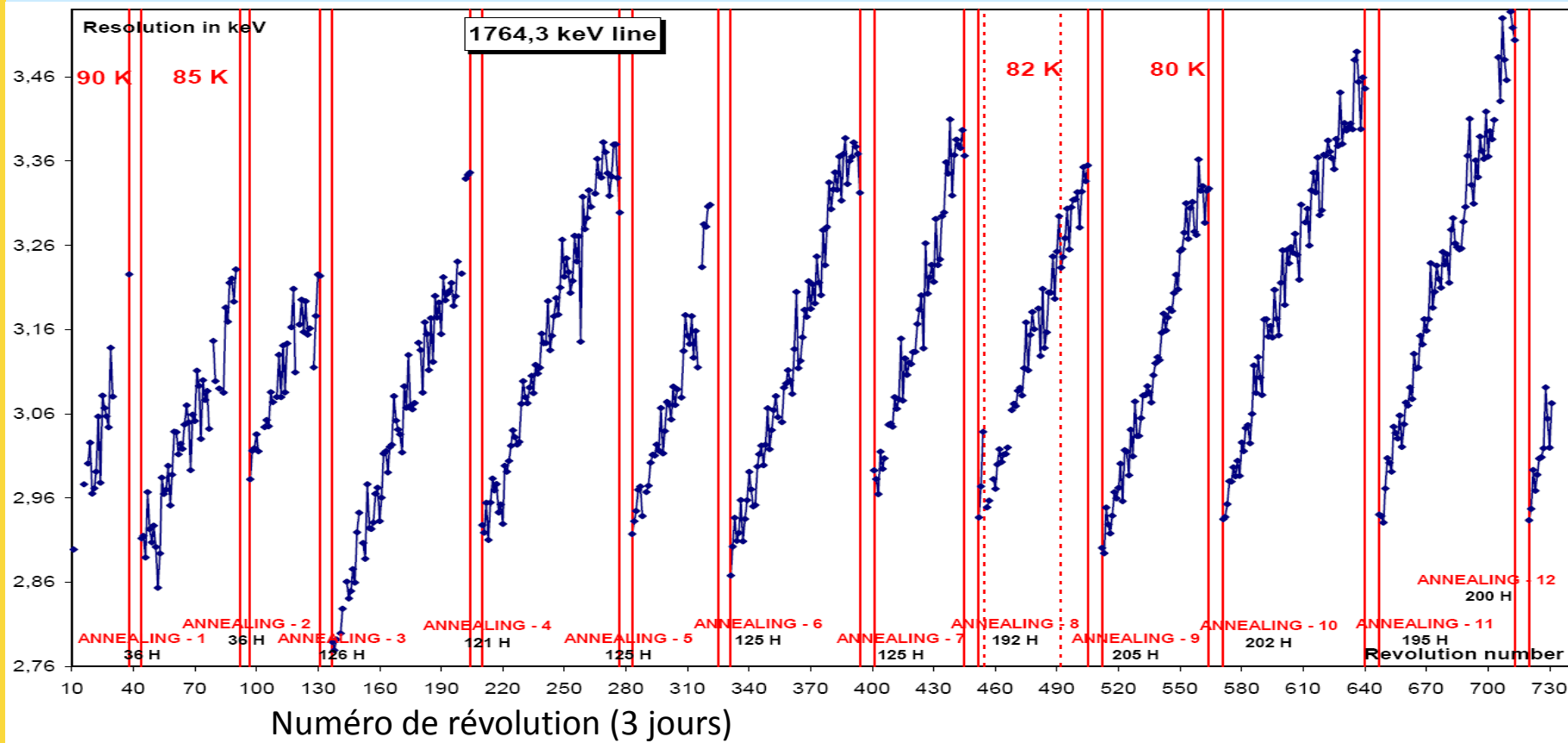
Cryogénie de SPI sur INTEGRAL

- **Caméra (19 Ge)** placée dans un Cryostat en Be (transparent aux gamma)
- **Cryo-machine pour réglage thermique actif des détecteurs (85 K)**
- **Opérations de recuit tous les 6 mois (3 jours à 100°C)**
 - annihiler les défauts dans le réseau cristallin des détecteurs, créés par les rayons cosmique, qui piègent les charges
 - Récupération de la résolution en énergie



Cryogénie de SPI sur INTEGRAL

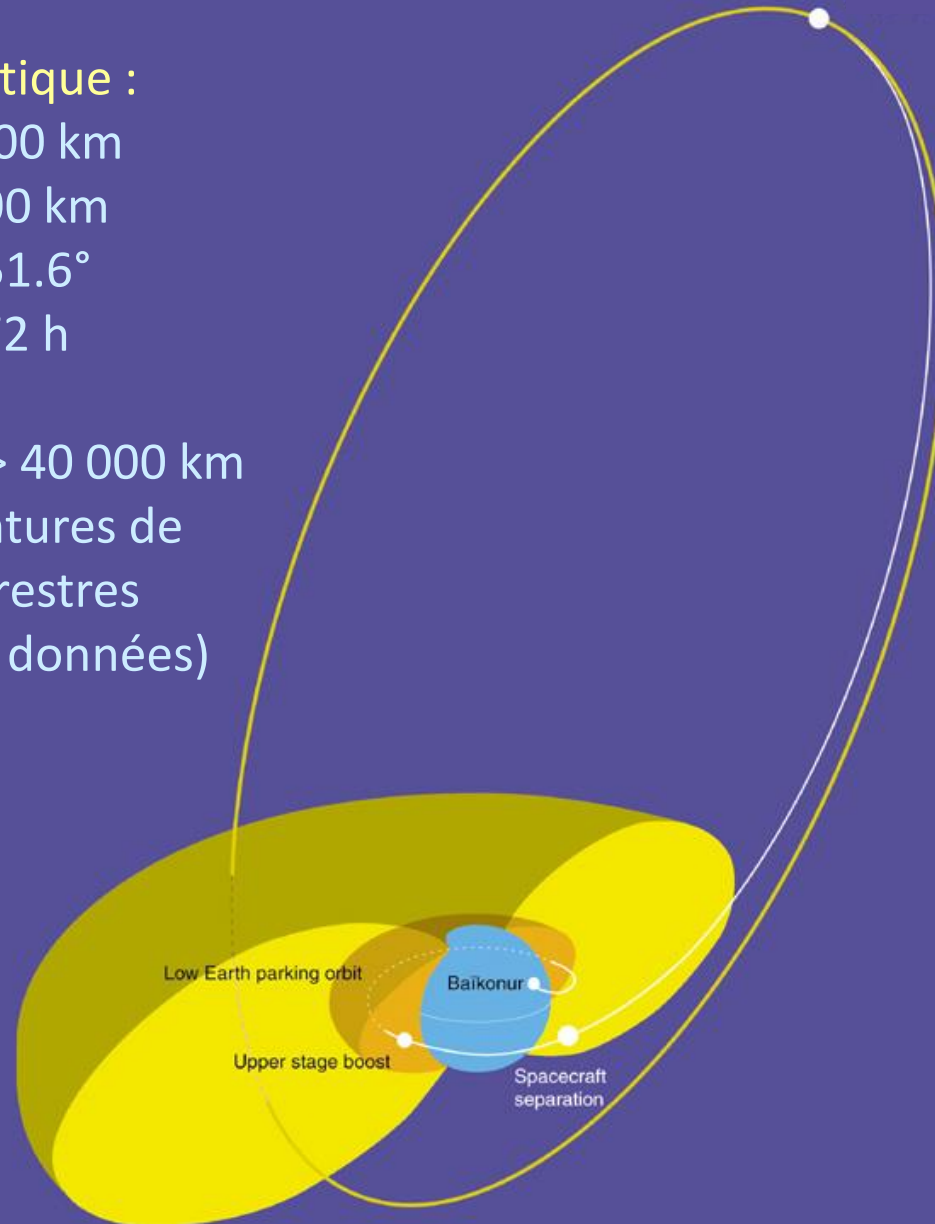
- **Caméra (19 Ge)** placée dans un Cryostat en Be (transparent aux gamma)
- **Cryo-machine** pour réglage thermique actif des détecteurs (85 K)
- **Opérations de recuit tous les 6 mois (3 jours à 100°C)**
 - annihiler les défauts dans le réseau cristallin des détecteurs, créés par les rayons cosmique, qui piègent les charges
 - Récupération de la résolution en énergie



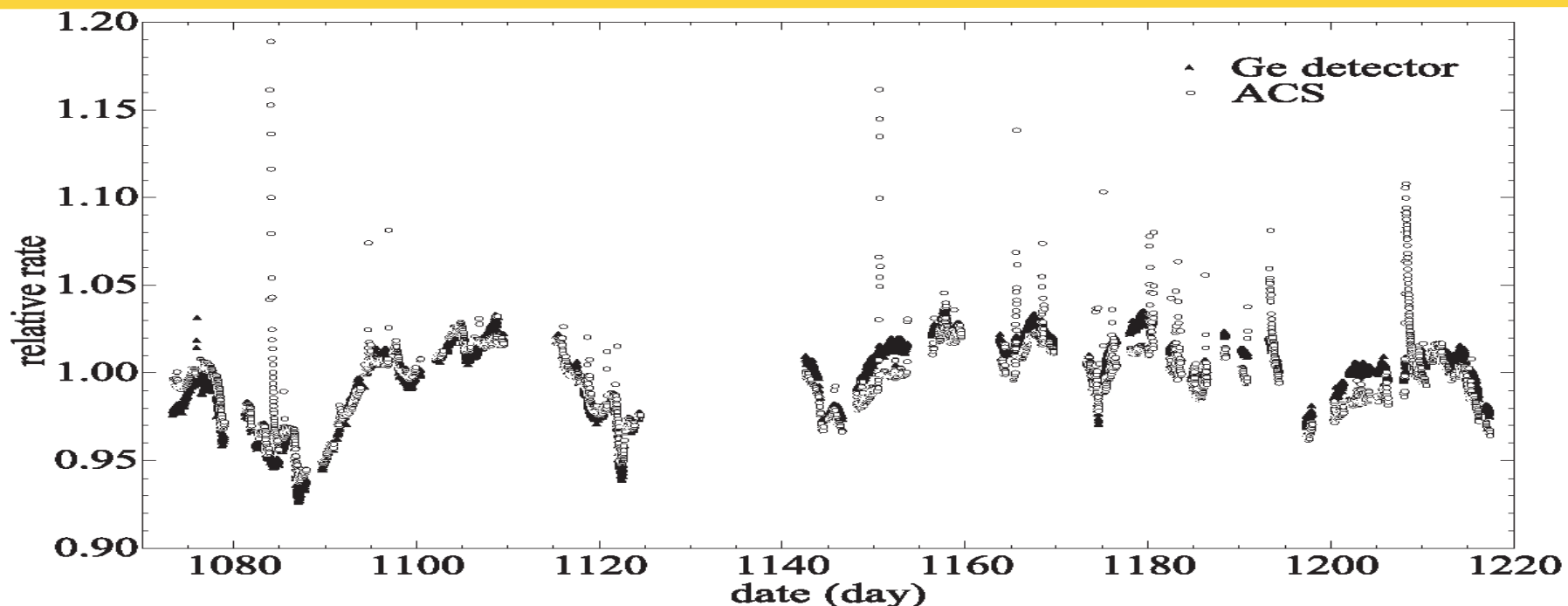
- **En densité de particules: meilleur que tous les vides terrestres**
- **Mais l'espace est « radioactif » (intense pouvoir ionisant)**
 - Plein de particules de haute énergie, absentes de nos laboratoires:
 - Electrons et noyaux du vent solaire
 - Noyaux du rayonnement cosmique
 - Le bombardement de particules chargées est intensif à toute orbite
 - Orbite basse: SAA (anomalie du champ magnétique terrestre au Brésil)
 - A 40 000 km : Ceintures de radiation de la Terre
 - Orbite haute: Eruptions solaires
 - On a rarement la possibilité de blinder les instruments
 - Questions de poids
 - Et si on le fait, on génère des neutrons secondaires dans l'instrument!
 - On doit employer des électroniques durcies aux radiations (SEU, Latch-up)
 - Limitation des composants disponibles

Orbite très elliptique :
apogée : 153 300 km
périgée : 9 000 km
inclinaison : 51.6°
période : 72 h

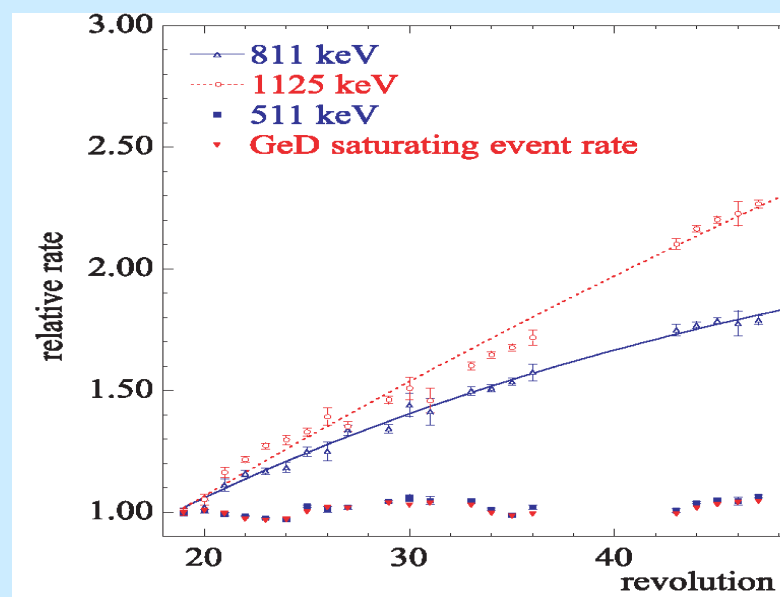
90% du temps > 40 000 km
hors des ceintures de
radiation terrestres
(acquisitions données)



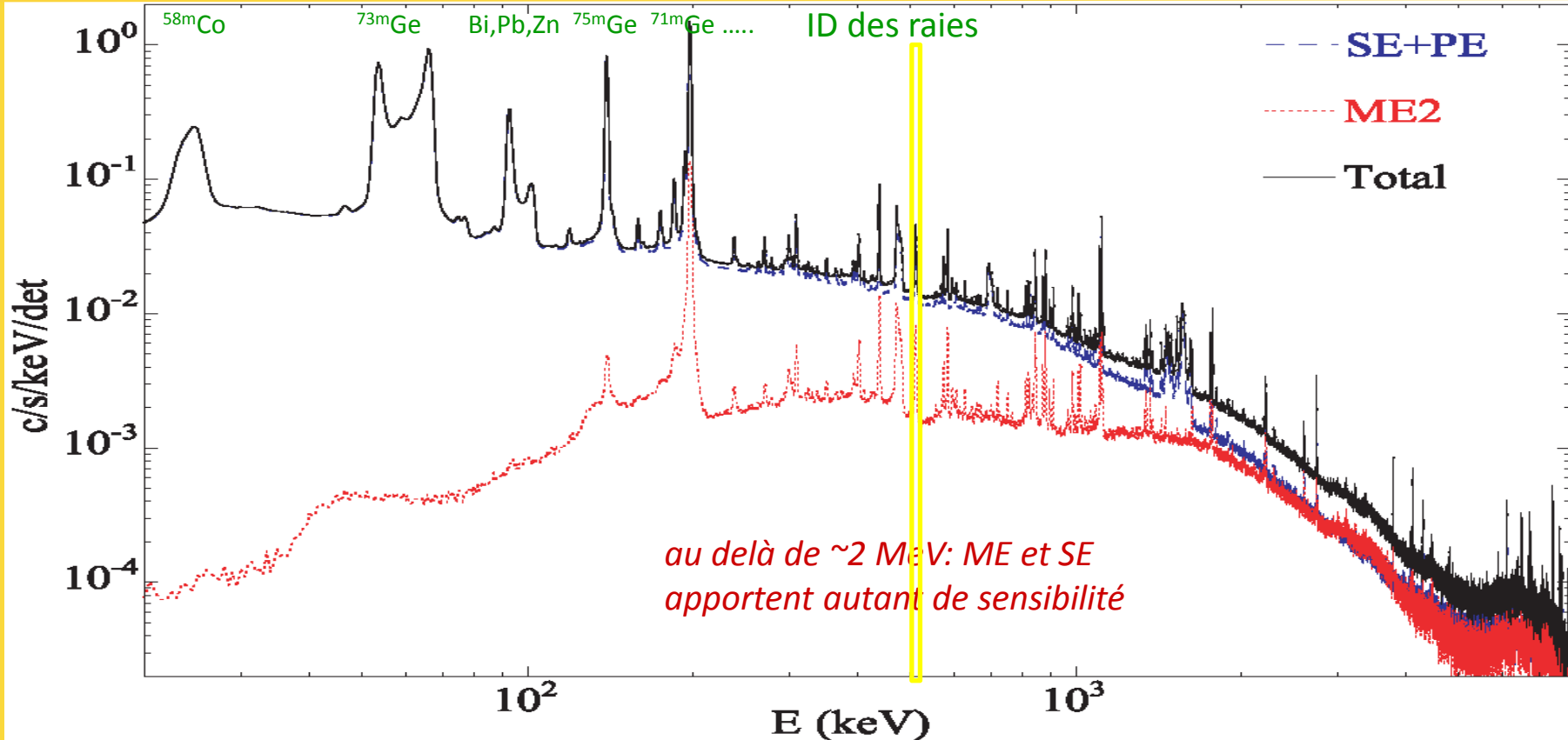
Bruit de fond de SPI sur INTEGRAL



- **Taux de comptage Ge et ACS**
Faible variation orbitale,
sensible aux passages ceinture de rad.
et aux éruptions solaires
- **Activation des matériaux**
certaines raies de bruit de fond augmentent



Bruit de fond de SPI sur INTEGRAL



Le Rayonnement Cosmique en interaction inélastique avec l'instrument

- $p \rightarrow n, p$ Isotopes radioactifs dans Ge (ou autres matériaux) $\Rightarrow \gamma$ prompt ou retardé
- Désintégrations β (spectre continu) ou γ (raie & continu Compton)
- $e^-; p \rightarrow \pi^0, \pi^+, \dots$
- cascades, fond continu

Le signal astrophysique est souvent $< 1\%$ d'une raie de bruit de fond

- Ge 2 6/12/2003 (14 mois)
- Ge 17 17/7/2004 (21 mois)
- Ge 5 19/2/2009 (6,3 ans)
- Ge 1 27/5/2010 (7,6 ans)
- En vol depuis 11,7 ans

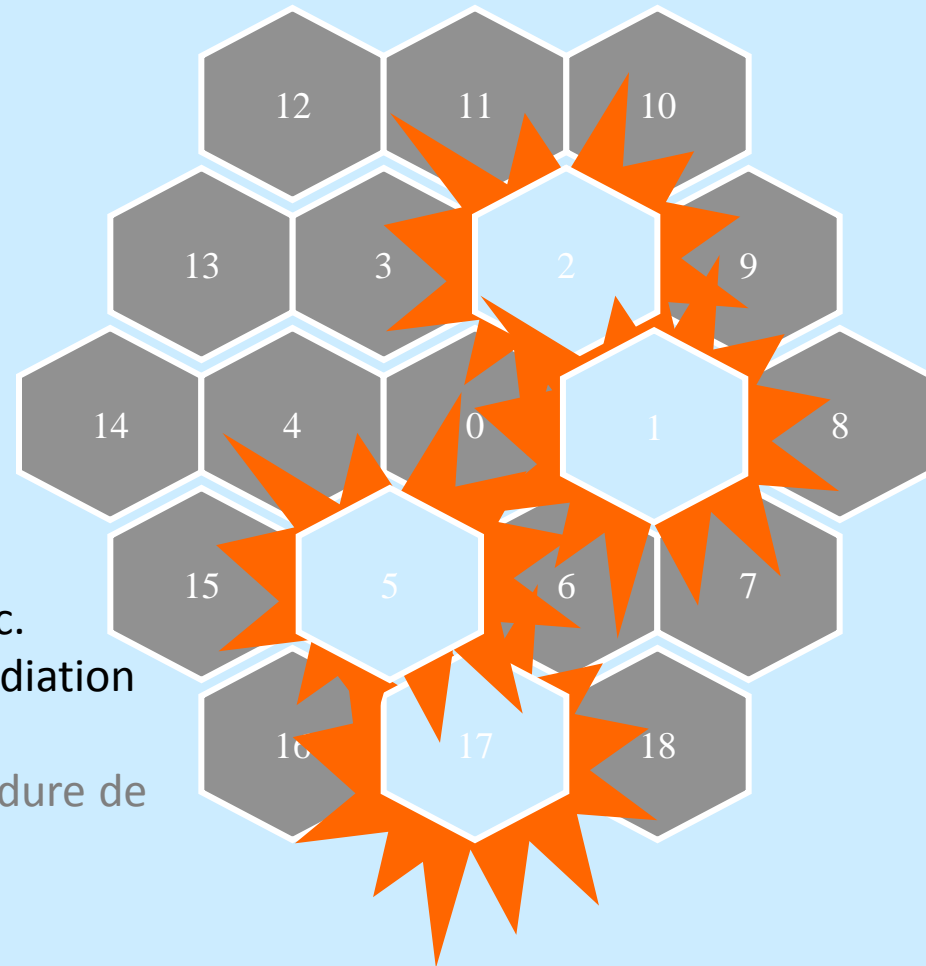
- **Destruction des entrées des pré-amplificateurs des diodes au Ge**

- **Causes possible**

- Particules chargées => décharges élec.
 - Stress au passage des ceintures de radiation
 - Stress après recuits improbable
- Néanmoins, modification de la procédure de recuit après 2^{ème} panne

- **Conséquences**

- Perte en sensibilité ~ -20%
- Prise en compte dans de nouvelles matrices de réponse instrumentales
- Le détecteur, contrairement à l'électronique en aval, n'est pas redondé



Comment faire un Projet Spatial?

- à l'échelle continentale:

- **NASA Etats Unis**
- **ESA Europe**



- à l'échelle nationale:

- **JAXA Japon**
- **CNES France**
- **DLR Allemagne**
- **ASI Italie**



CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES

- émergentes:

- **CNSA Chine**
- **ISRO Inde**

*Frapper à leur porte pour tenter
d'insérer son idée dans leur programme?
Pas facile!*

Programme ESA en Science spatiale

Soleil

Système Solaire

Astrophysique

Physique Fondamentale

Terminées

Ulysses [1990-2009]	Giotto [1985-1992]	Cos-B [1975-1982]	G
	SMART-1 [2003-2006]	IUE [1978-1996]	UV
		Exosat [1983-1986]	X
		Hipparcos [1989-1993]	V
		ISO [1995-1998]	IR



En opérations / Post-Opérations

SOHO [1995]	Cassini-Huygens [1997]	Hubble [1990]	V
Proba-2 [2009]	Cluster [2000]	XMM-Newton [1999]	X
	Double Star [2003]	Integral [2002]	G
	Mars Express [2003]	Herschel [2009-2013]	IR
	Rosetta [2004 *2014]	Planck [2009-2013]	FIR
	Venus Express [2005]	Gaia [2014]	V

En implémentation

Solar Orbiter, M1 [2017]	BepiColombo [2016]	JWST [2018]	V	LISA pathfinder [2015]
		Euclid, M2 [2020]	V/IR	

Missions Futures

		CHEOPS, S1 [2018]	V	
	JUICE, L1 [2022 *2030]	PLATO, M3 [2024]	V	
		ATHENA, L2 [2028]	X	LISA, L3 [2032]

Missions collaboratives

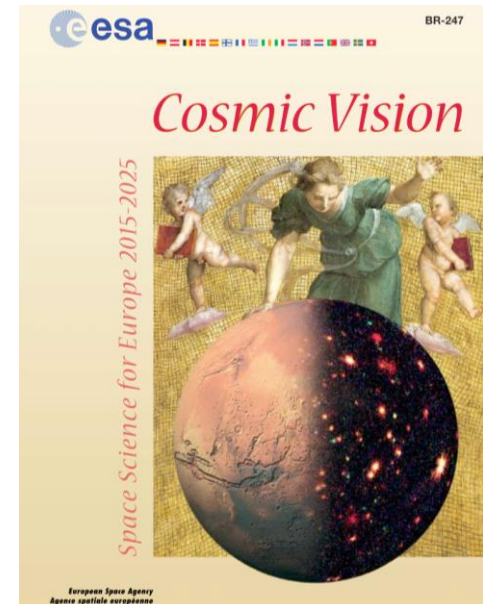
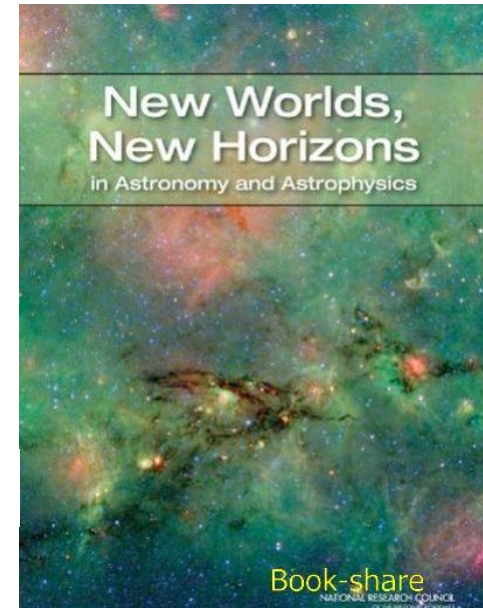
[Akari](#), [Chandrayaan-1](#), [Chang'E 1](#), [CoRoT](#), [Hinode](#), [Microscope](#), [Phobos-Soil \(Phobos-Grunt\)](#), [Suzaku](#)

Trois Grandes Etapes

- **Prospective**
 - phase de définition du programme des agences sur les 10 ou 20 ans à venir
- **Proposition de mission**
 - selon calendrier des missions décidé par les agences (enveloppe financière, dates de lancement)
- **Réalisation**
 - Un projet sélectionné par une agence, phase de réalisation (5 à 10 ans).

Définition du programme d'une agence sur les 10 ou 20 ans à venir

- appel à idées
 - lobbying intense
-
- Aux USA, on classe des propositions de mission par priorité (financement annuel) NASA 2012-2021
 - En Europe, on définit des thèmes scientifiques, on ne parle pas encore de missions (mais des projets sont en gestation) (financement pluriannuel) ESA 2015-2025
 - En France, prospective CNES 2014 en cours



- **Une fois le programme défini, les agences publient un appel d'offre de mission:**
 - **Cadrage financier, ampleur de la mission**
cout total pour l'Agence, lancement et exploitation compris:
 - Mission de classe M: 500 M€
 - Mission de classe L: 1G€
 - **Date de lancement et choix de lanceur**
 - coûts de lancement pris en charge par l'agence
 - définition masse et volume du satellite
 - **Précisions éventuelles:**
 - Type de science planétologie, astronomie, physique fondamentale
 - Choix technologiques pour développer un savoir faire
(ex: vol en formation)

Phase de Proposition de mission (Phase 0)

- **définition des exigences scientifiques**
- **petit groupe de chercheurs (mission M: 50 personnes, noyau dur de 10)**
- **soutien d'une agence nationale**
- **concurrence rude**
 - ESA M3 : 40 propositions (en 2010) pour lancement en 2022
 - ESA L2 et L3 : 42 propositions (en 2012) pour lancement 2028 et 2034
- **choix des missions (ou thèmes scientifiques L) retenues pour passer en Phase A**

Fin 2013, thèmes scientifiques L sélectionnés

L2 : astronomie X

->

mission pressentie

télescope X spatial ATHENA

L3 : ondes gravitationnelles

->

interféromètre spatial LISA

Phase de Définition de la mission (Phase A)

- étude technique détaillée du design
- démontrer sa faisabilité (coût et durée de développement)
- typiquement sur 2-3 ans
- affaire de chercheurs avec des ingénieurs pour lever les verrous techniques
- phase financée par l'agence
- phase compétitive

4 missions à l'étude pour ESA M3, phase A 2011-2013:

- LOFT (observation spectro-temporelle de sources X)
- STE-QUEST (test du principe d'équivalence)
- MarcoPolo-R (retour d'échantillons d'astéroïdes)
- EChO (caractérisation d'atmosphères d'exoplanètes)

+1 mission récupérée du tour de sélection d'avant:

- PLATO (détection d'exoplanètes)

Début 2014, mission sélectionnée M3: PLATO

La sélection de la mission à réaliser

- étape clé avant passage en phase de réalisation
- Livraison de documentation à l'agence, il faut démontrer:
 - la faisabilité de l'expérience:
simulations numériques, mesures sur prototypes
 - d'avoir des solutions techniques, qualifiées pour le spatial.
 - que les coûts de développement et d'exploitation restent dans l'enveloppe accordée au projet.
- Considérations politiques et de prestige jouent aussi...

Coopération entre plusieurs métiers

- **Chercheurs** : définition des performances requises des instruments, modes d'utilisation, invention des détecteurs
- **Ingénieurs et techniciens** : électroniciens, mécaniciens, spécialistes en cryogénie, opticiens, informaticiens...

Les règles d'un projet spatial sont différentes de la plupart des autres domaines de physique

- l'agence ne signe pas un chèque à une équipe scientifique
- l'agence achète un concept:
 - **organise le projet** (chef de projet, équipes pour mise en œuvre)
 - **confie aux laboratoires la réalisation** des instruments et des analyses de données
 - **confie la production du satellite et du lanceur à des industriels**
 - **procède au lancement** (ou l'achète si elle n'en a pas les moyens)
- **nombreuses étapes de revue**
 - **techniques et programmatiques** (la sciences est souvent éclipsée)

Développement de l'instrument

- **Plus de règles et de contraintes que sur beaucoup d'autres projets**
 - Tout écart aux règles nécessite une dérogation technico-administrative.
- **Objectif de fiabilité**
fonctionnement sans panne en orbite sur durée nominale ~ 5 ans,
espoir d'extension de la mission au-delà de la durée nominale
(ex: INTEGRAL prévu pour 5 ans, fonctionne depuis 12 ans en orbite)
 - **Eviter des solutions techniques trop risquées**
(ex: pièces mobiles qui se bloquent, lubrifiants, peintures qui dégazent)
 - **Tenue aux radiations des composants électroniques**
composants durcis, blindage des systèmes
(ex: processeurs autorisés de techno début '90: 100 MHz)
 - **Redonder les systèmes**, dédoublement de modules, dont l'un est OFF,
(car: pas de possibilité de réparation en orbite, sauf ISS et HST)
 - **Raidir le design** contre les vibrations au lancement

Phase B, Phase C/D, Phase E

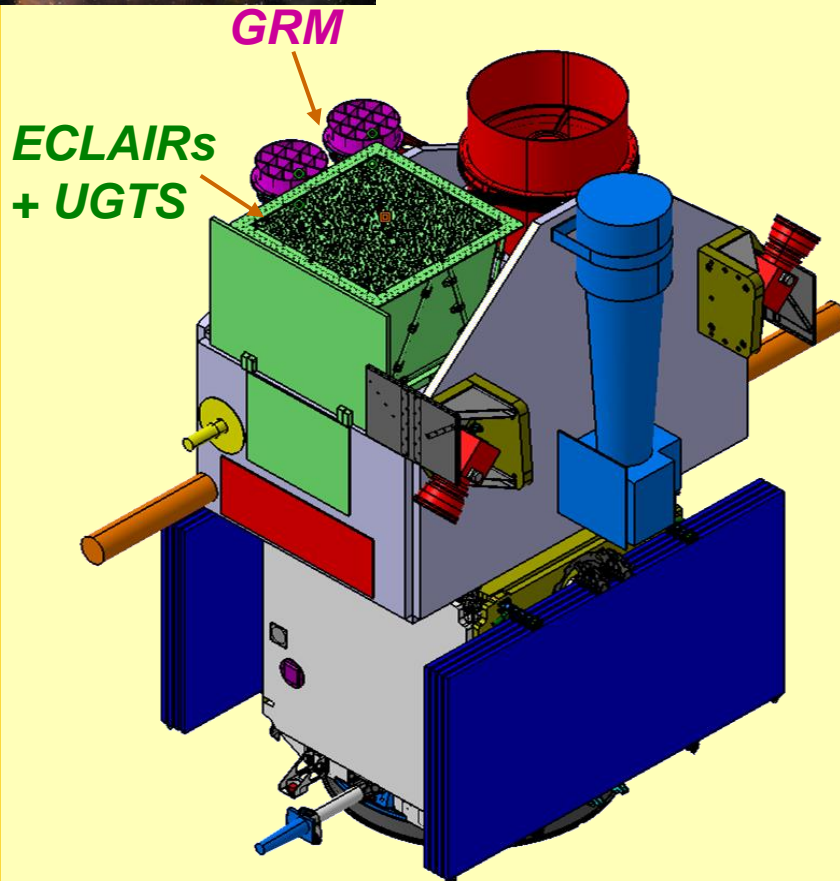
- **Successions de modèles:**
 - **SM** (software), **EM** (ingénierie), **QM** (qualification), **FM** (flight model)
 - 2 ans par modèle => 8 ans de réalisation
- **Tests avant lancement**
 - **Test fonctionnel** EM, QM, FM
 - **Test de tenue aux vibrations du lancement**, sur pot vibrant, QM vibré fort, FM testé
 - **Test en cyclage thermique**, enceinte à vide, QM larges excursion temp, FM testé en simulateur solaire
 - **Test de compatibilité électromagnétique**, chambre anéchoïque
 - **Étalonnage scientifique au sol**
- **Tests après lancement**
 - **phase de mise à poste, réglage en vol**
 - **étalonnage en vol sur sources connues**

***Nous venons juste de passer
la sélection en Phase B
d'une nouvelle mission!
SVOM***

Space-based Variable Objects Monitor

Projet Franco-Chinois (co-financé CNES–CNSA)

- Entré en Phase B
- Lancement prévu 2021 avec Long-March-2C



Instruments embarqués

- **GRM** chinois
Spectromètre γ (30 keV-3 MeV)
- **ECLAIRs** français
Caméra γ grand champ (2 sr)
Localisation du sursaut (10 arcmin)
UGTS (Unité Traitements Scientifique)
Demande Repointage satellite
- **MXT** français (+allemand & anglais)
Télescope X petit champ
Localisation affinée (<1 arcmin)
- **VT** chinois
Télescope Visible (magnitude~23)

Space-based Variable Objects Monitor

Projet Franco-Chinois (co-financé CNES–CNSA)

- Entré en Phase B
- Lancement prévu 2021 avec Long-March-2C



VT
visible
telescope

MXT
télescope X
petit champ



UGTS
au cœur de la
mission SVOM

Instruments embarqués

- **GRM** chinois
Spectromètre γ (30 keV-3 MeV)
- **ECLAIRS** français
Caméra γ grand champ (2 sr)
Localisation du sursaut (10 arcmin)
UGTS (Unité Traitements Scientifique)
Demande Repointage satellite
- **MXT** français (+allemand & anglais)
Télescope X petit champ
Localisation affinée (<1 arcmin)
- **VT** chinois
Télescope Visible (magnitude~23)

Conclusion

***Faire de la physique dans l'Espace,
pourquoi?***

L'accès à l'espace est coûteux

- Mission de taille M : ~ 500 M€
- Lancement Ariane 5: 170 M€
- Projet Herschel+Planck: 2 G€ (comparé au LHC, 3 G€)
- JWST: 6 G€ prévus (le congrès américain a heureusement étendu le budget...)

⇒ **Plus de projets à plus faible coût?**

- Partenariats inter-agences
- Nouveaux partenaires (chinois ou indiens)
- Microsatellites (voire Nanosatellites?)

***Toute question scientifique fondamentale
peut-elle raisonnablement revendiquer l'accès à l'espace?***

Peu de projets voient le jour

- Dernier appel (classe M) de l'ESA :
40 proposés, 4 en étude approfondie, 1 sélectionné

Les perspectives et le temps de développement sont longs

- 10 à 20 ans minimum avant lancement
- *Avons nous la capacité de nous projeter aussi loin, et de garantir que la question scientifique reste pertinente?*

L'accès à l'espace est risqué

- Ex: destruction des satellites CLUSTER au lancement d'Ariane-501 →
- Ex: Soyouz, fiabilité 97.3% (19 échecs/727)



Il faut

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

Aller dans l'Espace, pour...

sortir de la caverne, dépasser nos limites

Par l'exploration spatiale, l'homme est allé aux confins du système solaire. Voyager 1, à 127 UA (20 milliards de km), est la sonde la plus lointaine en activité, elle vient d'entrer dans l'espace inter-stellaire, et atteindra la prochaine étoile dans 80 000 ans. L'homme lui-même n'y ira probablement jamais.



Sature (distance 10 AU), vu par la sonde Cassini-Huygens (NASA-ESA).

Aller dans l'Espace, pour...

sortir de la caverne, dépasser nos limites

Par les sciences spatiales, l'homme a pris conscience des limites et de la fragilité de son monde, la petite planète bleue (« Pale Blue Dot », Carl Sagan).



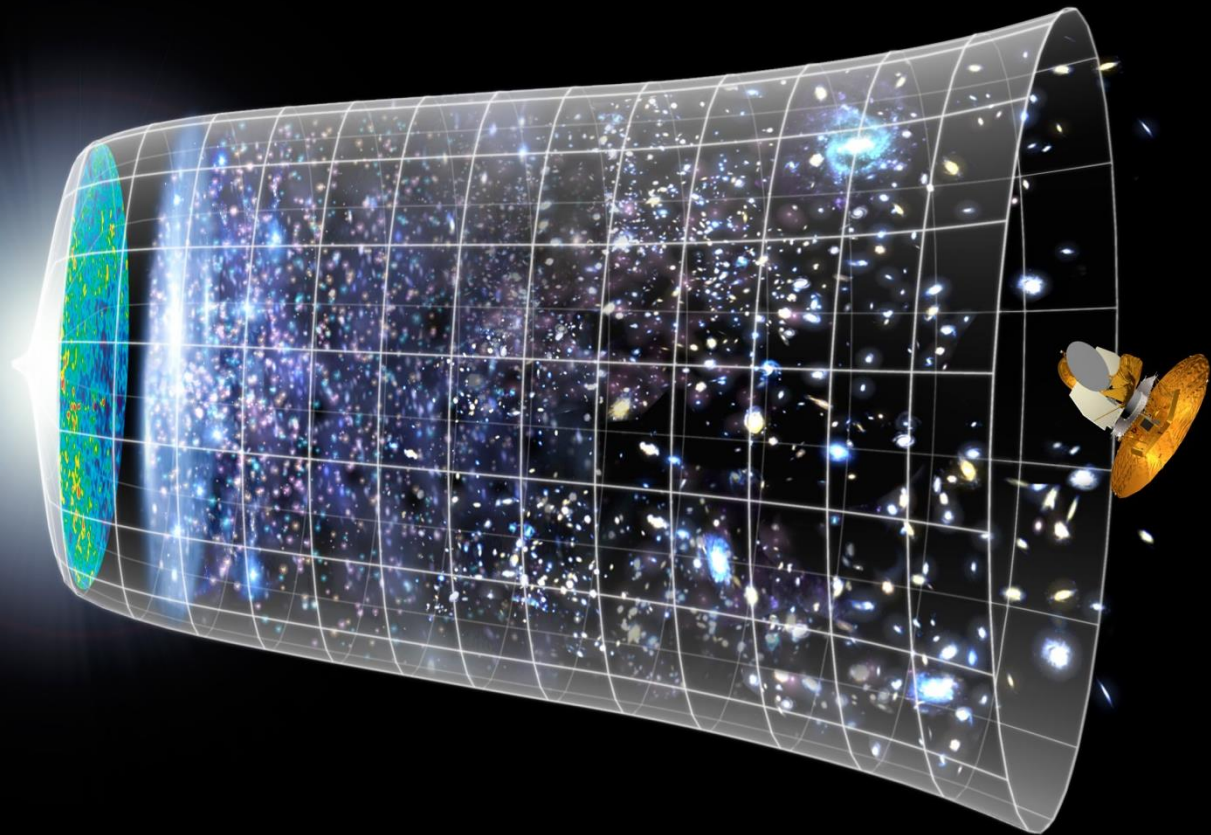
Aller dans l'Espace, pour...

sortir de la caverne, dépasser nos limites

Par la pensée l'homme entreprendra le voyage aux confins de l'Univers.
Les messagers qui en proviennent, révélés par la science spatiale,
lui permettront de mieux comprendre l'immensité de l'Univers.



« Le penseur » de Rodin



Merci...