

Mesurer l'infiniment petit, Observer l'infiniment grand

– 3^{ème} partie –

Les détecteurs pour L'astrophysique

David Attié

Rencontres de physique de l'infiniment grand à l'infiniment petit

Double-Clack

ALICE

Eichweiss

TIGES

HERA/DEL

CMC

Dark Matter

SPIN

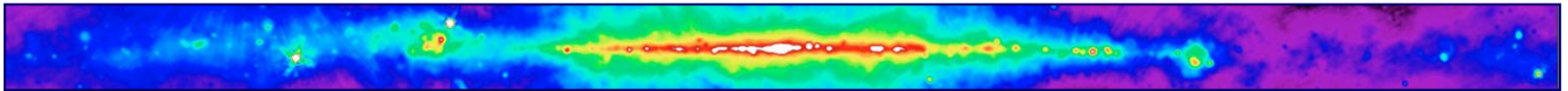
23 juillet 2012

Introduction

- La lumière : spécificité de l'astrophysique
 - La lumière : observation multi-longueur d'onde
 - Spectre électromagnétique
 - Critère de performance des télescopes (pouvoir séparateur, sensibilité)
- Quelques exemples
 - La radioastronomie
 - La physique des hautes (et très hautes) énergies
 - La bolométrie

La lumière : spécificité de l'astrophysique

La voie Lactée vue par...



...**les ondes radio** - À 400 MHz, la plupart des émissions vient de la diffusion des électrons libres dans les plasmas interstellaires (**gaz chaud ionisé interstellaire**). Certaines émissions proviennent également **des électrons accélérés dans de forts champs magnétiques**. (Radio-télescopes : Jodrell Bank, Bonn 100 m, & Parkes 64 m)



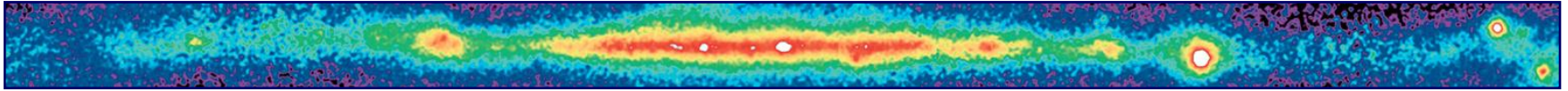
... **le rayonnement infra-rouge** - Image composée de l'infrarouge lointain prises par le satellite Infrared Astronomical (IRAS) à 12, 60 et 100 μm . La plupart de **l'émission est d'origine thermique**, de la poussière interstellaire chauffée les étoiles, y compris les régions de formation stellaire dans les nuages interstellaires.



... **la lumière visible** - Photomosaïque composée de photos prises à très large champ par des observatoires nord et sud. En raison de la forte obscuration par la poussière interstellaire de la lumière des étoiles provient principalement des étoiles à quelques milliers d'années-lumière du Soleil. Les tâches sombres montrent les nuages de poussière absorbante.

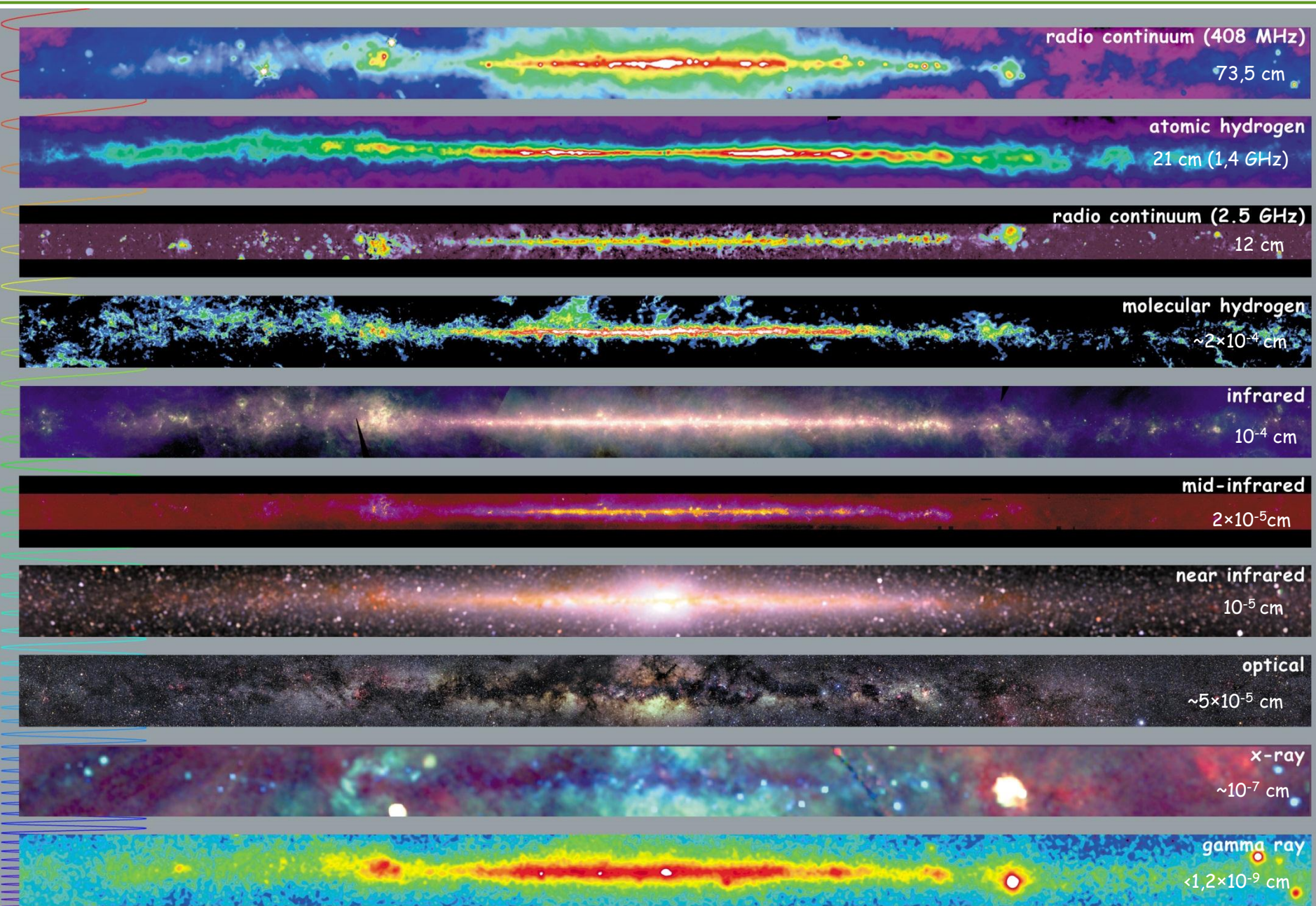


... **les rayons X** - Image composite d'un instrument sur le satellite Roentgen (ROSAT) dans trois bandes de rayons X centrées à 0,25 keV, 0,75 keV et 1,5 keV. Etendue aux rayons X mous provenant de **gaz chaud**. Aux énergies inférieures, du gaz froid interstellaire absorbe fortement les rayons X, et des nuages de gaz sont considérés comme des ombres sur fond émission de rayons X.



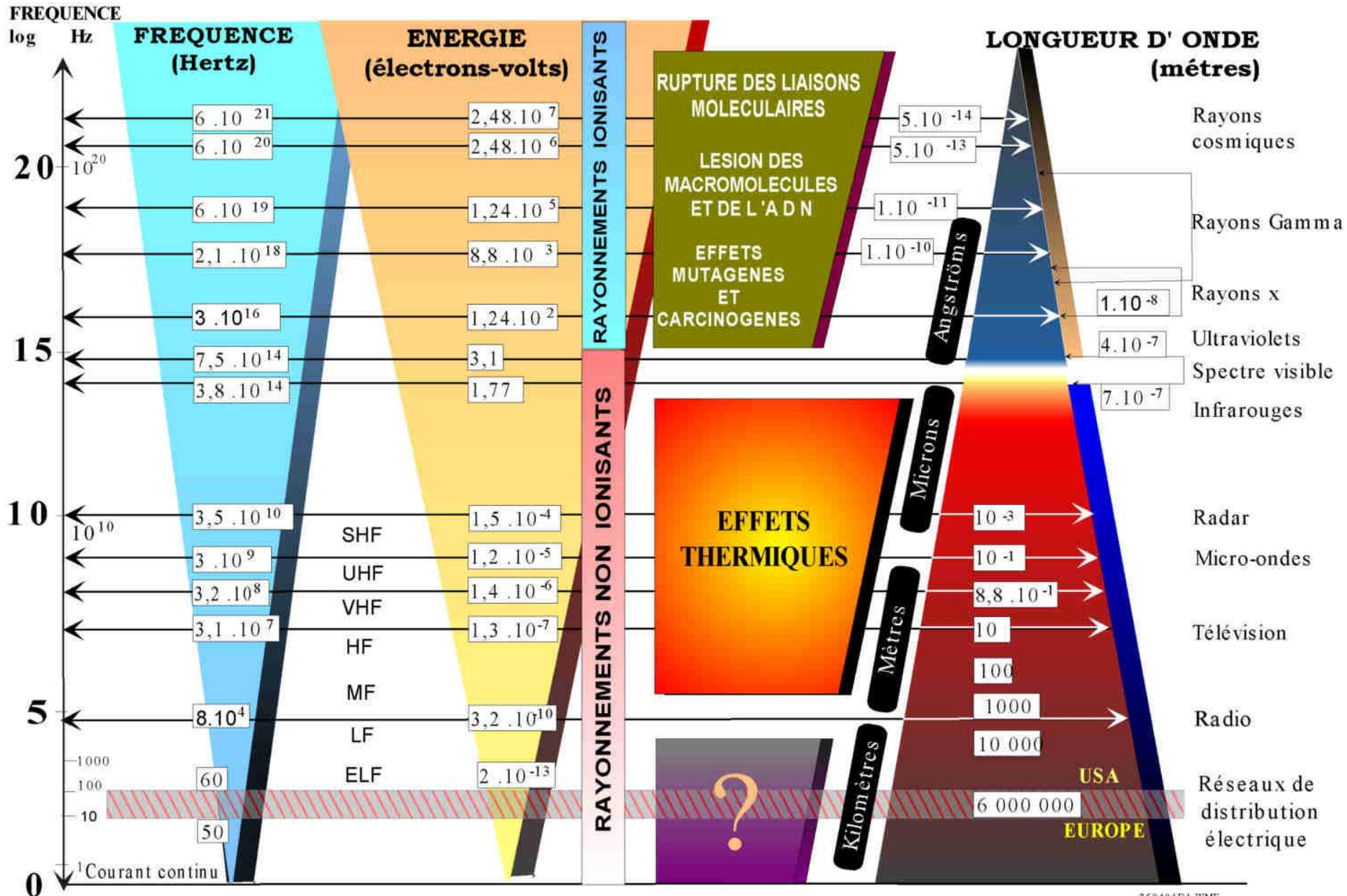
... **les rayons gamma** - Emission gamma ($E > 100 \text{ MeV}$) observée par Energetic Gamma-ray Experiment Telescope (EGRET) instrument sur le satellite Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO). A ces énergies extrêmes, la plupart des rayons gamma célestes proviennent de **collisions de rayons cosmiques avec les noyaux dans les nuages interstellaires**. La Voie Lactée est une source diffuse de rayons gamma. Superposée à la lumière diffuse de la Voie Lactée, des source de plusieurs pulsars gamma, par exemple, le crabe, Geminga, et les pulsars Vela le long du plan galactique sur le côté droit de l'image.

La Voie Lactée à différentes longueurs d'onde



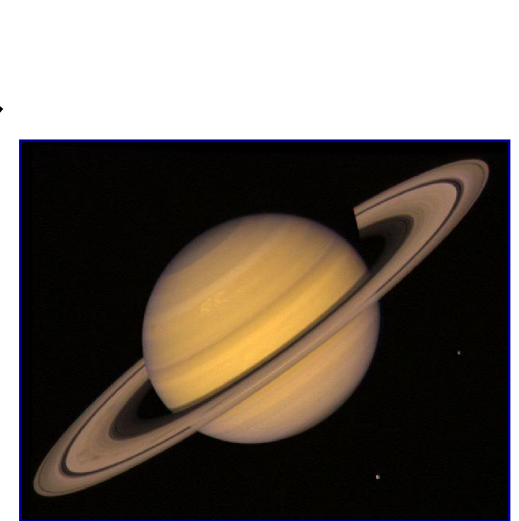
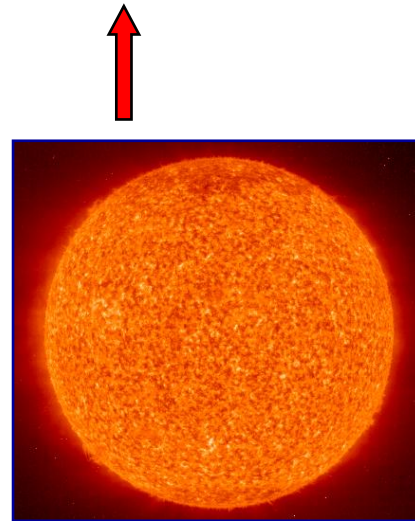
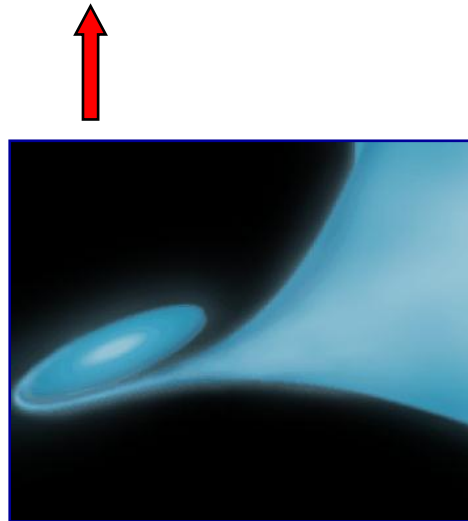
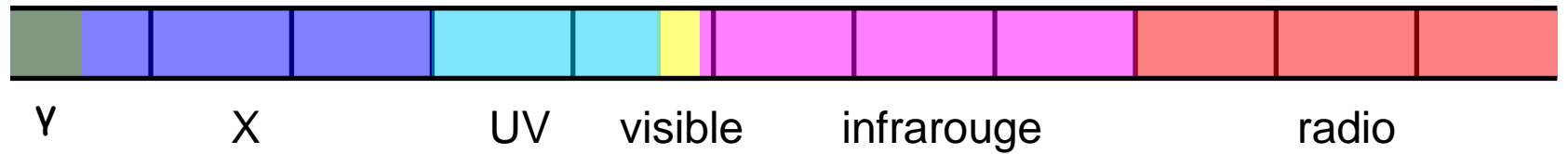
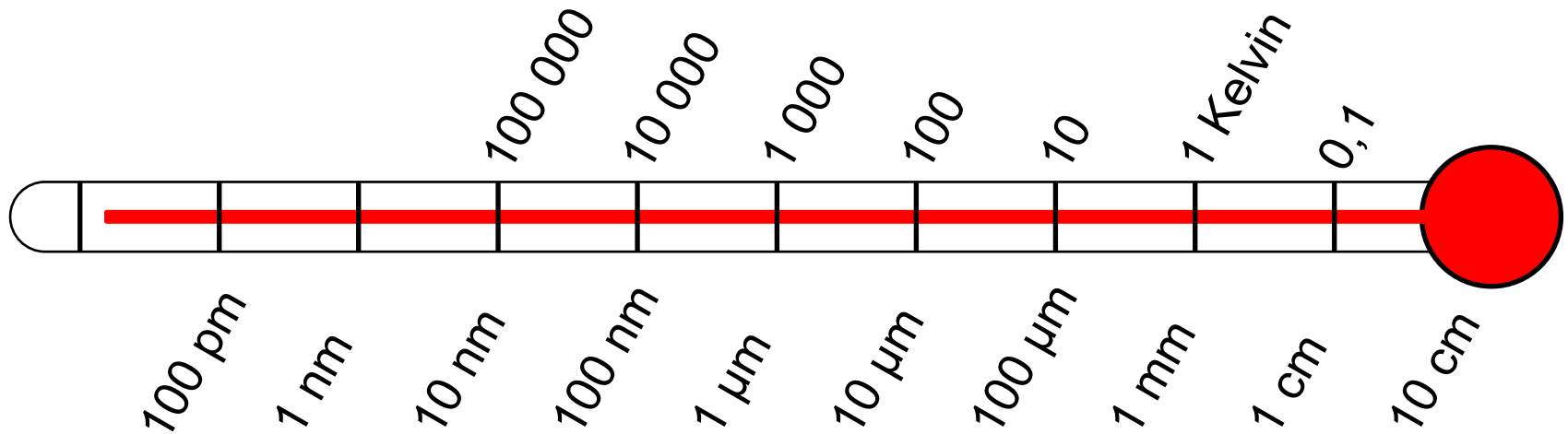
<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>

Spéctre électromagnétique



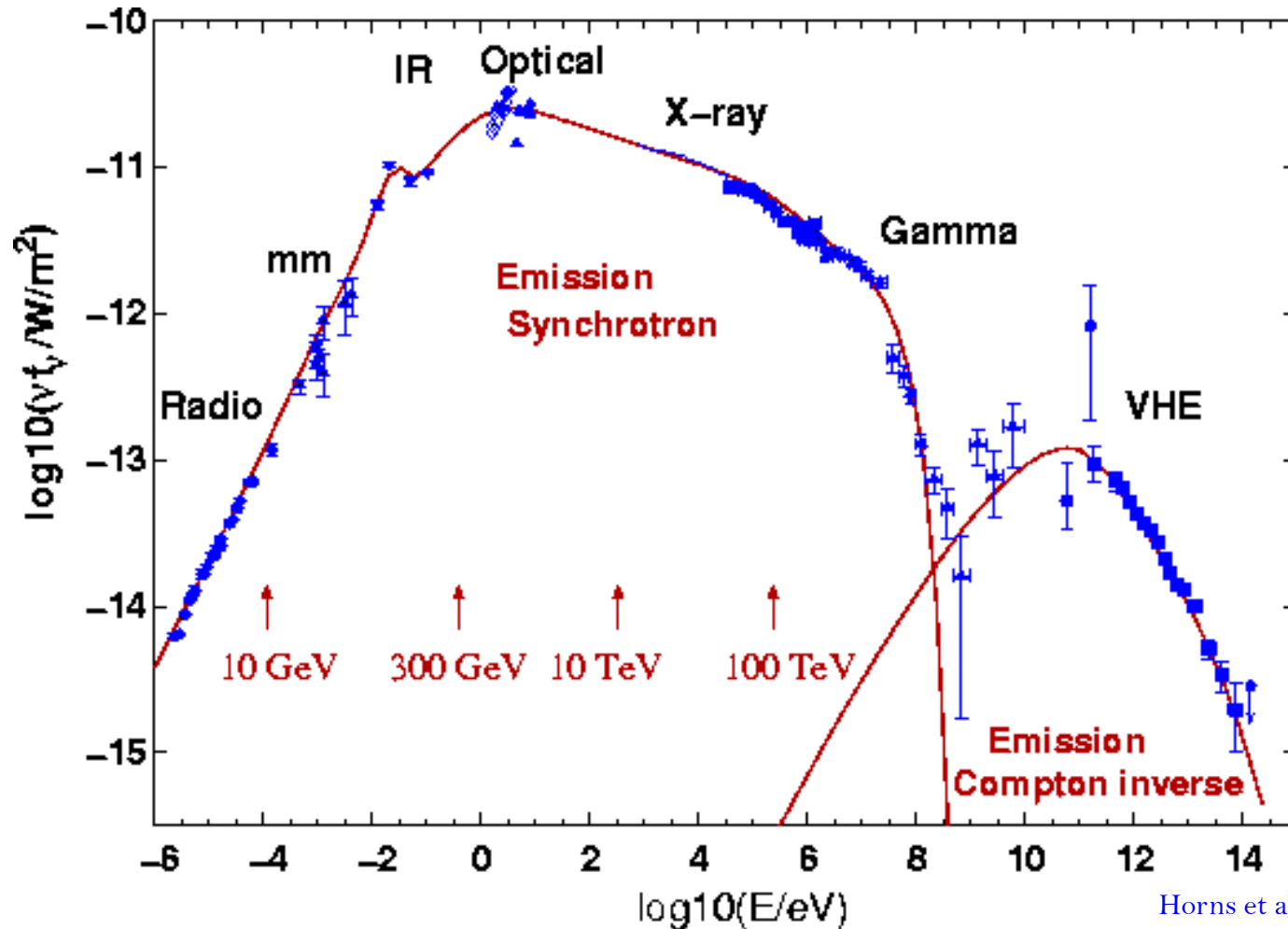
250401D1.WMF

La spectroscopie



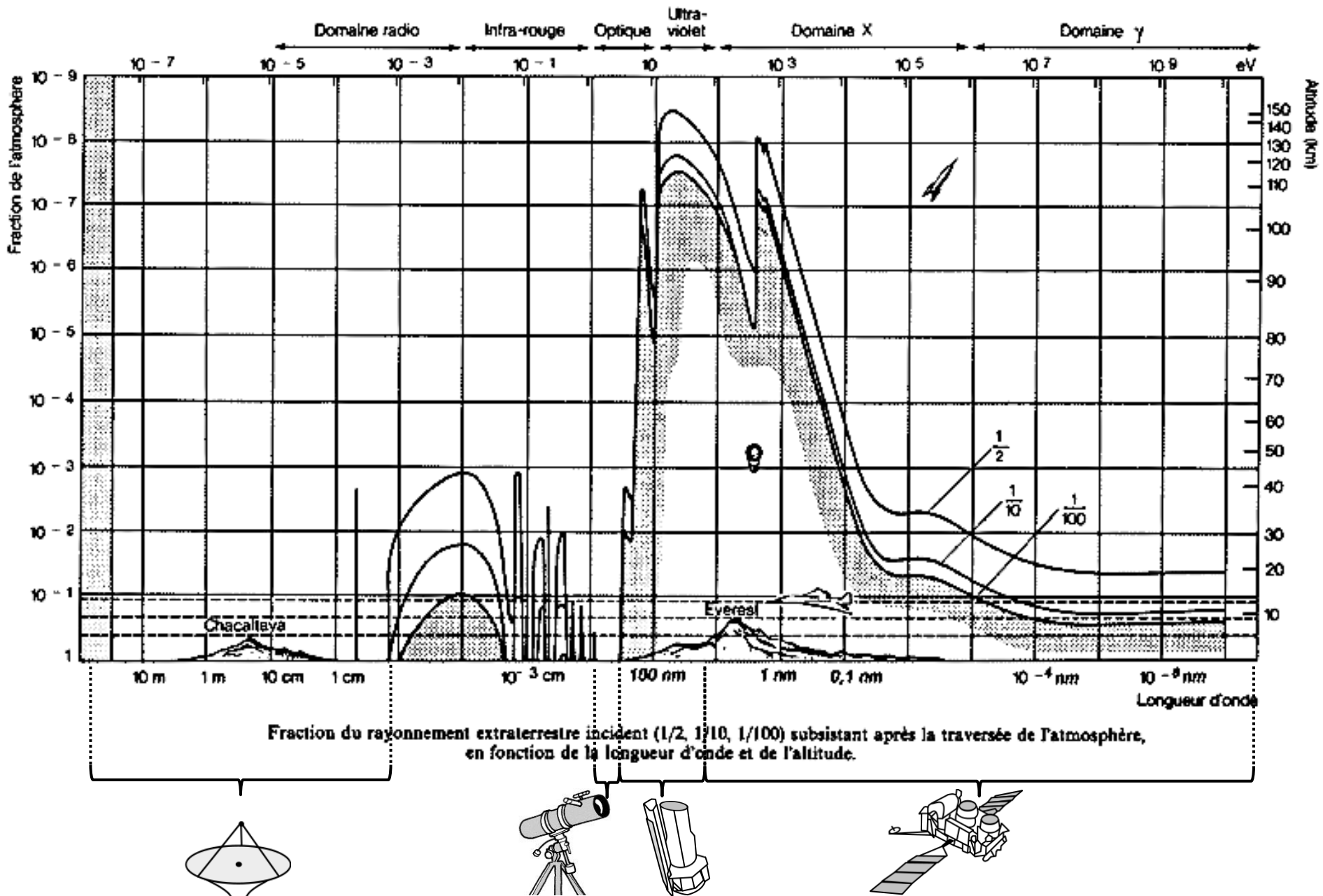
Observation multi-longueur d'onde nécessaire

- Crabe : nébuleuse synchrotron \equiv plérion
- Reste de supernova \rightarrow pulsar jeune (< 2000 ans)
- Emission continue thermique et non-thermique (accélération)

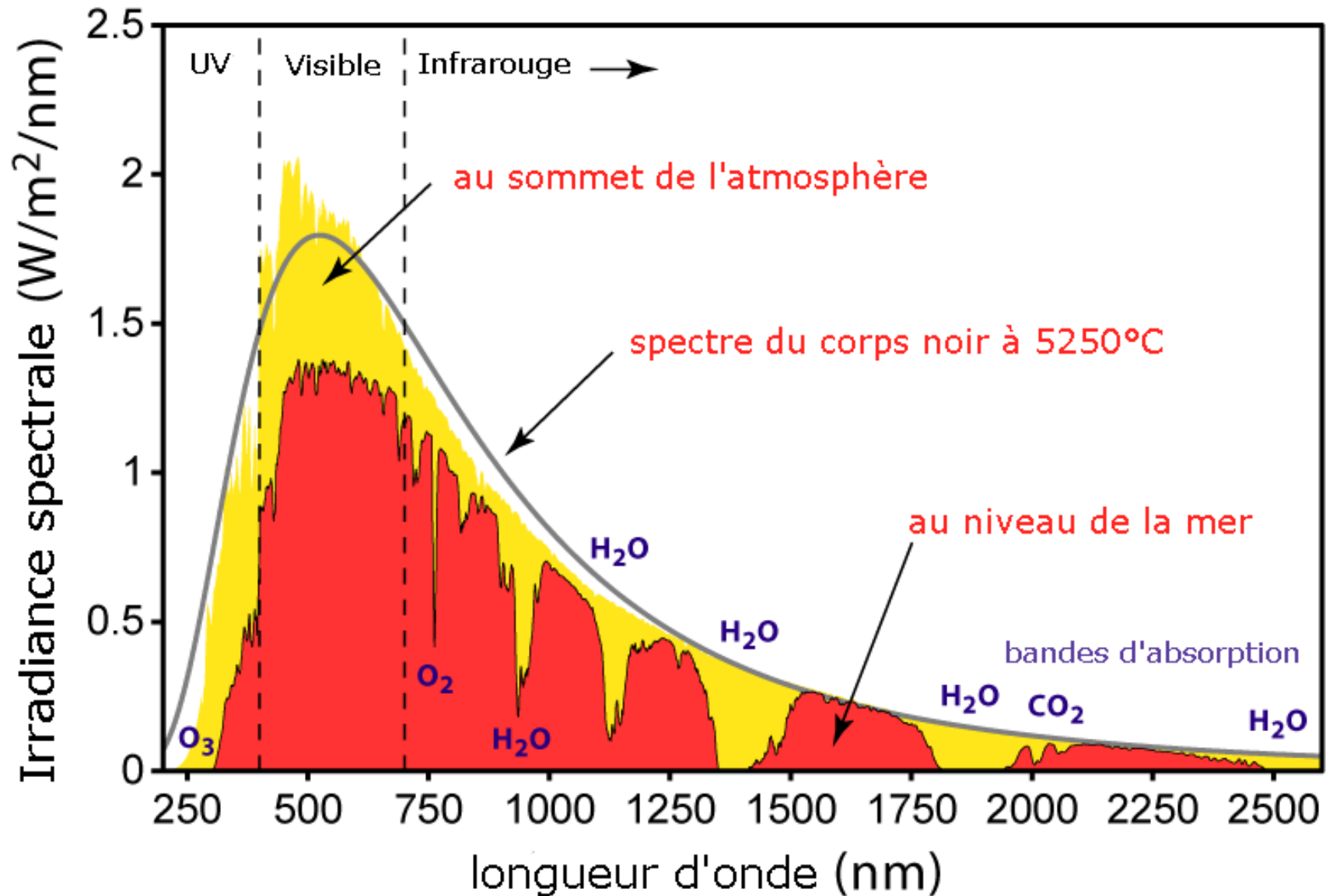


Horns et al., 2004

Transparence atmosphérique aux rayonnements



Spectre du rayonnement solaire



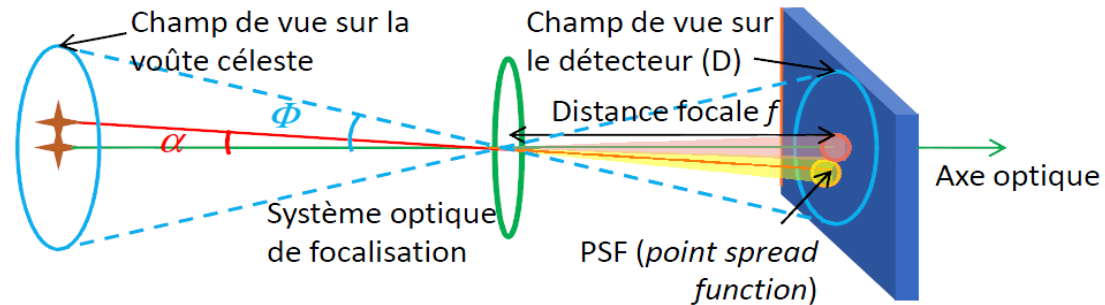
Critères de performances d'un télescope

- **Résolution angulaire α** :

- distance angulaire minimale entre 2 sources que le télescope sépare
- Le détecteur doit avoir des pixels au moins 2 fois plus petits que le diamètre d de la PSF (théorème d'échantillonnage) : $\sim 3-5$ fois

$$d = f \cdot \tan \alpha \approx f \cdot \alpha$$

$$D = f \cdot \tan \Phi \approx f \cdot \Phi$$



- **Précision de localisation β** :

- D'autant meilleure que la source est brillante : $\beta = \frac{\alpha}{\sqrt{n_\sigma}}$

- **Champ de vue Φ** :

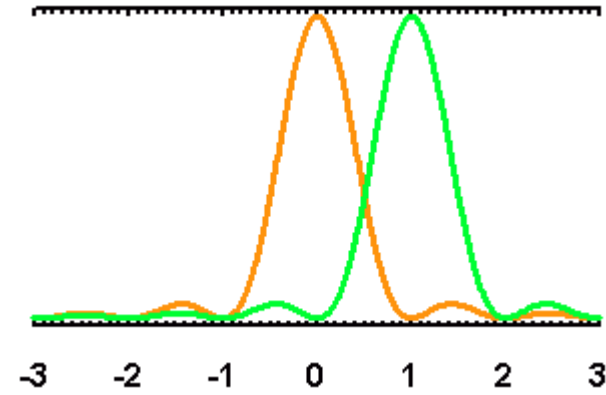
- Angle solide sous lequel le télescope observe le ciel (50% sensibilité sur l'axe).
- Le détecteur doit avoir une surface contenant tout le champ de vue.

- **Surface efficace de collection A_c** :

- Voir sensibilité

Critère de Rayleigh

- **Critère de Rayleigh** : on peut encore distinguer 2 sources ponctuelles si le premier zéro de la figure de diffraction se trouve à la place du maximum de l'autre.



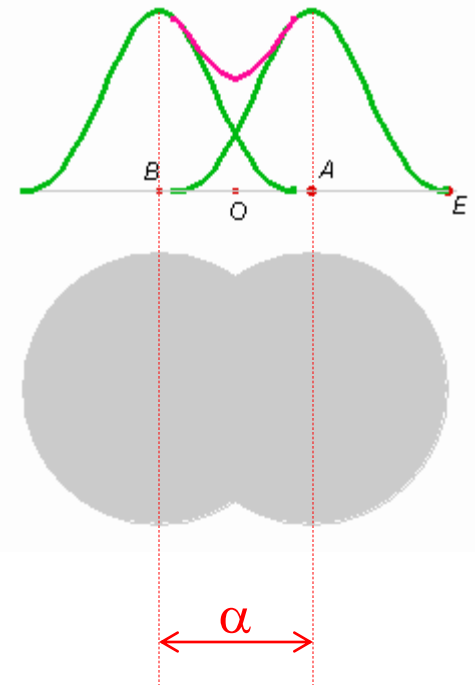
- Le rayon α du premier anneau sombre dépend de la longueur d'onde λ et du diamètre D :

$$\alpha = 1,22 \lambda / D$$

- On peut distinguer deux sources distinctes si leur écart angulaire d remplit la condition suivante :

$$d \geq 0,85 \alpha \approx \lambda / D$$

→ Pour augmenter le pouvoir de résolution il faut soit travailler à une longueur d'onde plus courte soit augmenter le diamètre de l'instrument !



Sensibilité d'un télescope

- **Sensibilité F_s dans une bande d'énergie** : flux de la plus faible source détectable
- Unité : photons.cm⁻².s⁻¹.keV⁻¹ ou erg.cm⁻².s⁻¹ ou crab
- Une source est détectée si son flux est mesuré avec un niveau de confiance n_σ (3σ) après un **temps d'exposition T**.

$$n_\sigma = \frac{S}{\sqrt{S+B}} \sqrt{T} = \frac{F_S \cdot A_C}{\sqrt{F_S \cdot A_C + F_B \cdot A_D}}$$

- S et B taux de comptage de la source et du fond en coups.s⁻¹
- Incertitude due a la statistique de Poisson et au modèle du bruit de fond
- Le taux de comptage de la source dépend de la **surface efficace de collection A_C** .
- Le taux de comptage du fond dépend de la **surface efficace de détection A_D** .

Quelques exemples de pouvoir séparateur théorique

Instrument	Diamètre	Domaine	Pouvoir séparateur (")	Pomme à distance (km)
Œil	7 mm	Visible	18*	1,1
Petit télescope	12 cm	Visible	1	20
Satellite ISO	60 cm	IR	8	2,6
Very Large Telescope (Chili)	8 m	Visible	0,015	1400
Very Large Telescope (Chili)	8 m	IR	0,6	33

- En pratique le pouvoir de résolution est limité à 1" par la turbulence atmosphérique

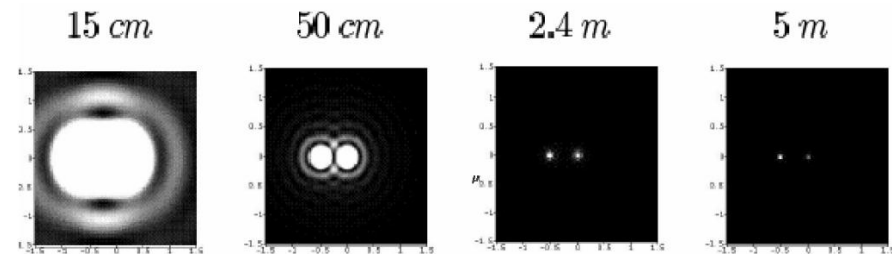
→ Optique adaptative ou télescope spatial

- Rappel :

– 1' (minute d'arc) = $1/60 = 0,016\ 6\dots^\circ$

– 1" (seconde d'arc) = $1/3600 = 0,000\ 277\dots^\circ$

- * : pour l'œil, la valeur vraie est de 60



La radioastronomie



Principe de la radioastronomie

- L'antenne, supposée adaptée, est électriquement équivalente, vue du récepteur, à une résistance pure. Mais une résistance portée à une température T présente à ses bornes une tension de bruit, capable de délivrer dans une bande de fréquence de largeur B une puissance : $P=kTB$

- Une antenne est caractérisée par une surface A et un lobe principal d'angle solide :
 $\Omega = \lambda^2 / A$ avec $\lambda (=c/\nu)$ longueur d'onde d'utilisation

- Deux cas se présentent lors de l'observation d'une radiosource :

- Source ponctuelle (a) :

la totalité du flux émis par la source est reçue sur l'antenne :

$$P_e = SAB$$

et la température d'antenne s'écrit :

$$T_A = \frac{1}{2} \frac{SA}{k}$$

- Source étendue (b) :

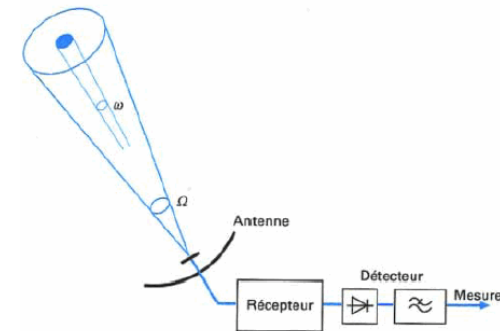
L'antenne étant vue de la source sous un angle solide A/d^2 ,

la puissance recueillie est :

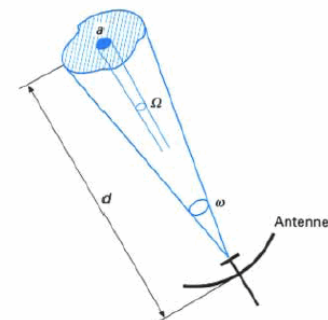
$$P_e = 2kTBd^2/A$$

la température d'antenne :

$$T = T_A$$



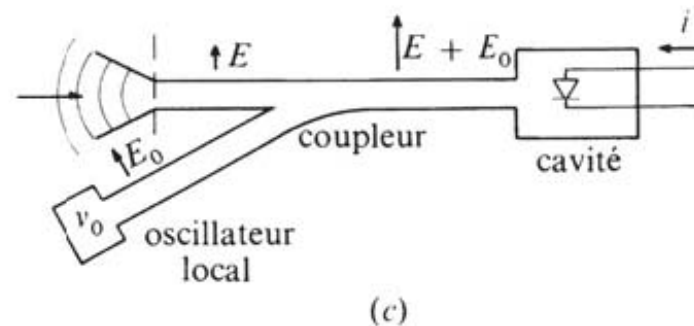
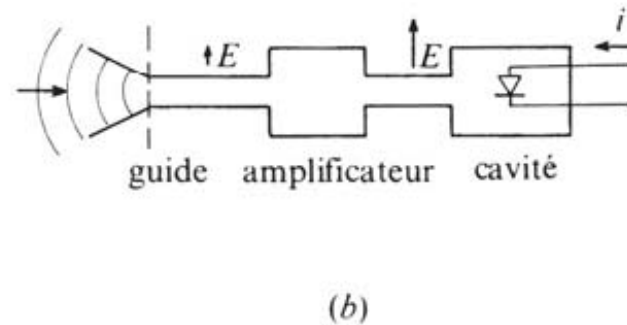
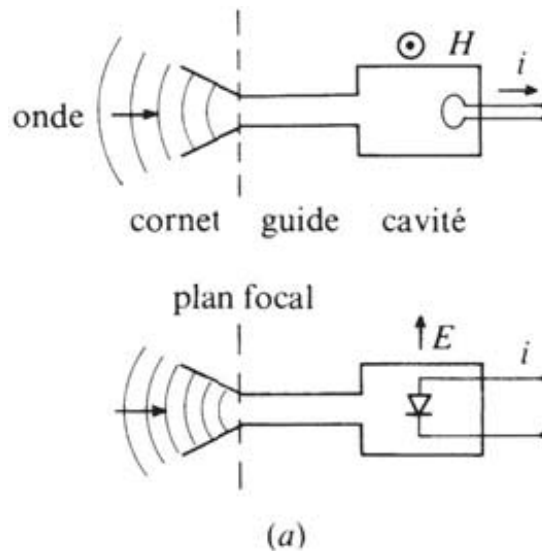
(a) observation d'une source ponctuelle



(b) observation d'une source étendue

Principe de la radioastronomie

- Trois configurations de réception de l'onde électromagnétique :
 - Détection directe (*a*)
 - Détection directe après amplification (*b*)
 - Détection hétérodyne, pouvant comprendre un amplificateur en amont du détecteur (*c*)



L'astrophysique des hautes énergies

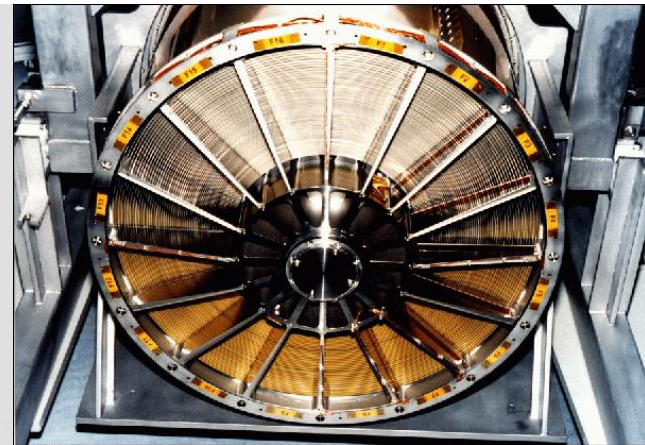
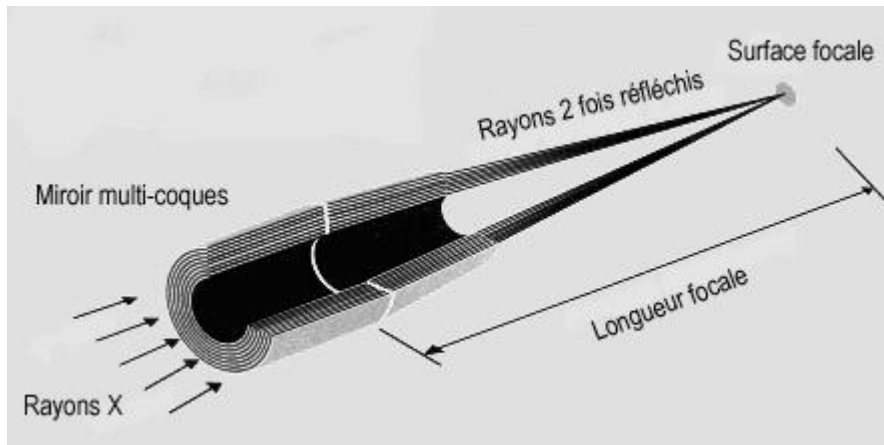
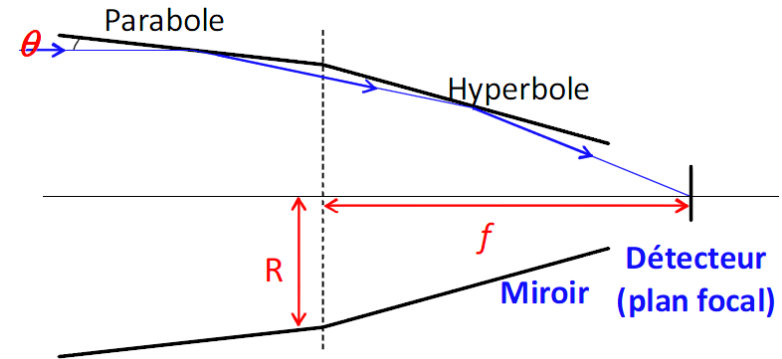
L'imagerie directe avec des miroirs

- Focalisation des rayons X par des **miroirs en incidence rasante** :

- Configuration de Wolter I : $\tan 4\pi = \frac{R}{f}$
- Surface efficace d'un miroir :

$$A_{\text{Coll}} = \pi \eta_R^2 (f \sin 4\theta_C)^2$$

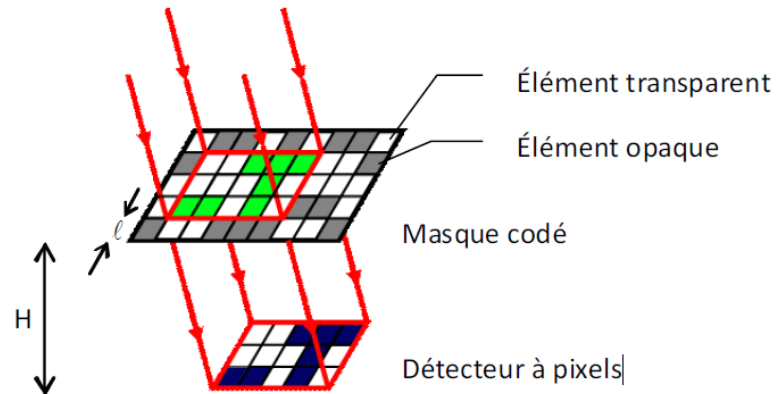
- η_R : réflectivité nécessite un polissage extrême
- θ_C : angle critique au-delà duquel la réflectivité n'est pas totale, décroît avec l'énergie (0,25° à 20 keV ; 0,1° à 50 keV)



Imagerie indirecte à masque codé

- Technique de collection et de localisation des rayons gamma :
 - la focalisation n'est pas possible à haute énergie.
 - **Système à masque codé** : la source à l'infini projette sur le détecteur une « ombre » caractéristique de sa position dans le ciel.

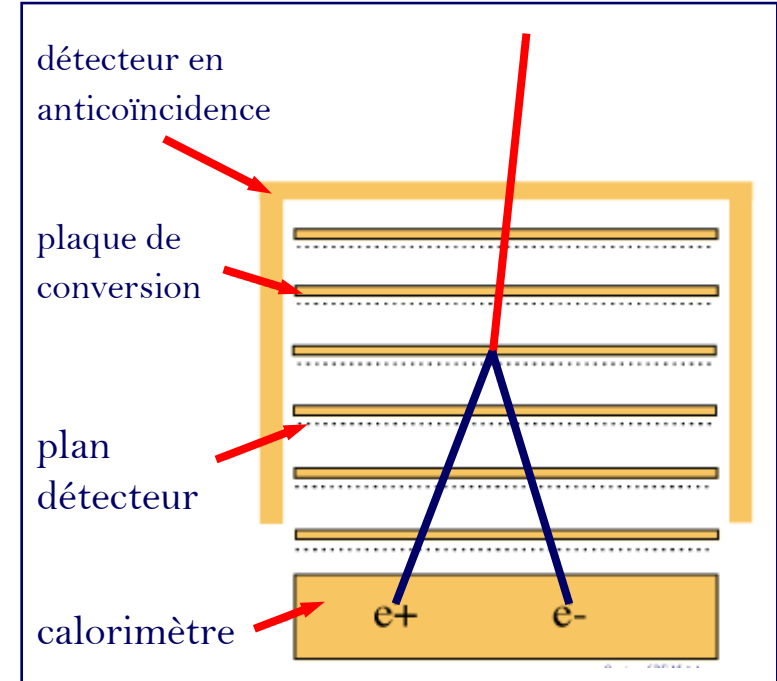
$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{l}{H} \right)$$



- Les masques pseudo-aléatoire permettent de reconstruire par **déconvolution** la position des sources de manière unique en minimisant l'influence du bruit de fond
- Éléments opaques doivent arrêter le rayonnement

Les télescopes à effet de paire

- Un photon incident d'énergie $E_\gamma > 2m_e c^2$ soit $E_\gamma > 1,02 \text{ MeV}$, produit une paire e^-e^+ dans le champ électrique qui règne au voisinage d'un noyau atomique
- La trajectoire des particules s'écarte peu de la direction du photon incident si $E_\gamma \gg 2m_e c^2$



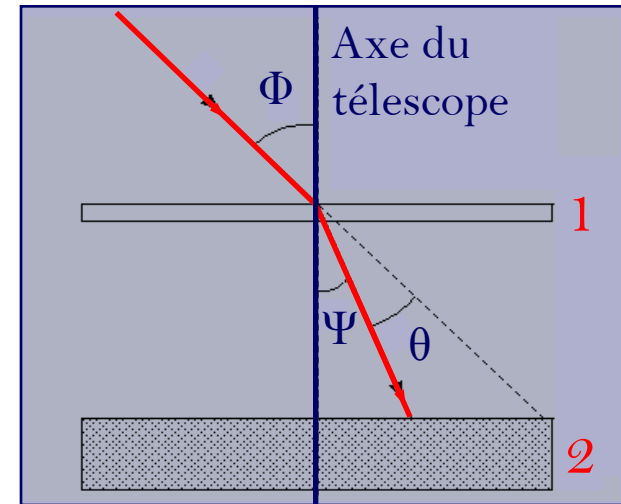
- Déviation moyenne :

$$\left(\langle \theta^2 \rangle\right)^{\frac{1}{2}} = q(E_\gamma, E_e, Z) \frac{m_e c^2}{E} \ln\left(\frac{E}{m_e c^2}\right)$$

Pour $E_\gamma = 100 \text{ MeV}$, la déviation moyenne $\theta \sim 1,5^\circ$

Les télescopes Compton

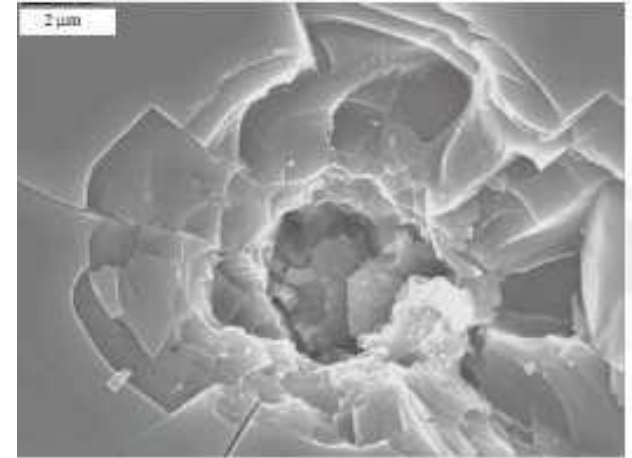
- Ils mettent en jeu deux plans détecteur sensibles à la position
- Plan 1 : fait d'un matériau à petit Z pour diffuser le photon gamma
- Plan 2 : fait d'un matériau à grand Z pour absorber le photon diffusé
- L'angle d'incidence Φ et l'énergie E_0 sont déduits des dépôts d'énergie E_1 et E_2 mesurés dans les plans 1 et 2 et de l'angle Ψ du photon diffusé



$$E_0 = E_1 + E_2$$
$$\Phi = \psi + \theta$$
$$\cos \theta = 1 - \frac{E_1 m_e c^2}{E_0 E_2}$$

Contraintes de l'instrumentation spatiale

- Pendant le lancement :
 - Chocs, vibrations
- L'environnement spatial :
 - **Variations thermiques** :
 - fatigue des matériaux
 - Panne des mécanismes, rupture
 - **Radiations** :
 - particules ionisantes ou énergétiques
 - Vieillesse accélérée des détecteurs, panne des électroniques
 - **Contamination** :
 - dépôt de particules, réactions de surface...
 - Dégradation des propriétés optiques
 - **Micrométéorites, débris spatiaux**

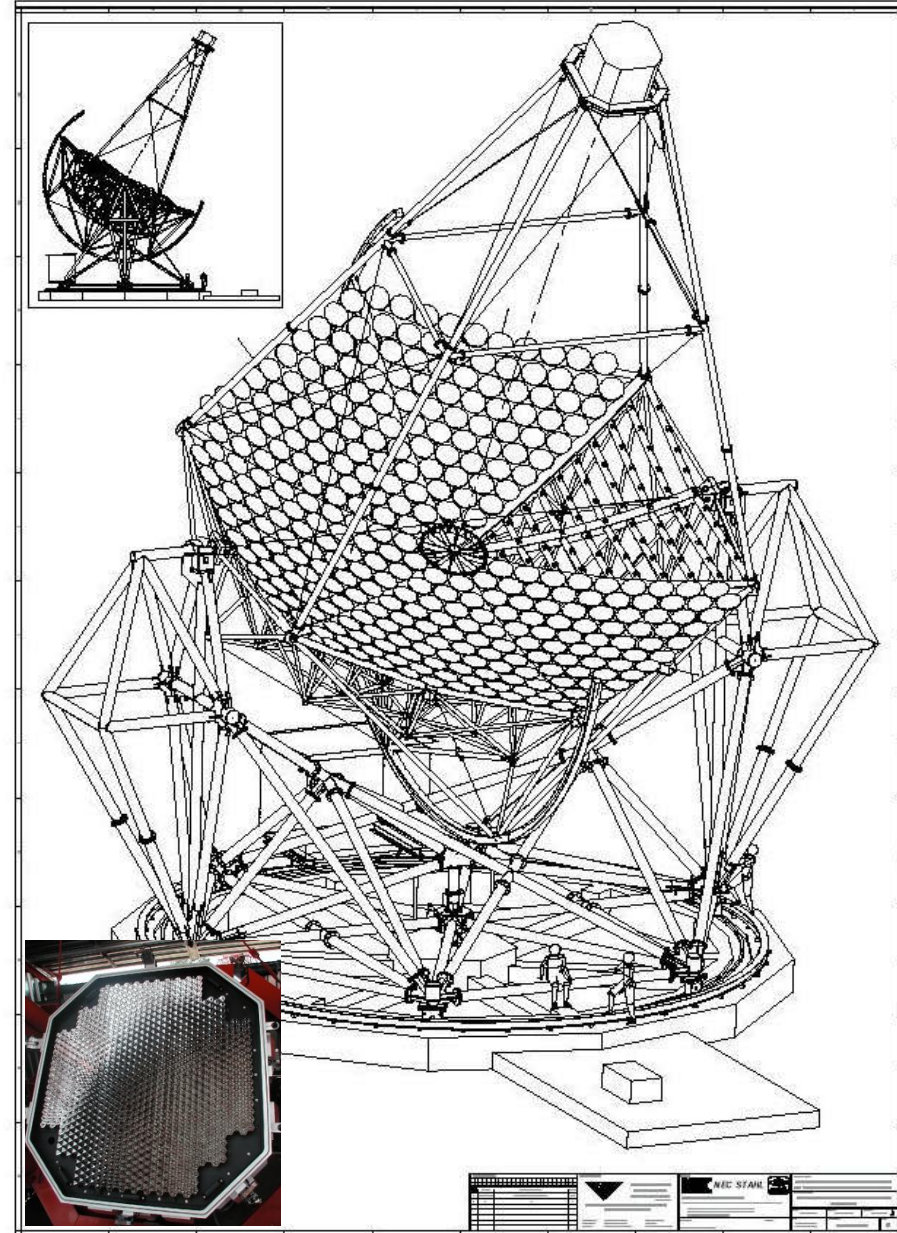


Particules Fe, $r = 0,3 \mu\text{m}$; $v = 10 \text{ km/s}$
cratères dans le silicium de $0,1$ à $10 \mu\text{m}$

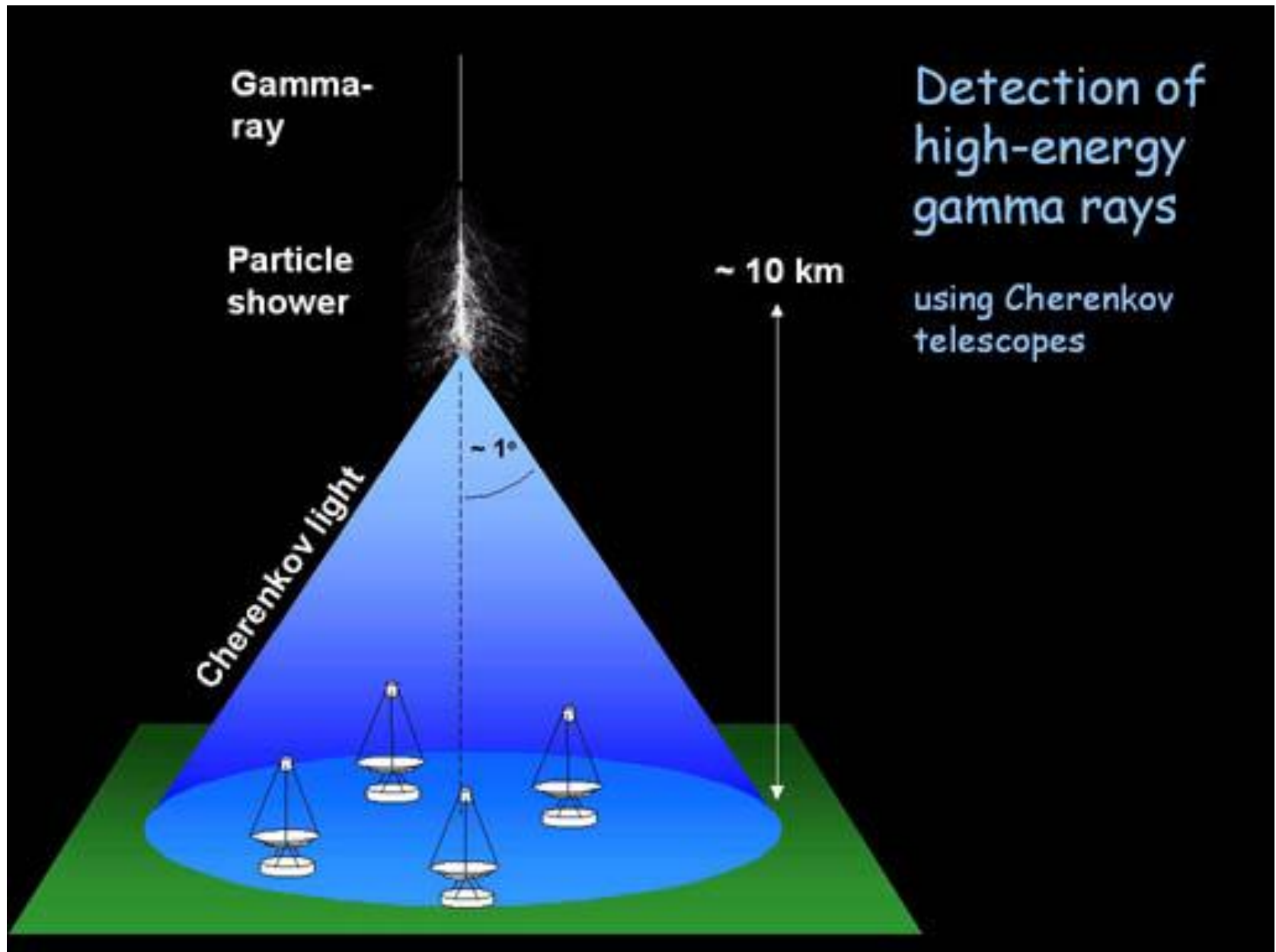
L'astrophysique des très hautes énergies

Le détecteur H.E.S.S.

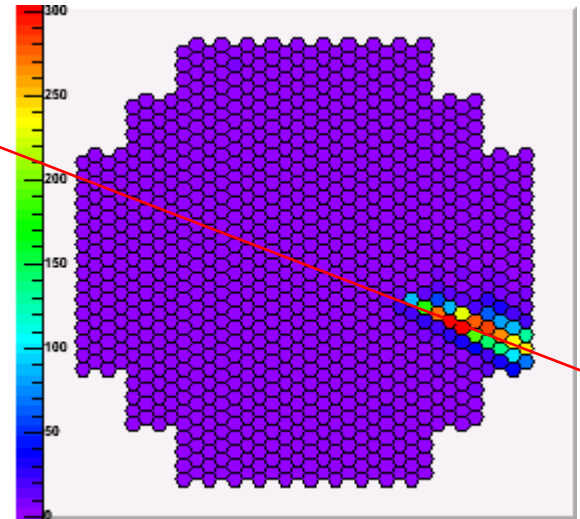
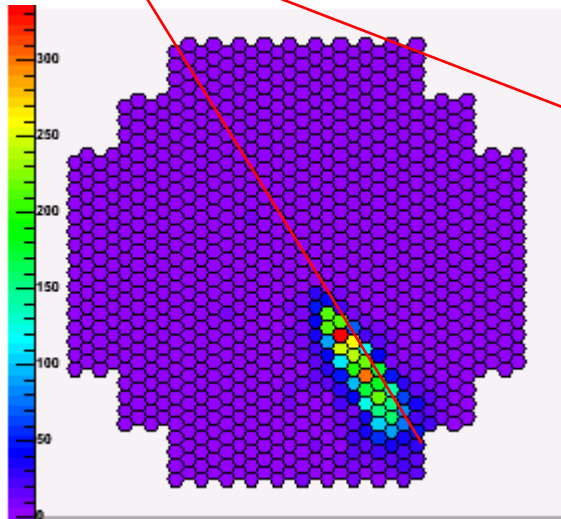
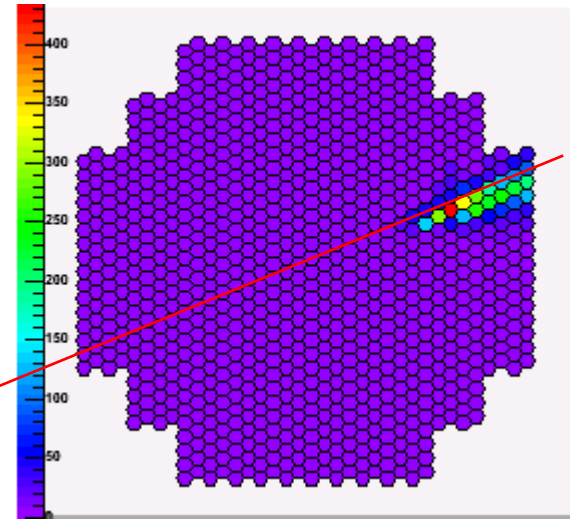
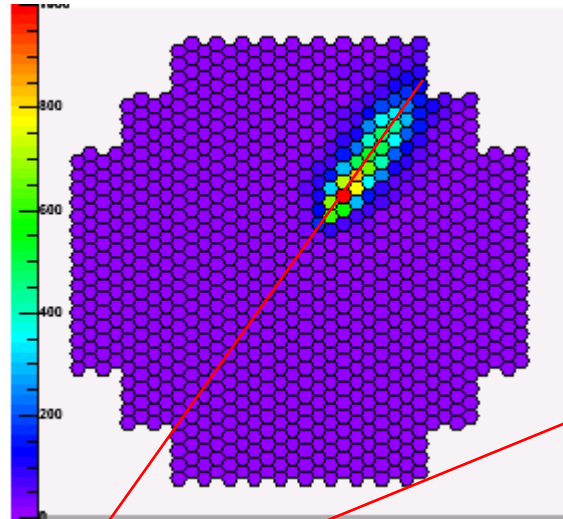
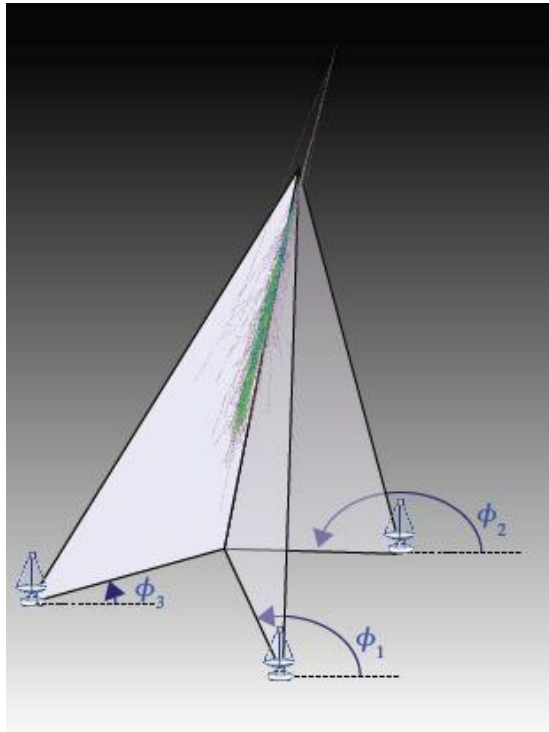
- **Système :**
 - Située en Namibie, 1800m d'altitude
 - 4 télescopes séparés de 120m
- **Télescope :**
 - Miroir de $\approx 107 \text{ m}^2$
 - Longueur focale: 15 m ($f/d \sim 1.2$)
- **Camera :**
 - 960 PMs (0.16°)
 - Champ de vue de 5°
 - Electronique intégrée dans la camera
 - Echantillonnage à 1GHz, intégration en 16 ns
- **Trigger central :**
 - Permet de sélectionner le nombre minimal de télescopes
- Hémisphère sud
- Grand champ de vue
- Opérationnel depuis Déc. 2003
- Optimisé pour **100 GeV – 20 TeV**



La technique Cherenkov atmosphérique [1/2]



La technique Cherenkov atmosphérique [2/2]



Les bolomètres

Principe du bolomètre

- Un **bolomètre** (du grec bolè, « radiation », et metron, « mesure ») est un détecteur développé par Samuel Pierpont Langley en 1878 afin d'étudier le rayonnement électromagnétique solaire.
- **Principe** : convertit l'énergie du rayonnement électromagnétique incident en chaleur au sein de l'absorbeur. Le signal observé est la variation de conductivité électrique du matériau en fonction de sa température (thermistance)

$$\Delta T = \frac{\Delta E}{C}$$

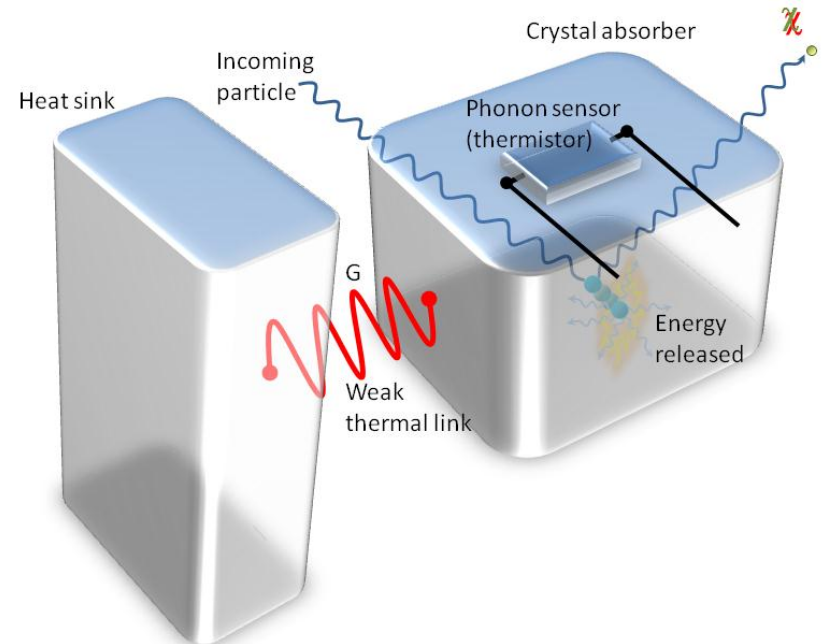
– Pour un cristal diélectrique en diamagnétique :

$$C = \alpha \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3$$

– proportionnalité directe ΔT & ΔE

– intérêt de $T \downarrow$:

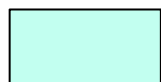
- sensibilité $\Delta T \uparrow$
- compense l'utilisation de cibles massives (recherches d'événements très rares)



Le succès des bolomètres, une histoire de quanta

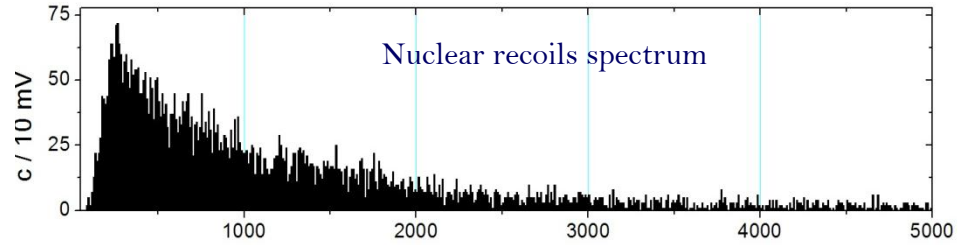
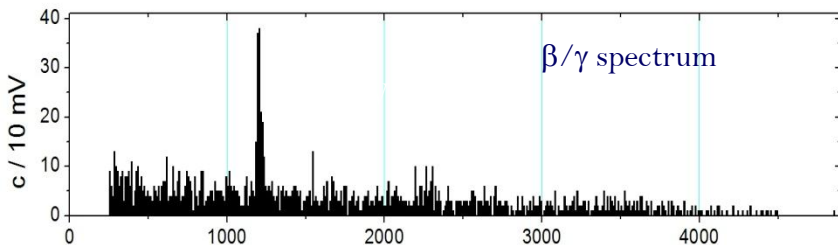
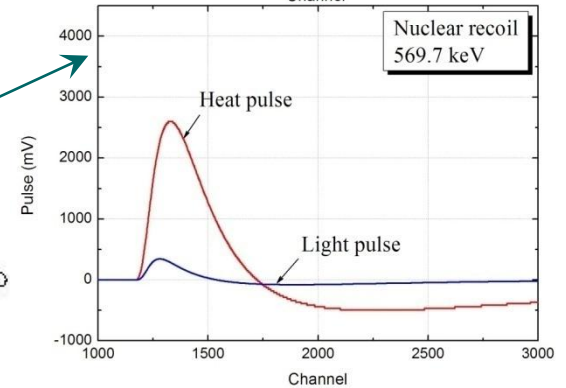
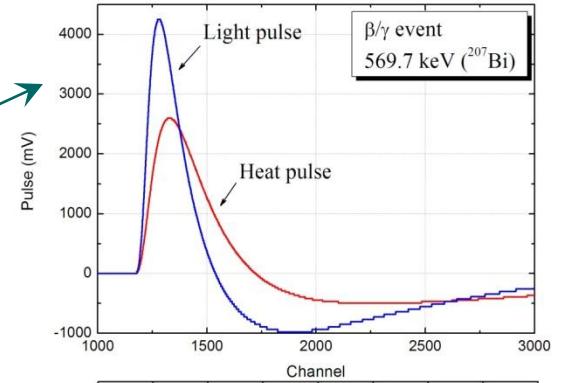
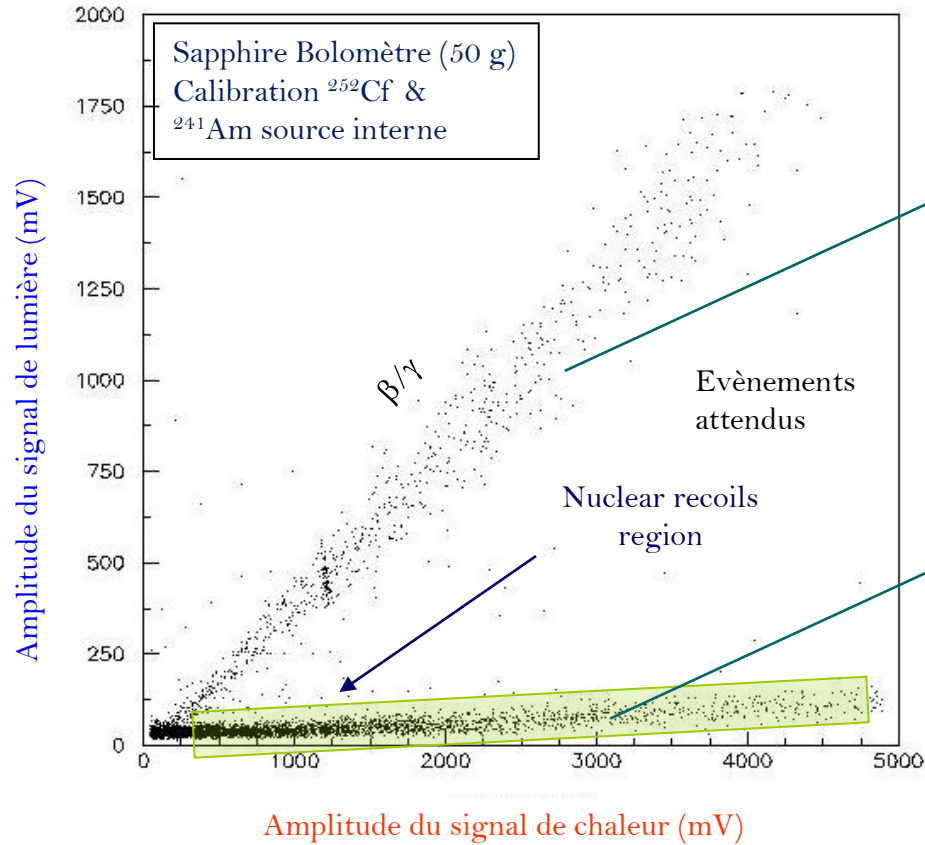
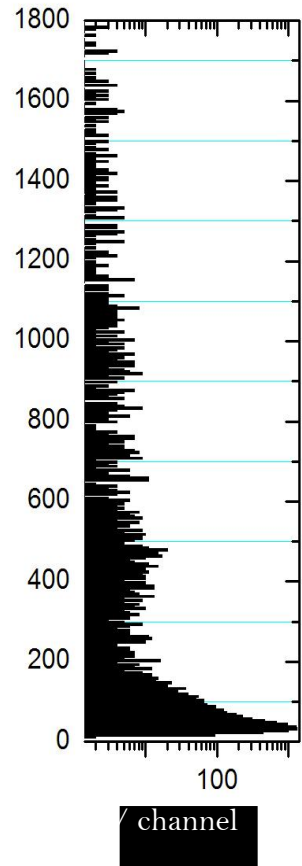
- Propriétés des bolomètres :
 - Grand choix de différents absorbeurs
 - Excellente résolution en énergie
 - Aptitude de détecter des particules de faibles énergies
 - Pouvoir d'identification des particules (bolomètre scintillant) avec mesures des chaleurs provenant de la lumière ou de l'ionisation

Détecteur	Produits de l'interaction	Dépense énergétique par quantum d'information (QE)
Scintillateur	Photons visibles	100 eV → 1keV
Compteur proportionnel	Ions	10 eV → 30 eV
Semi-conducteur	Paires électrons-trous	3 eV – 4 eV
STJ : jonction tunnel supra	Quasi-particules Paires de Cooper brisées	10^{-3} eV
Bolomètre à cible isolante	Phonons	10^{-5} eV à 10^{-4} eV
Bolomètre à cible métallique	Excitation d'électrons de conduction	$\ll 10^{-5}$ eV



Détecteurs refroidis

Identification de particules



Exemple de bolomètres

Détection de photons (sub-mm)

Détection de particules

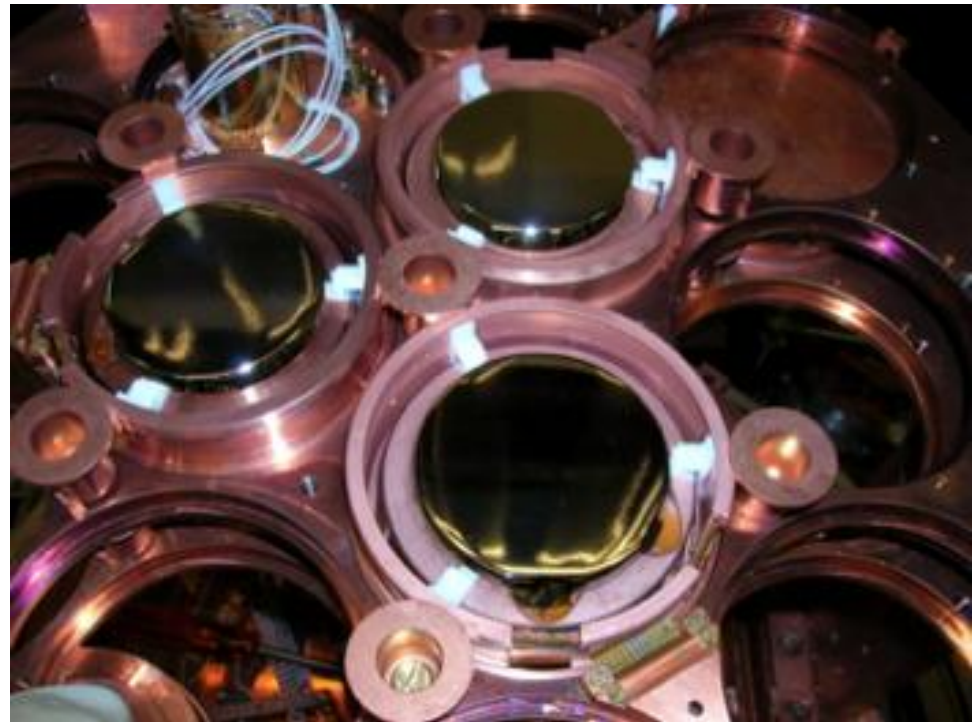


Cible en saphir de 25g, 50g, 200g & 1.2 kg

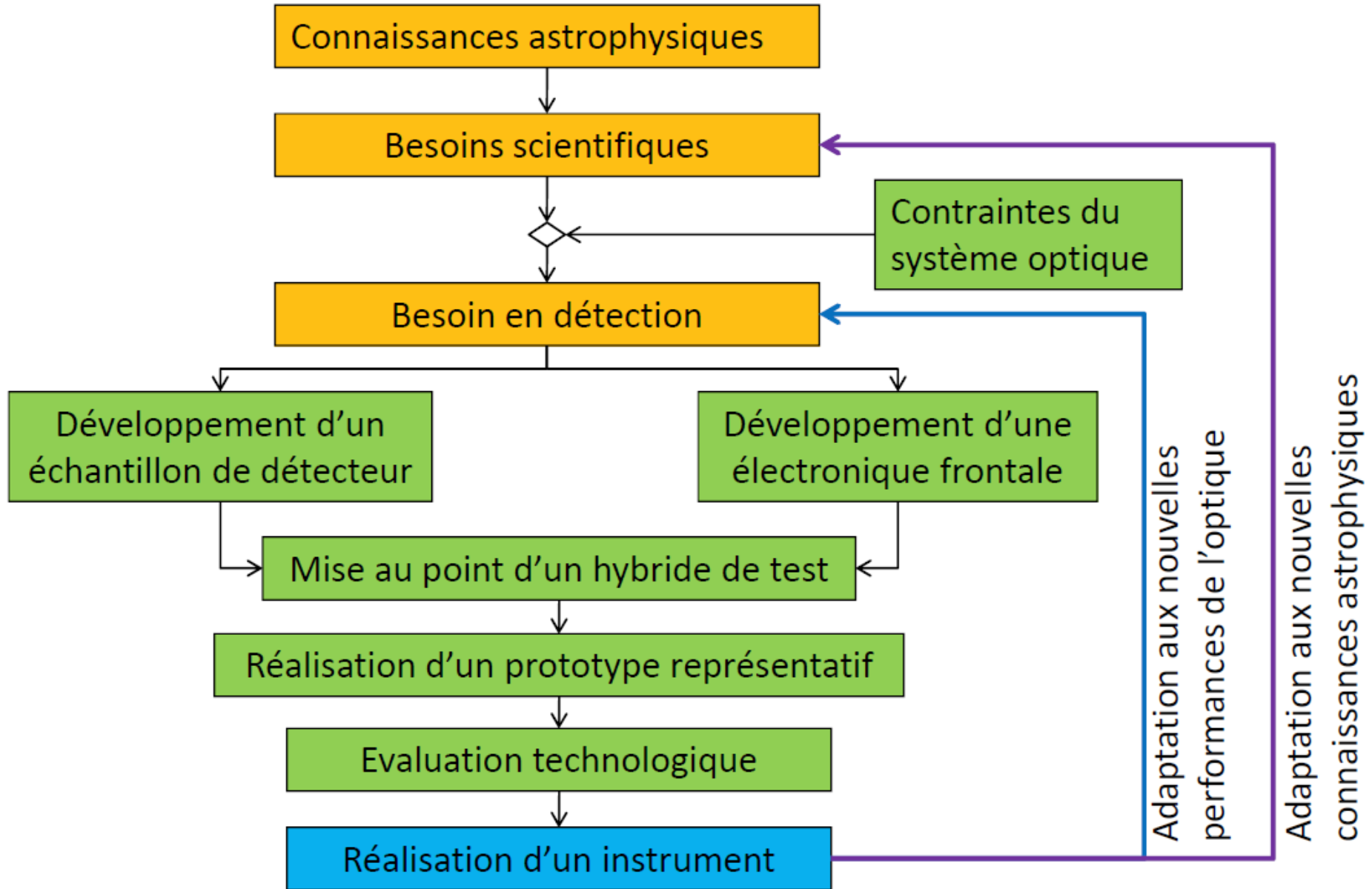
Pierre de Marcillac IAS, Orsay

Bolomètre HPGe de l'expérience Edelweiss

- Edelweiss : « Expérience pour Détecter les Wimps en site Souterrain »
 - WIMPS (**W**eakly **I**nteracting **M**assive **P**articles)
 - Il signaux induits par les WIMPs serait de très faible énergie (quelques dizaines de keV) et très rares
 - Détecteur : cristaux de germanium ultra pur (HPGe) à 20 mK
 - But : différencier le signal de Wimps, constitué par des reculs nucléaires, du bruit de fond majoritaire, constitué par la radioactivité, qui conduit principalement à des reculs électroniques



Cycle du développement d'un dispositif



Fin !

- David Attié (Physicien)
 - CEA Saclay :
Institut de Recherche sur les Lois Fondamentales de l'Univers (Irfu)
 - Email : david.attie@cea.fr
 - Tél : 01 69 08 11 14