

ASTROPHYSIQUE INSTRUMENTALE Examen 2012-2013

Session Janvier 2013

SANS DOCUMENTS - UNE PAGE A4 RECTO-VERSO AUTORISEE - DUREE 2H30

Les différents exercices sont indépendants. A l'intérieur d'une partie donnée, les questions peuvent souvent être traitées indépendamment. Il est conseillé de parcourir le sujet en entier, même rapidement, avant de démarrer.

PRESENTATION NOTEE SUR 1 POINT. Un bareme indicatif est mentionné.

CONSTANTES MATHÉMATIQUES ET PHYSIQUES

σ_S	=	$5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$	Const. Stefan	1 AU	=	$150 \cdot 10^6 \text{ km}$	Unité Astronomique
k	=	$1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$	Const. Boltzman	$1 M_{\odot}$	=	$2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$	Masse solaire
h	=	$6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$	Const. Planck	$1 L_{\odot}$	=	$3.86 \cdot 10^{26} \text{ W}$	L Solaire
e	=	$1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	Charge électron	$1 R_{\odot}$	=	$7 \cdot 10^8 \text{ m}$	R Solaire
c	=	$3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$	vitesse lumière	1 pc	=	$3.1 \cdot 10^{16} \text{ m}$	parsec
ϵ_o	=	$8.84 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$	Permittivité vide	1 an (moyen)	=	$3.16 \cdot 10^7 \text{ s}$	année moyenne
G	=	$6.7 \cdot 10^{-11} \text{ J.m.kg}^{-2}$	Const. Gravitation	1 AL	=	$9.5 \cdot 10^{15} \text{ m}$	Année Lumière
m_p	=	$1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	Masse proton	T_{\odot}	=	6000 K	T surface soleil

- Filtre L : $\Delta\nu \approx 10^{13} \text{ Hz}$; $h\nu_o \approx 5 \cdot 10^{-20} \text{ J}$; $F_o \approx 300 \text{ Jy}$

1- Observations dans la bande L [10]

On considère le résultat de la simulation d'observation dans la bande L présenté sur la figure 1 (instrument ISAAC sur le VLT). Les observations sont réalisées avec modulation (*chopping*) : chaque mesure est obtenue par soustraction d'une image sur la source (A) et d'une image sur une position voisine dans le ciel (B), voir figure 2

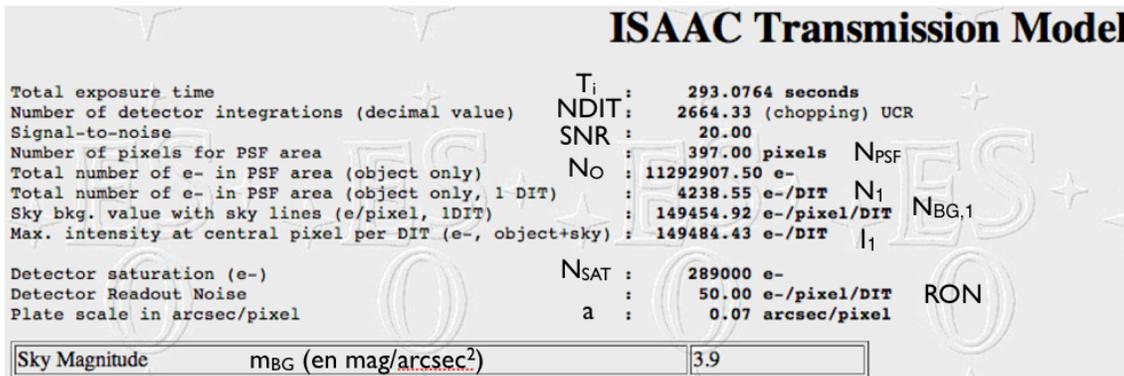


Figure 1: Résultat de simulation d'observations à $3.6 \mu\text{m}$ avec ISAAC

On adoptera strictement les notations indiquées sur la figure 1, et on donnera les résultats d'abord sous forme littérale avant de calculer les applications numériques.

- 1.1 Justifiez le mode d'observation utilisé. La magnitude de fond de ciel (en mag/arcsec²) vous paraît-elle correspondre à un flux de fond de ciel faible ou important ?
- 1.2 Quel est le temps de pose utilisé ? Quel est le modèle de PSF adopté si le seeing vaut 0.8'' dans le visible ?
- 1.3 Quel est le bruit statistique du à la source sur le pixel central ?

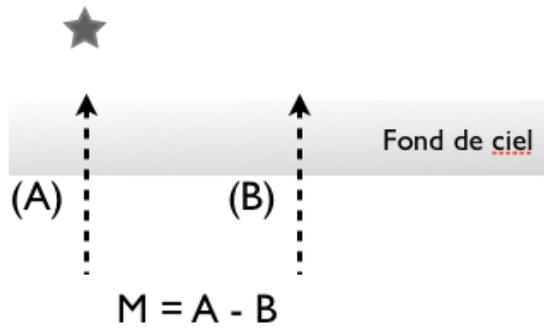


Figure 2: Observations modulées à $3.6 \mu\text{m}$ avec ISAAC

1.4 A partir des données dont vous disposez (ou que vous estimerez en les justifiant), estimez approximativement le nombre d'électrons obtenus par pixel et par pose dus au fond de ciel. Comparez votre résultats à celui de la simulation et discutez le.

Note : on aura intérêt à calculer les termes suivants :

- Flux de fond de ciel en $\text{Jy}/\text{arcsec}^2$ dans la bande L
- Nombre de photons de fond de ciel par seconde et par arcsec^2
- Nombre d'électrons reçus par pixel et par DIT.

1.5 En déduire une estimation de la transmission du système.

Dans les résultat de simulation de la figure 1, les données concernent les poses sur la source. Il y a donc autant de poses effectuées sur le ciel, et une mesure M (1 DIT) consiste en une paire de poses soustraites l'une à l'autre : $M = A - B$.

1.6 Si on connaît le $\text{SNR}(1)$ d'une mesure, donner le $\text{SNR}(N)$ obtenu par co-addition de N mesures.

On cherche d'abord à déterminer le SNR sur la PSF pour une mesure (1 DIT).

1.7 Etablir l'expression du SNR sous la PSF pour 1 DIT : $\text{SNR}_{\text{PSF}}(1)$. On explicitera bien l'ensemble des termes qu'on souhaite prendre en compte, puis on effectuera des approximations en les justifiant. Pourquoi le courant d'obscurité n'est pas indiqué ? Quel est le terme de bruit dominant ?

1.8 En gardant les mêmes conditions d'observation, déterminer quelle valeur devrait avoir le bruit de lecture RON_{lim} pour qu'il devienne le bruit dominant.

1.9 Montrer que le $\text{SNR}_{\text{PSF}}(1)$ est de l'ordre de 0.4. Est-ce normal ? Voit-on la source sur les images individuelles ?

1.10 En déduire la valeur de $\text{SNR}_{\text{PSF}}(2664)$. Conclure sur le résultat donné par la simulation.

1.11 Calculer le $\text{SNR}_{\text{PIC}}(1)$ (pixel central). En déduire $\text{SNR}_{\text{PIC}}(2664)$. En supposant que tout le signal de l'étoile est concentré sur le pixel central, déterminer une estimation de la magnitude de l'étoile observée.

1.12 Reprendre le calcul de la magnitude de l'étoile observée dans la simulation en utilisant un modèle plus réaliste de la PSF. Conclusion.

1.13 Indiquer comment obtenir un temps de pose global de 600 secondes. Peut-on augmenter le DIT ? De combien ? Discuter.

1.14 Donner une estimation du SNR atteint avec un temps de pose global de 600 secondes et un DIT de 0.11 secondes.

1.15 On suppose que le seeing double. Quels paramètres varient ? Quels paramètres restent constants ? Que devient N_{PSF} ? Que deviennent N_o et N_1 ?

1.16 Calculer le SNR obtenu sous la PSF pour un seeing de $1.6''$

2- Observations Radio Télescope [2]

On se propose d'observer des flots moléculaires en CO dans des naines brunes. Sur ces objets faibles, le signal radio correspondant est très faible (quelques dizaines de mK). On souhaite atteindre les performances suivantes :

- Sensibilité $3\sigma = 40 \text{ mK}$; - Résolution en vitesse $\Delta V = 0.25 \text{ km.s}^{-1}$.

En utilisant le simulateur de temps de pose de l'IRAM (ETC 30m), on obtient les résultats indiqués sur la figure 3, pour des observations avec le récepteur EMIR à 110 (Receiver e090) et 230 GHz (Receiver e230) respectivement. On prendra en

IRAM-30m (winter tracked time) for September 13th, 2012 deadline				IRAM-30m (winter tracked time) for September 13th, 2012 deadl			
User-defined parameters:				User-defined parameters:			
Frequency:	110.000 GHz			Frequency:	230.000 GHz		
Wavelength:	2.725 mm			Wavelength:	1.303 mm		
Frequency resolution:	0.092 MHz			Frequency resolution:	0.192 MHz		
Velocity resolution:	0.250 km/s			Velocity resolution:	0.250 km/s		
Spectrometer efficiency:	0.9			Spectrometer efficiency:	0.9		
Spatial resolution:	22.4 arcsec			Spatial resolution:	10.7 arcsec		
Typical elevation:	45.0 deg			Typical elevation:	45.0 deg		
Computed results:				Computed results:			
Receiver:	e090			Receiver:	e230		
Number of polarizations:	2			Number of polarizations:	2		
Number of pixels per pol.:	1			Number of pixels per pol.:	1		
rms noise:	40.000 mK[Ta*]			rms noise:	40.000 mK[Ta*]		
Winter conditions:	Excellent	Good	Average	Winter conditions:	Excellent	Good	Average
Precipitable water:	1.0	2.0	4.0 mm	Precipitable water:	1.0	2.0	4.0 mm
Tsys (mean per pixel):	131.5	137.7	149.7 K[Ta*]	Tsys (mean per pixel):	176.9	211.7	288.4 K[Ta*]
Frequency switching times:				Frequency switching times:			
- On source:	2.6	2.8	3.4 min	- On source:	2.2	3.2	6.0 min
- Telescope:	5.2	5.7	6.7 min	- Telescope:	4.5	6.4	12.0 min
Position/Wobbler switching times:				Position/Wobbler switching times:			
- On source:	2.6	2.8	3.4 min	- On source:	2.2	3.2	6.0 min
- Off source:	2.6	2.8	3.4 min	- Off source:	2.2	3.2	6.0 min
- Telescope:	10.4	11.4	13.4 min	- Telescope:	9.0	12.9	23.9 min

Figure 3: Résultat de simulation d'observations 30m IRAM

compte les conditions d'observation moyennes uniquement.

2.1 Pourquoi la largeur des canaux spectraux (Frequency resolution) est-elle différente pour e090 et e230 ?

2.2 Pourquoi le temps de télescope (temps total de travail) est-il plus important lorsqu'on travaille en mode "Position switch" qu'en mode "Frequency switch" ?

2.3 Pour les paramètres indiqués par l'ETC (T_{SYS} , temps de pose, etc.), vérifiez qu'on atteint bien la sensibilité requise dans le cas moyen.

2.4 Pourquoi T_{SYS} est-elle plus importante à 230 GHz qu'à 110 ?

3- Bolomètre [7]

Un bolomètre est un dispositif dont la résistance R varie en fonction de sa température T . Quand R varie, on utilise cette variation pour obtenir un signal de sortie en tension par exemple.

Le bolomètre est constitué d'un absorbant (exposé aux photons) et d'une source froide dont la température T_o est maintenue constante (par exemple avec un bain d'hélium liquide, voire figure 4) ; Rq : on a souvent $T_o < 1 \text{ K}$. Chaque photon contribue, quelle que soit sa longueur d'onde, et le domaine de sensibilité du bolomètre est déterminé par un filtre de largeur $\Delta\nu$ centré sur ν_o .

La température T de l'absorbant est déterminée par l'équilibre entre la puissance reçue (photons de la source et du fond + polarisation électrique) et la puissance perdue vers T_o à travers la conductance thermique G (figure 4-a). On a ainsi :

$$T = T_o + \frac{P}{G} = T_o + \frac{P_S + P_B + P_P}{G}$$

Où P est la somme des puissances reçues par le bolomètre : P_S est reçue de la source (Signal), P_B est reçue du fond (Background) et P_P est apportée par la Polarisation électrique : $P_P = UI$. Ces trois puissances (en W) contribuent à chauffer le composant légèrement au dessus de T_o .

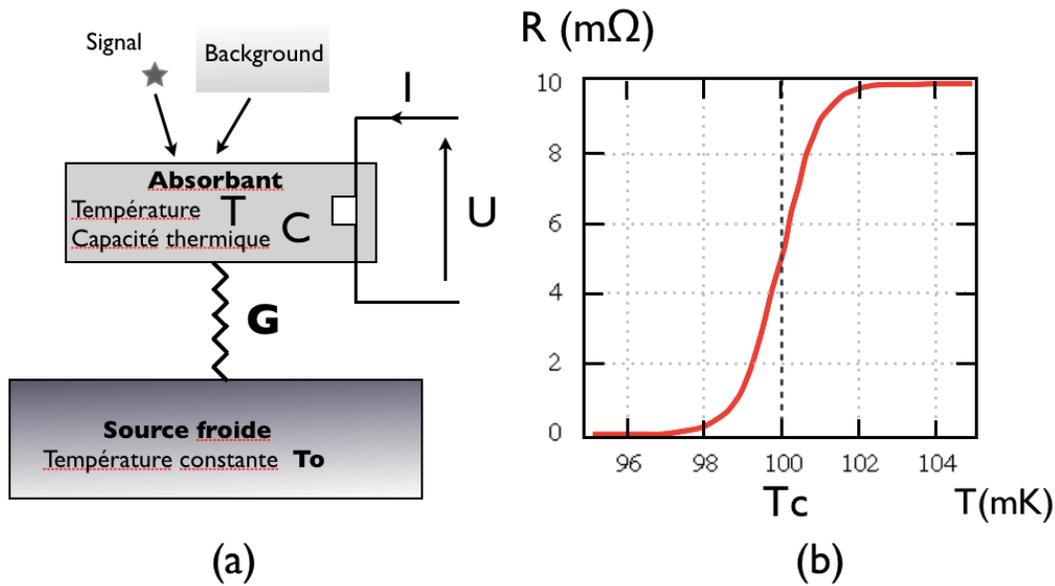


Figure 4: Gauche (a) : Principe du bolomètre ; droite (b) : Bolomètre "TES"

Une observation typique consiste à mesurer une source faible sur un fond de background important, par exemple une condensation de poussière devant un nuage moléculaire. Si P_B varie, on peut maintenir $T \approx \text{Cst}$ en variant P_P .

3.1 Rappeler l'unité de G .

3.2 En supposant que le background provient d'une émission de corps noir à la température T_{BG} et d'émissivité ε , établir l'expression de P_B en supposant que l'instrument observe avec une surface collectrice A dans un angle solide Ω .

3.3 Donnez une estimation des valeurs relatives de P_S , P_B , P_P .

Dans de nombreux cas, la résistance du bolomètre peut s'exprimer à partir d'une loi de puissance. Ainsi, pour un bolomètre à base de semi-conducteur, on a :

$$R = R_* e^{\sqrt{\frac{T_g}{T}}} \quad (1)$$

Où T_g est une température caractéristique du semi-conducteur.

Le taux de variation de la résistance avec T ("figure de mérite") est caractérisé par le paramètre $\alpha = \frac{d \log R}{d \log T} = \frac{T}{R} \frac{dR}{dT}$. On cherche évidemment à avoir des valeurs de α les plus élevées possible. Pour un bolomètre à semi-conducteur "classique", $\alpha \approx 5 - 10$.

3.4 Montrer que si R a l'expression donnée dans l'équation (1), α s'exprime de façon particulièrement simple en fonction de T .

On considère maintenant un bolomètre à transition brutale (*Transition Edge Sensor*, *TES*) dont la caractéristique est donnée sur la partie droite de la figure 4. Ce bolomètre est polarisé autour de sa température critique $T_C = 100$ mK. On suppose que la référence froide est à $T_o = 99$ mK, très proche de T_C .

3.5 Si on suppose que le bolomètre a une capacité thermique $C = 10^{-12}$ J/K et est relié au bain froid par une conductivité thermique $G = 5 \cdot 10^{-12}$ W/K, estimez la puissance de polarisation nécessaire P_P pour le maintenir à T_C en l'absence de rayonnement incident.

3.6 Déterminez la figure de mérite du TES à 98, 99, 100, 101, et 102 mK, et tracez cette réponse. Utiliser pour cela la figure agrandie fournie en fin d'énoncé (à découper et laisser dans la copie si nécessaire). Comparez au bolomètre classique. Conséquence sur la nécessité de garder la température du senseur quasi constante $> T_C$? $< T_C$?

3.7 Quelle limite prévoyez vous sur la variation de température $\Delta T = T - T_C$ maximum que le bolomètre peut supporter

avant de ne plus détecter de nouveaux photons ?

3.8 En déduire l'énergie maximum E_{\max} d'un photon incident que le bolomètre est capable de détecter. Que se passe-t-il si $E > E_{\max}$?

La polarisation du bolomètre peut être établie de 2 façons différentes : à tension U constante ($P_P = U^2/R$) ou à courant I constant ($P_P = RI^2$).

3.9 Si l'éclairement $P_S + P_B$ varie légèrement, montrer que seule la polarisation à tension constante permet de garder la polarisation du bolomètre stable à $T \approx T_C$.

On cherche maintenant à déterminer le type de réponse $T(t)$ du bolomètre lorsqu'il est éclairé par un seul photon d'énergie E .

3.10 En effectuant le bilan des puissances en jeu, montrer que la température du bolomètre obéit à l'équation différentielle suivante :

$$C \frac{dT}{dt} = P - G(T - T_o) + E \delta(t) \quad (2)$$

En particulier, on vérifiera que l'équation (2) est bien homogène en confirmant la dimension de $\delta(t)$ (fonction de Dirac).

On ne cherchera pas à résoudre (2) avec second membre mais on cherche à identifier la forme générale de la réponse $T(t)$.

3.11 Résoudre pour cela l'équation sans second membre (homogène) associée à l'équation (2). Quelle constante de temps fait intervenir la solution trouvée ? Tracer la réponse en température $T(t)$ à l'arrivée d'un photon.

3.12 Si on cherche à ce que le bolomètre puisse détecter et distinguer le plus de photons en séquence possible, conclure sur les valeurs de C et G .

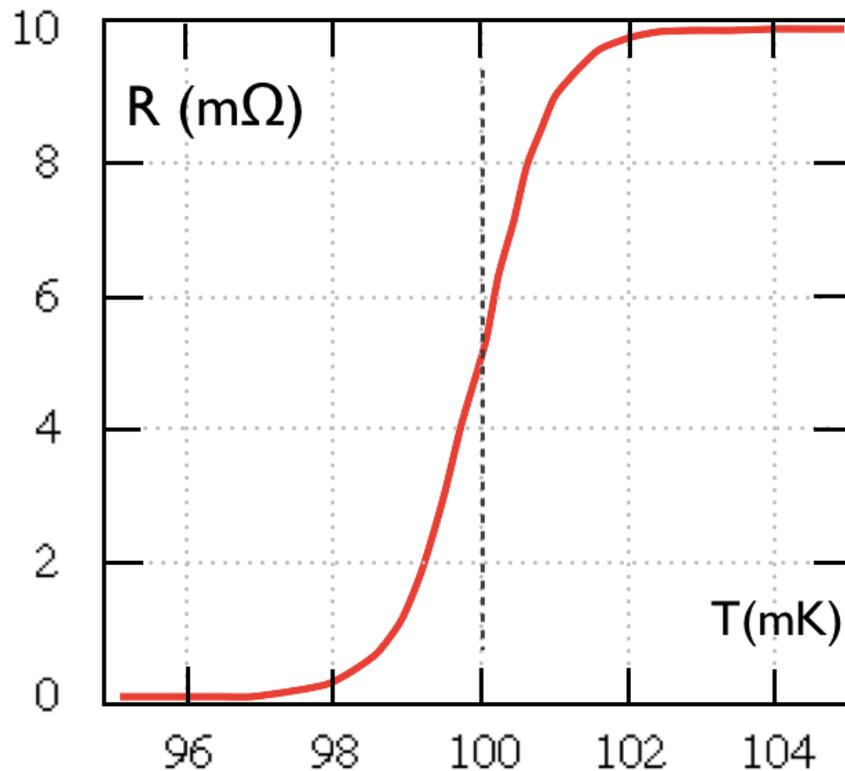


Figure 5: Bolomètre "TES"