

# SPICA FAR-Infrared Instrument **SAFARI**

A redshift machine in the MIR/FIR ?

Denis Burgarella pour le consortium SAFARI - France  
Observatoire Astronomique Marseille Provence  
Laboratoire d'Astrophysique de Marseille



# SAFARI en une vingtaine de minutes

- SAFARI 1 - un projet démocratique
- SAFARI 2 - qu'est-ce que SAFARI ?
- SAFARI 3 - une question de fond(s)
- SAFARI 4 - la science de SAFARI
- SAFARI 5 - l'organisation
- Résumé

# SAFARI 1 - un projet démocratique

# SAFARI 1 - un projet démocratique

- Le télescope SPICA est un projet de la JAXA ouvert à la collaboration internationale
- Ancien nom : European SPICA Instrument (ESI)
- Sélectionné par l'ESA (Cosmic Vision)
- Lors de la première réunion du consortium au RAL (Oxford, P.I. Bruce Swinyard), un vote démocratique anonyme a choisi un nom pour le projet :  
**SPICA FAR-INFRARED INSTRUMENT ou *SAFARI***

- 
- ESI
    - European SPICA Instrument
  - IRIS
    - IR I-maging S-pectrometer (thingy)
  - FISS (pr. FIZZ)
    - Far-infrared Imager Spectrometer for Spica
  - EMBASSY
    - European Multi-Band Advanced Spica Spectrometric SYstem
  - SAFARI
    - Spica Far infra Red Instrument
  - SFIS
    - Spica Far-infrared Imager Spectrometer

# SAFARI 2 - qu'est-ce SPICA/SAFARI ?

# SAFARI 2 - qu'est-ce SPICA ?

## Space infrared telescope for SPICA mission

Hidehiro Kaneda (ISAS / JAXA) and SPICA working group

ISAS : Institute of Space and Astronautical Science

JAXA : Japanese Aerospace Exploration Agency



- primary mirror: 3.5 m, single aperture  
clear aperture > 3.4 m

- telescope operated at 4.5 K

Requirements for SPICA telescope:

- image quality:

5  $\mu\text{m}$  diffraction-limited

Total WFE: <350 nm rms

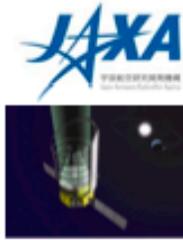
Surface roughness: <20 nm Ra

- total mass: < 700 kg

M1: ~ 300 kg, ~ 30 kg/m<sup>2</sup>

(ASTRO-F: 27 kg/m<sup>2</sup>)

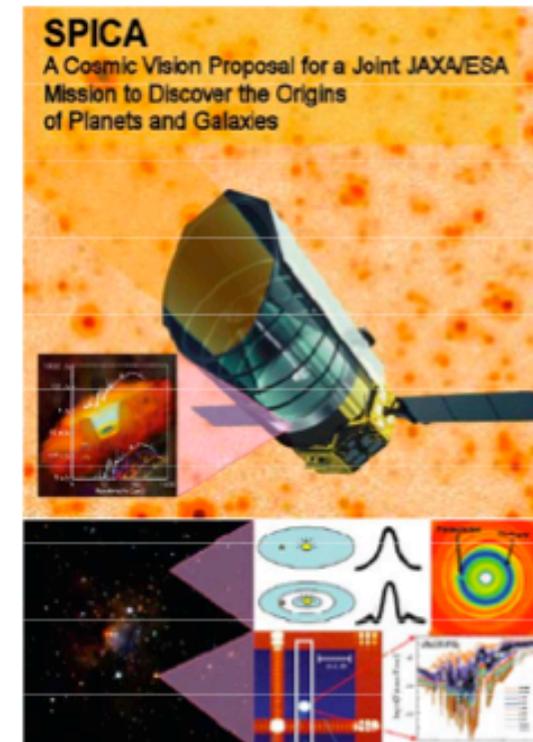
# SPICA - une mission internationale



## SPICA as an International Mission

**CNES**

- Europe (ESA, ESI Consortium)
  - Focal Plane Instrument
    - ESI: European SPICA Instrumentation (P.I: B. Swinyard, RAL, UK)
  - ESA Contribution
    - Telescope, Ground Station
  - Proposal selected in ESA/Cosmic Vision
    - Assessment Phase 2007-2009
- Korea (KASI, Seoul National University)
  - Collaboration on MIR Instrument
    - Infrared Working Group (P.I. H. M. Lee, Seoul University)
- USA (NASA/JPL, Caltech..)
  - BASS: Bolometer Array Survey Spectrograph
    - SMEX proposal submitted (P.I. M. Bradford JPL)



# SAFARI 2 - qu'est-ce SAFARI ?

Parameter	Specification
Instrument type	Imaging Fourier Transform Spectrometer
Wavelength range	30-210 $\mu\text{m}$ : Nominally divided into $\sim$ 3-4 sub-bands.
Instantaneous Field of View	2'x2'
Angular resolution	Diffraction limited performance above 40 $\mu\text{m}$
Pixel spacing	$F\lambda/2$ at the centre of each band
Parameter	Specification
Spectral resolution	Photometric Imaging: $R < 10$ Low Resolution Mode: $R \sim 100$ Med. Resolution Mode: $R \sim 2000 @ 100\mu\text{m}$ High Resolution Mode: $R \sim 10000$ (goal 100 $\mu\text{m}$ )
Sensitivity	Broad band photometry $< 50\mu\text{Jy}$ ( $5\sigma$ -1 hour) Medium resolution line sensitivity: $< 10 \times 10^{-20} \text{ W/m}^2$

SPICA

(SAFARI, FIR, Europe)

	Wavelength coverage	Pixel FOV	Total FOV	Detector
Channel 1	5 – 9 $\mu\text{m}$	0.098"	100" (Optional:300")	Si:As 1k x 1k (Optional:3x3mosaic)
Channel 2	8 – 15 $\mu\text{m}$	0.16"	160" (Optional:320")	Si:As 1k x 1k (Optional:2x2mosaic)
Channel 3	14 – 27 $\mu\text{m}$	0.28"	280"	Si:As 1k x 1k
Channel 4	20 – 38 $\mu\text{m}$	0.39"	400"	Si:Sb 1k x 1k

SPICA

(MIR, Japon/Corée)

	Wavelength coverage	Slit width (=2xP <sub>FOV</sub> )	Slit length	Number of slices	Resolving power	Detector
Channel 1	5 – 9 $\mu\text{m}$	0.53"	2.7"	3	30000	Si:As 1k x 1k
Channel 2	8 – 15 $\mu\text{m}$	0.88"	4.4"	3	30000	Si:As 1k x 1k
Channel 3	14 – 25 $\mu\text{m}$	1.5"	20"	5	6000	Si:As 1k x 1k
Channel 4	20 – 38 $\mu\text{m}$	2.2"	40"	8	3000	Si:Sb 1k x 1k

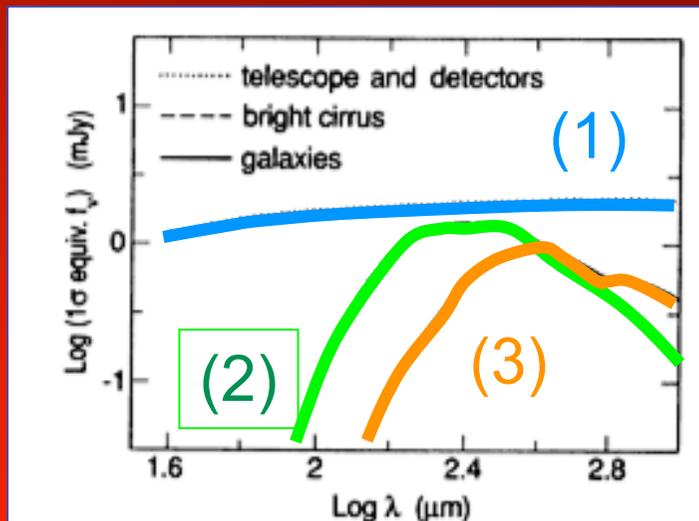
# SAFARI 3 - une question de fond(s)

# SAFARI 3 - une question de fond(s)

Décomposition de la limite en plusieurs composantes :

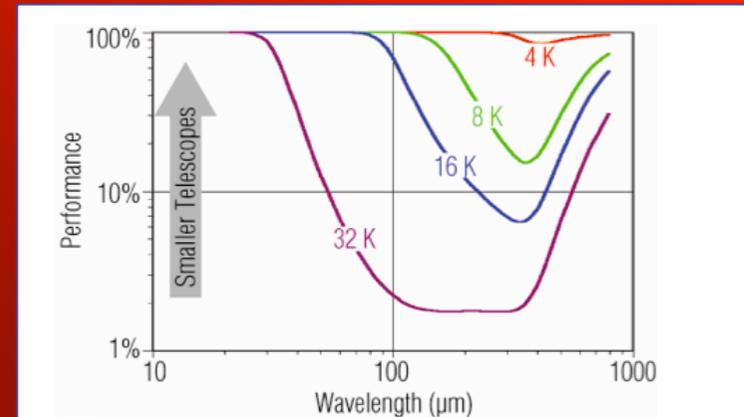
- Télescope\* et détecteur
- Cirrus
- Galaxies

\* valide pour un télescope spatial de 4m, passivement refroidi.



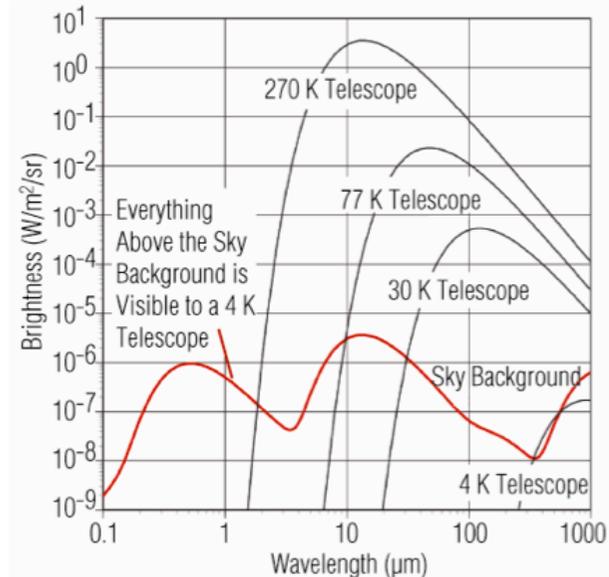
Helou & Breichman (1990, In ESA, From Ground-Based to Space-Borne Sub-mm Astronomy p. 117)

Fig. 4. Comparison of estimated levels of noise (after 1000 seconds of integration) from three different sources for a four-meter passively cooled telescope in Earth orbit, operating with a beam diameter of  $1.6\lambda/D$ . The dotted curve is dominated by photon noise due to thermal emission from the telescope. See §5 for more details.



LST005

Fig. 2 4K telescopes can be much smaller for non-photon-limited objects.

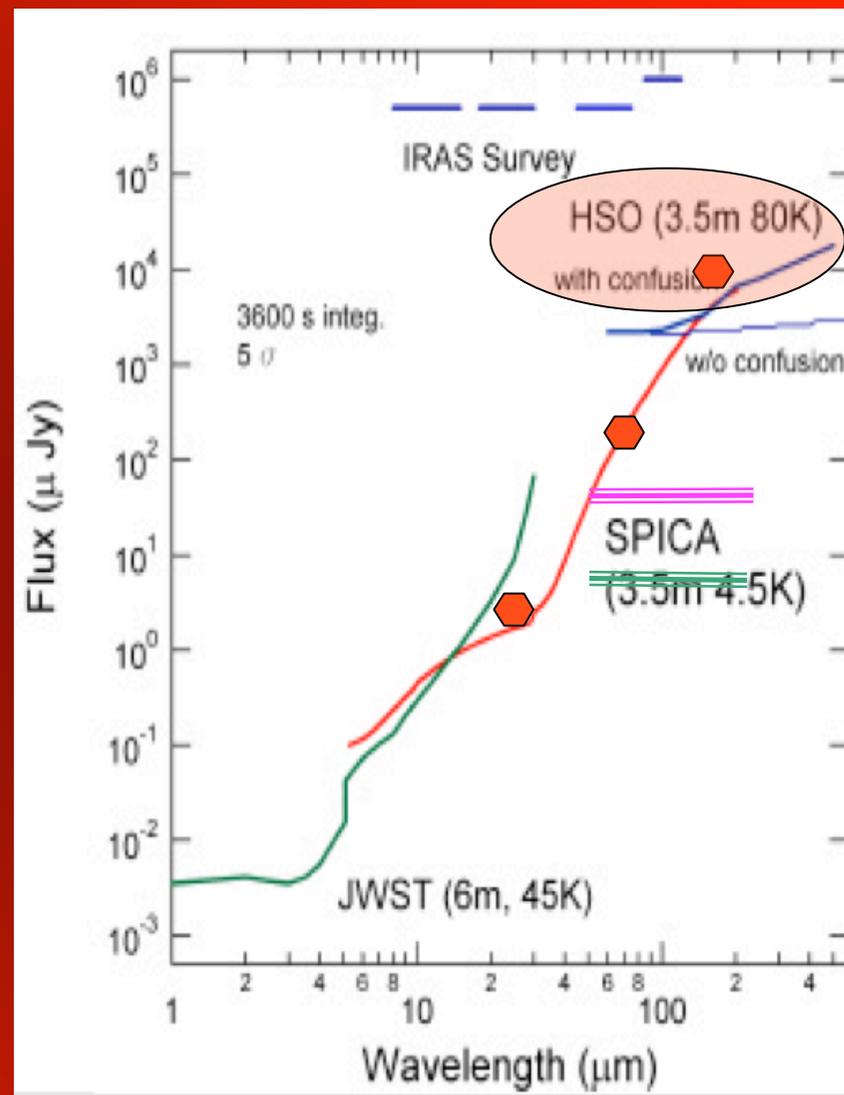


LST004

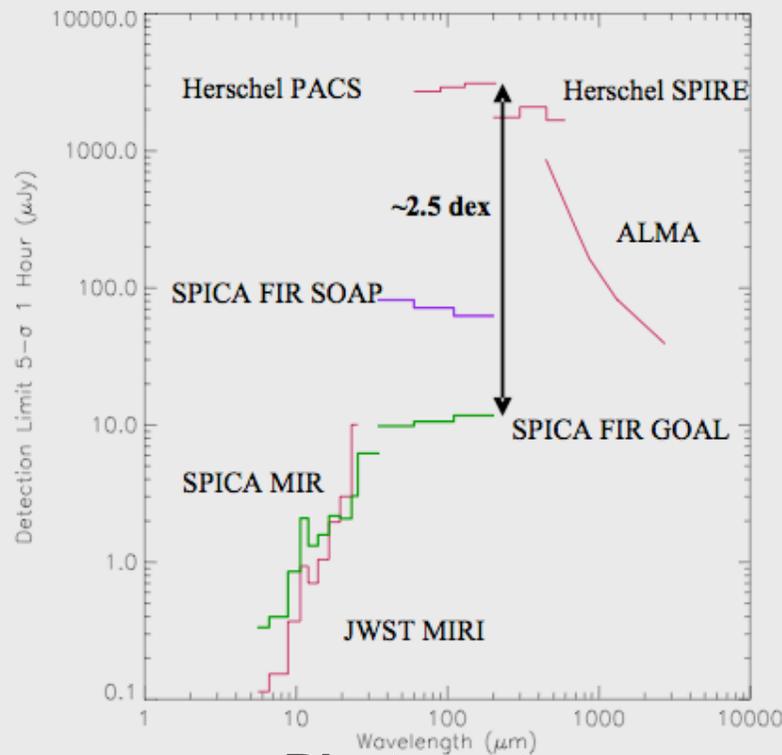
Fig. 3 4K is necessary to see the faintest objects.

# SAFARI 3 - une question de fond(s)

- Plusieurs confusions :
  - Emission des cirrus
  - Sources extragalactiques
- Ce dernier est dominant pour des grands télescopes tels que Herschel ou SPICA (Kiss, Klass & Lemke 2005 A&A 430, 343).
- Dole et al. (2004 ApJS 154, 93) ont calculé la limite de confusion totale pour SPICA (⬡).
- Limite de détection dans la bande 50 - 200  $\mu\text{m}$  en 1h,  $5\sigma$  ( $\Delta\sigma = 5 \text{ cm}^{-1}$ ) sera  $\sim 50 \mu\text{Jy}$  dans l'option basse et sera sous les  $\sim 10 \mu\text{Jy}$  dans l'option haute.

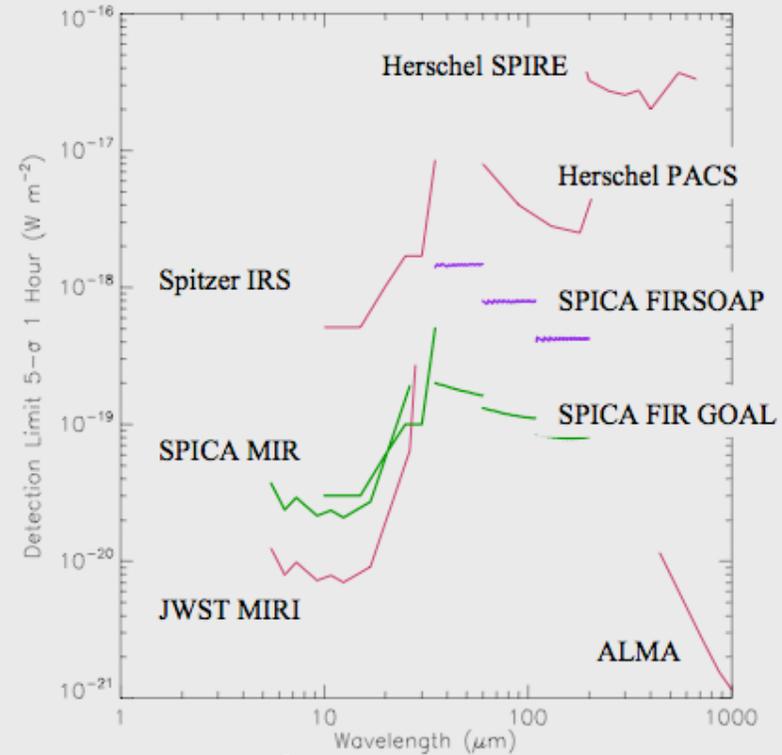


# SAFARI 3 - complémentarités



## Photometry

**Figure 1** - Predicted photometric performance of SPICA (green and purple) compared to predecessor and complementary facilities (red) given as point source sensitivities in  $\mu\text{Jy}$  for  $5\text{-}\sigma$  in 1 hour over the bands shown indicatively as horizontal lines. Note the  $2\frac{1}{2}$  orders of magnitude increase in FIR photometric sensitivity compared to PACS that will be achieved using goal sensitivity detectors on SPICA.



## Spectroscopy

**Figure 2** - Predicted spectroscopic performance of SPICA (green and purple) compared to predecessor and complementary facilities (red) given as single unresolved line sensitivity for a point source in  $\text{W m}^{-2}$  for  $5\text{-}\sigma$  in 1 hour. For ALMA 100 km/s resolution is assumed as this is appropriate for extra-galactic sources.

# SAFARI 4 - la science de SAFARI

# SAFARI 4 - la science de SAFARI

## Les origines encore et toujours :

- Origine 1: Formation des Planètes et Apparition de la Vie
- Origine 2: Systèmes Stellaires

- **Origine 3: Univers et ses composantes (les galaxies) :**

SPICA is ideally suited to study **star-formation activity hidden by dust absorption** by tracing the solid state features of dust further into the past than ever before. The combination of MIR and FIR spectroscopy on SPICA is also essential to **trace the formation and evolution of the super-massive black holes at galactic centres in relation to galaxy and star formation and trace the life cycles of chemical elements through cosmic history**. SPICA will be the first observatory with the ability to detect the MIR and FIR cooling lines out to the peak of star formation activity in the history of the Universe ( $z \sim 1-2$ ). It will do this for a wide range of galaxy types allowing a unique and unbiased view of galaxy evolution, the link between metallicity and star formation, and the relationship between starburst galaxies and active galactic nuclei.

# The rôle de la poussière dans les galaxies

Formation stellaire

Production de métaux

Formation de poussières



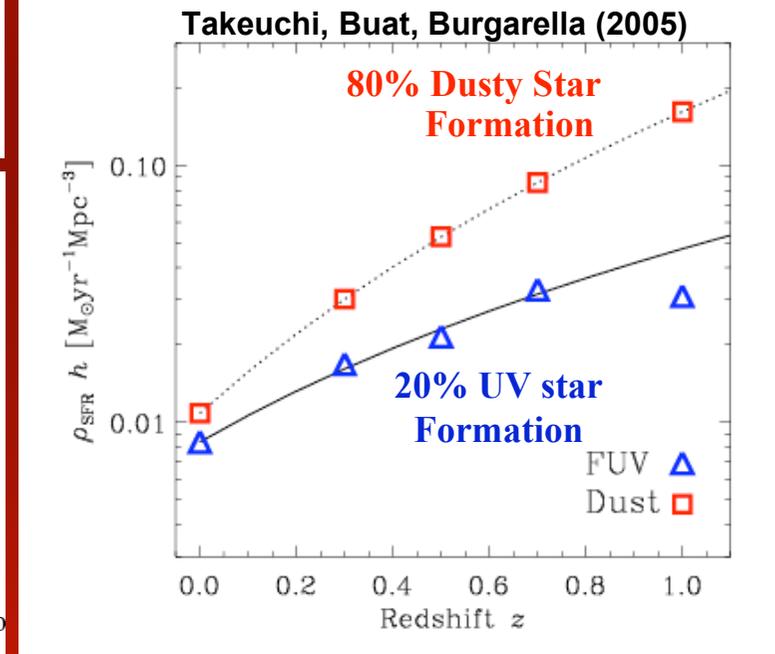
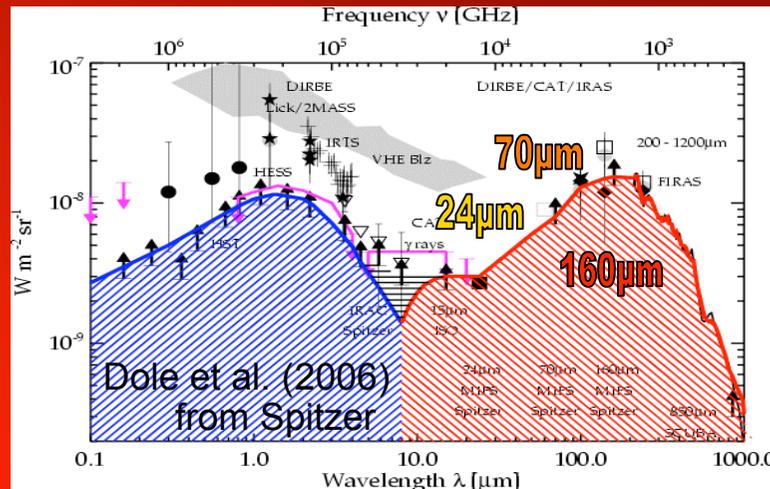
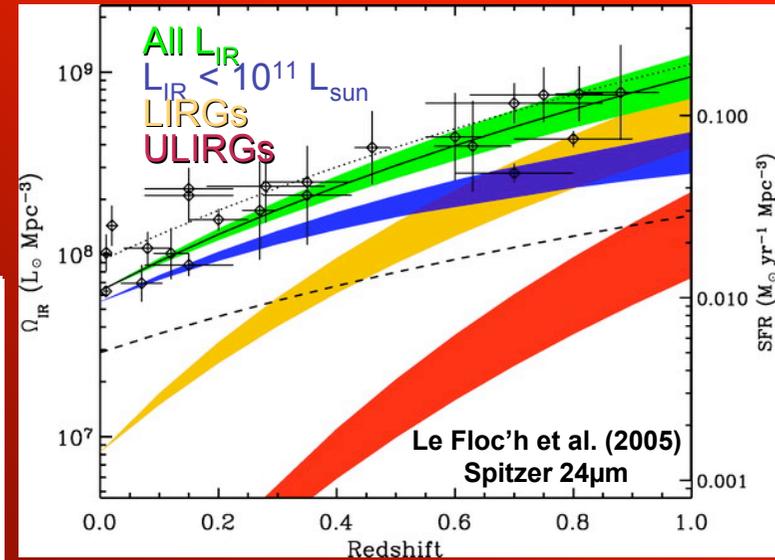
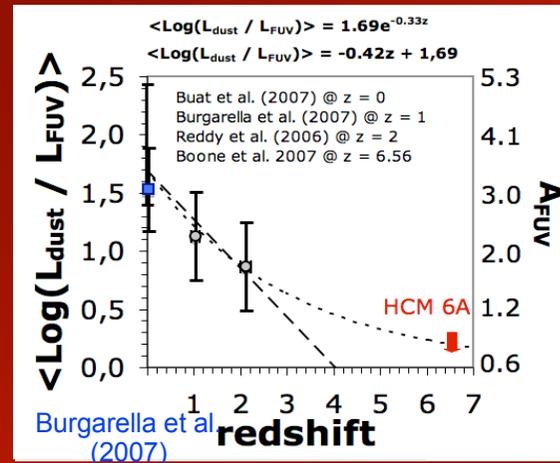
Les phases de formation stellaire active sont suivies par la formation de grains de poussière.

- les photons UV et optique sont “absorbés” par les grains de poussière et réémis dans le FIR
- connaître / apprendre / comprendre la formation et l'évolution des galaxies  
→ observations multi-longueurs d'onde comprenant obligatoirement le FIR

*Buat et al. : “An unbiased view of the cosmic star formation implies using both UV and FIR information”*

# SAFARI 4 - la science : des images ...

- Mesurer l'émission IR des galaxies UV
- Histoire de la formation stellaire (UV + IR)
- Résolution de 90% du fond cosmologique IR
- Comprendre la formation des poussières dans l'univers
- Détection des SN poussiéreuses et équation d'état
- Grandes structures



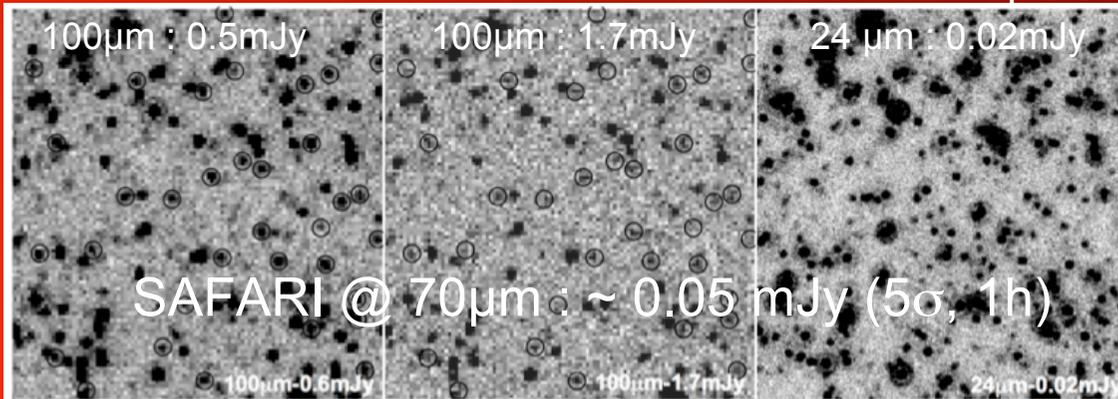
# SAFARI 4 - la science : des images ...

## Une courte histoire des champs profonds

- Le plus connu est certainement le HDF : 32194 réfs au 01/04/08 (HDF dans le titre) et 796 citations pour Williams et al. (1996)
- IRAS Deep Field (Keel et al. 1998) :  $0.5^\circ \times 1.5^\circ$  jusqu'à 10 mJy et  $z \sim 0.51$
- ISO HDF Sud (Oliver et al. 2002) : fov de 2.5-arcmin en rayon jusqu'à  $\sim 100 \mu\text{Jy}$  et  $z \sim 1.5$
- Spitzer GOODS (Dickinson & Giavalisco 2003) : fov  $160\text{-arcmin}^2$  down jusqu'à  $20 \mu\text{Jy}$  à  $24\mu\text{m}$  et  $z \sim 3$  et à  $70 \mu\text{m}$  (Frayser et al. 2006) :  $10' \times 10'$  jusqu'à 1.2 mJy
- Herschel GOODS (Elbaz et al. 2010 ?)

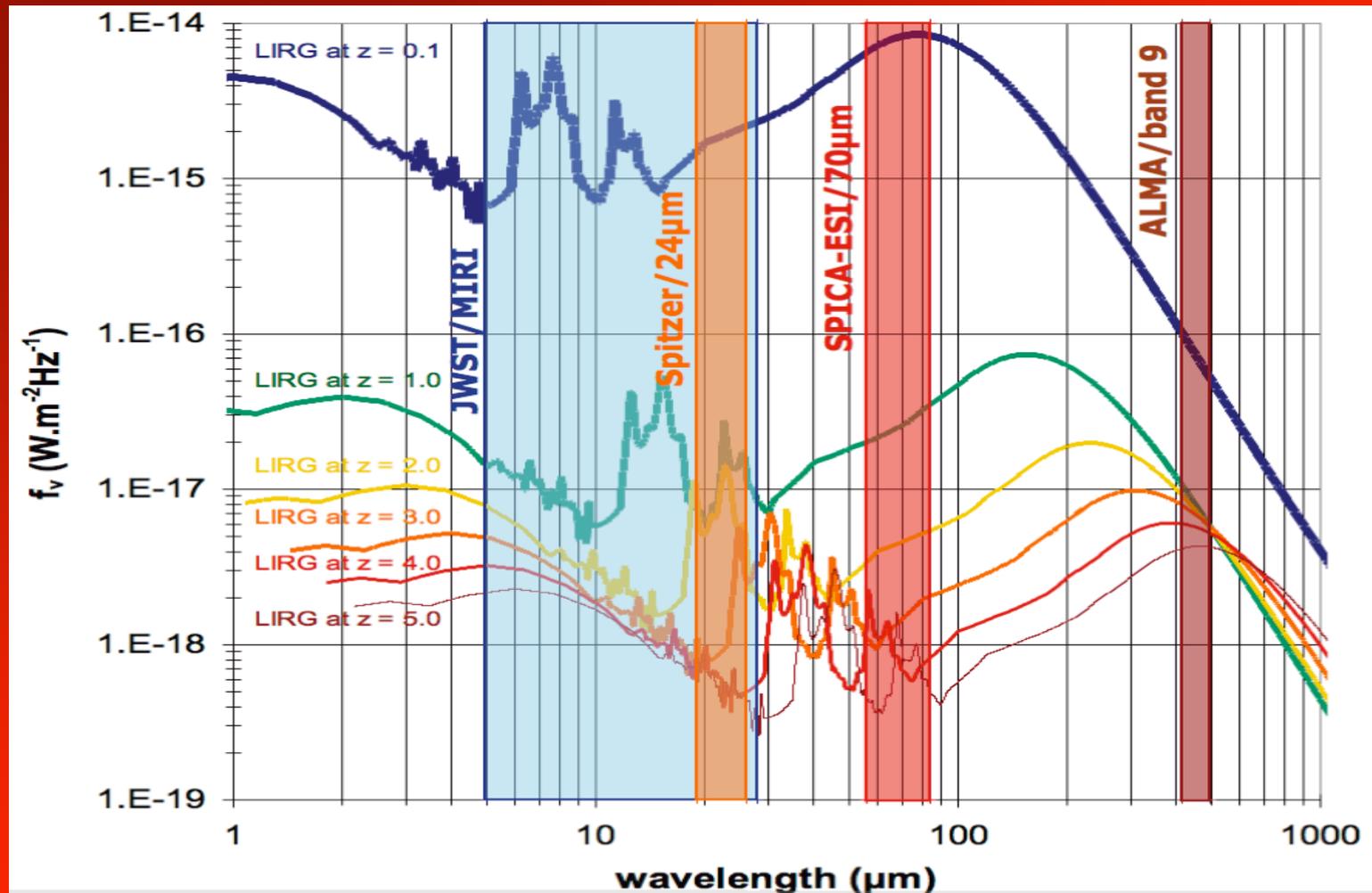


GOODS-Herschel      GTO/Herschel      GOODS / Spitzer

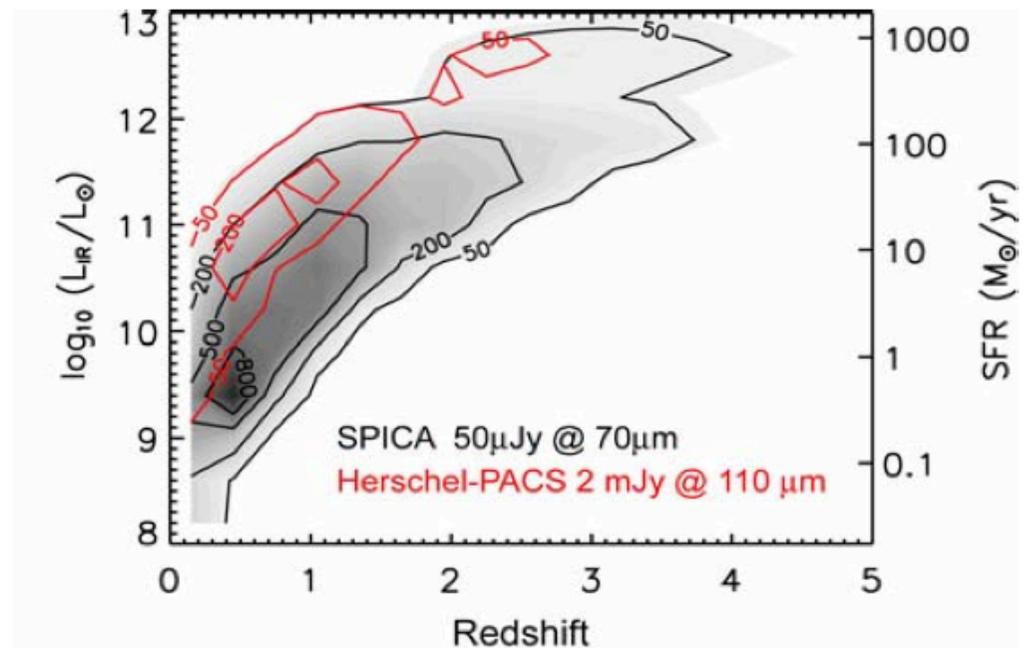


# SAFARI 4 - la science : des images

Observer le continuum dans un domaine libre de la contamination des PAHs / silicates jusqu'à  $z \sim 3$ .



# SAFARI 4 - combien de galaxies, à quel redshift et à quelle luminosité?

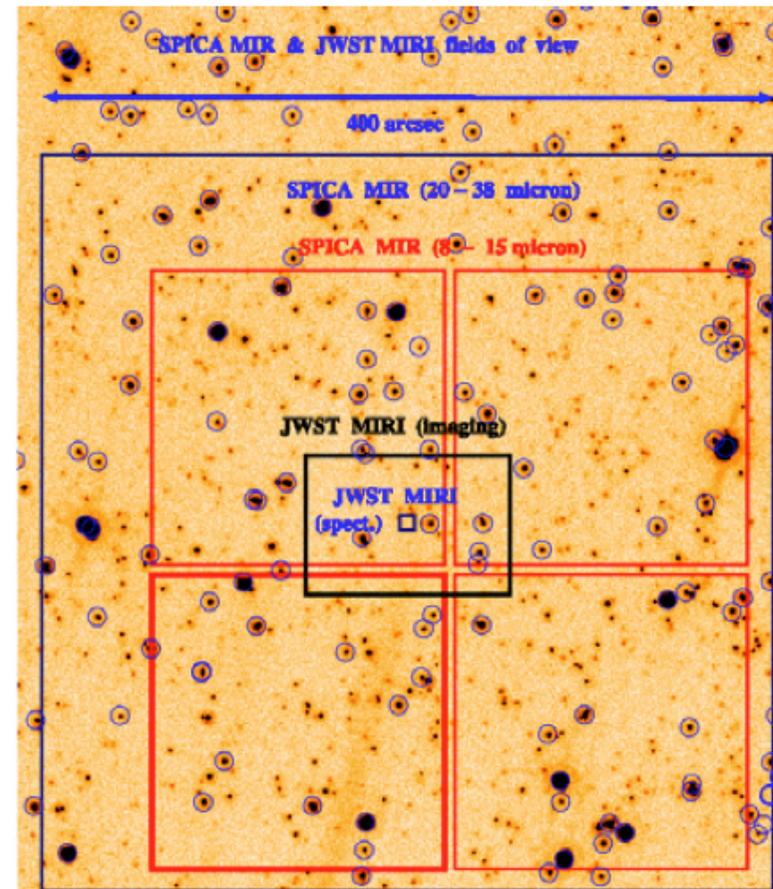


**Figure 15** - Expected number of sources of a given LIR (or equivalently star formation rate) and redshift that will be detected in a 70  $\mu\text{m}$  confusion-limited ( $\sim 50 \mu\text{Jy}$ ) survey of 1000 sq. arcmins with SPICA (greyscale/black contours) with PACS (to 2 mJy at 110  $\mu\text{m}$ , red contours). Contours indicate the number of sources per  $(\text{Log } L_{\text{IR}}, z)$  bin of (0.4, 0.3). PACS will be able to detect only the most luminous objects at a given redshift. JWST 24  $\mu\text{m}$  surveys to 5  $\mu\text{Jy}$  (not shown) will detect sources comparable in number and  $L_{\text{IR}}/z$  distribution to SPICA, however with considerable uncertainty in the  $L_{\text{IR}}$  derived from 24  $\mu\text{m}$  fluxes due to contamination from PAH emission.

# SAFARI 4 -

grande efficacité de  
« mapping » pour SPICA  
mais avec une meilleure  
résolution spatiale pour  
JWST MIRI et ALMA

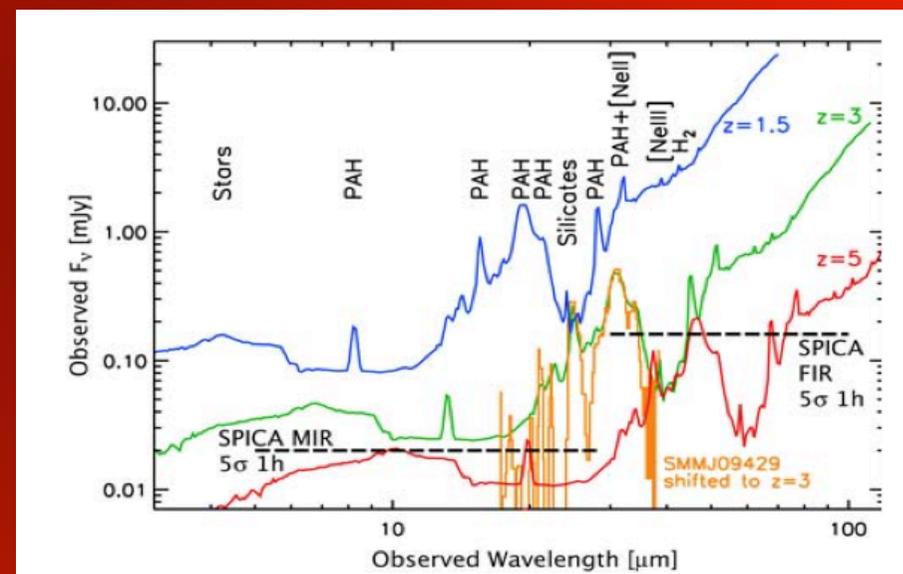
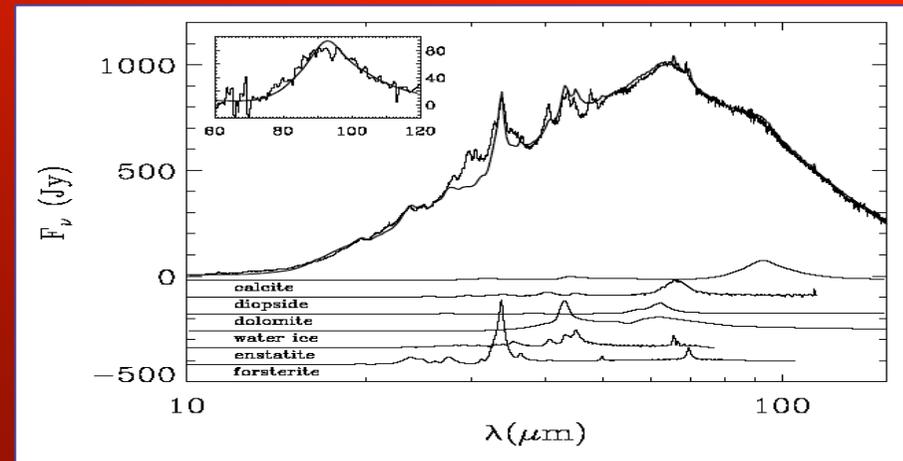
- Spitzer (24 $\mu$ m):
  - 100 sq. arcmin in 37 hours (2mJy 5 $\sigma$ )
- PACS (75 $\mu$ m):
  - 100 sq. arcmin in 37 hours (2mJy 5 $\sigma$ )  
(detecting 1 source/sq. arcmin)
- SPICA (70 $\mu$ m) - to confusion limit:
  - 100 sq. arcmin in 50hrs (SOAP detectors), expectation of detecting c. 18-20 sources/sq. arcmin
  - Same area/depth in ~ 1 hr for GOAL detectors



**Figure 18** - The FOV of 2 of the 4 channels of the SPICA MIR (for further technical details see Figure 22 in §4.4) are shown overlaid on the GOODS-S (epoch 2) IRAC 8  $\mu$ m image. Ringed objects marked have fluxes of  $S(8 \mu\text{m}) > 20 \mu\text{Jy}$  the 5 $\sigma$ -1hr sensitivity limit for detection in SPICA MIR low-resolution spectroscopy. Shown for comparison are JWST FOVs: more than 100 sources can be observed in a single pointing of SPICA-MIR, in contrast to ~few with the JWST.

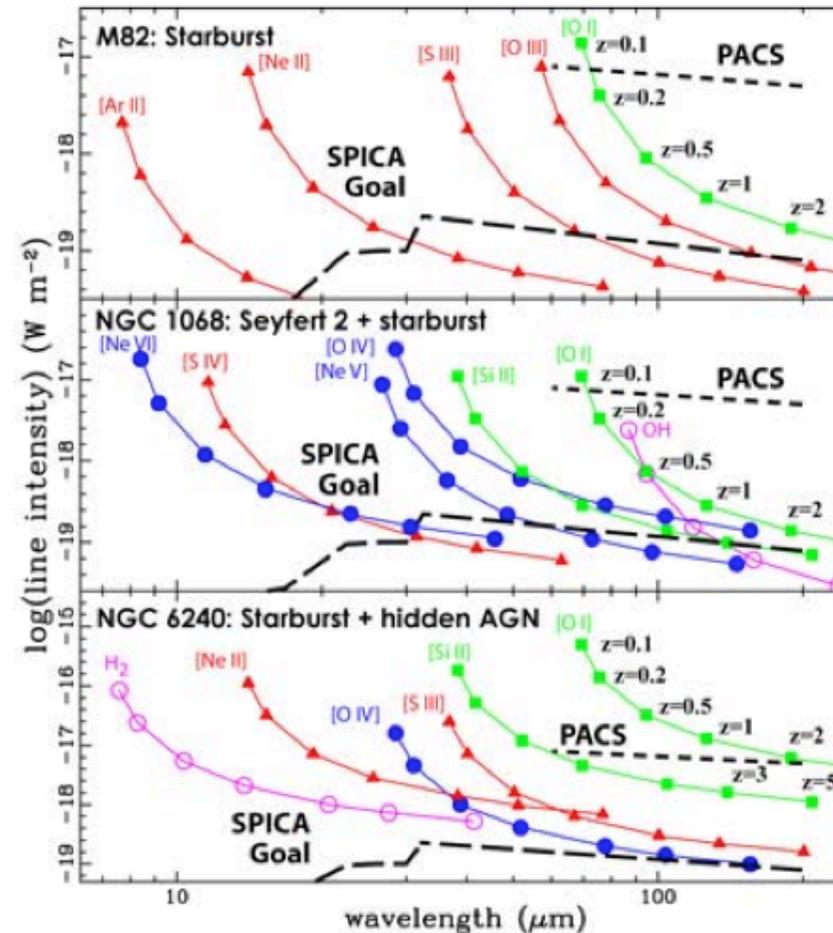
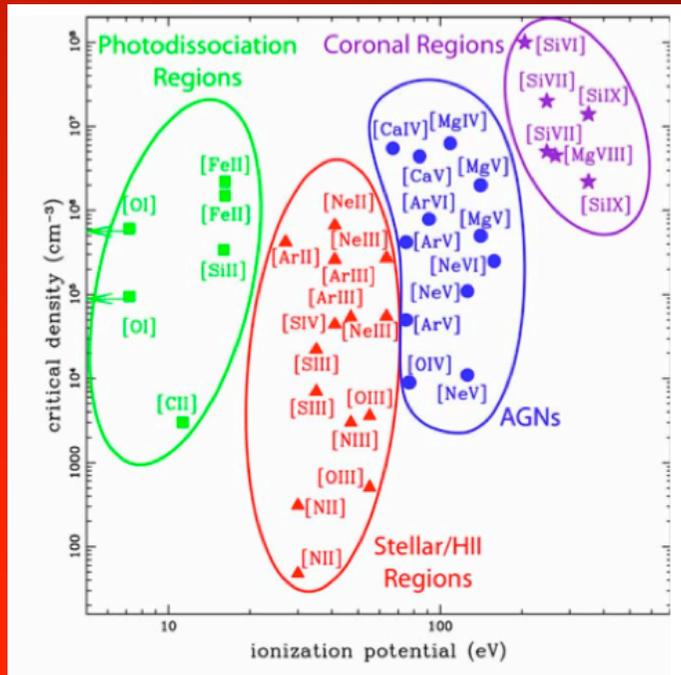
# SAFARI 4 - la science : des images ... et des spectres

- Processus physiques dans les galaxies jusqu'à  $z \sim 3 - 4$
- Détection de  $H_2$
- ISO et Spitzer ont montré que les structures spectrales observées en IR peuvent être utilisées pour mesurer le redshift
- Une "machine à redshift" : SPICA fournirait des redshifts à partir de spectres en MIR/FIR, même pour les galaxies poussiéreuses qui représentent  $\sim 80\%$  de la formation stellaire à  $z \sim 1$   
 $\Rightarrow$  un espace de découverte majeur en cosmologie

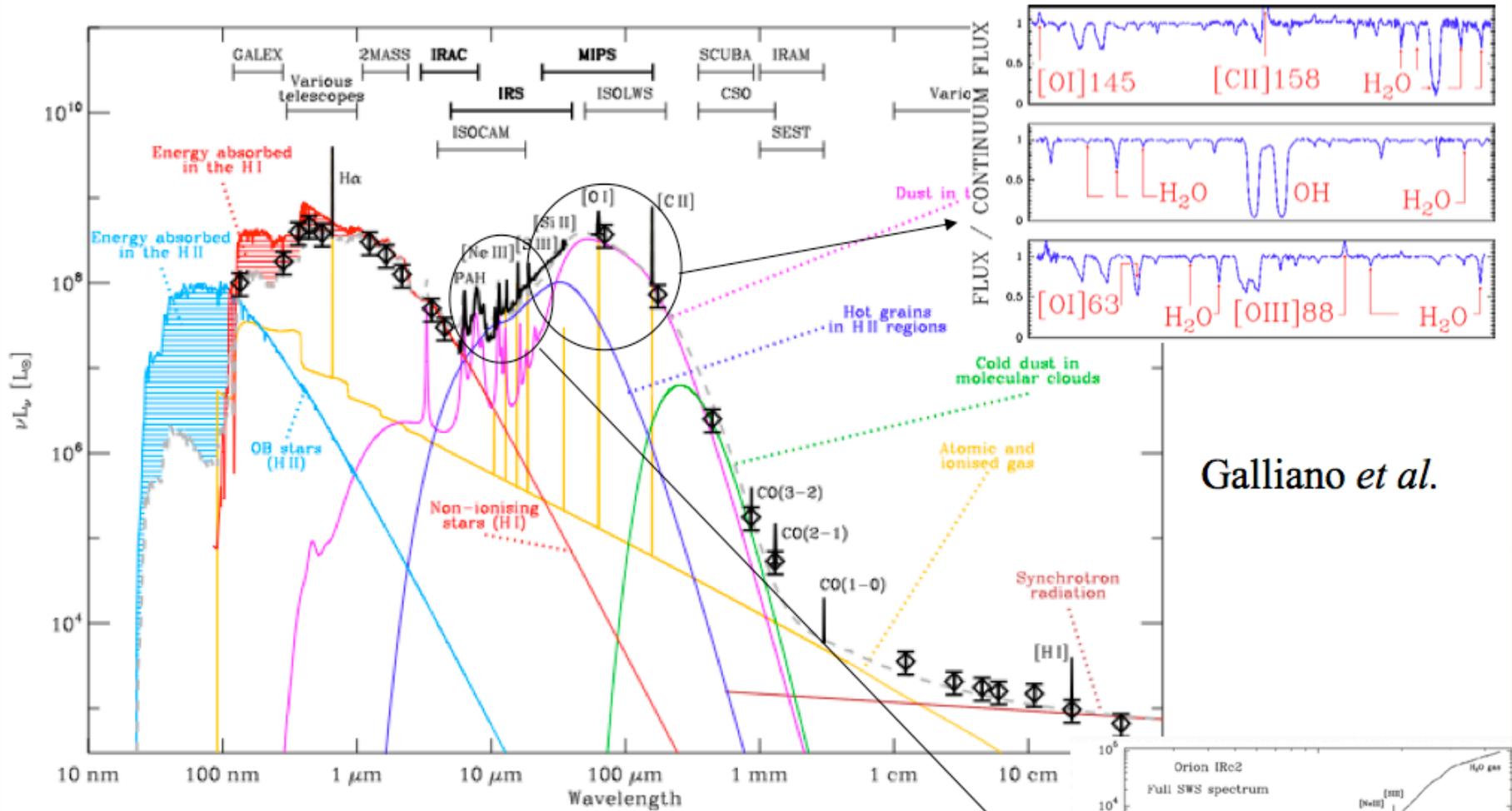


**Figure 13** - SPICA will have the sensitivity in low-resolution mode ( $R \sim 100$ ) to detect PAH/silicate features in dusty distant galaxies out to  $z \sim 3$  in 1 hour's integration, and out to  $z > 4$  in 10 hours. These features provide important pointers to the  $z >$  physical processes powering distant dusty galaxies, but also contaminate deep photometric MIR surveys.

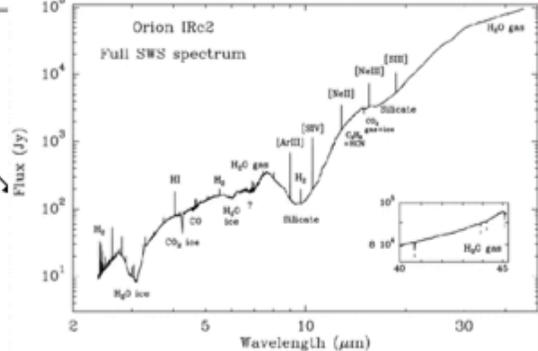
# SAFARI 4 - la connexion starburst / AGN à grand redshift



**Figure 12** - A plot of intensity vs. redshift of a selection of the key MIR/FIR emission lines visible with SPICA in three archetypical objects: M82 ( $L_{\text{FIR}} \sim 4 \times 10^{10} L_{\odot}$ ), NGC1068 ( $L_{\text{FIR}} \sim 2 \times 10^{11} L_{\odot}$ ) and NGC6240 ( $L_{\text{FIR}} \sim 7 \times 10^{11} L_{\odot}$ ) - in each panel the upper/lower dashed lines denote the  $5\sigma$ -1hr sensitivity of Herschel-PACS/SPICA respectively.



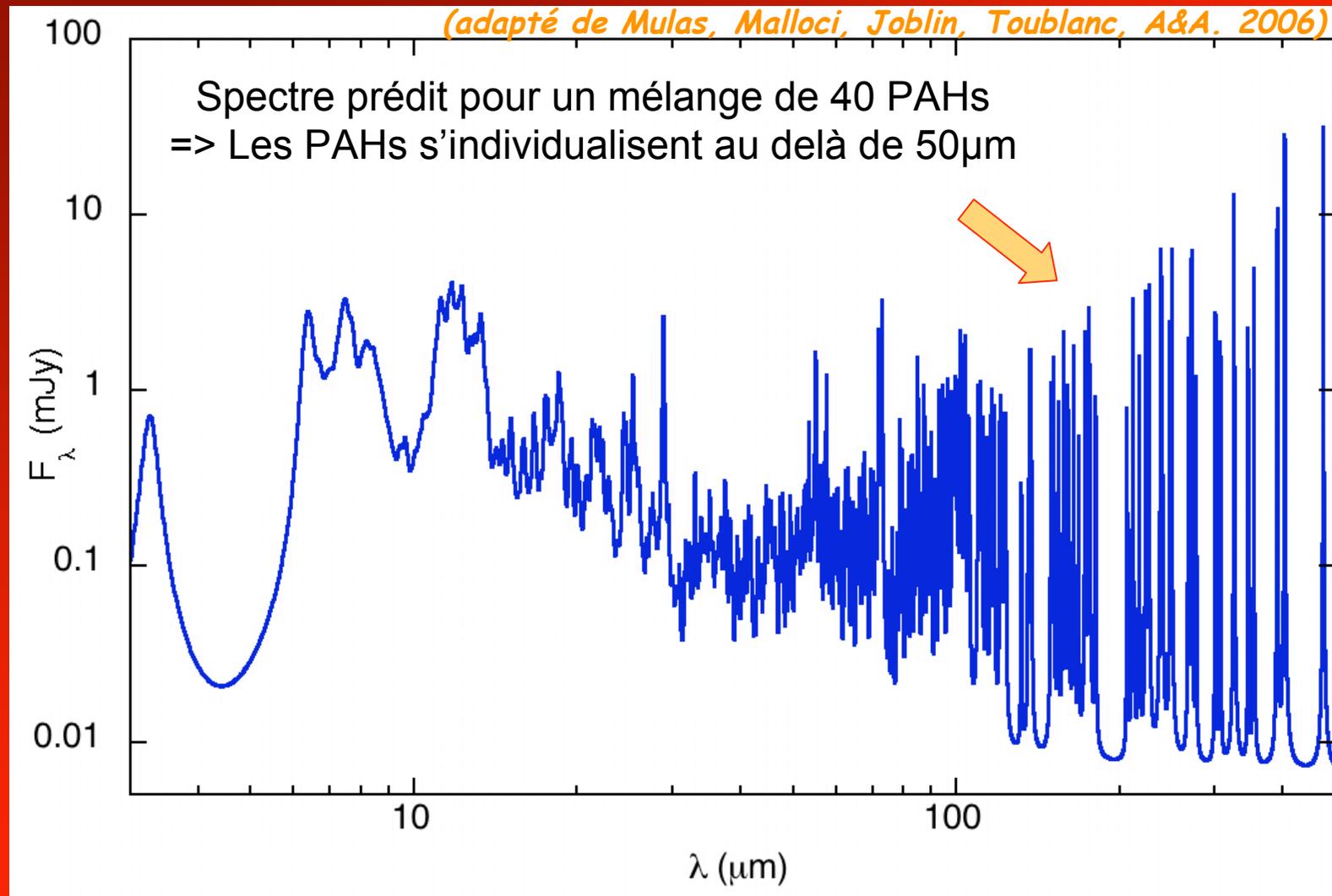
- Narrow-band spectral line features
- Broad-band PAH features + mineralogy
- Underlying SED



30<sup>th</sup>/31<sup>st</sup> January, 2008

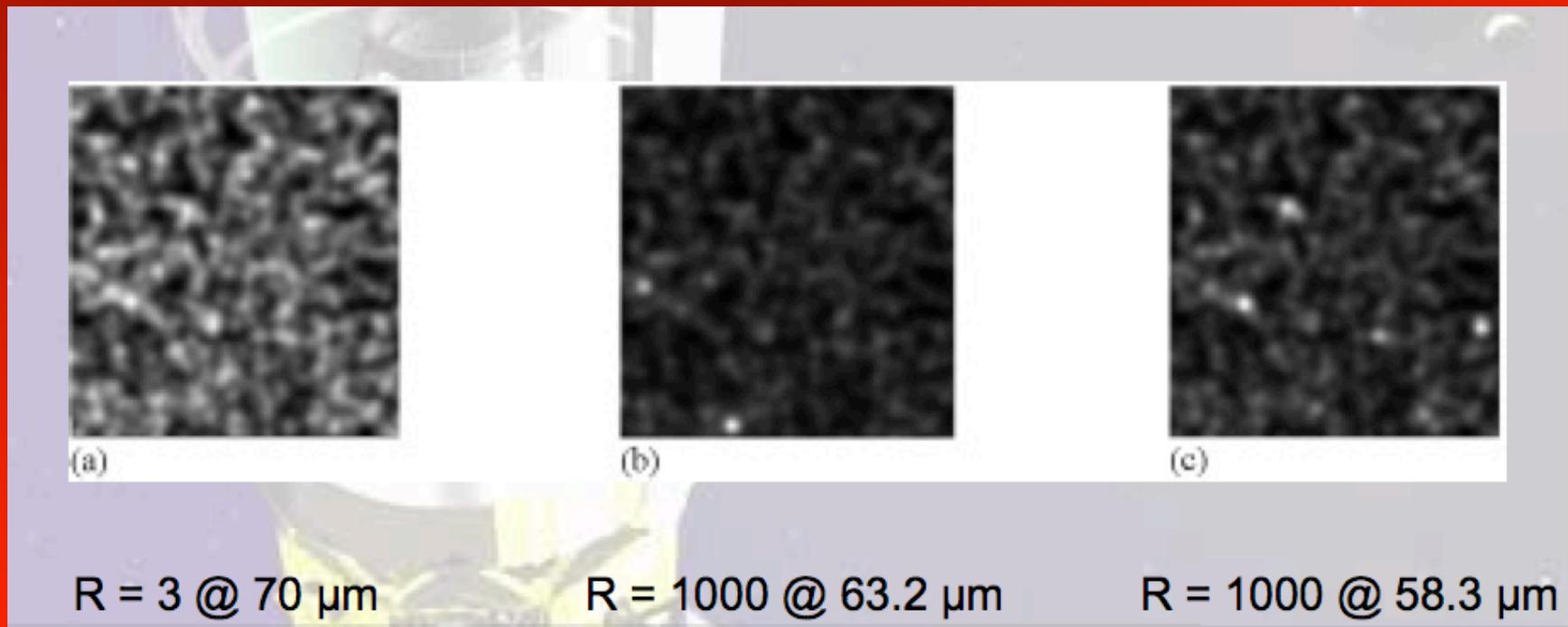
Post-Cosmic Vision Consortium meeting I - RAL

# SAFARI 4 - la science : des images ... et des spectres



## SAFARI 4 - la science : des images ... et des spectres

Aller au-delà de la confusion avec la haute résolution spectrale : un relevé spectroscopique « en aveugle »



# SAFARI 5 - l'organisation

## L'organisation de SAFARI

SAFARI Study team	Members
UK	Bruce Swinyard – PI Doug Griffin – Study Manager Matt Griffin – UK National Representative Kate Isaak – Project Scienc
France	Martin Giard – French National Representative Suzanne Madden Denis Burgarella Lionel Duband
Germany	Albrecht Poglitsch – German National Representative Walfried Raab – Instrument science Oliver Krause Richard Tuffs
Spain	Francisco Najarro – Spanish National Representative Javier Goicoechea – Project science Ishmael Perez Fournon
Italy	Luigi Spinoglio – Italian National Representative Anna di Giorgio
Belgium	Bart Vandenbussche – Belgian National Representative Christoffel Waelkens
Netherlands	Wolfgang Wild – Dutch National Representative
Canada	David Naylor – Canadian National Representative
Greece	Vassilis Charmandaris – Greek National Representative
Japan	Takao Nakagawa – SPICA Project Hideo Matsuhara – Instrument Interface
Austria	en discussion
US	en discussion

## Une partie de l'équipe SAFARI (P.I.: Bruce Swiyard, Cardiff)

Matthew Griffin<sup>a</sup>, Peter Hargrave<sup>a</sup>, Kate Isaak<sup>a</sup>, Phillip Mauskopf<sup>a</sup>, Angiola Orlando<sup>a</sup>, Lionel Duband<sup>b</sup>, Christophe Cara<sup>c</sup>, Suzanne Madden<sup>c</sup>, Martin Giard<sup>d</sup>, Christine Joblin<sup>d</sup>, Laurent Ravera<sup>d</sup>, José Cernicharo<sup>e</sup>, Francisco Najarro<sup>e</sup>, Göran Pilbratt<sup>f</sup>, Ismael Perez-Fournon<sup>g</sup>, Anthony Jones<sup>h</sup>, Anna di Giorgio<sup>i</sup>, Paolo Saraceno<sup>i</sup>, Luigi Spinoglio<sup>i</sup>, Patrick Merken<sup>j</sup>, Dave Clements<sup>k</sup>, Takao Nakagawa<sup>l</sup>, Bart Vandenbussche<sup>m</sup>, Christoffel Waelkens<sup>m</sup>, Paul van der Werf<sup>n</sup>, Maryvonne Gerin<sup>o</sup>, Javier Goicoechea<sup>o</sup>, Norbert Geis<sup>p</sup>, Albrecht Poglitsch<sup>p</sup>, Walfried Raab<sup>p</sup>, Jutta Stegmaier<sup>q</sup>, Cristina Popescu<sup>r</sup>, Richard Tuffs<sup>r</sup>, Mat Page<sup>s</sup>, Berend Winter<sup>s</sup>, Alesandro Boselli<sup>t</sup>, Denis Burgarella<sup>t</sup>, Véronique Buat<sup>t</sup>, Sébastien Vivès<sup>t</sup>, Annie Zavagno<sup>t</sup>, Slimane Bensammar<sup>u</sup>, Glenn White<sup>v</sup>, Marc Ferlet<sup>w</sup>, Doug Griffin<sup>w</sup>, Thijs de Graauw<sup>x</sup>, Wolfgang Wild<sup>x</sup>, Henk Hoervers<sup>x</sup>, Piet de Korte<sup>x</sup>, Sebastian Oliver<sup>y</sup>, Jonathan Braine<sup>z</sup>, Etienne Philippe Cais<sup>z</sup>, Peter Davis<sup>aa</sup>, David Elbaz<sup>c</sup>, Jean-Paul Kneib<sup>t</sup>

From the following institutes:

<sup>a</sup>Cardiff University, UK; <sup>b</sup>CEA, Grenoble, France; <sup>c</sup>CEA, Saclay, France; <sup>d</sup>CESR, Toulouse, France; <sup>e</sup>CSIC, Madrid, Spain; <sup>f</sup>ESA, ESTEC, Netherlands; <sup>g</sup>IAC, Tenerife, Spain; <sup>h</sup>IAS, Orsay, France; <sup>i</sup>IFSI, Rome, Italy; <sup>j</sup>IMEC, Belgium; <sup>k</sup>Imperial College, London, UK; <sup>l</sup>ISAS/JAXA, Japan; <sup>m</sup>KU Leuven, Belgium; <sup>n</sup>Leiden Observatory, Leiden, Netherlands; <sup>o</sup>LERMA, Paris, France; <sup>p</sup>MPE, Garching, Germany; <sup>q</sup>MPIA, Heidelberg, Germany; <sup>r</sup>MPIK, Heidelberg, Germany; <sup>s</sup>MSSL, Surrey, UK; <sup>t</sup>OAMP/LAM, Marseille, France; <sup>u</sup>Observatoire de Paris, France; <sup>v</sup>Open University, Milton Keynes, UK; <sup>w</sup>RAL, Oxfordshire, UK; <sup>x</sup>SRON Netherlands Institute for Space Research, Groningen/Utrecht, Netherlands; <sup>y</sup>Sussex University; <sup>z</sup>University of Bordeaux, France; <sup>aa</sup>University of Lethbridge, Canada

# Résumé

- Science :
  - SPICA et SAFARI permettra des avancées majeures dans le thème de la cosmologie, de la formation et de l'évolution des galaxies
- Pourquoi ?
  - SAFARI permettra de gagner un facteur 50 à 200 en sensibilité à 70  $\mu\text{m}$  p.r.à Herschel grâce à un refroidissement du télescope à 5K et permettra d'observer des champs profonds cosmologiques en IR aussi profonds que JWST mais dans le domaine de  $\lambda$  libre en PAH et silicates
  - SAFARI détectera des raies dans les galaxies IR jusqu'à  $z = 3 - 4$
  - SAFARI fournira des redshifts pour les galaxies IR directement à partir de l'IR
  - SAFARI sera extrêmement efficace pour cartographier les structures des galaxies IR qui représentent l'essentiel de la formation stellaire à grand  $z$
- Contexte ?
  - SAFARI sélectionné par l'ESA (Cosmic Vision)
  - SAFARI en soumission à la JAXA (Japon)
  - Lancement : milieu 2017
- Et le PNG/PNC dans tout cela ?
  - Science SAFARI semble très pertinente dans le contexte des objectifs scientifique PNG/PNC

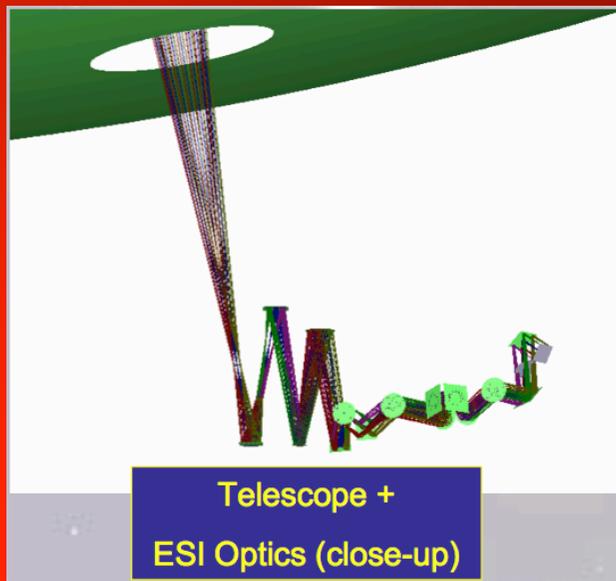
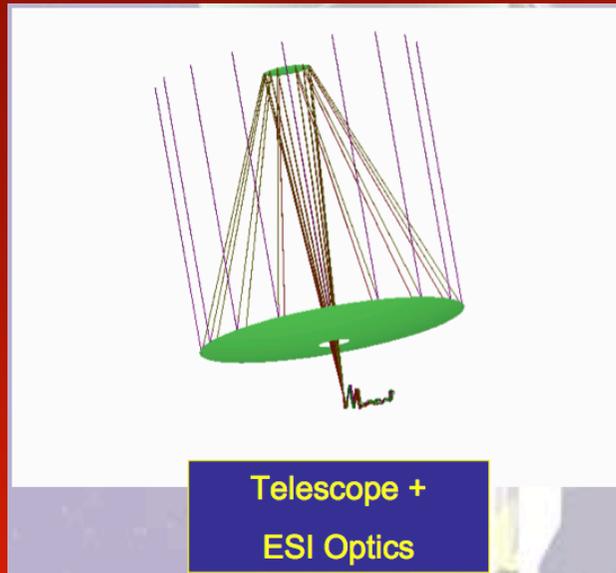
Merci pour votre attention

# Les specs des détecteurs

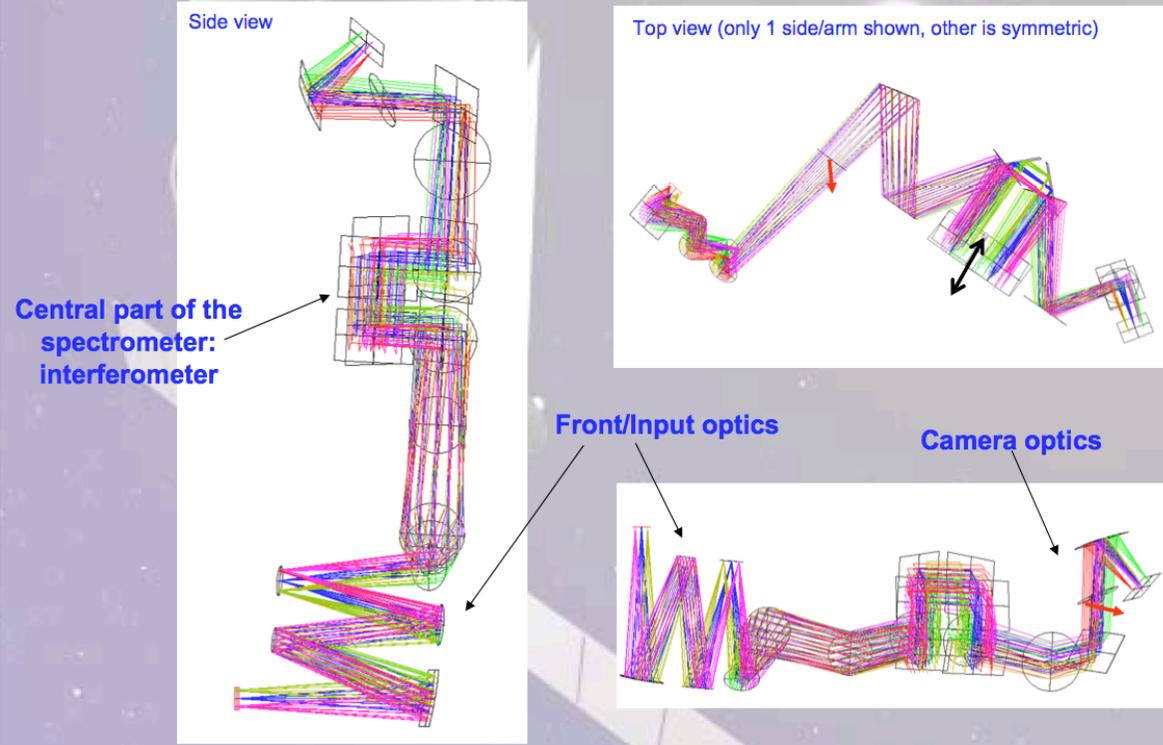
## ***Strawman detector specifications***

Band	$\lambda_c$	F $\lambda/2$ ( $\mu\text{m}$ )			1.22 $\lambda/D$ (D=3.5m)	Pixel Size on sky	Number of pixels	Field size
		f/10	f/20	f/40				arcmin
35-60	48	240	480	960	3.6	1.8	64x64	1.92
60-110	85	420	850	1680	6.1	3.05	38x38	1.93
110-210	160	800	1600	3200	11.5	5.75	20x20	1.917

# Optical Design de SAFARI



## SPICA-ESI IFTS optical chain: subsystems



# Candidats détecteurs pour SAFARI

## ***Candidate ESI Detector Technologies***

- Si-Bolometers
- TES Bolometers
- Photoconductors
- KID

