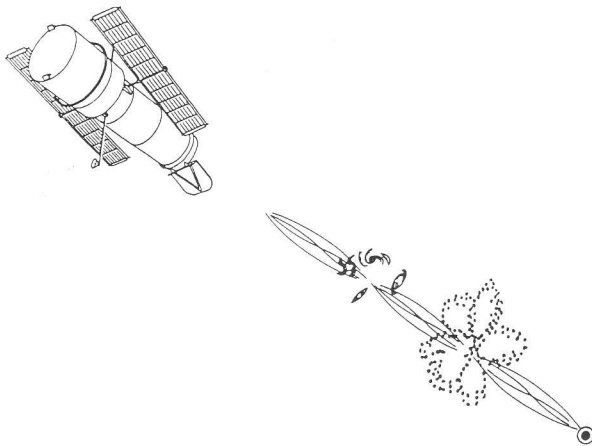


# Observations de l'Univers lointain avec le Télescope Spatial Hubble

Jean Surdej

Chercheur qualifié au FNRS  
Institut d'Astrophysique  
Université de Liège



Le télescope HST apparaît en fait comme un véritable observatoire astronomique. Son utilisation est toutefois complémentaire à celle des observatoires opérationnels au sol. Alors que sur Terre, l'atmosphère limite nos observations à quelques étroites fenêtres spectrales — celles de la lumière visible et des ondes radio ainsi que quelques petites fenêtres dans le proche infra-rouge — HST permet, grâce à son altitude de croisière de 610 km, d'observer le ciel dans les domaines spectraux ultraviolet, visible et le proche infra-rouge. De plus, à cause de l'agitation permanente de notre atmosphère, la résolution angulaire des observations au sol reste limitée à environ une seconde d'arc, quelle que soit la dimension des télescopes utilisés. De par sa situation privilégiée dans l'espace, HST devrait permettre aux astronomes d'observer tous les astres lointains avec une résolution angulaire théorique de 0,02 seconde d'arc dans l'ultraviolet, celle-ci étant entièrement fixée par le diamètre de 2,4 m de son miroir principal. De plus, la stabilité de pointage de l'instrument, à mieux de 0,01 seconde d'arc au cours de poses dépassant une dizaine d'heures, ainsi que la possibilité de pouvoir acquérir des données d'observations au cours de plus de 8 heures effectives chaque jour, 365 jours par an, font de HST l'observatoire le plus performant actuellement existant. Par ailleurs, les diverses fonctions des instruments scientifiques accessibles à bord de cet observatoire permettront aux astronomes de déchiffrer de multiples façons le rayonnement émis par les astres qui peuplent les profondeurs de notre Cosmos.

La durée de vie nominale de HST est d'environ 15 ans. Une telle longévité sera rendue possible grâce aux multiples visites de maintenance (réparations, changements d'instruments, corrections d'altitude)

## 1. Introduction

**A**vec le lancement du Télescope Spatial Hubble (abrégé dans la suite par HST) le 24 avril 1990, la dernière décennie du XX<sup>ème</sup> siècle promet des rebondissements spectaculaires dans l'exploration scientifique de notre Cosmos. Nous présentons dans cet article quelques uns des programmes d'observations extragalactiques qui devraient contribuer à une perception nouvelle et à une meilleure compréhension de notre Univers lointain. En particulier, nous décrivons le programme de recherche de nouveaux mirages gravitationnels au sein d'un échantillon de quasars très lumineux qui sera réalisé dans quelques mois au moyen de HST par l'équipe de chercheurs en astrophysique extragalactique de l'Université de Liège.

de l'observatoire HST par des astronautes avec les navettes spatiales américaines. Nous décrivons brièvement ci-après les six instruments scientifiques actuellement disponibles dans le plan focal de HST ainsi que les principaux programmes d'observations qu'ils permettront de réaliser dans un avenir proche.

## 2. HST, ses instruments et quelques programmes scientifiques d'observations extragalactiques

Vu les restrictions habituelles imposées aux équipements envoyés dans l'espace, le télescope HST et ses instruments scientifiques ont été tout spécialement choisis pour leur efficacité et leur compacité. L'optique du HST est de type Ritchey-Chrétien ( $D = 240$  cm,  $F/D = 24$ ) avec un miroir secondaire ( $D = 30$  cm) réfléchissant la lumière dans le plan focal du télescope, prête à être analysée par un ou plusieurs des six instruments scientifiques principaux (voir figures 1a et 1b). Ces instruments comprennent deux caméras directes (WF/PC et FOC), deux spectrographes (FOS et HRS), un photomètre rapide (HSP) et des senseurs (FGS) destinés aux pointage et guidage fins du télescope ainsi qu'à des mesures astrométriques très précises. Pour chacun de ces instruments, nous avons indiqué au tableau 1 le champ angulaire, le domaine spectral, la résolution (angulaire, spectrale ou temporelle) et la magnitude limite accessibles à partir de cet observatoire spatial. La figure 2 représente la disposition géométrique des six instruments scientifiques dans le plan focal de HST.

L'optique de HST est sensible à la lumière dans le domaine spectral allant de  $1100 \text{ \AA}$  à  $1 \text{ mm}$ . Par contre, les différents instruments scientifiques actuellement disponibles ne travaillent que dans des domaines de longueurs d'onde plus restreints. Ainsi tous les instruments de HST actuellement en service sont sensibles à la radiation ultraviolette. A l'exception du spectrographe à haute résolution HRS (High Resolution Spectrograph), ils sont tous aussi sensibles à la lumière visible (voir tableau 1). Aucun des instruments scientifiques ne permet cependant d'acquérir des observations dans le domaine infra-

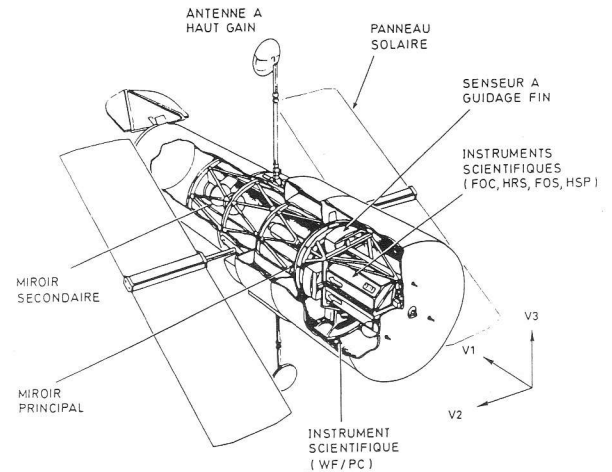


Figure 1a : Vue schématique des composants principaux de HST et définition des axes V1, V2 et V3

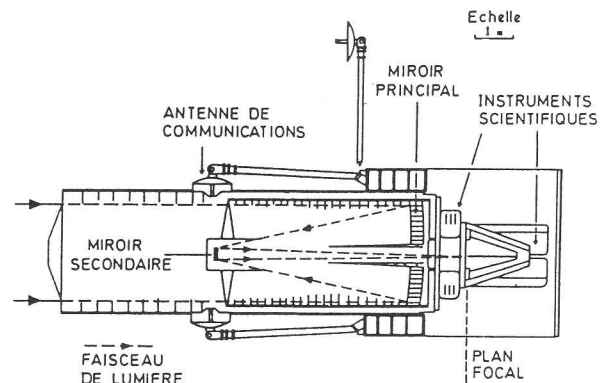


Figure 1b : Trajectoire des rayons lumineux à l'intérieur de HST (© STScI)

rouge ; bien que la caméra à grand champ WF/PC (Wide Field and Planetary Camera) qui est équipée de plusieurs détecteurs CCD permet d'effectuer de l'imagerie directe dans le proche infra-rouge. Dans le cadre de l'installation d'instruments scientifiques de seconde génération, il est toutefois prévu d'équiper HST en 1994 d'une chambre photographique NICMOS (Near Infrared Camera and Multiple Object Spectrograph) permettant d'opérer entre 1 et

Instrument	Champ angulaire	Domaine spectral	Resolution	Magnitude limite
WF/PC	2.7, 1.2 ( $''$ ) <sup>2</sup>	1150-11000 $\text{\AA}$	0.1, 0.04 $''$	28
FOC	11, 22 ( $''$ ) <sup>2</sup>	1200- 6000	0.02, 0.04 $''$	28
FOS	0.1 - 4.3 $''$	1150- 8000	3, 20 $\text{\AA}$	22, 26
HRS	0.25 - 2 $''$	1100- 3200	0.03, 0.15 1.5 $\text{\AA}$	11, 14 17
HSP	0.4, 1, 10 $''$	1200- 8000	16 $\mu\text{s}$	24
FGS	0.69 ( $''$ ) <sup>2</sup>	4670- 7000	0.003 $''$	17

Tableau 1 : Les six instruments scientifiques de HST

2,5  $\mu\text{m}$ . Les possibilités d'assurer le remplacement et/ou la maintenance des instruments scientifiques de HST tous les 3 à 4 ans constituent un progrès majeur dans le fonctionnement des observatoires spatiaux. Il sera en effet désormais possible d'accroître les performances observationnelles des télescopes de l'espace au cours de missions de routine par des astronautes spécialisés. Passons maintenant en revue les six instruments scientifiques qui sont aujourd'hui opérationnels à bord de HST ainsi que les programmes d'observations extragalactiques qu'ils permettront de bientôt réaliser.

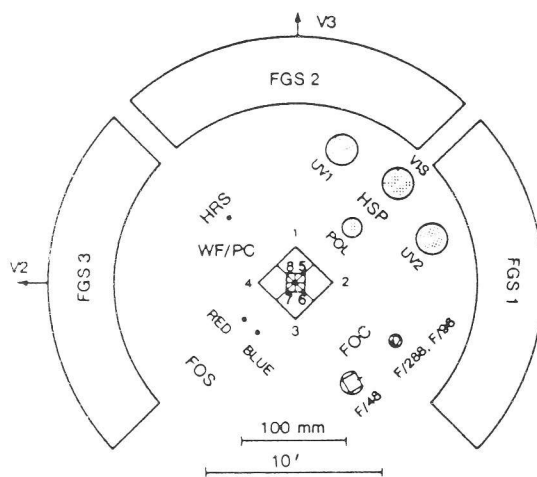


Figure 2 : Vue du champ angulaire et disposition des instruments scientifiques dans le plan focal de HST. V2 et V3 représentent l'orientation des axes principaux du télescope (cf. figure 1a). Voir le texte pour une description détaillée des autres sigles utilisés (© STScI).

### 2.1. La caméra à grand champ (WF/PC)

La WF/PC est en fait constituée de deux caméras indépendantes : la caméra à grand champ (WF, Wide Field) et la caméra planétaire (PC, Planetary Camera). La WF est la caméra de HST possédant le plus grand champ de vision ( $\varnothing \approx 2,7'$ ) ; avec une résolution angulaire toutefois remarquable ( $\approx 0,1''$ ). La caméra planétaire permet d'atteindre une résolution angulaire encore meilleure ( $\approx 0,04''$ ), au détriment bien sûr de l'étendue du champ angulaire ( $\varnothing \approx 1,2'$ ). Le détecteur d'images de la WF/PC est en fait formé de quatre détecteurs de type CCD (cf. figure 2). De nombreux filtres photométriques, réseaux de diffraction ou encore polariseurs peuvent être introduits dans le trajet des rayons lumineux. Nul doute que cette instrumentation sophistiquée conduira à des observations d'avant-garde en astrophysique extragalactique. La possibilité de détecter des objets de magnitude  $\approx 28$  avec des temps de pose d'une heure seulement est extraordinaire en soi :

i) l'étude des populations stellaires dans des galaxies situées à quelques centaines de millions d'années de lumière sera possible. Etant donné que regarder de plus en plus loin équivaut à remonter le temps, et bien sûr l'histoire des objets étudiés, de tels travaux nous permettront de mieux comprendre les facteurs qui conditionnent l'évolution des galaxies en général ;

ii) l'observation d'étoiles variables très distantes telles que les céphéides permettra de mieux étalonner l'échelle des distances dans notre Univers et ainsi de déterminer avec une précision meilleure que 10 % la valeur de la constante de Hubble et, par la même occasion, l'âge de notre Univers ;

iii) des objets encore plus faibles et plus éloignés dans notre Univers que ceux actuellement connus deviendront perceptibles. Nul doute que des protogalaxies, de très nombreux arcs de lumière d'objets très éloignés formés par des effets de lentille gravitationnelle associés à des galaxies individuelles et/ou à des amas très riches seront découverts d'ici peu ;

iv) avec ses résolutions angulaires exceptionnelles de 0,04 et 0,1", la WF/PC permettra d'aller sonder les plus fines structures géométriques des noyaux de galaxies et d'y découvrir peut-être les effets observationnels tant recherchés (cf. imagerie directe d'un disque d'accrétion) des gigantesques trous noirs à l'origine de l'activité nucléaire ;

v) étant donné la rapidité inégalée de la WF/PC à des longueurs d'onde supérieures à  $\lambda \approx 4500 \text{ \AA}$ , cette caméra devrait aussi contribuer à la détection des galaxies hôtes des quasars<sup>(1)</sup> à faible « redshift » (décalage vers le rouge) ainsi qu'à la mise en évidence de galaxies « lentille gravitationnelle » interposées le long de la ligne de visée de quasars à très haut redshift, littéralement transformés en « mirages » cosmiques

vi) enfin, il est aussi prévu d'obtenir avec la WF/PC de nombreuses ( $\geq 50$ ) observations directes de régions célestes situées à des latitudes galactiques élevées. Ces champs seront choisis au hasard et feront l'objet de poses d'assez longue durée ( $\approx 30$  min.). Ce matériel unique d'observations, qui couvrira au total un champ angulaire supérieur à 0,1 (deg)<sup>2</sup>, servira à la recherche de l'insoupçonnable (nouvelles classes d'objets extragalactiques, étude du dénombrement des galaxies très faibles, etc.).

### 2.2. La caméra pour objets faibles (FOC)

La caméra pour objets faibles (FOC, Faint Object Camera) a été entièrement conçue et réalisée par l'ESA. Comme nous le savons, la calibration de la FOC a été menée par le centre de recherche d'IAL

(1) Un quasar est un objet d'apparence quasi-stellaire possédant un redshift élevé. Il est généralement admis que ces objets très énergétiques sont des noyaux actifs de galaxies que l'on voit à un stade d'évolution peu avancé dans le temps.

Space. De par sa conception (détecteur à comptage de photons, etc.), la FOC s'avère être une caméra plus sensible et plus rapide que la WF/PC dans le domaine des longueurs d'onde inférieures à 4500 Å. Il en est différemment pour  $\lambda \geq 4500$  Å (voir la WF/PC). La résolution angulaire de la FOC est par contre supérieure à celle de la WF/PC à toutes les longueurs d'onde, mais son champ de vision en est évidemment plus réduit (cf. tableau 1 et figure 2). La FOC est en fait le seul instrument qui exploite pleinement la résolution angulaire théorique de HST. Mentionnons encore que la FOC possède deux chambres distinctes caractérisées par des rapports d'ouverture focale  $f/48$  et  $f/96$  (ou  $f/288$ ) et qu'il est possible d'imager des objets aussi faibles que la 28<sup>ème</sup> magnitude en des temps d'exposition de l'ordre d'une heure. Comme pour la WF/PC, il est aussi possible d'insérer dans le faisceau de lumière de multiples filtres photométriques, réseaux de diffraction, polariseurs et même des coronographes ayant une dimension angulaire entre 0,4 et 0,8" en vue d'observer des objets extrêmement faibles (cf. nébulosité, jet de matière, etc.) situés à proximité d'un astre beaucoup plus brillant.

La FOC est un instrument idéal pour conduire, à des longueurs d'onde  $\lambda \leq 4500$  Å, la plupart des projets d'observations extragalactiques déjà mentionnés pour la WF/PC. En effet, étant donné le grand pouvoir de résolution angulaire de HST dans l'ultraviolet, il est tout à fait indiqué de réaliser avec la FOC les programmes d'observations qui requièrent le plus de précision au niveau de l'imagerie directe. Nous décrivons au chapitre 3 un programme de recherche de mirages gravitationnels au moyen de la FOC qui sera prochainement mené par un groupe de chercheurs liégeois (Institut d'Astrophysique, Université de Liège).

### 2.3. Le spectrographe pour objets faibles (FOS)

L'utilisation du spectrographe pour objets faibles (FOS, Faint Object Spectrograph) a pour but d'obtenir des spectres d'objets relativement faibles dans des domaines spectraux assez étendus (1150-8000 Å). Au moyen de deux tubes électroniques indépendants (rouge et bleu) de type Digicon, le FOS doit permettre de réaliser la spectrophotométrie d'astres variables avec une résolution temporelle aussi élevée que 0,040 s. Ici aussi, un dispositif coronographique a été prévu pour l'observation d'objets très faibles situés dans le voisinage immédiat d'astres beaucoup plus brillants. FOS peut être utilisé suivant deux modes de résolution spectrale distincts : à faible résolution ( $\lambda/\Delta\lambda \approx 250$ ), il est possible d'obtenir des spectres d'objets de magnitude  $\approx 26$  en intégrant environ une heure, alors qu'à plus haute résolution ( $\lambda/\Delta\lambda \approx 1300$ ) des spectres d'objets de magnitude apparente  $\approx 22$  pourront être obtenus.

Parmi les programmes d'observations extragalactiques qui ont été sélectionnés, nous mentionnerons

la spectroscopie de supernovae apparaissant dans des galaxies très éloignées, l'étude physico-chimique de populations stellaires et/ou de galaxies lointaines, l'étude de l'évolution galactique au moyen de la spectroscopie comparative d'objets à bas et hauts redshifts, la détermination des redshifts de galaxies situées à proximité de quasars proches (cf. galaxies hôtes), ou éloignés (lentilles gravitationnelles); la spectroscopie des régions centrales et d'autres régions de galaxies à très grand redshift, l'identification spectroscopique des contreparties optiques de sources radio faibles, etc.

### 2.4. Le spectrographe à haute résolution (HRS)

Le spectrographe à haute résolution (HRS, High Resolution Spectrograph) est destiné à l'observation spectroscopique à haute résolution ( $\lambda/\Delta\lambda \approx 2000$ , 20000 ou 100000) d'astres modérément brillants (magnitudes typiques de 19, 16 et 14 pour les résolutions indiquées ci-avant). Comme pour le FOS, les deux détecteurs utilisés sont de type Digicon, possédant chacun 512 canaux individuels. Toutefois, ces détecteurs ne permettent de couvrir que la région ultraviolette du spectre électromagnétique ( $1150 \leq \lambda \leq 3200$  Å). HRS sera utilisé pour la détection de variations spectrales d'objets relativement brillants avec une résolution temporelle  $\approx 100$  millisecondes. L'observation dans l'ultraviolet des raies étroites en absorption qui abondent dans les spectres de quasars brillants fournira aussi des informations de toute première importance sur les propriétés, la structure, la distribution et l'évolution du gaz intergalactique constitué principalement d'hydrogène, d'hélium et de deutérium primordiaux ainsi que sur les halos et disques de galaxies possédant un redshift élevé.

### 2.5. Le photomètre rapide (HSP)

Le photomètre rapide (HSP, High Speed Photometer) est un détecteur de lumière très sensible. Celui-ci sert à mesurer l'intensité, la polarisation ainsi que la variabilité photométrique d'astres avec une résolution temporelle aussi précise que  $2 \cdot 10^{-5}$  seconde. Equipé de quatre tubes électroniques de type « dissecteur d'images » et d'éléments entièrement fixes (diaphragme d'entrée, filtres, polariseurs, etc.), HSP apparaît comme le plus simple des instruments scientifiques utilisables à bord de HST. C'est par le contrôle du télescope lui-même qu'il sera possible d'effectuer avec HSP de multiples mesures photométriques dans le domaine spectral  $1200 \leq \lambda \leq 8000$  Å ( $\lambda \leq 3200$  Å pour des mesures purement polarimétriques). Des astres aussi faibles que la magnitude 24 pourront être étudiés au cours de temps de pose de l'ordre de la demi-heure. L'étude de la variabilité temporelle de la luminosité des noyaux actifs de galaxies à faible et haut redshift figurera parmi les programmes prioritaires d'observations extragalactiques. La photométrie ultra-

rapide de la source compacte émettant le spectre continu de noyaux actifs de galaxies et de quasars brillants, lors d'occultations par la lune, permettra sans aucun doute des déterminations directes de la dimension et de la structure du moteur central responsable de l'activité surprenante de ces monstres extragalactiques.

## 2.6. Les senseurs à pointage et guidage fins

Bien que deux des trois senseurs (FGS, Fine Guidance Sensors) accessibles dans le plan focal de HST doivent servir en temps réel au pointage et/ou au guidage fins du télescope proprement dit, le troisième peut être utilisé pour effectuer des mesures astrométriques environ dix fois plus précises ( $\approx 0,002''$ ) que celles réalisables à partir du sol. En améliorant par un facteur dix la détermination des parallaxes géométriques, on pourra déterminer de façon directe la distance d'environ mille fois plus d'étoiles qu'auparavant. Une calibration beaucoup plus précise de l'échelle des distances cosmologiques résultera de ces mesures de distances stellaires locales, et par la même occasion nous aurons une meilleure connaissance des luminosités intrinsèques des galaxies et quasars très distants. Les mesures astrométriques de quasars brillants ( $\leq 20^{\text{ème}}$  magnitude) combinées à celles d'étoiles mesurées avec HST et avec le satellite Hipparcos serviront aussi à définir un système de référence inertiel beaucoup plus précis.

## 3. Recherche de mirages gravitationnels au moyen de HST

Une collaboration internationale, conduite par l'équipe de recherche en astrophysique extragalactique de l'Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège<sup>(2)</sup>, et maintenant élargie dans le cadre d'un programme-clé de l'Observatoire Européen Austral (ESO, voir Surdej et al. 1989), a entrepris une recherche systématique de mirages gravitationnels au sein d'un échantillon d'objets quasi-stellaires intrinsèquement très lumineux ( $M_V \leq -29$ ). La stratégie observationnelle adoptée consiste à obtenir des images à haute résolution angulaire (c'est-à-dire prises dans les meilleures conditions d'agitation atmosphérique très faible) des quasars sélectionnés, afin de détecter une éventuelle multiplicité de leurs images.

Ce programme de recherche a conduit dès 1987 à l'identification de plusieurs nouveaux cas de mirage gravitationnel dont certains ont déjà reçu une confirmation spectroscopique. Après la mise en évidence du dédoublement de l'image du quasar UM673 et la détection de la galaxie lentille (Surdej et al. 1987,

1988), la découverte du quasar quadruple H1413+117 (Magain et al. 1988) a permis de confirmer avec éclat l'efficacité de la méthode adoptée lors de la recherche des mirages gravitationnels. Pour les cas de UM673 et H1413+117, nous avons montré que la luminosité de ces quasars, ayant respectivement un décalage vers le rouge (red-shift) de  $z = 2,719$  et  $z = 2,55$ , est amplifiée par un facteur de l'ordre de 10 à 100 suite à la présence d'un objet défecteur (galaxie) situé entre la source et l'observateur. La masse des galaxies défectrices a été estimée à quelques centaines de milliards de masses solaires. Ces quasars nous paraissent donc très lumineux à cause d'une amplification de leur luminosité par des effets de lentille gravitationnelle et non pas à cause d'une origine purement intrinsèque. De nombreux autres candidats « mirage gravitationnel » ont été identifiés dans notre échantillon de 111 quasars très lumineux déjà imagés à partir du sol. L'étude détaillée de ces objets est en cours.

Les quasars très lumineux constituent d'excellents candidats au phénomène de mirage gravitationnel pour au moins quatre raisons majeures :

- (i) ces quasars proviennent d'un échantillon limité en flux pour lequel la probabilité de détecter des objets amplifiés par des effets de lentille gravitationnelle est plus élevée que pour un échantillon limité en volume ;
- (ii) ces objets très lumineux sont ceux pour lesquels il est le plus vraisemblable de soupçonner que leur grande luminosité résulte d'une amplification par effet de mirage gravitationnel ;
- (iii) leur très grand éloignement augmente la probabilité de trouver entre eux et nous un objet suffisamment massif capable de provoquer l'effet de lentille recherché ;
- (iv) on peut supposer que le trop petit nombre de mirages gravitationnels connus, pour lesquels les images sont séparées par des distances angulaires inférieures à une seconde d'arc est causé par un effet de sélection observationnel (effet néfaste de l'agitation atmosphérique, résolution spatiale limitée des détecteurs utilisés, etc.). C'est pourquoi nous avons décidé de lancer un tel programme de recherche de mirages gravitationnels, non seulement au moyen de puissants télescopes au sol (cf. les télescopes de 3,6 m de l'ESO au Chili, le télescope CFH de 3,6 m à Hawaï), avec le réseau géant d'antennes du VLA (Very Large Array, Nouveau-Mexique) dans le domaine des longueurs d'onde radio, mais aussi avec le Télescope Spatial Hubble dans la région ultraviolette du spectre électromagnétique. La recherche de nouveaux cas de mirages gravitationnels sera réalisée au moyen de la FOC dans la configuration  $f/D = 288$ . Dix quasars très lumineux seront observés à très haute résolution angulaire ( $\text{FWHM} \approx 0,02''$ ) au cours des neuf heures trente de temps d'observations qui nous ont été attribuées.

(2) Damien Hutsemékers, Pierre Magain, Marc Remy, Jean Surdej (Principal Investigateur), Jean-Pierre Swings et Eddy Van Drom.



La mise en évidence récente de défauts optiques de HST causés par une aberration de sphéricité importante du miroir principal nous a bien sûr beaucoup préoccupés. Fort heureusement, les images d'objets quasi-stellaires (étoiles, amas d'étoiles, quasars, mirages gravitationnels ayant pour source des quasars, etc.) restent encore caractérisées par un pic central ayant une largeur à mi-hauteur inférieure à 0,1" et contenant environ 15 % (au lieu de 85 %) de l'énergie totale de l'image. Il sera par conséquent encore possible de résoudre angulairement au moyen de HST des images quasi-stellaires séparées d'environ 0,1". Les brillances relatives de telles images multiples ne pourront toutefois pas excéder 5 magnitudes (cf. figure 3 pour le cliché du quasar 2237+0305 récemment obtenu avec la FOC par une équipe d'astrophysiciens au Space Telescope Science Institute à Baltimore, USA). Par conséquent, nous sommes rassurés que l'application de la technique de déconvolution d'images par roulement du Télescope Spatial ainsi que d'autres traitements numériques devraient nous permettre de mener à bien le but initialement fixé dans notre programme, à savoir la recherche à très haute résolution angulaire ( $\approx 0,02''$ ) de nouveaux mirages gravitationnels au sein d'un échantillon de quasars très lumineux.

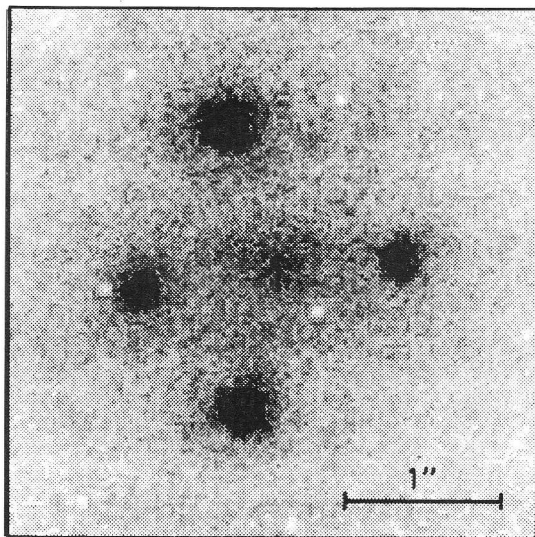


Figure 3 : Cliché du mirage gravitationnel 2237+0305, aussi connu sous le nom de la Croix d'Einstein, obtenu récemment avec la FOC par une équipe d'astrophysiciens du Space Telescope Science Institute à Baltimore. Les quatre images du quasar 2237+0305 ( $z \approx 1,69$ ) apparaissent très bien résolues ( $\text{FWHM} \leq 0,1''$ ) sur ce cliché. La cinquième image, au centre du cliché, est celle du noyau de la galaxie spirale ( $z \approx 0,04$ ) responsable des effets de lentille gravitationnelle observés (© NASA/ESA/Space Telescope Science Institute)

## Remerciements

*Je tiens à remercier Jean-Pierre Swings pour avoir relu le présent article.*

## Bibliographie générale

- Bahcall, J. : 1982, The Space Telescope Observatory, NASA CP-2244.  
 Bahcall, J., Spitzer, L. : 1982, The Space Telescope, Scientific American.  
 Burrows, C. : 1989, HST Optical Telescope Assembly Handbook, STScI internal publication.  
 Chaisson, E.J., Villard, R. : 1990, *Vistas of Astronomy*, 33, 1.  
 Magain, P., Surdej, J., Swings, J.P., Borgeest, U., Kayser, R., Kühr, H., Refsdal, S., Remy, M. : 1988, *Nature* 334, 325.  
 Surdej, J., Magain, P., Swings, J.P., Borgeest, U., Courvoisier, T.J.-L., Kayser, R., Kellermann, K.I., Kühr, H., Refsdal, S. : 1987, *Nature* 329, 695.  
 Surdej, J., Magain, P., Swings, J.P., Borgeest, U., Courvoisier, T.J.-L., Kayser, R., Kellermann, K.I., Kühr, H., Refsdal, S. : 1988, *Astron. Astrophys.* 198, 49.  
 Surdej, J., Arnaud, J., Borgeest, U., Djorgovski, S., Fleischmann, F., Hammer, F., Hutsemékers, D., Kayser, R., Le Fèvre, O., Nottale, L., Magain, P., Meylan, G., Refsdal, S., Remy, M., Shaver, P., Smette, A., Swings, J.P., Vanderriest, C., Van Drom, E., Véron-Cetty, M., Véron, P., Weigelt, G. : 1989, *The Messenger* 55, 8.