

L'expérience EROS II



Comment faire pour voir l'invisible ?

Un résumé de l'expérience EROS II, écrit pendant mon travail à l'ESO (European Southern Observatory) au Télescope MARLY à La Silla (Chili) du 20 mai au 7 juin 2001.

Table des matières

1. Introduction

- 1.1 La matière manquante
- 1.2 Différents candidats la matière noire et leur recherche
- 1.3 Lentilles et micro lentilles gravitationnelles
- 1.4 Le projet EROS

2. Théorie

- 2.1 L'effet de lentille gravitationnelle
 - 2.1.1 Rayon d'Einstein
- 2.2 L'effet de micro lentille gravitationnelle
 - 2.2.1 Amplification
 - 2.2.2 Durée d'amplification
 - 2.2.3 Taux d' événements
 - 2.2.4 Caractéristiques d'un événement

3. L'expérience EROS II

- 3.1 Recherche de micro lentilles
- 3.2 Montage expérimental d'EROS II
 - 3.2.1 L'optique du télescope MARLY
 - 3.2.2 Les cameras CCD
 - 3.2.3 Cryogénie
- 3.3 Prise des mesures et logistique

4. Analyse des données et conclusions

- 4.1 L'alerte *EROS-BLG-2001-3*
- 4.2 Résultats du projets EROS et conclusions
 - 4.2.1 La nature des MACHOs
 - 4.2.2 Conséquences pour la géométrie de l'univers
 - 4.2.3 Univers baryonique ou non-baryonique?

5. Annexe

- 5.1 Mesures des l' alerte *EROS-BLG-2001-3*
- 5.2 Bibliographie et Références

Remerciements

Mes sincères remerciements à Pascal Fouqué, Alain Maury et Christian Coutures, les responsables du projet EROS II sur le site de l'ESO à La Silla (Chili) et surtout à Jim Ritch de la CEA-Saclay (France) et à CALLISTA, l'association d'astronomie de l'Université de Lausanne et l'École Polytechnique Fédérale Lausanne (EPFL) qui l'ont fait possible, que j'ai pu participer au projet EROS II.

Bâle, le 7 Juillet 2001

Peter ERNI

Étudiant en Physique à l'Université de Bâle

1. Introduction

1.1 La matière manquante



Fig. 1 - Fritz Zwicky

Depuis les travaux de l'astronome Suisse *Fritz Zwicky* (1898-1974) en 1933 [1] les observations suggèrent que 90% de la matière qui compose les galaxies échappe aux instruments des astronomes. La masse des étoiles et des nuages interstellaires de gaz et de poussières visibles ne représente en effet que 10% de celle nécessaire pour que les galaxies soient en équilibre dynamique.

On a du constater que les vitesses de rotation loin du centre d'une galaxie ne diminuaient pas malgré l'apparente absence de matière dans ces régions. Cela ne s'explique que par une violation de la loi de la gravitation (que nous supposons impossible), ou par la présence d'une grande quantité de matière non-lumineuse (invisible, cachée, noire ou manquante). Cette matière invisible est ainsi indispensable pour empêcher une galaxie de se disperser.

1.2 Différents candidats pour la matière noire et leur recherche

L'hypothèse des MACHOs : Tout matière ordinaire (i.e. baryonique) invisible se trouve dans des objets trop petits pour émettre de la lumière ou dans les trous noirs. Cette matière forme une couronne (le halo) autour des galaxies. Ce sont les **MACHOs** (*Massive Astronomical Compact Halo Objects*). Des candidats potentiels sont: Les trous noirs (BH), les étoiles à neutrons (NS), les naines blanches (WD), les naines rouges (RD), les naines brunes (BD), des objets semblables à Jupiter et des planètes extrasolaires.

En 1986, l'astrophysicien polonais *Bohdan Paczynski* (*1940) a montré [2] que des naines brunes (des corps qui ne rayonnent pas ou très peu), en orbite dans le halo de notre galaxie, peuvent modifier la luminosité apparente des étoiles du Grand Nuage de Magellan par un effet de lentille gravitationnelle.

L'hypothèse des nuages d'hydrogène : Il s'agit de la matière ordinaire mais composée de nuages d'hydrogène moléculaire, très froids, pratiquement indétectables. L'hydrogène s'observe très bien, sous sa forme atomique, grâce aux ondes radio émises par les atomes excités, à une longueur d'onde de 21 cm. Mais lorsque les atomes liés 2 à 2 forment des molécules, l'hydrogène n'est détectable que dans le domaine de l'ultraviolet lointain, par l'absorption qu'il produit dans la lumière d'étoiles situées derrière les molécules d'hydrogène. C'est ainsi que des nuages d'hydrogène moléculaire ont été découvertes en 1969. D'autres détections devant des étoiles très brillantes ont été faites par le satellite *Copernicus* (1973-85). De 1992 à 93, cinq nuages entre 40 000 et 60 000 années lumières du centre de la galaxie ont été étudiés grâce aux radiotélescopes de 30 m de l'institut scientifique multinational IRAM (Institut de RadioAstronomie Millimétrique).

L'hypothèse des WIMPs : La matière noire est entre autre composée d'objets dites exotiques (non baryonique) et pour la plupart inconnus du classement des particules élémentaires. Cette matière est invisible parce qu'elle interagisse très peu ou pas du tout avec la matière ordinaire. On parle des **WIMPs** (Weakly Interacting Massive Particle) ou "Mauviette".

1.3 Lentilles et micro lentilles gravitationnelles

Depuis Einstein [3], on sait que la lumière est déviée par la gravitation. Cet effet a d'abord été détecté par les déplacements apparents d'étoiles au voisinage du Soleil observées dans une éclipse totale en 1917.



Fig. 2 - Lentilles gravitationnelles (HST)

L'effet de lentille gravitationnelle : La courbure des rayons lumineux peut aussi se traduire par la déformation de l'image d'objets placés derrière la source du champ de gravitation. Récemment (dans les années 1970) des arcs lumineux ont ainsi été observés dans des régions denses de l'Univers (typiquement au centre des amas de galaxies), interprétés comme l'image très déformée d'un quasar situés à l'arrière-plan. C'est ce que l'on appelle l'effet de lentille gravitationnelle.

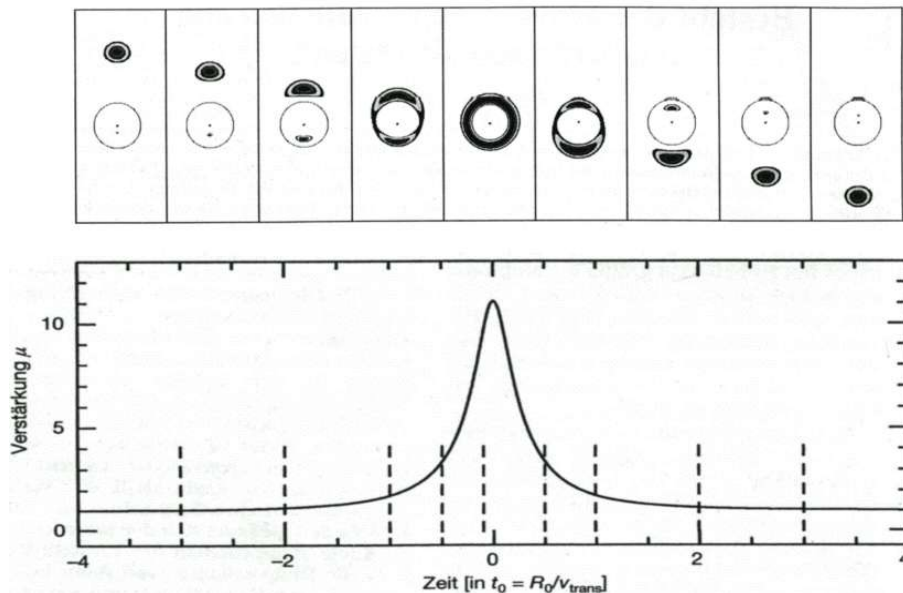


Fig. 3 - Micro lentille gravitationnelle, transition d'un MACHO devant une étoile vu par un "super-télescope"

Micro lentille gravitationnelle et naines brunes : Si le corps lumineux et le corps défecteur sont quasi ponctuels, l'image déformée (l'arc) peut être aussi ponctuelle. C'est donc impossible de voir une tel déformation mais c'est possible de la détecter d'une manière indirecte à cause de la modification de la luminosité de l'objet. Ceci est dû à la déflexion des rayons lumineux du corps lumineux par la gravitation du corps défecteur, le résultat est une amplification de la luminosité du premier. On peut remarquer que l'amplification est par construction indépendante de la longueur d'onde. *Paczynski* a montré [2] que l'on peut tirer partie de cet effet pour mettre en évidence des naines brunes. En effet celles-ci se déplacent plus rapidement que les corps qu'elles amplifient, il s'agit donc d'un phénomène d'amplification transitoire. Le projet EROS¹ (et aussi les projets MACHO² et OGLE³) s'est donc fixé entre autre pour but la surveillance des luminosités des étoiles des nuages de Magellan ainsi des

¹ EROS (Expérience de Recherche d'Objets Sombres): Un projet de la CEA (Commissariat de l'Energie Atomique à Saclay, France) en collaboration avec le CRNS (Centre National de la Recherche Scientifique, France), l'Université d'Orsay (France), l'ESO (European Southern Observatory) à La Silla (Chili) ainsi que des collaborateurs chiliens, américains et danois.

² MACHO (Massive Astronomical Compact Halo Objects): Un projet de collaborations scientifique entre les scientifiques de Mt. Stromlo (Australie), Siding Spring Observatories (Australie), Center for Particle Astrophysics at Santa Barbara (USA), San Diego (USA), Berkeley University (California, USA) et Lawrence Livermore National Laboratory (USA).

régions denses de notre galaxie (centre galactique et bras spiraux) pour rechercher de telles amplifications. Dans le cas des étoiles du grand nuage de Magellan et des naines brunes du halo, on peut attendre quelques amplifications par million d'étoiles : c'est donc un phénomène rare. D'autre part, la durée et l'amplitude du phénomène sont fonctions des vitesses et distances et de la masse du déflecteur. Dans le cas du halo de notre galaxie, on attend des durées comprises entre environ un jour (pour 10^{-7} masse solaire) et 1 mois (pour environ 0.1 masse solaire). En supposant le halo composé d'objets tous semblables, on voit que les phénomènes les plus brefs seraient aussi les plus nombreux. Pour distinguer un effet de micro lentille des autres phénomènes transitoires rencontrés dans l'évolution stellaire on utilise entre autre de sa caractéristique d'**achromaticité** : le phénomène doit être identique dans deux gammes distinctes de longueurs d'ondes.

1.4 Le projet EROS (Expérience de Recherche d'Objets Sombres)

Son but principal est la recherche et l'étude de la matière noire sous forme de naines brunes extra-galactiques (dans le halo de notre galaxie) et intra-galactique (vers les régions denses de la galaxie), par l'effets de micro lentilles gravitationnelles sur les étoiles du Grand et du Petit Nuage de Magellan respectivement le centre galactique et les bras spiraux.

EROS I (1993-1997) : Dans cette première phase une équipe scientifique de Saclay (France), a développé deux programmes complémentaires, basés l'un et l'autre à l'ESO à La Silla (Chili). D'une part, on a utilisé un télescope de 40 cm équipé d'une camera CCD à 1 million de pixels pour les naines brunes légères (qui produisent des phénomènes courts). Aucun candidat n'a été détecté à ce jour pour cette échelle de temps. D'autre part, 380 plaques photographiques des étoiles dans le Grand Nuage de Magellan ont été réalisées au télescope de Schmidt de l'ESO à La Silla, alternativement avec un filtre bleu et un rouge, avec le but de trouver des variations de leur luminosité. Ensuite ces plaques ont été digitalisées à la MAMA (Machine Automatique à Mesurer pour l'Astronomie) traitant les courbes de lumière de 4 millions d'étoiles (1 milliard de points de mesure en total). En septembre 1993, on découvre que 2 étoiles semblent avoir croisé une lentille gravitationnelle. De même, les Américains ont suivi dans le cadre de leur projet MACHO, pendant 1 an plus de 3 millions d'étoiles du Nuage de Magellan (avec le télescope du *Mont Stromlo* en Australie) et ont détecté en septembre 1993 un effet de micro lentille gravitationnelle. Pratiquement en même temps que les projets EROS et MACHO, aussi l'équipe du projet OGLE annonçait la découverte des premières candidates pour un événement d'une lentille gravitationnelle.

Eros II (1996-2002) : Analyse avec 2 caméras automatiques surtout des champs dans les Nuages de Magellan, le Centre Galactique et les bras spiraux pour la recherche de matière noire. Pour poursuivre ce programme de manière plus économique en augmentant considérablement la sensibilité et aussi s'abstraire de la réponse difficile à calibrer des plaques photographiques, la collaboration a construit un nouvel appareillage. Il s'agit d'un télescope de 1 m de diamètre (récupération du télescope MARLY) équipé d'un cube dichroïque et de deux nouvelles camera CCD (mosaïques de 8 CCD avec 2000 sur 2000 pixels); l'ensemble est guidé automatiquement par une autre camera CCD plus petite. Les premiers essais ont eu lieu au printemps 1995 à l'OHP (Observatoire de la Haute Provence en France). L'installation du télescope MARLY sur le site de l'ESO à La Silla a eu lieu en 1995. Depuis l'été 1996, EROS II livre constamment des mesures prises depuis La Silla (les données acquises pendant une nuit d'observation sont sous forme digitale et correspondent à environ 50 GB).

C'est dans la nature de l'expérience que les données acquises par EROS II peuvent aussi servir à des études d'autres phénomènes qui se manifestent aussi avec une variation de luminosité. Il s'agit surtout de la recherche de céphéïdes, des naines rouges et blanches, des supernovae et même des planètes extrasolaires. Pour la suite, nous voulons nous contenter de voir seulement plus explicitement la recherche de la matière noire.

³ OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment): Un projet de l'Observatoire de Université de Warszawa (Pologne) en collaboration avec la Carnegie Institution of Washington (USA) et l'Observatoire de Las Campanas (Chili).

2. Théorie

2.1 L'effet de micro lentille gravitationnelle

2.1.1 Rayon d'Einstein

L'effet de lentille gravitationnelle se produit lorsque les rayons d'une source lumineuse S sont défléchis par la présence sur la ligne de visée (la droite joignant l'observateur O à la source S) d'un objet D, de masse M, appelé déflecteur. Le déflecteur est supposé ponctuel. Le phénomène est décrit en fig. 4, sur laquelle est indiqué le paramètre d'impact b, qui est la distance du déflecteur d à la ligne de visée OS. On obtient des images multiples de la source.

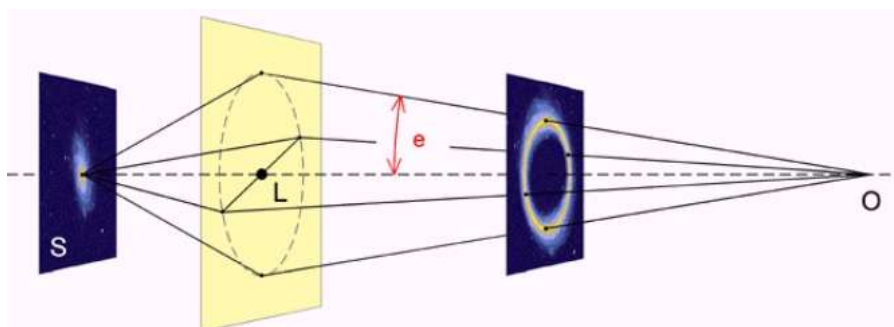


Fig. 4 - Le phénomène de lentille gravitationnelle. En l'absence du déflecteur, l'observateur voit simplement la source. En présence d'un déflecteur, l'observateur voit deux images de la source, qui se rassemblent en un cercle (dit cercle d'Einstein) lorsque la source, le déflecteur et l'observateur sont alignés.

Si le système source-déflecteur-observateur est aligné, les images multiples se rassemblent en un cercle, dont le rayon dans le plan du déflecteur est appelé rayon d'Einstein R_E (depuis c'était *Einstein* [3] qui a établi la théorie correspondante en 1936). R_E est lié aux distances relatives mises en jeu, et est proportionnel à la racine carrée de la masse du déflecteur, ainsi qu'à l'inverse de celle de la distance D_{OS} de la source à l'observateur:

$$R_E = \left(\frac{4GM D_{OD} D_{DS}}{c^2 D_{OS}} \right)^{0.5}$$

Placée un peu en dehors de la ligne de visée, l'observateur verra deux images, l'une à l'intérieur et l'autre à l'extérieur de cercle d'Einstein. De tels anneaux et images multiples ont été observés en radio et par le HST (Hubble Space Telescope), par exemple pour des quasars placés derrière des galaxies d'avant-plan servant de lentilles ou la Croix d'Einstein en est un exemple spectaculaire.

2.2 L'effet de micro lentille gravitationnelle

Quand la masse du déflecteur est petite, comme pour une naine brune par exemple, les images multiples de la source ne sont pas résolues. En effet, si la source est une étoile extragalactique située à 50 kpc de l'observateur, et le déflecteur un astre compact de $0.1 M_{\odot}$ située à 30 kpc, le rayon d'Einstein est de quelques unités astronomiques, et l'angle sous lequel il est observé d'environ 10^{-4} secondes d'arc ou dont la résolution angulaire d'un télescope dépasse rarement la seconde d'arc⁴. Dans ce cas, typique pour des objets sombres (déflecteur) devant des étoiles de la LMC ou la SMC (la source), on parle non seulement des lentilles gravitationnelles mais plus précisément de micro lentilles

⁴ Sans des techniques spéciales, les télescopes sur terre sont limités à une résolution de l'ordre d'une arc seconde. Avec une optique active (à ne pas confondre avec une optique active), la résolution descend jusqu'à 0.1 arc secondes. Grâce à l'absence de l'atmosphère, le HST arrive à des résolutions de l'ordre de 0.05 arc secondes.

gravitationnelles. Un tel événement n'est pas facile à mettre en évidence car l'amplification ne dépasse quelques pour cents, ce qui est la précision photométrique moyenne que l'on peut obtenir de façon régulière sur des étoiles, que si l'alignement observateur-lentille-source est très bon. Il faut donc acquérir une énorme quantité de mesures sous des conditions photométriques et puis les analyser avec une procédure assez sophistiquée pour pouvoir détecter ces faibles variations de luminosité.

2.2.1 Amplification

Soit u le rapport du paramètre d'impact au rayon d'Einstein:

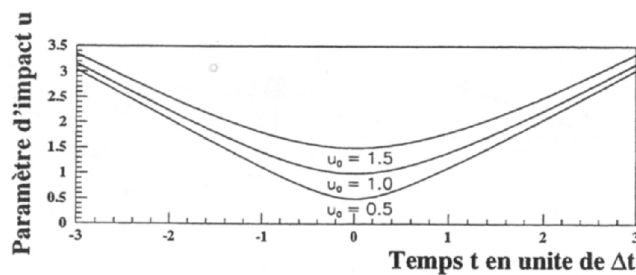
$$u = b/R_E$$

Le coefficient de amplification de la source, appelé aussi par abus de langage amplification, ne dépend selon *Einstein* [3] que de u :

$$A(u) = (u^2 + 2) / (u^2 + 4)^{0.5}$$

On constate que cette formule diverge lorsque le source-défecteur-observateur est aligné: il faut prendre en compte dans ce cas la taille finie du déflecteur. Lorsque le déflecteur est situé à un rayon d'Einstein de la ligne de visée, l'amplification est de 134%. D'autre part, ce phénomène est purement gravitationnel, et affectera par conséquent de manière identique toutes les longueurs d'ondes, le phénomène est donc achromatique.

a) Variation de paramètre d'impact



b) Amplification de l'étoile source

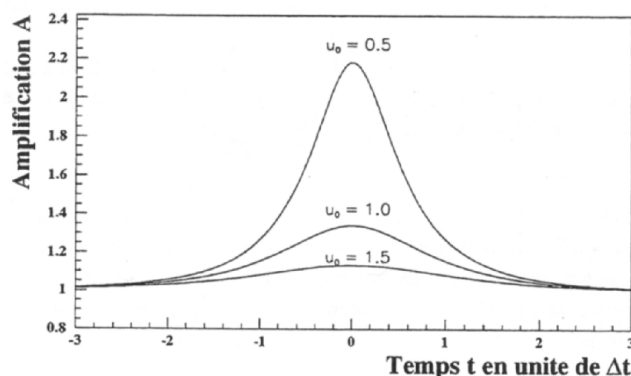


Fig. 5 - a) Variation du paramètre d'impact pour différentes valeurs minimales u_0 . Le déflecteur croise la ligne de visée à vitesse transversale constante. B) Variation de l'amplification pour différentes valeurs minimales du paramètre d'impact u_0 . Plus le déflecteur est proche de la ligne de visée, plus l'amplification est importante. L'échelle de temps est en unité de Δt .

2.2.2 Durée d'amplification

Nous avons ici décrit de manière statique le phénomène d'amplification d'une étoile source par un astre compact. Or, ces objets sombres sont en mouvement dans le halo. Ainsi, le paramètre $u(t)$ va varier au cours du temps, décroissant jusqu'à une valeur minimale $u(t_0)=u_0$ au fur et à mesure que le déflecteur se rapproche de la ligne de visée, puis augmentant à nouveau. Si on suppose la vitesse transverse à la ligne de visée du déflecteur v_{\perp} constante, la fonction $u(t)$ est symétrique par rapport à l'instant du maximum t_0 . L'amplification de l'étoile source dépend donc du temps. Elle est caractérisée par le paramètre u_0 et la vitesse transverse du déflecteur v_{\perp} . Elle est maximum lorsque u est égal à u_0 , et symétrique par rapport à l'instant du maximum.

On définit la durée d'amplification Δt par le temps mis par le déflecteur pour parcourir un rayon d'Einstein:

$$\Delta t = R_E/v_{\perp} \propto M^{0.5}/v_{\perp}$$

Fig. 5 montre l'évolution de la courbe d'amplification en fonction du temps en unité de Δt . Remarquons que la durée du phénomène est proportionnelle à la racine carrée de la masse M du déflecteur, ainsi qu'à l'inverse de sa vitesse transverse.

2.2.3 Taux d'événements

Il est maintenant nécessaire d'examiner la probabilité d'un tel événement, et sa dépendance en fonction de M . Pour cela, plaçons nous dans le cadre d'un modèle standard de halo sphérique et isotherme entièrement constitué d'astres compacts de masse M . La densité de matière sous ces conditions est décrite par:

$$M(R)=v_{\text{circ}}^2 R/G$$

La distribution des vitesses des objets est décrite par une maxwellienne, dont le sigma est lié à la vitesse de rotation circulaire v_{circ} par [4]:

$$\delta_{\text{vitesse}} = v_{\text{circ}}/2^{0.5}$$

La vitesse circulaire est égale à 220 km/s et en accord avec la courbe de rotation de la Galaxie.

La profondeur optique τ , c'est à dire la probabilité de trouver un déflecteur à un rayon d'Einstein de la ligne de visée d'une étoile source peut alors être déterminée sous ces hypothèses. Elle est extrêmement faible [2]:

$$\tau \approx 5.10^{-7}$$

Un tel événement est donc rare, et nécessite alors la surveillance de millions d'étoiles pendant plusieurs années au moins. Il est d'autre part très improbable qu'une étoile amplifiée le soit à l'avenir une seconde fois.

On en déduit la dépendance de taux d'événement attendu Γ en fonction de M :

$$\Gamma \propto \tau/\Delta t \propto M^{-0.5}$$

2.2.4 Caractéristiques d'un événement

La signature d'un événement de micro lentille gravitationnelle est une amplification achromatique de temporellement symétrique d'une étoile source. D'autre part, sa rareté impose un critère d'unicité: une étoile ne peut être amplifiée qu'une seule fois pendant la durée de l'expérience. Enfin, la durée de l'amplification est proportionnelle à la racine carrée de la masse du défecteur, et le nombre d'événements attendus à l'inverse de celle-ci. Ainsi, plus le défecteur est lourd, plus l'amplification de l'étoile source est longue. D'autre part, plus les défecteurs constituant le halo sont légers, plus le nombre d'événements attendus est important.

Événement d'une micro lentille gravitationnelle:

- Achromatique
- Temporellement symétrique
- Événement unique

En plus, le taux d'événements dépend de la masse et donc ainsi du nombre de défecteurs dans le halo de notre galaxie.

Fig. 6 - Critères d'une événement d'une micro lentille gravitationnelles

3. L'expérience EROS II

3.1 Recherche de micro lentilles

EROS II se consacre principalement à la recherche d'événements de micro lentille causés par des défecteurs de masse supérieure à $10^{-2} M_{\odot}$. Surveiller les étoiles du Petit et du Grand Nuage de Magellan (SMC et LMC) permet de sonder le halo Galactique sous deux lignes de visée différentes, et ainsi d'en étudier la forme. En revanche, l'observation des régions de haute densité d'étoiles du centre et des bras spiraux galactiques permet la détection d'événements causés par des défecteurs appartenant au disque Galactique.



Fig. 7 – Vue sur le site de l'ESO à La Silla depuis le 3.60m

Ainsi, 88 degrés carrés du LMC et 10 degrés carrés du SMC ont été observés à raison d'une mesure tous les trois jours, pendant les périodes de visibilité qui s'étendent de juillet à mai pour le LMC et de mai à février pour le SMC. La surface couverte est donc près de trois fois plus importante qu'elle ne l'était pour l'expérience EROS I (avec les plaques photographiques du télescope Schmidt de l'ESO à

La Silla). L'analyse des données du SMC [5] à permis d'isoler, parmi cinq million d'étoiles suivies pendant la saison 1996-97, un candidat micro lentille, co-découvert avec le groupe MACHO. La courbe de lumière présente de surcroît une variation sinusoïdale de 2.5% d'amplitude et de période 5,12 jours. Avec un seul événement, cause par un défecteur du halo, on en déduit que ce dernier pourrait être constitué pour moitié de tels objets. Dans ce cadre de cette hypothèse, la masse la plus probable du défecteur serait de $M=2.6^{+8.2}_{-2.3} M_{\odot}$, ce qui paraît bien élevé. Il est aussi possible d'envisager l'appartenance du défecteur au SMC, ce qui réduit l'estimation de la masse à $0.1 M_{\odot}$, et expliquerait aussi l'absence d'effet de parallaxe du au mouvement de la Terre pendant la durée de l'amplification (une centaine de jours). Ces résultats sont présentées en détail dans [5]. L'analyse des données vers le LMC (30 millions d'étoiles), pour lequel on attend quelques dizaines d'événements, est en cours [6]. Vers le Centre Galactique et les bras spiraux, les champs ont été choisis visuellement par leur brillance de surface, afin de maximiser la densité d'étoiles et de minimiser l'extinction. Il est prévu de se restreindre dans le Centre Galactique aux seules étoiles de type géante rouge, ce qui représente six millions d'étoiles distribuées sur un champ total de 80 degrés carrés. La connaissance de la position de ces étoiles cibles - dans la bulbe galactique (le 'bulge') - facilite le calcul d'une profondeur optique. Les géantes sont des étoiles très lumineuses, donc de photométrie aisée, et leur grande surface permettrait la détection d'événements de micro lentille pour lesquels la taille de la source n'est pas négligeable par rapport au rayon d'Einstein (événements dit de taille fine). Une statistique importante d'événements (on attend une cinquantaine d'événements par an) permettrait de contraindre la forme du bulbe Galactique (présence d'une barre). Pour plus de renseignements, on pourra consulter [7]. Vers trois bras spiraux de la Galaxie, 29 degrés carrés, soit 10 millions d'étoiles analysables, sont suivis depuis juillet 1996. La distance des étoiles cibles a été estimée à quelques kpc [8] et l'analyse des courbes de lumière [9] a déjà permis l'identification de 3 événements micro lentilles potentiels. Les champs du centre galactique et des bras spiraux sont observés de février à octobre.

3.2 Montage expérimental d'EROS II

EROS II bénéficie d'un appareillage entièrement nouveau, adapté à la prise de données massive. À la caméra CCD grand champ et au télescope dédié s'ajoutent un système de pointage automatique ainsi qu'une lecture électronique et une réduction informatique rapides des données, qui permettent de collecter - et gérer - une grande quantité de données par nuit d'observation.

3.2.1 L'optique du télescope MARLY

L'expérience EROS II est installée sur le site de l'ESO à La Silla, Chili. Ce site bénéficie d'un bon seeing (paramètre qui mesure l'étalement de la tache lumineuse des étoiles causé par l'atmosphère). Les conditions climatiques y sont excellentes (300 jours utilisables par an).



Fig. 8 – Le télescope MARLY sur le site de La Silla

EROS II utilise un télescope Ritchey-Chrétien de 1m, le MARLY, monté dans la coupole du GPO (Grand Prisme Objectif). Construit par l'Observatoire de Marseille et l'Observatoire de Lyon, le MARLY est prêté par l'Observatoire de Haute-Provence (OHP) pour toute la durée de l'expérience. Sa mécanique a été conçue par l'OHP.

Pour obtenir un grand champ, le rapport focale sur ouverture d'origine a été diminué de F/8 à F/5. La profondeur de champ est de 100 μ m. L'obtention d'un grand champ a pour contrepartie une variation de la forme de l'image d'une même étoile, selon qu'elle est obtenue sur le bord du champ ou au centre du champ. D'autre part, pour un même clairment, la quantité de lumière reçue est moindre sur le bord du champ qu'au centre: c'est l'effet de vignetage. Le gradient ainsi obtenu est compensé à la réduction de l'image, mais la diminution de la photo-statique ne peut être corrigée.

Pour permettre la prise de poses simultanées en deux couleurs, le faisceau incident est séparé en deux voies par un filtre dichroïque. La bande passante du filtre est de 400nm à 700nm pour la voie bleue, centrée à $\lambda_B=570$ nm, et de 600nm à 900nm pour la voie rouge, centrée à $\lambda_R=755$ nm.

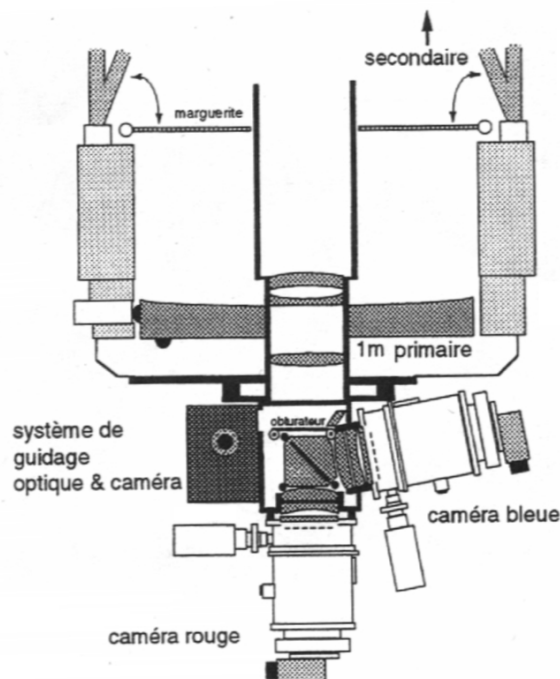


Fig. 9 - Schéma de l'appareillage optique. Le miroir secondaire n'est pas représenté. Sont indiqués la marguerite fermant le télescope, le miroir primaire, le système de guidage, l'obturateur devant le filtre dichroïque. Ce dernier divise le faisceau incident en deux voies bleue et rouge. Chaque plan focal est équipé d'une camera.

Les bandes passantes des filtres de EROS II sont bien plus larges que celles des filtres standard, car la recherche de micro lentilles nécessite d'obtenir le plus de plus possible dans deux couleurs différentes. Le filtre dichroïque est appliqué sur la diagonale d'un cube de verre optique de 10kg. Devant le filtre dichroïque, un obturateur grand champ conçu spécialement permet une illumination uniforme des plans focaux des voies rouge et bleue. Il est constitué d'un rideau métallique revêtu de Téflon et perce d'une ouverture de 180mmx720mm, qui s'enroule sur deux tiges de part et d'autre du filtre. Le sens de déroulement et l'accélération de l'obturateur sont les mêmes lors d'une ouverture et d'une fermeture consécutives, ce qui garantit une illumination uniforme. Le temps caractéristique d'obturation est de 0.5 secondes.

Une fraction du faisceau incident est déviée vers le système de guidage par un petit miroir placé devant l'obturateur. Le champ de la caméra de guidage, elle-même équipée d'un CCD 1536x1024 pixels, couvre 15 minutes d'arc x 15 minutes d'arc du ciel et il est situé à 0.7 degré ouest du centre du champ principal. Le système de guidage est muni de son propre obturateur. Le programme de guidage

sélectionne une étoile guide et la suit par clichés de environ une seconde, à partir desquels les corrections en déplacement à appliquer sont déduites.

3.2.2 Les cameras CCD

Chaque plan focal est équipé d'une camera CCD grand champ. Ces cameras, conçues et fabriquées au Service d'Etude de Détecteurs ainsi qu'au Service d'Instrumentation Générale du CEA-Saclay, sont composées d'une mosaïque de 2x4 CCD *Loral2k3eb* de 2048x2048 pixels, aboutables sur trois cotés. Ces CCD possèdent deux registres de sortie bas bruit. Cette configuration permet de les lire sur l'une ou l'autre sortie, ou d'utiliser, comme ce fut le cas, un CCD dont une seule sortie est disponible.

La taille du pixel est de 15 μ m, soit 0,6 arc seconds du ciel. Une camera correspond à une surface de 0,7x1,4 degrés carrés du ciel. Les hit CCD d'une camera sont lus en un temps très court de 50 secondes.

Le Contrat avec *Loral*, établi en 1994, prévoyait la production et le test à chaud d'un lot de 80 CCD, ainsi que le découpage par le Stewart Observatory de l'université d'Arizona (USA). Après une attente de deux ans, le nombre de CCD livrés fut suffisant pour construire les deux cameras, ce qui retarda l'expérience d'un laps de temps équivalent.

Les CCD sélectionnés présentent des défauts courants: colonnes mortes ou brillantes, défaut de surfacage, groupe de pixels défectueux. Quelques CCD souffrent d'un problème d'efficacité de transfert de charge (ou CTE pour Charge Transfer Efficiency) et 3 DDC ont une faille horizontale de quelques centaines de pixels au-delà de laquelle la CTE est très mauvaise. Ce défaut peut être minimiser par un réglage soigneux des tensions appliquées aux CCD. Enfin, certains CCD possèdent des pixels photo-émetteurs (ou LEP pour Light Emitting Pixel) qui illuminent le CCD aux alentours. La saturation locale est atteinte en 20 minutes. Les CCD possédant des LEP sont tous sur la camera de la voie rouge.

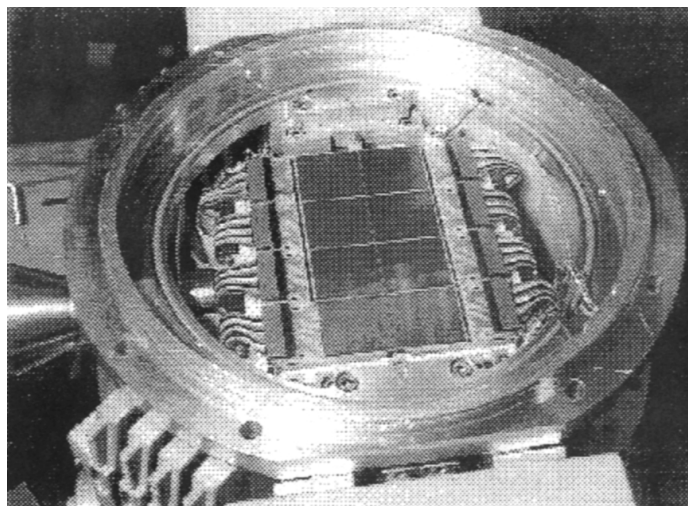


Fig. 10 - La camera bleue montée dans son cryostat. Sa surface est de 6,2cm x 12,4cm.

Les photons incidents créent un signal en électrons qui est amplifié puis converti en tension. À ce signal photo-électrons s'ajoute une tension constante, appelée piédestal (ou offset), et un signal dû à la création thermique de paires électron-trou. Ce dernier est minimisé en maintenant les CCD à 180 K.

Une étape de la réduction du signal consiste à soustraire un piédestal moyen, mesuré pour chaque CCD en l'absence d'éclairement (on parle alors d'*obscurité*). C'est aussi possible de déterminer pour chaque CCD le gain ainsi que le bruit de lecture, en mesurant le signal et le bruit du signal pour plusieurs éclaircissements (*flat fields* et *obscurités longues*).

3.2.3 Cryogénie

L'existence d'un courant dit d'obscurité, dû à la création thermique de paires électron-trou, oblige à refroidir les CCD à 180K. L'utilisation de l'azote liquide nécessiterait un appareillage trop encombrant, et le renouvellement quotidien de l'azote liquide est contraignant. Un système cryogénique sans azote liquide a été étudié et réalisé au DAPNIA (un département du CEA). Il comprend un cylindre de 15kg d'aluminium pur, qui joue le rôle de capacité thermique, en contact par une résistance thermique variable avec un bloc de cuivre de 1kg, sur lequel une plaque de céramique portant les CCD est fixée. Pendant le jour, une tête froide alimentée en hélium sous pression refroidit le bloc d'aluminium à 50K. La régulation du flux de chaleur du bloc de cuivre portant les CCD vers le bloc d'aluminium est assurée par une résistance variable. Elle est constituée d'une mâchoire dont la partie fixe est en contact constant avec le bloc de cuivre par l'intermédiaire de tresses de cuivre. La partie mobile de la mâchoire permet un contact réglable avec le bloc d'aluminium par 900 tresses de cuivre flexibles. L'ouverture plus ou moins grande de la mâchoire fait varier la surface de contact, donc l'échange de chaleur, entre le bloc d'aluminium et le bloc de cuivre. Ainsi, la température des CCD reste constante à 0,1K près. L'autonomie en froid est de 12 heures environ.

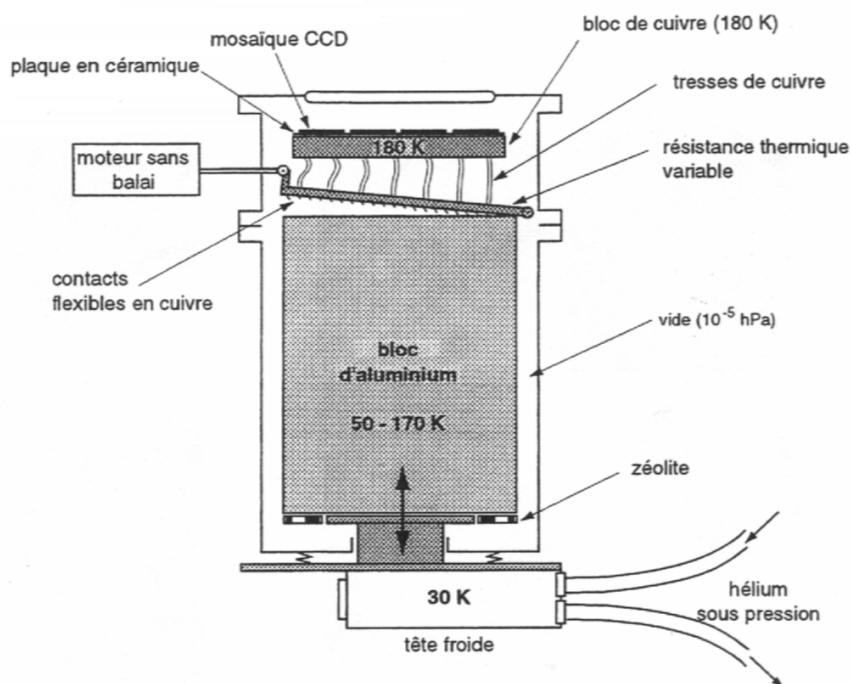


Fig. 11 - Schéma du système cryogénique.

Un vide de 10^{-5} hPa règne dans le cryostat. Des pastilles de zéolite, en piégeant les molécules, assurent la longévité du vide.

3.3 Prise des mesures et logistique

Toute la logistique du projet EROS II est assez complexe et fait appel à divers systèmes qui doivent interagir entre eux des façons très diverses. Pour obtenir une première idée de ces divers composants, il me semble pratique de les commenter brièvement l'un après l'autre :

- Les composants du hardware sont commandés à partir d'un PC exploité sous *Linux*, par un programme appelé *guidab* qui tourne en principe en permanence.

- Les déplacements du télescope, du miroir secondaire et de la coupole sont sous-traités à une des cartes du PC, la carte *Galaxe*, qui est équipée d'un processeur et sur laquelle quatre programmes peuvent être exécutés simultanément. Cette carte reçoit des informations analogiques et digitales de divers composants, et également des instructions du programme principal.
- L'ensemble du système est commandé dans la vie de "tous les jours" par l'acquisition de la manip depuis le *VME* à travers une liaison série de type RS232, à partir du clavier du PC ou encore à travers un terminal X.
- Les deux axes du télescope peuvent être bloqués et des senseurs signalent cet état et interdisent le mouvement sur l'axe en question (sécurité hard et soft). Une ampoule de mercure coupe les moteurs si l'inclinaison du télescope est inférieure à une certaine valeur critique.
- Un boîtier d'électronique dit "de l'OHP" fixé sur le télescope, lit et commande la position du miroir secondaire et l'ouverture/fermeture de la marguerite.
- Les deux moteurs pour l'entraînements du télescope sont couplés, équipés de codeurs (liés aux axes du télescope pour mesurer les coordonnées pointées).
- Une caméra de guidage est placée près des caméras principales.
- La coupole peut être commandée avec la raquette du télescope ou depuis la salle de contrôle. Un dispositif de sécurité mesure constamment la position de la coupole.
- Les alimentations des moteurs et des caméras sont situés sous le plancher du télescope dans la coupole ou il y a un PC qui commande le tout.
- L'unité centrale est dans le local informatique à côté de la salle de commande.

Gestion du planning d'observations: La commande `xplanning` donne accès à une interface graphique qui permet de sélectionner les champs à observer, et de les transmettre au *VME*. Il est possible d'ajouter manuellement des zones et des champs, de les réordonner. On est guidé par l'affichage du délai depuis la dernière prise de chaque champ, et par une estimation de l'angle horaire auquel il va être pris. Une fonction permet de trier automatiquement le planning par ascensions droites croissantes.

4. Analyse des données et conclusions

4.1 L'alerte *EROS-BLG-2001-3*

Pendant la durée de mon travail à La Silla, j'ai eu la chance d'avoir pris en image deux événements d'une micro lentille vers le centre galactique, sachant que l'on s'attend à un peu près huit événements par années.

La première alerte *EROS-BLG-2001-2* n'était pas d'une variation lumineuse très grande. En plus, une grande étoile en avant plan était très proche de l'étoile en question et a certainement joué un grand rôle sur la précision de nos mesures. À l'aide d'une première réduction des images brutes qui se fait encore à La Silla, nous avons pu mesurer une légère variation avec un maximum le 26 May. Qualitativement, nous avons trouvé à quelques pour cents près les mêmes résultats que la MAMA du CEA à Saclay.

La deuxième alerte *EROS-BLG-2001-3* était beaucoup plus intense et très bien visible à l'œil. On va très bien (fig. 14) qu'il s'agit bien d'un phénomène achromatique. L'étoile amplifiée est un géant rouge.

Alert EROS-2001-BLG-3

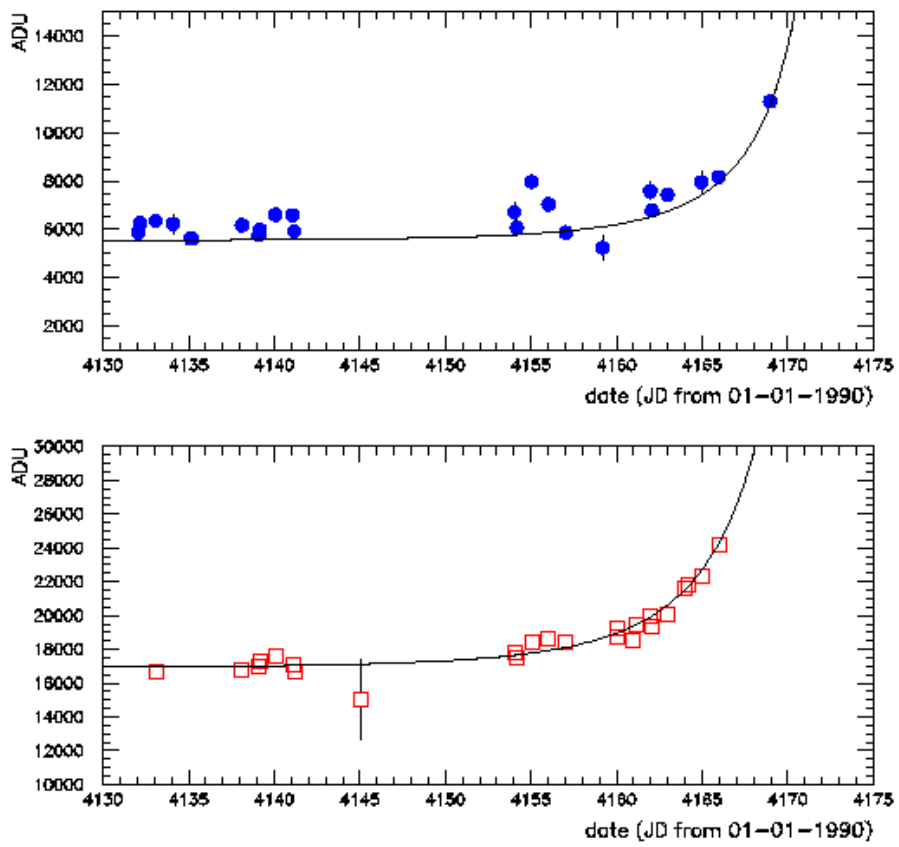


Fig. 12 - Intensité de la variation de luminosité de l'alerte *EROS-BLG-2001-3* (camera bleue et rouge)

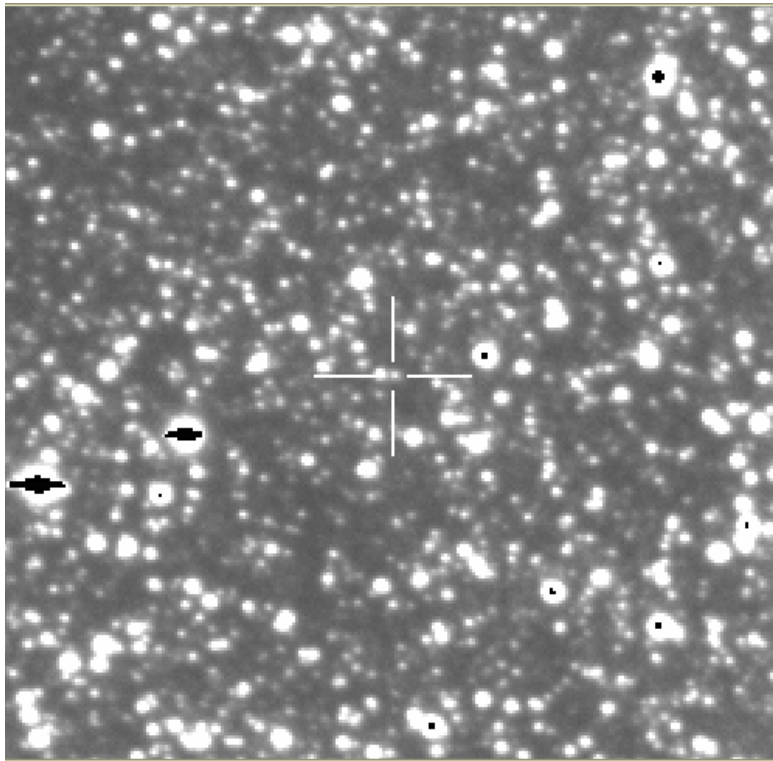


Fig. 13 - Une image 2048 x 2048 pixel de l'alerte *EROS-BLG-2001-3*, prise avec le télescope MARLY depuis La Silla, Chili.

North is oriented up and East is oriented left

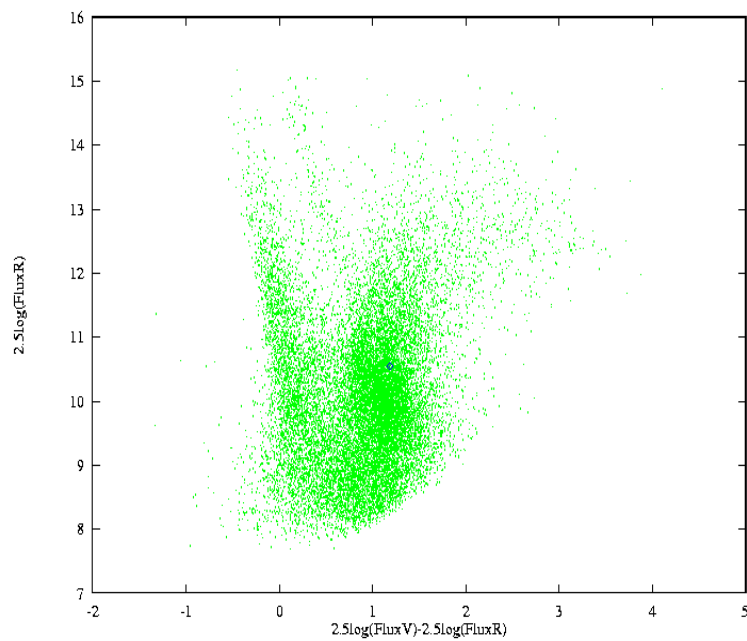


Fig. 14 - Diagramme Hertzsprung-Russel du fond avec de l'alerte *EROS-BLG-2001-3*

4.2 Résultats du projets EROS et conclusions

4.2.1 La nature des MACHOs

Une interprétation possible de ces événements, suggérée il y a trois ans par les chercheurs de la collaboration MACHO, était que le halo de matière noire qui entoure notre galaxie pourrait être entièrement constitué de ces objets sombres. Dans ce cas, compte tenu des durées des événements observés, une estimation de la masse de ces objets obscurs se situerait quelque part entre la masse du Soleil et le dixième de celle-ci.

Les équipes de la collaboration EROS viennent d'annoncer dans deux congrès, d'abord en août à Boston aux Etats-Unis (Gravitational Lensing : progress and future goals), puis actuellement à Paris (Topics in Astroparticule and Underground Physics, TAUP), que cette interprétation n'est plus quantitativement viable, car au moins trois fois plus d'événements auraient dû apparaître dans les données accumulées par ces équipes au cours des trois dernières années de mesures.

Les observations se poursuivent en vue de préciser l'origine de ces phénomènes de micro lentilles gravitationnelles. Plusieurs hypothèses sont actuellement explorées. Le sujet que je vais aborder à présent ne semble peut-être pas être au premier abord en rapport directe avec la matière noire. Cependant, si l'on a une vague notion du problème que les astronomes ont face au destin de l'univers, il apparaît alors clairement que la matière noire, vu qu'elle représente plus des 80% de la masse totale de l'univers, pourrait influencer le destin de l'univers. C'est précisément, ce que nous allons essayer de comprendre par des raisonnements simples. L'univers dans lequel nous vivons, est caractérisé par deux observations:

L'univers est issu d'une explosion primordiale le Big Bang: C'est en 1965 que Penzias et Wilson détectèrent un rayonnement présentant une isotropie parfaite, identique à celui d'un corps noir de 3K. Ce rayonnement est en fait le résidu d'un gaz de photons de rayonnement électromagnétique intense, existant lorsque l'univers était très concentré et très chaud.

L'univers est en expansion: C'est en 1929 que Edwin Hubble propose une loi importante, la loi de Hubble, qui dit que le spectre des galaxies proches présente un décalage vers le rouge proportionnelle à leurs distances.

L'expansion de l'univers que Hubble découvrit à partir de sa loi empirique, déduite de l'observation des galaxies locales et qui dit que la distance séparant deux galaxies est proportionnelle au décalage spectral de l'une par rapport à l'autre, atteint une dimension réellement fondamentale, lorsqu'on n'interprète pas le décalage spectral comme un décalage Doppler, mais comme un décalage spectral dit cosmologique. On définit ce décalage cosmologique à l'aide d'une fonction notée $R(t)$ et appelée le "rayon" de l'univers. Il s'agit d'une fonction dépendant du temps et qui associe à chaque temps t un état de l'univers. La forme de $R(t)$ constitue le modèle de l'univers et c'est la variation du rayon de l'univers au cours du temps, qui est appelée l'expansion de l'univers. De plus, comme l'expression du décalage spectral cosmologique est la même en tout point de l'espace, on peut adopter l'image intuitive qu'on se fait de l'univers, qui est celle de la surface d'une sphère qui se gonfle. Il est important d'insister sur le fait que la forme de la fonction $R(t)$ constitue le modèle de l'univers, c'est-à-dire que la connaissance de $R(t)$ nous permet de connaître l'histoire de l'univers au cours du temps et permet donc de répondre aux questions suivantes: l'univers existe-t-il de toute éternité, a-t-il une origine, quel est son avenir? Dans les années 1930, Friedmann proposa trois modèles de l'univers correspondant à trois types géométriques: hyperbolique, parabolique ou elliptique.

Trois types d'univers selon Friedmann (1930)

Si $R > R_{\text{critique}}$: univers elliptique

Si $R = R_{\text{critique}}$: univers parabolique

Si $R < R_{\text{critique}}$: univers hyperbolique

Fig. 16 - La densité de l'univers détermine une limite entre les différents modèles

2001 Bulge Events							
Event	Field.CCD.1/4	RA	Dec	V_J	R_C	Comments	
EROS BLG-2001-1	611/0/n duration 2		18:02:51.1	-27:38:17.2	16.5	16	Peak of A ~5 on May 3, very short
EROS BLG-2001-2	005/4/m	17:56:06.1	-29:08:18	19.4	18.08	Peak of A ~2 on May 26, duration 24.5 days	
EROS BLG-2001-3	003/4/k	17:51:56.1	-29:32:49	19	17.5	Magnification > 2 on June 1 and going up	
EROS BLG-2000-1	612/4/k	18:04:59.9	-31:42:41.9	17.6	17.	2000 Bulge Events Peak of A ~1.6 on March 4, duration 11+-1	
EROS BLG-2000-2	615/1/l	18:07:32.54	-26:44:24.9	16.7	16.	Peak of A ~4 on Feb. 27 (very uncertain), duration 14.5+-1.8 days	
EROS BLG-2000-3	611/6/m	18:03:09.04	-28:32:50.30	16.5	16.1	Peak of A ~1.4 on March 16, duration 4.5	
EROS BLG-2000-4	003/5/n	17:54:28.34	-29:35:13.1	19.2	18.2	Peak of A ~2.5 on March 11, duration 28.2+-	
EROS BLG-2000-5	002/5/K	17:53:11.5	-30:55:35	18.4	17.2	1 days Peak of A ~2 on June 4, duration 58.7+-4	
EROS BLG-2000-6	003/4/m	17:52:58.6	-29:34:21.2	18.7	17.5	days Amplification ~3 on May 19 and rising, duration ~20 days	
EROS BLG-2000-7	613/3/m	18:06:47.7	-29:50:08	16.7	16	Amplification ~1.7 on June 13, duration 13	
EROS BLG-99-1	624/4/m	18:12:25.5	-30:11:02	16.6	15.8	+1 days 1999 Bulge Events Peak of A ~1.9 on August 23, duration 17	
EROS BLG-99-2	619/4/n	18:09:15.3	-29:08:37	17.6	16.4	days Peak of A ~2.5 on August 14, duration 45+-4	
EROS BLG-99-3	002/7/n	17:59:30.0	-31:27:57	17.3	16.	days, blended Peak of A ~2 on 28 July, duration 11.7+-1	
EROS BLG-99-4	009/7/m	18:04:03.8	-31:32:36	17.4	16.4	days Amplification 1.7 and rising on September	
EROS BLG-99-5	008/5/n	18:01:24.5	-28:17:33	17.9	17.1	10,duration and maximum uncertain Amplification 1.5, maximum on August 1st,	
EROS BLG-99-6	620/4/k	18:08:36.8	-27:24:42	17.1	16.3	duration 41.3+-3 days Amplification 1.4 on September 20, duration	
EROS BLG-99-7	008/3/l	18:00:48.3	-27:56:25	18.1	17.8	and maximum uncertain Amplification 1.4 at maximum on September	
EROS BLG-99-8	610/1/l	18:03:41.5	-29:06:09.2	16.3	16.3	16, Einstein crossing time 9.7 days Amplification 1.3 at maximum on September	
EROS BLG-98-1	613/4/l	18:04:50.6	-30:16:34	18.6	17.7	12, Einstein crossing time 20 days 1998 Bulge Events Peak of A ~1.35 on 5 May, duration 12+6-4	
EROS BLG-98-2	614/5/k	18:07:06.46	-28:42:31	17.1	17.7	days Peak of A ~2 on 21 May, duration 15+-2	
EROS BLG-98-3	607/7/m	18:01:09.60	-29:56:19	17.6	16.8	days Peak of A ~5 on 29 June, duration 7+-2 days	
EROS BLG-98-4	611/3/n	18:04:33.66	-28:07:32	16.9	15.9	Peak of A ~1.75 on 8 July, duration 21+-8	
						days	

Avec la valeur théorique: $R_{\text{critique}} = 5 * 10^{-30} \text{ g/cm}^3$, pour une valeur de la constante de Hubble égale à 50 km/s*Mpc. Ces résultats s'interprètent aisément de manière classique, c'est-à-dire en considérant le fait qu'une densité élevée cause une forte attraction gravitationnelle et inversement. Ainsi, selon si l'intensité de cette attraction est supérieure ou inférieure à l'énergie cinétique de libération des objets constituant l'univers, il y aura arrêt de l'expansion et donc contraction (univers elliptique) ou au contraire expansion infinie (univers hyperbolique). L'égalité entre l'attraction gravitationnelle et l'énergie cinétique de libération correspond au cas où la densité de l'univers est égale à la densité critique (univers parabolique).

Nous voyons donc à ce niveau là, l'importance de connaître la quantité de matière noire dans l'univers, afin de pouvoir déterminer la densité de l'univers et voir lequel des trois modèles est correct. La somme de toute la matière visible de l'univers ne nous donne qu'une limite inférieure de la densité totale et qui représente moins de 4% de la densité critique de l'univers, puisqu'on mesure $r_{\text{visible}} = 2 * 10^{-31} \text{ g/cm}^3$. Et selon l'estimation faite pour le pourcentage de la matière visible par rapport à la matière totale de l'univers qu'on suppose être entièrement celle associée à la distribution des galaxies, il s'avère que cette matière totale représentent que ~20% de la densité critique.

Par conséquent, pour atteindre la densité critique de l'univers, il faudrait que 80% de la matière soit distribuée dans l'univers indépendamment des galaxies et soit constituée de matière non-baryonique. Le fait que ce soit de la matière non-baryonique et non pas de la matière baryonique vient du fait que

l'on suppose que la matière totale constituant les galaxies comprend toute la matière baryonique. La difficulté de se prononcer alors sur lequel des trois modèles de l'univers est correct, est donc une conséquence de l'existence de cette matière non-baryonique qu'on n'arrive pas mesurer et à observer, mais pour laquelle il existe "des preuves théoriques" se basant sur des raisonnements sur l'univers primordial.

4.2.3 Univers baryonique ou non-baryonique?

La nature de la matière noire très mal connue. Il semble très probable qu'une fraction soit formée de matière normale (baryonique) sous une forme inhabituelle, peut-être des astres sombres, des MACHOs. Les projets EROS, MACHO et OGLE arrivent à expliquer seulement 20% de la matière noire. Une autre fraction est sans doute formée de particules élémentaires interagissant très faiblement avec les autres, que ce soit des neutrinos ou des particules hypothétiques, des WIMPs.

5. Annexe

5.1 Mesures des l'alerte *EROS-BLG-2001-3*

BLEU

301516	5392.17	129.889	0
303125	5544.82	146.77	0
303324	5424.17	154.268	0
303606	5795.29	193.271	1
303923	5696.57	207.125	0
304413	5688.46	293.348	0
304512	5533.19	149.987	0
304723	5532.08	120.071	0
306225	5980.68	275.832	0
306712	5298.41	135.38	0
413207	5855.52	-241.517	0
413218	6254.97	-35.0563	0
413309	6333.96	-186.781	0
413410	6208.45	-376.188	0
413512	5602.78	-272.965	0
413521	5611.69	-151.149	0
413811	6165.59	-123.514	0
413909	5742.99	-193.348	0
413919	5969.15	-222.484	0
414008	6590.44	-202.894	0
414108	6578.64	-14.8486	0
414118	5911.79	118.832	0
415404	6701.19	-399.542	0
415417	6047.52	-342.307	0
415504	7952.06	-241.262	1
415603	7022.67	-64.2329	1
415703	5856.6	-229.88	0
415920	5231.65	-481.974	1
416197	7579.01	-362.241	0
416208	6756.48	-205.477	0
416299	7425.26	-174.533	0
416496	7935.35	-460.615	0
416597	8163.06	-288.291	0
416899	11290.7	23.1771	0

ROUGE

305808	15529.2	767.723	0
305698	17404.8	1281.53	0
305920	15685.9	438.501	0
301225	16470.9	421.904	0
301516	16896.5	364.822	0
303125	16595	427.335	0
303324	16887.7	417.675	0
303606	17079.4	607.911	0
303923	17200.6	421.132	0
304413	16963.7	443.219	0
406322	16683.2	408.602	0
406525	17194.3	427.525	0
406824	16733.9	246.246	0
407027	16339.6	447.164	0
407225	16722.5	195.364	0
407423	16610.5	187.243	0
407623	17233.2	161.83	0
407721	16855	119.981	0
407918	17574.5	26.9843	0
408220	17311.9	117.595	0
408424	17704.6	198.983	0
408522	16525.2	287.776	0
408923	16901	226.932	0
409124	17157.5	458.232	0
413309	16662.2	212.691	0
413811	16776.2	201.331	0
413909	16960.8	251.044	0
413919	17286.6	172.807	0
414008	17575.2	243.125	0
414108	17119.8	209.766	0
414118	16673.8	176.769	0
414506	15019.4	2365.64	1
415404	17811	136.409	0
415417	17534.2	225.782	0
415504	18438	143.442	1
415603	18630.6	181.258	1
415703	18419.5	208.941	0
416005	19286.8	146.205	0
416096	18543.3	199.709	0
416111	19502.2	249.466	0
416197	19969.7	195.88	0
416208	19364.3	234.89	0
416299	20051.5	298.451	0
416394	21571	367.506	0
416417	21827.3	405.102	0
416496	22344.7	366.124	0
416597	24147.3	381.8	0

5.1 Bibliographie et Références

- [1] Zwicky, F. "Nebulae as Gravitational Lenses." *Phys. Rev.* **51**, 290, 1937
- [2] Paczynski, B. "Gravitational Microlensing by the Galactic Halo", 1986, *ApJ*, 304, 1; *ApJ Letters*, 371, L63
- [3] Einstein, A. "Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field." *Science* 84, 506-507, 1936
- [4] Binney, J.J. & Tremaine, S. 1987, "Galactic Dynamics". *Princeton University Press*
- [5] Palanque-Delabrouille, N. " Search for planetary mass objects in the Galactic halo through microlensing". *Astron. Astrophys.* 329, P 522-537 (1998).
- [6] Lasserre T., Afonso C., Albert J.N., Andersen J., et al: "Not enough stellar mass Machos in the Galactic halo". *A&A Letters* 355, s. L39-L42. 2000.
- [7] Afonso C., Alard C., Albert J.N., Andersen J., et al. "Combined analysis of the binary lens caustic-crossing event Macho 98-SMC-1". *ApJ* 532, s. 340-352. 2000.
- [8] Mansoux, B. 1997. "Première analyse des données relatives aux bras spiraux de la voie lactée dans l'expérience EROS 2". Ph.D. thesis, Université Paris 7.
- [9] Derue, F. 1999. "Recherche d'événements de micro lentille gravitationnelle dans les bras spiraux de la galaxie avec EROS II". Ph.D. thesis, Université; Paris 11. Report LAL/CNRS.
- [10] Regnault, N. "Recherche de supernovae avec EROS II". Thèse de doctorat de l'Université Paris 7. LAL 00-65, Oct. 2000

Page web officiel du projet EROS avec les alertes actuelles:

www.lal.in2p3.fr/recherche/eros/erosf.html