

Les expériences à la recherche des axions

- Stratégies pour la recherche des axions
- Axions Solaires : CAST
- Expériences avec des faisceaux polarisés : PVLAS
- Perspectives

Esther Ferrer Ribas
DAPNIA/SEDI

Séminaire Commun SPhT-SAP-SPhN-SPP
30 mai 2006

Propriétés des axions

Pseudoscalaires neutres

Particules stables

Interagissant très peu avec la matière

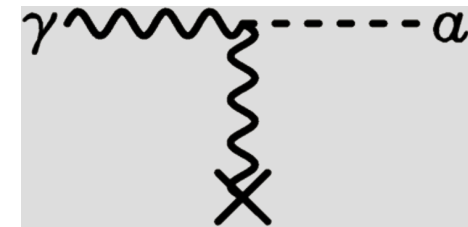
Masse: $m_a \simeq 0.6 \text{ eV} \frac{10^7 \text{ GeV}}{f_a}$ f_a échelle de
brisure de la symétrie

Couplage au photon: $L_{a\gamma\gamma} = g_{a\gamma\gamma} (\vec{E} \cdot \vec{B}) a$

Avec $g_{a\gamma\gamma} \simeq \frac{\alpha}{2\pi f_a} < 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$

Effet Primakoff

Conversion des photons
en axions (ou l'inverse)



Comment cherche-t-on les axions?

Selon leur origine...

Axions Galactiques

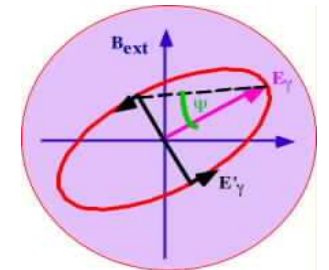


Haloscopes
(ADMX, CARRACK)

cavités microondes
+ champ magnétique

Axions de laboratoire

- Régénération "Light shining through wall"
- Polarisation (PVLAS)



laser + champ magnétique

Axions produits dans le soleil

- Helioscopes (CAST, TOKYO)
- Détecteurs cristallins (SOLAX, COSME, DAMA)

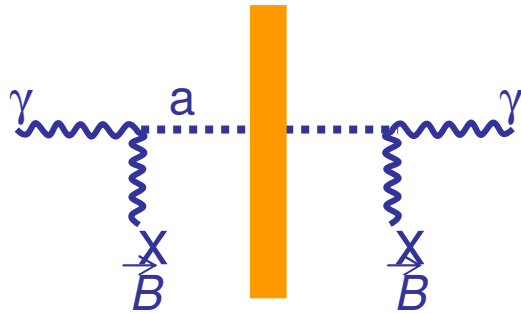


soleil + champ magnétique/électrique

Comment cherche-t-on les axions?

Axions de laboratoire

“Light shinning through wall”



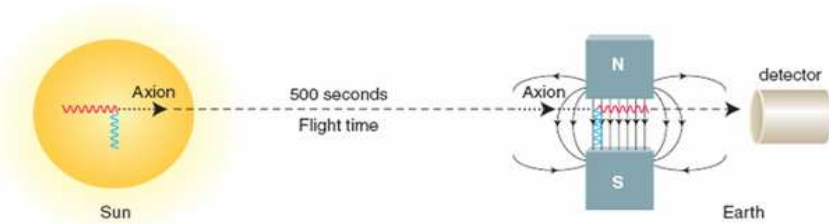
Polarisation (PVLAS)

Laser polarisé traverse un vide avec un champ magnétique intense

Mesure de l'état de polarisation de la lumière qui sort de la région où règne le vide

Axions produits dans le soleil

Hélioscopes (CAST, TOKYO)



Détecteurs cristallins (SOLAX, COSME, DAMA)

Primakoff + condition de Bragg

Détecteurs utilisés pour la recherche de WIMPS

Moins sensibles que les hélioscopes

L'historique

- Haloscopes & Hélioscopes [Sikivie, PRL 51 (83)]
- Polarisation [Maiani et al., PLB 175 (86)]
- Régénération [Van Bibber et al., PRL 59 (87)]
- Flux axions solaires [Van Bibber PRD 39 (89)]
- Axions solaires avec des cristaux [Paschos et Zioutas, PLB 323 (94)]

L'historique

1987 Rochester-Fermilab-Brookhaven/**cavités microondes** [PRL 64 (87)]

1990 Rochester experiment /**polarisation laser** [PRL 64 (90)]

1992 BNL/**photorégénération** [Z Phys 56 (92)]

Lazarus/**hélioscope** [PRL 69 (92)]

1994 PVLAS/**polarisation laser**

1997 CARRACK/**cavités microondes**

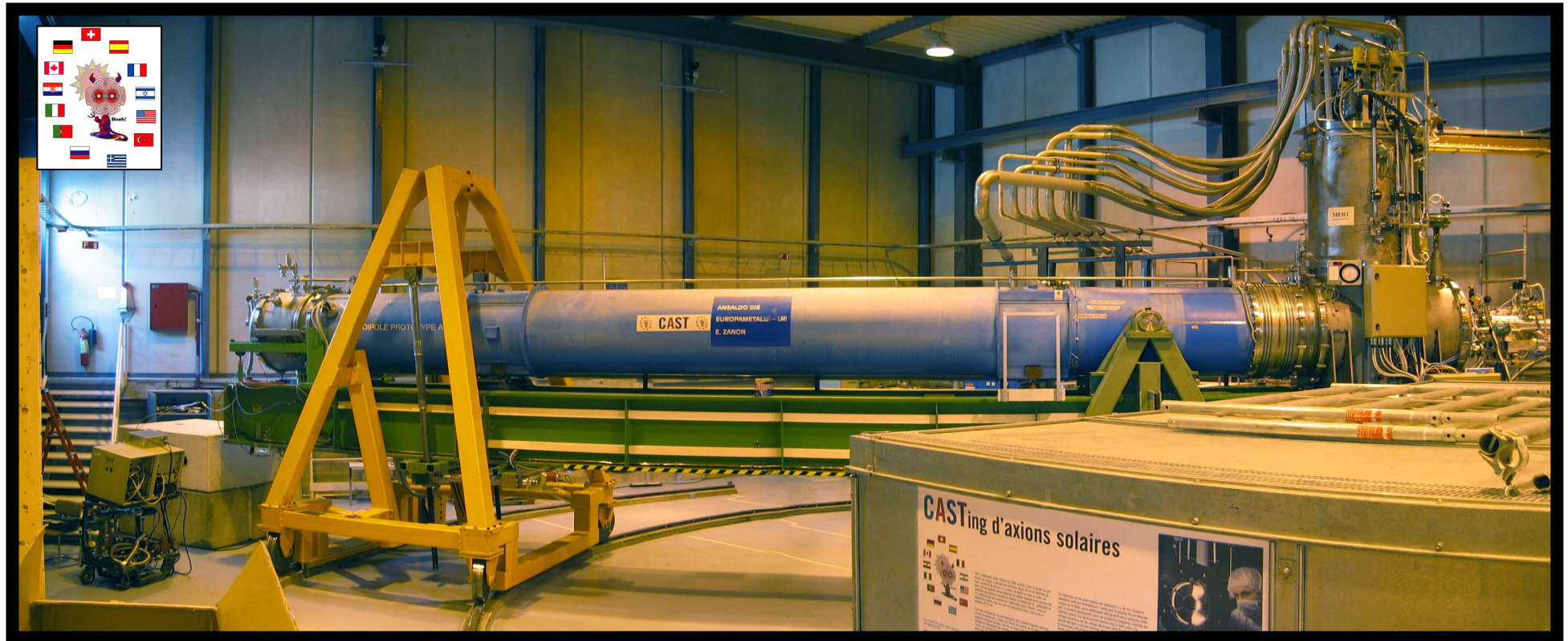
1998 ADMX/**cavités microondes**, SOLAX/germanium,
TOKYO/ **hélioscope**

2000 COSME/germanium

2003 CAST/**hélioscope**

2006 **ADMX**, **CAST**, **PVLAS**

CAST : CERN AXION SOLAR TELESCOPE



LHC dipôle : $L = 9.3 \text{ m}$, $B = 9 \text{ T}$

Plateforme tournante : mouvement vertical 16°
mouvement horizontal de 100°

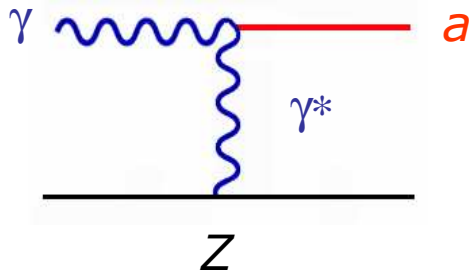
« Tracking » du soleil $\sim 3 \text{ h/jour}$, reste du temps bruit de fond

Trois détecteurs de rayons X

Signal:
excès de rayons X
lorsque l'on pointe vers
le soleil

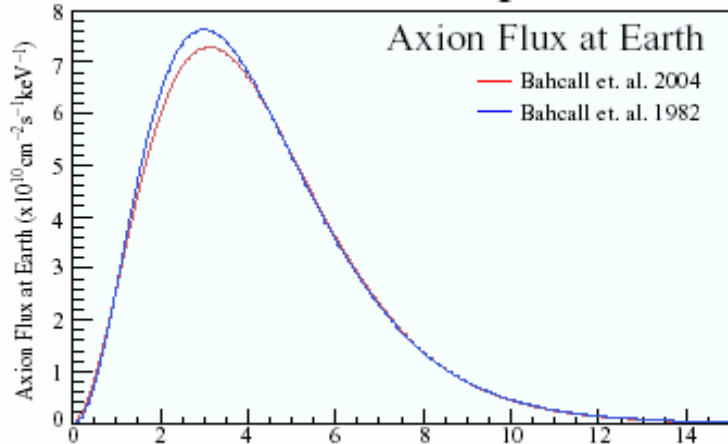
Production et détection

Production dans le soleil



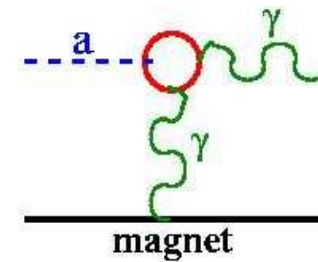
Interaction photon-nucléon dans le centre du soleil à travers l'effet **Primakoff**

Differential Axion Spectrum



$$\Phi_a \approx 3.67 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \left(\frac{g_{a\gamma\gamma}}{10^{-10} \text{ GeV}^{-1}} \right)^2$$

Principe de détection



Probabilité de conversion :

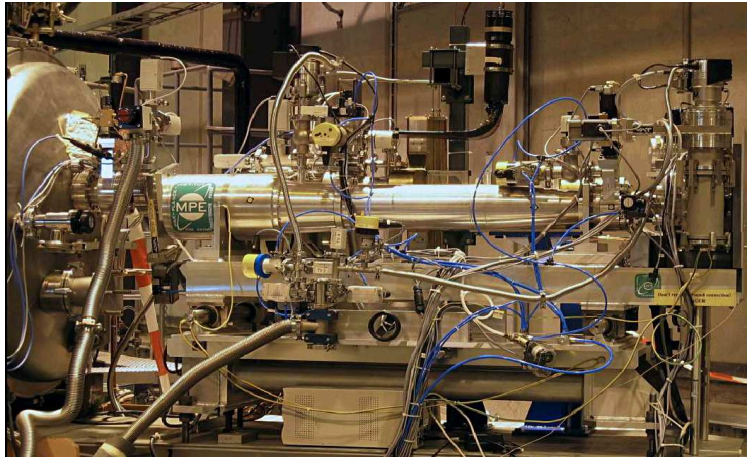
$$P_{a \rightarrow \gamma} = 1.7 \times 10^{-17} \left(\frac{B \cdot L}{9.0 \text{ T} \cdot 9.3 \text{ m}} \right)^2 \left(\frac{g_{a\gamma\gamma}}{10^{-10} \text{ GeV}^{-1}} \right)^2$$

Nombre de photons attendus :

$$N_\gamma = \Phi_a \cdot A \cdot P_{a \rightarrow \gamma}$$

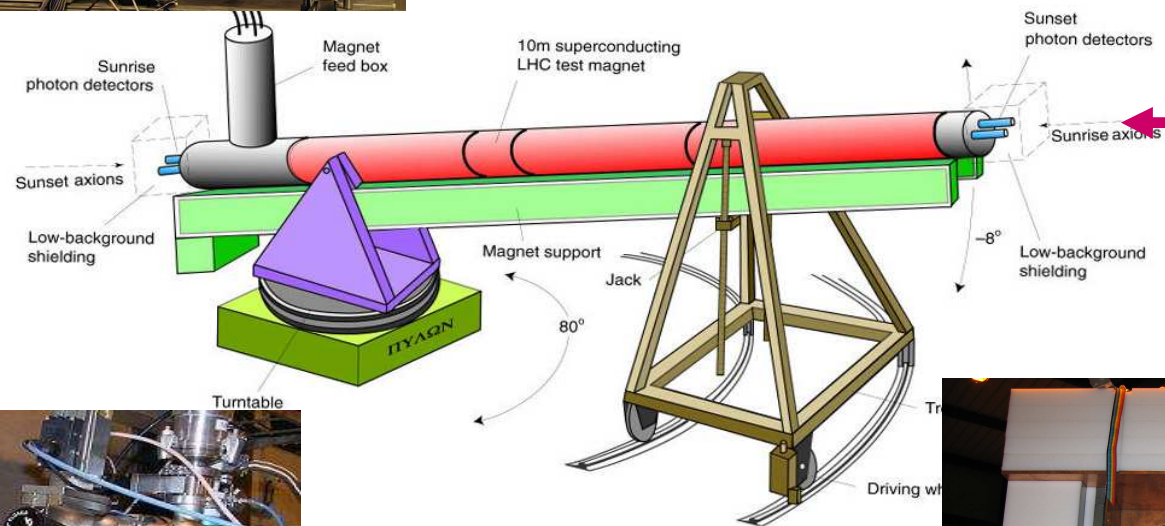
≈ 7 evts/jour avec $g_{a\gamma\gamma} = 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$ et $A = 14 \text{ cm}^2$

DETECTEURS A RAYONS X

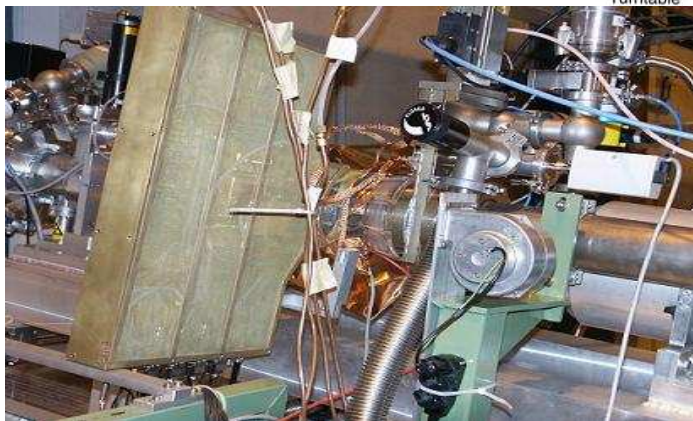


CCD + Télescope (Munich, Darmstadt)

Télescope → sensibilité augmenté



TPC
(Zaragoza)



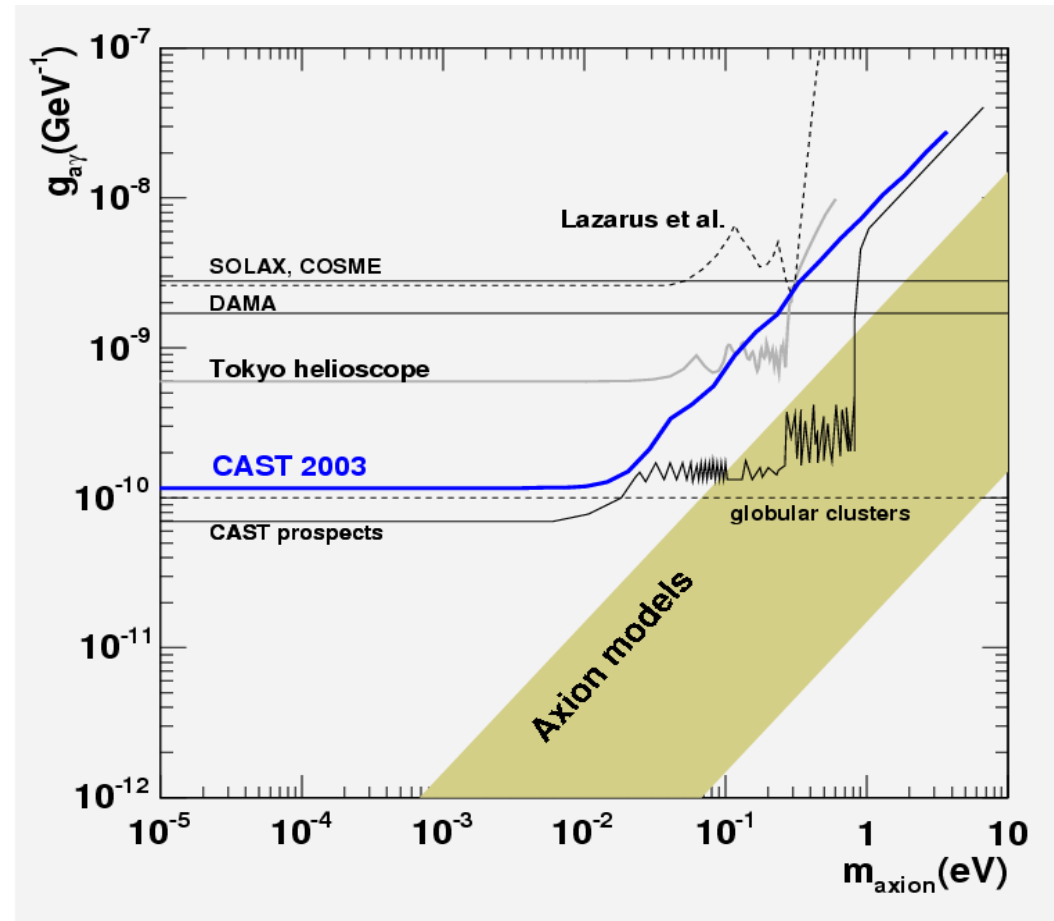
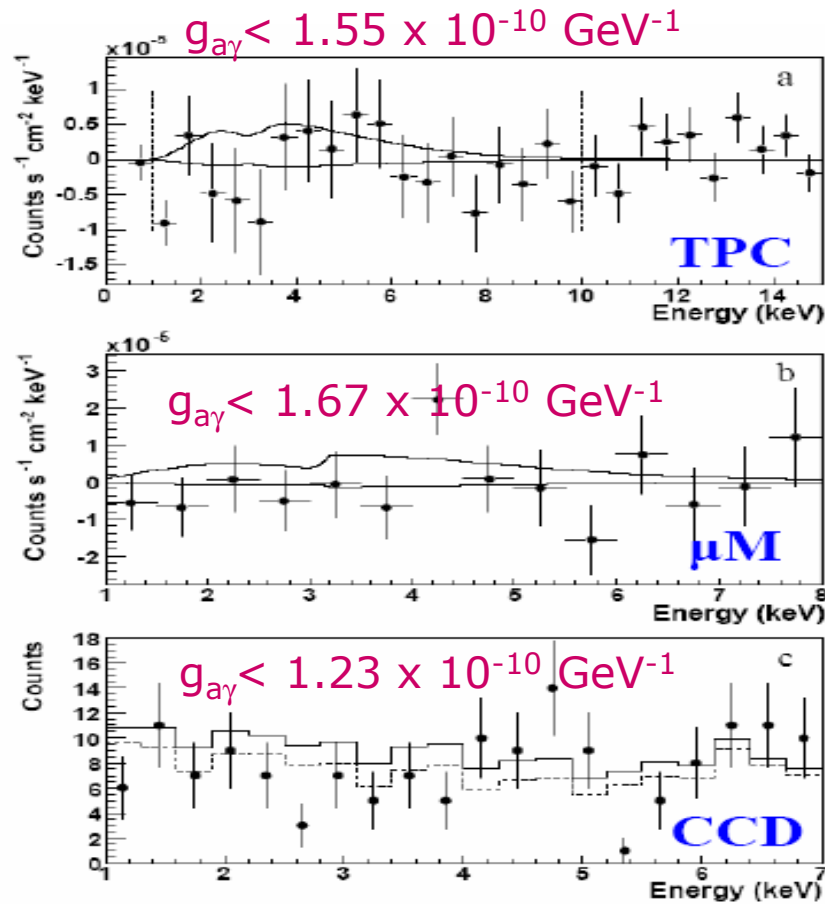
Micromegas
(DAPNIA, Athènes)



CALENDRIER

- Fin 2002 : « commissioning » aimant+ détecteurs
 - 2003 : Prise des données 6 mois
Résultats publiés : PRL 94 (2005) 121301
 - 2004 : Prise des données 6 mois
Améliorations aimant, système de tracking et détecteurs
Résultats préliminaires conf. Hiver
 - 2005 : « upgrade » de l'aimant pour la 2^{eme} phase de l'expérience
Premier run 2^{eme} phase Novembre-Décembre
 - 2006 : Prise des données PHASE II
 - 2007 : Prise des données PHASE II
- PHASE I
- PHASE II

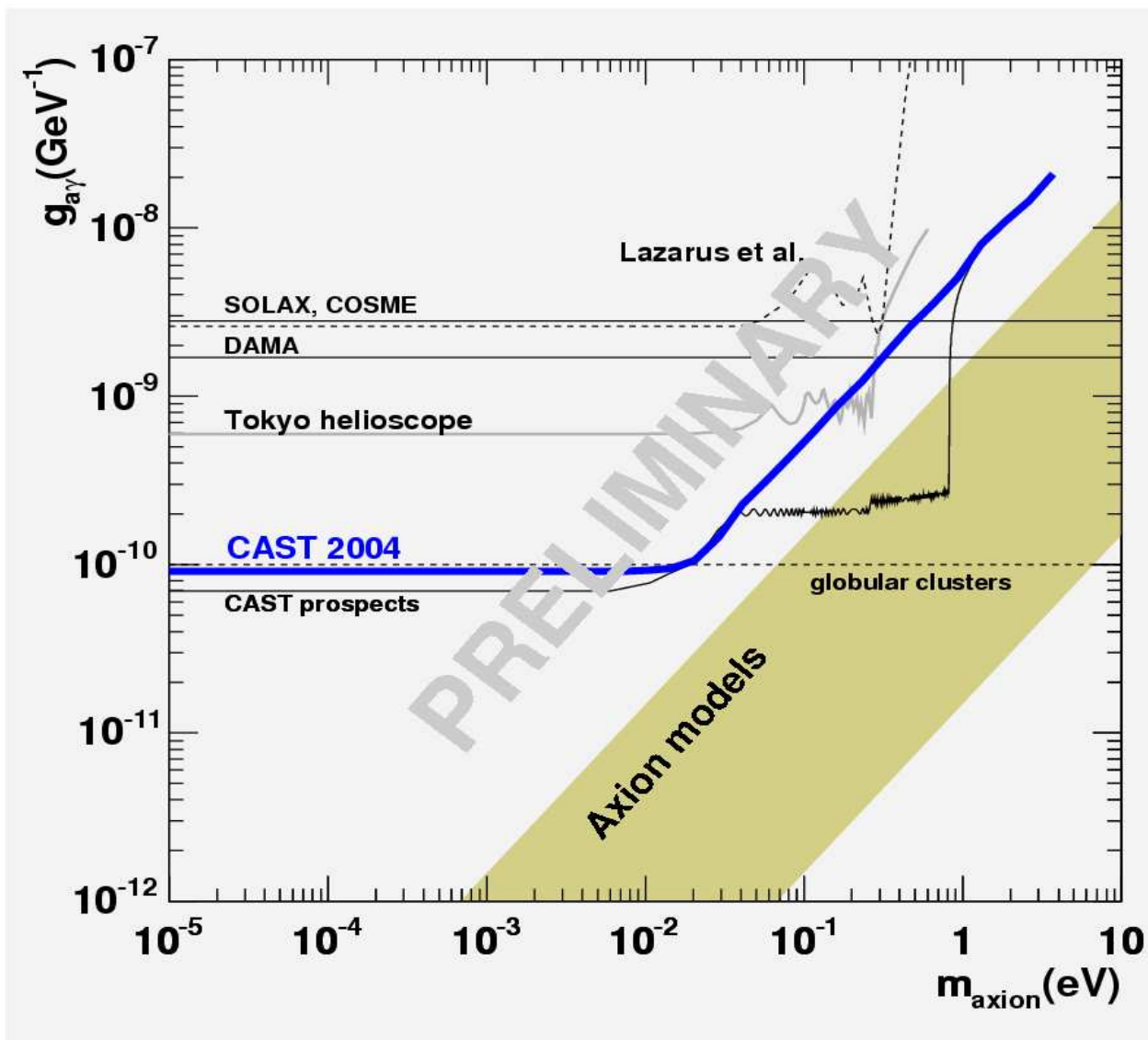
RESULTATS 2003 PUBLIES



Pas d'excès
 Zioutas et al., PRL 94 (2005) 121301

Limite combiné à 95 % CL:
 $g_{a\gamma} < 1.16 \times 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$

RESULTATS 2004 PRELIMINAIRES



$g_{a\gamma} < 9 \times 10^{-11} \text{ GeV}^{-1}$
pour $m_a < 0.02 \text{ eV}$

Première fois que l'on dépasse la limite venant des clusters globulaires

Cohérence

Dans le vide :

$$P_{a \rightarrow \gamma} = 1.74 \times 10^{-17} \left(\frac{B \cdot L}{9.0 \Gamma \cdot 9.26 \text{ m}} \right)^2 \left(\frac{g_{a\gamma}}{10^{-10} \text{ GeV}^{-1}} \right)^2 \cdot |M|^2$$

$$|\vec{q}| = \left| \frac{m_a^2}{2E_a} \right| \quad |M|^2 = \frac{2(1 - \cos(qL))}{(qL)^2} \quad qL \ll 1 \implies |M|^2 = 1$$

Pour $m_a > 10^{-2} \text{ eV}/c^2$ la cohérence est perdue

Dans un gaz :

$$P_{a \rightarrow \gamma} = \left(\frac{B g_{a\gamma}}{2} \right)^2 \frac{1}{q^2 + \Gamma^2/4} [1 + e^{-\Gamma L} - 2e^{-\Gamma L/2} \cos(qL)]$$

$$|\vec{q}| = \left| \frac{m_a^2 - m_\gamma^2}{2E} \right|$$

Coefficient d'absorption : Γ

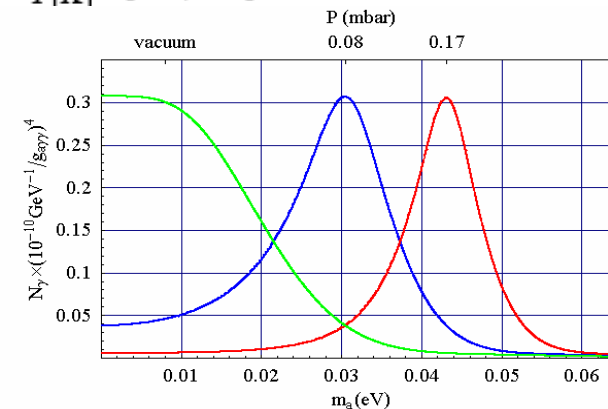
Condition de cohérence : $qL < \pi$

En remplissant l'aimant avec un gaz
le photon acquiert une masse

$$m_{\gamma, \text{eff}} \approx \sqrt{0.02 \frac{P[\text{mbar}]}{T[\text{K}]}} [\text{eV}/c^2]$$

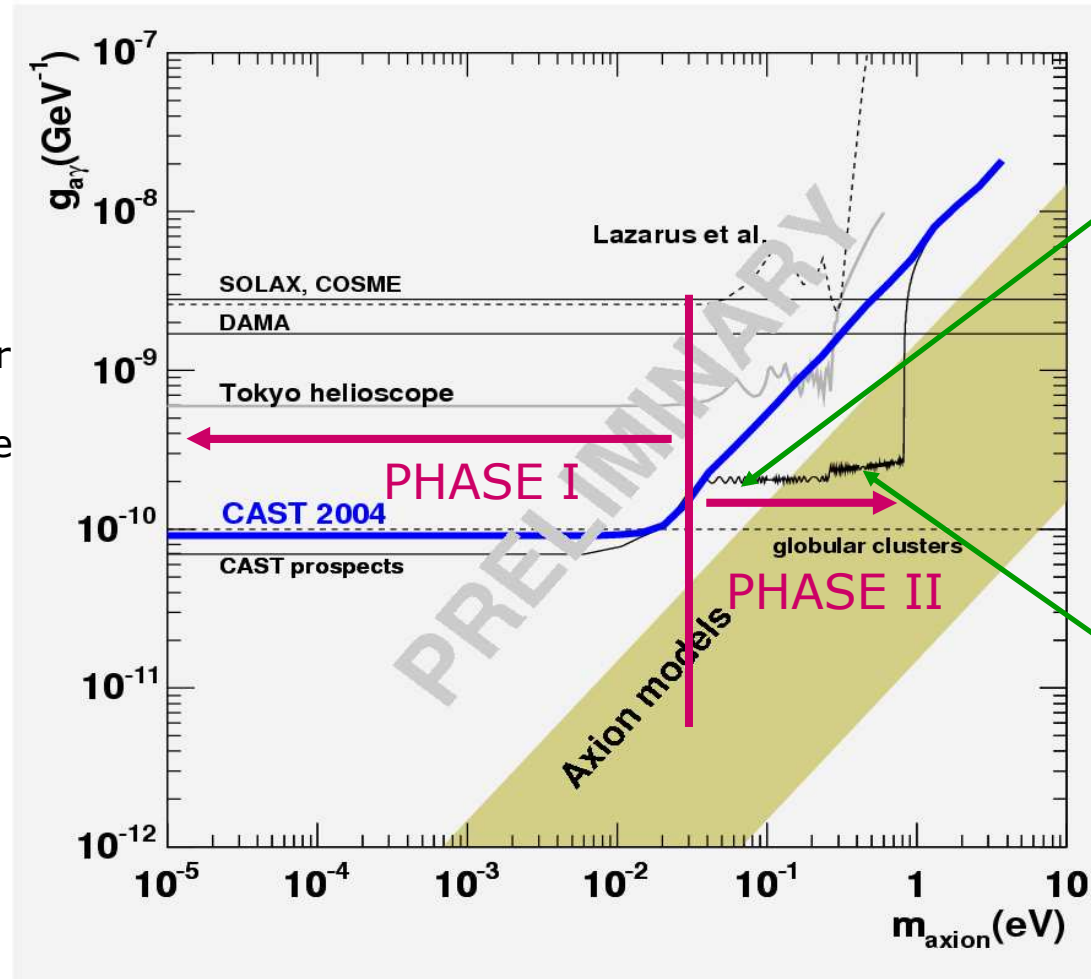
Condition de cohérence est récupérée
pour un intervalle de masse autour de m_γ

Les masses sont ajustées en changeant la
pression du gaz



CAST PHASE II

Extension de la sensibilité pour grand m_a en remplissant les tubes de l'aimant par un gaz (He^4 , He^3) pour récupérer la cohérence



He^4 à $T = 1.8 \text{ K}$,
 $p < 6 \text{ mbar}$
 $0.02 < m_a < 0.26 \text{ eV}$
 ≈ 70 positions de pression

He^3 à $T = 1.8 \text{ K}$, $p < 60 \text{ mbar}$
 $m_a < 0.8 \text{ eV}$
 ≈ 590 positions de pression

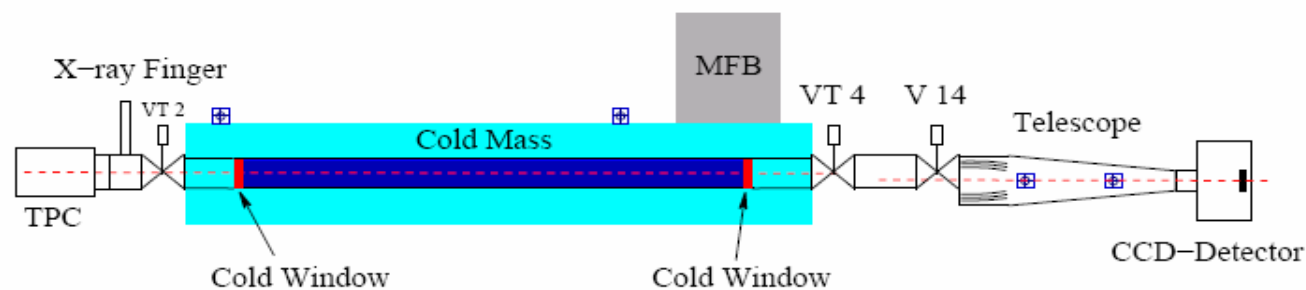
PHASE I : sensibilité jusqu'à $m_a = 0.02 \text{ eV}$

PHASE II : sensibilité de $m_a = 0.02\text{-}0.8 \text{ eV}$

CAST PHASE II

L'aimant a du subir des modifications pour pouvoir fonctionner avec de l' He^4 et He^3 :

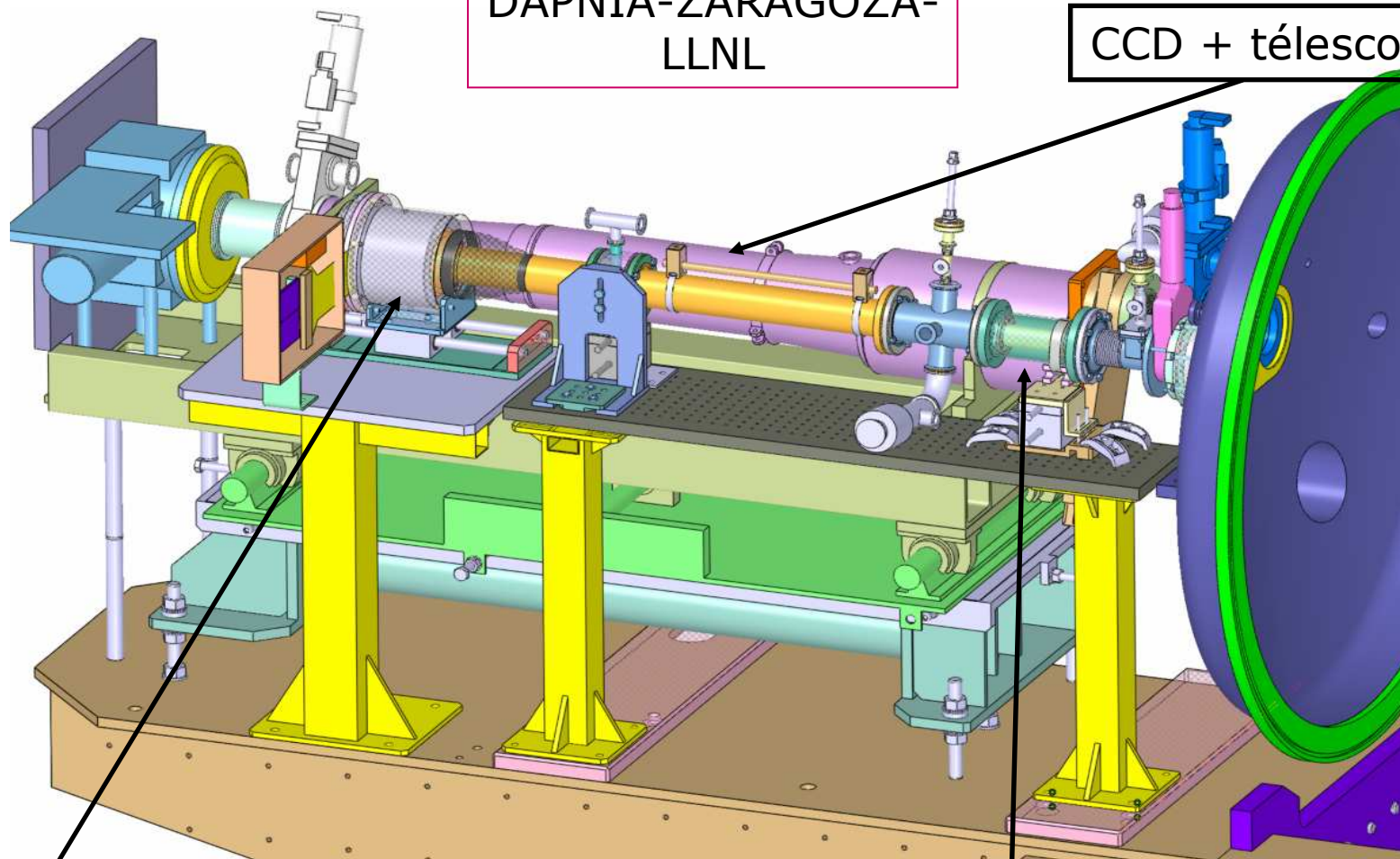
- Système pour contrôler la température et le gaz dans le tube de l'aimant
- Implementation de fenestres froides pour isoler le gaz de l'extérieur et minimiser les fuites thermiques
- Système de gaz pour stocker l' He^4 et He^3



NOUVELLE LIGNE MICROMEGLAS

DAPNIA-ZARAGOZA-
LLNL

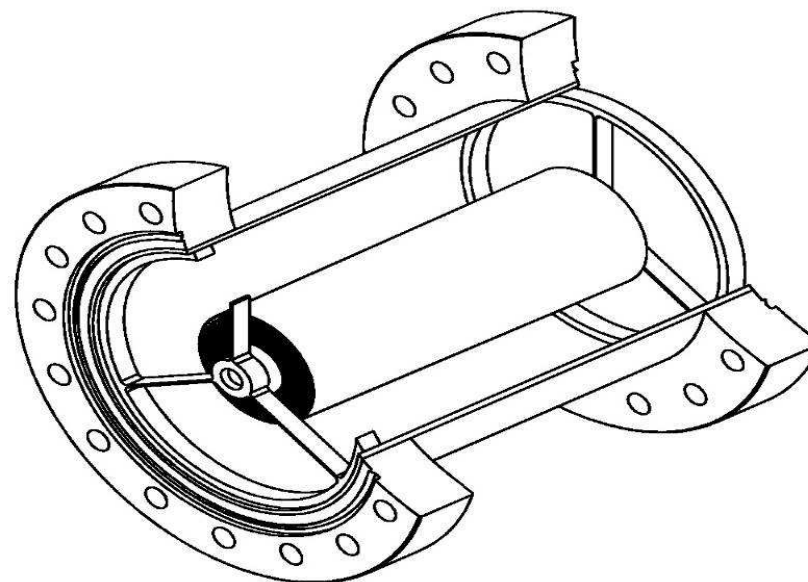
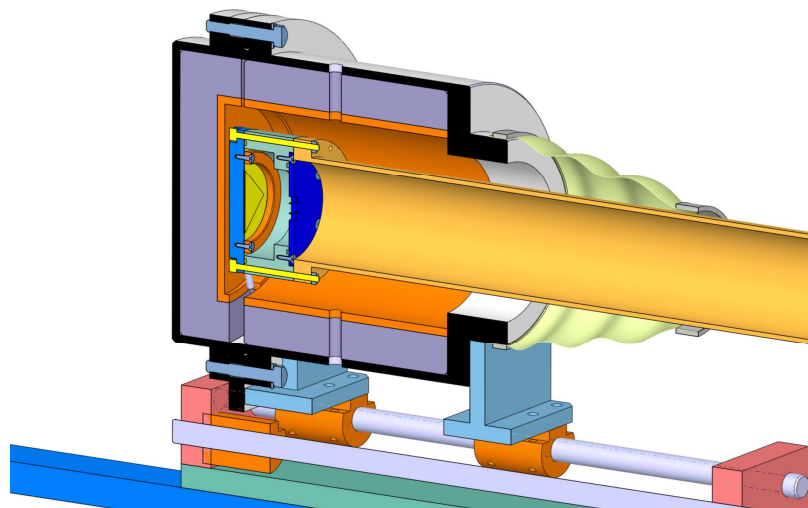
CCD + télescope



Nouveau détecteur avec
blindage

Collimateur de rayons X

Blindage et collimateur



Le blindage est composé de
5 mm Cu + 25 mm Pb + 1 mm Cd entouré de
blocks de polyéthylène dans un flux de N_2

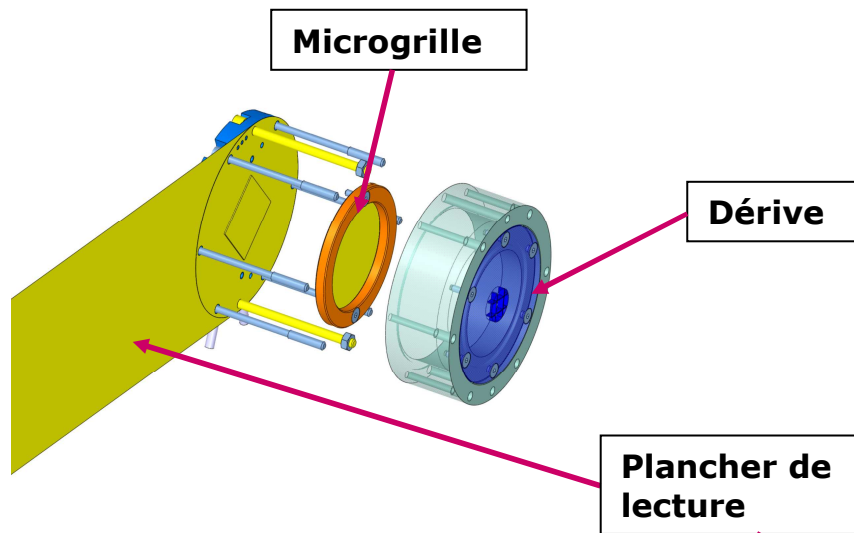
A partir de l'expérience de la TPC, on peut
s'attendre à une réduction de bruit de fond
d'environ un facteur 4.

- Distance focal 1.3 m
- 14 coquilles polycarbonées recouvertes
d'Iridium
- Un spot de 2 mm avec une efficacité de 36%

15 cm² ~1.6 mm²

facteur ~100 en bruit de fond

Nouveau détecteur



Nouveau gaz (Xe au lieu d'Ar) :
amélioration de l'efficacité de conversion
des photons dans le gaz

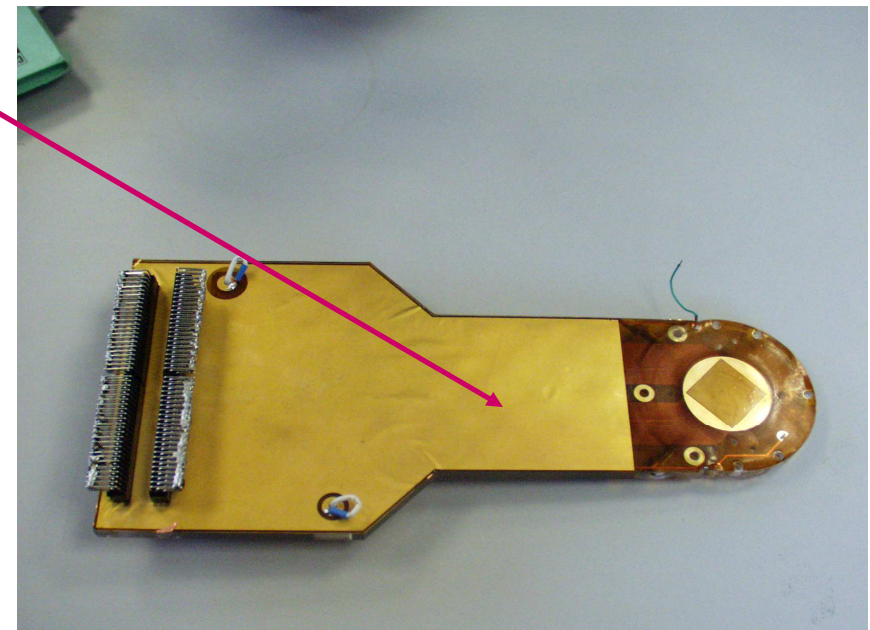
⇒ Efficacité ~90% (73%)

⇒ Mode semi-scellé

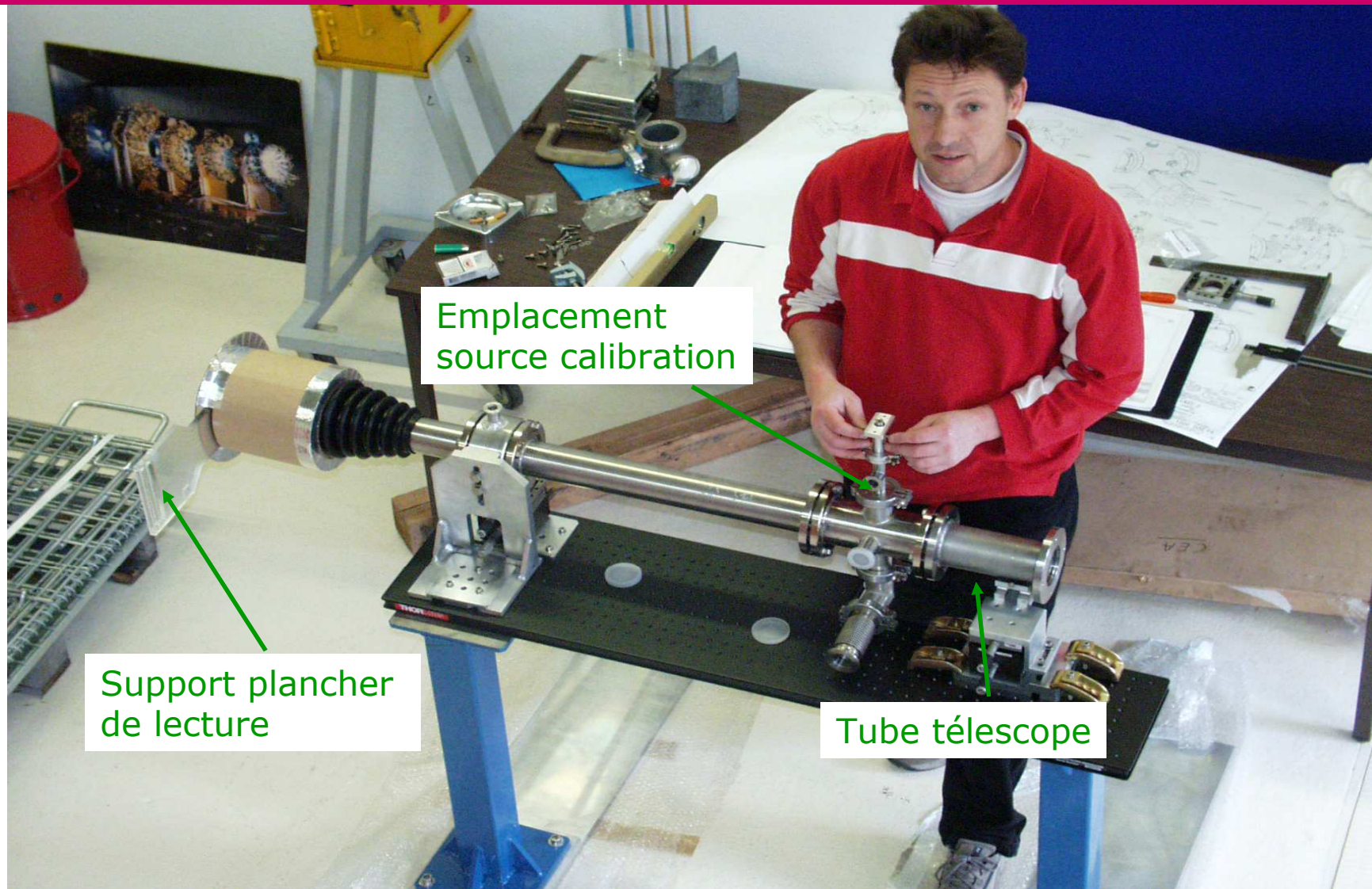
Tests ont commencé :

- Gaz
- Stabilité
- Gain
- Mode semi-scellé

Amélioration de la résolution en énergie
(~12 % FWHM à 5.9 keV au lieu de 19 %)



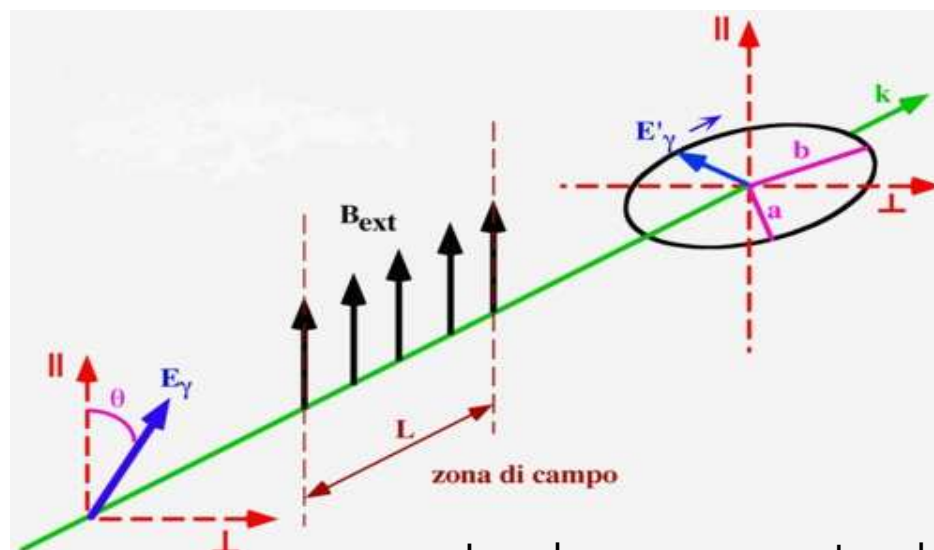
Montage à blanc de la ligne



Caractérisation de l'ensemble (détecteur + collimateur) : Septembre
Prise des données avant la fin de l'année

PVLAS : Polarizzazione del Vuoto con LASer

- Faisceau laser polarisé traversant un champ magnétique de 5 T.
- But : mesurer les modifications de polarisation de la lumière.
- QED prédit une interaction entre les photons et le champ B –ellipticité.
- Ellipticité due à la biréfringence du vide (changement d'index de réfraction pour différents vecteurs de polarisation) qui dépend de B^2 et du chemin optique

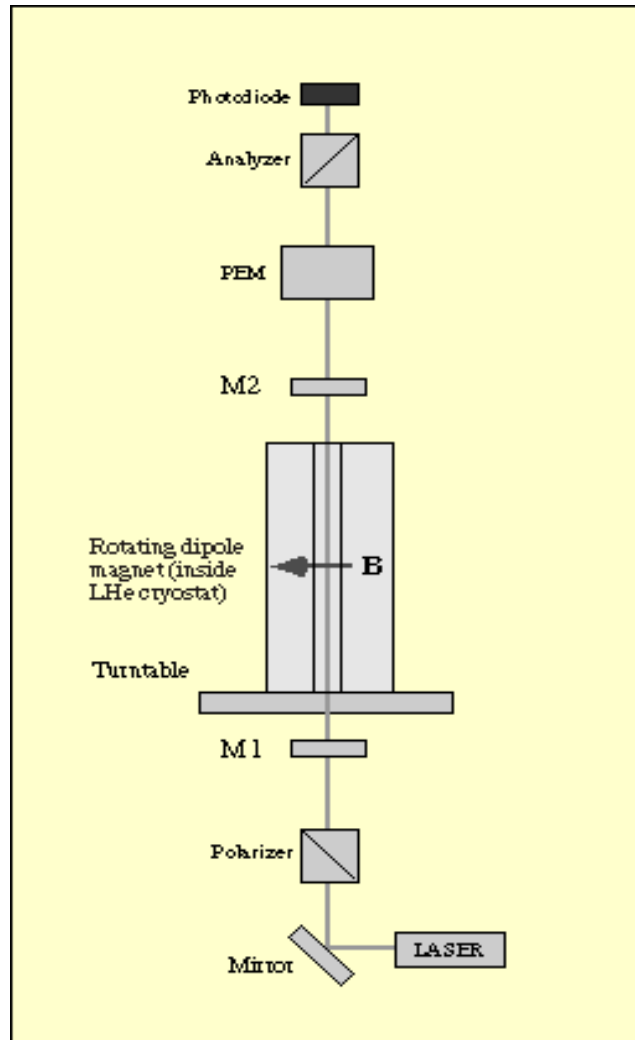


Les deux composantes du vecteur de polarisation vont se propager à des vitesses différentes et seront pas en phase.

Polarisation change de linéaire à elliptique

Polarisation
linéaire à 45° wrt champ

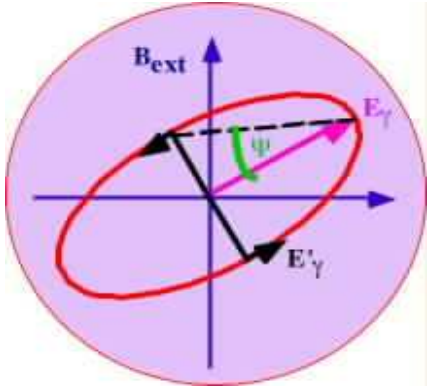
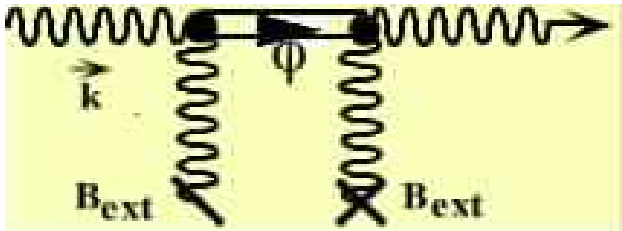
Expérience PVLAS



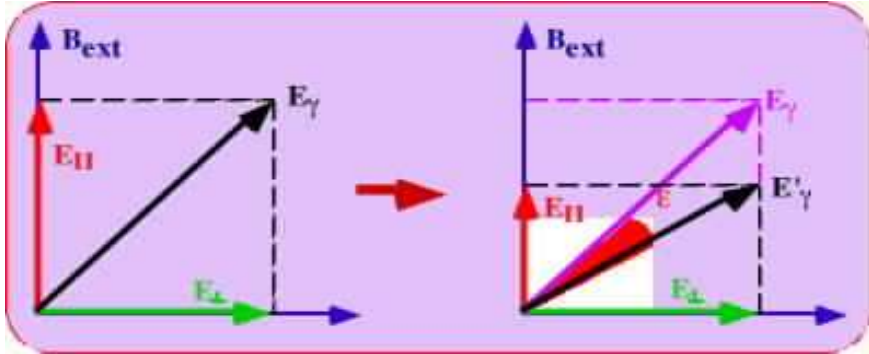
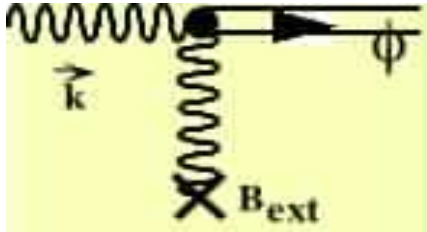
- Dipôle supraconducteur 1 m long tournant à une fréquence de 0.33 Hz
- $B = 6.5 \text{ T}$
- Résonateur Fabry-Perot avec deux miroirs M1, M2 (chemin optique $\sim 60 \text{ km}$)
- Laser Nd:YAG IR $\lambda = 1064 \text{ nm}$
- PEM: « Photo Elastic Modulator » pour mesurer des ellipticités très petites

PVLAS : effets mesurés

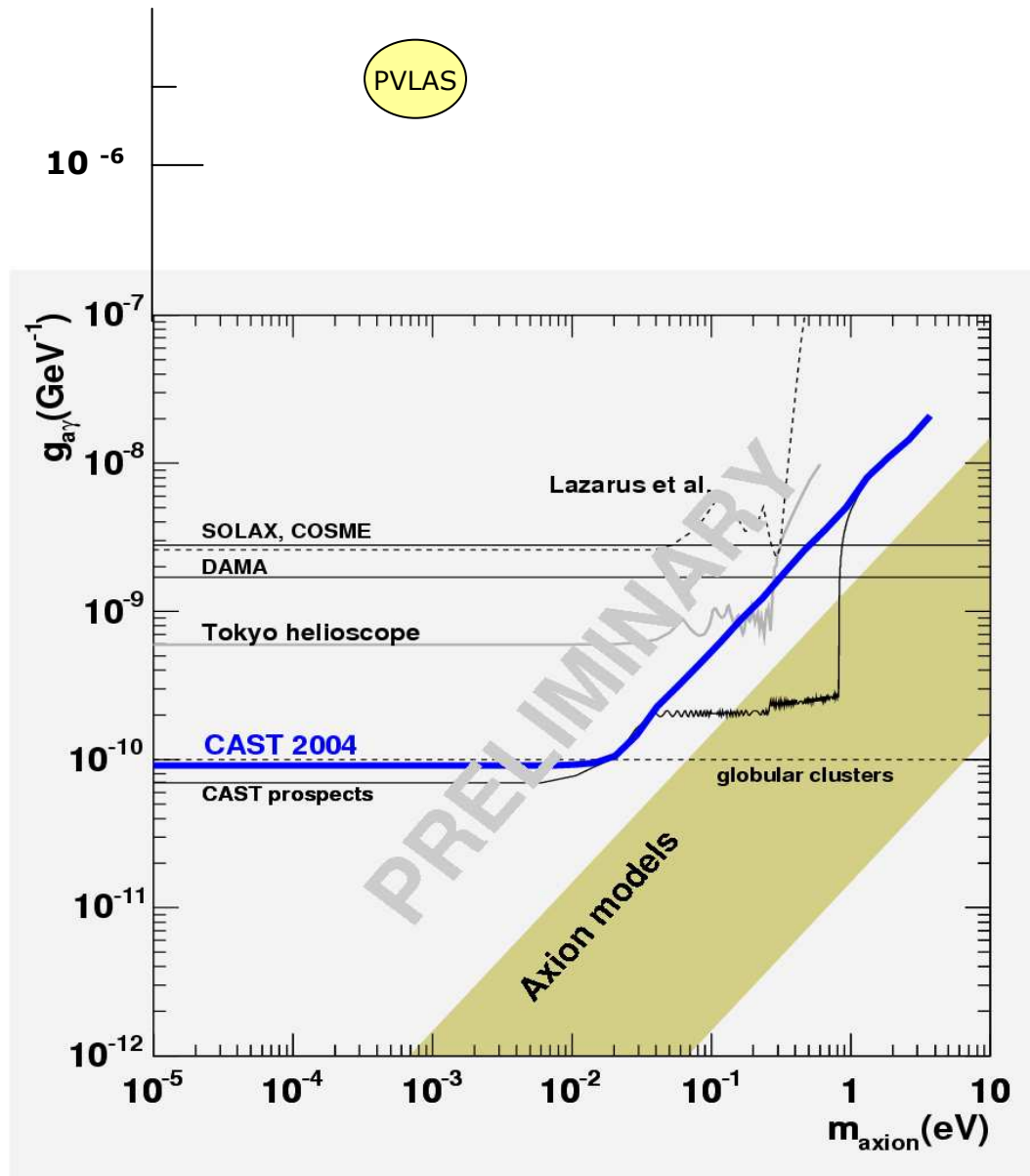
Production et désintégration d'une particule virtuelle : **changement d'ellipticité**



Production réelle d'une particule : **rotation du plan de polarisation (dichroïsme)**



PVLAS Résultats/Interprétation



- Ellipticité mesuré $\Psi = 5 \times 10^{-7}$
- Ellipticité prédit par QED $\Psi = 5 \times 10^{-11}$
- Mesure de dichroïsme (pas prédit par QED)
- Erreurs systématiques
- Production des nouvelles particules?

Pas compatible avec les précédents résultats expérimentaux

$$m_a \sim 1 \text{ meV}$$

$$g_{a\gamma} \sim 3 \times 10^{-6} \text{ GeV}^{-1}$$

[Zavattinni et al., PRL 96 (06)]

Le futur

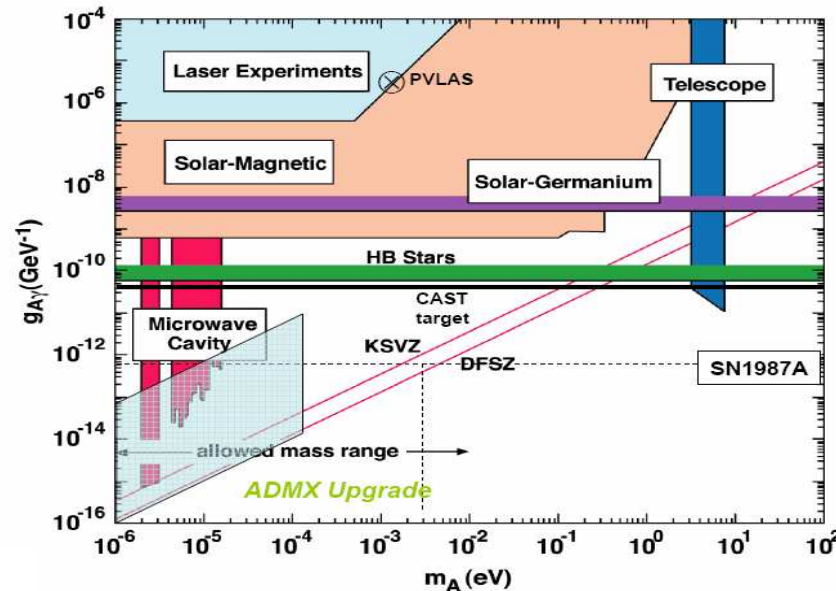
- **BMV project: Biréfringence Magnétique du Vide project (Toulouse, Lyon)**
- $B^2L = 30 \text{ T}^2\text{m}$
- Données fin 2006

- **Pugnat et al. : CERN**
- Expériences de laboratoire avec des aimants LHC (2007) Polarisation et régénération de photons. Premiers résultats 2008

- **Ringwald et al.: DESY**
- Large scale Axion Photonregeneration Experiment
- Dipôles de HERA
- Fin : 2006 Etude de faisabilité avec 2 dipôles HERA $B=5 \text{ T}$ et $L=5 \text{ m}$ (Test du résultat PVLAS)
- « Large scale » 400 dipôles après le decommissioning de HERA en 2007

Conclusions

- Une grande variété d'expériences avec des techniques expérimentales très différentes



L. Rosenberg présentation à
SNIC 2006

- Une communauté active : AXION Academic training
Décembre 2005 au CERN : <http://cast.mppmu.mpg.de/axion-training-2005/axion-training.php>
Mai 2006 a Patras (Grèce)
- Toutes les différentes stratégies ont besoin d'un champ magnétique intense dans un volume le plus grand possible