



i r f u

cea

saclay

# De SOPHI à Gbar, ou la gestation d'une expérience d'anti-gravité

# De SOPHI à Gbar, ou la gestation d'une expérience d'anti- gravité

**Ou comment répondre à la question:  
combien pèse l'antimatière?**

*Pourquoi peser l'antimatière ?*

*Comment ?*

*SOPHI, solution d'avenir*

*La traque des positons*

*Autres phases de R&D associées*

*L'après SOPHI à Saclay*

*De Saclay au CERN: ELENA*

# Pourquoi peser l'anti-matière ?

irfu



saclay

Cela n'a jamais été fait !

➤ La masse inertielle de l'antiproton a été mesurée à une grande précision, mais pas la masse gravitationnelle.

(M. Fischler, J. Lykken and T. Roberts, *Direct observation limits on antimatter gravitation*, arXiv:0808.3929 [hep-th] (2008).)

➤ Si Einstein a raison, les deux sont identiques

➤ Si CPT est vrai,  $M \Leftrightarrow M = \bar{M} \Leftrightarrow \bar{M}$

Mais  $M \Leftrightarrow \bar{M}$  ?

➤ Et... il existe des théories « exotiques » introduisant une asymétrie. (Chardin et Benoit-Lévy: cosmologie d'un univers de Milne-Dirac)

Si cela n'a pas encore été fait, c'est que ce n'est pas facile...

# Comment ?

Il suffit de prendre de l'antimatière et de la laisser tomber...

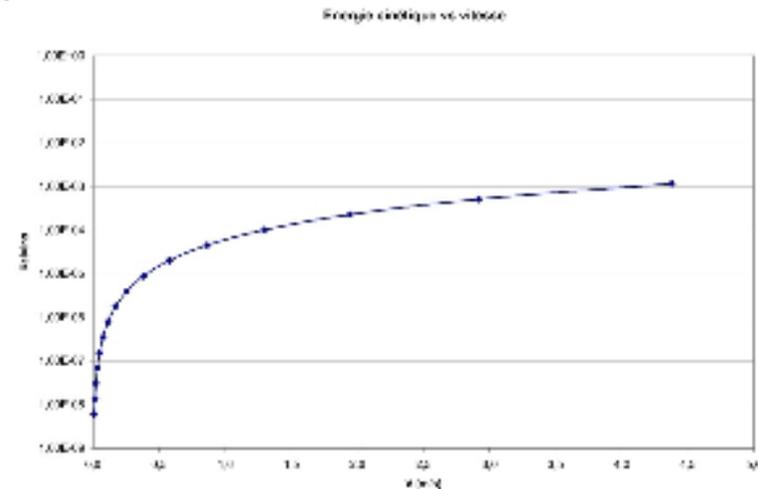
Mais il faut qu'elle soit neutre et au repos

- Neutre: antihydrogène ou antineutron (qu'on ne peut ralentir)
- Au repos: pas facile: le refroidissement par laser atteint au mieux les millikelvins

Il faut une vitesse de quelques cm/s : des microkelvins.

- Une solution: refroidissement électromagnétique d'un ion.

**C'est possible avec des ions  $\bar{H}^+$**



# Mesurer $\bar{g}$ avec des ions $\bar{H}^+$

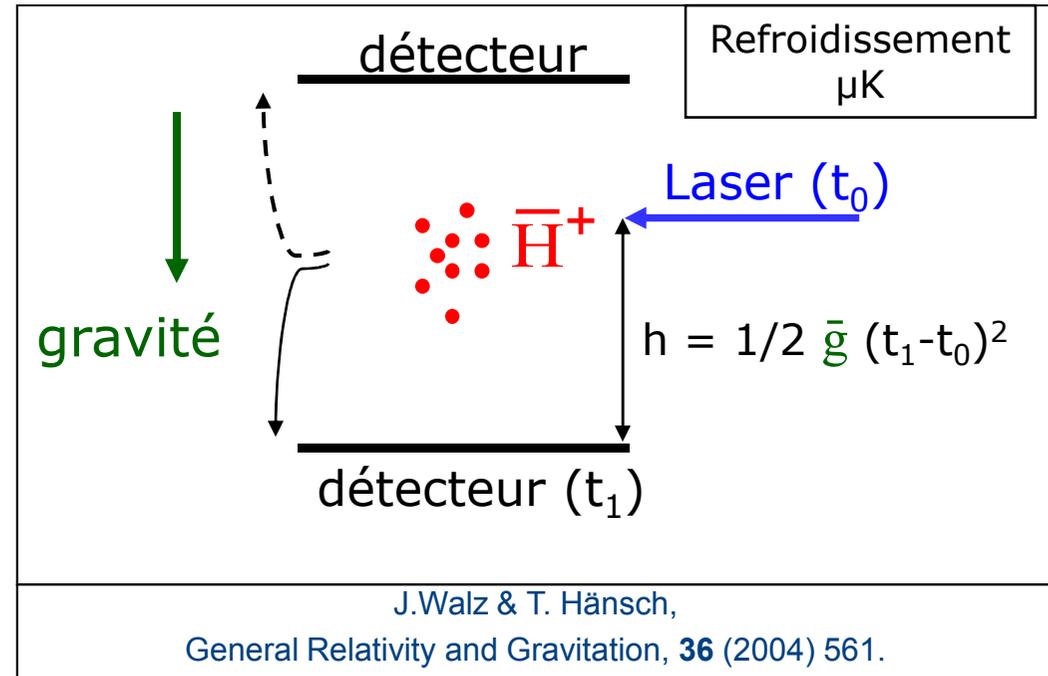
irfu



saclay

## Le principe:

- produire des ions  $\bar{H}^+$ ,
- les capturer dans un piège,
- les refroidir à 20  $\mu\text{K}$ ,
- enlever le positon excédentaire avec une impulsion laser,
- mesurer le temps de vol de l'antihydrogène neutre



## Précision attendue de la mesure:

Nombre d'ions $\bar{H}^+$ dans le piège	$\Delta g/g$
$5 \cdot 10^5$	0.001
$10^4$	0.006
$10^3$	0.02

$$h = 10 \text{ cm} \rightarrow \Delta t = 143 \text{ ms}$$

$$h = 1 \text{ mm} \rightarrow \Delta t = 14 \text{ ms}$$

(si  $\bar{g} = g \dots$ )

**Comment faire des ions  $\bar{H}^+$  ?**

# Produire des ions $\bar{H}^+$

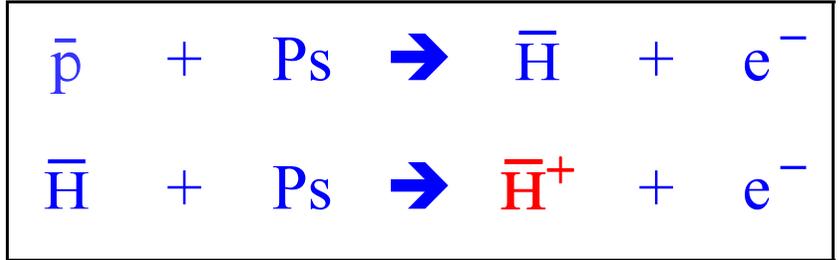
irfu



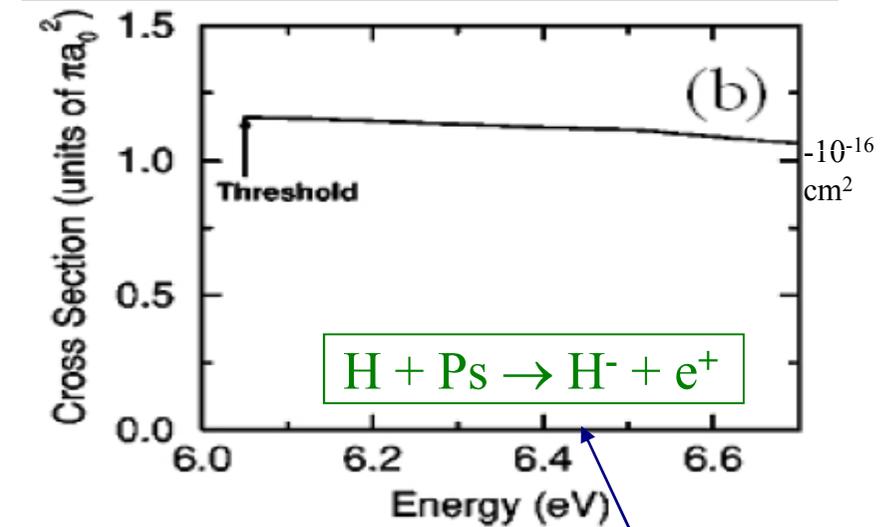
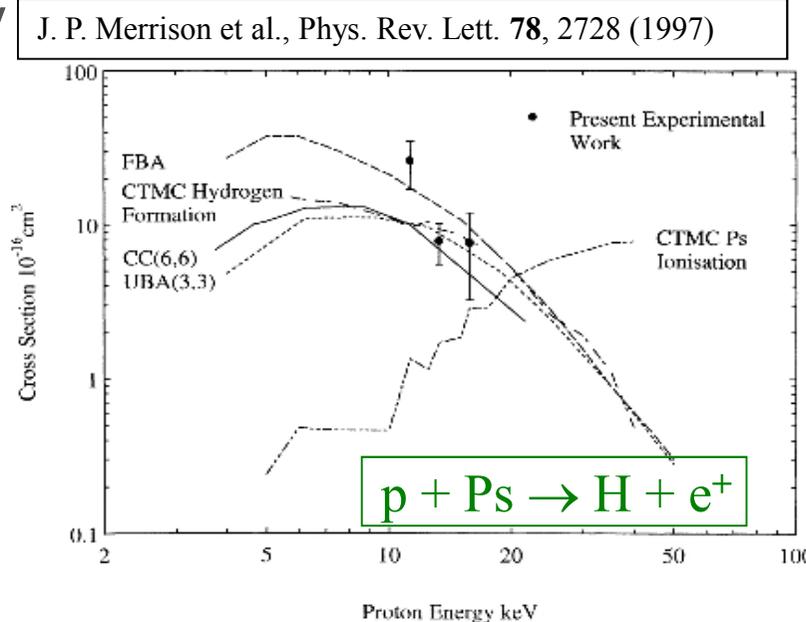
saclay

- **Pour produire des ions  $H^+$** , on fait interagir des antiprotons avec un nuage de positronium; Les sections efficaces le permettent...

*P. Pérez and A. Rosowsky, Nucl. Inst. Meth. A 545 (2005) 20-30.*



H.R.J. Walters and C. Starett, Phys. Stat. Sol. C, 1-8 (2007)



$E_H = 6 \text{ keV in Ps frame}$

Mais le rendement est faible:

$10^7 \bar{p}$  (12 AD shots) sur  $10^{12} \text{ Ps/cm}^2$  donnent  $10^4 \bar{H}$  et un  $\bar{H}^+$   
(Si le Ps est excité,  $\sigma$  augmente:  $n=3 \rightarrow 80 \bar{H}^+$ )

**Comment faire beaucoup de Ps ?**

# Produire du positronium

irfu

cea

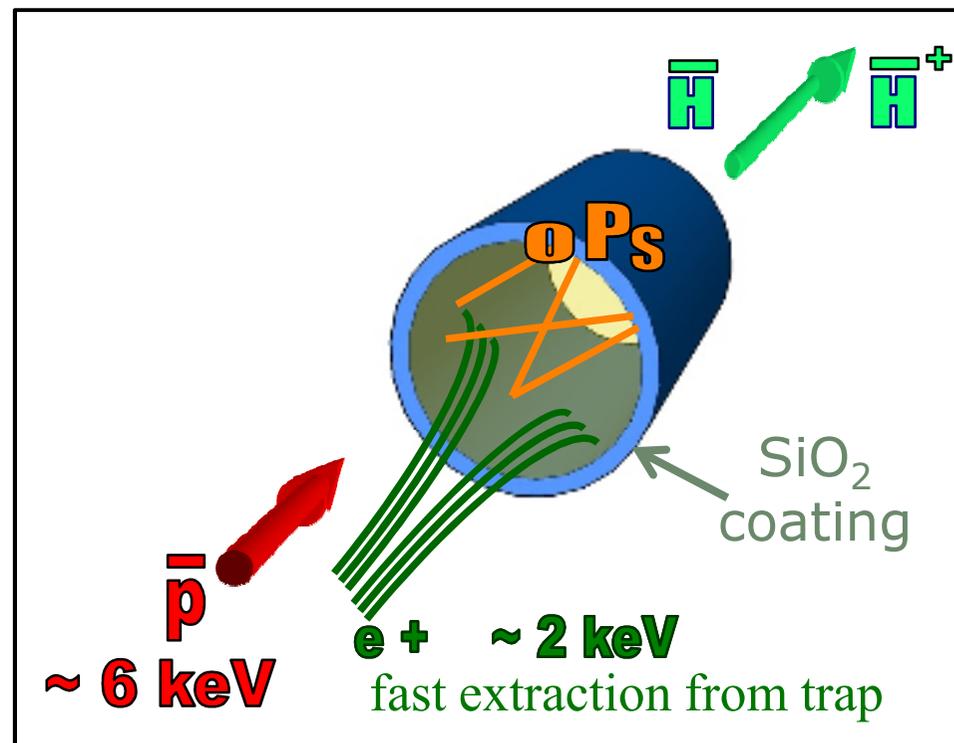
saclay

- **Le positronium est produit en envoyant des positons sur un substrat mésoporeux de SiO<sub>2</sub>**

- Cela permet de produire beaucoup d'orthopositronium, le seul utilisable ( $t=142\text{ns}$ , contre  $0,125\text{ ns}$  pour le para-Ps)

- Pour produire un nuage de  $10^{12}\text{ Ps/cm}^2$ , il faut envoyer  $10^{11}$  positons lents sur une surface de  $1\text{mm}^2$ , pendant un temps inférieur à la durée de vie du Ps

- Il faut ensuite exciter les Ps



$10^{11}\text{ e}^+$ , cela fait beaucoup

Les sources standard : max  $10^7\text{ e}^+/\text{sec}$

**Comment obtenir beaucoup de positons ?**

# Produire des positons

- Pour produire une telle quantité de positons, on a recours à un accélérateur linéaire d'électrons de haute intensité, suivi d'un modérateur

irfu



saclay

## Petits linacs

10 MeV/0.15 mA

$\langle E_{e^+} \rangle \sim 1.1 \text{ MeV}, 8 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$

5.5 MeV/0.15 mA

$\langle E_{e^+} \rangle \sim 0.8 \text{ MeV}, 2 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$

Taux de positons rapides ( $\text{s}^{-1}$ )	Efficacité de modération	Type de modérateur
$10^{12}$	$10^{-4}$	W
$10^{11}$	$10^{-3}$	Ar/Kr
$3 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{-3}$	Ne

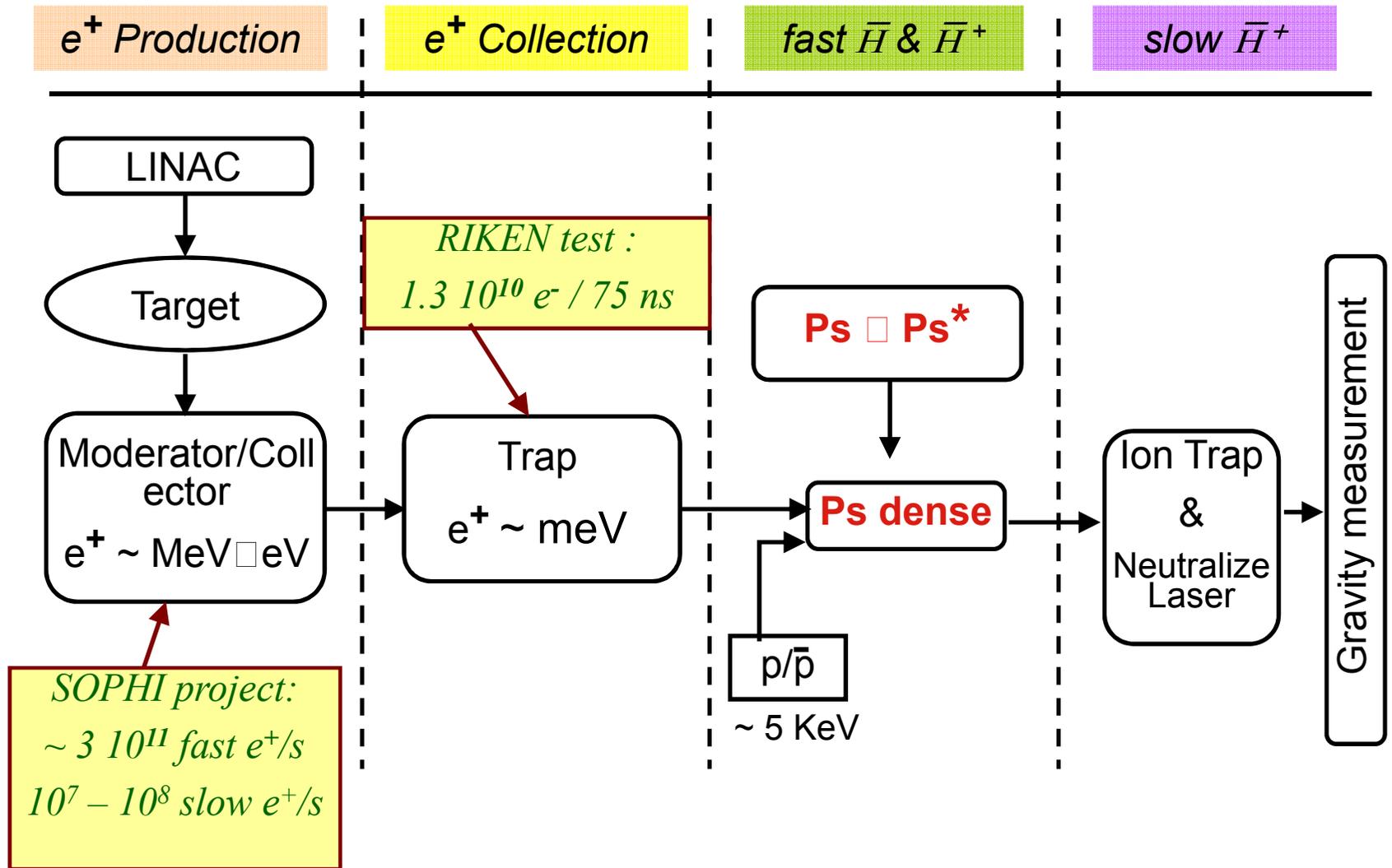
$2 \cdot 10^{11} \text{ e}^- / \text{s} \rightarrow 10^8 \text{ e}^+ / \text{s} \rightarrow$  accumulés dans un piège  
pendant 30 min  $\rightarrow 10^{11} \text{ e}^+$  'lents'

# Schéma synoptique

irfu

cea

saclay



# SOPHI, solution d'avenir ?

## Il faut construire une source de positons à partir d'un petit linac!

- Brevet français: N° 2 852 480 délivré le 15.04.2005 par l'INPI.  
United States Patent 6,818,902, Perez et al. November 16, 2004 .
- ANR 2005 – projet SOPHI (Source de positons de haute intensité) – 340 k€ (205 k€ pour le dapnia, 135 k€ pour Sigmaphi)
- Conseil Général 91 – financement ASTRE – projet SELMA (Source d'électrons pour les matériaux et l'anti-matière) – acquisition d'un linac de la société Linac Technologies – 100 k€ du CG 91 complété par 200 k€ de l'irfu)

➤ P2I

# L'installation à Saclay

irfu  
cea  
saclay



Le « malabar » (casemate de tir)  
dans le bât 126

Le linac à électrons  
 $E_c = 5.5 \text{ MeV}$   
 $I = 0.14 \text{ mA}$   
Taux de répétition : 200 Hz  
Durée des pulses : 4  $\mu\text{s}$

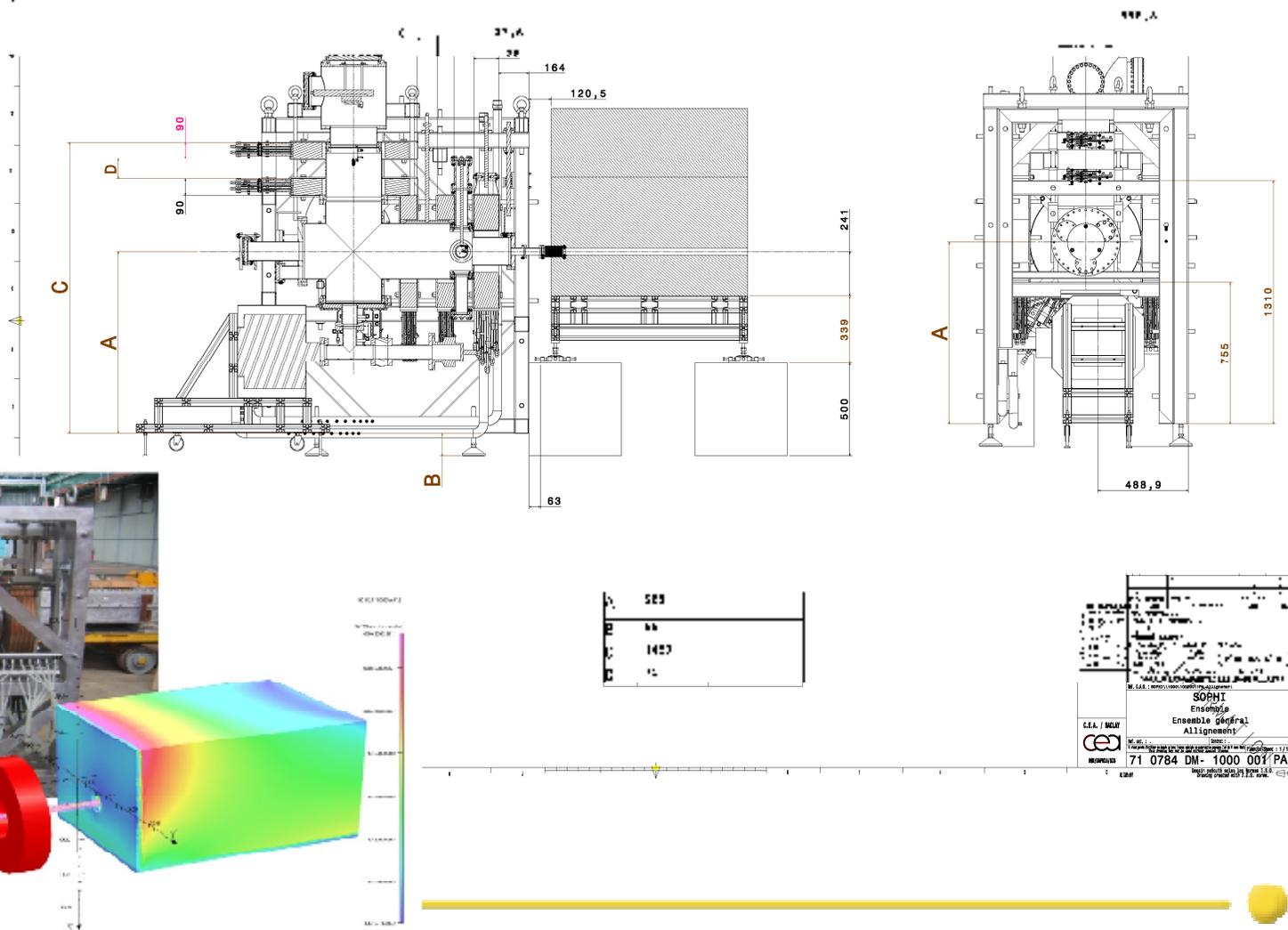
$e^+/e^-$  selector

- La réception du linac a été faite au printemps
- SOPHI est en place
- Le détecteur de positons est en cours de tests



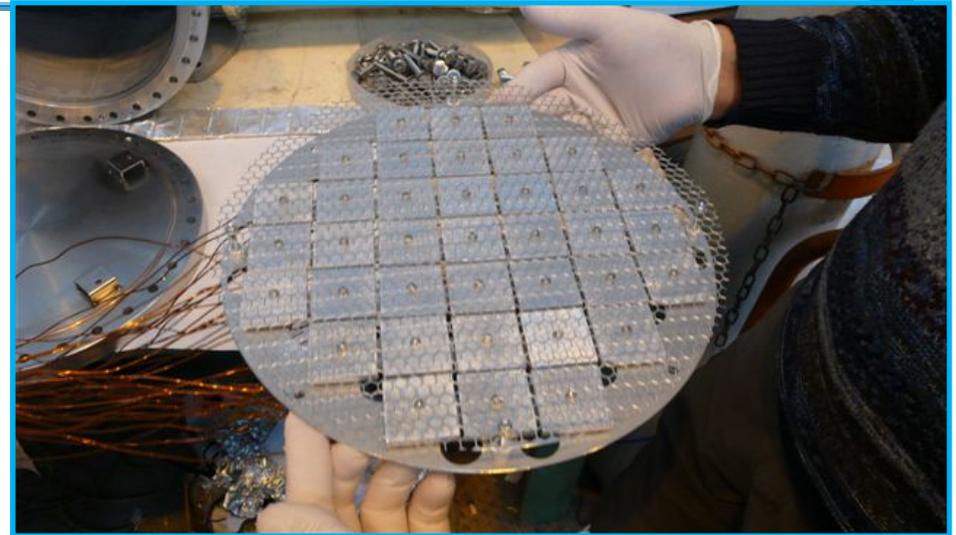
# L'installation à Saclay

irfu  
 cea  
 saclay



# Détection des positons

- Le détecteur: des pads servant de « Faraday cups », couvrant la sortie du faisceau secondaire produit sur une cible de tungstène (400  $\mu\text{m}$ )
- Il a fallu un gros travail de blindage pour obtenir un signal malgré le très important bruit haute fréquence du linac.
- Après mises à la masse, blindage de l'acquisition dans un cylindre inox, couplage opto-électronique de signaux, isolation du PC d'acquisition, etc. etc. : enfin des signaux « propres »



# Détection des positons

irfu



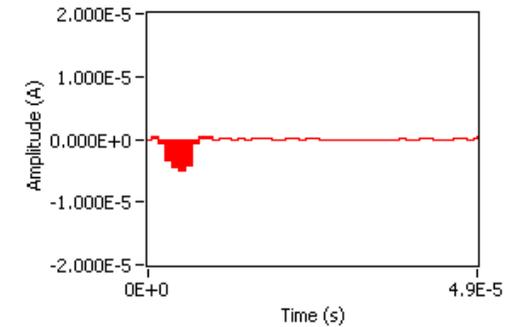
saclay

- Mesure des signaux (charge déposée) sur les pads (35x35 mm).

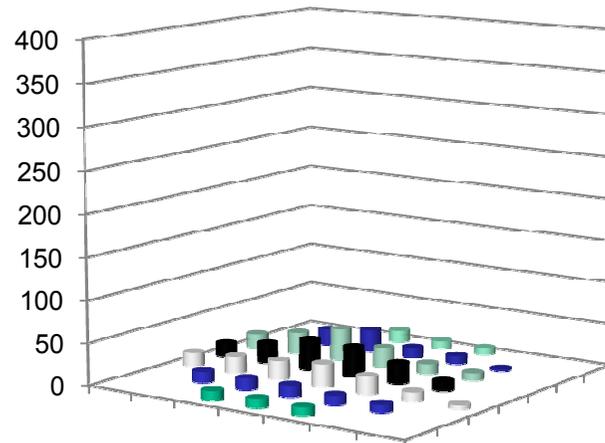
- Il reste un pic d'électrons de basse énergie (~5 keV) et un fond d'électrons supérieur au flux de positons attendu.

- Le travail continue pour réduire le fond d'électrons.

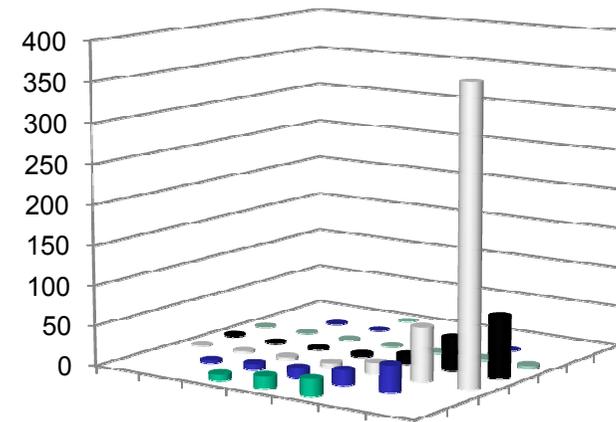
Measurement



PAD 12



Charge déposée (pC)  
Sans champ magnétique

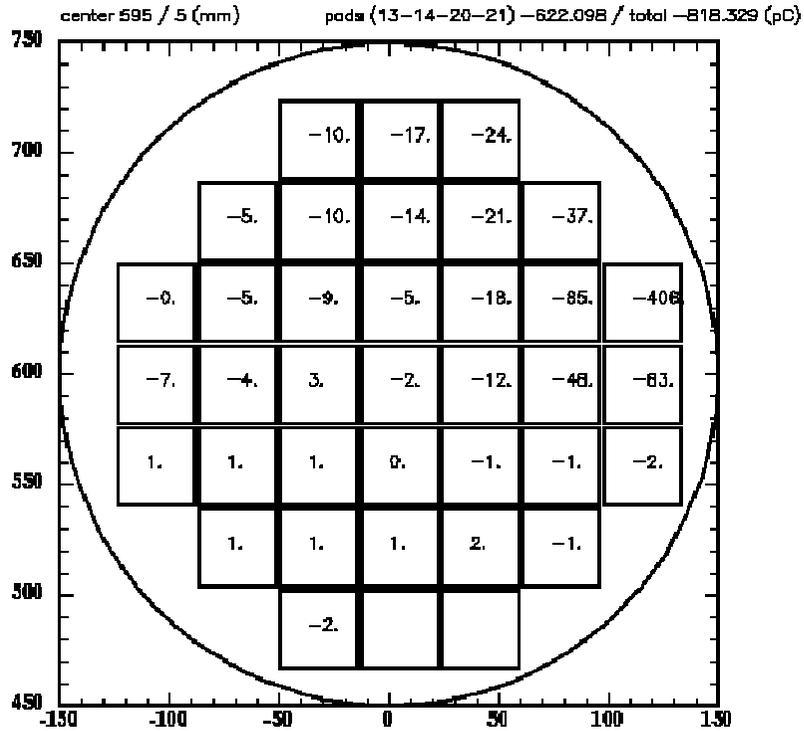


Charge déposée (pC)  
Champ magnétique nominal

# Comparaison Data – MC

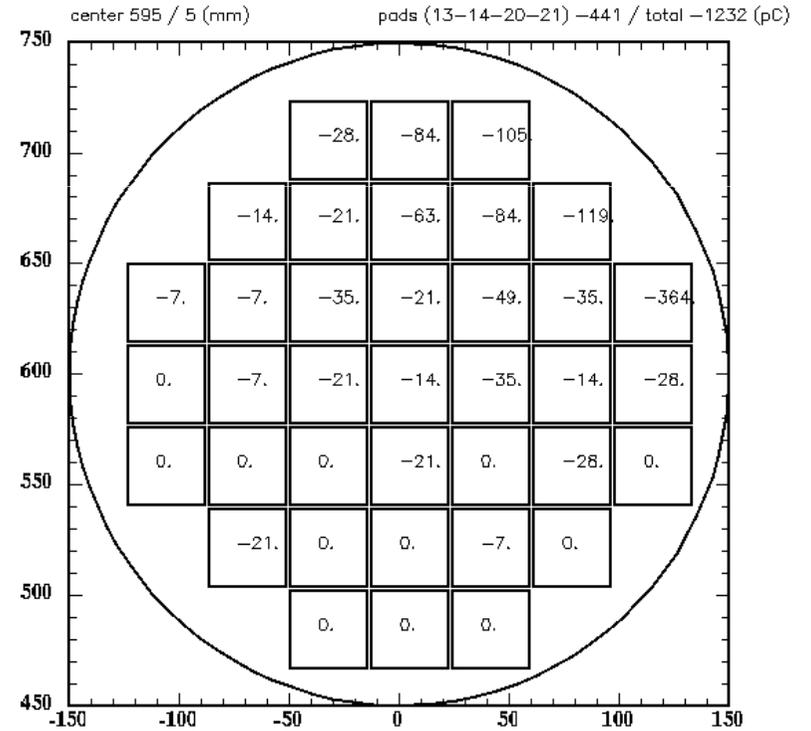
## Data

Champ magnétique nominal,  
-820 pC vus sur les pads



## MC

Champ magnétique nominal,  
-1230 pC vus sur les pads



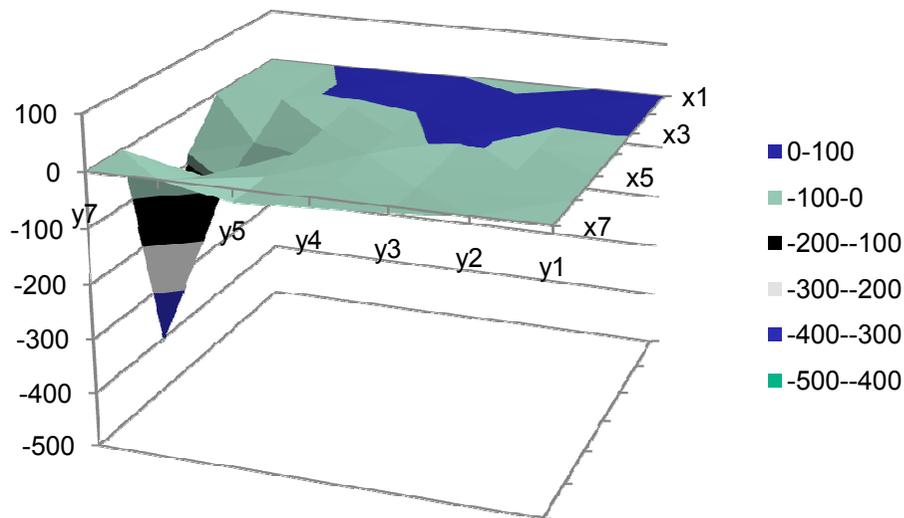
## Il faut faire fonctionner le tout!

- Le linac.
- Les alimentations électriques
- Le contrôle commande
- L'acquisition de données
- Le linac !
- Les pompes
- Le linac !!

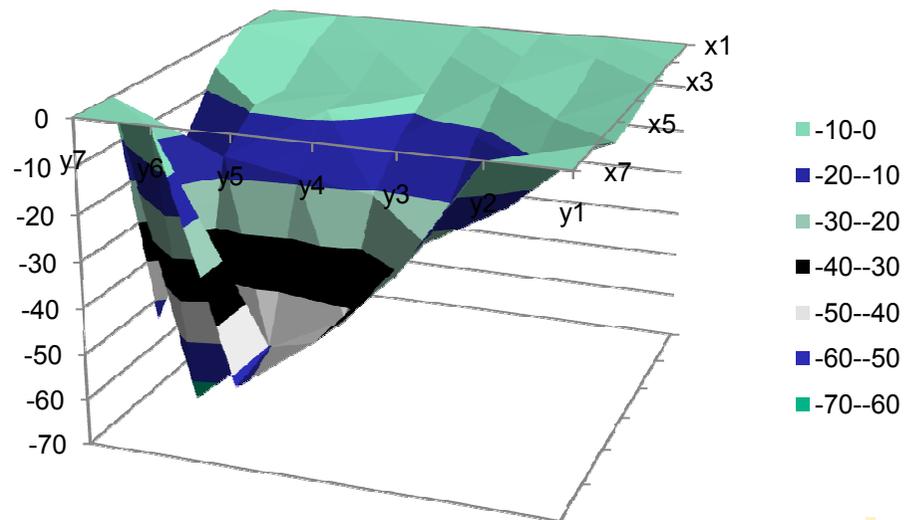


## Ce qu'on voit

Data :



MC :



configuration septembre 2009:  
Le signal observé est constitué à 96% d'électrons: les positons ne sont pas visibles  
Reste à éliminer 90% des électrons!  
(en évitant d'éliminer des positons...)

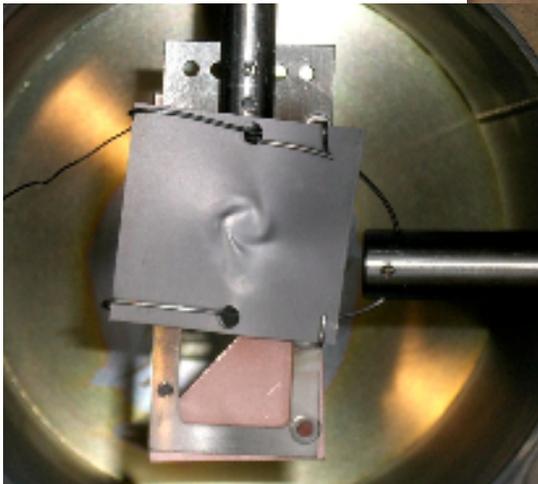
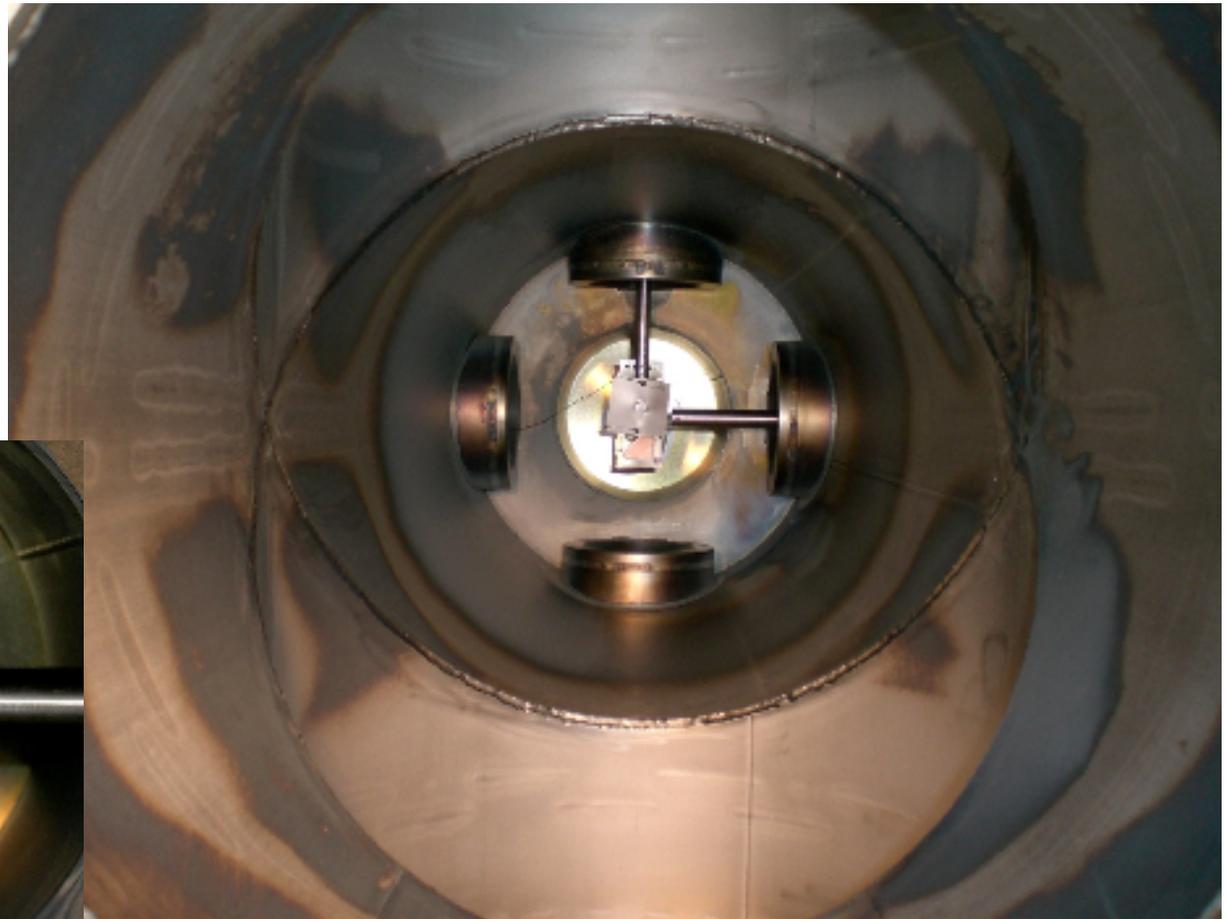
# Ce qu'on voit

irfu

cea

saclay

Quand on ouvre  
la casserole:



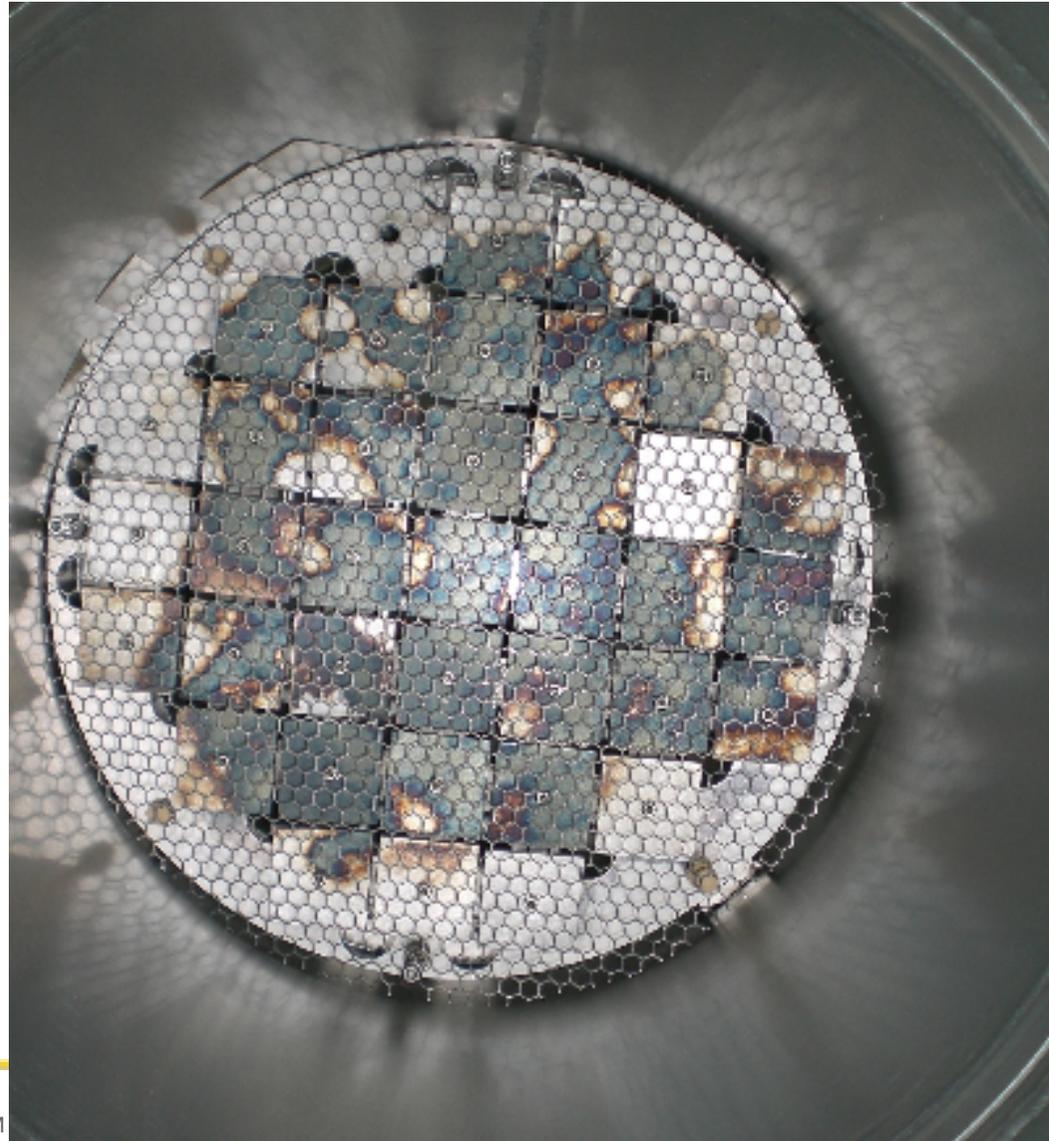
## *Ce qu'on voit*

irfu

cea

saclay

Quand on  
regarde le  
détecteur:



# Ce qu'on finit par comprendre

irfu

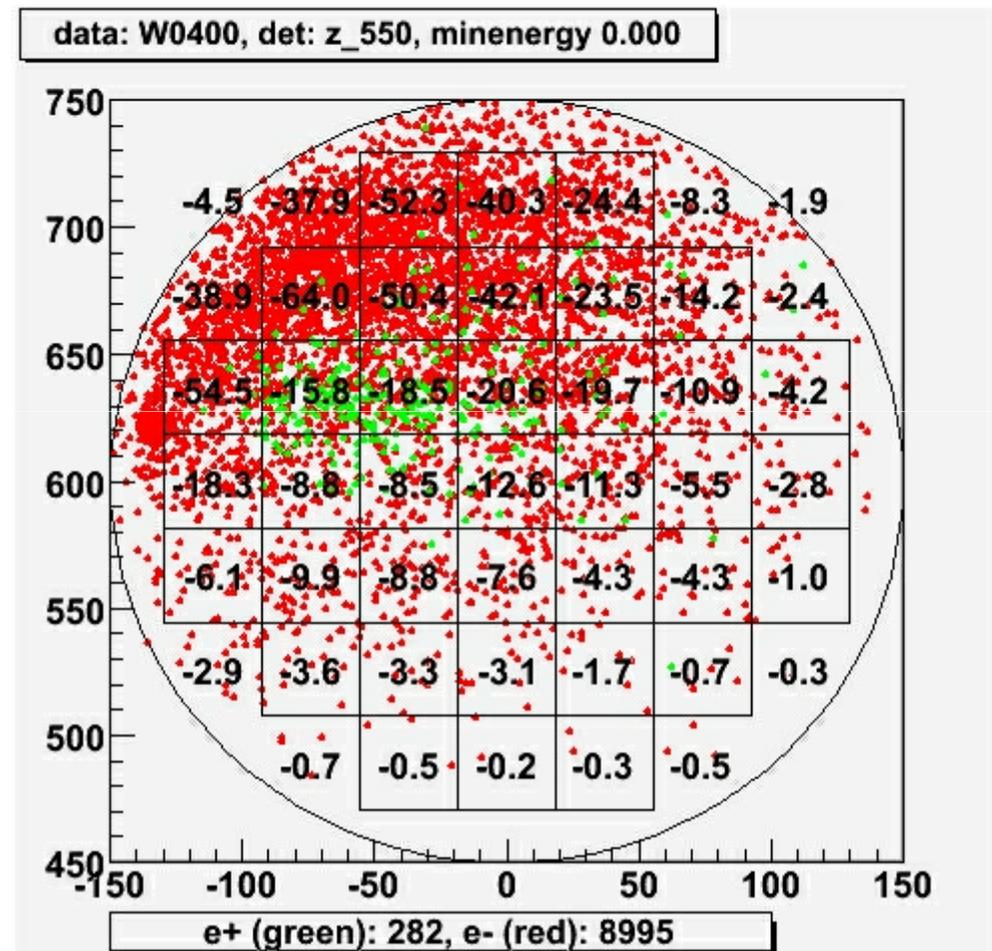


saclay

SIMULATION:

Impacts simulés au niveau du détecteur (configuration septembre 2009)

Les électrons secondaires produits par interaction sur les parois de la chambre à vide sont prédominants



# Ce qu'on finit par comprendre

irfu

cea

saclay

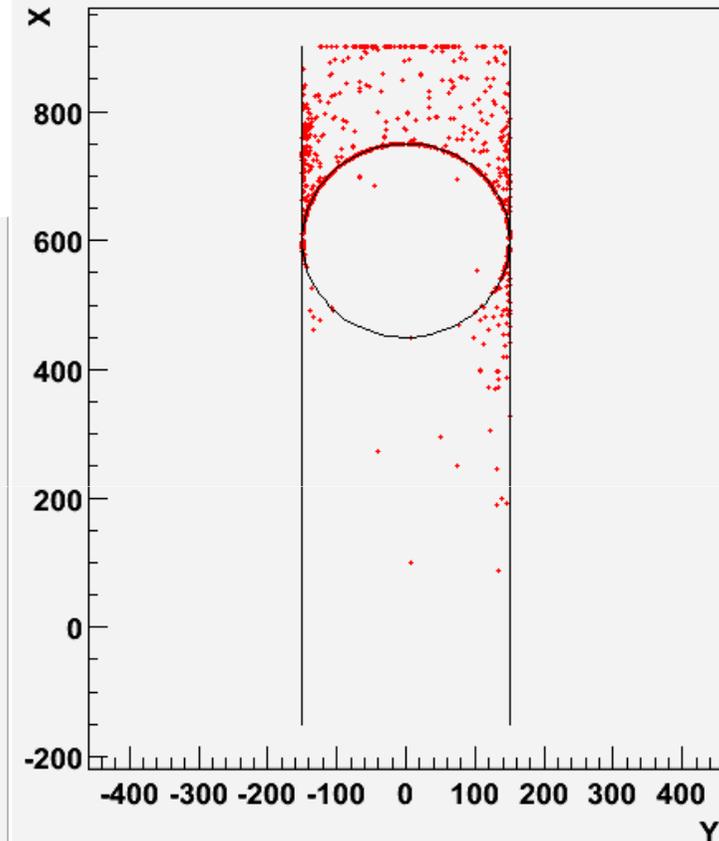
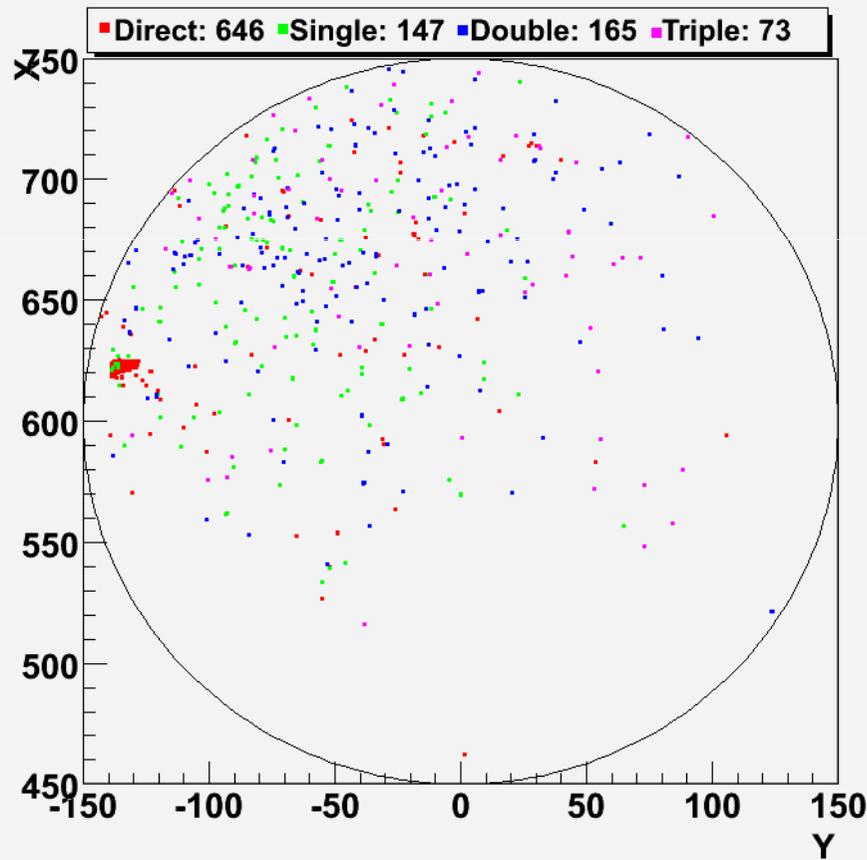
Trace des électrons sur le détecteur

Single: e- et une interaction avec les parois

Double: e- et 2 interactions avec les parois

Triple: e- et 3 interactions avec les parois

Direct: e- n'ayant pas touchés les parois.



Trace des chocs des e- sur les parois  
de l'enceinte à vide

## Des pistes pour voir les positons:

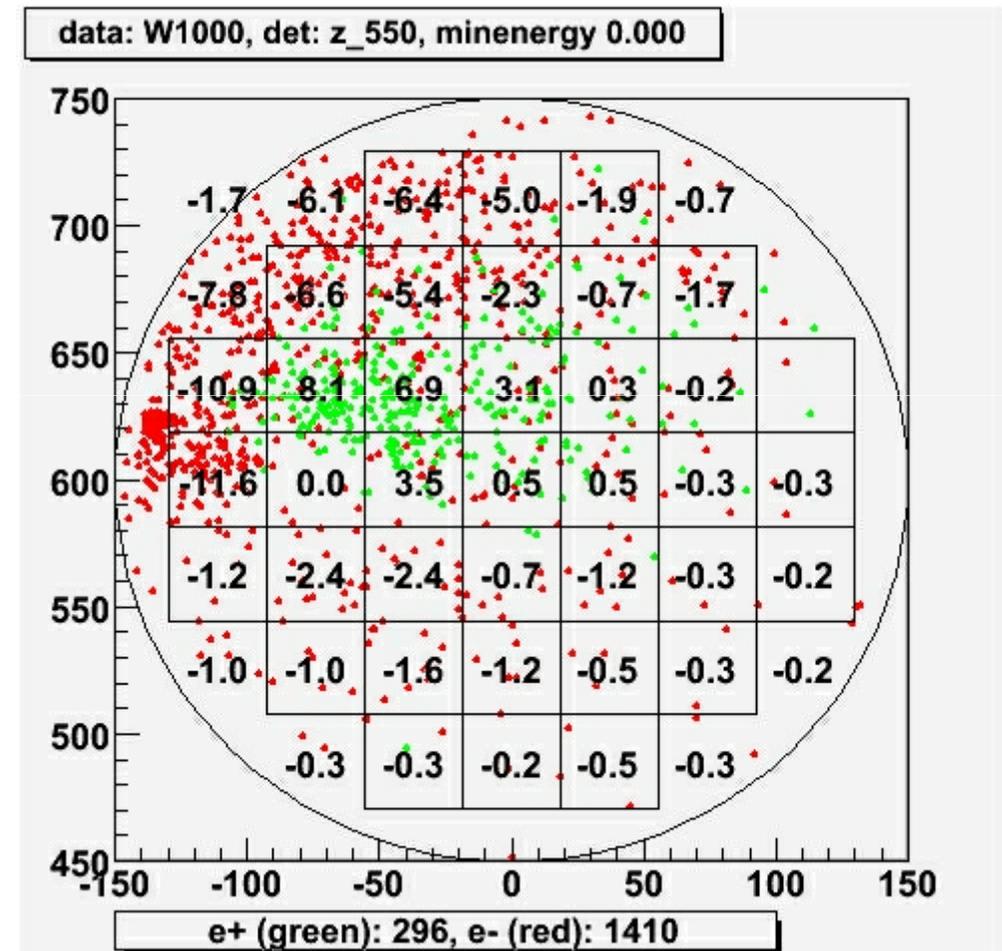
irfu



saclay

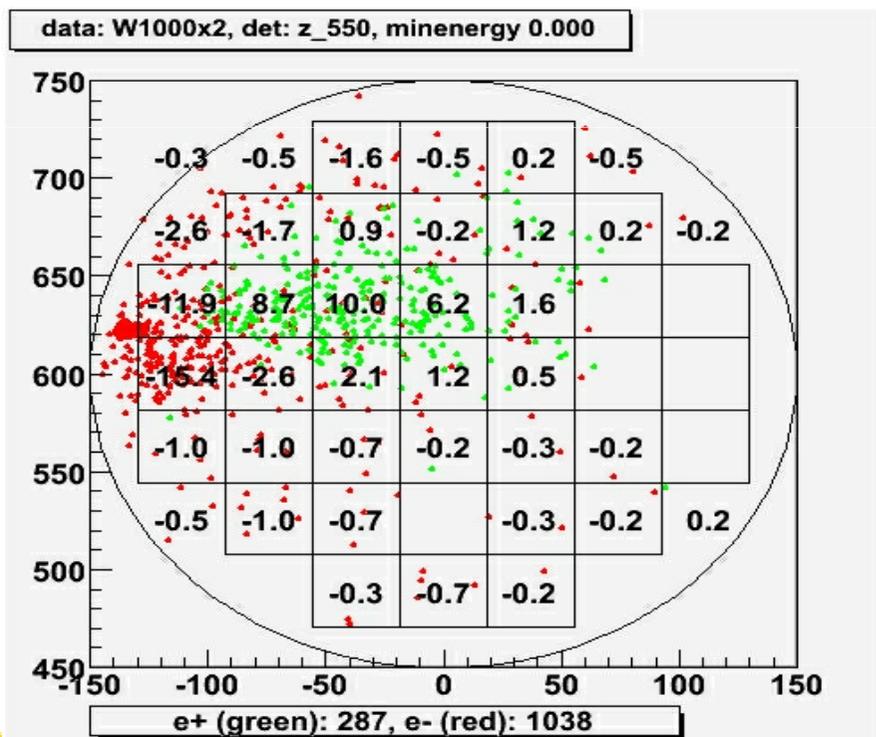
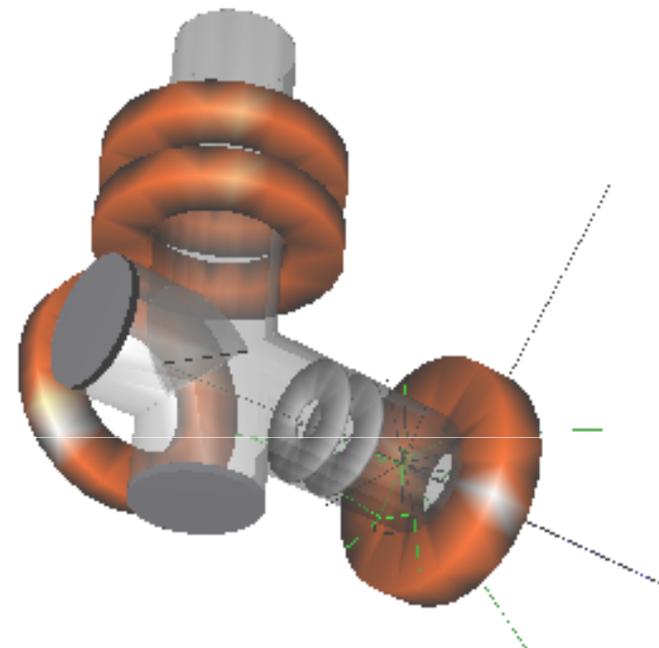
Augmenter l'épaisseur de la cible :  
1mm de tungstène au lieu de 400  $\mu\text{m}$

On diminue ainsi le  
nombre d'électrons  
sortant de la cible, sans  
pour autant diminuer  
sensiblement le nombre  
de positons.



## Des pistes pour voir les positons:

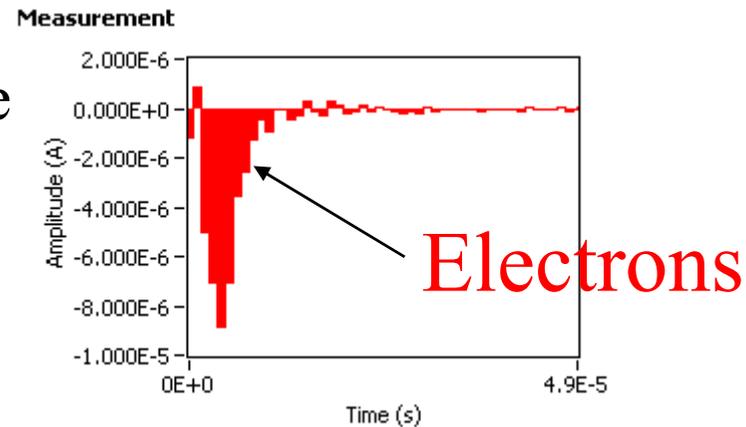
Insérer des anneaux en aluminium pour bloquer les électrons qui, en interagissant avec les parois, arrivent ensuite jusqu'au détecteur



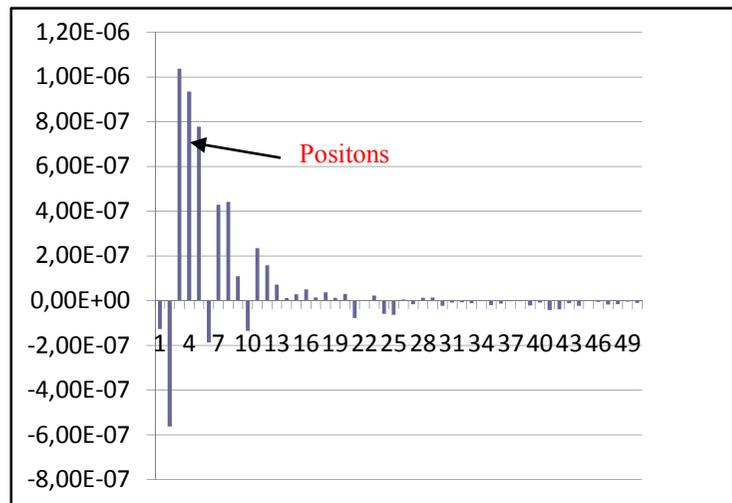
On crée les électrons secondaires dans une zone où ils ne peuvent pas être guidés vers le détecteur.

# Des pistes pour voir les positons:

Mesures du 4 décembre



SIGNAL 14 - avec champ - cathode 2700 mV



SIGNAL 12 - avec champ - cathode 2700 mV

On ne sait plus interpréter  
le signal sans considérer  
la présence de positons!

### Stockage des positons et formation du positronium

#### ➤ **Au Cern:**

Expérimentation avec ETHZ, sur la **conversion de positons en positronium**, à l'aide d'une source de  $^{22}\text{Na}$

#### ➤ **Au Riken (Japon) :**

Collaboration sur le stockage dans un piège de Penning

# conversion de positons en positronium

- Développement des convertisseurs de positronium

Manip CERNTOF

*E.T.H Zurich (A. Rubbia et al.)  
IRFU Saclay (L. Liskay et al.)*

irfu

cea

saclay



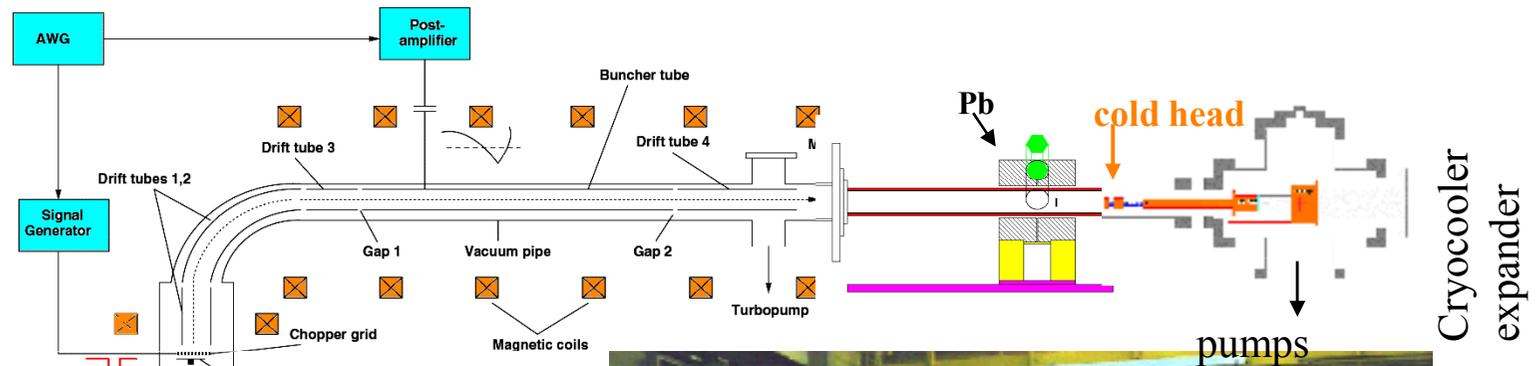
D. B. Cassidy et al., submitted to Phys. Rev. A

L. Liskay et al., Appl. Phys. Lett. **95**, 124103 (2009)

L. Liskay et al., Materials Science Forum **607**, 30-5 (2009)

L. Liskay et al., Appl. Phys. Lett. **92**, 063114 (2008)

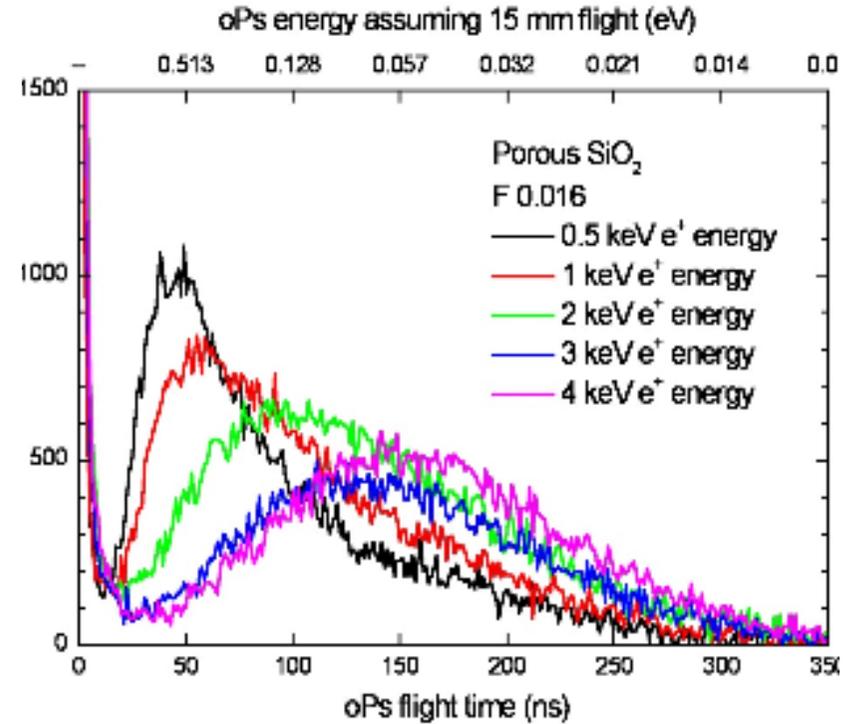
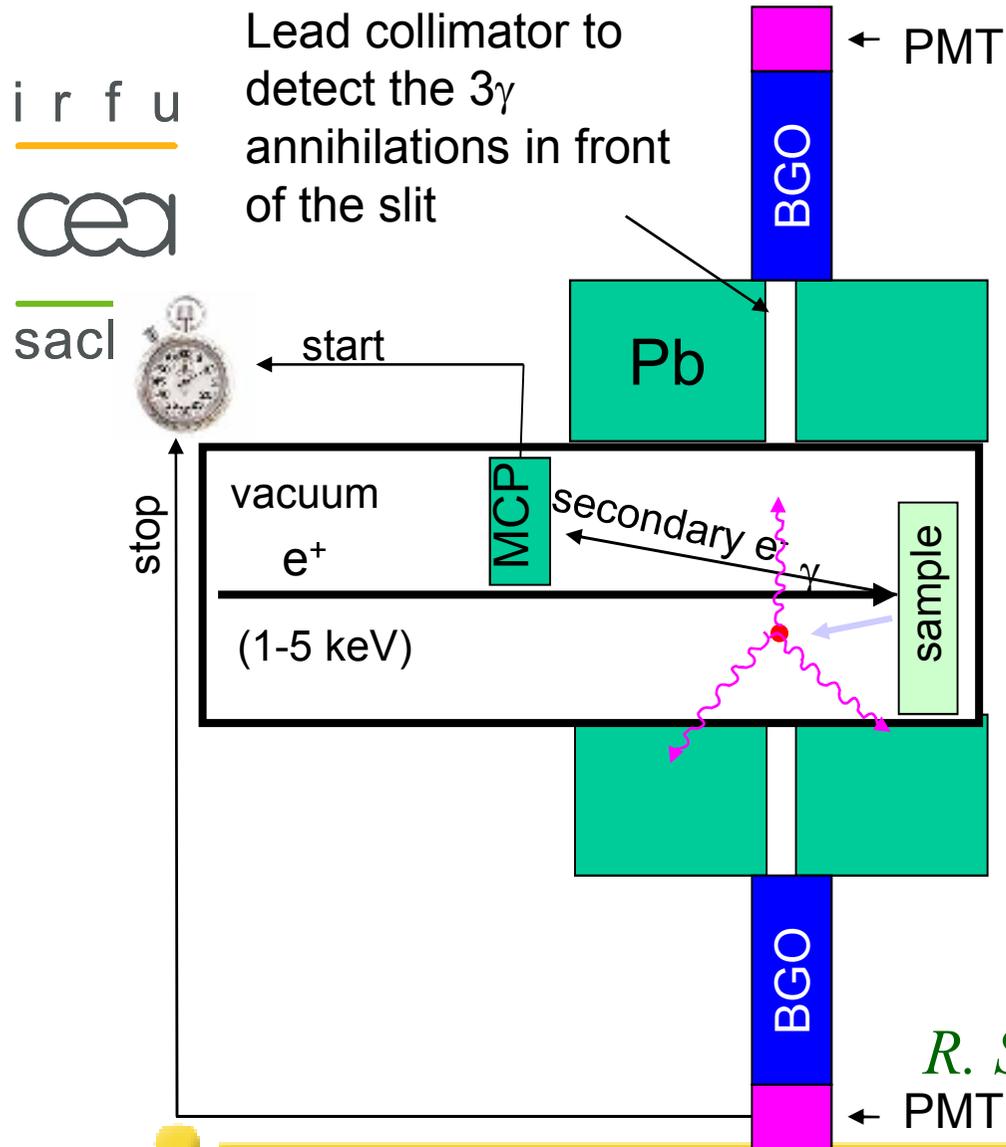
L. Liskay et al., Appl. Surf. Sci. **255**, 187-190 (2008)



**2 10<sup>7</sup> e<sup>+</sup>  
en 20 ns**



# Measure Ps energy (TOF)

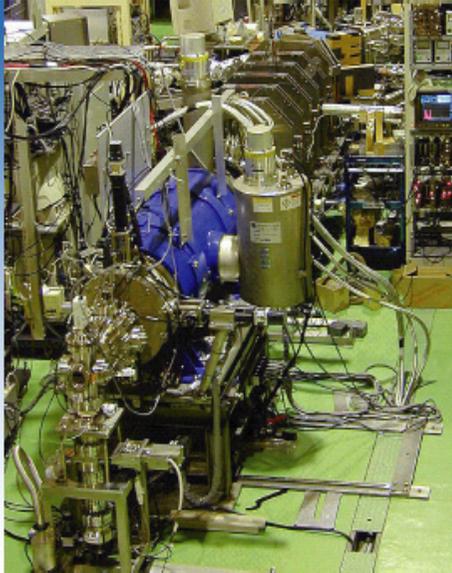


*L. Liskay (Saclay)*

*P. Crivelli, U. Gendotti (ETHZ)*

*R. Suzuki, T. Ohdaira (AIST Tsukuba)*

# stockage des positons dans un piège de Penning



## 電子プラズマを用いた陽電子蓄積装置の開発

Development of a positron accumulator with an electron plasma

小島 隆夫\*, 大島 永康\*†, 新垣 恵\*†, 毛利 明博\*, 山崎 泰規\*†

Takao M. Kojima\*, Nagayasu Oshima\*†, Megumi Niigaki†, Akihiro Mohri\*, and Yasunori Yamazaki\*†

理研原子物理研究室 Atomic Physics Laboratory, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan\*

東京大学大学院・総合文化 Institute of Physics, University of Tokyo, 3-8-1 Komaba, meguro, Tokyo 153-8902, Japan †

### Motivation

RIKEN Project :  
Cold HCI beam ( $\sim eV/q$ ) generation project.

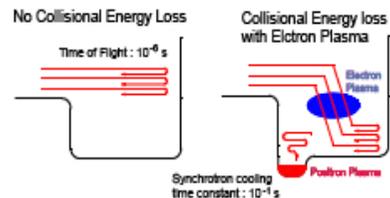
### Requirements :

- \* Positrons of  $>10^6$  for positron cooling of HCIs
- \* UHV ( $<10^{-11}$ Torr) to avoid recombination loss of HCIs

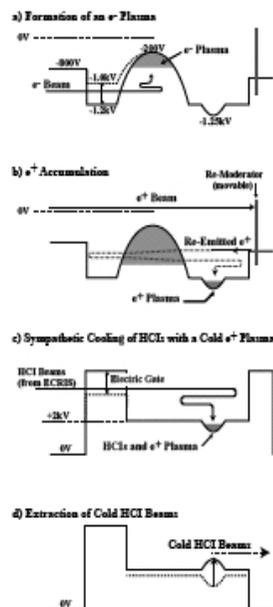
$e^+$  accumulator works in UHV  
with relatively high efficiency

### Concept of the new accumulation

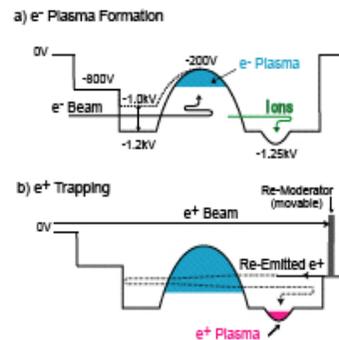
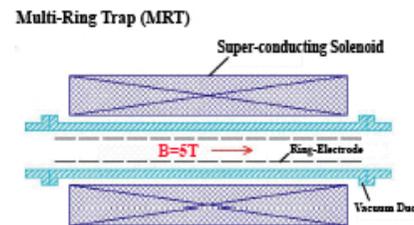
Collisional dumping with trapped electrons : **GAS FREE**



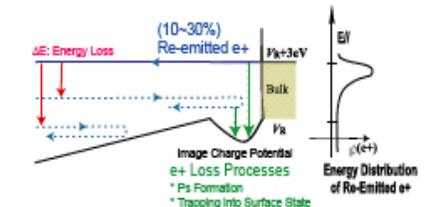
### Total procedure for cooling of HCIs



### Positron Accumulation Scheme

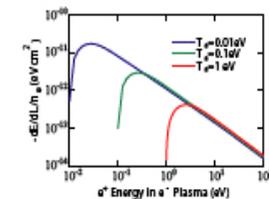


### Required $\Delta E$ of $e^+$ for Their Accumulation



(In case of W)  
If  $\Delta E$  is  $>3eV$ , re-emitted  $e^+$  would be accumulated.

### Required $e^-$ Plasma for $e^+$ Accumulation



$$-dE/dL (eV/cm) = \alpha n_e (cm^{-3}) / E (eV) \quad (\alpha \sim 1.5 \times 10^{-12}; \text{ if } T_e < E)$$

Required Condition:  
 $E_{ac} < (\Delta E/2) + (\alpha n_e L / \Delta E)$

E:  $e^+$  Injection Energy  
 $\Delta E$ : Required Energy Loss ( $\sim 3eV$ )  
 $n_e$ :  $e^-$  Plasma Density  
L:  $e^-$  Plasma Length

irfu



saclay

– Lettre d'intention CERN-  
SPSC-2007-038  
Saclay, Riken & U. Tokyo

- *P. Pérez, L. Liskay, B. Mansoulié, J.M.Rey*, IRFU, CEA-Saclay, France
- *A. Mohri, Y. Yamazaki\**, Atomic Physics Laboratory, RIKEN, Wako 351-01, Japan
- *N. Kuroda, H.A. Torii*, Institute of Physics, University of Tokyo, Komaba, 153-8902 Tokyo, Japan

**Letter of Intent**  
**CERN-SPSC-2007-038**

**A new path to measure antimatter free  
fall**

*P. Pérez, L. Liskay, B. Mansoulié,  
J.M.Rey*  
IRFU, CEA-Saclay, France

*A. Mohri, Y. Yamazaki\**  
Atomic Physics Laboratory, RIKEN,  
Wako 351-01, Japan

*N. Kuroda, H.A. Torii,*  
Institute of Physics, University of Tokyo,  
Komaba, 153-8902 Tokyo, Japan

# L'après SOPHI à Saclay

irfu

cea

saclay

## 2009

Saclay : Production de positons modérés

Etude d'une ligne de transfert des positons

Etude d'un piège à haut champ

Etude d'une modération cryogénique

Cern : Optimisation de la production de Ps (avec ETHZ)

Riken : Expérimentation de piégeage avec des électrons, bientôt avec des positons

## 2010+11

Construction de la ligne de positons, piégeage de positons, excitation de positronium

Ouverture de la ligne de positons à d'autres applications ?

# L'après SOPHI à Saclay

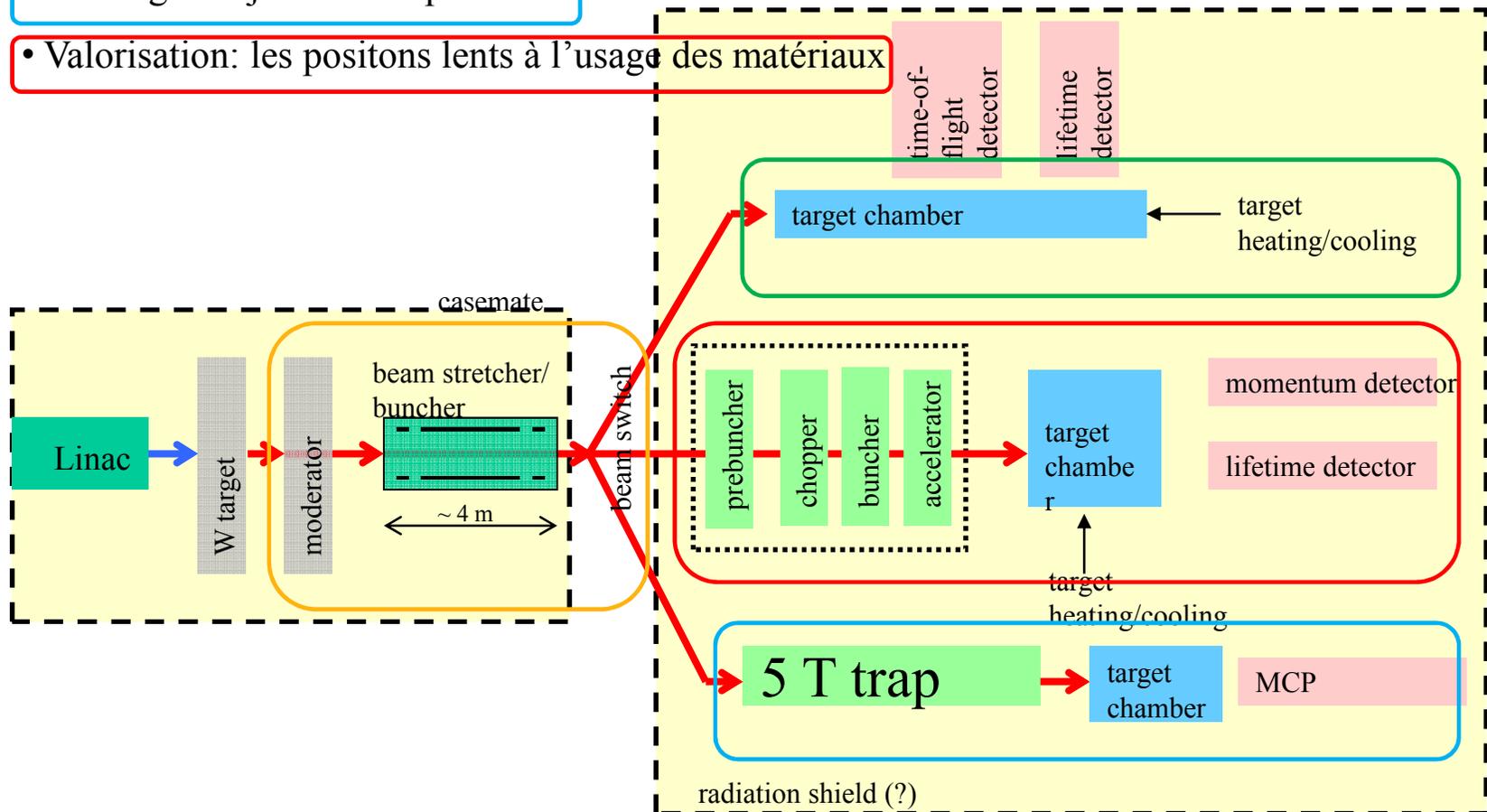
Poursuite du plan de développement: de SELMA/SOPHI vers l'Anti Hydrogène

irfu



saclay

- Modération et transport
- Développement des convertisseurs de positronium
- Stockage et éjection des positons
- Valorisation: les positons lents à l'usage des matériaux



# L'après SOPHI à Saclay

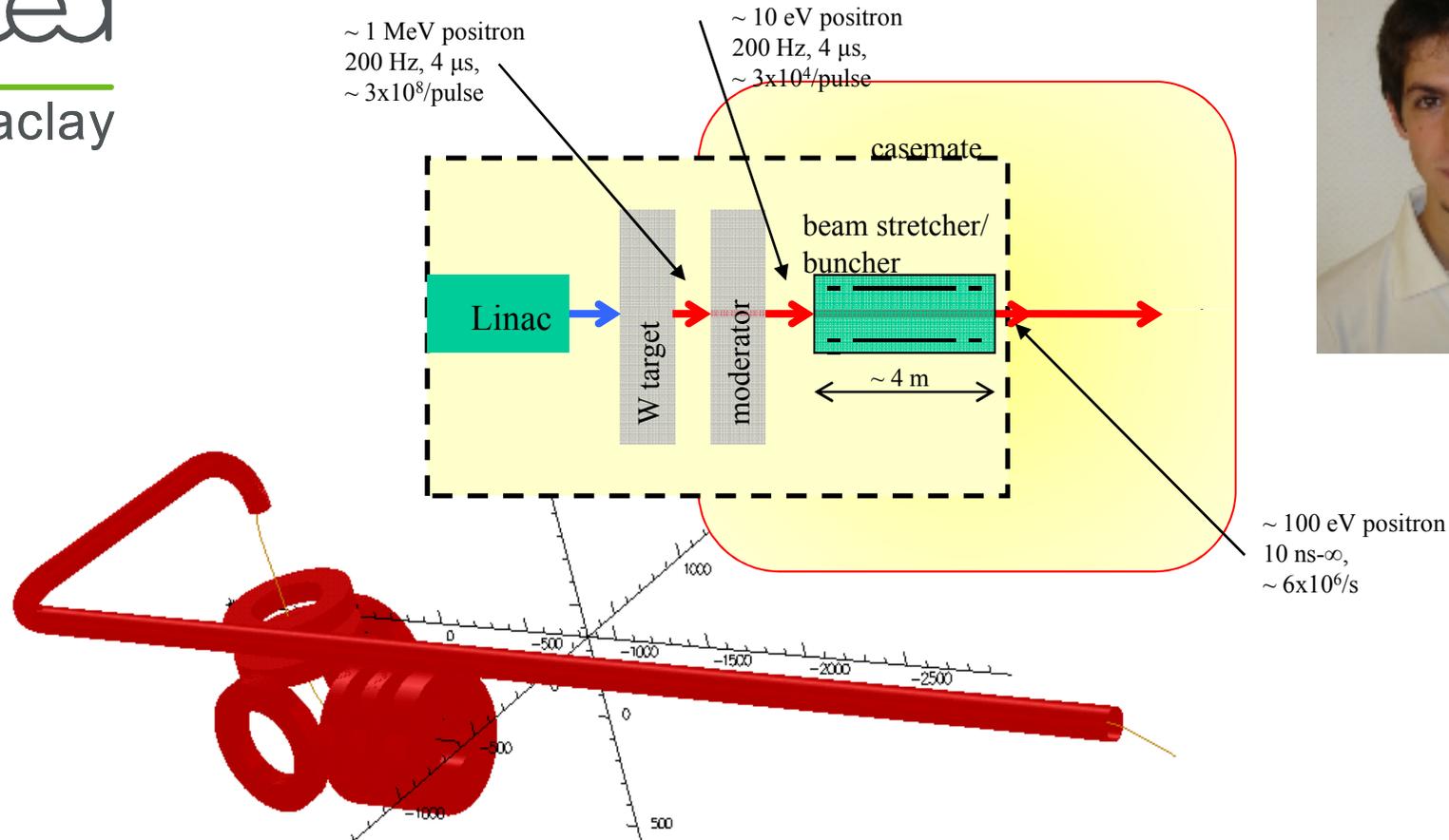
Thèse de  
Nicolas Ruiz



- Modération et transport

Ce pourquoi nous avons fait une demande P2I acceptée

irfu  
cea  
saclay



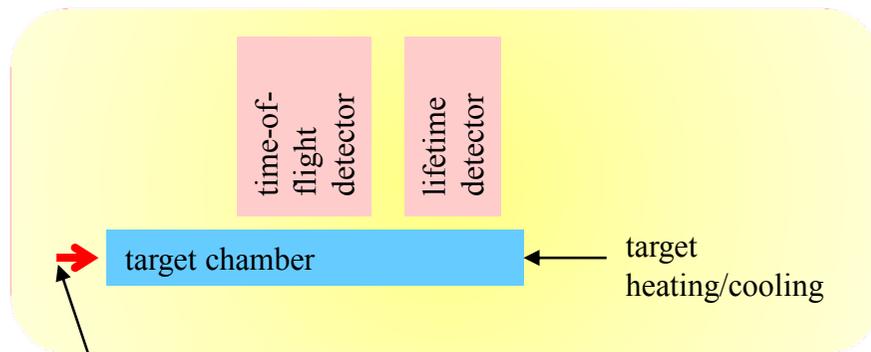
# L'après SOPHI à Saclay



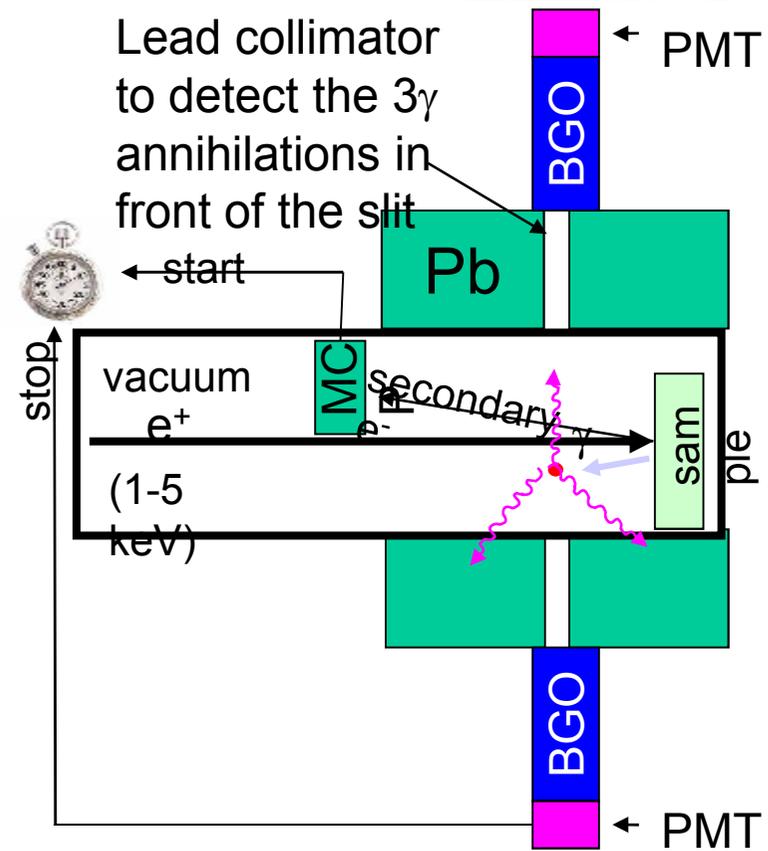
- Développement des convertisseurs de positronium

Clonage de la manip CERNTOF

irfu  
cea  
saclay



~ 100 eV positron,  
10<sup>4</sup> positron/100 ns  
@ 200 Hz

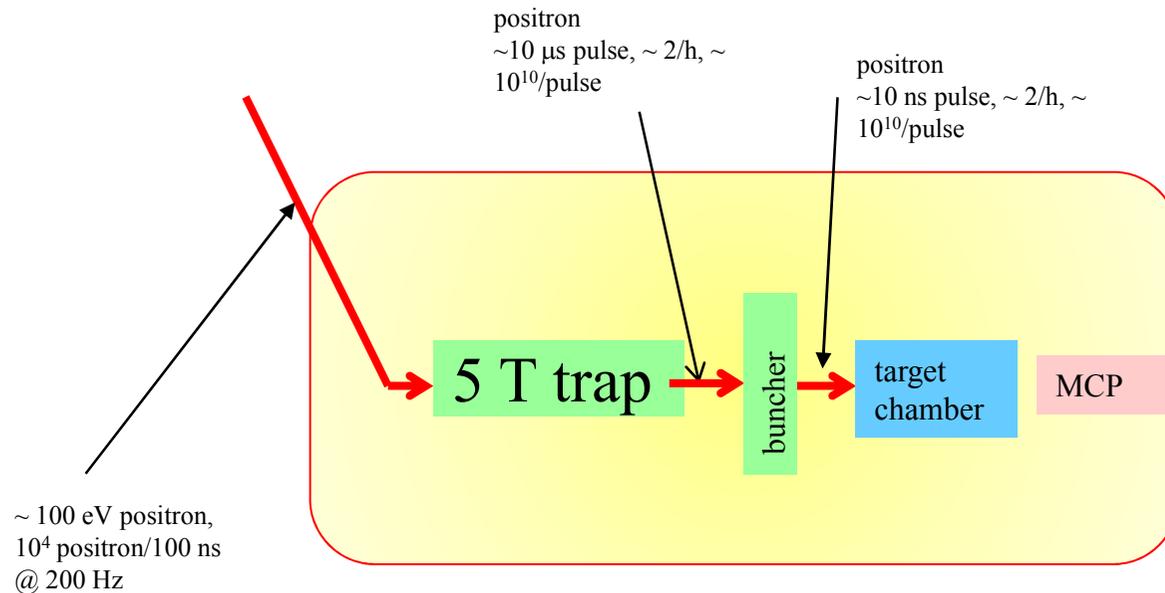


# L'après SOPHI à Saclay

- Stockage et éjection des positons

Collaboration avec RIKEN (Y. Yamasaki)

Thèse de  
Pierre Dupré



# L'après SOPHI à Saclay

irfu



saclay

- Stockage et éjection des positons



Thèse de  
Pierre Dupré

## Collaboration avec RIKEN (Y. Yamasaki)

Matériel venant de RIKEN, attendu lors du troisième trimestre 2010: **540 k€**

Matériel à acheter pour la remise en route à l'identique: **210 k€**

Matériel nécessaire pour le stockage sous 10 kV: estimé à **150 k€**

Matériel de contrôle commande (1baie automate + 4 baies instrum câblées):

**150 k€**

# L'après SOPHI à Saclay

- Valorisation: les positons lents à l'usage des matériaux

irfu

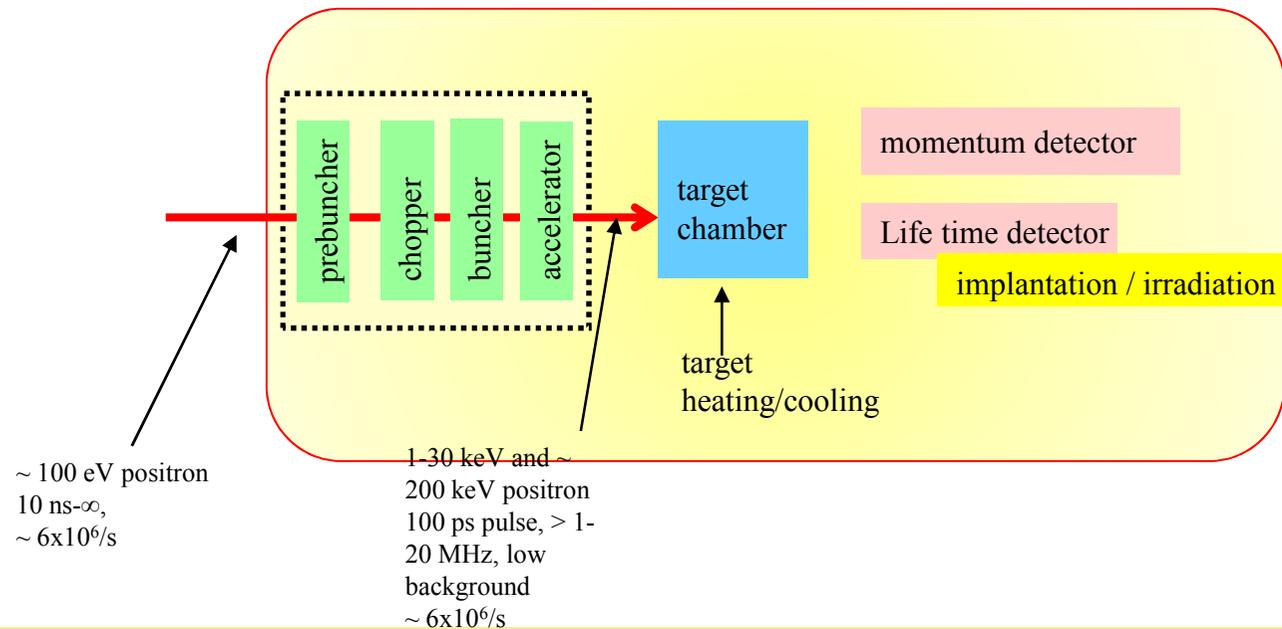


saclay

*Utile pour CEMHTI Orléans, JANNUS-DEN ...*

A faire financer par des sources externes à l'IRFU, mais demande une étude de détail pour motiver les demandes de financement.

- Cout estimé de la version  $e^+$  - 50 kV – 100 ps: **450 k€**



irfu

cea

saclay

## De Saclay au CERN!

2010+11

Etude et construction d'ELENA, pour améliorer l'efficacité de modération des anti-protons.

2012+

Démonstration de production  $H^-$ , installation auprès de l'AD (Cern),  
... Observation de la chute libre (2014 ?)



i r f u

cea

saclay

MÉRCI

# Saclay team



P. Pérez



P. Debu



P. Dupré



L. Liskay



B. Mansoulié

DSM/Irfu/SPP  
+  
SACM  
SIS,  
Sédi,  
Senac,



T. Muranaka



J-M. Rey



N. Ruiz



Y. Sacquin