

L'expérience "LPCTrap" :

Mesure du paramètre de corrélation angulaire β - ν
dans la désintégration de l' ^6He
utilisant un piège de Paul

Philippe Velten

Laboratoire de Physique Corpusculaire (LPC)

CNRS-ENSI Caen

Université de Caen, Basse-Normandie, France



Structure théorique

• **Modèle standard**

Interaction faible : $X \rightarrow Y + \beta + \nu_e$

théoriquement l'interaction faible le plus général
peut contenir tout les termes invariants de Lorentz : :
vecteur (V), axial (A), scalaire (S), tenseur (T), pseudo-scalaire (P)

$$\mathcal{H}(C_V, C_A, C_S, C_T, C_P)$$

Les expériences ont conduit à la **structure en V-A** :
les termes vecteur and axial sont majoritaires

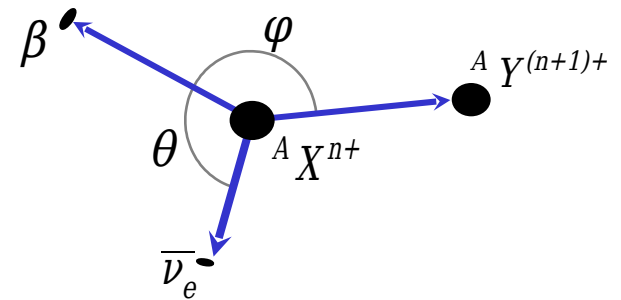
Limitations : observables expérimentales $\propto (C_i)^2$

des expériences de précision de désintégration β
sont toujours nécessaires

Distribution de désintégration β permise :

$$N(E_e, \Omega_{ev}) dE_e d\Omega_{ev} = CF(Z, E_e) N_o(E_e) \left(1 + b \frac{m_e}{E_e} + a \frac{p_e \cdot p_\nu}{E_e \cdot E_\nu} \cos\theta \right) dE_e d\Omega_{ev}$$

J.D. Jackson, PR106(1957) & NP4(1957)



corrélation angulaire $\beta - \nu$:

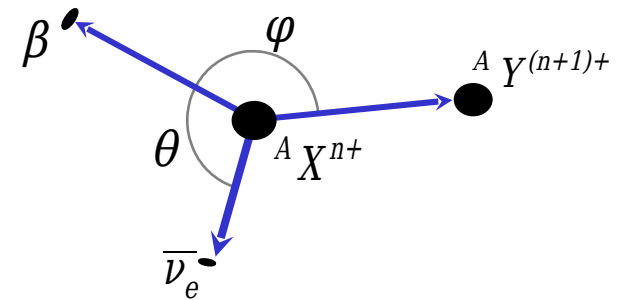
$$a (C_V, C_S, C_A, C_T, M_F, M_{GT})$$

$$a = \frac{[|C_V|^2 + |C'_V|^2 - |C_S|^2 - |C'_S|^2] |M_F|^2 + \frac{1}{3} [|C_T|^2 + |C'_T|^2 - |C_A|^2 - |C'_A|^2] |M_{GT}|^2}{[|C_V|^2 + |C'_V|^2 + |C_S|^2 + |C'_S|^2] |M_F|^2 + [|C_T|^2 + |C'_T|^2 + |C_A|^2 + |C'_A|^2] |M_{GT}|^2}$$

Distribution de désintégration β permise :

$$N(E_e, \Omega_{ev}) dE_e d\Omega_{ev} = CF(Z, E_e) N_o(E_e) \left(1 + b \frac{m_e}{E_e} + a \frac{p_e \cdot p_\nu}{E_e \cdot E_\nu} \cos\theta \right) dE_e d\Omega_{ev}$$

J.D. Jackson, PR106(1957) & NP4(1957)



corrélation angulaire $\beta - \nu$:



a (~~C_V~~ , ~~C_S~~ , ~~C_A~~ , ~~C_T~~ , ~~M_F~~ , ~~M_{GT}~~)

Désintégration **Fermi** pure

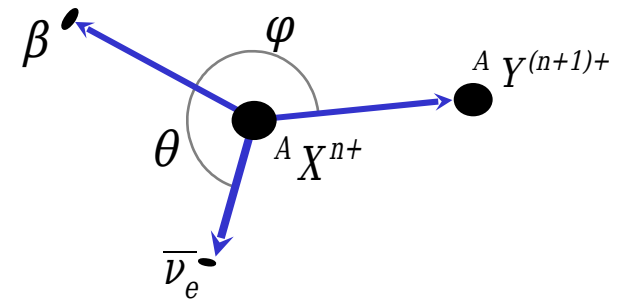
($\Delta J=0$, $\Delta P=+$)

$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } C_S=0 \implies a_F = 1 \quad (\text{structure V-A}) \\ \text{si } C_V=0 \implies a_F = -1 \end{array} \right.$

Distribution de désintégration β permise :

$$N(E_e, \Omega_{ev}) dE_e d\Omega_{ev} = CF(Z, E_e) N_o(E_e) \left(1 + b \frac{m_e}{E_e} + a \frac{p_e \cdot p_\nu}{E_e \cdot E_\nu} \cos\theta \right) dE_e d\Omega_{ev}$$

J.D. Jackson, PR106(1957) & NP4(1957)



corrélation angulaire $\beta - \nu$:



$$a \left(\cancel{C_V}, \cancel{C_S}, C_A, C_T, \cancel{M_F}, \cancel{M_{GT}} \right)$$

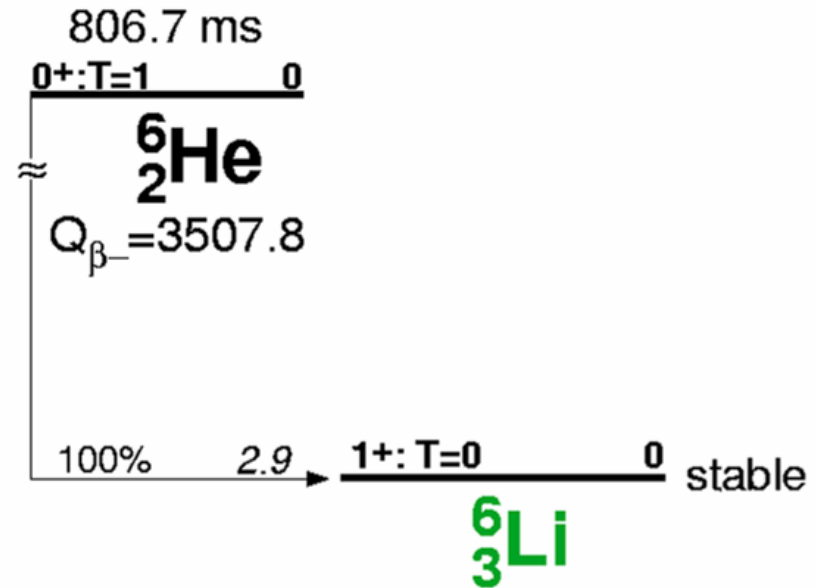
Désintégration **Gamow Teller pure**

($\Delta J = \pm 1, \Delta P = +$)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } C_T = 0 \implies a_{GT} = -1/3 \text{ (structure V-A)} \\ \text{si } C_A = 0 \implies a_{GT} = 1/3 \end{array} \right.$$

le candidat ${}^6\text{He}$ 

- Transition GT pure
- 100% État fond. \rightarrow État fond.
- $T_{1/2}$ raisonnable
- Énergie de l'ion de recul "importante" : $T_{r \max} = 1.4 \text{ keV}$
- Taux de production "élevé" : 10^8 ions/s (SPIRAL)



Limite actuelle

$$a_{\text{GT}} = -0.3343 \pm 0.0030 (1\sigma)$$

C.H. Johnson, PR 132 (1963) 1149

$$\frac{C_T}{C_A} \leq 0.13$$

Méthode : Analyse de spectre de l'énergie de recul

Objectif du LPCTrap

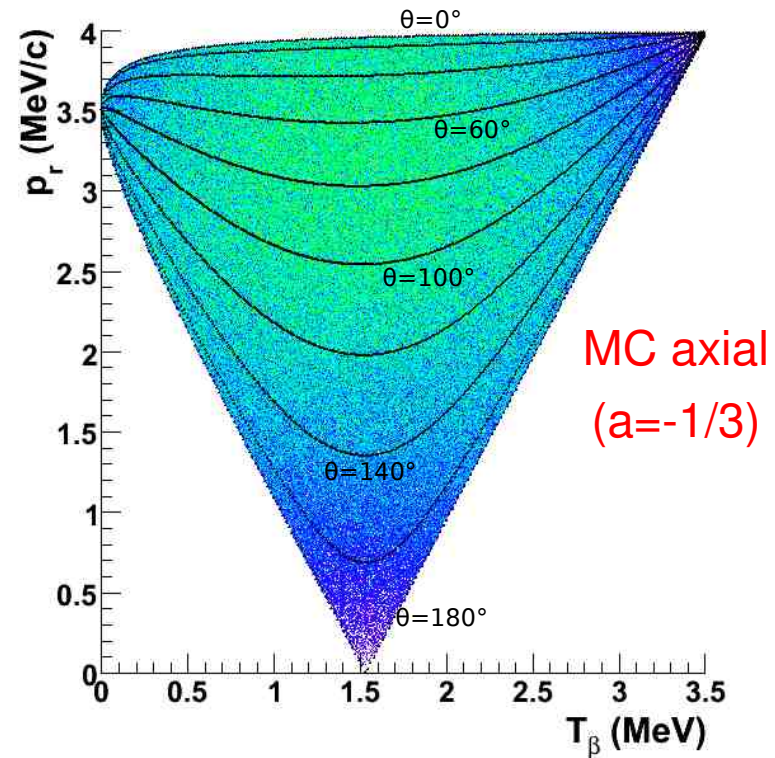
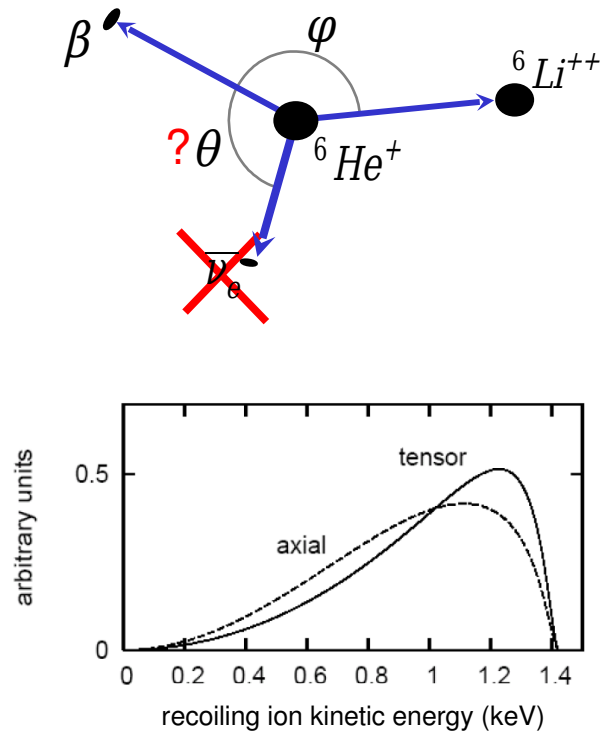
Mesurer a_{GT} avec $(\Delta a/a)_{\text{stat}} \leq 0.5\%$

Statistiques nécessaires : $\geq 10^6$ événements de désintégration

Méthode : mesure en **coïncidence** β -ion de recul
depuis un **piège à ions**

Comment mesurer une corrélation angulaire ?

$p_r(\theta)$ grâce à la cinématique de désintégration

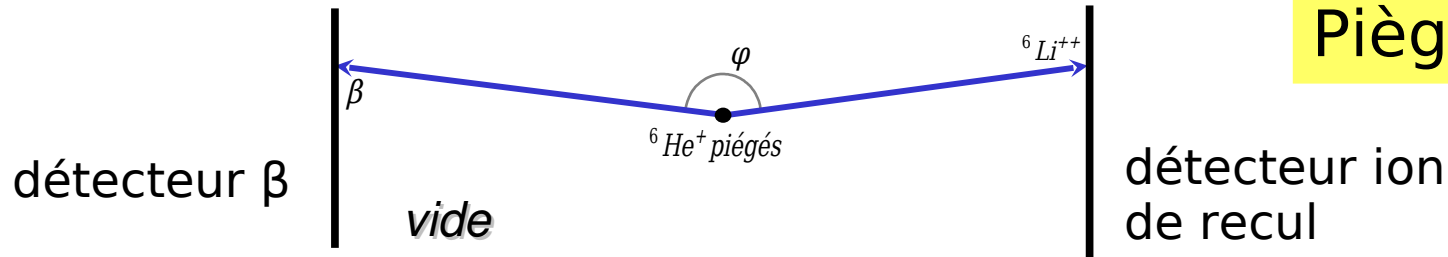


→ corrélation angulaire déduite du **recoil nucléaire**

Problèmes expérimentaux :

• **impulsion de recul mesurable**

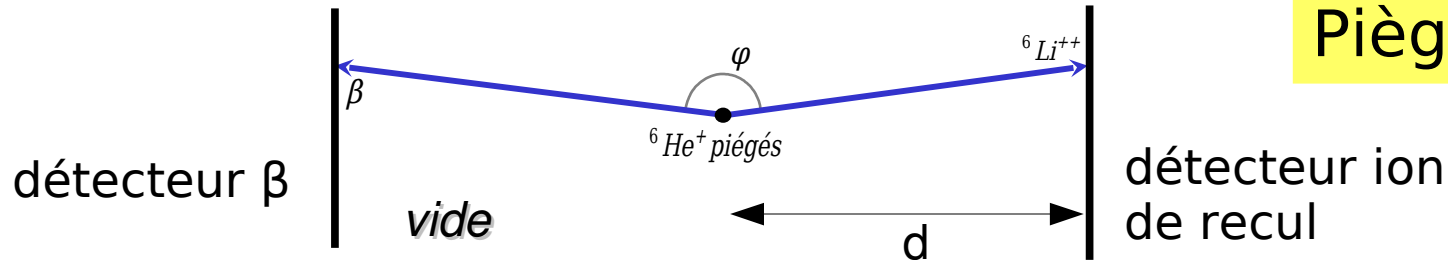
→ environnement **sans matière**



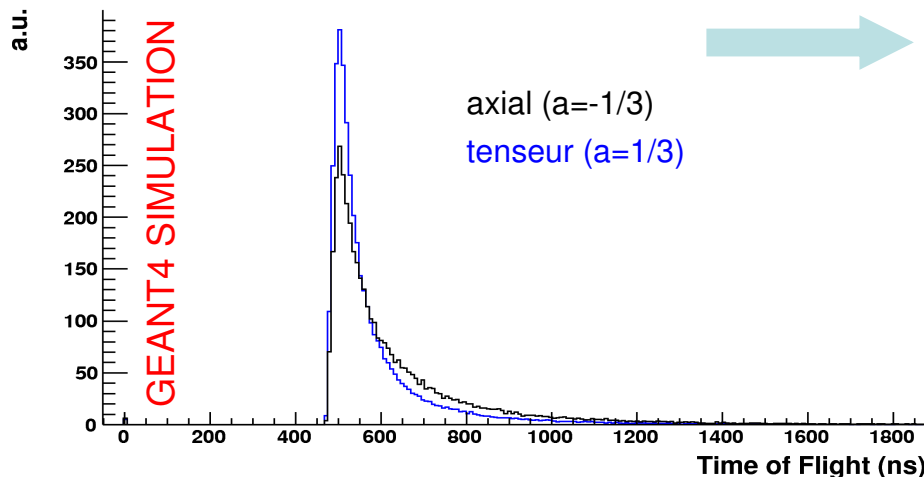
Problèmes expérimentaux :

- impulsion de recul mesurable**

→ environnement **sans matière**



- faible énergie de recul ($\sim\text{keV}$)**



→ spectre **temps de vol**

$t_{\text{start}} = \beta$ atteint son détecteur

$t_{\text{stop}} =$ l'ion atteint son détecteur

→ $\text{ToF}_{\text{ion}} = t_{\text{stop}} - t_{\text{start}} (= M_{\text{ion}} \cdot d / p_{\text{ion}})$

Problèmes expérimentaux :

- **réduire le bruit de fond**

→ mesure en **coincidence** β -ion de recul

Trigger = Scintillateur Plastique

couplage tensoriel
statistiquement favorisé
pour une **géométrie dos à dos**

telescope β

T_{β} + position β

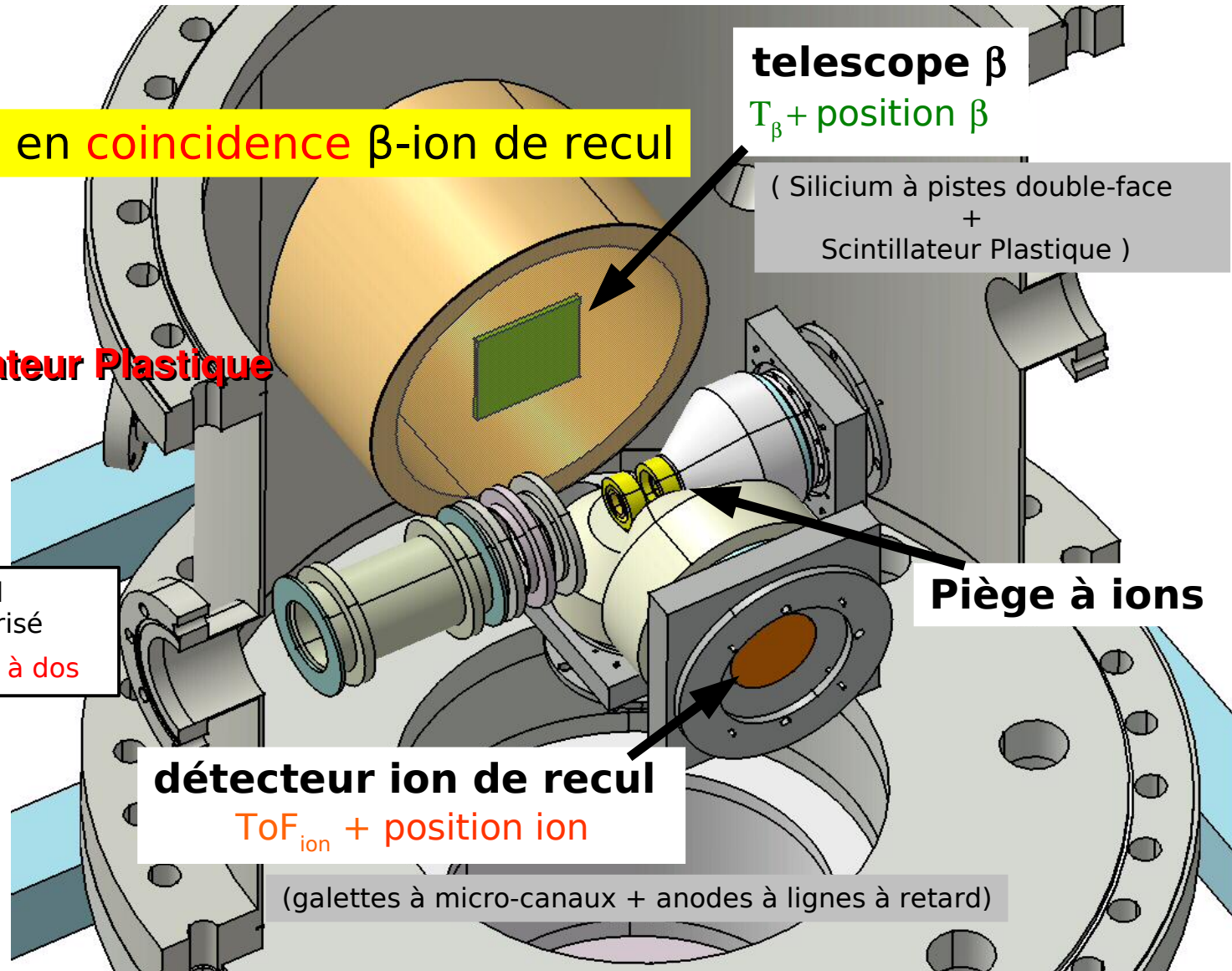
(Silicium à pistes double-face
+
Scintillateur Plastique)

Piège à ions

détecteur ion de recul

ToF_{ion} + position ion

(gallettes à micro-canaux + anodes à lignes à retard)



Problèmes expérimentaux :

- **réduire le bruit de fond**

mesure en **coincidence** β -ion de recul

telescope β

T_β + position β

(Silicium à pistes double-face
+
Scintillateur Plastique)

T_β
 T_{ion}
 $\varphi_{\beta\text{-ion}}$

cinématique complète \rightarrow **reconstruction de la masse du neutrino**

$$m_\nu^2 = E_\nu^2 - p_\nu^2$$

- **rejeter les fausses coïncidences et hors-pièges**
- **contrôler les effets systématiques**

détecteur ion de recul

ToF_{ion} + position ion

(gallettes à micro-canaux + anodes à lignes à retard)

Technique de piégeage : le piège de Paul

Équation de Poisson :

$$\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$$

Solution pour un potentiel quadratique :

$$V = A(x^2 + y^2 - 2z^2)$$

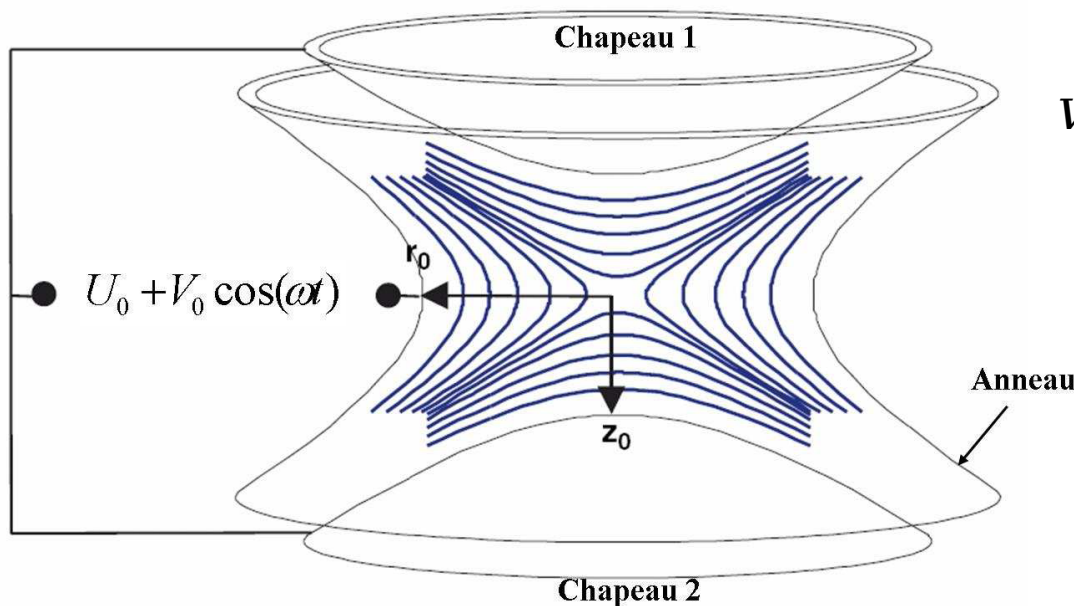
-> **champs oscillant nécessaire pour piéger**

Technique de piégeage : le piège de Paul

Équation de Poisson :
$$\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$$

Solution pour un potentiel quadratique :
$$V = A(x^2 + y^2 - 2z^2)$$

-> **champs oscillant nécessaire pour piéger**



$$V(r, z, t) = \frac{U_0 + V_0 \cos \omega t}{2 r_0^2} (r^2 - 2 z^2)$$

formes des chapeaux
et de l'anneau

$$V(0, 0, t) = 0$$

Technique de piégeage : le piège de Paul

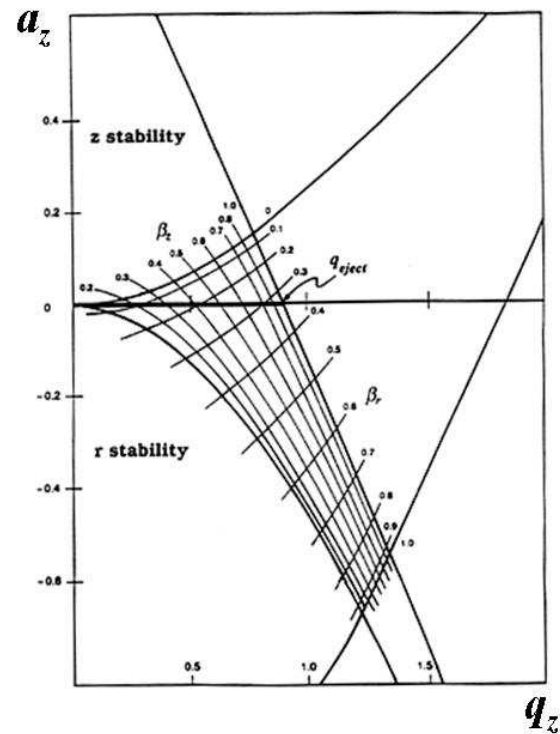
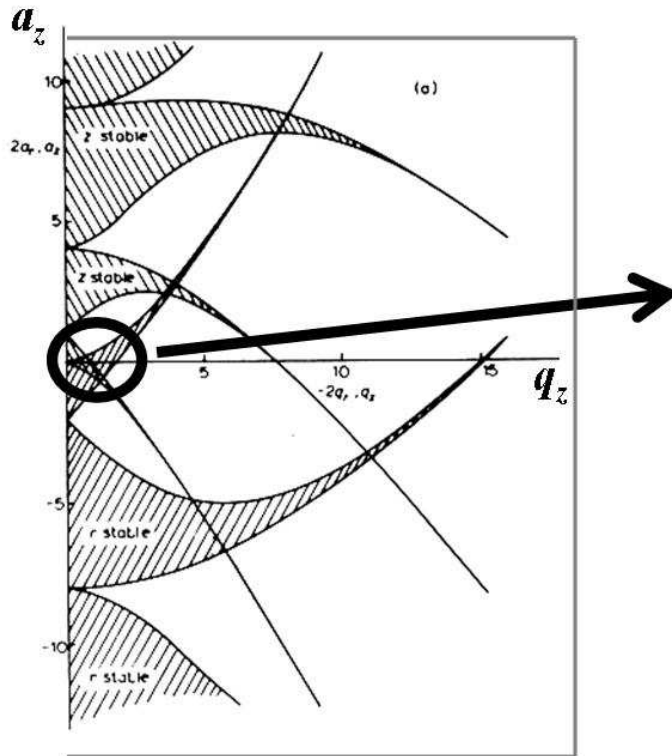
équations de Mathieu :
$$\frac{d^2\xi}{d\tau^2} + (a_\xi + 2q_\xi \cos 2\tau)\xi = 0$$

$$\xi = r, z$$

$$\tau = \frac{\omega t}{2}$$

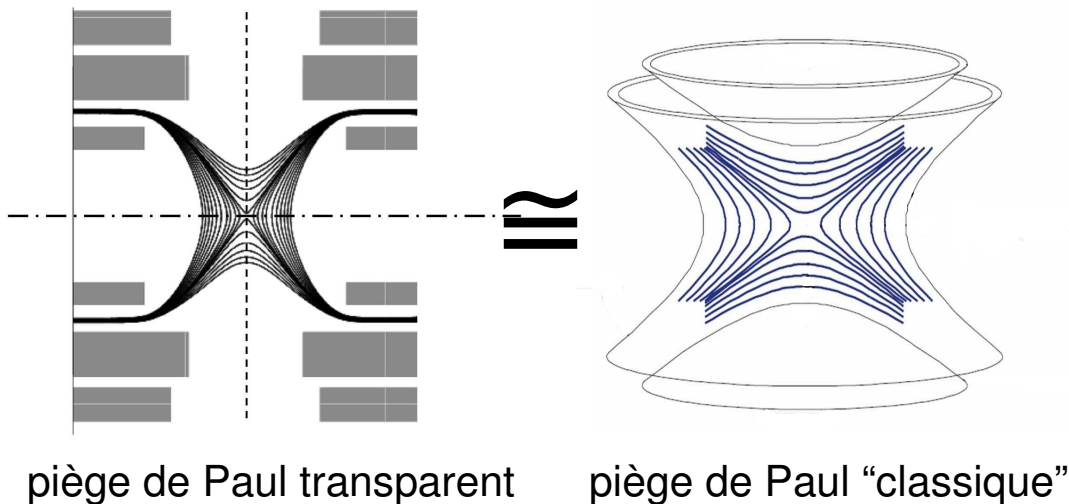
paramètres de Mathieu :
$$a_\xi(m, q, \omega, U_0)$$

$$q_\xi(m, q, \omega, V_0)$$



Le piège de Paul transparent

P. Delahaye, Thèse (2002)



Paramètres typiques de fonctionnement pour ${}^6\text{He}$:

$$f \approx 1.8 \text{ Mhz}$$

$$V_0 = 100\text{V}$$

Performances :

capacité $> 10^5$ ions
 temps de vie $\sim T_{1/2}({}^6\text{He})$

A. Mery, Thèse (2007)

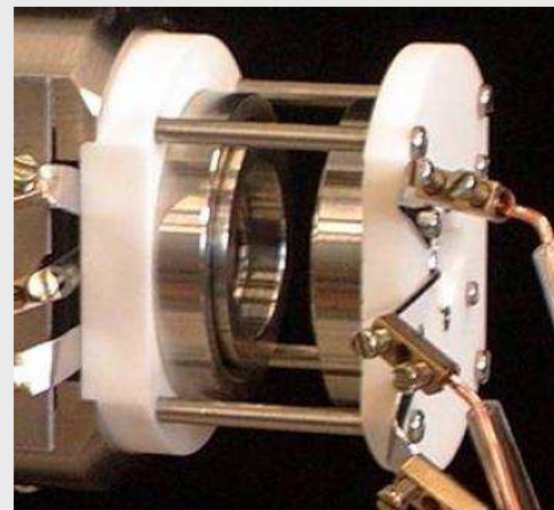
Caractéristiques :

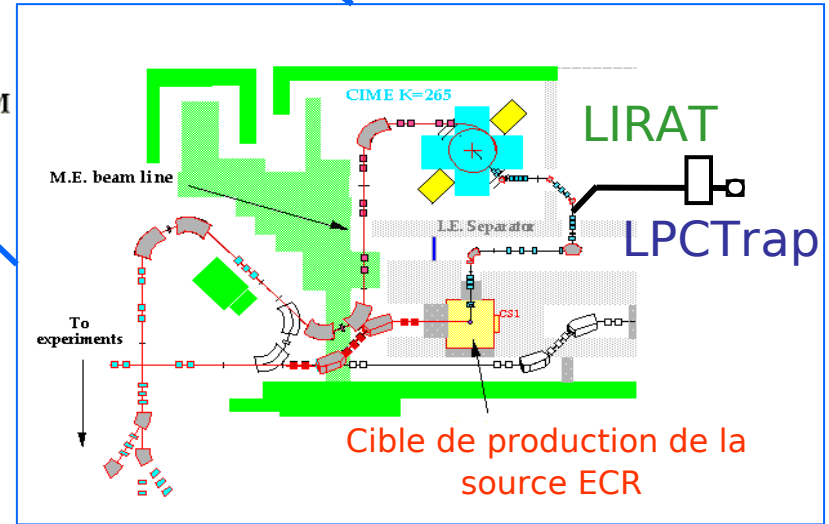
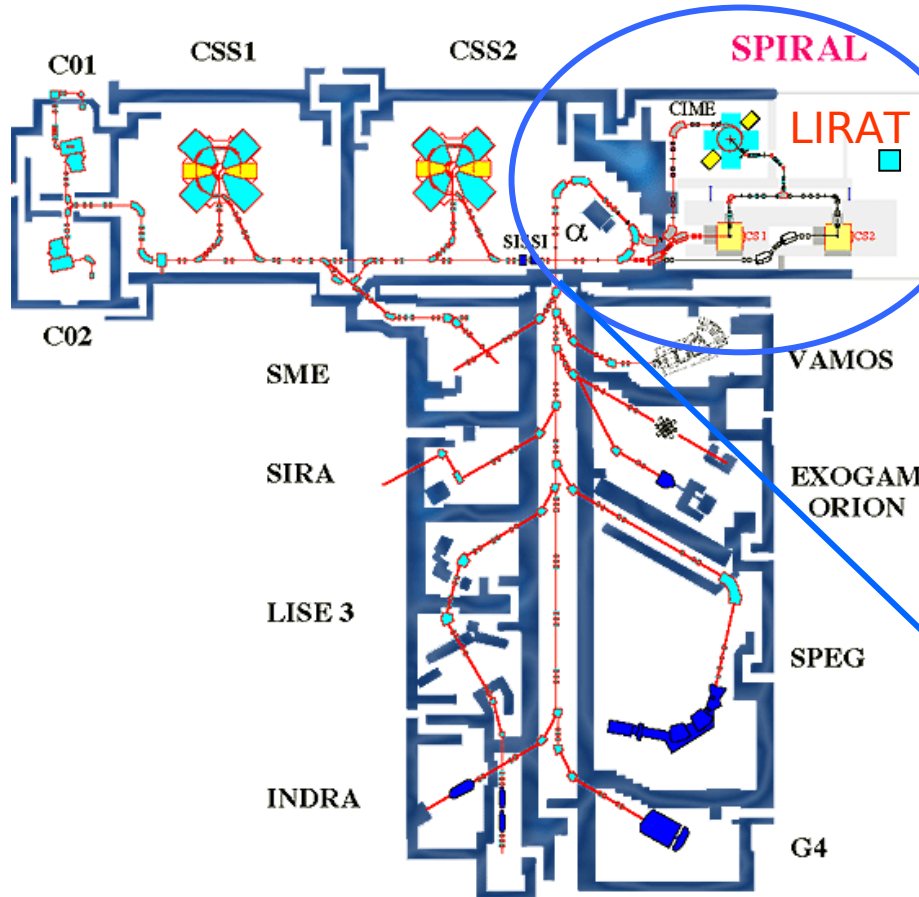
- 6 anneaux
- pas de champ magnétique
- géométrie ouverte
- puit de potentiel $\sim 2\text{-}3 \text{ eV}$

Nuage d'ions:

taille $\sim 1\text{mm}$
 température $\sim 0.1 \text{ eV}$

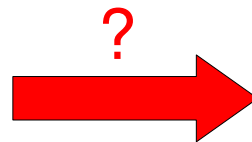
Transparent Paul trap





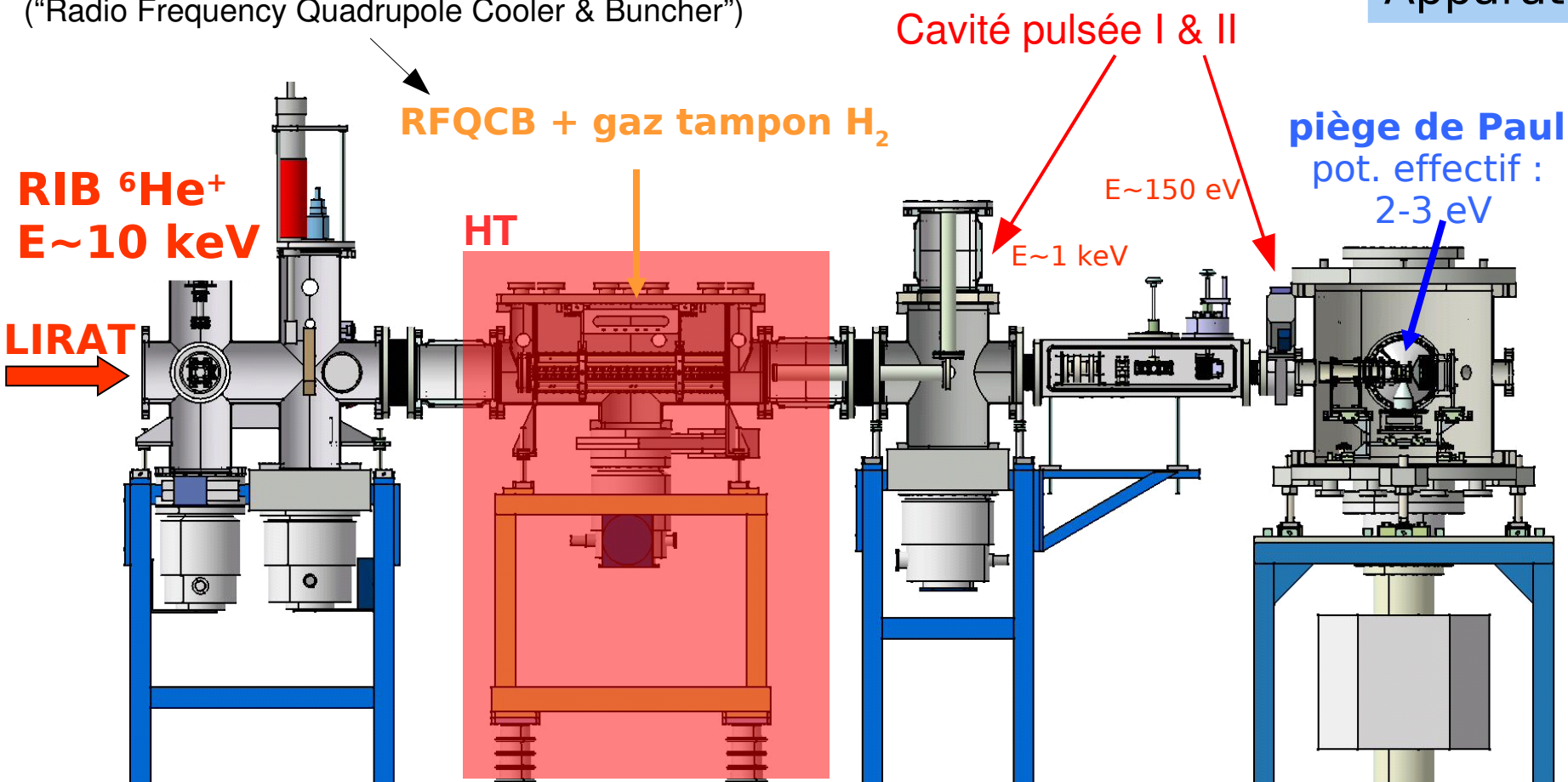
faisceau SPIRAL d'ions ${}^6\text{He}$:
 10-30 keV
 $\Delta E \sim 20 \text{ eV}$
 $80 \pi \text{ mm mrad}$

rate $\sim 10^8 \text{ ions/s}$



Piège de Paul :
 Potentiel effectif :
 2-3 eV,
 Injection par paquets

("Radio Frequency Quadrupole Cooler & Buncher")



Production,
séparation,
transport

Ralentissement,
refroidissement
& regroupement en paquet d'ions

Guidage

Piégeage
& mesure de
désintégration β

$\sim 10^8 \text{ } {}^6\text{He}^+/\text{s}$

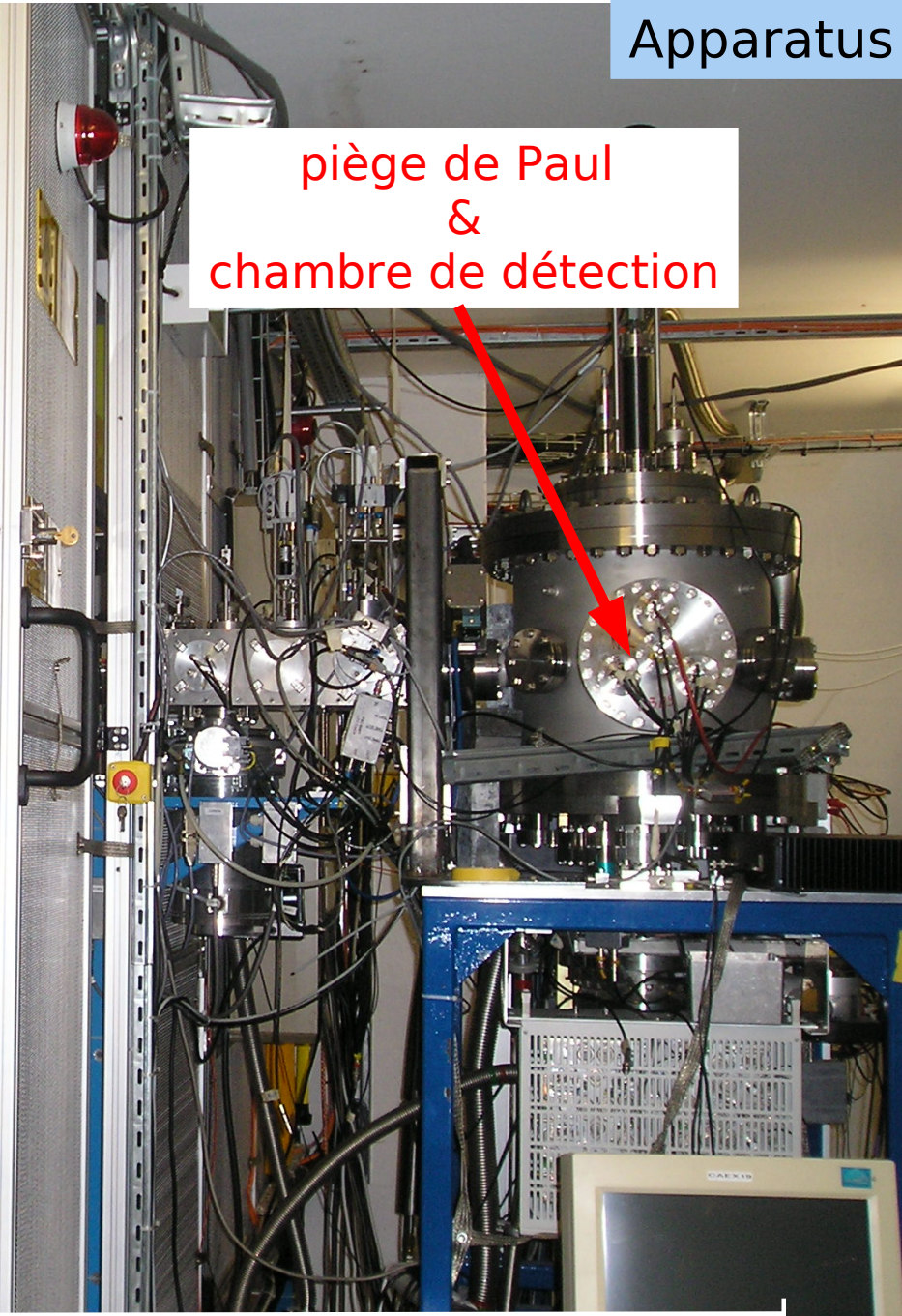
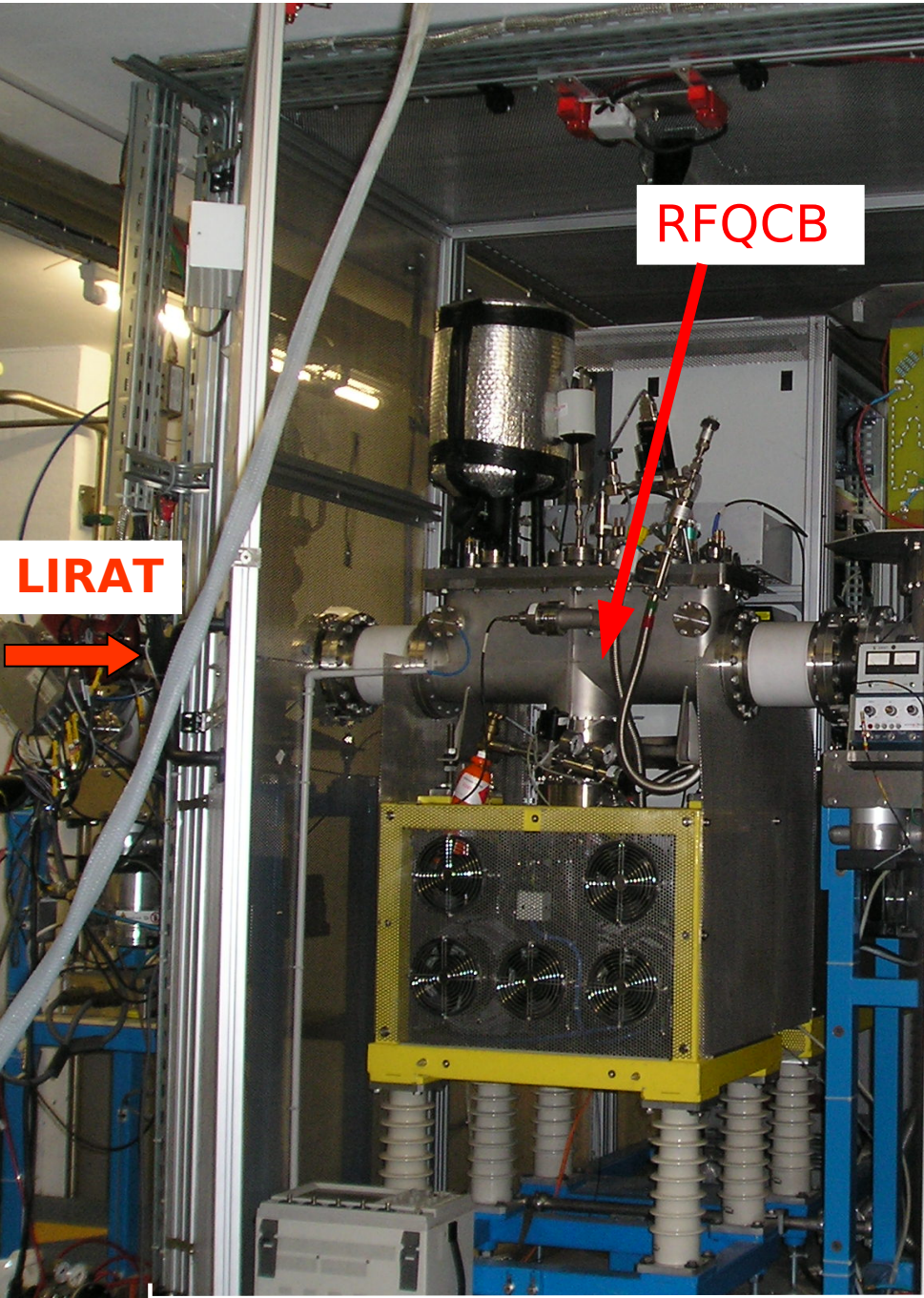


$\sim 10^5 \text{ } {}^6\text{He}^+/\text{paquet}$



$\sim 10^4 \text{ } {}^6\text{He}^+ \text{ piégés}$

(cycle : 100ms)

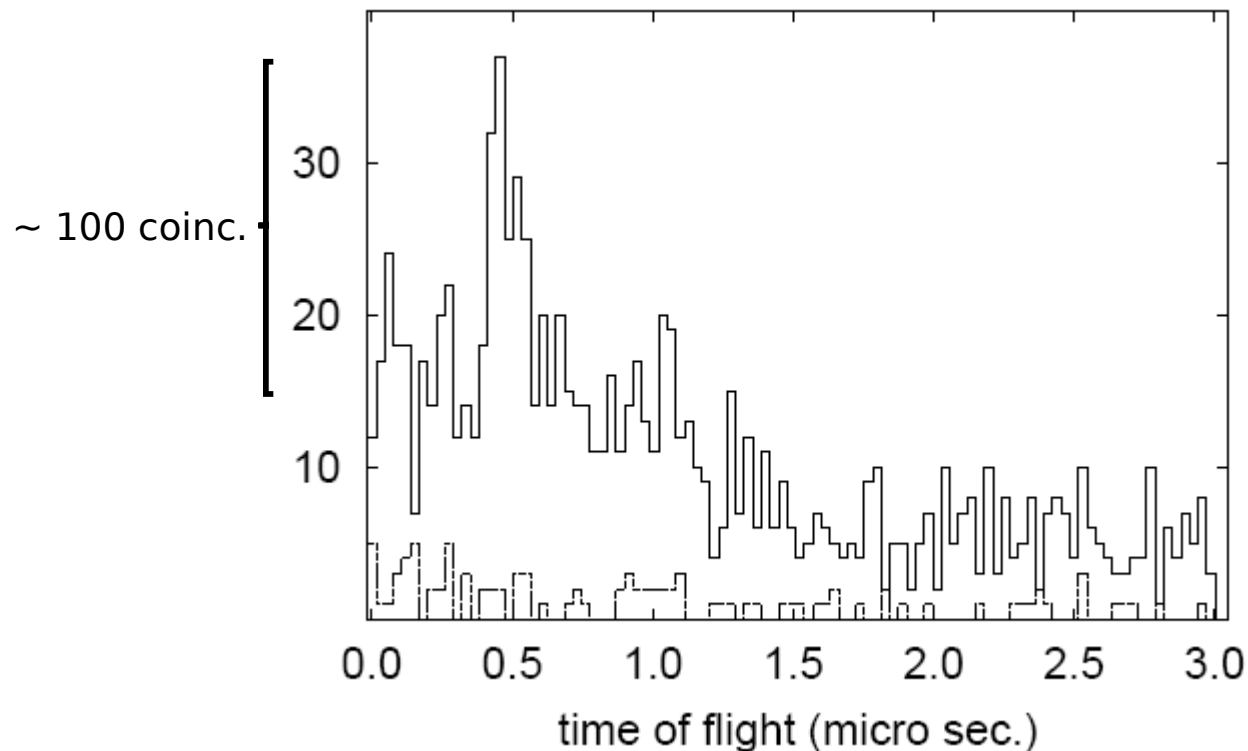


3.5 m

Résultats importants

➤ 2005 : expérience préliminaire au GANIL avec de l' ${}^6\text{He}^+$

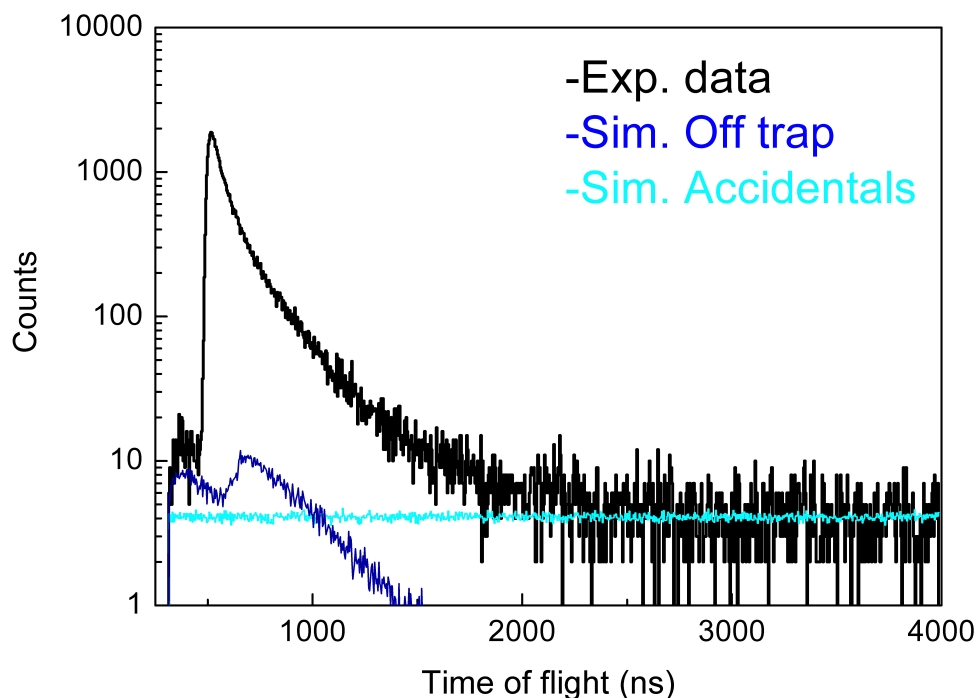
- preuve de principe
- première observation mondiale de coïncidences β -recul depuis un piège à ions



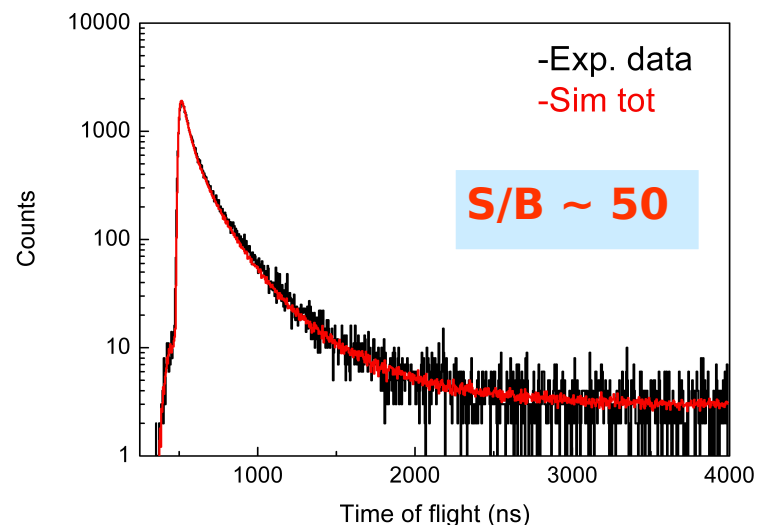
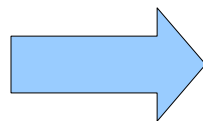
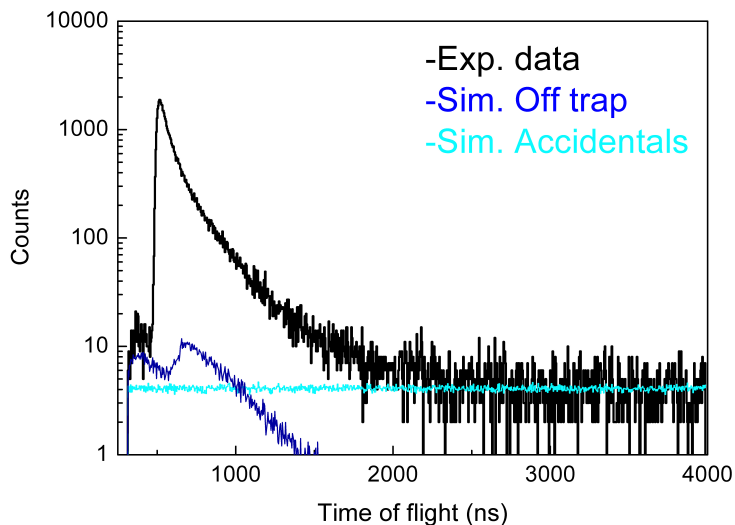
Résultats importants

➤ 2006 : Première prise de données (1 semaine)

- environ 10^5 coincidences $[(\Delta a/a)_{\text{stat}} \sim 2 \text{ \%}]$
- efficacité globale du LPCTrap $\sim 5 \cdot 10^{-3} \text{ \%}$ ($t_{\text{duty}} = 100 \text{ ms}$)
- principaux effets systématiques identifiés
 - bruit de fond
 - imagerie du nuage piégé
 - positions et réponses des détecteurs, ...



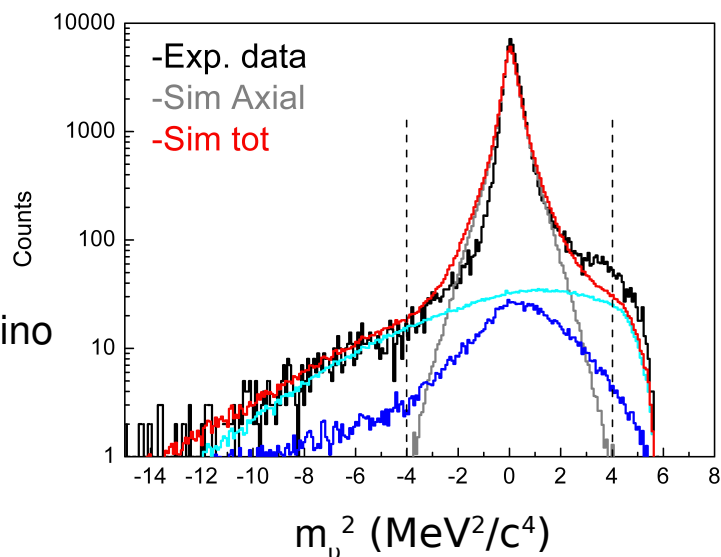
➤ 2006 : Première prise de données (1 semaine)



Phys. Rev. Lett. 101, 212504 (2008)

mass reconstruite du neutrino

$$m_\nu^2 = E_\nu^2 - p_\nu^2$$



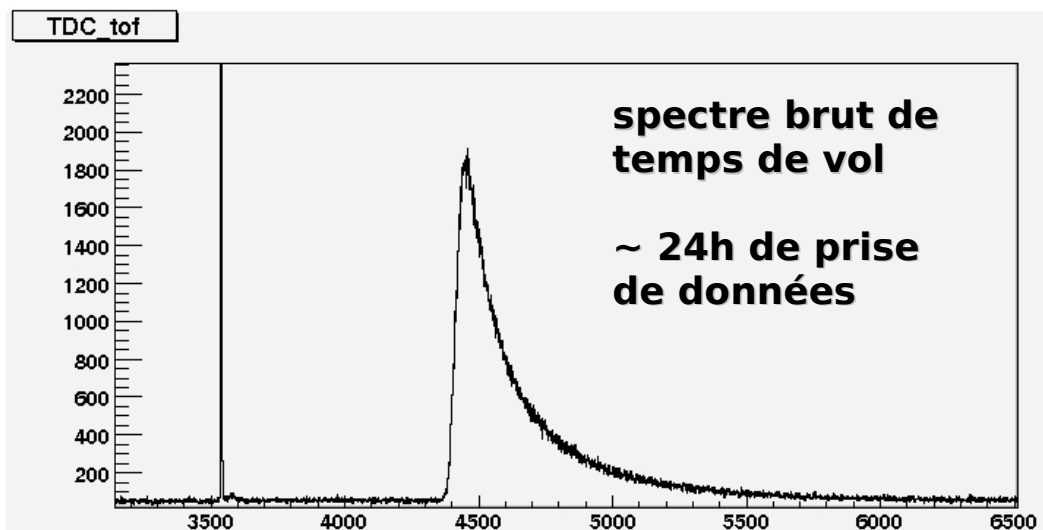
➤ **Octobre 2008** : Deuxième prise de données (1 semaine)

Conditions d'expériences idéales :

- stabilité et intensité du faisceau SPIRAL : $\sim 1,7 \cdot 10^8$ ${}^6\text{He}/\text{s}$
- transmission optimale de l'installation

1 semaine de données -> près de **$4 \cdot 10^6$** coïncidences bruts
(après nettoyage $\sim 50\%$ de réduction)

2 Millions de désintégrations β mesurées



Analyse des données en cours

simulation complète **GEANT4**
de l'environnement du piège

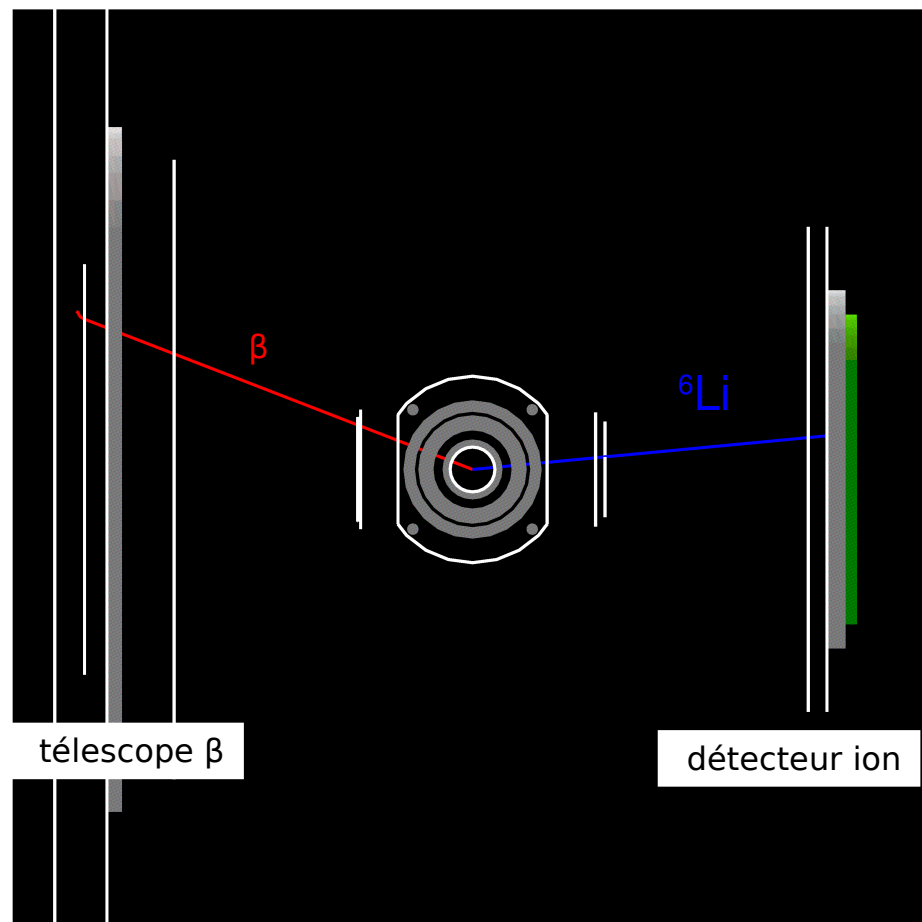
Objectifs : estimation précise des **effets systématiques**

simulation complète **GEANT4** de l'environnement du piège

Objectifs : estimation précise des **effets systématiques**

- position et orientation des détecteurs

(1 mm \leftrightarrow 5 ns @ 1.4 keV)

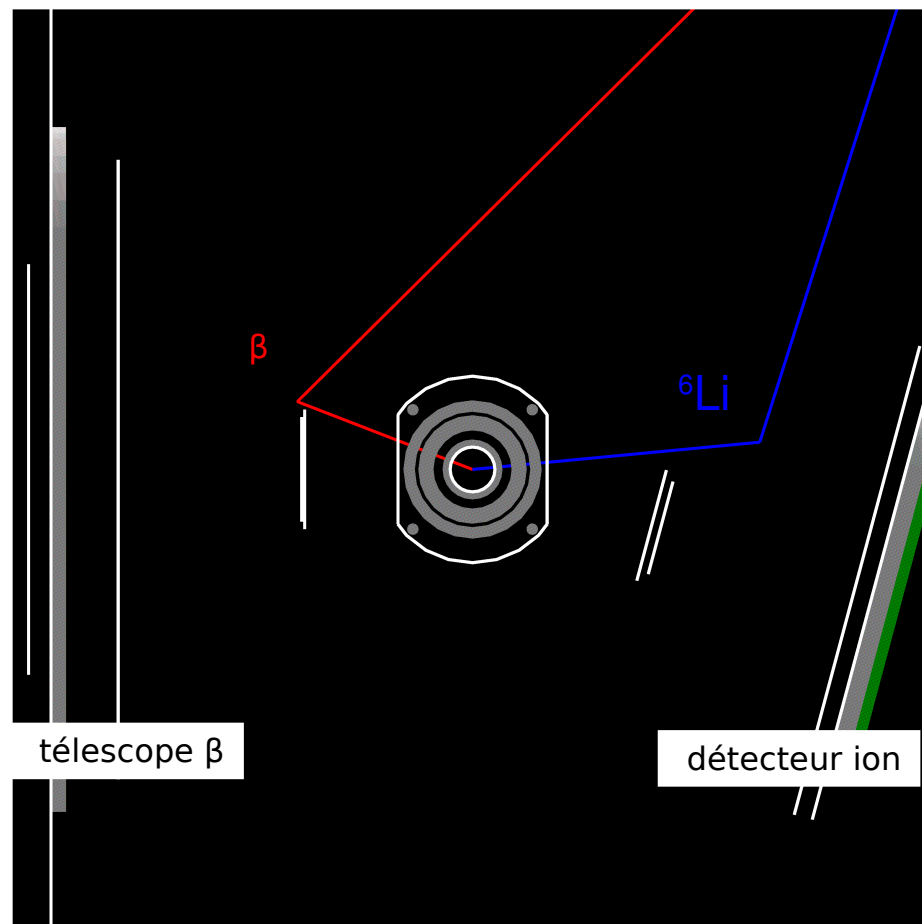


simulation complète **GEANT4** de l'environnement du piège

Objectifs : estimation précise des **effets systématiques**

- position et orientation des détecteurs

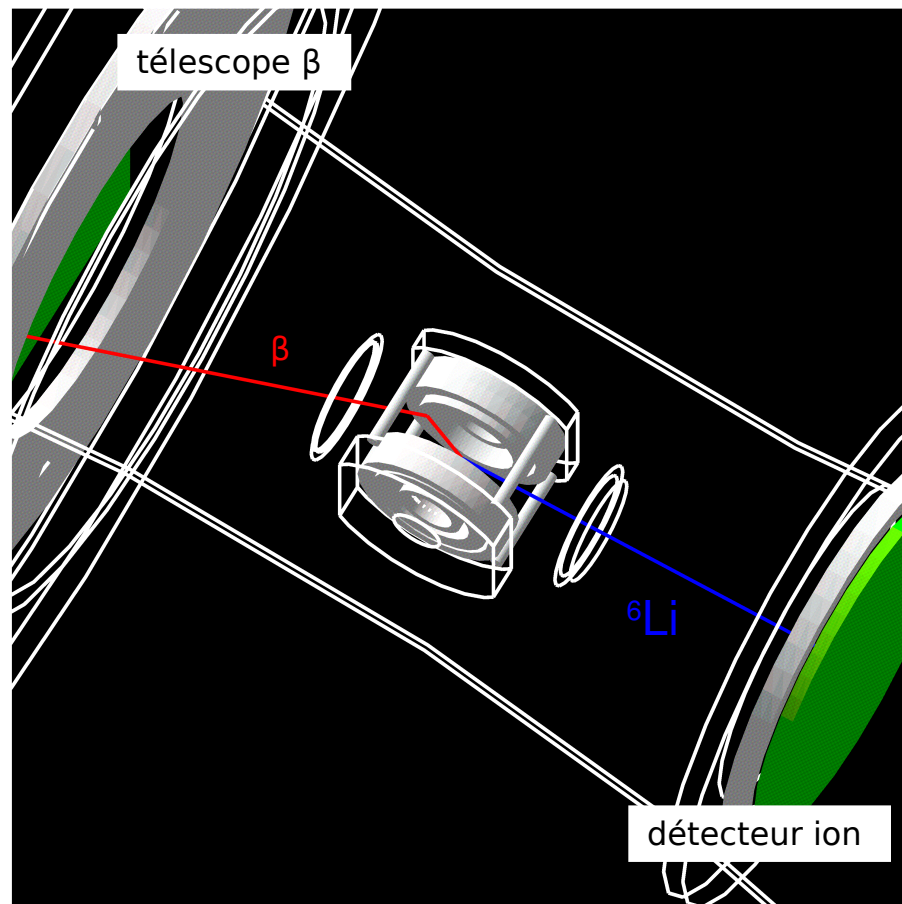
(1 mm \leftrightarrow 5 ns @ 1.4 keV)



simulation complète **GEANT4**
de l'environnement du piège

Objectifs : estimation précise des **effets systématiques**

- diffusion β



simulation complète **GEANT4**
de l'environnement du piège

Objectifs : estimation précise des **effets systématiques**

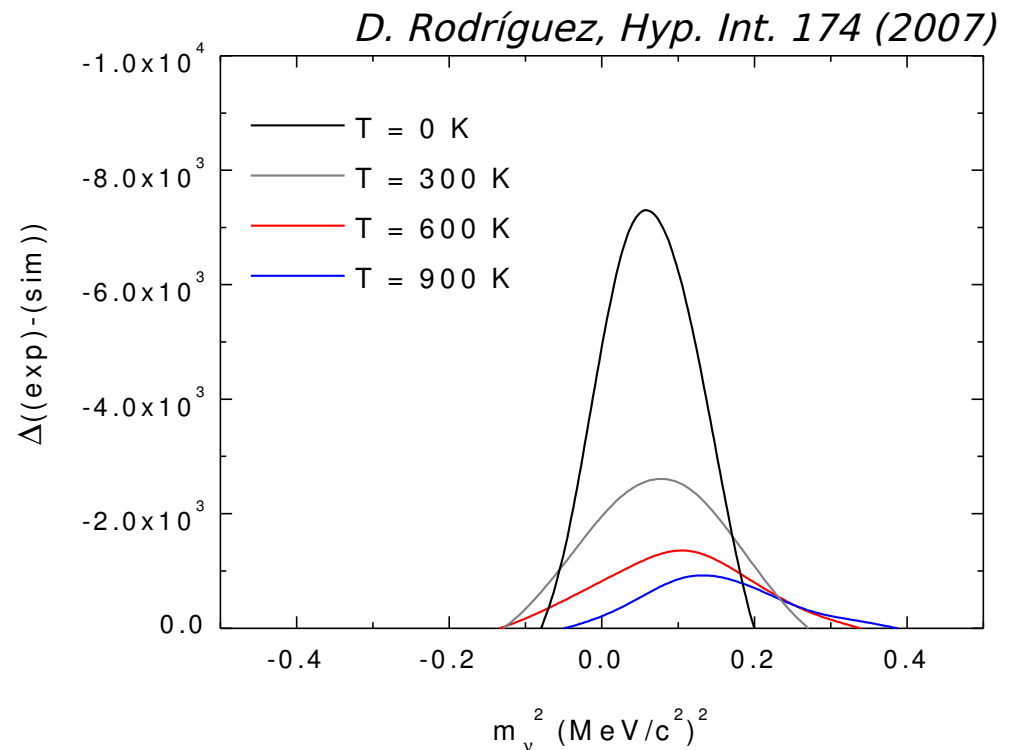
- trajectoire de l'ion de recul dans le champ RF
- sources de fausses coïncidences :
 - implantation des ions sur les détecteurs
 - présence de gaz résiduel He
- β shake-off
- ...

simulation complète **GEANT4** de l'environnement du piège

Objectifs : estimation précise des **effets systématiques**

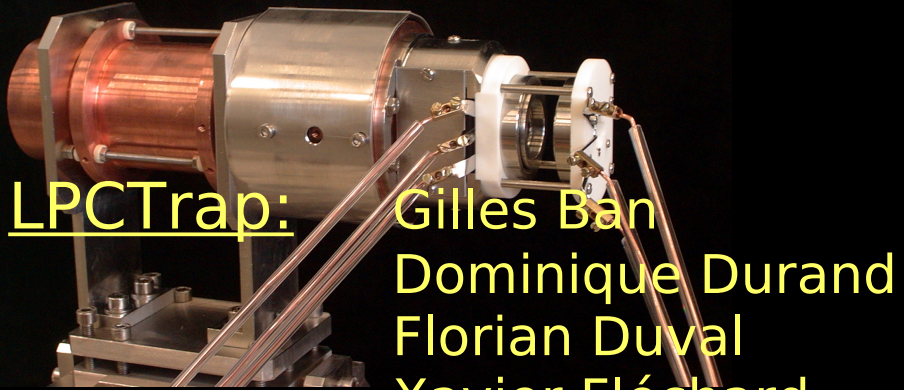
- nuage d'ions réaliste

-> distribution en position et
vitesse (=température)



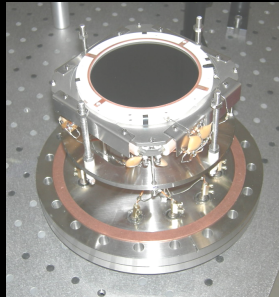
Conclusion

- **fonctionnement “plug & play” de l'installation**
 - LPCTrap disponible pour de futures expériences de précision
- **analyse et simulation en cours....**
 - confiance relative sur l'obtention d'une mesure de a avec la précision souhaitée en fin de thèse



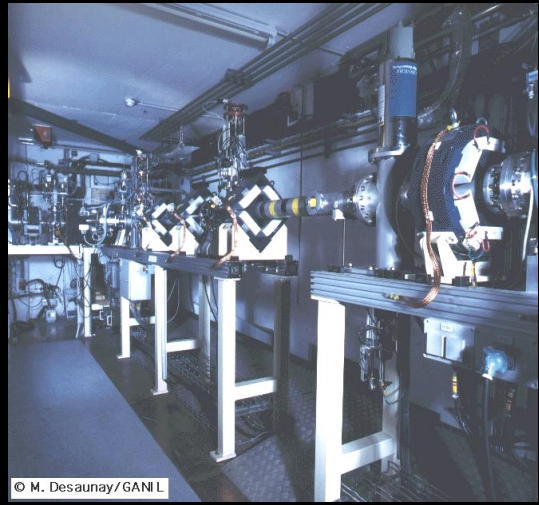
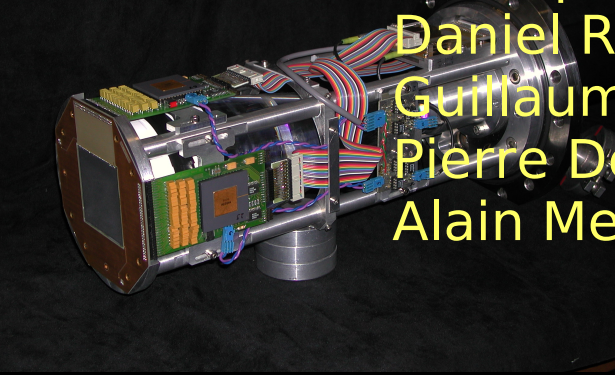
LPCTrap:

Gilles Ban
Dominique Durand
Florian Duval
Xavier Fléchar
Etienne Liénard
François Mauger
Oscar Naviliat-Cuncic
Philippe Velten



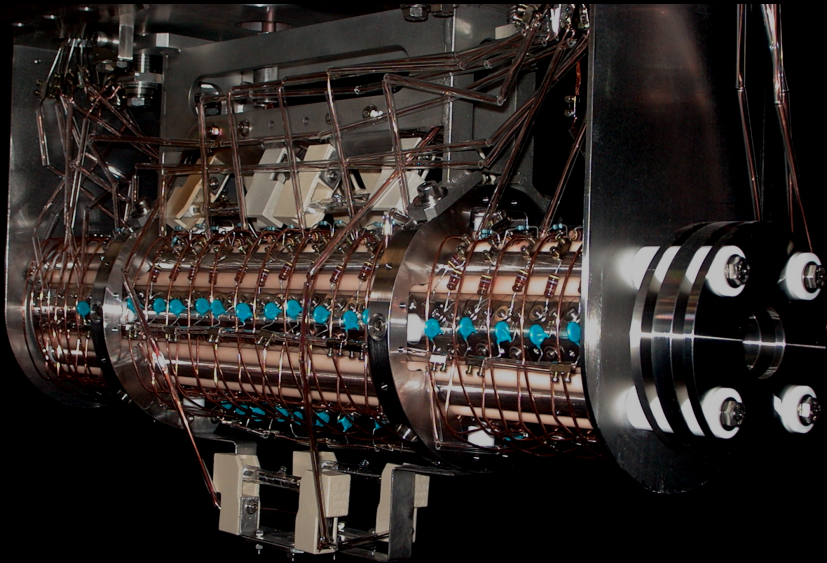
Ex-postdoc/students

Mustapha Herbane
Daniel Rodriguez
Guillaume Darius
Pierre Delahaye
Alain Mery



© M. Desauvay/GANIL

GANIL: Jean-Charles Thomas



➤ 2007-2008 : Optimizations & improvements

- fine tuning of the whole setup with ${}^6\text{Li}^{1+}$ ions (*F. Duval, NIM B (2008)*)
- addition of a vacuum impedance to decrease the background
- measurement of the ion cloud size (*D. Rodríguez, Hyp. Int. 174 (2007)*)
- precise alignment of the detectors (1/10 mm)
- addition of a second recoil detector at 90°
- measurement of the plastic scintillator response function with e-spectrometer (CENG, Bordeaux)

LPCTrap overall performance

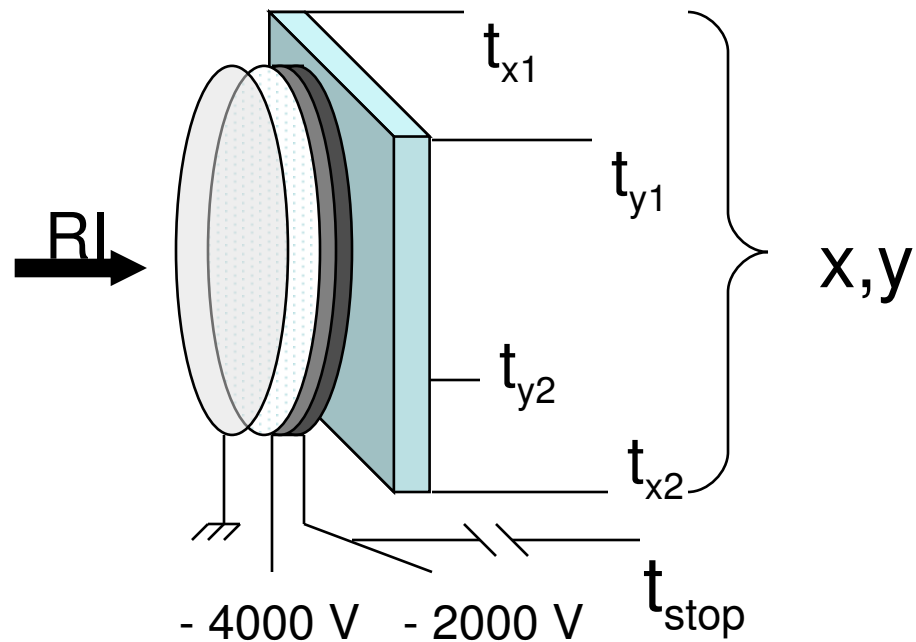
	2006 run	2007/2008 test*	2008 test run
ϵ_{RFQ}	3.5 %	3.3 %	1.25 %
$\epsilon_{\text{transfert}}$	2 %	30 %	20 %
ϵ_{trap}	9 %	20 %	20 %
ϵ_{global}	0.0065 %	0.2 %	0.05 %

* ${}^6\text{Li}$ @ 1 keV

The recoil ion detector

E. Liénard, accepted in NIM A

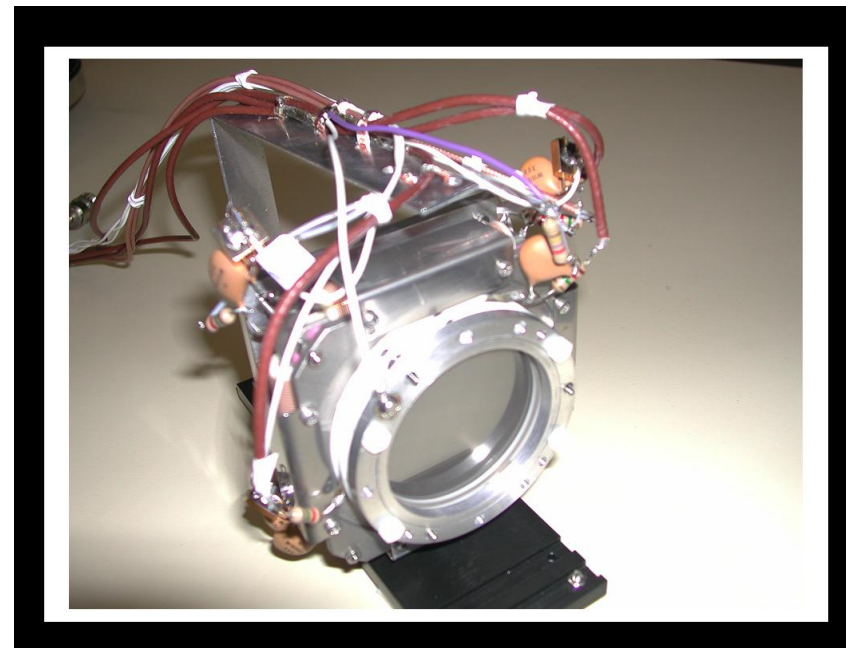
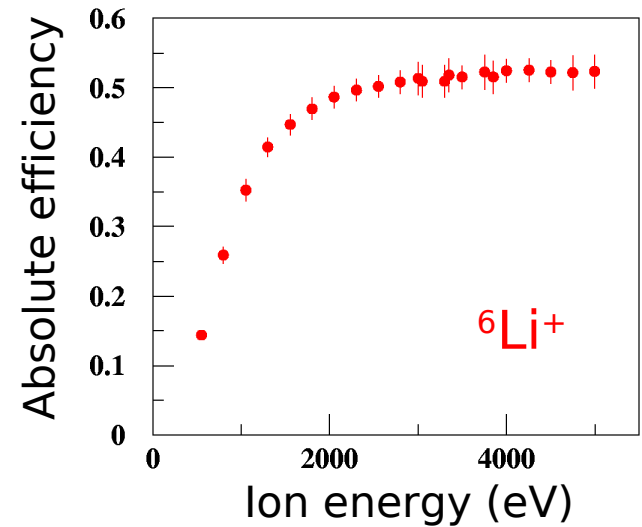
μ CPs + delay lines (*Roentdek*)



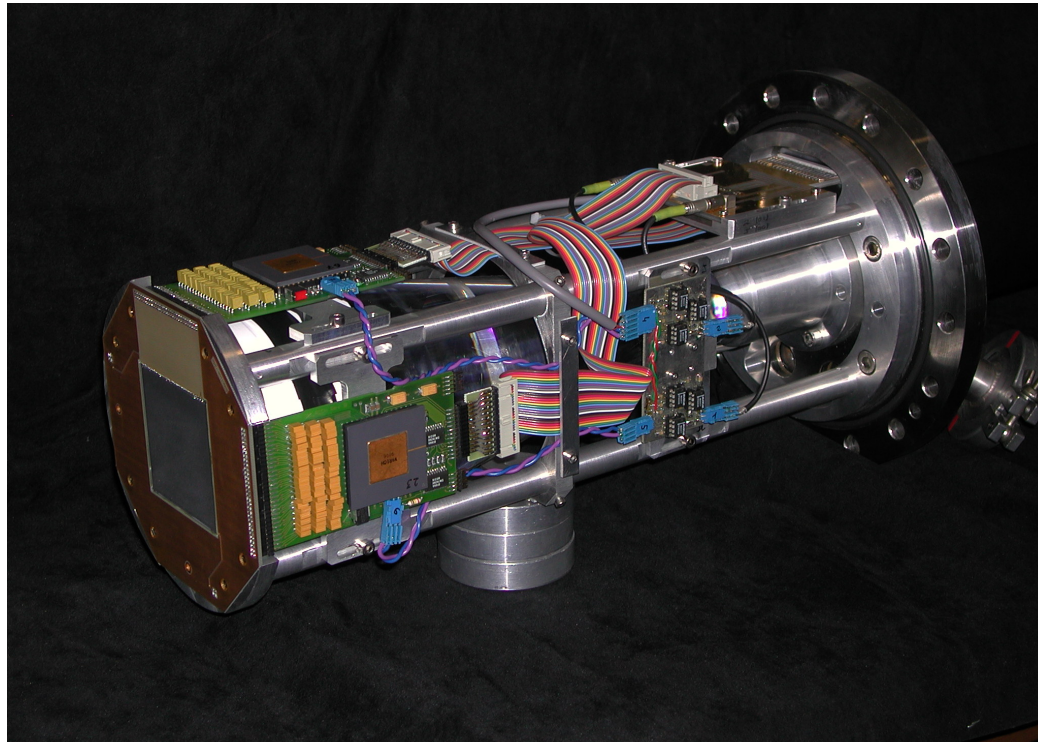
Resolution

- temporal: $\sigma_t < 200$ ps
- spatial: $\sigma_x, \sigma_y \sim 110$ μ m

μ CPs efficiency

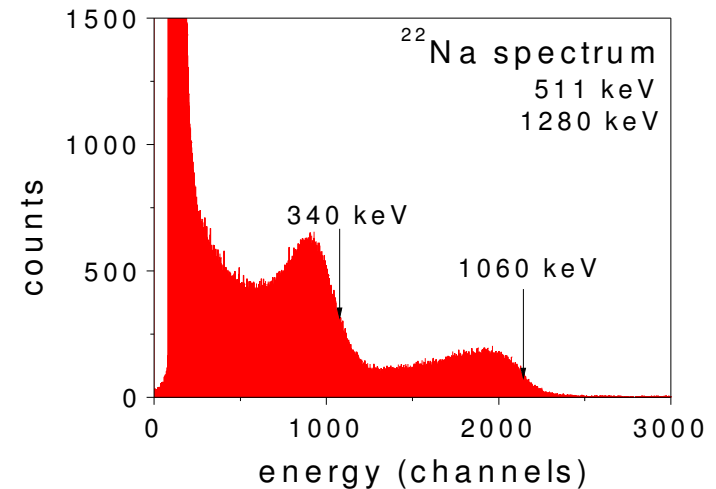


The β telescope



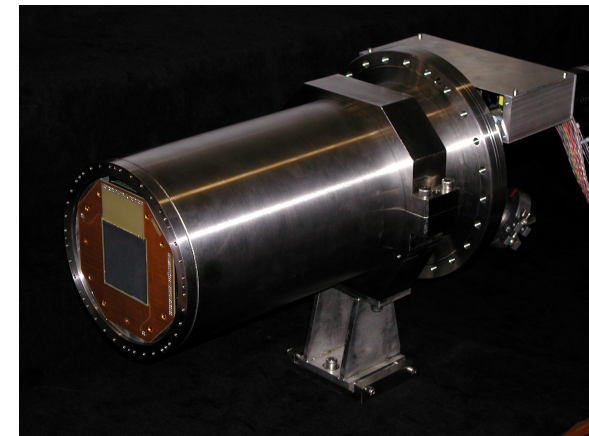
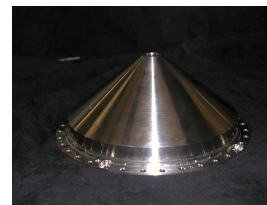
Plastic scintillator

- σ_T 500 ps
- σ_E 10 % at 1 MeV



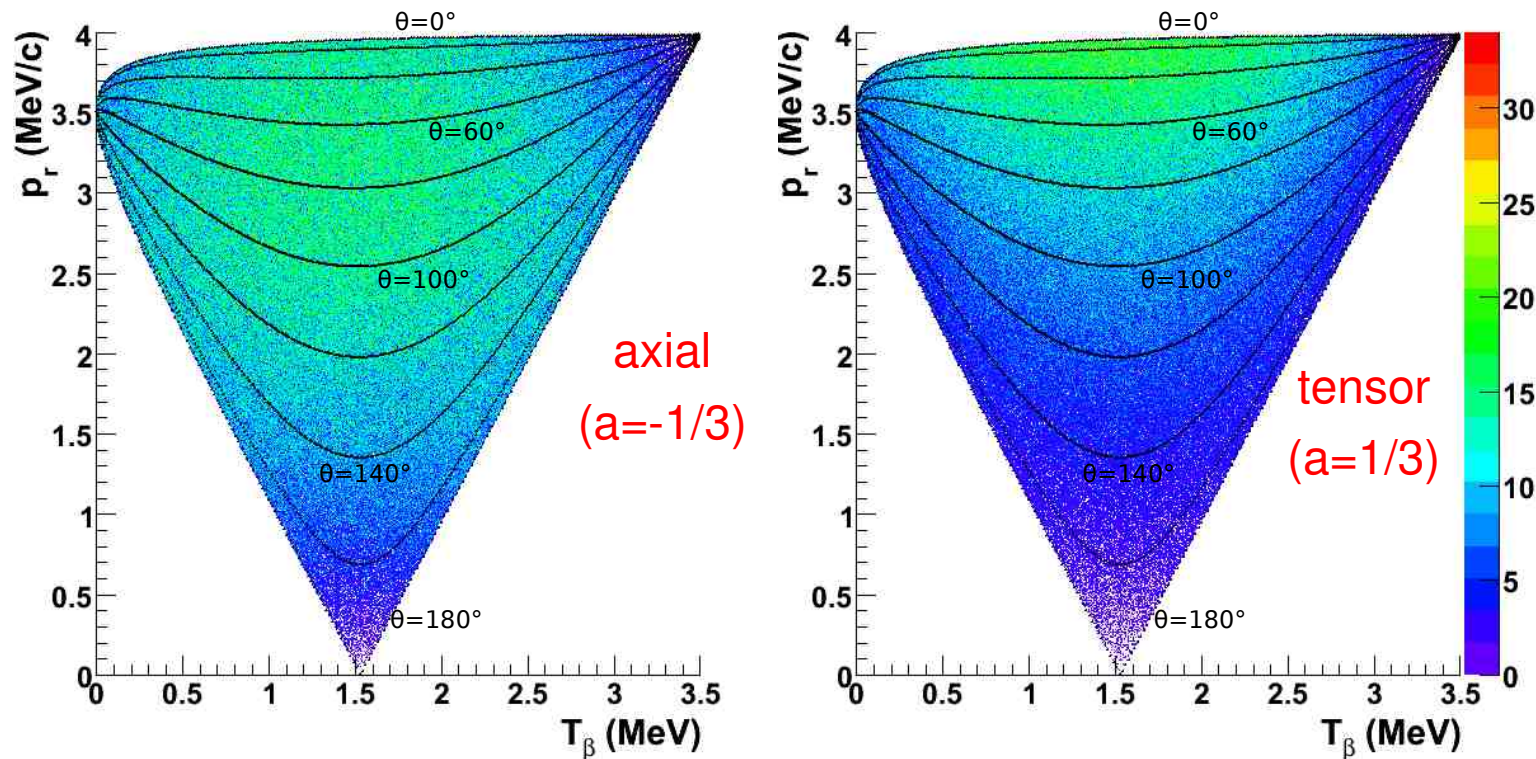
PSD silicon Detector

- 60 x 60 mm x 300 μm
- 1mm spatial resolution
- ~ 10 keV ΔE resolution



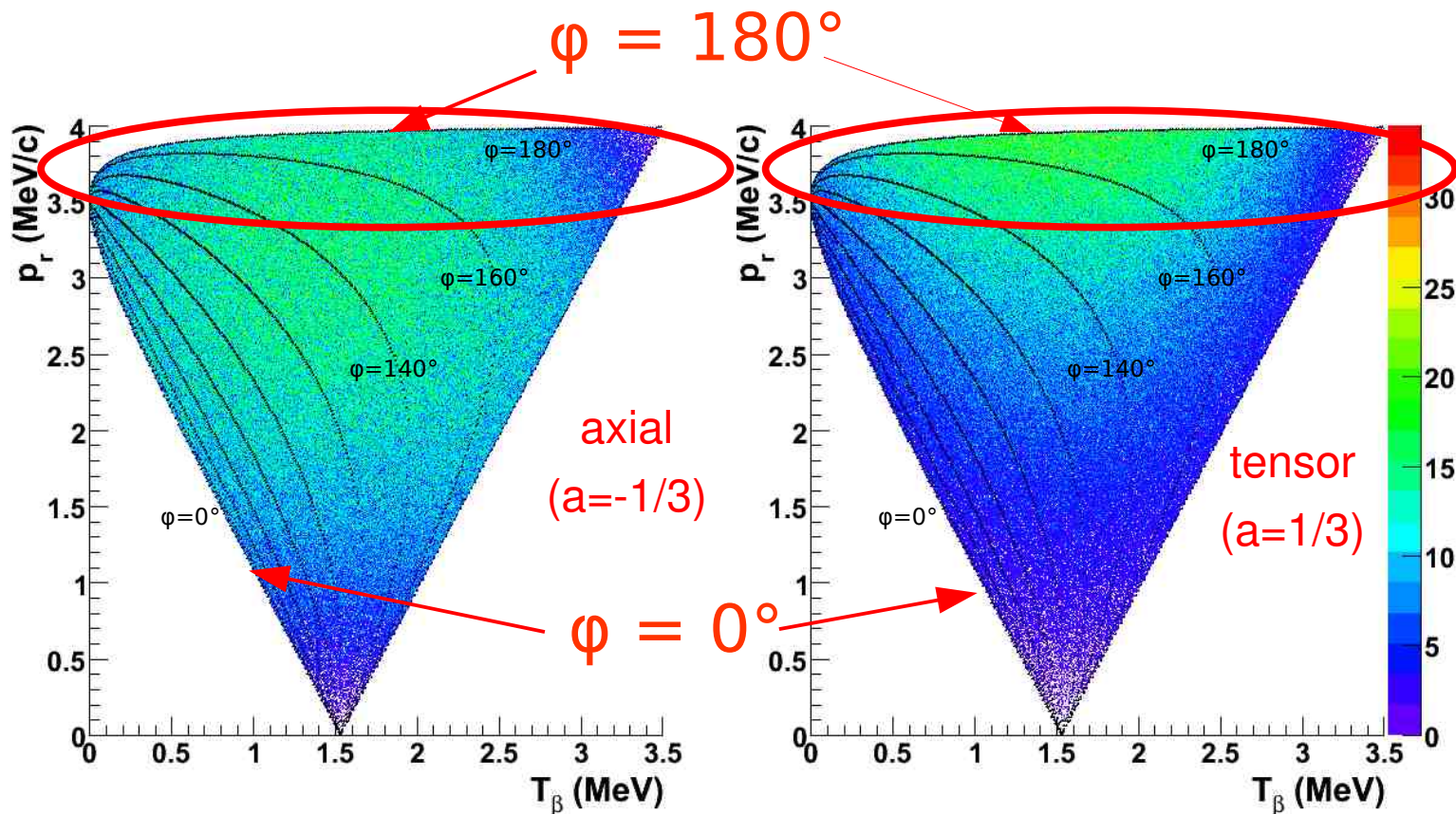
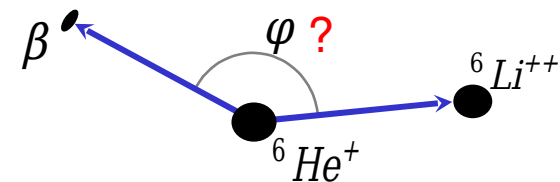
Neutrinos being extremely difficult to detect, how to measure angular correlation ?

$p_r(\theta)$ through decay kinematics



angular correlation inferred from **nuclear recoil**

Where (=at which φ) to measure p_r ?



tensor coupling statistically favoured
in a **back to back geometry**

Overall ${}^6\text{He}$ performance of LPCTrap

	2005	2006	2007/2008*	2008
I_{beam} (ions/s)	$3 \cdot 10^7$	$1\text{-}2 \cdot 10^8$		
t_{cycle} (ms)	100	100	20	200
ϵ_{RFQ}		3.5 %	3.3 %	
ϵ_{PD1}	20 % ?	10 %	75 %	
$\epsilon_{\text{transfert}}$		20 %	40 %	
ϵ_{trap}	0.5 %	9 %	20 %	
ϵ_{total}		0.0065 %	0.2 %	0.05 %
total coinc.	150	10^5	na	7000
measurement time (h)	6	55	na	2
coinc./s	0.007	0.5	4	1

* ${}^6\text{Li}$ @ 1 keV

➤ ^{19}Ne , ^{35}Ar : other candidates available @ LIRAT

β^+ emitters \longrightarrow e- shake off measure

Mirror decays \longrightarrow $\rho = \text{GT/F determination}$
(F + GT)

+ Precise T1/2

$$ft \propto \frac{1}{G_F^2 V_{ud}^2 (1 + \rho^2)}$$

- Alternative to $0^+ \rightarrow 0^+$
- Competitive with n decay

V_{ud} in CKM matrix...

*see arXiv:0809.0994 in <http://arxiv.org/> :
"Determination of $|V_{ud}|$ from nuclear mirror
transitions"
by O. Naviliat & N. Severijns*

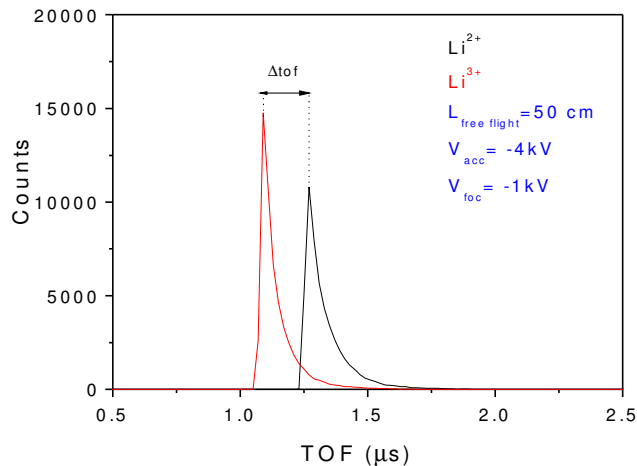
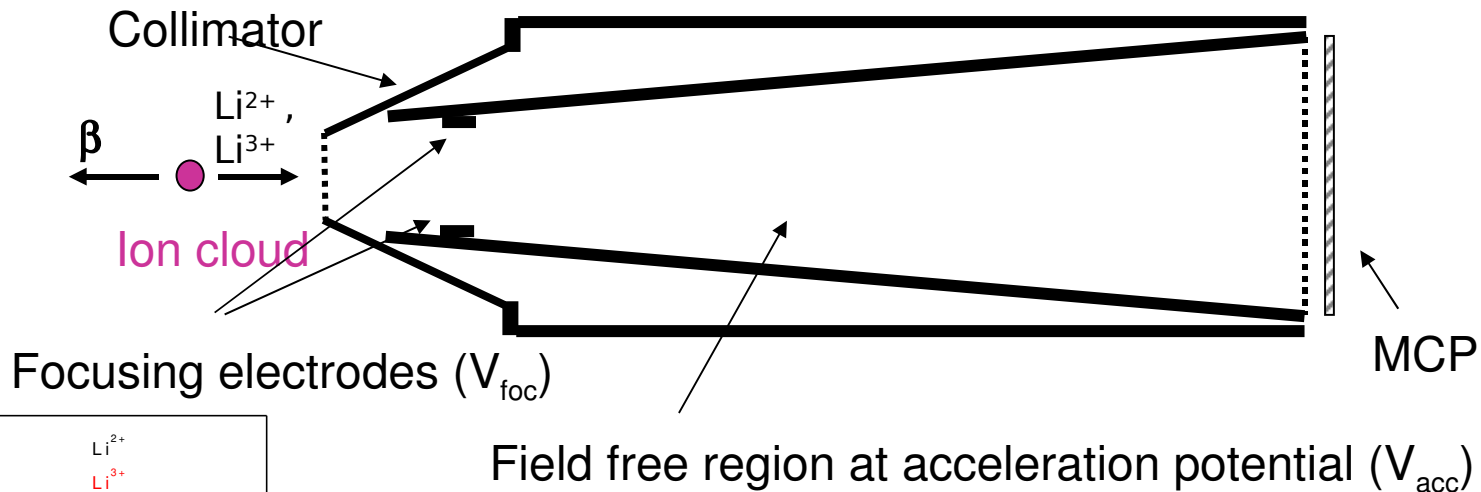
Outlook

➤ ${}^6\text{He}$: measurement of e- shake off (ionization of daughter nucleus)

-> Theoretical estimation $\sim 2\%$

-> Adding an acceleration voltage + a longer free field region

➡ Li^{2+} and Li^{3+} identification by time of flight



Tests of the standard electroweak model in beta decay

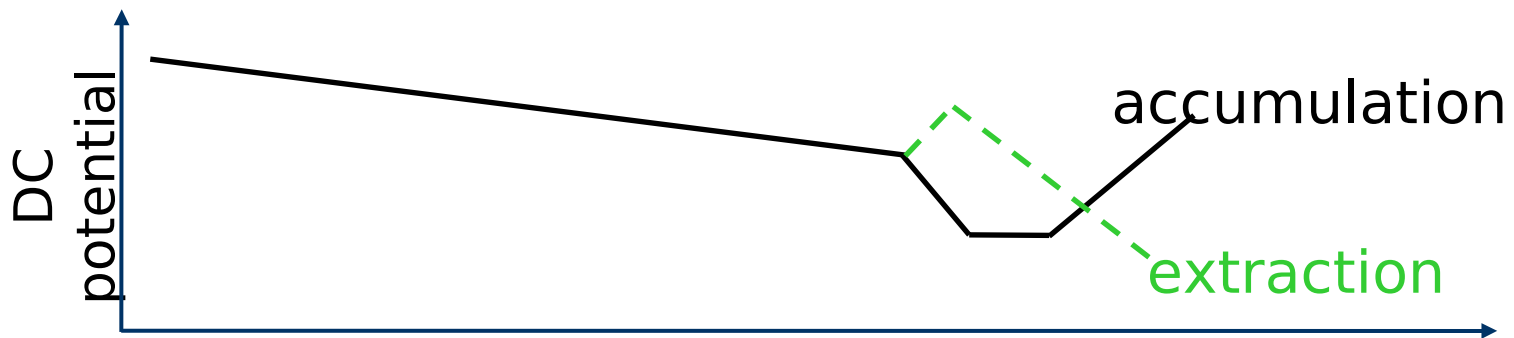
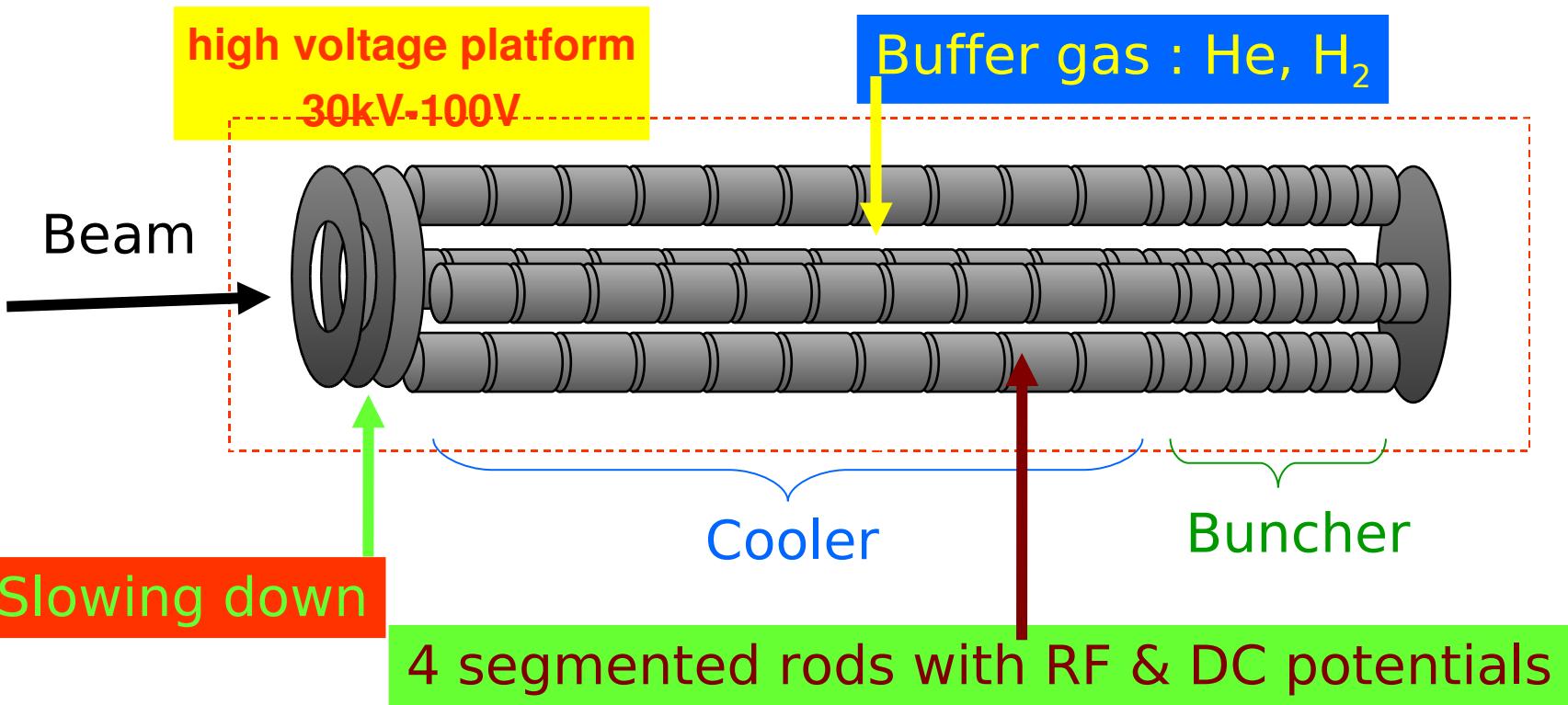
N. Severijns, M. Beck and O. Naviliat-Cuncic

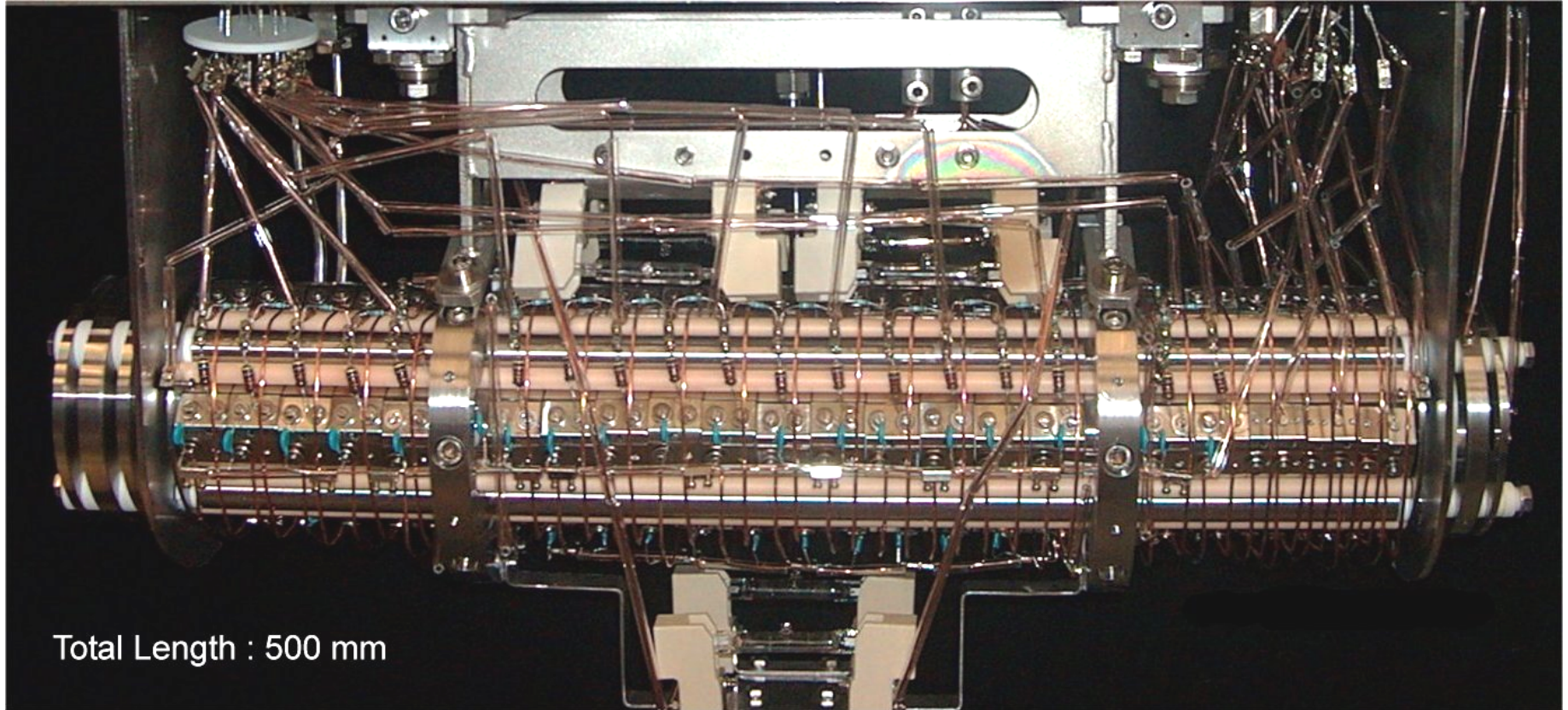
Reviews of Modern Physics (2006)

International context

isotope	method	result/goal	Publi	group/location
^{32}Ar (F)	"Doppler"	$a_F = 0.9989(52)(39)$ (fully re-analysed)	1999	CENPA / Isolde
$^{38\text{m}}\text{K}$ (F)	MOT-coinc	$a_F = 0.9981(30)(37)$	2005	SFU / Triumf
^{21}Na (mixed)	MOT-coinc	$a_m = 0.5243(92)$ (3.6 σ from SM)	2004	Berkeley / LBNL
^{35}Ar (mixed-F)	Penning-recoil	$\Delta a_F/a_F = 5 \cdot 10^{-3}$	/	Leuven / Isolde
^6He (GT)	Paul-coinc	$\Delta a_{\text{GT}}/a_{\text{GT}} = 5 \cdot 10^{-3}$	/	LPC / GANIL

The RFQ Cooler - buncher





Total Length : 500 mm

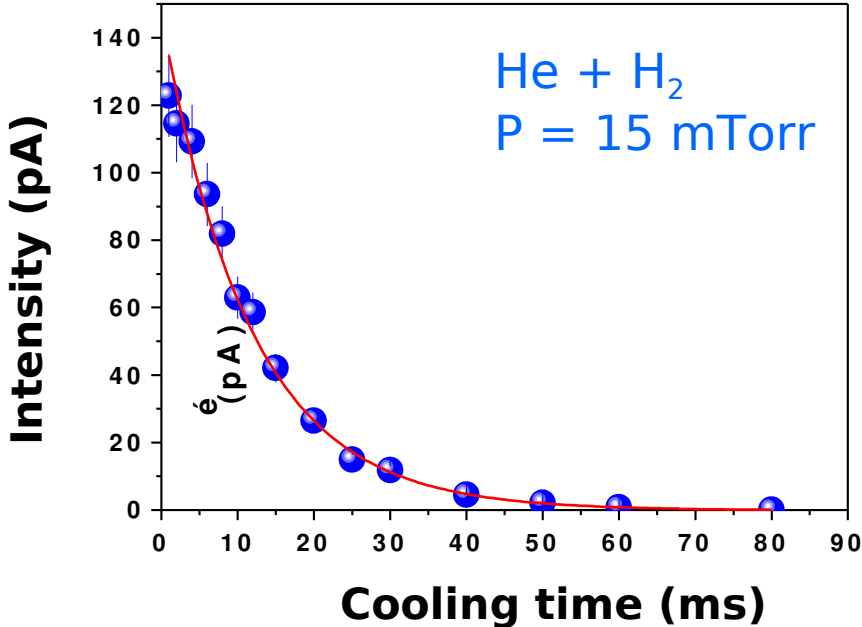
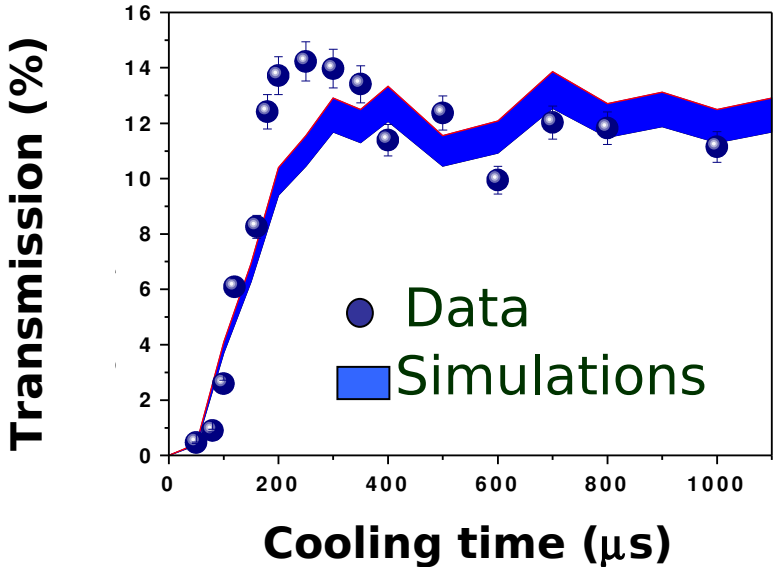
Parameters

RF : f : 0.8 to 2 MHz
 V_0 : 100 to 250 Volts
Pressure : some mTorr

Results

G. Ban, NIM A (2004)

He⁺ / H₂

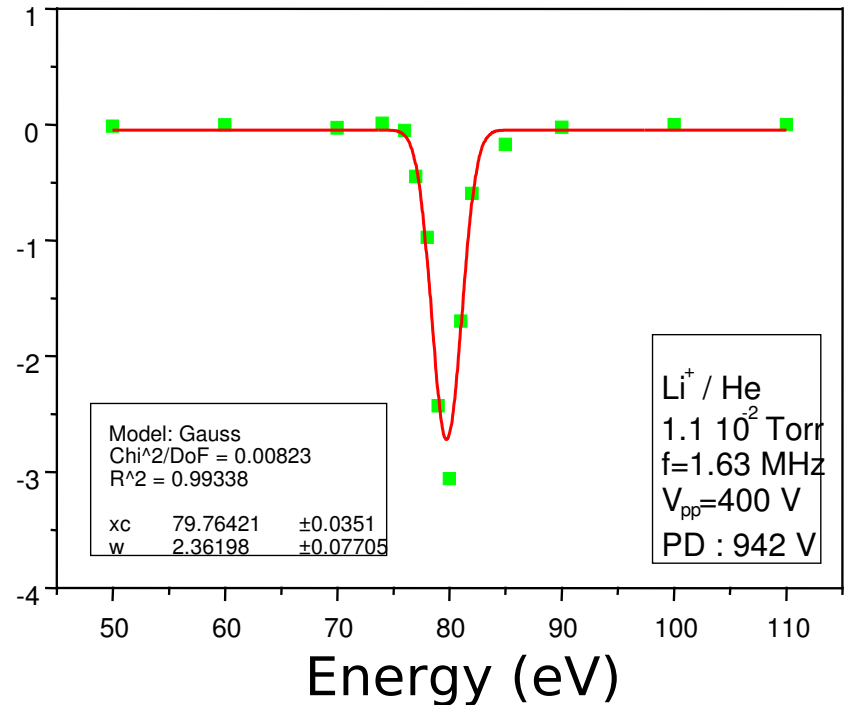
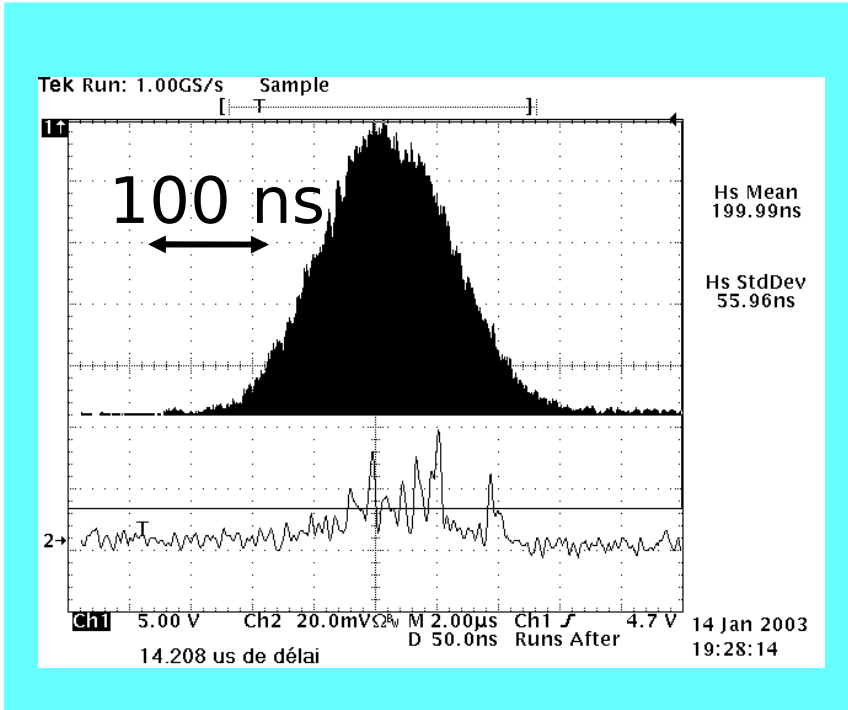


- Losses :
- RF heating
 - Charge exchange

→ ~ 10 % transmission
Cooling time He⁺ > 0.5 ms
Lifetime He⁺ ~ 20 ms

Time width of the bunches

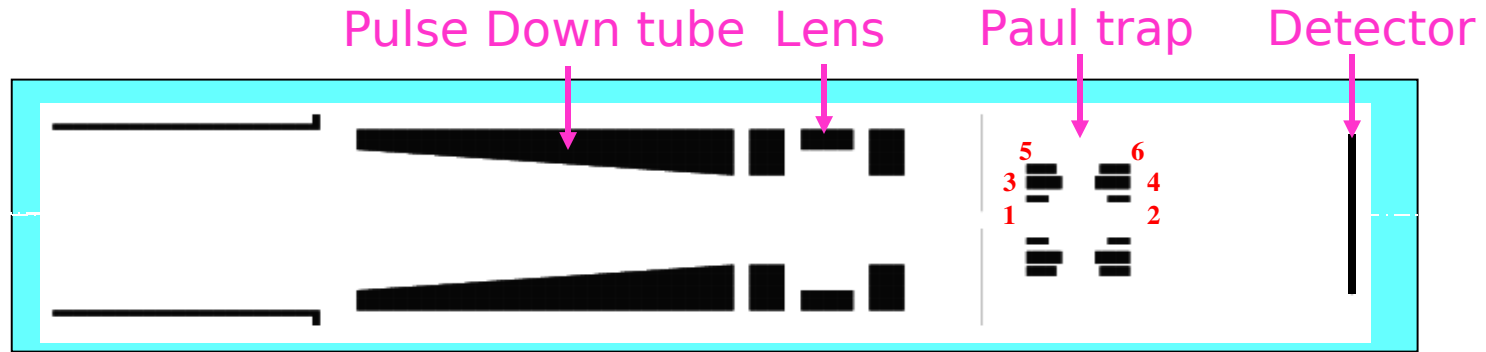
Longitudinal energy dispersion



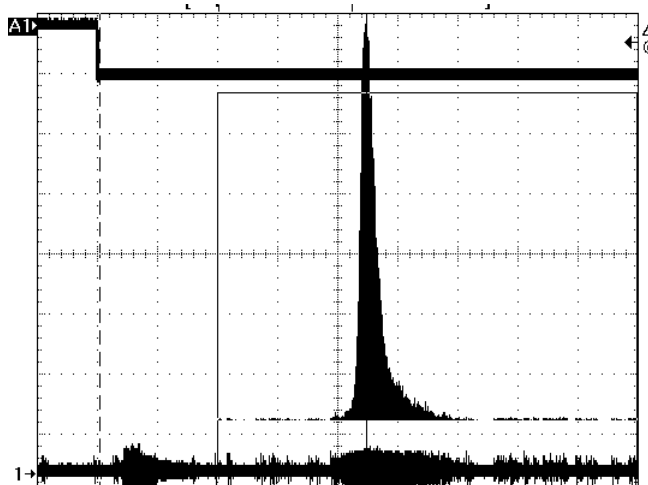
FWHM ~ 100 ns, 3 eV @ 1 keV

Longitudinal emittance 0.3 eV·μs

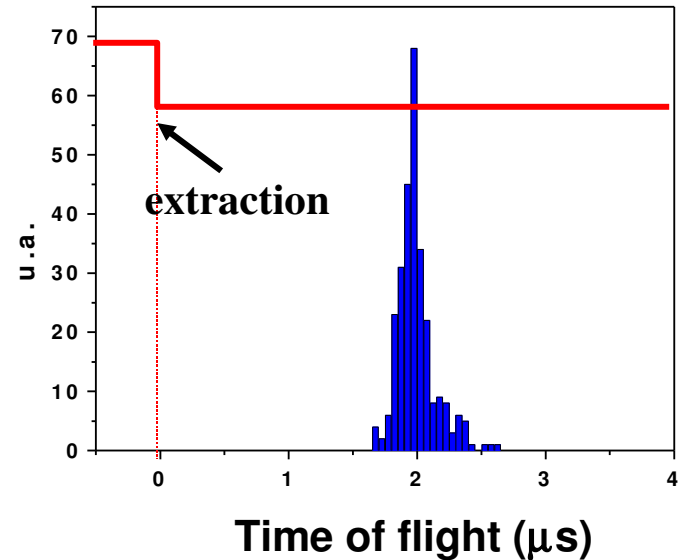
From the RFQ to the Paul trap



Experimental time of flight



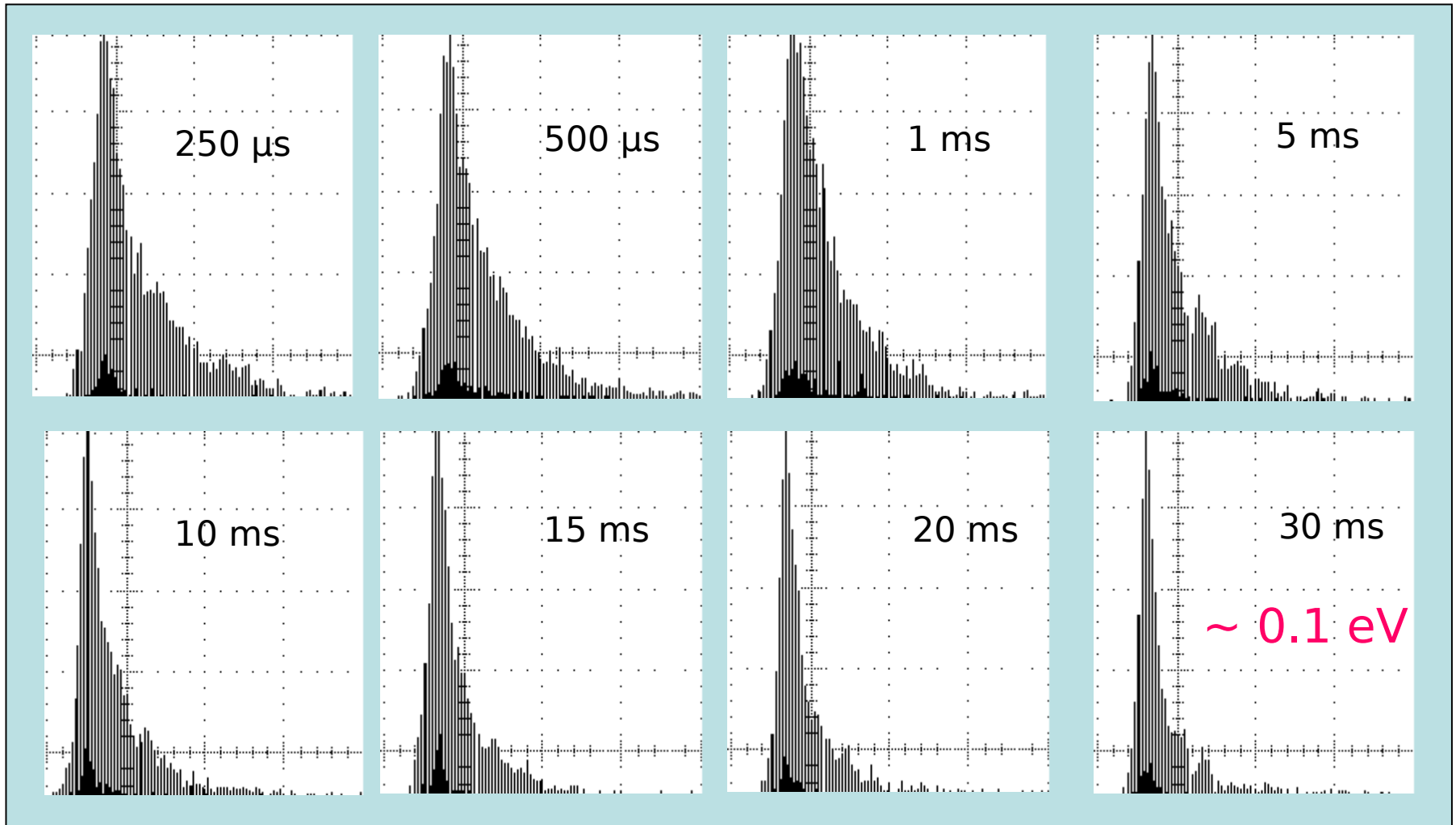
Simulated time of flight



- Cooled ${}^6\text{Li}^+$ ions trapped for several 10 ms
- Efficiency $\approx 20\%$

Evidence of cooling with residual H₂

$$P_{\text{H}_2} \sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ torr}$$

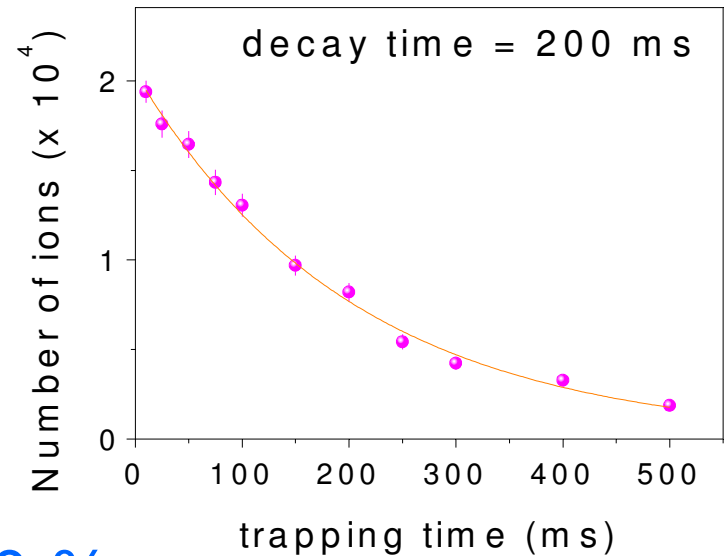


Time base : 200 ns/div.

- Life Time: 200 ms
- Capacity: up to 20000 ions

&

- Trapping efficiency: up to 20 %
- Evidence for cooling



In excellent agreement with simulations



Fulfills requirements for ${}^6\text{He}$ experiment