



SGCN

Secrétariat général du Comité national



COMITE NATIONAL DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**CONSEIL SCIENTIFIQUE DE L'INSTITUT NATIONAL DE PHYSIQUE NUCLEAIRE ET DE PHYSIQUE  
DES PARTICULES (IN2P3)**

**Réunion plénière du  
jeudi 26 octobre - Amphi Marie Curie - et vendredi 27 octobre 2017 - salle Pierre Auger  
Campus Michel-Ange - CNRS - PARIS**

*Etude de l'interaction faible*

Etienne Liénard

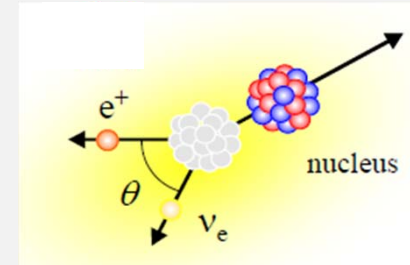
*LPC Caen, Université de Caen Normandie*



# Décroissance $\beta$ nucléaire : laboratoire pour tester le Modèle Standard

Décroissance  $\beta$  nucléaire = processus semi-leptonique gouverné par l'interaction faible (IF)

⇒ outil possible pour étudier l'IF



## Comment ?

Mesures de précision des

- corrélations entre les particules (impulsions ou impulsions et spins)
- valeurs "ft"

dans les  
décroissances  
pures (F ou GT)  
& miroirs  
(F + GT)

## Pourquoi ?

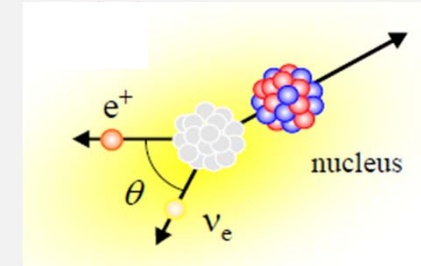
Structure & conditions du MS	Tests possibles
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Théorie V-A (<math>W^\pm, Z_0</math> = particules médiatrices) ⇒ <math>C_{\text{Scalaire}} = C_{\text{Tenseur}} = C_{\text{Pseudoscalaire}} = 0</math></li> <li>• Violation Maximale de Parité (MPV): <math>C_i = C_i'</math></li> <li>• Invariance ss Renv. Temps (TRI): <math>C_i</math> réelles</li> <li>• Conservation du Courant Vectoriel (CVC)</li> <li>• 3 familles de particules fondamentales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• "Courants" exotiques au-delà de V-A ⇒ nouvelles particules méd. (leptoquarks...)</li> <li>• Violation des symétries fondamentales : courants droitiers, violation de CP,...</li> <li>• Hypothèse CVC, unitarité de la matrice CKM (détermination précise de <math>V_{ud}</math>)</li> </ul>

# Décroissance $\beta$ nucléaire : laboratoire pour tester le Modèle Standard

- **Corrélations accessibles aux expériences**

1. Entre les impulsions de particules

$$a \frac{\vec{p}_e \cdot \vec{q}}{E_e E_\nu} \quad \text{conservation P, T}$$



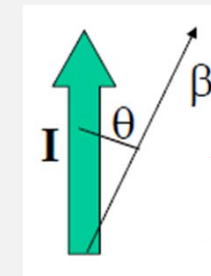
F	GT	Miroirs
-1 < a ≤ 1 Courants <b>Scalaire</b> s	-1/3 ≤ a < 1/3 Courants <b>Tensoriels</b>	a(ρ) où ρ = GT/F

*Test de la théorie V - A*

*dans le cadre V - A  
détermination de ρ*

2. Entre impulsion & spin

$$A \frac{\vec{J} \cdot \vec{p}_e}{JE_e} \quad \begin{array}{l} \text{conservation T} \\ \text{change de signe sous P} \end{array}$$



F	GT	Miroirs
Pas de sens	A ≠ 0 ⇒ <b>violation P</b>	A(ρ)

*Test de MPV*

*dans le cadre V - A  
détermination de ρ*

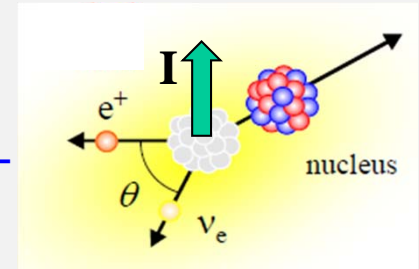
# Décroissance $\beta$ nucléaire : laboratoire pour tester le Modèle Standard

- Corrélations accessibles aux expériences

3. Entre impulsions & spin

$$D \frac{\vec{J} \cdot (\vec{p}_e \times \vec{q})}{J(E_e E_\nu)}$$

conservation P  
change de signe sous T



F	GT	Miroirs
Pas de sens	Pas de sens	$D \neq 0 \Rightarrow$ violation T

*Recherche de nouvelles sources de violation de CP*

- Mesures précises des valeurs "ft"  
( $M$ ,  $T_{1/2}$ ,  $BR$ ,  $\rho$ )

$$ft \propto \frac{1}{C_V^2 |M_F|^2 + C_A^2 |M_{GT}|^2} \propto \frac{1}{C_V^2 |M_F|^2 (1 + \rho^2)}$$

F	GT	Miroirs
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>C_V</math>, CVC, <math>V_{ud}</math>, CKM</li> <li>• <math>b_F</math></li> </ul>	<del>CAC</del> $\rightarrow M_{GT}$ $\Rightarrow$ modèles Phynu	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>C_V</math>, CVC, <math>V_{ud}</math>, CKM</li> <li>• <math>b_{GT} / b_F</math></li> </ul>

*Test de CVC & unitarité CKM*

Paramètre d'interférence de Fierz

# Décroissance $\beta$ nucléaire : laboratoire pour tester le Modèle Standard

- Cas spécial : le terme de Fierz

$$b \frac{m_e c^2}{E_e}$$

*toujours présent, pas de corrélation*  
conservation de P, T

$$b \propto C_{exotic} \times C_{standard} = 0 \text{ dans SM!} \Rightarrow \text{test de la théorie V - A}$$

## Observables sensibles à $b$ :

1. Distribution en énergie cinétique des  $\beta$

$$N(p_e) \propto W(p_e) \left(1 + b \frac{m_e c^2}{E_e}\right)$$

*nécessite une détection "propre" des particules  $\beta$*

2. Corrélations  $\beta$ - $\nu$

$$N(p_e, \theta) \propto W(p_e) \xi \left(1 + \tilde{a} \frac{v_e}{c} \cos(\theta)\right)$$

$$\tilde{a} = \frac{a}{1 + b \langle m_e / E_e \rangle}$$

*$a \propto |C_{exotic}|^2$  &  $b \propto C_{exotic} \Rightarrow b$  accroît la sensibilité du paramètre de corrélation!*

3. Valeurs  $Ft$

$$Ft \propto \left(1 + \langle m / E \rangle b\right)^{-1}$$

*études soutenues des décroissances pures  $F \rightarrow$  contraintes excellentes sur  $b_F$*

## Développement de LPCTrap : contexte en 1997

- *Couplages exotiques en interaction faible : situation des mesures de "a"*

- GT :  ${}^6\text{He}$  (Johnson *et al.* PRC 1963)  $\rightarrow a_{GT} = -0.3308$  (30)
- F :  ${}^{32}\text{Ar}$  (projet Adelberger *et al.*)  $\rightarrow a_F = 0.9989$  (65) publié en 1999  
 ${}^{38m}\text{K}$  (projet Gorelov *et al.*)  $\rightarrow a_F = 0.9981$  (48) publié en 2005

[  $\rightarrow$  limites sur les courants :  $C_T/C_A < 9\%$      $C_S/C_V < 7\%$  ]

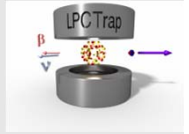
- *Projet SPIRAL @ GANIL*

- Faisceaux légers riches en n :  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^{18}\text{Ne}$ ,  ${}^{19}\text{Ne}$ ,  ${}^{32}\text{Ar}$ ,  ${}^{35}\text{Ar}$ , ...  
avec intensités élevées
- Premier faisceau en 2001



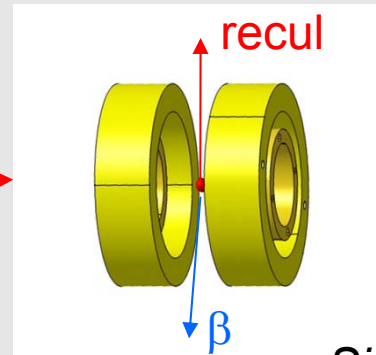
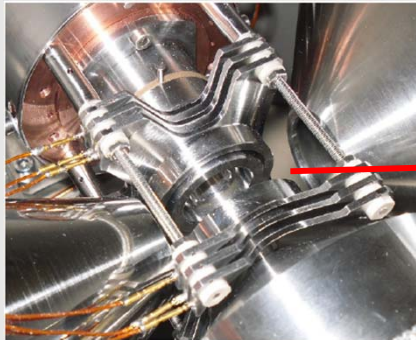
*But de LPCTrap : améliorer la précision sur  $a_{GT}$  en utilisant des technologies modernes*

# Le dispositif LPCTrap



- Source radioactive confinée dans un piège de Paul transparent

faisceau ↘

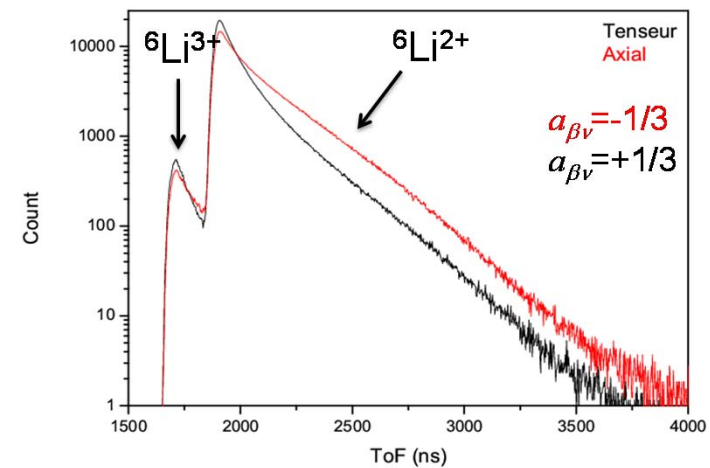


- détection en coïncidence des  $\beta$  – ions de recul
- $a$  déduit de la distribution en temps de vol des reculs

Simulation pour la décroissance  ${}^6\text{He}^+$

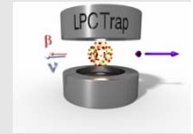
- ${}^6\text{He}$  : bon candidat

- Transition pure GT
- 100% fond. vers fond.
- $T_{1/2}$  raisonnable = 806.7 ms
- $Q_\beta$  élevé = 3.51 MeV,  $T_{\text{max}} = 1.4$  keV
- Taux de production élevé :  $2 \cdot 10^8$  ions/s

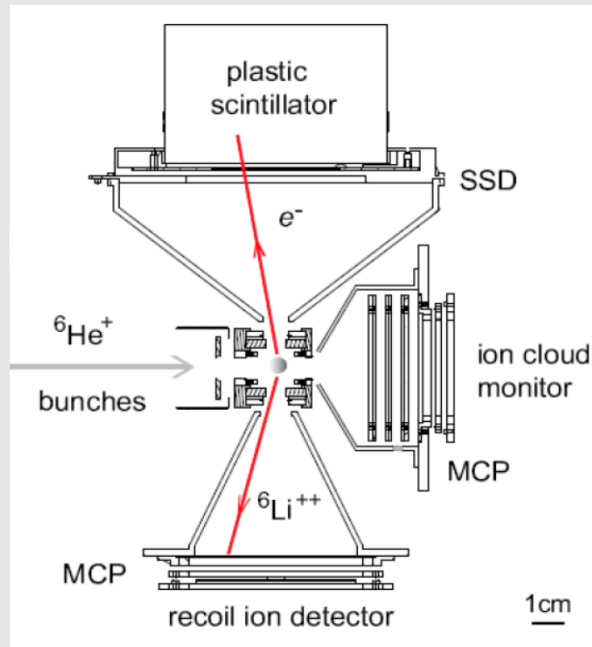


**nécessite une connaissance approfondie du dispositif expérimental !**

# LPCTrap : le système de détection



• < 2010



*E. Liénard et al., NIMA551(2005)*

Trigger : scintillateur  $\beta$

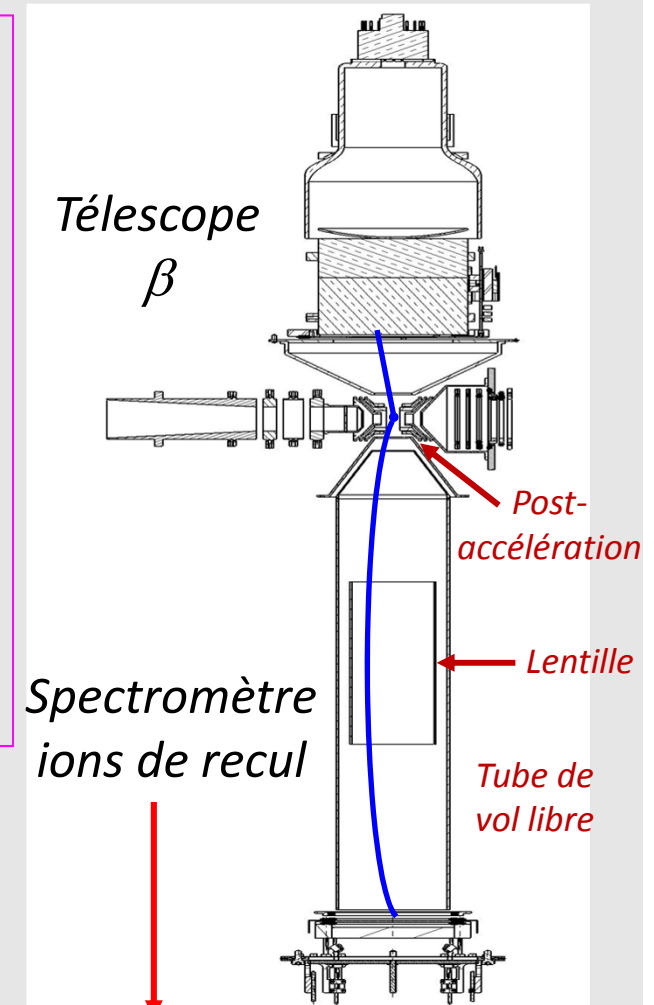
Paramètres :

- énergie  $\beta$
- position  $\beta$
- ToF ion de recul
- position ion de recul

+ marque en tps dans cycle  
& phase RF du piège

- Temps de vol des ions de recul
- Suppression du bruit de fond
- Contrôle des effets systématiques
- Contrôle de la cohérence des résultats

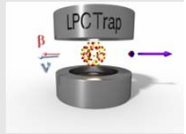
•  $\geq 2010$



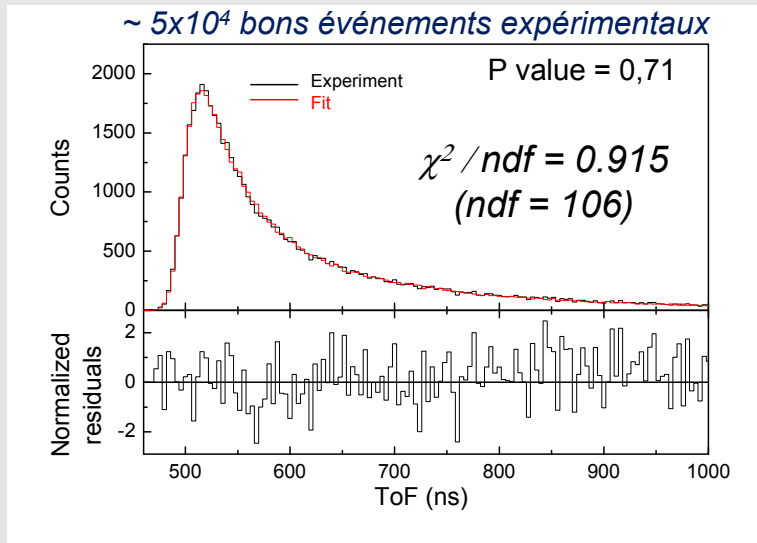
Distribution des états de charge  
des ions de recul (shakeoff)



# ${}^6\text{He}$ : premiers résultats



- *Première expérience en 2006*



$$a_{\beta\nu} = -0.3335 (73)_{\text{stat}} (75)_{\text{syst}}$$

*Flécharde et al., J.Phys.G 38 (2011)*

*Highlight de JPG 2011 !*

- Meilleure précision sur  $a_{GT}$  par une technique de coïncidence ( $\Delta a/a = 3\%$ )
- Bon contrôle des paramètres expérimentaux & simulation

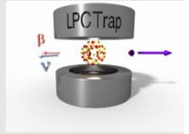
## Incertitudes systématiques

Source	Uncertainty	$\Delta a_{\beta\nu} (\times 10^{-3})$	Method
Cloud temperature	6.5%	6.8	off-line measurement
$\theta_{x\text{MCPSPD}}$	0.003 rad	0.1	present data
$\theta_{y\text{MCPSPD}}$	0.003 rad	0.1	present data
MCPSPD offset (x,y)	0.145 mm	0.3	present data
MCPSPD calibration	0.5 %	1.3	present data
$d_{\text{DSSSD}}$	0.2 mm	0.3	present data
$E_{\text{scint}}$		0.8	present data
$E_{\text{si}}$	10%	0.8	GEANT4
Background		0.9	present data
$\beta$ Scattering	10%	1.9	GEANT4
Shake off	0 - 0.05	0.6	theoretical calculation
$V_{\text{RF}}$	2.5%	1.7	off-line measurement
total		7.5	

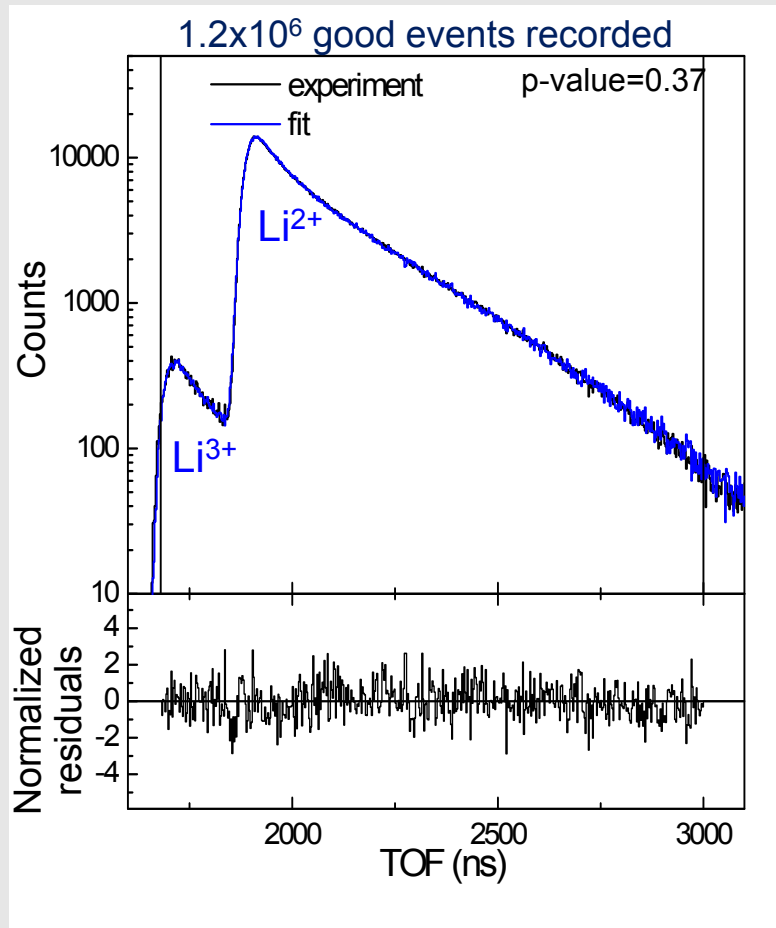
### Principaux paramètres systématiques :

- *Mouvement du nuage (température)*
- *Diffusion des  $\beta$*

# ${}^6\text{He}$ : premiers résultats



- Dernière expérience en 2010



- Analyse réalisée pour extraire  $P_{\text{shakeoff}}$  (simulation complète @ faible statistique :  $\sim 4 \times 10^5$ )

$$P_{\text{shake-off}} = 0.02339(35)_{\text{stat}}(07)_{\text{syst}}$$

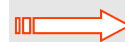
- Précision élevée :  $\Delta P_{\text{shake-off}} = 3.6 \cdot 10^{-4}$
- Excellent accord : valeur théorique 0.02322

*Couratin et al., PRL108 (2012) Highlight de PRL 2012 !*

- Au sujet de  $a_{GT}$  :

- $(\Delta a_{GT} / a_{GT})_{\text{stat}} \sim 0.45 \%$

- Difficultés pour reproduire fidèlement les distributions expérimentales  $\rightarrow$  mauvais  $\chi^2$  !



Amélioration de la modélisation du nuage en incluant les effets du refroidissement & de la charge d'espace (GPU's, CUDA)

Précision finale attendue :  $0.6\% < (\Delta a_{GT} / a_{GT})_{\text{tot}} < 2.2\%$

# Courants exotiques : état des lieux

- *Corrélation angulaire  $\beta$ - $\nu$  : les meilleurs résultats*

- GT:  ${}^6\text{He}$  (Johnson *et al.* PRC 1963)  $\rightarrow \tilde{a}_{GT} = -0.3308$  (30)  
corrigé par les effets radiatifs et de recul (Glück NPA 1998)

${}^8\text{Li}$  (Sternberg *et al.* PRL 2015)  $\rightarrow \tilde{a}_{GT} = -0.3342$  (39)

- F:  ${}^{32}\text{Ar}$  (Adelberger *et al.* PRL 1999)  $\rightarrow \tilde{a}_F = 0.9989$  (65)

${}^{38m}\text{K}$  (Gorelov *et al.* PRL 2005)  $\rightarrow \tilde{a}_F = 0.9981$  (48)

Précision relative

~ 1%

~ 0.5%

*Résultats utilisés dans une analyse globale incluant toutes les données disponibles*

## Revue:

REVIEWS OF MODERN PHYSICS, VOLUME 78, JULY-SEPTEMBER 2006

### Tests of the standard electroweak model in nuclear beta decay

Nathal Severijns\* and Marcus Beck†

Instituut voor Kern- en Stralingsfysica, Katholieke Universiteit Leuven, B-3001 Leuven, Belgium

Oscar Naviliat-Cuncic‡

Université de Caen Basse-Normandie and Laboratoire de Physique Corpusculaire CNRS-ENSI, F-14050 Caen, France

(Published 29 September 2006)

IOP Publishing

Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics

J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 41 (2014) 114001 (29pp)

doi:10.1088/0954-3899/41/11/114001

### Precision frontier in semileptonic weak interactions: theory

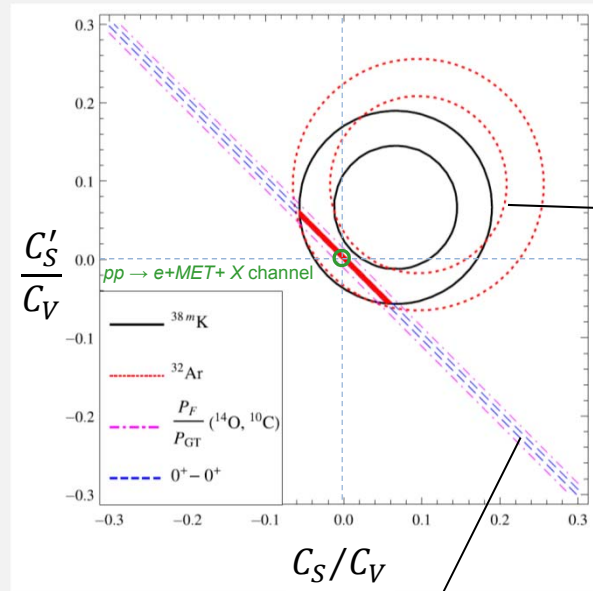
Barry R Holstein

Department of Physics-LGRT, University of Massachusetts Amherst, MA 01003, USA

+ Severijns *et al.* PhyScr 2013, Severijns JPG 2014, Wauters *et al.* PRC 2014 ...

# Courants exotiques : état des lieux

## SCALAIRE



$$Ft \propto (1 + \langle m/E \rangle b_F)^{-1}$$

Hardy et al PRC79(2009)

B.R. Holstein JPG41(2014)

$$\tilde{a} = \frac{a}{1 + b \langle m_e / E_e \rangle}$$

Cercles  
car

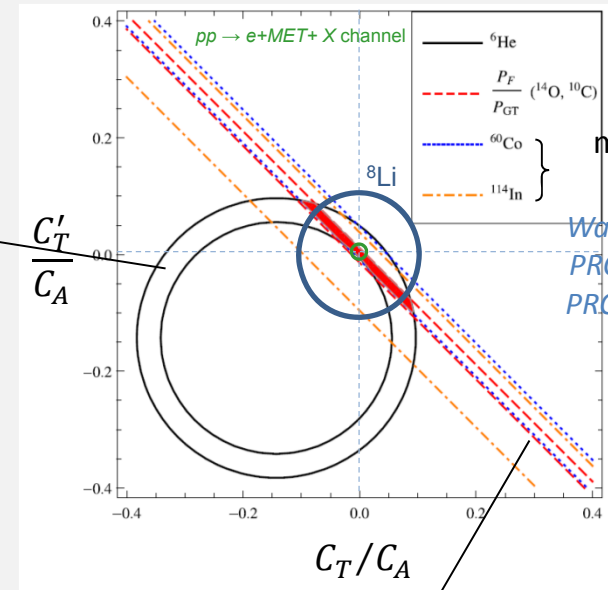
$$a(C_{S,T}^2, C_{V,A}^2)$$

$$b(C_{S,T}, C_{V,A})$$

$$|C_S^{(1)} / C_V^{(1)}| < 0.07$$

$$|C_T^{(1)} / C_A^{(1)}| < 0.09$$

## TENSORIEL



$$P_F / P_{GT} \propto b_F - b_{GT}$$

Wichers et al PRC58(1987)

Carnoy et al PRC43(1991)

• Meilleures contraintes par "b", mais "a" ajoute des limites...

• En vert : contraintes issues du LHC (données CMS)

Naviliat et al ADP525(2013)

Cirigliano et al PPNP71(2013)



Niveau de précision @  $10^{-3}$  nécessaire pour complémentarité avec LHC

# Courants exotiques : état des lieux & projets

Plusieurs projets → niveau de précision à 0.1% - 0.5 %

*adapté de Severijns & Naviliat PST152(2013)*

Parent	Technique	Team, laboratory	Remarks
${}^6\text{He}$	Spectrometer	ORNL	$a = -0.3308(30)$ 1963
${}^{32}\text{Ar}$	Foil; $p$ recoil	UW-Seattle, ISOLDE	$\tilde{a} = 0.9989(52)(39)$ 1999
${}^{38m}\text{K}$	MOT	SFU, TRIUMF	$\tilde{a} = 0.9981(30)(34)$ 2005
${}^{21}\text{Na}$	MOT	Berkeley, BNL	$a = 0.5502(38)(46)$ 2008
${}^6\text{He}$	Paul trap	LPC-Caen, GANIL	$\tilde{a} = -0.3335(73)(75)$ 2011
${}^6\text{He}$	Paul trap	LPC-Caen, GANIL	Analysis under way
${}^8\text{Li}$	Paul trap; $\beta\alpha$	ANL	$\tilde{a} = -0.3342(26)(29)$ 2015
${}^{35}\text{Ar}$	Paul trap	LPC-Caen, GANIL	Analysis under way
${}^{32}\text{Ar}$	Foil; $\beta$ - $p$ coinc	CENBG, ISOLDE	In preparation
${}^{19}\text{Ne}$	Paul trap	LPC-Caen, GANIL	Analysis under way
${}^6\text{He}$	EIBT	Weizmann, SOREQ	In progress
${}^6\text{He}$	MOT	ANL, CENPA	In progress
Ne	MOT	Weizmann, SOREQ	In progress
<del><math>{}^{21}\text{Na}</math></del>	<del>MOT</del>	<del>KVI-Groningen</del>	<del>In progress</del>
${}^{32}\text{Ar}$	Penning trap	Texas A&M	In preparation
${}^8\text{He}$	Foil; $\beta\gamma$	NSCL	In preparation ?

projets français

contribution française

+ mesures directes de "b" avec le même niveau de précision

# Courants exotiques : état des lieux & projets

Plusieurs projets → niveau de précision à 0.1% - 0.5 %

*adapté de Severijns & Naviliat PST152(2013)*

Parent	Technique	Team, laboratory	Remarks
${}^6\text{He}$	Spectrometer	ORNL	$a = -0.3308(30)$ 1963
${}^{32}\text{Ar}$	Foil; $p$ recoil	UW-Seattle, ISOLDE	$\tilde{a} = 0.9989(52)(39)$ 1999
${}^{38m}\text{K}$	MOT	SFU, TRIUMF	$\tilde{a} = 0.9981(30)(34)$ 2005
${}^{21}\text{Na}$	MOT	Berkeley, BNL	$a = 0.5502(38)(46)$ 2008
${}^6\text{He}$	Paul trap	LPC-Caen, GANIL	$\tilde{a} = -0.3335(73)(75)$ 2011
${}^6\text{He}$	Paul trap	LPC-Caen, GANIL	Analysis under way
${}^8\text{Li}$	Paul trap; $\beta\alpha$	ANL	$\tilde{a} = -0.3342(26)(29)$ 2015
${}^{35}\text{Ar}$	Paul trap	LPC-Caen, GANIL	Analysis under way
${}^{32}\text{Ar}$	Foil; $\beta$ - $p$ coinc	CENBG, ISOLDE	In preparation
${}^{19}\text{Ne}$	Paul trap	LPC-Caen, GANIL	Analysis under way
${}^6\text{He}$	EIBT	Weizmann, SOREQ	In progress
${}^6\text{He}$	MOT	ANL, CENPA	In progress
Ne	MOT	Weizmann, SOREQ	In progress
<del><math>{}^{21}\text{Na}</math></del>	<del>MOT</del>	<del>KVI-Groningen</del>	<del>In progress</del>
${}^{32}\text{Ar}$	Penning trap	Texas A&M	In preparation
${}^8\text{He}$	Foil; $\beta\gamma$	NSCL	In preparation ?

LPCTrap @ GANIL

limité @ 0.5% → miroirs



WISArD @ ISOLDE

+ mesures directes de "b" avec le même niveau de précision

# Courants exotiques : WISArD@ISOLDE

Weak-Interaction Studies with <sup>32</sup>Ar Decay

- Source radioactive implantée dans une fine feuille

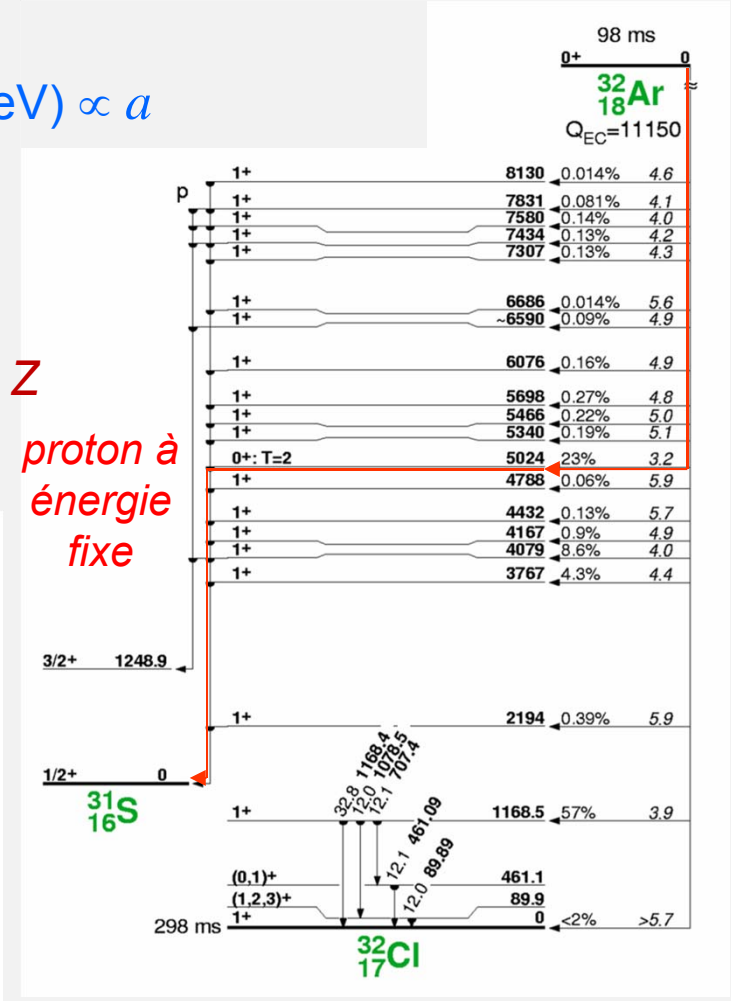
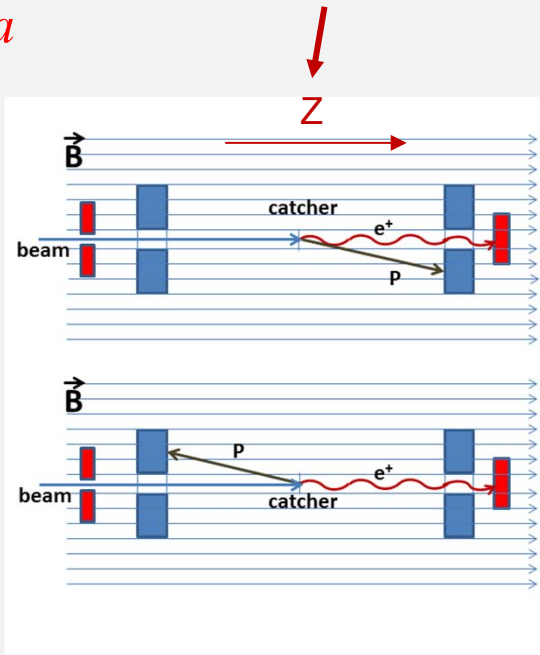
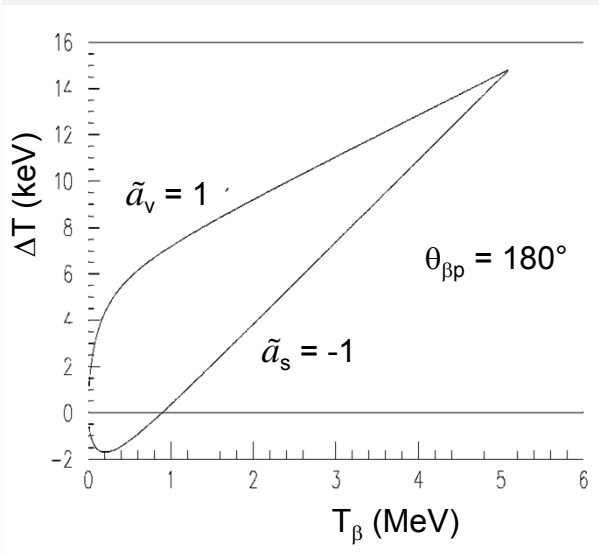
Severijns & Blank JPG44(2017)

Détection d'un p retardé émis pendant le recul

- p émis pendant le recul → décalage cinétique (~10keV) ∝ a

$$\Delta T = \frac{(p_{\text{shift}}^2 - p^2)}{2m_p} = \frac{\langle r_z \rangle}{2M_{\text{ion}}} \left( \frac{\langle r_z \rangle m_p}{M_{\text{ion}}} + 2p \right)$$

où  $\langle r_z \rangle$  est une moyenne pondérée de la composante Z de l'impulsion de recul ∝ a

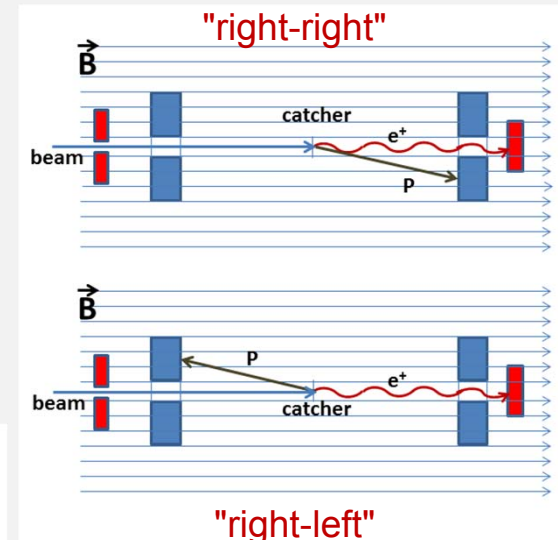
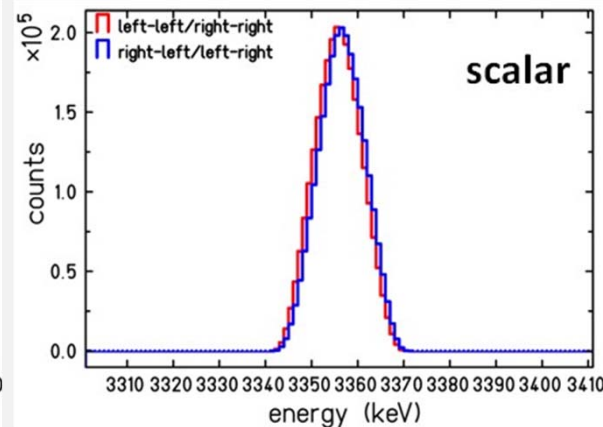
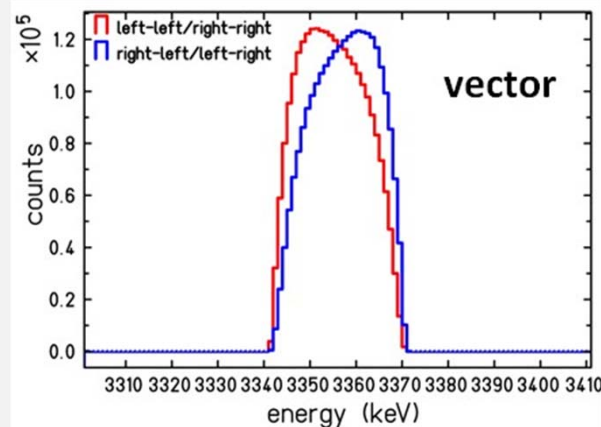


Severijns &amp; Blank JPG44(2017)

- Source radioactive implantée dans une fine feuille

Détection d'un p retardé émis pendant le recul

- → décalage cinétique ( $\sim 10\text{keV}$ )  $\propto a$
- coïncidences  $\beta - p$  à  $0^\circ$  &  $180^\circ$  dans l'aimant de WITCH  
→ double décalage cinétique



Simulation réalisée  
avec **résolution 5 keV**  
sur l'énergie cinétique  
du p ( $\sim 3.3\text{ MeV}$ )

- globalement, le courant vectoriel induit un décalage cinétique contrairement au courant scalaire
- méthode sans détection des reculs et insensible à la diffusion  $\beta$  → **0.1% semble accessible**

Candidats intéressants :  $^{32}\text{Ar}$ ,  $^{20}\text{Mg}$ ,  $^{22}\text{Al}$ ,  $^{24}\text{Si}$ ,  $^{36}\text{Ca}$ ... → @ GANIL : SPIRAL & S<sup>3</sup>  
avec PIPERADE dans DESIR



# Violation des symétries fondamentales : le renversement du Temps

## • Violation de $T =$ violation de $CP$

- Observation dans les décroissances de mésons insuffisante pour reproduire l'asymétrie matière – antimatière dans l'univers
- Corrélations triples en décroissance  $\beta$  ( $D$  and  $R$ ) & nEDM  $\rightarrow$  recherche de nouvelles sources de violation de  $CP$
- Meilleurs résultats actuels en décroissances nucléaires :

$$^{19}\text{Ne} \rightarrow D = (1 \pm 6) 10^{-4} \quad \text{Calaprice et al. Hyp. Int.22 (1985)}$$

$$n \rightarrow D = (-0.94 \pm 1.89 \pm 0.97) 10^{-4} \quad \text{Mumm et al. PRL107 (2011), Chupp et al. PRC86 (2012)}$$

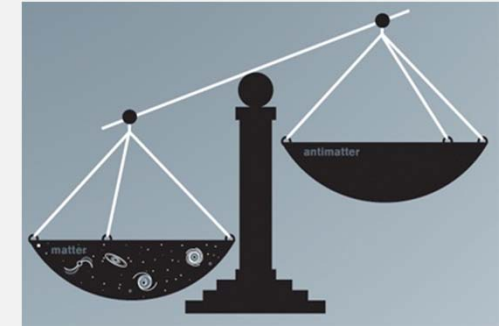
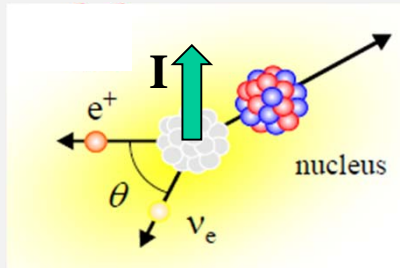


Illustration: Sandbox Studio

## • Violation de $CP$ : mesure de $D$



$$D = \frac{\vec{J} \cdot (\vec{p}_e \times \vec{q})}{J(E_e E_\nu)}$$

- coïncidences  $\beta$ -reculs
- $\vec{J}$  connu

**LPCTrap ?**

$$D = \frac{-2\rho \operatorname{Im}(\delta_{JJ'} (\frac{J}{J+1})^{1/2} \frac{C_A^*}{C_A})}{(1+\rho^2)}$$

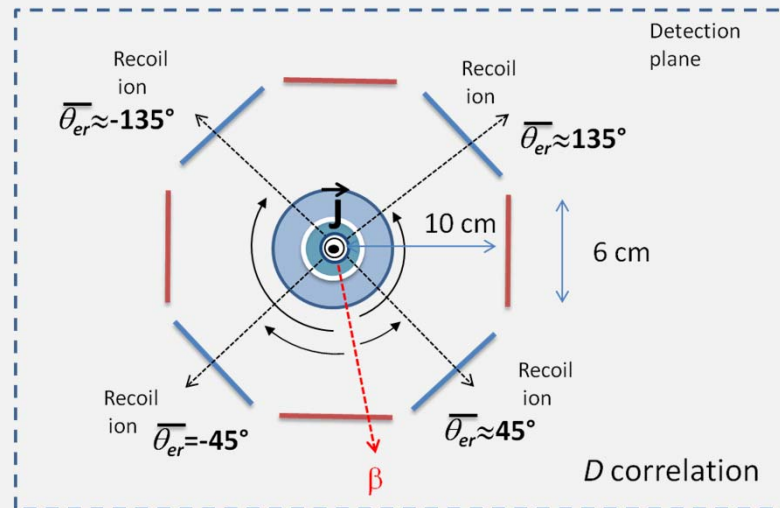
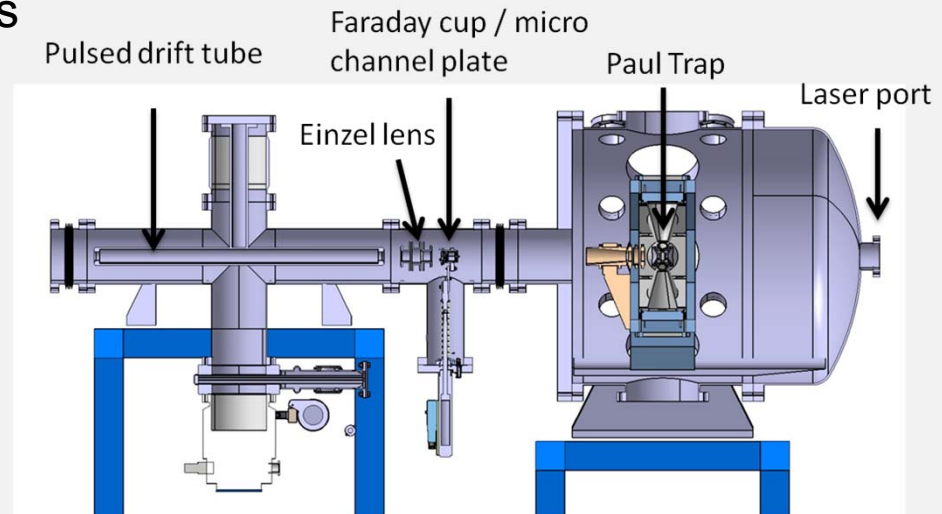
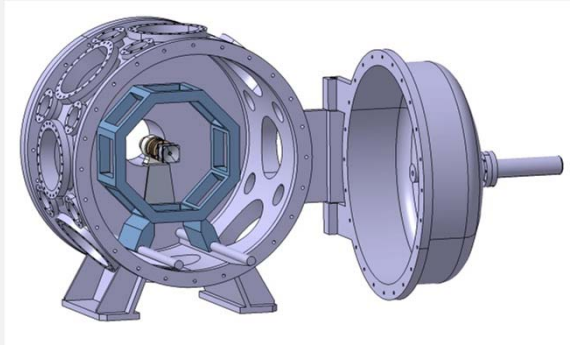
- $D \neq 0 \rightarrow \rho \neq 0$   
 $\rightarrow$  décroissance miroir !

**Nouveaux faisceaux SPIRAL**

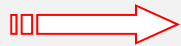
# Test de la violation de CP : mesure de $D$

- *Polarisation du nuage : méthode du pompage optique*

→ Nouvelle chambre, lasers & détecteurs



- Polarisation réalisée grâce à l'interaction multiple avec des lasers @  $v$  adéquates  
→ *première mondiale*
- Evolution du système de détection :  
→ *arrangement de 8 modules*
- Faisceaux intéressants :  $^{23}\text{Mg}$ ,  $^{39}\text{Ca}$



**Projet "MORA" (Matter's Origin from the RadioActivity of trapped and laser oriented ions)**





# Projet MORA

Coordinateur: P. Delahaye

- ~ 630k€ **financés** par la Région Normandie **pour 2 ans**
- Collaboration GANIL – LPC Caen + contributions de JYFL, IKS Leuven, ISOLDE, IPNL, U Manchester
- **T<sub>0</sub> : avril 2018**
- **1<sup>ère</sup> étape** : **mesure polarisation nuage**  $^{23}\text{Mg}$  @ JYFL  
degré élevé attendu (> 99% in 0.2ms)  
& évaluation via la mesure de  $A_\beta$

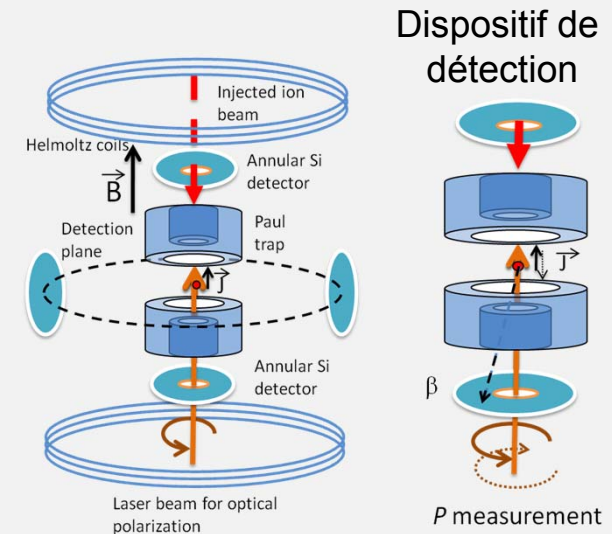
## Mesures de D

- $D \propto \frac{N^+ - N^-}{N^+ + N^-}$  entre **2 directions opposées de polarisation**
- 1<sup>ère</sup> @ JYFL, **amélioration @ DESIR**
- **Résultats attendus en 1 semaine :**

$$\text{JYFL: } \sigma_D \sim 5 \times 10^{-4}$$

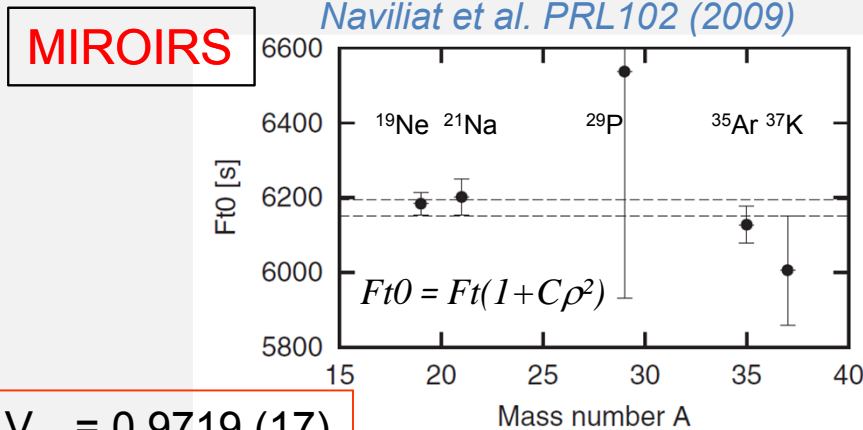
$$\text{DESIR: } \sigma_D \sim 5 \times 10^{-5} \quad \Rightarrow$$

- Facteur 10 meilleur que le résultat actuel ( $^{19}\text{Ne}$ )
- Futur candidat :  $^{39}\text{Ca}$

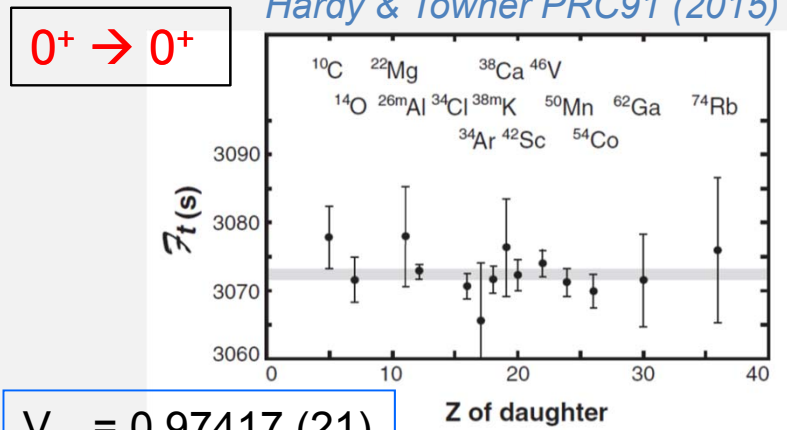


# CVC, $V_{ud}$ & CKM : mesures des valeurs $ft$

- *Décroissances nucléaires miroirs vs pures F*



$$V_{ud} = 0.9719 (17)$$



$$V_{ud} = 0.97417 (21)$$

$$(Ft)^{PF} = f_V t_{1/2} (1 + \delta_R) (1 + \delta_{NS} - \delta_C) = \frac{K}{V_{ud}^2 (1 + \Delta_R)}$$

Mesures de  $T_{1/2}$ ,  $BR$ ,  $M$

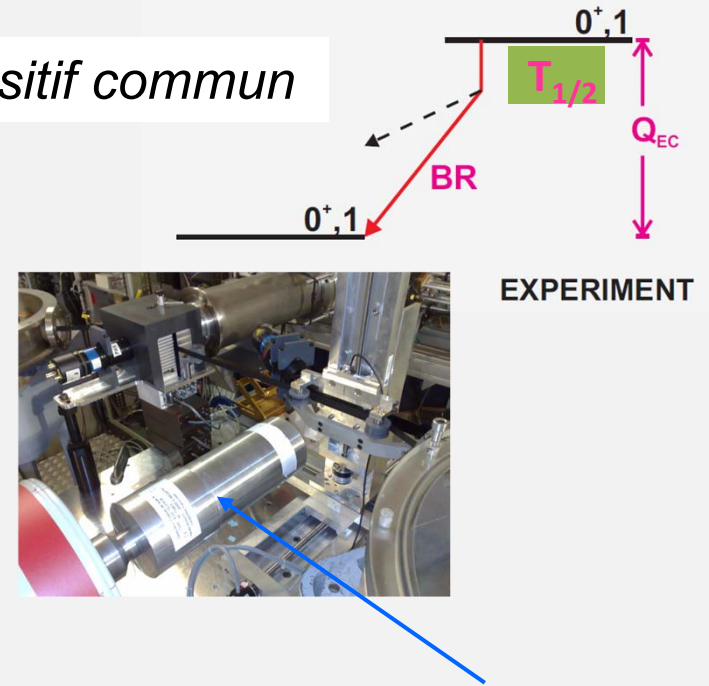
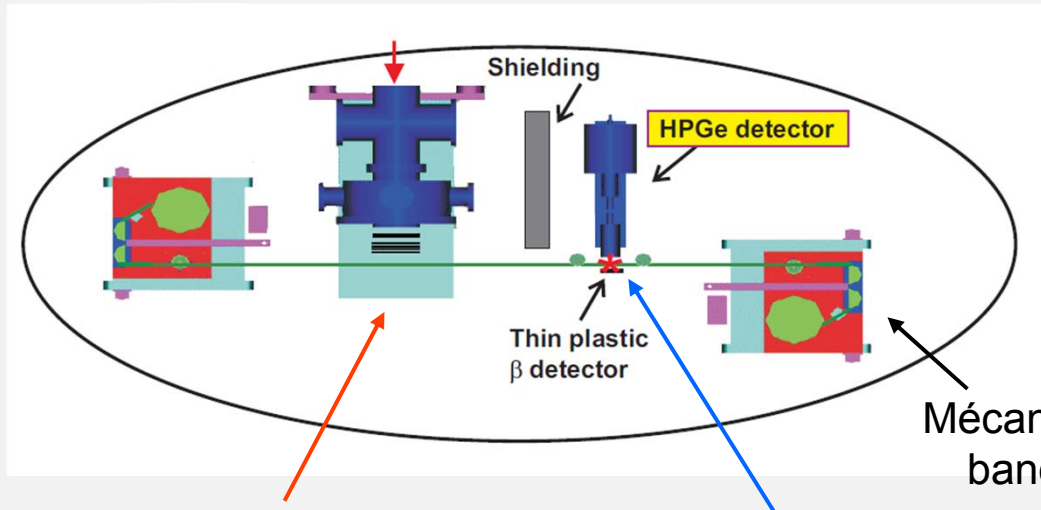
$$(Ft)^{miroir} = f_V t_{1/2} (1 + \delta_R) (1 + \delta_{NS} - \delta_C) = \frac{2K}{V_{ud}^2 (1 + \Delta_R) (1 + \frac{f_A}{f_V} \rho^2)}$$

Mesures de  $T_{1/2}$ ,  $BR$ ,  $M$ ,  $\rho$

$\delta_R, \delta_{NS}, \Delta_R$  : corrections radiatives } < 1%  
 $\delta_C$  : brisure de la symétrie d'isospin }

# CVC, $V_{ud}$ & CKM : mesures des valeurs $ft$

- Périodes & rapports d'embranchement : ~ dispositif commun



1. Implantation sur bande

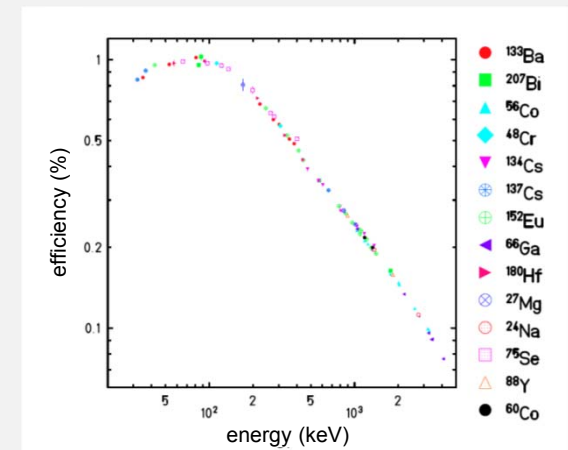
2. Dispositif de détection : scintillateur plastique ( $\beta$ ) & HPGe ( $\gamma$ )

- Pour les mesures de BR,  $\epsilon_\gamma$  doit être déterminé précisément avec des sources calibrées

$$\Delta\epsilon_{rel} = 0.1\%, \Delta\epsilon_{abs} = 0.15\%$$

- *effort & temps importants dédiés à ce travail*
- *seulement 2 tels Ge dans le monde, 1 au CENBG !*

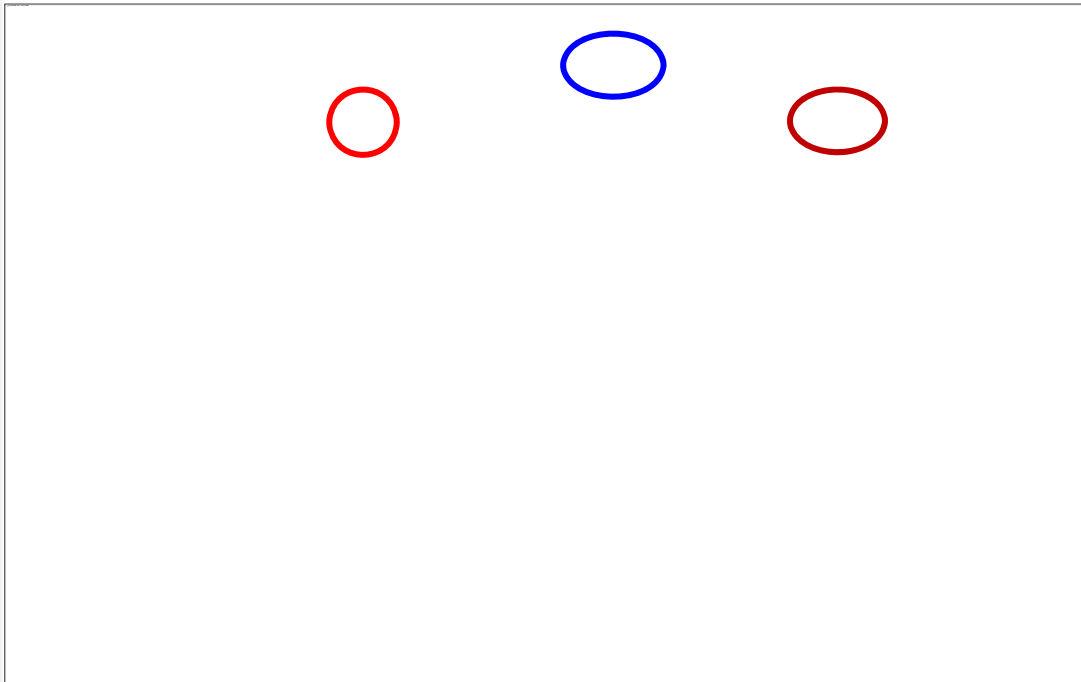
*Blank et al. NIMA776 (2015)*



# CVC, $V_{ud}$ & CKM : mesures des valeurs $ft$

- *Décroissances pures Fermi : état des lieux*

Hardy & Towner PRC91(2015)



Quelques contributions françaises :

$^{14}\text{O}$  :  $T_{1/2}$  Laffoley et al PRC88(2013) TRIUMF

$^{38}\text{Ca}$  :  $T_{1/2}$  Blank et al EPJA44(2010) ISOLDE  
 $T_{1/2}$ , BR Blank et al EPJA51(2015) GANIL

$^{62}\text{Ga}$  : BR Bey et al EPJA36(2008) JYFL

→  $ft = 3072.27(72) \text{ s}$

hypothèse CVC vérifiée à  $\sim 10^{-4}$

⇒  $\sqrt{2} C_V = 8.7303 \cdot 10^{-5} \text{ MeV fm}^3$  →  $V_{ud} = \sqrt{2} C_V / G_F = 0.97417 (21)$

⇒  $|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0.99978 \pm 0.00055$

décroissance du méson K : 0.22534 (93)      décroissance du méson B : 0.00393 (35)

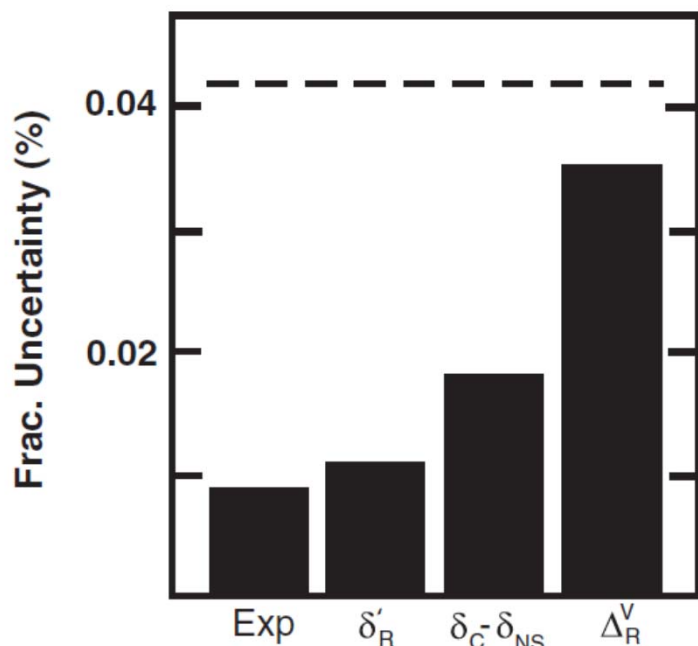
valeur dans **2016 PARTICLE PHYSICS BOOKLET**

# CVC, $V_{ud}$ & CKM : mesures des valeurs $ft$

- *Décroissances pures Fermi : état des lieux & perspectives*

$$\delta_c = \delta_{IM} + \delta_{RO}$$

Hardy & Towner PRC91(2015)



Emitter	$\delta_{IM}$			$Ft$	
	Present work (2013)	Ormand, Brown (1989)	Towner, Hardy (2008)	Present work (2013)	Towner, Hardy (2010)
$^{22}\text{Mg}$	0.0216(9)	0.017	0.010 (10)	3077.6(72)	3077.6(74)
$^{26m}\text{Al}$	0.0120(8)	0.01	0.025 (10)	3072.9(13)	3072.4(14)
$^{26}\text{Si}$	0.046(0)	0.028	0.022 (10)		
$^{30}\text{S}$	0.027(1)	0.056	0.137 (20)		
$^{34}\text{Cl}$	0.0363(5)	0.06	0.091 (10)	3072.6(21)	3070.6(21)
$^{34}\text{Ar}$	0.0060(4)	0.008	0.023 (10)	3070.7(84)	3069.6(85)

Parent nucleus	$\mathcal{F}t$ (s)	
	Present work	Towner and Hardy <sup>a</sup>
$^{22}\text{Mg}$	3077.6 (72)	3077.6 (74)
$^{26}\text{Al}^m$	3072.9 (13)	3072.4 (14)
$^{34}\text{Cl}$	3072.6 (21)	3070.6 (21)
$^{34}\text{Ar}$	3070.7 (84)	3069.6 (85)

Lam et al. PRC87(2013)

*≠ modèles  
→ ≠ valeurs !*

*Incertitude dominée par les corrections théoriques !*

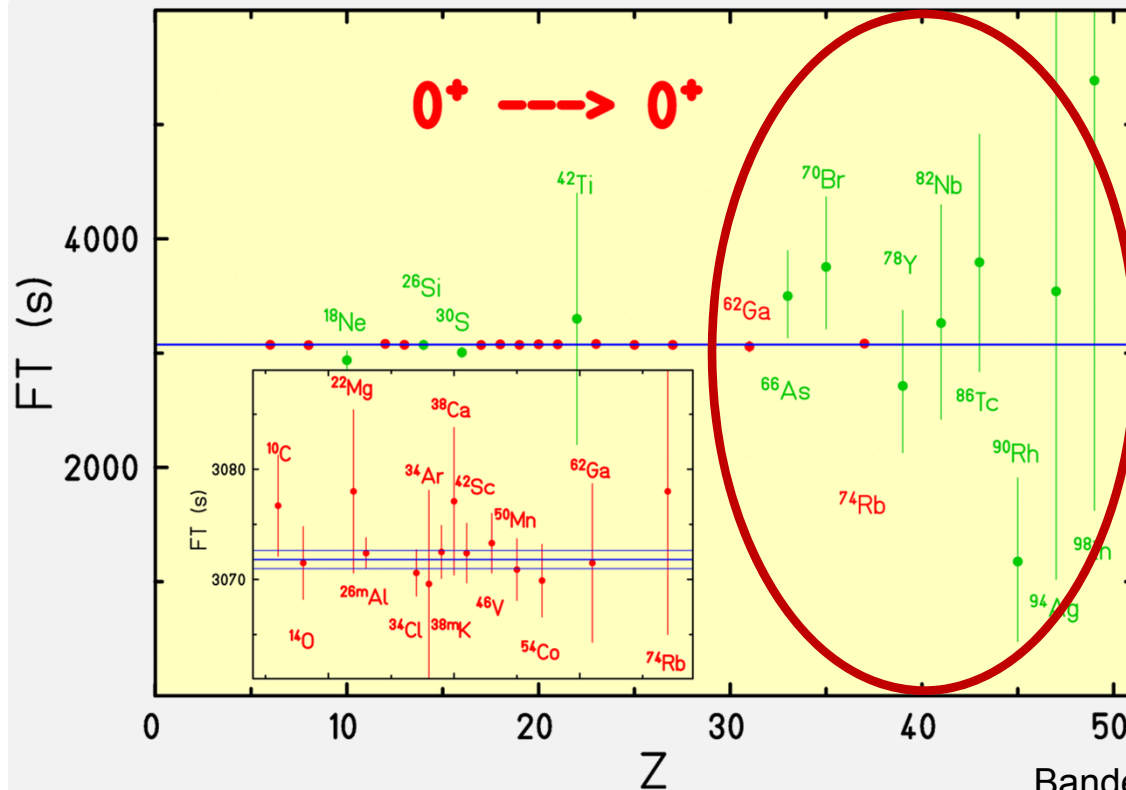


*Crucial de réaliser des mesures pour les améliorer !*

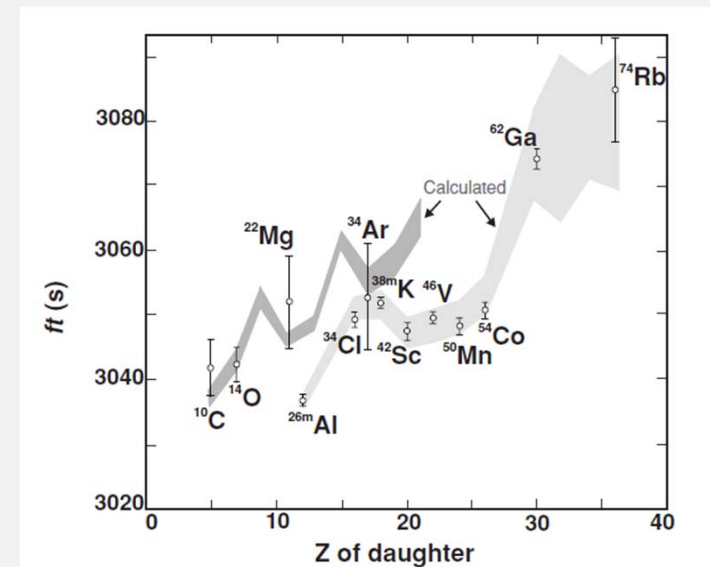
# CVC, $V_{ud}$ & CKM : mesures des valeurs $ft$

- *Décroissances pures Fermi : état des lieux & perspectives*

## Mesures à Z plus élevé



- test de CVC sur une base beaucoup plus grande
- à Z plus élevé, les corrections sont aussi plus grandes

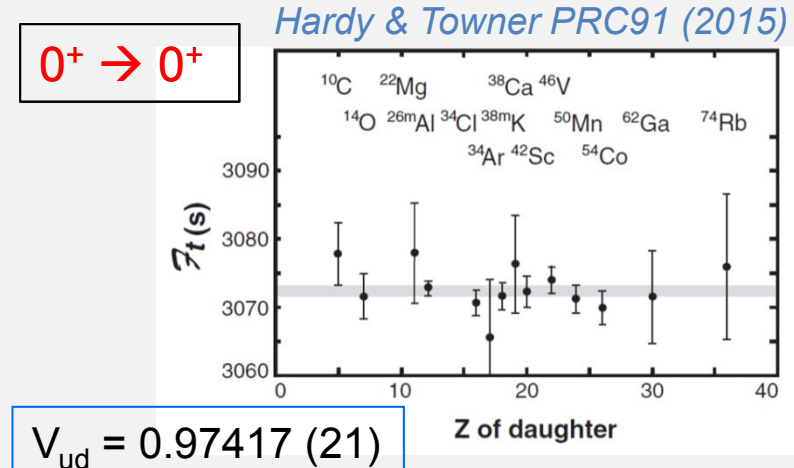
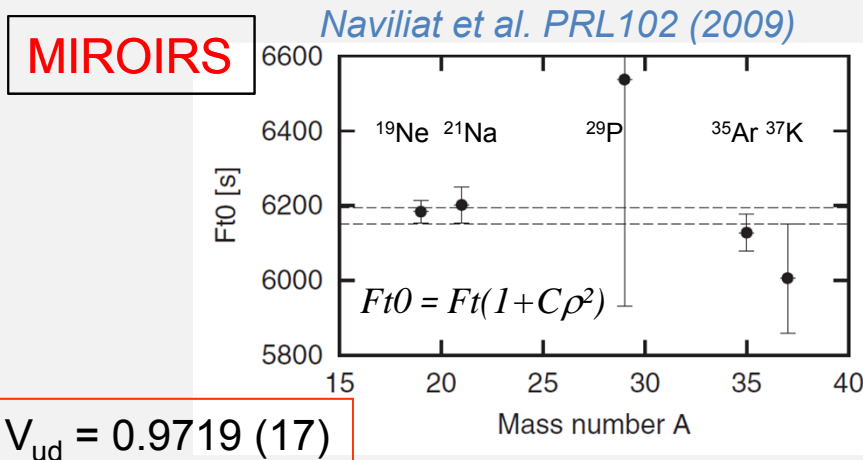


Candidats intéressants :  $^{66}\text{As}$ ,  $^{70}\text{Br}$ ,  $^{78}\text{Y}$ ,  $^{82}\text{Nb}$ ,  $^{86}\text{Tc}$ , ... → @ GANIL : faisceaux  $S^3\text{-LEB}$  dans le hall DESIR



# CVC, $V_{ud}$ & CKM : mesures des valeurs $ft$

- *Décroissances nucléaires miroirs vs pures  $F$*



un facteur ~10  
moins précis

$$(Ft)^{PF} = f_V t_{1/2} (1 + \delta_R) (1 + \delta_{NS} - \delta_C) = \frac{K}{V_{ud}^2 (1 + \Delta_R)}$$

Mesures de  $T_{1/2}$ , BR, M

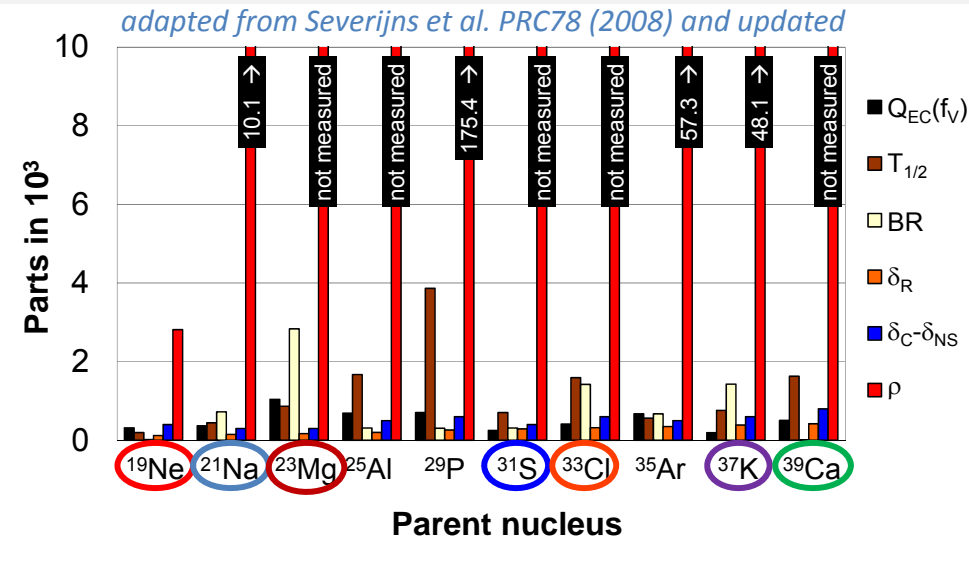
$$(Ft)^{miroir} = f_V t_{1/2} (1 + \delta_R) (1 + \delta_{NS} - \delta_C) = \frac{2K}{V_{ud}^2 (1 + \Delta_R) (1 + \frac{f_A}{f_V} \rho^2)}$$

Mesures de  $T_{1/2}$ , BR, M,  $\rho$

$\rho$  est le paramètre limitant !

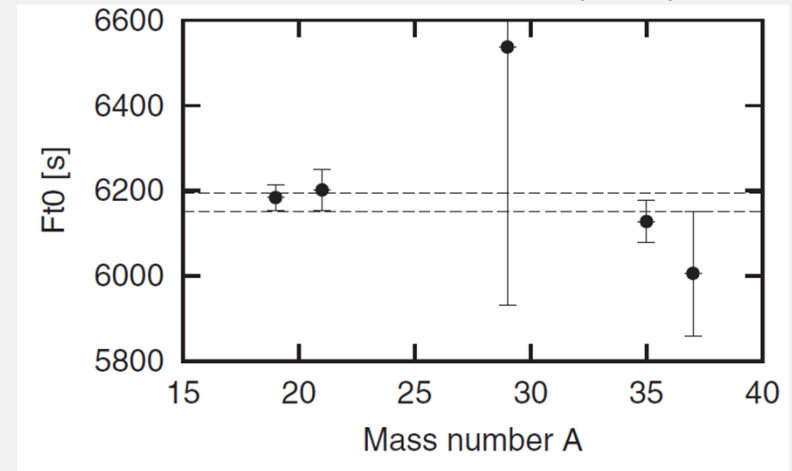
# CVC, $V_{ud}$ & CKM : mesures des valeurs $ft$

## • Décroissances nucléaires miroirs



- $^{19}\text{Ne}$   $T_{1/2}$ : Broussard et al. PRL112 (2014)
- $^{21}\text{Na}$  M: Mukherjee et al. EPJA35 (2008)  
 $T_{1/2}$ : Grinyer et al. PRC91 (2015) — FR
- $^{23}\text{Mg}$  M: Saastamoinen et al. PRC80 (2009)  
 $T_{1/2}$ , BR: Magron et al. EPJA53 (2017) — FR
- $^{31}\text{S}$  M: Kankainen et al. PRC82 (2010)  
 $T_{1/2}$ : Bacquias et al. EPJA48 (2012) — FR
- $^{33}\text{Cl}$   $T_{1/2}$ : Grinyer et al. PRC92 (2015) — FR
- $^{37}\text{K}$   $T_{1/2}$ : Shidling et al. PRC90 (2014)
- $^{39}\text{Ca}$   $T_{1/2}$ : Blank et al. EPJA44 (2010) — FR

Naviliat et al. PRL102 (2009)

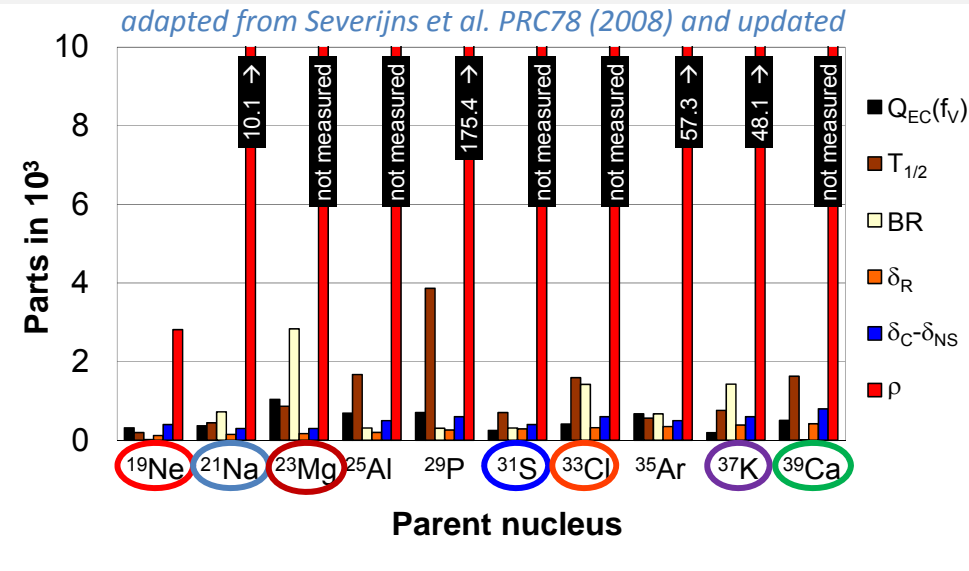


Communauté scientifique impliquée dans le domaine

FR = contribution française

# CVC, $V_{ud}$ & CKM : mesures des valeurs $ft$

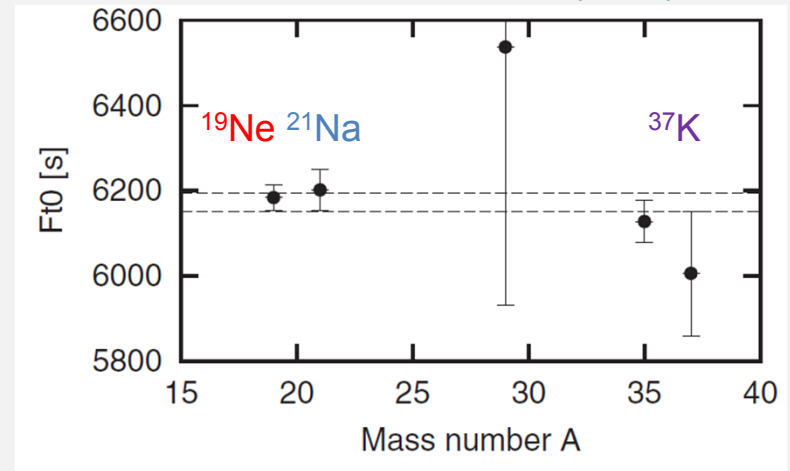
## • Décroissances nucléaires miroirs



- $^{19}\text{Ne}$   $T_{1/2}$ : Broussard et al. PRL112 (2014)
- $^{21}\text{Na}$  M: Mukherjee et al. EPJA35 (2008)  
 $T_{1/2}$ : Grinyer et al. PRC91 (2015)
- $^{23}\text{Mg}$  M: Saastamoinen et al. PRC80 (2009)  
 $T_{1/2}$ , BR: Magron et al. EPJA53 (2017)
- $^{31}\text{S}$  M: Kankainen et al. PRC82 (2010)  
 $T_{1/2}$ : Bacquias et al. EPJA48 (2012)
- $^{33}\text{Cl}$   $T_{1/2}$ : Grinyer et al. PRC92 (2015)
- $^{37}\text{K}$   $T_{1/2}$ : Shidling et al. PRC90 (2014)
- $^{39}\text{Ca}$   $T_{1/2}$ : Blank et al. EPJA44 (2010)



Naviliat et al. PRL102 (2009)



Communauté scientifique impliquée dans le domaine... MAIS

$$V_{ud} (2009) = 0.9719 (17)$$



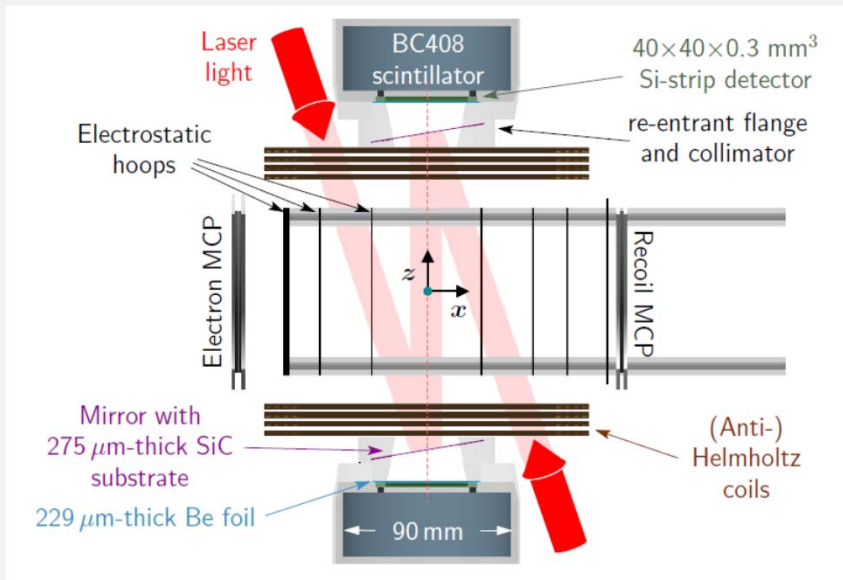
$$V_{ud} (2017) = 0.9721 (17) !!$$

Pour la détermination de  $V_{ud}$ , les valeurs de  $\rho$  doivent être améliorées ...

# CVC, $V_{ud}$ & CKM : mesures des valeurs $ft$

## • Décroissances nucléaires miroirs

Résultat récent : mesure de  $A_\beta$  dans  $^{37}\text{K}$  (TRIUMF) [Fenker et al. arXiv:1706.00414v1 2017](#)



- Source confinée dans le MoT de TRINAT
- Détection des  $\beta$  dans la direction Z avec une polarisation des noyaux en  $\pm Z$
- Degré de P mesuré par une sonde laser & détection des photo-ions  
→  $P_{\sigma^-} = 99.13(8)\%$      $P_{\sigma^+} = 99.12(9)\%$

⇒  $A_\beta = -0.5707(18)$     0.3% précision relative

⇒  $V_{ud}(2009) = 0.9719(17)$     →     $V_{ud}(2017) = 0.9728(14)!!$

*en un seul coup* → *amélioration claire sur  $V_{ud}$  &  $A_\beta(^{37}\text{K}) \neq$  le cas le plus sensible...*

# CVC, $V_{ud}$ & CKM : mesures des valeurs $ft$

- $\rho$  précisément déterminé via des mesures de corrélation

$$a_m = \frac{(1 - \rho^2/3)}{(1 + \rho^2)}$$

$$A_m = \frac{\rho^2 - 2\rho\sqrt{J(J+1)}}{(1 + \rho^2)(J+1)}$$

Severijns & Naviliat PST152(2013)

$a$  or  $A$  @ 0.5% ?

meilleure sensibilité  
avec des  
mesures de  $a$



LPCTrap@GANIL !

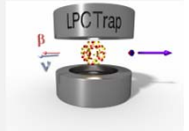


Parent nucleus	$\Delta V_{ud}$	$a$		$A$		
		$(\Delta V_{ud})^{\text{limit}}$	Factor $\Delta \mathcal{F}t$	$(\Delta V_{ud})^{\text{limit}}$	Factor $\Delta \mathcal{F}t$	
$^3\text{H}$	0.0011	0.0010	2.1	0.0011	0.0009	2.3
$^{11}\text{C}$	0.0025	0.0016	4.0	0.0207	0.0207	0.3
$^{13}\text{N}$	0.0017	0.0017	1.0	0.0123	0.0123	0.1
$^{15}\text{O}$	0.0020	0.0016	2.4	0.0023	0.0020	1.9
$^{17}\text{F}$	0.0019	0.0013	3.1	0.0341	0.0341	0.1
$^{19}\text{Ne}$	0.0011	0.0010	1.5	0.0011	0.0011	1.5
$^{21}\text{Na}$	0.0022	0.0017	2.7	0.0036	0.0034	1.3
$^{23}\text{Mg}$	0.0025	0.0018	3.1	0.0034	0.0030	1.9
$^{25}\text{Al}$	0.0019	0.0018	1.7	0.0056	0.0056	0.5
$^{27}\text{Si}$	0.0029	0.0018	4.1	0.0068	0.0066	1.1
$^{29}\text{P}$	0.0026	0.0018	3.4	0.0024	0.0014	4.3
$^{31}\text{S}$	0.0038	0.0018	5.9	0.0068	0.0061	1.8
$^{33}\text{Cl}$	0.0021	0.0018	2.0	0.0013	0.0006	6.0
$^{35}\text{Ar}$	0.0019	0.0018	1.1	0.0007	0.0004	4.8
$^{37}\text{K}$	0.0034	0.0017	5.8	0.0050	0.0041	2.3
$^{39}\text{Ca}$	0.0024	0.0016	3.5	0.0032	0.0027	2.2
$^{41}\text{Sc}$	0.0029	0.0022	2.7	0.0299	0.0299	0.2
$^{43}\text{Ti}$	0.0076	0.0018	13.2	0.0167	0.0151	1.6
$^{45}\text{V}$	0.0112	0.0020	17.7	0.0115	0.0032	11.2

$(\Delta V_{ud})^{\text{limit}}$  → seulement  $\Delta\rho$  contribue à l'incertitude

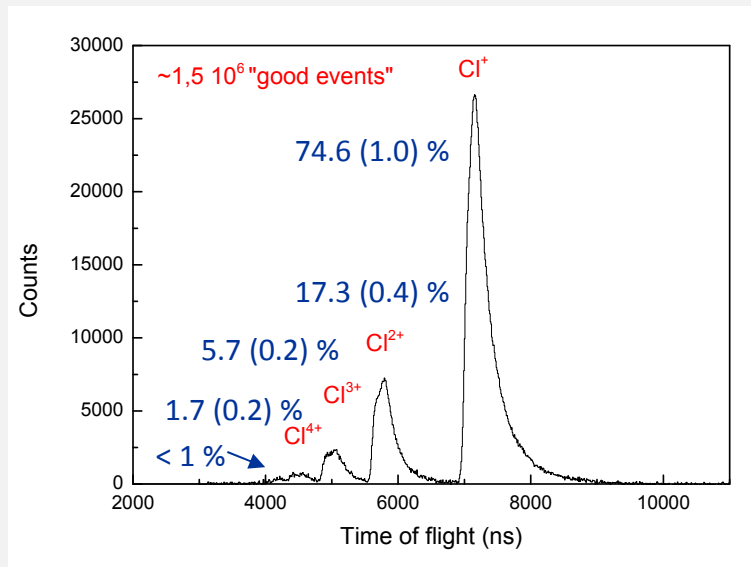
≠ le plus sensible

# CVC, $V_{ud}$ & CKM : mesures des valeurs $ft$



- $^{35}\text{Ar}$  &  $^{19}\text{Ne}$  : données acquises avec LPCTrap

$^{35}\text{Ar}$  : 2011 - 2012

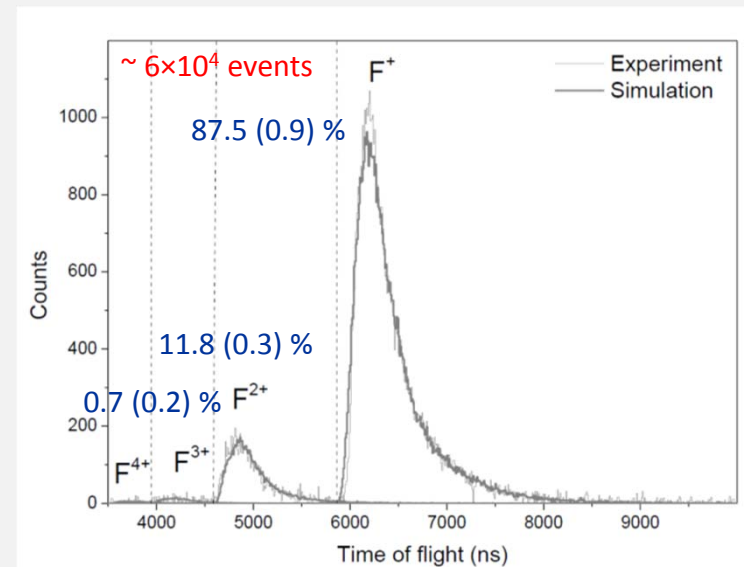


Shakeoff : Couratin et al. PRA88 (2013)

- analyse des données en cours pour  $a$
- $(\Delta a_m / a_m)_{\text{stat}} \sim 0.15 \%$

⇒ Résultat potentiel avec une très grande précision ...

$^{19}\text{Ne}$  : 2013



Revue : Liénard et al. Hyp Int 236 (2015)

- analyse des données en cours pour SO &  $a$
- $(\Delta a_m / a_m)_{\text{stat}} \sim 11 \%$  ( $a_m \sim 0 \dots$ )

⇒ Meilleure précision pour  $a_m$  mais sans effet sur  $\Delta V_{ud}$

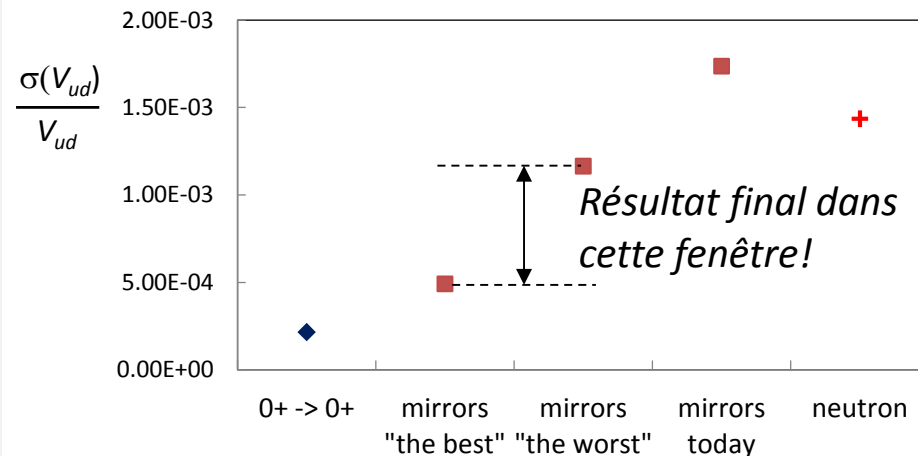
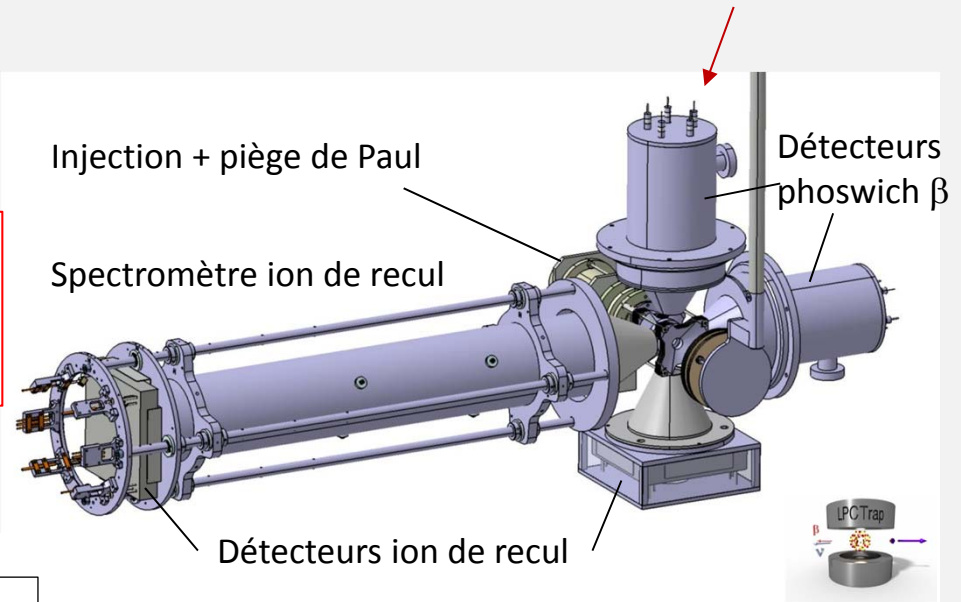
# CVC, $V_{ud}$ & CKM : mesures des valeurs $ft$

- *Décroissances nucléaires miroirs*

Perspectives @ GANIL : mesure de  $a$  dans plusieurs décroissances miroirs avec **LPCTrap2**

Ion	$T_{1/2}$ (s)	Taux attendus (pps)
$^{21}\text{Na}$	22.49	6.5E+08
$^{23}\text{Mg}$	11.32	2.1E+08
$^{33}\text{Cl}$	2.51	3.4E+07
$^{37}\text{K}$	1.22	7.4E+08

production SPIRAL >  $10^7$  pps



*Dans tous les cas, une amélioration significative sur  $V_{ud}$  est à notre portée*

@ LIRAT & DESIR

# CVC, $V_{ud}$ & CKM : mesures des valeurs $ft$

- *Décroissances nucléaires miroirs*

Autre intérêt : test des modèles utilisés pour calculer les corrections théoriques ( $\delta_C$ )

Konieczka et al. PRC93 (2016)

Severijns et al. PRC78 (2008)

	A	$\delta_C^{(NCC1)}$	$\delta_C^{(NSM)}$
$^{19}\text{Ne} \rightarrow ^{19}\text{F}$	17	0.166(17)	0.585(27)
	19	0.339(34)	0.415(39)
	21	0.300(30)	0.348(27)
$^{23}\text{Mg} \rightarrow ^{23}\text{Na}$	23	0.316(32)	0.293(22)
	25	0.413(41)	0.461(47)
$^{27}\text{Si} \rightarrow ^{27}\text{Al}$	27	0.439(44)	0.312(34)
	29	0.520(52)	0.976(53)
	31	0.585(59)	0.715(36)
$^{33}\text{Cl} \rightarrow ^{33}\text{S}$	33	0.705(71)	0.865(59)
$^{35}\text{Ar} \rightarrow ^{35}\text{Cl}$	35	0.366(37)	0.493(46)
$^{37}\text{K} \rightarrow ^{37}\text{Ar}$	37	0.907(91)	0.734(61)
	39	0.318(32)	0.855(81)
	41	0.426(43)	0.821(63)
	43	0.690(69)	0.50(10)
	45	0.589(59)	0.87(12)
	47	0.673(67)	
	49	0.646(65)	
	51	0.714(71)	
	53	0.898(90)	
	55	0.620(62)	

Contribution du CENBG  
N. Smirnova et al.

0.201

Magron et al. EPJA53 (2017)

0.312

*Différents modèles donnent  
différents résultats !*



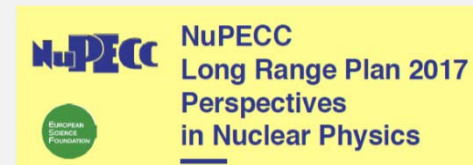
# CONCLUSION

- **Décroissance  $\beta$  nucléaire = outil sensible pour étudier l'Interaction Faible**

- Existence de courants exotiques → WISArD (ISOLDE)
- Violation des symétries fondamentales → MORA (JYFL)
- Hypothèse CVC, unitarité de CKM → [ LPCTrap (SPIRAL)  
Dispositif d'implantation (SPIRAL, JYFL, ISOLDE, TRIUMF)

*grâce aux mesures précises de distributions d'événements en corrélation & des valeurs  $ft$  ( $M$ ,  $T_{1/2}$ ,  $BR$ ,  $\rho$ ) dans les transitions pures et miroirs*

*programme complet dans LRP 2017 NuPECC*

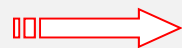
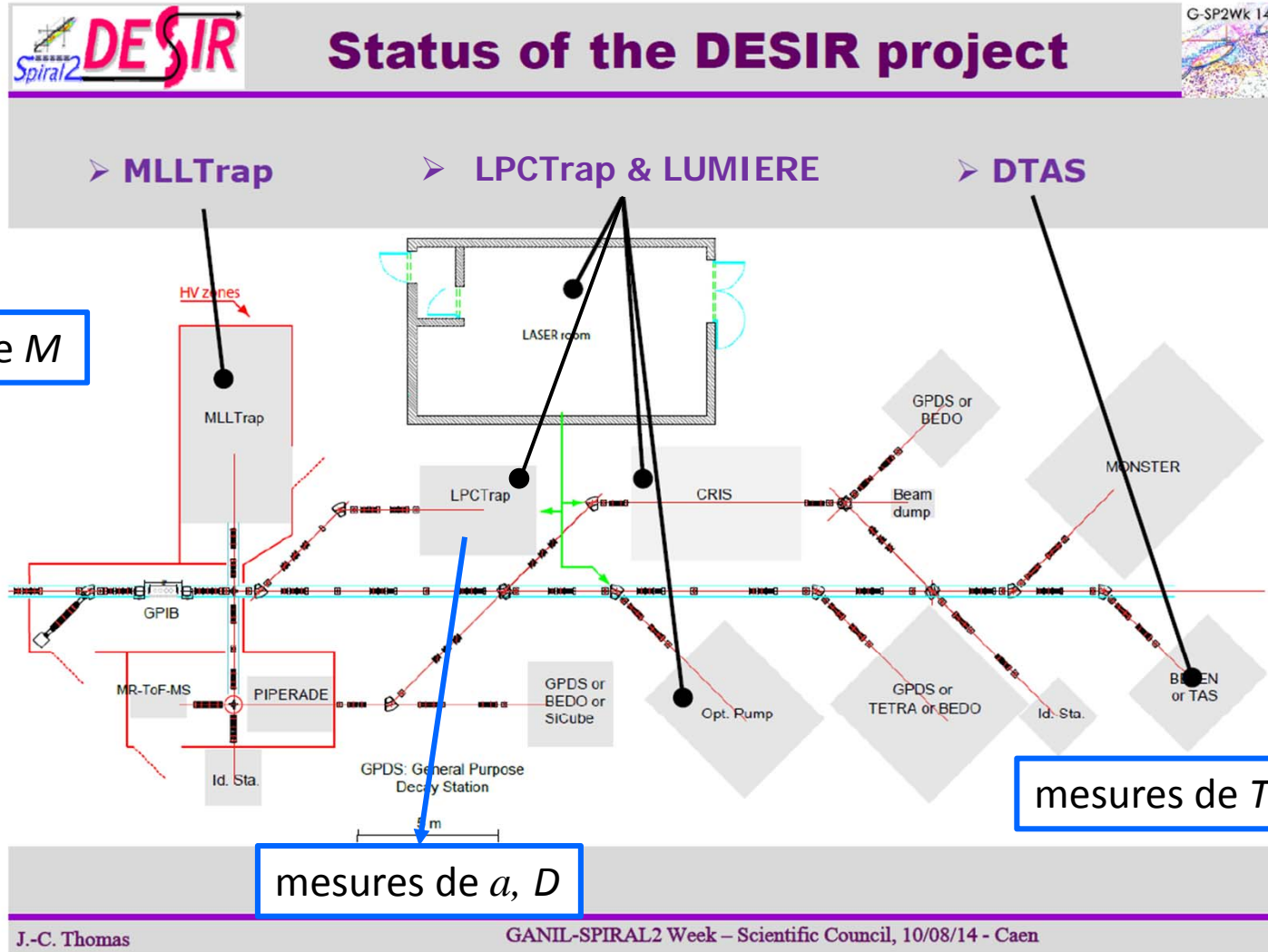


- **Toutes les plateformes de production de GANIL/SPIRAL(2) sont utiles**

- SPIRAL 1: noyaux légers avec intensités élevées pour mesurer les corrélations ( $a$ ,  $D$ ), et valeurs  $ft$  dans les miroirs
- S3-LEB: noyaux légers non disponibles à SPIRAL1 & noyaux lourds pour les valeurs  $ft$  dans les pures F

*meilleur site pour réaliser ce programme avec des faisceaux de haute qualité : DESIR !*

# Plan de DESIR (esquisse)



**Installation complète pour mesurer  $T_{1/2}$ ,  $BR$ ,  $M$ ,  $a$  et  $D$**