



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

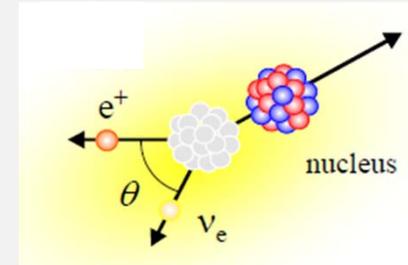
LPC Caen, Université de Caen Normandie



Décroissance β nucléaire : laboratoire pour tester le Modèle Standard

Décroissance β 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 ?

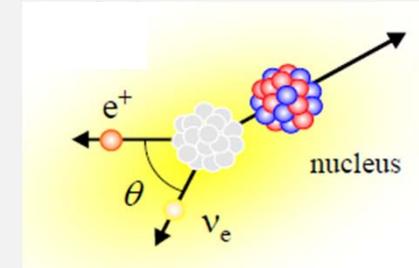
Structure & conditions du MS	Tests possibles
<ul style="list-style-type: none"> • Théorie V-A (W^\pm, Z_0 = particules médiatrices) ⇒ $C_{\text{Scalaire}} = C_{\text{Tenseur}} = C_{\text{Pseudoscalaire}} = 0$ • Violation Maximale de Parité (MPV): $C_i = C_i'$ • Invariance ss Renv. Temps (TRI): C_i réelles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

Décroissance β nucléaire : laboratoire pour tester le Modèle Standard

- Corrélations accessibles aux expériences

1. Entre les impulsions de particules

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



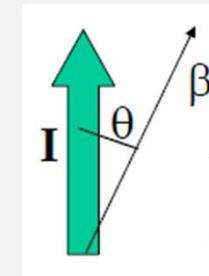
F	GT	Miroirs
$-1 < a \leq 1$ Courants Scalaire s	$-1/3 \leq a < 1/3$ Courants Tensoriels	$a(\rho)$ où $\rho = GT/F$

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	$A \neq 0 \Rightarrow$ violation P	$A(\rho)$

Test de MPV

*dans le cadre V - A
détermination de ρ*

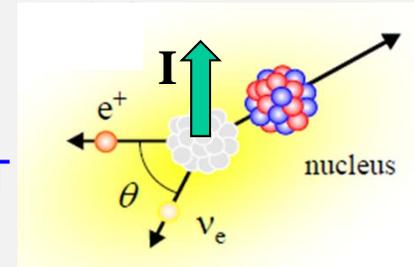
Décroissance β nucléaire : laboratoire pour tester le Modèle Standard

- 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 , ρ)

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

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

Test de CVC & unitarité CKM

Paramètre d'interférence de Fierz

Décroissance β 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 β

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

nécessite une détection "propre" des particules β

2. Corrélations β - ν

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

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

$a \propto |C_{exotic}|^2$ & $b \propto C_{exotic} \Rightarrow b$ 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 : $C_T/C_A < 9\%$ $C_S/C_V < 7\%$]

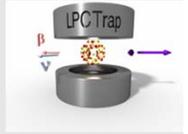
- *Projet SPIRAL @ GANIL*

- 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



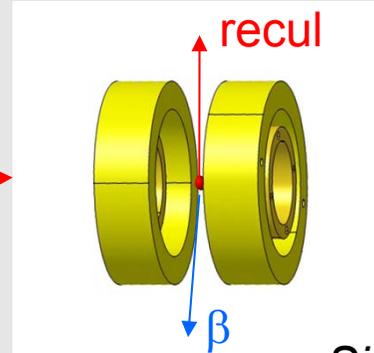
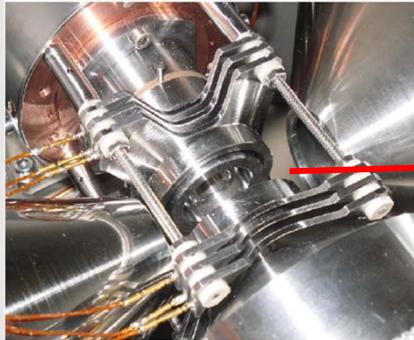
But de LPCTrap : améliorer la précision sur a_{GT} en utilisant des technologies modernes

Le dispositif LPCTrap



- Source radioactive confinée dans un piège de Paul transparent

faisceau ↘

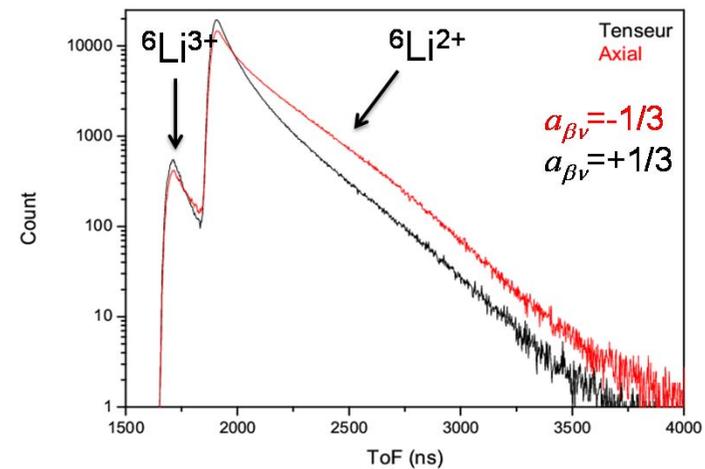


- détection en coïncidence des β – ions de recul
- a déduit de la distribution en temps de vol des reculs

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

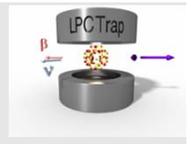
- ${}^6\text{He}$: bon candidat

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

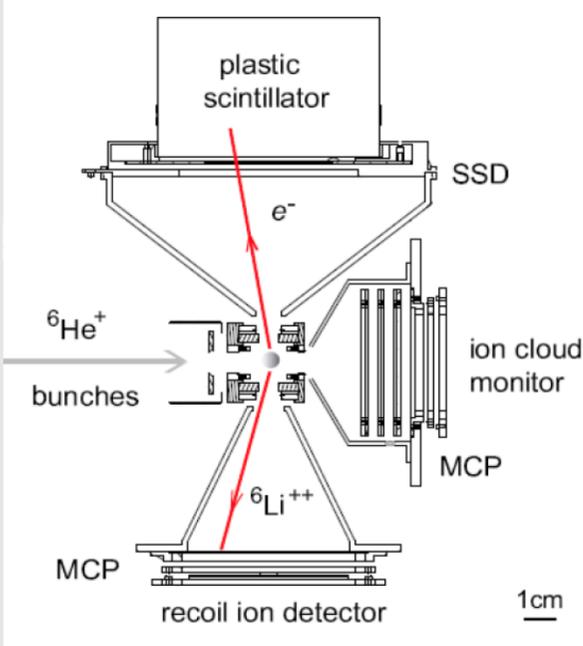


nécessite une connaissance approfondie du dispositif expérimental !

LPCTrap : le système de détection



• < 2010



E. Liénard et al., NIMA551(2005)

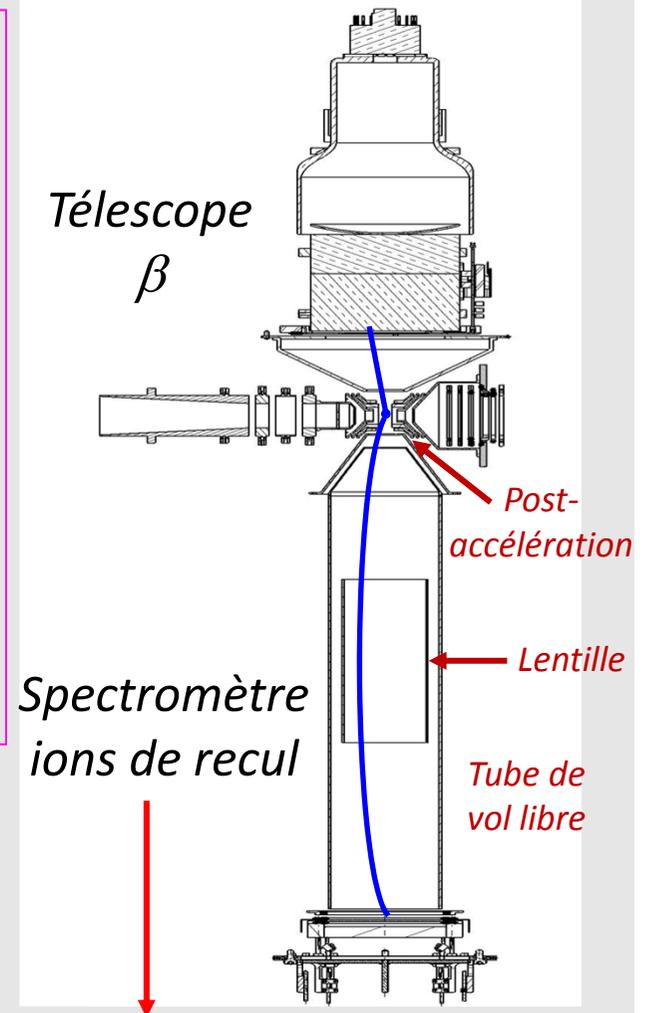
Trigger : scintillateur β

Paramètres :

- énergie β
- position β
- ToF ion de recul
- position ion de recul

+ marque en tps dans cycle & phase RF du piège

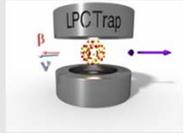
• ≥ 2010



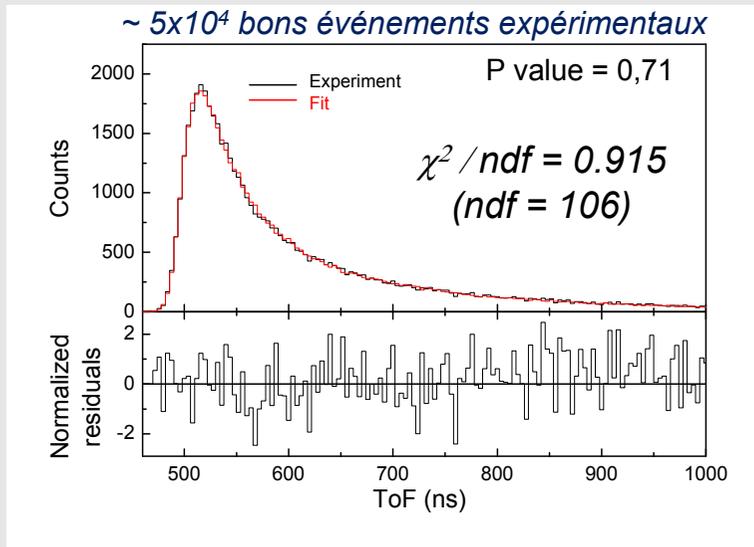
- Temps de vol des ions de recul
- Suppression du bruit de fond
- Contrôle des effets systématiques
- Contrôle de la cohérence des résultats

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

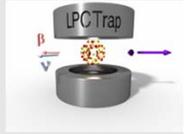
Incertitudes systématiques

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_{DSSSD}	0.2 mm	0.3	present data
E_{scint}		0.8	present data
E_{si}	10%	0.8	GEANT4
Background		0.9	present data
β Scattering	10%	1.9	GEANT4
Shake off	0 - 0.05	0.6	theoretical calculation
V_{RF}	2.5%	1.7	off-line measurement
total		7.5	

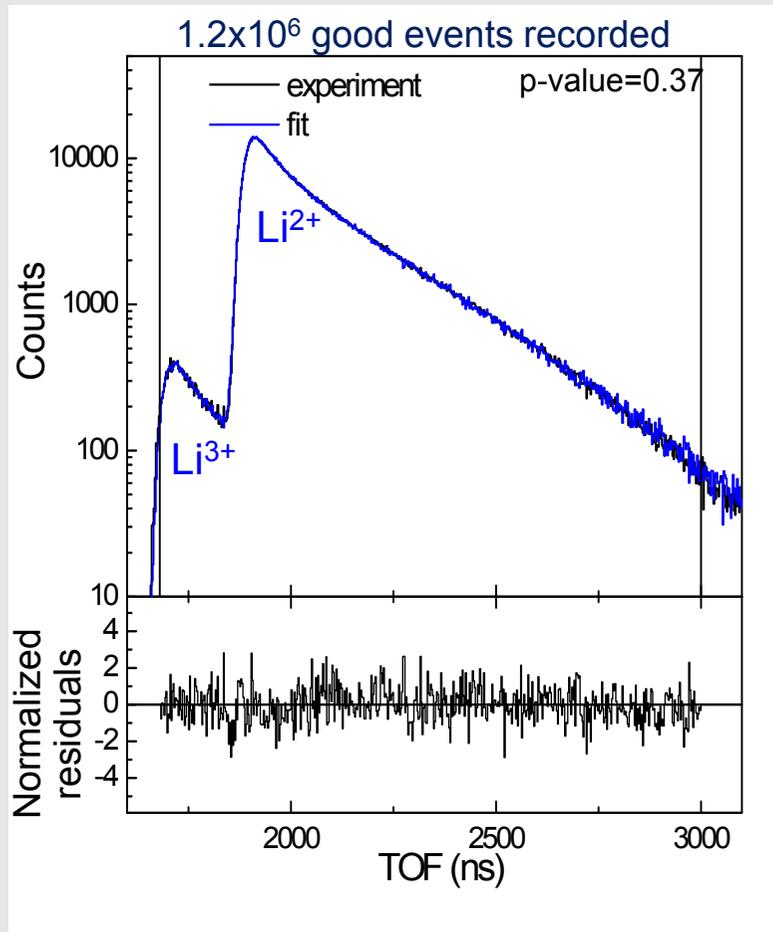
Principaux paramètres systématiques :

- *Mouvement du nuage (température)*
- *Diffusion des β*

${}^6\text{He}$: premiers résultats



- Dernière expérience en 2010



- Analyse réalisée pour extraire P_{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 χ^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 β - ν : 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)

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

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

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

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

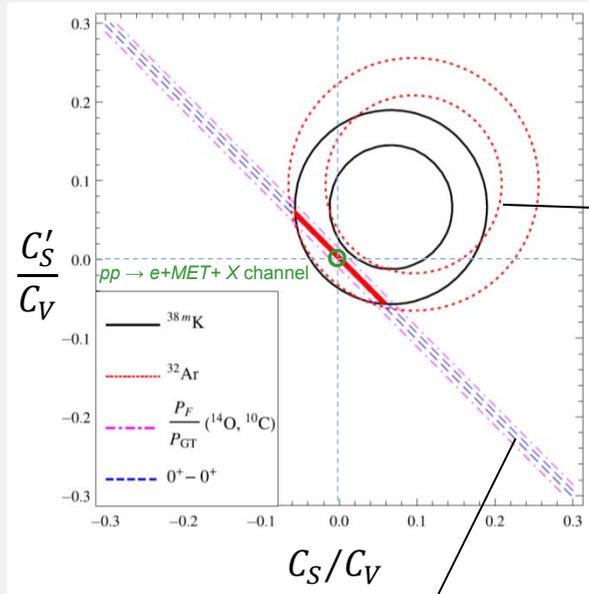
Barry R Holstein

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

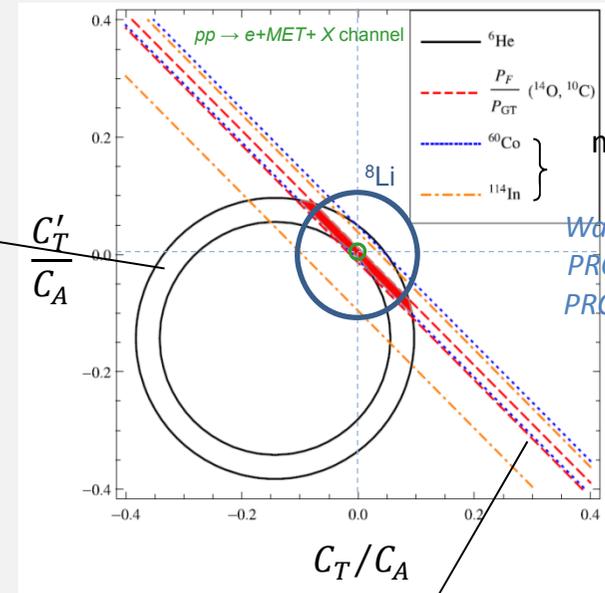
$$a(C_{S,T}^2, C_{V,A}^2)$$

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

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

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

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; β - 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
${}^{21}\text{Na}$	MOT	KVI-Groningen	In progress
${}^{32}\text{Ar}$	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; β - 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
${}^{21}\text{Na}$	MOT	KVI-Groningen	In progress
${}^{32}\text{Ar}$	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 ^{32}Ar Decay

- Source radioactive implantée dans une fine feuille

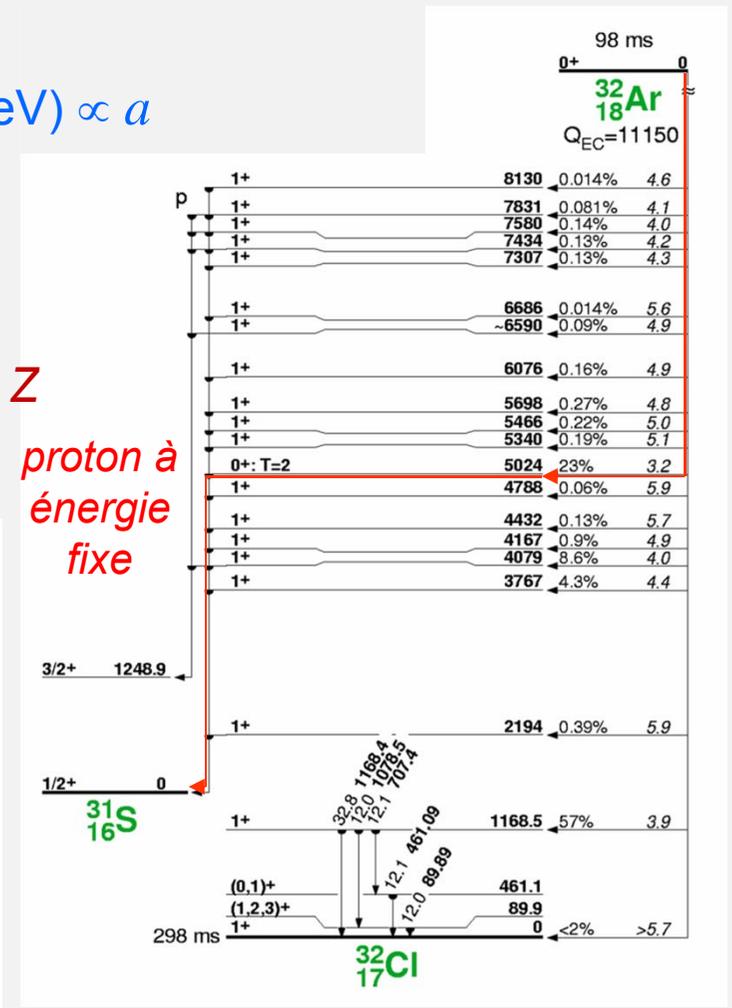
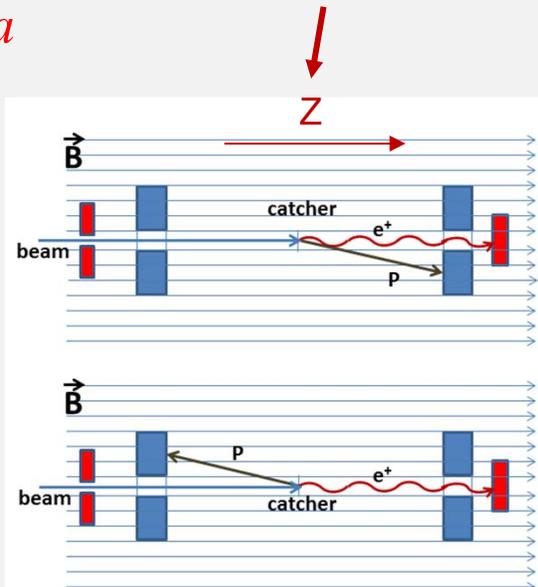
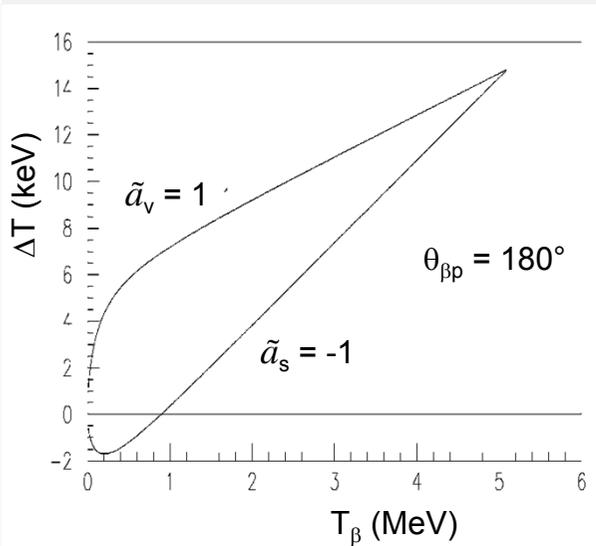
Severijns & Blank JPG44(2017)

Détection d'un p retardé émis pendant le recul

- p émis pendant le recul \rightarrow décalage cinétique ($\sim 10\text{keV}$) $\propto a$

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

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

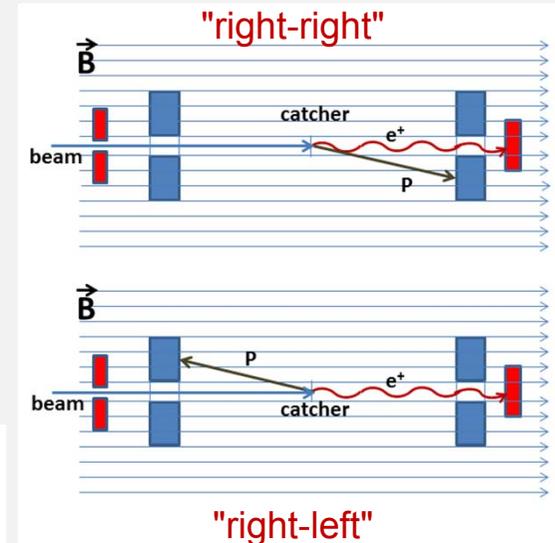
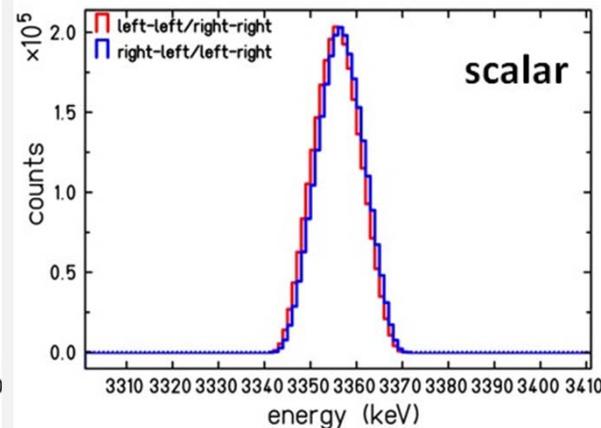
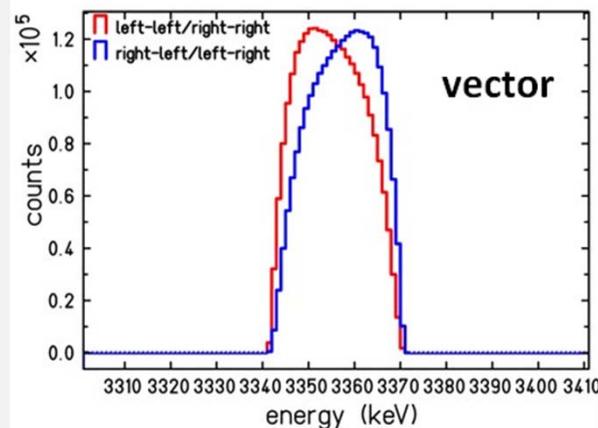


Severijns & Blank JPG44(2017)

- 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° & 180° 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 β → **0.1% semble accessible**

Candidats intéressants : ^{32}Ar , ^{20}Mg , ^{22}Al , ^{24}Si , ^{36}Ca ... → @ GANIL : SPIRAL & S³
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 β (D and R) & nEDM \rightarrow recherche de nouvelles sources de violation de CP
- Meilleurs résultats actuels en décroissances nucléaires :

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

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

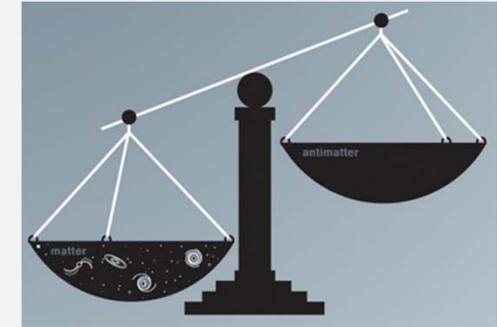
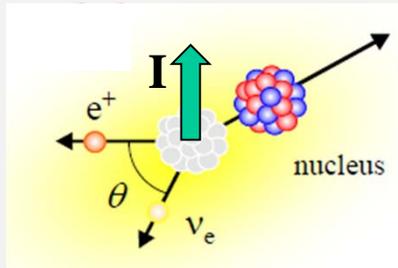


Illustration: Sandbox Studio

• Violation de CP : mesure de D



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

- coïncidences β -reculs
- \vec{J} connu

LPCTrap ?

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

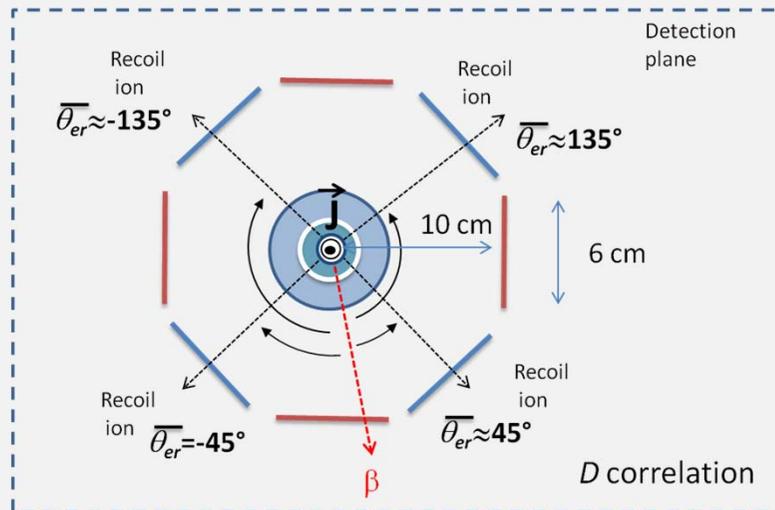
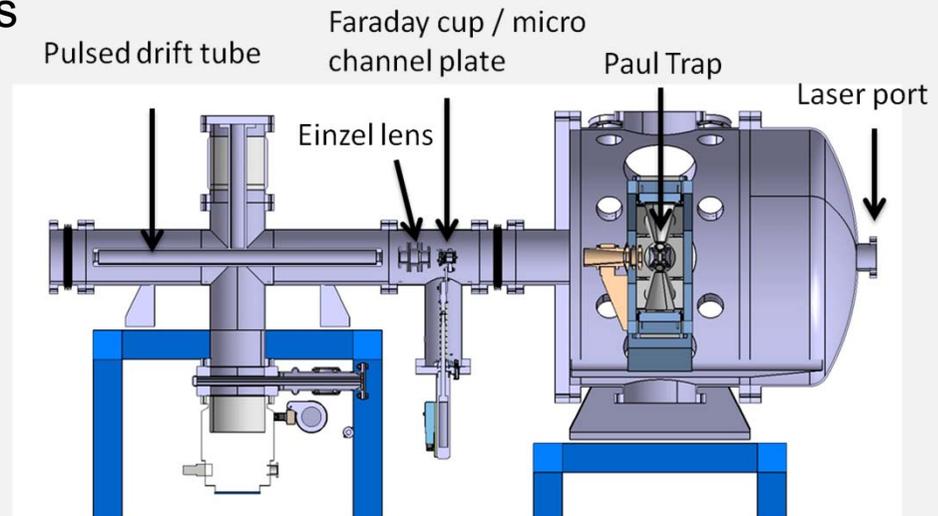
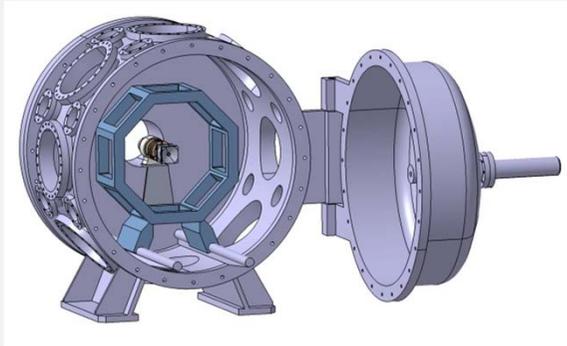
- $D \neq 0 \rightarrow \rho \neq 0$
 \rightarrow décroissance miroir !

Nouveaux faisceaux SPIRAL

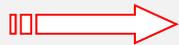
Test de la violation de CP : mesure de D

- *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}Mg , ^{39}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
- **T₀ : avril 2018**
- **1^{ère} étape** : **mesure polarisation nuage** ²³Mg @ JYFL
degré élevé attendu (> 99% in 0.2ms)
& évaluation via la mesure de A_β

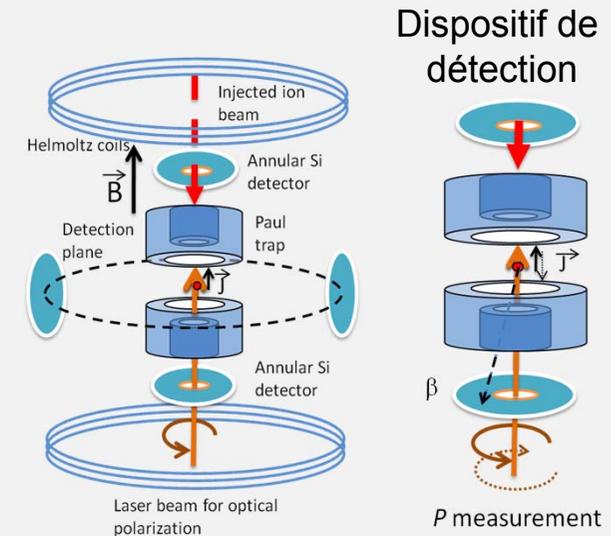
Mesures de D

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

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

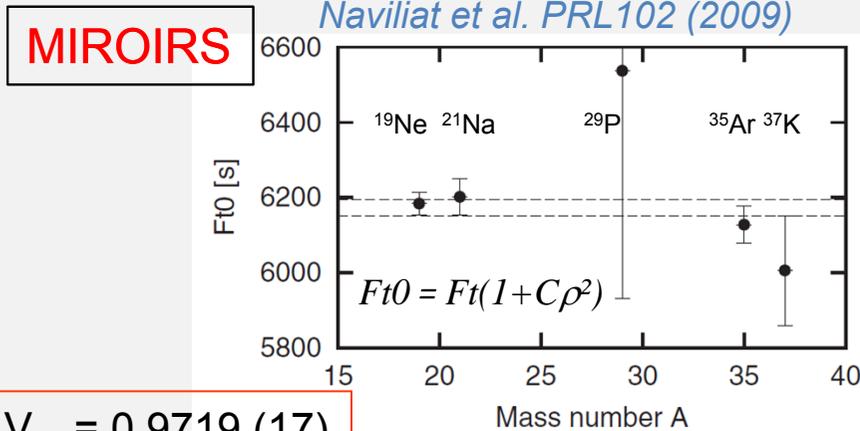
$$\text{DESIR: } \sigma_D \sim 5 \times 10^{-5} \quad \Rightarrow$$

- Facteur 10 meilleur que le résultat actuel (¹⁹Ne)
- Futur candidat : ³⁹Ca

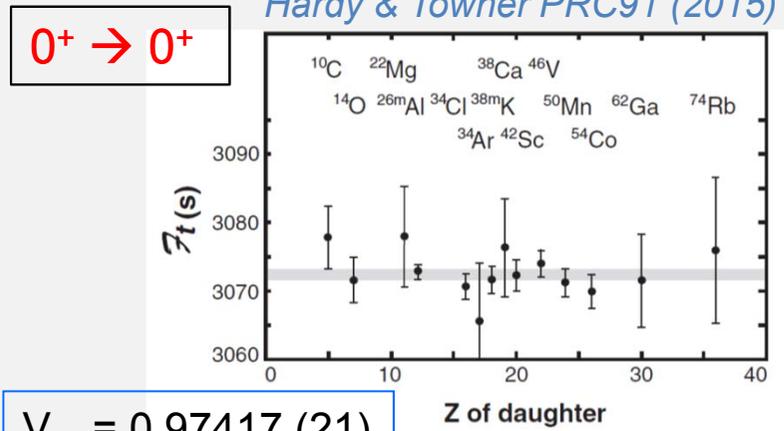


CVC, V_{ud} & CKM : mesures des valeurs ft

- *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

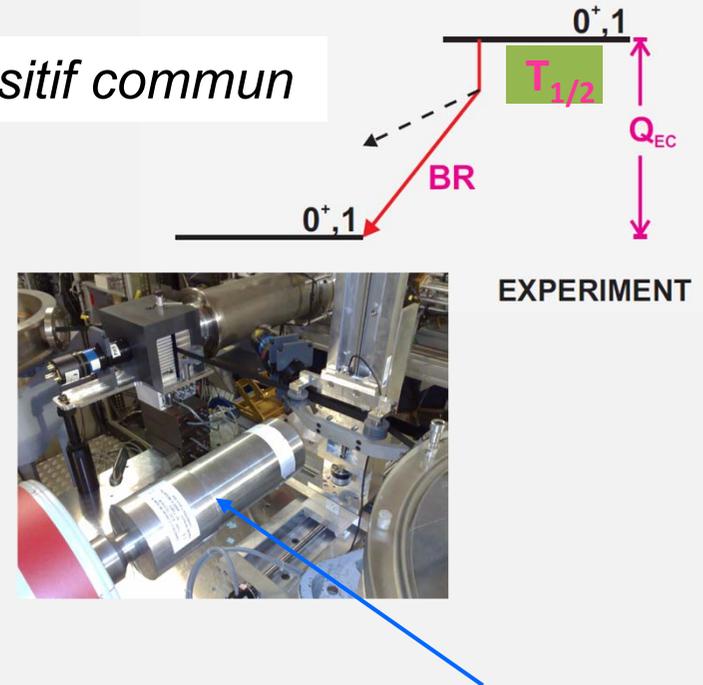
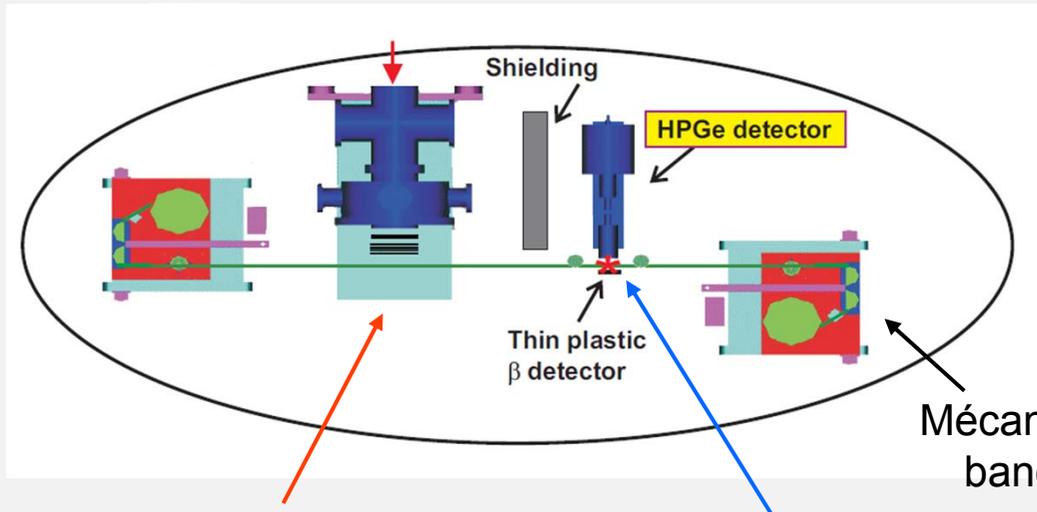
$$(Ft)^{miroir} = f_V t_{1/2} (1 + \delta_R) (1 + \delta_{NS} - \delta_C) = \frac{2K}{V_{ud}^2 (1 + \Delta_R) (1 + \frac{f_A}{f_V} \rho^2)}$$

Mesures de $T_{1/2}$, BR , M , ρ

$\delta_R, \delta_{NS}, \Delta_R$: corrections radiatives } < 1%
 δ_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

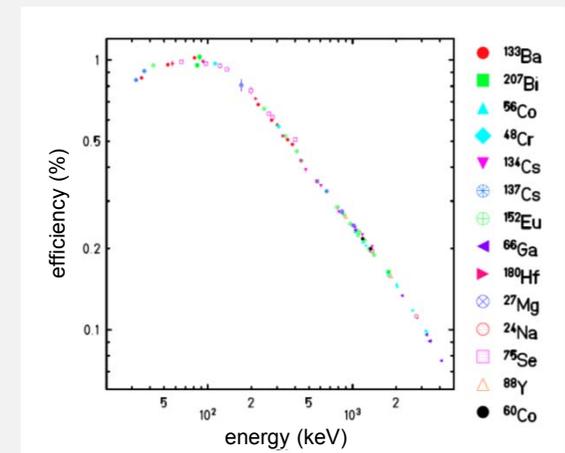
2. Dispositif de détection : scintillateur plastique (β) & HPGe (γ)

- Pour les mesures de BR, ϵ_γ 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 !*

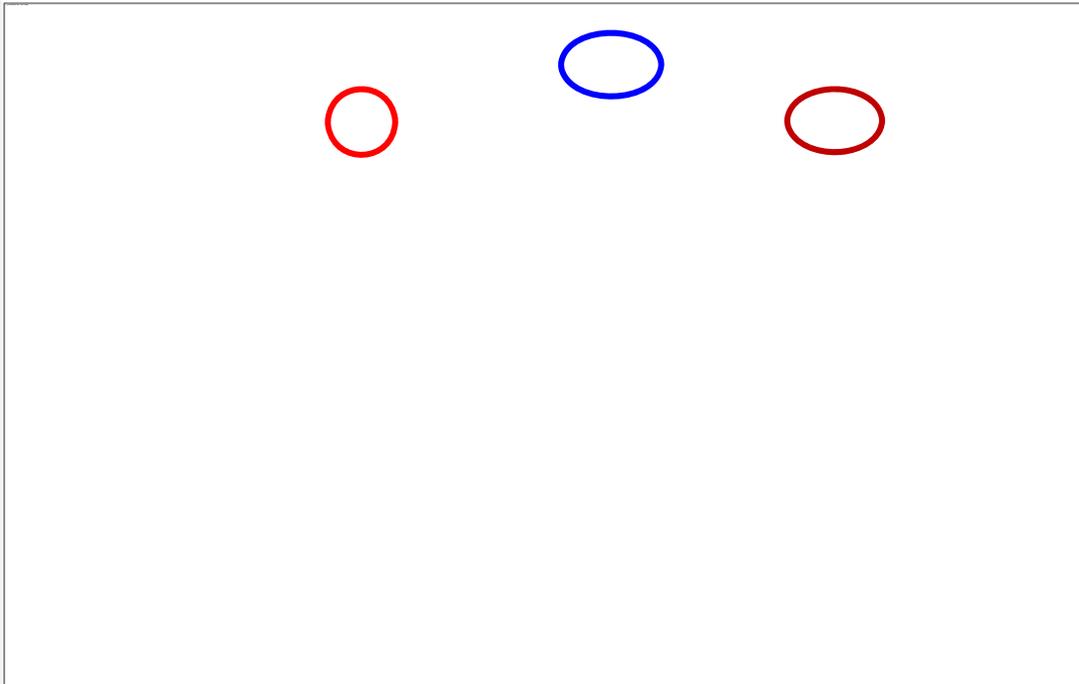
Blank et al. NIMA776 (2015)



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

- *Décroissances pures Fermi : état des lieux*

Hardy & Towner PRC91(2015)



Quelques contributions françaises :

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

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

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

→ $ft = 3072.27(72) \text{ s}$

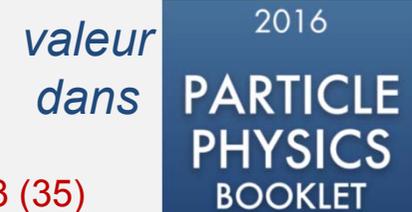
hypothèse CVC vérifiée à $\sim 10^{-4}$

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

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

décroissance du méson K : 0.22534 (93)

décroissance du méson B : 0.00393 (35)

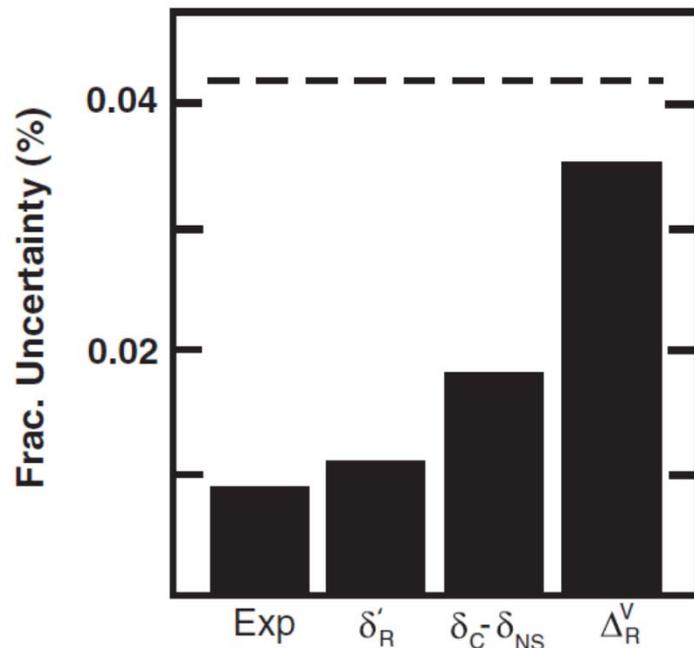


CVC, V_{ud} & CKM : mesures des valeurs ft

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

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

Hardy & Towner PRC91(2015)



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

Lam et al. PRC87(2013)

*≠ modèles
→ ≠ valeurs !*

Incertitude dominée par les corrections théoriques !

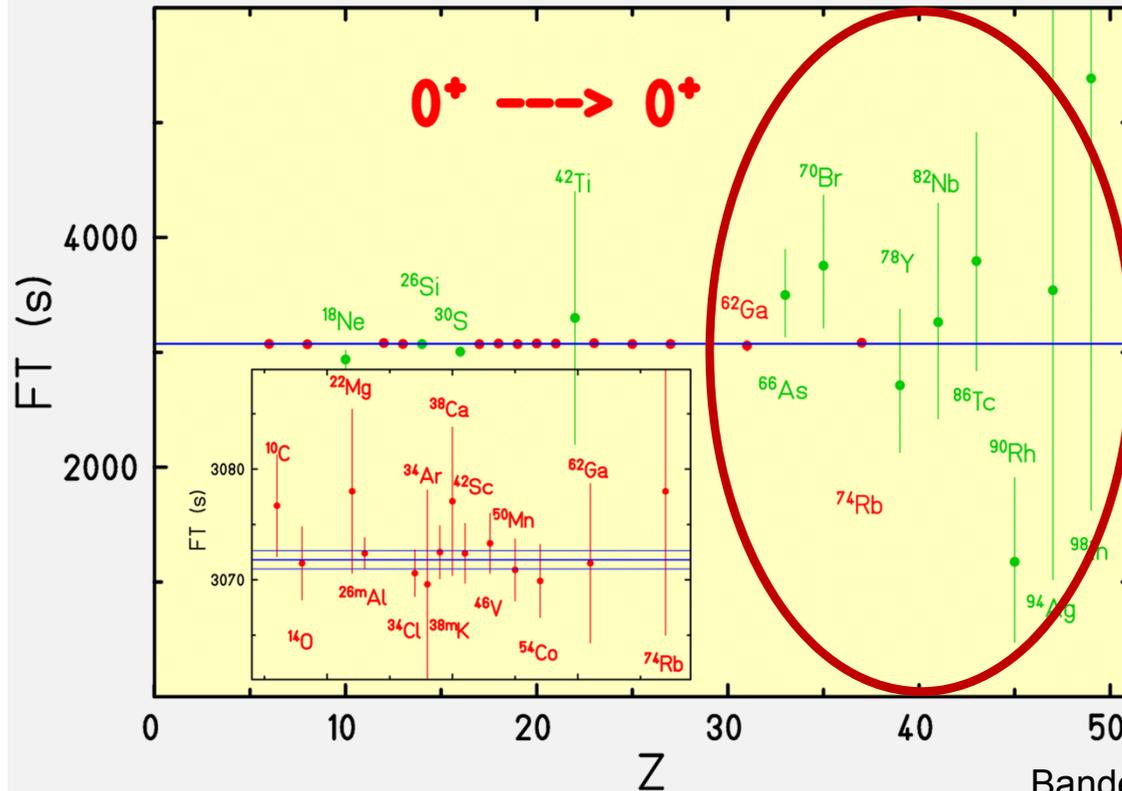


Crucial de réaliser des mesures pour les améliorer !

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

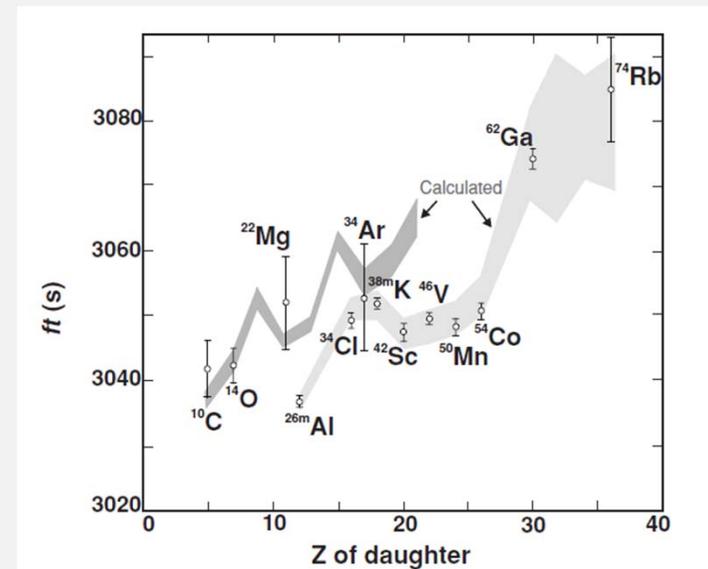
- *Décroissances pures Fermi : état des lieux & perspectives*

Mesures à Z plus élevé



Bandes → calculées avec $\overline{ft} / [(1 + \delta'_R)(1 - \delta_C + \delta_{NS})]$.

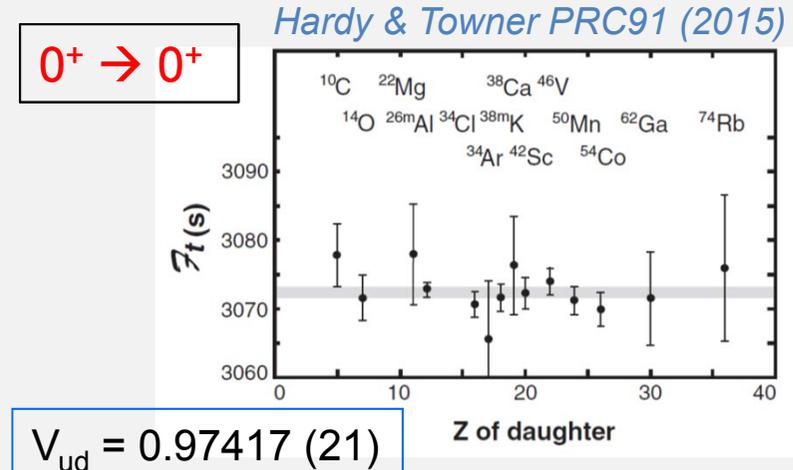
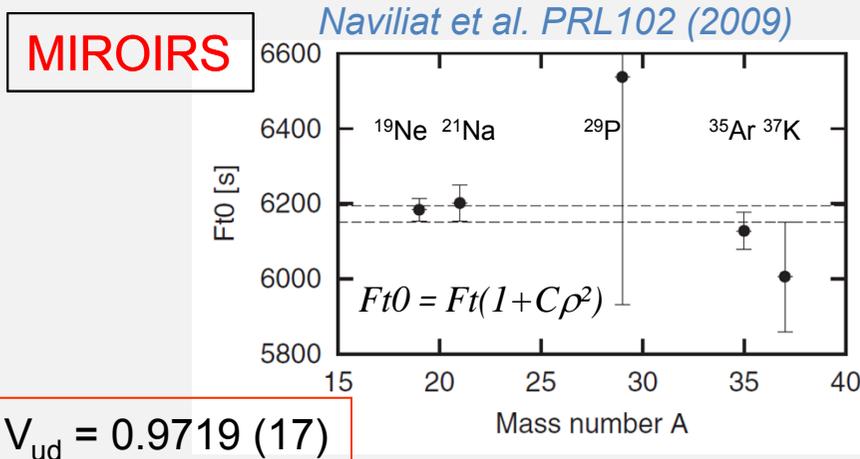
- test de CVC sur une base beaucoup plus grande
- à Z plus élevé, les corrections sont aussi plus grandes



Candidats intéressants : ^{66}As , ^{70}Br , ^{78}Y , ^{82}Nb , ^{86}Tc , ... → @ GANIL : faisceaux S^3 -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

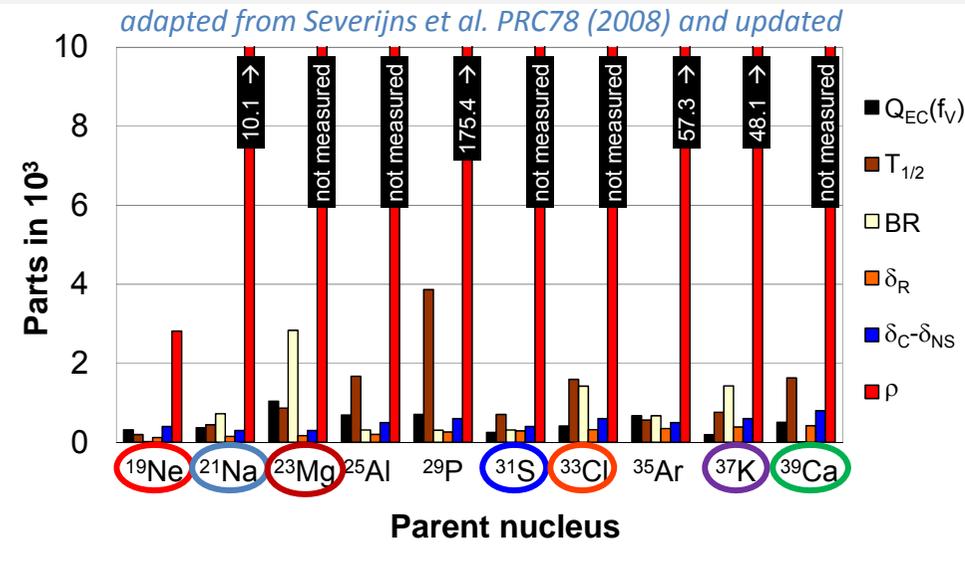
$$(Ft)^{miroir} = f_V t_{1/2} (1 + \delta_R) (1 + \delta_{NS} - \delta_C) = \frac{2K}{V_{ud}^2 (1 + \Delta_R) (1 + \frac{f_A}{f_V} \rho^2)}$$

Mesures de $T_{1/2}$, BR, M, ρ

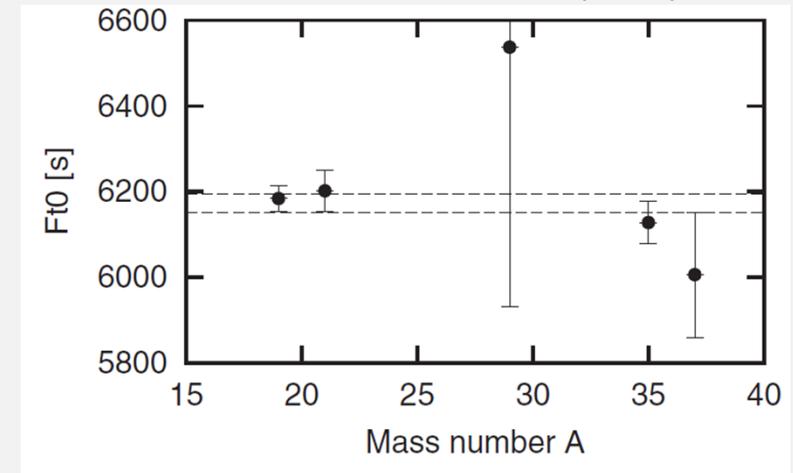
ρ est le paramètre limitant !

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

• Décroissances nucléaires miroirs



Naviliat et al. PRL102 (2009)



Communauté scientifique impliquée dans le domaine

FR = contribution française

^{19}Ne $T_{1/2}$: Broussard et al. PRL112 (2014)

^{21}Na M: Mukherjee et al. EPJA35 (2008)

$T_{1/2}$: Grinyer et al. PRC91 (2015) — FR

^{23}Mg M: Saastamoinen et al. PRC80 (2009)

$T_{1/2}$, BR: Magron et al. EPJA53 (2017) — FR

^{31}S M: Kankainen et al. PRC82 (2010)

$T_{1/2}$: Bacquias et al. EPJA48 (2012) — FR

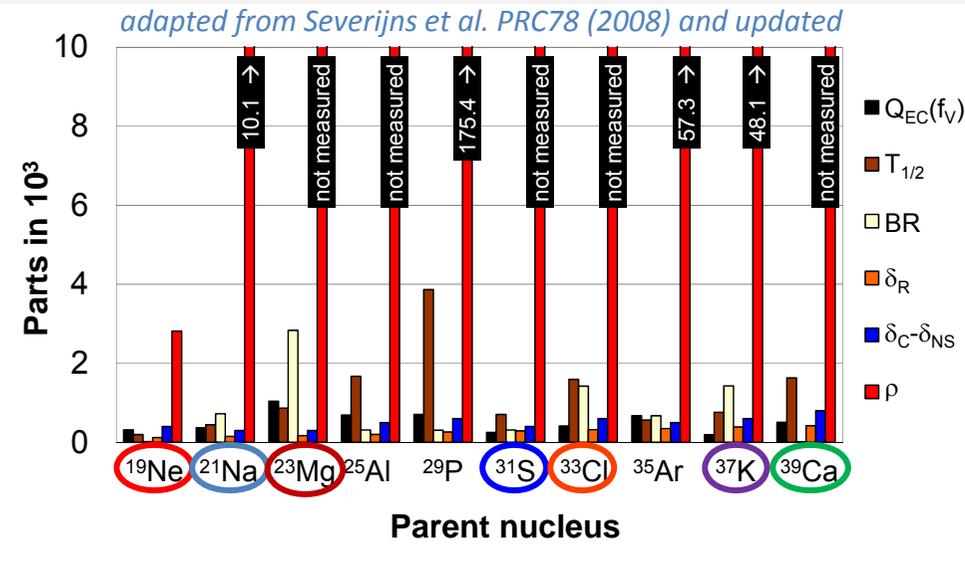
^{33}Cl $T_{1/2}$: Grinyer et al. PRC92 (2015) — FR

^{37}K $T_{1/2}$: Shidling et al. PRC90 (2014)

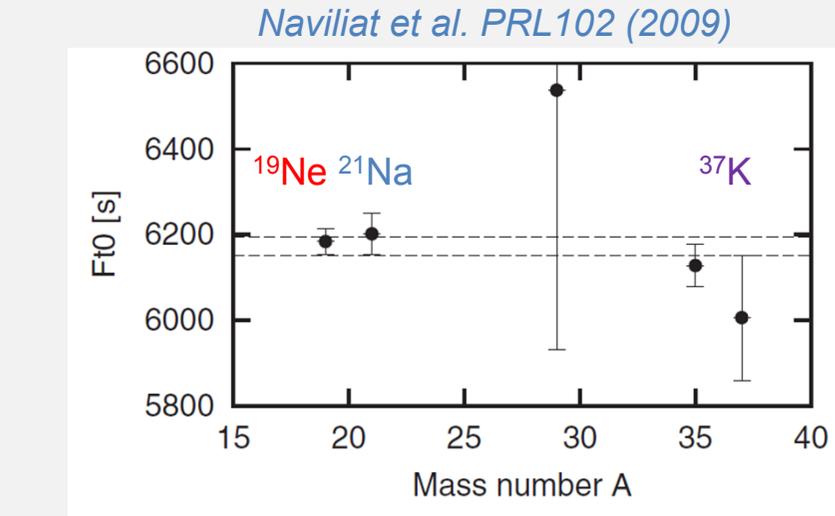
^{39}Ca $T_{1/2}$: Blank et al. EPJA44 (2010) — FR

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

• Décroissances nucléaires miroirs



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



Communauté scientifique impliquée dans le domaine... MAIS

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



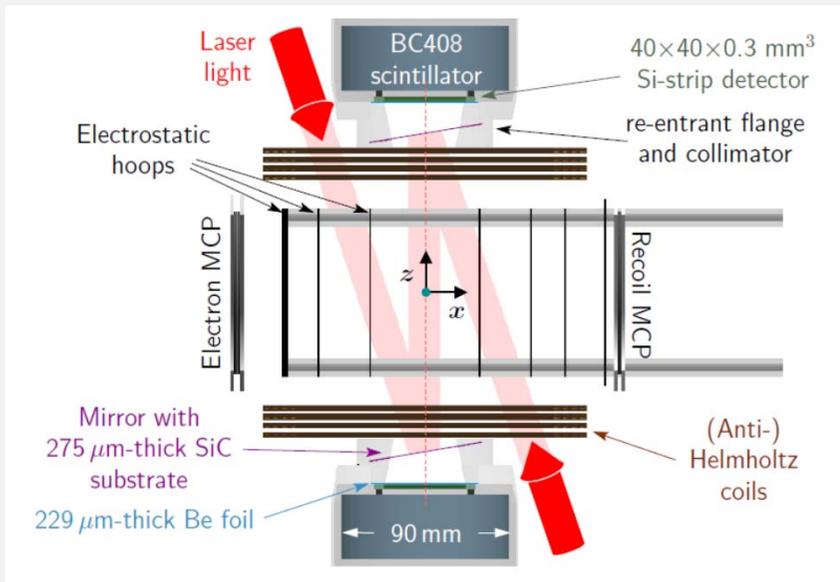
$$V_{ud} (2017) = 0.9721 (17) !!$$

Pour la détermination de V_{ud} , les valeurs de ρ doivent être améliorées ...

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

• Décroissances nucléaires miroirs

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



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

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

$\Rightarrow V_{ud}(2009) = 0.9719(17)$ $\rightarrow V_{ud}(2017) = 0.9728(14)!!$

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

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

- ρ précisément déterminé via des mesures de corrélation

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

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

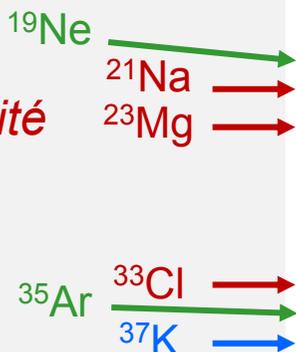
Severijns & Naviliat PST152(2013)

a or A @ 0.5% ?

meilleure sensibilité
avec des
mesures de a



LPCTrap@GANIL !

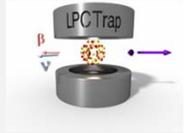


Parent nucleus	ΔV_{ud}	a		ΔV_{ud}	A	
		$(\Delta V_{ud})^{\text{limit}}$	Factor $\Delta \mathcal{F}t$		$(\Delta V_{ud})^{\text{limit}}$	Factor $\Delta \mathcal{F}t$
^3H	0.0011	0.0010	2.1	0.0011	0.0009	2.3
^{11}C	0.0025	0.0016	4.0	0.0207	0.0207	0.3
^{13}N	0.0017	0.0017	1.0	0.0123	0.0123	0.1
^{15}O	0.0020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

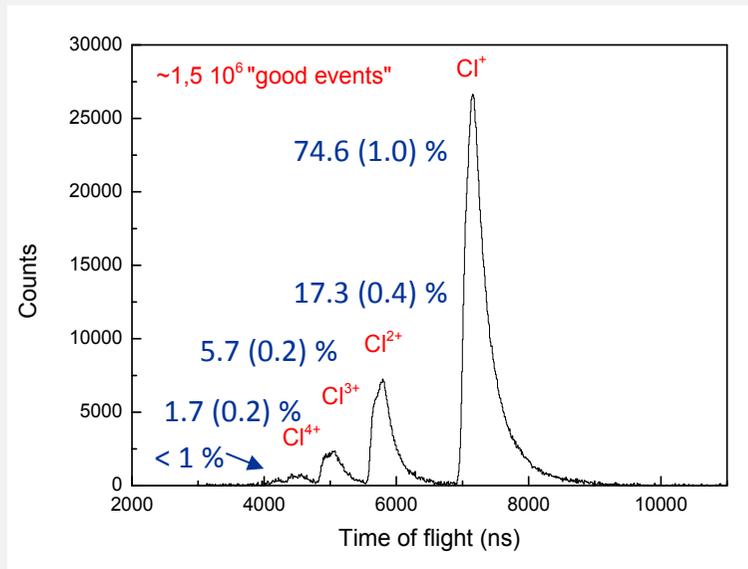
≠ le plus sensible

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



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

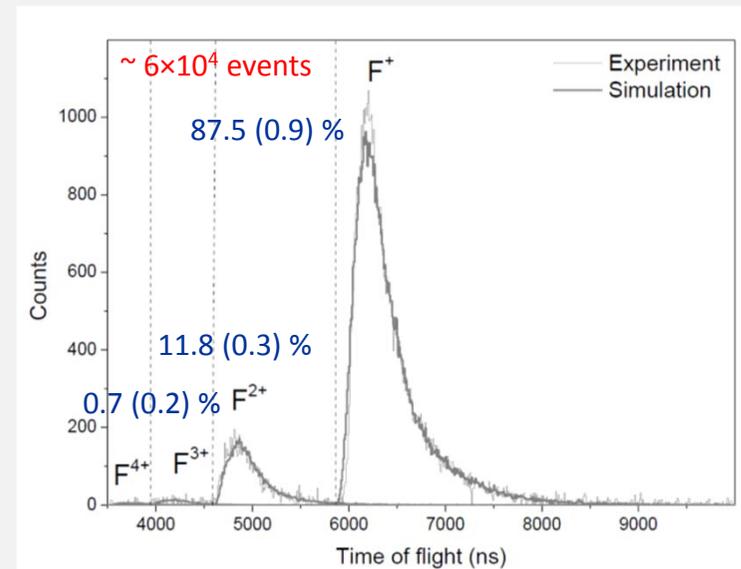
^{35}Ar : 2011 - 2012



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}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 ΔV_{ud}**

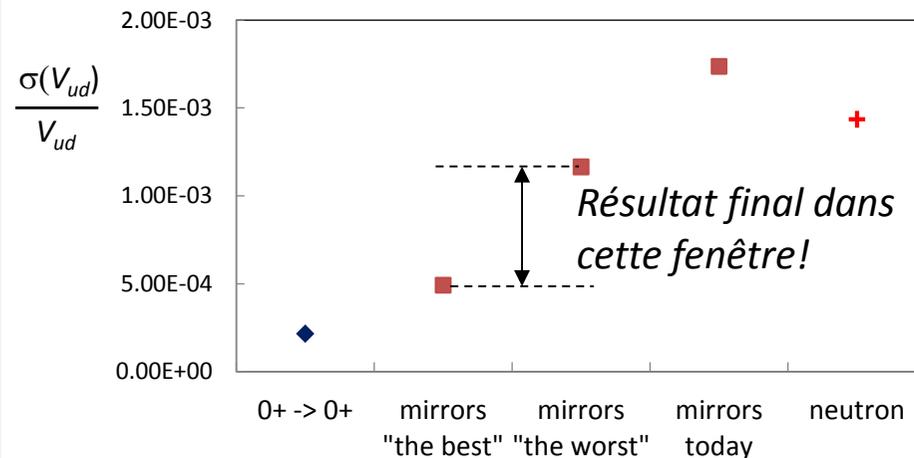
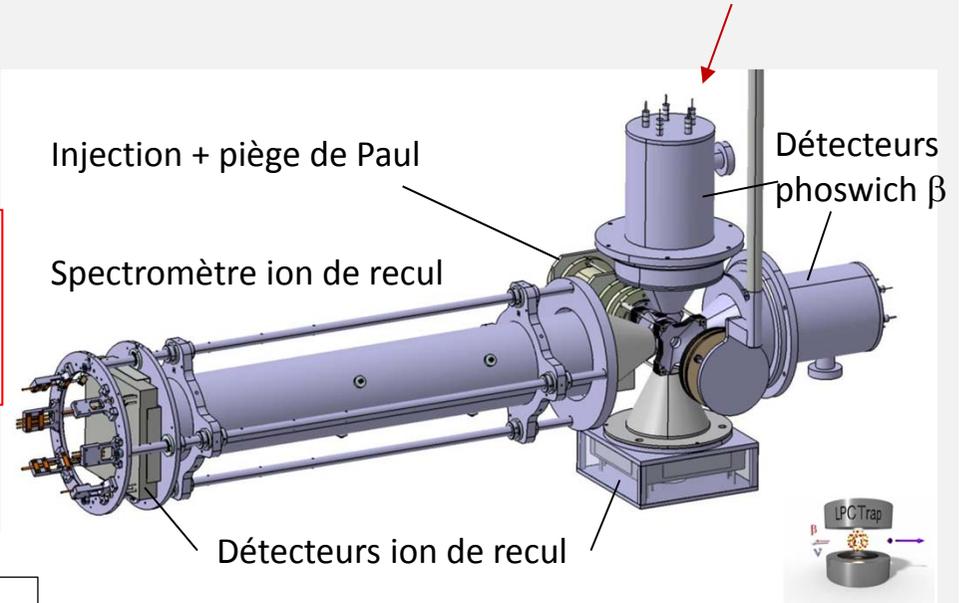
CVC, V_{ud} & CKM : mesures des valeurs ft

- *Décroissances nucléaires miroirs*

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

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

Konieczka et al. PRC93 (2016)

Severijns et al. PRC78 (2008)

$^{19}\text{Ne} \rightarrow ^{19}\text{F}$

$^{23}\text{Mg} \rightarrow ^{23}\text{Na}$

$^{27}\text{Si} \rightarrow ^{27}\text{Al}$

$^{33}\text{Cl} \rightarrow ^{33}\text{S}$

$^{35}\text{Ar} \rightarrow ^{35}\text{Cl}$

$^{37}\text{K} \rightarrow ^{37}\text{Ar}$

A	$\delta_C^{(\text{NCC1})}$	$\delta_C^{(\text{NSM})}$
17	0.166(17)	0.585(27)
19	0.339(34)	0.415(39)
21	0.300(30)	0.348(27)
23	0.316(32)	0.293(22)
25	0.413(41)	0.461(47)
27	0.439(44)	0.312(34)
29	0.520(52)	0.976(53)
31	0.585(59)	0.715(36)
33	0.705(71)	0.865(59)
35	0.366(37)	0.493(46)
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 β 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 , ρ) dans les transitions pures et miroirs

programme complet dans LRP 2017 NuPECC

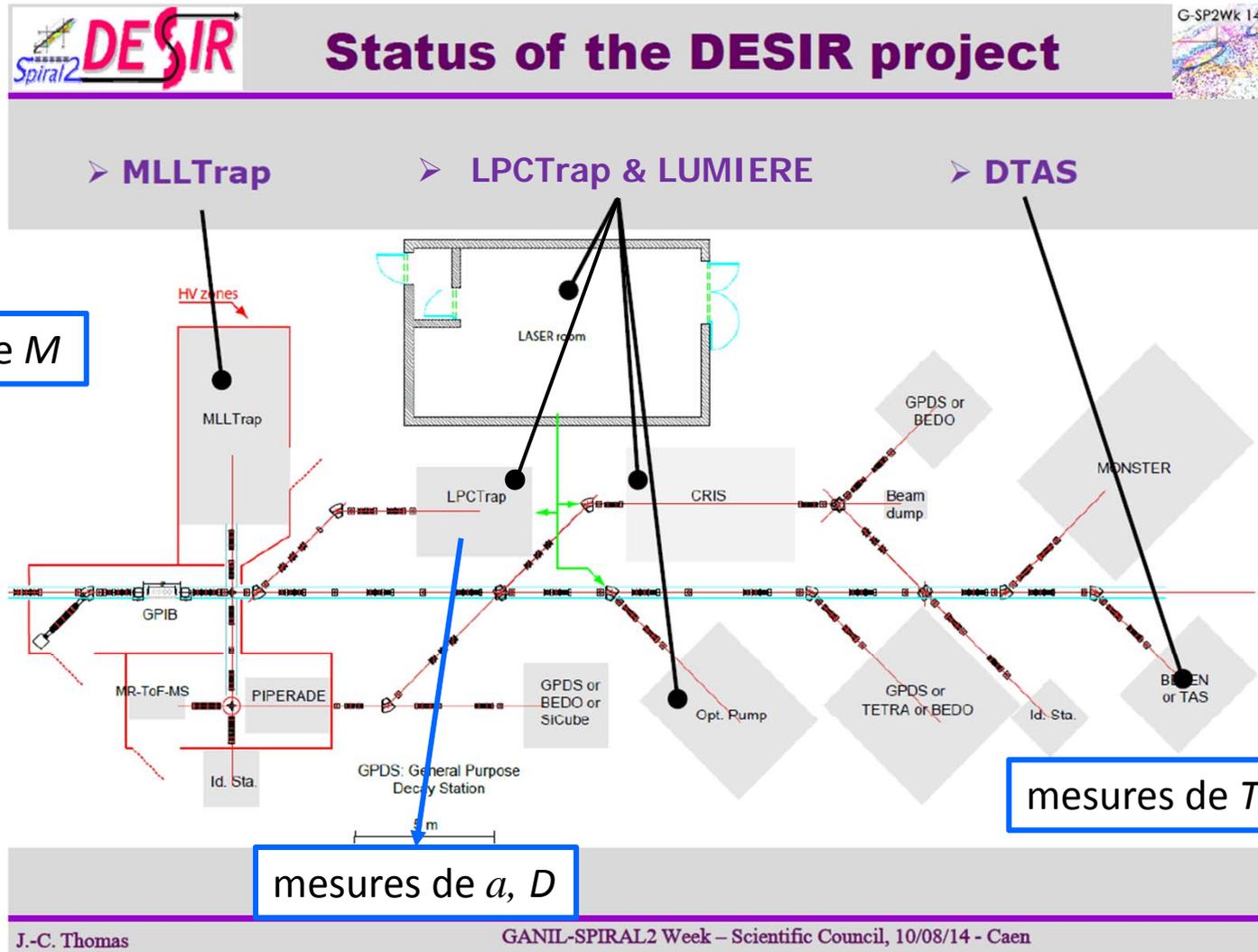


- **Toutes les plateformes de production de GANIL/SPIRAL(2) sont utiles**

- 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