

Développement d'une détection par SPC pour la recherche de la désintégration $\beta\beta 0\nu$

Séminaire Suabtech - 2/2/2023

Vincent Cecchini

Université de Bordeaux, LP2i-B, Subatech, CNRS/IN2P3, IMT-Atlantique.
Co-direction Anselmo Meregaglia, Pascal Lautridou.

université
de BORDEAUX



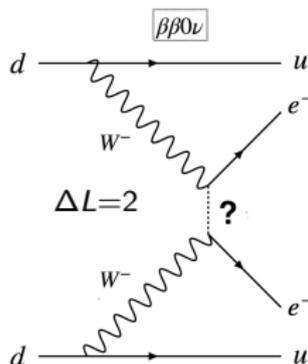
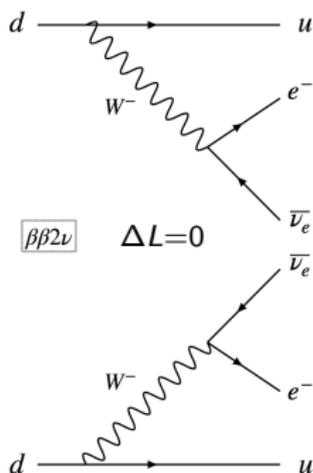
Sommaire

- 1 La décroissance $\beta\beta 0\nu$
- 2 R2D2: Rare Decays with Radial Detector
 - Les motivations
 - Les Compteurs Proportionnels Sphériques (SPC)
 - Configuration expérimentale utilisée
- 3 Simulation et modélisation du signal
 - Analyse des formes d'ondes
 - Simulation du détecteur
 - Modélisation du signal
- 4 Résultats expérimentaux
 - Résolution en énergie
 - Mesure de la lumière de scintillation
 - Reconstruction de la position
- 5 Conclusions

La double désintégration bêta

$\beta\beta : (A,Z) \rightarrow (A,Z+2) + 2e^- (+ 2\bar{\nu}_e)$. Si β impossible ($M_{(Z+1)}^A(Y) > M_{(Z)}^A(X)$)

Deux canaux :



- $\beta\beta 2\nu$ autorisée par le Modèle Standard \rightarrow observée, $T_{1/2}^{2\nu} > 10^{18}$ ans.
- $\beta\beta 0\nu$ interdite par le Modèle Standard \rightarrow non observée, limite $T_{1/2}^{0\nu} > 2.3 \times 10^{26}$ ans.

Pourquoi étudier la décroissance $\beta\beta 0\nu$?

Neutrinos :

- Particules élémentaires
- 3 états de saveur (e, μ , τ)
- **Charge électrique nulle**
- Pas de charge de couleur

→ Interagissent seulement via l'**interaction faible**.

Modèle avant découverte des oscillations: $m_\nu = 0$

ν oscillation \Rightarrow (faibles) masses

Formalisme de Dirac $\nu \neq \bar{\nu}$

- Neutrinos massifs
- Conservation du nombre leptonique L

Décroissance $\beta\beta 0\nu$ impossible

Formalisme de Majorana $\nu = \bar{\nu}$

- Neutrinos massifs
- Non conservation de L

Décroissance $\beta\beta 0\nu$ autorisée.

→ Observer une décroissance $\beta\beta 0\nu \Rightarrow \nu$ de Majorana.

Pourquoi étudier la décroissance $\beta\beta\nu$?

Neutrinos :

- Particules élémentaires
- 3 états de saveur (e, μ , τ)
- **Charge électrique nulle**
- Pas de charge de couleur

→ Interagissent seulement via l'**interaction faible**.

Modèle avant découverte des oscillations: $m_\nu = 0$

ν oscillation \Rightarrow (faibles) masses

Formalisme de Dirac $\nu \neq \bar{\nu}$

- Neutrinos massifs
- Conservation du nombre leptonique L

Décroissance $\beta\beta\nu$ impossible

Formalisme de Majorana $\nu = \bar{\nu}$

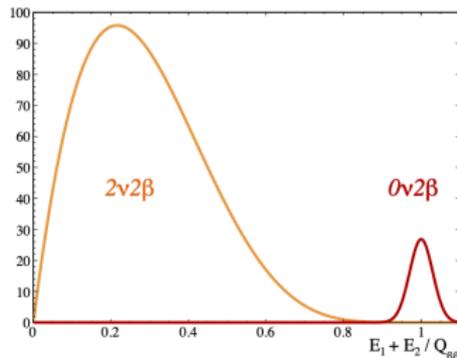
- Neutrinos massifs
- Non conservation de L

Décroissance $\beta\beta\nu$ autorisée.

→ Observer une décroissance $\beta\beta\nu \Rightarrow \nu$ de Majorana.

Comment mesurer une décroissance $\beta\beta 0\nu$?

Les spectres en énergie des $\beta\beta 2\nu$ et $\beta\beta 0\nu$ diffèrent :



- $\beta\beta 2\nu$: ν emporte une part de l'énergie de désintégration.
- $\beta\beta 0\nu$: l'énergie est distribuée entre les e^- uniquement.

→ Recherche d'un pic à $Q_{\beta\beta}^1$.

$$^1Q_{\beta\beta} = M\left(\overset{A}{Z}X\right) - M\left(\overset{A}{Z+2}Y\right)$$

Caractéristiques des détecteurs $\beta\beta\nu$

Maximiser la sensibilité à

$$T_{1/2}^{0\nu} \left(\propto \sqrt{\frac{M \cdot t}{r_b \Delta E}} \right)$$

- Grande masse d'isotope $\beta\beta$ (maximiser $M \cdot t$).
- Excellente résolution en énergie (minimiser ΔE).
- Très bas bruit de fond radioactif (minimiser r_b dans la ROI).

Avantages du zéro bruit de fond
($\Leftrightarrow r_b \cdot \Delta E \cdot M \cdot t < 1$)

$$T_{1/2}^{0\nu} \propto \frac{M \cdot t}{N}$$

→ Même accroissement de $T_{1/2}^{0\nu}$:
sensibilité linéaire avec $M \cdot t$ Bruits de fond : Radioactivité naturelle, rayonnements cosmiques, $\beta\beta 2\nu$.→ Réduction : Blindage, Profondeur, Propriétés isotope $\beta\beta$.

+ Identification des 2 électrons

Caractéristiques des détecteurs $\beta\beta\nu$

Maximiser la sensibilité à

$$T_{1/2}^{0\nu} \left(\propto \sqrt{\frac{M \cdot t}{r_b \Delta E}} \right)$$

- Grande masse d'isotope $\beta\beta$ (maximiser $M \cdot t$).
- Excellente résolution en énergie (minimiser ΔE).
- Très bas bruit de fond radioactif (minimiser r_b dans la ROI).

Avantages du zéro bruit de fond
($\Leftrightarrow r_b \cdot \Delta E \cdot M \cdot t < 1$)

$$T_{1/2}^{0\nu} \propto \frac{M \cdot t}{N}$$

→ Même accroissement de $T_{1/2}^{0\nu}$:
sensibilité linéaire avec $M \cdot t$

Bruits de fond : Radioactivité naturelle, rayonnements cosmiques, $\beta\beta 2\nu$.

→ Réduction : Blindage, Profondeur, Propriétés isotope $\beta\beta$.

+ Identification des 2 électrons

Intérêts du xénon

- ^{136}Xe : candidat $\beta\beta 0\nu$.
- $Q_{\beta\beta}$ élevée (2.458 MeV) → bruit de fond réduit.
- $T_{1/2}^{2\nu} = 2.2 \times 10^{21}$ ans : ↑ le rapport signal ($\beta\beta 0\nu$) sur bruit ($\beta\beta 2\nu$).
- Bonne **résolution en énergie** :
- Importante **abondance naturelle** (8.9%).
- Méthodes d'**enrichissement** connues.
- **Gaz noble** : peu de réactions chimiques, pas de toxicité.
- Plusieurs expériences $0\nu\beta\beta$ → **Conditionnement éprouvé**.

Intérêts du xénon

- ^{136}Xe : candidat $\beta\beta 0\nu$.
- $Q_{\beta\beta}$ **élevée** (2.458 MeV) → bruit de fond réduit.
- $T_{1/2}^{2\nu} = 2.2 \times 10^{21}$ ans : ↑ le rapport signal ($\beta\beta 0\nu$) sur bruit ($\beta\beta 2\nu$).
- Bonne **résolution en énergie** :
- Importante **abondance naturelle** (8.9%).
- Méthodes d'**enrichissement** connues.
- **Gaz noble** : peu de réactions chimiques, pas de toxicité.
- Plusieurs expériences $0\nu\beta\beta$ → **Conditionnement éprouvé**.

Intérêts du xénon

- ^{136}Xe : candidat $\beta\beta 0\nu$.
- $Q_{\beta\beta}$ **élevée** (2.458 MeV) → bruit de fond réduit.
- $T_{1/2}^{2\nu} = 2.2 \times 10^{21}$ ans : ↑ le rapport signal ($\beta\beta 0\nu$) sur bruit ($\beta\beta 2\nu$).
- Bonne **résolution en énergie** :
 - Théorie de Fano: $\frac{\Delta E}{E} = 2.355 \frac{\sigma}{N_i} = 2.355 \frac{\sqrt{F \times W}}{\sqrt{E}} \sim 0.3\%$ FWHM.
- Importante **abondance naturelle** (8.9%).
- Méthodes d'**enrichissement** connues.
- **Gaz noble** : peu de réactions chimiques, pas de toxicité.
- Plusieurs expériences $0\nu\beta\beta$ → **Conditionnement éprouvé**.

Intérêts du xénon

- ^{136}Xe : candidat $\beta\beta 0\nu$.
- $Q_{\beta\beta}$ **élevée** (2.458 MeV) → bruit de fond réduit.
- $T_{1/2}^{2\nu} = 2.2 \times 10^{21}$ ans : ↑ le rapport signal ($\beta\beta 0\nu$) sur bruit ($\beta\beta 2\nu$).
- Bonne **résolution en énergie** :
 - Théorie de Fano: $\frac{\Delta E}{E} = 2.355 \frac{\sigma}{N_i} = 2.355 \frac{\sqrt{F \times W}}{\sqrt{E}} \sim 0.3\%$ FWHM.
- Importante **abondance naturelle** (8.9%).
- Méthodes d'**enrichissement** connues.
- **Gaz noble** : peu de réactions chimiques, pas de toxicité.
- Plusieurs expériences $0\nu\beta\beta$ → **Conditionnement éprouvé**.

Intérêts du xénon

- ^{136}Xe : candidat $\beta\beta 0\nu$.
- $Q_{\beta\beta}$ **élevée** (2.458 MeV) → bruit de fond réduit.
- $T_{1/2}^{2\nu} = 2.2 \times 10^{21}$ ans : ↑ le rapport signal ($\beta\beta 0\nu$) sur bruit ($\beta\beta 2\nu$).
- Bonne **résolution en énergie** :
 - Théorie de Fano: $\frac{\Delta E}{E} = 2.355 \frac{\sigma}{N_i} = 2.355 \frac{\sqrt{F \times W}}{\sqrt{E}} \sim 0.3\%$ FWHM.
- Importante **abondance naturelle** (8.9%).
- Méthodes d'**enrichissement** connues.
- **Gaz noble** : peu de réactions chimiques, pas de toxicité.
- Plusieurs expériences $0\nu\beta\beta$ → **Conditionnement éprouvé**.

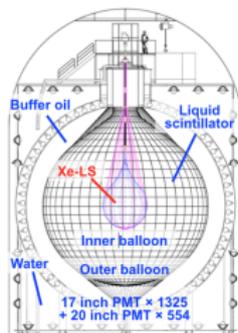
Intérêts du xénon

- ^{136}Xe : candidat $\beta\beta 0\nu$.
- $Q_{\beta\beta}$ **élevée** (2.458 MeV) → bruit de fond réduit.
- $T_{1/2}^{2\nu} = 2.2 \times 10^{21}$ ans : ↑ le rapport signal ($\beta\beta 0\nu$) sur bruit ($\beta\beta 2\nu$).
- Bonne **résolution en énergie** :
 - Théorie de Fano: $\frac{\Delta E}{E} = 2.355 \frac{\sigma}{N_i} = 2.355 \frac{\sqrt{F \times W}}{\sqrt{E}} \sim 0.3\%$ FWHM.
- Importante **abondance naturelle** (8.9%).
- Méthodes d'**enrichissement** connues.
- **Gaz noble** : peu de réactions chimiques, pas de toxicité.
- Plusieurs expériences $0\nu\beta\beta$ → **Conditionnement éprouvé**.
 - A l'état liquide (EXO, KamLAND-Zen).
 - Gaz pressurisé (NEXT, PANDAX-III) → localisation de l'interaction et distinction des 2 traces (Imageurs avec $> 10^2 - 10^4$ voies de lecture).

Limites actuelles sur la demie-vie de la $\beta\beta 0\nu$

KamLAND-ZEN

Liquide scintillant dopé au ^{136}Xe
(~3%)



- Exposition: 970 kg.yr
- $\beta\beta 0\nu$ limite (90% C.L.):

$$T_{1/2}^{0\nu} > 2.3 \times 10^{26} \text{ ans}$$

arxiv.org/abs/2203.02139

GERDA

Diodes Germanium enrichies en
 ^{76}Ge (~87%)



- Exposition: 127.2 kg.yr
- $\beta\beta 0\nu$ limite (90% C.L.):

$$T_{1/2}^{0\nu} > 1.8 \times 10^{26} \text{ ans}$$

[10.1103/PhysRevLett.125.252502](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevLett.125.252502)

Sommaire

- 1 La décroissance $\beta\beta 0\nu$
- 2 R2D2: Rare Decays with Radial Detector
 - Les motivations
 - Les Compteurs Proportionnels Sphériques (SPC)
 - Configuration expérimentale utilisée
- 3 Simulation et modélisation du signal
 - Analyse des formes d'ondes
 - Simulation du détecteur
 - Modélisation du signal
- 4 Résultats expérimentaux
 - Résolution en énergie
 - Mesure de la lumière de scintillation
 - Reconstruction de la position
- 5 Conclusions

Motivations pour une SPC HP au Xe

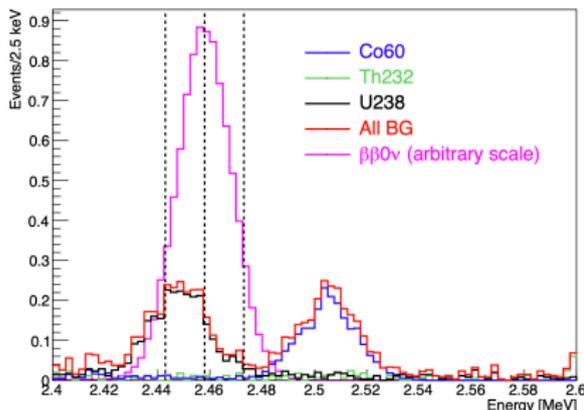
- Mesures de la **résolution en énergie du xénon gazeux** : $\Delta E/E = 0.6\%$ FWHM (γ de 662 keV à $P < 60$ bar, Bolotnikov et Ramsey).
- NEWS-G, **résultats prometteurs des SPC** pour la recherche d'événements rares au keV (low mass dark matter, KK-axions) : très faible seuil de détection, décomposition du signal en contributions individuelles d' e^- .
- Structure mécanique simple \Rightarrow **Peu de matériaux** \Rightarrow Réduction du bruit de fond radioactif.
- **Voie de lecture unique** (mesure la lumière de scintillation possible).
- Analyse numérique de la forme des signaux : **possible localisation / séparation des traces** \rightarrow rejet du bruit de fond.

R2D2 : motivations et objectifs

Simulation préliminaire d'une SPC de $r=37$ cm contenant 50 kg de ^{136}Xe (gazeux à 40 bar) et des bruits de fond. Avec une ROI de $Q_{\beta\beta} \pm 0.6\%$:

- Efficacité de détection de 64%
- Bruit de fond de **0.1 evt/an**
- Sensibilité à la demie-vie compétitive : $T_{1/2}^{0\nu} > 2.5 \times 10^{25}$ ans

EXO-200 : $T_{1/2}^{0\nu} > 3.5 \times 10^{25}$ ans
avec ~ 200 kg de xénon.

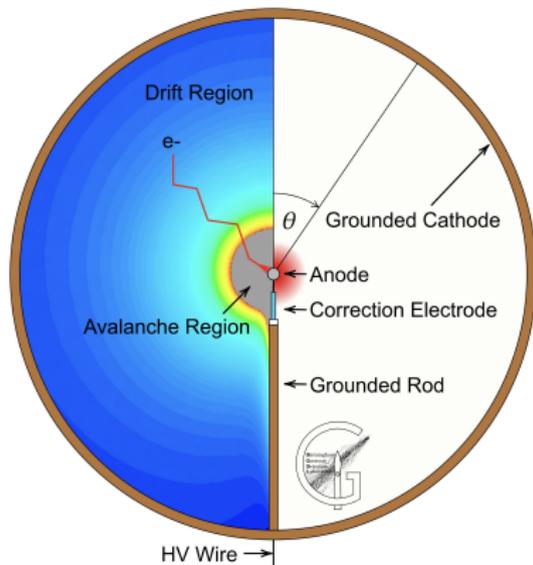


→ R2D2 R&D : **1% FWHM** de résolution en énergie à 2.46 MeV ;
Localisation / séparation des traces pour le rejet du bruit de fond.

Prototype **non radio-pur** \Rightarrow Pas de mesure sur $T_{1/2}^{\beta\beta}$.

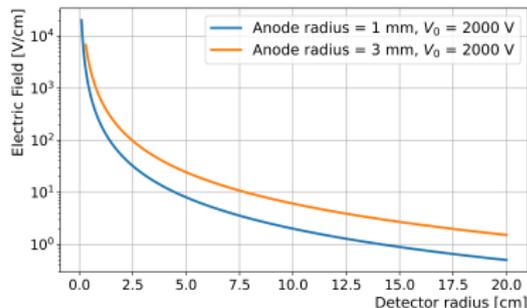
Principes des SPCs

Caractéristiques



$$E(r) = \frac{V_0}{r^2} \cdot \frac{r_c r_a}{r_c - r_a}$$

Formation du signal

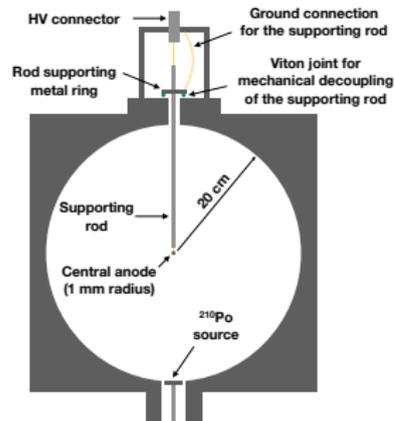


→ Régime d'ionisation: charge due aux mouvements des primaires dans $E(r)$.

→ Régime proportionnel: charge due essentiellement à la dérive des ions de l'avalanche (contribution 5 à 10 fois supérieurs aux e^-).

Anode

Alimentation en haute-tension ET mesure du signal.



Bille d'1 mm de rayon en acier inoxydable, soudée à un câble de $500\ \mu\text{m}$.
La tige support est à la terre (potentielle source de claquages).

Prototypes de SPC

SPC-1 (2018)



Diamètre: 40 cm
Pression: 1 atm

SPC-2 (2021)

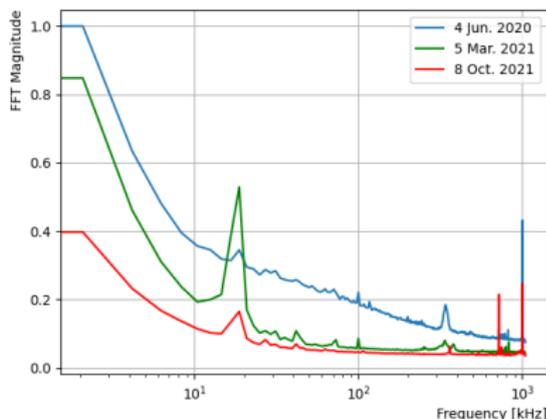


Diamètre: 40 cm
Pression: 40 bar

Amélioration du Prototype

- Structure Mécanique :
 - Certification à la pression
 - Étanchéité
 - Traversées
- Réduction du bruit :
 - Réduction des vibrations (mécanique, acoustique)
 - Température régulée
 - Électronique bas bruit (projet OWEN²)
 - Continuité électrique

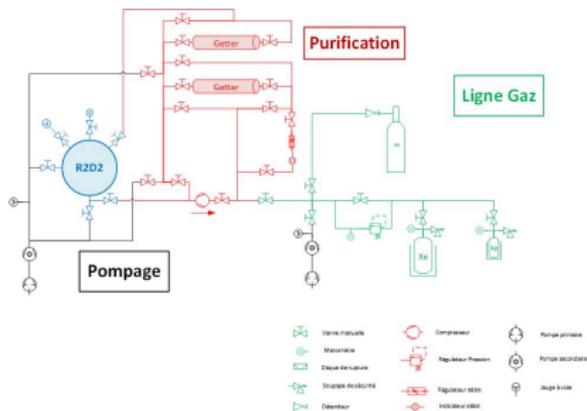
Évolution de la réponse en fréquence au bruit



Réduction d'un facteur 3. Progrès à basse fréquence.

²<https://r2d2.in2p3.fr/owen.html>

Gestion du gaz



- Recyclage : Récupération par cryo-pompage
- Purification : Réduction des impuretés électronégatives : 2 filtres (getters)

+ système de re-circulation en circuit fermé pour la purification.

Récupération

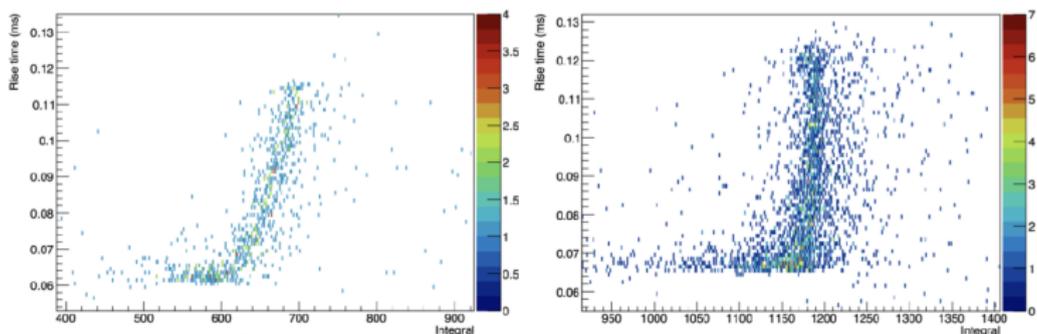


Purification



Intérêt de la purification

Contaminants \Rightarrow la charge collectée varie et présente une dépendance à la distance séparant l'anode de la région d'ionisation (attachement) :



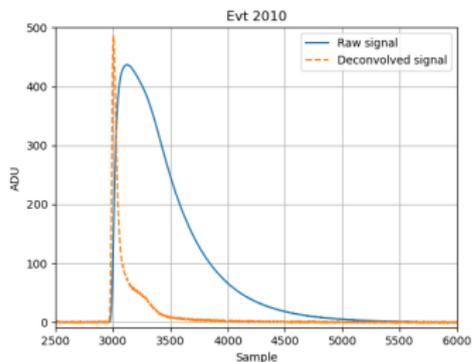
α 5.3 MeV (^{210}Po) - Xe 1 bar après 24 et 48h de purification

\rightarrow la qualité du gaz est cruciale !

Sommaire

- 1 La décroissance $\beta\beta 0\nu$
- 2 R2D2: Rare Decays with Radial Detector
 - Les motivations
 - Les Compteurs Proportionnels Sphériques (SPC)
 - Configuration expérimentale utilisée
- 3 Simulation et modélisation du signal
 - Analyse des formes d'ondes
 - Simulation du détecteur
 - Modélisation du signal
- 4 Résultats expérimentaux
 - Résolution en énergie
 - Mesure de la lumière de scintillation
 - Reconstruction de la position
- 5 Conclusions

Signaux expérimentaux



- C_t (Intégrale) : Énergie mesurée
- R_t (Temps de montée) : Déformation lié au pré-amplificateur de charge

⇒ Déconvolution de la réponse de l'intégrateur.

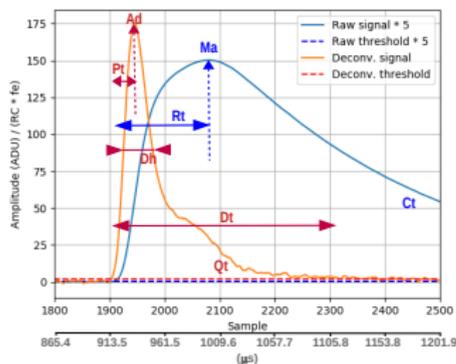
Signal déconvolué = profil temporel de la charge induite sur l'anode.

- Q_t (Intégrale) = C_t
- Observables temporelles P_t , D_t , D_h

→ Interprétation des observables par la simulation / modélisation.

Contributions personnelles : Simulation et modélisation du signal

Signaux expérimentaux



- Ct (Intégrale) : Énergie mesurée
- Rt (Temps de montée) : Déformation lié au pré-amplificateur de charge

⇒ Déconvolution de la réponse de l'intégrateur.

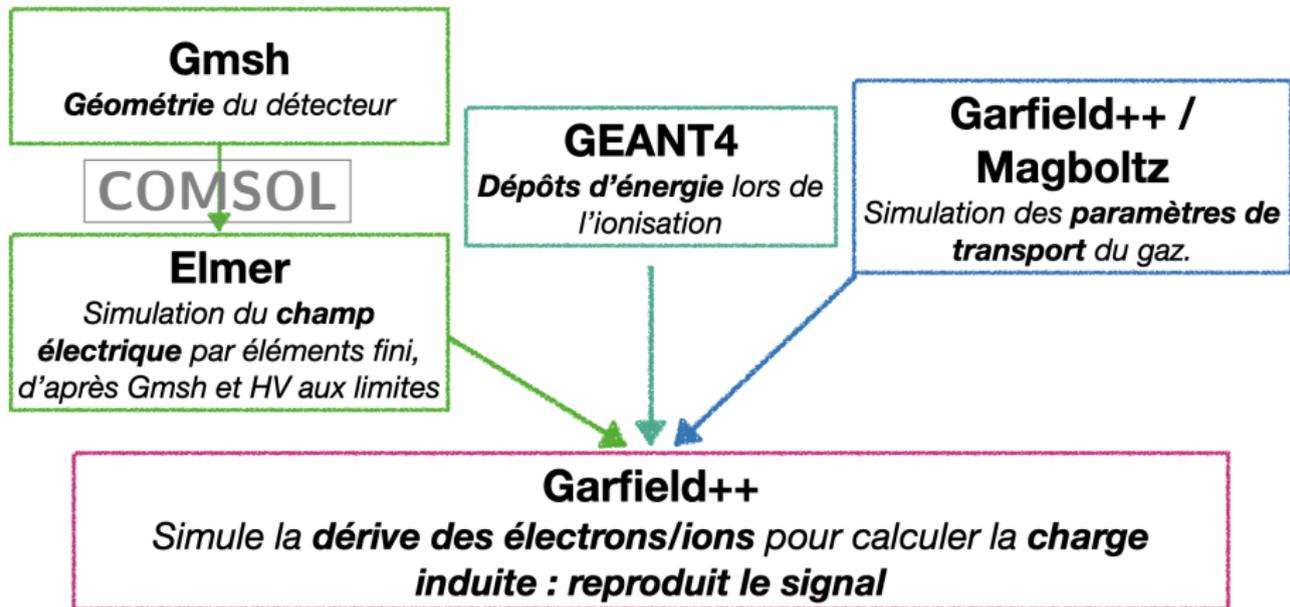
Signal déconvolué = profil temporel de la charge induite sur l'anode.

- Qt (Intégrale) = Ct
- Observables temporelles Pt, Dt, Dh

→ Interprétation des observables par la simulation / modélisation.

Contributions personnelles : Simulation et modélisation du signal

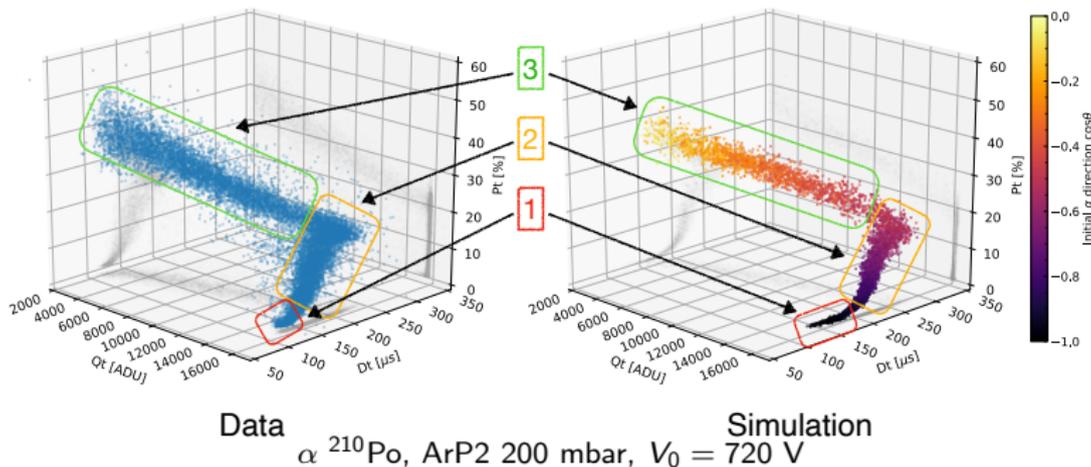
Simulation - Approche conventionnelle



- 1 Simuler les **dépôts d'énergie**
- 2 Lier les **paramètres de transport** à la **géométrie** via le **champ électrique**

Usage de la simulation

La distribution des observables est liée à la **topologie de l'événement** → **distributions caractéristiques**, ex de 3 régions distinctes:



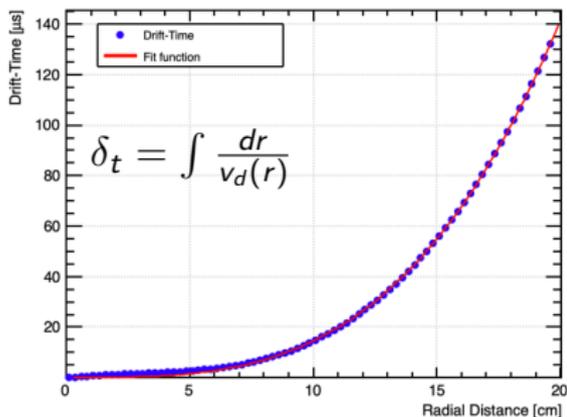
- 1 Traces en direction de l'anode.
- 2 Traces contenues dans le gaz.
- 3 Traces déposant une partie de l'énergie dans la cathode.

→ Simulation : interprétation statistique des données.

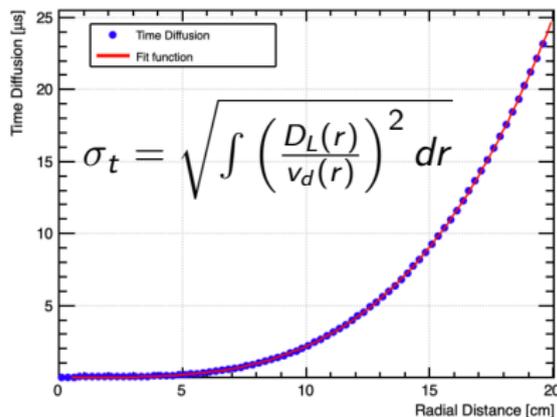
Modélisation - Temps de dérive et diffusion

Paramètres de transport (Magboltz) \rightarrow Intégration sur $E(r) \propto \frac{V_0}{r^2}$

Temps de dérive



Diffusion temporelle



δ_t et σ_t sont modélisés par des lois de puissance :

$$t = t_{max} \times (r/r_{max})^\alpha$$

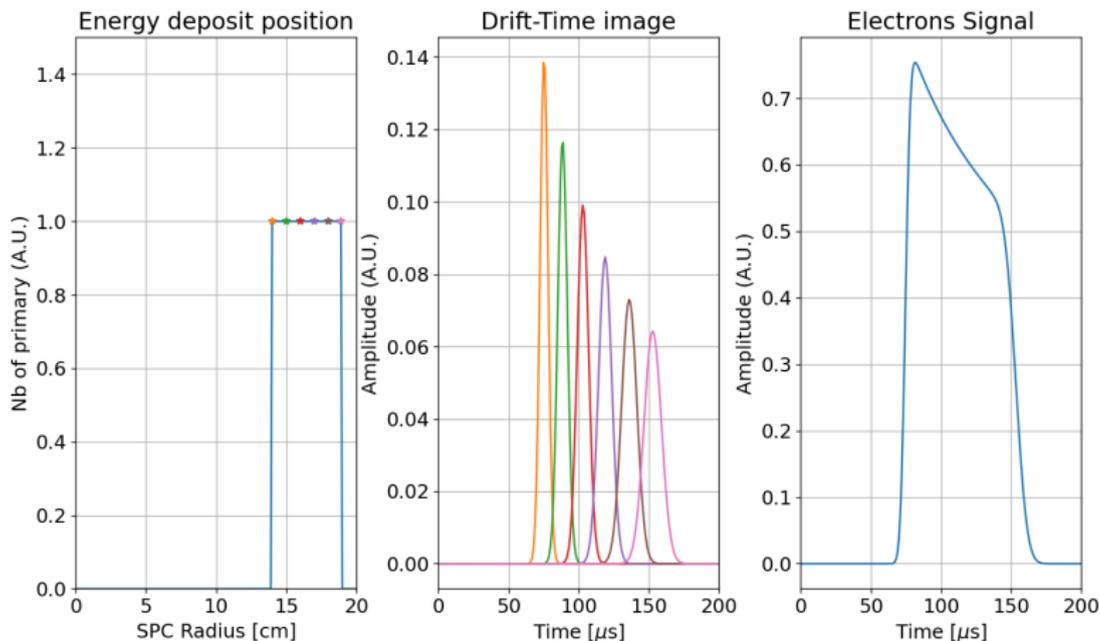
t_{max} et α dépendent du mélange gazeux, de P et de V_0 .

$\rightarrow \delta_t$ et σ_t définissent la forme du signal !

Modèle simplifié de formation du signal

Paramètres de transport des e^- (macroscopiques) :

- Vitesse de dérive (temps d'arrivée) ; diffusion (étalement gaussien)



→ Pt est dominé par la diffusion des e^- ayant le plus petit rayon.

Sommaire

- 1 La décroissance $\beta\beta 0\nu$
- 2 R2D2: Rare Decays with Radial Detector
 - Les motivations
 - Les Compteurs Proportionnels Sphériques (SPC)
 - Configuration expérimentale utilisée
- 3 Simulation et modélisation du signal
 - Analyse des formes d'ondes
 - Simulation du détecteur
 - Modélisation du signal
- 4 Résultats expérimentaux
 - Résolution en énergie
 - Mesure de la lumière de scintillation
 - Reconstruction de la position
- 5 Conclusions

Configuration du détecteur

1^{ère} phase (2019 - 2021) à basse pression (200 mbar à 1.1 bar) → source α de 5.3 MeV (^{210}Po) : longueur de trace < rayon du détecteur.

- **Argon P2** (98% Ar, 2%CH₄) pour mesurer la résolution en énergie.
- **Argon pur** pour les mesures du temps de dérive, par détection de la lumière de scintillation en coïncidence avec le signal d'anode.

Mesure de la lumière de scintillation:

6 × 6 mm² SiPM, efficacité de détection des photons (PDE) de 14% à 128 nm (utilisation à température ambiante)

1.1 bar → α restent proches.

Configuration du détecteur

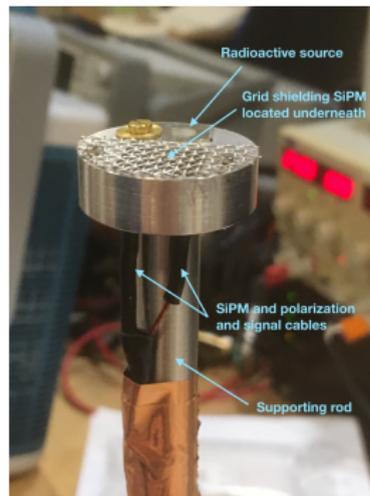
1^{ère} phase (2019 - 2021) à basse pression (200 mbar à 1.1 bar) → source α de 5.3 MeV (^{210}Po) : longueur de trace < rayon du détecteur.

- **Argon P2** (98% Ar, 2%CH₄) pour mesurer la résolution en énergie.
- **Argon pur** pour les mesures du temps de dérive, par détection de la lumière de scintillation en coïncidence avec le signal d'anode.

Mesure de la lumière de scintillation:

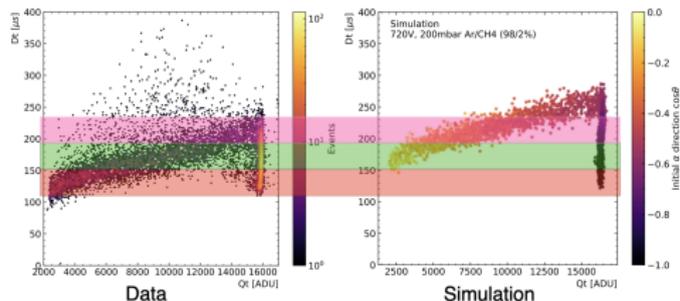
6 × 6 mm² SiPM, efficacité de détection des photons (PDE) de 14% à 128 nm (utilisation à température ambiante)

1.1 bar → α restent proches.

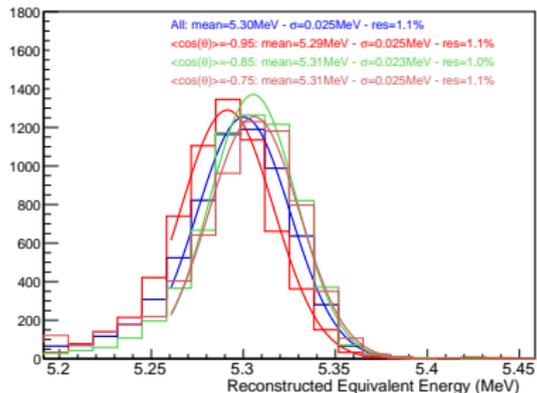
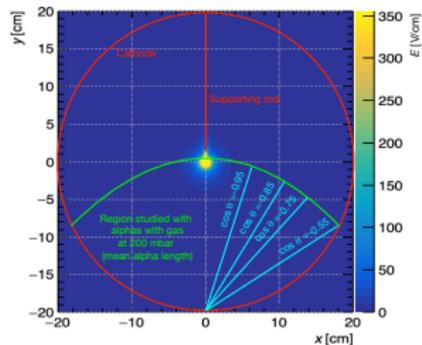


Effets de la direction sur la résolution en énergie

Coupages de sélection des angles
définies à partir de la simulation.



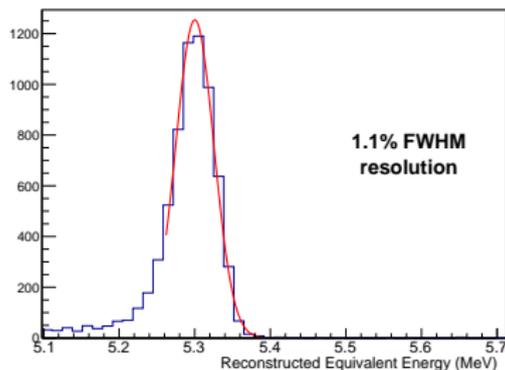
⇒ A basse pression, dans des conditions de faible attachement, la direction de la trace n'affecte pas la résolution en énergie.



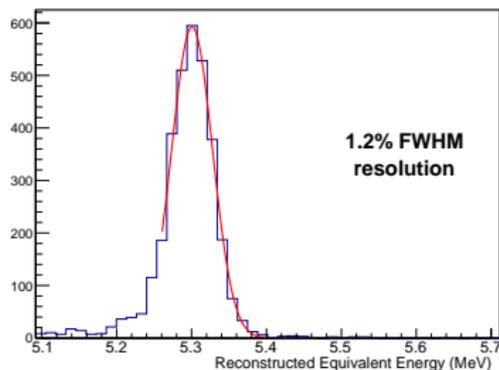
α ^{210}Po - ArP2 200mbar - 720V.

Effets de la longueur de la trace sur la résolution en énergie

Pour faire **varier la longueur de la trace**, des mesures ont été réalisées à différentes pressions **200 mbar** (720V) et **1100 mbar** (2000V) : **15 à 20 cm** et **3 à 4 cm** respectivement.



200mbar



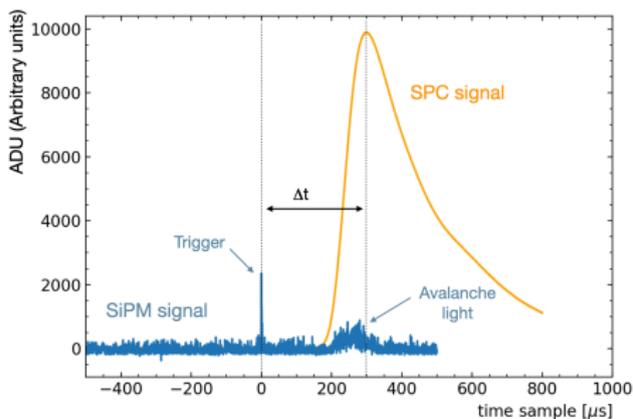
1100mbar

⇒ La **longueur de la trace**, dans ce régime de pression, **n'affecte pas la résolution en énergie**.

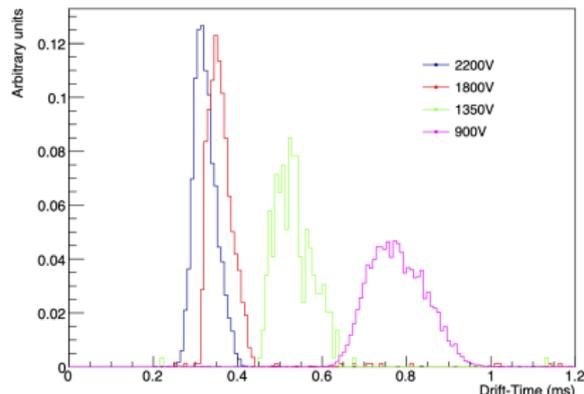
Mesures du temps de dérive

Position radiale → Nécessaire à la réduction des bruits de fond.

- SiPM détecte la lumière de scintillation, t_0 de l'événement.
- Temps de dérive $\Delta t = t_{\text{avalanche}} - t_{\text{ionisation}}$

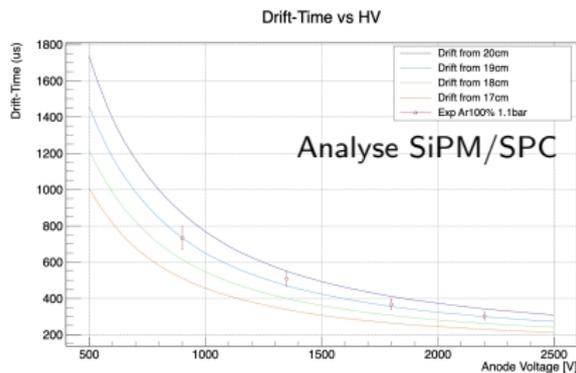


1.1 bar, 2200V : SiPM (bleu), SPC (orange).



Distributions des temps de dérive à différentes HV.

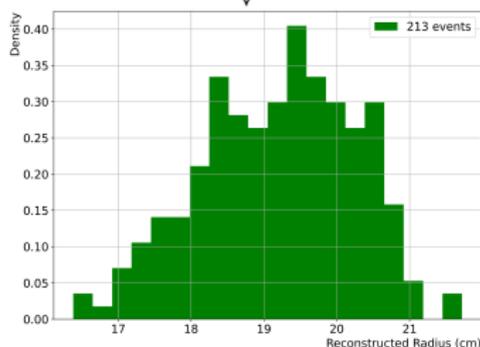
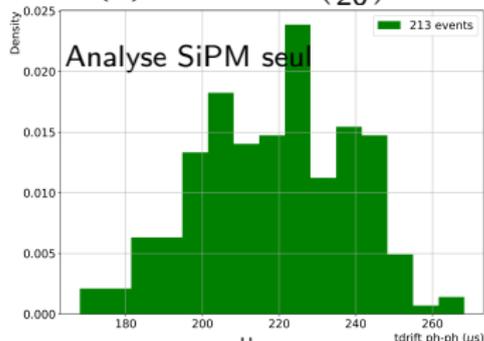
Temps de dérive et reconstruction de la position



Temps de dérive expérimental (points) et simulé (courbes pour différents rayons initiaux) en fonction de la tension sur l'anode.

Accord données / simulation
 \Rightarrow Validation du lien position / temps de dérive

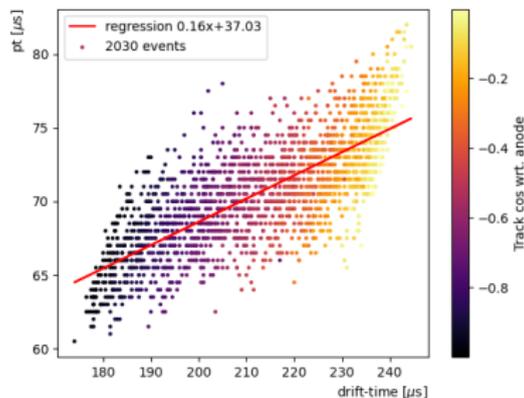
Ar 1.1 bar 2.2 kV avec
 $\Delta t(r) = 234 \times \left(\frac{r}{20}\right)^{1.66}$



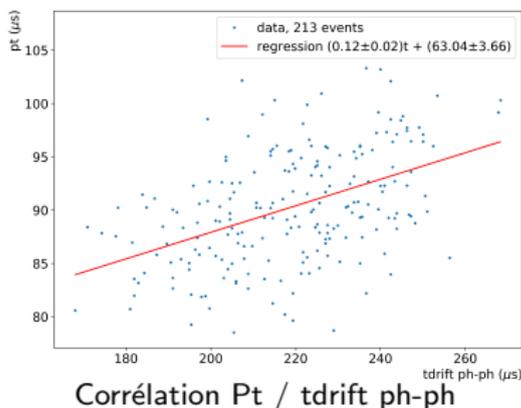
Recherche de corrélation avec le signal SPC

1. Modèle : Pt (signal déconvolué) lié à la position par la diffusion.
Vérification du lien avec la position :

2. Simulation
(signal SPC pur)



3. Données
(coïncidence lumière/charge)



Pt est corrélé au temps de dérive $\rightarrow Pt(r) = Pt_{max} \times (r/r_{max})^\alpha$

Reconstruction de la position par le signal SPC

Détermination expérimentale de $Pt(r)$

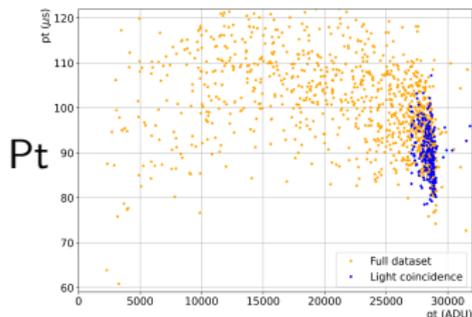
→ Coïncidence lumière/charge :

$r_{max} = r_c$ rayon de la cathode (20 cm)

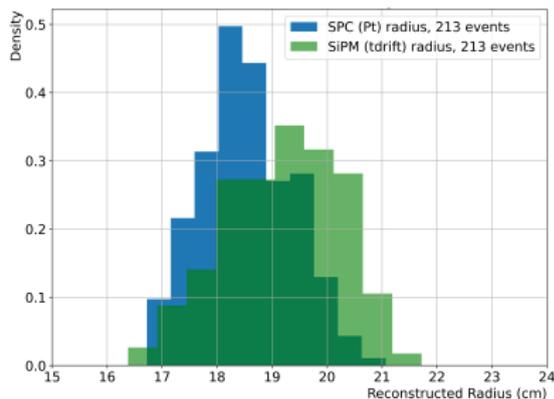
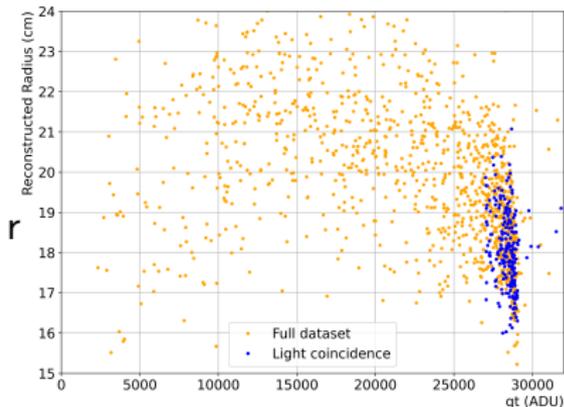
$\alpha = 0.74$ calculé en fixant Pt_{min} et r_{min}

r_{min} = distance minimale des α à l'anode

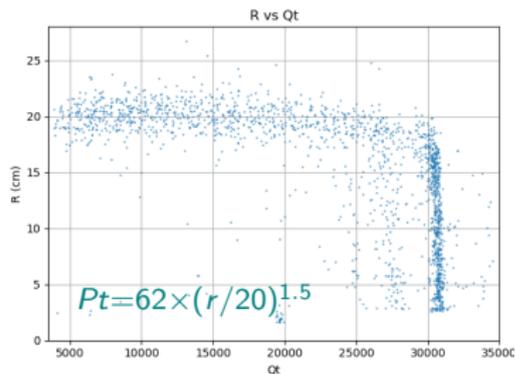
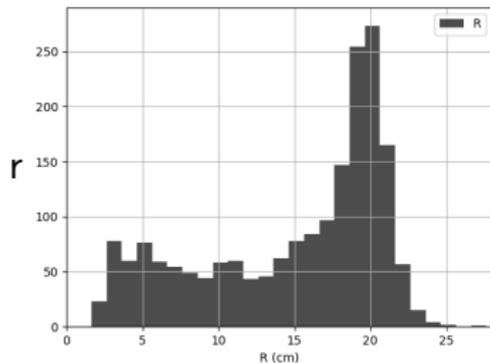
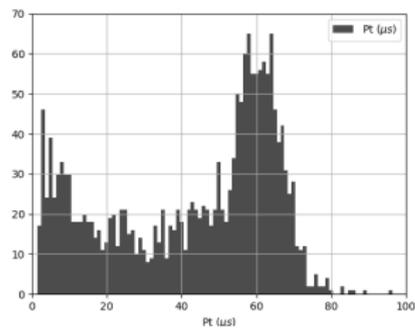
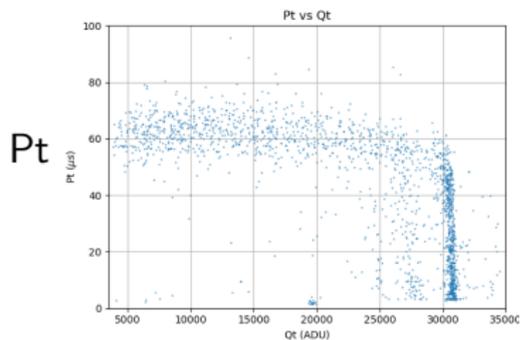
$Pt_{min} = 80 \mu s$ et $Pt_{max} = 100 \mu s$



$$Pt = 100 \times (r/20)^{0.74} \quad \Downarrow$$



Reconstruction de la position - 200 mbar



Il est possible de **reconstruire la position à partir du signal SPC seul !**

Sommaire

- 1 La décroissance $\beta\beta 0\nu$
- 2 R2D2: Rare Decays with Radial Detector
 - Les motivations
 - Les Compteurs Proportionnels Sphériques (SPC)
 - Configuration expérimentale utilisée
- 3 Simulation et modélisation du signal
 - Analyse des formes d'ondes
 - Simulation du détecteur
 - Modélisation du signal
- 4 Résultats expérimentaux
 - Résolution en énergie
 - Mesure de la lumière de scintillation
 - Reconstruction de la position
- 5 Conclusions

Mise en perspective des résultats avec les objectifs

- Prototype fonctionnel : haute pression ; récupération du gaz ; purification.
 - **Mise en service d'un prototype** certifié pour la haute pression.
 - Installation des **systèmes de purification et récupération**.
- 1% FWHM de résolution en énergie à 2.458 MeV (Xe HP).
 - Mesures de résolution en Ar à pression ambiante: **1.1% FWHM** à 5.3 MeV \approx 1.6% à 2.46 MeV
 - La résolution en énergie **n'est affectée ni par la longueur de la trace, ni par sa direction** dans ce régime.
- Localisation de l'interaction pour rejet du fond issu de la cathode.
 - Instrumentation et mesures de lumière de scintillation.
 - Méthodologie d'analyse du signal SPC pour la localisation établie.
 - Il est possible de se passer de SiPM.

La simulation reproduit correctement la réponse du détecteur.

Mise en perspective des résultats avec les objectifs

- Prototype fonctionnel : haute pression ; récupération du gaz ; purification.
 - **Mise en service d'un prototype** certifié pour la haute pression.
 - Installation des **systèmes de purification et récupération**.
- 1% FWHM de résolution en énergie à 2.458 MeV (Xe HP).
 - Mesures de résolution en Ar à pression ambiante: **1.1% FWHM** à 5.3 MeV \approx 1.6% à 2.46 MeV
 - La résolution en énergie **n'est affectée ni par la longueur de la trace, ni par sa direction** dans ce régime.
- Localisation de l'interaction pour rejet du fond issu de la cathode.
 - Instrumentation et mesures de lumière de scintillation.
 - Méthodologie d'analyse du signal SPC pour la localisation établie.
 - Il est possible de se passer de SiPM.

La simulation reproduit correctement la réponse du détecteur.

Mise en perspective des résultats avec les objectifs

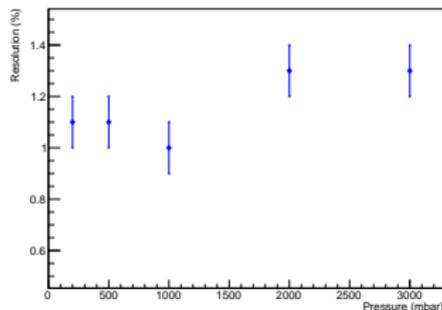
- Prototype fonctionnel : haute pression ; récupération du gaz ; purification.
 - **Mise en service d'un prototype** certifié pour la haute pression.
 - Installation des **systèmes de purification et récupération**.
- 1% FWHM de résolution en énergie à 2.458 MeV (Xe HP).
 - Mesures de résolution en Ar à pression ambiante: **1.1% FWHM** à 5.3 MeV \approx 1.6% à 2.46 MeV
 - La résolution en énergie **n'est affectée ni par la longueur de la trace, ni par sa direction** dans ce régime.
- Localisation de l'interaction pour rejet du fond issu de la cathode.
 - Instrumentation et mesures de lumière de scintillation.
 - Méthodologie d'analyse du signal SPC pour la localisation établie.
 - Il est possible de se passer de SiPM.

La simulation reproduit correctement la réponse du détecteur.

Depuis juillet ...

Argon

SPC



Xénon

Attachement trop important.

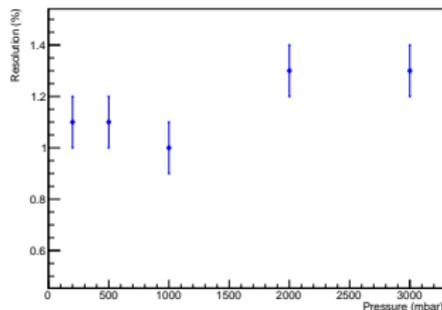
⇒ Anode 3 mm pour $\uparrow E(r)$:
régime \sim ionisation.

P=250 et 900 mbar (1300 V) :
 $\Delta Q/Q=3.8$ et 7% FWHM

Depuis juillet ...

Argon

SPC



Xénon

Attachement trop important.
 \Rightarrow Anode 3 mm pour $\uparrow E(r)$:
 régime \sim ionisation.

$P=250$ et 900 mbar (1300 V) :
 $\Delta Q/Q=3.8$ et 7% FWHM

CPC: Compteur Proportionnel Cylindrique



$$r_a = 10 \mu\text{m},$$

$$r_c = 17 \text{ cm.}$$

$$E(r) \propto V_0/r$$

Résultats préliminaires

Argon

1 bar, 900 V:

$\Delta Q/Q=1.2\%$ FWHM

Xénon

$P = 0.5$ et 1 bar
 (900 V, 1200 V) :

$\Delta Q/Q=1.8\%$ FWHM.

$\rightarrow 1.4\%$ après analyse.



The End