

# Revue d'expériences

Recherche de la double décroissance beta sans émission de neutrino

Y. LEMIERRE

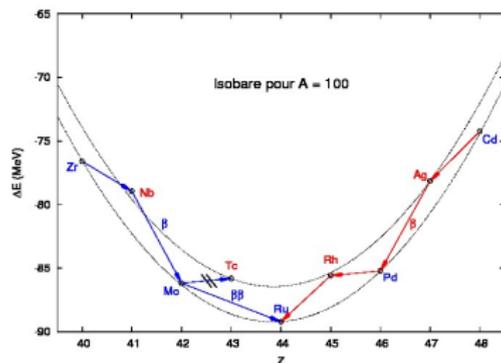
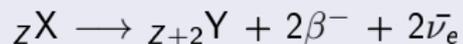
25 Octobre 2018



UNIVERSITÉ  
CAEN  
NORMANDIE

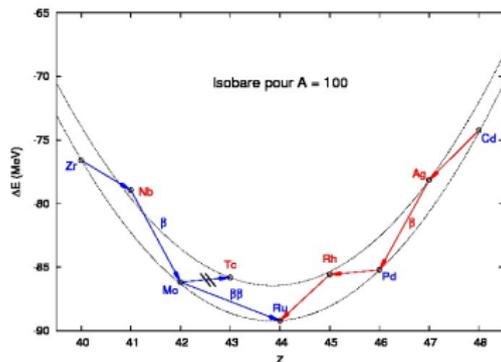
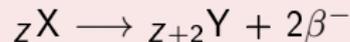
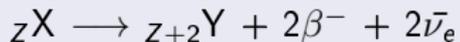


# La double décroissance $\beta$

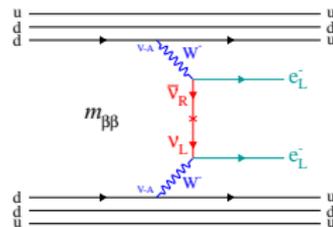


- Mesuré pour  $\sim 30$  isotopes
- $T_{1/2}^{2\nu} \in [10^{18}; 10^{24}]$  années

# La double décroissance $\beta$



- Mesuré pour  $\sim 30$  isotopes
- $T_{1/2}^{2\nu} \in [10^{18}; 10^{24}]$  années



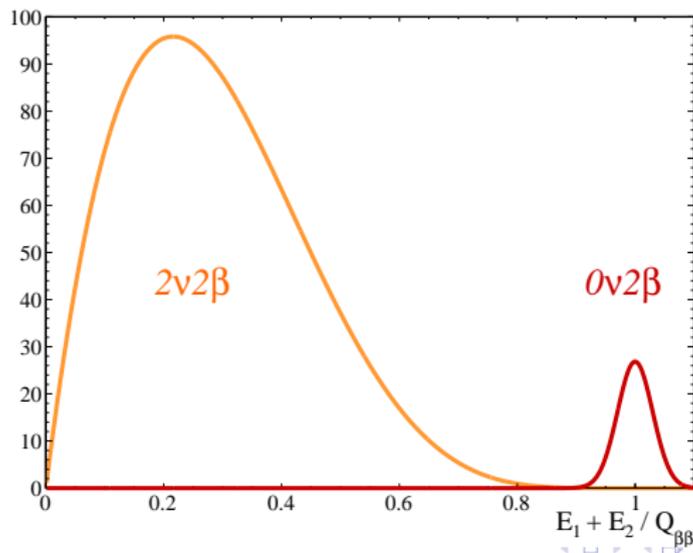
- $\Delta L = 2$
  - $\bar{\nu} \equiv \nu$
  - $m_{\beta\beta}$
  - Hiérarchie de masse IH vs NH
- $\Rightarrow T_{1/2}^{0\nu} > 10^{26}$  années

## Signature expérimentale

Autorisé par le MS

2 électrons  $\Rightarrow \sum E_e \in [0; Q_{\beta\beta}]$ 

Interdit par MS

2 électrons  $\Rightarrow \sum E_e = Q_{\beta\beta}$ 

# Choix de l'isotope

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G_{0\nu} |\mathcal{M}_{0\nu}|^2 |m_{\beta\beta}|^2$$

Isotope	$Q_{\beta\beta}$ [MeV]	$G_{0\nu}$ [ $10^{-15} \text{y}^{-1}$ ]	$T_{1/2}^{2\nu}$ [y]	$AN$ [%]
$^{48}\text{Ca}$	4,274	24,81	$4,4 \pm 0,6 \times 10^{19}$	0,187
$^{76}\text{Ge}$	2,039	2,36	$1,4 \pm 0,5 \times 10^{21}$	7,61
$^{82}\text{Se}$	2,996	10,16	$9,6 \pm 1,0 \times 10^{19}$	8,73
$^{96}\text{Zr}$	3,348	20,58	$2,2 \pm 0,3 \times 10^{19}$	2,8
$^{100}\text{Mo}$	3,035	15,92	$7,2 \pm 0,5 \times 10^{18}$	9,63
$^{116}\text{Cd}$	2,805	16,70	$2,9 \pm 0,3 \times 10^{19}$	7,49
$^{130}\text{Te}$	2,529	14,22	$7,0 \pm 1,4 \times 10^{20}$	34,1
$^{136}\text{Xe}$	2,462	14,58	$2,2 \pm 0,1 \times 10^{21}$	8,9
$^{150}\text{Nd}$	3,368	63,03	$9,1 \pm 0,7 \times 10^{18}$	5,6

- grand  $Q_{\beta\beta} \rightarrow$  au-delà de la radioactivité naturelle
- $G_{0\nu}$  et  $|\mathcal{M}_{0\nu}|$  élevé
- $T_{1/2}^{2\nu}$  le plus long possible
- Abondance naturelle favorable

# Choix de l'isotope

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G_{0\nu} |\mathcal{M}_{0\nu}|^2 |m_{\beta\beta}|^2$$

Isotope	$Q_{\beta\beta}$ [MeV]	$G_{0\nu}$ [ $10^{-15} \text{y}^{-1}$ ]	$T_{1/2}^{2\nu}$ [y]	$AN$ [%]
$^{48}\text{Ca}$	<b>4,274</b>	24,81	$4,4 \pm 0,6 \times 10^{19}$	0,187
$^{76}\text{Ge}$	2,039	2,36	$1,4 \pm 0,5 \times 10^{21}$	7,61
$^{82}\text{Se}$	2,996	10,16	$9,6 \pm 1,0 \times 10^{19}$	8,73
$^{96}\text{Zr}$	3,348	20,58	$2,2 \pm 0,3 \times 10^{19}$	2,8
$^{100}\text{Mo}$	3,035	15,92	$7,2 \pm 0,5 \times 10^{18}$	9,63
$^{116}\text{Cd}$	2,805	16,70	$2,9 \pm 0,3 \times 10^{19}$	7,49
$^{130}\text{Te}$	2,529	14,22	$7,0 \pm 1,4 \times 10^{20}$	<b>34,1</b>
$^{136}\text{Xe}$	2,462	14,58	<b><math>2,2 \pm 0,1 \times 10^{21}</math></b>	8,9
$^{150}\text{Nd}$	3,368	<b>63,03</b>	$9,1 \pm 0,7 \times 10^{18}$	5,6

- grand  $Q_{\beta\beta}$  → au-delà de la radioactivité naturelle
- $G_{0\nu}$  et  $|\mathcal{M}_{0\nu}|$  élevé
- $T_{1/2}^{2\nu}$  le plus long possible
- Abondance naturelle favorable

# Choix de l'isotope

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G_{0\nu} |\mathcal{M}_{0\nu}|^2 |m_{\beta\beta}|^2$$

Avec  $m_{\beta\beta} = 50$  meV, pour le  $^{150}\text{Nd}$

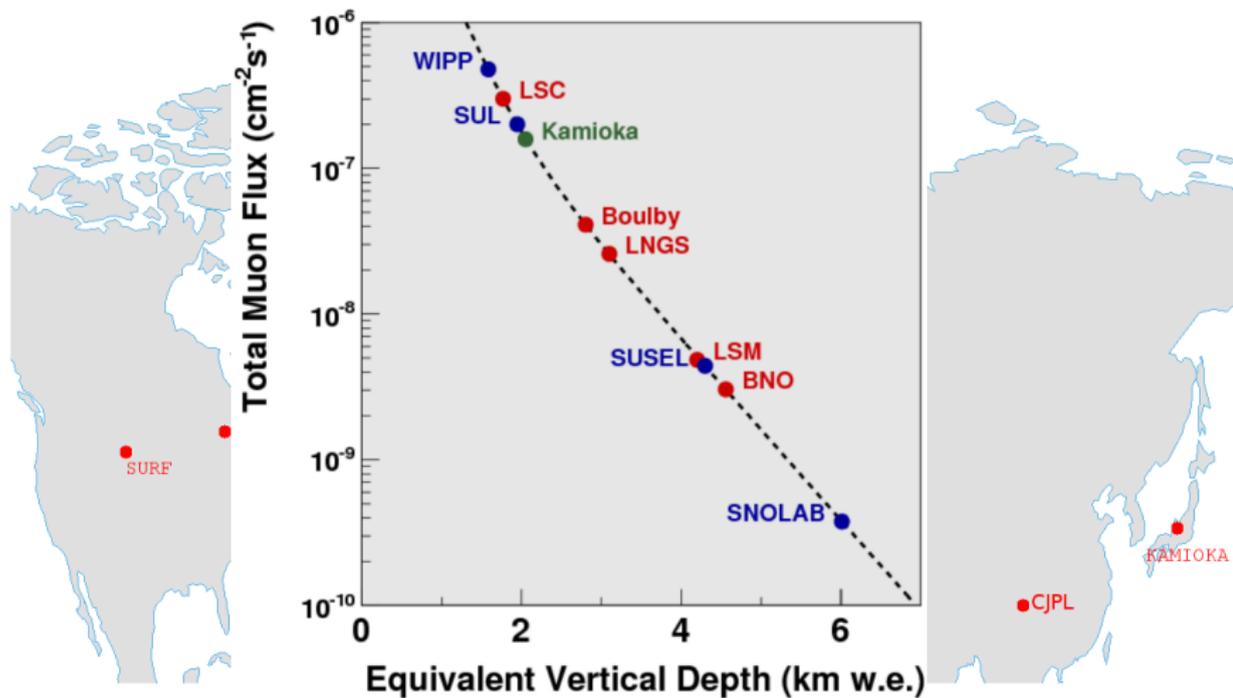
$$T_{1/2}^{0\nu} = 1,8 \cdot 10^{26} \text{ années} \Rightarrow \simeq 1 \text{ décroissance/an/100 kg}$$

- grand  $Q_{\beta\beta} \rightarrow$  au-delà de la radioactivité naturelle
- $G_{0\nu}$  et  $|\mathcal{M}_{0\nu}|$  élevé
- $T_{1/2}^{2\nu}$  le plus long possible
- Abondance naturelle favorable

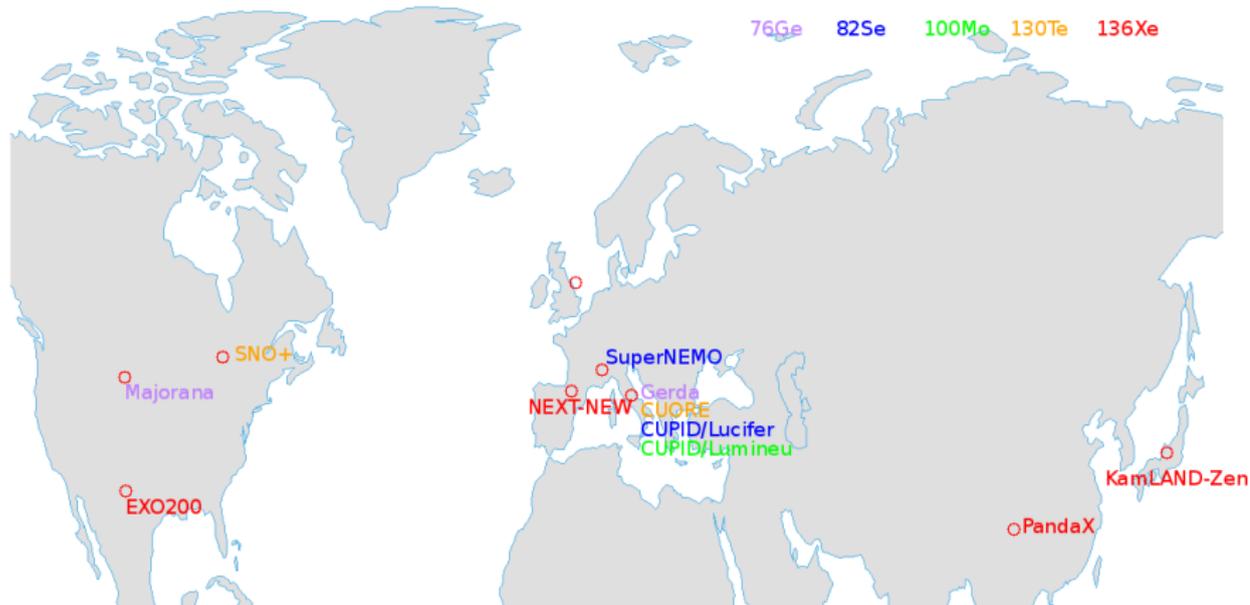
# Quelques sites souterrains



# Quelques sites souterrains



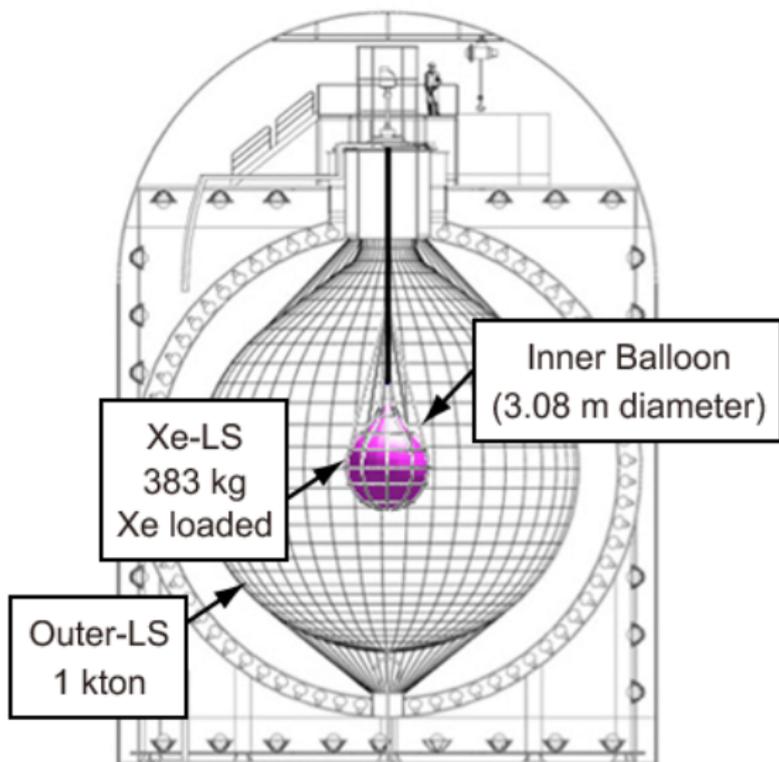
# Quelques expériences



## Quelques expériences

Expérience <i>Technique</i>	Isotope	Masse kg	BDF cps/(keV.kg.an)	$T_{1/2}^{0\nu}$ années	$m_{\beta\beta}$ meV
<i>Liquide scintillant</i>					
KamLAND-ZEN	$^{136}\text{Xe}$	300	$1,510^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{26}$	< 61-165
SNO+*	$^{130}\text{Te}$	1300		$1,9 \cdot 10^{26}$	< 44-110
<i>HpGE</i>					
GERDA	$^{76}\text{Ge}$	35	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$0,9 \cdot 10^{26}$	< 120-260
MAJORANA		44	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{25}$	< 240-520
<i>Bolomètre scintillant</i>					
CUPID-0	$^{82}\text{Se}$	5,13	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{24}$	< 376-770
CUORE*	$^{130}\text{Te}$	200	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$10^{26}$	< 110-520
<i>TPC</i>					
EXO	$^{136}\text{Xe}$	100	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{25}$	< 147-398
NEXT*		100	$4 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{25}$	< 120
<i>Tracko-Calo</i>					
SuperNEMO*	$^{82}\text{Se}$	100	$10^{-4}$	$10^{26}$	< 50-100

# Les liquides scintillants – KamLAND-Zen



# Les liquides scintillants – KamLAND-Zen

## Avantages

- Détecteur existant
- Masse importante d'isotope
- Veto actif
- BI  $\sim 10^{-5}$  coups/(keV.kg.an)

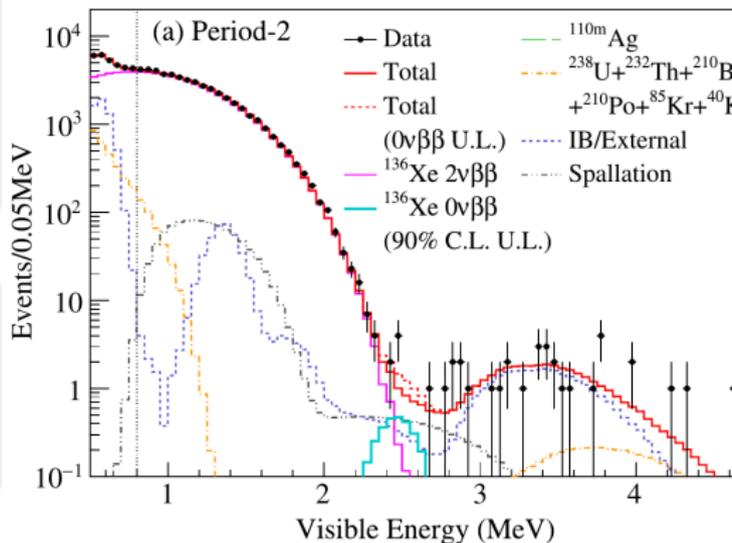
## Inconvénients

- Résolution en énergie modeste
- $Q_{\beta\beta}(^{136}\text{Xe}) = 2462$  keV
- $l_{\mu} \sim 160$   $\mu\text{/m}^2\text{/j}$

Meilleure sensibilité :

$$T_{1/2}^{0\nu} > 1,07 \cdot 10^{26} \text{ années}$$

$$m_{\beta\beta} < 61\text{-}160 \text{ meV}$$



# Les liquides scintillants – KamLAND-Zen

## Avantages

- Détecteur existant
- Masse importante d'isotope
- Veto actif
- BI  $\sim 10^{-5}$  coups/(keV.kg.an)

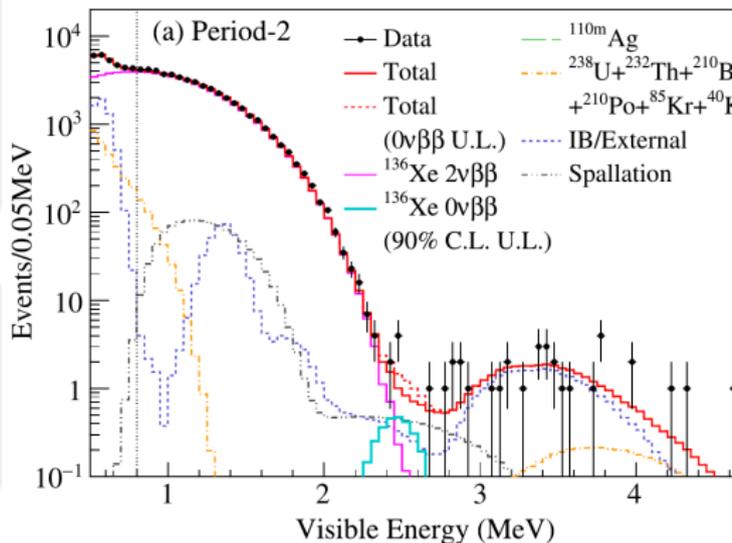
## Inconvénients

- Résolution en énergie modeste
- $Q_{\beta\beta}({}^{136}\text{Xe}) = 2462$  keV
- $l_{\mu} \sim 160$   $\mu/\text{m}^2/\text{j}$

Meilleure sensibilité :

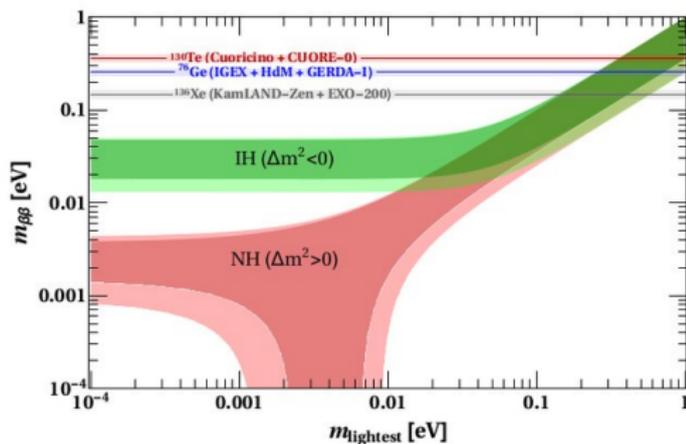
$$T_{1/2}^{0\nu} > 1,07 \cdot 10^{26} \text{ années}$$

$$m_{\beta\beta} < 61\text{-}160 \text{ meV}$$

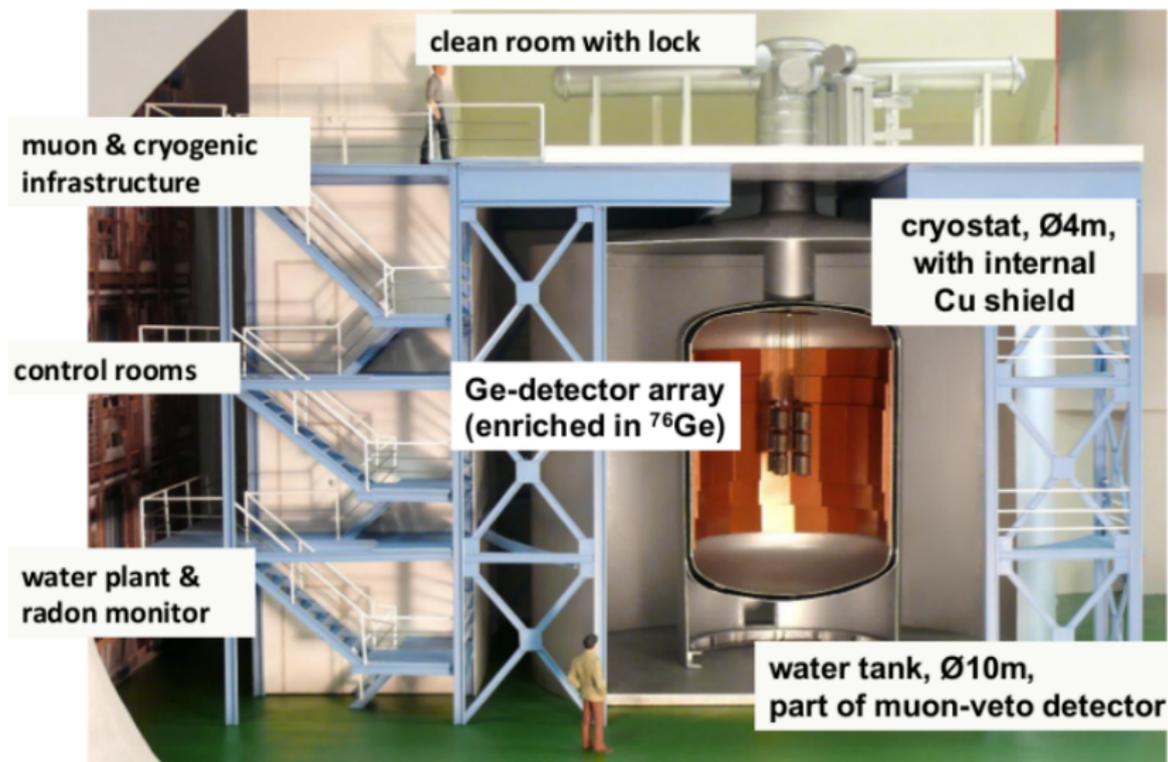


# L'étape suivante pour les liquides scintillants

- KamLAND-ZEN 800
  - 800 kg de  $^{136}\text{Xe}$
  - Ballon interne plus grand et plus propre
  - prévu cette année
- KamLAND2-ZEN
  - 1000 kg de  $^{136}\text{Xe}$
  - Amélioration de  $\frac{\Delta E}{E}$
  - $m_{\beta\beta} < 20$  meV en 5 années
  - $T_{1/2}^{0\nu} > 5 \cdot 10^{27}$  années



# Les semi-conducteurs – Gerda



# Les semi-conducteurs – Gerda

## Avantages

- Gerda –  $\frac{\Delta E}{E} \sim 0,14 \%$  à  $Q_{\beta\beta}$
- $\varepsilon \sim 70-90 \%$
- Identification  
(Pulse Shape Analysis)

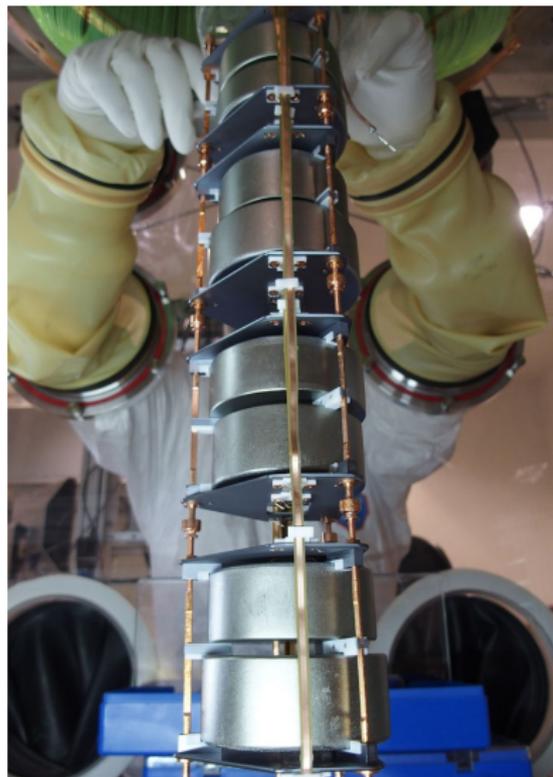
## Inconvénients

- $Q_{\beta\beta}(^{76}\text{Ge}) = 2039 \text{ keV}$
- $G_{0\nu}$  défavorable

Dernier résultat :

$$T_{1/2}^{0\nu} > 0,9 \cdot 10^{26} \text{ années}$$

$$m_{\beta\beta} < 120-260 \text{ meV}$$



# Les semi-conducteurs – Gerda

## Avantages

- Gerda –  $\frac{\Delta E}{E} \sim 0,14 \%$  à  $Q_{\beta\beta}$
- $\varepsilon \sim 70-90 \%$
- Identification  
(Pulse Shape Analysis)

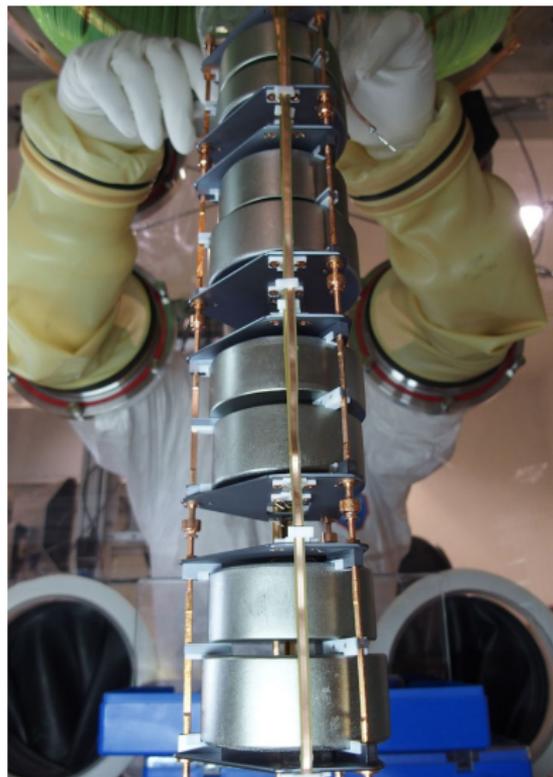
## Inconvénients

- $Q_{\beta\beta}(^{76}\text{Ge}) = 2039 \text{ keV}$
- $G_{0\nu}$  défavorable

Dernier résultat :

$$T_{1/2}^{0\nu} > 0,9 \cdot 10^{26} \text{ années}$$

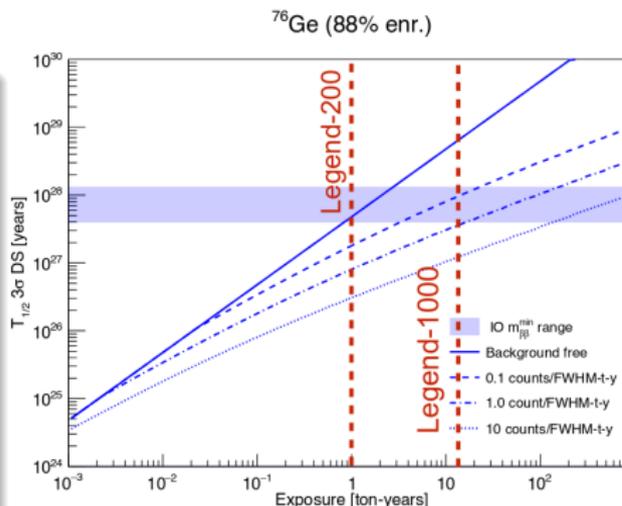
$$m_{\beta\beta} < 120-260 \text{ meV}$$



# L'étape suivante pour les semi-conducteurs

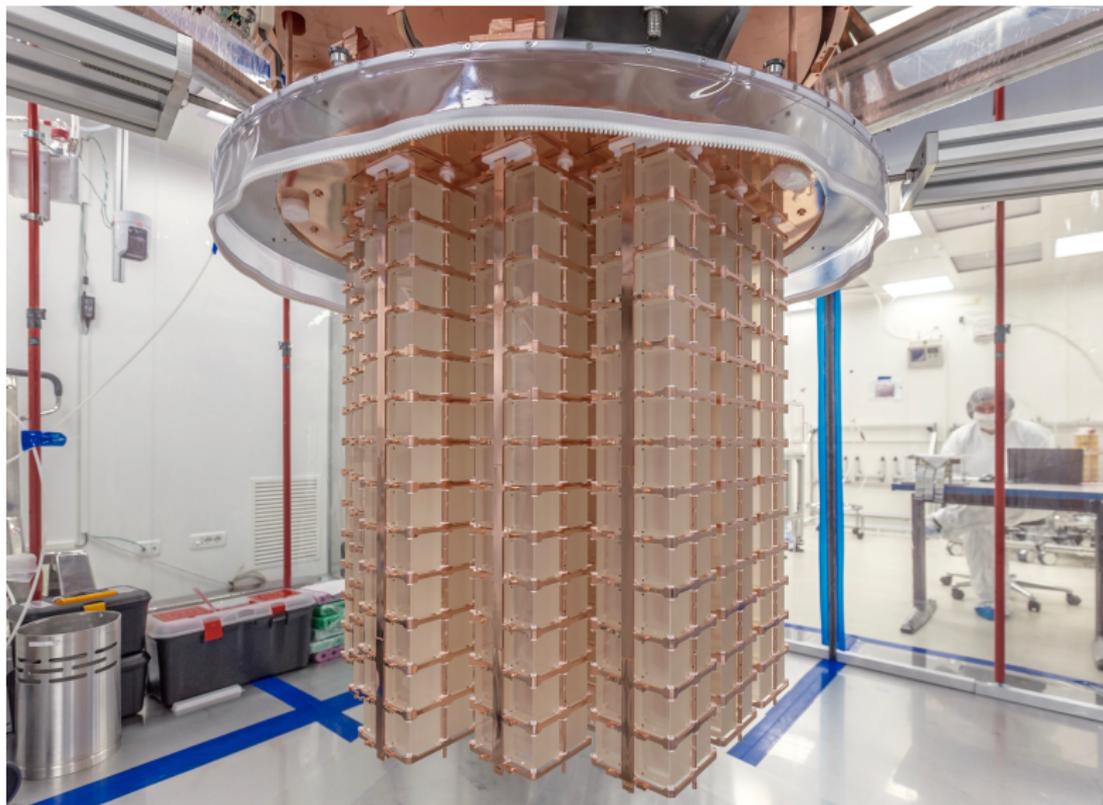
Le meilleur de Gerda et de Majorana

- LEGEND-200
  - Infrastructure de Gerda à Gran Sasso
  - BI  $\sim 10^{-4}$  coups/(keV.kg.an)
  - $T_{1/2}^{0\nu} > 10^{27}$  années
  - $m_{\beta\beta} < 50$  meV
  - Démarrage en 2021
- LEGEND-1000
  - BI  $\sim 2 \cdot 10^{-5}$  coups/(keV.kg.an)
  - $T_{1/2}^{0\nu} > 1,2 \cdot 10^{28}$  années
  - montée en charge continue



Large Enriched Germanium Experiment for Neutrinoless – LEGEND

# Les bolomètres scintillants – CUORE



# Les bolomètres scintillants – CUORE

## Avantages

- $\frac{\Delta E}{E} \sim 0,2 \%$  à  $Q_{\beta\beta}$
- Étude de plusieurs isotopes  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{100}\text{Mo}$  ...
- Bolomètre et Scintillation  
Identification des fonds

## Inconvénients

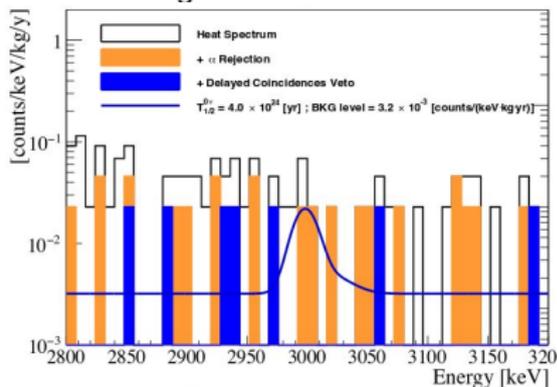
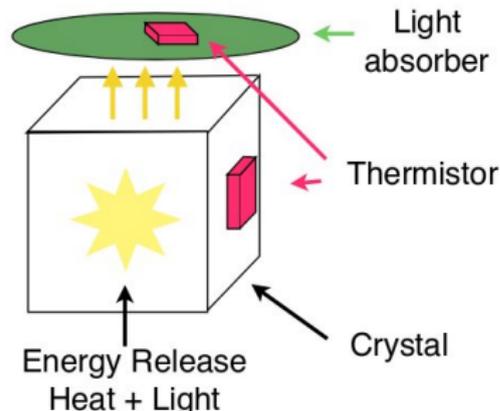
- Cryostat
- (Identification des fonds)

Dernier résultat :

$$T_{1/2}^{0\nu}(^{82}\text{Se}) > 2,4 \cdot 10^{24} \text{ années}$$

$$m_{\beta\beta} < 376\text{-}770 \text{ meV}$$

$$\text{exposition} = 1,83 \text{ kg}\cdot\text{an}$$



# Les bolomètres scintillants – CUORE

## Avantages

- $\frac{\Delta E}{E} \sim 0,2 \%$  à  $Q_{\beta\beta}$
- Étude de plusieurs isotopes  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{100}\text{Mo}$  ...
- Bolomètre et Scintillation  
Identification des fonds

## Inconvénients

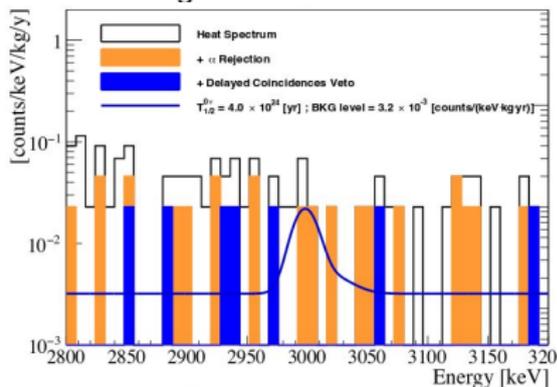
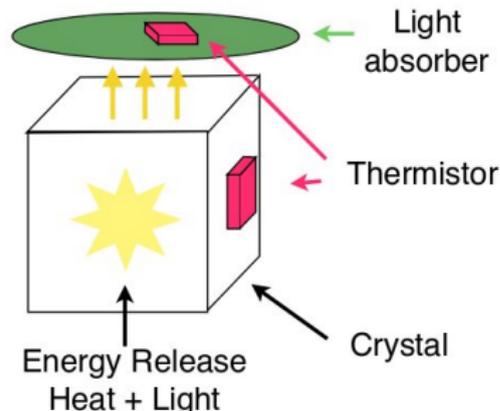
- Cryostat
- (Identification des fonds)

Dernier résultat :

$$T_{1/2}^{0\nu}(^{82}\text{Se}) > 2,4 \cdot 10^{24} \text{ années}$$

$$m_{\beta\beta} < 376\text{-}770 \text{ meV}$$

$$\text{exposition} = 1,83 \text{ kg.an}$$



## L'étape suivante pour les bolomètres

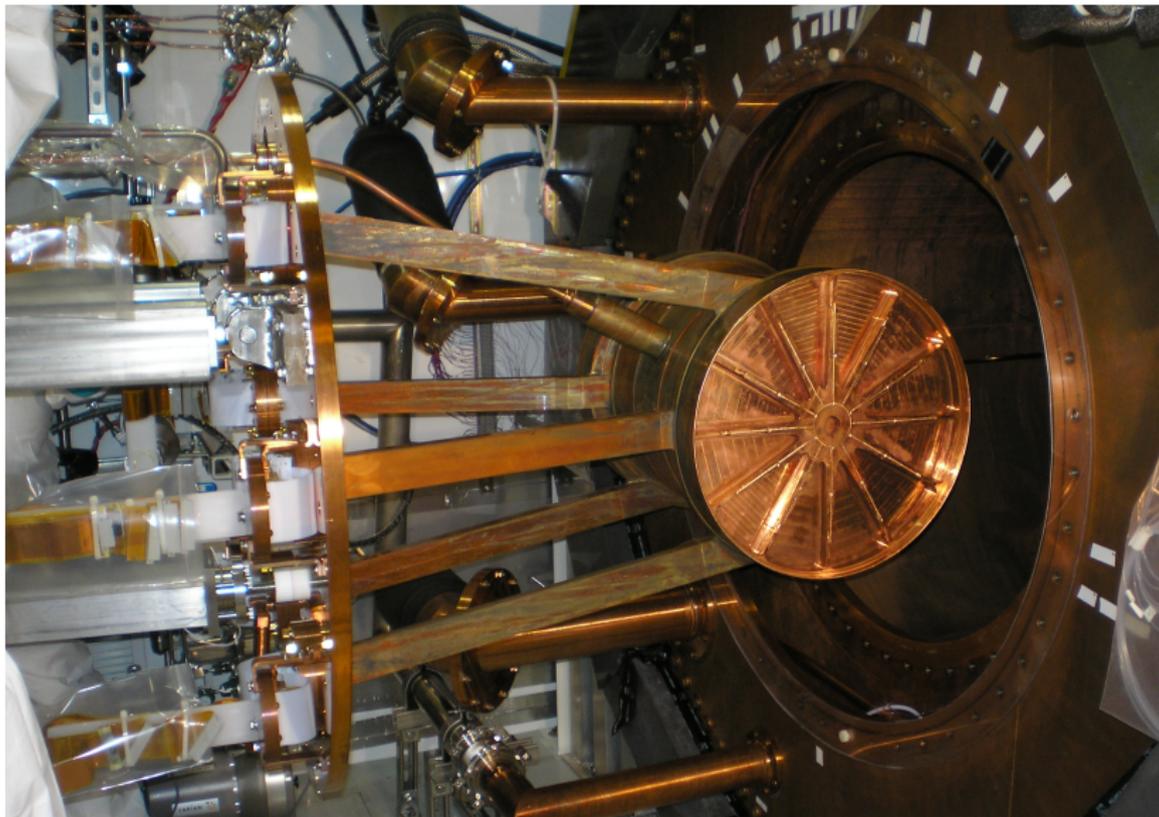
## CUPID

- Bolomètres scintillants
- Cryostat de CUORE
- ex :  $^{82}\text{Se}$  :  $m \approx 330$  kg
- $\text{BI} \sim 2 \cdot 10^{-5}$  coups/(keV.kg.an)
- $T_{1/2}^{0\nu} > 10^{28}$  années  
 $m_{\beta\beta} < 10$  meV
- Démarrage > 2022

Element	material	contamination [Bq/kg]	Te [cnts/ton/y]	Se/Cd/Mo [cnts/ton/y]
Far Sources				
$^{238}\text{U}$ external shield	lead	$< 1 \times 10^{-5}$	$< 7 \times 10^{-3}$	$< 4 \times 10^{-3}$
$^{232}\text{Th}$ external shield	lead	$< 7 \times 10^{-5}$	$< 1$	$< 1 \times 10^{-2}$
$^{238}\text{U}$ 300 K top plate	stainless steel	$< 2 \times 10^{-4}$	$< 5 \times 10^{-4}$	$< 3 \times 10^{-4}$
$^{232}\text{Th}$ 300 K top plate	stainless steel	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 3 \times 10^{-2}$	$< 3 \times 10^{-4}$
$^{238}\text{U}$ cryostat elements	copper	$< 7 \times 10^{-5}$	$< 4 \times 10^{-1}$	$< 3 \times 10^{-1}$
$^{232}\text{Th}$ cryostat elements	copper	$< 2 \times 10^{-6}$	$< 3 \times 10^{-1}$	$< 1 \times 10^{-2}$
$^{238}\text{U}$ internal shield	copper	$< 7 \times 10^{-5}$	$< 1$	$< 6 \times 10^{-1}$
$^{232}\text{Th}$ internal shield	copper	$< 2 \times 10^{-6}$	$< 8 \times 10^{-1}$	$< 8 \times 10^{-3}$
$^{238}\text{U}$ 30 cm disk	lead	$< 1 \times 10^{-5}$	$< 1 \times 10^{-3}$	$< 7 \times 10^{-4}$
$^{232}\text{Th}$ 30 cm disk	lead	$< 7 \times 10^{-5}$	$< 2 \times 10^{-1}$	$< 2 \times 10^{-3}$
Near Sources				
$^{238}\text{U}$ detector holders	copper	$< 7 \times 10^{-5}$	$< 2$	$< 1$
$^{232}\text{Th}$ detector holders	copper	$< 2 \times 10^{-6}$	$< 1 \times 10^{-1}$	$< 2 \times 10^{-1}$

CUORE Upgrade with Particle Identification – CUPID

## Les chambres à projection temporelle – EXO



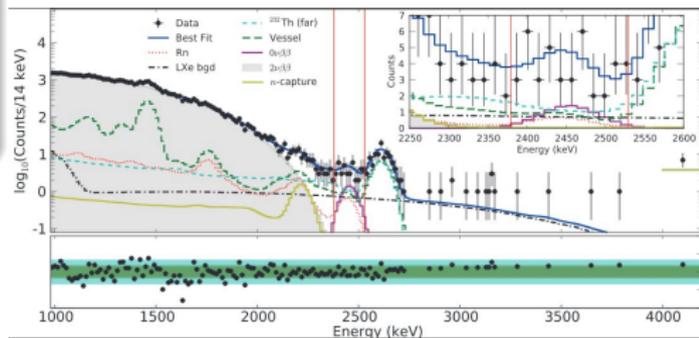
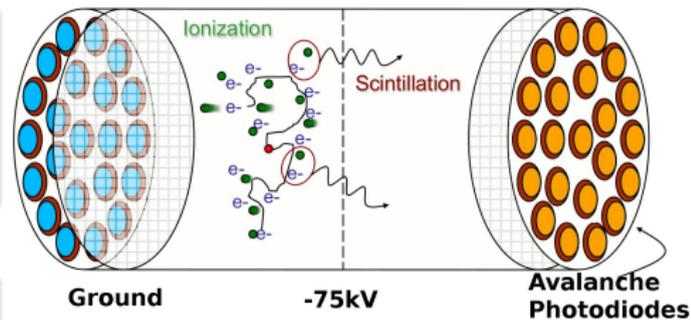
# Les chambres à projection temporelle – EXO

## Avantages

- Ionisation et scintillation
- Calorimétrie et localisation 3D
- Identification  $SS/MS$

## Inconvénients

- Xe liquide → Cryostat
- Laboratoire WIPP
- Émanation de Radon



Dernier résultat :

$$T_{1/2}^{0\nu} > 3,7 \cdot 10^{25} \text{ années}$$

$$m_{\beta\beta} < 147\text{-}398 \text{ meV}$$

$$BI = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ coups}/(\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{an})$$

# Les chambres à projection temporelle – EXO

## Avantages

- Ionisation et scintillation  
Calorimétrie et localisation 3D
- Identification  $SS/MS$

## Inconvénients

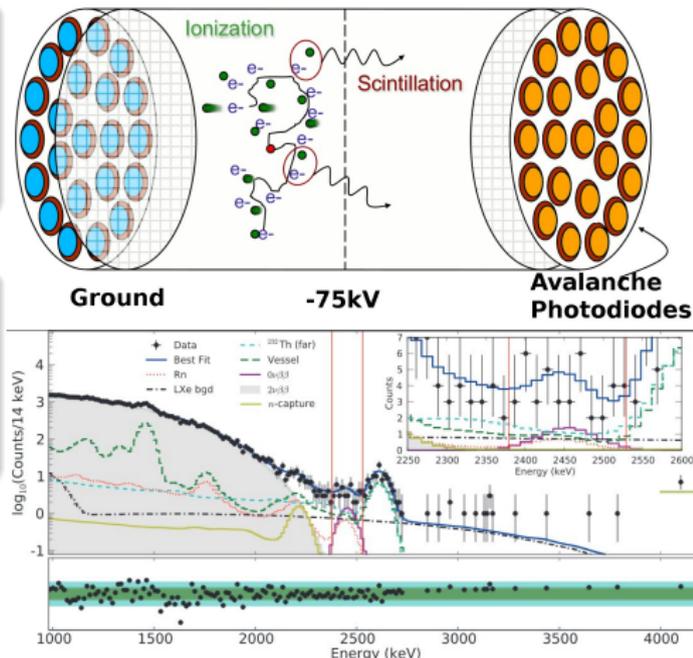
- Xe liquide → Cryostat
- Laboratoire WIPP
- Émanation de Radon

Dernier résultat :

$$T_{1/2}^{0\nu} > 3,7 \cdot 10^{25} \text{ années}$$

$$m_{\beta\beta} < 147\text{-}398 \text{ meV}$$

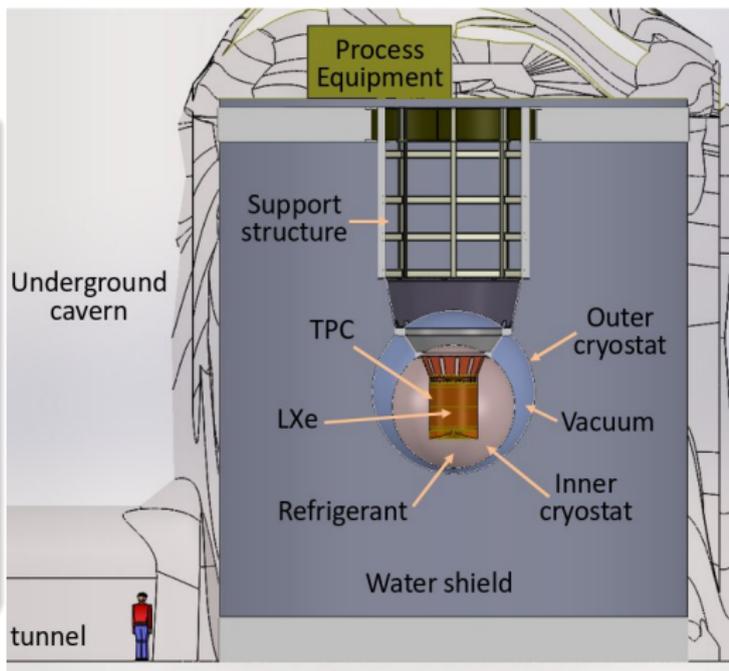
$$BI = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ coups}/(\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{an})$$



# L'étape suivante pour les chambres à projection temporelle

## nEXO

- Installation à SNOLAB
- $^{136}\text{Xe}$  :  $m \approx 5000 \text{ kg}$
- Identification du  $^{136}\text{Ba}$
- Extensibilité du détecteur ?
- Émanation du radon ...
- $\text{BI} \sim 10^{-4} \text{ coups}/(\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{an})$
- $T_{1/2}^{0\nu} > 10^{28} \text{ années}$   
 $m_{\beta\beta} < 15 \text{ meV}$



# Prospectives

Supposons  $m_{\beta\beta} = 5 \text{ meV}$

Que peut-on attendre avec 10 tonnes d'isotopes durant 10 ans ?

Isotope	$T_{1/2}$ [ $10^{28}$ années]	$N_{\beta\beta}$ [ $10^{28}$ isotopes]	$N_{decay}$
$^{76}\text{Ge}$	$\sim 50$	7,9	$\sim 1$
$^{82}\text{Se}$	$\sim 6$	7,4	$\sim 5$
$^{130}\text{Te}$	$\sim 8$	4,5	$\sim 4$
$^{136}\text{Xe}$	$\sim 8$	4,5	$\sim 4$
$^{150}\text{Nd}$	$\sim 2$	4	$\sim 13$

- Excellent  $\frac{\Delta E}{E}$
- $BDF_{ROI}$  proche de 0
- Un laboratoire profond et vaste

# Prospectives

Supposons  $m_{\beta\beta} = 5 \text{ meV}$

Que peut-on attendre avec 10 tonnes d'isotopes durant 10 ans?

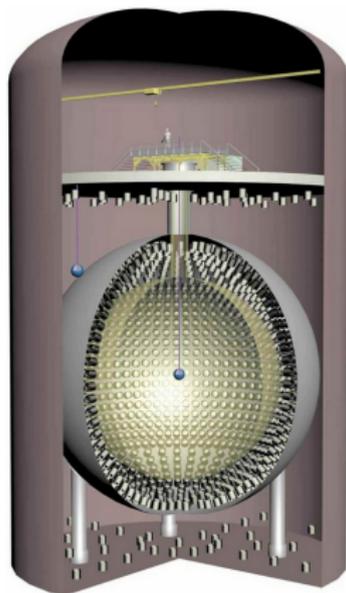
Isotope	$T_{1/2}$ [ $10^{28}$ années]	$N_{\beta\beta}$ [ $10^{28}$ isotopes]	$N_{decay}$
$^{76}\text{Ge}$	$\sim 50$	7,9	$\sim 1$
$^{82}\text{Se}$	$\sim 6$	7,4	$\sim 5$
$^{130}\text{Te}$	$\sim 8$	4,5	$\sim 4$
$^{136}\text{Xe}$	$\sim 8$	4,5	$\sim 4$
$^{150}\text{Nd}$	$\sim 2$	4	$\sim 13$

- Excellent  $\frac{\Delta E}{E}$
- $BDF_{ROI}$  proche de 0
- Un laboratoire profond et vaste

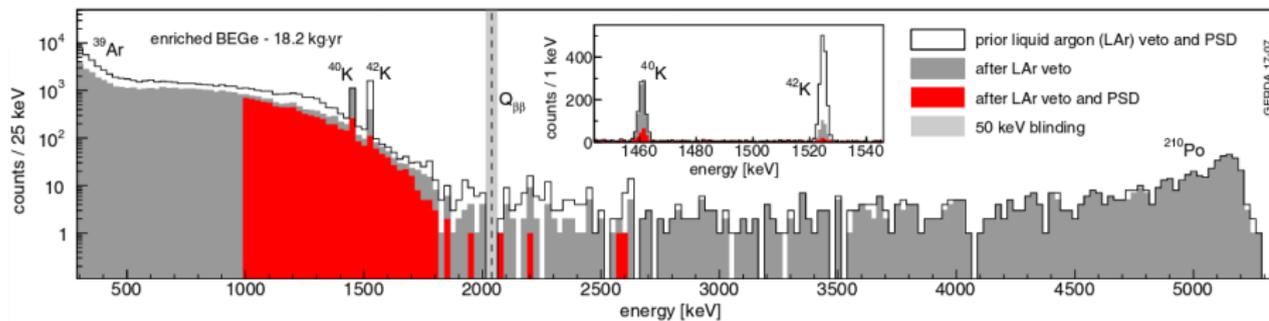
# Les liquides scintillants



# Les liquides scintillants



# Les semi-conducteurs $^{76}\text{Ge}$



## Hiérarchie de masse

