

Studio di decadimenti rari con un rivelatore a scintillazione BaF_2 contaminato da radio

[Eur. Phys. J. A 50 (2014) 134]



Alessandro Di Marco

I.N.F.N. & Università di Roma Tor Vergata

100° Congresso Nazionale della S.I.F.

Pisa 25 Settembre 2014



Lo scintillatore BaF₂



- Utilizzato in varie applicazioni come la rivelazione di γ e neutroni
- Utilizzato in medicina per la *Positron Emission Tomography* (PET)
- Rivelatore promettente per studiare decadimenti doppio beta ($\beta\beta$) di isotopi del Bario:
 - ^{130}Ba [$Q_{\beta\beta} = 2618.7(2.6)$ keV]
 $\rightarrow (0\nu+2\nu)$ osservato in esp. radiochimici $T_{1/2} = (2,2 \pm 0,5) \times 10^{21}$ y
 $T_{1/2} = (6,0 \pm 1,1) \times 10^{20}$ y
 - ^{132}Ba [$Q_{\beta\beta} = 844.0(1.1)$ keV]
- Primo studio di rivelazione diretta di decadimenti $\beta\beta$ del ^{130}Ba eseguito da DAMA con BaF₂ dove si sono ottenuti limiti per i canali vari di decadimento dell'ordine di 10^{17} yr
 \rightarrow desiderabili ulteriori R&D su rivelatori BaF₂
- I cristalli di BaF₂ tipicamente hanno livelli elevati di contaminazione dalle catene di U/Th
- In particolare nella misura presentata di seguito tali contaminazioni hanno permesso di:
 - Studiare la vita media del ^{212}Po
 - Studiare per la prima volta il decadimento β del ^{222}Rn
 - Porre dei limiti sperimentali migliori rispetto a quelli già disponibili per i decadimenti $\beta\beta$ di ^{212}Pb , ^{222}Rn e ^{226}Ra

DAMA SET-UPS

an observatory for rare processes @ LNGS



- DAMA/LIBRA (DAMA/NaI)
- DAMA/LXe
- **DAMA/R&D**
- DAMA/Crys
- DAMA/Ge

Collaboration:

Roma Tor Vergata, Roma La Sapienza, LNGS, IHEP/Beijing

+ by-products and small scale expts.: INR-Kiev

+ neutron meas.: ENEA-Frascati

+ in some studies on bb decays (DST-MAE project): IIT Kharagpur, India

Web Site: <http://people.roma2.infn.it/dama>

La configurazione sperimentale

Cristallo BaF_2 installato in DAMA/R&D

Dimensioni: $\varnothing 3'' \times 3''$

Peso: 1,714 kg

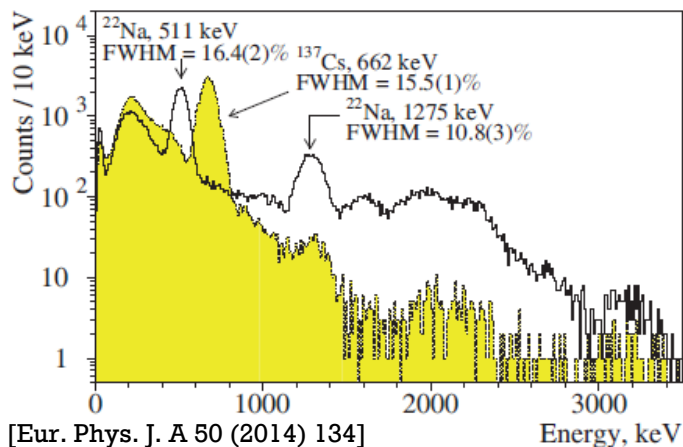
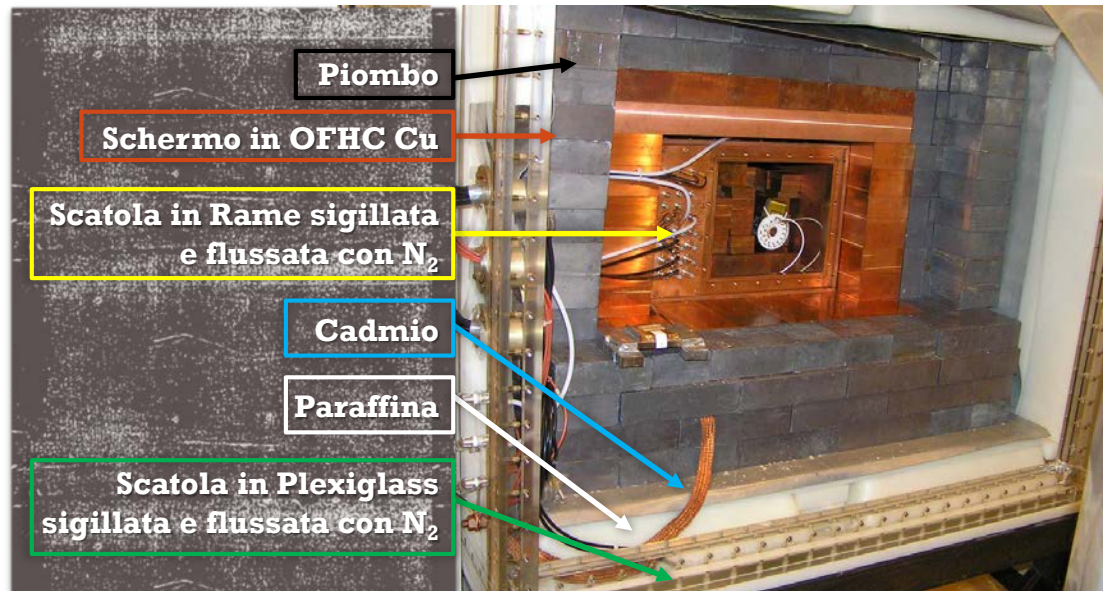
Tempo vivo di acquisizione: 101 ore

Cristallo accoppiato tramite due guide di luce in quarzo [$\varnothing 3'' \times 10 \text{ cm}$] a 2 PMT ETL 9302FLA

Acquisizione event-by-event

I segnali dei PMT sono sommati e inviati a un TD Acqiris DC2 [1Gsample/s] e registrati su una finestra temporale di 4000 ns

Trigger dato dalla coincidenza dei segnali dei 2 PMT [trigger rate $\approx 75 \text{ cps}$]



Soglia energetica hardware $\approx 30 \text{ keV}$

Apparato calibrato con sorgenti di:
 ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{60}Co , ^{133}Ba e ^{228}Th

Risoluzione energetica:

$$FWHM_{\gamma} [\text{keV}] = 397(54) + 15,6(3) \times E_{\gamma} [\text{keV}]$$

Scintillatori organici di grande massa presentano scale energetiche per γ e β leggermente diverse, tale effetto per il rivelatore BaF_2 usato è trascurabile

Pulse Shape Discrimination

- Impulsi originati da particelle diverse hanno diverso profilo temporale
- PSD ottenuta dalla stima del tempo medio:
 - a_i : ampiezza dell'impulso
 - t_i : tempo corrispondente all' i -esimo canale del TD

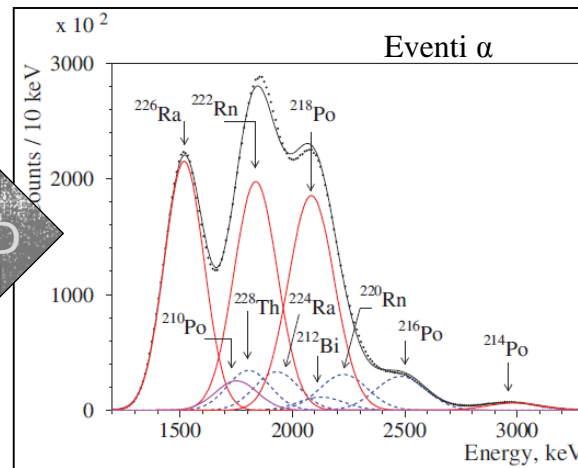
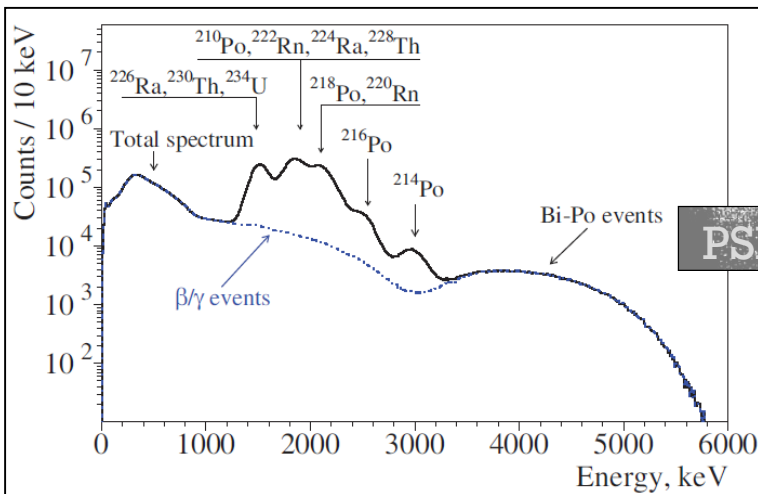
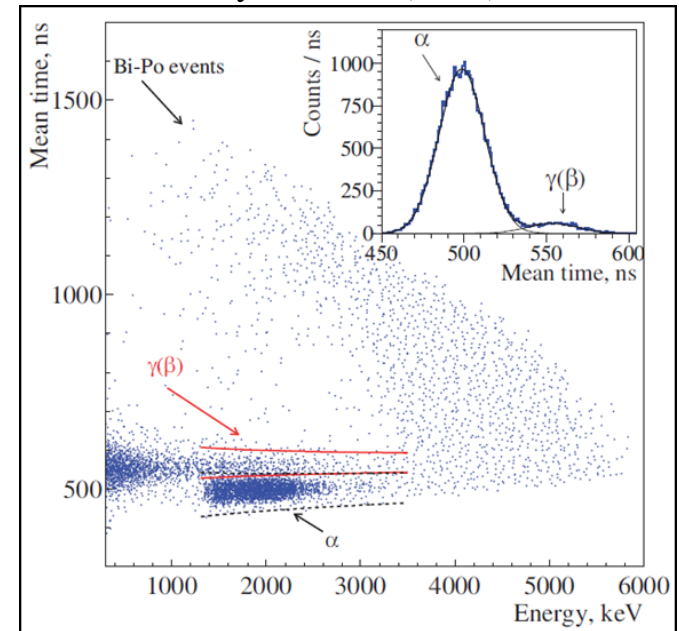
$$\tau = \frac{\sum_i a_i \cdot t_i}{\sum_i a_i}$$

a_i : ampiezza dell'impulso
 t_i : tempo corrispondente all' i -esimo canale del TD

Studio dei contaminanti

$$\alpha/\beta = 0.200(1) + 0.0245(1) \times E_\alpha [MeV]$$

[Eur. Phys. J. A 50 (2014) 134]



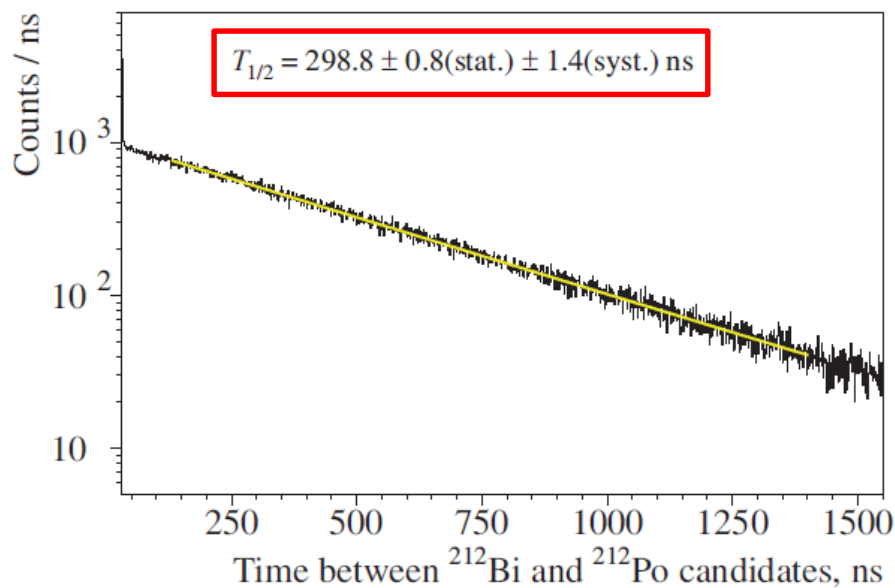
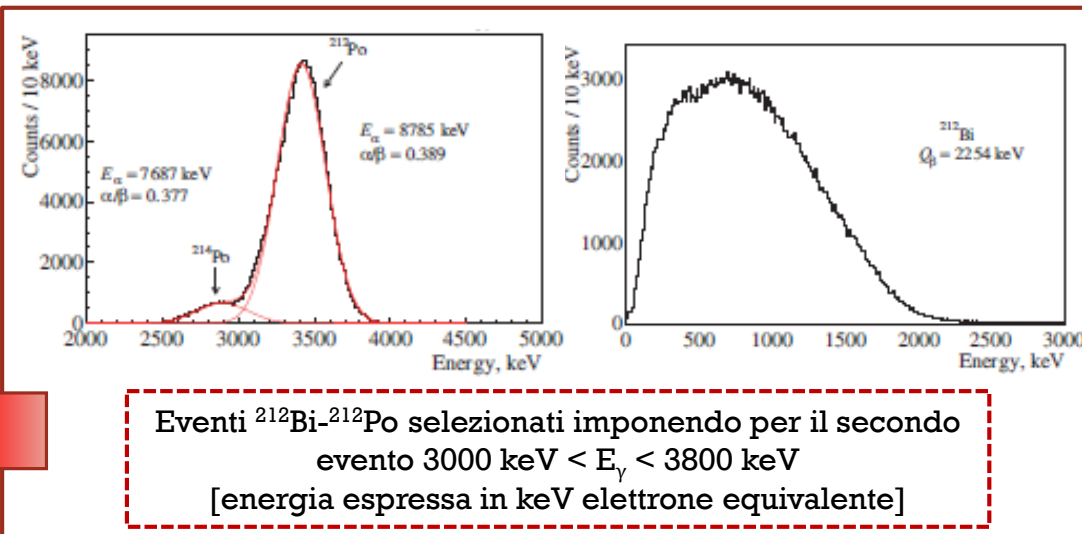
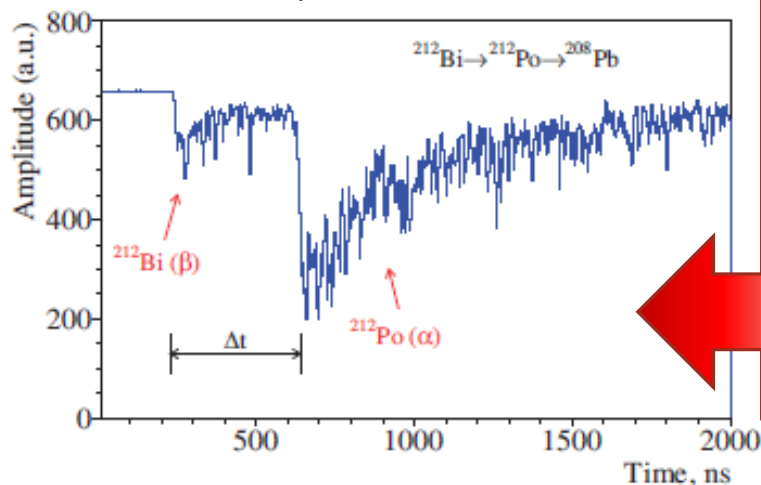
Chain	Nuclide	Activity, Bq/kg
232Th	232Th	< 0.004
	228Th	1.35(6)
238U	238U	< 0.0002
	226Ra	7.8(1)
	210Pb	0.99(1)
	235U	235U
	231Pa	< 0.0007
	227Ac	< 0.07

Limiti al 90% C.L.

[energia espressa in keV elettrone equivalente]

Vita media del ^{212}Po

[Eur. Phys. J. A 50 (2014) 134]



Procedura di fit:

- $\text{cost.} + \exp(-t/T_{212\text{Po}}) + \exp(-t/T_{214\text{Po}})$
cost. \rightarrow random coincid. $< 1\%$
- $162.3 \mu\text{s} < T_{214\text{Po}} < 166.3 \mu\text{s}$
- considerati 30 diversi intervalli temporali per 3 diversi bin temporali: 1, 2 e 3 ns per canale
- $\chi^2/\text{d.o.f.} = 0.92\text{-}1.15$

Studio di decadimenti $\beta\beta$ delle catene U/Th

L'elevata contaminazione del rivelatore BaF₂ da Ra permette di studiare alcuni decadimenti β e $\beta\beta$ di nuclidi appartenenti alle catene U/Th

Questi sono difficili da studiare a causa degli altri decadimenti veloci che possono dare essi stessi o la catena cui appartengono

Modo 2ν : $(A,Z) \rightarrow (A,Z+2) + 2e^- + 2\nu_e$ previsto dal MS

Modo 0ν : $(A,Z) \rightarrow (A,Z+2) + 2e^-$ possibile se ν è particella di Majorana

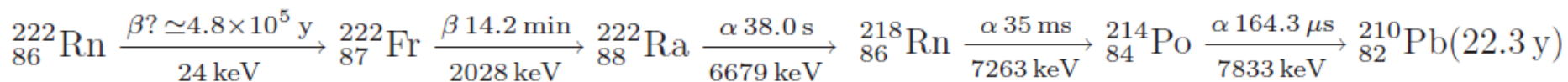
Decadimenti $\beta\beta$ di nuclidi instabili hanno $Q_{\beta\beta}$ maggiore rispetto ai nuclidi che decadono esclusivamente $\beta\beta$ ($\simeq 40$ MeV contro ≤ 4.3 MeV)

- Maggiore probabilità di avvenire
- Vite medie inferiori
- Maggiore difficoltà nel loro studio

Studio del decadimento β del ^{222}Rn

^{222}Rn è considerato decadere α al 100%

Il suo decadimento β è energeticamente possibile: $Q_\beta = (24 \pm 21) \text{ keV}$ con $T_{1/2} = 4.8 \times 10^5 \text{ y}$

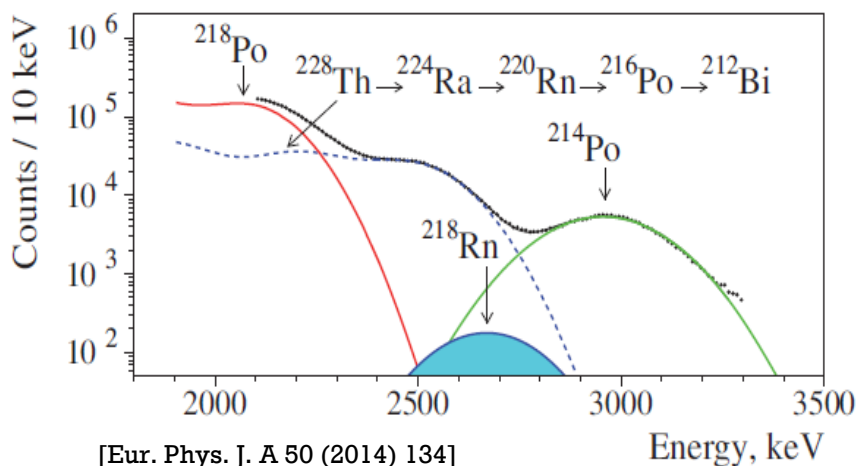


A causa dell'elevata rate sperimentale (75 cps) e considerato il tempo morto sperimentale (1.65 ms) è possibile studiare solo la catena:



selezionando eventi:

- 1) β di energia (30 – 2207) keV (attesi 99% di eventi dal ^{222}Fr)
- 2) α di energia (2109 – 2623) keV_{ee} con intervallo temporale [1.65 ms, 1.65 ms + 5×38.0 s]
- 3) α di energia (2398 – 2946) keV_{ee} con intervallo temporale [1.65 ms, 1.65 ms + 5×35.0 ms]



[Eur. Phys. J. A 50 (2014) 134]

[energia espressa in keV elettrone equivalente]

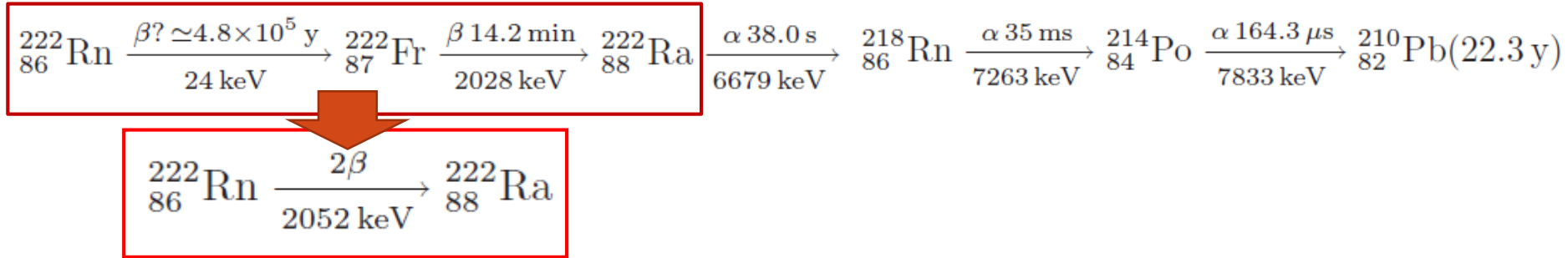
BKG da eventi α casuali dalle catene U/Th a causa dell'ampio intervallo temporale considerato nell'evento (2)

Fit con modello BKG + Gaussiana nell'intervallo (2110 – 3260) keV

$$T_{1/2}^\beta(^{222}\text{Rn}) > 8.0 \text{ y} \quad \text{at} \quad 90\% \text{ C.L.}$$

Studio del decadimento $\beta\beta$ del ^{222}Rn

^{222}Rn è considerato decadere α al 100%



Analogamente al decadimento β è possibile studiare solo la catena:



selezionando eventi:

- 1) β di energia (0 – 2231) keV
- 2) α di energia (2109 – 2623) keV_{ee} con intervallo temporale [1.65 ms, 1.65 ms + 5×38.0 s]
- 3) α di energia (2398 – 2946) keV_{ee} con intervallo temporale [1.65 ms, 1.65 ms + 5×35.0 ms]

$$\lim T_{1/2}^{2\beta} = \varepsilon \cdot t \cdot R^{\alpha/\beta} \cdot T_{1/2}^{\alpha/\beta} / \lim S.$$

Dai dati si ricava:

$$\lim S = 5.4 \times 10^3 \text{ eventi}$$

$$\varepsilon_{2\nu} = 0.849 \text{ e } \varepsilon_{0\nu} = 0.841 \text{ da MC}$$

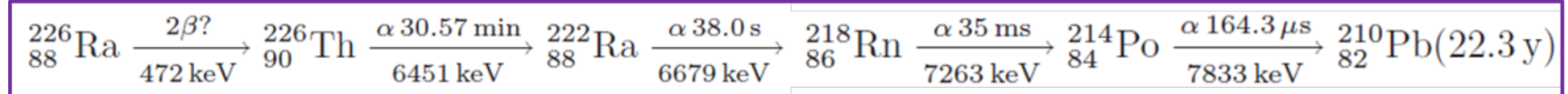
$$t = 101 \text{ ore}$$

$$T_{1/2}^{2\beta(0\nu+2\nu)}(^{222}\text{Rn}) > 8.0 \text{ y at } 90\% \text{ C.L.}$$

Studio del decadimento $\beta\beta$ del ^{226}Ra

^{226}Ra decade α in ^{222}Rn con $T_{1/2} = 1600$ y nel $\approx 100\%$ dei casi e nel $3.2 \times 10^{-9}\%$ decade in cluster emettendo ^{14}C

Energeticamente ^{226}Ra può decadere anche $\beta\beta$ [$Q_{\beta\beta} = (472 \pm 5)$ keV] producendo la catena



Analogamente al ^{222}Rn è possibile studiare solo la catena:



selezionando eventi:

- 1) α di energia (2000 – 2502) keV_{ee}
- 2) α di energia (2109 – 2623) keV_{ee} con intervallo temporale [1.65 ms, 1.65 ms + 5×38.0 s]
- 3) α di energia (2398 – 2946) keV_{ee} con intervallo temporale [1.65 ms, 1.65 ms + 5×35.0 ms]

$$\lim T_{1/2}^{2\beta} = \varepsilon \cdot t \cdot R^{\alpha/\beta} \cdot T_{1/2}^{\alpha/\beta} / \lim S.$$

Dai dati si ricava:

$$\lim S = 5.4 \times 10^3 \text{ eventi}$$

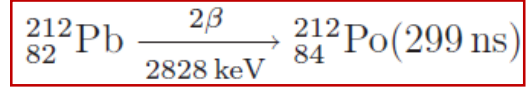
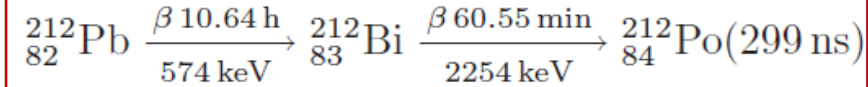
$$\varepsilon_{(2\nu+0\nu)} = 0.833 \text{ da MC}$$

$$t = 101 \text{ ore}$$

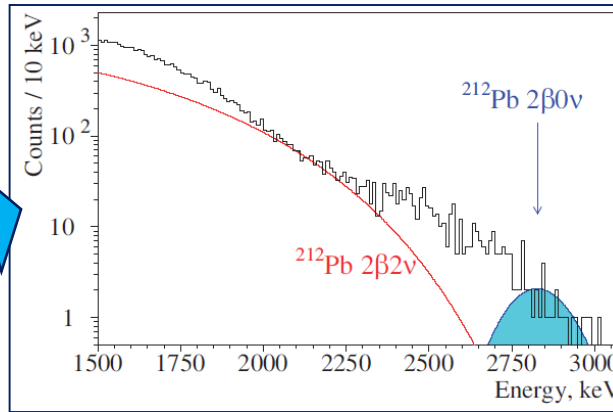
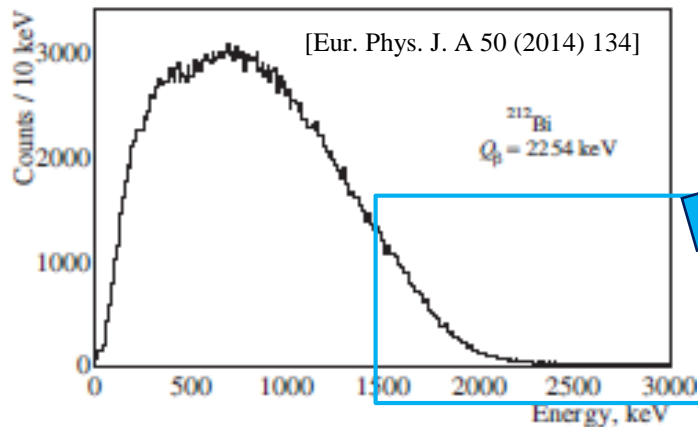
$$T_{1/2}^{2\beta(0\nu+2\nu)}(^{226}\text{Ra}) > 1.2 \times 10^6 \text{ y} \quad \text{at} \quad 90\% \text{ C.L.}$$

Studio del decadimento $\beta\beta$ del ^{212}Pb

^{212}Pb decade β in ^{212}Bi con $T_{1/2} = 10.64$ ore che decade β in ^{212}Po con $T_{1/2} = 60.55$ min
 ^{212}Pb può decadere direttamente $\beta\beta$ in ^{212}Po



Per identificare il processo si studiano gli eventi Bi-Po



Dai dati si ricava:
 $\lim S_{2\nu} = 1.1 \times 10^5$ eventi
 $\lim S_{0\nu} = 46.6$ eventi

Da simulazioni MC
 $\varepsilon = 0.92$

$t = 101$ ore
 ^{212}Pb in equilibrio secolare
 con ^{228}Th

$$\lim T_{1/2}^{2\beta} = \varepsilon \cdot t \cdot R^{\alpha/\beta} \cdot T_{1/2}^{\alpha/\beta} / \lim S.$$

$$T_{1/2}^{2\beta 0\nu} ({}^{212}\text{Pb}) > 20 \text{ y} \quad \text{at} \quad 90\% \text{ C.L.}$$

$$T_{1/2}^{2\beta 2\nu} ({}^{212}\text{Pb}) > 75 \text{ h} \quad \text{at} \quad 90\% \text{ C.L.}$$

Summary

Nuclide	Main channel of decay and $T_{1/2}$		$T_{1/2}$ (and branching ratio, B)		Other works
			[Eur. Phys. J. A 50 (2014) 134]		
^{212}Po	α	299 ± 2 ns	$298.8 \pm 0.8(\text{stat.}) \pm 1.4(\text{syst.})$		$294.7 \pm 0.6(\text{stat.}) \pm 0.8(\text{syst.})$ 299 ± 2
^{212}Pb	β	10.64 h	$2\beta 2\nu > 75$ h	$(B < 14\%)$	> 146 h
			$2\beta 0\nu > 20$ y	$(B < 6.0 \times 10^{-3}\%)$	> 6.7 y
^{222}Rn	α	3.8235 d	$\beta > 8.0$ y	$(B < 0.13\%)$	–
			$2\beta 2\nu > 8.0$ y	$(B < 0.13\%)$	> 40 d
			$2\beta 0\nu > 8.0$ y	$(B < 0.13\%)$	> 2.8 y
^{226}Ra	α	1600 y	$2\beta 2\nu > 1.2 \times 10^6$ y	$(B < 0.13\%)$	$> 4.5 \times 10^3$ y
			$2\beta 0\nu > 1.2 \times 10^6$ y	$(B < 0.13\%)$	$> 4.1 \times 10^4$ y

Questa misura ha permesso di:

- Determinare con maggiore precisione $T_{1/2}$ del decadimento del ^{212}Po
- Studiare per la prima volta il decadimento β del ^{222}Rn
- Studiare i decadimenti $\beta\beta$ di ^{222}Rn , ^{226}Ra e ^{212}Pb

Conclusioni

- Il rivelatore BaF_2 usato presenta contaminazione da ^{226}Ra e ^{228}Th riconducibile alla affinità chimica del Ra con il Ba
- La risposta del rivelatore è stata investigata in un ampio intervallo energetico (fino a 9 MeV) e la buona capacità di PSD del rivelatore è stata dimostrata
- La sensibilità sperimentale è stata fortemente limitata dall'elevato tempo morto
- I risultati possono essere migliorati usando un rivelatore BaF_2 di minore tempo morto e/o migliore risoluzione
- La contaminazione da Ra è attualmente la principale limitazione all'uso di rivelatori BaF_2 nello studio di decadimenti $\beta\beta$ del ^{130}Ba e del ^{132}Ba
- Attualmente un R&D per purificare questi rivelatori dal Radio è attualmente in corso presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Grazie per l'attenzione!