Dark area per la calibrazione della risposta dei rivelatori CR-39 ad alte esposizioni di Radon

D. Franci[1], F. Cardellini[2], T. Aureli[1]

[1]ARPA Lazio – Sez. Prov. di Roma, Unità CEM, RI, IL

[2]ENEA CR Casaccia, INMRI

VI Convegno Nazionale - Il controllo degli agenti fisici: ambiente, territorio e nuove tecnologie

Alessandria, 6-7-8 Giugno 2016

Sommario

- ✓ Focus sul problema della **sovrapposizione delle tracce** nei rivelatori CR-39

- ✓ Parziale soluzione: curva di calibrazione basata su un **polinomio di ordine >= 2**

- ✓ Svantaggio: curva non monotonona, che introduce un **limite superiore** all'esposizione rivelabile

- ✓ Approccio alternativo: ricerca di una grandezza adatta per la costruzione di una **curva di calibrazione monotona**

- ✓ Utilizzo della **dark area**, ovvero la frazione di superficie del rivelatore occupata da tracce

- ✓ Validazione del modello, confronto con l'approccio standard e discussione delle **prestazioni**

Misure integrate – CR39

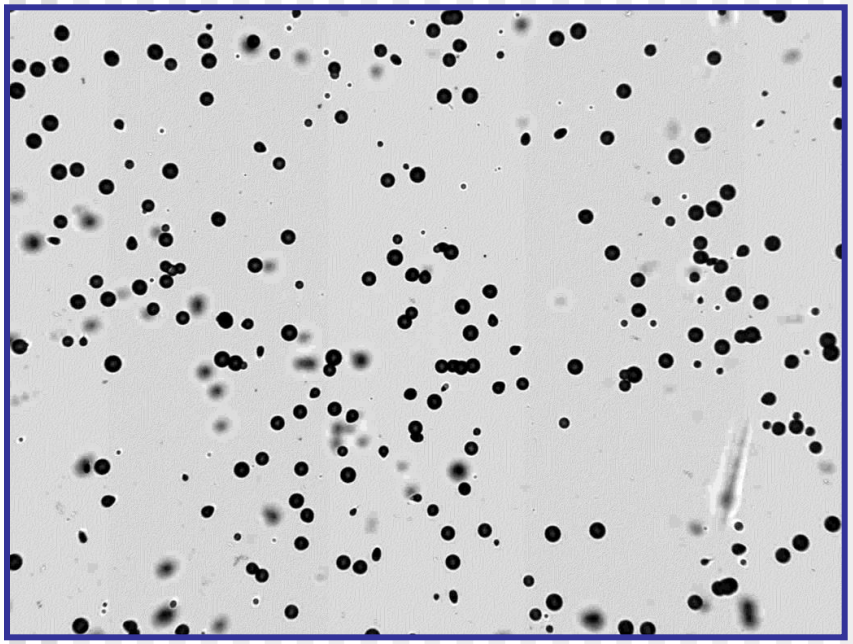
- La concentrazione di radon in locali indoor dipende da parametri ambientali (**temperatura**, **pressione**, **ventilazione dei locali**, ...)
- Grandezza fortemente **variabile nel tempo**
- Necessità di **misure integrate** (6 / 12 mesi) per ottenere un valore mediato nel tempo

Rivelatori a tracce nucleari CR39

- Costi contenuti
- Semplicità di utilizzo
- Minimo ingombro

Principio di Misura

- ✓ Le particelle alfa danneggiano il polimero creando **tracce latenti**
- ✓ Tracce amplificate (R ~ 20 μm) mediante un **attacco chimico** del CR39 con NaOH al 25%, per 4h a 90 °C
- ✓ L'analisi e' un **esperimento di conteggio** (stat. di Poisson)



Conteggio delle tracce

↓ Calibrazione

Calcolo dell'esposizione [kBqh/m^3]

↓ Tempo esposizione

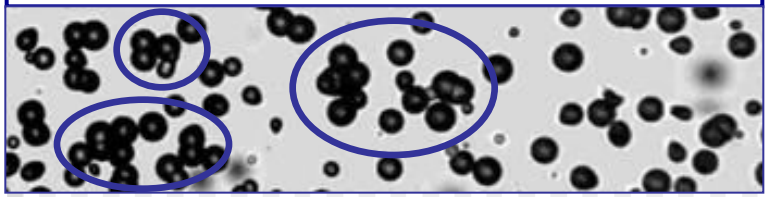
Calcolo della concentrazione [Bq/m^3]

Criticità nella misura

Sebbene la misura rappresenti un esercizio concettualmente semplice, si devono tenere in considerazione **alcune criticità**

Sovrapposizione tracce:

all'aumentare del numero di tracce rivelate aumenta la probabilità di sovrapposizione

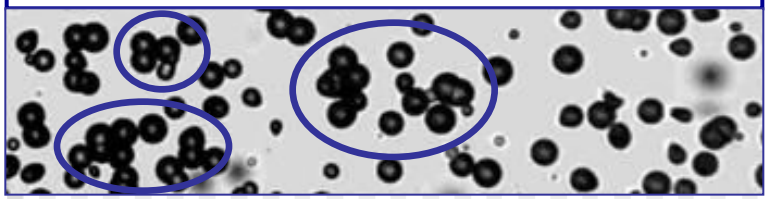


Criticità nella misura

Sebbene la misura rappresenti un esercizio concettualmente semplice, si devono tenere in considerazione **alcune criticità**

Sovrapposizione tracce:

all'aumentare del numero di tracce rivelate aumenta la probabilità di sovrapposizione



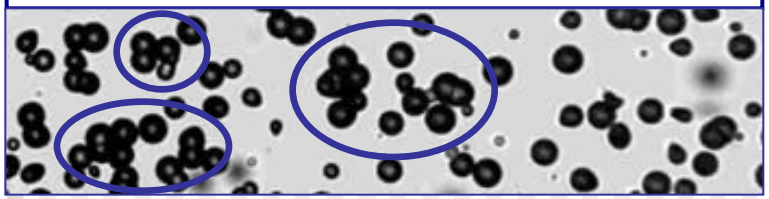
Effetto ageing/fading:

l'esposizione prolungata dei rivelatori all'aria a temperatura ambiente - prima, dopo e durante la misurazione - influisce sulla sensibilità del polimero alla rivelazione delle tracce alfa

Criticità nella misura

Sebbene la misura rappresenti un esercizio concettualmente semplice, si devono tenere in considerazione **alcune criticità**

Sovrapposizione tracce:
all'aumentare del numero di tracce rivelate aumenta la probabilità di sovrapposizione



Effetto ageing/fading:
l'esposizione prolungata dei rivelatori all'aria a temperatura ambiente - prima, dopo e durante la misurazione - influisce sulla sensibilità del polimero alla rivelazione delle tracce alfa

Entrambi gli effetti producono una diminuzione della sensibilità del rivelatore di cui bisogna tenere conto

EFFETTO DELLA SOVRAPPOSIZIONE DELLE TRACCE

Linearità della risposta

- Dalla **densità di tracce** rivelata (trks/mm^2) si risale al valore di **esposizione** (kBqh/m^3)
- Al crescere dell'esposizione, aumenta il numero di tracce e di conseguenza la **probabilità di sovrapposizione**
- La sovrapposizione produce uno scostamento rispetto alla **risposta lineare del rivelatore ideale**

RIVELATORE IDEALE

Esposizione

$\propto$

Densità tracce

$$\mathrm{Exp} = \mathrm{K}_{cal} \cdot \mathrm{d}_{read}$$

Linearità della risposta

- Dalla **densità di tracce** rivelata (trks/mm^2) si risale al valore di **esposizione** (kBqh/m^3)
- Al crescere dell'esposizione, aumenta il numero di tracce e di conseguenza la **probabilità di sovrapposizione**
- La sovrapposizione produce uno scostamento rispetto alla **risposta lineare del rivelatore ideale**

RIVELATORE IDEALE

Esposizione

$\propto$

Densità tracce

$$\underbrace{\mathrm{Exp}}_{\text{calcolata}} = \mathrm{K}_{cal} \cdot \underbrace{\mathrm{d}_{read}}_{\text{misurata}}$$

$\mathrm{Exp} \rightarrow$ [kBqhm^{-3}]

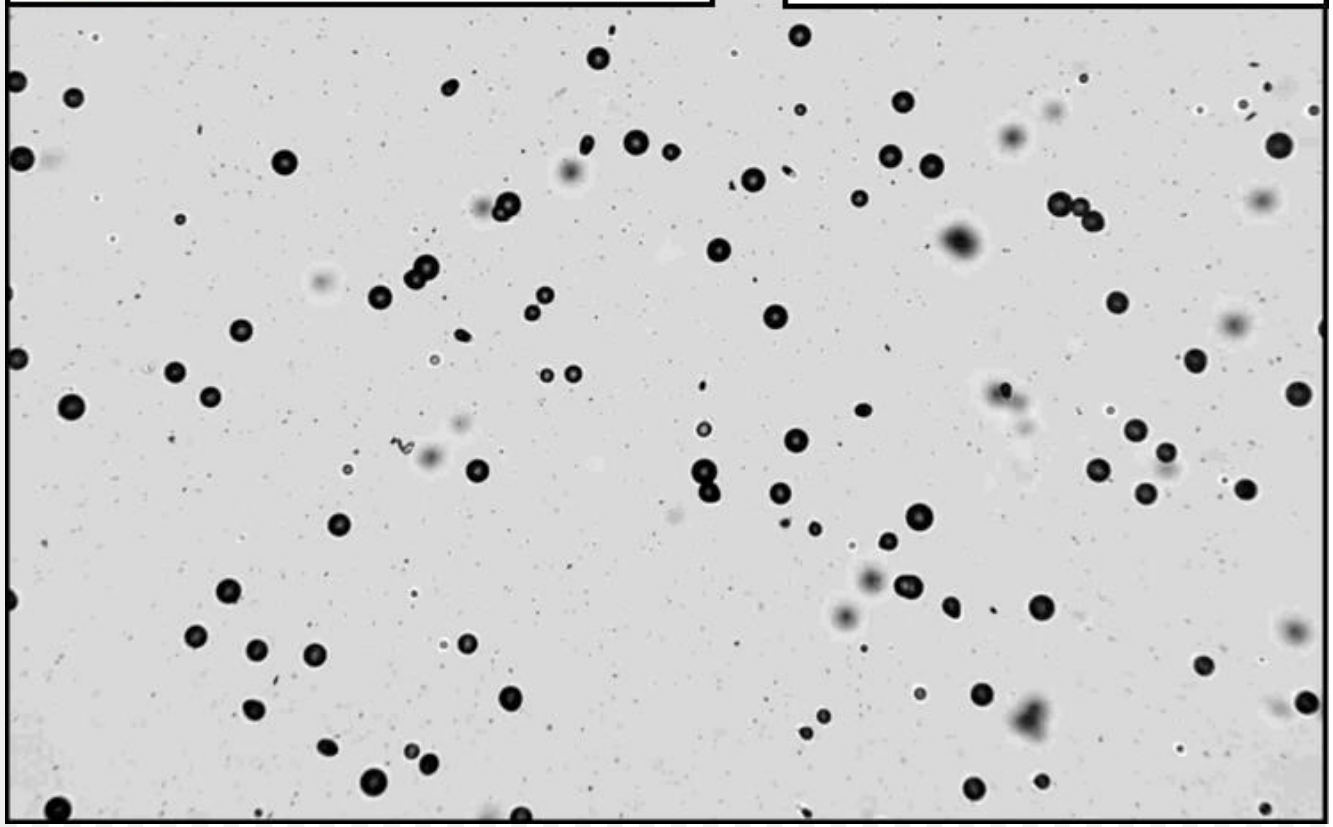
$\mathrm{d}_{read} \rightarrow$ [trks/mm^2]

RIVELATORE IDEALE ≠ RIVELATORE REALE

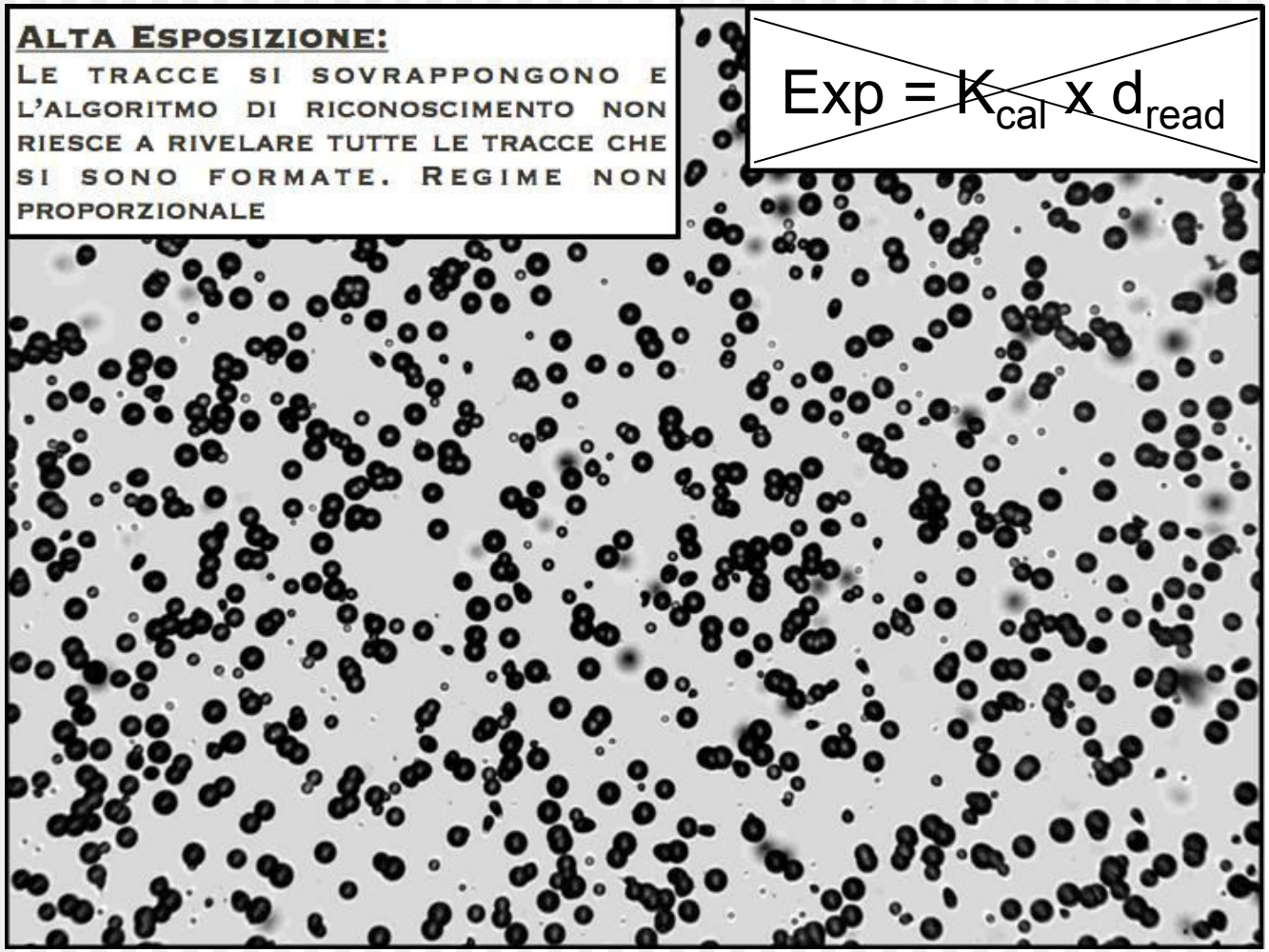
Dipendenza della risposta dalla densità di tracce

Bassa Esposizione:
Le tracce sono ben separate e tutte quelle che si formano sono rivelate.
Regime proporzionale

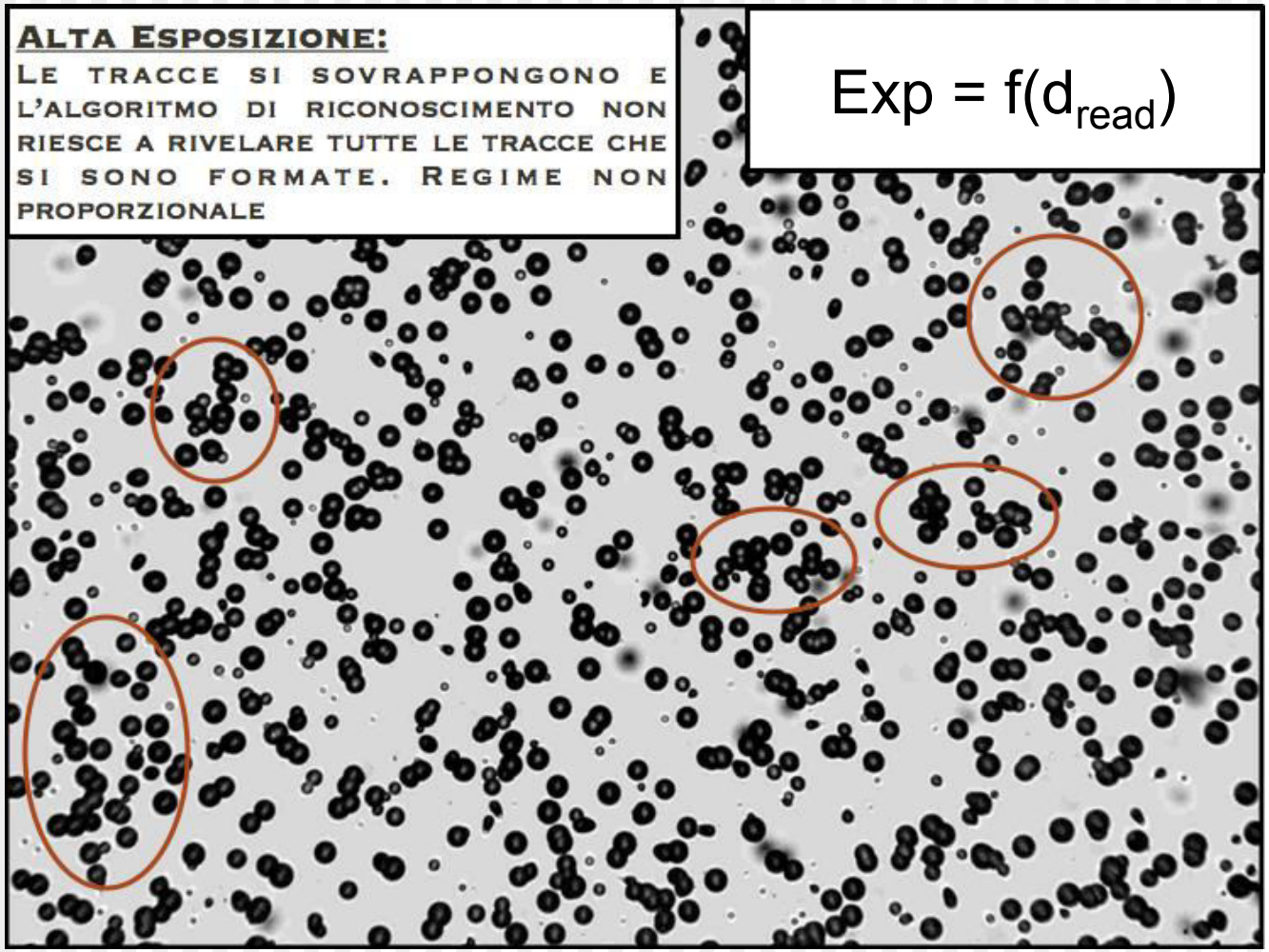
$$Exp = K_{cal} \times d_{read}$$



Dipendenza della risposta dalla densità di tracce

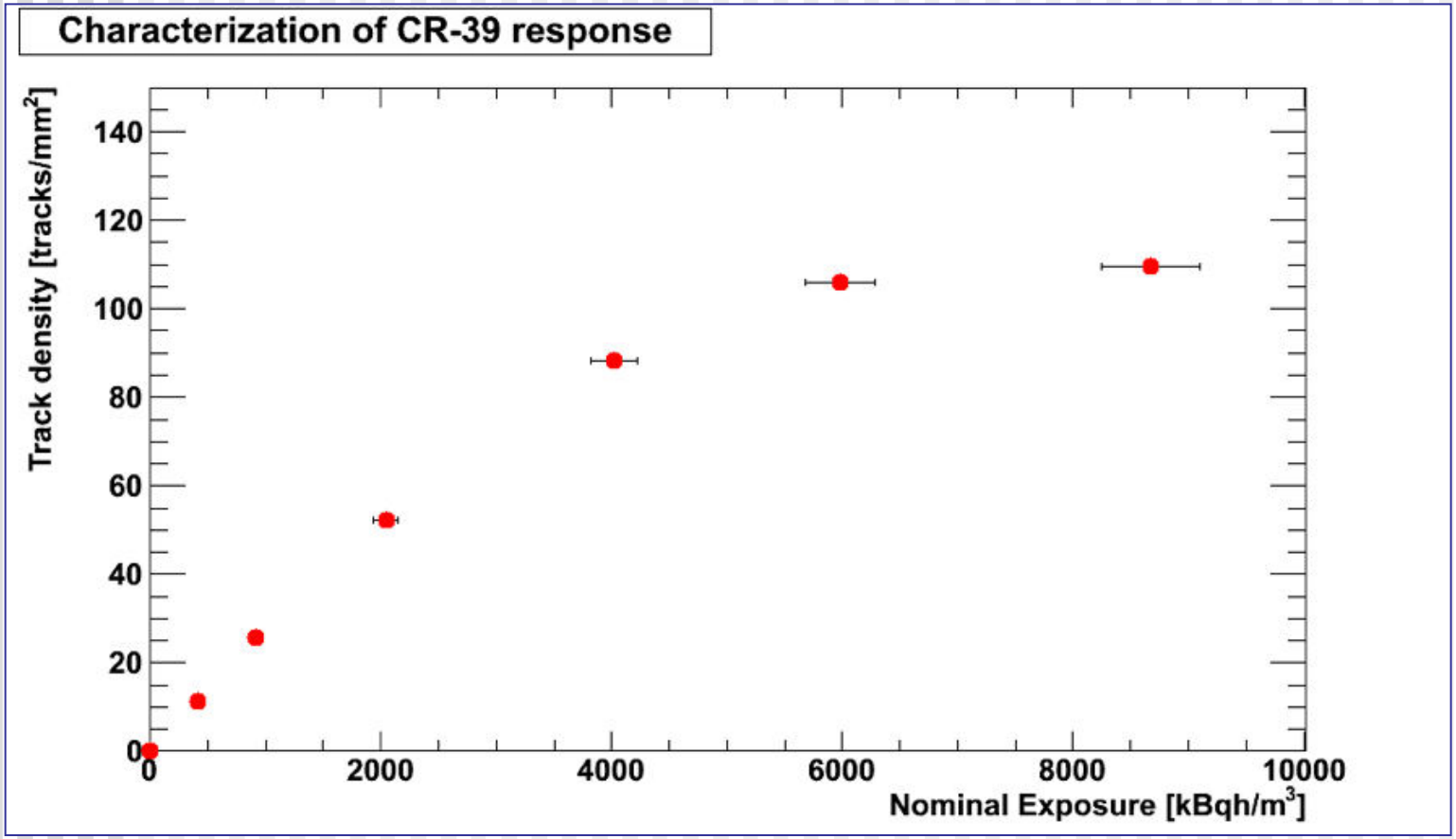


Dipendenza della risposta dalla densità di tracce



Curva di calibrazione sperimentale

Calibrazione mediante esposizioni certificate in camera Radon presso ENEA-INMRI

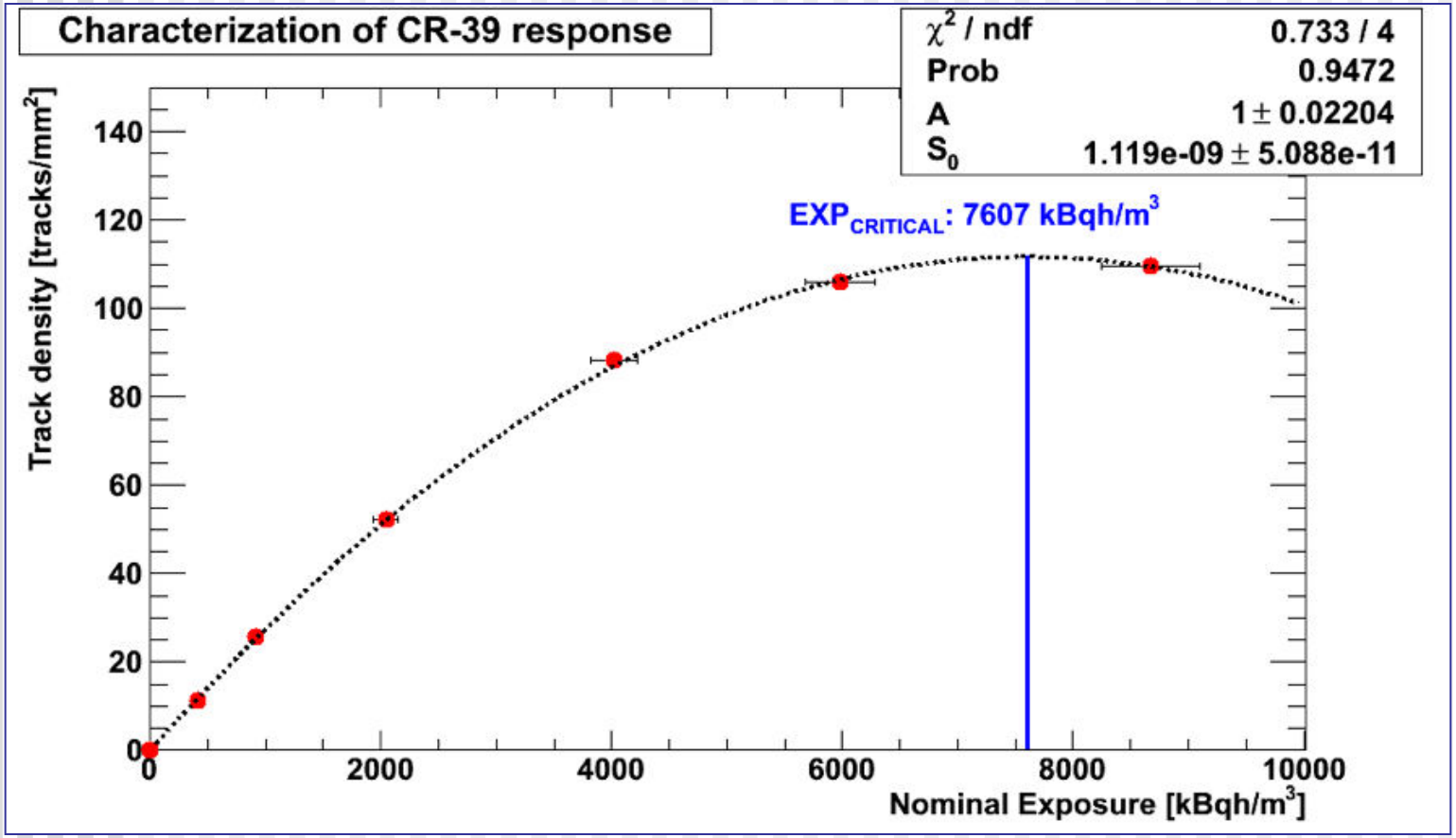


Esposizione [kBqh/m³]
410
911
2042
4020
5987
8673

D.Franci, T.Aureli, *A method to account for track overlap in CR-39 detectors*, Radiat. Prot. Dosimetry. (2014) 158 (1) doi:10.1093/rpd/nct193

Curva di calibrazione sperimentale

Fit ai dati → polinomio troncato al 2^ ordine [parabola]
Trascuriamo le intersezioni tra più di due tracce

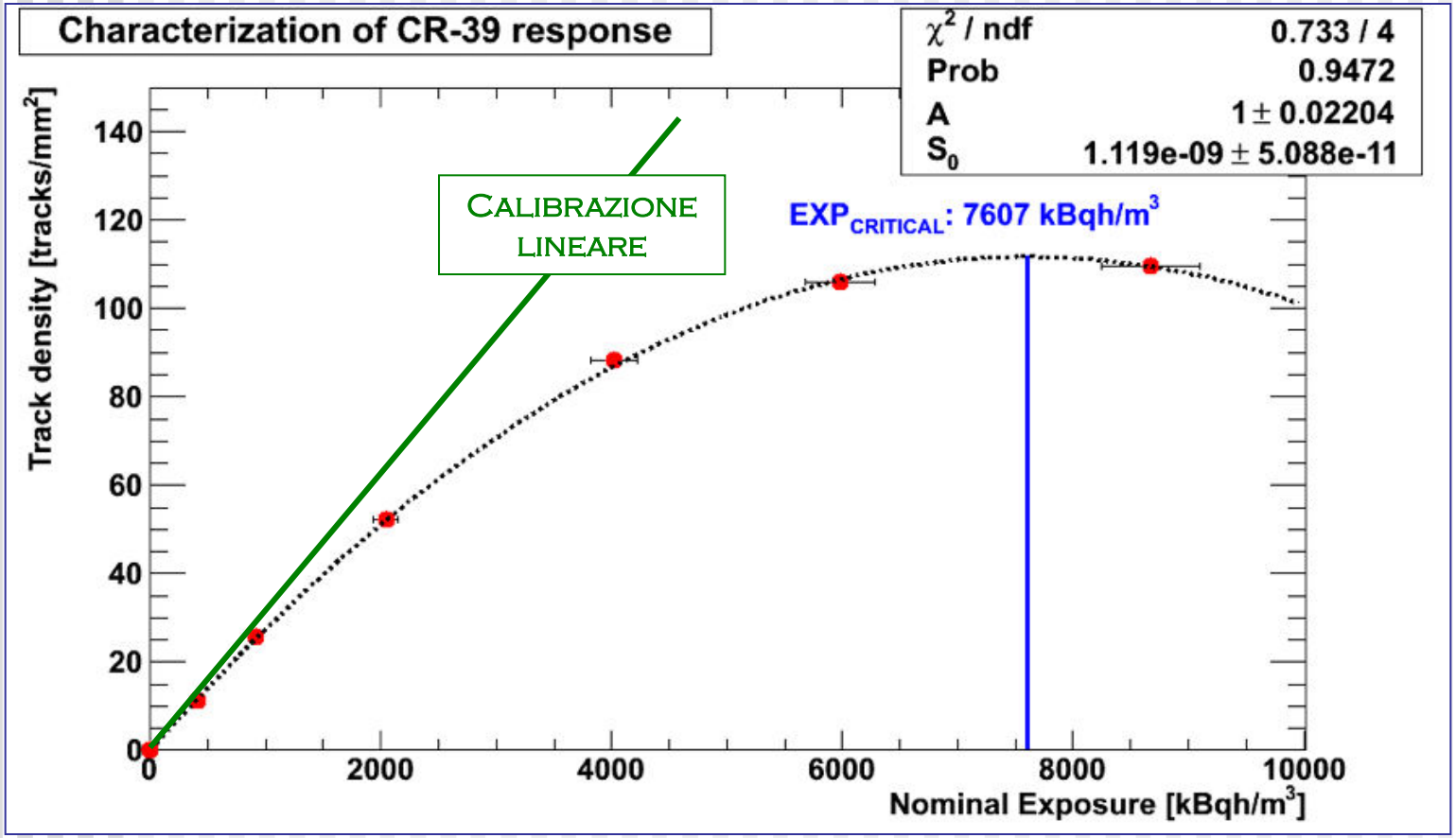


Esposizione [kBqh/m^3]
410
911
2042
4020
5987
8673

D.Franci, T.Aureli, *A method to account for track overlap in CR-39 detectors*, Radiat. Prot. Dosimetry. (2014) 158 (1) doi:10.1093/rpd/nct193

Curva di calibrazione sperimentale

Fit ai dati → polinomio troncato al 2^ ordine [parabola]
Trascuriamo le intersezioni tra più di due tracce

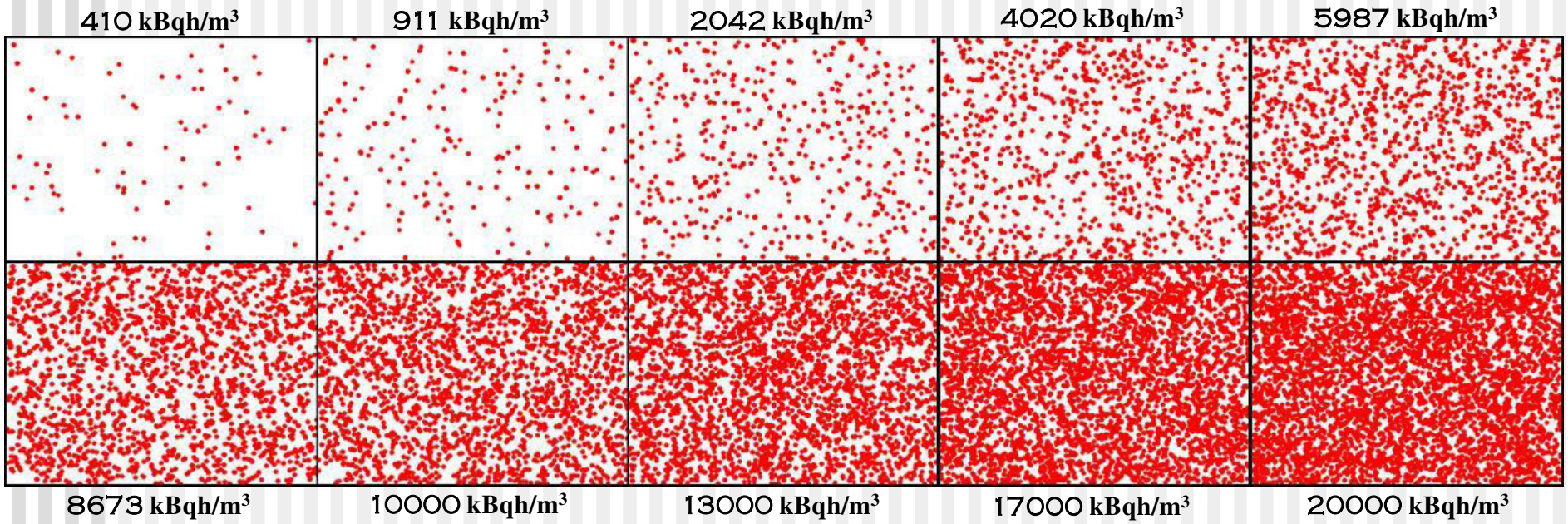


Esposizione [kBqh/m^3]
410
911
2042
4020
5987
8673

D.Franci, T.Aureli, *A method to account for track overlap in CR-39 detectors*, Radiat. Prot. Dosimetry. (2014) 158 (1) doi:10.1093/rpd/nct193

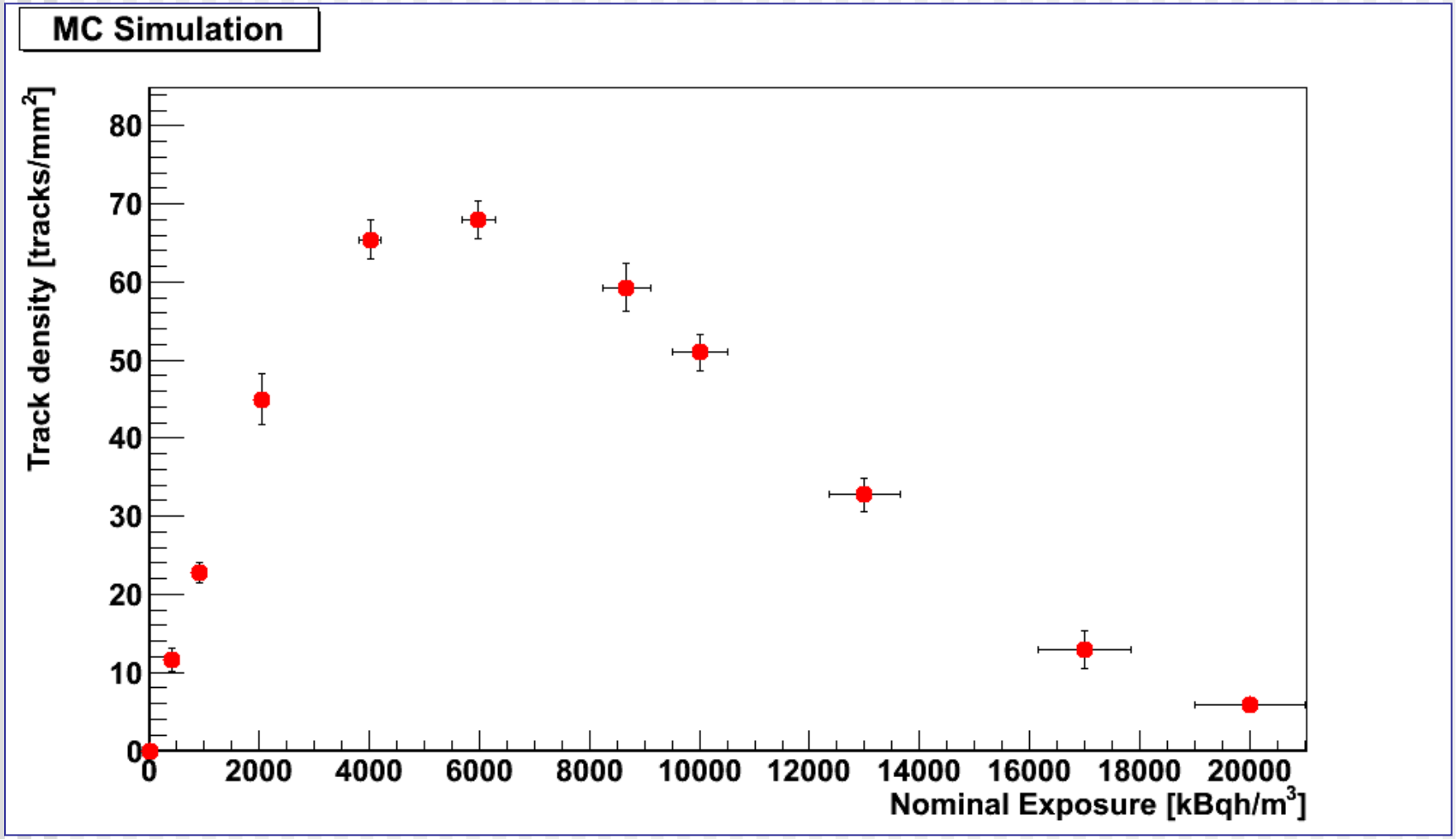
Validazione tramite Monte Carlo

- ✓ Calibrazione validata mediante simulazioni Monte Carlo
- ✓ Sono stati simulati CR39 a valori di esposizione crescenti
- ✓ Le tracce sono state analizzate mediante ImageJ, un software open-source di pattern recognition
- ✓ Lo studio ha dettagliato l'impatto della sovrapposizione sulla risposta del rivelatore



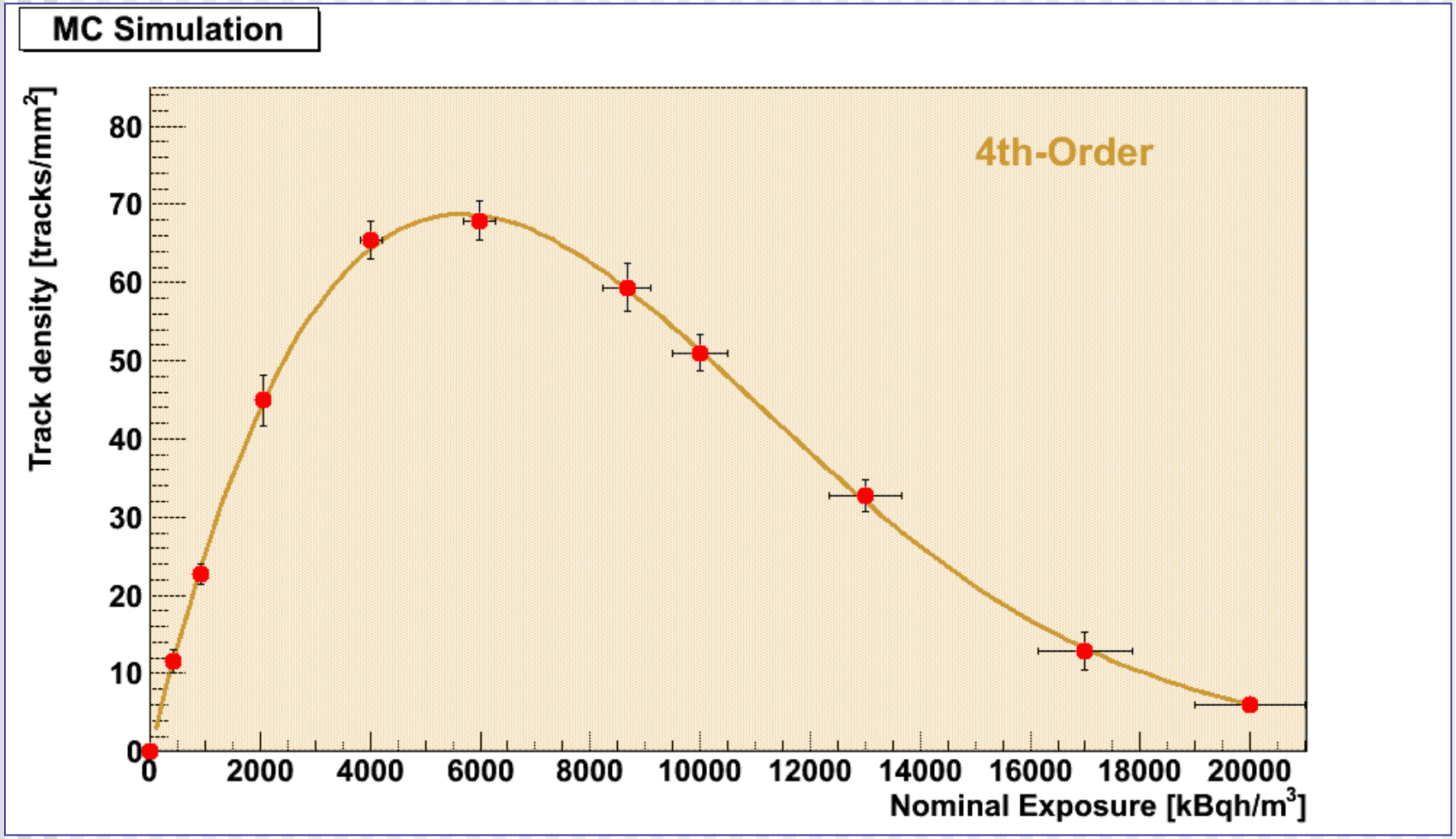
Risultati Monte Carlo

Plot densità di tracce vs Esposizione



Risultati Monte Carlo

Fit con polinomio di ordine crescente

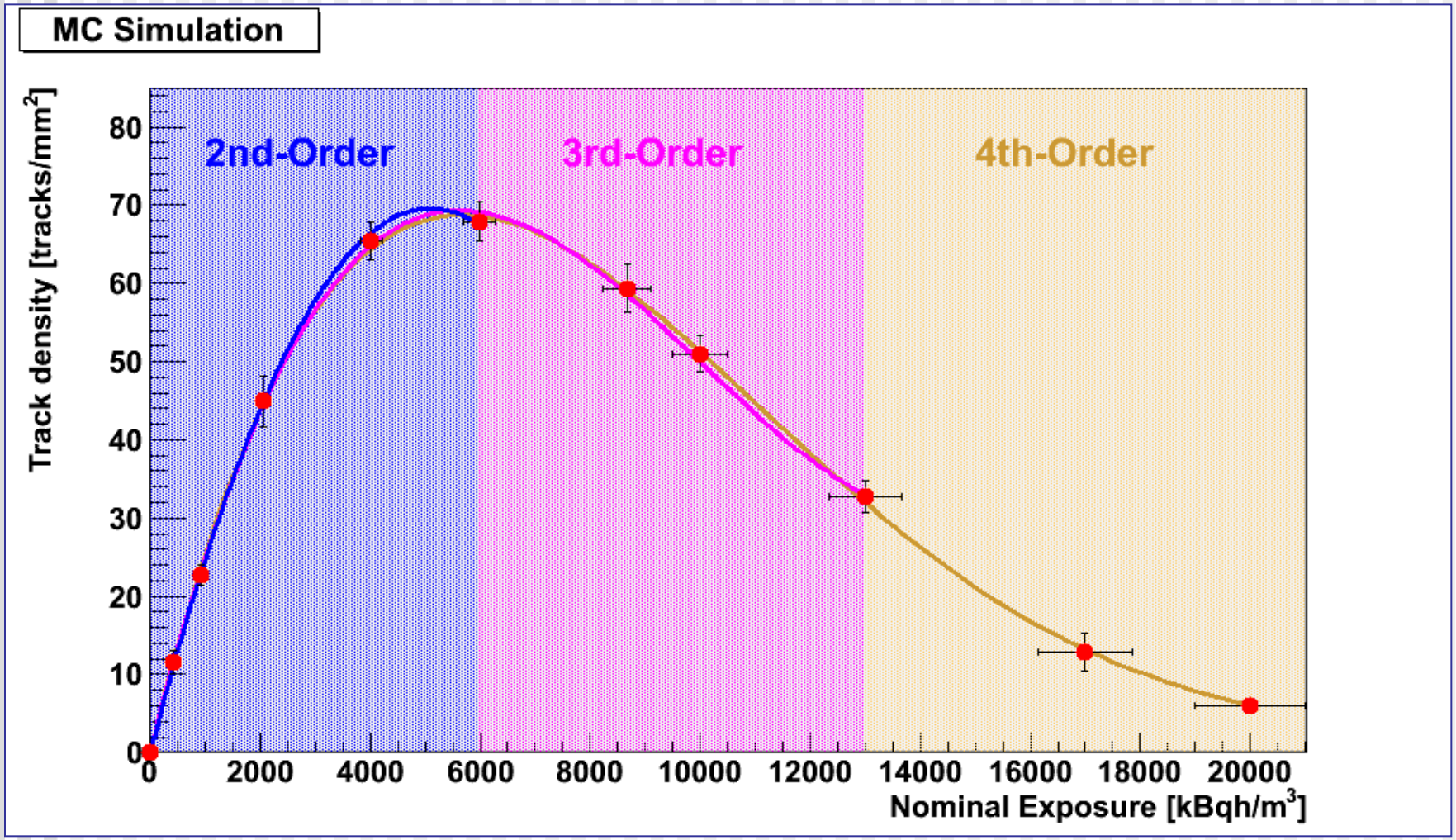


Risultati Monte Carlo

Fit con polinomio di ordine crescente

Risultati Monte Carlo

Fit con polinomio di ordine crescente



Sovrapposizione in sintesi

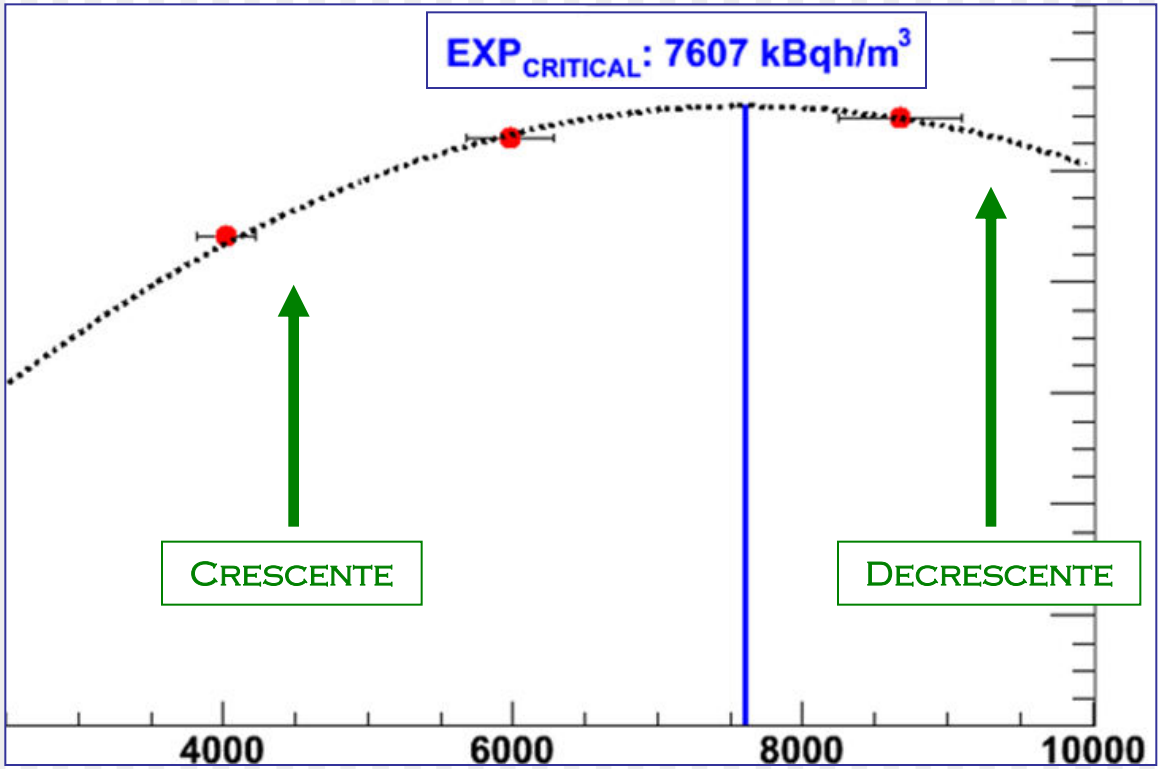
- ✓ **Risposta degradata** a causa della sovrapposizione delle tracce
- ✓ Possibile **sottostima dell'esposizione** (e della concentrazione) di Radon
- ✓ Polinomio di **2^ grado** fornisce risultati corretti

Esposizione nominale [kBqh/m3]	Esposizione misurata [kBqh/m3]	Esposizione cal. lineare [kBqh/m3]	Scarto [%]
410	395,4	385	6,1%
911	926,1	869,8	4,5%
2042	2051,8	1775,1	13,1%
4020	4109,9	2999,6	25,4%
5987	5878,9	3607,3	39,7%
8673	8628,4	3735,3	56,9%

Sei mesi a 500 Bq/m^3

Limitazioni del metodo di calibrazione

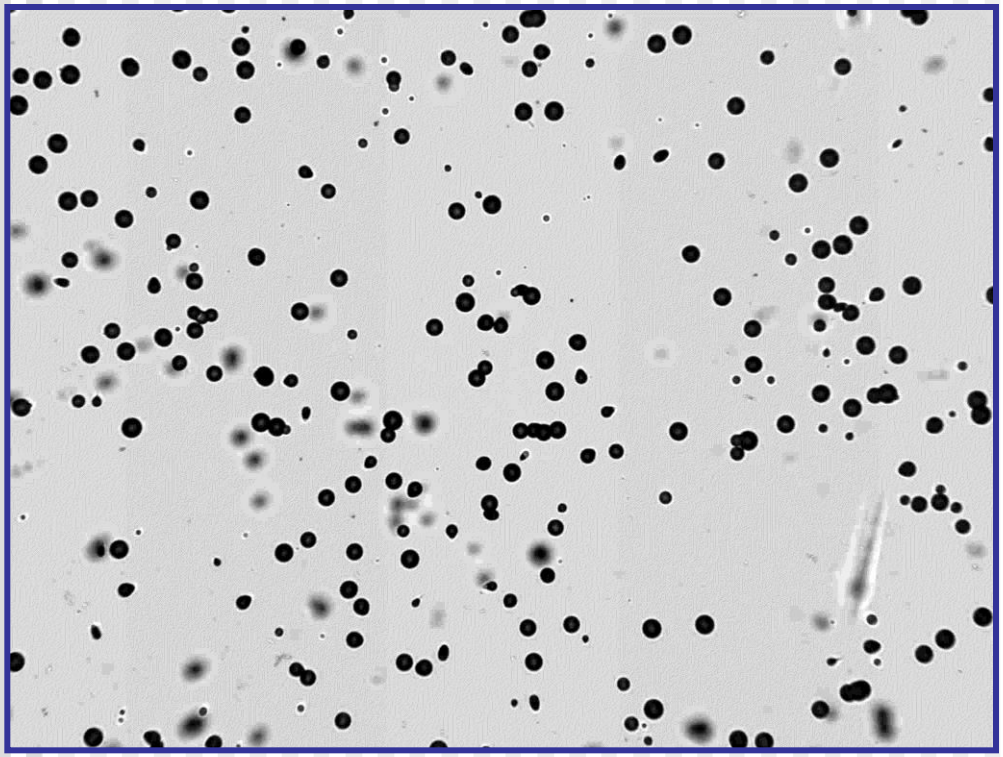
La curva di calibrazione non è strettamente monotona rispetto all'esposizione



$EXP_{CRITICAL}$ è il limite superiore del metodo di calibrazione

Dark area

Per fornire risultati quantitativi a valori di esposizione superiori, **serve una grandezza strettamente monotona rispetto all'esposizione**

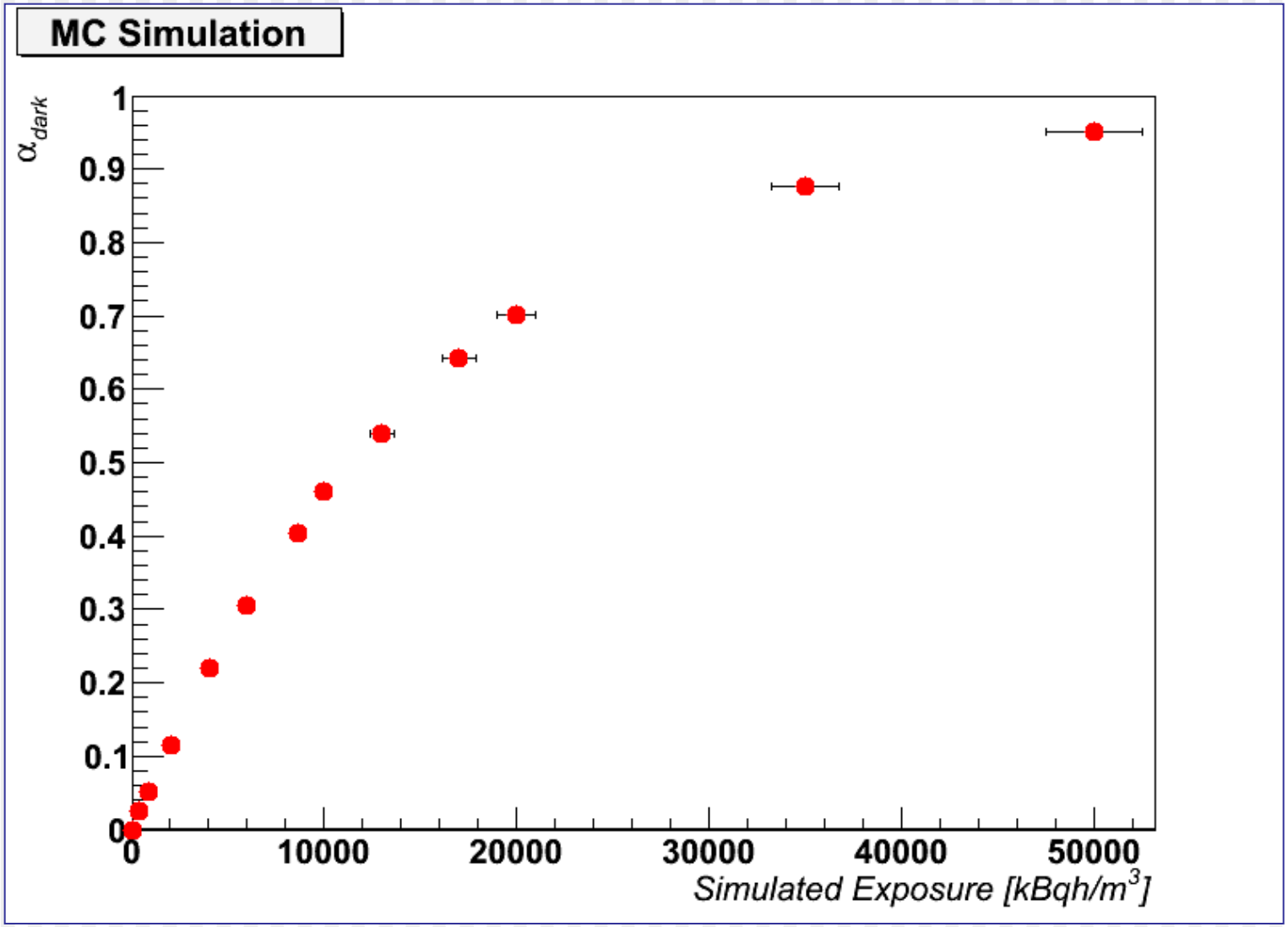


Dark Area

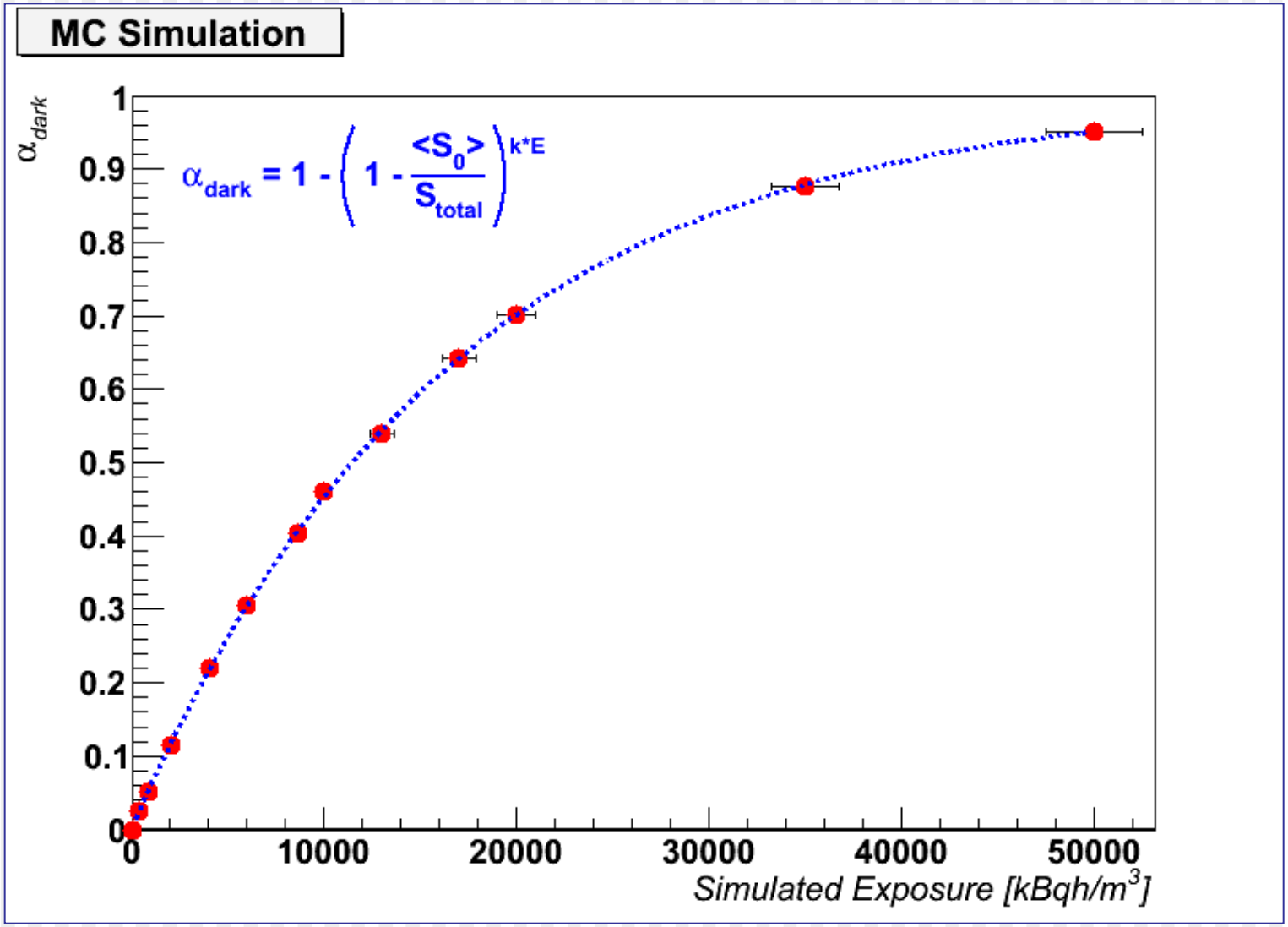
$$\alpha_{dark} = \frac{\text{Superficie nera}}{\text{Superficie totale}}$$

La superficie nera è quella occupata da tracce

Dark area vs Esposizione



Dark area vs Esposizione



Calibrazione con Dark Area

Curva di calibrazione α_{dark} vs esposizione

$$\ln(1-\alpha_{dark}) = A \cdot \ln\left(1-\frac{\langle S_0 \rangle}{S_{tot}}\right) \cdot E = K \cdot E$$

Calibrazione con Dark Area

Curva di calibrazione α_{dark} vs esposizione

$$\ln(1-\alpha_{dark}) = A \cdot \ln\left(1-\frac{\langle S_0 \rangle}{S_{tot}}\right) \cdot E = K \cdot E$$

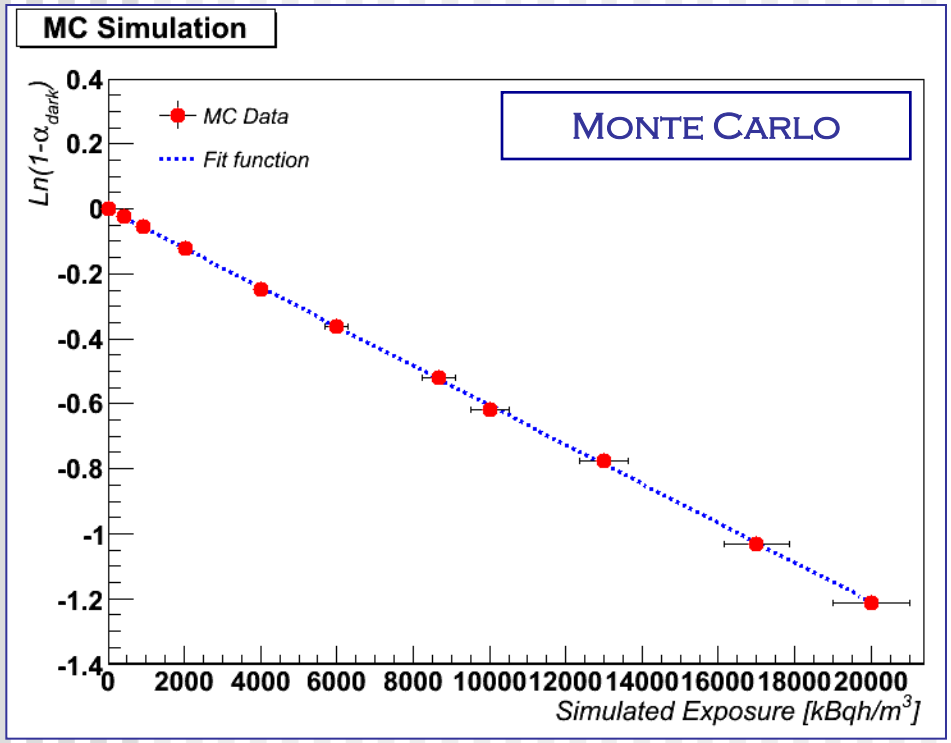
→ Lineare con E

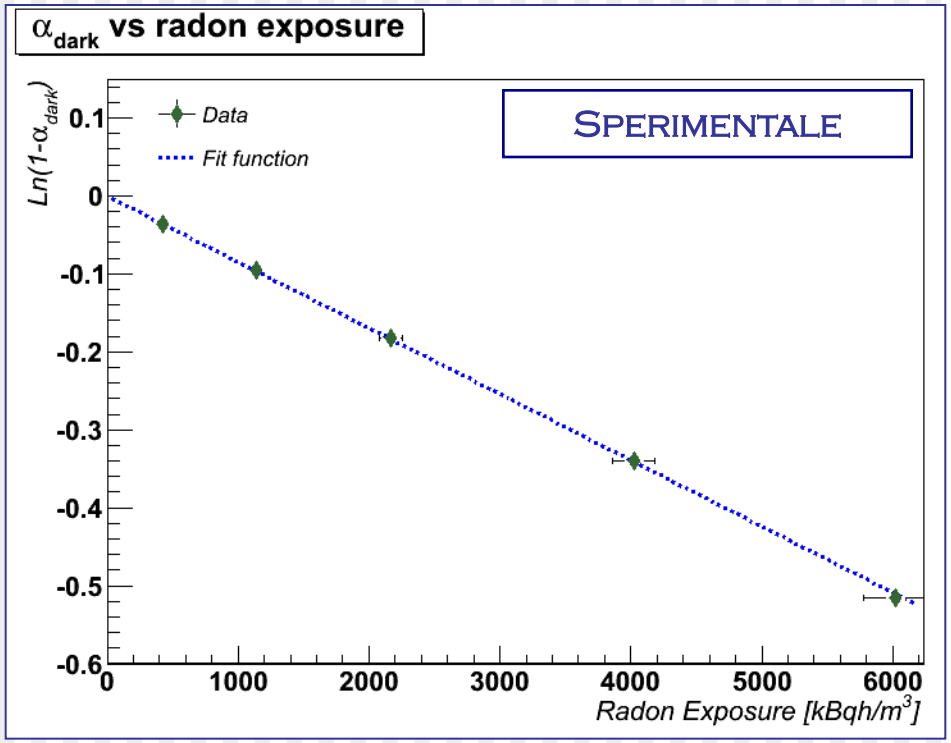
Calibrazione con Dark Area

Curva di calibrazione α_{dark} vs esposizione

$$\ln(1-\alpha_{dark}) = A \cdot \ln\left(1-\frac{\langle S_0 \rangle}{S_{tot}}\right) \cdot E = K \cdot E$$

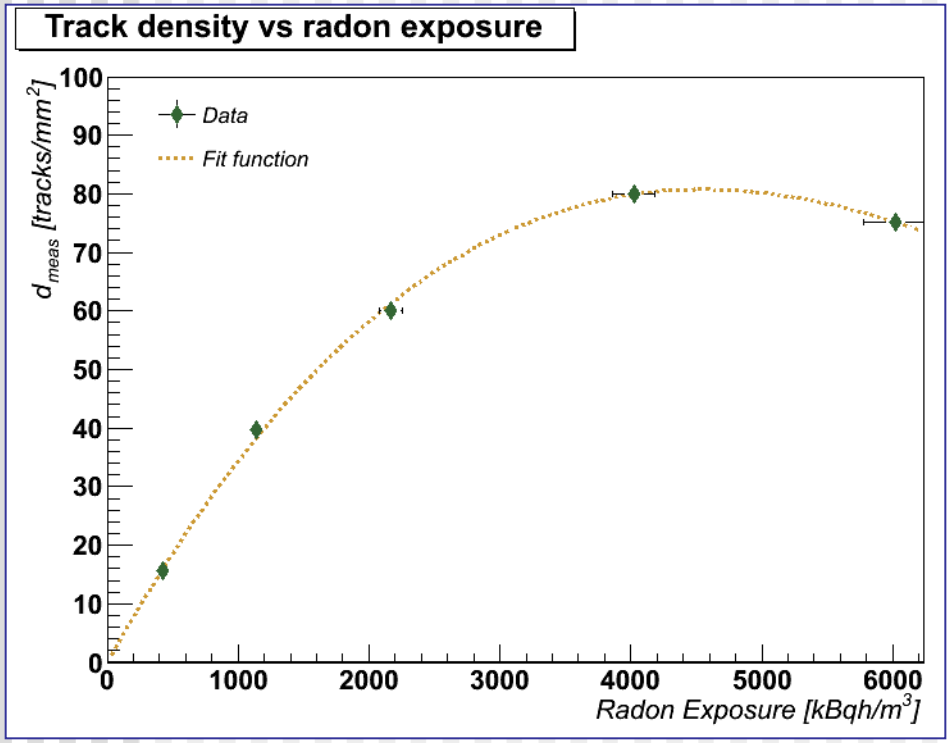
Lineare con E

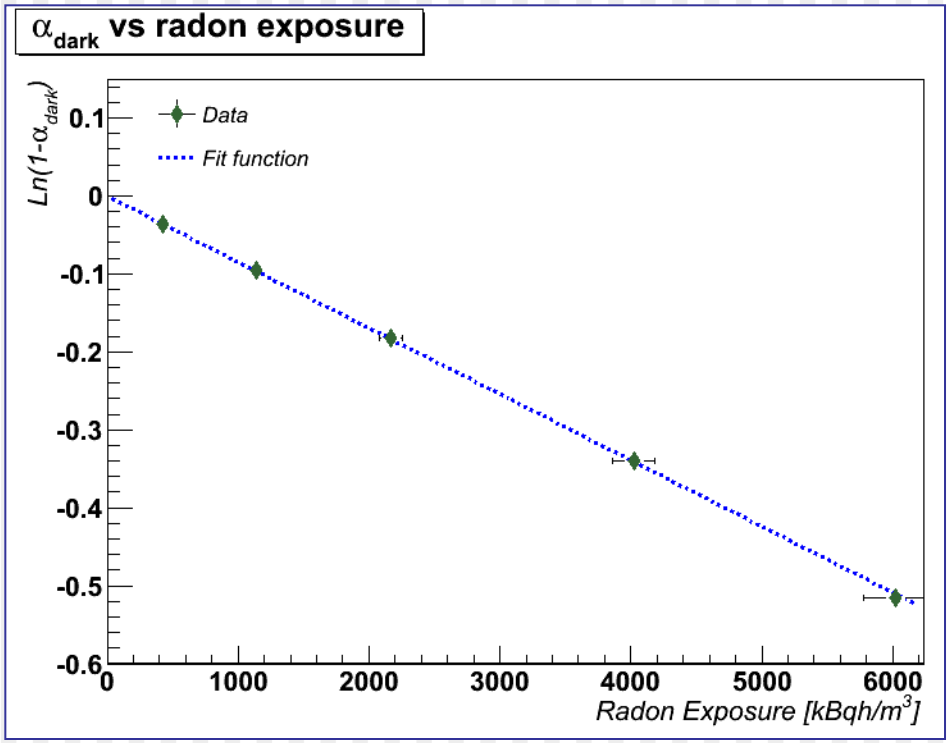




Curve di calibrazione a confronto

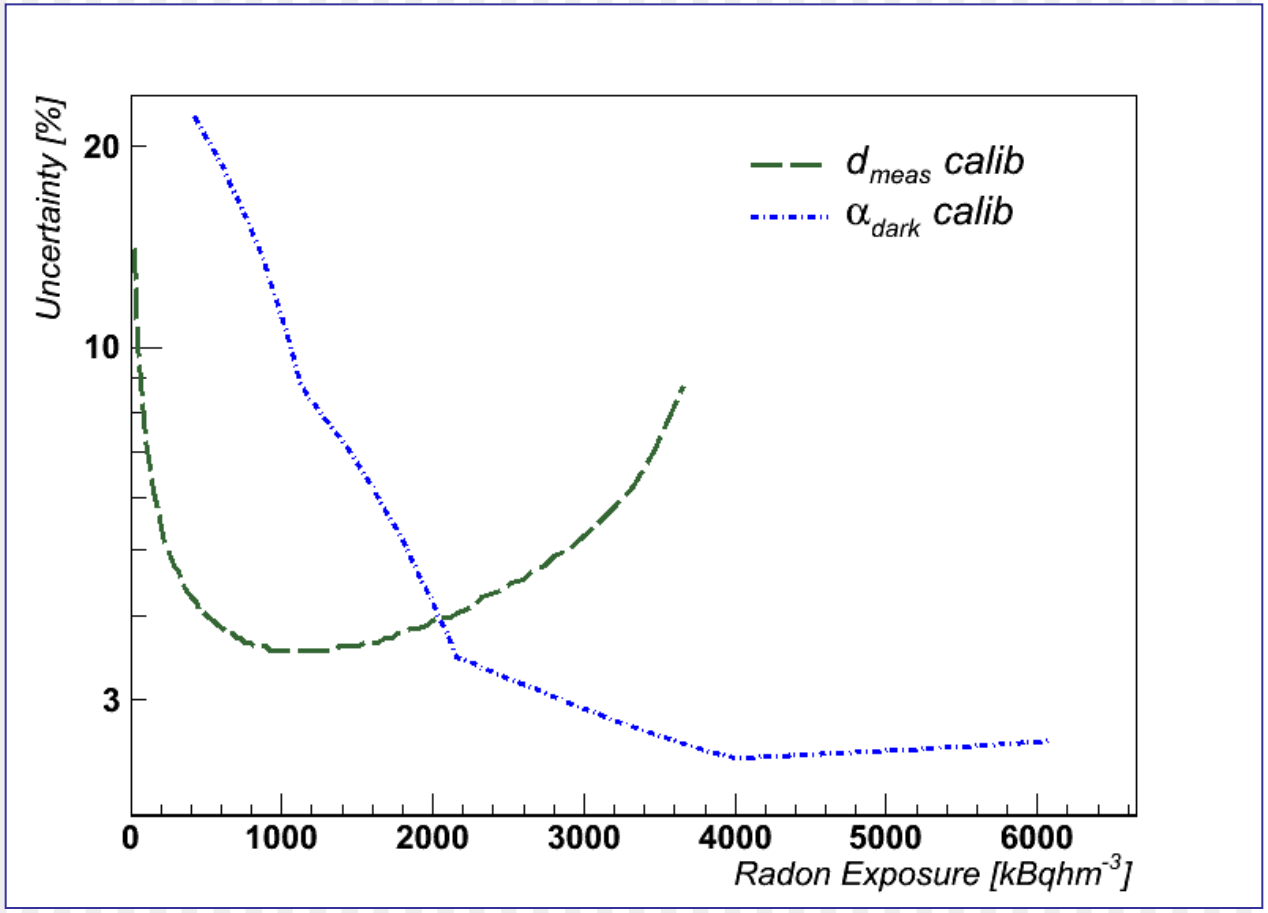
Curva di calibrazione sperimentali ottenute **dalle stesse esposizioni controllate** in camera radon





Incertezze a confronto

L'incertezza relativa fornisce un criterio oggettivo su cui basare la scelta della curva da usare in un caso specifico



Validazione del metodo

Il metodo è stato validato con **tre esposizioni incognite in camera radon**, simulando lo scenario di un interconfronto

Table 3. Results from three additional radon exposures at ENEA-INMRI.

Radon Exposure (kBqh m^{-3})	d_{meas} calibration results (kBqh m^{-3})	α_{dark} calibration results (kBqh m^{-3})
1516 ± 76		
3396 ± 170		
6149 ± 307		

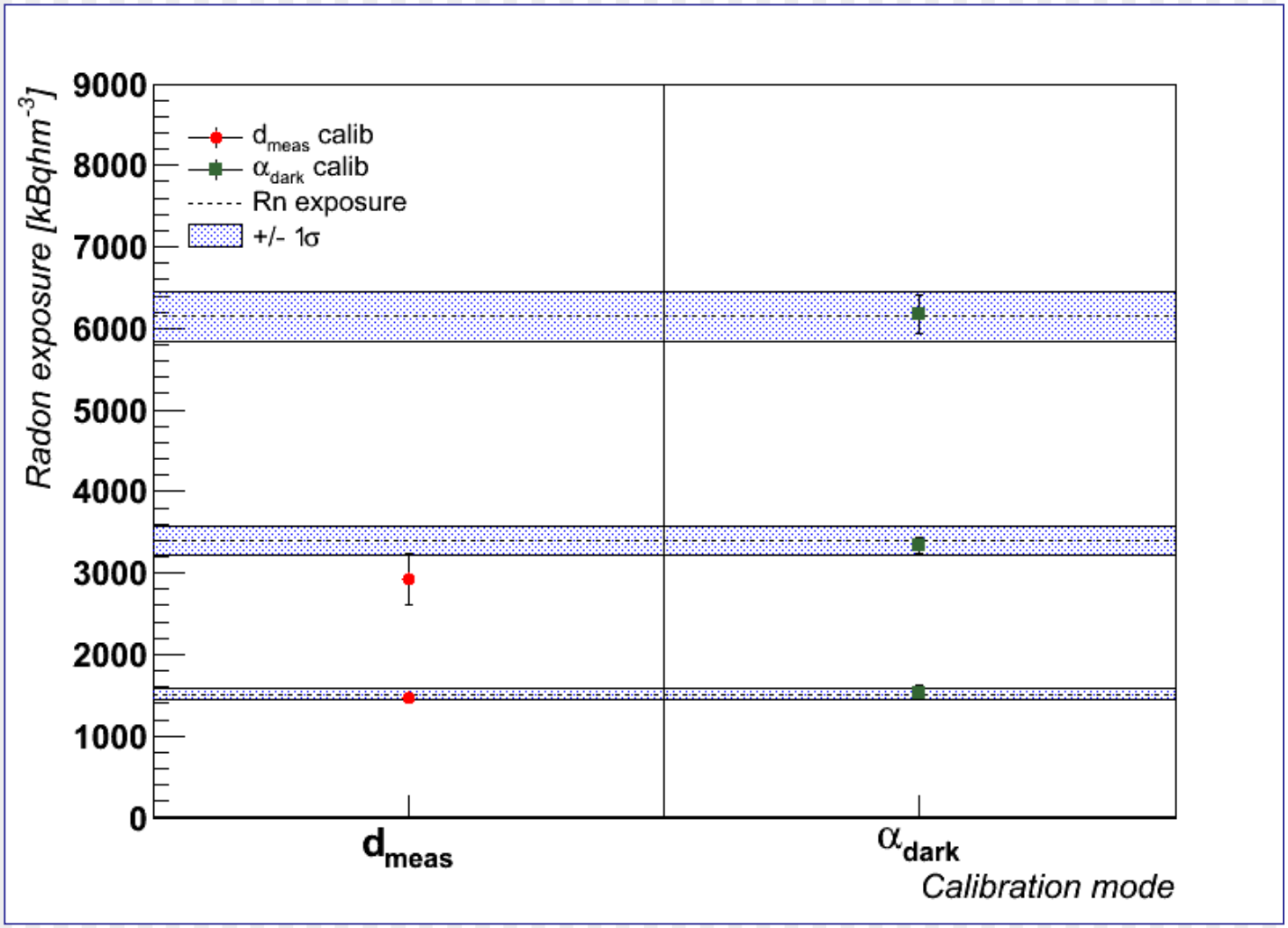
Validazione del metodo

Il metodo è stato validato con **tre esposizioni incognite in camera radon**, simulando lo scenario di un interconfronto

Table 3. Results from three additional radon exposures at ENEA-INMRI.

Radon Exposure (kBqh m^{-3})	d_{meas} calibration results (kBqh m^{-3})	α_{dark} calibration results (kBqh m^{-3})
1516 ± 76	1460 ± 64	1534 ± 96
3396 ± 170	2923 ± 318	3338 ± 107
6149 ± 307	—	6173 ± 230

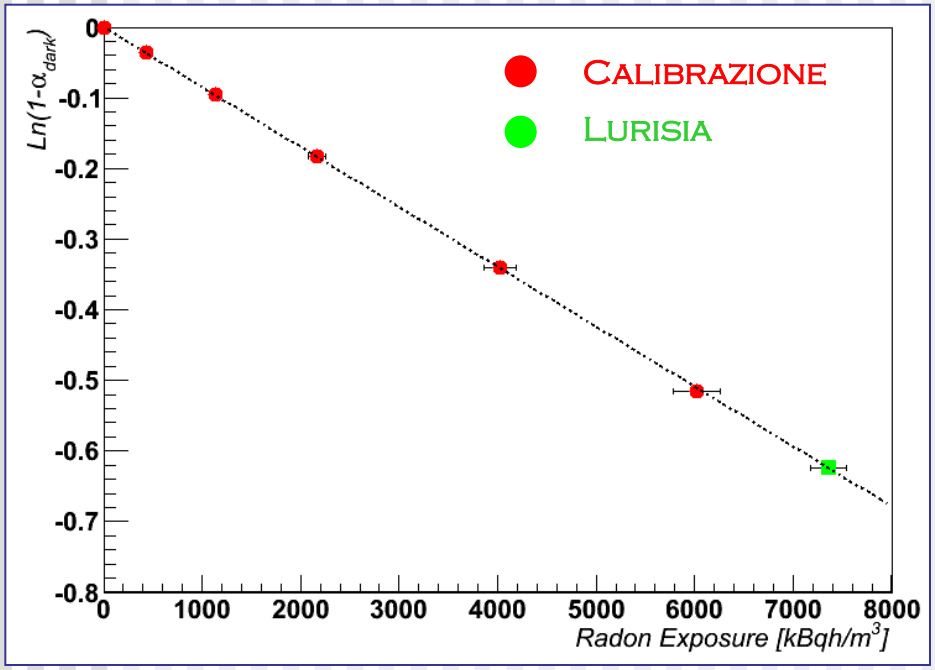
Validazione del metodo

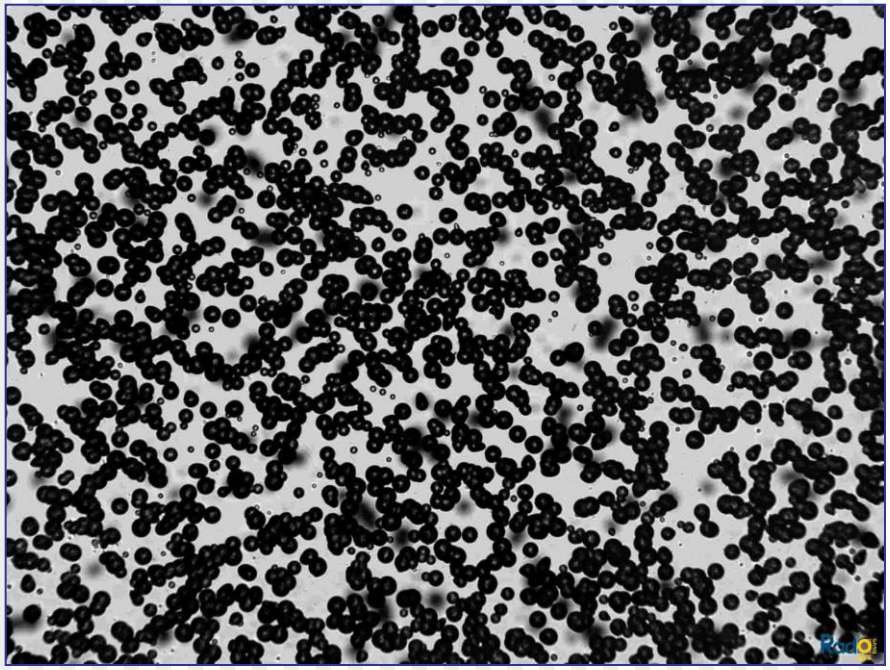


Interconfronto Lurisia

La calibrazione con la dark area è stata testata in occasione **dell'interconfronto presso la grotta di Lurisia**

- ✓ Esposizione bassa: 608 kBqh/m^3
- ✓ **Esposizione alta: 8635 kBqh/m^3**

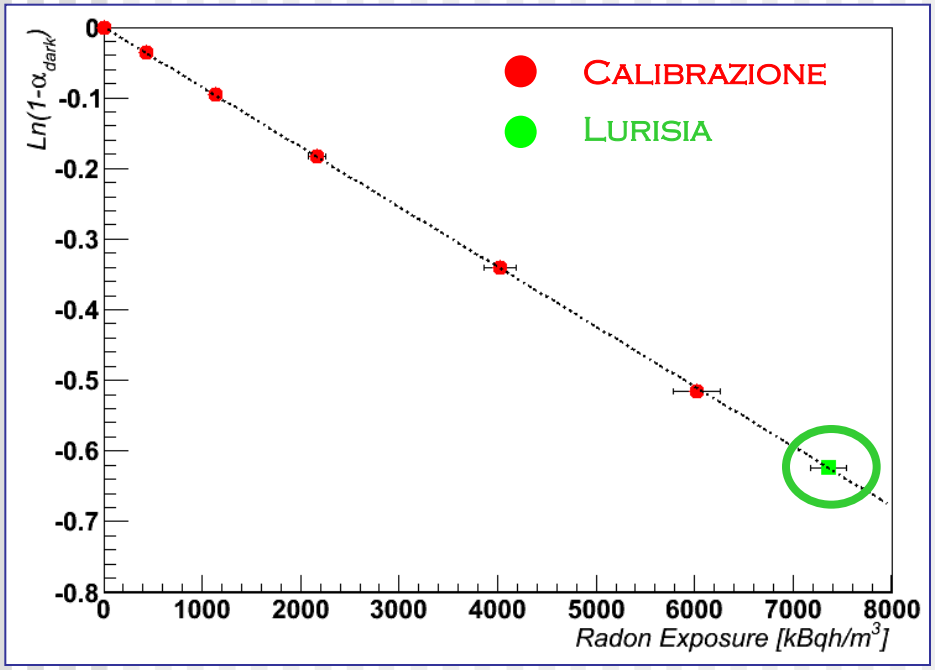


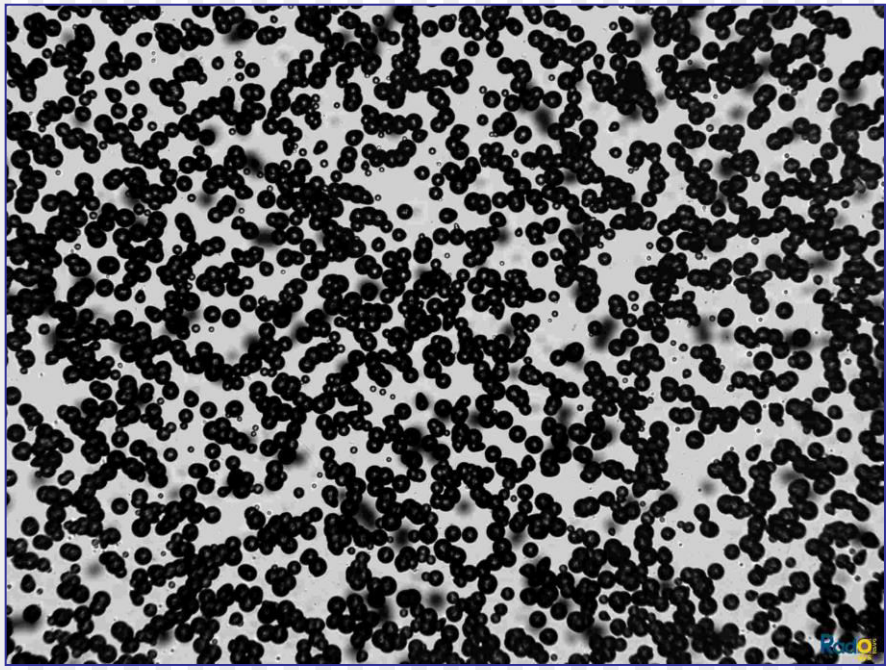


Interconfronto Lurisia

La calibrazione con la dark area è stata testata in occasione dell'interconfronto presso la grotta di Lurisia

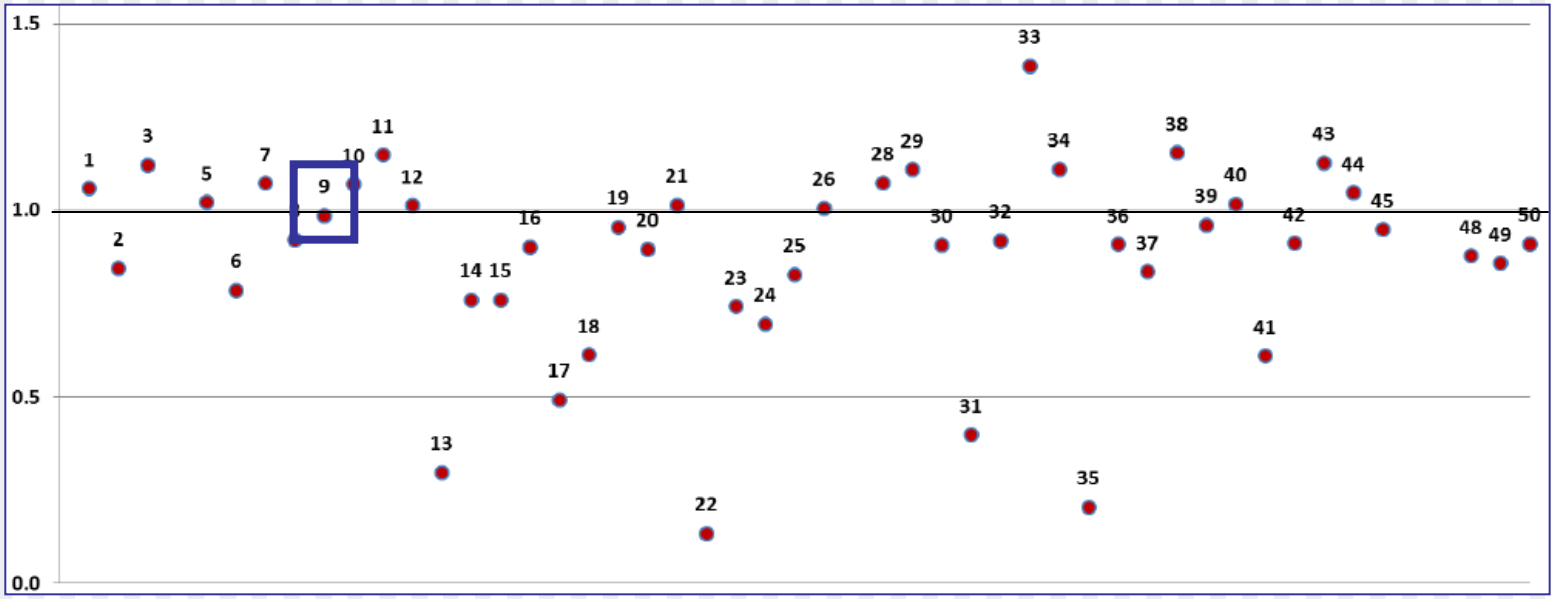
- ✓ Esposizione bassa: 608 kBqh/m^3
- ✓ Esposizione alta: 8635 kBqh/m^3



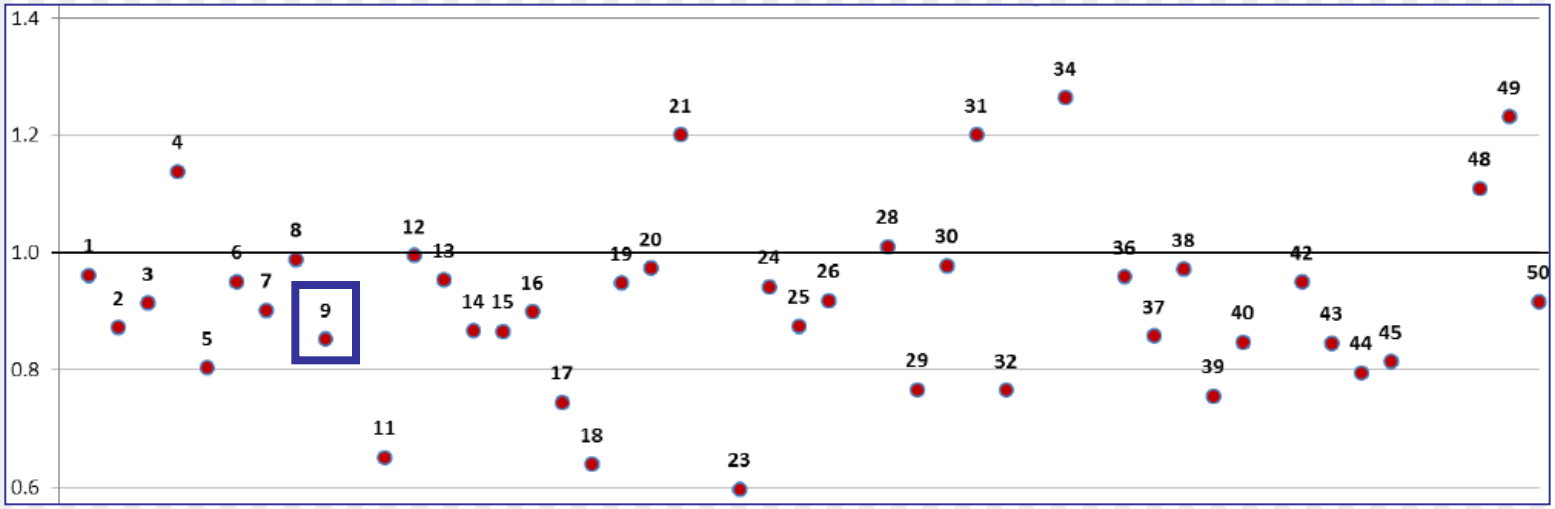


Risultati Lurisia

608 kBqh/m^3
Calibrazione standard



8635 kBqh/m^3
Calibrazione dark area



Conclusioni

- ✓ I rivelatori a tracce nucleari rappresentano uno standard per le misure integrate di Radon
- ✓ Nonostante i numerosi vantaggi, la misura presenta comunque alcune criticità da tenere in conto
- ✓ La sovrapposizione delle tracce riduce la sensibilità del rivelatore ad alte esposizioni
- ✓ La calibrazione mediante la dark area consente di estendere il range di misura oltre il limite di saturazione
- ✓ I metodo è stato validato mediante studi monte carlo ed esposizioni in camera radon
- ✓ L'interconfronto di Lurisia è stato il primo, incoraggiante, banco di prova

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

Backup slides

Ageing / Fading

L'esposizione prolungata all'aria a temperatura ambiente dei CR39 produce una **riduzione della sensibilità**

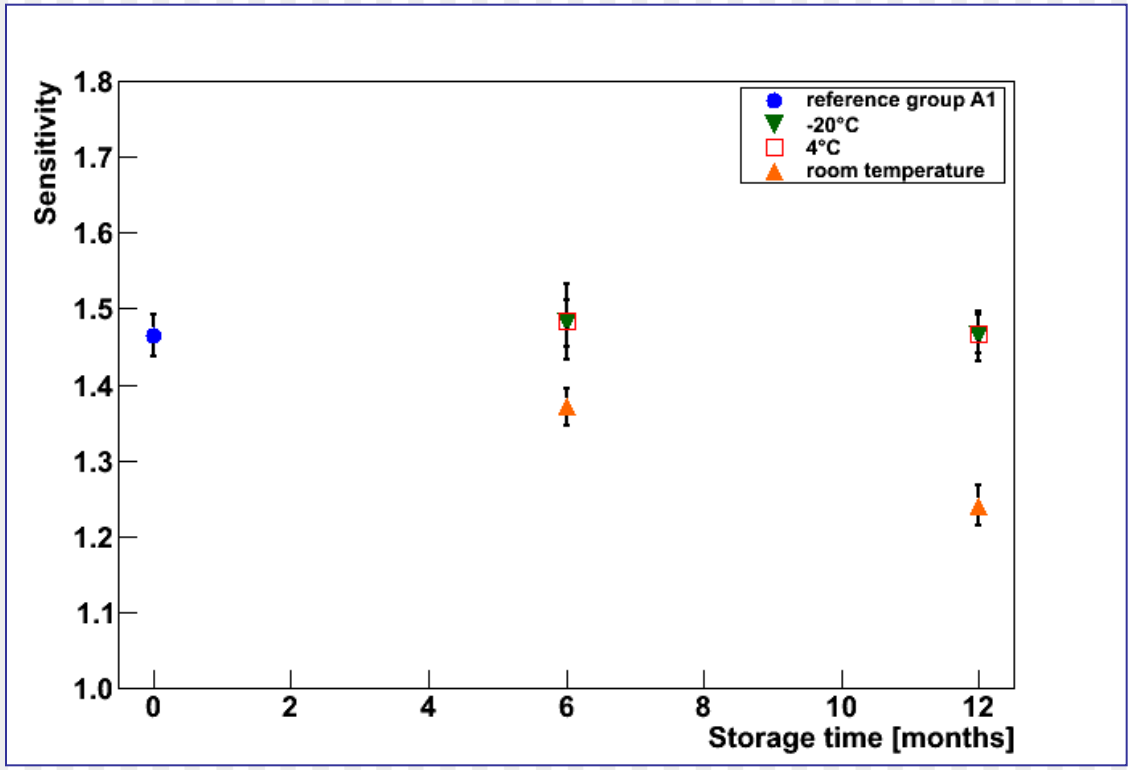
AGEING: riduzione della sensibilità dovuta alla conservazione in aria **prima** dell'esposizione al Radon

FADING: riduzione della sensibilità dovuta alla conservazione in aria **dopo** l'esposizione al Radon

In condizioni operative, i rivelatori rimangono esposti all'aria per tutto il periodo della misura (3 / 6 mesi), subendo un **effetto combinato Ageing + Fading**

Ageing vs Temperatura

Una **bassa temperatura di conservazione** inibisce la riduzione di sensibilità del CR39

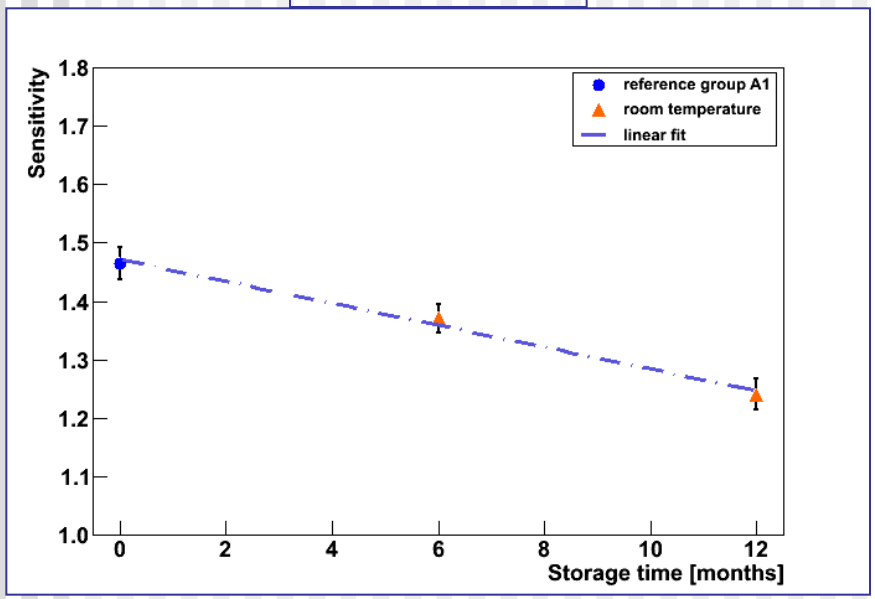


E' buona norma conservare i rivelatori prima e dopo l'esposizione in **ambienti freddi** (frigoriferi, congelatori)

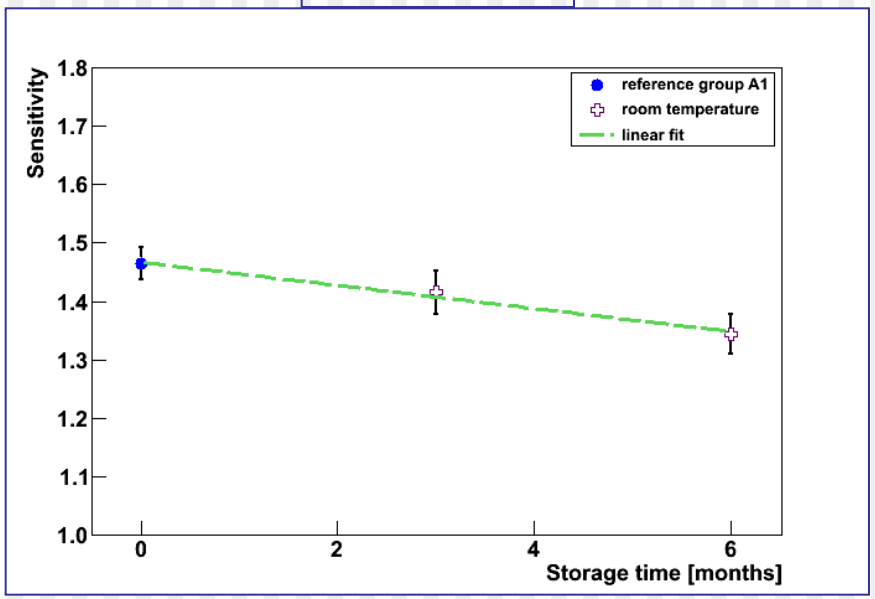
Effetto a temperatura ambiente

A temperatura ambiente, la riduzione della sensibilità aumenta linearmente con il tempo di esposizione

AGEING



FADING

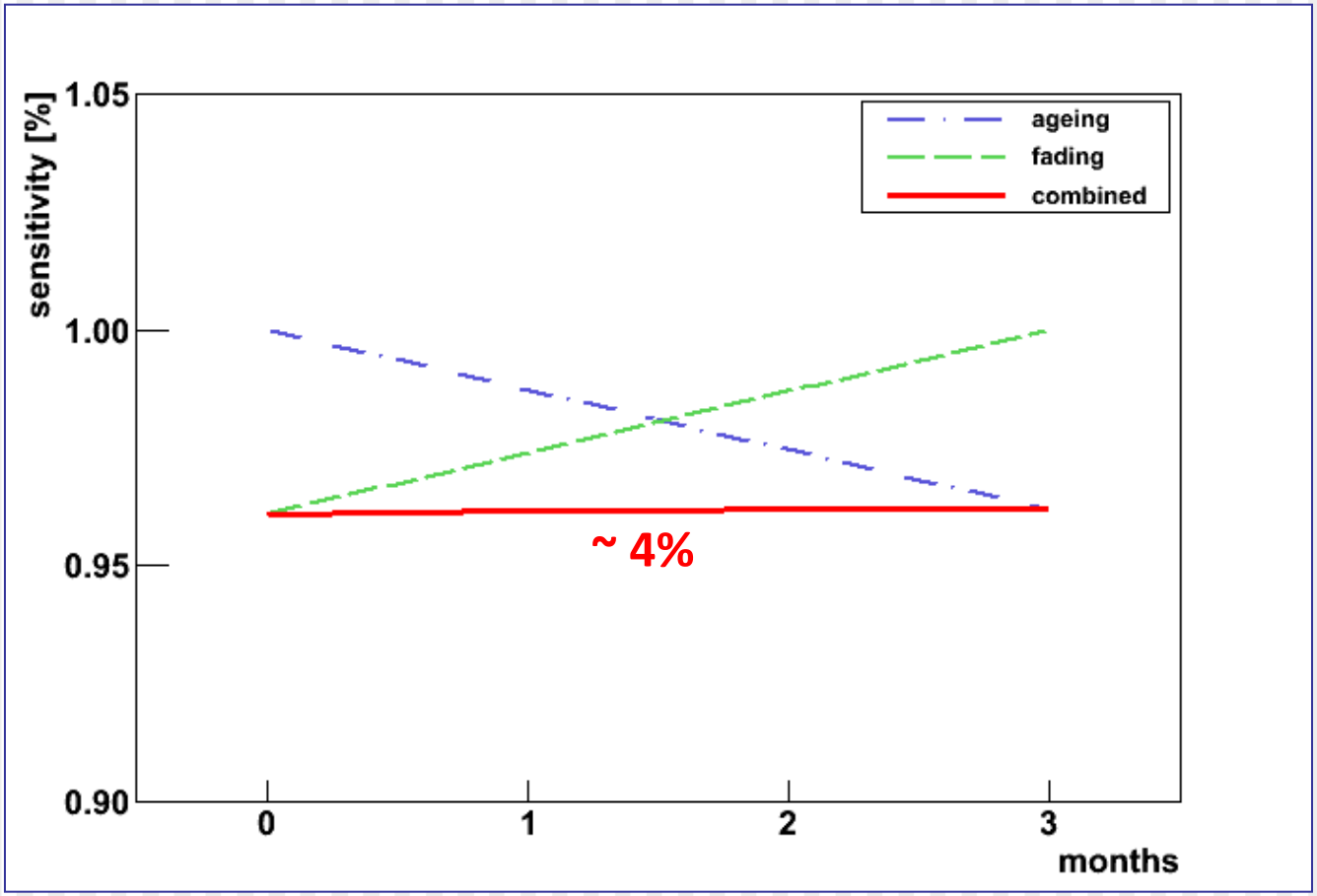


$$S_C(t) = S_0 (1 - 0.0127 \cdot t) [1 - 0.0135 \cdot (T - t)]$$

D.Franci, T.Aureli, F.Cardellini, *Study of ageing and fading in CR-39 detectors for different storage conditions*, RPD *(2015) 167 (4): 425-428*

Riduzione sensibilità a 3 mesi

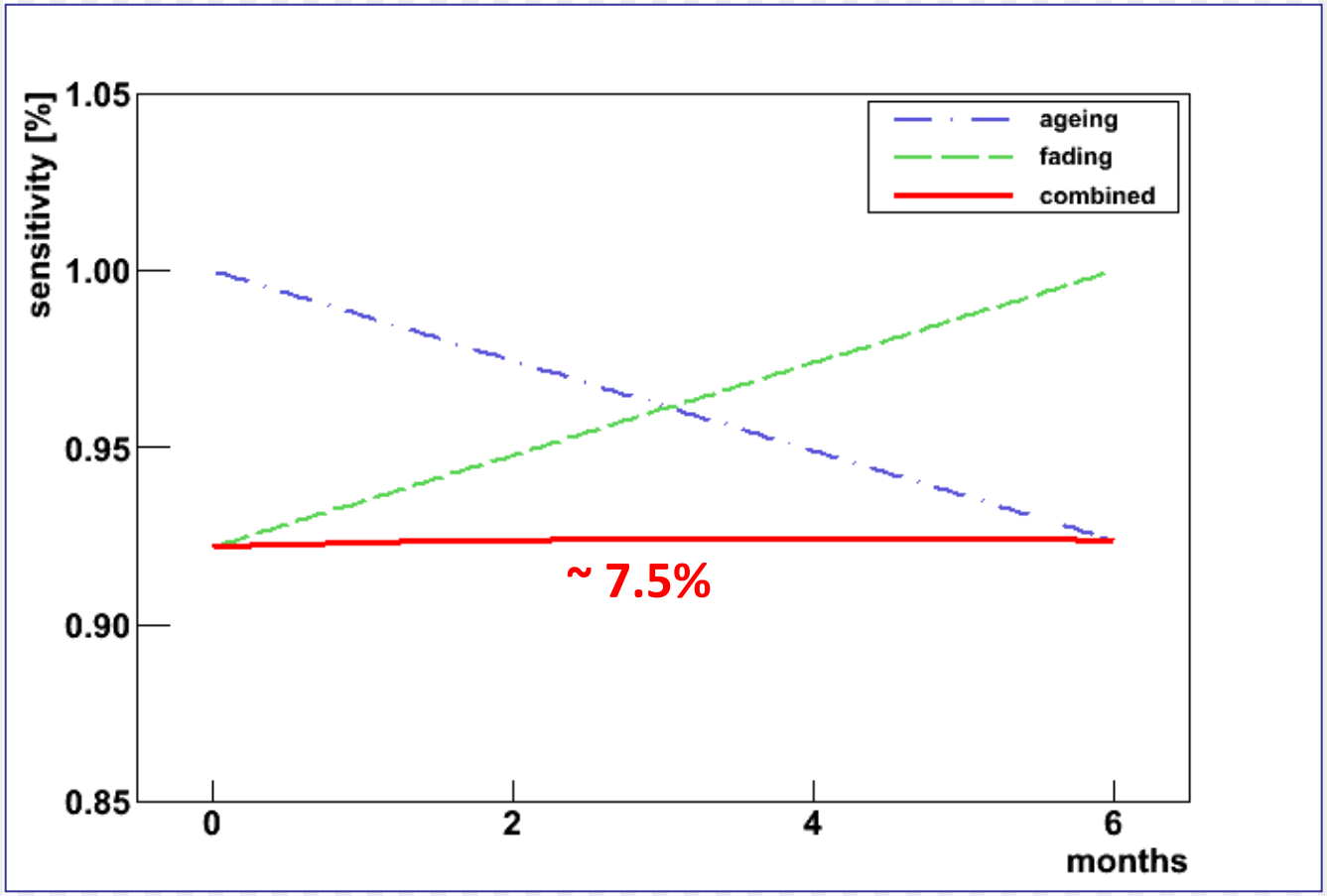
Durante la misura, i CR39 sono esposti all'aria a temperatura ambiente per periodi lunghi [effetto combinato A+F]



D.Franci, T.Aureli, F.Cardellini, *Study of ageing and fading in CR-39 detectors for different storage conditions*, RPD *(2015) 167 (4): 425-428*

Riduzione sensibilità a 6 mesi

Durante la misura, i CR39 sono esposti all'aria a temperatura ambiente per periodi lunghi [effetto combinato A+F]



D.Franci, T.Aureli, F.Cardellini, *Study of ageing and fading in CR-39 detectors for different storage conditions*, RPD *(2015) 167 (4): 425-428*