INNOVAZIONE AL SERVIZIO DELL'AMBIENTE:

IL LABORATORIO DI ARPA LOMBARDIA DI MILANO

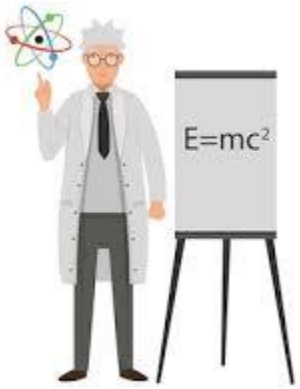
Le attività del Centro Regionale Radioprotezione

Rosella Rusconi
ARPA Lombardia, U.O. Centro Regionale Radioprotezione
r.rusconi@arpalombardia.it

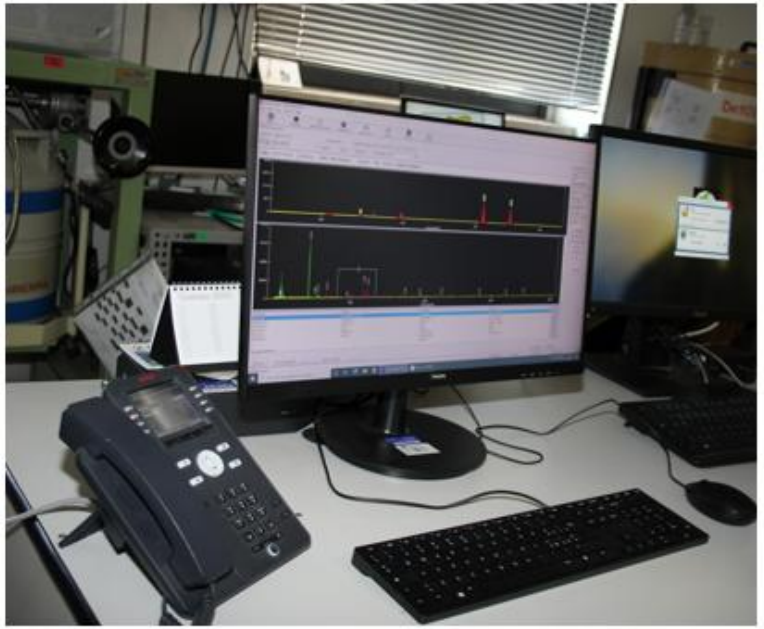
19 settembre 2025

U.O. Centro Regionale Radioprotezione (C.R.R.)

- Struttura multidisciplinare composta da **F**isici, **C**himici ed **I**ngegneri (**G**eologi, **B**iologi) che si occupa di **radioprotezione e radioattività ambientale**
- Funzionalmente inserito all'interno del **D**ipartimento **R**egionale **P**restazioni **A**nalitiche (**D.R.P.A.**)
- **Coordina e supporta** i Dipartimenti ARPA nelle attività di verifica e controllo in cui sono presenti o coinvolte, a qualunque titolo, sostanze radioattive, in attuazione del **D.L.vo 101/2020 s.m.i.**
- Svolge **sopralluoghi e misure in campo**
- Dotato di un **laboratorio** di **analisi radiochimiche e radiometriche** accreditato ISO 17025

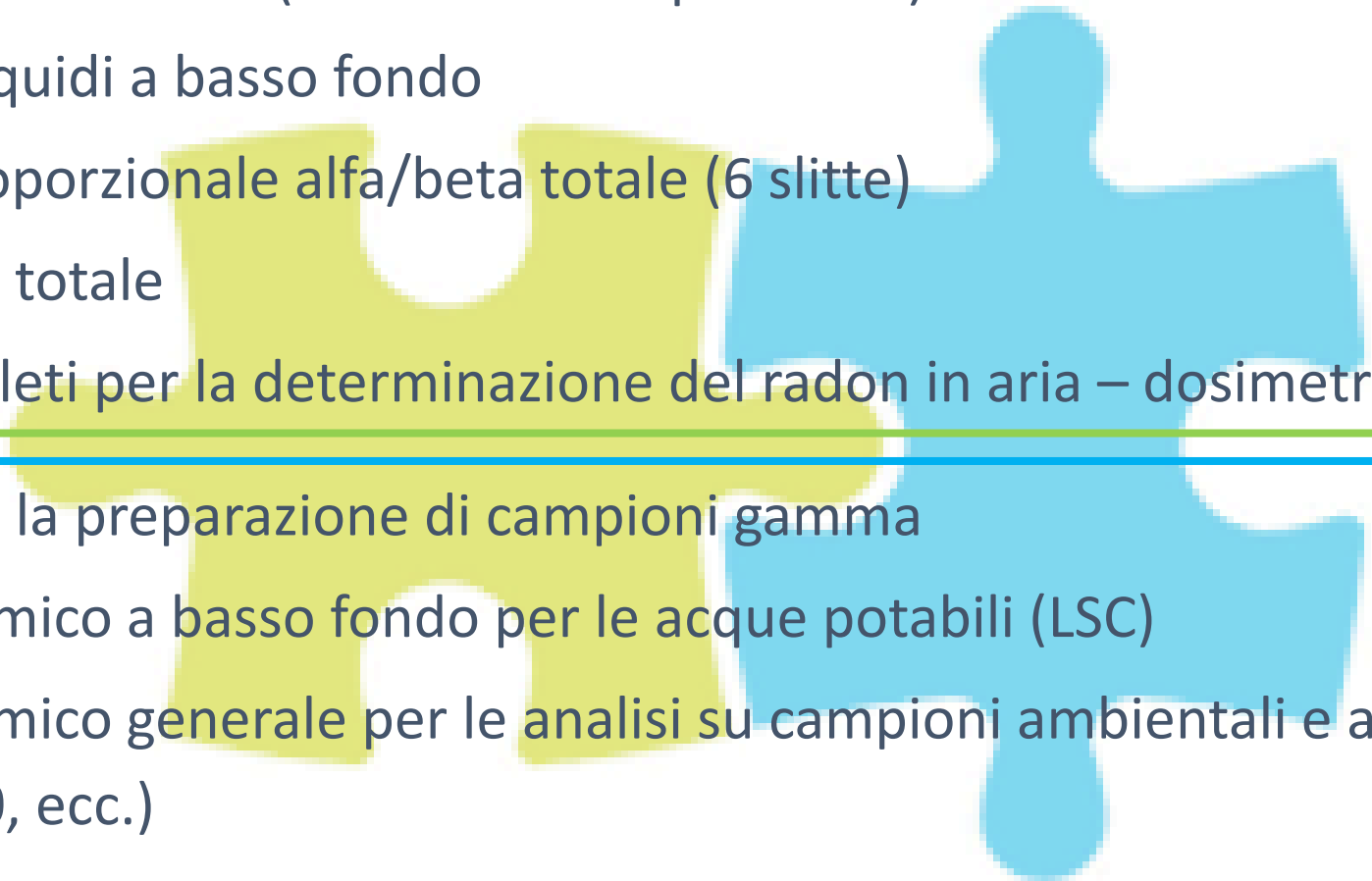


Attività in **L**aboratorio – **R**adiochimica & **R**adiometria



Attività in Laboratorio – Radiochimica & Radiometria

- 6 linee spettrometria gamma e gamma-X (HPGe)
- 3 linee spettrometria alfa (Si a barriera superficiale)
- 2 scintillatori liquidi a basso fondo
- 1 contatore proporzionale alfa/beta totale (6 slitte)
- 2 contatori alfa totale
- 2 sistemi completi per la determinazione del radon in aria – dosimetri a tracce nucleari

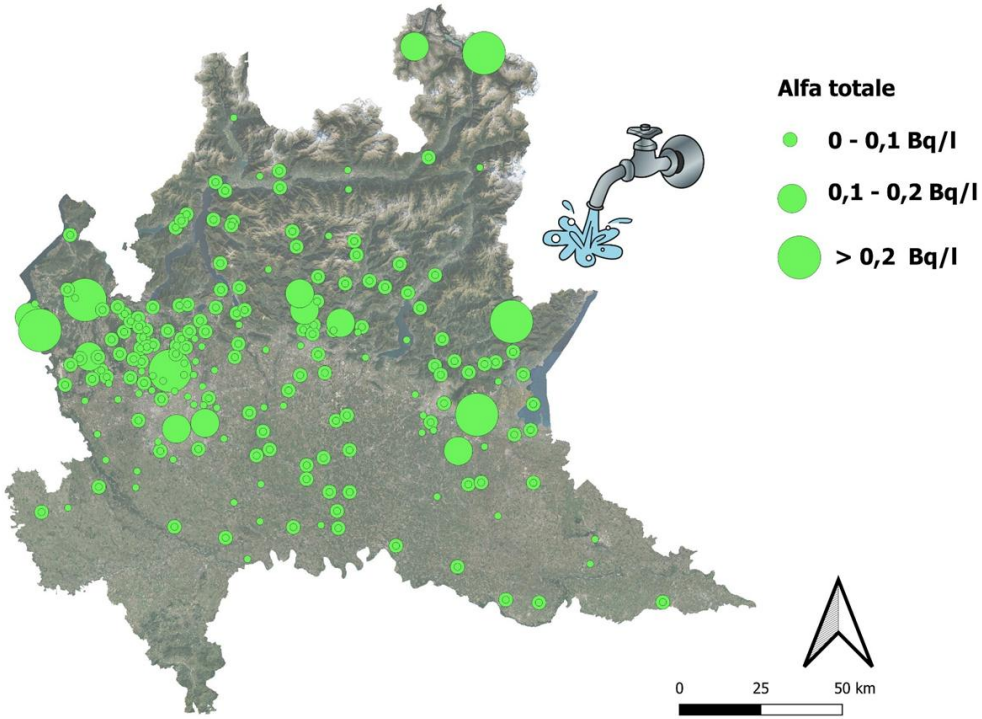


- laboratorio per la preparazione di campioni gamma
- laboratorio chimico a basso fondo per le acque potabili (LSC)
- laboratorio chimico generale per le analisi su campioni ambientali e alimentari (Sr-90, Pu, Po-210, Pb-210, ecc.)
- 2 laboratori di radiochimica per la preparazione di standard radioattivi e la manipolazione e trattamento di campioni contaminati

Attività in **L**aboratorio – **R**adiochimica & **R**adiometria

Principali metodi analitici:

- Radionuclidi gamma emettitori
- Metodi per la determinazione in spettrometria alfa di isotopi dell'uranio, del plutonio, del torio, dell'americio, polonio 210 in matrici solide e liquide
- Metodi per la determinazione di Sr-90, Pb-210 in matrici solide e liquidi (contatore proporzionale)
- Metodi per la misura di campioni acquosi in scintillazione liquida (attività alfa e beta totale, radio 226, radon 222, uranio, trizio)



Attività in **L**aboratorio – **R**adiochimica & **R**adiometria

Laboratorio accreditato ISO 17025:

- UNI 11665: DETERMINAZIONE DI RADIONUCLIDI GAMMA EMETTITORI MEDIANTE SPETTROMETRIA GAMMA AD ALTA RISOLUZIONE

- UNI EN ISO 11704: DETERMINAZIONE DELLA CONCENTRAZIONE DI ATTIVITÁ ALFA E BETA TOTALE NELLE ACQUE NON SALINE MEDIANTE SCINTILLAZIONE LIQUIDA
- ISO 13165-1 : DETERMINAZIONE DELLA CONCENTRAZIONE DI ATTIVITA' DI 226Ra NELLE ACQUE MEDIANTE SCINTILLAZIONE LIQUIDA
- ISO 13169-2018: DETERMINAZIONE DELLA CONCENTRAZIONE DI ATTIVITA' DI URANIO NELLE ACQUE POTABILI MEDIANTE SCINTILLAZIONE LIQUIDA
- ISO 13164-4 : DETERMINAZIONE DELLA CONCENTRAZIONE DI ATTIVITA' DI 222Rn NELLE ACQUE POTABILI MEDIANTE SCINTILLAZIONE LIQUIDA IN DOPPIA FASE

- ISO 11665-4:2021 MISURA DELLA CONCENTRAZIONE DI RADON IN ARIA CON RIVELATORI CR-39
- ISO 11665-4: 2021 - MISURA INTEGRATA DELLA CONCENTRAZIONE MEDIA DI ATTIVITA' DI RADON-222 IN ARIA CON RIVELATORI PASSIVI A ELETTRETI

Radiochimica & Radiometria

Partecipazione a GdL UNI e ISO:

- Membro UNI:
  - UNI/CT 45/SC 02/GL 01 Tecnologie nucleari e Radioprotezione, Protezione dalle radiazioni, Metodi radiometrici di misura su campioni alimentari e ambientali

- Membro ISO:
  - ISO/TC 147/SC 3 Technical Committee Water quality, Subcommittee 03 Radioactivity measurements
  - ISO/TC 85/SC 2 Technical Committee Nuclear energy, nuclear technologies, and radiological protection, Subcommitte 02 Radiological Protection

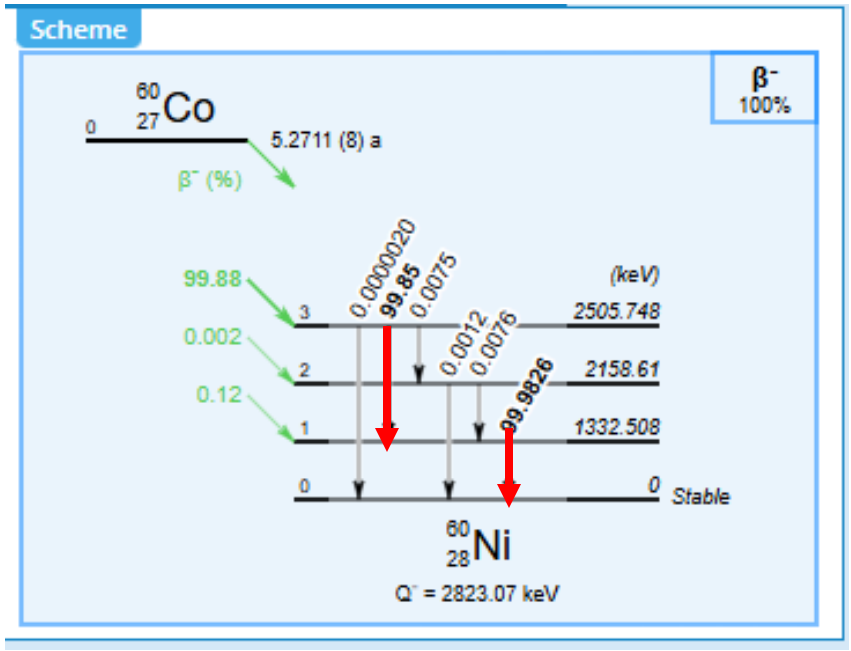
Radiochimica & Radiometria

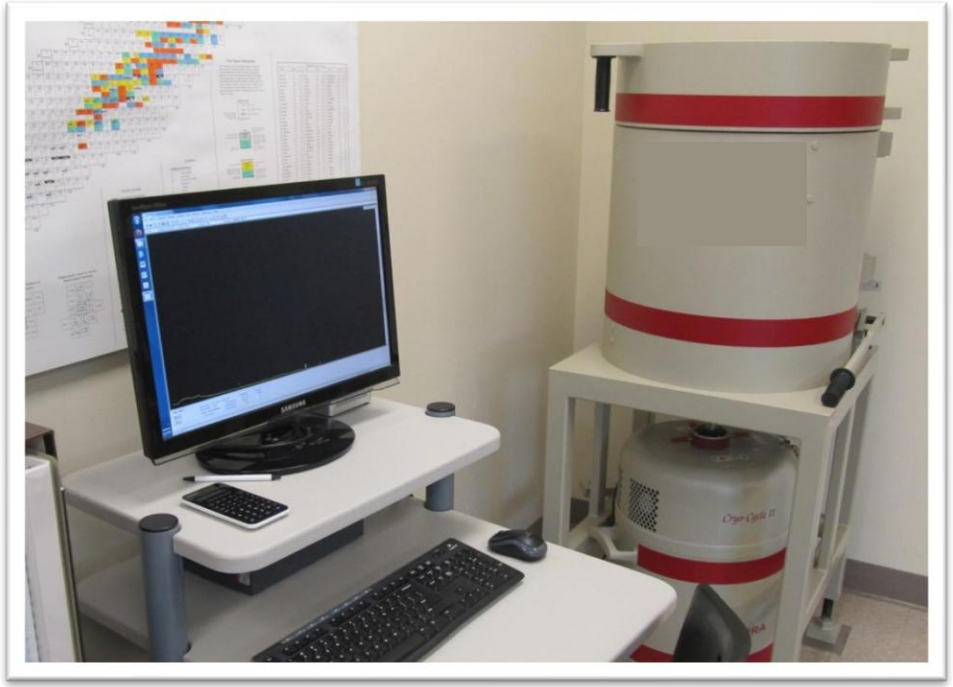
- Metodi sviluppati e recepiti come standard UNI e/o ISO:
  - UNI 11665 - Determinazione di radionuclidi gamma emettitori mediante spettrometria gamma ad alta risoluzione
  - UNI EN ISO 11704 Water quality — Gross alpha and gross beta activity — Test method using liquid scintillation counting (LSC)
  - UNI EN ISO 13164-4 Water quality — Radon-222 — Part 4: Test method using two-phase liquid scintillation counting (LSC)
  - UNI EN ISO 13165-1 Water quality — Radium-226 — Part 1: Test method using liquid scintillation counting (LSC)
  - ISO 13169 Water quality — Uranium — Test method using alpha liquid scintillation counting (LSC)
  - UNI 11912 - Metodo di prova per la misura della concentrazione di attività del polonio 210 tramite spettrometria alfa in campioni ambientali e alimentari, in materiali industriali e da costruzione
  - UNI 11959-1:2024 — Determinazione di piombo 210 mediante conteggio beta - Parte 1: Misura mediante separazione e conteggio di bismuto 210 all'equilibrio

Spettrometria **G**amma ad **A**lta **R**isoluzione

Misure di Attività: Spettrometria Gamma

- Se ci sono emissioni gamma «utili» il metodo di misura privilegiato è la spettrometria gamma ad alta risoluzione

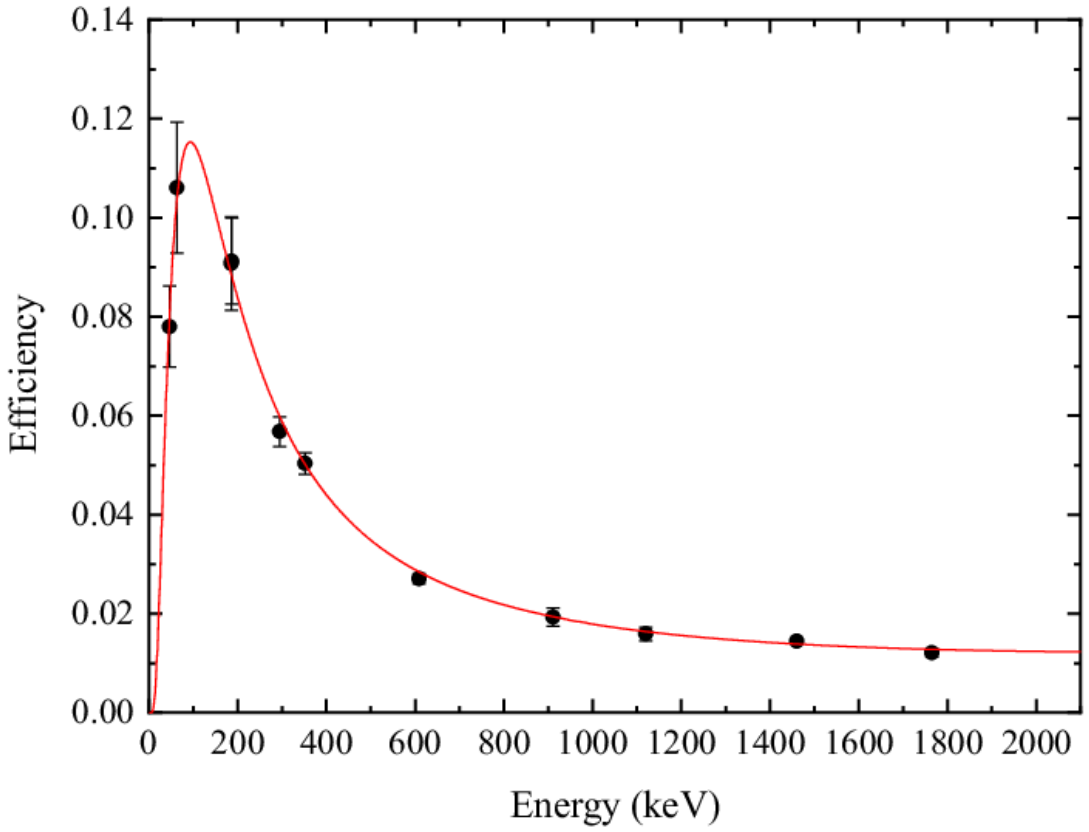




Rivelatori al Ge iperpuro (HPGe)

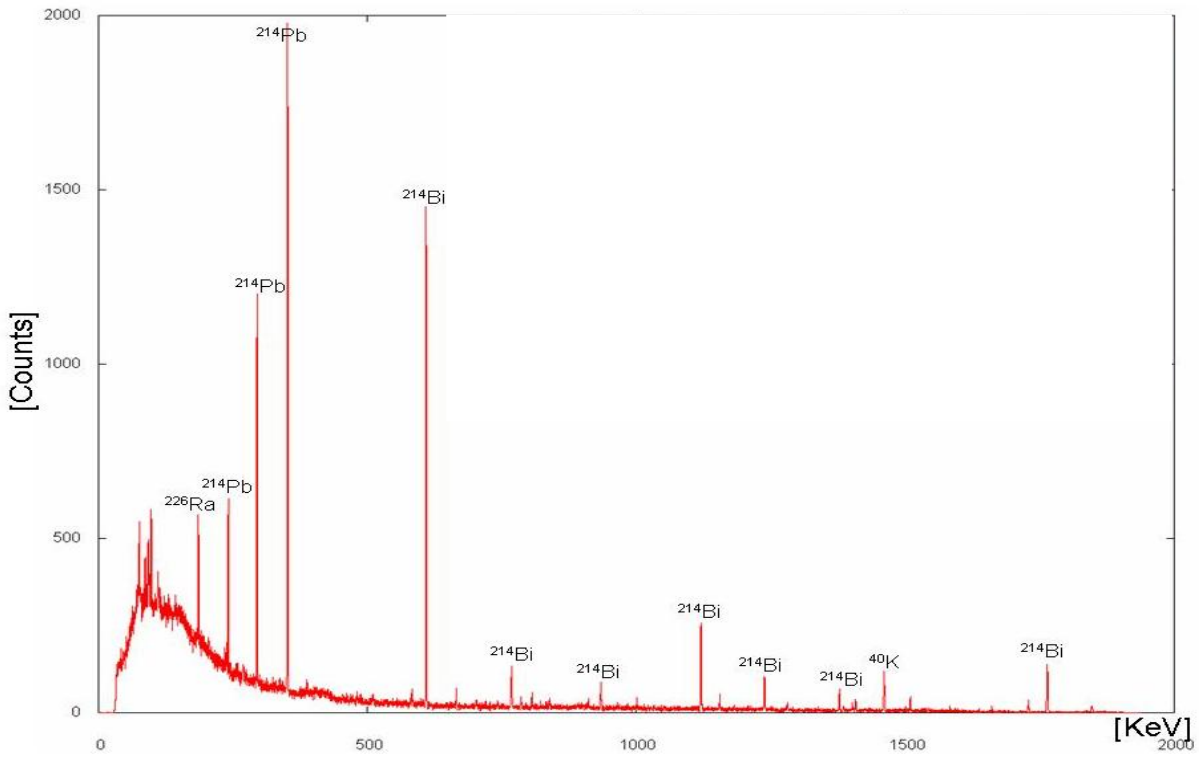
Misure di Attività: Spettrometria Gamma

- Il metodo prevede la costruzione di una curva di taratura in efficienza in funzione dell'energia dei fotoni, realizzata sperimentalmente attraverso l'acquisizione dello spettro gamma di una sorgente radioattiva certificata in matrice acquosa
- Preparazione del campione minima, il requisito principale è che sia omogeneo
- Permette l'analisi di quantità di campione variabili da pochi grammi a circa 2 kg



Metodo nella maggior parte dei casi matrice – indipendente e radionuclide-indipendente, la risposta dipende solo dall'energia dei fotoni

Misure di **A**ttività: **S**pettrometria **G**amma

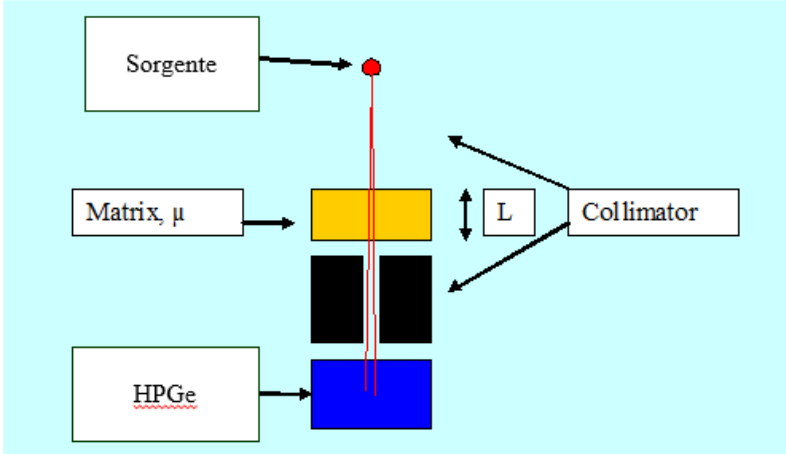


Misure di **A**ttività: **S**pettrometria **G**amma

- Metodo nella maggior parte dei casi matrice indipendente: vero per E > 100 keV
- E < 100 keV: l'analisi di radioisotopi con emissioni gamma a bassa energia (es.: Pb-210) è sensibile alla composizione chimica ed alla densità del campione
- In materiali ad alta densità e Z medio (es.: sabbie zirconifere) si rende necessaria l'applicazione di correzioni per autoassorbimento
- Le correzioni possono essere valutate numericamente nei casi in cui la composizione chimica del campione è nota
- Quando la composizione chimica del campione non è nota (es.: residui NORM) è necessario eseguire una determinazione sperimentale del coefficiente di attenuazione lineare

Determinazione Sperimentale del Coefficiente di Attenuazione

- Metodo sperimentale per la misura del coefficiente di attenuazione (o autoassorbimento) basato sul lavoro di Cutshall e sulle successive declinazioni operative proposte dall'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti
- Il metodo prevede la misura sperimentale del coefficiente di attenuazione attraverso una misura di trasmissione di un fascio di fotoni collimati generato da una sorgente puntiforme multigamma



$$\frac{cps_{Matrice}(E)}{cps_{vuoto}(E)} = e^{-\mu L}$$

$$\mu = \frac{1}{L} \cdot ln \frac{cps_{vuoto}(E)}{cps_{Matrice}(E)} \qquad \text{(eqz. 1)}$$

dove:

μ = coefficiente di attenuazione lineare

L = lunghezza di trasmissione

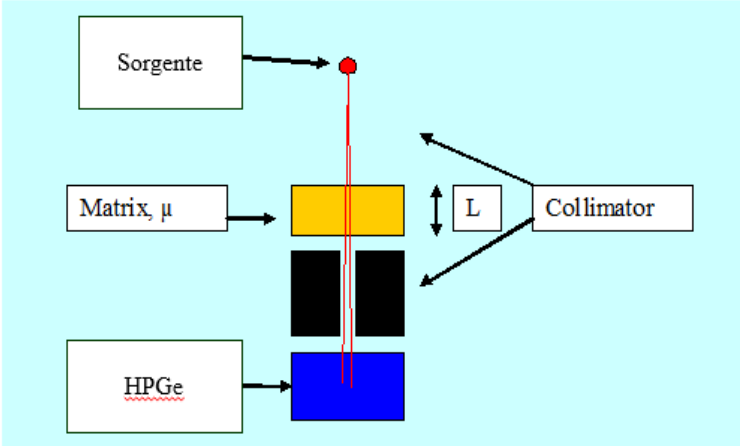
$cps_{Matrice}$ e cps_{vuoto} = rateo di conteggio di fotopicco con e senza matrice interposta

Cutshall et al., *Direct analysis of 210Pb in sediment samples: Self-absorption corrections*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Volume 206, Issues 1–2,1983

De Felice et al., Trasferimento dell'efficienza: presupposto delle correzioni per somma in coincidenza e autoassorbimento, Workshop "Spettrometria gamma ad alta risoluzione", Milano 19 settembre 2018

Determinazione Sperimentale del Coefficiente di Attenuazione

Il setup sperimentale è composto da:



- una o più sorgenti puntiformi, con emissioni gamma nell'intervallo di energie per il quale si deve valutare il coefficiente di autoassorbimento;
- un contenitore (vial), posto tra sorgente e rivelatore;
- un collimatore in piombo

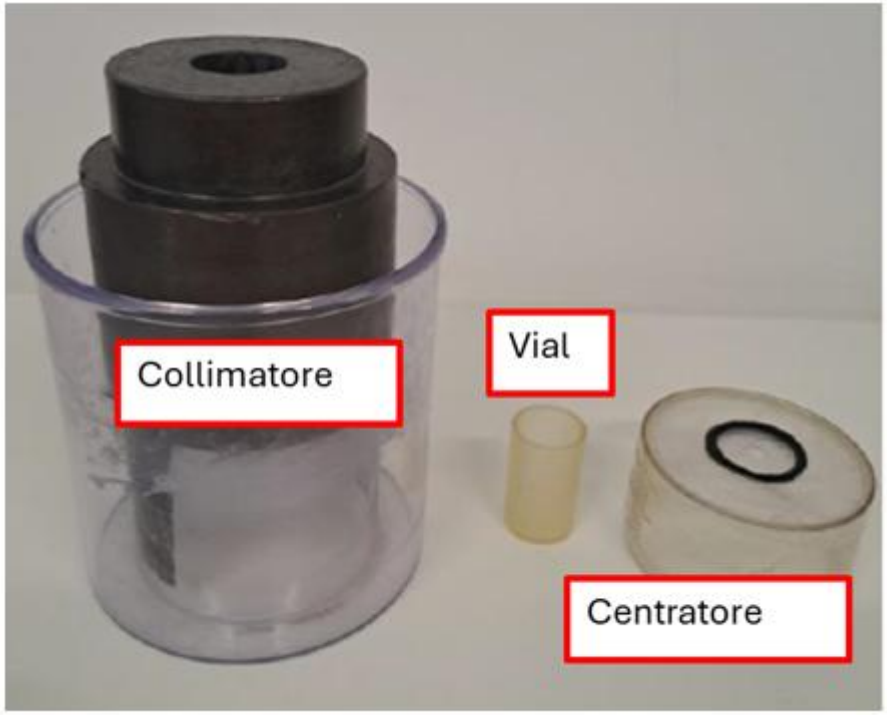
Vengono acquisiti due spettri nella stessa configurazione:

- misura a vuoto: si esegue una misura con sorgente e vial vuota
- misura con matrice: si aggiunge nella vial la matrice di cui si vuole determinare il coefficiente di attenuazione lineare e si esegue una misura con la sorgente

Il coefficiente di attenuazione lineare per una data energia si ottiene a partire dal rapporto tra le aree di fotopicco degli spettri relativi alla misura a vuoto ed alla misura con matrice

$$\mu = \frac{1}{L} \cdot ln \frac{cps_{vuoto}(E)}{cps_{Matrice}(E)}$$

Determinazione **S**perimentale del **C**oefficiente di **A**ttenuazione



Determinazione Sperimentale del Coefficiente di Attenuazione

- Confronto esemplificativo del valore teorico del coefficiente di attenuazione con quello determinato sperimentalmente

Matrice	Massa (g)	Riv.	Sorgente	Energia (keV)	Valore misurato (cm^2/g)	Inc. % (k=1)	Valore rif. X-COM (cm^2/g)	scarto %
Acqua (H2O)	10,35	det01	Am-241 Eu-152	46,54	0,2237	2,8	0,2158	3,7
		det01	Am-241 Eu-152	63,30	0,1853	2,8	0,1884	-1,6
		det01	Am-241 Eu-152	92,59	0,1609	2,8	0,1687	-4,6
		det01	Am-241 Eu-152	121,8 *	0,1544	2,3	0,1569	-1,6
		det01	Am-241 Eu-152	344,9 *	0,1110	2,5	0,1121	-1,0
		det01	Am-241 Eu-152	779,6 *	0,0753	3,4	0,07959	-5,5
		det01	Am-241 Eu-152	964,8 *	0,0678	3,5	0,07193	-5,8
		det01	Am-241 Eu-152	1408,7 *	0,0570	3,4	0,05944	-4,1

Determinazione Sperimentale del Coefficiente di Attenuazione

Descrizione	RN	Energia	Attività misurata con efficienza d=1	Inc. (k=1)	Inc. % (k=1)	FCA

Descrizione	Id. prova	Id. campione Interno	Matrice	Densità	Parametro	Valore misurato (Bq/kg)	Inc. (k=1)	Valore certificato (Bq/kg)	Inc. (k=1)	zeta-score (utest)	scarto %
Bauxite - IAEA	IAEA-TERC-2024	MI2024.0278.03	Bauxite	1,3	Pb-210	152	18	140	6	0,63	8,6
Bauxite - IAEA	IAEA-TERC-2024	MI2024.0278.03	Bauxite	1,3	Th-234	148	18	143	7	0,26	3,5
Sediment - IAEA	IAEA-TERC-2024	MI2024.0277.03	Sedimento	1,0	Pb-210	349	41	306	17	0,97	14
Sediment - IAEA	IAEA-TERC-2024	MI2024.0277.03	Sedimento	1,0	Th-234	274	33	246	11	0,80	11
Fosfogesso IAEA (MRC 434)	IAEA-434	MI2025.0375.01	Fosfogesso	0,74	Pb-210	703	83	721	20	-0,21	-2,4
Fosfogesso IAEA (MRC 434)	IAEA-434	MI2025.0375.01	Fosfogesso	0,74	Th-234	124	16	120,0	5,5	0,24	3,3
Farina di zirconio											
Farina di zirconio											
Farina di zirconio											

Determinazione **S**perimentale del **C**oefficiente di **A**ttenuazione

- Le correzioni per autoassorbimento possono essere importanti (fino ad un fattore 10 e oltre) e non sempre vengono correttamente contabilizzate
- Il problema si pone in particolare per la misura di Pb-210 in campioni di tipo industriale (es.: NORM)
- L'utilizzo di fattori correttivi per autoassorbimento è contemplato dal metodo UNI 11665, che prevede anche la possibilità della determinazione sperimentale del coefficiente di attenuazione
- I software per misure di spettrometria gamma disponibili sul mercato gestiscono solo in parte questo tipo di correzioni, necessario implementare soluzioni complementari
- Rilevante attività di messa a punto e validazione

Attività in **C**ampo – **P**relievi & **M**isure

Spettrometria Gamma in Campo

NaI

- ✓ Dimensioni e peso ridotti
- ✓ Semplicità di utilizzo
- ⊗ Bassa risoluzione

HPGe

- ✓ Alta risoluzione
- ⊗ Gestione (trasporto, raffreddamento)
- ⊗ Meno diffusi

Spettrometria Gamma in Campo

Mirion SPIR-Ace (NaI)

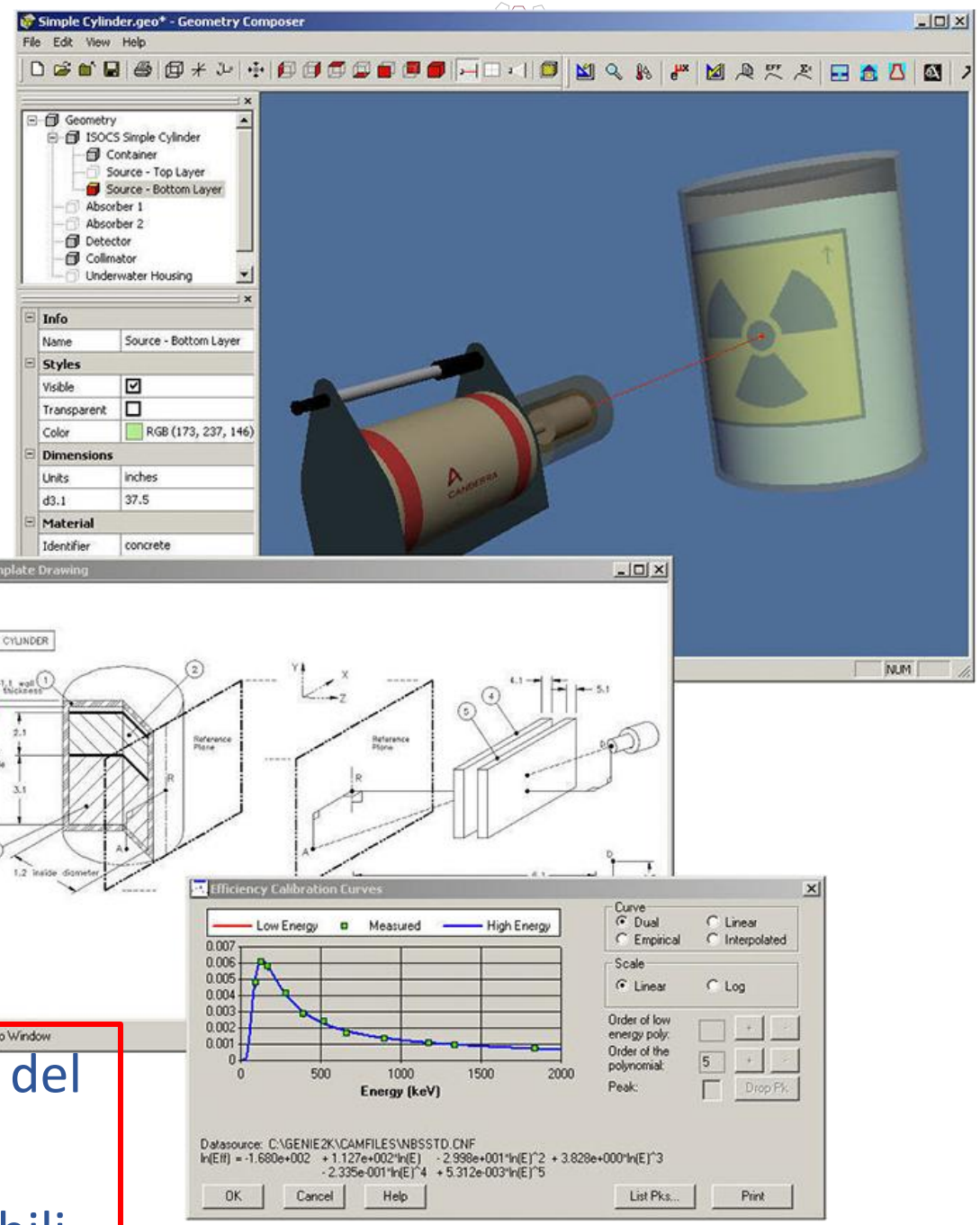
Mirion Falcon (HPGe)

Forniti con:

- Caratterizzazione generica
- Software Monte Carlo per il calcolo dell'efficienza (ISOCS)

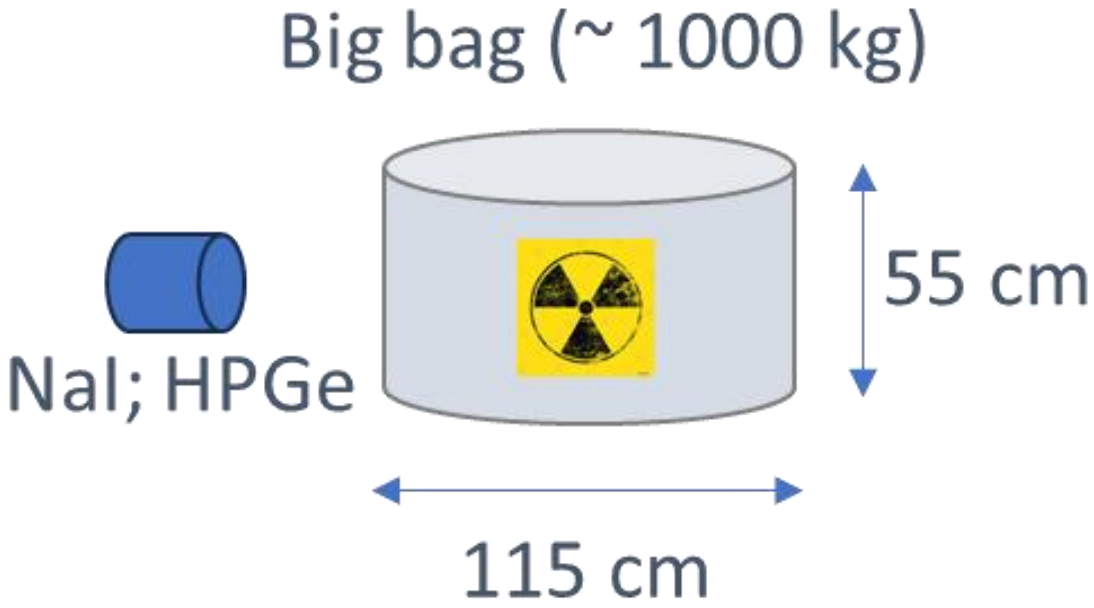
Strumento	Tipologia	Dimensioni cristallo (d x h)	Risoluzione (FWHM @ 662 keV)	Range energia	Dimensioni esterne	Peso
Mirion SPIR-Ace	NaI	1,4"x2"	~ 50 keV	25 keV - 3 MeV	20x15x6 cm	1,4 kg
Mirion FALCON	HPGe planare	60x30 mm (efficienza relativa 18%)	< 2 keV	20 keV - 3 MeV	45x45x18 cm	15,5 kg

- L’utilizzo in campo di spettrometri gamma ad alta o bassa risoluzione per la determinazione quantitativa dell’attività si sta rapidamente diffondendo, in parallelo con la maggiore disponibilità sul mercato di strumenti associati a software di simulazione ed analisi basati su metodi MonteCarlo
- L’implementazione pratica del metodo è apparentemente semplice, occorre però definire:
  - geometria dell’oggetto in misura
  - la sua densità e composizione chimica
  - la disposizione geometrica campione - rivelatore



Fondamentale la corretta impostazione e validazione del metodo e la valutazione realistica dell’incertezza di misura, parametri di ingresso difficilmente quantificabili

Spettrometria **G**amma in **C**ampo



Materiale: terre e rocce da scavo
Densità media: 1,75 g/cm^3
Tempo di misura: 900 s x lato

Spettrometria Gamma in Campo

FUSTO 200L

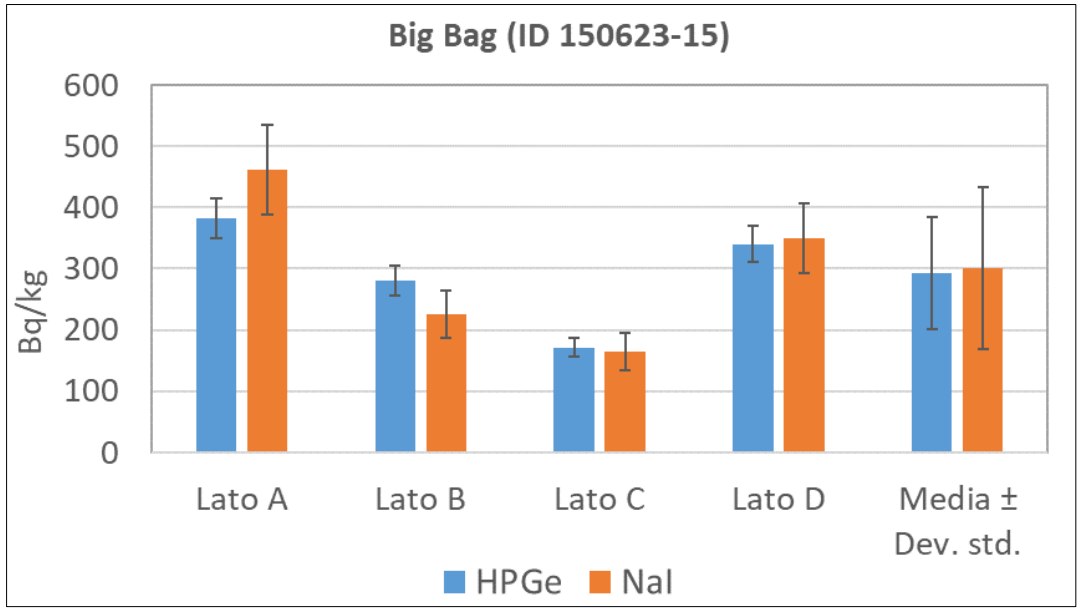
Materiale: polveri abbattimento fumi
Densità media: 1,5 g/cm3

	HPGe (300 sec x 4)		NaI (300 sec x 4)		Lab	
	Cs-137		Cs-137		Cs-137	
ID fusto	Bq/kg	Inc (k=1)	Bq/kg	Inc (k=1)	Bq/kg	Inc (k=1)
B17	9063	554	10013	579	9910	390

Spettrometria Gamma in Campo

Big bag 150623-15 - T = 900 sec

	HPGe		NaI	
	Cs-137 (Bq/kg)	Inc. (Bq/kg) k=1	Cs-137 (Bq/kg)	Inc. (Bq/kg) k=1
Lato A	382	32	461	73
Lato B	281	24	226	39
Lato C	171	15	165	31
Lato D	340	29	350	57
Media ± Dev. std.	**294**	**92**	**301**	**132**



Spettrometria Gamma in Campo

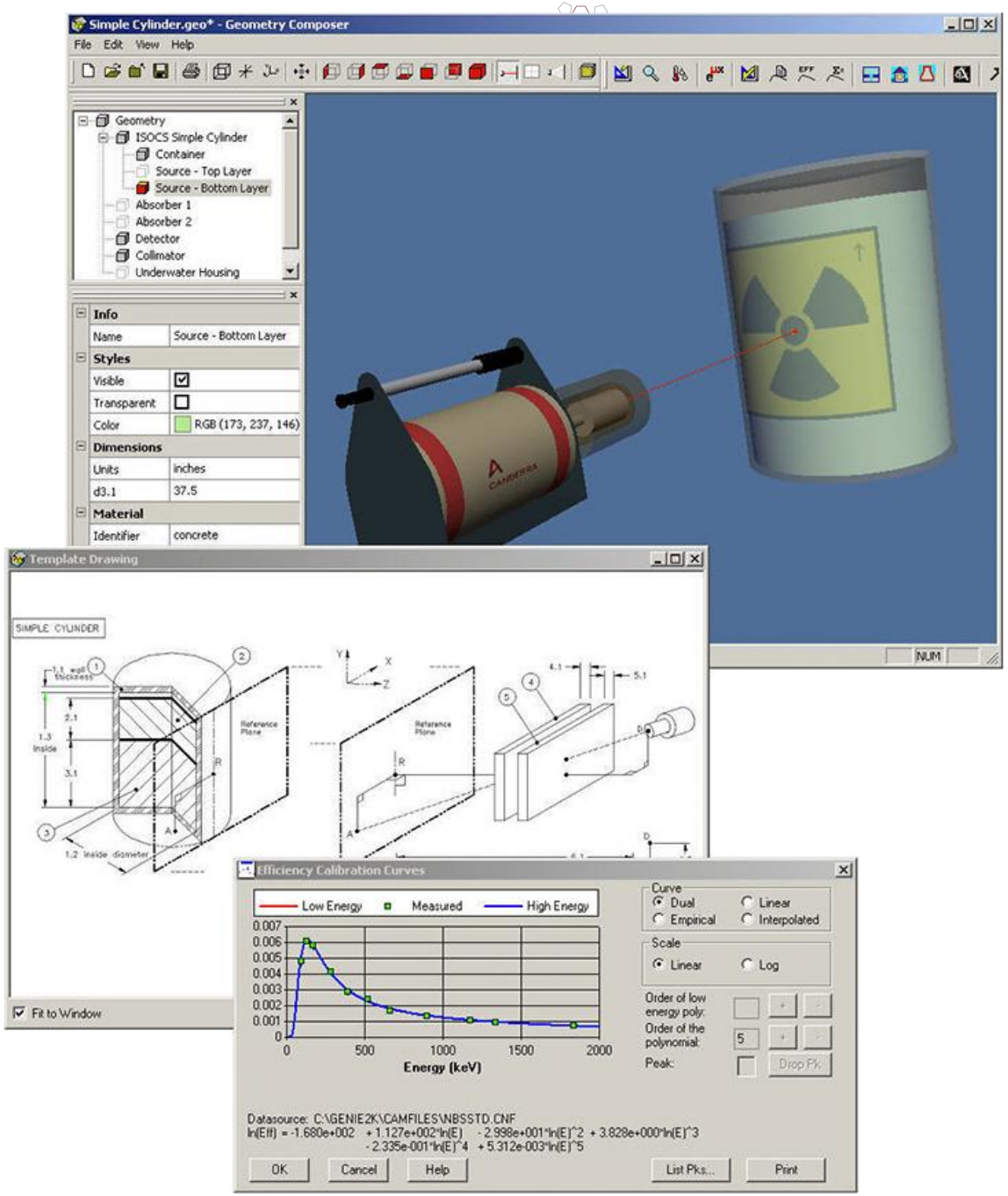
Incertezza di misura

Contributi più significativi:

- massa del campione
- dimensioni e volume del campione
- composizione chimica e densità
- posizione relativa campione - rivelatore
- distribuzione della sorgente nel campione

Incertezza complessiva stimata:

- 60 % per 50-100 keV
- 40% per 100-2000 keV



Spettrometria Gamma in Campo

Valutazione MAR (ISO 11929)

$$MAR_{ISO}\left(\frac{Bq}{kg}\right) = \frac{(4{,}66 \cdot u_{CB} + 2{,}72)}{\varepsilon \cdot T \cdot m \cdot I_\gamma} \cdot \frac{1}{1 - 2{,}72 \cdot \left[\left(\frac{u_\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{u_m}{m}\right)^2\right]}$$

- La MAR viene spesso ancora valutata utilizzando la formula di Currie
- La differenza tra le due formulazioni (Currie e ISO) non è significativa se l'incertezza su ε e m sono trascurabili
- Con incertezza sull'efficienza pari al 40% la MAR_{ISO} è pari circa al doppio della MAR_{Currie}

La corretta valutazione dell'incertezza influisce anche sulla correttezza della stima della sensibilità analitica, che in caso contrario può essere notevolmente sottostimata

- Tutte le misure ed analisi radiometriche, in campo o in laboratorio, devono essere svolte nel rispetto dei requisiti minimi dell'art. 155 del D.L.vo 101/2020 s.m.i.:
  - organizzazione conforme ai requisiti della norma tecnica UNI CEI EN ISO/IEC 17025 ovvero possesso di un accreditamento in conformità alla norma 17025
  - personale tecnico dipendente o con rapporto esclusivo di collaborazione
  - effettuazione di test di interlaboratorio per verificare la correttezza della misura dosimetrica e radiometrica
  - sistemi di misurazione conforme allo stato della tecnica
  - formazione e informazione e l'aggiornamento del personale
- L'accreditamento di alcune tecniche (spettrometria gamma) ormai diffuso, anche se ancora critica la gestione di alcune complessità (es.: correzioni per autoassorbimento)
- L'accreditamento (e l'affidabilità!) delle tecniche in campo (spettrometria gamma) più limitato e critico

Grazie per l'attenzione