Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
LABORATORI NAZIONALI DI LEGNARO

Programma INFN per Docenti

Laboratorio 2: Radioattività ambientale

Alla scoperta della radioattività che ci circonda: un percorso didattico per i ragazzi delle scuole secondarie di secondo grado

Matteo Albéri - Enrico Chiarelli

www.fe.infn.it/radioactivity

Laboratorio di Tecnologie Nucleari Applicate all'Ambiente

Ci presentiamo

Michele Montuschi
INFN, Ferrara Section
Dep. of Physics and Earth Sciences
University of Ferrara

Fabio Mantovani
INFN, Ferrara Section
Dep. of Physics and Earth Sciences
University of Ferrara

Virginia Strati
INFN, Ferrara Section
Dep. of Physics and Earth Sciences
University of Ferrara

Carlo Bottardi
INFN, Ferrara Section
Dep. of Physics and Earth Sciences
University of Ferrara

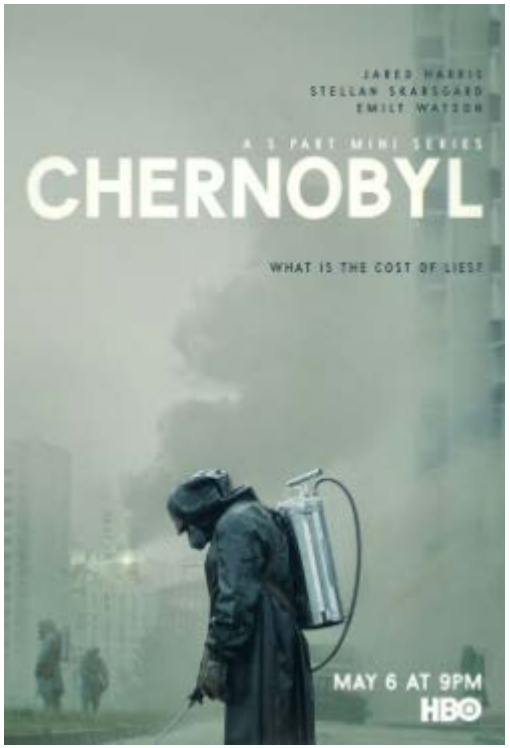
Kassandra Giulia Cristina Raptis
INFN, Ferrara Section
Dep. of Physics and Earth Sciences
University of Ferrara

Enrico Chiarelli
INFN, Ferrara Section
Dep. of Physics and Earth Sciences
University of Ferrara

Matteo Albéri
INFN, Legnaro National Laboratories
Dep. of Physics and Earth Sciences
University of Ferrara

Andrea Serafini
INFN, Ferrara Section
Dep. of Physics and Earth Sciences
University of Ferrara

Come viene percepito questo tema?



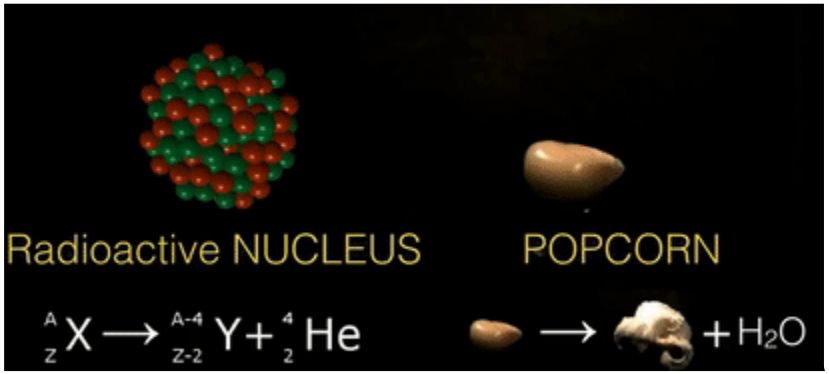
Il decadimento radioattivo…

La maggior parte dei nuclei che costituiscono la materia è stabile anche quando subiscono reazioni chimiche

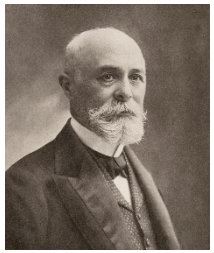
Alcuni nuclei sono invece instabili (radionuclidi) ovvero si trasformano spontaneamente e raggiungono la stabilità emettendo radiazioni.
Questo processo è chiamato decadimento radioattivo

Il decadimento nucleare è un **evento random**… come lo scoppio dei popcorn!

Il decadimento radioattivo…



La radioattività è un fenomeno fisico naturale che si verifica quando il nucleo di un atomo instabile raggiunge un nuovo stato di equilibrio emettendo radiazioni



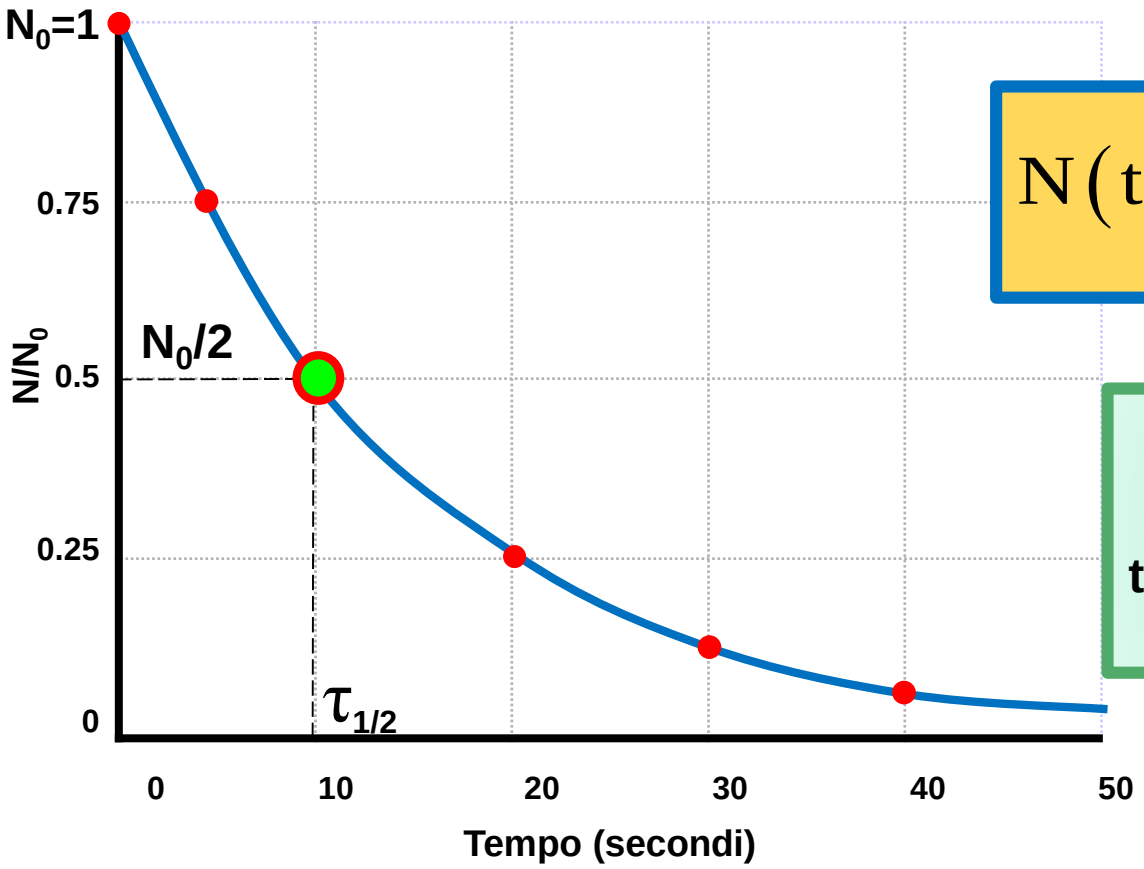
ATTIVITÀ
Unità di misura: 1 Bq = 1 decadimento al secondo

- il decadimento radioattivo è un processo statistico
- è impossibile prevedere quando un dato nucleo decadrà ma…

…ma è possibile prevedere quanti nuclei saranno decaduti in media dopo un certo intervallo di tempo

La legge esponenziale del decadimento radioattivo

Descrive matematicamente come diminuisce, col passare del tempo, il numero di nuclei radioattivi di una data specie man mano che essi si trasformano. **N_0 è il numero iniziale di nuclei presenti al tempo t=0, N il numero di quelli sopravvissuti**



$$N(t) = N_0 \exp\left(-\frac{0.693 \times t}{\tau_{1/2}}\right)$$

$\tau_{1/2}$ il tempo di dimezzamento (emivita) [s]
tempo occorrente perché la metà dei nuclei iniziali decadano

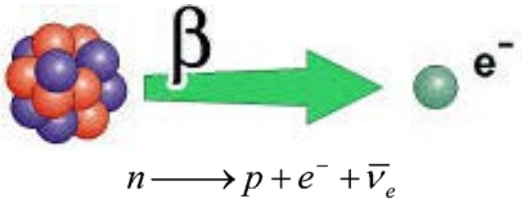
I decadimenti radioattivi

Decadimento Alfa

tipico dei nuclidi che hanno un numero elevato sia di protoni che di neutroni, ossia con Z > 83 e A > 220

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He $$

Decadimento Beta



caratteristico dei nuclei in cui vi è un eccesso di neutroni rispetto ai protoni; tali nuclei devono aumentare il numero di protoni per stabilizzarsi, essi decadono emettendo, elettroni veloci (particelle β)

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + e^- + \bar{\nu}_e $$

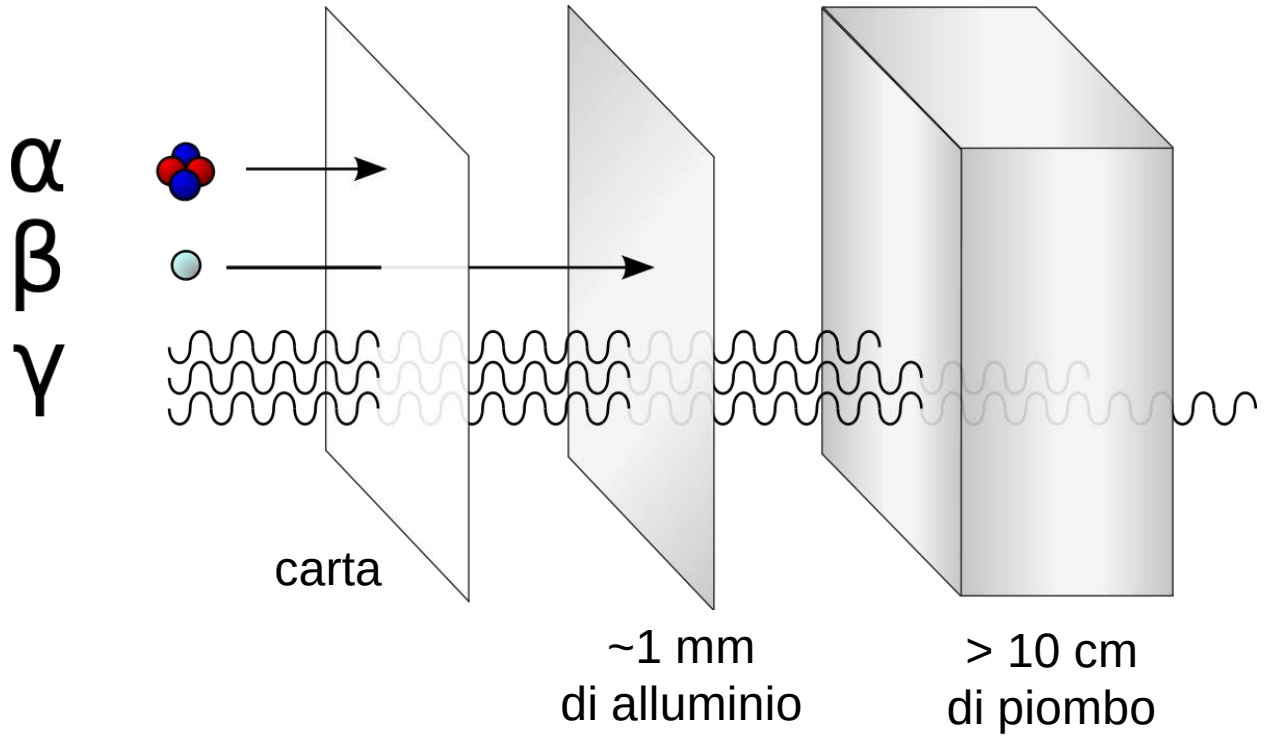
Decadimento Gamma

Emissione di fotoni dopo un decadimento α o β. Nell'emissione γ restano invariati sia il numero atomico sia il numero di massa.

$$ {}^{A}_{Z}X^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma $$

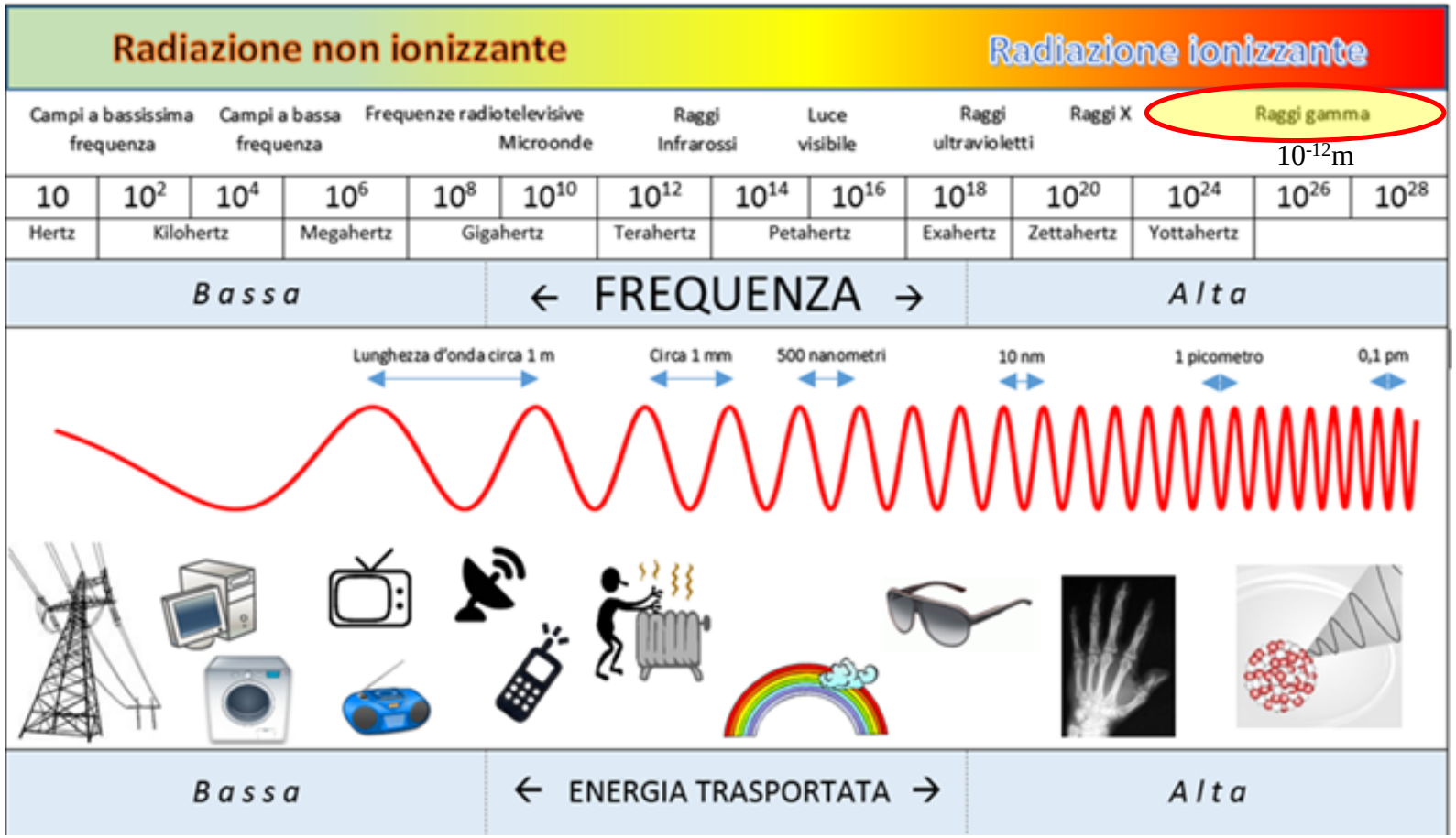
Le radiazioni ionizzanti

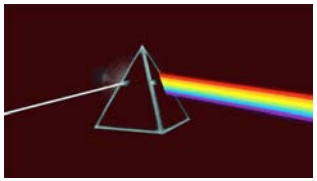
Nome	Massa	Carica	Descrizione
α	$6.68\ 10^{-27}$ Kg	+2	Nuclei di elio(^4_2He)
β	$0.9\ 10^{-30}$ Kg	-1	Elettroni (e^-)
γ	0	0	Fotoni



Le radiazioni alpha, beta e gamma sono dette **ionizzanti** perché la loro energia è tale da ionizzare gli atomi con cui possono interagire, cioè **strappare da essi uno o più elettroni** oppure rompere i legami chimici delle molecole

Lo spettro elettromagnetico



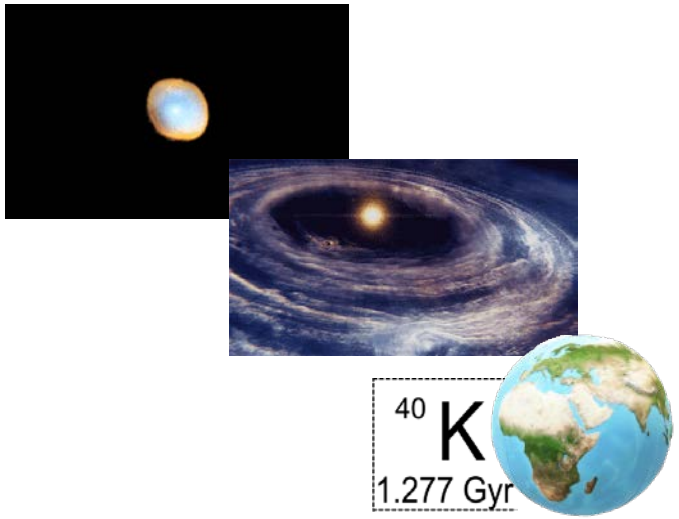


Gli umani sono in grado di percepire lunghezze d'onda comprese tra i ~370 e i ~700 nanometri.

I fotoni possono avere lunghezze d'onda diverse e quindi diverse energie: maggiore è l'energia, minore è la lunghezza d'onda.

La radioattività naturale terrestre

- La Terra, come tutto il Sistema Solare, ha avuto origine dalla condensazione di polveri interstellari provenienti da generazioni di stelle che alla fine della loro esistenza hanno rimesso in circolo gran parte della massa di cui erano composte arricchita dagli elementi prodotti dai processi nucleari avvenuti al loro interno



- I principali **radionuclidi primordiali** nella crosta terrestre sono **^{238}U, ^{232}Th e ^{40}K,** la loro presenza oggi si deve ai grandi tempi di dimezzamento di queste specie presenti al tempo della formazione del nostro pianeta

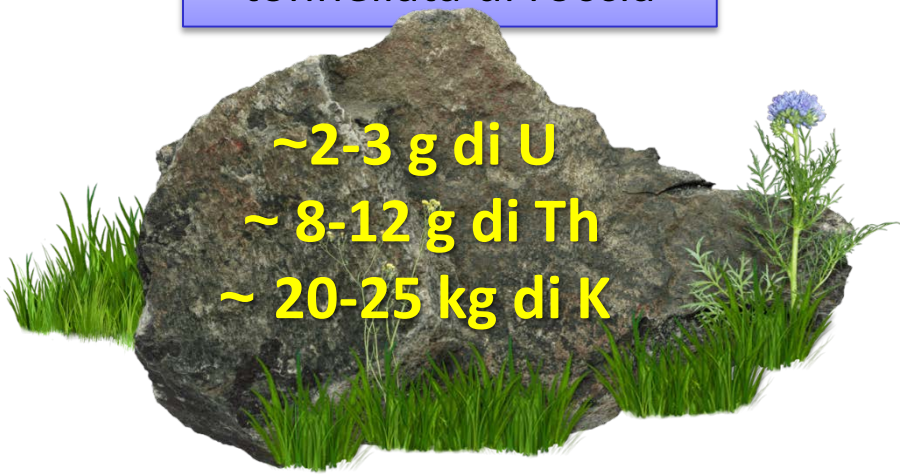
Nuclide	Tempo dimezzamento	Abbondanza isotopica naturale
^{238}U	4.47 x 10^9 anni	99.3% dell'U totale
^{232}Th	14.1 x 10^9 anni	100% del Th totale
^{40}K	1.28 x 10^9 anni	0.012% del K totale

Mentre il ^{40}K subisce un singolo decadimento, ^{238}U e ^{232}Th producono catene che comprendo decadimenti α, β, e/o γ

La radioattività naturale terrestre

Elemento	Abbondanza tipica	Attività specifica media
Uranio	2-3 ppm (µg/g)	30 Bq/kg
Torio	8-12 ppm (µg/g)	40 Bq/kg
Potassio	2 - 2.5% (cg/g)	720 Bq/kg

Mediamente, per 1 tonnellata di roccia



Quanto sono radioattive le rocce terrestri?

Granito (roccia ignea intrusiva)

~1000 Bq/kg

Tufo (roccia magmatica)

~1800 Bq/kg

Marmo (calcarea)

~100 Bq/kg

Gesso (sedimentaria)

~100 Bq/kg

Potassio

Il potassio è essenziale per tutti gli esseri viventi, compresi gli esseri umani e si trova soprattutto nei tessuti muscolari. È presente nel suolo, nei materiali da costruzione, nelle piante e negli animali.

In natura ci sono **3 isotopi di potassio**

Nome	n° di protoni	n° di neutroni	Abbondanza %	$t_{1/2}$
^{39}K	19	20	93.26	Stabile
^{40}K	**19**	**21**	**0.012**	**$1.3\ 10^9$ anni**
^{41}K	19	22	6.73	Stabile

Su centomila atomi di potassio solo 12 sono effettivamente radioattivi!

Qualche esempio

Radioattività del potassio

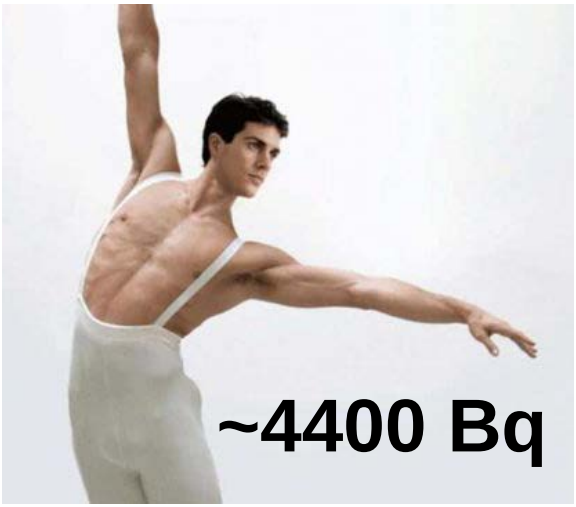
1 birra media (400 g) contiene circa 110 mg di potassio

Decadono 31 nuclei al secondo in ogni grammo di potassio

31 Bq/g

1 banana di 150 g contiene circa 525 mg di potassio:

Un uomo adulto di 70 kg ha circa 140 g di potassio

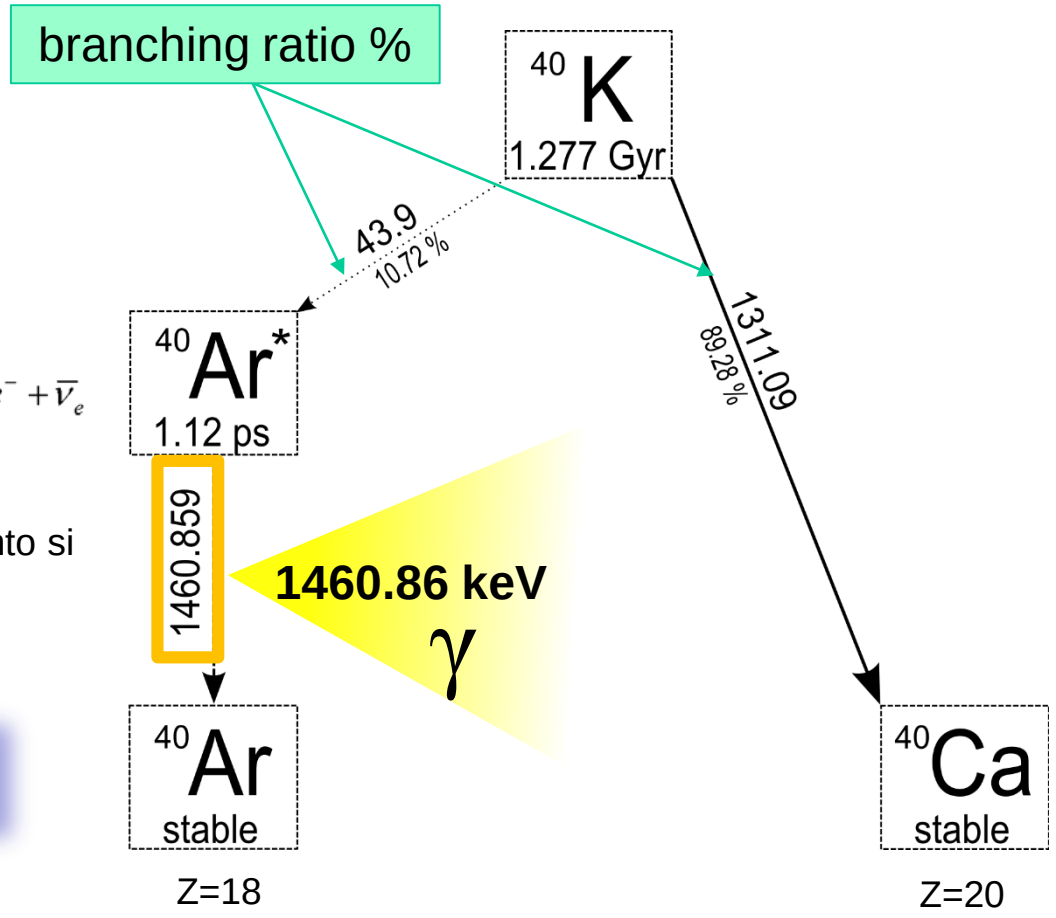


Decadimento del K-40

Decade direttamente in un isotopo stabile

EC il nucleo assorbe uno dei suoi elettroni orbitanti trasformando un protone del nucleo in un neutrone

$$p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e \qquad n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$



L'energia rilasciata durante un decadimento si misura in elettronvolt:

1 eV = 1.6 10^{-19} J

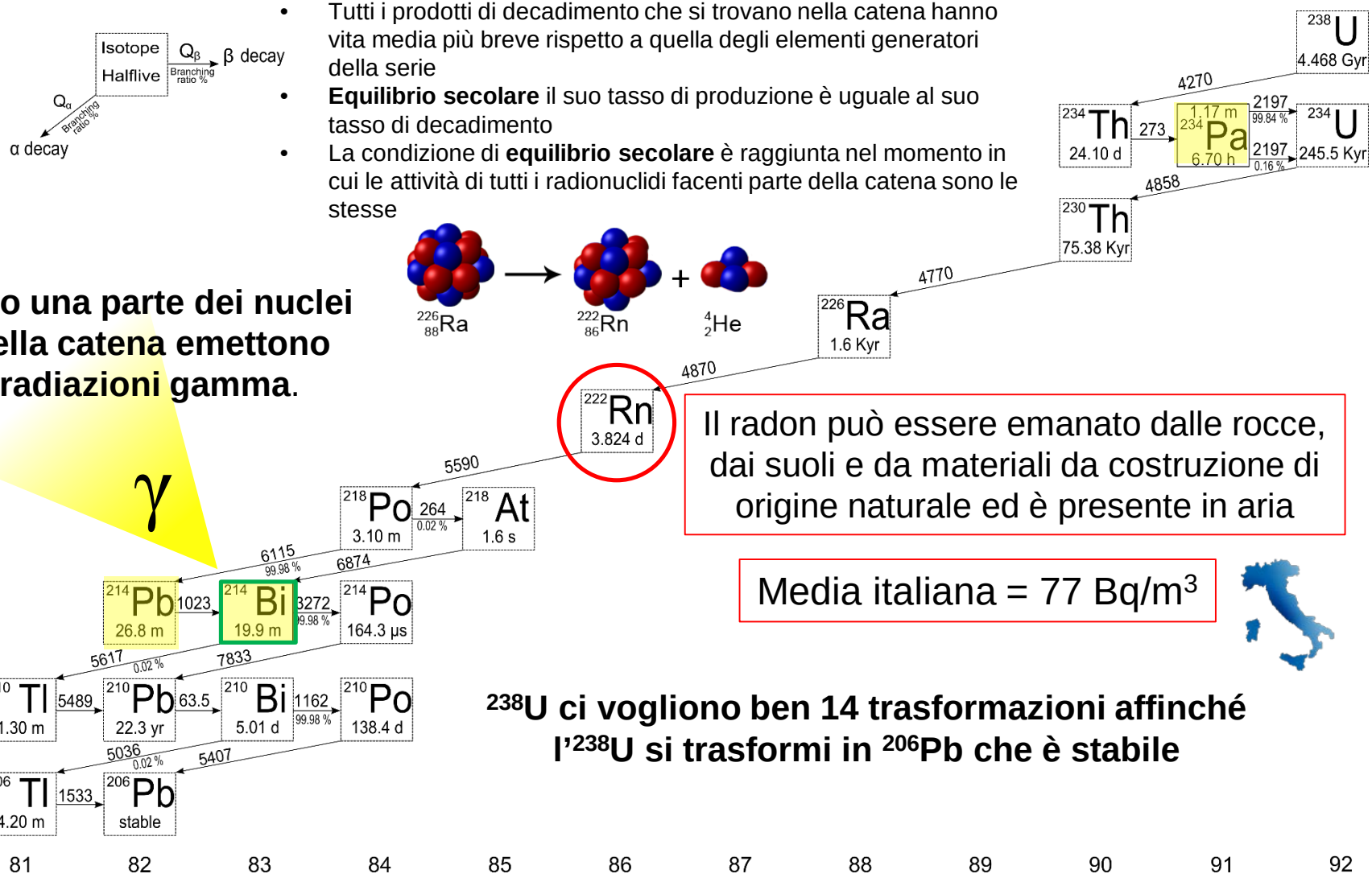
1% di K = 313 Bq/kg

Il fotoni emessi hanno un'energia di **1460.86 keV** e possono essere utilizzati per identificare e quantificare la concentrazione di attività di ^{40}K nell'ambiente

La catena di decadimento dell'U-238

^{238}U (abbondanza naturale del 99.28%)

- Tutti i prodotti di decadimento che si trovano nella catena hanno vita media più breve rispetto a quella degli elementi generatori della serie
- **Equilibrio secolare** il suo tasso di produzione è uguale al suo tasso di decadimento
- La condizione di **equilibrio secolare** è raggiunta nel momento in cui le attività di tutti i radionuclidi facenti parte della catena sono le stesse



Solo una parte dei nuclei della catena emettono radiazioni gamma.

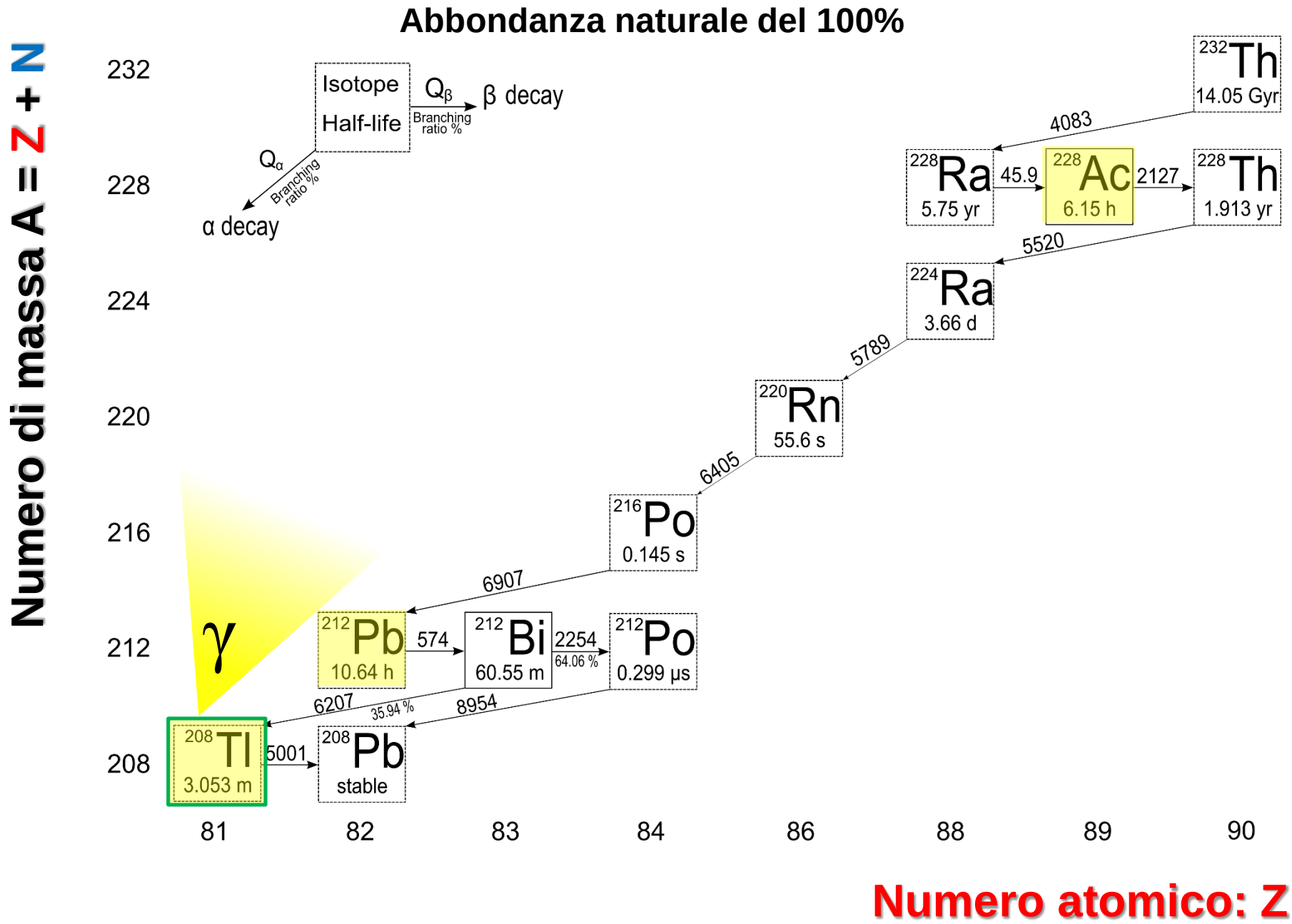
Il radon può essere emanato dalle rocce, dai suoli e da materiali da costruzione di origine naturale ed è presente in aria

Media italiana = 77 Bq/m^3

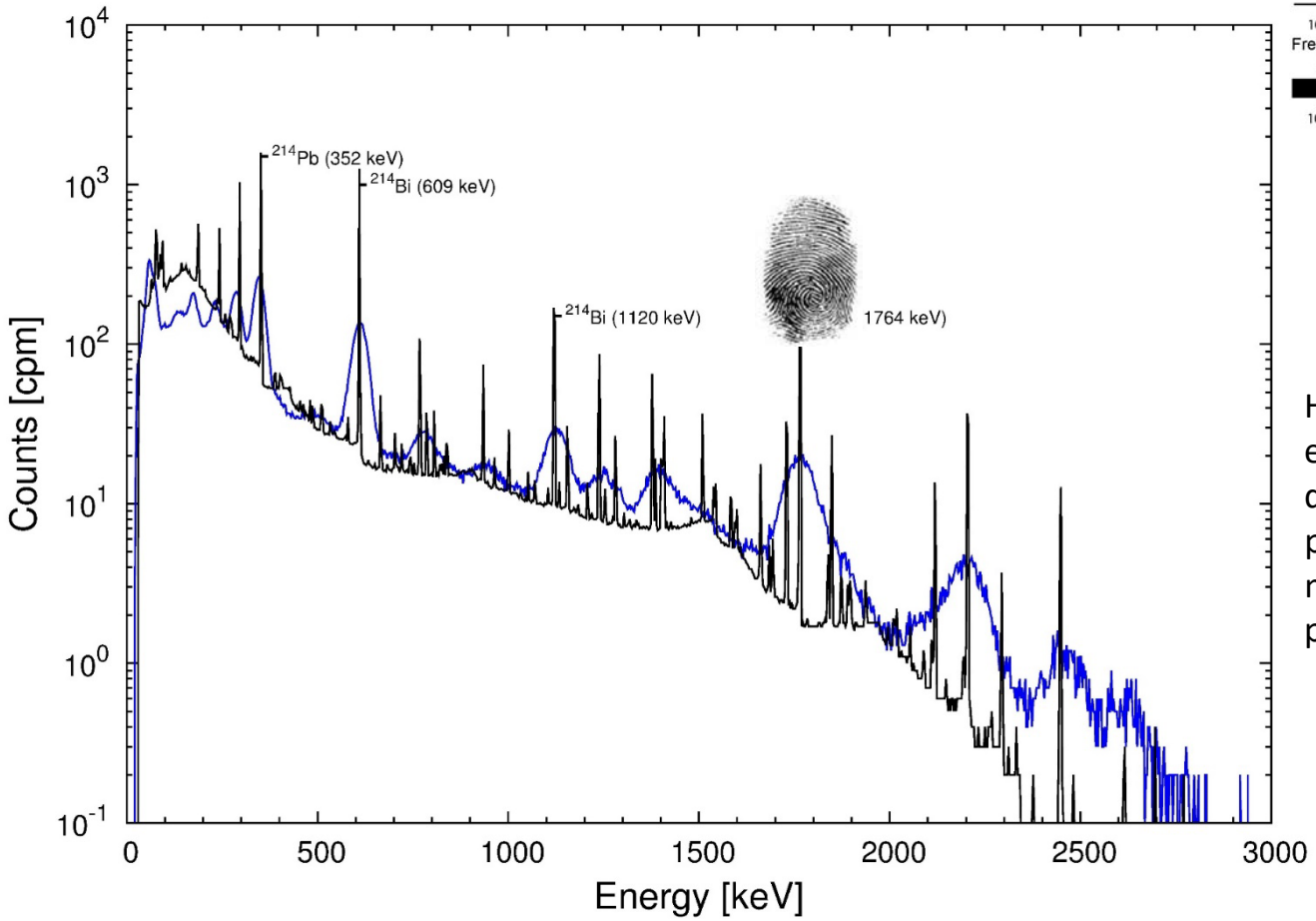
^{238}U ci vogliono ben 14 trasformazioni affinché l'^{238}U si trasformi in ^{206}Pb che è stabile

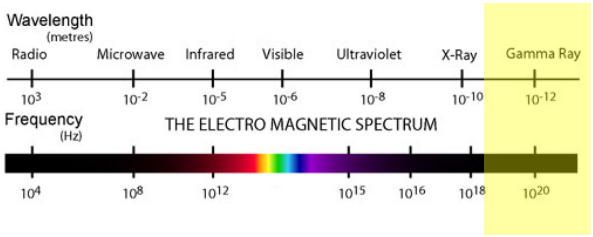
Numero atomico: Z

La catena di decadimento del Th-232



Cosa misuriamo?





Risoluzione NaI = 6%

Risoluzione HPGe = 0.2%

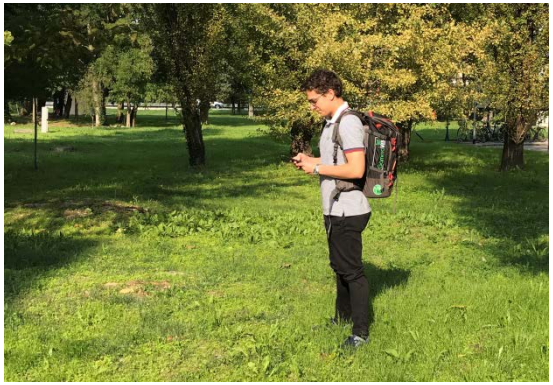
HPGe hanno una risoluzione energetica molto superiore a quella dei rivelatori a scintillazione NaI, poiché viene generato un numero maggiore di portatori di carica a parità di energia depositata.

In uno spettro gamma si riconoscono i **FOTOPICCHI**, che corrispondono ai fotoni che arrivano al rivelatore con **energia uguale a quella con cui sono stati emessi** e che **hanno depositato tutta l'energia nel rivelatore**

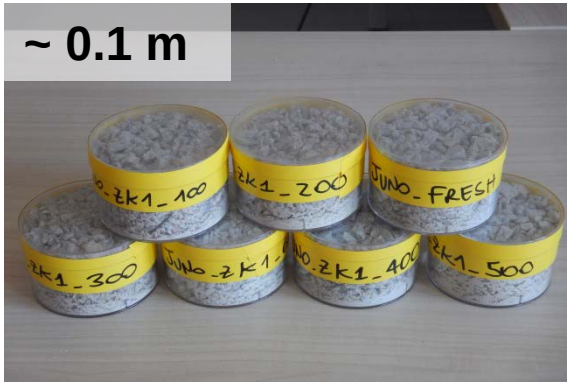
Dove lavoriamo?

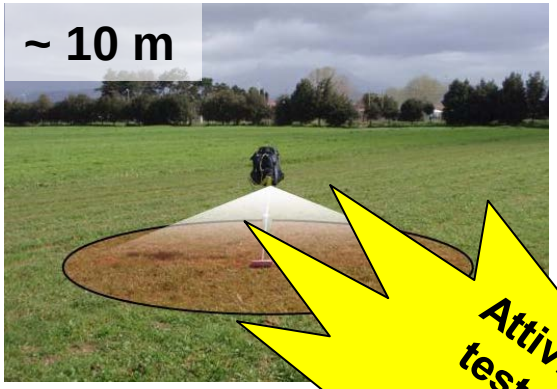
... in lab

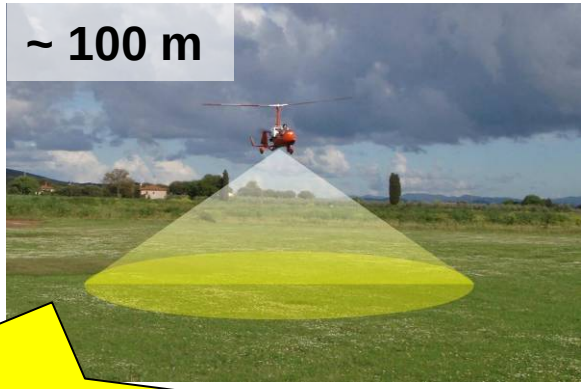
... in situ



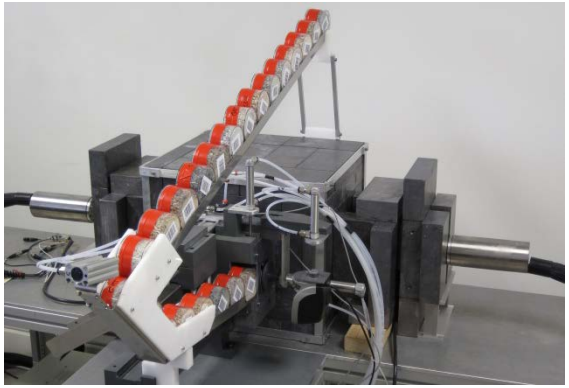
... airborne

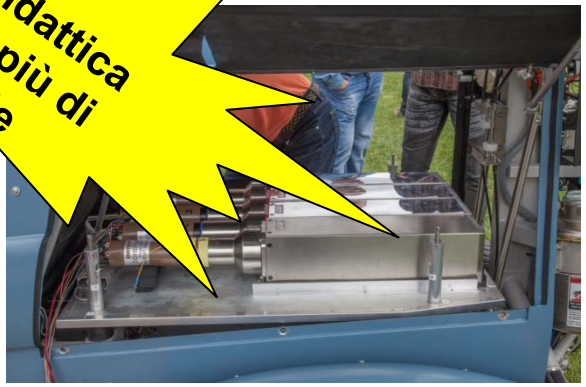






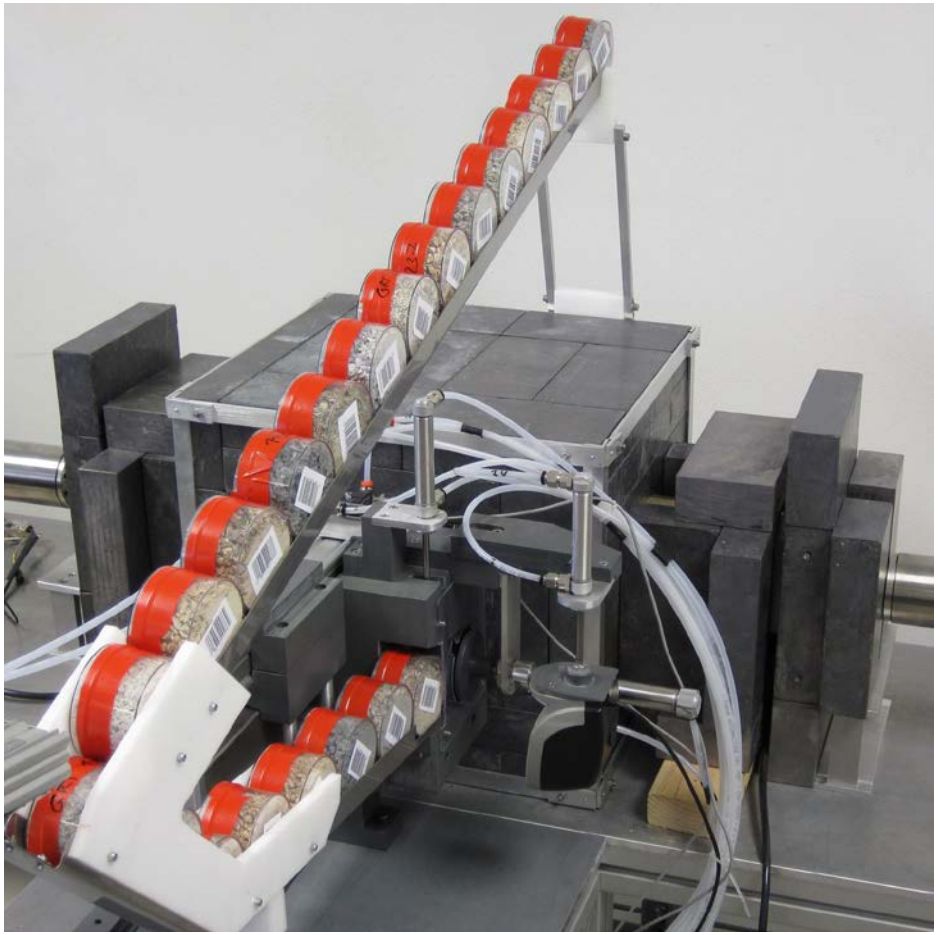
Attività didattica testata in più di 50 scuole

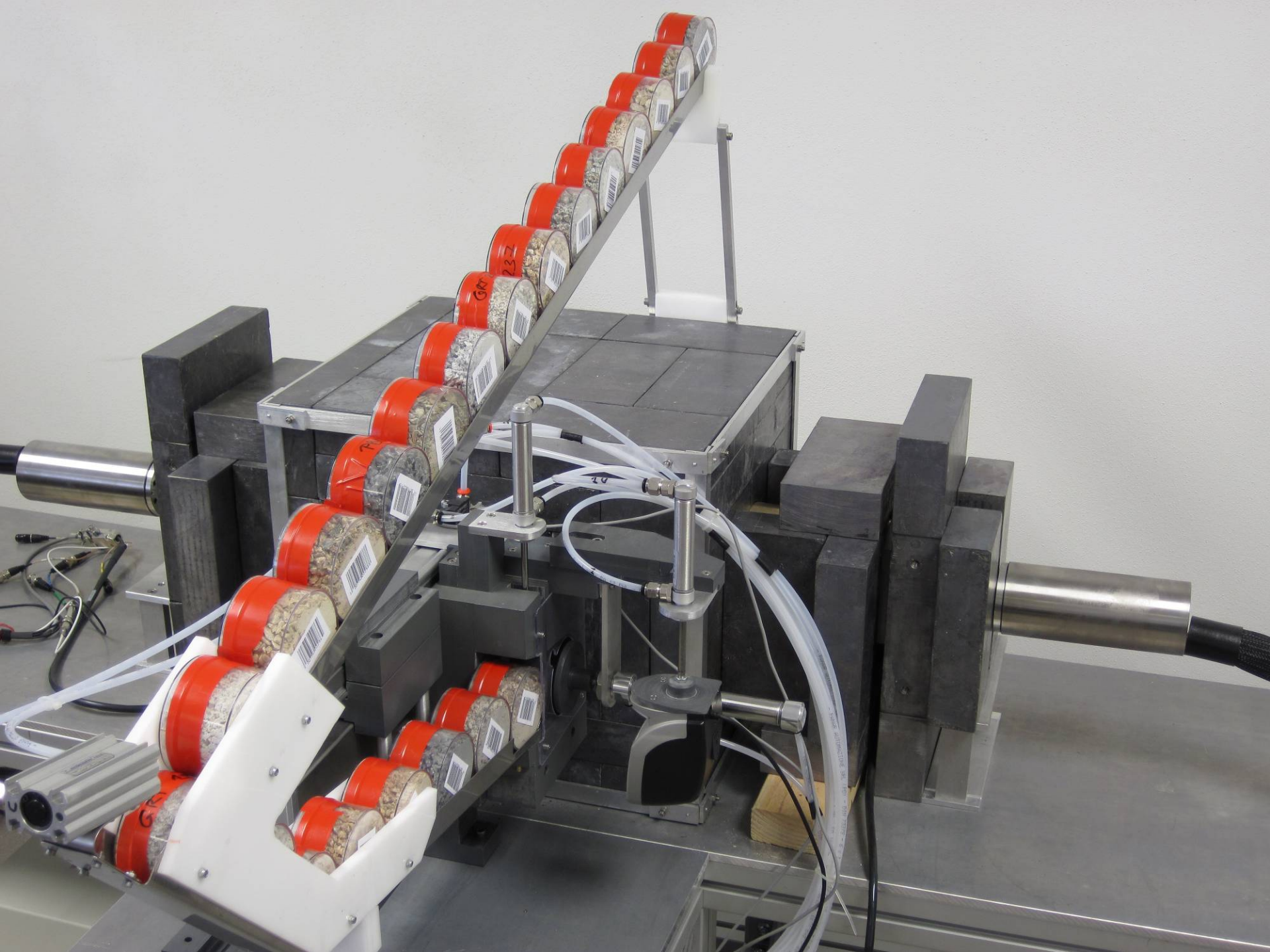


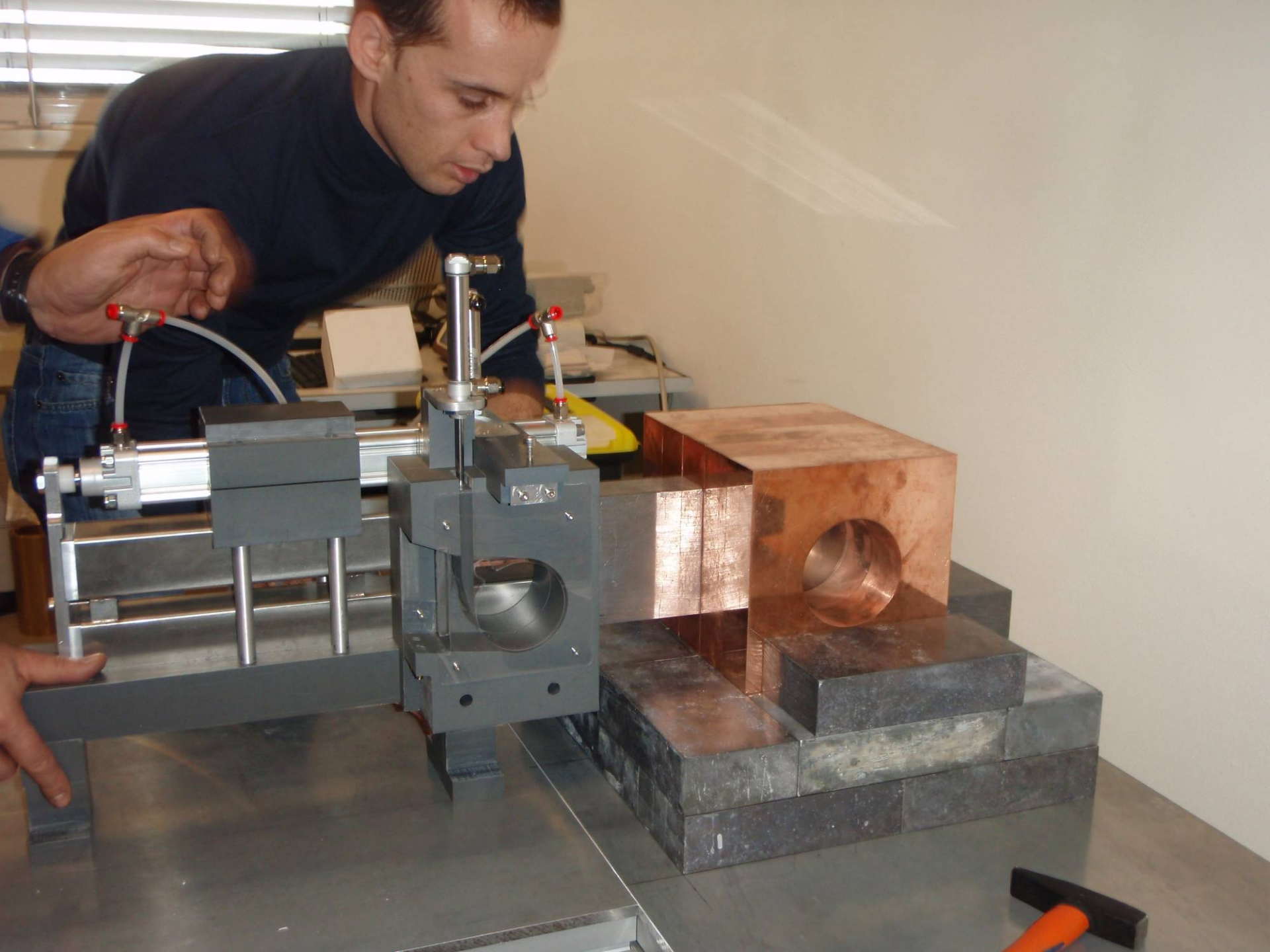


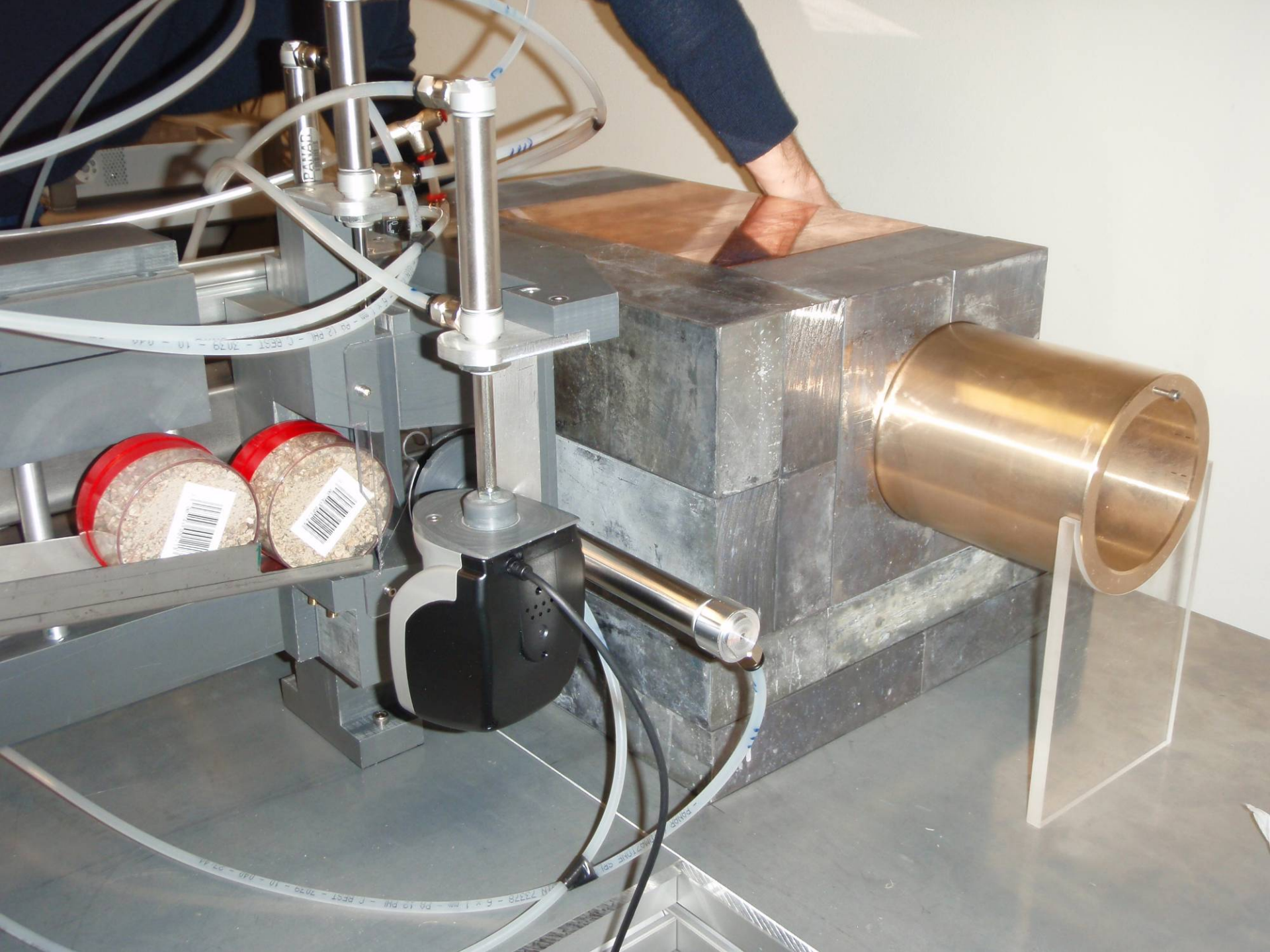
Sistema MCA_RAD

- Detectors: 2 HPGe (Rel. Eff. 63%)
- Risoluzione Energetica: 2.02 keV at 1.33 MeV
- Temperatura di funzionamento: ~ -190 °C
- Schermatura: Cu, Pb
- Volume del campione: 180 cm^3
- Durata misura standard: ~ 1 h
- Errore sistematico sulla misura dell'attività assoluta: < 5%
- Grado di automazione: 22 campioni con lettore di codice a barre
- Conforme alle linee guida IAEA

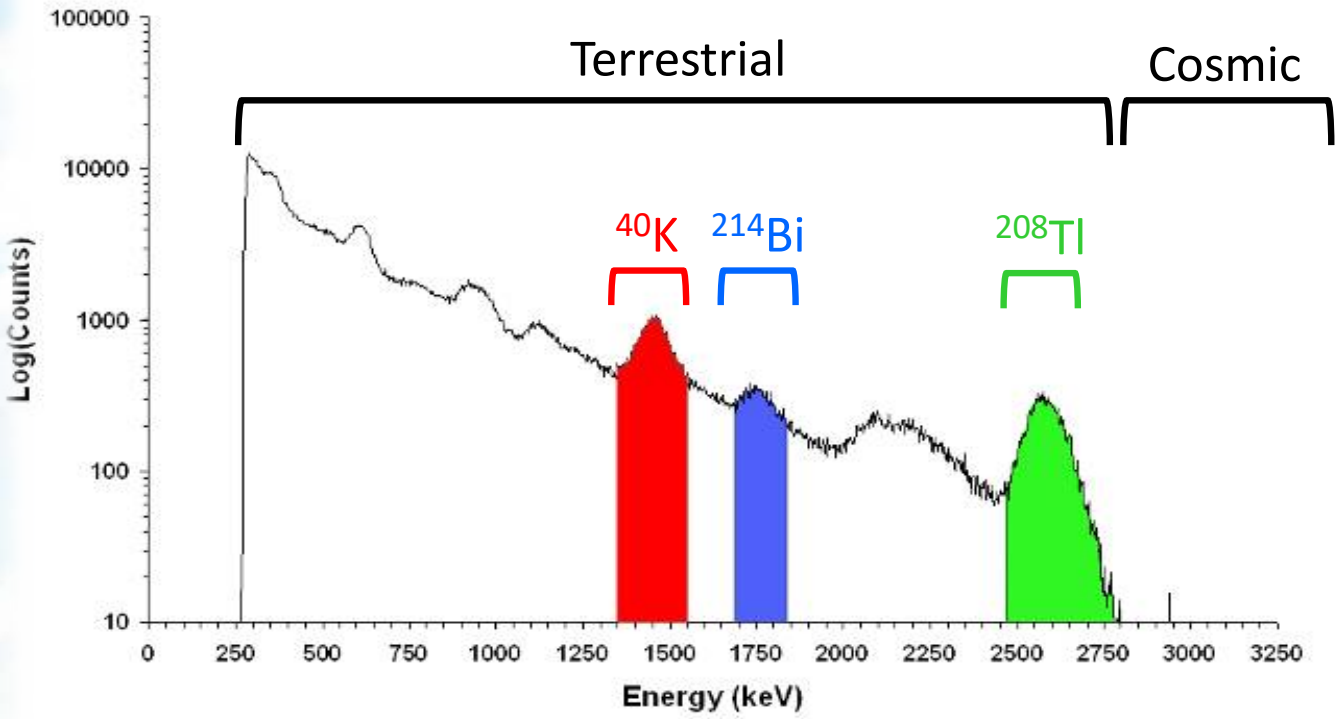


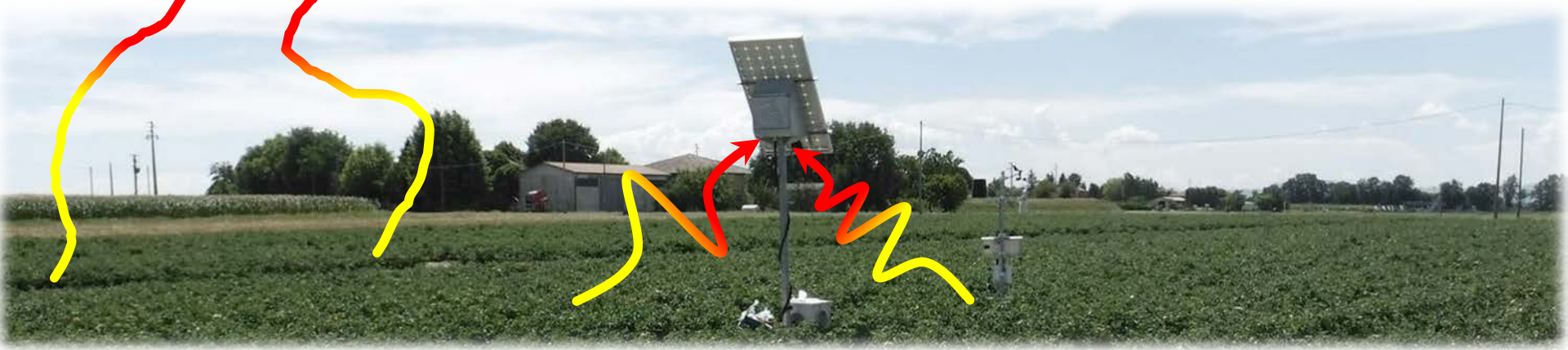






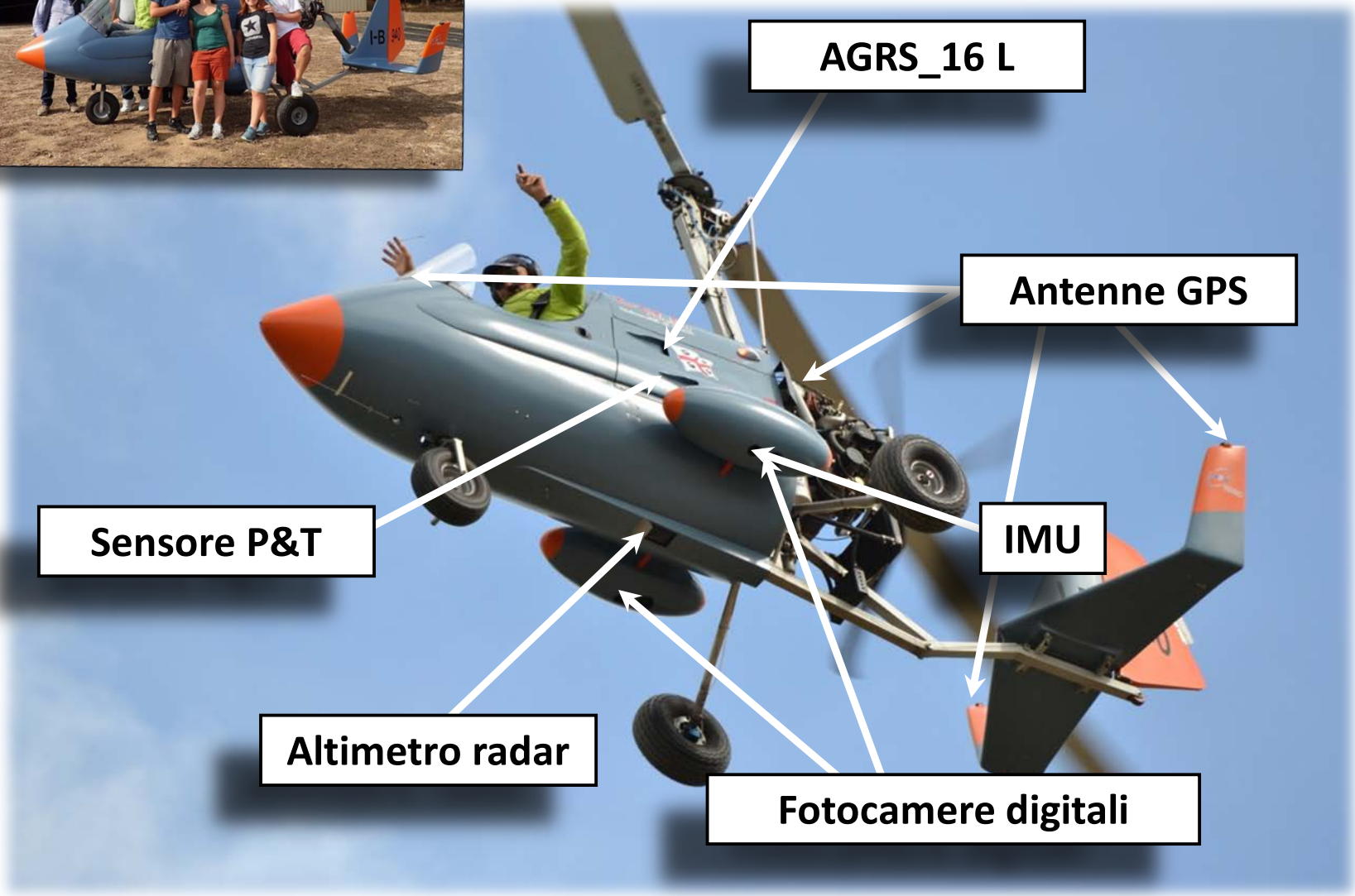
Spettroscopia gamma outdoor





Radgyro: principali caratteristiche

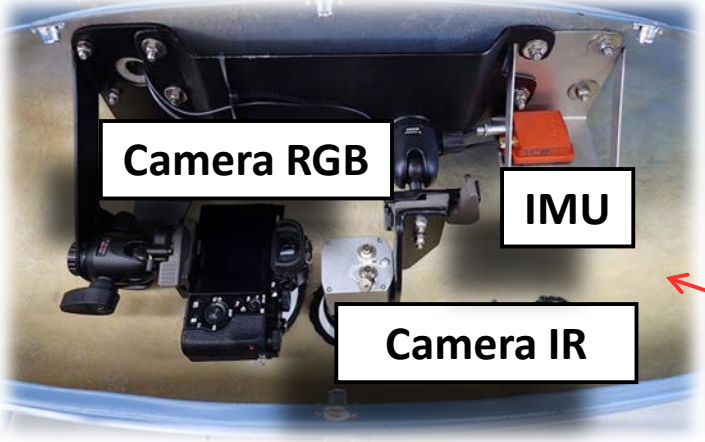
- Motore: 1.6 litri turbo – 90 kW
- Carico: 150 kg
- Serbatoio: 90 litri
- Carburante: benzina
- Lunghezza: 5.20 m
- Larghezza: 2 m
- Rotore: 8.5 m
- Spazio per il decollo:< 70 m
- Range di volo: < 3.5 ore
- Range investigazione: ~ 50 km^2 / h
- Facile da trasportare

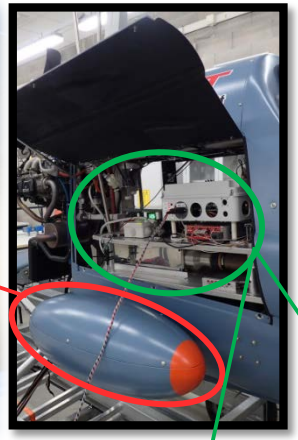

AGRS_16 L
Antenne GPS
Sensore P&T
IMU
Altimetro radar
Fotocamere digitali

ROTAX

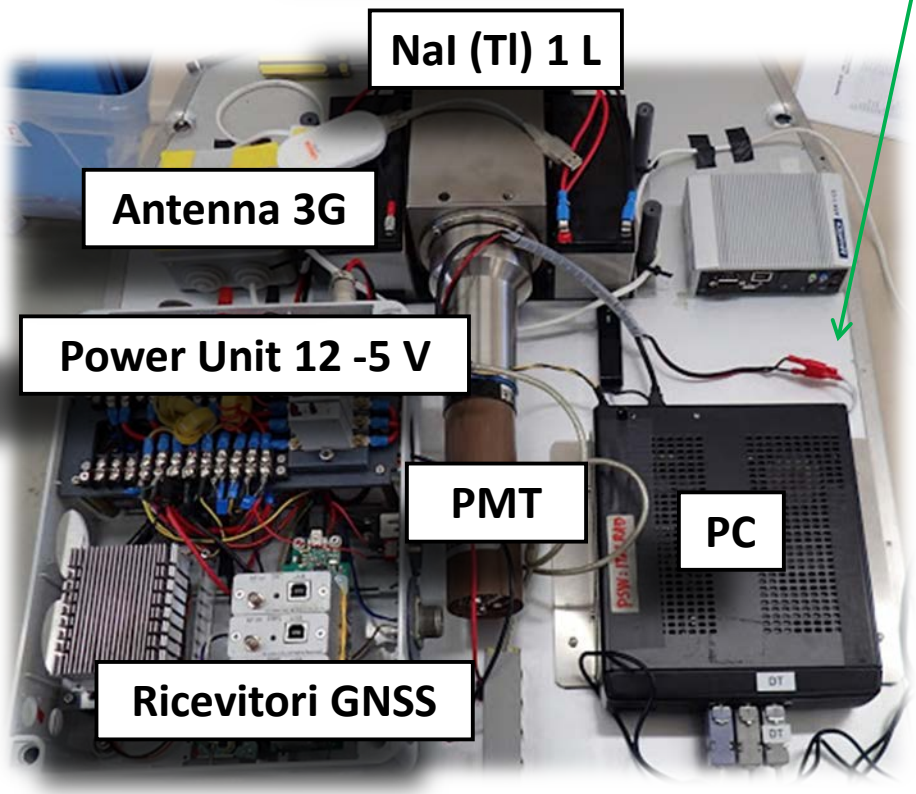
12 v
12 v
5 v
Batt avv

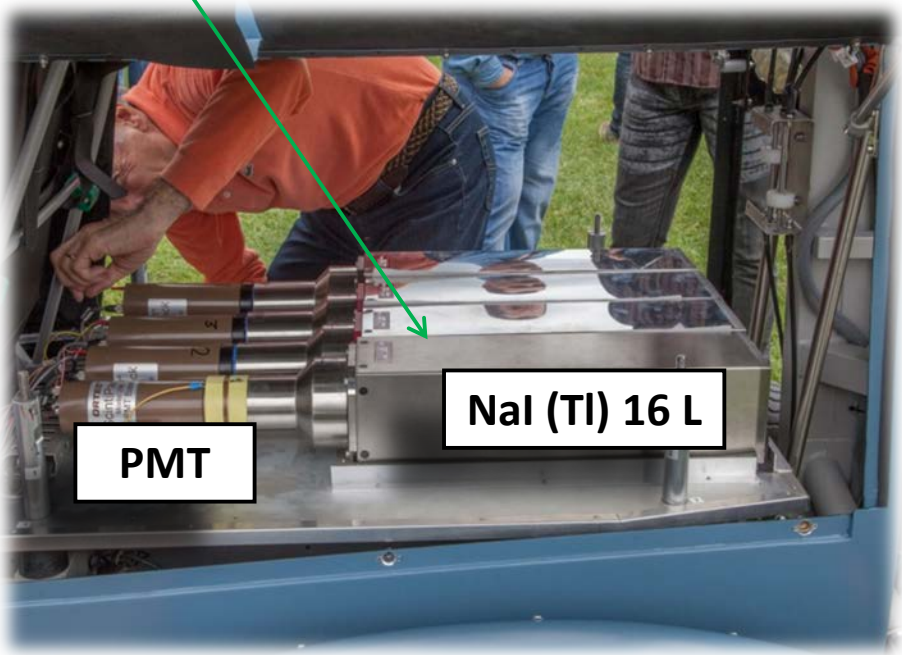
Strumentazione presente a bordo





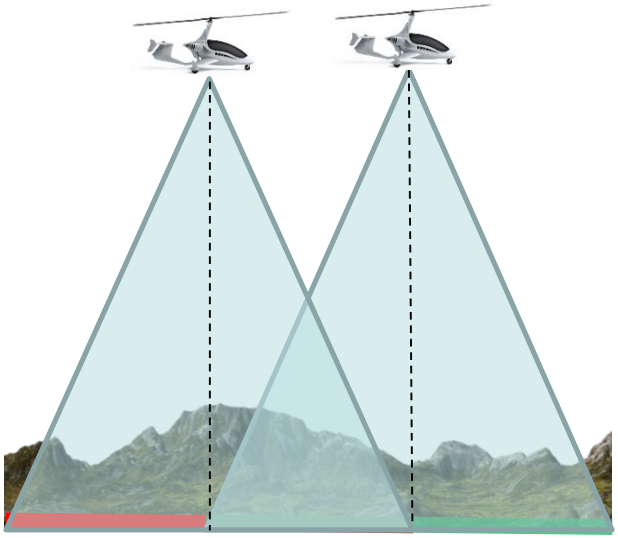
Airborne Gamma Ray Spectrometer 16 L	
4 Rivelatori NaI(Tl)	4 Lit. (102 x 102 x 406 mm)
1 Rivelatore NaI(Tl)	1 Lit. (102 x 102 x 102 mm)
Acquisizione	List mode (evento per evento)
Canali	2048

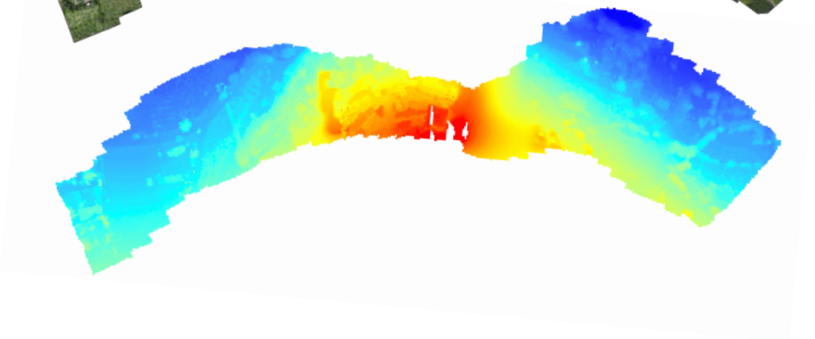


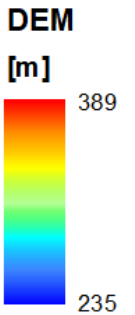


Fotogrammetria

Formato Fullframe 36 x 24 mm
Risoluzione 24.3 megapixel (6000 x 4000 pixel)

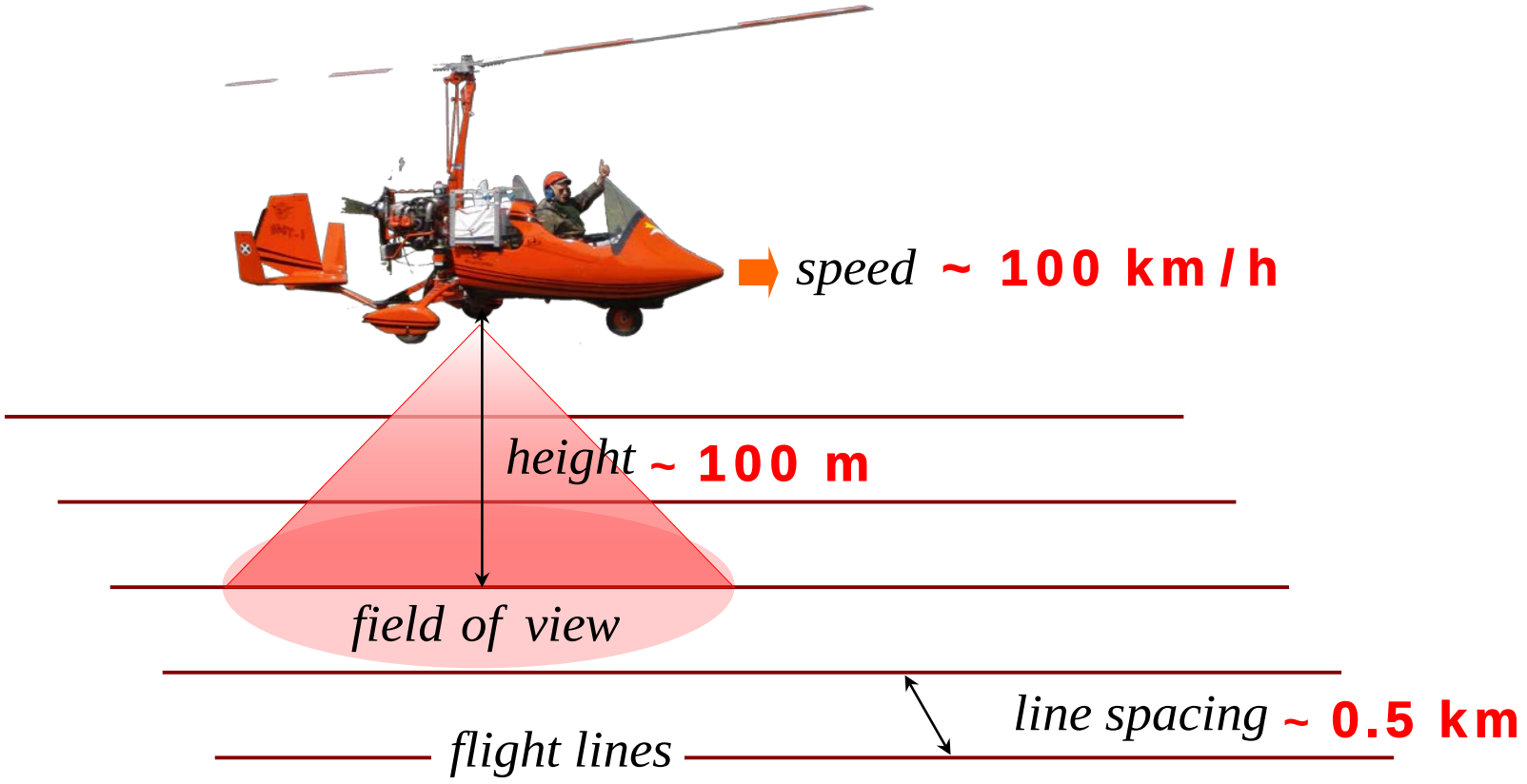






Airborne Gamma-Ray Spectrometry

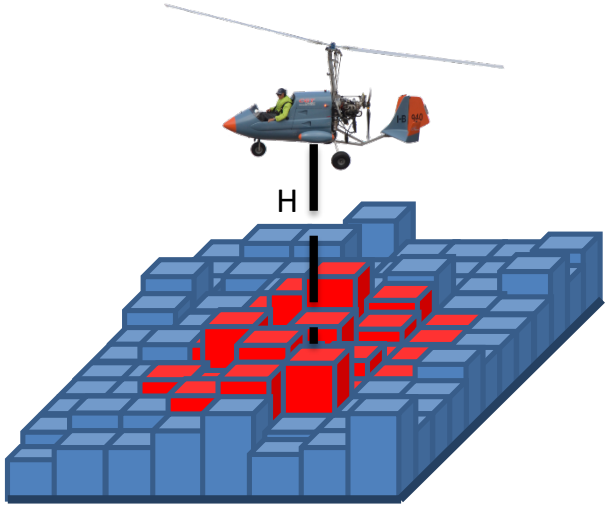
Nell'impostare la campagna di voli abbiamo seguito i suggerimenti delle linee guida dell'IAEA: questo ci permetterà di confrontarci con altre esperienze internazionali.



Il velivolo deve seguire la morfologia del territorio

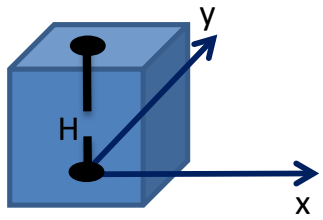
* International Atomic Energy Agency. Guidelines for radioelement mapping using gamma-ray spectrometry data. IAEA-TECDOC-1363, Vienna; 2003.

Correzione topografica



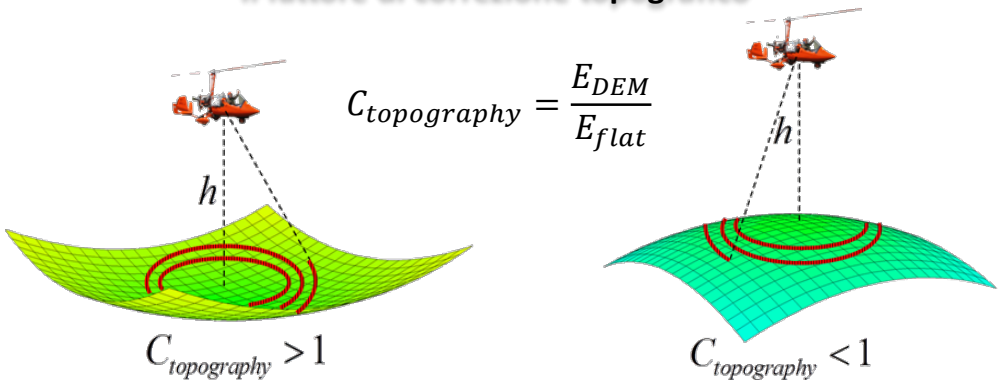
Digital Elevation Model (DEM)

Superficie in cui ad un numero finito di coppie (X,Y), in coordinate UTM, viene attribuita una quota ortometrica (H) corrispondente

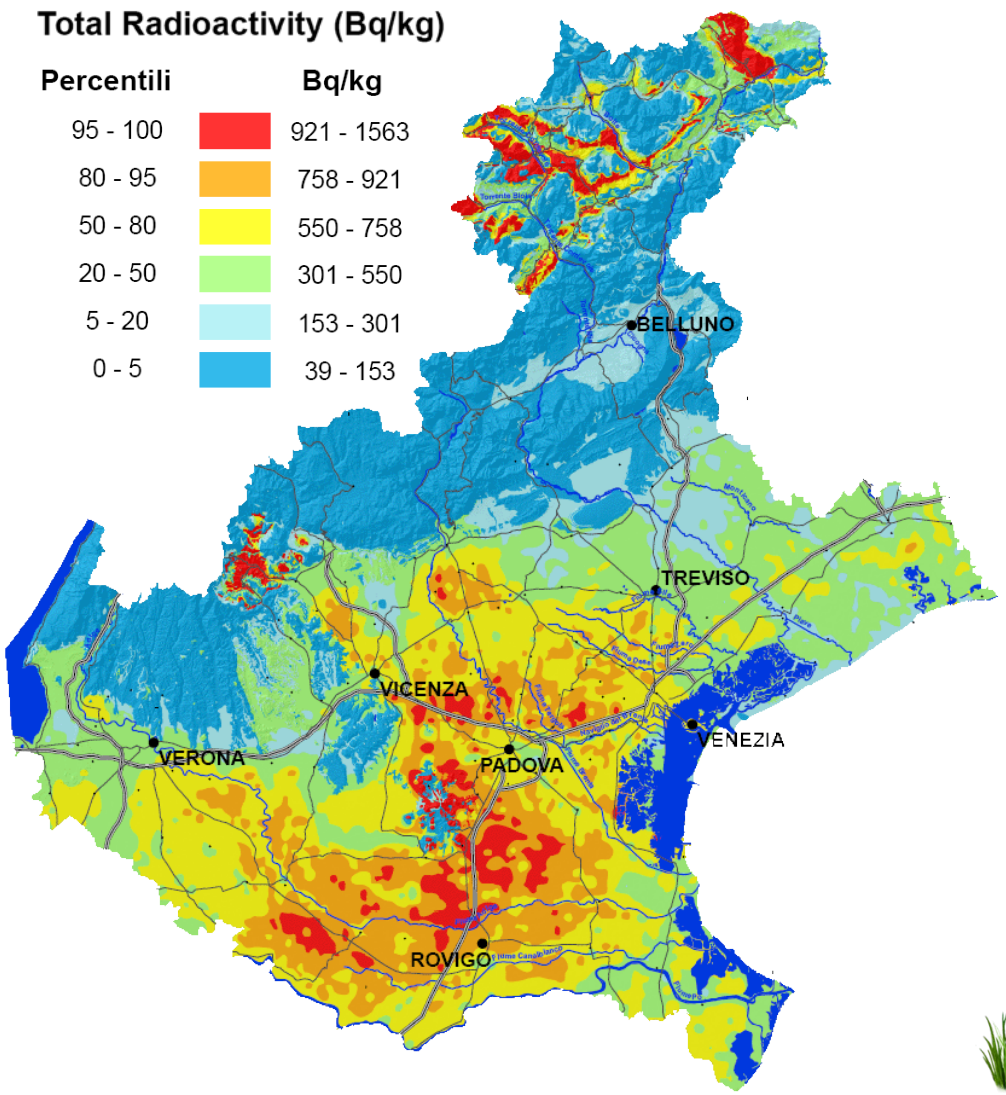


Ogni pixel ha un'area di 10 m x 10 m

Il fattore di correzione topografico



Mappa della radioattività naturale della regione Veneto

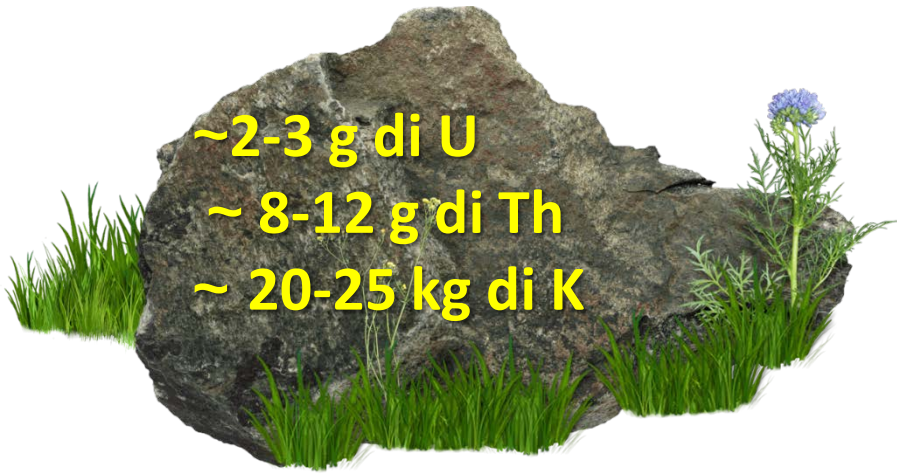


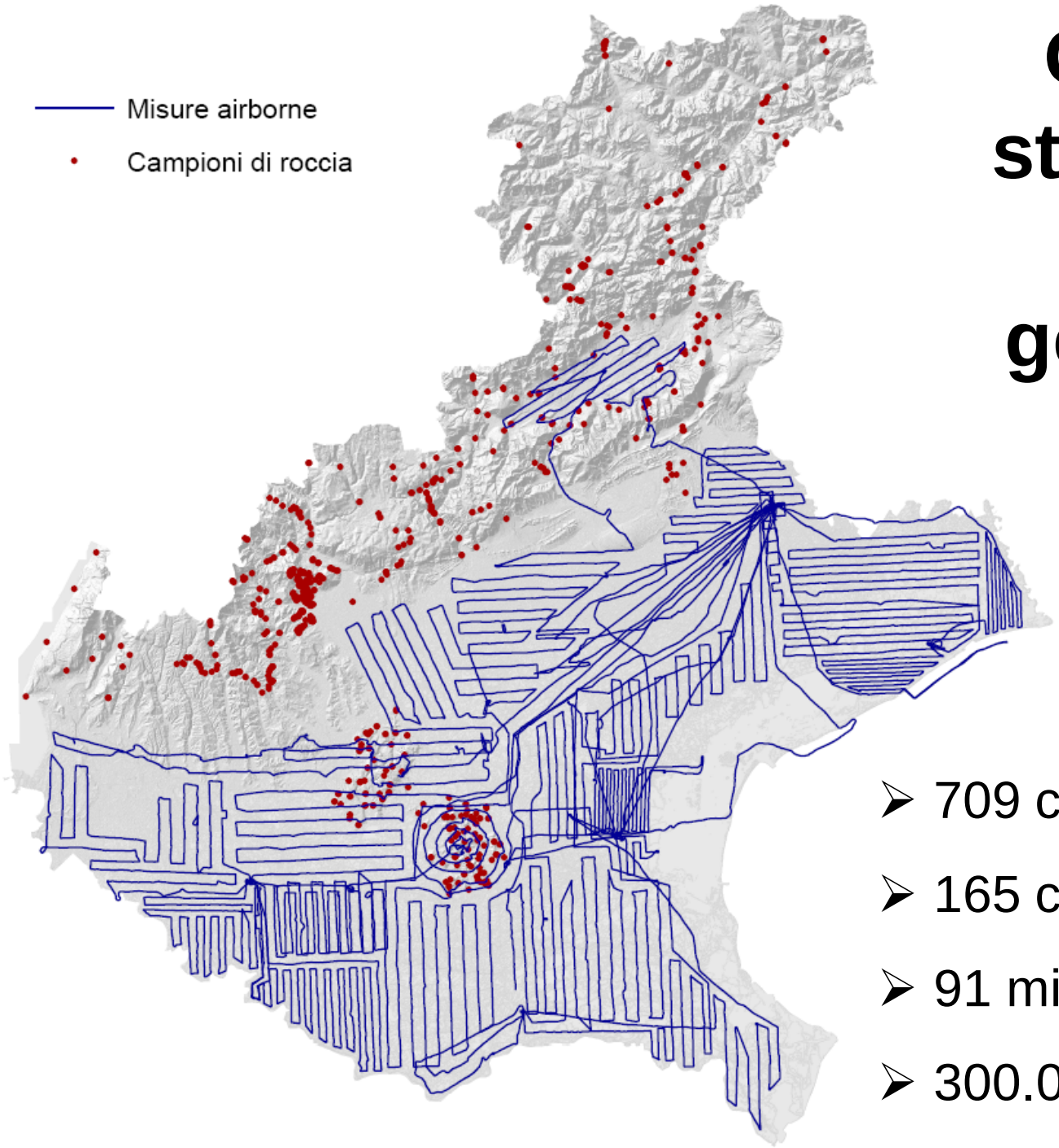
Attività specifica totale media della crosta 790 Bq/kg

1%K = 313 Bq/kg
1ppm U = 12.4 Bq/kg
1ppm Th = 4.1 Bq/kg

Attività specifica totale
[Bq/kg]= A (K) + A (U) + A (Th)

1 tonnellata di roccia



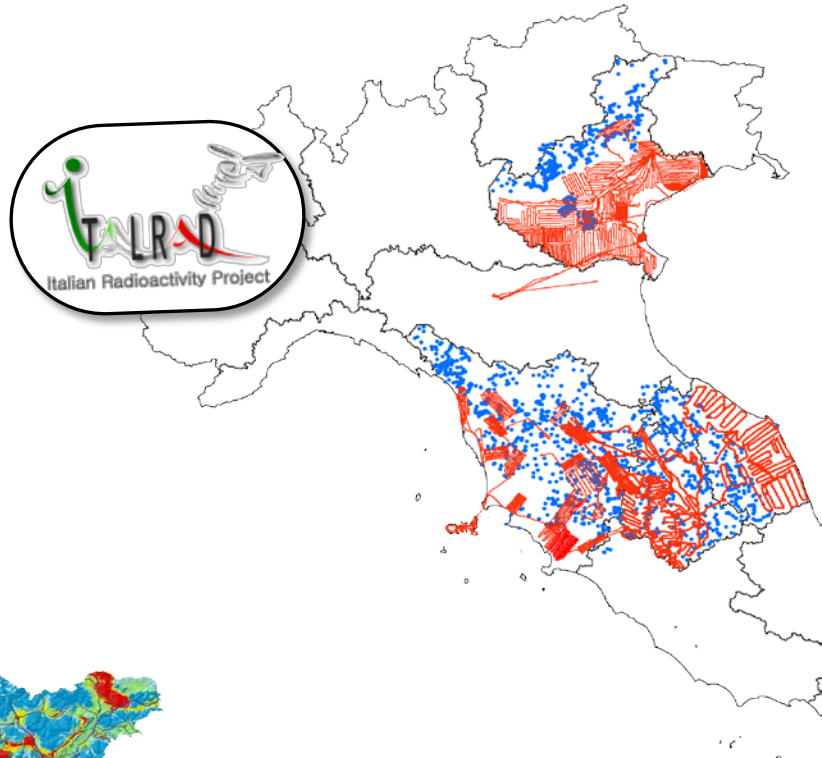


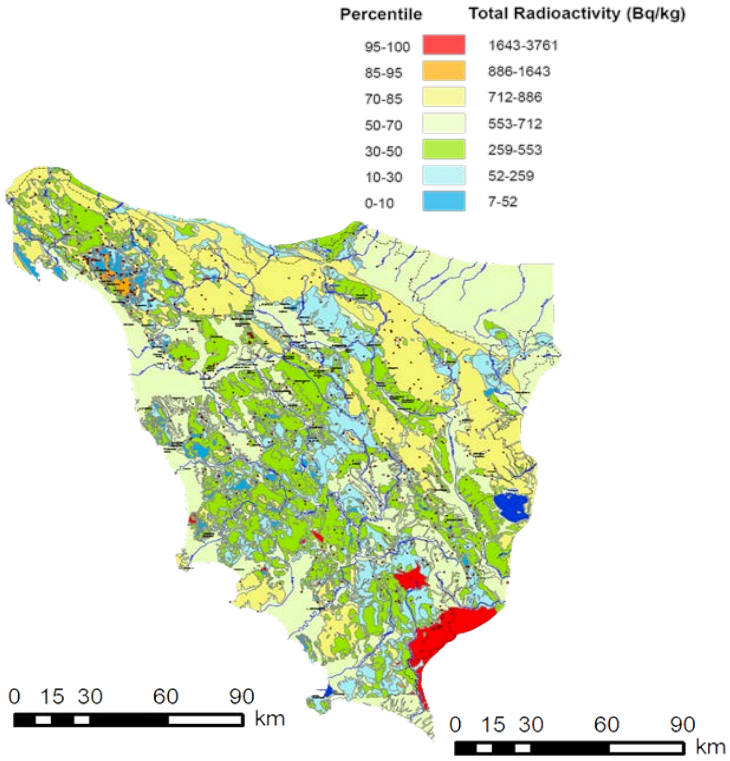
Quello che sta dietro alla carta: il geodatabase

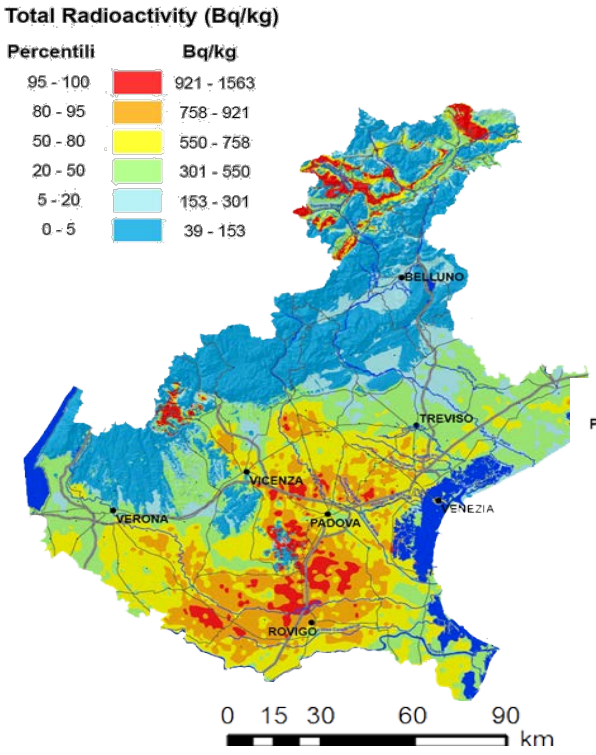
- 709 campioni di roccia
- 165 campioni di suolo
- 91 misure in situ
- 300.000 misure airborne

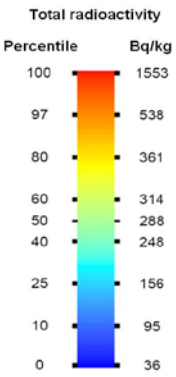
I survey che abbiamo realizzato

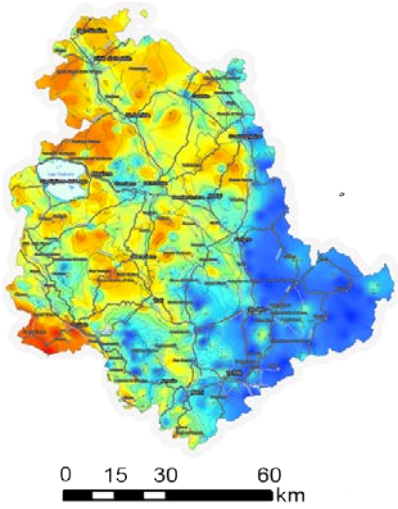
	Numero di campioni		Voli
Regione	**rocce**	**suoli**	**10^3 km**
Marche	306	3	1.57
Sardegna	1030	/	2.72
Toscana	676	1236	5.65
Umbria	283	14	2.75
Veneto	708	165	8.21
Total	**3003**	**1418**	**20.90**





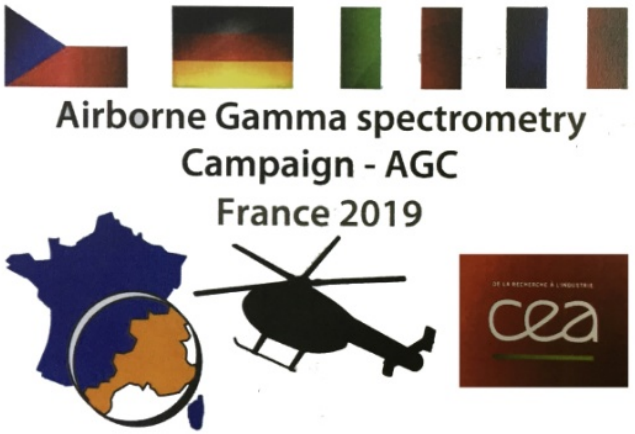






International intercomparison exercises of airborne gamma-spectrometric systems – Orange (France) – 12-19 Ott 2019

- Calibrare apparati per la misura di radioattività gamma a bordo di velivoli (elicotteri)
- Confrontare mappe di uranio, torio e potassio sorvolando le stesse superfici
- Individuare in real time sorgenti radioattive «orfane»
- Condividere strategie di sorvolo, protocolli di acquisizione, formati dei file di output, prodotti cartografici, etc.
- Costruire un network internazionale per fornire una tempestiva risposta in caso di incidente nucleare



«Noi, la squadra a caccia di radioattività»

Con un velivolo un team di ricercatori Unife e dell'Istituto nazionale di fisica nucleare ha preso parte alle esercitazioni europee

di Giuseppe Malaspina
FERRARA

Agilità, economicità, automazione. Un trinomio di concetti al servizio di un particolare tipo di monitoraggio aereo, che ha avuto in un team dell'ateneo estense uno dei suoi partecipanti. Nella città francese di Orange, nella regione della Provenza, dal 14 al 18 ottobre scorso, infatti, si sono svolti gli 'International intercomparison exercises of airborne gamma-spectrometric systems'. Una serie di esercitazioni periodiche, ciok, che da circa un decennio coinvolgono gruppi provenienti da Paesi europei, e dotati di sistemi per monitorare la radioattività attraverso l'impiego di velivoli. Sorvolare l'area a caccia di piccole sorgenti radioattive, opportunamente occultate dagli organizzatori, dunque, come attività dell'insolita competizione fra squadre.

Una gara solo formale, se si considera la finalità di condividere e confrontare i dati raccolti. In un'ottica generale di uniformare le diverse unità di misura. In un contesto europeo caratterizzato da impianti nucleari che necessitano di manutenzione, acquisisce pertanto importanza la presenza di un network fra colleghi che conoscano le reciproche modalità operative nella rilevazione di dati, e che producano mappe con la stessa unità di misura. «Questa esercitazione – ha spiegato Fabio Mantovani, docente del dipartimento di Fisica e Scienze della Terra dell'Università di Ferrara, e coordinatore del progetto Italrad, dell'Istituto nazionale di Fisica nucleare – si ripetono, in ambito europeo, con cadenza biennale. Nell'edizione precedente, a Zurigo nel 2017, il nostro compito era di osservatori. In quest'ultimo caso, invece, siamo entrati a far parte dell'esperienza con il nostro velivolo e la nostra attrezzatura». Per la prima volta, ha quindi partecipato un gruppo italiano, costituito da giovani ricercatori e ricercatrici del dipartimento di Fisica e Scienze della Terra di Unife, e dell'Infn, oltre a due team della Francia, uno della Germania e uno della Repubblica Ceca. «Per quanto riguarda la composizione dei gruppi – ha illustrato il docente Mantovani – ogni team comprendeva circa una decina di persone. Un paio come piloti, un altro paio a occuparsi dell'aspetto della comunicazione, e poi ovviamente tecnici e persone di scienza. Il particolare mezzo che noi abbiamo utilizzato è un autogiro. A differenza degli altri velivoli, il nostro consuma soltanto 25 litri di carburante all'ora. L'elicottero del team della Repubblica Ceca, per esempio, ne consuma oltre 700 all'ora. Noi abbiamo puntato su fattori come l'agilità e il controllo remoto. A pilotare il velivolo c'era infatti un solo pilota. E poi abbiamo deciso di montare quanto più materiale possibile a bordo, come camere fotografiche e a infrarossi, in modo da trasmettere dati e immagini in tempo reale alla stazione di terra. Un monitoraggio di circa 30 giga di dati all'ora».

In virtù di una strumentazione completamente automatizzata, tutte le fasi del volo sono state seguite dal personale a terra, in grado di controllare la telemetria.

Sopra, i ricercatori di Fisica Unife. In alto, il pilota del mezzo

L'OBIETTIVO

In caso di disastro nucleare il mezzo può sorvolare le aree e misurare il fallout

IN FRANCIA

Parte dei test hanno riguardato il cesio radioattivo di Chernobyl sulle Alpi

Dal funzionamento degli strumenti alla visione delle riprese delle zone sorvolate. Gli equipaggi hanno così gareggiato in cinque esercitazioni, utilizzando diversi elicotteri e spettrometri gamma. Sono stati effettuati voli per l'identificazione in tempo reale di sorgenti radioattive, collocate per l'occasione in posizioni ignote, e per la caratterizzazione di zone interessate dal fallout del cesio radioattivo di Chernobyl, nelle Alpi marittime francesi. Alla fine di ogni giornata, le squadre hanno condiviso i dati. «Abbiamo individuato – ha aggiunto Mantovani – le sorgenti con precisione. E andremo avanti con le esercitazioni. Gli sbocchi ulteriori di questa esperienza vanno comunque oltre al campo della radioattività, interessando ambiti come il monitoraggio ambientale e l'agricoltura di precisione».

© RIPRODUZIONE RISERVATA

IN PILLOLE

Come funziona la competizione

I test si sono tenuti nella città di Orange dal 14 al 18 ottobre

1 Il progetto
Da una decina d'anni vengono organizzati gli 'International Intercomparison exercises of airborne gamma-spactrometric systems', nei quali team da tutta Europa si sfidano alla ricerca di sorgenti radioattive

2 Il gioco
Seppure sotto forma di esercitazione, la finalità è mettere insieme modalità operative e tecnologie utili ai Paesi a intercettare fallout radioattivi in caso di disastro nucleare

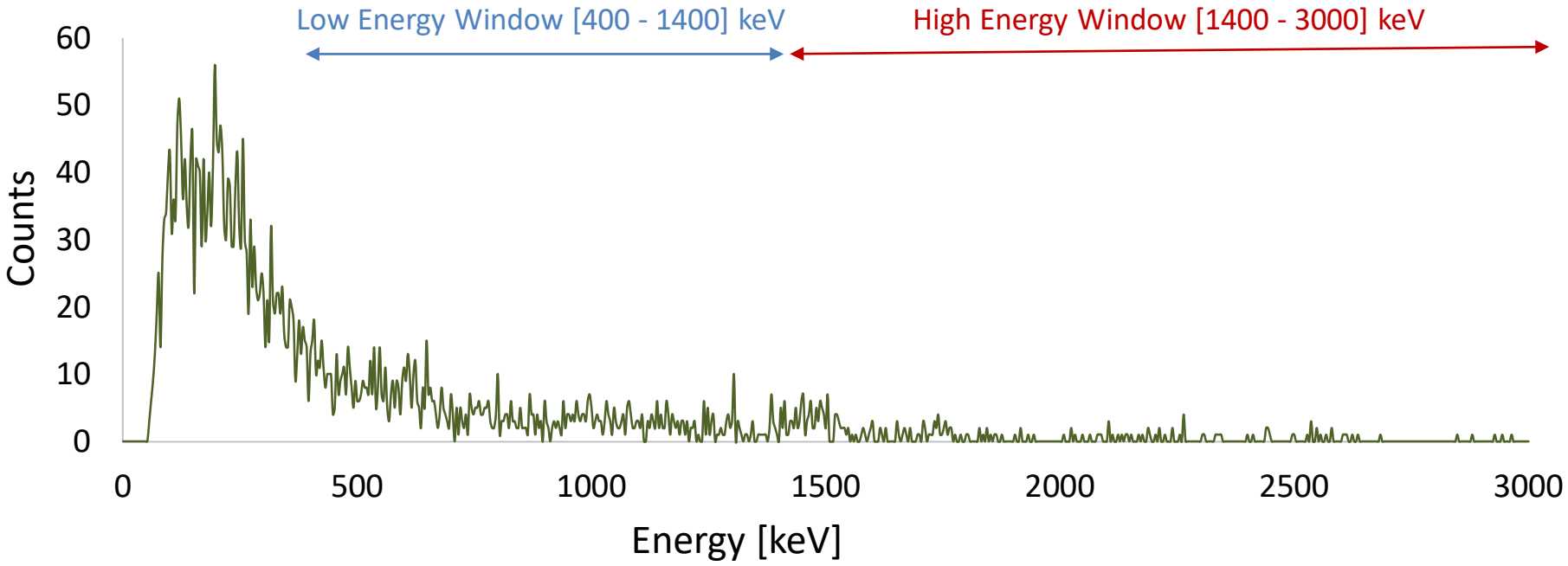
3 L'Italia
Si è presentata con un mezzo leggero, guidato solo da un pilota e senza bisogno di equipaggio a bordo. La tecnologia montata consente di analizzare da terra tutti i dati raccolti, fino a 30 giga di dati all'ora

4 Gli sbocchi
La tecnologia sviluppata può essere utilizzata anche in ambiti differenti da quello della radioattività, come il monitoraggio ambientale e l'agricoltura di precisione

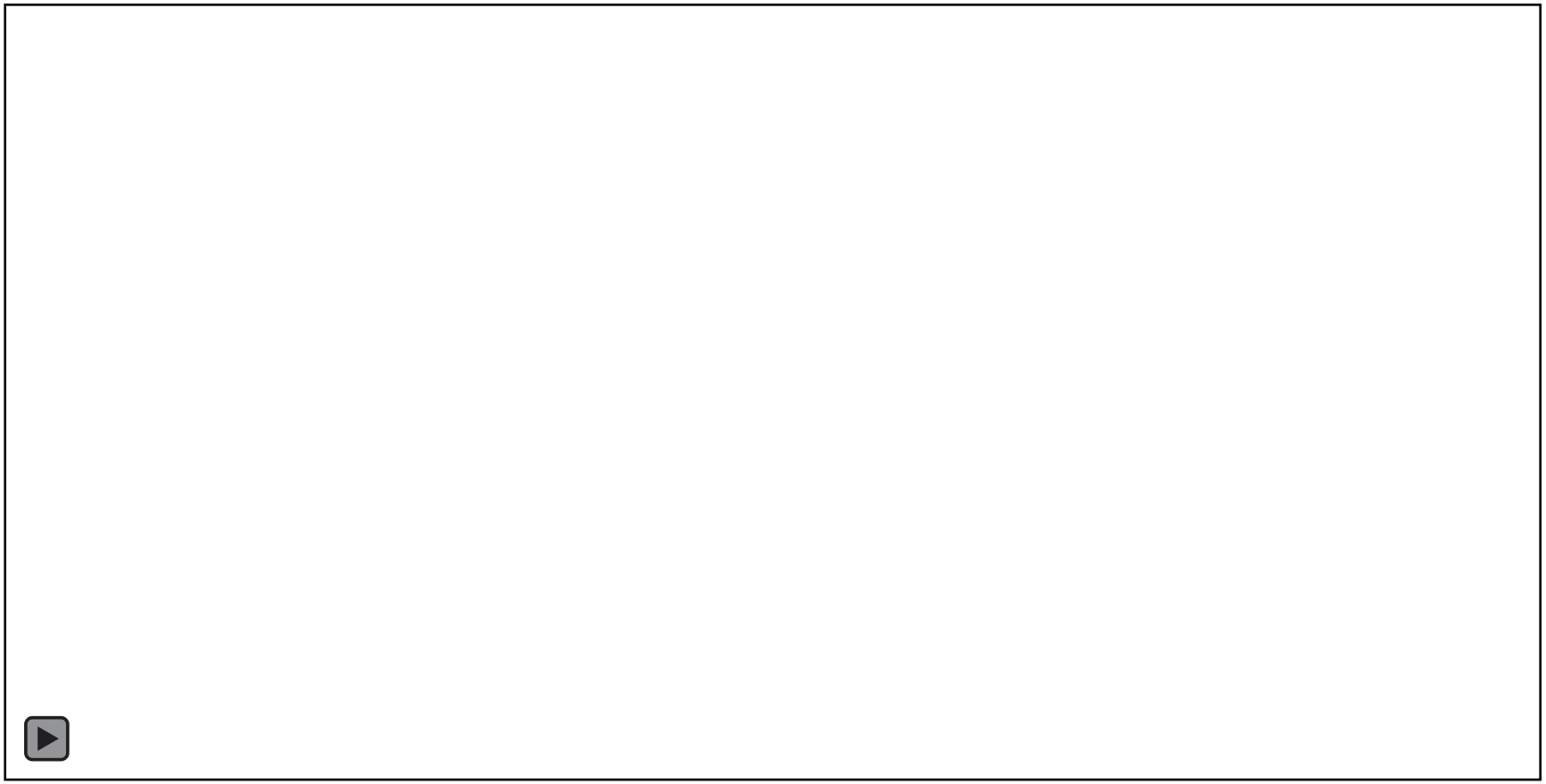
Identificazione automatica ed in real time di una sorgente...

Man Made Gross Count ratio:

$$MMGC = \frac{LEW}{HEW}$$



Giovedì 17 ottobre – ore 9.53 …



Visitate il nostro sito!

www.fe.infn.it/radioactivity

Un patrimonio per tutti

www.fe.infn.it/italrad

Un patrimonio pubblico

Place: romano d'ezzelino (VEN_R_0207)

Formation: calcari grigi

Lithology: calcare

Total activity concentration and Isotopic abundances			
Total Activity Bq/kg	K %	eU µg/g	eTh µg/g
21.30 ± 9.32	0.03 ± 0.03	0.48 ± 0.08	0.78 ± 0.78

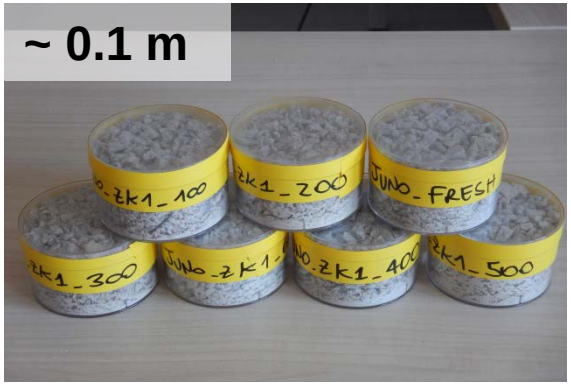
Outcroping

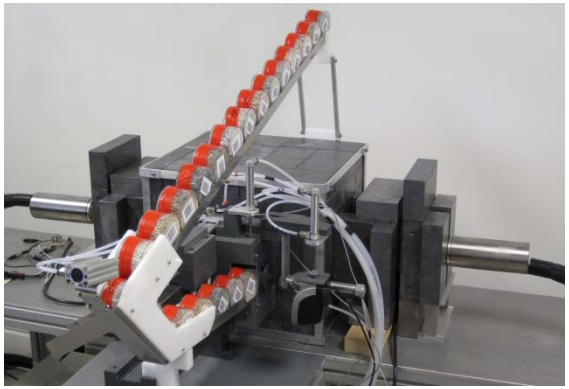
Data SIO,

Google earth

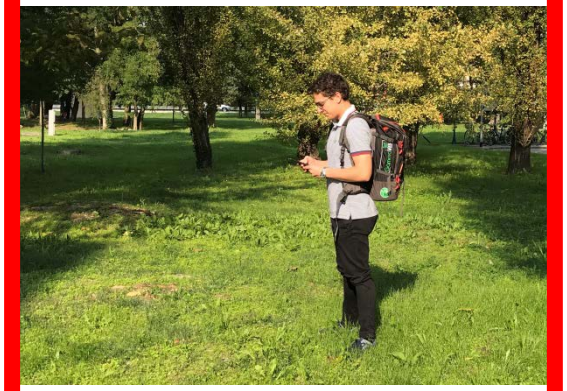
Dove lavoriamo?

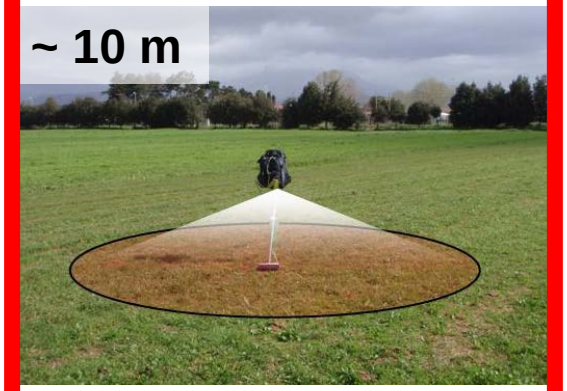
… in lab



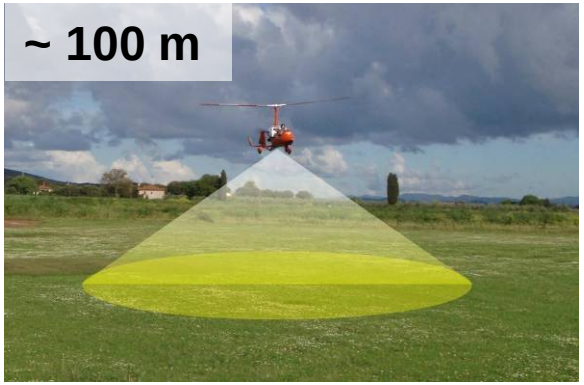


… in situ

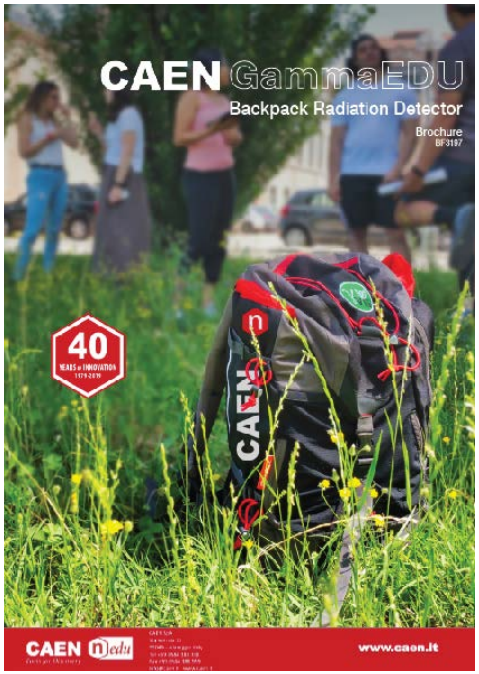




… airborne



GammaEDU: uno strumento moderno a portata di studente



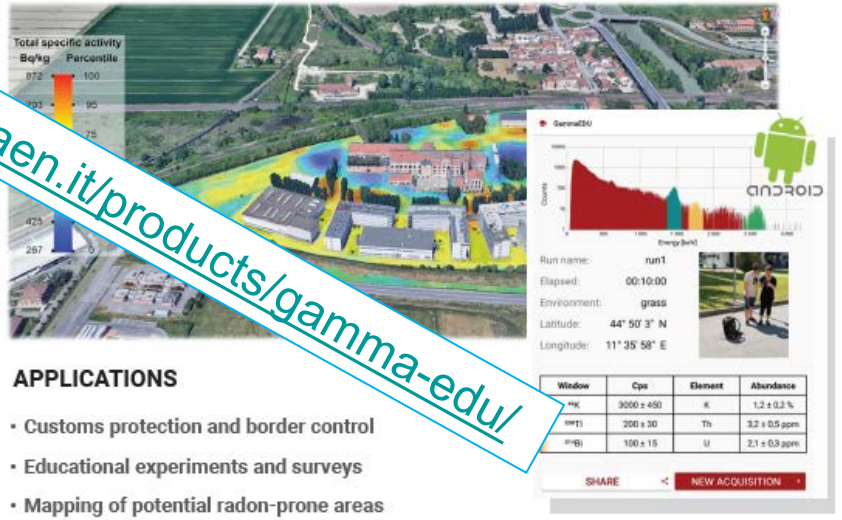
Richieste	Soluzioni
Portatile	1 L NaI(Tl) detector ~ 4 kg all'interno di uno zaino
Veloce	Tempo di acquisizione standard: 5 - 10 min
Risposta in real time	Tablet con applicazione Android
Sensori accessori	Bluetooth, GPS
Risoluzione energetica	Risoluzione energetica 7% (662 keV ^{137}Cs)

Android App **GammaEDU** for real-time analysis

The measurement can be run with a tablet in just one click!

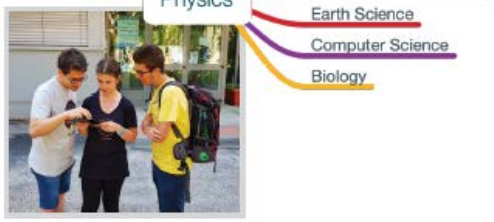
With the GammaEdu Android application the students can acquire and analyze in real time a **g-ray spectrum** to get the K, U and Th abundances, keep note of the surrounding environment, take the **GPS coordinates** and shoot a picture of the on-going measurement. The data are saved in a **kmz file** ready to be visualized on **Google Earth** and shared on **Google Drive** for producing a radioactivity map of the area.

www.caen.it/products/gamma-edu/

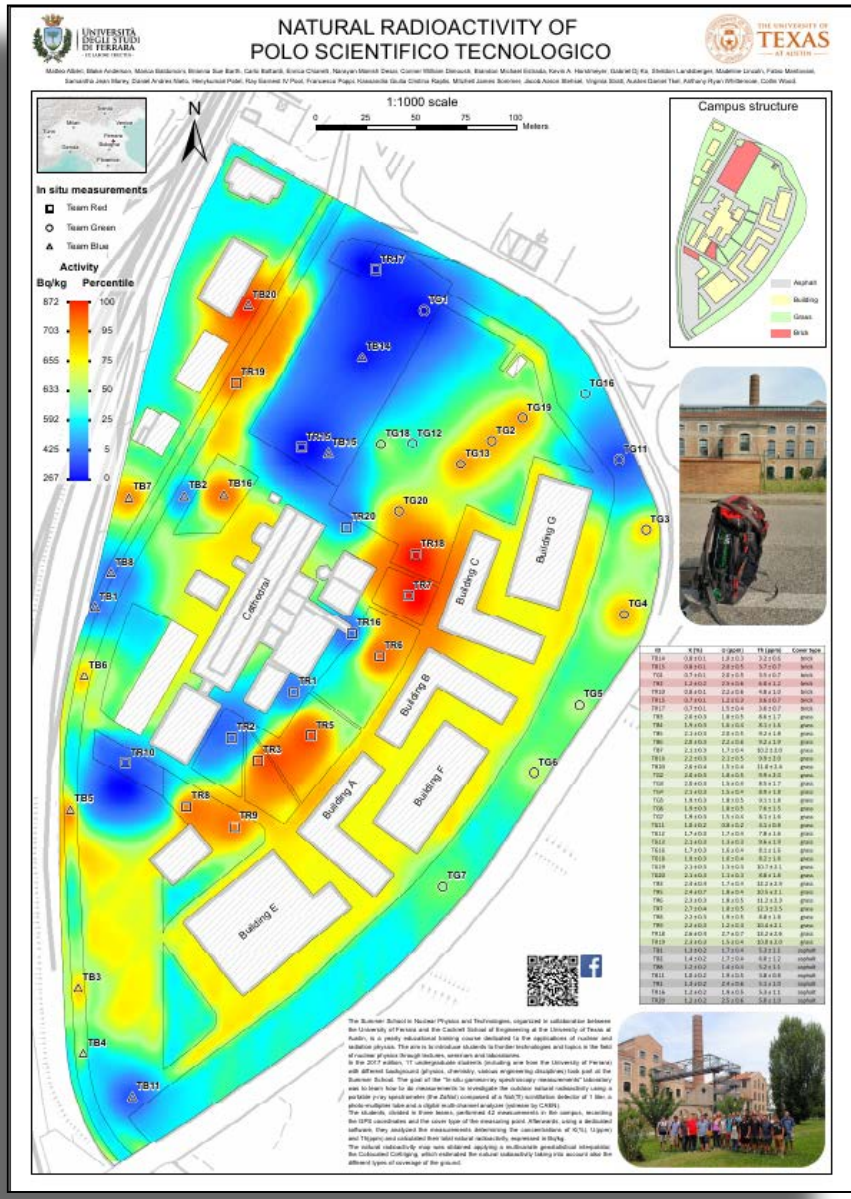


APPLICATIONS

- Customs protection and border control
- Educational experiments and surveys
- Mapping of potential radon-prone areas
- Environmental monitoring in land field
- Geochemical and mineral exploration
- Scenario of emergency services
- Homeland security



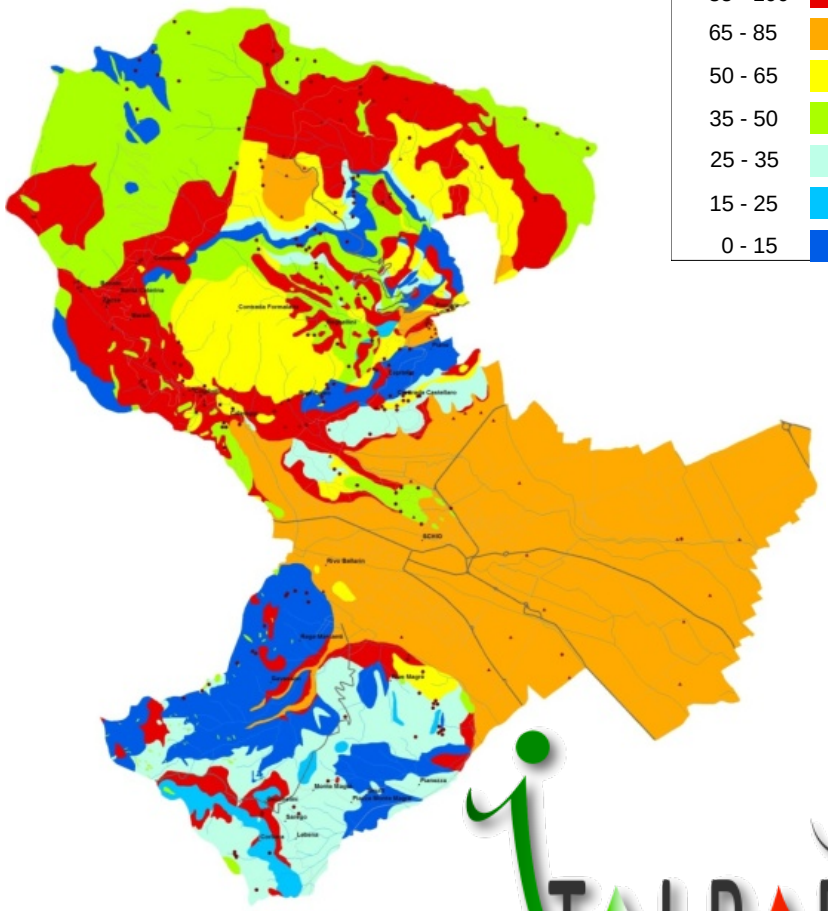
Studenti protagonisti della ricerca



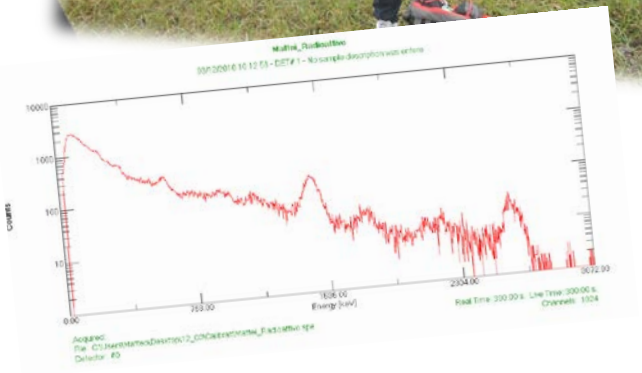
Conoscenza del proprio territorio

Mappa della radioattività del comune di Schio

Percentili	U (ppm)
85 - 100	5.2 - 29.0
65 - 85	3.5 - 5.2
50 - 65	2.8 - 3.5
35 - 50	1.8 - 2.8
25 - 35	1.3 - 1.8
15 - 25	0.9 - 1.3
0 - 15	0.2 - 0.9



Italian Radioactivity Project



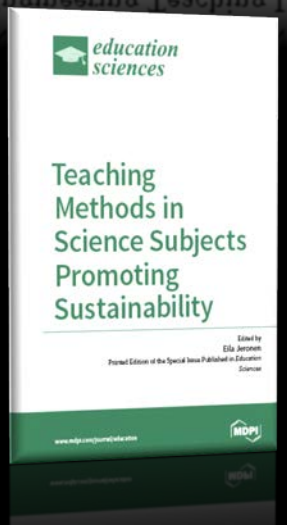
Misura	K [%]			U [ppm]			Th [ppm]			Attività [Bq/kg]		
classe	2.63	±	0.04	3.99	±	0.13	12.2	±	0.2	923	±	14
Eleonora_bella	1.52	±	0.03	2.36	±	0.09	5.9	±	0.2	527	±	10
mais-verdura	2.04	±	0.03	2.92	±	0.12	8.7	±	0.2	711	±	13
rachele_special	1.60	±	0.03	2.40	±	0.10	6.4	±	0.2	557	±	10
Rivela-Mais	1.48	±	0.03	2.71	±	0.10	5.5	±	0.2	520	±	10

education sciences

Training Engineers to be Ghostbusters: Hunting for the Spectral Environmental Radioactivity

M Albéri[1,2], M Baldoncini[1,2], C Bottardi[1,2], E Chiarelli[3], S Landsberger[4], K G C Raptis[3], V Strati[3] and F Mantovani[1,2]

[1] Department of Physics and Earth Sciences, University of Ferrara, Via Saragat, 1, 44100 Ferrara, Italy
[2] Ferrara Section of the National Institute of Nuclear Physics, Via Saragat, 1, 44100 Ferrara, Italy
[3] Legnaro National Laboratory, National Institute of Nuclear Physics, Via dell'Università 2, 35020 Legnaro (Padova), Italy
[4] Nuclear Engineering Teaching Lab, University of Texas, Pickle Research Campus R-9000, Austin, TX 78712, USA



www.fe.infn.it/radioactivity

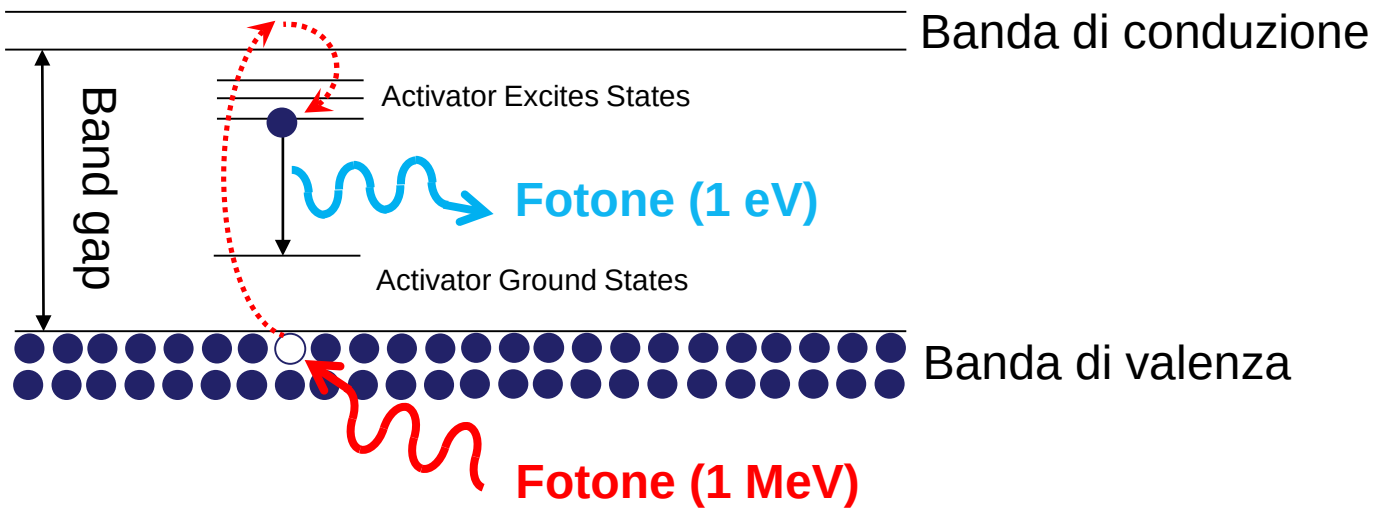
Lo scintillatore inorganico NaI(Tl)

Rivelatore a scintillazione NaI: un raggio gamma attraversa il cristallo (sale) ed emette un flash di luce visibile.

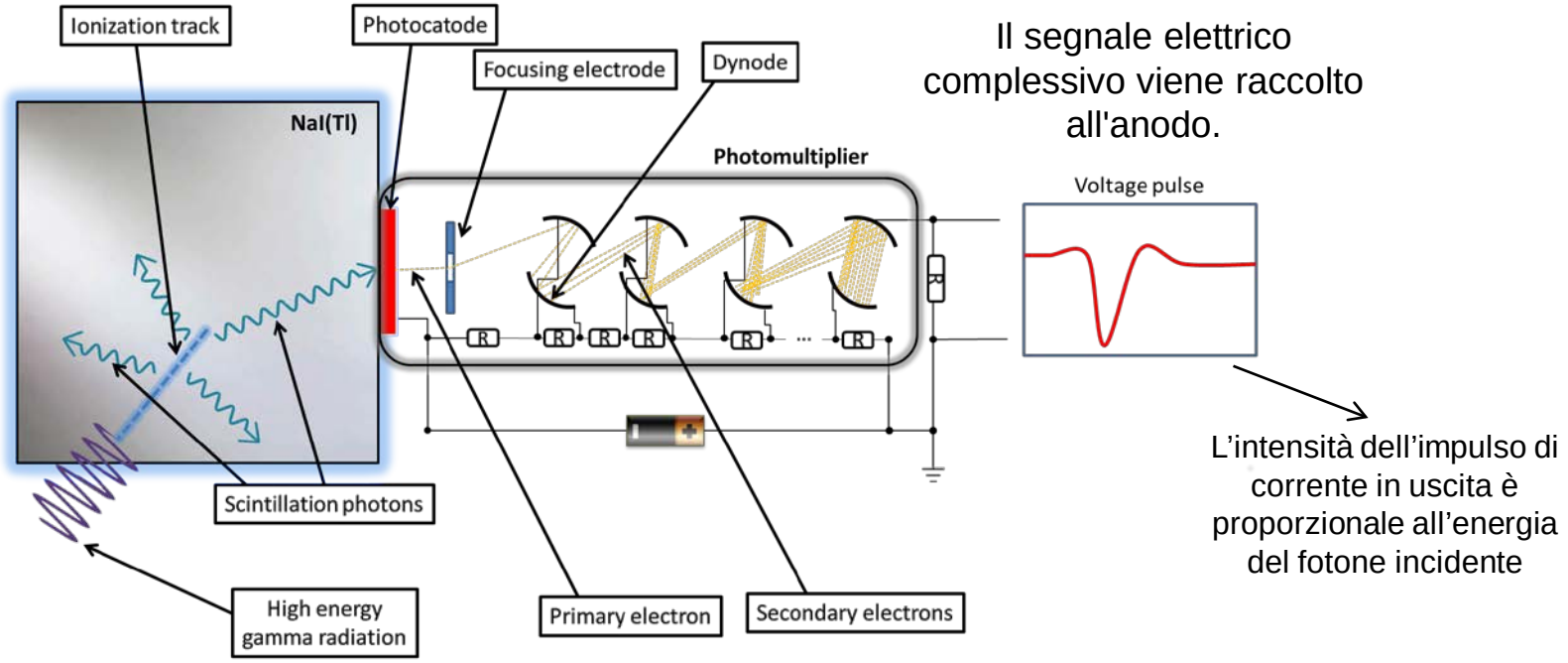
eccellente resa luminosa: circa 38 000 fotoni/MeV

Il meccanismo di scintillazione dipende dallo stato energetico determinato dalla struttura cristallina del materiale

NaI(Tl) – ioduro di sodio attivato con tallio (0.2%)



Dai fotoni alla corrente elettrica: il fotomoltiplicatore

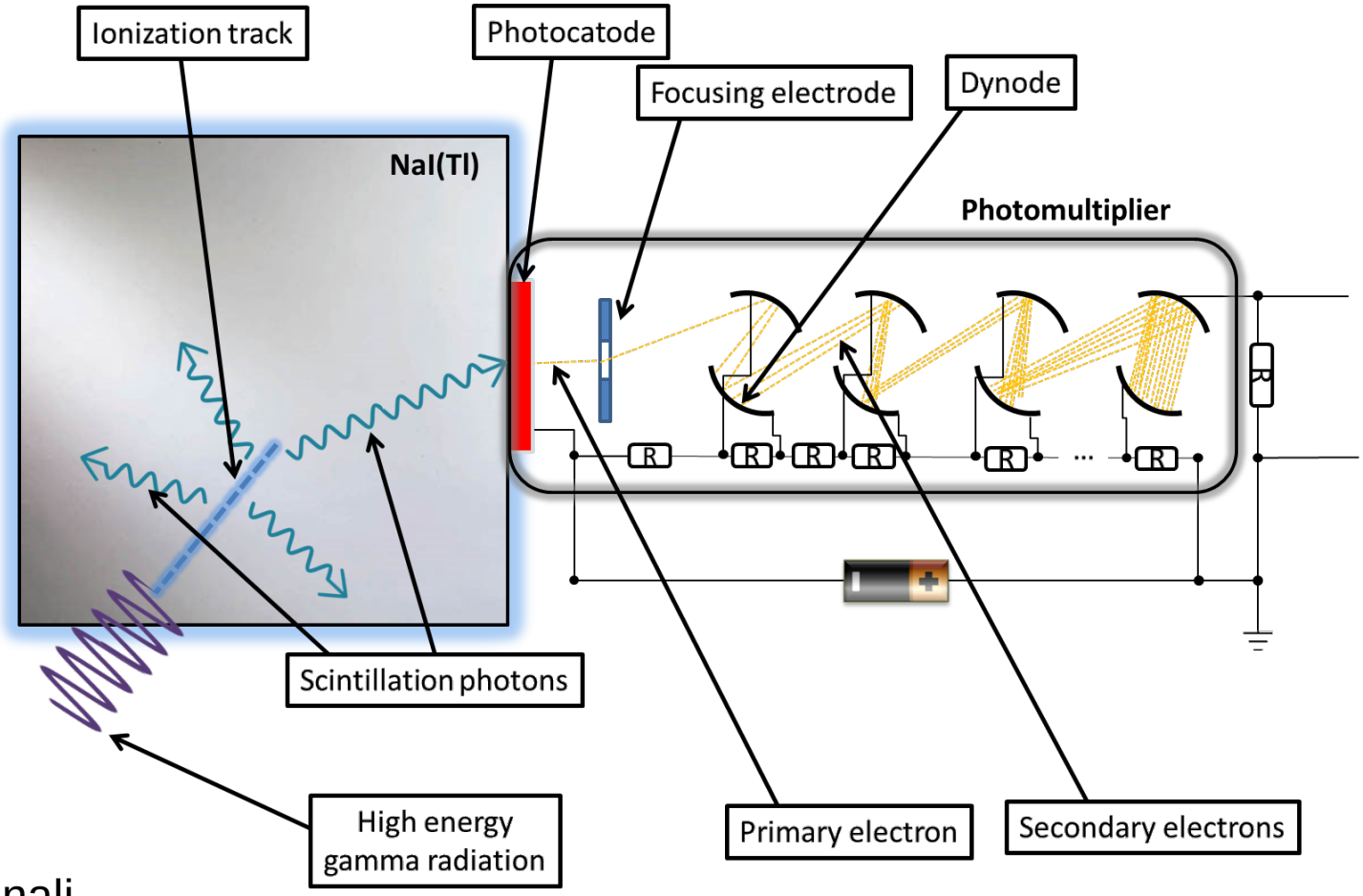


- **fotocatodo:** è uno strato di materiale fotosensibile che ha la funzione di convertire, per effetto fotoelettrico, i fotoni ottici incidenti in elettroni (**efficienza quantica** numero di fotoelettroni emessi/numero di fotoni incidenti **20-30%**)

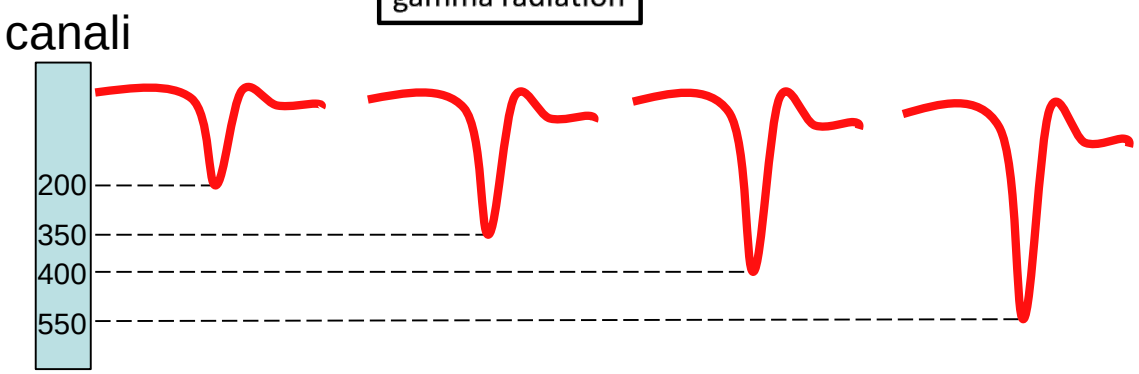
- **ottica di raccolta:** dopo essere stati emessi dal fotocatodo, i fotoelettroni devono essere raccolti e portati senza perdite al primo stadio di moltiplicazione

- **sezione moltiplicatrice:** gli elettroni emessi dal fotocatodo vengono guidati, tramite un opportuno campo elettrostatico, attraverso una struttura di elettrodi, i **dinodi**, dove ciascun elettrone incidente dà origine a più elettroni tramite un meccanismo di emissione secondaria. I dinodi sono tenuti ad una differenza di potenziale accelerante (positiva), in modo da attrarre gli elettroni provenienti dal dinodo precedente.

Dai fotoni alla corrente elettrica: il fotomoltiplicatore



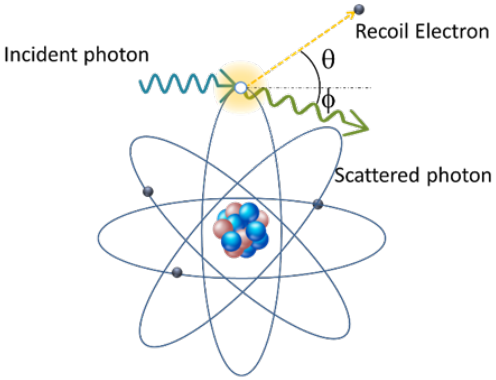
L'intensità dell'impulso di corrente in uscita è proporzionale all'energia del fotone incidente



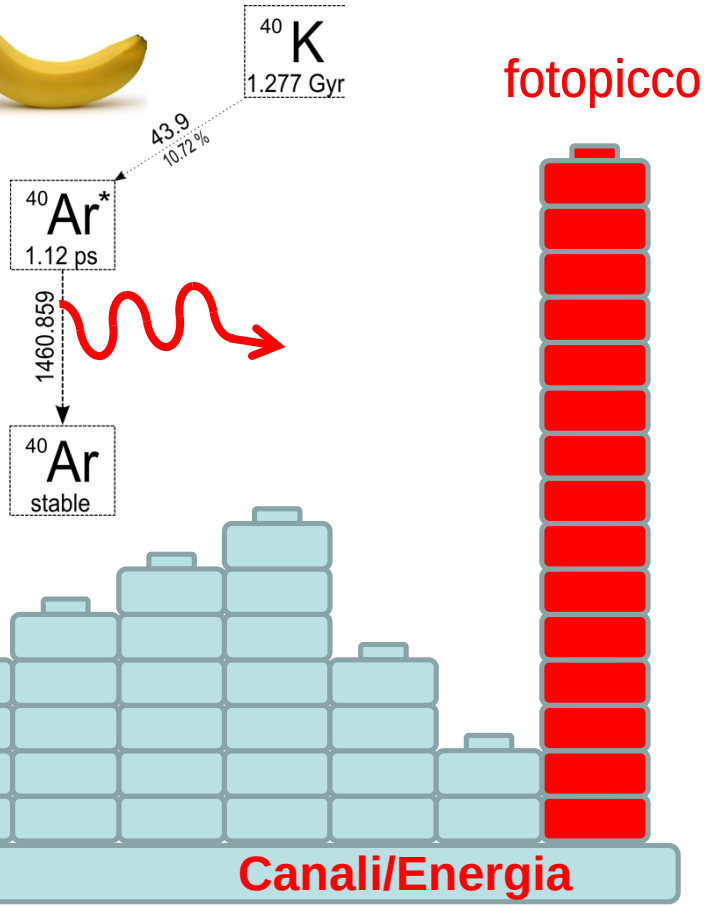
Il canale di acquisizione è proporzionale all'energia dei fotoni incidenti

Lo spettro γ: caratteristiche principali

Tutti i fotoni, indipendentemente dal modo di interazione, alla fine depositeranno tutta l'energia nel rivelatore: nello spettro si formano gli eventi del ***fotopicco*** (photopeak o full energy peak) in corrispondenza dell'energia del fotone.

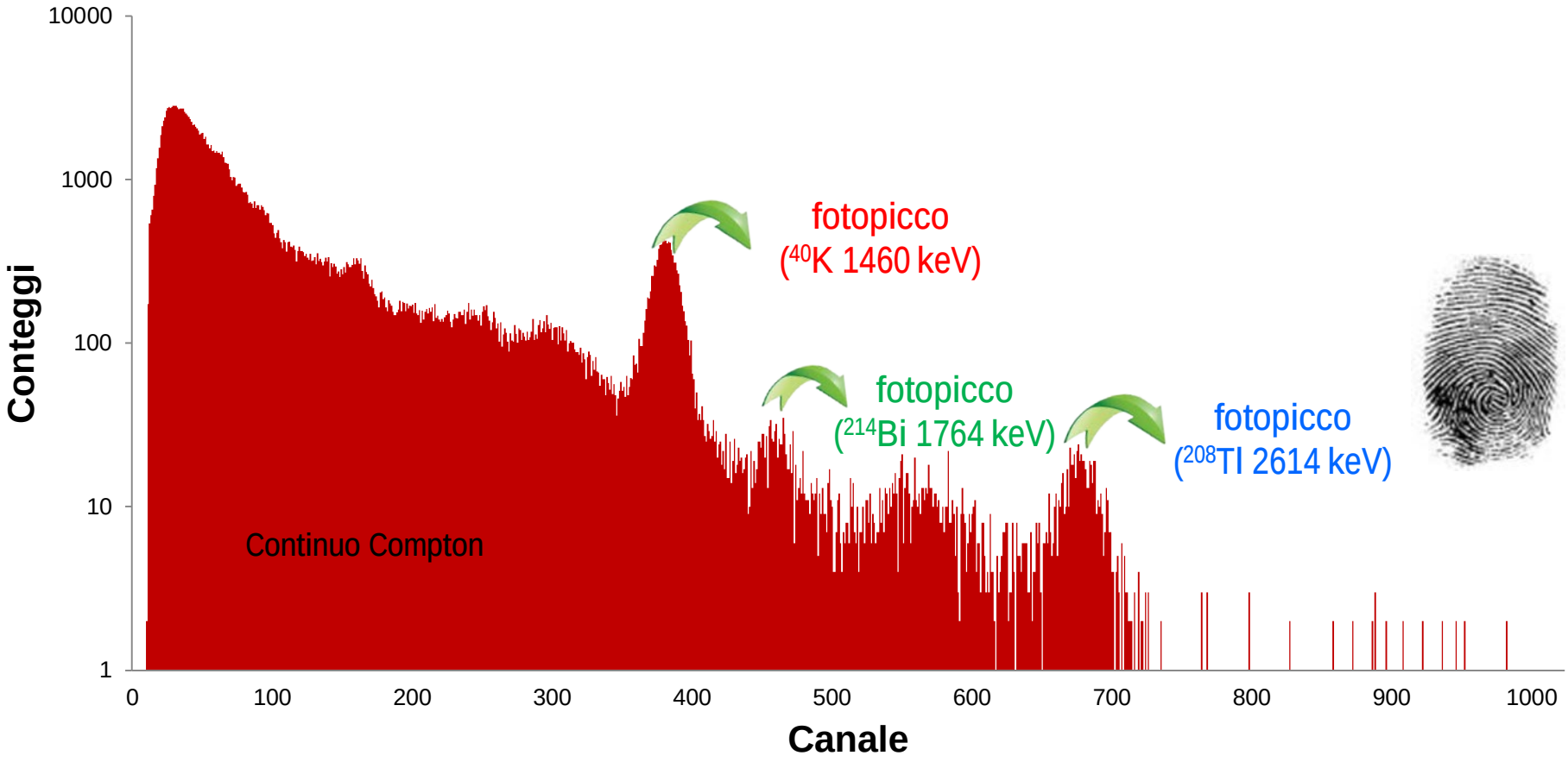


In un rivelatore reale i fotoni che escono dopo aver subito un 'Compton scattering' creano eventi continui '***Compton continuum***' con energia minore del fotone incidente.



SPETTRO E' L'ISTOGRAMMA DEGLI EVENTI CLASSIFICATI RISPETTO AL CANALE ENERGETICO

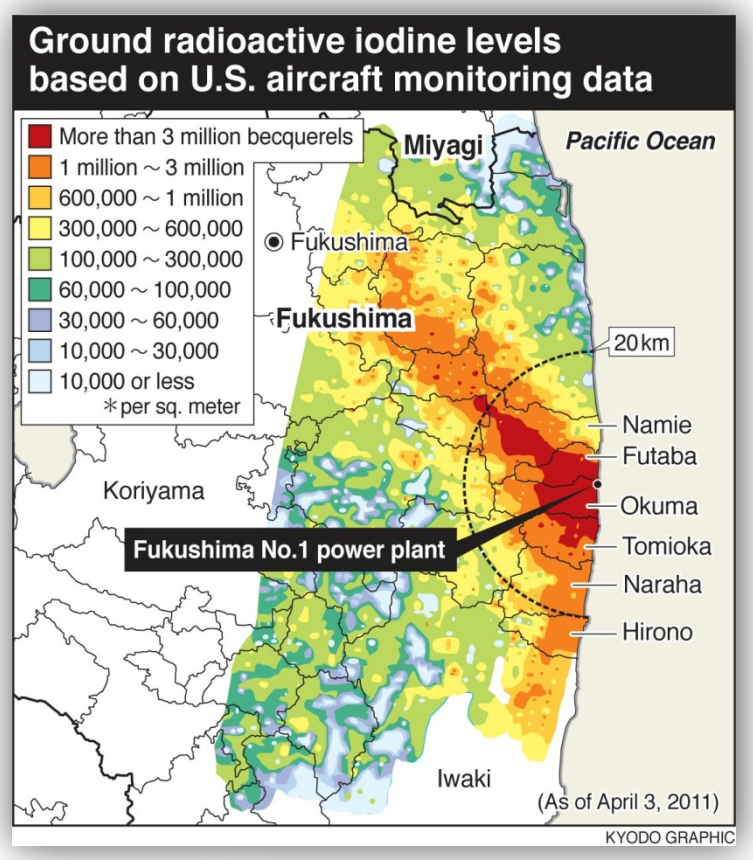
I ragazzi imparano ad interpretare uno spettro gamma!

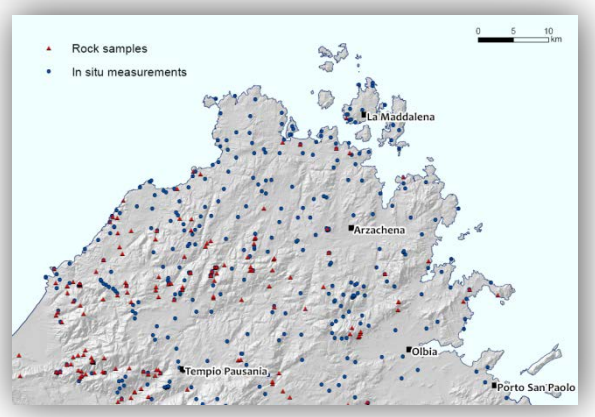


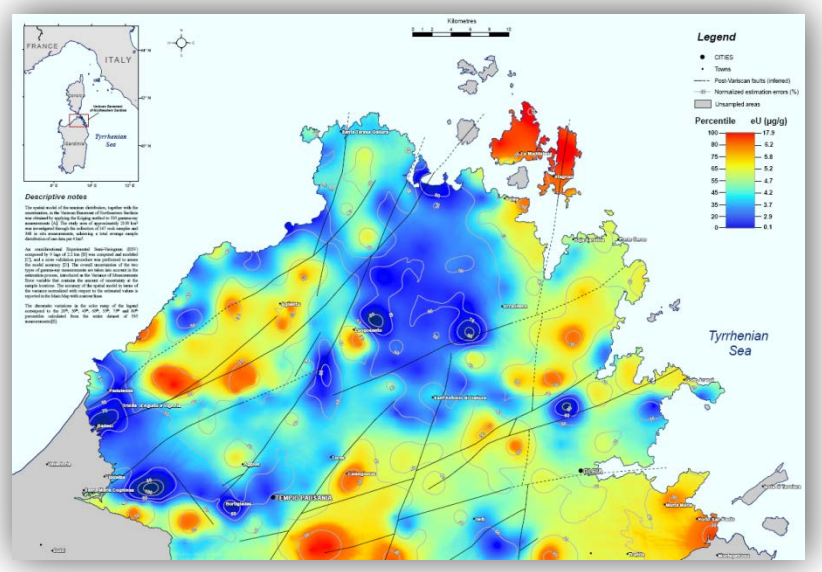
Misuriamo la radioattività ambientale con GammaEDU

- **Metodologie di monitoraggio della radioattività ambientale**
- **Misure di radioattività in situ**
- **Realizzazione di misure in situ con un rivelatore di spettroscopia gamma portatile**
- **Analisi di uno spettro**
- **Calcolo dell'attività specifica di ciascuna misura**

Spettroscopia γ in situ



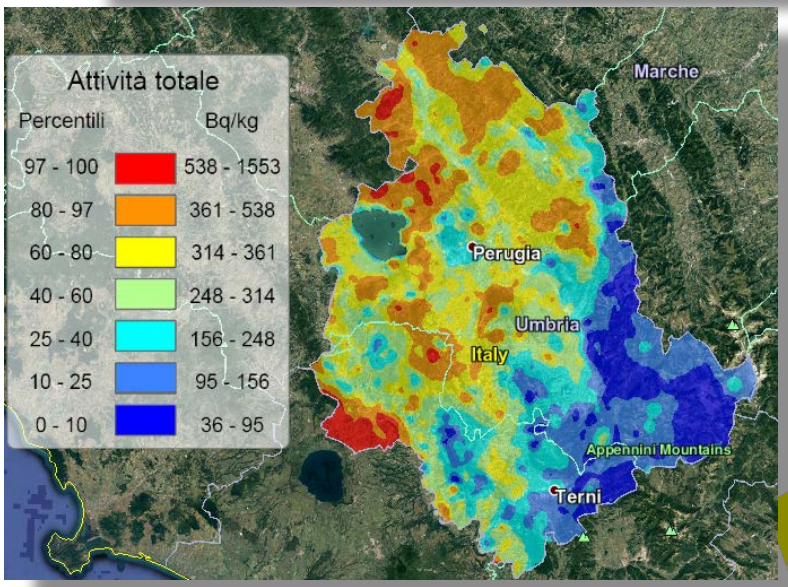


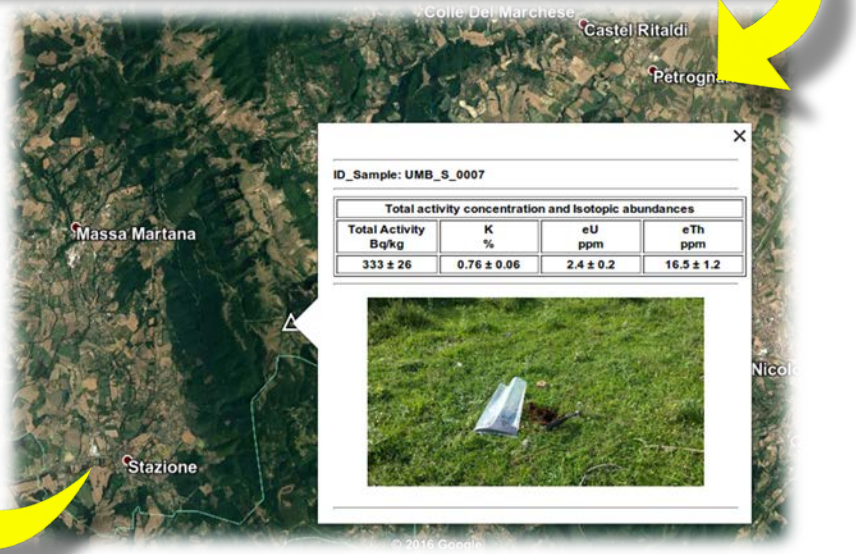


Obiettivi dell'esperienza

- ✓ Imparare a pianificare le misure in situ con uno spettrometro gamma
- ✓ Misurare le abbondanze e l'attività specifica dei radionuclidi
- ✓ Trasferire i dati su una piattaforma webGIS
- ✓ Interpretare criticamente i risultati

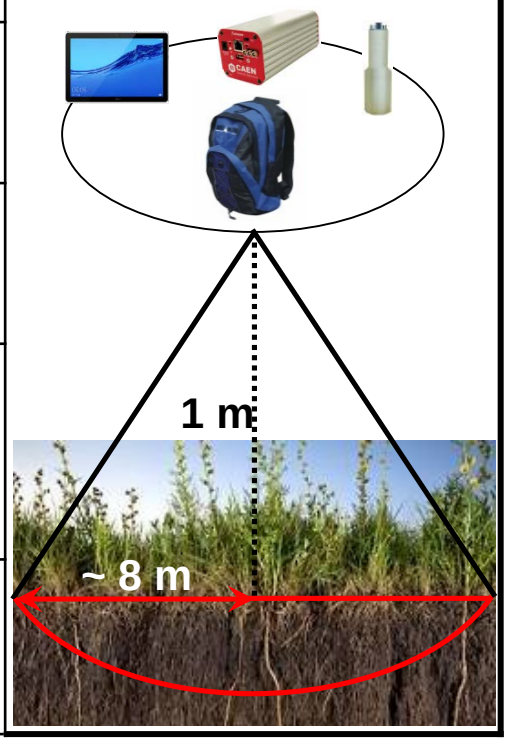
```
1 UMB_S_0001;43.450721;12.155075;690;45;1.95;0.12;2.9;0.3;10.8;0.9;Foto/UMB_S_0001.jpg
2 UMB_S_0002;43.307085;12.216802;717;47;2.01;0.13;3.0;0.3;12.4;1.0;Foto/UMB_S_0002.jpg
3 UMB_S_0003;42.611024;12.433069;625;42;1.61;0.10;3.5;0.3;19.3;1.4;Foto/UMB_S_0003.jpg
```



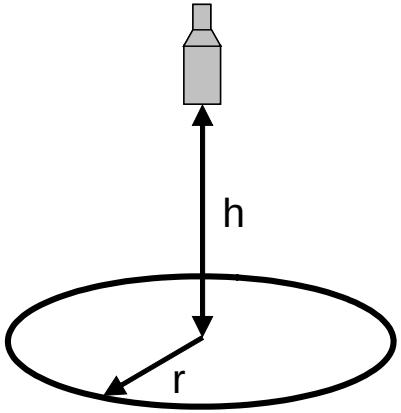


Spettroscopia gamma in situ con detectors NaI(Tl)

GammaEDU è uno strumento portatile dedicato alla determinazione quantitativa in-situ della concentrazione di radionuclidi che emettono radiazioni gamma.

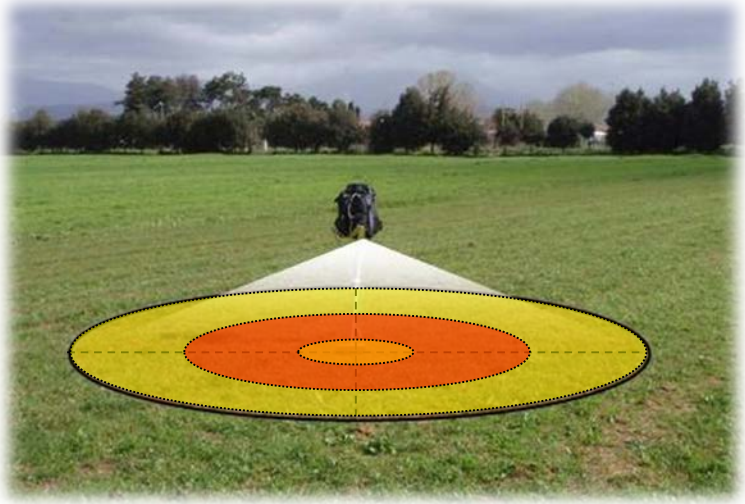
Caratteristiche	Descrizione	Uso
Portatile	Rilevatore 1L NaI (Tl) ~ 4 kg configurato in uno zaino	
Veloce	Tempo di acquisizione standard di 5 minuti	
Area di investigazione	Il campo visivo ad 1 m di altezza ha un raggio di 20 m (~ 95%)	
Autonomia	MCA integrato da 2048 canali (γ–Stream)	
Feedback in real-time	Tablet o Smartphone	

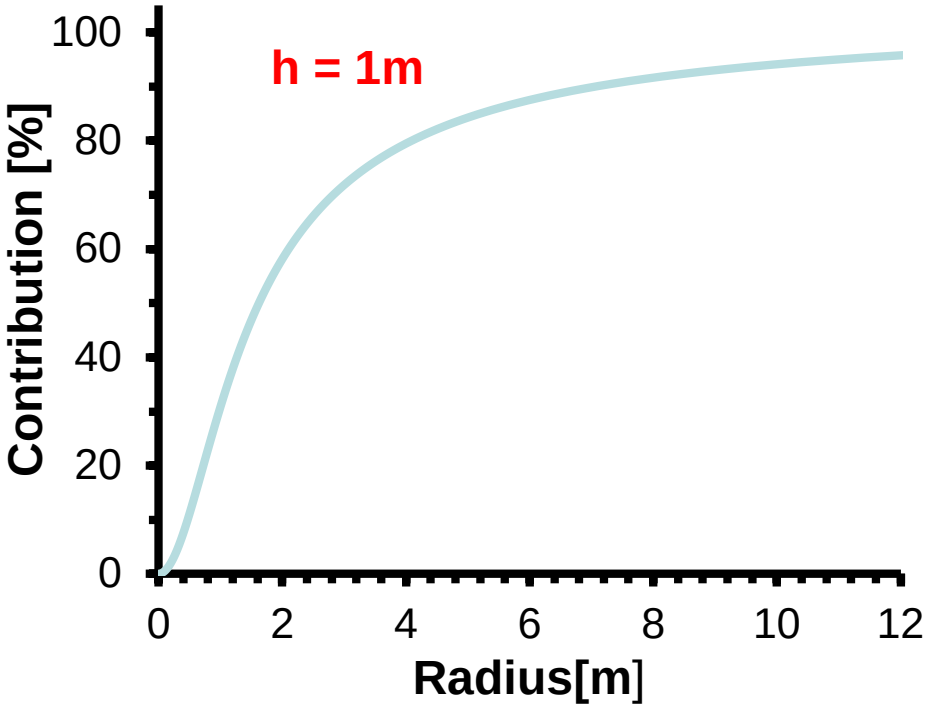
Il campo di visione di un NaI(Tl)

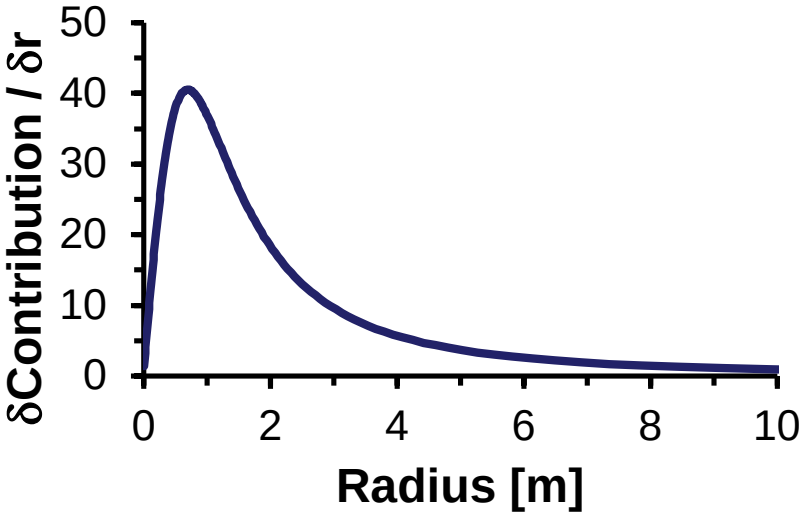


Se il rilevatore è posizionato ad un'altezza **h** dalla sorgente, il 90% del segnale proviene da un'area circolare omogenea di raggio **r**

h (m)	0.1	0.3	0.5	0.8	1.0
r (m)	0.7	2.2	3.5	6	7.5







Scelta dell'area adatta alle misure

Il punto in cui eseguire una misurazione dev'essere collocato in un'area piana avente un raggio di almeno 10 m

Perché?

A causa della geometria dell'irraggiamento!

Per ottenere una misurazione affidabile, è necessario attenersi scrupolosamente alle condizioni di calibrazione, altrimenti è necessario applicare delle correzioni

Cosa ci serve?

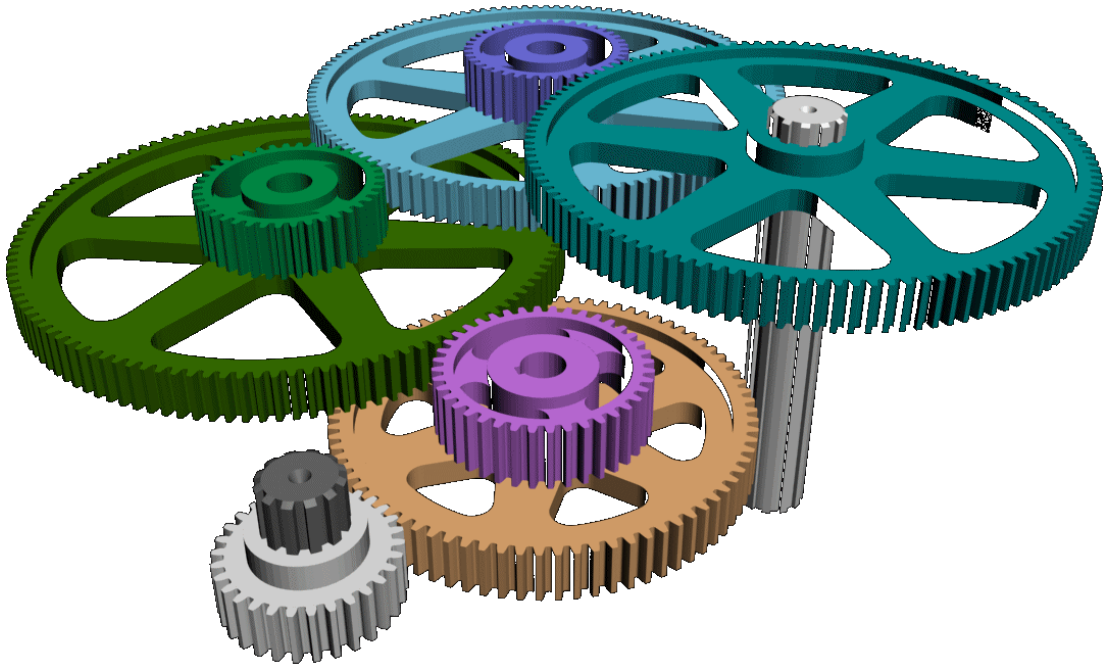
1) Zaino + detector

2) Tablet con applicazione GammaEDU

3) Smartphone con i punti GPS

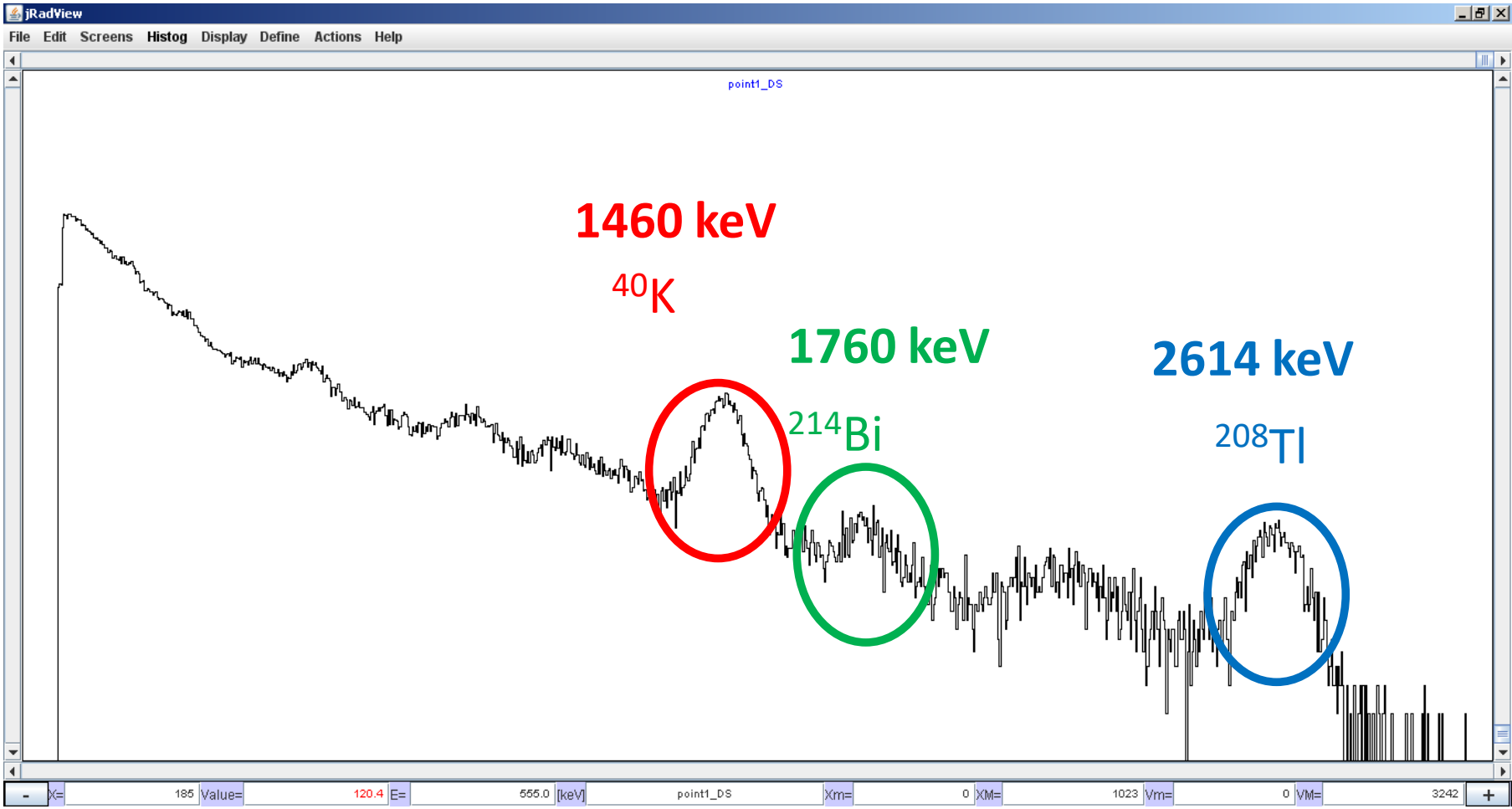
4) Scheda da compilare

Data processing…..

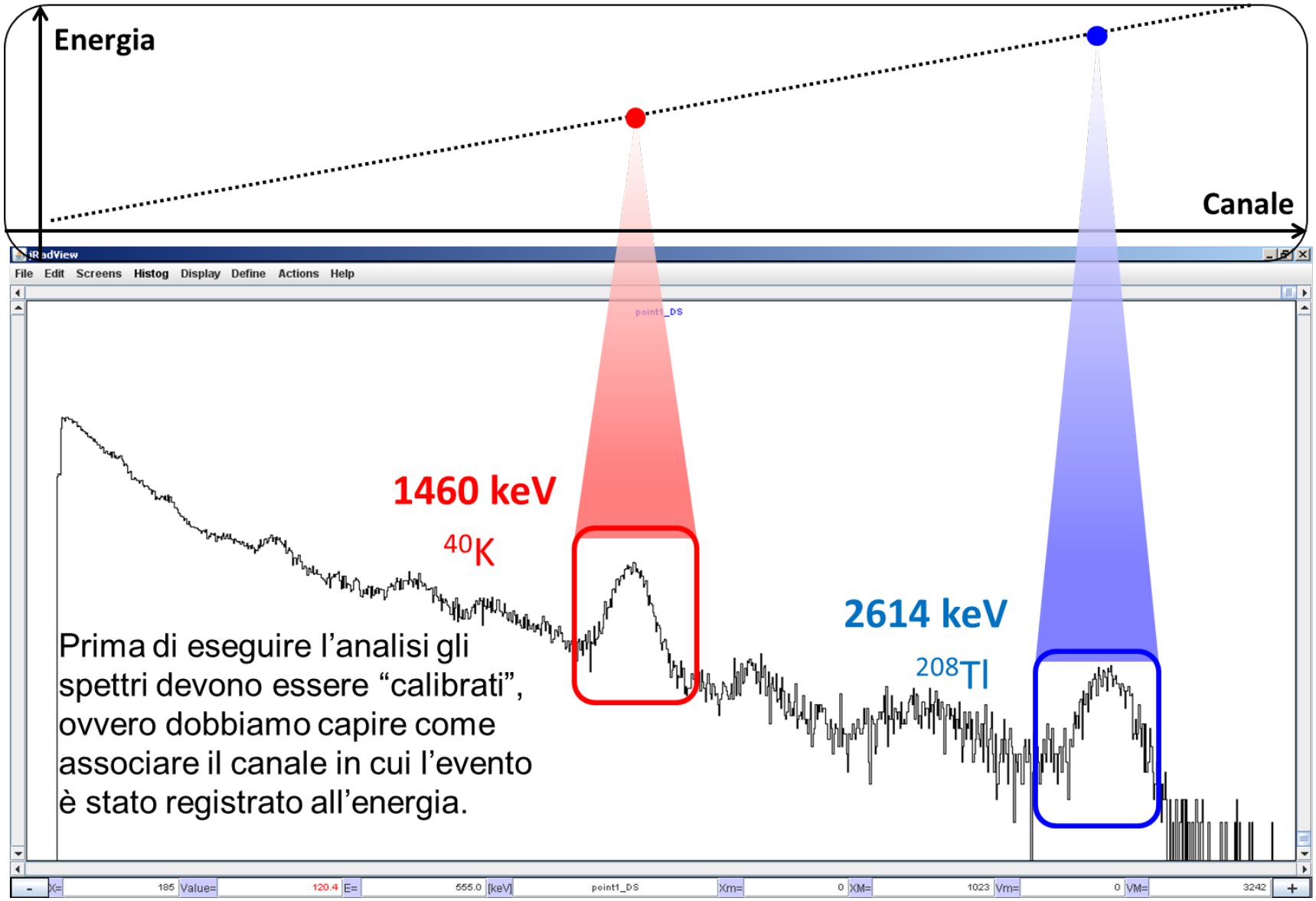


Che informazioni si ottengono da uno spettro gamma?

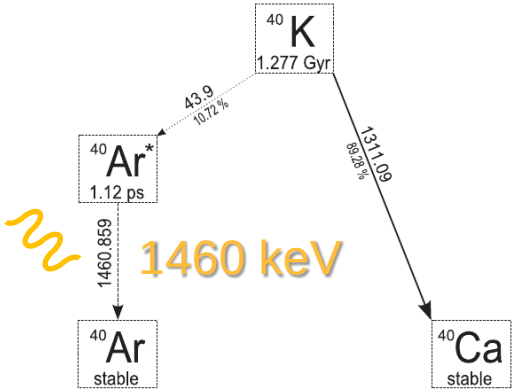
In uno spettro gamma si riconoscono i **FOTOPICCHI**, che corrispondono ai fotoni che arrivano al rivelatore con **energia uguale a quella con cui sono stati emessi** e che **hanno depositato tutta l'energia nel rivelatore**

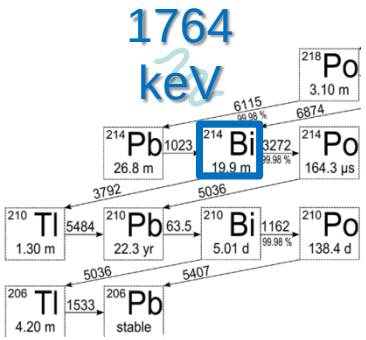


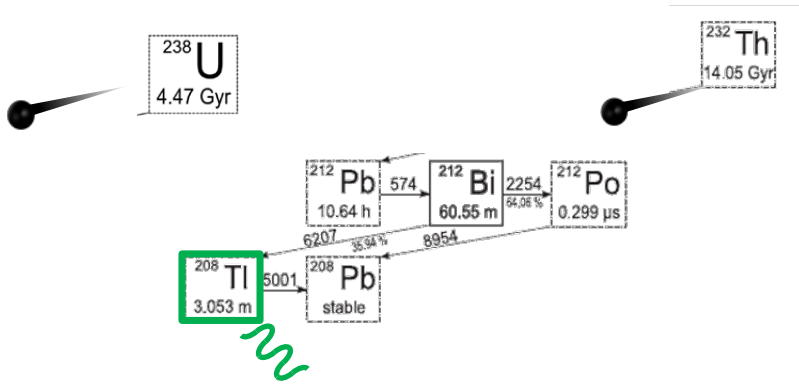
A quale intervallo di energia corrisponde un canale?



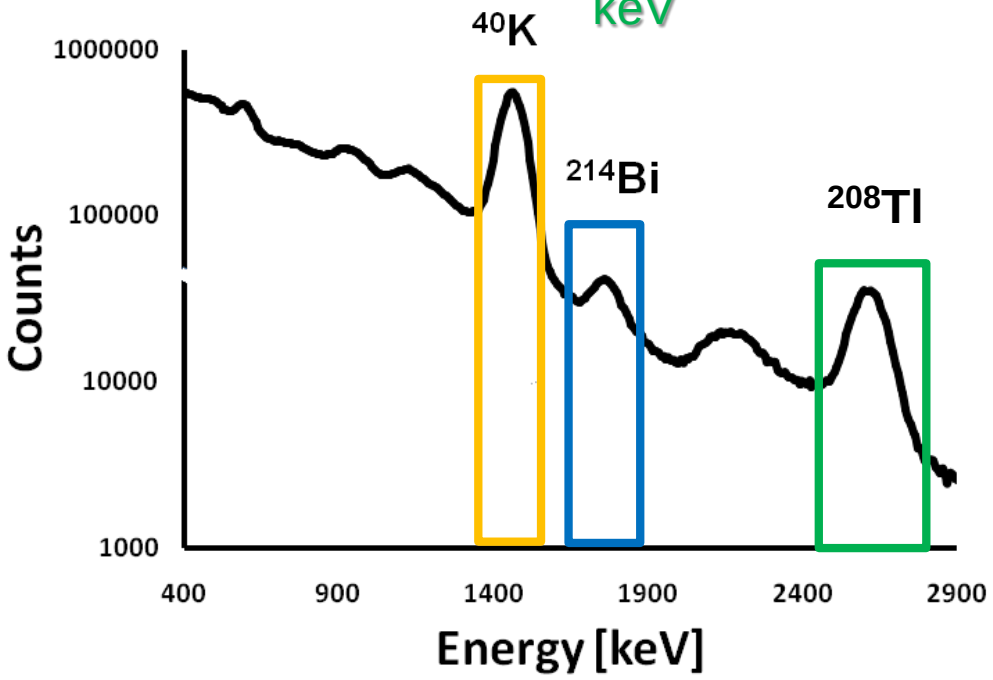
Region of interest (ROI)







Nuclide	ROI (keV)
^{40}K	1370-1570
^{214}Bi	1660-1860
^{208}Tl	2410-2810

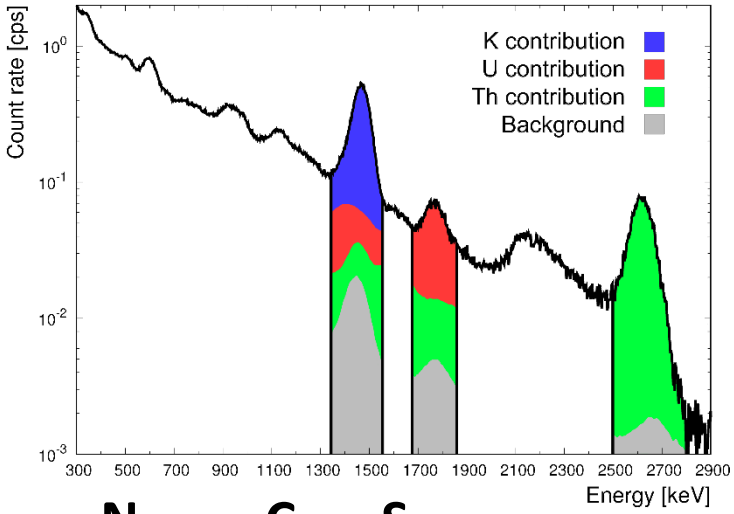


Count rate: numero di conteggi misurati per unità di tempo

$n_i = N_i/T$ [cps]

The Window Analysis Method (WAM)

The **Window Analysis Method (WAM)**, suggested by the International Atomic energy Agency **(IAEA)***, looks to count rates recorded in **energy windows** associated to the ^{40}K photopeak and in the most prominent photopeaks occurring in the ^{238}U (^{214}Bi) and ^{232}Th (^{208}Tl) decay chains



Element	Radionuclide	Energy (keV)	Energy Window (keV)
^{40}K	^{40}K	1460	1370-1570
eU	^{214}Bi	1765	1660-1860
eTh	^{208}Tl	2614	2410-2810

Estimated eU and eTh abundances assume that the condition of secular equilibrium holds

$$N_{mx3} = C_{mx3} \cdot S_{3x3}$$

m = #sites, 3 = #isotopes

$$S = \begin{pmatrix} 122.48 & 0.00 & 0.00 \\ 9.98 & 11.42 & 0.22 \\ 1.95 & 1.64 & 5.00 \end{pmatrix}$$

The S matrix has a triangular shape:

The **upper triangle** is expected to have almost null elements

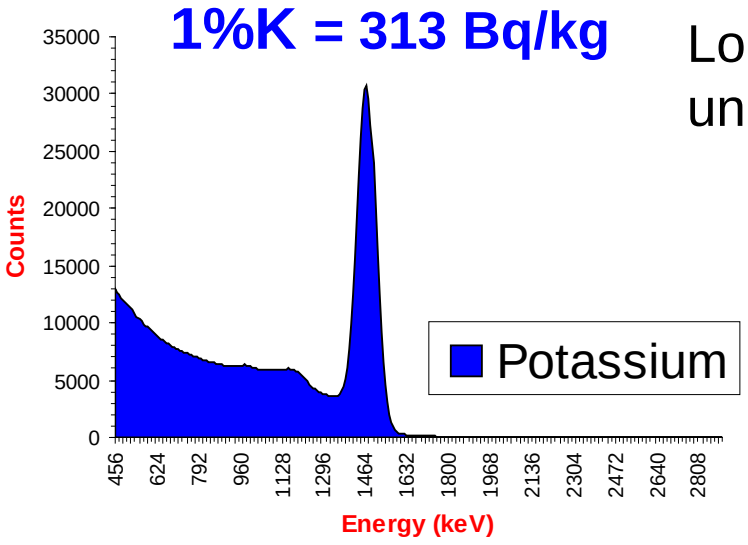
The **lower triangle** reflects the combined effect of Compton events and secondary photopeak events

The **vector of unknown concentrations C** can be computed from the background corrected count rates **N = N* - B** provided the inverse sensitivity matrix **S^{-1}**

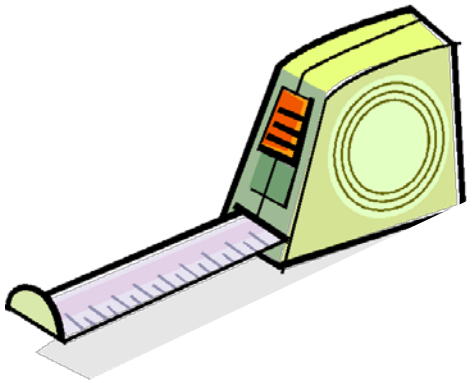
$$C = N \cdot S^{-1}$$

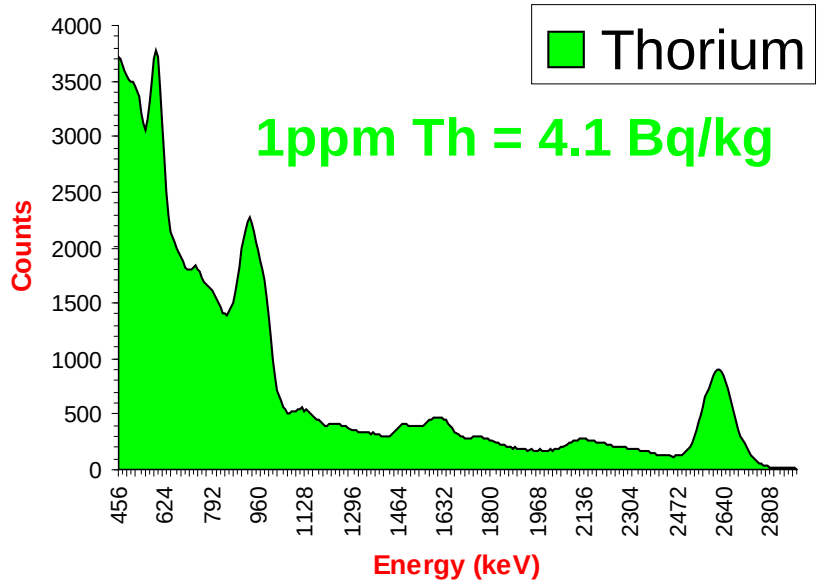
*Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003.

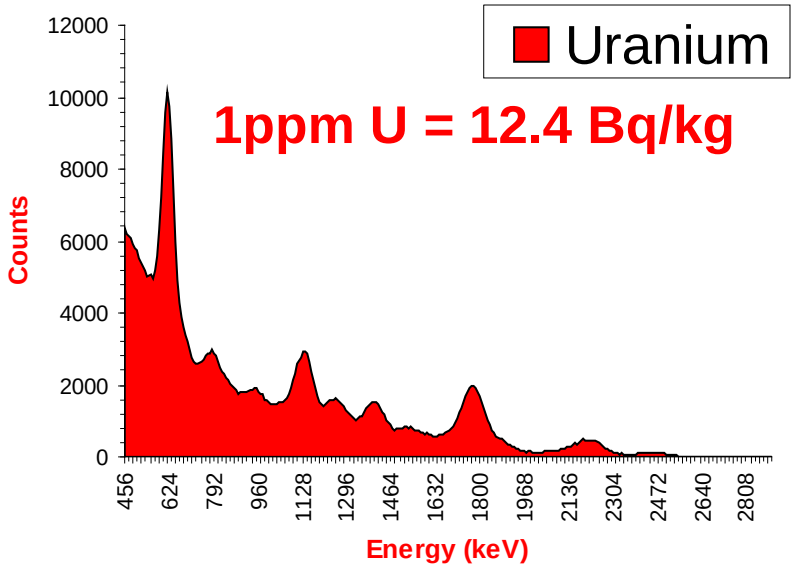
Full spectrum analysis



Lo spettro fondamentale è la nostra unità di misura

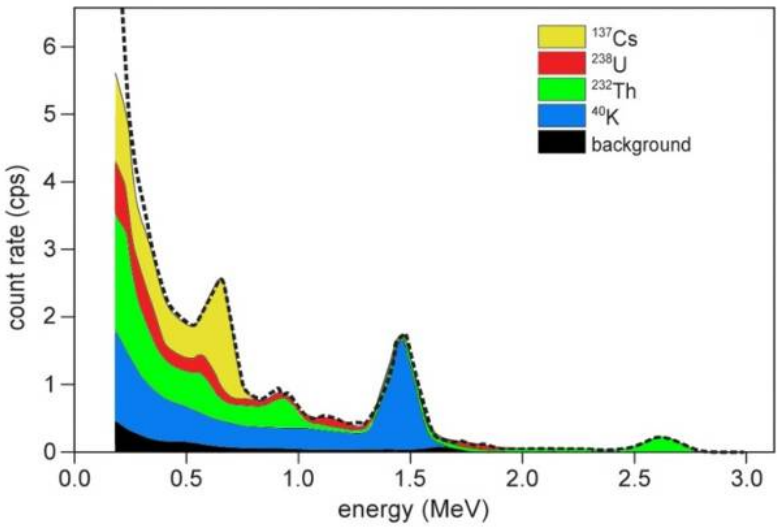






“Smontiamo” lo spettro

Spettro totale = somma degli spettri dei singoli radionuclidi

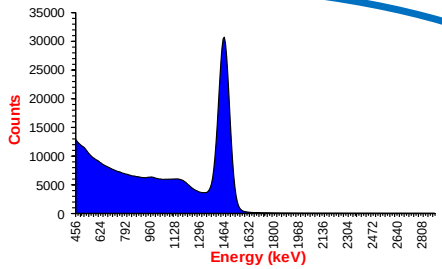


=

Spettro singolo radionuclide = spettro fondamentale × concentrazione

K

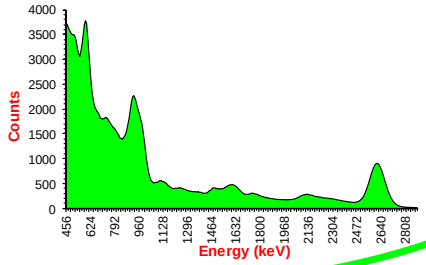
2.5 % x



+

Th

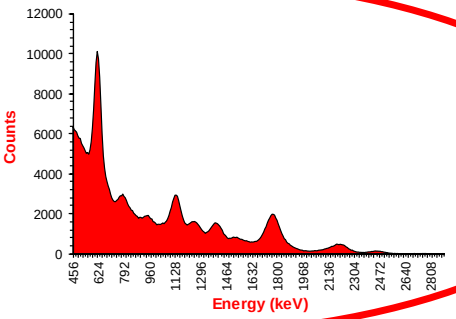
8.7 ppm x



+

U

4.5 ppm x



ANALIZZARE uno spettro significa ricostruire lo spettro misurato come somma degli spettri dei singoli radionuclidi per **determinare i valori di concentrazione.**

Cosa si intende per dose?

«Tutto è veleno: nulla esiste di non velenoso. Solo la dose fa in modo che il veleno non faccia effetto.»

Paracelso (Einsiedeln, 14 novembre 1493 – Salisburgo, 24 settembre 1541),

La radioattività interagisce con il nostro corpo

L'energia ceduta per unità di massa dalla radiazione ionizzante si chiama **dose D** (Gy = Gray = J/kg).

Per quantificare l'impatto sugli organismi della radiazione ionizzante bisogna tener conto del tipo di radiazione e della radiosensibilità degli organi.

La **dose equivalente H_T** (Sv = Sievert = J/kg) misura la dose assorbita dal tessuto T a secondo del "tipo" di radioattività:

$$H_T = w_R D$$

dove w_R è un "peso" per il "tipo" di radiazione

Tipo di rad.	W_R
e ; γ ; X	1
neutroni	5-20
alpha	20

La **dose efficace E** (Sv = Sievert = J/kg) è la somma ponderata delle dosi equivalenti per i vari tessuti: tiene conto della diversa radiosensibilità degli organi irraggiati:

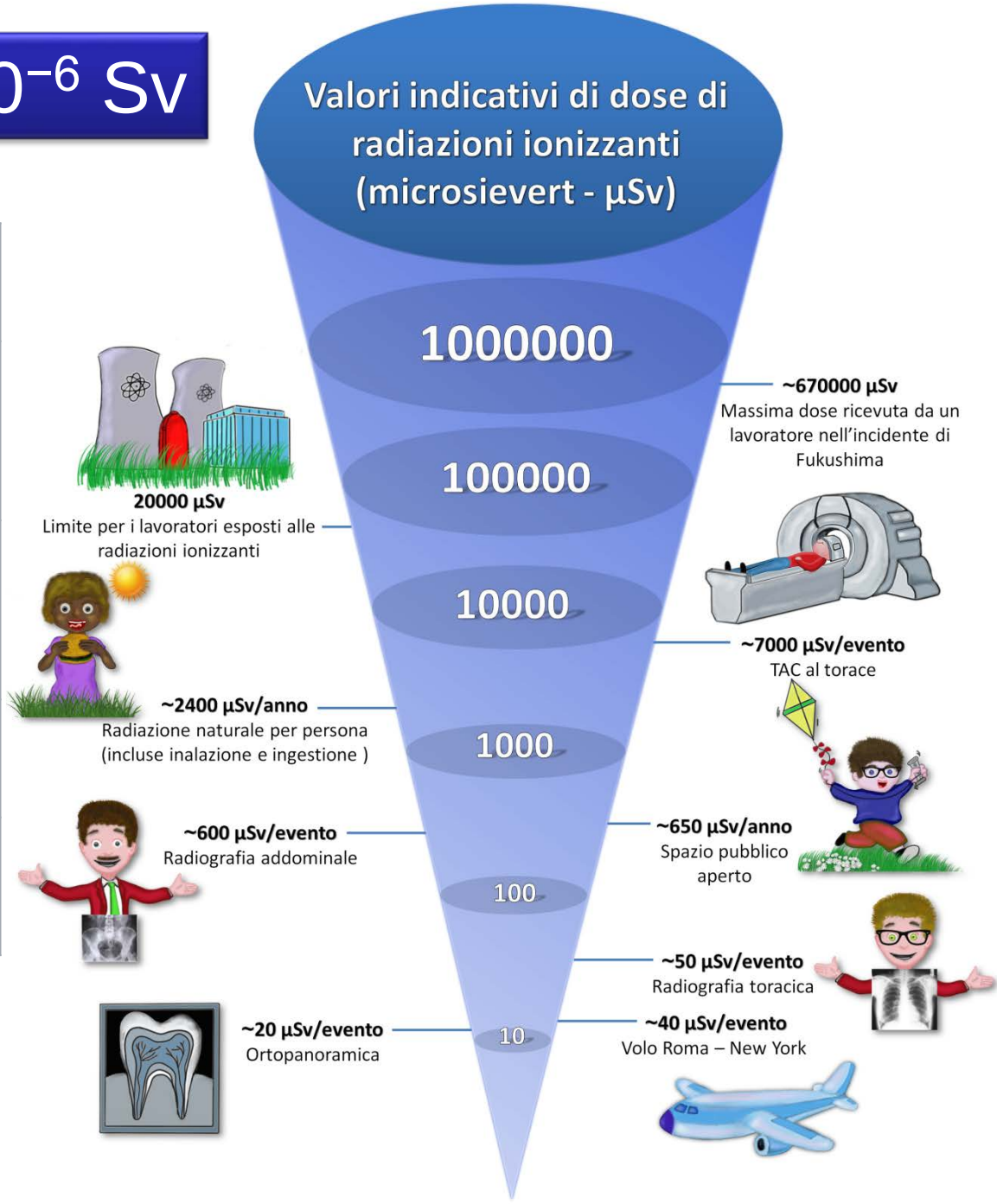
$$E = \sum_T w_T H_T$$

dove w_T è un "peso" per il "tipo" di tessuto

Organi	w_T
Gonadi	0.20
Midollo osseo, colon, stomaco, polmone	0.12
Vescica, mammella, fegato, esofago, tiroide, altri organi	0.05
Pelle, superfici ossa	0.01

$1\mu Sv = 10^{-6}$ Sv

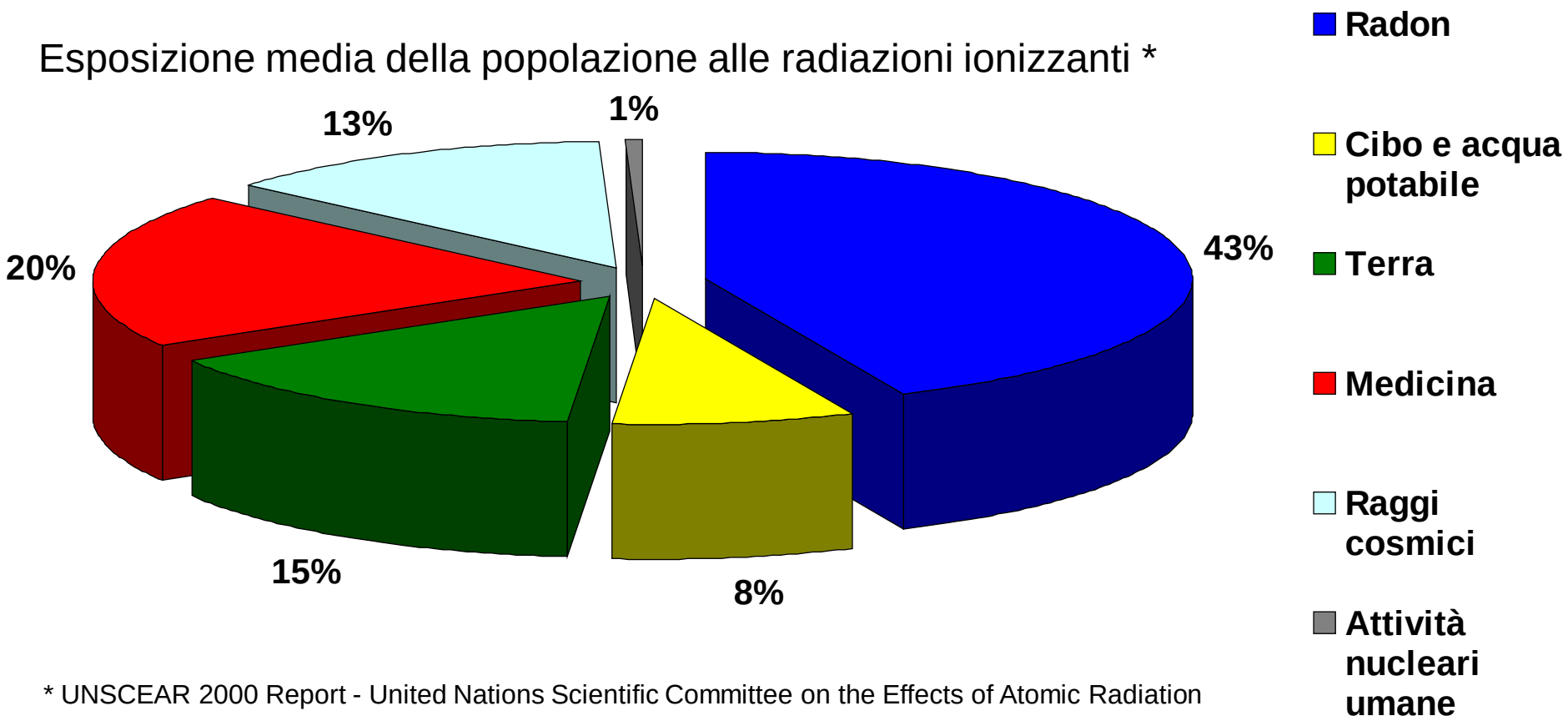
dose equivalente	effetti biologici
1 Sv	alterazioni temporanee dell'emoglobina
2 ~ 3 Sv	nausea, perdita dei capelli, emorragie
4 Sv	morte nel 50% dei casi
6 Sv	sopravvivenza improbabile



Dose efficace assorbita in un anno...

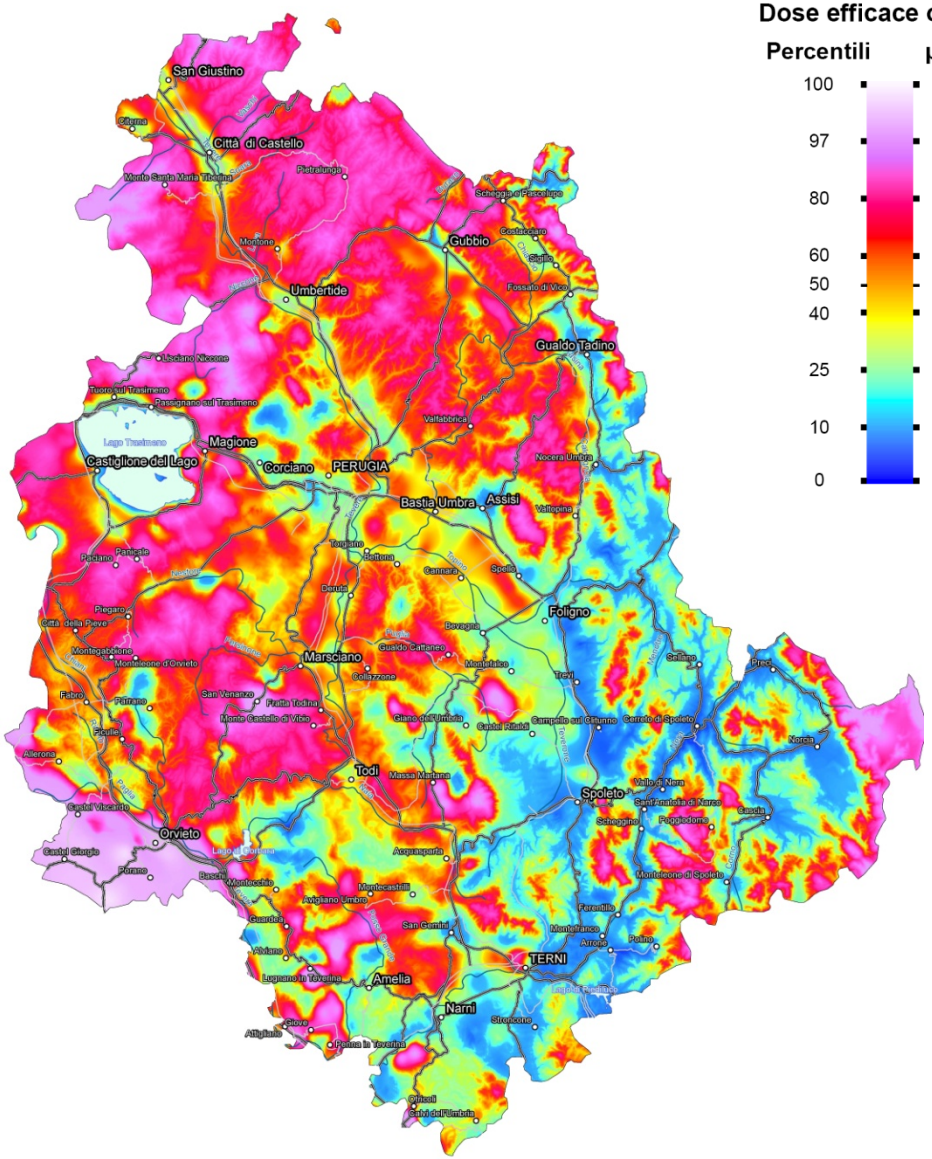
Dose efficace media assorbita dalla popolazione dovuta al “fondo naturale”: **2.400 µSv/year**.

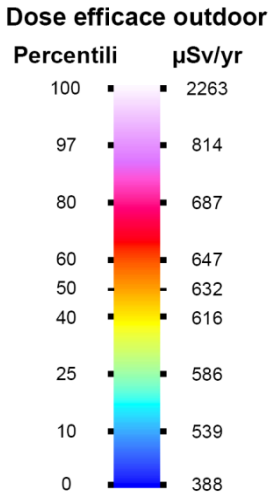
…e assorbita in una vita.

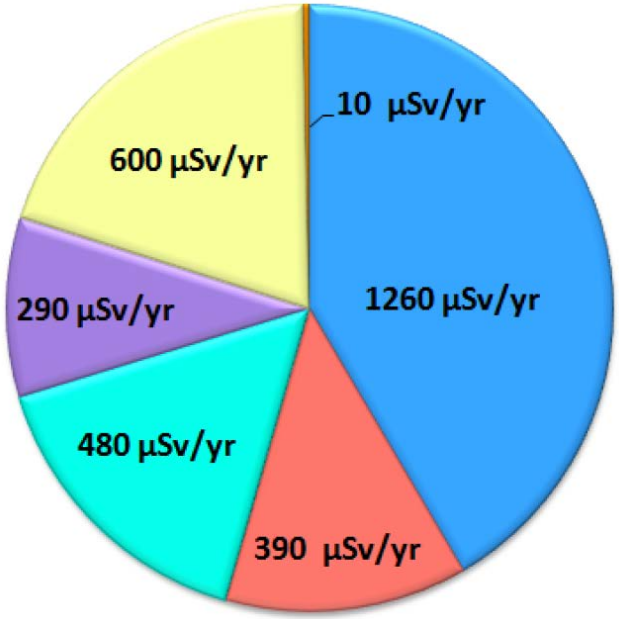


* UNSCEAR 2000 Report - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

Dose efficace totale outdoor

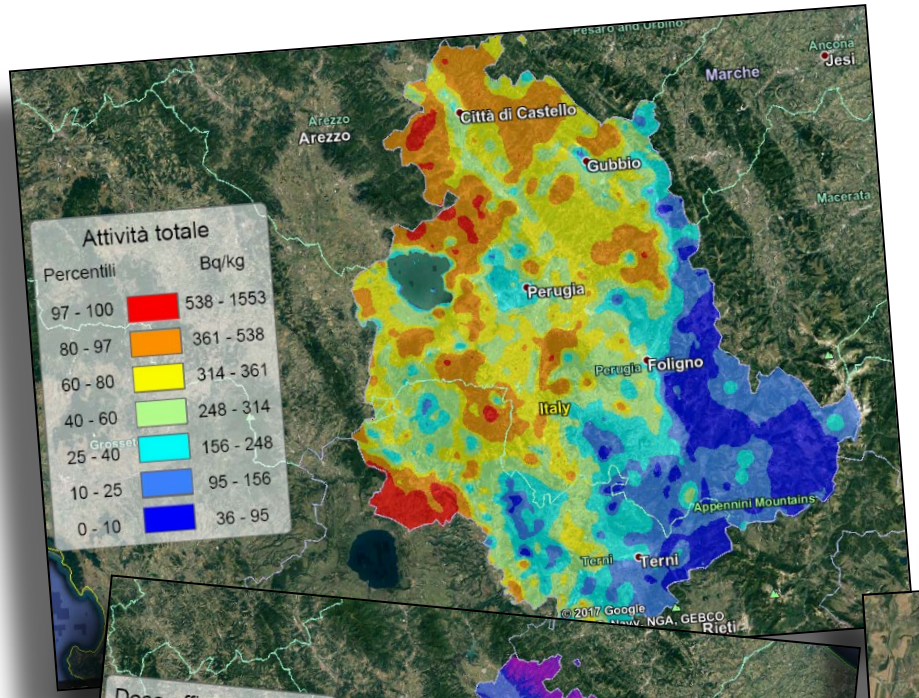


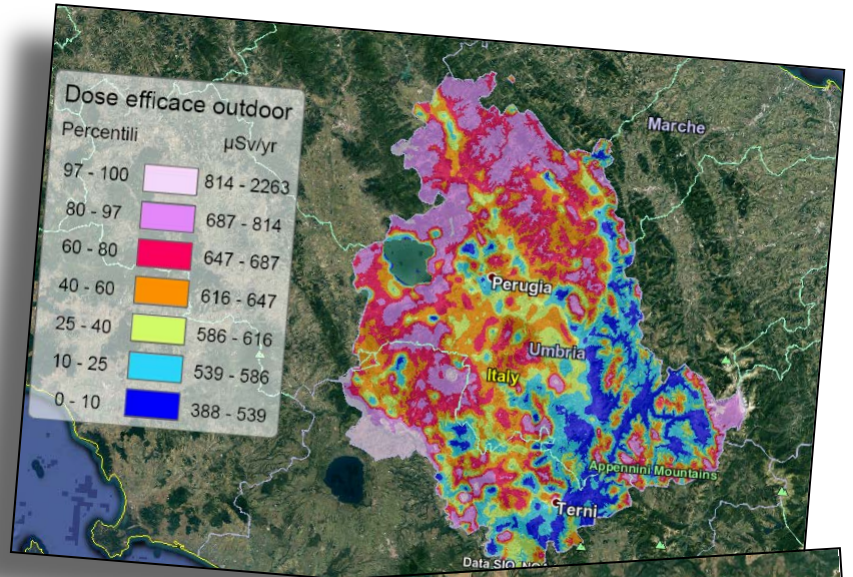


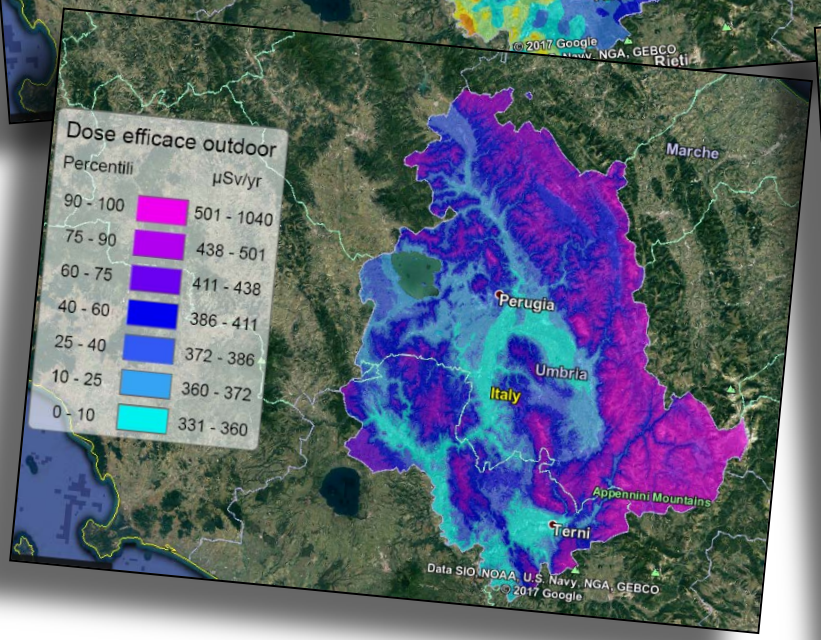


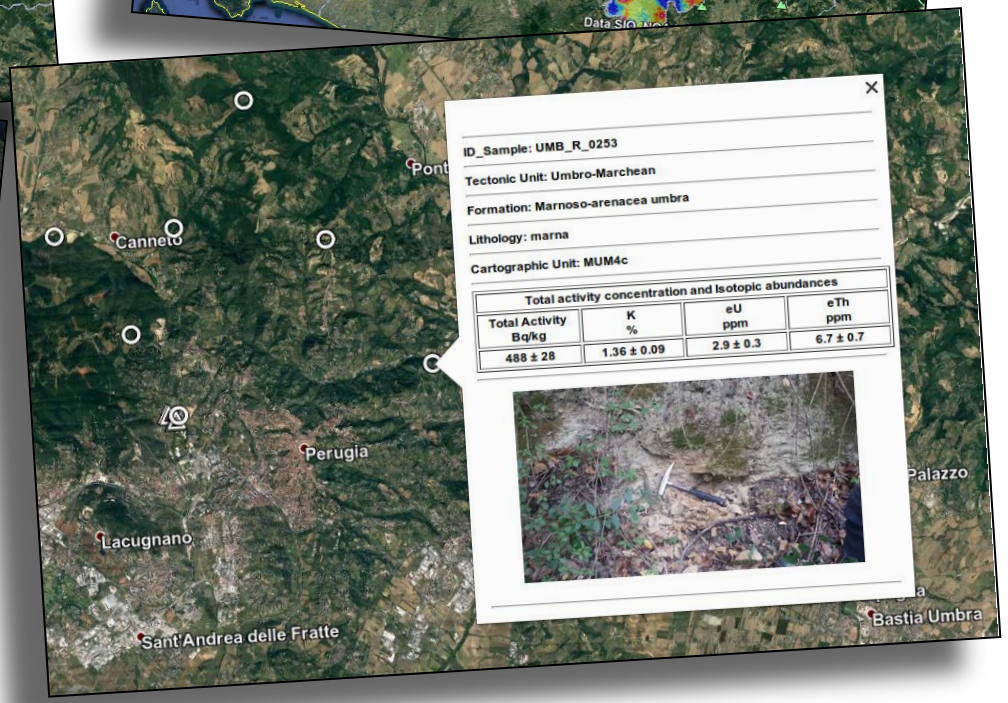
- INALAZIONE
- RADIAZIONE COSMICA
- RADIAZIONE TERRESTRE
- INGESTIONE
- RADIAZIONE MEDICA
- ALTRO

Integrazione dei risulati in Google Earth









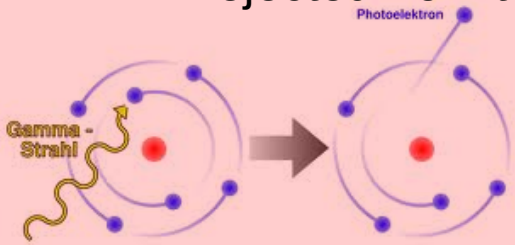
Grazie

Principal interaction mechanisms of gamma-ray with matter

The operating principle of a gamma-ray detector is based on the interaction of the incident photons with the detector material

- **Photoelectric effect**
- **Compton scattering**
- **Pair production**

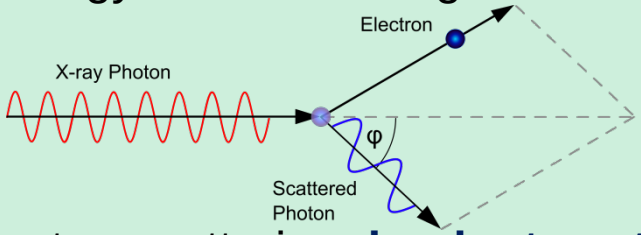
In the **photoelectric effect**, the incident photon completely transfers its energy to a bound electron, which is ejected from the atom.



$$E_e = h\nu - E_b$$

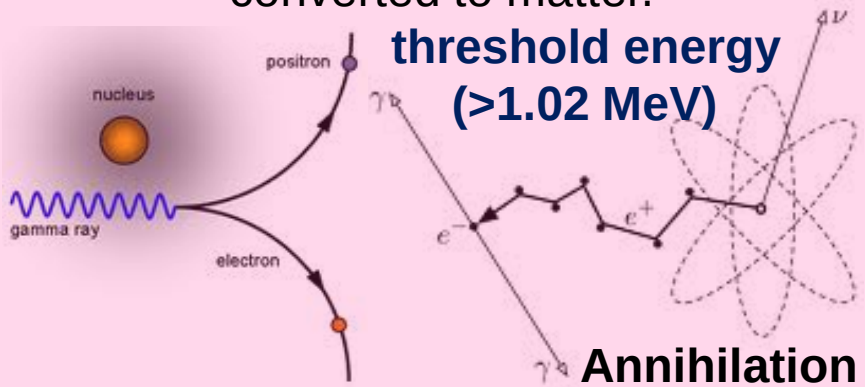
The photoelectric effect **dominates at low gamma energies**

In the **Compton scattering**, the incident photon interacts with a bound electron resulting in the deflection of the photon. The photon transfers a portion of its energy to the recoiling electron.



Compton scattering **dominates at intermediate energies**.

In general, in **pair production** the energy is directly converted to matter.



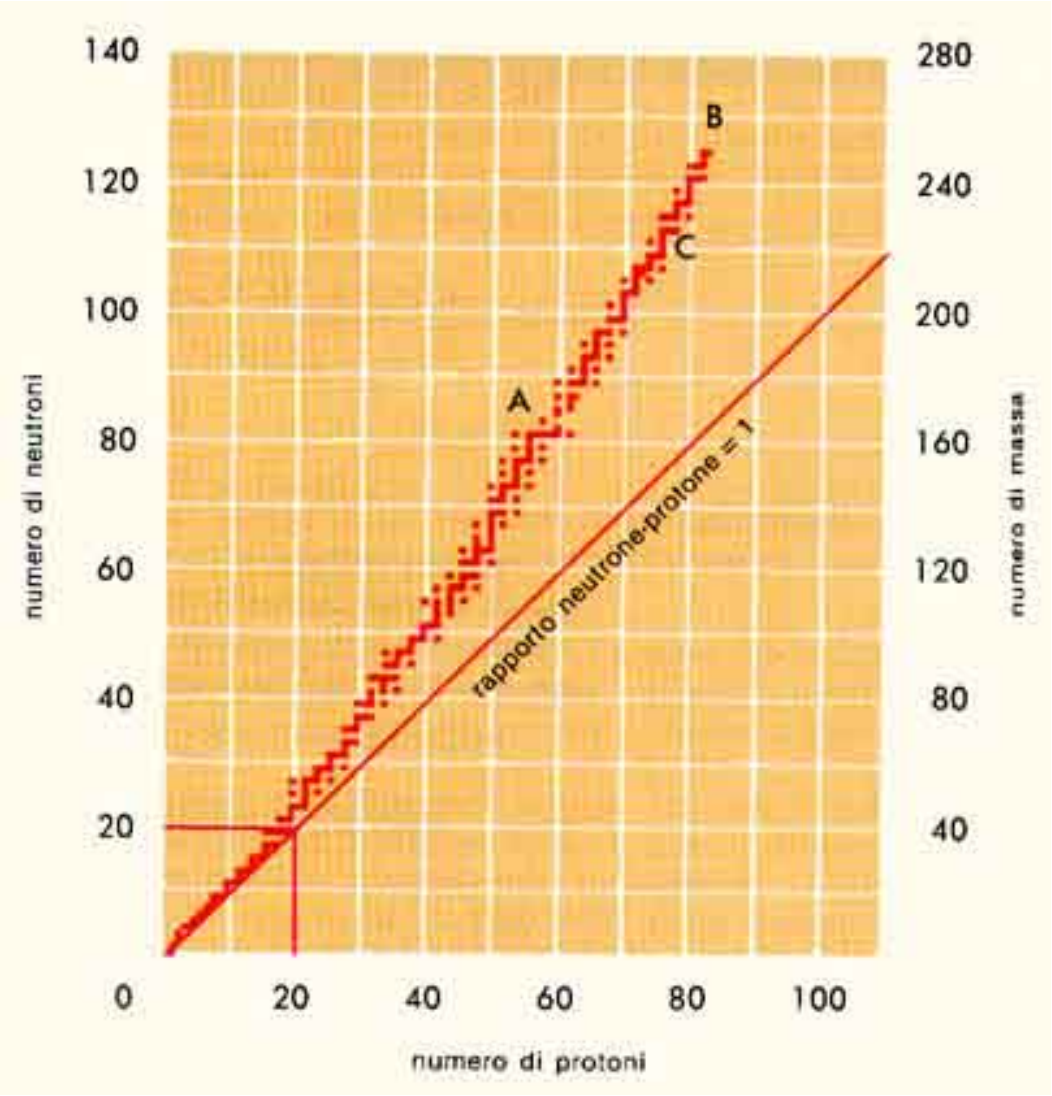
threshold energy (>1.02 MeV)

Annihilation

This interaction dominates at high energies.

La tavola dei nuclei

Esistono migliaia di tipi di nuclei rappresentati nel piano (N,Z)

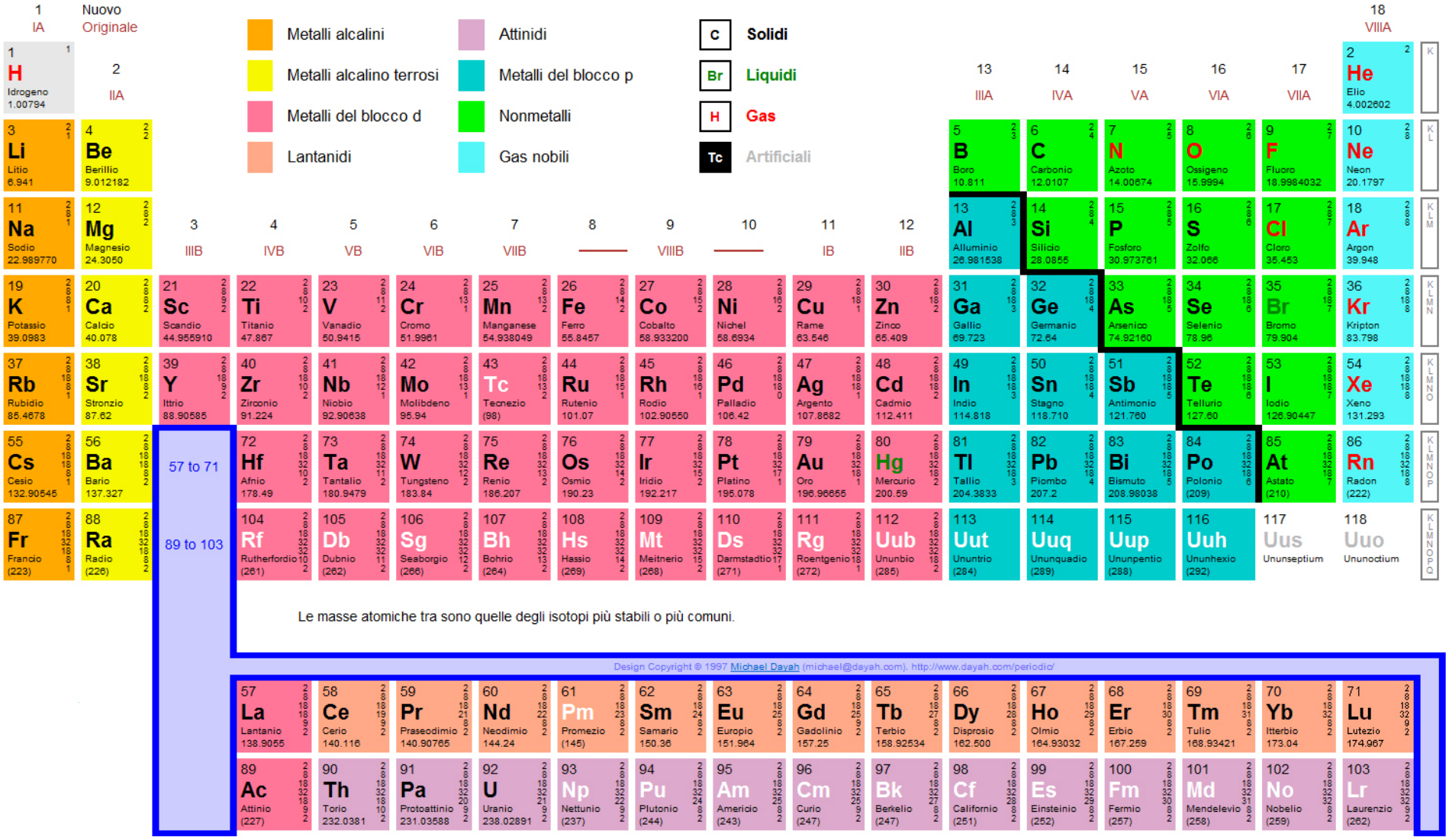


Per piccoli valori di Z e di N le configurazioni nucleari stabili corrispondono a un numero uguale di protoni e di neutroni (Z = N).

I nuclei più stabili tendono ad avere un numero pari di protoni e di neutroni; è stata quest'osservazione a suggerire che le forze nucleari sono forze che si esercitano tra coppie di corpi

Al crescere di Z il numero di neutroni necessari a garantire la stabilità aumenta, superando di gran lunga il numero di protoni presenti nello stesso atomo.

La tavola degli elementi

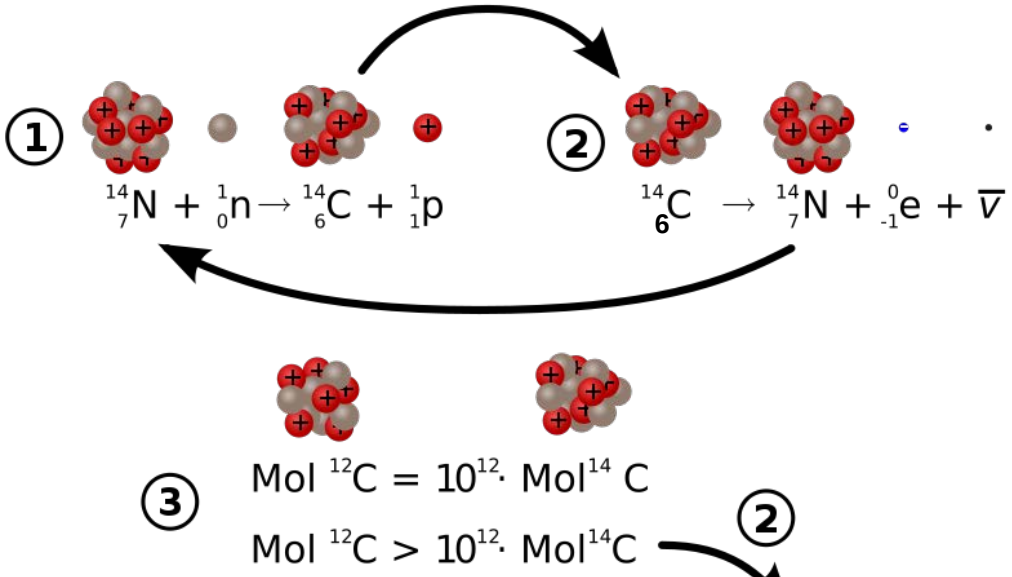


In natura si trovano elementi con Z < 92.

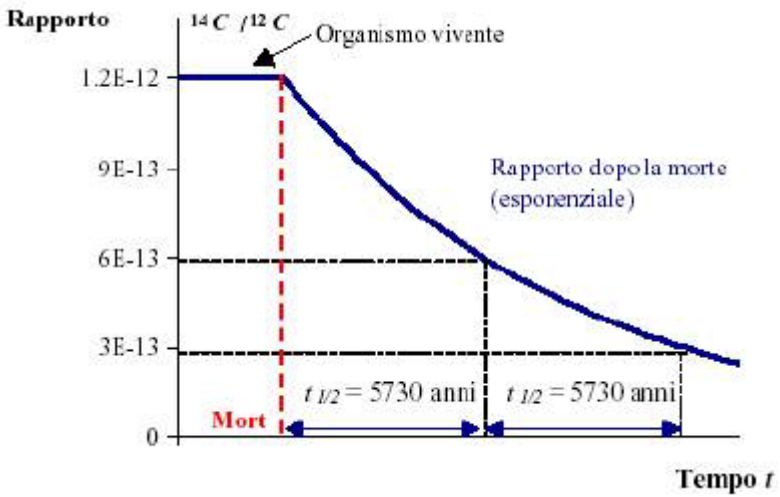
Tutti gli elementi oltre il polonio (Z = 84) sono radioattivi.

La datazione al radiocarbonio

Il ^{14}C formato nell'atmosfera si ossida in $^{14}CO_2$ ed entra nel ciclo biologico attraverso la fotosintesi e la catena alimentare.
Poiché la chimica non distingue gli isotopi, negli organismi viventi si ha la stessa concentrazione di ^{14}C che nell'atmosfera.

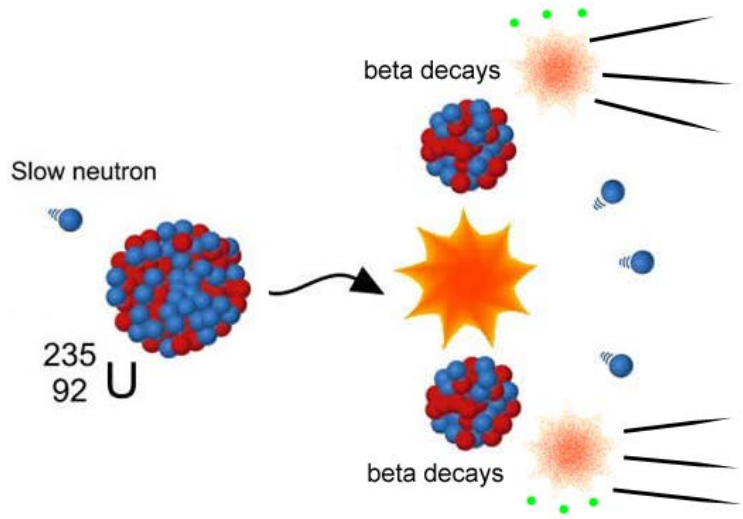


(1) La formazione del ^{14}C,
(2) Il decadimento del ^{14}C,
(3) Il segno "uguale" vale per gli organismi vivi, e il segno "non-uguale" vale per i organismi morti, nei quale il ^{14}C decade.



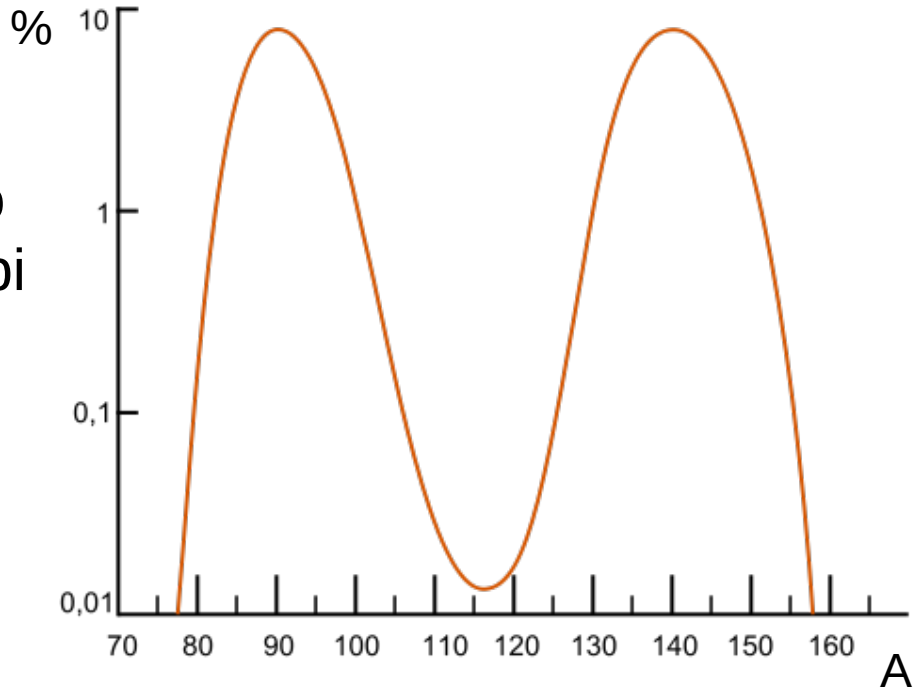
- Da quando l'organismo muore (t = 0) il ^{14}C può solo decadere, e la sua concentrazione diminuisce nel tempo.
- Dato un campione, si determina l'abbondanza residua di ^{14}C e da questo si risale si risale all'età.

Le sorgenti di radioattività artificiale



$$^{235}U + n -> X_1 + X_2 + 2n$$

Distribuzione dei prodotti di fissione rispetto al numero di massa A



I frammenti di fissione X1 e X2 sono generalmente instabili e hanno tempi di dimezzamento che variano dalle frazioni di secondo ai miliardi di miliardi di anni.

Le sorgenti di radioattività naturale

La radioattività ambientale può classificare avere origine naturale o artificiale:

La **radioattività naturale** si può classificare secondo l' origine in due categorie:

Primordiale – da prima della creazione della Terra

Nuclide	Tempo dimezzamento	Abbondanza isotopica naturale
^{235}U	7.04×10^{8} yr	0.7% dell'U totale
^{238}U	4.47×10^{9} yr	99.3% dell'U totale
^{232}Th	1.41×10^{10} yr	100% del Th totale
^{40}K	1.28×10^{9} yr	0.012% del K totale
^{87}Rb	4.75×10^{10} yr	27.8% del Rb totale

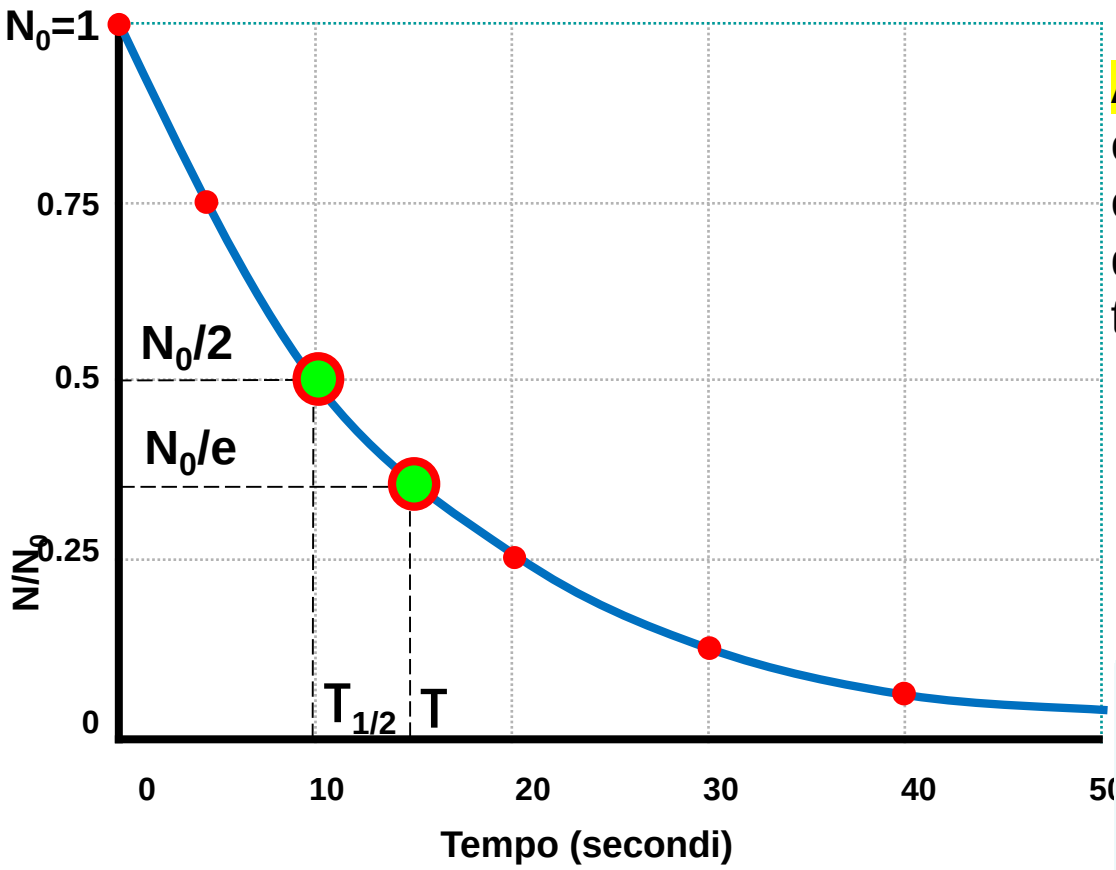
Cosmogenica – dai raggi cosmici provenienti dallo spazio

Nuclide	Tempo dimezzamento	Sorgente
^{14}C	5730 yr	$^{14}N(n,p)^{14}C$

La legge esponenziale del decadimento radioattivo

Descrive matematicamente come diminuisce, col passare del tempo, il numero di nuclei radioattivi di una data specie man mano che essi si trasformano. **N_0 è il numero iniziale di nuclei presenti al tempo t=0, N il numero di quelli sopravvissuti**

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

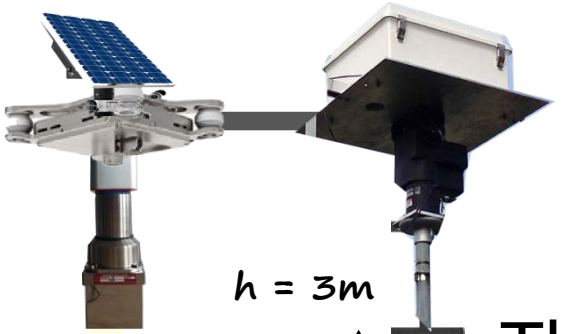


λ è la costante di decadimento [s^{-1}]
è unica per ogni radionuclide ed esprime la probabilità che il decadimento avvenga nell'unità di tempo

T = 1/ λ è la vita media del radionuclide [s]
è il tempo richiesto per ridurre il numero di nuclei nel Sistema di un fattore **e**

$T_{1/2}$ il tempo di dimezzamento (emivita) [s]
tempo occorrente perché la metà dei nuclei iniziali decadano

Gamma spectroscopy for the estimation of soil water content



h = 3m

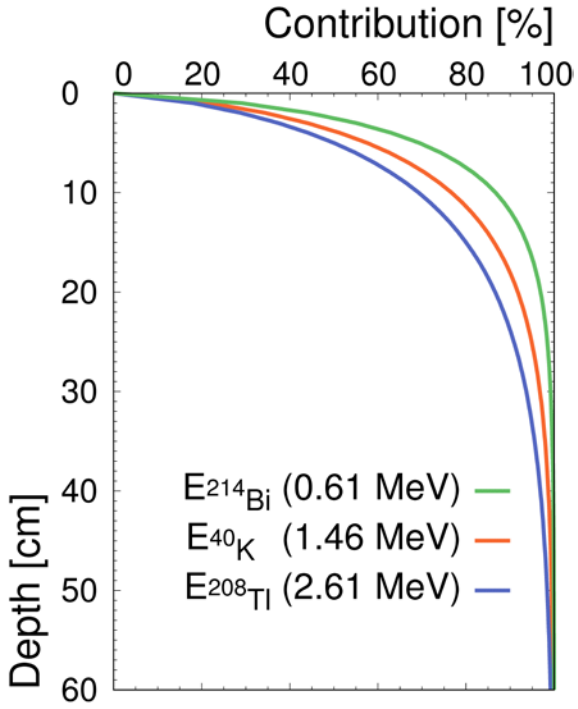
γ

r = 30 m

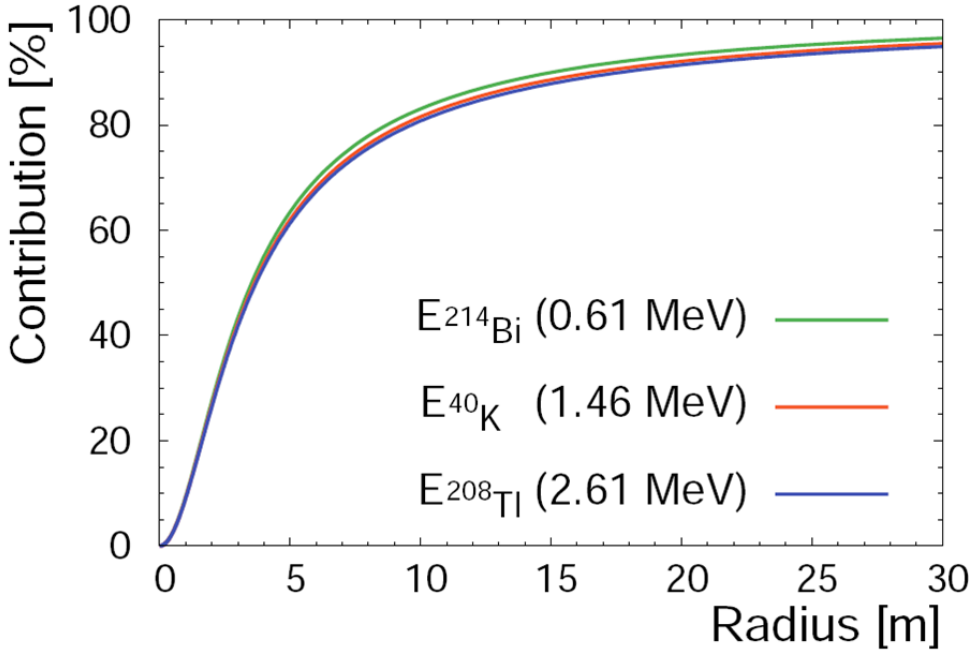
The soil water content θ is inversely proportional to the signal S (K) produced by the ^{40}K decay measured by the gamma spectrometer

Gamma station: vertical and horizontal field of view

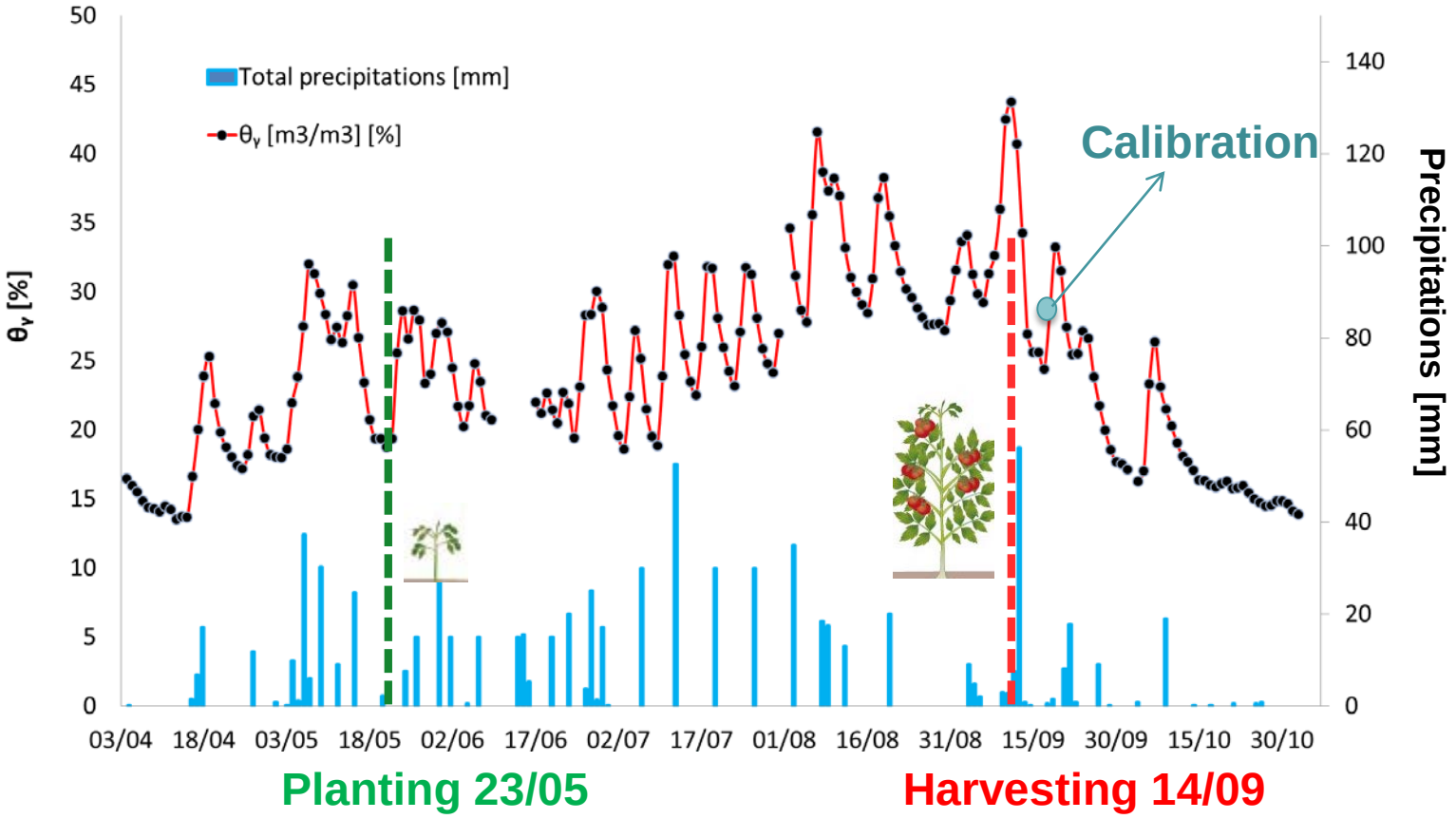
In a typical soil ~ 95% of the gamma radiation is emitted from the top 25 cm of the soil



Cumulative contribution of ground radioactivity in percentage as function of the source radius detected at height of 2.3 m reaches ~ 95% at ~ 25 m of radius



From the count rates to the water content in soil



- Daily measurements of the water content θ_γ on the basis of **the gravimetric calibration measures of 18/9/2017 (taken in bare soil condition)**
- Excellent sensitivity to changes in θ_γ due to rainfall and irrigation is observed

From count rates to abundance: the detector calibration

***Calibration**: characterize the **detector response function** to a known radioactive source*

- A **calibration pad** is a slab of concrete enriched by a **known concentration** of radioelements which should ideally simulate a **geological source** of radiation.
- Calibration pads:

❑ are **difficult** to realize

❑ have non negligible handling and storage **costs**

❑ imply the application of **geometrical corrections**

- An alternative to calibration pads are **natural calibration sites**
- They should be identified according to:

❑ **predominant abundance** of one radionuclide

❑ high degree of **homogeneity**

❑ **flat morphology**

Calibrating the ZaNaI detector

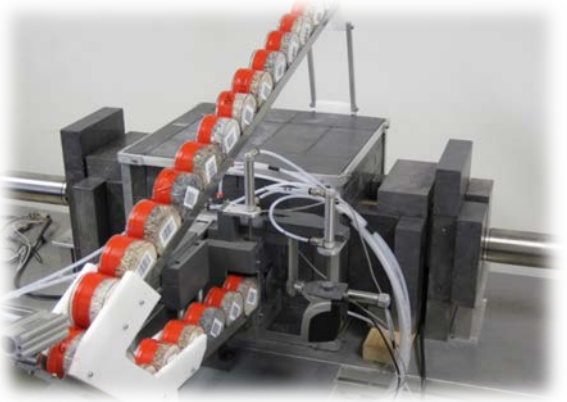
$$N = C \cdot S$$

Count rate matrix N obtained from **gamma spectra** measured at natural calibration sites

Sensitivity matrix S

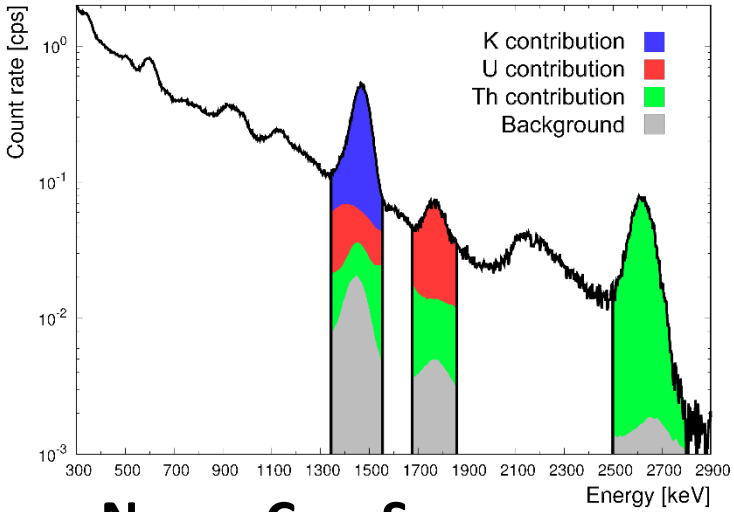
$$S = C^{-1} \cdot N$$

Concentration matrix C obtained from **HPGe measurements** on collected samples



The Window Analysis Method (WAM)

The **Window Analysis Method (WAM)**, suggested by the International Atomic energy Agency **(IAEA)***, looks to count rates recorded in **energy windows** associated to the ^{40}K photopeak and in the most prominent photopeaks occurring in the ^{238}U (^{214}Bi) and ^{232}Th (^{208}Tl) decay chains



Element	Radionuclide	Energy (keV)	Energy Window (keV)
^{40}K	^{40}K	1460	1370-1570
eU	^{214}Bi	1765	1660-1860
eTh	^{208}Tl	2614	2410-2810

Estimated eU and eTh abundances assume that the condition of secular equilibrium holds

$$N_{mx3} = C_{mx3} \cdot S_{3x3}$$

m = #sites, 3 = #isotopes

$$S = \begin{pmatrix} 122.48 & 0.00 & 0.00 \\ 9.98 & 11.42 & 0.22 \\ 1.95 & 1.64 & 5.00 \end{pmatrix}$$

The S matrix has a triangular shape:

The **upper triangle** is expected to have almost null elements

The **lower triangle** reflects the combined effect of Compton events and secondary photopeak events

The **vector of unknown concentrations C** can be computed from the background corrected count rates **N = N* - B** provided the inverse sensitivity matrix **S^{-1}**

$$C = N \cdot S^{-1}$$

*Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003.