



**RADON**

**COME SCOVARLO  
TRAMITE UN TELESCOPIO  
PER RAGGI COSMICI**

# UNA RADIOATTIVITÀ POCO COSMICA

di Marco Arcani

Da oltre un anno è attivo un esperimento scientifico per la fisica delle astroparticelle, il progetto ADA (Astroparticle Detector Array), un dispiegamento di rivelatori (a livello nazionale) volto a scoprire raggi cosmici ultra energetici. ADA utilizza come rivelatore, uno strumento denominato AMD5. Durante i rilevamenti relativi alla radiazione cosmica, in un'area di un edificio utilizzata come luogo di test, il rivelatore AMD5 mostrava variazioni cicliche inspiegabili rispetto alle note variazioni dei raggi cosmici a terra.

Un'indagine durata oltre un anno evidenzia che le misure erano e sono influenzate da emissioni dal suolo di gas radon, un gas inodore invisibile e molto pericoloso. Questo è il report completo di come è avvenuta la scoperta, con alcuni risvolti anche divertenti.

## ■ IL RIVELATORE DI RAGGI COSMICI AMD5

I rivelatori di radiazione ionizzante funzionano tramite metodologie di diversa natura, per semplificare si può semplicemente considerare un rivelatore come un apparecchio che trasforma gli effetti prodotti da particelle attraversanti un mezzo (solido o gassoso), in impulsi elettrici che è possibile misurare elettronicamente. Tra i tipi principali di rivelatori ci sono quelli a gas, come i classici contatori di Geiger-Müller (GMT) basati appunto sulla ionizzazione di un gas e gli scintillatori, che come mezzo possono utilizzare sia elementi solidi che liquidi o gassosi e sono basati sull'eccitazione (diseccitazione) molecolare di specifici materiali.

La differenza principale tra un normale rivelatore di radiazioni ionizzanti e un rivelatore per raggi cosmici è quello dell'utilizzo di circuiti di coincidenza. Siccome l'energia posseduta dalle particelle cosmiche è dell'ordine delle migliaia di volte superiore rispetto a quella posseduta dalle particelle della radioattività naturale, si adottano alcuni metodi per escludere le particelle "terrestri" e misurare solamente quelle "cosmiche". Uno di questi metodi è quello di impilare più sensori (almeno due) e contare solamente le particelle che li attraversano entrambi (figura 1). Un altro metodo consiste nello schermare i rivelatori con piombo e cemento ed è utilizzato di solito per rivelare i neutroni "cosmici" in questo modo altre particelle "terrestri" sono bloccate mentre i neutroni cosmici (a seconda dell'energia che si vuole misurare) attra-

versano armatura e rivelatore e vengono contati. In alcuni casi si possono utilizzare entrambi i metodi ovvero coincidenza e schermatura.

Il rivelatore AMD5 (*Astroparticle Muon Detector*, figura 2) utilizza il metodo coincidente con due rivelatori di tipo Geiger-Müller (GMT) quindi conta *prevalentemente* le particelle cosmiche escludendo quelle da radioattività naturale sotto a una certa soglia di energia. Le particelle cosmiche misurate dall'AMD5 sono i raggi gamma e tutte quelle elettricamente cariche come i muoni e gli elettroni.



Figura 2 - Uno dei rivelatori di raggi cosmici AMD5. Essi sono costruiti in un case per p.c. e collegati a personal computer.

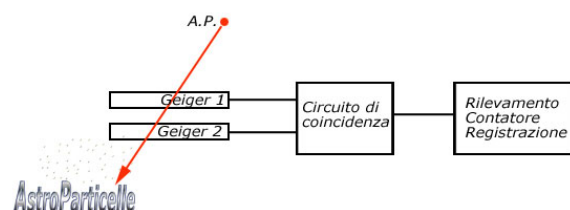


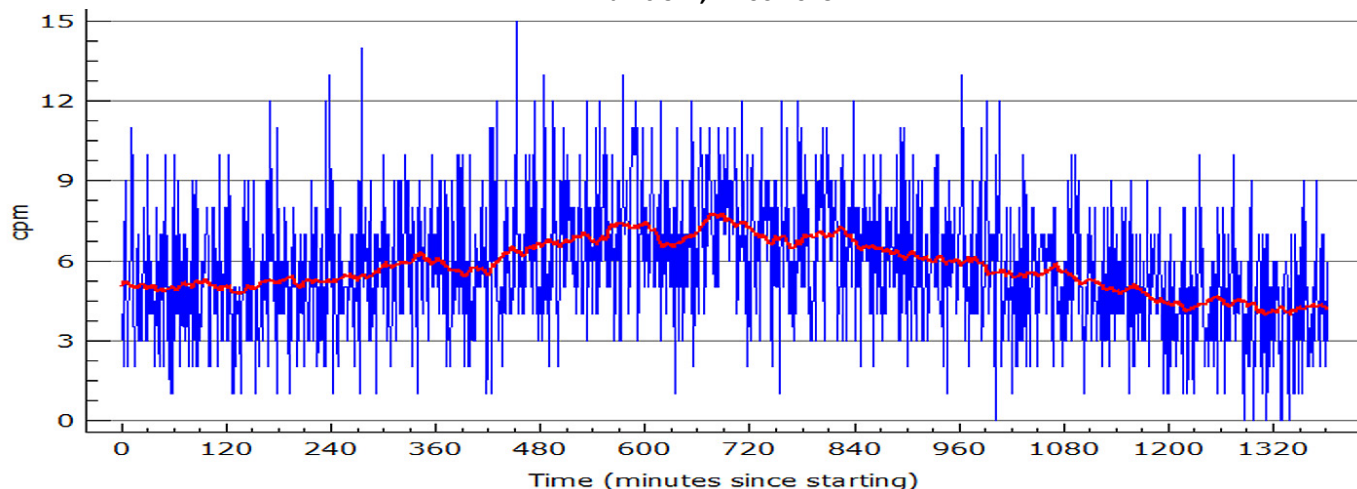
Figura 1 - Il tipico metodo della coincidenza adottato da qualsiasi rivelatore di raggi cosmici, uno strumento di questo tipo viene chiamato anche telescopio per raggi cosmici.

## ■ MISURE ANOMALE

Dopo l'installazione di un rivelatore AMD5 (in una zona a scopo di test che chiameremo "edificio-A"<sup>1</sup>) avvenuta nel febbraio 2013, le misure ricavate confrontate con un analogo prototipo, sembravano rientrare nel conteggio tipico di questo strumento. Il

1 Il luogo reale non viene indicato per questione di privacy.

Edificio-A, 11.06.2013



**Figura 3** - Una delle misure anomale relativa al 11.06.2013, la curva in rosso (media mobile) rappresenta la modulazione che normalmente non dovrebbe esserci (i dati dovrebbero “viaggiare” lungo una retta). La media delle particelle è di 5,7 al minuto (cpm) contro le 3 durante un funzionamento considerato normale.

progetto ADA prevede il funzionamento continuo dei rivelatori, 24 ore su 24, e i dati raccolti dai *detectors* vengono inviati via ftp su un server web e sono consultabili in tempo reale (<http://www.astroparticelle.it/public/ada>); per le ultime 24 ore i dati sono plottati graficamente. Attualmente sono tre i *detectors* AMD5 attivi, uno a Tradate presso l’Osservatorio FOAM13, uno a Venegono I. nel mio laboratorio e uno presso l’Osservatorio Galileo Galilei di Cariatì (CS).

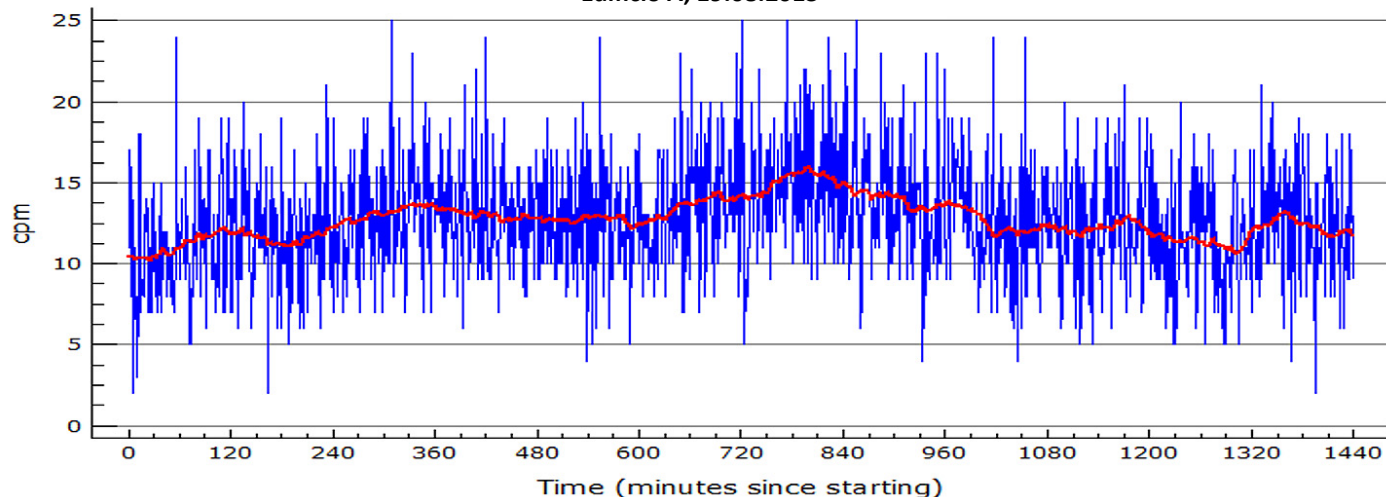
Durante alcuni giorni nel rivelatore sistemato nell’*edificio-A* si notavano evidenti variazioni nel flusso misurato, una sorta di modulazione sul conteggio che non si riusciva a interpretare (figura 3), inoltre il conteggio medio di particelle era almeno del doppio rispetto alla media attesa con alcune giornate in cui raggiungeva valori allarmanti (figura 4). Poiché negli altri strumenti dell’*array* non si aveva lo stesso andamento il fenomeno non poteva essere attribuito ad eventi astronomici come l’effetto Forbush: un fenomeno dovuto a eruzioni solari che può far diminuire

per qualche ora il flusso dei raggi cosmici a terra.

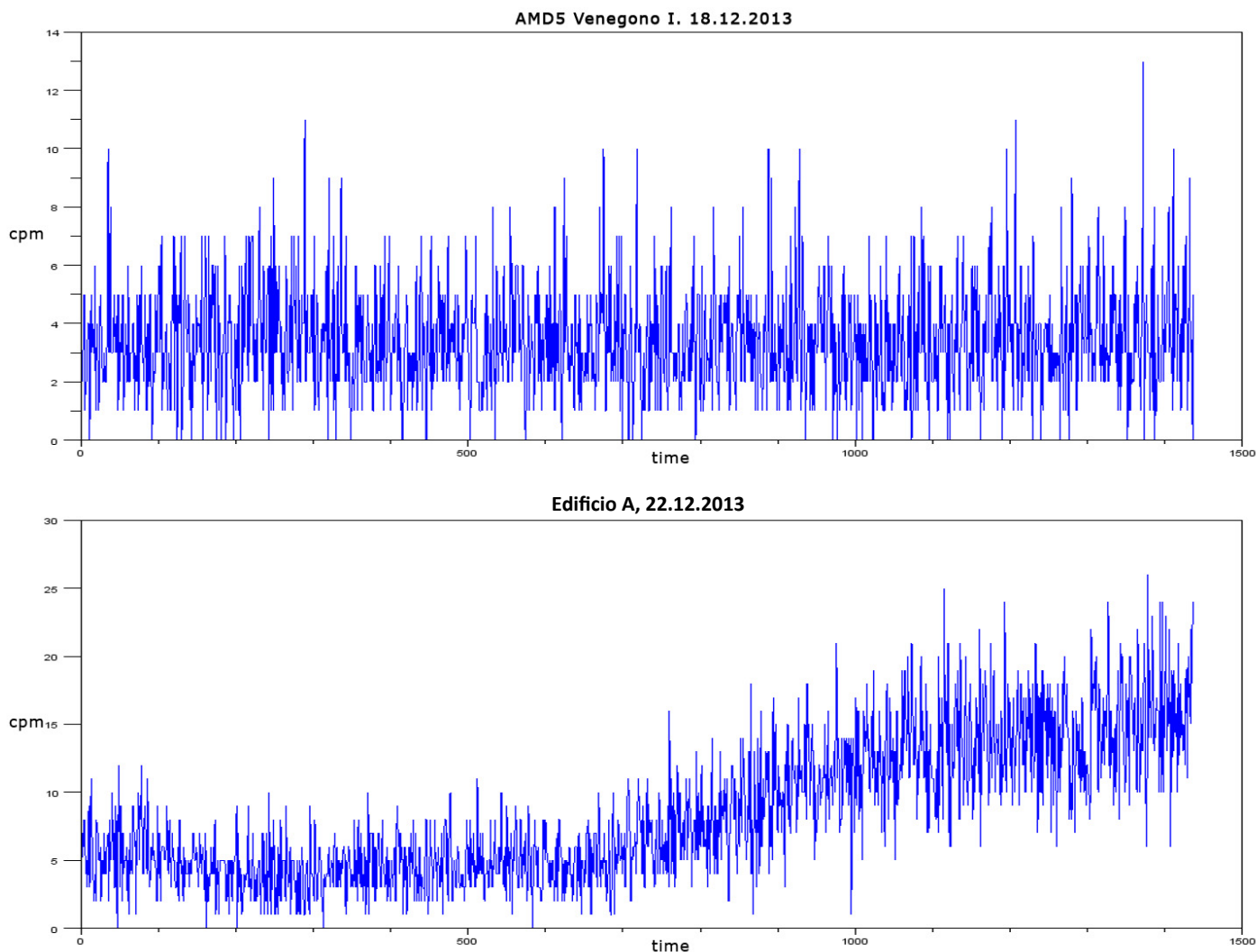
### ■ PRIME INDAGINI

Dato che il rivelatore era un progetto giovane era lecito supporre che avesse qualche problema tecnico, ma siccome l’elettronica era stata ampiamente sperimentata con i precedenti (contemporanei e successivi) modelli, si è pensato di sostituire i tubi Geiger supponendo che fossero difettosi. Dopo questa operazione, per un paio di giorni ha funzionato correttamente per poi riprendere con rivelazioni dall’andamento anomalo e misure giudicabili peggiori rispetto alle precedenti. Sembrava che il flusso di particelle rivelate cambiasse prevalentemente in corrispondenza di un orario specifico (dalle 13,30 alle 14,30 circa). Si è così iniziato a pensare ad alcune cause artificiali, tra cui l’ipotesi che la rete Enel avesse una qualche oscillazione nei valori di tensione fornita, così elevata, da influire sull’alimentatore di alta tensione che

Edificio A, 19.08.2013



**Figura 4** - Un altro rilevamento del giorno 19.08.2013, la curva in rosso rappresenta la modulazione. La media delle particelle è di 12,7 al minuto, più di 4 volte il valore atteso.



**Figura 5** - Confronto del rilevamento dei dati nel corso di una giornata in località differenti, sopra a Venegono I. e sotto nella località utilizzata per i test; da notare il diverso flusso di particelle contate al minuto.

alimenta i GMT all'interno del rivelatore.

Così sono iniziati vari controlli, per farla breve nel corso del 2013 sono stati sostituiti i circuiti elettronici dell'alta tensione ed è stata ulteriormente stabilizzata tutta l'alimentazione relativa all'elettronica del rivelatore AMD5. È stato inoltre aggiunto un gruppo di continuità (UPS) per sopperire alle eventuali variazioni della corrente elettrica, a questo punto era impossibile che il rivelatore avesse qualsiasi tipo di variazione endogena. Come contro prova finale, il rivelatore è stato portato nel mio laboratorio per una settimana dove ha funzionato perfettamente, ma riportato nell'area precedente le letture anomale sono riapparse (figura 5).

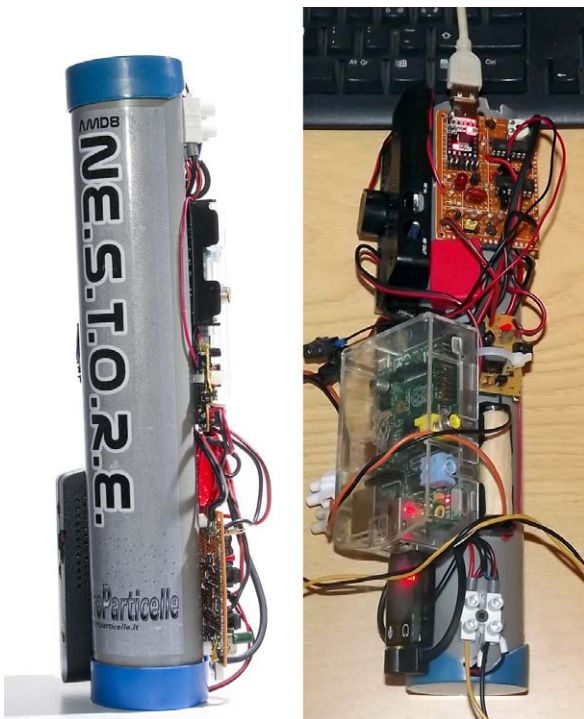
## ■ SULLE ORME DI SHERLOCK HOLMES

Se escludi l'impossibile, ciò che rimane, per quanto improbabile, non può che essere la verità<sup>2</sup>.

Iniziava a esserci il sospetto che la causa fosse naturale, ovvero sorgenti radioattive di qualche tipo. Dato

che dopo aver riportato il rivelatore nell'*edificio-A* i problemi sono ricominciati, serviva un esperimento per confermare tali sospetti. La svolta decisiva è stata quella di posizionare un altro rivelatore proprio sopra all'AMD5: NESTORE (figura 6), un detector costruito per la misura di raggi cosmici in stratosfera. NESTORE è costruito con un unico GMT di grandi dimensioni, quindi raccoglie molte particelle e funzionando come un comune contatore Geiger registra la radiazione ionizzante totale. I grafici plottati contemporaneamente da AMD5 e NESTORE nel corso di una settimana segnavano lo stesso andamento (figura 7) provando che effettivamente nell'*edificio-A* c'era e c'è una sorgente radioattiva. La prova successiva è stata quella di spostare l'AMD5 solo di qualche decina di metri per iniziare a circoscrivere il problema. Il rivelatore è stato in funzione per una decina di giorni in una zona attigua alla precedente (ma in un'altra costruzione) e ha funzionato correttamente verificando che lì la radioattività è assente. Il problema riguarda probabilmente tutta l'infrastruttura relativa alla parte "abitabile" dell'*edificio-A*.

<sup>2</sup> La celebre frase del personaggio Sherlock Holmes ideato da Sir Arthur Conan Doyle.

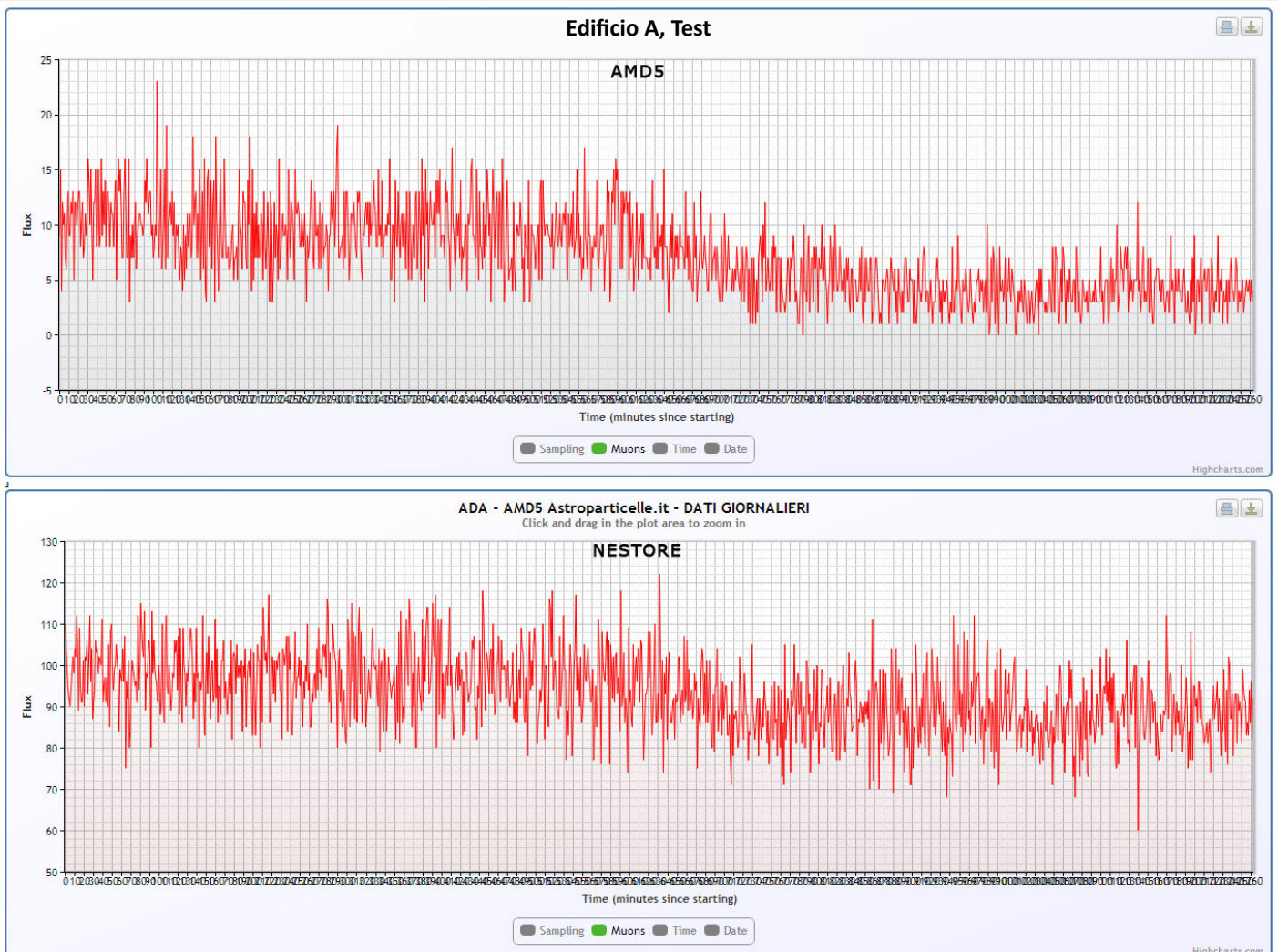


## ■ LA SORGENTE

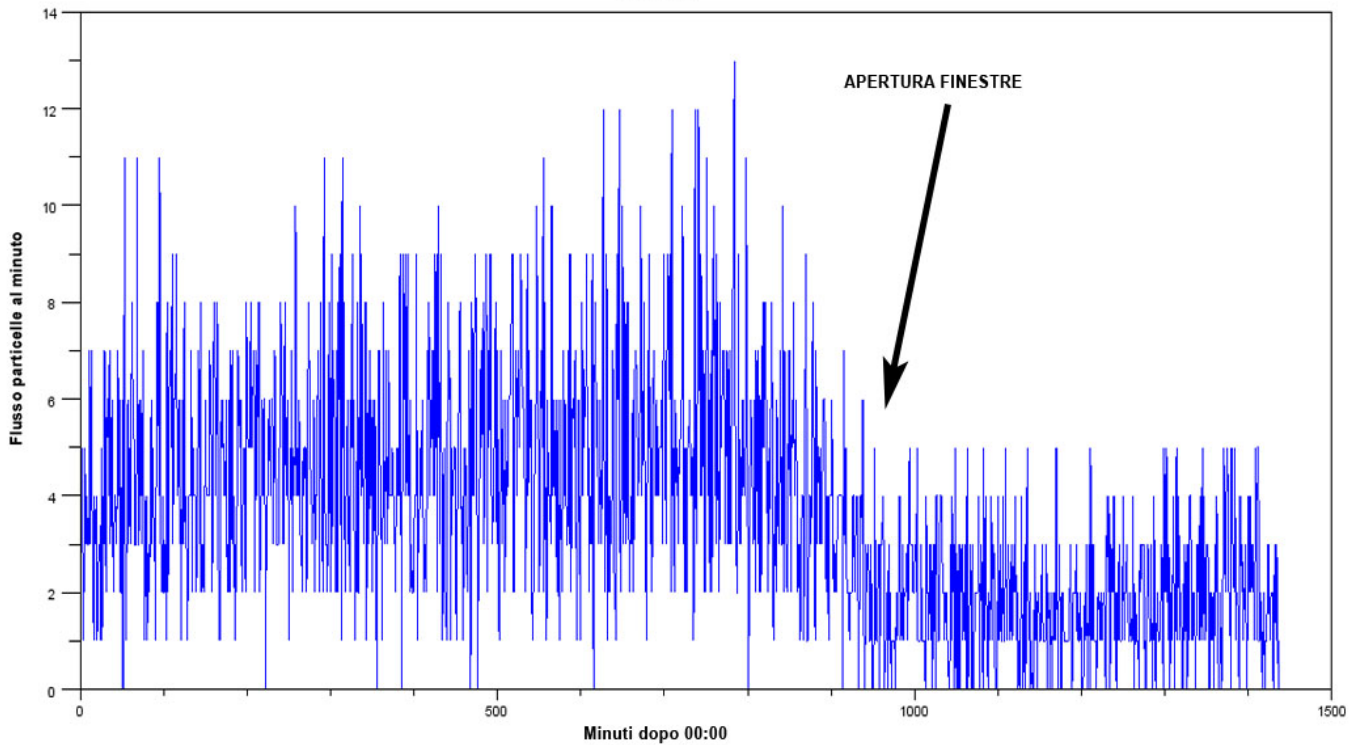
Trovata la causa, non c'è voluto molto per capire che il colpevole è sicuramente il gas radon, un gas pesante, radioattivo e presente anche in Lombardia. L'isotopo più comune del radon è quello di massa atomica 222 ( $^{222}\text{Rn}$ ) che emette tre particelle alfa e una gamma, è difficile da rivelare perché volatile e quindi si evidenzia solo su misure a lungo termine, dopo che si è depositato. Il rivelatore AMD5 non vede le particelle alfa, ma solamente quelle beta e gamma, oltre ai muoni dei raggi cosmici; quindi quello che misura sono probabilmente i fotoni gamma emessi dal radon e le particelle emesse dai prodotti di decadimento del radon stesso. Il tempo di dimezzamento del  $^{222}\text{Rn}$  è infatti di *tre giorni* dopodiché decade in una catena di isotopi (bismuto polonio e piombo) radioattivi. La prova finale è stata quella di tenere chiuso il locale dell'*edificio-A* per tre giorni consecutivi e poi aprire le finestre col risultato lampante che nei primi giorni il conteggio aumenta progressivamente e dopo l'apertura delle finestre diminuisce a vista d'occhio (figura 8).

**Figura 6** - NE.S.T.O.R.E. (Near Space Trip Observer Radiation Experiment), è stato sviluppato attorno a un tubo GMT di grosse dimensioni, questo per incamerare il più alto numero possibile di dati, pur mantenendo pesi e ingombri ridotti.

A questo punto il meccanismo delle oscillazioni appare evidente. Il locale dell'*edificio-A* rimane chiuso, il gas si accumula e dopo qualche giorno (in seguito al dimezzamento) il conteggio di particelle aumenta progressivamente. Quando le fi-



**Figura 7** - Le misure contemporanee tra AMD5 e NESTORE sono state molto eloquenti e utili per risolvere il mistero.



**Figura 8** - La prova conclusiva dimostra senza alcun dubbio che il colpevole è il gas radon.

nestre o anche solo la porta d'entrata viene lasciata aperta, l'aerazione ne permette la fuoriuscita e il conteggio di particelle ritorna quasi nella norma.

## ■ IL GAS RADON

Il radon è un gas nobile che nasce dal decadimento del radio che a sua volta deriva dall'uranio. Come visto precedentemente esiste in diversi nuclidi e il più comune è il  $^{222}\text{Rn}$ , il quale si dimezza in 3,8 giorni (figura 10) decadendo in una catena di isotopi radioattivi fino ad arrivare al piombo non radioattivo (figura 9). Il radon è presente quasi ovunque nel sottosuolo, specialmente in terreni granulosi e viene portato in superficie attraverso scavi e spaccature geologiche provocate dai terremoti; per questo il suo monitoraggio è utilizzato come precursore di terremoti in aree sismiche. In Lombardia è presente a zone (figura 11) e gli scavi edili possono aprire un varco per la fuoriuscita di questo gas, per approfondire ci sono molti documenti in rete, i.e. il documento dell'ARPA della regione Lombardia: [http://ita.arpalombardia.it/ita/aree\\_tematiche/agentifisici/files/radio/linee\\_guida\\_20radon\\_2011.pdf](http://ita.arpalombardia.it/ita/aree_tematiche/agentifisici/files/radio/linee_guida_20radon_2011.pdf).

## ■ QUALCHE CONTO

Non è semplice quantificare il livello di radioattività assorbita nell'ambiente dovuta al radon poiché varia di giorno in giorno e a quanto risulta dai dati in archivio è maggiore nei mesi caldi. Normalmente il

conteggio dei "raggi cosmici" risulta essere del 20% superiore rispetto agli altri rivelatori di ADA, quindi si può semplicemente supporre che la radioattività assorbita sia del 20% superiore rispetto alla media.

Non sono un esperto di radioprotezione e il rivelatore non è costruito per misurare il radon, tuttavia un conto grossolano relativo alla radiazione assorbita che si accumula dopo tre giorni senza aprire le finestre (la condizione peggiore) che può capitare nei mesi invernali è stato fatto.

La misura è stata condotta durante alcuni giorni di rilevamenti in cui il locale sarebbe sicuramente rimasto chiuso a lungo ed escludendo la coincidenza dei GMT, ovvero utilizzando i due GMT in parallelo come in un comune contatore di radioattività. Per il calcolo sono stati presi i valori della media più alta e più bassa (figura 13). Il più alto valore è risultato essere di 102 cpm (*count per minute*), per convertire i cpm nell'unità di misura più comune della radiazione equivalente assorbita (Sievert) ci viene in aiuto il *data-sheet* dei GMT. Prima di tutto bisogna dividere per 2 il valore perché i GMT erano due quindi 51 cpm. Da questo valore togliamo le particelle vere dei raggi cosmici che incidono in media per 4 cpm quindi totale 47. Il produttore dei tubi Geiger dichiara :

*Gamma Sensitivity Ra226 (cps/mR/hr) 29*

Prima bisogna convertire i cpm in cps quindi  $47/60=0.783$ . Ora facciamo una prima approssimazione utilizzando il dato relativo al radio considerandolo valido anche per la radiazione che stiamo misuran-



Figura 9 - Il decadimento del radon 222.

Rn-222		
Atomic Number :	86	
Half-Life :	3.8235 d	
Jp : 0+ Sn : 6100,00 keV Sp : 7800,00 keV		
Possible Parents		
Parent	Fraction (%)	Decay Mode
At-222	100 %	b-
Decay Products		
Daughter	Fraction (%)	Decay Mode
Po-218	100 %	a
Emission Products		
Number of Alphas :	3	
Number of Betas :	0	
Number of Gammas :	1	
Number of X-Rays :	0	

Figura 10 - I vari isotopi del radon e la scheda del radon 222. [Reference: "Handbook of Chemistry and Physics", 75th Edition, D.R. Lide (Editor), CRC Press, Boca Raton, FL, ISBN 0-849-30596-9, 1995 - Kaye, G.W.C & Laby, T.H. "Tables of Physical and Chemical Constants", 14th. Edition, Longman Press, ISBN 0-582-46326-2, 1973.]

type of radiation and energy range	radiation weighting factor $w_R$
photons, all energies	1
electrons and muons <sup>8</sup> , all energies	1
neutrons $E_n < 10$ keV	5
neutrons $10$ keV $\leq E_n \leq 100$ keV	10
neutrons $100$ keV $< E_n \leq 2$ MeV	20
neutrons $2$ MeV $< E_n \leq 20$ MeV	10
neutrons with $E_n > 20$ MeV	5
protons, except recoil protons, $E > 2$ MeV	5
$\alpha$ particles, fission fragments, heavy nuclei	20

Figura 12 - Il fattore di ponderazione  $w_R$  per diversi tipi di particelle. [Claus Grupen; *Introduction to Radiation Protection*, Springer]

SnapStat: Multiple Sample Comparison			
Sample	Count	Mean	Sigma
date_2014041613000002.Col	182	5341	8,62899
date_2014042013000000.Col	286	3918	15,6954
date_2014042113000000.Col	285	9464	9,76215
date_2014042213000000.Col	2102	001	9,00546
daily-data.Col	1257	100,067	8,29505
	7002	91,327	13,4589

Figura 13 - I valori delle medie durante cinque giorni di campionamento con quella minima (verde) e massima (rosso) considerate.

significa che non stima gli effetti biologici e la pericolosità dell'esposizione che è invece fornita dal calcolo della dose equivalente ed eventualmente di quella efficace, le quali tengono conto del tipo di radiazione e degli eventuali organi colpiti. La dose equivalente viene calcolata con la seguente formula:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

Che equivale alla sommatoria dei fattori di conversione del tipo di particella (figura 12) moltiplicata per la dose assorbita. Il radon emette prevalentemente particelle alfa ma dobbiamo tenere in considerazione anche le particelle gamma (del radon stesso) e beta degli altri isotopi quindi  $20(\text{alfa}) \times 0.25 = 5 + 2(\text{beta} + \text{gamma}) \times 0.25$  ne segue che la dose equivalente corrisponde a  $5.5 \mu\text{Sv/h}$ . La dose efficace tiene conto anche dei vari organi colpiti, in questo caso possiamo considerare che tutto il corpo è esposto uniformemente quindi la dose efficace corrisponde a quella equivalente ovvero  $5.5 \mu\text{Sv/h}$ .

Facendo lo stesso calcolo in condizioni di vita "normale" nell'edificio-A (porte e finestre che si aprono

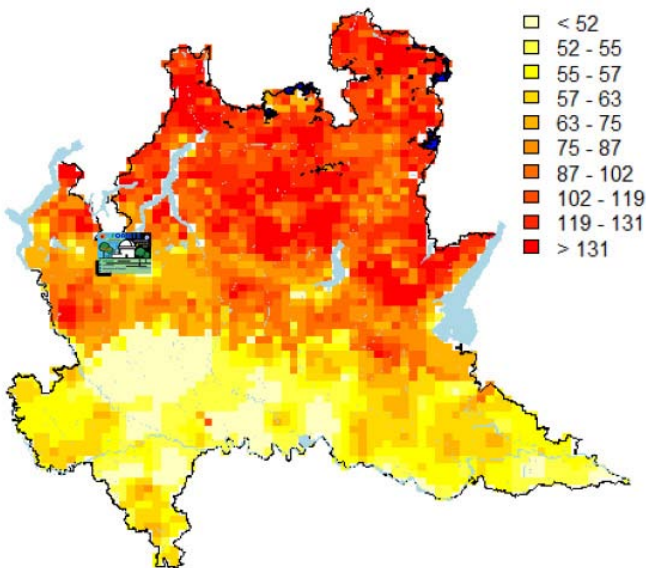
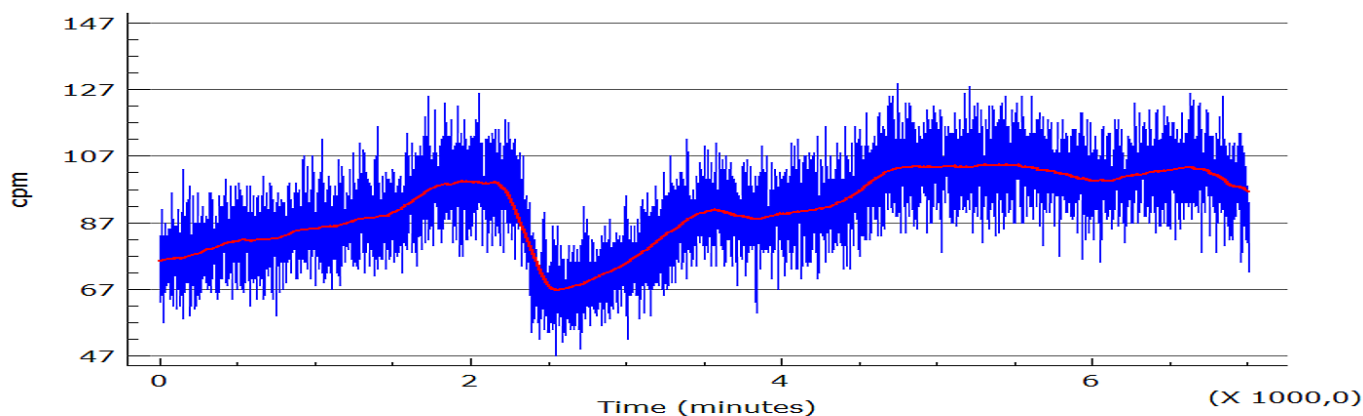


Figura 11 - Distribuzione del radon in Lombardia espressa in Bq/m<sup>3</sup> determinato su misure condotte al piano terra di vari edifici[arpalombardia.it].

do quindi  $0.783/29 = 0.0270$ . Questo risultato corrisponde alla radioattività in millesimi di Röntgen per ora, quindi  $0.027$  mR/h. Poiché  $1$  Röntgen  $\sim 0.00933$  (seconda approssimazione) Sv o meglio Gy si ottiene  $0.25 \mu\text{Gy/h}$ . Questo valore corrisponde alla dose assorbita che però è quantitativo ma non qualitativo,



**Figura 14** - Cinque giorni di misura per determinare la dose efficace; nei primi due giorni si nota che l'ambiente è ancora "abitato" in quanto la radiazione precipita per l'aerazione, nei tre giorni seguenti essa sale di nuovo e si assesta intorno ai 100 cpm.

regolarmente) ovvero considerando la media più bassa misurata (82cpm) si ottiene un valore di 4.18  $\mu\text{Sv/h}$ . Quindi la dose efficace assorbita oscillerebbe tra i 4.18 e i 5.5  $\mu\text{Sv/h}$ . Questo porta a fare la seguente riflessione: se uno lavorasse in queste condizioni per 40 ore settimanali assorbirebbe in un anno 11.44 mSv. Le varie commissioni internazionali (ICRP e Euratom) considerano per la popolazione il valore di 1mSv/anno come limite massimo, oltre il quale si è considerati lavoratori a rischio.

## ■ CONCLUSIONI

Finalmente si è giunti alla conclusione di un puzzle che ci ha sconcertati per più di un anno. Le anomalie riscontrate in tutto il tempo in cui il rivelatore è rimasto in funzione erano dovute all'emissione del gas radioattivo dal sottosuolo (la quale ha variabilità episodica) e soprattutto alle aperture delle porte e delle finestre dell'*edificio-A*. Questo porta prima a trarre alcune serie considerazioni...

1. Il rivelatore AMD5 è estremamente affidabile e preciso.
2. I raggi gamma del radon (o le particelle emesse dagli isotopi del suo decadimento) posseggono sufficiente energia per attraversare entrambi i tubi Geiger del detector? Il fatto è che il gas avvolge tutto l'ambiente, compreso l'interno del rivelatore e quindi la sorgente radioattiva si può dire che è a contatto coi GMT, per questo si ha un conteggio di coincidenza (probabilmente da particelle diverse che attraversano contemporaneamente i tubi Geiger).
3. Abbiamo scoperto una nuova tecnica per rivelare il radon.

...e poi ad altre curiose riflessioni:

4. Il personale dell'*edificio-A* esegue le pulizie regolarmente: l'orario di apertura delle finestre per fare asciugare i pavimenti è ben documentata (13-14,30).
5. Il rivelatore può essere utilizzato come antifurto (se il ladro si sofferma a lungo).
6. Mai sottovalutare esperimenti che sembrano apparentemente fini a se stessi.
7. Mai sottovalutare esperimenti condotti da *Astroparticelle.it* ! :-)

Rimane da stabilire quale strategia adottare in questi casi poiché il rivelatore non può lavorare correttamente e il personale del *edificio-A* è esposto, specialmente nei mesi invernali, a questo pericoloso gas radioattivo.

Marco Arcani

[www.astroparticelle.it](http://www.astroparticelle.it)