

uRANIA-V

u-RWELL Advanced Neutron Identification Apparatus at group V

G. Bencivenni
LNF-INFN

L'idea di un **rivelatore di neutroni termici** basato su **tecnologia μ -RWELL** nasce nell'ambito del progetto **EU ATTRACT-uRANIA** (5/2019 –10/2020)

μ -RWELL Advanced Neutron Imaging Apparatus (uRANIA)

funded within the call ATTRACT,
European Union's Horizon 2020 research and innovation programme
under grant agreement No 777222

INFN - Ferrara, LNF
Lund University
ESS – Linköping Coating Workshop
ELTOS SpA (IT), TECHTRA (PL)

Objective of EU project: proof of concept

Application fields: measurement of neutron fluxes at spallation source

Imaging of crystals for material studies

Neutron-based radiography, Homeland security Monitoring radioactive waste

Composizione della Collaborazione

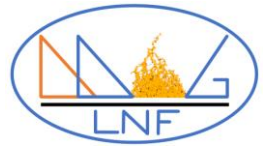
INFN - LNF (1.1- FTE)

| | |
|------------------------------|------------|
| G. Bencivenni (resp. naz.) - | 0.3 |
| G. Felici - | 0.2 |
| G. Morello - | 0.3 |
| M. Poli Lener - | 0.3 |
| M. Giovannetti - | 0 |

INFN - Ferrara (1.0 - FTE)

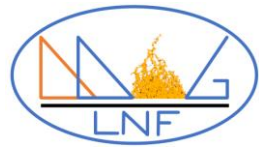
| | |
|-------------------------------|-------------|
| G. Cibinetto (resp. locale) - | 0.25 |
| R. Farinelli - | 0.35 |
| I. Balossino - | 0.2 |
| I. Garzia | 0.2 |
| L. Lavezzi | 0 |
| G. Mezzadri | 0 |
| M. Scodeggio | 0 |

Stato dell'arte (I)

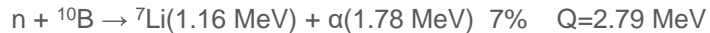
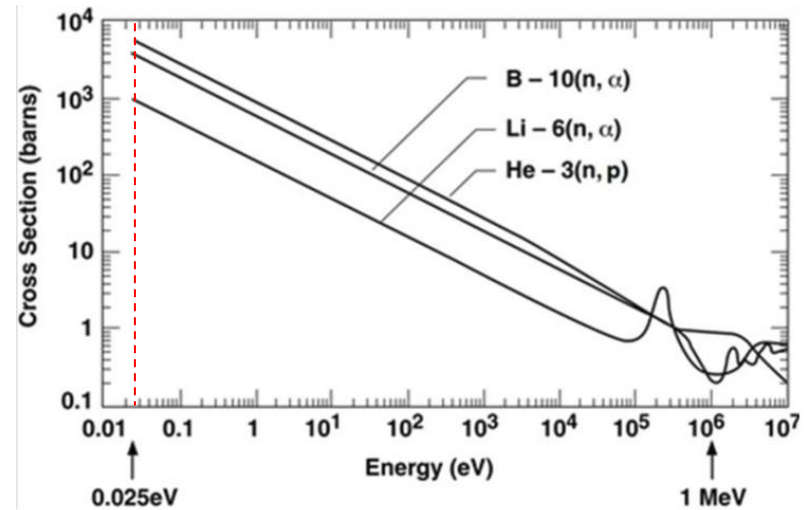


- **Rivelatori di neutroni termici**
 - **rivelatori a filo con ^3He** ad alta pressione, grazie all'alta sezione d'urto per assorbimento, sono storicamente tra i più efficienti rivelatori di neutroni termici
 - la **crisi dell' ^3He** (>2000, *riduzione testate nucleari e maggiore domanda per applicazioni di sicurezza nazionale*) ha richiesto lo sviluppo di tecnologie alternative
 - nei **rivelatori a gas** la rivelazione di neutroni termici è possibile grazie all'utilizzo di **appropriati materiali convertitori**: le particelle cariche prodotte nell'interazione rilasciano un segnale distinguibile dal fondo (generalmente di fotoni)

Stato dell'arte (II)

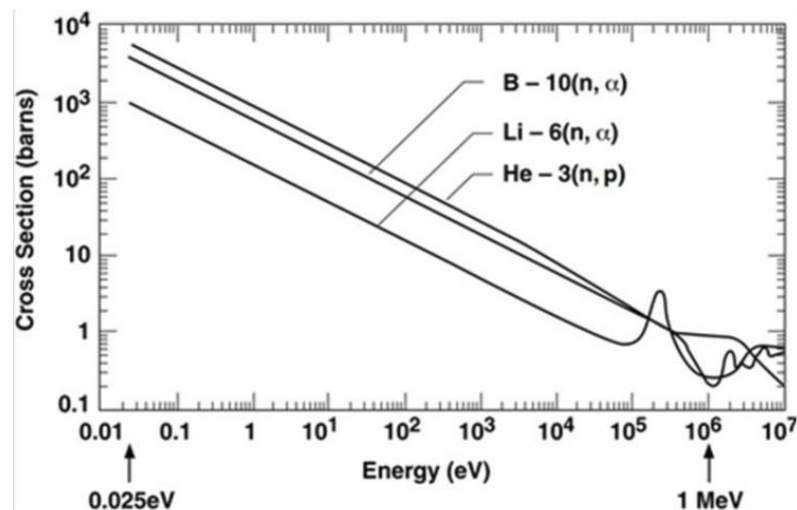
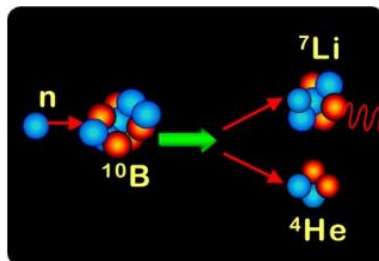
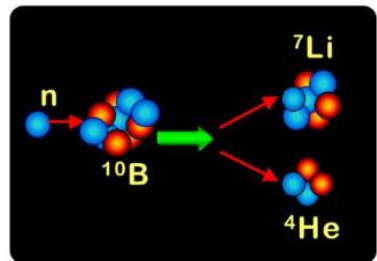
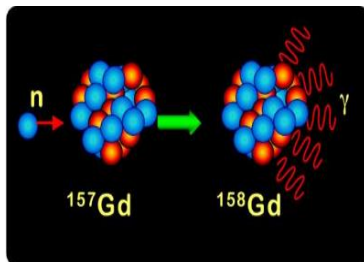
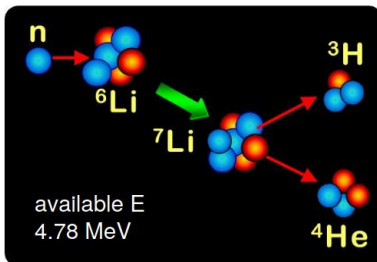


- I **convertitori** più comunemente utilizzati, a parte l' ^3He , sono ^{10}B e ^6Li , con sezioni d'urto per neutroni termici di **3840** e **940 barn** rispettivamente. Il ^{157}Gd ha una sezione d'urto di circa **255000 barn** ma i prodotti sono raggi X e elettroni di conversione, meno facili da distinguere dai fotoni di fondo
- I **vantaggi del ^{10}B** : elevata stabilità chimica, non igroscopicità, costi relativamente contenuti, ottima adesione su diversi substrati, basso livello di impurità e spessore controllabile e uniforme su grandi superfici
- **Deposizioni di ^{10}B** su vari substrati e dimensioni fino a (50)30x200 cm² realizzabili presso l' "**ESS - Linköping Coatings Workshop**" (Svezia)

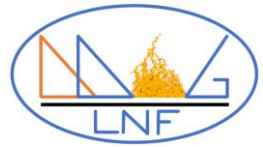


Le particelle alfa e gli ioni Litio hanno un range in gas dell'ordine di qualche mm, producendo un segnale facilmente distinguibile dal fondo.

Converter materials



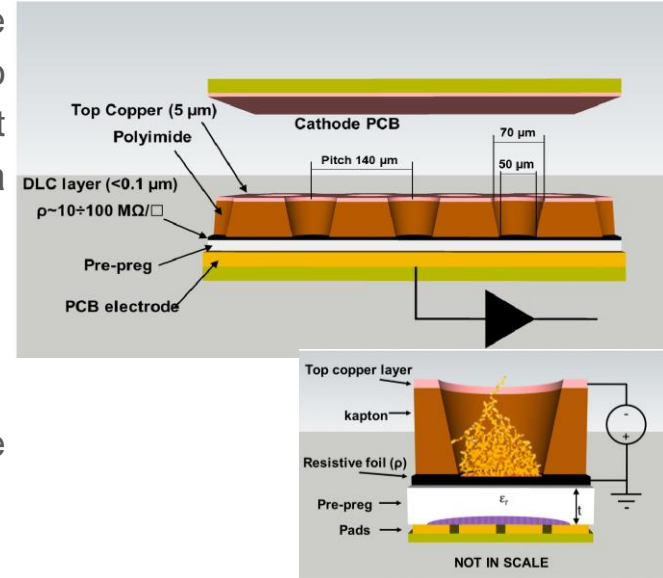
Obiettivi del progetto



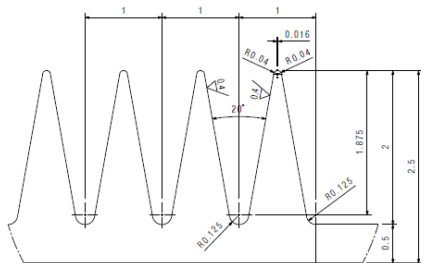
- **Sviluppo di un dispositivo innovativo** per la rivelazione di neutroni termici ad alta efficienza, basato sulla tecnologia **micro-ResistiveWELL (μ -RWELL)** per applicazioni in **homeland security e radioactive waste monitoring**
- **Conversione dei neutroni termici basata su deposizioni di B4C** realizzate da ESS-Linkoping Coating Workshop (Sweden)
- Possibilità di realizzare **detector di grandi dimensioni e convertitori di varie geometrie**
- **Sviluppo di elettronica low cost** per operazione in **counting-mode** per applicazioni in **Radiation Portal Monitor (RPM), Radioactive Waste Monitoring (RWM)**
- Test di RWELL ad alta granularità operata in **tracking-mode** per applicazioni in **radiografia comparata neutronica/raggi-X**

Metodologia della ricerca

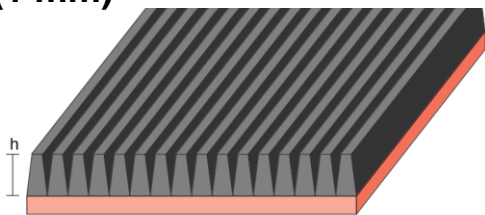
- **μ -RWELL:** MPGD compatto, con singolo stadio di amplificazione in Kapton+Cu (GEM-like) accoppiato capacitivamente attraverso stadio resistivo (DLC) direttamente con il PCB readout (strip/pad/pixel) \rightarrow **large area (RPM) e geometria flessibile/cilindrica o roof-tile (RWM)**
- **Convertitori:**
 - catodi planari con $2.5 \mu\text{m}$ di B_4C (EU ATTRACT-uRANIA)
 - **mesh metalliche borate** inserite nello spazio di deriva
 - **grooved-cathode** per aumentare la superficie efficace borata
 - catodi **multi-blade**, con lamelle perpendicolari (floating)
- **Misure in current-mode:** l'efficienza di conversione può essere estratta dalla misura della corrente che fluisce sul DLC (*necessitano simulazioni con GEANT4 – Ferrara*)
- **Misure in counting-mode:** lettura diretta del segnale indotto sul readout a pad (o sul top di amplificazione)
- **Imaging**, per *neutron-radiography*, **con readout a micro-strip** con APV25 (risoluzione $100 \mu\text{m}$)⁸



Converter geometries



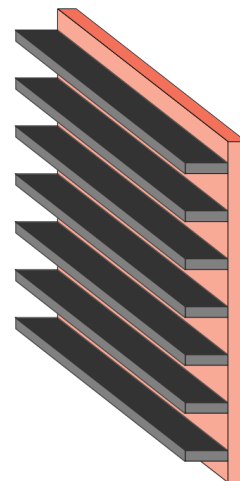
$h = O(1 \text{ mm})$



neutrons

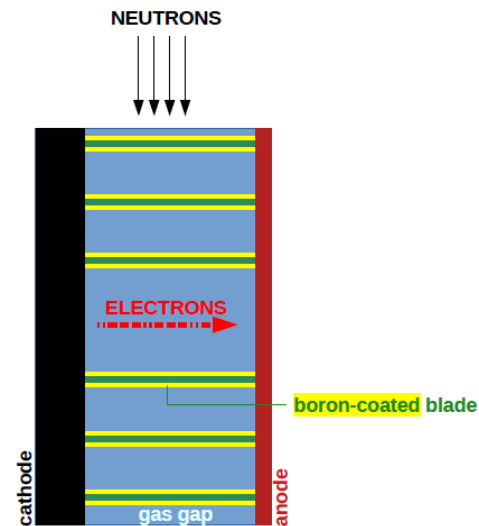
Grooved cathode
(head-on operation)

$h = O(1 \text{ cm})$



neutrons

multi-blade cathode
(side-on operation)

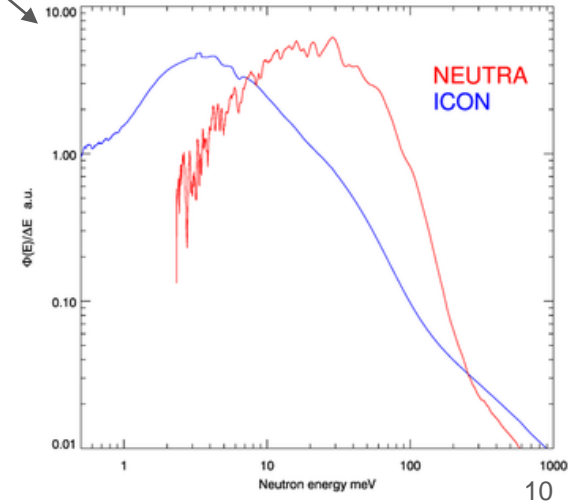
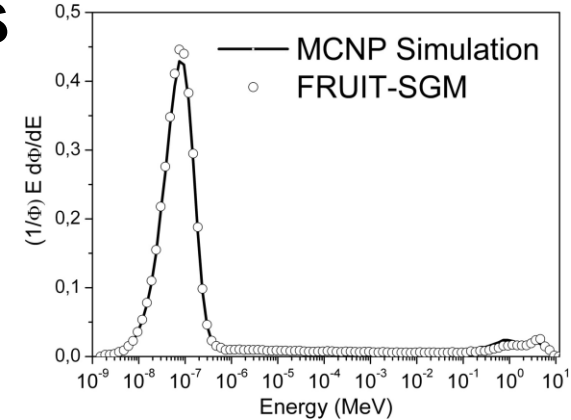


Neutron test facilities

- **ENEA - HOTNES:** sorgente di $^{241}\text{Am-B}$ in pozzetto di polietilene. Flusso di neutroni di 750 Hz/cm^2 . Energia piccata a 100 meV con RMS di 290 meV
- **PSI - NEUTRA:** fascio di neutroni termici con flusso 1 MHz/cm^2 . Energia moderabile tramite deuterio liquido (ICON)

| Lunghezza a d'onda (Å) | Energia (meV) | Risoluzione energetica (meV) |
|------------------------|---------------|------------------------------|
| 3.09 | 8.604 | 2.462 |
| 5.08 | 3.183 | 0.555 |
| 7.07 | 1.643 | 0.207 |
| 9.06 | 1.000 | 0.098 |
| 11.05 | 0.673 | 0.055 |
| 13.04 | 0.483 | 0.034 |
| 15.03 | 0.364 | 0.022 |

Berlino - NEAT: è uno spettrometro a tempo di volo con multi-chopper ad elevata risoluzione in energia, che permette di produrre fasci monocromatici con energie da $320 \mu\text{eV}$ (16 Å) a 20 meV (2 Å).



γ - ray test sources

... e poi ... il problema della discriminazione γ -n

The γ -ray sensitivity of a neutron beam monitor is an important criterion in its selection. This is because it is important to discriminate between the background radiation which is mainly γ and the neutrons from the beam. To understand the degree of neutron to γ discrimination, the beam monitors were tested using neutron and γ sources at the Source Testing Facility, Lund University.

For γ sensitivity measurements different γ sources (^{60}Co , ^{57}Co , ^{133}Ba) at 2 cm from the monitor were used in order to evaluate the sensitivity of the monitors to low, medium and high-energy γ . The corresponding energies and intensities of these sources are summarized in Table III.

TABLE III. The γ sources used with their corresponding energy and intensities.

| Isotope | Current activity (MBq) | Energy (keV) | Intensity (%) |
|-------------------|------------------------|--------------|---------------|
| ^{60}Co | 15.58 | 1173.23 | 99.85 |
| | | 1332.48 | 99.98 |
| ^{57}Co | 21.34 | 122 | 85.6 |
| | | 136 | 10.7 |
| ^{133}Ba | 3.12 | 384 | 9 |
| | | 356 | 62 |
| | | 303 | 18 |
| | | 276 | 7 |
| | | 80 | 36 |
| | | 30–35 | 117 |

... campagna di calibrazione del detector alla Source Test Facility di Lund (II anno)

WP1 - Sviluppo di convertitori borati e *detector integration* (resp. G. Morello, LNF)

- disegno, costruzione e assemblaggio rivelatori
- *grooved cathodes* (type I) con diversi angoli e profondità delle scanalature e diversi spessori di B4C
- *single/double metallic mesh* (type II) con diverse trasparenze ottiche/elettroniche e deposizioni di B4C
- *multi-blade* (type III) implementate su rivelatore μ -RWELL con geometria *TPC-oriented*

WP2 – Simulazioni (resp. L. Lavezzi, INFN – To)

I tre tipi di convertitori presentati nel WP1 dovranno essere studiati/ottimizzati attraverso simulazioni in GEANT4; la relativa validazione con dati sperimentali similmente a quanto fatto con il catodo borato in ATTRACT - uRANIA (EU). Simulazione fondi principalmente fotoni (varie energie) e neutroni cosmici.

WP3 - DAQ ed elettronica (resp. R. Farinelli, INFN – Fe)

- Sviluppo elettronica a componenti discreti per readout in counting-mode del rivelatore per applicazioni in RPM e RWM
- Studi finalizzati alla lettura di rivelatori equipaggiati con micro-strip per *imaging* neutronico

1° anno: costruzione e test di due tipi di convertitori su rivelatori standard, disegno SEA-LNF, produzione ELTOS-CERN.

Test ENEA-HOTNES

2° anno: costruzione e test di terzo tipo di convertitore su rivelatore RWELL a TPC, disegno SEA-LNF, produzione ELTOS-CERN.

Test ENEA-HOTNES

3° anno: costruzione e test di rivelatore large size RWELL, disegno SEA-LNF, produzione ELTOS-CERN. Elettronica counting-mode finale.

Test Berlino o PSI

| | 2021 | | | | 2022 | | | | 2023 | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1° Tr. | 2° Tr. | 3° Tr. | 4° Tr. | 1° Tr. | 2° Tr. | 3° Tr. | 4° Tr. | 1° Tr. | 2° Tr. | 3° Tr. | 4° Tr. |
| WP1 | | | | | | | | | | | | |
| Converter design (type I - II) | █ | | | | | | | | | | | |
| Converter construction & deposition (ESS) | | █ | | | | | | | | | | |
| Standard detector construction (ELTOS-CERN) | | | █ | | | | | | | | | |
| Detector integration & quality test | | | | █ | | | | | | | | |
| ENEA-HOTNES test & data analysis | | | | | █ | | | | | | | |
| Converter design and construction (type III) | | | | | | █ | | | | | | |
| Design & construction of new detector for multi-blade (type III) | | | | | | | █ | | | | | |
| Detector integration & quality test | | | | | | | | █ | | | | |
| TESTS & data analysis: 1 - ENEA-HOTNES; 2 -Source Test Facility (LUND) | | | | | | | | | █ | | | |
| Large area converter construction & deposition (ESS) | | | | | | | | | | █ | | |
| Large area detector design & construction (ELTOS-CERN) | | | | | | | | | | | █ | |
| Detector integration & quality test | | | | | | | | | | | | █ |
| Test at CAEN (tbc) | | | | | | | | | | | | |
| Test PSI o Berlino (tbc) | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| WP2 | | | | | | | | | | | | |
| simulation of converter (type I - II) | █ | █ | | | | | | | | | | |
| simulation of converter type III (multi-blade) | | | | | █ | | | | | | | |
| simulation of background events | | | | | | | | | █ | █ | | |
| WP3 | | | | | | | | | | | | |
| design amplificatore per counting mode | | | | | | | | | | | | |
| test prototipo di amplificatore per counting-mode (su banco/cosmici) | | | | | | | | | | | | |
| test elettronica APV e trigger con elettronica counting (su banco/cosmici) | | | | | | | | | | | | |
| disegno scheda DAQ per elettronica counting-mode a 8 o 16 chs | | | | | | | | | | | | |
| Test con sorgnete di neutroni per valutare prestazioni amplificatore counting-mode | | | | | | | | | | | | |
| Ottimizzazione con eventi di neutroni di algoritmi uTPC per imaging | | | | | | | | | | | | |
| Test scheda finale per l'elettronica in counting mode | | | | | | | | | | | | |
| Test della nuova elettronica in counting mode con large area | | | | | | | | | | | | |
| Misura efficienza e risoluzione spaziale per applicazioni di imaging | | | | | | | | | | | | |

Milestones

- **M1:** realizzazione dei convertitori a *mesh* e *grooved-cathode* e costruzione rivelatori piccoli dimensioni [m9]
- **M2:** analisi dati del test beam di HOTNES con prototipi di piccole dimensioni equipaggiati con convertitori a *mesh* e *grooved-cathode* e instrumentati con elettronica commerciale [m12]
- **M3:** progettazione, costruzione e test del rivelatore con geometria TPC e convertitori *multi-blade* [m24]
- **M4:** design e test di elettronica custom per il *counting-mode* [m21]
- **M5:** misura delle prestazioni di efficienza in *counting mode* e risoluzione spaziale di un prototipo di grande area [m36]

Richieste ai servizi di laboratorio

Richieste servizi per l'anno (LNF)

- | | | |
|-----------------------|---|------|
| ○ CAD elettronico | → | 3 mu |
| ○ CAD meccanico | → | 3 mu |
| ○ Assistenza apparati | → | 3 mu |
| ○ Officina meccanica | → | 2 mu |

Piano finanziario 2021 (I)

Preliminary

| | | LNF (k€) | Ferrara (k€) | Totale (k€) |
|-----------------|-----------------------|-----------|--------------|-------------|
| CONSUMI | WP1 | 24 | 20.5 | 44.5 |
| | WP3 | 0 | 5 | 5 |
| MISSIONI | Contatti ditte | 2 | 2 | 4 |
| | TB ENEA | 0 | 4 | 4 |

Piano finanziario 2021 (II)

Preliminary

CONSUMI

WP1

- N.4 convertitori type I con ($h=0.2, 1, 2, 4$ mm) 4.0 k€
- Convertitori a mesh (n. 8 type II) 1.0 k€
- N.1 B4C targhetta per sputtering convertitori 15.0 k€
- Frame per mesh e catodi spessori (2, 3, 6 mm) 2.0 k€
- N. 12 PCB-RWELL a pad 20.0 k€
- N.4 pre-mixed gas bottle 2.5 k€

WP3

- Elettronica counting mode 5.0 k€

Missioni

- Contatti con ELTOS e ESS-Linkoping 4.0 k€
- Test beam ENEA-HOTNES (Ferrara) 4.0 k€

Piano finanziario 2022-2023 (stima)

| 2022 | | Ferrara + LNF (k€) |
|----------|---------------------------|-----------------------|
| CONSUMI | WP1 | 18.5 |
| | WP3 | 10 |
| MISSIONI | Contatti ditte | 4 |
| | Test beam ENEA | 2 |
| | Gamma Test at STF Lund | 12 |

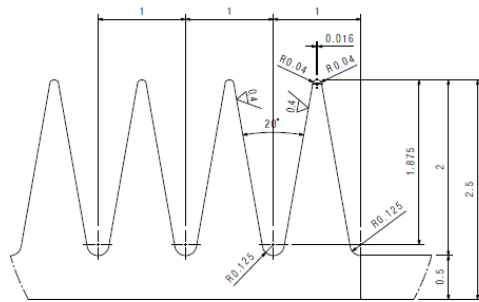
| 2023 | | Ferrara + LNF (k€) |
|----------|----------------|-----------------------|
| CONSUMI | WP1 | 20 |
| | WP3 | 5 |
| MISSIONI | Contatti ditte | 4 |
| | TB Berlino | 12 |

Conclusioni

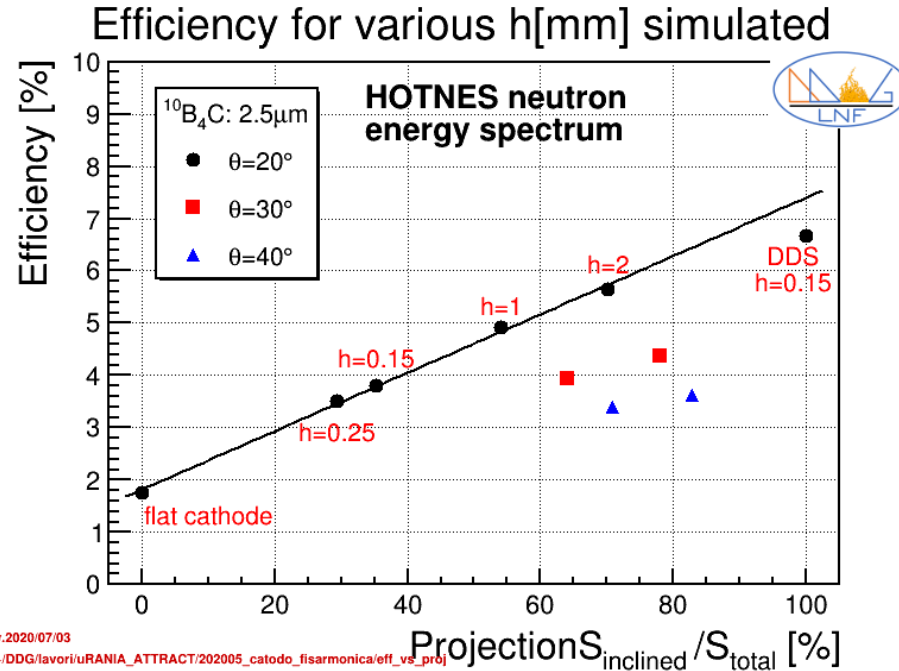
- Proposta di un **rivelatore per neutroni termici** con possibili applicazioni in **homeland security e radioactive waste monitoring** basato su tecnologia **μ RWELL e ^{10}B - converters**
- Tecnologia caratterizzata da semplicità, compattezza, robustezza, scalabilità e geometria flessibile
- **Trasferimento tecnologico:**
 - **ELTOS**, per detector manufacturing (in corso)
 - **CAEN**, per eventuali futuri sviluppi di RPM (*contatti in corso*)

Spare slides

Grooved cathode: preliminary simulation



For $E_n = 0,025$ meV
x2 efficiency



Efficiency for various grooved cathodes configurations, considering the HOTNES energy spectrum

RPM needs for large area sensitive detectors

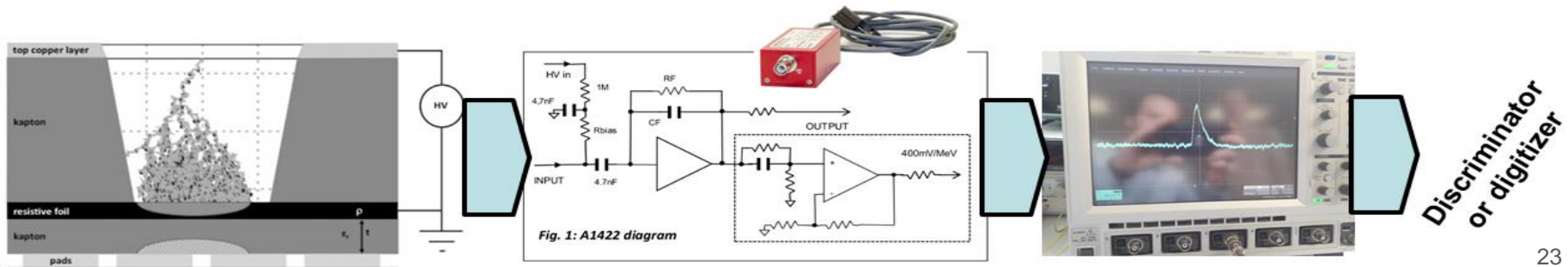
Nuclear Security Systems
and Measures for the Detection of
Nuclear and Other Radioactive Material
out of Regulatory Control

4.10. However, hand-held detectors, as personal radiation detectors, suffer from the relatively small size of their sensors. As sensitivity is directly related to the volume of the detector, these devices have limited detection ranges and may need a longer time to scan larger areas or items, such as shipping containers to obtain a sufficiently low limit of detection.

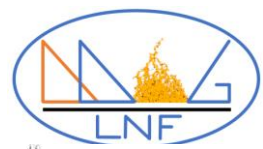
Counting mode

La moltiplicazione generata nel pozzetto della μ -RWELL induce un segnale negativo sul readout (*quello normalmente utilizzato*) e **positivo sul TOP dello stadio di amplificazione**. Disaccoppiando capacitivamente il TOP (alimentato con HV) e collegandolo ad un pre-amplificatore CAEN A1422 è stato osservato un segnale di $\sim 100 \text{ mV}/50\Omega$, che discriminato può essere inviato ad uno scaler.

Il circuito riportato qui sotto necessita la sostituzione di alcuni componenti per accoppiarsi in maniera opportuna alla μ -RWELL e alla sua capacità di ingresso (dell'ordine di $2 \text{ nF} - 100\text{cm}^2$). La riduzione del rumore gioca un ruolo chiave per massimizzare l'efficienza di questa tecnica di lettura che permette la misura in counting mode della singola particella, semplificando la rivelazione del neutrone (vs il current-mode) e aprendo la possibilità di costruire un rivelatore auto-triggerante.



Possibili Applicazioni



Possibili applicazioni nel campo della sicurezza nazionale:

- **Radiation Portal Monitor (RPM):** per il controllo dei traffici di materiale radioattivo ai confini o negli aeroporti; necessitano rivelatori di grandi dimensioni ($O(m^2)$) → **large area μ -RWELL**
- Monitoring barili di **scorie radioattive** (PuO_2 o PuF_4) → **large area e forma cilindrica (o *roof-tile*)**



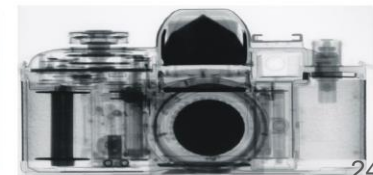
Altre applicazioni:

- Radiografia neutronica per il controllo dei materiali per industria aerospaziale, energetica e difesa. Complementare a radiografia a raggi X

Comparison of X-ray and Neutron Radiographs

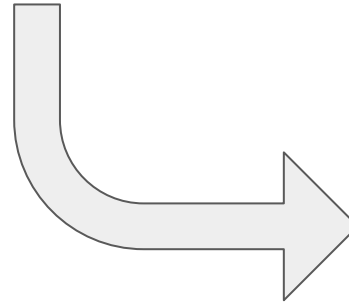
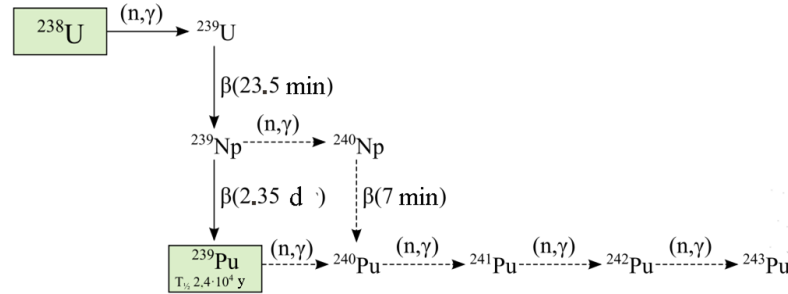
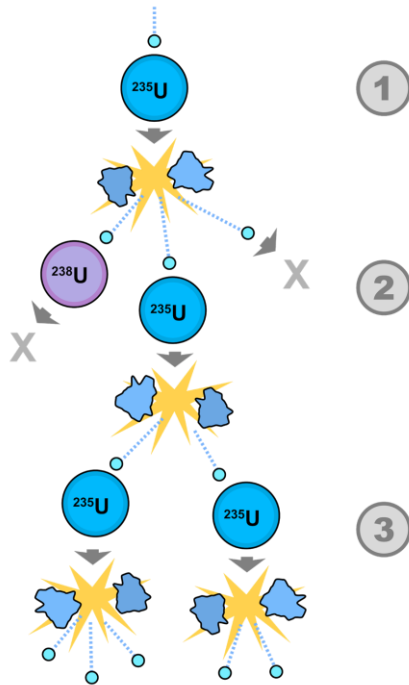
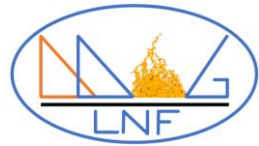


X-ray



Neutrons

Reazioni fissione e scorie radioattive



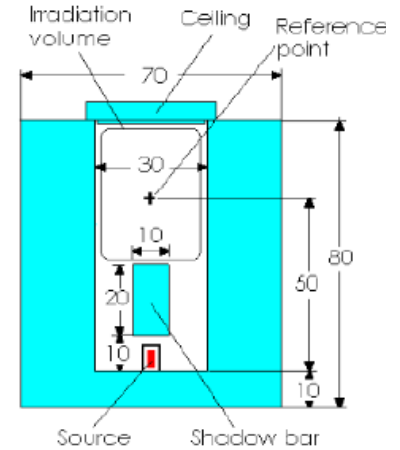
L'Uranio-238, prodotto di scarto della fissione, diventa per cattura elettronica $^{239,240,241,242,243}\text{Pu}$. Combinandosi con l'ossigeno il Pu dà origine a un ossido che emette neutroni.

| Isotope | Amount (wt%) | Neutron Production Rate for 100 g of Pu (n/s) | | |
|-------------------|--------------------|---|------------------------|------------------------|
| | | Metal (spontaneous fission) | PuO ₂ (α,n) | PuF ₄ (α,n) |
| ²³⁸ Pu | 0.024 | 62 | 322 | 52 800 |
| ²³⁹ Pu | 89.667 | 2 | 3 416 | 502 135 |
| ²⁴⁰ Pu | 9.645 | 9 838 | 1 360 | 202 545 |
| ²⁴¹ Pu | 0.556 | 0 | 1 | 95 |
| ²⁴² Pu | 0.109 | 187 | 0 | 29 |
| ²⁴¹ Am | 0.327 ^a | 0 | 880 | 144 417 |
| Totals | | 10 089 | 5 979 | 902 021 |
| ²³⁸ Pu | 0.059 | 153 | 791 | 129 800 |
| ²³⁹ Pu | 82.077 | 2 | 3 127 | 459 631 |
| ²⁴⁰ Pu | 16.297 | 16 623 | 2 298 | 342 237 |
| ²⁴¹ Pu | 1.231 | 0 | 2 | 209 |
| ²⁴² Pu | 0.336 | 578 | 1 | 91 |
| ²⁴¹ Am | 0.162 ^a | 0 | 436 | 71 546 |
| Totals | | 17 356 | 6 655 | 1 003 514 |
| ²³⁸ Pu | 1.574 | 4 077 | 21 092 | 3 462 800 |
| ²³⁹ Pu | 57.342 | 1 | 2 185 | 321 115 |
| ²⁴⁰ Pu | 24.980 | 25 480 | 3 522 | 524 580 |
| ²⁴¹ Pu | 10.560 | 0 | 14 | 1 795 |
| ²⁴² Pu | 5.545 | 9 537 | 11 | 1 497 |
| ²⁴¹ Am | 1.159 ^a | 1 | 3 118 | 511 863 |
| Totals | | 39 096 | 29 942 | 4 823 650 |

^a ²⁴¹Am wt% relative to plutonium.

Test @ ENEA – HOTNES facility

- Homogeneous Thermal Neutron Source
- Source: $^{241}\text{Am-B}$
- Cylindrical symmetry, polyethylene walls
- Iso-fluence on disks (within 1-2%) with diameter 30 cm
- Fluence 750 Hz/cm²
- Shadow block to stop gammas (4-9 $\mu\text{S/h}$)
- Angular distribution down to 8 mrad from surface
- Energy spectrum peaked at 100 meV (FWHM = 290 meV)



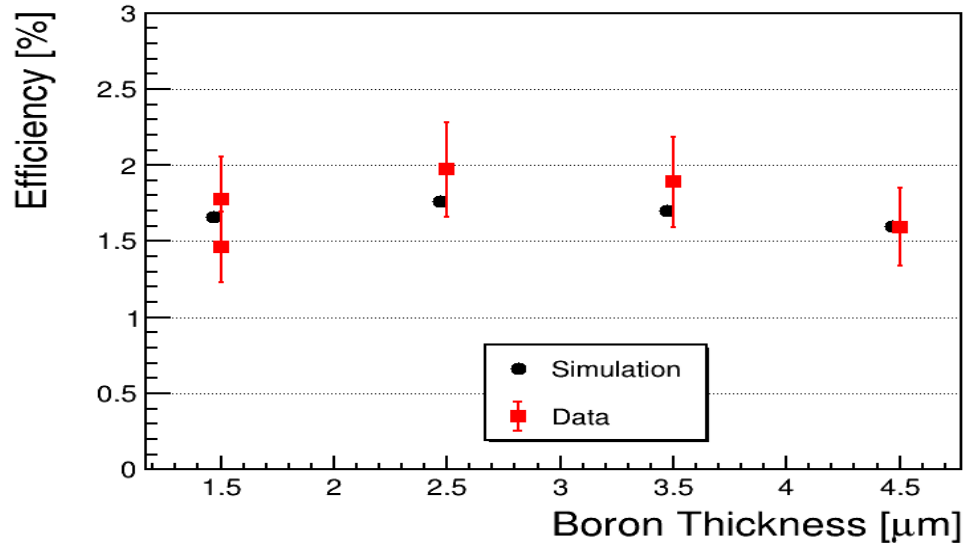
*[R. Bedogni et al., Nucl. Instr. & Meth. A 843 (2017) 18-21]

goal of the test: measure the conversion efficiency and compare it to simulation.

$$i = e \cdot \Phi \cdot G \cdot \epsilon \cdot \langle N \rangle \cdot \Sigma \quad \Rightarrow \quad \epsilon = \frac{i}{e \cdot \Phi \cdot G \cdot \langle N \rangle \cdot \Sigma}$$

- i = current measured with a picoamperometer
- e = electron charge
- Φ = fluence from HOTNES calibration (758 Hz/cm²)
- G = gain from X-ray calibration
- $\langle N \rangle$ = number of ionization from GARFIELD++ simulations
- Σ = chamber surface (10 × 10 cm²)

ATTRACT-uRANIA: experimental vs simulated results



The most basic detector option with a B4C coated cathode

The accordance between simulated data and experimental results is remarkable
→ **this validates the simulation code and procedure**

- w/2.5 μm ^{10}B a 2% efficiency obtained @ HOTNES (100 meV, FWHM 290 meV)
- → around 4% with 25 meV neutrons