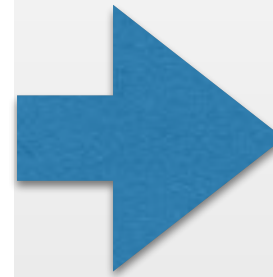


**ERC Advanced Grant 2013  
Research proposal [Part B1]**

Principal Investigator (PI): *Prof. Stefano Ragazzi*  
PI's Host Institution for the project: *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare*

The Electron Capture Decay of  $^{163}\text{Ho}$  to Measure the  
Electron Neutrino Mass with sub-eV sensitivity

HOLMES



**Sigla INFN in CSN2  
dal 2019**

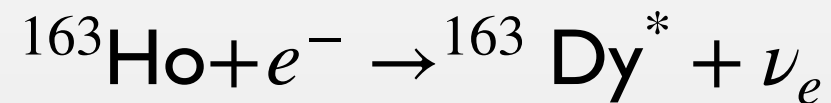
**Grant europeo finanziato nel 2014 (esteso sino a 02/2020)  
INFN GE e INFN / Uni Mi Bicocca.**

**Progetto pilota per la misura diretta di massa del neutrino  
sfruttando decadimento per cattura elettronica di  $^{163}\text{Ho}$ .**

**ERC grant terminato -> sigla INFN dal 2019**

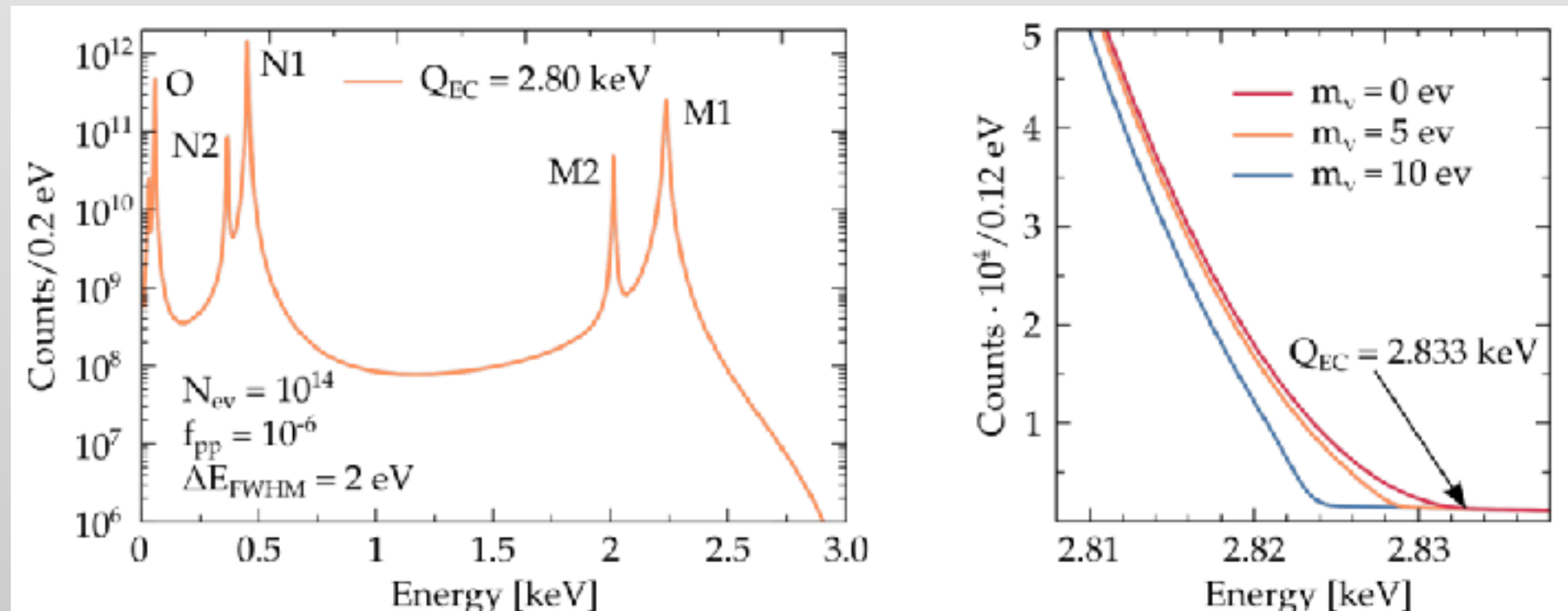
# La misura di HOLMES

- Decadimento di  $^{163}\text{Ho}$  via cattura elettronica da shell  $\geq M1$ ,  $Q_{EC} \sim 2.8\text{keV}$



$$\frac{d\Lambda_{EC}}{dE_c} = \frac{G_\beta^2}{4\pi^2} (Q - E_c) \sqrt{(Q - E_c)^2 - m_\nu^2} \times \sum_i K_i \frac{\Gamma_i}{2\pi} \frac{1}{(E_c - E_i)^2 + \Gamma_i^2/4}$$

- Misura calorimetrica dello spettro di diseccitazione del  $\text{Dy}^*$
- $m_\nu$  dipende da  $Q$  valore e posizione dei picchi
- $\tau \sim 4200\text{y}$ : pochi nuclei necessari per avere attività ragionevoli ( $1\text{Bq} = 2 \times 10^{11}$  nuclei)



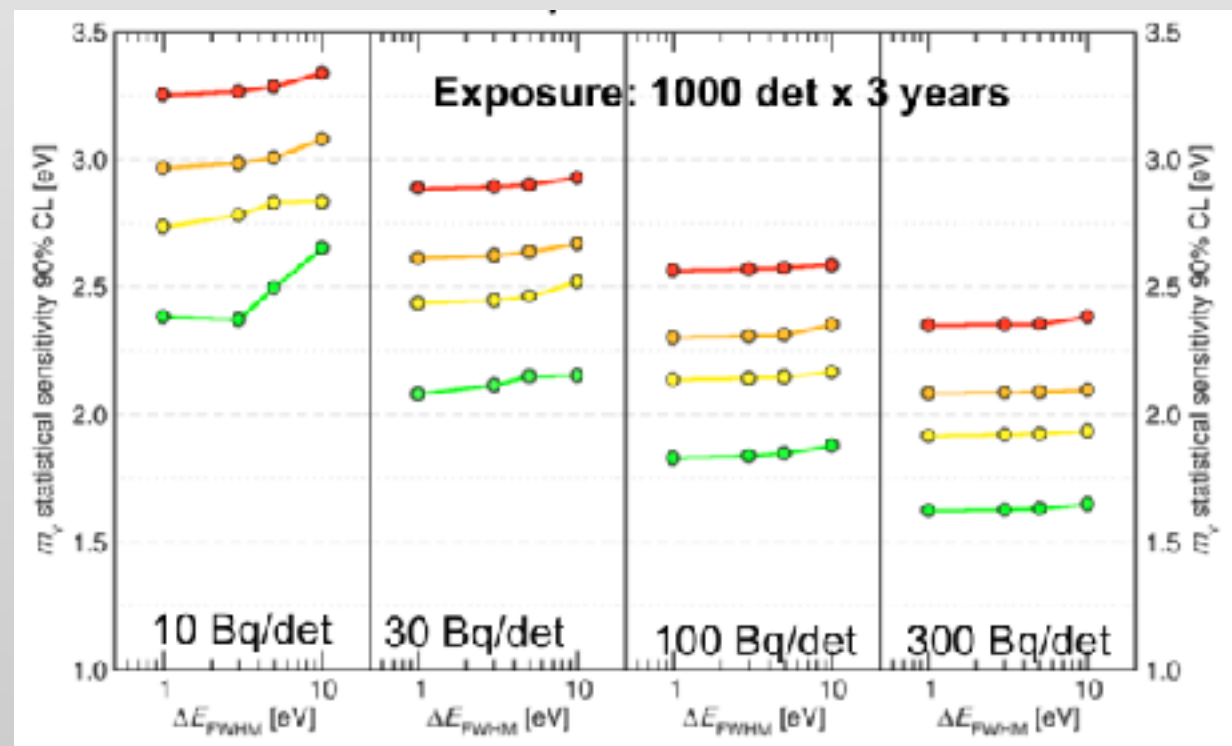
# La misura di HOLMES

Nella sua configurazione di baseline, **Holmes consiste in:**

- **array di micro-calorimetri basati su TES** con impiantati all'interno atomi di  $^{163}\text{Ho}$
- **$O(10^2)\text{Bq/detector}$** , corrispondenti a  $\sim 10^{13}$  nuclei di  $^{163}\text{Ho}$
- risoluzioni attese:  **$\Delta E \sim 1\text{eV}$ ,  $\tau \sim 1\mu\text{s}$**
- **array da 1000 rivelatori con readout multiplexato**
  - totale di  $\sim 10^{16}$  nuclei di  $^{163}\text{Ho}$   $\sim 18\mu\text{g}$
  - $O(10^{13})$  eventi in 1 anno di presa dati

E' una **misura pilota** che vuole dimostrare:

- la **fattibilita' della misura** sul singolo array
- la **scalabilita' del progetto** (ovvero, la possibilita' di costruire molti array da misurare contemporaneamente per aumentare la statistica)



# I task di HOLMES

---

- Produzione e caratterizzazione dei singoli microcalorimetri
- Ingegnerizzazione degli array
- Produzione della sorgente di  $^{163}\text{Ho}$
- Purificazione della sorgente
- Impiantazione dell' $^{163}\text{Ho}$  nei detector e completamento
- Sviluppo readout multiplexing

**resp. Milano Bicocca**

**resp. Genova**

# Produzione di $^{163}\text{Ho}$

$^{163}\text{Ho}$  prodotto per attivazione di  $^{162}\text{Er}$  in reattore:

- $^{162}\text{Er} (n,\gamma) ^{163}\text{Er}$
- $^{163}\text{Er} + e^- \rightarrow ^{163}\text{Ho} + \nu_e$  ( $\tau_{1/2} \sim 75$  m)
- alto yield  $\sim 3 \times 10^{12}$   $^{163}\text{Ho}$  nuclei/mg( $^{162}\text{Er}$ )/h

|  |  |  |  |  |   |
|--|--|--|--|--|---|
| Tm 163<br>1.81 h<br>$\epsilon$<br>$\beta^+$ ...<br>$\gamma$ 104; 69; 241;<br>1434; 1397... | Tm 164<br>5.1 m<br>2.9 m<br>$\epsilon$<br>$\beta^+$ 2.9...<br>$\gamma$ 91;<br>1155;<br>208;<br>315...  | Tm 165<br>30.06 h<br>$\epsilon$<br>$\beta^+$ ...<br>$\gamma$ 243; 47;<br>297; 807... | Tm 166<br>7.70 h<br>$\epsilon$<br>$\beta^+$ 1.9...<br>$\gamma$ 779; 2052;<br>184; 1274...  | Tm 167<br>9.25 d<br>$\epsilon$<br>$\gamma$ 532...<br>m           | Tm 168<br>93.1 d<br>$\epsilon$ ; $\beta^+$ ...<br>$\beta^+$ ...<br>$\gamma$ 198; 816;<br>447...   |
| Er 162<br>0.139<br>$\alpha$ 19<br>$\sigma_n, \alpha < 0.011$                               | Er 163<br>75 m<br>$\epsilon$<br>$\beta^+$ ...<br>$\gamma$ (1114...)<br>g   | Er 164<br>1.601<br>$\alpha$ 13<br>$\sigma_n, \alpha < 0.0012$                        | Er 165<br>10.3 h<br>$\epsilon$<br>no $\gamma$  | Er 166<br>33.503<br>$\alpha$ 3 + 14<br>$\sigma_n, \alpha < 7E-5$ | Er 167<br>2.3 s<br>22.869<br>$\beta^-$ 200<br>$\alpha$ 600<br>$\sigma_n, \alpha < 3E-6$   |
| Ho 161<br>6.7 s<br>$\epsilon$<br>$\gamma$ 26;<br>78...<br>$e^-$<br>ly 211                  | Ho 162<br>68 m<br>15 m<br>$\epsilon$<br>$\beta^-$ 29...<br>$\gamma$ 185;<br>1220; 283;<br>937...<br>$e^-$<br>$\beta^+$ 1.1...<br>$\gamma$ 81;<br>1319... | Ho 163<br>1.1 h<br>4570 a<br>$\epsilon$<br>no $\gamma$<br>ly 298                     | Ho 164<br>37 m<br>29 m<br>$\epsilon$<br>$\beta^-$ 1.0...<br>$\gamma$ 91;<br>73...<br>$e^-$ | Ho 165<br>100<br>$\alpha$ 3.1 + 58<br>$\sigma_n, \alpha < 2E-5$  | Ho 166<br>1200 a<br>2680 h<br>$\beta^-$<br>0.07...<br>$\gamma$ 184;<br>810; 712<br>$\alpha$ 3100<br>$\beta^-$<br>1.9...<br>$\gamma$ 81...<br>$e^-$    |
| Dy 160<br>2.329<br>$\alpha$ 60<br>$\sigma_n, \alpha < 0.0003$                              | Dy 161<br>18.889<br>$\alpha$ 600<br>$\sigma_n, \alpha < 1E-6$  | Dy 162<br>25.475<br>$\alpha$ 170   | Dy 163<br>24.896<br>$\alpha$ 120<br>$\sigma_n, \alpha < 2E-5$                              | Dy 164<br>28.260<br>$\alpha$ 1610 + 1040                         | Dy 165<br>1.3 m<br>2.35 h<br>ly 108; $e^-$<br>$\beta^-$ 0.9;<br>1.3...<br>1.0...<br>$\gamma$ 91;<br>$\gamma$ 515...<br>$\alpha$ 3000<br>$\alpha$ 3000 |
| Tb 159   | Tb 160   | Tb 161   | Tb 162   | Tb 163   | Tb 164  |

Ma ci sono contaminazioni provenienti da altre specie:

- $^{165}\text{Ho} (n,\gamma) ^{166m}\text{Ho}$  ( $\beta$ ,  $\tau_{1/2} \sim 1200$  anni)
- da contaminazioni di  $^{165}\text{Ho}$  oppure  $^{164}\text{Er} (n,\gamma)$
- processo di purificazione e selezione del campione in modo da eliminare specie contaminanti che possono generare fondo nella misura
- **fondamentale ridurre al minimo il contributo di  $^{166m}\text{Ho}$**

# Purificazione dell' $^{163}\text{Ho}$

---

La separazione dell'Ho da altri contaminanti procede in piu' passaggi:

- **purificazione radiochimica** (prima/dopo il processo di attivazione)
  - permette di separare tutto cio' che non e' Ho, non ha effetti sugli isotopi (es.  $^{166m}\text{Ho}$ )
  - **MoU siglato fra INFN e PSI** per la purificazione di tutta la sorgente necessaria per HOLMES (~ 200MBq)
- **preparazione del target di  $^{163}\text{Ho}$** 
  - $^{163}\text{Ho}$  dopo purificazione è in forma ossidata in soluzione HCl, necessario inglobarlo in bersaglio da sputtering in sorgente ionica
- **separazione in massa con spettrometro magnetico**
  - fondamentale per eliminare  $^{166m}\text{Ho}$
  - sviluppo di linea di fascio a bassa energia (50keV) permette di impiantare nuclei nell'assorbitore
  - Produzione di target da sputtering per sorgente



# Produzione del target (1)

---

“ricetta” sinter definita (collaborazione con Prof. Manfrinetti DCCI):

- 5% Ho
- 36% Ti
- 41% Ni
- 18% Sn
- Polveri < 40um
- Miscela e lavorazione in atmosfera controllata per ridurre ossidazione
- Pressato in stampo e “cotto” @1200 K per qualche giorno...

**Target prodotto e pronto per il test.**



# Produzione del target (2)

---

**Altra possibilita'**: produzione del target tramite "molecular plating" in collaborazione con il gruppo di radiochimica del PSI (D. Schumann, E. Maugeri):

- una forma di elettrodeposizione ad alta uniformita' ed efficienza
- possibilita' di gestire diverse forme chimiche dell'Ho
  - Non necessario Ho metallico -> evita passaggio distillazione
- eliminerebbe importanti questioni di sicurezza (manipolazione sorgente fatta al PSI)...

Alcuni target ad hoc gia' prodotti in officina a Genova e inviati a PSI per la procedura di molecular plating.

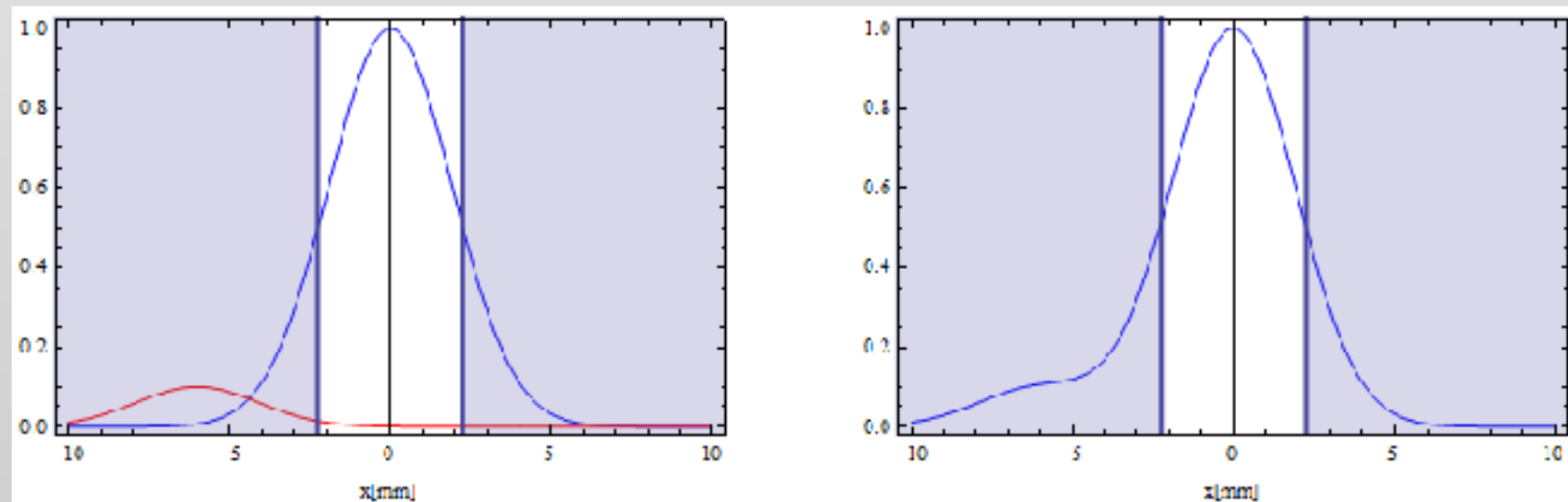
Verranno testati nelle prossime settimane con deposizione di Ho (165!)



# Il separatore isotopico

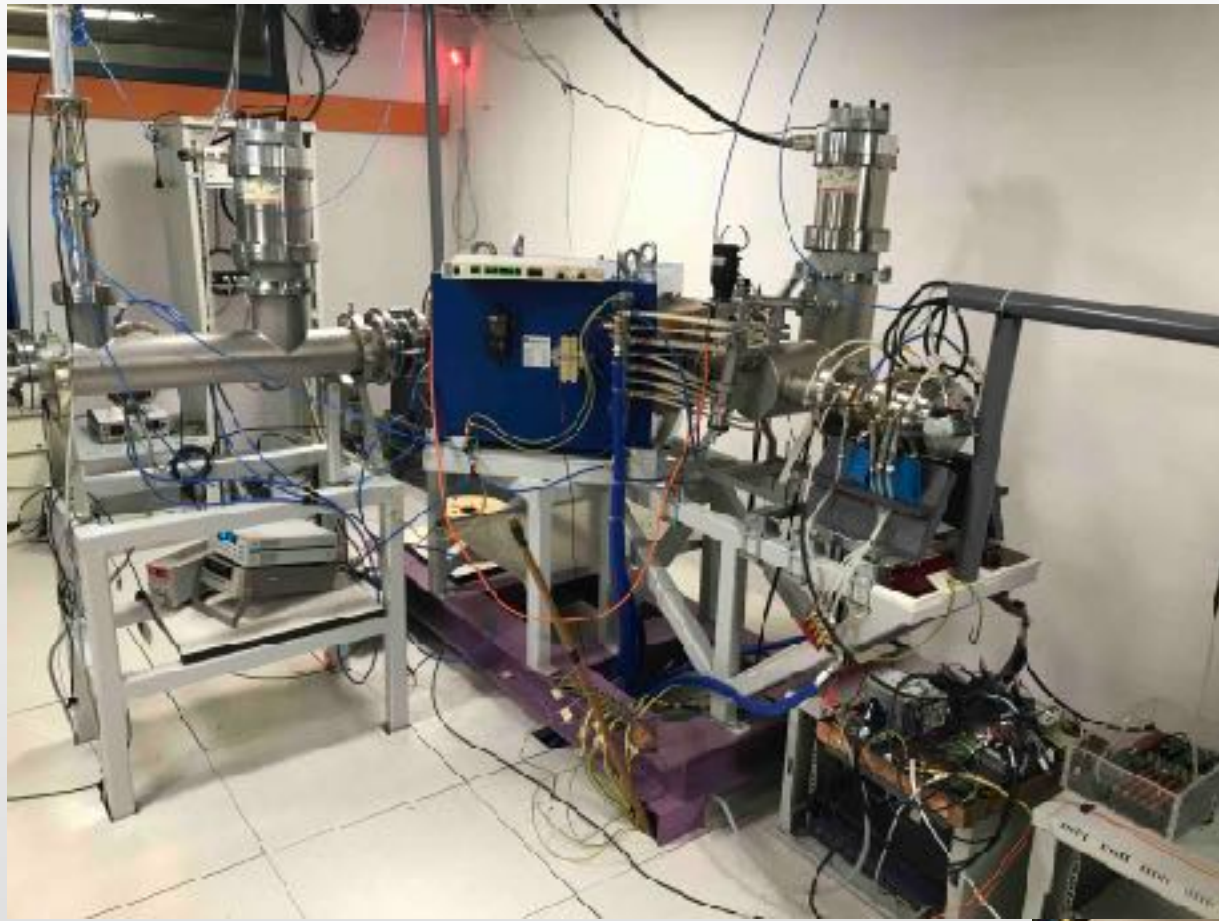
- **sorgente ionica** basata su sputtering con potenziale di accelerazione a 50kV
  - ionizza  $^{163}\text{Ho}$  in plasma d'Ar e accelera fascio
- **dipolo per analisi magnetica**
  - separa isotopi in funzione delle masse
- **diagnostica e target**
  - analisi del fascio, slitte, posizionamento del target, coevaporazione di Au (la sorgente deve essere incapsulata nel micro-calorimetro)

Diametro fascio atteso circa 4.5mm FWHM alle slitte dopo magnete. Separazione fra 2 picchi masse adiacenti (es 163/162) ~ 6mm





# Il separatore isotopico



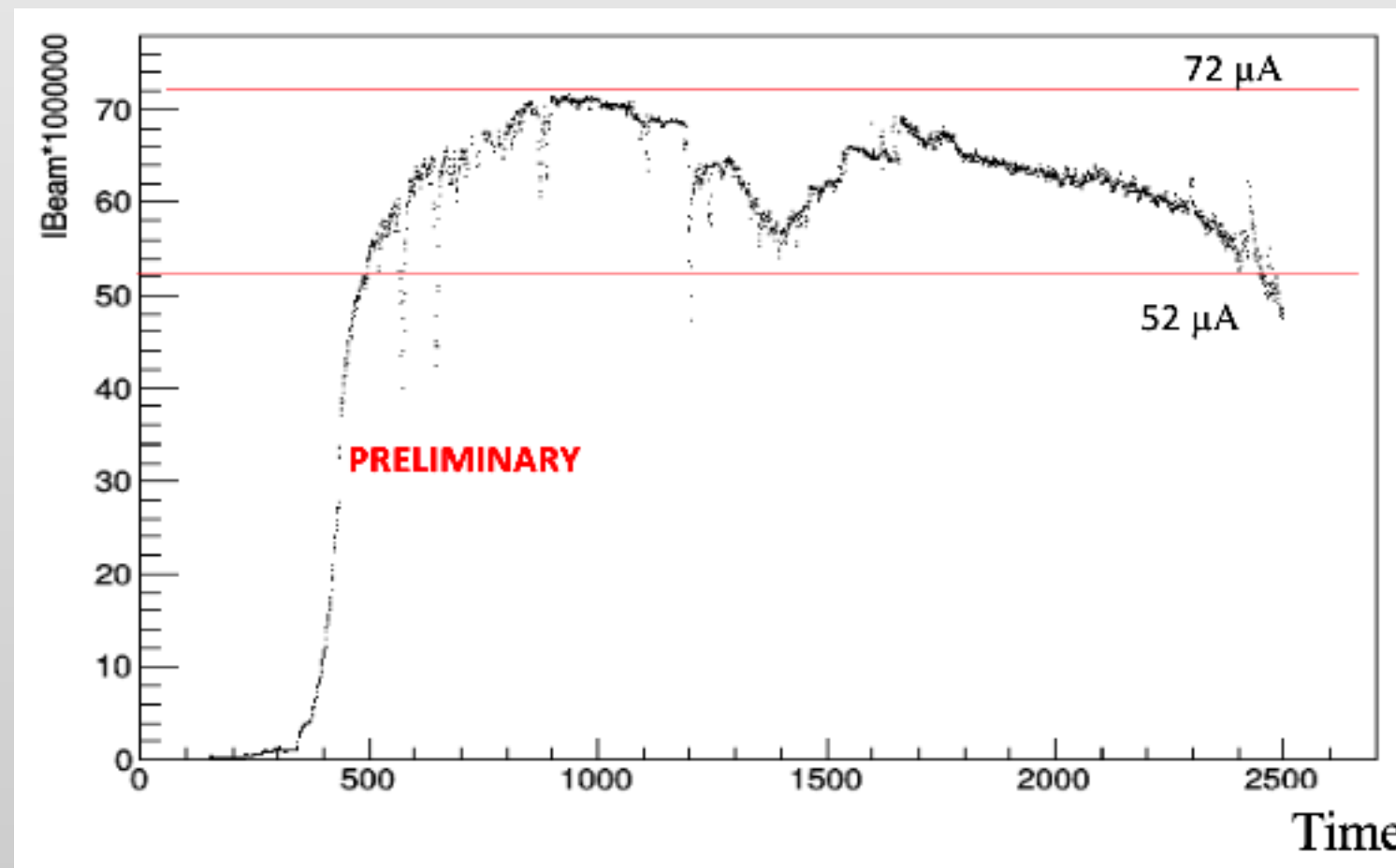


# Isolamento HV



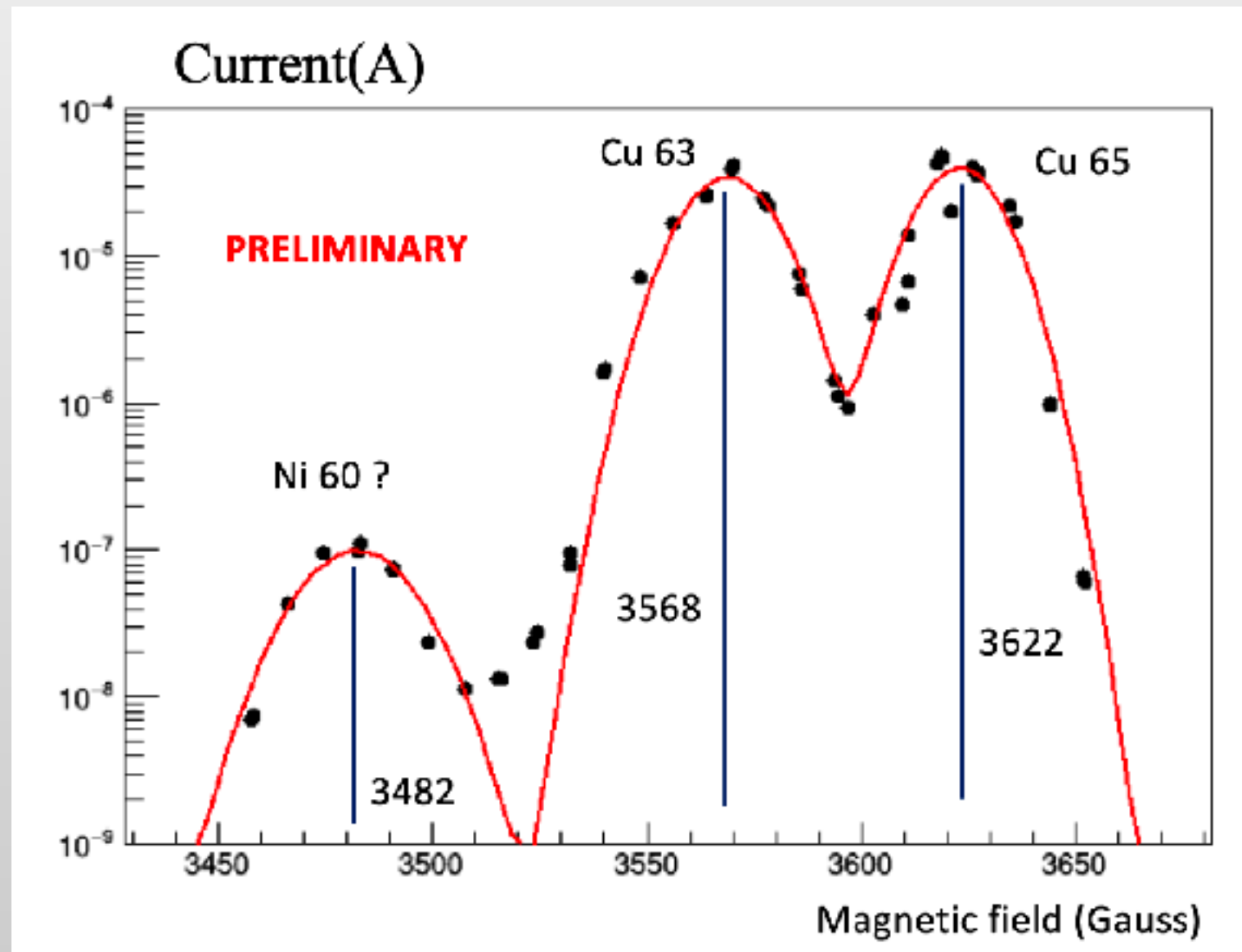
# Impiantatore

- Installazione dell'impiantatore completata
- Tutto il sistema e' controllato in remoto con controller NI e Labview
  - Tutti gli elementi a 50kV sono schermati con strutture in PVC da 40mm
- Corrente di fascio misurata:  $\sim 50/60\mu\text{A}$  @20kV con target in rame
- Stiamo studiando la correlazione con i parametri della sorgente



# Impiantatore

- Primi test effettuati con bersaglio in rame per valutare separazione in massa ( $^{63}\text{Cu}$  e  $^{65}\text{Cu}$ )
  - Studi ancora in corso (alcuni effetti da capire: abbondanza relativa, etc)



# Attività 2020 - 2021

---

- L'installazione dell'impiantatore è stata completata nel 2019
- A causa del lockdown i test sono stati interrotti a fine febbraio 2020.
- Le operazioni sono riprese a metà maggio con qualche rallentamento:
  - ~ 2 mesi necessari al ripristino delle attività da fine lockdown ad oggi (ancora in corso)
  - Al momento ripresi i test con bersaglio in rame, in attesa dei primi target con Ho naturale dal PSI.
- Se test positivo possibile procedere a prima impiantazione con  $^{163}\text{Ho}$  con l'attuale configurazione della macchina:
  - bassa attività';
  - design array non definitivo.



# Attività 2020 - 2021

---

- A seguire: upgrade della linea di fascio
  - Quadrupolo elettrostatico + tool diagnostica (già acquistati)
    - Incremento efficienza di impiantazione
  - Estensione della linea di fascio ~ 2.5 m
  - Progetto a cura di studio ingegneristico esterno per valutazione carichi solai etc...
    - Già finanziato da INFN su fondi 2019
    - In attesa di sopralluogo in laboratorio
- Il progetto per la dislocazione dei pesi in laboratorio in seguito all'upgrade verra' seguito da un ingegnere esterno (ordine 4kE già finanziato da INFN quest'anno)

# Anagrafica / richieste servizi

---

Richieste servizi:

- disegno e produzione strutture in seguito a studio posizionamento carichi per upgrade linea di fascio:
  - Officina: 4 m.u.
  - Pro. Mec.: 5 m.u.

| <b>Holmes</b> |        |
|---------------|--------|
| De Gerone     | 0.5    |
| Gallucci      | 0.3    |
| Fedkevych     | 0.3    |
| Celasco       | 0.3    |
| Manfrinetti   | 0.7    |
| Bevilacqua    | 9 m.u. |
| Siccardi      | 9 m.u. |

|           |        |
|-----------|--------|
| Officina  | 4 m.u. |
| Pro. mec. | 5 m.u. |