

## PROMPT GAMMA ACTIVATION ANALYSIS PER L'INVESTIGAZIONE DI MATERIALI E REPERTI ARCHEOLOGICI

### PRESENTAZIONE

L'analisi chimica di manufatti archeologici ha acquistato, recentemente, sempre più attenzione in vista della disponibilità di tecniche innovative. La conoscenza della composizione degli elementi - includendo quelli principali e gli elementi in traccia - può fornire importanti informazioni riguardo alla provenienza, al processo di manifattura, ai materiali di base, ecc. I metodi più comuni, quali l'investigazione microscopica ed i metodi analitici (XRF, INAA, ICP-MS) sono distruttivi, e ciò rappresenta generalmente un ostacolo notevole nel caso di reperti archeologici interi o di frammenti. Gli stessi oggetti, di conseguenza, potevano essere investigati, sino a poco tempo fa, soltanto a livello macroscopico. Riguardo all'analisi mediante fluorescenza dei raggi X (XRF), la stessa è di solito limitata allo studio di superfici lisce o di campioni archeologici restaurati.

La *Prompt Gamma Activation Analysis* (PGAA), basata sulla reazione nucleare (n, gamma), è uno strumento innovativo per risolvere tale problema, potendo essere impiegata per l'analisi non-distruttiva della composizione elementare di materiali e reperti archeologici. In particolare, si può determinare la composizione del volume di campione irradiato in peso % o in ppm. Grazie alla bassa intensità del fascio esterno di neutroni ( $10^6$ - $10^8$  cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>), la PGAA può essere considerata una tecnica non distruttiva, applicabile, perciò, a campioni che devono essere conservati inalterati. Dopo alcuni giorni di raffreddamento (vale a dire, di decadimento di prodotti radioattivi), i reperti investigati possono essere restituiti nelle loro condizioni originali eccetto l'isotopo Ag (ove presente).

Un altro grande vantaggio della PGAA è che la stessa rappresenta un metodo multi-elemento, vale a dire che tutti gli elementi chimici possono essere individuati grazie alle radiazioni gamma indotte, sebbene con differenti sensibilità. Con l'aiuto della PGAA, in seguito alla stessa misurazione possono essere individuati sia gli elementi principali, sia molti elementi in traccia d'oggetti di metallo, pietra, ceramica, ecc.

Tutti gli elementi contenuti nel campione da analizzare possono essere rilevati, ed il loro ammontare può essere stimato per ottenere la massa totale. Rinormalizzando la massa rilevata con la massa totale, si possono ottenere direttamente le concentrazioni dell'elemento, senza la necessità di misurare separatamente gli elementi standard. I dati di composizione ottenuti, principalmente espressi in massa % oppure in unità µg/g, sono trattati ulteriormente mediante l'Analisi del Componente Principale (ACP), un metodo impiegato per trovare similitudini e diversità tra gli oggetti studiati.

La bassa intensità dei fasci neutronici disponibili presso i reattori nucleari ha costituito un ostacolo sino alla fine degli anni '90, sebbene i vantaggi della PGAA per l'archeometria fossero stati riconosciuti già negli anni '80. L'alta intensità e la presenza trascurabile di rumori di fondo, in seguito, hanno reso possibile l'applicabilità della tecnica considerata nella sua piena efficienza.

Mediante la PGAA, possono essere investigate svariate tipologie di reperti archeologici. Le misurazioni non richiedono alcuna preparazione del campione, ed i manufatti possono essere posti direttamente nel fascio neutronico. Il metodo può essere considerato come veloce, paragonato ad altri metodi analitici, poiché le misurazioni forniscono risultati immediati. Grazie all'alta penetrabilità dei neutroni, la PGAA è in grado di fornire una composizione media del materiale interno, vale a dire del reperto archeologico nella sua interezza. Parti ben definite d'oggetti archeologici di grandi dimensioni - ad esempio elmetti, armature, armi o intere sculture -, se necessario, possono essere investigate separatamente, illuminando soltanto la zona del campione posta in una scatola adeguatamente progettata per ottenere un'appropriata protezione dalle radiazioni durante le misurazioni.

Tra le varie tipologie di campioni archeologici investigabili mediante PGAA, si possono citare le seguenti:

#### Manufatti di piombo

Ci sono molte probabilità di scoprire tracce d'elementi nella matrice di Pb, Poiché lo stesso elemento presenta un solo picco *prompt gamma*. Le superfici del campione da analizzare devono essere pulite il più possibile, onde evitare la contaminazione con altri elementi. Le dimensioni del campione possono variare, dal frammento di pochi cm al reperto perfettamente conservato nella sua interezza.

#### Manufatti di ferro

Possono essere esaminati vari tipi di campioni - ad esempio, armi intere o loro frammenti. La procedura di fabbricazione, inoltre, può essere investigata; in particolare, può essere organizzato uno studio scientifico sistematico che comprenda l'indagine, oltre dei reperti stessi, di vari campioni nuovi di ferro aventi la stessa composizione e forgiati diversamente, con lo scopo d'individuare la tecnica di forgiatura più vicina a quella dei reperti considerati. Questi ultimi possono essere esaminati anche mediante la tecnica della diffusione neutronica a piccoli angoli (v.), la quale è in grado di fornire utili informazioni sulle caratteristiche microstrutturali, dando indicazioni, inoltre, per risalire alla zona di provenienza del materiale.

#### Manufatti di bronzo

In generale, si possono identificare gli elementi principali – composizione elementare (Cu, Sn, Pb e Zn) ed anche elementi in tracce (As, Cd, Sb e Ag) appartenenti a reperti quali, ad esempio, fibule, elmetti, anelli, vasi. Sn e Pb possono essere rilevati oltre qualche unità percentuale. Si può compiere una distinzione tra ottone (alto tenore di Zn), bronzo con alto tenore di Sn e bronzo con alto tenore di Pb. Abbiamo eseguito, per questo caso, dei calcoli sui limiti d'investigazione degli elementi nel bronzo. Supponendo un irraggiamento della durata di 10000 s di un componente di bronzo avente lo spessore di 0.1cm mediante un fascio di 4 cm<sup>2</sup>, i limiti d'investigazione degli elementi sono i seguenti (in peso %):

Zn: 0.57, Sn: 2.6, Pb: 5

H: 0.005, B: 0.00007, Al: 2.8, Si: 1.6, P: 3.1, S: 0.3, Cl: 0.05, K: 0.74, Ca: 1.8, Ti: 0.09, Cr: 0.1, Mn: 0.22, Fe: 0.48, Co: 0.014, Ni: 0.078, As: 0.28, Ag: 0.049, Cd: 0.0009, Sb: 0.55, Au: 0.037, Hg: 0.006.

Tali valori corrispondono al caso ideale, allorché si trascurano le interferenze tra i vari picchi. In realtà, le possibili interferenze tra i picchi possono aumentare gli stessi limiti riguardo ad alcuni elementi in traccia. La sensibilità può essere aumentata, conseguentemente, misurando con tempi più lunghi (vale a dire, di alcune ore).

Reperti di bronzo mineralizzati possono essere anch'essi investigati, fornendo la stessa tipologia d'informazioni.

Per quanto riguarda reperti di bronzo con presenza d'Ag, bisogna considerare che lo spettro dell'argento è notevolmente complesso, presentando molti picchi che si sovrappongono ad altri picchi e creando incognite per la valutazione degli spettri PGAA. Una particolare considerazione va fatta per quanto riguarda l'attivazione dell'argento paragonata a quella del rame. L'argento (Ag-110) ha una durata di 250 giorni, il rame (Cu-64) ha una durata di 12.7 ore. Facendo seguito ad un irraggiamento della durata di 10000 s del campione sopra considerato, dopo un giorno di raffreddamento l'attività rimanente dell'argento è pari a 3.14 kBq, l'attività del rame è pari a 87 kBq. Dopo tre giorni, l'attività dell'argento è pari a 1.62 kBq, mentre quella del rame è pari a 3.3 kBq. Dopo dieci giorni, l'attività dell'argento è pari a 1.59 kBq, mentre quella del rame è in pratica nulla (Cu-64 decade velocemente). Dopo 100 giorni, l'attività dell'argento è pari a 1.24 kBq, mentre dopo 1000 giorni la stessa è ancora pari a 0.2 kBq. Dal punto di vista della protezione dalle radiazioni, ad ogni modo, tali valori non sono considerati effettivamente alti. A titolo d'esempio, secondo il Regolamento Ungherese, l'argento radioattivo con attività sotto a 1 MBq (=1000 kBq) può essere maneggiato liberamente. Alcuni problemi possono però verificarsi in occasione di successive analisi, allorché dette basse attività possono contaminare, ad esempio, altre

strumentazioni. Tenendo conto di tale considerazione, in seguito all'investigazione mediante PGAA, i campioni senza la presenza d'Ag possono essere sottoposti a successive analisi (es. AAS, ICP, EDS) già dopo una decina di giorni circa.

#### Monete

Possono essere identificati, anche in questo caso, gli elementi principali ed anche quelli in tracce.

#### Manufatti di terracotta

Tali reperti possono essere investigati sia mediante PGAA, sia mediante la tecnica della diffusione neutronica a piccoli angoli (v.), la quale può fornire utili informazioni sulla micro-porosità e su altre caratteristiche, e dare indicazioni valide per risalire alla zona di provenienza del materiale.

Una banca dati già esistente su cui fare riferimento si rivela utile in tutti i casi considerati. Per quanto riguarda i metodi complementari d'indagine che possono arricchire la stessa banca dati, si possono citare i seguenti: XRF, INAA, ICP o spettroscopia IR.

Un esempio d'applicazione della tecnica considerata è costituito dall'investigazione recentemente compiuta (nel 2005) dallo STUDIO D'INGEGNERIA ROGANTE per conto della Soprintendenza per i Beni Archeologici delle Marche di Ancona, di 18 reperti archeologici enei, provenienti dai siti delle necropoli di Età Picena (Età del Ferro) di Matelica (MC) e Fabriano (AN), risalenti al VII secolo a. C. (il cosiddetto periodo orientalizzante). Il territorio attorno alla Città di Matelica, infatti, ha restituito inaspettatamente, negli ultimi 3 lustri, moltissimo materiale Umbro-Piceno dai suoi ricchissimi corredi tombali bronzei e fittili: tutta questa mole consistente di nuovi materiali potrebbe essere investigata sistematicamente con le accurate analisi non distruttive condotte mediante PGAA. I dati così ottenuti dalle prove sui 18 manufatti in questione sono stati ulteriormente elaborati incrociandoli fra loro con griglie complementari ottenute tramite il metodo dell'Analisi del Componente Principale (ACP), che ha permesso di evidenziare le differenze e/o somiglianze degli oggetti in questione. Così facendo si è rilevata, per esempio, la sostanziale identità compositiva dell'unico campione fabrianese con gli altri 15 del contesto di Matelica ed invece è emersa la parziale estraneità di due manufatti matelicesi dal loro proprio areale (v. bibl. [2]).

Naturalmente, fino a che rimarranno analisi isolate e numericamente poco consistenti, anche se di campioni significativi ed interessanti, e la banca dati sarà sostanzialmente esigua, si potranno fornire ben pochi appigli ad altri contesti datanti e ben definiti. Ma quando la maglia dei riferimenti così ottenuti sarà abbastanza fitta, si potranno orientare analisi mirate di specifici ritrovamenti tese a confermare o confutare teorie o supposizioni formulate su base meramente storiografica o stilistica e tipologica. Impiegando la PGAA e ponendo le giuste domande si potranno ottenere molte importanti risposte chiarificatrici su tecniche fusorie, processi metallurgici, produzioni minerarie, flussi migratori, influssi culturali e scambi commerciali nell'Antichità.

Lo STUDIO D'INGEGNERIA ROGANTE:

- rappresenta un punto di riferimento in Italia ed all'estero per la tecnica nucleare considerata;
- grazie al suo network applicativo all'avanguardia, ha sviluppato, per tali applicazioni, apposite procedure di trattamento dati;
- è in grado d'offrire consulenza ed assistenza riguardo ad applicazioni della PGAA, che comprendono studi definitivi e di fattibilità, e corsi dedicati;
- per quanto concerne il presente argomento, organizza seminari-mini corsi, che si svolgono direttamente in sede degli interessati; si trasmette, in tal modo, un contributo fondamentale agli Enti archeologici ed ai Ricercatori del settore, i quali, per quanto riguarda la tecnica considerata, sono impossibilitati a completare le proprie strutture di ricerca.

Per maggiori informazioni, si prega di contattarci.

**Bibliografia:**

[1] M. Rogante, Prompt Gamma Activation Analysis (PGAA) per l'investigazione di reperti archeologici, *Archeopiceno*, n° 43/44, anno XIV (2006), pp. 27-31.

[2] M. Rogante, G. De Marinis, Zs. Kasztovszky, F. Milazzo, Comparative analysis of Iron Age bronze archaeological objects from a Picenum necropolis of Centre Italy with Prompt Gamma Activation Analysis, *Nuovo Cimento C*, 30/1 (2007), pp. 113-122. – DOI: 10.1393/ncc/i2006-10037-7

**Referente Archeologico:**

Dott. Alvise MANNI

Dottore in Lettere Classiche (Archeologia e Storia dell'Arte Greca e Romana)

[alvise.manni@libero.it](mailto:alvise.manni@libero.it)

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

## BASI TEORICHE

Lo strumento PGAA (vedi figura 1) si trova presso la guida neutronica, e la sua area sperimentale consta di circa 15-20 m<sup>2</sup>. I bersagli sono posti su un telaio d'alluminio sottile, e collocati in una piccola camera che può essere evacuata.



Fig. 1. Strumentazione PGAA

(Reattore di Budapest, presso il quale l'ing. Rogante è Membro Italiano del Pannello Scientifico).

Lo strumento di base di spettroscopia gamma consiste in un rivelatore principale di germanio d'elevata purezza (HPGe) avente geometria coassiale, ed uno scintillatore BGO, circondato da 10 cm di spessore di schermatura di piombo. L'intero sistema è posto su una tavola, che può essere mossa in ogni direzione. Il rivelatore principale HPGe può essere posto a 12 cm dall'obiettivo, e tale distanza può essere ridotta sino a 3 cm dal campione da investigare.

I neutroni sono guidati verso la posizione del campione, la quale si trova approssimativamente a 35 m dal centro di reattore. La sezione d'attraversamento del fascio neutronico può essere ridotta ad 1×1 cm<sup>2</sup>. Gli elementi chimici di un dato campione possono essere identificati in uno spettro di PGAA secondo le energie dei loro picchi di raggi gamma caratteristici, mentre l'analisi quantitativa è basata sulla determinazione esatta delle intensità del picco gamma. Durante la

valutazione dello spettro, devono essere considerati anche gli effetti della sovrapposizione dei picchi e dei rumori di fondo originati dalla radiazione naturale gamma, e le reazioni ( $n, \bar{\alpha}$ ) sui materiali circostanti. I dati ottenuti dalla misurazione sono raccolti da computer.

L'intensità di raggi gamma rivelata  $A_E$  è direttamente proporzionale alla massa  $m$  di un determinato elemento, alla sensibilità analitica  $S$  per quel dato elemento ed al tempo  $t$  di misurazione:

$$A_E = m \cdot S \cdot t \quad (1)$$

dove:

$$S = \frac{N_A}{M} \cdot \theta \cdot \sigma_0 \cdot l_\gamma \cdot \Phi_0 \cdot \varepsilon(E_\gamma)$$

è espressa in unità di misura  $s^{-1} \text{ mg}^{-1}$ . La sensibilità analitica è proporzionale alla sezione trasversale di cattura del neutrone del nucleo  $\sigma_0$ , all'abbondanza isotopica  $\theta$  ed alla produzione gamma per cattura di neutrone  $l_\gamma$ , le quali sono costanti nucleari, così come al flusso neutronico ed all'efficienza del rivelatore  $\varepsilon(E_\gamma)$ , grandezze caratteristiche del sistema di misura.

La sensibilità del metodo di PGAA dipende fortemente dalla sezione trasversale di cattura del neutrone del nucleo considerato; ne deriva, perciò, una lunga serie di valori di sensibilità per i diversi elementi. I migliori elementi investigabili sono: B, Cd, Sm e Gd con rivelazione limite al disotto di  $0.01 \mu\text{g/g}$ . I casi meno vantaggiosi riguardano gli elementi: C, N, O, F, Sn, Pb e Bi, con limiti di rivelazione al disopra di  $1000 \mu\text{g/g}$ .

La Tab. 1 rappresenta la tabella periodica degli elementi con indicazione della proprietà, da parte della strumentazione PGAA, di rilevamento in ppm per ciascun elemento.

**Lo STUDIO D'INGEGNERIA ROGANTE: ha sviluppato, per tali applicazioni, apposite procedure di misurazione e di trattamento dati, ed è fornitore d'importanti Enti a livello internazionale.**

| Elementi Isotopo stabile   |   |   |   |  |  |  |   |   |  |   |  |   |   |   |   |  |  | Limite di rilevabilità [ppm]   |   |   |   |  |  |
|--|---|---|---|--|--|--|---|---|--|---|--|---|---|---|---|--|--|--|---|---|---|--|--|
| Peso atomico $\sigma$ - cattura $\sigma$ - diffusione                        |   |   |   |  |  |  |   |   |  |   |  |   |   |   |   |  |  | <span style="color: red;">■</span> 0.1-1<br><span style="background-color: yellow;">■</span> 1-10<br><span style="background-color: cyan;">■</span> 10-100<br><span style="background-color: lightblue;">■</span> 100-1000<br><span style="background-color: grey;">■</span> >1000<br><span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 10px; height: 10px;"></span> nessun dato |   |   |   |  |  |
| H<br>1<br>1.00794<br>0.3326 b<br>82.02 b                                     |   |   |   |  |  |  |   |   |  |   |  |   |   |   |   |  | He<br>2<br>3 <sup>0.00014</sup> 4<br>4.002602<br>0.007 b<br>1.34 b   |  |   |   |   |  |  |
| Li<br>3<br>6 <sup>7.5</sup> 7 <sup>92.5</sup><br>6.941<br>70.5 b<br>1.37 b   | Be<br>4<br>9<br>9.0122<br>0.0076 b<br>7.63 b  |   |   |  |  |  |   |   |  |   |  |   |   |   |   |  |  | B<br>5<br>10 <sup>20</sup> 11 <sup>80</sup><br>10.811<br>767 b<br>5.24 b   | C<br>6<br>12 <sup>99</sup> 13 <sup>1.1</sup><br>12.011<br>0.00350 b<br>5.551 b                    | N<br>7<br>14 15 <sup>37</sup><br>14.00674<br>1.9 b<br>11.51 b | O<br>8<br>16 17 <sup>0.038</sup> 18 <sup>0.2</sup><br>15.9994<br>0.00019 b<br>4.232 b | F<br>9<br>19<br>18.998<br>0.0096 b<br>4.018 b                                | Ne<br>10<br>20 <sup>91</sup> 21 <sup>0.26</sup> 22 <sup>9</sup><br>20.1797<br>0.039 b<br>2.628 b |
| Na<br>11<br>23<br>22.98977<br>0.530 b<br>3.28 b                              | Mg<br>12<br>24 <sup>78</sup> 25 <sup>10</sup> 26 <sup>11</sup><br>24.305<br>0.063 b<br>3.71 b   |   |   |  |  |  |   |   |  |   |  |   |   |   |   |  |  | Al<br>13<br>27<br>26.9815<br>0.231 b<br>1.503 b  | Si<br>14<br>28 <sup>92</sup> 29 <sup>4.7</sup> 30 <sup>3.1</sup><br>28.0855<br>0.171 b<br>2.167 b | P<br>15<br>31<br>30.9738<br>0.172 b<br>3.312 b                | S<br>16<br>32 <sup>95</sup> 33 34 <sup>4</sup> 36<br>32.066<br>0.53 b<br>1.026 b      | Cl<br>17<br>35 <sup>75</sup> 37 <sup>24</sup><br>35.4527<br>33.5 b<br>16.8 b | Ar<br>18<br>36 38 40 <sup>99.6</sup><br>39.948<br>0.675 b<br>0.683 b                             |
| K<br>19<br>39 <sup>93</sup> 40 41 <sup>7</sup><br>39.0983<br>2.1 b<br>1.96 b | Ca<br>20<br>40 <sup>97</sup> 42 43 44 <sup>2</sup><br>40.078<br>27.5 b<br>23.5 b  | Sc<br>21<br>45<br>44.9559<br>27.5 b<br>23.5 b                       | Ti<br>22<br>46 <sup>8</sup> 47 <sup>7</sup> 48 <sup>74</sup><br>47.867<br>6.09 b<br>4.35 b  | V<br>23<br>50 <sup>0.25</sup> 51<br>50.9415<br>5.08 b<br>5.10 b      | Cr<br>24<br>50 <sup>4</sup> 52 <sup>84</sup> 53 <sup>10</sup><br>51.9961<br>3.05 b<br>3.49 b                                       | Mn<br>25<br>55<br>54.9380<br>13.3 b<br>2.15 b                                  | Fe<br>26<br>54 <sup>6</sup> 56 <sup>92</sup> 57 <sup>2</sup> 58<br>55.845<br>2.56 b<br>11.62 b  | Co<br>27<br>59<br>58.9332<br>37.18 b<br>5.6 b                               | Ni<br>28<br>58 <sup>68</sup> 60 <sup>26</sup> 61 <sup>1.1</sup><br>58.6934<br>62 <sup>3.6</sup> 64 <sup>0.3</sup><br>4.49 b<br>18.5 b            | Cu<br>29<br>63 <sup>69</sup> 65 <sup>31</sup><br>63.546<br>3.78 b<br>8.03 b     | Zn<br>30<br>64 <sup>49</sup> 66 <sup>28</sup> 67 <sup>4</sup><br>65.39<br>68 <sup>19</sup> 70<br>2.75 b<br>6.38 b  | Ga<br>31<br>69 <sup>60</sup> 71 <sup>40</sup><br>69.723<br>2.75 b<br>6.83 b     | Ge<br>32<br>70 <sup>20</sup> 72 <sup>27</sup> 73 <sup>8</sup><br>72.61<br>74 <sup>37</sup> 76 <sup>5</sup><br>2.20 b<br>8.60 b  | As<br>33<br>75<br>74.9216<br>4.5 b<br>5.50 b                                  | Se<br>34<br>74 76 <sup>9</sup> 77 <sup>8</sup> 78 <sup>24</sup><br>78.96<br>80 <sup>49</sup> 82 <sup>7</sup><br>11.7 b<br>8.30 b                                      | Br<br>35<br>79 <sup>51</sup> 81 <sup>49</sup><br>79.904<br>6.9 b<br>5.90 b | Kr<br>36<br>78 80 <sup>2</sup> 82 <sup>12</sup> 83 <sup>12</sup><br>83.8<br>84 <sup>54</sup> 86 <sup>17</sup><br>25 b<br>7.68 b  |  |   |   |   |  |  |
| Rb<br>37<br>85 <sup>72</sup> 87 <sup>28</sup><br>85.4678<br>0.38 b<br>6.8 b  | Sr<br>38<br>84 86 <sup>10</sup> 87 <sup>7</sup><br>88 <sup>83</sup><br>87.62<br>1.28 b<br>6.25 b  | Y<br>39<br>89<br>88.90585<br>1.28 b<br>7.70 b                       | Zr<br>40<br>90 <sup>52</sup> 91 <sup>11</sup> 92 <sup>17</sup><br>91.224<br>94 <sup>17</sup> 96 <sup>3</sup><br>0.185 b<br>6.46 b             | Nb<br>41<br>93<br>92.90638<br>1.15 b<br>6.255 b                      | Mo<br>42<br>92 94 <sup>9</sup> 95 <sup>16</sup><br>95.94<br>97 <sup>19</sup> 98 <sup>24</sup> 99 <sup>10</sup><br>2.48 b<br>5.71 b | (Tc)<br>43<br>(98)<br>20 b<br>6.3 b  | Ru<br>44<br>96 <sup>6</sup> 98 <sup>9</sup> 99 <sup>13</sup> 100 <sup>1</sup><br>101.07<br>101.07<br>2.56 b<br>6.6 b                                      | Rh<br>45<br>103<br>102.9055<br>144.8 b<br>4.6 b                             | Pd<br>46<br>102 <sup>1</sup> 104 <sup>11</sup> 105 <sup>22</sup><br>106 <sup>27</sup> 108 <sup>27</sup><br>110 <sup>12</sup><br>106.42<br>4.48 b | Ag<br>47<br>107 <sup>52</sup> 109 <sup>48</sup><br>107.8682<br>63.3 b<br>4.99 b | Cd<br>48<br>106 <sup>1</sup> 108 <sup>1</sup> 110 <sup>1</sup> 111 <sup>1</sup><br>112 <sup>1</sup> 113 <sup>1</sup> 114 <sup>1</sup> 116 <sup>1</sup><br>112.411<br>2520 b<br>6.5 b | In<br>49<br>113 <sup>4</sup> 115 <sup>96</sup><br>114.818<br>193.8 b<br>2.62 b  | Sn<br>50<br>112 <sup>1</sup> 114 115 116 <sup>5</sup><br>117 <sup>1</sup> 118 <sup>1</sup> 119 <sup>1</sup><br>120 <sup>1</sup> 122 <sup>1</sup> 124 <sup>1</sup><br>118.71<br>0.626 b<br>4.892 b | Sb<br>51<br>121 <sup>57</sup> 123 <sup>43</sup><br>121.76<br>4.91 b<br>3.90 b | Te<br>52<br>120 122 <sup>1</sup> 123 <sup>1</sup> 124 <sup>4</sup><br>125 <sup>1</sup> 126 <sup>1</sup> 128 <sup>1</sup> 130 <sup>9</sup><br>127.6<br>4.7 b<br>4.32 b | I<br>53<br>127<br>126.90447<br>6.15 b<br>3.81 b                            | Xe<br>54<br>124 126 128 <sup>1</sup> 129 <sup>27</sup><br>130 <sup>1</sup> 131 <sup>1</sup> 132 <sup>27</sup> 134 <sup>19</sup><br>136 <sup>1</sup><br>131.29<br>23.9 b<br>- |  |   |   |   |  |  |
| Cs<br>55<br>133<br>132.90545<br>29.0 b<br>3.90 b                             | Ba<br>56<br>130 132 134 <sup>4</sup> 135 <sup>7</sup><br>136 <sup>1</sup> 137 <sup>1</sup> 138 <sup>2</sup><br>137.327<br>1.1 b<br>3.38 b | La<br>57<br>138 139 <sup>99.9</sup><br>138.9055<br>8.97 b<br>9.66 b | Hf<br>58<br>174 176 <sup>1</sup> 177 <sup>19</sup><br>178 <sup>27</sup> 179 <sup>14</sup><br>180 <sup>35</sup><br>178.49<br>104.1 b<br>10.2 b | Ta<br>59<br>180 181 <sup>99.99</sup><br>180.9497<br>20.6 b<br>6.01 b | W<br>60<br>180 182 <sup>26</sup><br>183 <sup>14</sup> 184 <sup>31</sup><br>186 <sup>29</sup><br>183.84<br>18.3 b<br>4.60 b         | Re<br>61<br>185 <sup>37</sup> 187 <sup>63</sup><br>186.207<br>89.7 b<br>11.5 b | Os<br>62<br>184 186 <sup>1</sup> 187 <sup>7</sup><br>188 <sup>1</sup> 189 <sup>1</sup> 190 <sup>1</sup><br>192 <sup>1</sup><br>190.23<br>16.0 b<br>14.7 b | Ir<br>63<br>191 <sup>37</sup> 193 <sup>63</sup><br>192.217<br>425 b<br>14 b | Pt<br>64<br>190 192 <sup>1</sup> 194 <sup>33</sup><br>195 <sup>34</sup> 196 <sup>25</sup><br>198 <sup>7</sup><br>195.08<br>10.3 b<br>11.71 b     | Au<br>65<br>196 196.96655<br>98.65 b<br>7.73 b                                  | Hg<br>66<br>196 198 <sup>1</sup> 199 <sup>17</sup><br>200 <sup>1</sup> 201 <sup>1</sup> 202 <sup>1</sup><br>204 <sup>1</sup><br>200.59<br>372.3 b<br>26.8 b                          | Tl<br>67<br>203 <sup>30</sup> 205 <sup>70</sup><br>204.3833<br>3.43 b<br>9.89 b | Pb<br>68<br>204 <sup>1</sup> 206 <sup>24</sup><br>207 <sup>22</sup> 208 <sup>52</sup><br>207.2<br>0.171 b<br>11.12 b  | Bi<br>69<br>209<br>208.98038<br>0.0338 b<br>9.156 b                           | (Po)<br>70<br>(209)   | (At)<br>71<br>(210)  | (Rn)<br>72<br>(222)  |  |   |   |   |  |  |
| (Fr)<br>73<br>(223)  | (Ra)<br>74<br>(226)   | (Ac)<br>75<br>(227)   | 104   | 105  | 106  |  |   |   |  |   |  |   |   |   |   |  |  |  |   |   |   |  |  |
| -  | 12.8 b<br>13 b  | -   |   |  |  |  |   |   |  |   |  |   |   |   |   |  |  |  |   |   |   |  |  |

Tab. 1 - Tabella periodica degli elementi con indicazione della proprietà, da parte della strumentazione PGAA, di rilevamento in ppm per ciascun elemento.

## I NEUTRONI

I neutroni sono particelle elementari praticamente prive di cariche elettriche, costituenti - assieme ai protoni - il nucleo atomico. La caratteristica di non interagire elettricamente con gli elettroni ed i nuclei nella materia presenta il gran vantaggio di poter penetrare la stessa materia in profondità. Infatti, mentre i raggi x offrono un'eccellente risoluzione ma sono assorbiti facilmente dai materiali (riuscendo a penetrarne soltanto strati superficiali), i neutroni, possedendo un coefficiente d'assorbimento lineare circa 1000 volte più debole rispetto ai primi, penetrano la materia fino a diversi centimetri (circa 2-3 cm riguardo agli acciai, circa 5-6 cm riguardo all'alluminio e le sue leghe).

I neutroni sono prodotti da sorgenti continue (reattori nucleari) oppure da sorgenti pulsate (acceleratori). Nelle sorgenti continue, i neutroni sono prodotti dalla reazione di fissione di nuclei pesanti quali  $^{235}\text{U}$  oppure  $^{239}\text{Pu}$ , ed inizialmente sono caratterizzati da un'energia assai elevata; gli stessi neutroni sono successivamente rallentati ad energie termiche tramite dei moderatori, quindi sono sottoposti a collisioni che li rallentano ulteriormente per condurli in equilibrio termico col mezzo che li circonda. Lo stesso equilibrio termico consente di impiegare il teorema di equipartizione dell'energia come segue:

$$1/2 mv^2 = 3/2 kT \quad (3)$$

ed anche:

$$\lambda^2 = h^2/3mkT \quad (4)$$

in cui  $k$  è la costante di Boltzmann,  $m$ ,  $v$ ,  $\lambda$  sono rispettivamente la massa, la velocità e la lunghezza d'onda del neutrone,  $T$  è la temperatura.

La conseguente distribuzione dei neutroni in funzione delle velocità appartiene al tipo Maxwelliano, ed è tale che la relativa  $\lambda$  sia compresa tra 1.55 e 1.33 Å per  $T$  compresa tra 0°C e 100°C.

Speciali tubi-guida hanno il compito di trasferire i neutroni prodotti dall'interno del nocciolo ai diversi strumenti.