

Proton beams by metal targets

L. Velardi^{a,b}, V. Turco^a, L. Scrimieri^b, G. Quarta^b, L. Calcagnile^b, V. Nassisi^a

^a *Laboratorio di Elettronica Applicata e Strumentazione LEAS, INFN, Department of Mathematics and Physics, University of Salento - Lecce, Via Provinciale Lecce-Monteroni, 73100 Lecce – Italy*

^b *CEntro di DATazione e Diagnostica CEDAD, University of Salento, INFN, Italy*

Abstract

Nowadays, the transport and acceleration of particle beams is performed by conventional accelerators, but in the last decade the scientific community is focused on the study of laser-driven ion acceleration, which can offer a potentially more compact and cost-effective mean of delivering ions/protons. For this, the choice of the target plays a fundamental role in the quality of the ion beam. The starting point to obtain protons is the use of materials rich in hydrogen or hydrogenated chemical compounds. In this paper, we show ablation measurements on Al, Ta and Ti targets to obtain proton beams. These materials are known to be good hydrogen adsorbers.

Riassunto

Oggi giorno, il trasporto e l'accelerazione di fasci di particelle sono generalmente eseguiti da acceleratori convenzionali, ma nell'ultimo decennio la comunità scientifica si è concentrata sullo studio dell'estrazione e accelerazione di ioni indotti da laser, che può offrire un mezzo potenzialmente più compatto ed economicamente efficace per la produzione di ioni e protoni. La scelta del target è cruciale per il tipo di fascio che si vuole ottenere. Intanto, per ottenere protoni si deve partire dall'idrogeno. Per questo, la scelta del target ricade su materiali ricchi di idrogeno (adsorbito attraverso contaminanti e H₂O) o composti chimici contenenti idrogeno (idrati, polimeri e così via). In questo articolo sono riportate misure di ablazione su target metallici per ottenere fasci di protoni. Sono stati utilizzati target a base di Al, Ta e Ti, materiali conosciuti come buoni adsorbitori di idrogeno.

Corresponding Author: luciano.velardi@le.infn.it

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, l'accelerazione delle particelle mediante interazione laser con target metallici sottili, nota come *Laser Ion Acceleration* (LIA), si sta sviluppando per offrire un'alternativa più compatta e conveniente alla produzione ed accelerazione di fasci di ioni e protoni [1-5] per applicazioni mediche, come l'adroterapia.

Lo stato dell'arte su LIA si basa sull'uso di sistemi laser ad alta potenza con impulsi ultrabrevi (nell'intervallo dei ps e fs) e alte energie (da poche a centinaia di Joule), al fine di ottenere valori di irradianza superiori a 10^{16} W/cm² [6-11]. Con questi valori, è possibile generare protoni quasi-monoenergetici con energie oltre al MeV [12, 13]. A valori di irraggiamento superiori di 10^{19} W/cm², il regime è chiamato *Target Normal Sheath Acceleration* (TNSA) [14-17]: in questo caso, gli elettroni prodotti vengono accelerati fino ad energie relativistiche, mentre i protoni e gli ioni ad energie di diversi MeV [5, 9, 13].

A causa del loro profilo di rilascio della dose nei mezzi biologici (picco di Bragg), i protoni sono la scelta ideale per l'adroterapia. La produzione di fasci di protoni tramite LIA richiede target sotto forma di film spessi o sottili, micro o nanostrutturati [18] contenenti idrogeno. Buoni candidati sono polimeri, idruri metallici e composti chimici o materiali in grado di adsorbire l'idrogeno e i suoi contaminanti (idrocarburi e H_2O) sulla loro superficie (metalli e metalli di transizione) [19]. I protoni sono ottenuti da atomi di idrogeno ionizzati, principalmente adsorbiti come molecole di H_2 nei primissimi strati superficiali e debolmente legati al target, oppure da composti in cui l'idrogeno è parte integrante della specie chimica. Quando un raggio laser pulsato interagisce con un bersaglio arricchito di idrogeno, i protoni e gli ioni della piuma di plasma vengono accelerati da diversi processi [20]. I protoni sono più veloci rispetto agli ioni, a causa della loro massa inferiore.

Molti esperimenti sono stati condotti utilizzando bersagli di polimeri (PMMA [12, 21], Mylar [22], PE [23]), idruri metallici (TiH [24], TiH_2 [25], MgH_2 [26, 27], ZrH_2 [26, 27]), metalli [28, 29] e metalli di transizione [30, 31].

In questo articolo sono riportate misure di ablazione con un laser ad eccimeri KrF su target metallici, per ottenere fasci di protoni. Sono stati utilizzati target puri a base di Al, Ta e Ti, materiali conosciuti come buoni adsorbitori di idrogeno.

2. MATERIALI E METODI

Le misure di ablazione laser sono state eseguite in una camera da vuoto, l'acceleratore PLATONE, disponibile presso il laboratorio LEAS di Lecce, in Italia. Questo apparato è una sorgente di ioni indotta da laser (Laser Ion Source, LIS), che produce plasma tramite il meccanismo di ablazione e accelera le componenti cariche della piuma di plasma ad energie sino a 60 keV per stato di carica [32, 33]. Tuttavia, gli esperimenti mostrati in questo lavoro sono stati effettuati in espansione libera del plasma, senza alcuna tensione di accelerazione applicata.

L'apparato Platone (Fig. 1) è costituito da un laser ad eccimeri KrF ($\lambda=248$ nm, $\tau=23$ ns), un fotodiodo (FD), un beam-splitter (B), uno specchio (S), una lente (L) e una camera di generazione (CG). Quest'ultima è dotata di una finestra al quarzo (F), un supporto per il target (T) ed un sistema da vuoto ($\sim 10^{-5}$ mbar).

Il beam-splitter è utilizzato per dividere il fascio laser in due parti: una parte è inviata al fotodiodo veloce di tipo Hamamatsu R1328U-02 per controllare la forma d'onda del segnale e per attivare l'oscilloscopio, l'altra parte è diretta nella CG con un angolo di 70° rispetto al normale al target. Quest'ultimo fascio è focalizzato da una lente sottile (L, 15 cm di lunghezza focale) sulla superficie del target con uno spot di dimensione di $0,5$ mm².

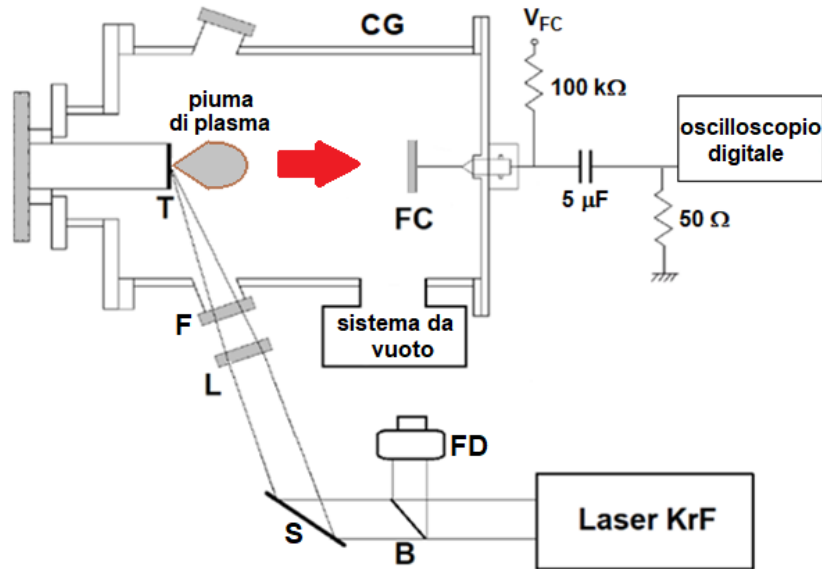


Fig. 1. Schematizzazione dell'apparato sperimentale: **FD**: fotodiodo, **B**: beam-splitter, **S**: specchio, **L**: lente, **F**: finestra di quarzo, **T**: target, **FC**: coppa di Faraday, **GC**: camera di generazione, V_{FC} : tensione della FC.

Il sistema di diagnostica consiste di una coppa di Faraday (FC) polarizzata ad una tensione negativa $V_{FC} = -100$ V per raccogliere le cariche positive (ioni/protoni) della piuma di plasma. La FC è posizionata davanti alla superficie del target T, ad una distanza di 23 cm. La coppa di Faraday è collegata a un oscilloscopio digitale, Le Croy WaveSurfer 422, attraverso un circuito RC adattato [34] per separare la tensione V_{FC} dall'oscilloscopio e registrare i segnali di corrente. I segnali sono analizzati con la tecnica del tempo di volo (time of flight, TOF). Campioni di alluminio, tantalio e titanio (puri al 99,99%) con una superficie di 1×1 cm² ed uno spessore di 500 μm, sono stati utilizzati come target. Le fluenze laser utilizzate in questo esperimento sono state 1.3, 2.5 e 5.0 J/cm².

3. RISULTATI

La Figura 3 riporta gli spettri TOF relativi ai tre target, a diversi valori di fluenza laser. I segnali principali di plasma sono dovuti agli ioni del bersaglio e contengono una convoluzione dei segnali relativi a differenti stati di carica presenti nella piuma. A valori di irradianza laser utilizzate in questo lavoro (10^8 W/cm²), gli stati di carica principali per gli ioni sono +1, con un basso contributo di ioni +2 [30].

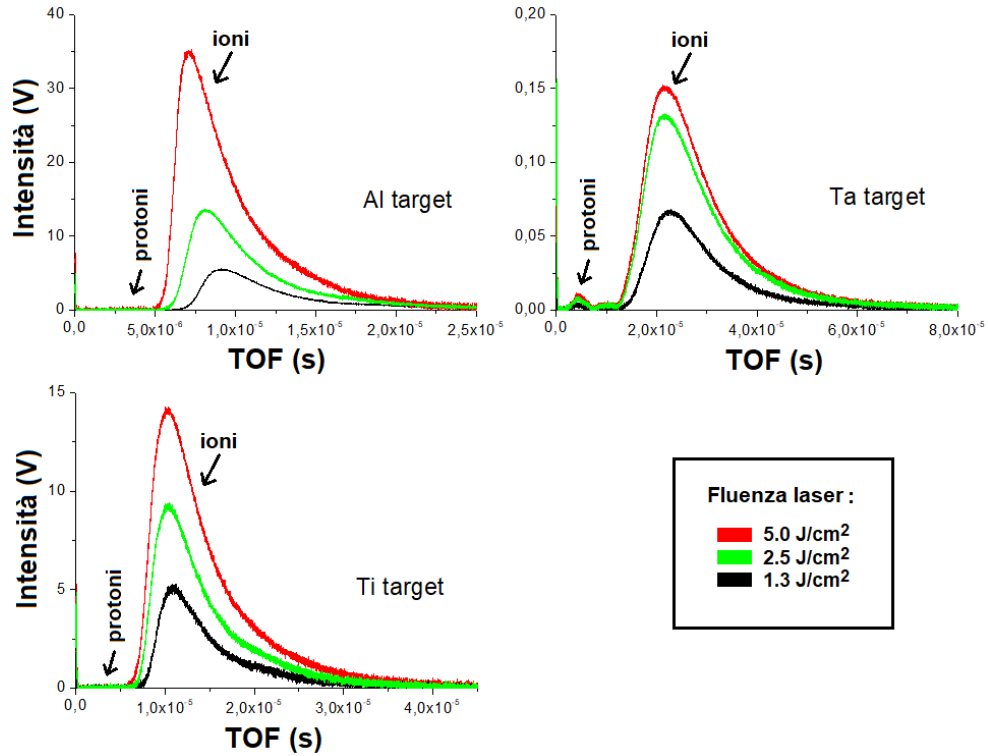


Fig. 3. Spettri TOF relativi ai tre target registrati dalla coppa di Faraday a diversi valori di fluenza laser. I picchi principali sono dovuti agli ioni, mentre quelli più veloci e di minor ampiezza (visibili in questa figura solo nei segnali del tantalio), sono dovuti ai protoni.

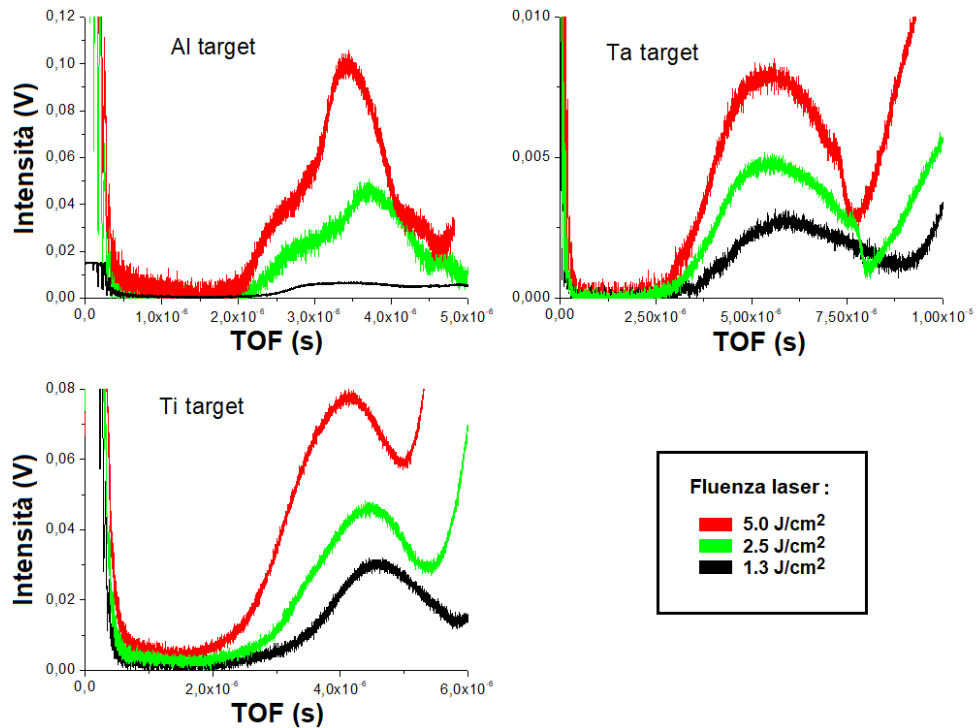


Fig. 4. Spettri TOF relativi ai protoni del target a diversi valori di fluenza laser.

La figura 4 mostra un ingrandimento delle regioni che precedono i segnali principali di plasma. Si possono osservare dei segnali poco intensi di particelle veloci dovuti ai protoni, generalmente prodotti dall'idrogeno ionizzato dei contaminanti (idrocarburi e contaminazioni di H₂O), principalmente adsorbiti come molecole di H₂ sulla superficie del target.

Le forme d'onda dei protoni (Fig. 4) mostrano segnali con i picchi centrati intorno 3.5, 6 e 4.2 μ s rispettivamente per i target di Al, Ta e Ti (si è considerata la fluenza massima). A questi tempi di volo corrispondono energie cinetiche di circa 10-30 eV.

Integrando i segnali di TOF dei protoni, si ottiene la carica raccolta per impulso laser, espressa in Coulomb. Da questo valore, si può facilmente calcolare il numero di protoni per impulso registrati dalla FC (Fig. 5).

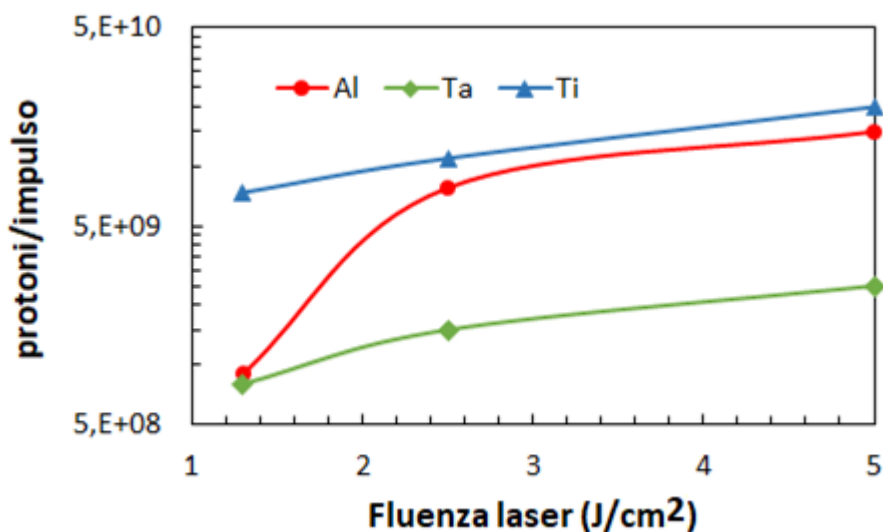


Fig. 5. Numero di protoni per impulso laser vs fluenza laser.

I valori di dose di protoni per impulso (10^9 - 10^{10}) mostrati in Fig. 5 sono interessanti considerando che sono stati ottenuti con un laser di bassa potenza.

Dagli spettri degli ioni di Fig. 3 ci saremmo aspettati una produzione di protoni maggiore con il target di Al, poichè la sua carica ionica prodotta è risultata superiore di molto rispetto a quella degli altri target. Tuttavia, da queste misure risulta che il target che produce più protoni è il tantalio. Misure sull'adsorbimento superficiale dell'idrogeno su questi target metallici sono tuttora in corso.

4. CONCLUSIONI

Questo studio mostra come sia possibile ottenere fasci di protoni di bassa energia mediante l'ablazione laser di target metallici. Nonostante le basse fluenze laser utilizzate, i valori di dose di protoni prodotti per impulso (10^9 - 10^{10}) sono interessanti nel panorama scientifico. Sono tuttora in atto studi che si propongono di aumentare i protoni prodotti attraverso un processo di idrogenazione delle superfici metalliche.

Referenze

- [1] S. V. Bulanov, V.S. Khoroshkov, Plasma Phys. Rep. **28**, 453 (2002).
- [2] C. -M. Ma, I. Veltchev, E. Fourkal, J. S. Li, W. Luo, J. Fan, T. Lin, A. Pollack, Laser Phys. **16**, 639 (2006).

- [3] T. Tajima, D. Habs, X. Yan, *Rev. Accel. Sci. Technol.* **2**, 201 (2009).
- [4] M. Borghesi, *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A* **740**, 6-9 (2014).
- [5] R. A. Snavely, M. H. Key, S. P. Hatchett, T. E. Cowan, M. Roth, T. W. Phillips, M. A. Stoyer, E. A. Henry, T. C. Sangster, M. S. Singh, S. C. Wilks, A. MacKinnon, A. Offenberger, D. M. Pennington, K. Yasuike, A. B. Langdon, B. F. Lasinski, J. Johnson, M. D. Perry, E. M. Campbell, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 2945 (2000).
- [6] K. Ogura, M. Nishiuchi, A. S. Pirozhkov, T. Tanimoto, A. Sagisaka, T. Z. Esirkepov, M. Kando, T. Shizuma, T. Hayakawa, H. Kiriyama, T. Shimomura, S. Kondo, S. Kanazawa, Y. Nakai, H. Sasao, F. Sasao, Y. Fukuda, H. Sakaki, M. Kanasaki, A. Yogo, S. V. Bulanov, P. R. Bolton, K. Kondo, *Opt. Lett.* **37**, 2868 (2012).
- [7] M. De Marco, J. Krása, J. Cikhardt, M. Pfeifer, E. Krouský, D. Margarone, H. Ahmed, M. Borghesi, S. Kar, L. Giuffrida, R. Vrana, A. Velyhan, J. Limpouch, G. Korn, S. Weber, L. Velardi, D. Delle Side, V. Nassisi, J. Ullschmied, *JINST* **11**, C06004 (2016).
- [8] H. Schwoerer, S. Pfoth, O. Jäckel, K. -U. Amthor, B. Liesfeld, W. Ziegler, R. Sauerbrey, K. W. D. Ledingham, T. Esirkepov, *Nature* **439**, 445-448 (2006).
- [9] L. Torrioni, *Physics of Plasma* **24**, 023111 (2017).
- [10] L. Torrioni, M. Cutroneo, J. Ullschmied, *Physics of Plasmas* **24**, 043112-043123 (2017).
- [11] A. J. Mackinnon, Y. Sentoku, P. K. Patel, D. W. Price, S. Hatchett, M. H. Key, C. Andersen, R. Snavely, R. R. Freeman, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 215006 (2002).
- [12] S. Fritzler, V. Malka, G. Grillon, J. P. Rousseau, F. Burgy, E. Lefebvre, E. d'Humières, P. McKenna, K. W. D. Ledingham, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 3039 (2003).
- [13] S. D. Kraft, C. Richter, K. Zeil, M. Baumann, E. Beyreuther, S. Bock, M. Bussmann, T. E. Cowan, Y. Dammene, W. Enghardt, U. Helbig, L. Karsch, T. Kluge, L. Laschinsky, E. Lessmann, J. Metzkes, D. Naumburger, R. Sauerbrey, M. Schürer, M. Sobiella, J. Woithe, U. Schramm, J. Pawelke, *New J. Phys.* **12**, 085003 (2010).
- [14] M. Passoni, L. Bertagna, A. Zani, *New Journal of Physics* **12**, 045012 (2010).
- [15] P. McKenna, D. Neely, R. Bingham, D. Jaroszynski (eds.), *Laser-Plasma Interactions and Applications*, (Scottish Graduate Series, Springer International Publishing, 2013).
- [16] H. Schmitz, *Physics of Plasmas* **19**, 083115 (2012).
- [17] S. Agosteo, M. P. Anania, M. Caresana, G. A. P. Cirrone, C. De Martinis, D. Delle Side, A. Fazzi, G. Gatti, D. Giove, D. Giulietti, L. A. Gizzi, L. Labate, P. Londrillo, M. Maggiore, V. Nassisi, S. Sinigardi, A. Tramontana, F. Schillaci, V. Scuderi, G. Turchetti, V. Varoli, L. Velardi, *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. B* **331**, 15-19 (2014).
- [18] A. Lübcke, A.A.Andreev, S. Höhm, R. Grunwald, L. Ehrentraut, M. Schnürer, *Sci. Rep.* **7**: 44030 (2017).
- [19] S. Banerjee, A. K. Tyagi, *Functional Materials Preparation, Processing and Applications*, ch. 15: Hydrogen Storage Materials, pp. 607-637, (Elsevier, 2012).
- [20] J. C. Miller, R. F. Haglund, *Laser Ablation and Desorption*, vol. **30** Experimental Methods in the Physical Sciences (Academic Press, 1997).
- [21] L. Torrioni, M. Cutroneo, V. Semian, G. Ceccio, *Appl. Surf. Sci.* **351**, 580-587 (2015).
- [22] L. Torrioni, L. Giuffrida, M. Cutroneo, P. Cirrone, A. Picciotto, J. Krasa, D. Margarone, A. Velyhan, L. Laska, J. Ullschmied, J. Wolowski, J. Badziak, M. Rosinski, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 02B315 (2012).
- [23] L. Torrioni, *Molecules* **19**, 17052-17065 (2014).
- [24] D. Delle Side, V. Nassisi, L. Velardi, *Appl. Surf. Sci.* **272**, 124-127 (2013).

- [25] D. Delle Side, V. Nassisi, L. Velardi, *Journal of Physics: Conference Series* **508**, 012013 (2014).
- [26] M. Sekine, K. Kondo, M. Okamura, N. Hayashizaki, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 02B318 (2012).
- [27] M. Okamura, C. Stifler, K. Palm, D. Steski, S. Ikeda, M. Kumaki, T. Kanesue, *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 02A906 (2016).
- [28] J. S. Green, A. P. L. Robinson, N. Booth, D. C. Carroll, R. J. Dance, R. J. Gray, D. A. MacLellan, P. McKenna, C. D. Murphy, D. Rusby, L. Wilson, *Appl. Phys. Lett.* **104**, 214101 (2014).
- [29] D. Wang, Y. Shou, P. Wang, J. Liu, C. Li, Z. Gong, R. Hu, W. Ma, X. Yan, *Sci. Rep.* **8**:2536 (2018).
- [30] Velardi, D. Delle Side, J. Krása, V. Nassisi, *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A* **735**, 564–567 (2014).
- [31] L. Velardi, D. Delle Side, J. Krása, V. Nassisi, *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. B* **331**, 20–22 (2014).
- [32] V. Nassisi, L. Velardi, D. Delle Side, *Appl. Surf. Sci.* **272**, 114 (2013).
- [33] A. Lorusso, M. V. Siciliano, L. Velardi, V. Nassisi, *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A* **614**, 169 (2010).
- [34] D. Doria, A. Lorusso, F. Belloni, V. Nassisi, *Rev. Sci. Instrum.* **75**, 387 (2004).