

Relazione riguardante l'attività di ricerca e sviluppo svolta nell'ambito del progetto triennale Rita Levi Montalcini:

Rapida accelerazione di un fascio ad alta brillantezza di elettroni per mezzo dell'accelerazione a plasma indotta da laser nel gas contenuto in capillari

Massimo Petrarca

Dipartimento SBAI, Sapienza Università di Roma.

Introduzione al progetto

Il progetto in oggetto iniziato nell'Aprile 2014 e finanziato dal MIUR con un budget totale di ~254 k€ di cui 78k€ dedicati all'attività di ricerca, s'inquadra nell'ambito delle attuali ricerche di nuovi sistemi di accelerazione di particelle necessari per superare le limitazioni tecnologiche presenti al giorno d'oggi. Attualmente il campo degli acceleratori è basato sull'uso delle cavità a radio frequenza che contribuiscono a rendere gli acceleratori di dimensioni enormi e comportano elevate spese di costruzione e mantenimento. I gradienti di campo ottenibili da questa tecnologia accelerante sono intrinsecamente limitati a circa 100 MV/m per la banda S e tra 200-300 MV/m per la banda X.

La ricerca scientifica e tecnologica attuale è concentrata sulla messa a punto di sistemi acceleranti che si sviluppano su dimensioni ridotte in grado di produrre fasci di particelle di alta energia, alta intensità, buona collimazione in impulso e spaziale. La sfida è quindi quella di progettare macchine acceleranti il più possibile compatte riducendo quindi i costi di costruzione e di esercizio. La metodologia più promettente è quella basata sull'accelerazione laser-plasma LWFA (*Laser Wakefield Acceleration*). I fondamenti teorici di questa tecnica sono stati dettati nel 1979 da T. Tajima e J.M. Dawson i quali suggerirono che l'onda di plasma generata da un singolo impulso laser di alta intensità che si propaga in un gas ionizzato, può essere usata per accelerare particelle cariche. Con questo tipo di processo è possibile ottenere gradienti di campo fino a 1000 volte più alti della tecnica convenzionale a radio frequenza.

I progressi della tecnologia laser hanno permesso, nel 2004, a tre laboratori: Imperial College (UK), Lawrence Berkeley National Laboratory (USA), e Laboratoire d'Optique Appliquée (Francia) di dimostrare sperimentalmente la possibilità di accelerare fasci di elettroni tramite un singolo potente impulso laser (circa 1J di energia, 40 fs di lunghezza temporale e circa 30TW di potenza di picco). Da allora è cominciata una grande campagna mondiale sullo studio di questo tipo di accelerazione. Nonostante le evidenze sperimentali di forti accelerazioni ottenute in varie configurazioni, le caratteristiche del pacchetto di elettroni accelerato sono sempre stato di modeste qualità (grandi divergenze spaziali, "spread" di energia e bassa brillantezza) inoltre il pacchetto è sempre stato costituito da elettroni prelevati dal plasma stesso.

Queste nuove tecniche di accelerazione sono in via di sviluppo anche in Italia presso i laboratori nazionali di Frascati LNF dell'INFN nell'area sperimentale dedicata SPARC_Lab, in quanto il management degli INFN è convinto che lo studio di questi sistemi di accelerazione abbia importanza strategica.

L'obiettivo primario del progetto (che si avvale dell'infrastruttura SPARC_Lab), è l'accelerazione con alti gradienti di campo generati dall'interazione laser-plasma di fasci

di elettroni (seed) di alta brillantezza, breve durata temporale e piccola fluttuazione in energia, preservando quanto più possibile durante l'accelerazione le caratteristiche iniziali del pacchetto.

La differenza sostanziale rispetto agli esperimenti fino ad ora condotti in tutto il mondo consiste nel fatto che nell'onda di plasma si iniettano pacchetti di elettroni (seed) di alta brillantezza generati esternamente da un fotoiniettore e non pacchetti di elettroni generati dal plasma stesso e che presentano delle caratteristiche di bassa qualità. Partendo quindi da elevate brillanze del "seed" si pensa di poter ottenere un processo di accelerazione a plasma che produca pacchetti di elettroni di alta brillantezza.

L'infrastruttura SPARC_Lab è dotata dei due ingredienti principali e complementari per portare avanti questa ricerca. Infatti consente l'utilizzo di pacchetti di elettroni generati dal fotoiniettore di alta brillantezza di SPARC e di un laser FLAME di alta potenza di picco (circa 200 TW). L'opportunità di poter far interagire questi due elementi, è fondamentale per studiare lo schema di accelerazione descritto.

Le tre condizioni necessarie per il raggiungimento dell'obiettivo del progetto sono:

- **Generazione del "wakefield":** possibilità di generare e controllare quanto più possibile il campo accelerante "wakefield" in canali di plasma con opportune caratteristiche. Questa parte di studio comprende anche l'attività di R&D per l'accoppiamento del laser nel capillare.
- **Generazione del fascio laser:** possibilità di controllare al meglio le proprietà del fascio laser usato per innescare l'onda di plasma.
- **Sincronizzazione e generazione del pacchetto di elettroni:** possibilità di generare e sincronizzare alla decina di fs nel punto di interazione, il pacchetto di elettroni con l'onda di wakefield. La durata temporale del pacchetto di elettroni e i valori di sincronizzazione tra questo e l'onda di plasma sono principalmente determinati dalla densità del plasma e dal regime in cui questo viene eccitato. Il pacchetto di elettroni deve avere energia di $\sim 80\text{MeV}$ e carica di circa 10pC . La dimensione trasversa e longitudinale deve essere di $\sim 10\mu\text{m}$ e $\sim 10\text{fs}$ e l'emittanza normalizzata di $\sim 1\text{ mm-mrad}$.

Alcuni dettagli tecnici sull'accelerazione laser-plasma

La generazione degli alti campi di wakefield è legata all'impulso laser tramite la forza ponderomotrice che è proporzionale al gradiente dell'intensità laser. La prima conseguenza diretta è che per poter sfruttare i campi acceleranti su lunghe distanze, bisogna poter contrastare il fenomeno della diffrazione estendendo quindi l'elevata intensità laser su lunghezze ben maggiori della lunghezza di Rayleigh (Z_R) che è la distanza sulla quale il waist (w_0) dell'impulso laser varia di $\sqrt{2}$. Per rendere il discorso più quantitativo $Z_R \sim 0.35 \text{ cm}$ per un impulso laser con una lunghezza d'onda centrale di 800nm foccheggiato su uno spot di $60 \mu\text{m}$ di diametro (a $1/e^2$).

La metodologia scelta è basata sulla possibilità di propagare gli impulsi laser in capillari dielettrici. Se le condizioni di "matching" per l'eccitazione del modo principale della struttura dielettrica sono soddisfatte, l'impulso laser rimarrà confinato all'interno del capillare per lunghezze ben maggiori di Z_R . A questo punto il principale ostacolo, dal punto di vista laser, su propagazione sempre più lunghe in capillari dielettrici è legato alla dissipazione di energia lungo la propagazione. In vuoto, la dissipazione di energia del modo dipende inversamente dal cubo del diametro del capillare. La lunghezza sulla quale avviene l'accelerazione deve poi essere ottimizzata in base allo sfasamento relativo tra gli elettroni accelerati e il campo accelerante. Questa lunghezza dipende dalla frequenza principale del laser e dalla densità del plasma tramite la relazione $\propto \frac{n^{-3/2}}{\lambda_{laser}^2}$.

L'onda di wakefield, può essere generata in due regime differenti, distinti tra loro dal parametro $a_0 = \frac{eA}{m_e c^2} = 0.85 \cdot 10^{-9} \lambda_{laser}(\mu\text{m}) \sqrt{I(\text{W}/\text{cm}^2)}$ dove a_0 è il valore di picco del potenziale vettore del laser. Questo parametro distingue il regime lineare (non relativistico) da quello non-lineare in cui il moto trasverso degli elettroni "moto di quiver" eccitati dal campo elettrico del laser deve essere descritto dalla dinamica relativistica.

Poiché si vuole accelerare un pacchetto di elettroni (seed) che viene iniettato nell'onda di plasma, l'ampiezza di quest'onda deve essere sufficientemente ampia da non essere perturbata in modo significativo dal campo elettrico generato dal seed stesso. Si trova quindi che bisogna lavorare in un regime di transizione ovvero $a_0 \sim 1$.

Queste considerazioni mettono in luce il fatto che bisogna studiare sia sperimentalmente che teoricamente l'onda di wakefield generata dall'interazione di impulsi laser propaganti in capillari contenenti del gas per poter trovare un "trade-off" tra i parametri principali: intensità laser, densità del plasma, lunghezza e diametro del capillare, e ottimizzare quindi il processo di accelerazione. In questo processo di ottimizzazione è importante tener presente che sono preferibili onde di plasma con ampiezza ridotta (1GV/m) rispetto all'ampiezza massima raggiungibile (100GV/m) se però possono essere sfruttate su distanze più estese (5-20 cm). Infatti il guadagno di energia dipende dall'ampiezza del campo accelerante ma anche dalla lunghezza sulla quale avviene l'accelerazione tramite la relazione: $W = e E_{acc} L_{acc}$. In più bisognerà considerare le condizioni sotto le quali, la qualità iniziale del pacchetto di elettroni sia preservata il più possibile durante l'accelerazione.

Attività Scientifica

In questa sezione riporto l'attività scientifica svolta in questi tre anni e suddivisa in cinque tematiche. Per ciascuna tematica riporto all'inizio gli articoli pubblicati o in fase di pubblicazione e di seguito una breve descrizione degli stessi.

A) Studio sull'evoluzione dell'impulso laser nel capillare per la generazione del campo elettrico accelerante "wakefield" e per la relativa diagnostica:

- 1) A. Curcio, M. Petrarca, D. Giulietti, M. Ferrario: *Numerical and analytical models to study the laser-driven plasma perturbation in a dielectric gas-filled capillary waveguide*. Opt. Lett. 41(18), 4233-4236 (2016), doi:10.1364/OL.41.004233
- 2) F.G. Bisesto, M.P. Anania, A.L. Bacci, M. Bellaveglia, E. Chiadroni, A. Cianchi, A. Curcio, D. Di Giovenale, G. Di Pirro, M. Ferrario, M. Galletti, A. Gallo, A. Ghigo, A. Marocchino, A. Mostacci, M. Petrarca, R. Pompili, A.R. Rossi, L. Serafini, C. Vaccarezza: *Laser-capillary interaction for the EXIN project*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment 09/2016; 829., pp. 309–313, doi:10.1016/j.nima.2016.01.037
- 3) A Curcio, M Anania, F. Bisesto, E Chiadroni, A Cianchi, M Ferrario, F Filippi, D Giulietti, A Marocchino, M Petrarca, V Shpakov, A Zigler: *Trace-space reconstruction of low-emittance electron beams through betatron radiation in laser-plasma accelerators*. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams 01/2017; 20(1)., pp. 1-7, doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.20.012801
- 4) A. Curcio, D. Giulietti, M. Petrarca, *Tuning of Betatron Radiation in Laser-Plasma Accelerators via Multimodal Laser Propagation through Capillary Waveguides*, accepted by Phys. Plasma. 2017.

[1] In questo lavoro studio teoricamente il processo di generazione del campo di wakefield in capillari dielettrici. Si è sviluppato un modello matematico per studiare la propagazione di laser intensi ($0.1 < a_0 < 1$) in capillari dielettrici riempiti (lunghezza ~ 5 cm) con un gas già ionizzato (es. H) o da ionizzare con il laser stesso. Il modello teorico è stato sviluppato in simmetria cilindrica tenendo presente i parametri di riferimento per l'esperimento ed è basato sulle equazioni di Maxwell accoppiate con la risposta del plasma. Questo studio si differenzia rispetto ad altri modelli teorici proposti in letteratura perché non studia direttamente l'evoluzione dell'impulso laser, ma sviluppa l'evoluzione dei coefficienti di accoppiamento dei vari modi del capillare a partire dalle condizioni iniziali. Tramite i coefficienti, si ricostruisce poi la risposta del plasma (e quindi del campo accelerante "wakefield") e anche il profilo dell'impulso laser lungo la propagazione. Il nostro codice permette di caratterizzare rapidamente (qualche decina di minuti di una workstation) la risposta del plasma e la conseguente deformazione dell'impulso laser lungo il capillare. Solitamente, utilizzando altri codici, lo studio di questo problema avviene in qualche ora. Quindi il modello e il codice che sono stati sviluppati permettono di configurare e ottimizzare il set-up sperimentale in poco tempo non togliendo nulla alla fisica in gioco. Inoltre viene anche riportata una descrizione analitica del processo che comparata al modello numerico mostra un buon accordo. In entrambi i modelli è possibile tener conto della ionizzazione (nel caso il laser sia fatto propagare in gas non ancora ionizzato). Viene evidenziato come la ionizzazione renda irregolare il campo accelerante all'entrata del capillare rendendosi quindi un processo indesiderato e sottolineando la necessità di un plasma preformato.

[2] In questo lavoro sono riportati i risultati relativi l'analisi sperimentale dei limiti sulla stabilità di puntamento del laser richiesta per eccitare solo il modo principale del capillare e permettere di verificare sperimentalmente la tolleranza nel posizionamento longitudinale della posizione del waist del laser rispetto al piano di entrata del capillare. Si è potuto verificare che l'efficienza dell'accoppiamento nel modo principale non viene alterata significativamente se un disallineamento corrispondente a una traslazione di $\sim 10\mu\text{m}$ (offset) o ad una differente angolazione di ~ 4 mrad sono presenti nel puntamento laser. Lo studio è stato eseguito utilizzando un laser CW di $\sim 20\text{mW}$ (non impulsato). L'utilizzo di un laser CW ha permesso di effettuare i test in aria senza dover montare il set-up sperimentale sotto vuoto e quindi rendere la misura più complicata. Al contempo ha permesso di sormontare la problematica relativa al danneggiamento del capillare causata dall'alta intensità dell'impulso laser. L'accoppiamento ad alta potenza sarà affrontato in modo specifico nel corso del secondo semestre 2017 una volta che il sistema laser è stato perfezionato per migliorarne il profilo spaziale. La criticità del profilo spaziale risiede nella presenza di una regione spaziale di alta intensità che circonda il picco principale del laser e che può provocare dei forti danneggiamenti del capillare nel caso in cui incida direttamente sulla struttura dielettrica.

[3] In questo lavoro abbiamo presentato una tecnica di diagnostica non invasiva per la caratterizzazione della qualità trasversa di un pacchetto di elettroni accelerato dal "wakefield" di un gas-jet ionizzato ed eccitato da un impulso laser. La metodologia presentata è in grado di modellizzare e ricostruire lo spazio delle tracce trasverso di fasci di elettroni di bassa emittanza accelerati nel "regime a bolla" che si genera dall'interazione laser-plasma. In particolare si mostra che la misura contemporanea single-shot dello spettro di energia degli elettroni e lo spettro di radiazione di betatrone consente una misura completa di emittanza trasversa. Lo studio permette di ricostruire l'emittanza durante il processo di accelerazione prima ancora che il "bunch" esca dal plasma stesso. Viene poi descritta una nuova tecnica per misurare direttamente la distribuzione delle ampiezze di oscillazione di betatrone. Questa tecnica è stata testata presso il laboratorio SPARC-Lab (Laboratori Nazionali di Frascati-INFN) attraverso l'interazione del laser FLAME con un gas-jet di Elio. In questo modo si è riuscito anche a ricostruire il profilo trasverso dei fasci accelerati. Dallo studio della dinamica trasversa degli elettroni all'interno della bolla di plasma viene anche derivata la correlazione tra l'ampiezza di oscillazione betatrone e la divergenza, cioè l'angolo rispetto all'asse di accelerazione. La distribuzione angolare del fascio di elettroni all'interno della bolla viene così ricostruito. Nonostante quest'analisi sia stata confrontata con misure basate sullo schema di accelerazione altamente non-lineare noto come "regime a bolla" (in cui un ensemble di elettroni del plasma stesso, viene automaticamente iniettato nel campo accelerante che si forma nel plasma non contenuto in una struttura dielettrica), la stessa metodologia può essere applicata nel caso dello schema di accelerazione basato sull'iniezione esterna quando il plasma è contenuto in un capillare.

[4] In questo lavoro si studia teoricamente come viene perturbata l'emissione di betatrone emessa durante il processo di accelerazione di un pacchetto di elettroni in un plasma contenuto in capillare ed eccitato da un impulso laser. La conoscenza delle perturbazioni della radiazione di betatrone in queste condizioni permette di utilizzare la tecnica descritta in [3] per ricostruire lo spazio delle fasi del pacchetto di elettroni accelerato. Questo lavoro mostra come la propagazione del laser nei modi del capillare influisca nel campo wakefield generato e quindi nella radiazione di betatrone emessa

dagli elettroni accelerati. In più tramite la misura di questa radiazione è possibile ricavare “shot-to-shot” (per ogni impulso del laser) la qualità del matching tra laser-capillare. Sarà quindi possibile ottimizzare l’allineamento del laser nel capillare tramite un processo iterativo basato su questa diagnostica. Inoltre questo studio mostra anche come ottimizzare il sistema costituito dalla struttura dielettrica, laser e plasma nel caso si volesse generare una sorgente X-Gamma.

B) Studio dell’interazione di laser ad alta intensità con target solidi. Lavori svolti in collaborazione con il Prof. Arie Zigler (Racah Institute of Physics, Hebrew University, 91904 Jerusalem, Israel) attualmente presso LNF-INFN come “visiting scientist”.

- 5) R. Pompili, M. P. Anania, F. Bisesto, M. Botton, M. Castellano, E. Chiadroni, A. Cianchi, A. Curcio, M. Ferrario, M. Galletti, Z. Henis, M. Petrarca, E. Schleifer, A. Zigler: *Femtosecond dynamics of energetic electrons in high intensity laser-matter interactions*. Scientific Reports 10/2016; 6:35000, pp. 1-7, doi:10.1038/srep35000
- 6) R. Pompili, M.P. Anania, F. Bisesto, M. Botton, M. Castellano, E. Chiadroni, A. Cianchi, A. Curcio, M. Ferrario, M. Galletti, Z. Henis, M. Petrarca, E. Schleifer, A. Zigler: *Sub-picosecond snapshots of fast electrons from high intensity laser-matter interactions*. Optics Express 12/2016; 24(26)., pp. 29512-29520 , doi:10.1364/OE.24.029512
- 7) A. Curcio, M. Anania, F.G. Bisesto, A. Faenov, M. Ferrario, M. Galletti, D. Giulietti, R. Kodama, M. Petrarca, T. Pikuz, A. Zigler: *Characterization of X-ray radiation from solid Sn target irradiated by femtosecond laser pulses in the presence of air plasma sparks*. Laser and Particle Beams, 34(3), pp. 533–538. doi: 10.1017/S0263034616000458.

[5] In questo lavoro si studia la dinamica degli elettroni di alta energia (fino a decine di MeV) generati nelle prime fasi di interazione tra un impulso laser ultracorto e ultraintenso ($\sim 2 \cdot 10^{18}$ W/cm²) con bersagli solidi. Queste particelle che fuoriescono sono identificate come il nucleo essenziale di vari fenomeni su scala del picosecondo come ad esempio l’accelerazione di protoni guidata da laser, la generazione di campi magnetici intensi e di impulsi elettromagnetici di alta potenza e ampio spettro. Aumentando il numero di elettroni rilasciati dal target può essere di grande utilità in tutti questi processi. Fino ad oggi sono state registrate solo evidenze indirette di questi elettroni veloci, quindi nessuno studio dettagliato dei meccanismi che regolano la loro dinamica è stato possibile. Vengono dunque, per la prima volta, riportate misure dirette risolte nel tempo di elettroni energetici espulsi da target solidi durante l’interazione con un laser ad alta intensità e ultracorto. Si misurano bunch di elettroni fino a 7 nC di carica, di durata al picosecondo e 12 MeV di energia. La dinamica di questi elettroni viene registrata con una risoluzione temporale senza precedenti (decine di femtosecondi), dimostrando che “bunch” di alta carica ed alta energia si ottengono quando si aumenta la curvatura geometrica del bersaglio. Questi risultati aprono la strada verso miglioramenti significativi dell’accelerazione di ioni via laser, basandosi su target opportunamente progettati che potranno permettere lo sviluppo futuro di acceleratori di ioni su piccola scala.

[6] Questo lavoro riguarda l’interazione di laser ad alta intensità di breve durata (decine di fs) con bersagli solidi sottili, in particolare per ciò che concerne la produzione di “bunch” di elettroni che vengono estratti dal bersaglio lasciando su di esso una carica

positiva legata alla formazione di un potenziale elettrostatico, che a sua volta può essere utilizzato per l'accelerazione di ioni. I tempi tipici di tale fenomeno sono al di sotto del picosecondo. Si mostrano, per la prima volta, misure ad altissima risoluzione temporale (decine di fs) dei primi elettroni rilasciati dal target, i cosiddetti elettroni veloci. La loro carica totale, l'energia e il profilo temporale sono forniti tramite una diagnostica basata sul campionamento elettro-ottico (Electro Optical Sampling-EOS).

[7] In questo lavoro si indaga l'emissione di raggi X da target solidi di stagno irraggiati da impulsi laser al femtosecondo di bassa energia (pochi mJ) ma elevate intensità ($\sim 1 \cdot 10^{15}$ W/cm²), propagati attraverso scariche di plasma indotte in aria. Lo scopo è quello di comprendere meglio il meccanismo di emissione di radiazione X e mostrare quindi la possibilità di produrre questa radiazione per mezzo di un sistema laser compatto che può quindi divenire utile per varie applicazioni i.e. applicazioni spettroscopiche, medicali, di "imaging" ecc. Si dimostra che l'utilizzo controllato di un pre-impulso ultracorto è necessario per ottimizzare l'efficienza di conversione dell'energia laser in emissione X del target (in particolare si studia l'emissione della riga Lyman- α). Si trova che il contrasto ottimale tra l'impulso principale e il pre-impulso controllato deve essere circa 0.01, cioè il pre-impulso deve avere un'energia pari a un centesimo dell'energia dell'impulso laser principale. Si osserva poi che sussiste una correlazione tra gli spettri nel vicino infrarosso misurati all'uscita della scarica di plasma e il contrasto laser, infatti in prossimità del contrasto ottimale 0.01 si verifica uno shift massimo nel blu dello spettro laser. Questa evidenza può essere utilizzata come diagnostica per l'ottimizzazione della produzione di radiazione X.

C) Studio del jitter relativo laser-elettroni

- 8) R. Pompili, M. P. Anania, M. Bellaveglia, A. Biagioni, G. Castorina, E. Chiadroni, A. Cianchi, M. Croia, D. Di Giovenale, M. Ferrario, F. Filippi, A. Gallo, G. Gatti, F. Giorgianni, A. Giribono, W. Li, S. Lupi, A. Mostacci, M. Petrarca, L. Piersanti, G. Di Pirro, S. Romeo, J. Scifo, V. Shapakov, C. Vaccarezza, F. Villa, *Femtosecond timing-jitter between photo-cathode laser and ultra-short electron bunches by means of hybrid compression*, New J. Phys. 18 (2016), 083033 pp1-14, doi:10.1088/1367-2630/18/8/083033

Questo lavoro è stato svolto in collaborazione con il gruppo SPARC_Lab e riguarda la caratterizzazione del "jitter" del tempo di arrivo tra un impulso laser e il pacchetto di elettroni emesso dal fotocathode. In quest'analisi sulla dinamica longitudinale degli elettroni, si evidenzia come in particolari condizioni, questo "jitter" possa scendere fino a valori di ~ 20 fs rms. Questo lavoro è di estrema importanza per tutti gli esperimenti di accelerazione laser-plasma nella configurazione di iniezione esterna. Esperimenti in cui le specifiche sulla sincronizzazione dell'onda accelerante e il pacchetto "seed" di elettroni, sono molto stringenti richiedendo una sincronizzazione dell'ordine della decina di femtosecondi.

D) Studio sulla soglia di danneggiamento di materiali dielettrici per impulsi ultracorti e relativa applicazione nell'ambito della filamentazione laser. Questi lavori sono stati svolti in collaborazione con il Prof. P. Plynkin (College of Optical Sciences, University of Arizona, Tucson, and Visiting Scientist, LLNL).

- 9) Liu, X-L.; Cheng, W.; Petrarca, M.; Plynkin, P., *Measurements of fluence profiles in femtosecond laser filaments in air*, Optics Letters 41 (20) 4751-4754 (2016)

- 10) Liu, X-L.; Cheng, W.; Petrarca, M.; Polynkin, P., *Universal threshold for femtosecond laser ablation with oblique illumination*, Applied Physics Letters 109, 161604 pp 1-3, (2016);

[9] In questo lavoro abbiamo introdotto una tecnica per misurare la distribuzione del profilo di densità di energia di un laser al femtosecondo con intensità di picco fino a molte centinaia di terawatt per centimetro quadrato. La tecnica si basa sulla dipendenza della soglia di danneggiamento nel regime “single-shot” dell’oro in funzione dall’angolo d’incidenza del fascio laser sul campione. La tecnica è stata applicata per ricavare la distribuzione del profilo di densità di energia di un “filamento” laser. Il risultato è in accordo con la descrizione teorica del processo di filamentazione.

[10] In questo lavoro abbiamo quantificato la dipendenza della soglia di danneggiamento nel regime “single-shot” per tre tipi diversi di materiale: metalli, dielettrici e semiconduttori. Questa dipendenza è stata proposta per la caratterizzazione del profilo della densità di energia d’impulsi laser di alta intensità.

E) Studio sulla generazione d’impulsi THz e loro applicazioni

- 11) M. Petrarca, A. Curcio, V. Dolci, S. Lupi, A. Marocchino, Plasma wakefield generation by single-cycle THz pulses, submitted to Scientific Report.
- 12) F. Giorgianni, M. P. Anania, M. Bellaveglia, A. Biagioni, E. Chiadroni, A. Cianchi, D. Di Giovenale, G. Di Pirro, M. Ferrario, S. Lupi, F. Filippi, A. Gallo, G. Gatti, F. Giorgianni, A. Giribono, W. Li, S. Lupi, A. Mostacci, M. Petrarca, S. Pioli, V. Shapakov, C. Vaccarezza, F. Villa, *Tailoring of Highly Intense THz Radiation Through High Brightness Electron Beams Longitudinal Manipulation*, Appl. Sci. 2016, 6(2), 56; pp. 1-10, doi:10.3390/app6020056
- 13) V. Shpakov, M. Bellaveglia, M. Castellano, E. Chiadroni, A. Cianchi, S. Dabagov, D. Di Giovenale, M. Ferrario, F. Giorgianni, S. Lupi, A. Mostacci, M. Petrarca, G. Di Pirro, R. Pompili, F. Villa, *Pre-wave zone studies of Coherent Transition and Diffraction Radiation*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B, 355, 144-149. doi: [10.1016/j.nimb.2015.03.047](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.03.047)
- 14) F. Giorgianni, E. Chiadroni, A. Rovere, M. Cestelli-Guidi, A. Perucchi, M. Bellaveglia, M. Castellano, D. Di Giovenale, G. Di Pirro, M. Ferrario, R. Pompili, C. Vaccarezza, F. Villa, A. Cianchi, A. Mostacci, M. Petrarca, M. Brahlek, N. Koirala, S. Oh, S. Lupi, *Strong nonlinear terahertz response induced by Dirac surface states in Bi₂Se₃ Topological Insulator*, Nature Communications 7, Article number: 11421, pp. 1-6 (2016); doi :10.1038/ncomms11421

[11] In questo lavoro studio teoricamente la possibilità di utilizzare impulsi THz a regime di “single-cycle” per eccitare opportunamente un plasma e quindi creare anche un campo “wakefield”. Il diretto vantaggio di questo schema risiede nel fatto che usando impulsi al THz (1-3 THz) le energie richieste sono di qualche decina di mJ e le lunghezze temporali di ~300fs a discapito dei 3J (o più) e 30fs richiesti attualmente utilizzando il laser a Ti:Sa (con impulsi laser centrati a ~2000 THz). Un ulteriore vantaggio è che il THz è una frequenza non ionizzante. Questo studio evidenzia la possibilità di applicare questa tecnica per ottenere sorgenti compatte di elettroni aventi energie di forte interesse per la fisica medica.

[12-13] Il lavoro presentato in questi articoli, è stato svolto in collaborazione con il gruppo della Dr.ssa E. Chiadroni (Ricercatore Confermato presso LNF-INFN) presso la

“facility” SPARC_Lab dei LNF-INFN. Si è studiata la radiazione THz generata da pacchetti di elettroni in interazione con target solidi e si è messo in risalto la possibilità di modulare lo spettro del campo THz quando un treno d’impulsi viene fatto incidere sul target solido.

[14] Il lavoro presentato in questi articoli, è stato svolto in collaborazione con il gruppo della Dr.ssa E. Chiadroni presso la “facility” SPARC_Lab dei LNF-INFN ed il Prof. S. Lupi (Professore Associato presso il dipartimento di Fisica della Sapienza.) dell’università Sapienza di Roma. In questo lavoro si sono utilizzati gli impulsi di radiazione THz generati dall’interazione di pacchetti di elettroni con un target solido, per lo studio della risposta non lineare di materiali nell’ambito della fisica dello stato solido. In particolare si è studiata la risposta non-lineare del “topological insulator” Bi_2Se_3 indotta da un campo THz intenso. Si è dimostrato come il forte campo THz inneschi l’effetto di “trasparenza indotta” legata esclusivamente alla presenza di elettroni di Dirac sulla superficie del materiale.

Attività sperimentale di supporto e ottimizzazione del sistema laser

In questi tre anni, una buona percentuale di tempo è stata dedicata all'attività sperimentale necessaria per l'ottimizzazione del sistema laser. Riporto una breve descrizione del lavoro svolto in collaborazione con il gruppo SPARC_Lab.

Il laser FLAME di alta intensità (100TW) necessario per lo svolgimento del progetto, è stato uno dei primi sistemi di tale intensità prodotti commercialmente in Europa dalla Amplitude ed entrato in funzione nel 2008. L'invecchiamento dei componenti principali del sistema e le forti specifiche richieste da questo progetto (elencate in quanto segue), hanno richiesto un enorme lavoro di laboratorio per riottimizzare il sistema e renderlo quanto più adatto al progetto. I parametri principali che debbono essere raggiunti sono $\sim 3\text{J}$ di energia, larghezza temporale FWHM $\sim 30\text{fs}$, profilo spaziale flat-top prima del focheggiamento e "waist" nel fuoco $w_0 \sim 40\mu\text{m}$ con una concentrazione di energia nel picco principale uguale o superiore al 60%. Per poter ottimizzare il profilo spaziale nel fuoco, ho implementato un upgrade "Pharao" dell'ottica adattiva presente nella catena laser. Con questo sistema, è possibile correggere non solo le aberrazioni introdotte sul fronte di fase del fascio laser dagli elementi ottici a monte dello specchio deformabile, ma è possibile compensare anche le aberrazioni introdotte anche a valle di questo. In particolare è possibile ora eseguire una diagnostica del "fuoco virtuale". Il "fuoco virtuale" è il fuoco in cui tutte le caratteristiche dettate dall'ottica di focheggiamento, di trasporto e amplificazione del fascio laser sono riprodotte a basse intensità in un fascio secondario ma in parallelo al fuoco ad alta intensità (fascio principale). Ora è quindi possibile correggere facilmente e velocemente rispetto alla tecnica di allineamento convenzionale anche l'astigmatismo introdotto dall'ottica focheggiante (specchio parabolico). In questa configurazione siamo in grado di ottenere una concentrazione di energia nello spot principale del fascio laser intorno al 60%. Questo può essere considerato un buon valore per il tipo di laser in considerazione.

La riattivazione e ottimizzazione dell'amplificatore criogenico permette ora di raggiungere $\sim 3\text{J}$ dopo il compressore, adoperando i dieci laser di pompa a Nd:Yag in modo conservativo e producendo un profilo spaziale omogeneo del fascio amplificato.

Si è investigata la causa delle fluttuazioni sul puntamento del laser, osservate nella prima parte della linea ottica di trasporto. Sono state individuate vari posizioni lungo la linea in cui il fascio era soggetto a turbolenza causata da flussi di aria. Si è quindi provveduto alla copertura completa di tutta la linea ottica. Questo ha permesso, non solo di migliorare la stabilità di puntamento del laser ma anche le fluttuazione sul fronte di fase spaziale. Fluttuazioni queste che deterioravano sensibilmente il profilo e la sua stabilità nel fuoco. Ora si ha una fluttuazione del fronte di fase di $\sim 60\text{nm}$ e cioè inferiore a $\lambda/10$ rispetto al valore iniziale di $\sim 200\text{nm}$ (corrispondente a $\lambda/4$).

Nello stesso tempo sono stati eseguiti degli interventi di messa a punto del compressore che è stato completamente rinnovato. Questo rinnovo ha permesso di eliminare il "chirp spaziale" e migliorare quindi il profilo spaziale nel fuoco. Si riesce ora ad ottenere uno spot di $\sim 20\mu\text{m}$ di diametro nel fuoco al posto di $60\mu\text{m}$ e quindi si ha un aumento d'intensità di circa un fattore 9 (a parità di energia).

Un piano di ottimizzazione e messa a punto dei laser di pompa è in fase di sviluppo. Questo sviluppo permetterà di portare questi laser alle energie nominali senza provocare il danneggiamento frequente di alcune ottiche del laser stesso e quindi si potranno raggiungere su base giornaliera, energie più elevate ($3J < E < 5J$) dopo il compressore. Energie richieste per raggiungere i valori di necessari di a_0 .

Attività future di ricerca e sviluppo

Il progetto Rita Levi Montalcini, richiede l'uso di un laser con una elevata potenza di picco (100TW) e intensità ($>10^{18} \text{ W/cm}^2$). Questa caratteristica comporta un notevole stress per la struttura dielettrica del capillare che è parte integrante del cuore del progetto. Nonostante il progetto preveda un "proof of principle" di questa nuova tecnica di accelerazione, è di rilevante importanza che l'esperimento possa avvenire con una elevata frequenza di ripetizione (decine di "shot/ora") per poter aumentare quindi la statistica sul risultato, riducendo al minimo i danneggiamenti strutturali e i costi e dimostrando così l'applicabilità futura del metodo. Non è infatti accettabile dover sostituire un capillare ogni qualche "shot" a causa di un suo danneggiamento. La diretta conseguenza sarebbe una drastica riduzione della frequenza di ripetizione, una maggiore complicazione del set-up sperimentale e un maggiore impatto sull'economia del progetto. Per rimediare a queste problematiche ho ideato e cominciato a studiare la possibilità di utilizzare un campo di radiazione alla frequenza THz per poter accelerare i pacchetti di elettroni. Questa radiazione, potrebbe essere direttamente accoppiata in cavità acceleranti appositamente progettate per poter quindi creare il campo longitudinale richiesto per l'accelerazione. Un altro schema potrebbe essere quello di utilizzare questa radiazione per eccitare opportunamente un plasma e quindi creare anche in questo caso un campo "wakefield". Il diretto vantaggio di questo schema risiede nel fatto che usando impulsi al THz (1-3 THz) le energie richieste sono di qualche decina di mJ e le lunghezze temporali di $\sim 300\text{fs}$ a discapito dei 3J (o più) e 30fs richiesti attualmente dal progetto per impulsi laser centrati a $\sim 2000 \text{ THz}$; un ulteriore vantaggio è che il THz è una frequenza non ionizzante. Questo studio è stato anche formalizzato in un articolo ed ora è in fase di referaggio alla rivista Nat. Scientific Report [11]. Il "drawback" di questo schema è che al momento non esistono sorgenti di radiazione THz capaci di emettere questi livelli di energie. Per superare questa problematica, ho ideato uno schema per poter raggiungere le potenze di picco THz richieste. L'idea si basa sull'utilizzo di un laser convenzionale opportunamente adattato per produrre N fasci THz i quali successivamente vengono opportunamente sovrapposti e messi in fase tra loro di modo da poter sfruttare il processo di coerenza e quindi usufruire dell'andamento N^2 dell'intensità risultante. La tecnologia attuale permette di produrre questi N fasci con energie fino a 1mJ a seconda del tipo di sorgente laser e del cristallo usato per sviluppare il processo di rettificazione ottica e convertire la frequenza portante del laser nel THz. Il forte sviluppo su scala mondiale di R&D riguardante la tecnologia di questa banda spettrale lascia pensare che a breve si potrà accedere ai livelli di energie richieste per l'accelerazione al THz. Ho anche formalizzato l'idea di utilizzare la radiazione THz per accelerare un pacchetto di elettroni e la metodologia richiesta per produrre le potenze di picco THz necessarie a tal fine, in un progetto presentato alla commissione di Gruppo V dell'INFN la quale ha trovato il progetto di rilevante importanza nell'ambito della fisica degli acceleratori e ha concordato un

finanziamento iniziale di ~60k€ (a partire da metà 2017) per la sigla THz_RD. Di questa sigla, io sono il responsabile scientifico per la parte di generazione di radiazione THz ad alta intensità tramite la metodologia della sovrapposizione coerente di N campi THz mentre il Prof. S. Lupi è il responsabile scientifico dello sviluppo di una particolare diagnostica per applicazioni alla medicina (sempre basata sulla radiazione THz). Per la prima fase dello svolgimento dell'attività relativa alla sigla (2 anni), il lavoro sperimentale si avvale della strumentazione del laboratorio Teralab del Prof. S. Lupi situato presso il nuovo edificio del dipartimento di fisica alla Sapienza. Responsabile nazionale e locale della sigla il Prof S. Lupi. Nell'ambito di questa sigla ho instaurato una collaborazione con il Prof. K. Cassou (Maître de Conférences / Associate Professor LAL - Université Paris-Sud / CNRS) e la Prof.essa S. Kazamias (Sophie Kazamias Maître de conférences Université Paris Sud LPGP-LASERIX) per effettuare gli esperimenti di generazione di THz ad alta intensità. In più ho instaurato anche una collaborazione con la ditta AMPLITUDE "leader" nella produzione di sistemi laser ad alta potenza, per testare la tecnica che si vuole investigare su un particolare tipo di laser. Queste collaborazioni sono state formalizzate tramite una "lettera di intenti" da parte di ciascun collaboratore.

L'utilizzo della radiazione THz nell'ambito di nuove tecniche di accelerazione ha riscontrato un grande interesse nella comunità scientifica internazionale dando "il via" a differenti programmi di ricerca in vari istituti. Il CERN, si è dimostrato interessato a quest'attività e il Dr. Roberto Corsini, capo sezione di BE-ABP-LAT mi ha invitato come "convener" per la sessione THz del workshop sulle prospettive di ricerca per la facility CALIFES (nel futuro CLEAR). In questo workshop, ho anche presentato un programma di ricerca volto allo studio dell'accelerazione a THz (10-12 Ottobre 2016; <https://indico.cern.ch/event/533052/>). Un primo test di accelerazione al THz potrebbe essere effettuato sfruttando la radiazione THz di transizione ottica emessa da un pacchetto di elettroni relativistico in interazione con un target solido. La generazione di questa radiazione THz e le sue proprietà sono già in via di studio nella "facility" SPARC_Lab in collaborazione con la Dr.ssa E. Chiadroni. Questi esperimenti oltre ad un notevole impatto scientifico sono anche serviti come "benchmark" per testare la sorgente THz basata sulla radiazione di transizione e caratterizzarne le proprietà quando pacchetti di elettroni a bassa carica sono utilizzati per innescare il processo di transizione ottica coerente. In parallelo a queste attività si sta sviluppando una collaborazione con il Cockcroft Institute per lo studio di accelerazione basata su campi THz in opportune guide d'onda; questa struttura permetterebbe di allungare la distanza di accelerazione e quindi massimizzare il guadagno di energia finale degli elettroni. Inoltre sono stato invitato come "invited speaker" alla conferenza EMN (che si svolgerà in Aprile 2017) sul THz e le sue applicazioni (<http://emnmeeting.org/Americas/terahertz/invited-speakers/>).

Sempre nell'ambito INFN in collaborazione con il Prof. S. Lupi è in fase di preparazione un workshop riguardante gli sviluppi e le applicazioni della radiazione THz. Lo scopo del workshop è di ottenere una visione globale sull'utilizzo del THz all'interno degli INFN per poter eventualmente organizzare un gruppo di lavoro esteso e puntare a richiedere fondi alla comunità europea (H2020) per un progetto dedicato allo sviluppo di una sorgente THz ad altissima intensità dedicata per nuove tecniche di accelerazione. Sempre in collaborazione con Prof. S. Lupi studio la possibilità di utilizzare il THz per applicazioni biomediche in particolare per l'analisi non invasiva di malattie della pelle.

Un esperimento per la generazione di alti campi THz è stato configurato e presentato per la richiesta di fondi alla comunità europea tramite il consorzio LaserLab. La proposta ha passato il referaggio ed è stata accettata per essere finanziata. L'esperimento verrà portato avanti (nella facility di Jena), durante il 2017 in collaborazione con il, Dr. Daniil Kartashov e Dr. Pavel Polynkin. Tale esperimento prevede lo studio della radiazione THz prodotta quando un laser di 30TW di potenza viene foccheggiato in aria. I risultati, saranno tra i primi prodotti con un laser di tale potenza. Questa è una metodologia promettente per la generazione di impulsi THz di elevata energia che potrebbero quindi essere impiegati per i test di accelerazione.

Collaborazioni

- Università di Gerusalemme, Prof. Arie Zigler, per la continuazione dello studio della generazione di raggi X e per lo studio del processo di accelerazione tramite l'interazione laser-targhetta.
- Con il Dr. Daniil Kartashov (Institute for Optics and Quantum Electronics, Friedrich-Schiller University Jena, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena, Germany) e con il Prof. Pavel Polynkin (*College of Optical Sciences, University of Arizona, Tucson, and Visiting Scientist, LLNL*) per lo studio del processo di "laseramento atmosferico ad alta intensità"; per lo studio della radiazione THz quando impulsi laser con alte potenze di picco (>20TW) sono foccheggiati in aria e per lo studio delle caratteristiche del plasma sotto le stesse condizioni.
- Con il CERN (Dr. Roberto Corsini capo sezione di BE-ABP-LAT) per quanto riguarda i primi test di accelerazione al THz presso CLEAR. Questa attività è prevista iniziare durante i primi mesi del 2017. In questo periodo, nella facility CLEAR (ex CALIFES), si svolgeranno i primi test per caratterizzare i livelli di potenze di picco THz generate da pacchetti di elettroni di 200MeV con cariche di qualche nC. Successivamente, il campo THz prodotto da questi elettroni verrà fatto interagire con pacchetti di elettroni (sempre generati da questa "facility") per i primi test di accelerazione.
- Con il Prof. K. Cassou (Maître de Conférences / Associate Professor LAL - Université Paris-Sud / CNRS) e la Prof.essa S. Kazamias (Sophie Kazamias Maître de conférences Université Paris Sud LPGP-LASERIX) per effettuare gli esperimenti di generazione di THz ad alta intensità tramite la tecnica della sovrapposizione coerente per la quale ho ottenuto I fondi INFN di gruppo V nella sigla THz_RD. Una parte di questi test sarà svolta in collaborazione con la ditta AMPLITUDE, una delle ditte "leader" nella produzione di sistemi laser ad alta potenza.
- Con il Prof. K. Cassou e la ditta AMPLITUDE, è in corso di sviluppo anche una collaborazione per lo sviluppo del laser per il fotocatodo di ELI-NP per il quale mi occupo dello "shaping" longitudinale degli impulsi UV.

Bibliografia

Riporto qui la lista completa dei principali lavori svolti nel triennio Aprile-2014 – Febbraio 2017 e discussi in questa relazione scientifica.

- 1) A. Curcio, M. Petrarca, D. Giulietti, M. Ferrario: *Numerical and analytical models to study the laser-driven plasma perturbation in a dielectric gas-filled capillary waveguide*. Opt. Lett. 41(18), 4233-4236 (2016), doi:10.1364/OL.41.004233
- 2) F.G. Bisesto, M.P. Anania, A.L. Bacci, M. Bellaveglia, E. Chiadroni, A. Cianchi, A. Curcio, D. Di Giovenale, G. Di Pirro, M. Ferrario, M. Galletti, A. Gallo, A. Ghigo, A. Marocchino, A. Mostacci, M. Petrarca, R. Pompili, A.R. Rossi, L. Serafini, C. Vaccarezza: *Laser-capillary interaction for the EXIN project*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment 09/2016; 829., pp. 309–313, doi:10.1016/j.nima.2016.01.037
- 3) A. Curcio, M. Anania, F. Bisesto, E. Chiadroni, A. Cianchi, M. Ferrario, F. Filippi, D. Giulietti, A. Marocchino, M. Petrarca, V. Shpakov, A. Zigler: *Trace-space reconstruction of low-emittance electron beams through betatron radiation in laser-plasma accelerators*. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams 01/2017; 20(1), pp. 1-7, doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.20.012801
- 4) A. Curcio, D. Giulietti, M. Petrarca, *Tuning of Betatron Radiation in Laser-Plasma Accelerators via Multimodal Laser Propagation through Capillary Waveguides*, accepted by Phys. Plasma. 2017.
- 5) R. Pompili, M. P. Anania, F. Bisesto, M. Botton, M. Castellano, E. Chiadroni, A. Cianchi, A. Curcio, M. Ferrario, M. Galletti, Z. Henis, M. Petrarca, E. Schleifer, A. Zigler: *Femtosecond dynamics of energetic electrons in high intensity laser-matter interactions*. Scientific Reports 10/2016; 6:35000, pp. 1-7, doi:10.1038/srep35000
- 6) R. Pompili, M.P. Anania, F. Bisesto, M. Botton, M. Castellano, E. Chiadroni, A. Cianchi, A. Curcio, M. Ferrario, M. Galletti, Z. Henis, M. Petrarca, E. Schleifer, A. Zigler: *Sub-picosecond snapshots of fast electrons from high intensity laser-matter interactions*. Optics Express 12/2016; 24(26), pp. 29512-29520 , doi:10.1364/OE.24.029512
- 7) A. Curcio, M. Anania, F.G. Bisesto, A. Faenov, M. Ferrario, M. Galletti, D. Giulietti, R. Kodama, M. Petrarca, T. Pikuz, A. Zigler: *Characterization of X-ray radiation from solid Sn target irradiated by femtosecond laser pulses in the presence of air plasma sparks*. Laser and Particle Beams, 34(3), pp. 533–538. doi: 10.1017/S0263034616000458.
- 8) R. Pompili, M. P. Anania, M. Bellaveglia, A. Biagioni, G. Castorina, E. Chiadroni, A. Cianchi, M. Croia, D. Di Giovenale, M. Ferrario, F. Filippi, A. Gallo, G. Gatti, F. Giorgianni, A. Giribono, W. Li, S. Lupi, A. Mostacci, M. Petrarca, L. Piersanti, G. Di Pirro, S. Romeo, J. Scifo, V. Shpakov, C. Vaccarezza, F. Villa, *Femtosecond timing-jitter between photo-cathode laser and ultra-short electron bunches by means of hybrid compression*, New J. Phys. 18 (2016), 083033 pp1-14, doi:10.1088/1367-2630/18/8/083033
- 9) Liu, X-L.; Cheng, W.; Petrarca, M.; Polynkin, P., *Measurements of fluence profiles in femtosecond laser filaments in air*, Optics Letters 41 (20) 4751-4754 (2016)
- 10) Liu, X-L.; Cheng, W.; Petrarca, M.; Polynkin, P., *Universal threshold for femtosecond laser ablation with oblique illumination*, Applied Physics Letters 109, 161604 pp 1-3, (2016);

- 11) M. Petrarca, A. Curcio, V. Dolci, S. Lupi, A. Marocchino, Plasma wakefield generation by single-cycle THz pulses, submitted to Scientific Report.
- 12) F. Giorgianni, M. P. Anania, M. Bellaveglia, A. Biagioni, E. Chiadroni, A. Cianchi, D. Di Giovenale, G. Di Pirro, M. Ferrario, S. Lupi, F. Filippi, A. Gallo, G. Gatti, F. Giorgianni, A. Giribono, W. Li, S. Lupi, A. Mostacci, M. Petrarca, S. Pioli, V. Shpakov, C. Vaccarezza, F. Villa, *Tailoring of Highly Intense THz Radiation Through High Brightness Electron Beams Longitudinal Manipulation*, Appl. Sci. 2016, 6(2), 56; pp. 1-10, doi:10.3390/app6020056
- 13) V. Shpakov, M. Bellaveglia, M. Castellano, E. Chiadroni, A. Cianchi, S. Dabagov, D. Di Giovenale, M. Ferrario, F. Giorgianni, S. Lupi, A. Mostacci, M. Petrarca, G. Di Pirro, R. Pompili, F. Villa, *Pre-wave zone studies of Coherent Transition and Diffraction Radiation*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B, 355, 144-149. doi: [10.1016/j.nimb.2015.03.047](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.03.047)
- 14) F. Giorgianni, E. Chiadroni, A. Rovere, M. Cestelli-Guidi, A. Perucchi, M. Bellaveglia, M. Castellano, D. Di Giovenale, G. Di Pirro, M. Ferrario, R. Pompili, C. Vaccarezza, F. Villa, A. Cianchi, A. Mostacci, M. Petrarca, M. Brahlek, N. Koirala, S. Oh, S. Lupi, *Strong nonlinear terahertz response induced by Dirac surface states in Bi_2Se_3 Topological Insulator*, Nature Communications 7, Article number: 11421, pp. 1-6 (2016); doi :10.1038/ncomms11421

I lavori descritti in [9-10] e [5-7] sono stati svolti in collaborazione con colleghi di altri istituti internazionali: rispettivamente con il Prof. Pavel Polynkin (College of Optical Sciences, University of Arizona, Tucson, and Visiting Scientist, LLNL) ed il Prof. Arie Zigler (Racah Institute of Physics, Hebrew University, 91904 Jerusalem, Israel).

Attività didattica

Nel 2014 ho conseguito l'Abilitazione Scientifica Nazionale alle funzioni di professore universitario di seconda fascia per il settore concorsuale 02/B3 – Fisica Applicata, indetta con D.D. n.161 del 28/1/2013.

Valore del parametro H-index = 10 (Scopus) ad oggi: 30/01/2017

In parallelo al lavoro di ricerca, ho svolto e svolgo ancora la seguente attività didattica:

Corso per studenti di Dottorato in Fisica degli Acceleratori: *Laser ad alta intensità*.

Durante l'A.A. 2014/2015 e l'A.A. 2015/2016: docente di riferimento per il modulo di Fisica Applicata dell'insegnamento di Basi Molecolari per i corsi di studio (presso Roma Azienda Policlinico Umberto I) con SSD: FIS/07 e Classe CdS: L/SNT2 (Facoltà di Medicina e Odontoiatria):

Ortottica ed Assistenza Oftalmologica
Terapia della Neuro e Psicomotricità dell'Età Evolutiva
Terapia Occupazionale
Fisioterapia

Durante l'A.A. 2014/2015 ho svolto il ruolo di co-docente al corso di Fisica I per Ingegneria Chimica tenuto dal Prof. M. Piacentini.

Per quanto riguarda l'attività di formazione/ricerca, sono il relatore della Tesi di Dottorato in Fisica degli Acceleratori del Dr. A. Curcio e Dr. V. Dolci i quali sono direttamente implicati nell'attività sperimentale e teorica riguardante la mia attività di ricerca.

30/01/2017

Massimo Petrarca

