

Relazione sull'attività di ricerca di Marco Toppi nel triennio 2022-2025

Durante il mio triennio di attività in qualità di RTD-B del dipartimento di Scienze di Base e Applicate all'Ingegneria dell'università Sapienza ho svolto attività di ricerca principalmente nell'ambito dell'esperimento FOOT (FragmentatiOn Of the Target), finanziato dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), che ha come obiettivo la misura di sezioni d'urto dei processi di frammentazione nell'interazione di fasci di ioni leggeri (essenzialmente p, ^4He , ^{12}C e ^{16}O) con diversi tipi di bersaglio. Tali misure sono di interesse per applicazioni nell'ambito della Particle Therapy, per lo sviluppo di piani di trattamento (TPS) più affidabili, e per la radioprotezione nello spazio nello sviluppo di schermi per astronauti nell'ISS (International Space Station), per viaggi sulla luna e interplanetari (Marte). Queste due applicazioni condividono l'interesse per la frammentazione di ioni del fascio sopracitati, con l'aggiunta di ioni più pesanti come il ^{20}Ne , attualmente di interesse per la PT, e ^{28}Si e ^{56}Fe per la radioprotezione nello spazio. I range di energie sono anche simili: ioni di 100-1000 MeV/u, mentre i bersagli sono soprattutto gli elementi principali costituenti il corpo umano (H,C e O), di interesse per la Particle Therapy, e bersagli leggeri utili per la radioprotezione nello spazio, ovvero bersagli ricchi di idrogeno che minimizzano la probabilità di frammentazione secondaria nello schermo stesso.

Nel mio primo anno (2022-2023) mi sono in particolare occupato dell'analisi dei primi dati di un fascio di ^{16}O a 400 MeV/u incidenti su bersaglio di Carbonio acquisiti al laboratorio del GSI (Germania, Darmstadt) nel 2019. Tali dati sono di interesse per lo sviluppo di piani di trattamento accurati per l'adroterapia con fasci di ^{16}O e anche per la radioprotezione nello spazio essendo il ^{16}O l'isotopo più abbondante tra i raggi cosmici dopo p e ^4He (ma con una Z e quindi un rilascio di dose decisamente maggiore di p e ^4He). In particolare, mi sono occupato dello sviluppo degli algoritmi di identificazione dei frammenti, di tracciamento, ho studiato la reiezione del fondo le efficienze di rivelazione e di ricostruzione e ottenuto le sezioni d'urto di frammentazione di cambio di carica per la produzione di frammenti con numero atomico Z nel range $Z = [2-7]$. Ho portato a termine la misura delle sezioni d'urto di frammentazione i cui risultati sono stati pubblicati su Frontiers (Marco Toppi, et al. (2022), Elemental fragmentation cross sections for a ^{16}O beam of 400 MeV/u kinetic energy interacting with a graphite target using the FOOT ΔE -TOF detectors. Front. Phys. 10:979229. DOI 10.3389/fphy.2022.979229).

A fine 2022 ho terminato il mio mandato come deputy software coordinator della collaborazione per lo sviluppo del codice di ricostruzione e identificazione dei frammenti nell'apparato sperimentale di FOOT.

Grazie all'esperienza maturata nell'analisi, nello sviluppo di algoritmi di ricostruzione nell'esperimento e nella conoscenza del rivelatore di FOOT sono stato eletto ad inizio 2023 nuovo Physics Coordinator dell'esperimento (<https://web.infn.it/foot/en/sample-page/>), carica della durata di 2 anni. Mi sono quindi occupato di coordinare il gruppo di analisi e le diverse analisi dati in corso di diverse campagne di acquisizione dati, svolte tra il 2021 e il 2022. In particolare nel biennio 2023-2024 mi sono occupato delle seguenti analisi:

1. L'analisi della frammentazione prodotta a grande angolo da fasci di ^{12}C in un range di energie 100-400 MeV/u. Scopo di questa analisi è la misura di sezioni d'urto di produzione di protoni, deuteroni e tritoni in un intervallo angolare tra i 60° e i 90° . Tale analisi ha portato ad un articolo sottomesso a EPJA (The European Physical Journal A - <https://epja.epj.org/>) e attualmente in via di revisione.

2. L'analisi dei dati acquisiti a GSI nel 2021 con il setup di emulsioni di FOOT per la misura delle sezioni d'urto di frammentazione di fasci di ^{16}O a 200 MeV/u, incidenti su C per la produzione di frammenti leggeri di H, He e Li. La misura della sezione d'urto totale di frammentazione per tale processo è in via di sottomissione in un articolo per PRC (Physical Review C - <https://journals.aps.org/prc>).
3. L'analisi dei dati acquisiti a GSI nel 2021 per l'interazione di un fascio di ^{16}O di 400 MeV/u su bersagli di C e C_2H_4 per la misura di sezioni d'urto differenziali nell'angolo di produzione dei frammenti per i processi $\text{O}+\text{H}$, $\text{O}+\text{C}_2\text{H}_4$ e $\text{O}+\text{H}$ (ottenuto dalla sottrazione stechiometrica dei primi due processi). Per i dati del 2019 la ridotta statistica acquisita ha permesso solamente la misura di sezioni d'urto elementari integrate, mentre l'analisi dei dati del 2021 è volta a misurare le sezioni d'urto di frammentazione differenziali rispetto all'angolo di produzione dei frammenti. L'analisi della sezione d'urto di $\text{O}+\text{C}$ e i risultati ottenuti sono stati accettati in un articolo sottomesso a PRC (Physical Review C - <https://journals.aps.org/prc>).
4. Gli stessi dati di GSI del 2021 permettono una misura di sezioni d'urto differenziali rispetto alla β di produzione dei frammenti per i processi $\text{O}+\text{H}$, $\text{O}+\text{C}_2\text{H}_4$ e $\text{O}+\text{H}$. Per tali dati, considerando quelle Z (carica nucleare) di produzione per le quali si ha un'abbondanza isotopica quasi totalitaria (e.g. ^4He , ^{12}C , ^{14}N) si possono anche ottenere le sezioni d'urto differenziali nell'energia cinetica dei frammenti. Da tali studi è possibile inoltre misurare la sezione d'urto del processo di frammentazione di un bersaglio di O da parte di un fascio di H ($\text{H}+\text{O}$) utilizzando un approccio di cinematica inversa in cui i frammenti dell'O creati dalla sua interazione con un bersaglio di H vengono misurati nel sistema di riferimento in cui il fascio di O è fermo ed è il bersaglio di H ad andare contro esso. Tale processo ($\text{H}+\text{O}$) è difficilmente misurabile in cinematica diretta (fascio di H su bersaglio di O) in quanto i frammenti del bersaglio di O sarebbero prodotti con un'energia cinetica così piccola (range dell'ordine del μm) da non riuscire ad uscire dal bersaglio stesso per essere rivelati. Tale analisi è attualmente in sviluppo (2025).

FOOT è un esperimento che prende dati pochi giorni l'anno in diversi siti sperimentali. Parte del mio lavoro nella collaborazione è anche la partecipazione a queste prese dati, in cui si deve trasportare tutto il detector (costituito da diversi sub-detectors e due magneti permanenti), montare, acquisire in pochi turni-fascio e poi smontare. In particolare ho partecipato a tutte le prese dati di questo triennio, al "Heidelberg Ion Beam Therapy Center" (HIT) nel 2022 e poi ogni anno dal 2022 al 2024 al Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (CNAO) di Pavia. In qualità di Physics coordinator ho dovuto valutare in ogni campagna che dati acquisire, con quali setup, fasci e bersagli in base al tempo fascio allocato in modo da raggiungere la misura delle sezioni d'urto obiettivo di FOOT con la precisione richiesta dalle applicazioni di PT e RPS. In tutte queste campagne di misura sono stati collezionati dati per calibrare il rivelatore di FOOT e per fare misure di frammentazione di un fascio di ^{12}C di 200 MeV/u su bersaglio di C e C_2H_4 al CNAO e di fasci di ^4He a diverse energie su bersaglio di C ad HIT. Nel periodo di tempo tra le varie prese dati il rivelatore usato dall'esperimento FOOT è stato via via sviluppato. L'apparato sperimentale finale è stato usato per la prima volta solo alla fine del 2023, con il magnete di FOOT e il calorimetro a BGO completo che permetteranno la misura dell'identificazione isotopica dei frammenti, attraverso la misura del loro impulso, della loro energia cinetica e del loro tempo di volo.

Per quanto riguarda il mio lavoro nel software di ricostruzione e identificazione dei frammenti dell'esperimento, nell'ultimo anno (2024-2025) mi sono occupato della ricostruzione di tracce e vertici con il rivelatore di vertice di FOOT (VTX), composto da 4 layer di rivelatori al silicio

a MAPS (Monolithic Active Pixel Sensors) Mimosa-28. Il lavoro è stato svolto insieme ad una laureanda di Fisica della Sapienza che ho seguito come correlatore. In particolare mi sono occupato di massimizzare le prestazioni di tale rivelatore, sia per quanto riguarda la sua efficienza di tracciamento che di ricostruzione di vertici, per tutte le campagne di presa dati di FOOT in cui è stato utilizzato. Tale rivelatore è cruciale per la ricostruzione di tracce globali e per la misura delle sezioni d'urto stesse in presenza di campo magnetico. A tal fine ho dovuto lavorare sull'ottimizzazione dei parametri usati dalla ricostruzione in primis nelle simulazioni Monte Carlo per poi passare ai dati veri e propri. Infine parte fondamentale del lavoro si è concentrata sulla gestione del pile-up su tale sensore, dovuto ad un read-out dei Mimosa-28 lento ($\sim 675 \mu s$ rispetto ad una rate di fascio di ~ 1 kHz, necessaria per accumulare una statistica sufficiente ad ottenere una precisione sulle sezioni d'urto con un errore statistico inferiore al 5%). Lo studio e l'ottimizzazione di tale detector ha avuto un impatto molto importante sulla qualità dei dati acquisiti con l'apparato completo nella campagna di presa dati di CNAO2024, rispetto a quelli del 2023 in cui tale detector aveva lavorato in un regime sub-ottimale. Ora sto coordinando l'analisi di questi dati per la misura di sezioni d'urto isotopiche doppio differenziali in angolo ed energia cinetica dei frammenti. Tale analisi è al momento solo nella fase iniziale e costituisce l'obiettivo principale della mia attività di ricerca e di tutta la collaborazione FOOT. Grazie al mio impegno e ai risultati ottenuti, sono stato rieletto nel 2025 per un secondo mandato come Physics Coordinator di FOOT.

Ho presentato i risultati dell'analisi e dello stato di avanzamento di FOOT al: "59th International Winter Meeting on Nuclear Physics" a Bormio, in Italia, a gennaio 2023. Inoltre ho ricevuto un talk su invito alla 111° congresso nazionale della SIF di quest'anno a Palermo (2025) per presentare lo stato di FOOT.

In questi anni ho lavorato anche per ottenere finanziamenti per FOOT, per personale e per prese dati. Abbiamo vinto, come FOOT, la call del MAECI (Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale) del 2023 con identificativo PGR12400, per "Large research infrastructures or centers located in Germany, which provide enabling and unique technologic or scientific facilities unavailable in Italy". Il progetto vincitore dal nome: "Measuring Oxygen Fragmentation For Improved Ion Therapy Strategies (MOFFIITS)" concluderà alla fine del 2025. Ad inizio 2025 ho anche partecipato ad un'applicazione per l'ESA PAC - IBPER 2025 per avere finanziamenti per una presa dati di FOOT ai laboratori del GSI (https://www.gsi.de/en/work/research/experiment_electronics/laboratories) con fasci di C ad alta energia (700-1000 MeV/u) di particolare interesse per la RPS. Finora la proposta ha superato il primo livello di valutazione e siamo in attesa per il secondo.

Nell'ambito della collaborazione FOOT, mi sono inoltre occupato della progettazione e realizzazione di un Beam Monitor di basse intensità per monitorare il fascio della sala sperimentale del CNAO, che è la sala in cui FOOT prende dati a partire da fine 2022. Il rivelatore consiste di due piani di fibre scintillanti lette da SiPM e da un readout di ASICs e FPGA.

Durante questo triennio ho anche continuato la mia attività nella collaborazione ALICE al CERN, come parte del gruppo di analisi di "Light Flavour" che si occupa dello studio delle proprietà del Quark Gluon Plasma, formato in collisioni di ioni pesanti ad alte energie, a partire dalla misura di particelle leggere (composte da quark u, d e s) emesse ad alto impulso trasverso e prodotte dall'adronizzazione di partoni nella fase iniziale della collisione. In particolare mi sono occupato della misura di flussi di produzione di pioni, kaoni (carichi) e protoni nell'interazione di diversi sistemi (p-p, p-Pb, Pb-Pb e Xe-Xe) a diverse energie del centro di massa tipiche di LHC nel range 2-13 TeV/u. Ho inoltre partecipato alla presa dati di ALICE dal 2022 al 2024 (Run3 di LHC) in qualità di Shift Leader per l'acquisizione di collisioni p-p a 13 TeV e ho continuato ad occuparmi, come faccio dall'inizio del Run3, dei Quality Checks dell'Inner Tracking System di

ALICE il rivelatore di tracciamento ad ALPIDE alla cui costruzione e sviluppo ho partecipato sin dal 2016, durante il "Long Shutdown 2" di LHC.

A handwritten signature in black ink, reading "Marco Cacciari". The signature is written in a cursive style and is surrounded by a faint, circular, dotted pattern.