

SHiP-Fed: Search for Hidden Particles

nuova frontiera di scienza e tecnologia al CERN

November 5, 2019

Dipartimenti partecipanti

- Dipartimento di Fisica "E. Pancini"
- Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura
- Dipartimento di Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell'Informazione
- Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale
- Dipartimento di Ingegneria civile, edile e ambientale
- Dipartimento di Ingegneria Industriale
- Dipartimento di Scienze Chimiche
- Dipartimento di Matematica e Applicazioni "R. Caccioppoli"
- Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse
- Dipartimento di Medicina Molecolare e Biotecnologie Mediche

Dipartimento di afferenza:

Fisica "E. Pancini"

Responsabile scientifico:

Giovanni De Lellis

Comitato di gestione

- C. Nitsch - Dipartimento di Matematica e Applicazioni "R. Caccioppoli"
- C. De Rosa - Dipartimento di Scienze Chimiche
- G. De Lellis, F. Tramontano - Dipartimento di Fisica "E. Pancini"
- A. Prota - Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura
- M. de Magistris, F. Garofalo - Dipartimento di Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell'Informazione
- P. Maffettone - Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale
- M. Giugni - Dipartimento di Ingegneria civile, edile e ambientale
- R. Mastrullo - Dipartimento di Ingegneria Industriale
- M. A. De Matteis - Dipartimento di Medicina Molecolare e Biotecnologie Mediche
- G. Balassone - Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse

1 Il Progetto SHiP al CERN

La scoperta del bosone di Higgs al CERN nel 2012 [1, 2] ha confermato il Modello Standard delle interazioni fondamentali che descrive i costituenti elementari della materia che conosciamo e il loro modo di interagire. Rimangono ancora non spiegati molti fenomeni quali la materia oscura, l'asimmetria barionica dell'Universo e le masse dei neutrini. Conosciamo solo circa il 5% dell'Universo e dobbiamo ancora capire perché siamo fatti di materia e non di anti-materia mentre si ipotizza che negli istanti primordiali dell'Universo ci fosse una completa simmetria tra i due stati. L'esistenza di nuove particelle potrebbe spiegare questi fenomeni. Purtroppo non conosciamo la scala di energie di queste particelle. Le attuali ricerche all'acceleratore LHC al CERN costituiscono la frontiera dell'alta energia della fisica delle particelle, ovvero sono particolarmente sensibili a particelle di massa più alta di quelle attualmente osservate ma caratterizzate da probabilità ordinarie di interazione con esse. Particelle con masse relativamente basse e molto debolmente accoppiate con la materia sono previste da molti modelli teorici ma non è ancora stata condotta una ricerca sperimentale con la necessaria sensibilità. L'esperimento SHiP (Search for Hidden Particles) al CERN è una proposta per la ricerca di queste particelle e lo studio della fisica del neutrino, sottomessa ad Aprile 2015 al Comitato Scientifico del CERN (SPSC) [3, 4] e attualmente al vaglio dei Comitati Scientifici internazionali.

La ricerca di queste particelle può essere fatta efficacemente attraverso una facility cosiddetta di beam dump, ovvero un fascio di protoni di alta energia che viene fatto incidere con altissima intensità su un bersaglio denso. Tutte le particelle cariche prodotte in queste interazioni vengono assorbite oppure deflesse da campi magnetici. Fuoriescono da questo bersaglio solo particelle molto debolmente interagenti come i neutrini ed eventualmente nuove particelle ancora da scoprire che vengono studiate con apparati dedicati.

La facility è una copiosissima sorgente di neutrini e in particolare per quelli tau, la particella meno studiata tra quelle note. Il gruppo di Napoli ha proposto nel 2014 un rivelatore di neutrini per lo studio delle loro proprietà, in particolare per la misura della probabilità di interazione del neutrino tau, mai misurata e per l'osservazione dell'anti-neutrino tau. Napoli è stato tra i 6 gruppi costituenti dell'esperimento. L'esperimento ha poi costituito una Collaborazione di oltre 250 scienziati provenienti da 54 Istituti di 18 Nazioni.

La realizzazione di SHiP necessita lo sviluppo di nuovi apparati sperimentali e infrastrutture di ricerca che richiedono competenze molto ampie e trasversali che coprono diverse branche della scienza e della tecnologia. Nel piano strategico che segue elenchiamo i diversi saperi dell'Ateneo Federiciano coinvolti nella progettazione, realizzazione e nel funzionamento dell'esperimento SHiP.

2 PIANO STRATEGICO

2.1 Esplorare nuova fisica con gli acceleratori del CERN

L'esperimento SHiP si propone di esplorare il cosiddetto *Hidden Sector*, ovvero il complesso di nuove particelle e campi dove potrebbe risiedere la spiegazione a fenomeni osservati sperimentalmente ma non inquadrabili nel panorama attuale delle conoscenze, quali, ad esempio, la natura della materia oscura che domina nel nostro universo e l'asimmetria tra materia e antimateria. Il complesso di acceleratori del CERN consente una sensibilità unica nella esplorazione della cosiddetta frontiera dell'intensità facendo incidere un fascio di alta intensità su un bersaglio di materia e producendo così copiosamente neutrini e particelle *nascoste*. Tali particelle possono essere rivelate sia attraverso il loro decadimento, che avviene a diverse decine di metri rispetto al punto di produzione, sia attraverso la diffusione su atomi del bersaglio [5, 6, 7, 8, 9]. Particelle di materia oscura, per esempio, possono essere diffuse dagli elettroni del bersaglio a emulsioni nucleari, causando un rinculo degli elettroni che vengono rivelati e studiati.

Un esperimento a bersaglio fisso è anche una copiosa sorgente di neutrini, in particolare di neutrini tau, ad oggi le particelle meno conosciute tra quelle del Modello Standard delle particelle elementari.

2.2 Sviluppo di nuovi rivelatori alla frontiera dell'intensità

La ricerca di eventi rari in un esperimento che si colloca alla frontiera dell'intensità pone la duplice sfida di un'elevata sensibilità e una riduzione drastica del fondo. Le emulsioni nucleari sono rivelatori traccianti con risoluzione spaziale sub-micrometrica e vengono utilizzate per la rivelazione di interazioni di neutrini e la ricerca di materia oscura [10]. Le emulsioni sono tipicamente costituite da cristalli di alogenuro di argento (~ 200 nm) immersi in gelatina organica, vengono prodotte sotto forma di film sottili e utilizzate

in combinazione con materiale passivo per aumentare la probabilità di interazione dei neutrini e delle particelle nascoste. La scelta del materiale passivo è cruciale, sia in termini di prestazioni nella misura di energia e di identificazione delle particelle, sia in termini di compatibilità chimica e meccanica con le emulsioni. Grazie a un intenso programma di R&D è stato possibile produrre emulsioni con cristalli del diametro di 20 e 40 nanometri, circa un ordine di grandezza inferiore rispetto a quelli contenuti nelle emulsioni tradizionali [11, 12]. Queste emulsioni consentono di rivelare rinculi nucleari di lunghezze inferiori a 100 nm e sono ideali per la rivelazione della materia oscura leggera, quando questa produce rinculi nucleari.

Una linea di ricerca è lo sviluppo di emulsioni nucleari in cui la gelatina che agisce da sostrato viene rimpiazzata da polimeri sintetici. Questo consente di controllare la frazione di carbonio in modo da ridurre la radioattività della componente del ^{14}C . Ciò richiede un significativo R&D.

Una importante sorgente di fondo che può inficiare la ricerca di eventi rari è costituita da particelle cariche prodotte nelle interazioni dei protoni primari con il bersaglio, i cosiddetti muoni. Queste sono le uniche particelle cariche che riescono a penetrare gli schermi passivi e magnetici a monte, sebbene anche queste vengano molto ridotte (di diversi milioni di volte) rispetto al loro flusso iniziale. L'identificazione di tali particelle deve essere effettuata con rivelatori con risoluzione temporale migliore di 100 ps, in grado di coprire superfici di centinaia di metri quadri. Rivelatori a scintillazione o a gas rispondono a questi requisiti. Si dovranno realizzare prototipi di tali rivelatori per valutarne le prestazioni. Essi necessitano anche dello sviluppo di elettronica per la lettura e il processamento dei segnali prodotti dal passaggio delle particelle.

Nell'analisi dei dati provenienti dai rivelatori, l'utilizzo di tecniche di machine learning è sempre più necessaria data la complessità dei dati stessi e la ricchezza di informazioni in essi contenuta. In particolare l'analisi delle immagini raccolte al microscopio con processori direttamente collegati ai sensori permettono di sfruttare appieno le informazioni a livello nanometrico dei diversi pixel che costituiscono l'immagine.

2.3 Tubi di decadimento a vuoto ultraleggeri

Particelle nuove potrebbero manifestarsi attraverso la disintegrazione (decadimento) in particelle conosciute. Per poter accrescere la probabilità di decadimento è necessario progettare e realizzare un tubo di decadimento di oltre 50 m di lunghezza e circa 1000 m³ di volume interno. All'interno deve esserci il vuoto, ovvero una pressione un milione di volte inferiore a quella dell'atmosfera, per evitare interazioni di neutrini con le molecole di aria. La struttura del tubo deve assicurare la tenuta del vuoto ed essere la più leggera possibile onde evitare interazioni di neutrini con la struttura stessa che potrebbero generare un segnale simile a quello prodotto dalle nuove particelle che si ricercano. Inoltre, la struttura deve sostenere un guscio di liquido scintillante, ovvero un liquido che emette luce al passaggio di particelle cariche e dunque rivela quelle che entrano lateralmente e che costituiscono un fondo da eliminare [13].

2.4 Elettromagneti per rivelatori di frontiera

Per le specifiche condizioni e i vincoli legati alle esigenze sperimentali, SHiP richiede magneti con caratteristiche di unicità. In particolare, il magnete per il rivelatore di neutrini e materia oscura rappresenta una sfida tecnologica ai limiti della fattibilità per le sue caratteristiche di volume magnetizzato, vincoli dimensionali, accessibilità e potenza impegnata. La sua analisi e progettazione necessita di competenze interdisciplinari di elettromagnetismo stazionario, analisi strutturale, analisi termica, meccanica, elettronica di potenza e tecnologie metallurgiche. Vi sono molteplici aspetti di rilievo quali la progettazione ottima elettromagnetica in termini di uniformità e stabilità del campo, la riduzione del campo residuo, l'efficienza energetica, il raffreddamento dell'avvolgimento e il condizionamento del rivelatore in esso contenuto e gli aspetti meccanici e tecnologici legati alla sua realizzazione. È allo studio una soluzione basata su tecnologia in rame "warm magnet", dimensionata su una corrente equivalente $NI = 1 \text{ MA}$, una potenza impegnata di $P = 1 \text{ MW}$, una massa di circa 350 ton di ferro e 50 ton di rame, per magnetizzare in modo uniforme a un valore di induzione magnetica $B = 1.25 \text{ T}$ un volume complessivo utile di $1 \times 1.6 \times 5.4 \text{ m}^3$ occupato dal rivelatore di particelle. È in fase di pre-analisi anche la possibilità di sostituire l'avvolgimento tradizionale con una configurazione "dry superconducting coil" alla temperatura di 40 K, in matrice di rame [14].

2.5 Bersagli di fasci di particelle ad altissima intensità ed energia

Il fascio di protoni di alta intensità (4×10^{13} protoni in un secondo) ed energia di 400 GeV incide su un bersaglio denso di molibdeno e tungsteno. La potenza depositata massima supera i 2.5 MW e riscalda

il bersaglio tanto che il tungsteno non può essere utilizzato nella parte più a monte perché fonderebbe. Si prevede di raffreddare il bersaglio con un sistema di raffreddamento ad acqua ad alta pressione (15-20 atmosfere) in modo da non superare il punto di ebollizione. Nuove tecniche di raffreddamento che non usino l'acqua possono migliorare il progetto da diversi punti di vista, quali ad esempio il problema dello smaltimento dell'acqua radioattiva [15].

La scelta dei materiali coinvolti nel bersaglio è un altro punto critico: le proprietà dei materiali soggetti ad elevate radiazioni per lungo tempo non sono ben conosciute. Questo è un tema di ricerca in corso di studio. Ciò non riguarda solo il bersaglio stesso ma anche tutta la regione circostante.

La distribuzione del punto di incidenza del fascio di protoni sul bersaglio è un aspetto cruciale per ridurre gli stress interni e le variazioni termiche durante il funzionamento. A tale scopo, sarà necessario utilizzare delle tecniche di ottimizzazione vincolata per determinare la traiettoria del fascio che consenta una distribuzione più omogenea dell'energia rilasciata. Per ciò che concerne le specifiche di progetto, bisognerà tener conto delle temperature massime di esercizio e degli stress risultanti. Le analisi preliminari richiederanno una discretizzazione spaziale del fenomeno di diffusione del calore, in modo da utilizzare equazioni differenziali ordinarie anziché alle derivate parziali. Nel progetto della traiettoria ottimale, inoltre, si dovrà tener conto dei vincoli sugli attuatori, che limitano l'insieme delle traiettorie ammissibili. Ad esempio, la distribuzione del fascio di protoni sul bersaglio è determinata da due magneti H e V, il che vincola il tipo di possibili traiettorie.

2.6 Meccanica di precisione per strutture complesse

Nei grandi apparati sperimentali come quelli dell'esperimento SHiP è usuale dover assemblare, manipolare e mantenere strutture di grandi masse (centinaia di ton), caratterizzate da tolleranze meccaniche estremamente ridotte, sia dal punto di vista realizzativo che rispetto alla movimentazione nella normale operatività. Ciò pone sfide progettuali e tecnologiche che richiedono competenze di natura meccanica. Allo stato attuale del progetto e in riferimento a diversi apparati in fase di progettazione, si evidenziano diversi contributi necessari alla definizione delle strutture meccaniche. Ad esempio, per quanto riguarda il magnete per il rivelatore di neutrini e materia oscura, è necessario integrare l'attuale progettazione meccanica di massima in modo da rispondere all'esigenza di apertura e accesso al rivelatore interno al magnete per le routinarie procedure di manutenzione previste durante il funzionamento. Ciò comporta la movimentazione di grandi blocchi massivi (di svariate tonnellate ciascuno) che, in configurazione di chiusura, risultano soggetti a grandi stress meccanici e interconnessi con tolleranze molto stringenti.

2.7 Certificazione e monitoraggio di parametri e prestazioni di apparati sperimentali in condizioni estreme

Il complesso sistema costituito dal rivelatore SHiP richiede, sia in fase di realizzazione che di funzionamento, la misura e il collaudo di molti sottosistemi come ad esempio i magneti, nonché il monitoraggio di un ampio insieme di grandezze fisiche quali temperature, livelli di umidità relativa, dosi di radiazioni o presenza di gas. Per quanto riguarda la misura e la certificazione è necessario l'apporto di competenze di alto livello nella rilevazione delle mappe di campo magnetico per i diversi magneti previsti, tramite strumentazione di misura di flusso magnetico di precisione elevata, trasduttori PCB e magnetometri a bobina rotante. Inoltre l'elevata stabilità richiesta alle alimentazioni (power converters) necessita lo sviluppo di sistemi di acquisizione dati di elevata ripetibilità per misure di impulsi. Infine è da citare la possibilità di sviluppare tecniche per l'analisi di incertezza di modelli complessi o ibridi (emulazione, simulazione, FEM). Per quanto riguarda il monitoraggio si devono sviluppare innovativi sensori e sistemi di sensori (preferenzialmente di carattere fotonico) in grado di operare in condizioni estreme e intrinsecamente immuni da effetti di radiazione o interferenza. Andrà anche progettata e sviluppata la relativa circuiteria Opto-Elettronica per la manipolazione ed elaborazione delle grandezze monitorate, anche in applicazione di sistemi di allarme in sicurezza (DSS).

2.8 Sistemi idraulici per rivelatori liquidi di particelle

Il tubo di decadimento a vuoto è circondato da un guscio di liquido scintillante unitamente a sistemi di lettura della luce prodotta quando particelle cariche lo attraversano (fotomoltiplicatori). Una possibile soluzione per il liquido è il LAB (linear alkylbenzene, $C_6H_5C_nH_{2n+1}$) in cui viene diluita la sostanza fluorescente (diphenyl-oxazole) nella concentrazione di 2.0 g/l. Al liquido è associato un sistema di lettura della luce prodotta dal passaggio di particelle cariche: si tratta di alcune migliaia di fotomoltiplicatori al silicio la cui superficie sensibile è di circa $3 \times 3 \text{ mm}^2$. Il volume complessivo del liquido è stimato in circa

300 m³. Va progettato e realizzato un impianto per l'iniezione del liquido e il suo svuotamento, anche per interventi di manutenzione, con opportune vasche di contenimento a servizio.

2.9 Sistemi di controllo

Il funzionamento dell'apparato necessita della progettazione di sistemi per l'automazione e il controllo da remoto della movimentazione di diverse parti dell'apparato. In particolare, la regione del bersaglio dei protoni sarà ospitata in un bunker costruito da blocchi di ferro e cemento per schermare la radioattività. Durante il funzionamento dell'esperimento, questo luogo sarà il punto a più alta radioattività del CERN e pertanto sarà necessario implementare sistemi di automazione e controllo remoto per la gestione in remoto di tutto l'apparato. In particolare, il sistema di controllo dovrà essere in grado di inserire il bersaglio di molibdeno e tungsteno e di poterlo sostituire nel caso in cui gli stress meccanici lo deteriorino dopo anni di funzionamento. Va considerata che la dose di radiazioni a 10 cm di distanza dal bersaglio sarà di 400 MGy per anno. Pertanto dovranno essere sviluppate strategie avanzate di controllo a retroazione e teleoperazione per la manipolazione e la sostituzione del bersaglio che siano robuste e affidabili e che tengano conto degli aspetti di sicurezza legate all'ambiente altamente radioattivo in cui saranno implementate. [15].

2.10 Sistemi innovativi di microscopia automatica

L'uso di rivelatori a emulsione nucleare su larga scala richiede lo sviluppo di sistemi di microscopia automatica di nuova generazione in grado di far fronte alla scansione di ampie superfici in tempi comparabili a quelli di esposizione. Il bersaglio di emulsioni utilizzato nell'esperimento SHiP prevede, infatti, l'utilizzo di circa 7000 m² di emulsioni nucleari in cinque anni di presa dati. La digitalizzazione automatica dell'informazione tridimensionale contenuta nel film di emulsione nucleare viene effettuata muovendo il piano focale dell'obiettivo all'interno dello spessore del campione e catturando una serie di immagini tomografiche durante il movimento. I sistemi tradizionali si basano sulla tecnica dello Stop&Go, usata già nei primi microscopi automatici [16, 17, 18, 19], o del più recente Continuous Motion [20]. Sebbene quest'ultima abbia notevolmente ridotto i tempi morti necessari per passare da un campo di vista a quello adiacente, è necessario ulteriormente aumentare la velocità di analisi senza pregiudicare l'accuratezza (sub-micrometrica). Per superare tale limite è stato recentemente proposto un nuovo approccio basato sull'inclinazione del piano focale dell'obiettivo in modo da scansionare l'intero volume dell'emulsione senza fermarsi, eliminando così del tutto i tempi morti [21]. L'utilizzo di un approccio multi-camera, può consentire di raggiungere una velocità di scansione un po' maggiore (2000 cm²/h) rispetto alle tecniche attualmente utilizzate. Si dovranno sviluppare prototipi di questi strumenti.

2.11 Microscopia con risoluzione nanometrica

L'utilizzo di emulsioni nucleari con grani nanometrici per la ricerca di materia oscura richiede lo sviluppo di sistemi di microscopia innovativi, capaci di raggiungere una risoluzione che superi il limite di diffrazione ottico in modo da garantire elevate efficienza e purezza nella selezione del segnale che ha lunghezze che possono arrivare a poche centinaia di nanometri. Tale ambizioso obiettivo può essere raggiunto sfruttando l'effetto della *risonanza plasmonica*, che avviene quando grani metallici sono immersi in un mezzo dielettrico. L'ampiezza della risonanza della luce riflessa mostra una dipendenza dalla polarizzazione della luce incidente per grani di argento ellissoidali e può essere usata per desumere la presenza di due grani allineati posti a una distanza inferiore del limite ottico, di circa 200 nm. La lunghezza d'onda della luce riflessa dipende, inoltre, dalle dimensioni dei grani che hanno agito da centri diffusori. Questo effetto consente di ricavare informazioni sul verso della traccia dal momento che i grani presentano dimensioni maggiori al termine del loro percorso, causando lo spostamento della luce riflessa verso il rosso. Per sfruttare questi effetti abbiamo recentemente realizzato un brevetto, sviluppando un sistema ottico a *super-risoluzione*, dotati di un sistema ad epi-illuminazione, filtro polarizzatore e telecamera a colori, in grado di raggiungere un'accuratezza in posizione inferiore a 10 nm e abbassare la soglia di rivelazione di tracce indotte da rinculi nucleari al di sotto di 100 nm [22]. La calibrazione della risposta del microscopio a super-risoluzione viene effettuata con microscopi elettronici a trasmissione (TEM) e a scansione (SEM), in grado di fornire immagini di alta qualità sulla scala nanometrica e ideali per la visualizzazione e la caratterizzazione delle emulsioni nanometriche.

Queste tecniche di analisi nanometrica sono utili anche negli studi di micro e nano-fluidica, quando si rimpiazza la gelatina con un liquido organico, come ad esempio accade negli studi della dinamica di

nanoparticelle non-sferiche in un liquido.

2.12 Nuovi materiali per sviluppo di rivelatori innovativi

La scienza dei materiali è fondamentale nello sviluppo di nuovi rivelatori e nuovi sistemi di lettura. Si elencano di seguito solo alcuni esempi.

Uno dei problemi aperti è la sostituzione della gelatina delle emulsioni nucleari che funge da supporto per i cristalli di bromuro d'argento con materiali quali i polimeri sintetici. Lo scopo è controllare e ridurre il livello di Carbonio nella gelatina che ha un isotopo radioattivo (^{14}C).

La scelta di materiali per realizzare calorimetri elettromagnetici, ovvero rivelatori che misurano l'energia di elettroni, è un punto che necessita R&D. Attualmente si usa il piombo ma l'utilizzo di tungsteno porterebbe molti vantaggi dal punto di vista della fisica. I costi sono però spesso proibitivi. L'utilizzo di leghe di tungsteno ottenuti con tecniche di sinterizzazione può essere un compromesso ottimale perché questi materiali hanno sulla carta proprietà molto vicine al tungsteno puro sia in termini di densità che in termini di lunghezza di radiazione. Sono necessarie prove sperimentali dei vari materiali e la loro caratterizzazione.

Un altro problema aperto riguarda i rivelatori che utilizzano gas che non sono conformi al protocollo di Kyoto per la lotta all'inquinamento. Tra questi rivelatori ci sono le camere traccianti cosiddette RPC (Resistive Plate Chambers). In questi rivelatori si utilizzano attualmente miscele di $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$, iC_4H_{10} e SF_6 rispettivamente al 95.2%, 4.5% e 0.3%. Le componenti $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ e SF_6 sono state recentemente classificate come greenhouse gas a causa del loro potenziale di riscaldamento globale. Vanno individuate miscele più promettenti a partire da quelle basate sul tetrafluoropropene (HFO-1234ze). Si intende anche valutare l'effetto dell'uso di CO_2 o di NovacTM in queste miscele, come possibili alternative alle componenti iC_4H_{10} e SF_6 .

2.13 Tecniche computazionali per previsioni teoriche di nuova fisica

Per verificare la teoria fondamentale e apprezzarne eventuali deviazioni, occorre disporre di predizioni teoriche con un livello di accuratezza uguale o superiore a quello delle misure in programma. Lo scenario attuale vede gli esperimenti molto più avanti rispetto alle previsioni teoriche il cui collo di bottiglia è rappresentato dal calcolo perturbativo in teoria quantistica dei campi.

Il problema principale è la risoluzione di integrali la cui struttura matematica è ancora largamente sconosciuta. All'interno della comunità scientifica internazionale di riferimento sono allo studio diversi approcci che vanno dagli ambiti più formali (modular forms, intersection theory, elliptic polylogarithms, coaction) a quelli computazionali. In quest'ultimo ambito il problema è posto in termini della risoluzione algebrica di sistemi lineari con milioni di equazioni e la risoluzione di sistemi di equazioni alle derivate parziali.

Anche se il problema è ben posto dal punto di vista matematico, non si conosce ancora una maniera efficace di affrontare questo tipo di calcoli che sia adeguata a fornire risposte in tempo utile per l'analisi dei dati che saranno raccolti.

References

- [1] **ATLAS** Collaboration, G. Aad et al., *Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC*, *Phys. Lett.* **B716** (2012) 1–29, [arXiv:1207.7214].
- [2] **CMS** Collaboration, S. Chatrchyan et al., *Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC*, *Phys.Lett.* **B716** (2012) 30–61, [arXiv:1207.7235].
- [3] **SHiP** Collaboration, M. Anelli et al., *A facility to Search for Hidden Particles (SHiP) at the CERN SPS*, [arXiv:1504.04956].
- [4] S. Alekhin et al., *A facility to Search for Hidden Particles at the CERN SPS: the SHiP physics case*, *Rept. Prog. Phys.* **79** (2016), no. 12 124201, [arXiv:1504.04855].
- [5] **SHiP** Collaboration, C. Ahdida et al., *Sensitivity of the SHiP experiment to Heavy Neutral Leptons*, *JHEP* **04** (2019) 077, [arXiv:1811.00930].

- [6] P. deNiverville, C.-Y. Chen, M. Pospelov, and A. Ritz, *Light dark matter in neutrino beams: production modelling and scattering signatures at MiniBooNE, T2K and SHiP*, *Phys. Rev.* **D95** (2017), no. 3 035006, [arXiv:1609.01770].
- [7] D. Gorbunov, A. Makarov, and I. Timiryasov, *Decaying light particles in the SHiP experiment: Signal rate estimates for hidden photons*, *Phys. Rev.* **D91** (2015), no. 3 035027, [arXiv:1411.4007].
- [8] J. de Vries, H. K. Dreiner, and D. Schmeier, *R-Parity Violation and Light Neutralinos at SHiP and the LHC*, *Phys. Rev.* **D94** (2016), no. 3 035006, [arXiv:1511.07436].
- [9] Bondarenko, K. and Boyarsky, A. and Ovchinnikov, M. and Ruchayskiy, O., *Intensity frontier experiments in search for new physics: SHiP and MATHUSLA, to appear* (2018).
- [10] A. Ariga, T. Ariga, G. De Lellis, A. Ereditato, and K. Niwa, *Particle Physics Reference Library - Vol. 2. Detectors for Particles and Radiation, Chapter 3.0 Nuclear Emulsions*. 2018.
- [11] M. Natsume, K. Hoshino, M. Nakamura, T. Nakano, K. Niwa, O. Sato, T. Toshito, K. Kuwabara, and T. Tani, *Low-velocity ion tracks in fine grain emulsion*, *Nucl. Instrum. Meth.* **A575** (2007) 439–443.
- [12] T. Naka et al., *Fine grained nuclear emulsion for higher resolution tracking detector*, *Nucl. Instrum. Meth.* **A718** (2013) 519–521.
- [13] **SHiP** Collaboration, C. Ahdida et al., *SHiP Experiment - Progress Report*, Tech. Rep. CERN-SPSC-2019-010. SPSC-SR-248, CERN, Geneva, Jan, 2019.
- [14] **SHiP** Collaboration, *The Magnet of the Scattering and Neutrino Detector for the SHiP experiment at CERN*, [arXiv:1910.02952].
- [15] C. C. Ahdida, M. Calviani, B. Goddard, R. Jacobsson, and M. Lamont, *SPS Beam Dump Facility Comprehensive Design Study*, Tech. Rep. CERN-PBC-REPORT-2018-001, CERN, Geneva, December 2018.
- [16] N. Armenise et al., *High-speed particle tracking in nuclear emulsion by last-generation automatic microscopes*, *Nucl. Instrum. Meth.* **A551** (2005) 261–270.
- [17] L. Arrabito et al., *Hardware performance of a scanning system for high speed analysis of nuclear emulsions*, *Nucl. Instrum. Meth.* **A568** (2006) 578–587, [physics/0604043].
- [18] A. Alexandrov et al., *A new fast scanning system for the measurement of large angle tracks in nuclear emulsions*, *JINST* **10** (2015), no. 11 P11006.
- [19] A. Alexandrov et al., *A new generation scanning system for the high-speed analysis of nuclear emulsions*, *JINST* **11** (2016), no. 06 P06002.
- [20] A. Alexandrov et al., *The Continuous Motion Technique for a New Generation of Scanning Systems*, *Sci. Rep.* **7** (2017), no. 1 7310.
- [21] A. Alexandrov, G. De Lellis, and V. Tioukov, *A Novel Optical Scanning Technique with an Inclined Focusing Plane*, *Sci. Rep.* **9** (2019), no. 1 2870.
- [22] A. Umemoto, T. Naka, A. Alexandrov, and M. Yoshimoto, *Super-resolution plasmonic imaging microscopy for a submicron tracking emulsion detector*, *PTEP* **2019** (2019), no. 6 063H02, [arXiv:1812.09528].