

Borsa di Studio finanziata da fondi PNRR ex D.M. 118 del 02/03/2023

**Missione 4,
componente 1,
linea di
investimento 3.4**

Transizione digitale ed ambientale

Tematica di Ricerca

Sviluppo del workflow di simulazione e ricostruzione di un rivelatore di imaging per la fisica dei neutrini su architetture di calcolo eterogenee accelerate

English version

Development of simulation and reconstruction workflow on heterogeneous accelerated architectures for a neutrino physics imaging detector

Dottorato di Ricerca

ITALIANO: Fisica

ENGLISH: Physics

Tipologia di Impresa e mesi frequenza obbligatoria (se previsto)

–

Mesi frequenza obbligatoria all'estero

6 (CERN e/o Fermilab)

Obiettivi generali della ricerca

Il progetto di ricerca si propone di investigare applicazioni del calcolo eterogeneo ad alte prestazioni nell'ambito della fisica fondamentale, come *use case* per l'acquisizione delle competenze per lo sviluppo di metodi di calcolo di nuova concezione su architetture di calcolo eterogenee (CPU/GPU) accelerate.

Lo scopo è formare giovani ricercatori in grado portare tali competenze anche fuori dal mondo accademico per compiere una vera transizione digitale della società e del Paese. Con questo fine ultimo in mente, il caso studio su cui verranno sviluppati e testati tali metodi è l'ottimizzazione e la validazione del *workflow* di simulazione, ricostruzione e analisi di un grande apparato sperimentale (DUNE - *Deep Underground Neutrino Experiment*) per la fisica dei neutrini su architetture di calcolo HPC eterogenee.

La ricostruzione delle interazioni di neutrino nei rivelatori dell'esperimento DUNE, per esempio, richiede la combinazione di algoritmi di ricostruzione tradizionali basati su CPU con una tecnica innovativa di ricostruzione di immagini accelerata su GPU. Questa nuova tecnica consiste nell'*imaging* della luce di scintillazione tramite maschere ad apertura codificata e richiede l'utilizzo di algoritmi caratterizzati da un *working set* di dimensioni dell'ordine del TB. L'algoritmo si basa sull'esecuzione di un prodotto matriciale con $O(10^{10})$ elementi che può beneficiare dell'accelerazione su architetture di calcolo *GPU-based*.

Un'altra applicazione che avrebbe essenziali benefici di queste architetture miste basate su GPU è l'estrazione dei parametri della matrice di mescolamento dei neutrini nel modello standard; tale processo è estremamente complesso a causa delle centinaia di errori sistematici che influiscono sul processo stesso, dovuti essenzialmente a tre fonti principali: fascio, sezioni d'urto e rivelatori. Gli algoritmi di analisi tradizionali sviluppati per l'architettura di calcolo *CPU-based*, anche se *multi* e *many-core*, di fronte alla enorme quantità di dati da simulare e analizzare richiederebbe risorse di calcolo (CPU e memoria) estremamente dispendiose, sia dal punto di vista del tempo sia da quello energetico. L'adattamento e l'ottimizzazione di tali algoritmi per architetture accelerate basate su GPU permetterebbe una significativa diminuzione dei tempi di elaborazione, rendendo possibile lo studio dettagliato dell'impatto delle singole sorgenti di sistematico sui risultati finali.

English version

The research project aims to investigate applications of high-performance heterogeneous computing in the field of fundamental physics, as use cases for acquiring skills in developing novel computation methods on accelerated heterogeneous computing architectures (CPU/GPU). The purpose is to train young researchers capable of applying these skills outside the academic world to achieve a true digital transition of society and the country. With this ultimate goal in mind, the case study on which these methods will be developed and tested is the optimization and validation of the simulation, reconstruction, and analysis workflow of a large experimental apparatus (DUNE - Deep Underground Neutrino Experiment) for neutrino physics on heterogeneous HPC (High-Performance Computing) architectures.

The reconstruction of neutrino interactions in the detectors of the DUNE experiment, for example, requires the combination of traditional CPU-based reconstruction algorithms with an innovative GPU-accelerated image reconstruction technique. This new technique involves imaging scintillation light using coded aperture masks and requires the use of algorithms characterized by a working set size on the order of TB (terabytes). The algorithm is based on performing a matrix product with $O(10^{10})$ elements, which can benefit from acceleration on GPU-based computing architectures.

Another application that would greatly benefit from these mixed GPU-based architectures is the extraction of neutrino mixing matrix parameters in the Standard Model. This process is extremely complex due to the hundreds of systematic errors that affect the process itself, primarily originating from three main sources: the beam, cross-sections, and detectors. Traditional analysis algorithms developed for CPU-based computing architectures, even if multi- and many-core, would require plenty of resource-intensive computing (CPU and memory) to simulate and analyze the enormous amount of data, both in terms of time and energy. Adapting and optimizing such algorithms for GPU-accelerated architectures would significantly reduce processing times, enabling a detailed study of the impact of individual systematic sources on the final results.

Impatto in relazione a uno o più dei seguenti fattori: (i) miglioramento della sostenibilità ambientale; (ii) accelerazione di processi di trasformazione digitale; (iii) promozione dell'inclusione sociale

L'attività proposta avrà un impatto sostanziale sull'accelerazione dei processi di trasformazione digitale; da un lato gli algoritmi innovativi per l'*imaging* della luce di scintillazione tramite maschere ad apertura codificata potranno essere utilizzati in campi diversi quali la diagnostica per immagini (PET, per esempio), dall'altro l'implementazione di tali algoritmi, della simulazione e ricostruzione dei dati su nuove infrastrutture di calcolo eterogenee (CPU, GPU, ...) potranno dare un nuovo impulso alla digitalizzazione in moltissimi altri settori scientifici e industriali.

Inoltre, il progetto promuove l'innovazione nel campo del calcolo ad alte prestazioni per la gestione di ingenti moli di dati, sviluppando tecnologie che saranno rese disponibili, in maniera trasversale, ad altre discipline e al mondo aziendale. Queste nuove tecnologie, riducendo di molto i tempi di calcolo rispetto ai metodi tradizionali utilizzati correntemente, hanno anche una ricaduta di sostenibilità ambientale, visto che si riducono i consumi di energia necessari a far funzionare le infrastrutture di calcolo.

English version

The proposed activity will have a substantial impact on accelerating digital transformation processes. On one hand, the innovative algorithms for imaging scintillation light using coded aperture masks can be utilized in various fields such as medical imaging (e.g., PET). On the other hand, the implementation of these algorithms, as well as the simulation and reconstruction of data on new heterogeneous computing infrastructures (CPU, GPU, etc.), can provide a new impetus for digitization in numerous other scientific and industrial sectors.

Furthermore, the project promotes innovation in the field of high-performance computing for handling large amounts of data, developing technologies that will be made available, in a cross-cutting manner, to other disciplines and the business world. These new technologies, by significantly reducing computation times



Funded by the
European Union
NextGenerationEU



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Università
degli Studi
di Ferrara

compared to currently used traditional methods, also have a positive environmental impact as they decrease the energy consumption required to operate computing infrastructures.