



PIANO
TRIENNALE
DELLE ATTIVITÀ
2025- 2027

Museo Storico della Fisica e
Centro Studi e Ricerche Enrico
Fermi (CREF)



CENTRO RICERCHE
ENRICO FERMI 

Approvato con delibera del C.d.A. n. 48/2025 del 14/07/2025

INDICE

INDICE	2
EXECUTIVE SUMMARY	5
DESCRIZIONE DELL'ENTE	10
MISSIONE e STRATEGIE di SVILUPPO	11
ADERENZA verso il PNR 2021-2027	12
POSIZIONAMENTO dell'ENTE	12
<i>Affinità con altri Enti mono- o multi-tematici</i>	12
<i>Produzione scientifica e suo andamento negli ultimi tre anni</i>	13
COLLABORAZIONI NAZIONALI E INTERNAZIONALI	18
<i>Accordi quadro e convenzioni</i>	18
<i>Collaborazioni nazionali</i>	19
<i>Collaborazioni internazionali</i>	19
PERSONALE RICERCATORE, TECNOLOGO, TECNICO, AMMINISTRATIVO	21
1 - <i>Personale CREF al 31 dicembre 2024</i>	21
2 - <i>Altre tipologie di personale presenti al 31 dicembre 2024</i>	21
INFRASTRUTTURE, LABORATORI di RICERCA, STRUMENTAZIONE	22
1) <i>Laboratorio Beni Culturali</i>	22
2) <i>Laboratorio di Fotonica Computazionale</i>	23
3) <i>Laboratorio Extreme Energy Events</i>	24
4) <i>Laboratorio Sony Csl-Rome</i>	25
5) <i>Laboratorio Neuroimmagini</i>	26
6) <i>Laboratorio Radio e Adro Terapia</i>	27
ATTIVITÀ SCIENTIFICA E PROGETTUALE	28
A Breve descrizione delle principali linee di ricerca e delle loro finalità	28
A.1 <i>Complessità</i>	28
A.2 <i>Fisica Applicata</i>	28
A.3 <i>Fisica Fondamentale</i>	29
A.4 <i>Museo Enrico Fermi</i>	30
B. Risultati ottenuti e obiettivi futuri	31
B.1. <i>Complessità</i>	31
B.2 <i>Fisica Applicata</i>	33
B.3. <i>Fisica fondamentale</i>	35
B.4. <i>Museo Enrico Fermi</i>	37

C. - Elenco dei principali progetti di ricerca previsti per il triennio, con breve descrizione degli obiettivi e dei risultati attesi	39
<i>C.1 Fisica Statistica e Sistemi Complessi nelle Scienze Naturali.....</i>	<i>39</i>
<i>C.2. Complessità per lo sviluppo economico e tecnologico.....</i>	<i>42</i>
<i>C.3 L'impatto dell'intelligenza artificiale sul tessuto socioeconomico e l'innovazione tecnologica</i>	<i>46</i>
<i>C.4 Innovazione e Scenari Predittivi per la Sostenibilità.....</i>	<i>49</i>
<i>C.5 Neuroscienze e neuroimaging quantitativo (NQI).....</i>	<i>53</i>
<i>C.6 Radio e Adro Terapia.....</i>	<i>57</i>
<i>C.7 Fisica per i Beni Culturali.....</i>	<i>61</i>
<i>C.8 Tecnologie fotoniche e Intelligenza Artificiale</i>	<i>64</i>
<i>C.9 Progetto Extreme Energy Events</i>	<i>68</i>
<i>C.10 Cinematica e dinamica delle galassie.....</i>	<i>73</i>
<i>C.11 Nuclear Astrophysics with innovative sources</i>	<i>75</i>
<i>C.12 Problemi Aperti in Meccanica Quantistica.....</i>	<i>78</i>
<i>C.13 Il Regio Istituto di Fisica a via Panisperna tra storia e ricerca. Protagonisti, metodi, scoperte, strumenti scientifici</i>	<i>81</i>
<i>C.14 Sulle orme dei Ragazzi di via Panisperna:.....</i>	<i>84</i>
<i>C.15 La Comunicazione del CREF e del Museo Enrico Fermi</i>	<i>86</i>
D. Tabelle riassuntive: i) budget; ii) fonti di finanziamento; iii) ricercatori coinvolti (%).	89
<i>i) Budget dedicato alla ricerca e al museo.....</i>	<i>89</i>
<i>ii) Progetti in corso e fonti di finanziamento</i>	<i>90</i>
<i>iii) Grafici ricercatori coinvolti (%)......</i>	<i>91</i>
ATTIVITÀ DI TERZA MISSIONE / IMPATTO SOCIALE	92
<i>Azioni di supporto all'alta formazione</i>	<i>92</i>
<i>Attività di public engagement.....</i>	<i>94</i>
<i>Indicazione del budget e del personale (%) coinvolto nelle varie attività</i>	<i>95</i>
<i>Servizi conto-terzi: indicazione ricavi ottenuti e personale impegnato (%), previsione per il triennio.</i>	<i>96</i>
<i>Partecipazioni a spin-off, società e fondazioni.</i>	<i>96</i>
<i>Brevetti depositati: titolo, anno pubblicazione, entrate, etc.....</i>	<i>96</i>
<i>Eventi Terza Missione.....</i>	<i>97</i>
<i>Eventi Istituzionali.....</i>	<i>98</i>
AZIONI PER GENDER EQUALITY.....	99
<i>Gender Equality Plan (GEP).....</i>	<i>99</i>
RISORSE.....	100
<i>Ricavi e proventi per l'attività istituzionale.....</i>	<i>100</i>
<i>Principali voci del bilancio preventivo CREF 2025-2027</i>	<i>101</i>
FABBISOGNO DEL PERSONALE E DOTAZIONE ORGANICA.....	105

<i>Personale dipendente in servizio al 31 dicembre 2024</i>	105
<i>Calcolo del punto organico</i>	106
<i>Verifica del limite di sostenibilità</i>	106
<i>Formulazione ipotesi organico 2025-2027</i>	107
MONITORAGGIO E AUTOVALUTAZIONE	110
<i>Descrizione dei meccanismi per il monitoraggio interno dell'avanzamento delle attività e dei progetti</i>	110
<i>Autovalutazione dell'impatto delle attività di ricerca a livello scientifico, economico e sociale</i>	110

EXECUTIVE SUMMARY

Il **Museo storico della fisica e Centro studi e ricerche Enrico Fermi** (CREF) ha sede nella **palazzina di via Panisperna** che ha ospitato lo storico Regio Istituto di Fisica dagli anni '80 del 1800 alla fine degli anni '30 del 1900. In questo luogo, tra la fine degli anni '20 e la metà degli anni '30, fu attivo il **celebre gruppo di giovani fisici capitanato da Enrico Fermi** e composto, tra gli altri, da Emilio Segrè, Edoardo Amaldi, Franco Rasetti, Bruno Pontecorvo. In particolare, nel biennio 1934-35 venne qui portata avanti un'intensa attività di ricerca all'avanguardia nella fisica fondamentale, tra cui i primi **esperimenti sulla radioattività indotta da neutroni**, che giocheranno un ruolo centrale nel futuro sviluppo dell'energia nucleare. In questa palazzina è stata quindi scritta non solo la storia della fisica italiana, ma quella di tutto il Novecento. Per questa sua eccezionale importanza, nel 1999, il Parlamento ha votato all'unanimità la legge che ha costituito un **nuovo Ente di ricerca**: il "Museo storico della fisica e Centro studi e ricerche Enrico Fermi", vigilato dal Ministero dell'università e ricerca, con sede istituzionale proprio nella Palazzina di via Panisperna.

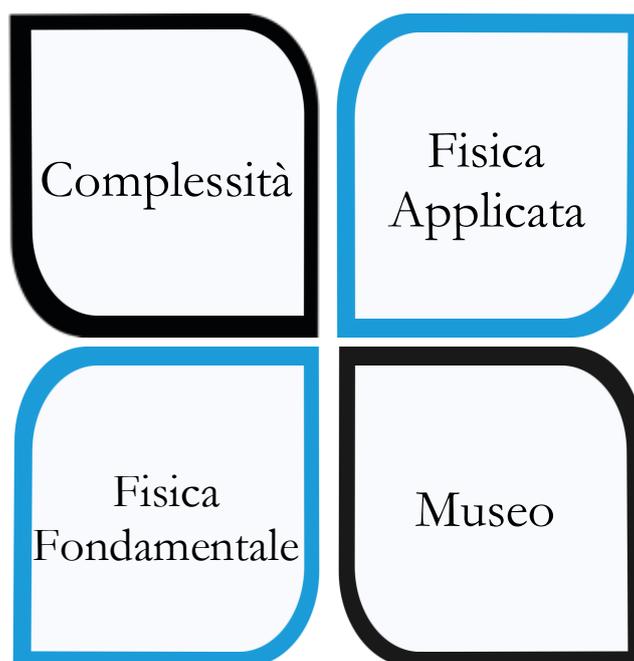
Il parziale restauro della palazzina di via Panisperna, concluso nel novembre 2019, ha reso questo luogo il centro strategico dello sviluppo dell'Ente.

Il Museo storico della fisica e Centro studi e ricerche Enrico Fermi rappresenta, quindi, un **unicum nel panorama degli Enti di Ricerca italiani**. Punto cardine della sua missione è infatti associare ad attività di punta nella ricerca scientifica e tecnologica in Fisica con una forte vocazione multidisciplinare, la promozione e la diffusione delle conoscenze sullo sviluppo storico della Fisica italiana con particolare riguardo al ruolo di Enrico Fermi e del suo gruppo di ricerca. In questa prospettiva, dunque, **il Museo è luogo di conservazione ed esposizione**, mentre **il Centro di Ricerca è luogo di produzione di conoscenza**. Entrambi hanno però in comune l'attenzione alla figura di **Enrico Fermi** e alla sua **influenza sulla fisica moderna**.

Dal 1999 il CREF, in attesa che la sede storica completasse la fase di ristrutturazione terminata alla fine del 2019, ha efficacemente e con costanza portato avanti, **puntando sulla collaborazione con altri Enti e Università**, vari progetti delocalizzati presso centri o laboratori di ricerca nazionali e internazionali, nonché presso diversi luoghi espositivi e numerosi istituti scolastici per quanto attiene alle attività legate al Museo e alla diffusione della cultura scientifica. Dal 2019 con la consegna della palazzina, parzialmente restaurata, è iniziata una nuova era, in quanto si sono create le condizioni per meglio perseguire gli obiettivi prioritari dell'Ente: sfruttare le potenzialità di un contesto storico e affascinante per rafforzare e fare crescere le ricerche già avviate, aprire nuove linee di ricerca, diffondere la cultura scientifica attraverso la valorizzazione dell'eredità scientifica di Enrico Fermi. In questo modo, la visibilità del CREF è cresciuta ulteriormente in ambito internazionale, in virtù del fatto che nel suo complesso l'ente conduce un'attività di ricerca originale, di avanguardia e sempre in continuo sviluppo, nel campo della fisica con una forte connotazione interdisciplinare. Grazie alla sua dimensione agile il CREF rappresenta una grande opportunità per la comunità scientifica italiana e internazionale.

In questo contesto, il CREF ha intrapreso negli ultimi anni un intenso lavoro di sviluppo di **linee di ricerca** strategiche ad alto impatto scientifico che sono organizzate in **4 filoni**.

I **quattro filoni: Complessità - Fisica Applicata - Fisica Fondamentale - Museo**, in cui si inseriscono le nostre attività di ricerca e museali, hanno obiettivi ben definiti e di alto livello e hanno come comune denominatore la multidisciplinarietà e un grosso impegno nella diffusione della cultura. Il Piano Triennale delle attività 2025-2027 è stato in questo senso rinnovato per rispecchiare le quattro tematiche principali nelle quali il Centro Fermi esprime oggi tutte le sue potenzialità. Un **elemento comune** a diverse attività condotte nelle linee di ricerca dell'Ente è lo sviluppo innovativo di tecniche di **Intelligenza Artificiale** che, portata avanti principalmente nel filone dei Sistemi Complessi, vengono impiegate e inserite tra gli strumenti di indagine degli altri tre filoni di ricerca. In tutti e quattro settori di ricerca l'attività del CREF si colloca ai vertici internazionali sia per quello che riguarda la produzione scientifica, sia per la capacità di attrarre dall'esterno fondi per la ricerca, sia per l'attrazione che riscuote tra i giovani ricercatori, sia infine per la grande rete di interazioni e collaborazioni con altre istituzioni scientifiche.



Nei prossimi anni è intenzione dell'Ente rafforzare queste attività rendendo sempre più competitive le diverse linee di ricerca.

Un **obiettivo** da realizzare in tempi molto rapidi è il **restauro** di alcuni locali della Palazzina di Via Panisperna, attualmente ancora allo stato grezzo, per dedicare nuovi uffici e laboratori al **potenziamento delle attività di ricerca dell'Ente**.

Il CREF è un ente molto dinamico che ha conseguito negli anni ottimi risultati sia sul piano scientifico sia rispetto alla diffusione della cultura. L'intento è di rafforzare questo percorso, valorizzando sia la ricerca multidisciplinare di punta sia la ricerca storica, la prima finalizzata a migliorare la nostra vita e la seconda fonte di ispirazione e di appartenenza.

Passiamo qui in rassegna i **quattro filoni principali delle attività di ricerca e museali del CREF**.

L'approccio scientifico tradizionale, pur ricco di risultati che hanno arricchito enormemente la nostra conoscenza dell'universo, dei sistemi biologici e sociali e portato a innovazioni tecnologiche impressionanti, sembra non rappresentare uno strumento efficace per descrivere e spiegare le **complessità** di svariati sistemi. I grandi sconvolgimenti sociali a cui abbiamo assistito su scala locale e globale negli ultimi due decenni non possono essere pienamente descritti e spiegati attraverso un approccio di tipo riduzionista tipico della fisica tradizionale. In effetti, tutti questi fenomeni possono essere descritti in termini di **processi dinamici** che si propagano con **caratteristiche multiscala**, schematizzabili ad esempio come **reti complesse**. Parallelamente, i recenti progressi nella comprensione della funzione e dell'organizzazione dei sistemi biologici hanno reso evidente che molti processi a livello di cellule, organi, organismi e popolazioni possono essere modellati come **sistemi complessi**. In campo sociale ed economico simili aspetti si ritrovano ad esempio nelle **dinamiche di innovazione tecnologica** e delle relative ricadute sia sulla **competitività economica** che sull'**organizzazione sociale**, con connessioni di tipo *small world* come quelle generate dai moderni **sistemi di mobilità e trasporto**.

Malgrado il suo originale impianto riduzionista, la fisica, grazie all'enorme bagaglio di **tecniche analitiche e numeriche di modellizzazione** di sistemi complessi e la sua capacità di adattarsi e integrare nuovi concetti, negli ultimi decenni ha comunque dimostrato di essere in grado di affrontare queste nuove sfide. In particolare, la moderna **fisica statistica** e la recente **teoria dei sistemi complessi**, unite alle sempre crescenti capacità di **calcolo numerico** e alla crescita esponenziale delle performance degli **algoritmi di Intelligenza Artificiale**, offrono strumenti fondamentali per l'analisi di grandi quantità di dati relativi a sistemi caratterizzati da un alto livello di complessità ed eterogeneità, e alla loro modellizzazione teorica.

In quest'ambito l'attività del CREF si articola in quattro particolari ambiti di ricerca: **Complessità per lo sviluppo economico e tecnologico**, **Fisica statistica e sistemi complessi nelle scienze naturali**,

Impatto dell'intelligenza artificiale sul tessuto socioeconomico e l'innovazione tecnologica e un laboratorio congiunto con la SONY CSL sul tema “**Innovazione e scenari predittivi per la Sostenibilità**”.

La **Fisica Applicata** affonda le sue radici nell'origine stessa della scienza moderna e trasla in innovazione tecnologica le scoperte della Fisica Fondamentale, gettando un ponte tra l'investigazione delle leggi della natura e a loro concreta applicazione pratica. Si tratta di un'area fortemente interdisciplinare che abbraccia settori di grande rilevanza, dalla fisica medica alla conservazione dei beni culturali, dalle scienze dei materiali alle scienze ambientali. La Fisica Applicata svolge in tali settori un ruolo cruciale e favorisce una fruttuosa contaminazione tra diversi approcci metodologici.

La macroarea del CREF dedicata alla Fisica Applicata si focalizza su settori quali la **Fisica Medica** e la **Fisica per i Beni Culturali**.

Lo studio della **Fisica Medica**, in particolare, è condotto in due ambiti diversi, che però convergono sulle **esigenze** generate da una **società che invecchia**. La linea di ricerca su **Radio e Adro Terapia** si inserisce in tale contesto ed è dedicata all'ottimizzazione di **tecniche di imaging nucleare** e allo **sviluppo di terapie innovative**. Nel campo dell'imaging, le ricerche stanno contribuendo allo sviluppo di sistemi di rilevazione **SPECT** (Tomografia a Emissione di Singolo Fotone) caratterizzati da buone prestazioni e basso costo, in modo da permettere l'uso su scala sempre più vasta. In ambito terapeutico, è stato possibile realizzare un nuovo rivelatore, che consente di stimare con più precisione la conformazione nel tempo e nello spazio della **dose di radiazione** rilasciata al paziente per la cura dei tumori, un parametro fondamentale per **minimizzare i danni** al tessuto sano. La linea di ricerca su **Neuroscienze e Neuroimaging Quantitativo** unisce l'aspetto dello sviluppo tecnologico, in questo caso focalizzato su **nuove tecniche MRI** (Imaging con Risonanza Magnetica) per lo **studio della funzione cerebrale**, e la caratterizzazione dell'associazione tra l'elaborazione dell'informazione a livello corticale, il consumo di energia che la sostiene, e il substrato microstrutturale che ne permette la trasmissione. La ricerca affronta in particolare la **dinamica delle fluttuazioni cerebrali**, spontanee o indotte dall'interazione con l'ambiente. A tal fine, le attività sono in parte dedicate alla caratterizzazione del segnale MRI funzionale e allo sviluppo di metodiche per depurarlo da componenti indesiderate (per esempio fluttuazioni di origine cardiaca anziché neuronale).

La linea di ricerca su **Fisica per i Beni Culturali** al CREF è dedicata allo sviluppo e applicazione di **metodiche analitiche** per lo **studio di materiali di rilevanza storico-artistica**, ed ha l'obiettivo di mettere a punto tecnologie che consentano una migliore comprensione di struttura, composizione, processi di produzione e stato di conservazione dei beni culturali, sfruttando approcci analitici e computazionali. La conoscenza approfondita dei materiali costituenti e dei fenomeni di degrado dei materiali di interesse storico-artistico richiede un approccio interdisciplinare che **integri fisica, chimica e scienze dei materiali**. Le attività si estendono allo studio di **beni librari** in termini di materie prime ed efficacia di prodotti per la conservazione, alla caratterizzazione di **manufatti metallici e ceramici** e dei relativi metodi di produzione, allo studio di **reperti organici** (ossa, legni antichi, semi ritrovati in contesti archeologici, residui). La **Fisica Applicata** contribuisce in questo campo tramite lo sviluppo e l'utilizzo di **tecniche di indagine** come, ad esempio, la **fluorescenza a raggi X** (XRF) o la **spettroscopia infrarossa** (IR).

La macroarea di **Fisica Fondamentale** esplora diversi ambiti innovativi, con l'obiettivo di approfondire la nostra comprensione dell'universo e superare i limiti delle attuali tecnologie.

Uno degli assi portanti è lo **sviluppo di tecnologie fotoniche e intelligenza artificiale**, con la realizzazione di **sistemi di calcolo ottico** avanzati che sfruttano l'interazione della luce laser con mezzi fotonici complessi. Questi dispositivi, basati su **reti neurali ibride elettronico-fotoniche**, promettono di rivoluzionare il calcolo ottimizzando la risoluzione di problemi complessi. Il **machine learning** viene inoltre impiegato per affinare le tecniche ottiche di caratterizzazione dei materiali, mentre modelli matematici avanzati consentono di simulare sistemi combinatoriali, esplorando sia la fisica classica che quantistica. Parallelamente, il **Progetto Extreme Energy Events** (EEE) porta la ricerca di punta sui **raggi cosmici** direttamente nelle Scuole Superiori, coinvolgendo studenti e docenti nell'installazione e gestione di telescopi capaci di tracciare i muoni cosmici su una vastissima area. Questa iniziativa non solo monitora il **flusso di raggi cosmici** a livello nazionale, ma con la missione **PolarquEEEst** ha esteso le osservazioni a **latitudini estreme**, come le Isole Svalbard, per approfondire lo studio di questi fenomeni. Nel campo della **cinematica e dinamica delle galassie**, si indaga la distribuzione della **materia oscura** attraverso l'analisi dei campi di velocità galattici. Un particolare focus è rivolto al modello del disco di materia oscura,

che sfida l'ipotesi tradizionale di un alone sferico, offrendo una spiegazione più coerente con le curve di rotazione osservate nella Via Lattea e in altre galassie a spirale. L'**astrofisica nucleare** con sorgenti innovative si concentra invece sulla **nucleosintesi**, studiando i processi che hanno portato alla formazione degli elementi chimici, dal Big Bang alle reazioni stellari. In particolare, si estendono le misurazioni a condizioni di **plasma ionizzato**, simulando con maggiore fedeltà l'ambiente in cui questi processi avvengono in natura. Infine, i **problemi aperti in meccanica quantistica** rappresentano una sfida fondamentale nella ricerca teorica e sperimentale. Attraverso l'uso di rivelatori avanzati e tecniche di machine learning, si indagano questioni come la **connessione spin-statistica** e il **collasso spontaneo della funzione d'onda**, cercando segnali di **nuova fisica** che possano contribuire alla formulazione di una **teoria unificata della gravità quantistica**. Queste linee di ricerca affrontano temi diversi ma accumulati dall'obiettivo di andare oltre i confini della conoscenza, combinando sperimentazione e teoria per rispondere ad alcune delle domande più profonde sulla natura della realtà. Il progresso in questi ambiti richiede quindi un approccio interdisciplinare, capace di mettere insieme **modelli teorici avanzati**, **sperimentazioni sofisticatissime** e l'uso di **intelligenza artificiale** a supporto dell'analisi e dell'interpretazione dei dati.

Il **Museo Enrico Fermi**, situato al pianterreno della palazzina di via Panisperna su una superficie di circa 400 metri quadri, nasce dalla volontà di preservare e diffondere la **memoria storica di Enrico Fermi** e dei suoi collaboratori e, in generale delle **vicende storiche e scientifiche** che furono protagoniste in un periodo in cui la **fisica italiana** fu **al centro del panorama della scienza**. È stato allestito in maniera permanente alla fine del 2019 e dal 2022, dopo la pandemia da Covid-19, il Museo ha riaperto i propri spazi al pubblico.

Il Museo vuole essere un ponte fra passato e futuro: un luogo dove la narrazione dell'eredità scientifica di Enrico Fermi si aggancia al presente e si rivolge direttamente alle nuove generazioni. Le presenze, in continua crescita, hanno raggiunto nel 2024 oltre **4.600 visitatori**. Di questi, il 71% sono **studenti delle scuole secondarie**. Si tengono anche attività specifiche quali PCTO e visite ai laboratori dell'ente che vengono utilizzati attivamente in percorsi di apprendimento stimolanti, proseguendo e approfondendo la visita museale. A partire dal mese di marzo 2023 sono state organizzate alcune visite pilota per le scuole secondarie di primo grado (fascia di età degli studenti 11-13 anni) che hanno riscosso un grande successo. Questo ha comportato la creazione di un target di visita differente, adatta all'età e alla preparazione dei giovani studenti, anche attraverso l'utilizzo di materiali didattici e giochi educativi realizzati appositamente per l'occasione. Il Museo è aperto altresì a soggetti collettivi e organizzazioni scientifiche mentre per la cittadinanza si organizzano Open-Day mensili pubblicizzati tramite il sito istituzionale del Museo e tramite i social media dell'Ente. All'interno del Museo vengono presentate le tappe significative della vita di Fermi e delle sue scoperte, combinando in maniera innovativa oggetti e pannelli tradizionali con moderne tecnologie multimediali. Specificamente, nel dicembre 2024 è stata inaugurata una **nuova installazione, 1934 - Annus mirabilis**, dedicata agli esperimenti del 1934 sulla **radioattività indotta da neutroni** che portarono al Nobel del 1938. Uno degli obiettivi del Museo è infatti **divulgare la scienza** in maniera diversificata per avvicinare anche il pubblico di non specialisti in maniera semplice e accattivante. Per questo il Museo partecipa, attraverso il **coinvolgimento del personale di ricerca**, ad attività di divulgazione come la Notte europea dei ricercatori, a festival della scienza - Genova e Roma - con laboratori, exhibit ed attività pensate anche per i più piccoli. Vengono altresì organizzate conferenze, presentazioni di libri e dibattiti sulla storia della fisica. Il Museo si propone quale punto di riferimento e hub di informazioni per **produzioni televisive e radiofoniche** su argomenti legati alla storia di via Panisperna. Il Museo ha avviato un processo di inserimento sempre più efficace all'interno di un network per la **diffusione della museologia scientifica** in Italia e all'estero creando collegamenti con le Istituzioni e gli operatori interessati, attraverso uno scambio di opinioni e di notizie. Le **collaborazioni** in atto sono con l'Associazione Musei Scientifici Italiani (AMSI), il Museo Curie di Parigi, il Museo di Fisica di Sapienza di Roma e il Museo Egizio di Torino. Centrale per la vita e valorizzazione del Museo è il ruolo della **comunicazione**. Attraverso una grafica moderna, l'uso di foto d'archivio e la definizione di uno stile verbale coerente, è stato progettato e realizzato un sito web dedicato al Museo, in grado di guidare i visitatori in tutto il percorso della visita, dalla prenotazione all'approfondimento dei contenuti. Dal 2023 funziona anche una newsletter mensile. Il lavoro di concerto tra Museo, personale di ricerca e comunicazione, ha permesso di creare una identità forte come punto di

riferimento per la diffusione della storia legata a Fermi e al gruppo di via Panisperna, ma anche come luogo di scambio e di dialogo, in un confronto continuo tra storia, ricerca e divulgazione della scienza.

Il CREF persegue, dunque, la missione di promuovere e sviluppare la ricerca scientifica, con obiettivi di eccellenza finalizzati all'ampliamento delle conoscenze e a originali applicazioni interdisciplinari, e favorendo un'ampia e mirata disseminazione della cultura scientifica. La **linea strategica per il prossimo triennio** punta a **potenziare le attività attuali** che sono portate avanti da ricercatori molto motivati che con notevoli sforzi ma anche con grande successo riescono ad **attrarre fondi** da progetti premiali nazionali ed europei. Ammonta a più di 1,6 M€ la raccolta complessiva degli ultimi due anni. Sono stati richiesti al Ministero fondi infrastrutturali per l'**acquisizione di nuove attrezzature** per i laboratori per la **ricerca in astrofisica nucleare**, per lo **sviluppo di rivelatori di particelle** e per la realizzazione di **scanner tomografici per il patrimonio culturale**. Il Museo continuerà ad arricchirsi di materiale e di attività con un grande impulso alla cooperazione con altri musei e con le società scientifiche nazionali e internazionali. Il CREF conta **23 unità di personale ricercatore e tecnologo**, circa **100 associati alle ricerche**, **12 dottorandi** finanziati dal CREF, e una ventina tra **assegnisti, borsisti e altri collaboratori**.

La **produzione scientifica** dell'Ente è estremamente ricca e variegata e conta oltre 330 pubblicazioni, su riviste indicizzate o su volume, nel triennio 2022-2024 e nel I trimestre 2025, con una regolare crescita nel corso degli anni e con oltre 10000 citazioni. Nel triennio in esame sono stati prodotti anche due brevetti. A questa produzione si affianca una copiosa attività di organizzazione di **conferenze, workshops e convegni** e un numero elevatissimo di **presentazioni a conferenze** (oltre 300) delle quali oltre la metà **su invito**. Circa una ventina sono gli **accordi quadro, le convenzioni** e i **MOU** con prestigiose istituzioni nazionali e internazionali, oltre 50 collaborazioni nazionali e più di 40 le collaborazioni internazionali stabilite dai ricercatori dell'Ente. Il CREF si configura come un dinamico **punto di connessione tra l'eredità scientifica del passato e le sfide del futuro**, ponendosi l'obiettivo di rendere la scienza accessibile e rilevante per le nuove generazioni. E tra gli obiettivi dell'Ente **Rendere accessibili i risultati della ricerca** attraverso il sito web e i canali sociali, in particolare LinkedIn tramite articoli divulgativi sulle pubblicazioni dell'ente, promuovere il **Contatto diretto con il lavoro e la metodologia di ricerca** attraverso l'**interazione diretta con i ricercatori e le visite ai laboratori** come parte integrante del percorso di visita Museale per le scuole, incentivare i **Percorsi di competenze trasversali e orientamento (PCTO)** e molte altre attività di **public engagement** insieme alle numerose attività di **terza missione**. Il CREF adotta un sistema strutturato di **monitoraggio interno**, organizzato su base annuale, per garantire il corretto avanzamento delle attività e dei progetti strutturato in quattro aree: **qualità della produzione scientifica, capacità di attrarre finanziamenti competitivi, sviluppo del capitale umano e contributo alla società**. Il Direttore Scientifico conduce **audit interni** periodici, per verificare lo stato di avanzamento delle ricerche, valutare la qualità scientifica dei risultati e identificare eventuali criticità, proponendo azioni correttive quando necessario. Su base annuale, viene effettuata una **verifica complessiva degli obiettivi**, analizzando i risultati ottenuti rispetto alle milestone prefissate, anche in base al report del Comitato Interno di Valutazione.

Il percorso intrapreso dal CREF attraverso la promozione ed esecuzione di linee di ricerca originali e di impatto e delle attività museali è destinato a essere duraturo e a portare risultati di sempre crescente interesse. Sarà quindi importante in futuro seguire questo percorso.

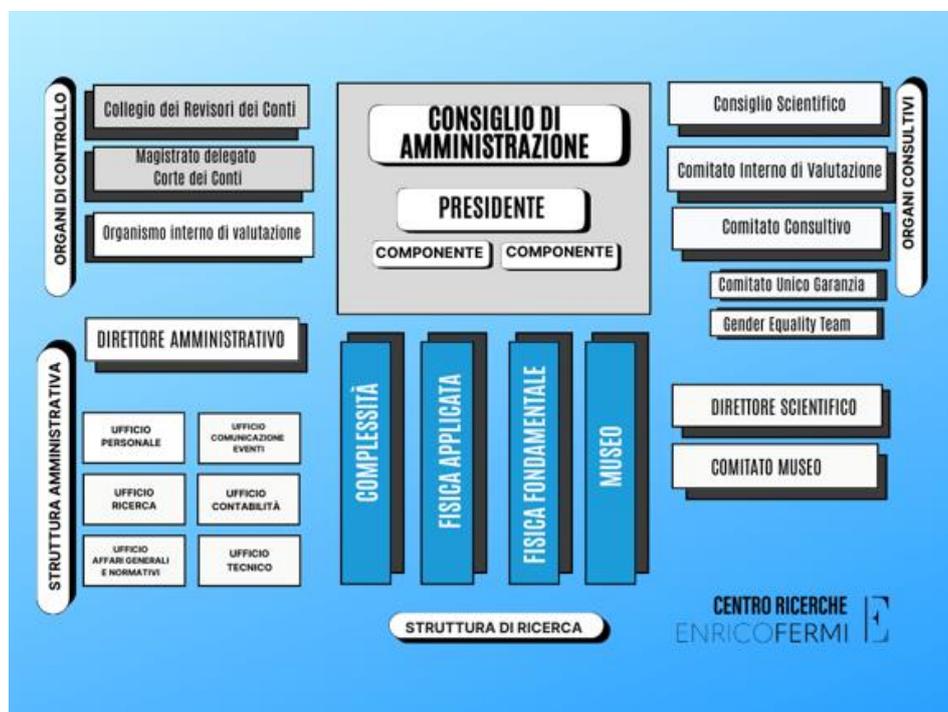
DESCRIZIONE DELL'ENTE

Il CREF persegue la missione di promuovere e sviluppare la ricerca scientifica, con obiettivi di eccellenza finalizzati all'ampliamento delle conoscenze e a originali applicazioni interdisciplinari, e favorendo un'ampia e mirata disseminazione della cultura scientifica. Il filo conduttore e ispiratore delle attività del CREF è quello di valorizzare e disseminare l'eredità scientifica di Enrico Fermi.

La sua attività riguarda quattro filoni di ricerca, la Complessità, la Fisica Applicata, la Fisica Fondamentale e la ricerca storica legata al Museo.

Il CREF, seguendo l'insegnamento di Enrico Fermi, è impegnato concretamente nella ricerca nell'ambito dei settori più avanzati della fisica, tenendo presente il valore dell'interdisciplinarietà nella realizzazione di progetti in cui la fisica interagisce con altre discipline, e nella disseminazione della cultura scientifica ad ampio raggio, in particolare presso i giovani. Gli scopi che caratterizzano l'unicità del CREF sono: promuovere, programmare e realizzare studi e ricerche nel campo della fisica facilitando la collaborazione scientifica fra ricercatori italiani e stranieri; promuovere e realizzare progetti interdisciplinari; promuovere la formazione e la crescita professionale di ricercatori di grande talento, su temi scientifici d'avanguardia, con particolare riferimento alle problematiche interdisciplinari; portare la scienza nel cuore dei giovani, coinvolgendo studenti e docenti delle istituzioni scolastiche primarie e secondarie; consentire ai ricercatori che operano presso il CREF di utilizzare la più avanzata strumentazione messa a disposizione dai soggetti convenzionati; promuovere e diffondere la conoscenza della storia della fisica, con particolare riguardo all'attività di Enrico Fermi e del suo gruppo di ricerca; tutelare la memoria storica del Complesso Monumentale di via Panisperna; promuovere la diffusione della cultura scientifica attraverso attività museali comprendenti anche l'organizzazione di mostre scientifiche temporanee o permanenti.

Gli organi di governo e la struttura organizzativa dell'ente sono rappresentati in forma grafica nella figura seguente.



Sono Organi del CREF: il Presidente; il Consiglio di Amministrazione; il Consiglio Scientifico; il Collegio dei Revisori dei Conti.

Il Presidente ha la rappresentanza legale del CREF, ne assicura l'unità dell'indirizzo scientifico, sovrintende alle attività ed è responsabile delle relazioni nazionali e internazionali.

Il Consiglio di Amministrazione ha competenze di indirizzo e di programmazione e approva tutti gli atti di carattere generale e fondamentale per l'organizzazione, funzionamento, amministrazione e gestione del CREF.

Il Direttore amministrativo è responsabile, in qualità di vertice, della gestione della struttura amministrativa del CREF e ne dirige, coordina e controlla le attività.

Il Direttore scientifico delle attività museali e di ricerca sottopone al Consiglio di Amministrazione gli elementi del Piano Triennale e provvede al coordinamento e valorizzazione dei progetti interdisciplinari del CREF e alla loro attuazione.

Il Consiglio Scientifico ha funzioni consultive in materia di pianificazione e visione strategica ed è composto da scienziati e personalità di fama internazionale.

Il Comitato Interno di Valutazione è anche composto da scienziati e personalità di fama internazionale.

Sia il Consiglio Scientifico sia il Comitato di Valutazione si riuniscono periodicamente su base annuale, durante le riunioni vengono presentate tutte le Attività dell'Ente, coinvolgendo nelle presentazioni anche i giovani ricercatori e redigono in forma scritta parere e suggerimenti sulle varie Attività.

Il Comitato consultivo interno è composto da 2 dirigenti di ricerca o tecnologi, 2 primi ricercatori o tecnologi, 2 ricercatori o tecnologi eletti dal personale di ricerca e tecnologo.

Per quanto riguarda il personale che comprende ricercatori e tecnologi, amministrativi e addetti alla comunicazione il CREF garantisce parità e pari opportunità tra uomini e donne e l'assenza di ogni forma di discriminazione.

Il CREF ha una sede unica, la palazzina storica oggi all'interno del compendio del Ministero degli Interni, che ospita il Museo Storico Enrico Fermi, gli uffici per il personale e dei laboratori per la ricerca scientifica. Una parte dell'edificio è in condizioni grezze e non può quindi essere utilizzata. Per questa parte dell'edificio è programmata la sua ristrutturazione che sarà realizzata in fasi e con i tempi legati all'ottenimento dei fondi dal MUR.

MISSIONE e STRATEGIE di SVILUPPO

Gli scopi che caratterizzano l'unicità del CREF sono promuovere, programmare e realizzare studi e ricerche nel campo della fisica facilitando la collaborazione scientifica fra ricercatori italiani e stranieri, promuovere la formazione e la crescita professionale di ricercatori di grande talento, su temi scientifici d'avanguardia, con particolare riferimento alle problematiche interdisciplinari.

La linea strategica per il prossimo triennio è quella di potenziare le attività attuali che sono portate avanti da ricercatori molto motivati che compiono notevoli sforzi nell'attrarre fondi da progetti premiali nazionali ed europei.

Sono stati richiesti al Ministero fondi infrastrutturali per l'acquisizione di nuove attrezzature per i laboratori per la ricerca in astrofisica nucleare, per lo sviluppo di rivelatori di particelle e per la realizzazione di scanner tomografici per il patrimonio culturale, oltre all'ampliamento dei laboratori, dell'area espositiva del museo e degli uffici mediante l'ulteriore restauro dell'edificio ospitante. Nell'ambito delle applicazioni in medicina saranno realizzati prototipi per la rivelazione di neutroni in adroterapia. La ricerca in astrofisica nucleare, utilizzando tecniche basate sull'impegno di laser e plasmi, è una ricerca nuova per il CREF ed è stata in parte già avviata utilizzando le infrastrutture disponibili presso i laboratori INFN di Frascati e di Catania. Con l'obiettivo di contribuire alla risoluzione di problemi fondamentali in economia, clima, mobilità, e comprensione dei sistemi biologici sono in corso degli studi per lo sviluppo di algoritmi innovativi per potenziare le tecniche di Intelligenza Artificiale.

Le collaborazioni con istituzioni di ricerca, laboratori e strutture nazionali e internazionali saranno ulteriormente promosse per facilitare l'operato dei nostri ricercatori in reti internazionali e per sfruttare al meglio le varie opportunità scientifiche e tecnologiche in atto e in via di sviluppo.

Il museo continuerà ad arricchirsi, possibilmente anche attraverso fondi aggiuntivi, e sicuramente non interromperà i suoi sforzi per attrarre sempre più persone, non solo provenienti dalla comunità studentesca. È anche in corso un aumento della cooperazione con altri musei e con le società scientifiche nazionali e

internazionali. Il programma di *outreach* con il supporto dell'ufficio comunicazione è molto denso di eventi che continueranno a valorizzare la figura di Fermi e la sua eredità scientifica.

ADERENZA verso il PNR 2021-2027

L'attività scientifica del CREF e il relativo Piano Triennale di Attività vengono sviluppati in piena coerenza con gli scopi e le finalità contenuti nel PNR 2021-2027. Conseguentemente, tutti i Progetti strutturali dell'Ente sono stati concepiti con la finalità di portare un contributo tangibile allo sviluppo del Paese, in conformità con il PNR. In particolare, molti dei Progetti presentano un carattere fortemente interdisciplinare e innovativo, sono basati su metodologie data-driven e hanno una forte connotazione internazionale. Tutti i progetti scientifici hanno anche l'obiettivo di valorizzare e promuovere il contributo dei giovani ricercatori alla ricerca scientifica.

Le attività del CREF si inseriscono in particolare nelle priorità del PNR "CONSOLIDARE LA RICERCA FONDAMENTALE" e "RAFFORZARE LA RICERCA INTERDISCIPLINARE", al cui interno si situano tutte le linee di ricerca.

Vengono inoltre coperti gli ambiti Salute, con l'area d'intervento Tecnologie per la salute, l'ambito Cultura umanistica, creatività, trasformazioni sociali, società dell'inclusione, con l'area Patrimonio culturale, e l'ambito Digitale, industria aerospazio, con gli ambiti Intelligenza artificiale, Tecnologie quantistiche, Transizione digitale.

Le richieste esterne per ricerca e consulenza non hanno determinato uno scostamento dalle linee del PNR, in quanto sono state concentrate su tematiche inerenti allo sviluppo di tecnologie per la salute.

POSIZIONAMENTO dell'ENTE

Affinità con altri Enti mono- o multi-tematici.

Il Museo storico della fisica e Centro studi e ricerche Enrico Fermi, rappresenta un unicum nel panorama degli Enti di Ricerca italiani. Esso, infatti, associa alle attività di punta nella ricerca scientifica e tecnologica in Fisica, la promozione e la diffusione delle conoscenze sullo sviluppo storico della Fisica italiana con particolare riguardo al ruolo di Enrico Fermi e del suo gruppo di ricerca, del quale preserva e valorizza il materiale scientifico e storico, consentendone la fruizione attraverso il Museo a lui dedicato. Il Museo è, dunque, un luogo di conservazione e esposizione, mentre il Centro di Ricerca è un luogo di produzione di conoscenza. Entrambi hanno però in comune l'attenzione alla figura di Enrico Fermi e alla sua influenza sulla fisica moderna.

Il Museo storico della fisica e Centro studi e ricerche Enrico Fermi riconduce, dentro il famoso edificio di Via Panisperna, attività scientifiche innovative ed originali, con una vocazione multidisciplinare e una particolare attenzione all'impatto delle ricerche e, allo stesso tempo, attraverso le attività collegate al Museo, con reperti originali e moderni sistemi audio visivi, onora la straordinaria figura e l'eredità di Enrico Fermi e della sua scuola. Lo storico edificio, che ospitò il Regio Istituto di Fisica di Roma, fu protagonista in un periodo cruciale dello sviluppo della fisica moderna a cavallo tra '800 e '900 e fu luogo di rivoluzionarie e fondamentali scoperte, condotte da Fermi e dal suo gruppo, negli anni Trenta del Novecento.

L'Ente è stato istituito nel 1999. Per molti anni, in attesa che la sede storica completasse la fase di ristrutturazione, che è terminata solo alla fine del 2019, l'Ente ha efficacemente e continuativamente portato avanti, in collaborazione con altri Enti e Università, vari progetti delocalizzati presso centri o laboratori di ricerca nazionali e internazionali, nonché presso diversi luoghi espositivi e numerosi istituti scolastici per quanto attiene alle sue attività di diffusione della cultura scientifica. Caratteristica principale dell'Ente è stata la natura interdisciplinare dei suoi molti progetti e attività, che gli ha consentito di svilupparsi, in attesa di una sede propria, e definire le sue strategie di ricerca, sempre all'insegna dell'interdisciplinarietà e dell'eredità scientifica di Enrico Fermi e avviando, allo stesso tempo, la raccolta di materiale, reperti e testimonianze da destinare al futuro Museo.

Dalla consegna della nuova sede, ormai quasi totalmente restaurata, è iniziata la fase propriamente operativa, scientifica e museale, accompagnata da una crescita sensibile delle attività di ricerca e del personale dedicato. L'Ente di Ricerca ha potenziato considerevolmente le proprie attività scientifiche, affermandosi, nel giro di pochi anni, e diventando un punto di riferimento in diverse tematiche della fisica, dalla complessità all'intelligenza artificiale, dalla fisica dei raggi cosmici alla gravitazione e materia oscura, dal neuroimaging quantitativo alla radio e adroterapia, dalle tecnologie fotoniche alla fisica applicata ai beni culturali, dai problemi aperti in meccanica quantistica alla fisica del cambiamento climatico. Il Museo storico della fisica e Centro studi e ricerche Enrico Fermi ha riportato il paradigma dell'interdisciplinarietà al centro dello sviluppo della ricerca scientifica, ispirandosi ad una visione della ricerca che va oltre i temi caratteristici della fisica più tradizionale, usando tecniche innovative e metodi di avanguardia e prestando particolare attenzione alle applicazioni e all'impatto tecnologico, sociale ed economico delle ricerche perseguite.

Produzione scientifica e suo andamento negli ultimi tre anni

La produzione scientifica principale dell'Ente, divisa per anno, è riportata nel seguente elenco, che comprende unicamente contributi su rivista indicizzata o su volume. Sono esclusi i prodotti minori e le pubblicazioni frutto di grandi esperimenti internazionali con partecipazione minoritaria dell'Ente.

2022

Abbrescia M. et al. Scientific Reports DOI:10.1038/s41598-022-23984-2.
Akaishi T. et al. EPJ Web Conf DOI:[10.1051/epjconf/202227101003](https://doi.org/10.1051/epjconf/202227101003)
Alexandrov A. et al. Journal of Instrumentation DOI:10.1088/1748-0221/17/12/P12012
Barbieri N. et al. The Journal of Technology Transfer 2022-1-30.
Bernaschi M. et al. Scientific Reports DOI: 10.1038/s41598-022-22798-6
Bozzo G. et al. International Journal of Science Education. DOI:10.1080/09500693.2022.2149284
Brandi G., Di Matteo T. et al. International Review of Financial Analysis 84 (2022) 102324.
Bruno M. et al. EPJ Data Science DOI: 10.1140/epjds/s13688-022-00330-0
Buendía V. et al. Phil. Trans. R. Soc. A DOI:10.1098/rsta.2020.0424
Caccioli F., T. Di Matteo, et al. London, 2019 (WEHIA 2019). DOI [10.1007/s11403-022-00354-9](https://doi.org/10.1007/s11403-022-00354-9) (2022)
Caldarola B et al. Laboratory of Economics and Management (LEM) Working Paper Series (2022/36).
Calvanese Strinati M. et al. Nature Communications DOI:10.1038/s41467-022-34847-9
Calvanese Strinati M. et al. Physical Review A DOI:10.1103/PhysRevA.105.043318
Costa S et al. Review of Official Statistics 2022-1
Curceanu C. et al. PoS DISCRETE2020-2021 DOI:[10.22323/1.405.0005](https://doi.org/10.22323/1.405.0005).
Curceanu C. et al. EPJ Web Conf. DOI:[10.1051/epjconf/202225807006](https://doi.org/10.1051/epjconf/202225807006)
De Cunzio F. et al. Scientific Reports 12(1) 22141.
De Paolis L. et al. EPJ Web Conf. DOI:[10.1051/epjconf/202227000028](https://doi.org/10.1051/epjconf/202227000028)
De Paolis L. et al. Nuovo Cim.C. DOI:[10.1393/ncc/i2022-22103-y](https://doi.org/10.1393/ncc/i2022-22103-y).
De Paolis L. et al. PoS DOI:[10.22323/1.380.0456](https://doi.org/10.22323/1.380.0456)
De Paolis L. et al. PoS ICHEP2022. DOI:[10.22323/1.414.1003](https://doi.org/10.22323/1.414.1003)
De Pipaon Perez C. S... Di Matteo T. Entropy 24, no. 3: 365. DOI: [10.3390/e24030365](https://doi.org/10.3390/e24030365).
Derakhshani M. et al. Physics of Life Reviews. DOI: [10.1016/j.plrev.2022.05.004](https://doi.org/10.1016/j.plrev.2022.05.004)
Desiderio A. et al. Journal of Physics: Complexity 3(4):04LT01
DiNuzzo M. et al. eLife. DOI:10.7554/eLife.71016.
DiNuzzo M. et al. Human Brain Mapping. DOI:[10.1002/hbm.25970](https://doi.org/10.1002/hbm.25970).
DiNuzzo M. et al. Journal of Neuroscience Research. DOI:[10.1002/jnr.25029](https://doi.org/10.1002/jnr.25029)
Festa G. et al. Molecules. DOI:10.3390/molecules27010163
Festa G. et al. Scientific Reports DOI:10.1038/s41598-022-07689-0
Focaccia M Il Nuovo Saggiatore vol. 38 n. 5-6.
Focaccia M Introduzione in Orso Mario Corbino Codice ISBN-9788874381326
Focaccia M Physics in Perspective DOI: [10.1007/s00016-022-00291-x](https://doi.org/10.1007/s00016-022-00291-x)
Gravino P. et al. Nature Human Behaviour DOI:<https://www.nature.com/articles/s41562-022-01353-3>
Guerra F. et al. Quaderni di Storia della Fisica 28 (2022) 39-60
Khreptak A. et al. Acta Phys.Polon. DOI:[10.5506/APhysPolBSupp.15.4-A1](https://doi.org/10.5506/APhysPolBSupp.15.4-A1).
Kraan A.C. et al. Medical Physics DOI:10.1002/mp.15336
Leone M. Pisa University Press Pisa 2022 pp. 253-262
Macchiati V., ...Di Matteo T. et al, D. Paolotti, G. Caldarelli, G. Cimini, Journal of Economic Interaction and Coordination 17, 443-474 (2022). DOI: [10.1007/s11403-021-00338-1](https://doi.org/10.1007/s11403-021-00338-1)
Mancini A. et al. Scientific Reports 12 13780
Mandaglio G. et al. Journal of Physics DOI:10.1088/1742-6596/2374/1/012051.

Mattei M. et al. Scientific Reports DOI: 10.1038/s41598-022-16603-7
Miliucci M. et al. Measur.Sci.Tech. DOI:[10.1088/1361-6501/ac777a](https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac777a)
Miliucci M. et al. Nuovo Cim.C. DOI:[10.1393/ncc/i2022-22205-6](https://doi.org/10.1393/ncc/i2022-22205-6).
Miliucci M. et al. Rev.Mex.Fis.Suppl. DOI:[10.31349/SuplRevMexFis.3.0308081](https://doi.org/10.31349/SuplRevMexFis.3.0308081).
Mogliani M. et al. Frontiers in Oncology DOI:10.3389/fonc.2022.929949
Monti F. et al. Proceedings of the 41st Annual conference Pisa University Press Pisa 2022 pp. 263-272
Napolitano F. et al. Phys.Scripta DOI:[10.1088/1402-4896/ac7fc0](https://doi.org/10.1088/1402-4896/ac7fc0)
Napolitano F. et al. Symmetry. DOI:[10.3390/sym14050893](https://doi.org/10.3390/sym14050893)
Napolitano L. et al. Economic Dynamics 63 224-240.
Patelli A. et al. Scientific Data 10.1038/s41597-022-01732-5
Pisano S. et al. Proceedings of the ICERI Conference (2022) 7646.
Piscicchia K. et al. Acta Phys.Polon.A DOI:[10.12693/APhysPolA.142.361](https://doi.org/10.12693/APhysPolA.142.361).
Piscicchia K. et al. EPJ Web Conf. DOI:[10.1051/epjconf/202226201006](https://doi.org/10.1051/epjconf/202226201006)
Piscicchia K. et al. EPJ Web Conf. DOI:[10.1051/epjconf/202227107004](https://doi.org/10.1051/epjconf/202227107004)
Porcelli A. et al. EPJ Web Conf. DOI:[10.1051/epjconf/202226201022](https://doi.org/10.1051/epjconf/202226201022)
Reisz N. et al. New Journal of Physics DOI: [10.1088/1367-2630/ac6ca1](https://doi.org/10.1088/1367-2630/ac6ca1)
Ripoli C. et al. Journal of Physics DOI:10.1088/1742-6596/2374/1/012152.
Robotti N. Il Nuovo Saggiatore 38 (2022) 9-24
Robotti N. Pisa University Press Pisa 2022 p. 174
Rothman D. et al. Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism DOI:10.1177/0271678X211064399.
Sakuma F. et al. EPJ Web Conf. DOI:[10.1051/epjconf/202226201008](https://doi.org/10.1051/epjconf/202226201008)
Scatigno C et al. International Journal of Food Science and Technology DOI:[10.1111/ijfs.15735](https://doi.org/10.1111/ijfs.15735)
Scatigno C. et al. G. Journal of Imaging DOI:10.3390/jimaging8100284
Schueller W. et al. Scientific Data DOI: [10.1038/s41597-022-01819-z](https://doi.org/10.1038/s41597-022-01819-z)
Scordo A. et al Acta Phys.Polon.A DOI:[10.12693/APhysPolA.142.373](https://doi.org/10.12693/APhysPolA.142.373).
Sgaramella F: et al.cPhys.Scripta. DOI:[10.1088/1402-4896/ac95da](https://doi.org/10.1088/1402-4896/ac95da)
Sirghi D. et al. J.Phys.G. DOI:[10.1088/1361-6471/ac5dac](https://doi.org/10.1088/1361-6471/ac5dac)
Sirghi F. et al. PoS PANIC2021. DOI:[10.22323/1.380.0200](https://doi.org/10.22323/1.380.0200)
Skurzok M. et al. Int.J.Mod.Phys.E. DOI:[10.1142/S0218301322400018](https://doi.org/10.1142/S0218301322400018)
Teghil A. et al. Journal of Cognitive Neuroscience. DOI:[10.1162/jocn_a_01906](https://doi.org/10.1162/jocn_a_01906).
Teodonio L. et al. Journal of Cultural Heritage. DOI:10.1016/j.culher.2022.07.006
Trigilio A. et al. NIM A DOI:10.1016/j.nima.2022.167334
Tuchler M. et al. EPJ Web Conf. DOI:[10.1051/epjconf/202226201016](https://doi.org/10.1051/epjconf/202226201016)
Valentini F. et al. Crystals. DOI:10.3390/cryst12091182
Villegas P. et al. J. Stat. Mech. DOI:10.1088/1742-5468/ac7a2c

2023

Abbene L. et al. Collider Sensors. DOI:[10.3390/s23177328](https://doi.org/10.3390/s23177328)
Abbene L. et al. Eur.Phys.J.ST. DOI:[10.1140/epjs/s11734-023-00881-x](https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-023-00881-x)
Abrescia M. et al. [European Physical Journal C](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-11353-w) DOI:0.1140/epjc/s10052-023-11353-w.
Aikawa S. et al. Phys.Lett.B DOI:[10.1016/j.physletb.2022.137637](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2022.137637)
Akaishi T. et al. Phys.Lett.B. DOI:[10.1016/j.physletb.2023.138128](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2023.138128)
Albertin F. et al. Materials Letters DOI:10.1016/j.matlet.2023.134791
Albora G. et al. Scientific Reports. DOI: 10.1038/s41598-023-28179-x
Bossini E. et al. Nuclear Instruments and Methods DOI: [10.1016/j.nima.2022.167754](https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167754)
Brugnoli E. et al. Nature Italy DOI:10.1038/d43978-023-00026-7
Brugnoli E. et al. Proceedings of the VALE workshop at ECAI 2023.
Bruno M. et al. Journal of Physics: Complexity DOI: 10.1088/2632-072X/ad1411
Caldarola B. et al.. Research Policy.
Cetrulo A. et al. Intereconomics 58(4) 215-221.
Cifarelli, L. et al. Prometeo 41:164 (2023)
Colamarino E. et al. BMC Neurology. DOI:10.1186/s12883-023-03442-w.
Costa S. et al. Industrial and Corporate Change dtad030.
Curceanu C. et al. Front.in Phys. DOI:[10.3389/fphy.2023.1240250](https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1240250)
Curceanu C. et al. PoS CORFU2022. DOI:[10.22323/1.436.0039](https://doi.org/10.22323/1.436.0039)
Daniotti S. et al. Scientific Reports DOI:[10.1038/s41598-023-30134-9](https://doi.org/10.1038/s41598-023-30134-9)
De Cunzio F. et al. Utrecht University Human Geography and Planning.
De Marzo G. et al. ILO Working Paper Series International Labour Organization (No. 995271691902676).
De Paolis L. et al. EPJ Web Conf. DOI:[10.1051/epjconf/202329006003](https://doi.org/10.1051/epjconf/202329006003)
De Paolis L. et al. Phys.Scripta. DOI:[10.1088/1402-4896/ac76ec](https://doi.org/10.1088/1402-4896/ac76ec).
Di Bartolomeo G. et al. e Phys. Rev. A. DOI:[10.1103/PhysRevA.108.012202](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.108.012202)
Diodato D. et al. 2023. Economic Complexity for Regional Industrial Strategies. Joint Research Centre European Commission.
Festa G. et al. Analytical Chemistry DOI:0.1021/acs.analchem.2c04721

Festa G. et al. Expert Systems With Applications. DOI:10.1016/j.eswa.2023.120328
Focaccia M. Atti del XVII Convegno annuale SISFA DOI:10.12871/978883339843318.
Franciosini G. et al. Physics in Medicine and Biology DOI:10.1088/1361-6560/aca1f2
Galati G. et al. Frontiers in Physics DOI:10.3389/fphy.2023.1327202
Galli L. et al. NIM A DOI:10.1016/j.nima.2022.167757
Giove F. et al. Frontiers in Neuroscience. DOI:10.3389/fnins.2024.1488845.
Grazzi S.E. et al. Nuclear Instruments and Methods A DOI:j.nima.2022.167612.
Guidi M. et al. Frontiers in Physics. DOI:10.3389/fphy.2023.1248021.
Guidi M. et al. La Neurologia Italiana XIX (2023) 13–20.
Kraan A.C. et al. NIM A DOI:10.1016/j.nima.2022.167615
Lo Sardo D. et al. PLoS ONE DOI:[10.1371/journal.pone.0283628](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283628)
Maugeri L. et al. Journal of Neurotrauma. DOI:[10.1089/neu.2021.0451](https://doi.org/10.1089/neu.2021.0451).
Miliucci M. et al. Appl.Radiat.Isot.. DOI:[10.1016/j.apradiso.2023.110822](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110822)
Muscato A. et al. Frontiers in Physics DOI:10.3389/fphy.2023.1185598
Napolitano F. et al. Symmetry. DOI:[10.3390/sym15020480](https://doi.org/10.3390/sym15020480)
Ottaviani C. et al. International Journal of Psychophysiology. DOI:10.1016/j.ijpsycho.2023.05.045.
Patelli A. et al. Il Mulino.
Patelli A. et al. Journal of Informetrics 10.1016/j.joi.2022.101357
Patelli A. et al. Sci. Rep. 10.1038/s41598-023-29979-x
Patuelli A. et al. Scientific Reports DOI: 10.1038/s41598-023-34024-y
Piscicchia K. et al. Entropy. DOI:[10.3390/e25020295](https://doi.org/10.3390/e25020295)
Piscicchia K. et al. Phys.Rev.C. DOI:[10.1103/PhysRevC.108.055201](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.108.055201)
Piscicchia K. et al. Universe. DOI:[10.3390/universe9070321](https://doi.org/10.3390/universe9070321)
Podobnik B. ... Di Matteo T. et al. Technology in Society 72 (2023) 102148.
Pohan A. et al. Phys.Rev.D DOI: [10.1103/PhysRevD.108.023509](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.108.023509)
Raddant M., Di Matteo T., Journal of Economic Interaction and Coordination, DOI: [10.1007/s11403-023-00389-6](https://doi.org/10.1007/s11403-023-00389-6).
Ripoli C. et al. Proceedings of Science PoS (TAUP-2023) 322.
Ripoli C. et al. Journal of Instrumentation DOI 10.1088/1748-0221/19/03/C03060.
Robotti N. Atti della Accademia Ligure di Scienze e Lettere Serie V (2023) 151-171
Rocco D. et al. NIM A DOI:10.1016/j.nima.2023.168277
Sgararella F. et al. EPJ Web Conf. DOI:[10.1051/epiconf/202329006005](https://doi.org/10.1051/epiconf/202329006005)
Sgararella F. et al. Eur.Phys.J.A 59. DOI:[10.1140/epja/s10050-023-00976-y](https://doi.org/10.1140/epja/s10050-023-00976-y)
Sgararella F. et al. J.Phys.Conf.Ser. DOI:[10.1088/1742-6596/2446/1/012023](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2446/1/012023)
Sirghi D. L. et al. Nucl.Phys.A DOI:[10.1016/j.nuclphysa.2022.122567](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2022.122567)
Skurzok M. et al. Front.in Phys.. DOI:[10.3389/fphy.2023.1237644](https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1237644)
Skurzok M. et al. EPJ Web Conf.. DOI:[10.1051/epjconf/202327911019](https://doi.org/10.1051/epjconf/202327911019)
Straccamore M. et al. Scientific Reports DOI:10.1038/s41598-023-30649-1
Sylos Labini F. et al. Mont. Not.R.Acad.Soc DOI: 10.1093/mnras/stad1916 Published: 27 June 2023
Sylos Labini F. et al. Astrophys.J. DOI:10.3847/1538-4357/acb92c
Teghil A. et al. Brain Structure and Function. DOI:[10.1007/s00429-023-02612-3](https://doi.org/10.1007/s00429-023-02612-3).
Tuchler M. et al. JINST. DOI:[10.1088/1748-0221/18/11/P11026](https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/11/P11026)
Villegas P. et al. Nat. Phys. DOI:10.1038/s41567-022-01866-8
Wang H-F. The Astrophysical Journal DOI: [10.48550/arXiv.2211.05668](https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.05668)
Wang X. S. et al. Optics Express [10.1364/OE.49243](https://doi.org/10.1364/OE.49243)
Villegas P. et al. Phys. Rev. Res. DOI:10.1103/PhysRevResearch.4.033196

2024

Abbene L. et al. Sensors. DOI:[10.3390/s24237562](https://doi.org/10.3390/s24237562)
Abbrescia M. et al. JINST DOI:10.1088/1748-0221/19/11/P11003.
Abbrescia M. et al. NIM A. DOI:10.1016/j.nima.2024.170163
Angelini O et al. Chaos Solitons & Fractals. DOI:[10.1016/j.chaos.2024.115006](https://doi.org/10.1016/j.chaos.2024.115006)
Artibani F. et al. Acta Phys.Polon.B. DOI:[10.5506/APhysPolB.55.5-A2](https://doi.org/10.5506/APhysPolB.55.5-A2)
Aufiero S. et al. Scientific Reports DOI:10.1038/s41598-024-61448-x
Baudis L. et al. Eur.Phys.J.C DOI: [10.1140/epjc/s10052-024-13510-1](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13510-1)
Bellina A. et al. arXiv preprint DOI:10.48550/arXiv.2411.03394
Bellina A. et al. arXiv preprint DOI:10.48550/arXiv.2401.10114
Bosnar D. et al. NIM A. DOI:[10.1016/j.nima.2024.169966](https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169966)
Brugnoli E. et al. DOI:10.5220/0012595000003636
Brugnoli E. et al. Social Science Computer Review DOI:[10.1177/08944393241269097](https://doi.org/10.1177/08944393241269097)
Bruno M. et al. Nature Cities DOI: 10.1038/s44284-024-00119-4
Buompane R. et al. Eur.Phys.J.Plus. DOI:[10.1140/epjp/s13360-023-04840-2](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-04840-2)
Caldarelli G. et al. J. Stat. Mech. DOI:10.1088/1742-5468/ad57b1

- Caldarola B. et al. (No. 2024-033). United Nations University-Maastricht Economic and Social Research Institute on Innovation and Technology (MERIT).
- Caldarola B. et al. Journal of Physics: Complexity 10.1088/2632-072X/ad4f3d
- Calvanese Strinati M. et al. Physical Review A DOI:10.1103/PhysRevA.109.063519
- Calvanese Strinati M. et al. Physical Review Letters DOI:10.1103/PhysRevLett.132.017301
- Cetrulo A. et al. Economia & lavoro 12(1) 151-168.
- Cifarelli L. et al. Prometeo 43:166 (2024)
- Collaborazione EEE Supplemento al Giornale di Fisica Vo. 65(2024)
- Costa S. et al. Economia Italiana 1/2024 15-57.
- Curceanu C. et al. Acta Phys.Polon. DOI:[10.5506/APhysPolBSupp.17.1-A6](https://doi.org/10.5506/APhysPolBSupp.17.1-A6)
- De Paolis L. et al. EPJ Web Conf. DOI:[10.1051/epjconf/202429105003](https://doi.org/10.1051/epjconf/202429105003)
- DiNuzzo M. et al. Journal of Neurochemistry. DOI:[10.1111/jnc.15839](https://doi.org/10.1111/jnc.15839).
- Diodato D. et al. 2024. A Handbook of Economic Complexity for Policy. Joint Research Centre European Commission.
- Fanelli F. et al. arXiv preprint DOI:10.48550/arXiv.2410.21133
- Fenoaltea E. M. et al. arXiv preprint DOI:10.48550/arXiv.2412.04924.
- Fessina M. et al. Journal of Physics: Complexity. DOI:10.1088/2632-072X/ad3604
- Focaccia M. et al. Atti del XLIII Convegno annuale SISFA DOI:10.6093/978-88-6887-305-9.
- Focaccia M. Europhysics News DOI:10.1051/epn/2024202
- Focaccia M. Il Nuovo Saggiatore vol. 40 n. 5-6 pp. 58-66.
- Focaccia M. Una donna tra arte e scienza. ISBN-9788897828181.
- Franciosini G. et al. Frontiers in Physics DOI:10.3389/fphy.2024.1249393
- Franciosini G. et al. Physica Medica DOI:10.1016/j.cjmp.2024.103346
- Gabrielli A. et al. Lect. Notes Comput. Sci. 14070
- Galeazzi A. et al. PNAS Nexus DOI:[10.1093/pnasnexus/pgae474](https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgae474)
- Gallo A. Commun. Phys. DOI:10.1038/s42005-024-01640-7
- Gravino P. et al. Applied Network Science DOI:[10.1007/s41109-024-00643-1](https://doi.org/10.1007/s41109-024-00643-1)
- Hill D. et al. Philosophical Transactions A DOI:[10.1098/rsta.2024.0097](https://doi.org/10.1098/rsta.2024.0097)
- Jerry Jones D. ...Di Matteo T. et al. Entropy 26 (2024), 848. DOI: [10.3390/e26100848](https://doi.org/10.3390/e26100848)
- Kaniadakis G., Di Matteo T. et al. Eur. Phys. J. B (2024) 97:203. DOI: [10.1140/epjb/s10051-024-00832-y](https://doi.org/10.1140/epjb/s10051-024-00832-y)
- Londei A. et al. NeurIPS 2024 DOI:10.48550/arXiv.2410.18156
- Manti S. et al. Entropy. DOI:[10.3390/e26090752](https://doi.org/10.3390/e26090752)
- Mariani M. et al. Nat. Comm. Phys. DOI:10.1038/s42005-024-01588-8
- Marzolla F et al. arXiv preprint DOI:10.48550/arXiv.2409.01817.
- Mazzilli D. et al. Journal of Physics: Complexity 10.1088/2632-072X/ad2697
- Mencarelli L. et al. Alzheimer's Research & Therapy. DOI:10.1186/s13195-024-01501-z.
- Napolitano F. et al. Acta Phys.Polon.A. DOI:[10.12693/aphyspola.146.669](https://doi.org/10.12693/aphyspola.146.669)
- Napolitano F. et al. Measur.Sci.Tech. DOI:[10.1088/1361-6501/ad080a](https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad080a)
- Neal Z. et al. PLOS Complex Systems. DOI:10.1371/journal.pcsy.0000010
- Neffke F. et al.. Utrecht University Department of Human Geography and Spatial Planning
- Noumi H. et al. EPJ Web Conf. DOI:[10.1051/epjconf/202429105011](https://doi.org/10.1051/epjconf/202429105011)
- Palermo G. et al. Phys. Rev. E 110 024313
- Patelli A. et al. European Commission DOI:10.2760/035046
- Pecorino V., Di Matteo T., et al. The European Physical Journal B 97, 154 (2024). DOI: [10.1140/epjb/s10051-024-00792-3](https://doi.org/10.1140/epjb/s10051-024-00792-3) - Paper highlighted in [EPJB News pages](#) and on the [Springer Research News page](#)
- Piscicchia K. et al. Condens. Matter. DOI:[10.3390/condmat9020022](https://doi.org/10.3390/condmat9020022)
- Porcelli A. et al. Eur.Phys.J.C. DOI:[10.1140/epjc/s10052-024-12599-8](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-12599-8)
- Pratelli M. et al. EPJ Data Science DOI: 10.1140/epjds/s13688-024-00461-6
- Pratelli M. et al. PNAS Nexus DOI:10.1093/pnasnexus/pgae177
- Prevedello G. et al. ICAART 2024. DOI:[10.5220/0012596000003636](https://doi.org/10.5220/0012596000003636)
- Ripoli C. et al. Giornale di Fisica DOI:10.1393/gdf/i2024-10541-x.
- Robotti N. Federico II University Press Napoli 2024 p. 105-111.
- Scatigno C. et al. Crystals. DOI:10.3390/cryst14060534
- Scatigno C. et al. Polymers. DOI:10.3390/polym16131850
- Schettino M. et al. Translational Psychiatry DOI: 10.1038/s41398-024-03162-w
- Scordo A. et al. NIM A. DOI:[10.1016/j.nima.2023.169060](https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.169060)
- Sgaramella F. et al. Acta Phys.Polon. DOI:[10.5506/APhysPolBSupp.17.1-A8](https://doi.org/10.5506/APhysPolBSupp.17.1-A8)
- Sgaramella F. et al. Condens.Mat. DOI:[10.3390/condmat9010016](https://doi.org/10.3390/condmat9010016)
- Sgaramella F. et al. J.Phys.G. DOI:[10.1088/1361-6471/ad34ea](https://doi.org/10.1088/1361-6471/ad34ea)
- Sirghi F. et al. EPJ Web Conf. DOI:[10.1051/epjconf/202429101008](https://doi.org/10.1051/epjconf/202429101008)
- Sirghi F. et al. JINST. DOI:[10.1088/1748-0221/19/11/P11006](https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/11/P11006)
- Sylos Labini F. et al The Astrophysical Journal DOI: 10.3847/1538-4357/ad88f1
- Sylos Labini F. et al. Mon. Not. R.Acad. Soc DOI:10.1093/mnras/stad3278
- Trigilio A. et al. JINST DOI:10.1088/1748-0221/19/02/C02043
- Trusso S. et al. Applied Surface Science. DOI:10.1016/j.apsusc.2023.159186

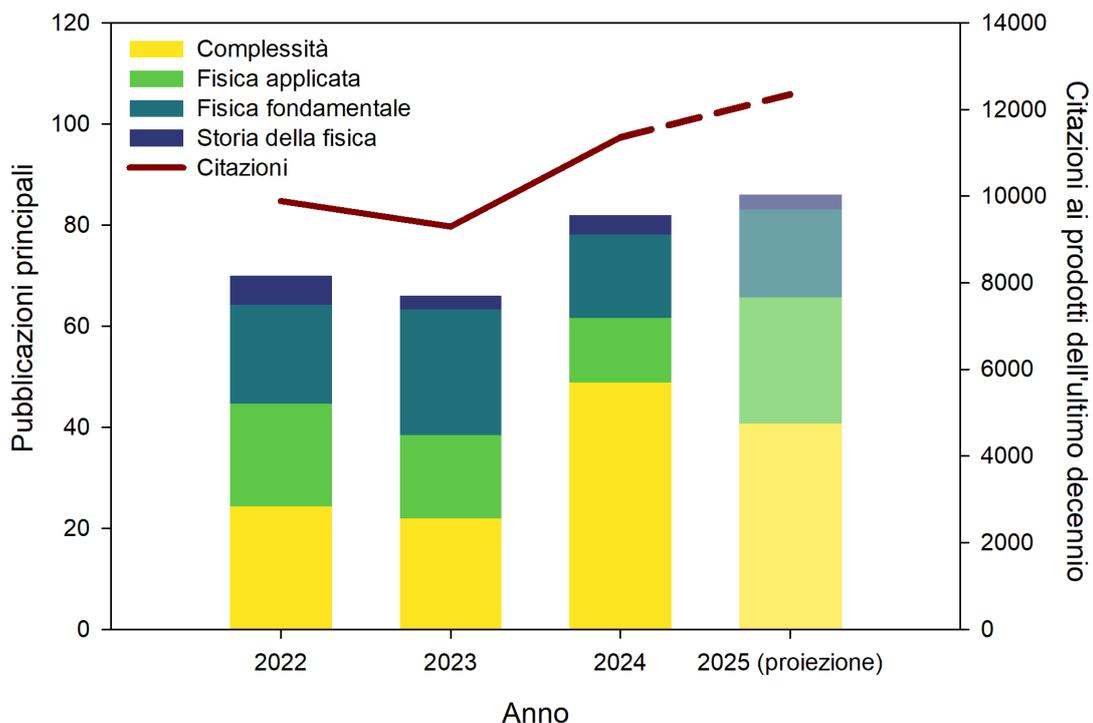
Villegas P. et al. Phys. Rev. E DOI:10.1103/PhysRevE.109.L042402
 Wang H. et al. Nature Computational Science. DOI:10.1038/s43588-024-00644-1
 Yamaga T. et al. Phys.Rev.C. DOI:10.1103/PhysRevC.110.014002
 Zarrella R. et al Journal of Instrumentation DOI:10.1088/1748-0221/19/04/C04006

2025

Brugnoli E. et al. PLoS ONE DOI:[10.1371/journal.pone.0316258](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0316258)
 Casaburi P. ... Di Matteo T. et al. PLoS Comput Biol (2025) 21(2) DOI: [10.1371/journal.pcbi.1012802](https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1012802)
 Cresti L. et al arXiv preprint DOI:10.48550/arXiv.2501.01781.
 Dong Y. et at. Computer Physics Communications DOI:10.1016/j.cpc.2024.109398
 Egidi E. et al. Frontiers in Physics. DOI:10.3389/fphy.2025.1487822.
 Festa G. et al. Journal of Cultural Heritage. DOI:10.1016/j.culher.2025.01.002
 Fratini M. et al. Frontiers in Physics. DOI:10.3389/fphy.2025.1479573.
 Gallo A. et al. Physical Review E. DOI:10.1103/PhysRevE.111.024312
 Guerra F. et al. Springer Cham Switzerland In press
 Guerra F. et al Cambridge University Press In press
 Guidi M. et al. Il Nuovo Cimento C Colloquia and Communications in Physics. In press
 Labounek R. et al. Imaging neuroscience. In press
 Lasaponara S. et al. Journal of Cognitive Neuroscience. DOI:10.1162/jocn_a_02240.
 Mangia S. et al. Scientific Reports. DOI:10.1038/s41598-025-90342-3.
 Mangini F. et al. JCBFM. DOI:10.1177/0271678X251325413.
 Moraschi M. et al. Influence of scanning plane on human spinal cord functional Magnetic Resonance echo planar imaging PLOS One. In press.
 Poggialini A. et al. Phys. Rev. Lett. DOI:10.1103/PhysRevLett.134.057401
 Simonetti A., ... Di Matteo T. et al., Applied Network Science (2025) 10:5 DOI: [10.1007/s41109-025-00693-z](https://doi.org/10.1007/s41109-025-00693-z)
 Sulpizio V. et al. Scientific Reports (2025). In press.
 Sylos Labini R. et al. Astronomy and Astrophysics DOI:10.1051/0004-6361/202452556
 Verga C. et al. Experimental Brain Research. DOI:10.1007/s00221-025-07055-2.
 Villegas P. et al. Phys. Rev. Res. DOI:10.1103/PhysRevResearch.7.013065
 Wang Hao et al. IEEE Photonics Journal. DOI:[10.1109/JPHOT.2025.3547948](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2025.3547948)

Grafico riassuntivo della produzione scientifica degli ultimi tre anni

L'andamento delle pubblicazioni degli ultimi tre anni è riportato in figura, che comprende anche una proiezione riferita all'anno in corso e basata sui dati acquisiti sino a tutto marzo. La stessa figura riporta le citazioni ricevute nel triennio di riferimento dalla produzione scientifica principale degli ultimi dieci anni, e la relativa proiezione per l'anno in corso.



Andamento della produzione scientifica principale negli ultimi tre anni e proiezione per l'anno in corso

Produzioni televisive, trasmissioni radiofoniche e documentari

2024, ideazione e sceneggiatura del docufilm Omaggio a Ginestra (con A. La Rana A. Scillitani) Artemide Film-Zanichelli. Cortometraggio sulla figura e l'opera di Ginestra Giovane Amaldi.

2024, partecipazione alla trasmissione "Enrico Fermi una vita atomica - Nel secolo breve" su Rai storia (<https://www.raiplay.it/video/2024/11/Nel-secolo-breve--Enrico-Fermi-una-vita-atomica-1de4be96-8d81-478c-b590-03bdf76ad1eb.html>).

2024, consulenza e partecipazione al documentario "Nel mondo dei fatti - Storia di Enrico Fermi" Focus Mediaset (https://mediasetinfinity.mediaset.it/documentari/nelregnodeifatti-storiadienricofermi_SE000000002359).

2024, partecipazione alla trasmissione "Fermi tutti: c'è la vasca dei pesci rossi" su Radio3scienza. (<https://www.raiplaysound.it/audio/2024/10/Radio3-Scienza-del-22102024-b5982cbc-cb0f-4eb0-8cf9-b4b133a148b4.html>).

2025, assistenza e organizzazione riprese per speciale RaiCultura dedicato all'evento per la presentazione della nuova installazione Annus Mirabilis del 10 dicembre – <https://www.raicultura.it/speciali/viaggioalcentrodellatomogliesperimentidel1934>

2025, assistenza e organizzazione riprese per il programma "Ulisse il piacere della scoperta", Rai, puntata dedicata alla bomba atomica, messa in onda alla fine di maggio.

Conferenze, workshop, referaggio per riviste, comitati scientifici

Nel triennio 2022-2024, i ricercatori del CREF hanno contribuito con oltre 300 presentazioni a Conferenze, di cui oltre 150 su invito. Si riscontra una nutrita presenza in comitati organizzatori di conferenze e nei comitati scientifici, oltre un centinaio in totale per l'organizzazione di oltre 100 tra conferenze e workshop.

COLLABORAZIONI NAZIONALI E INTERNAZIONALI

Accordi quadro e convenzioni

- Accordo quadro e convenzione con il CNR
- Accordo quadro e convenzione operativa con l'INFN
- Accordo quadro e convenzione operativa con la Fondazione Santa Lucia Roma
- Accordo quadro con Università telematica Mercatorum e il Centro Studi delle Camere di Commercio di Roma
- Accordo quadro con L'accademia Belle Arti di Brera
- Accordo quadro con L'Università Tor Vergata - Dipartimento di Storia, Patrimonio culturale, Formazione e Società
- Accordo quadro con l'Istituto Centrale per la Grafica
- Accordo quadro con il Comune di Mentana
- Accordo quadro con l'Accademia di Belle Arti di Roma
- Accordo quadro con l'Istituto Centrale per la Patologia degli Archivi e del Libro
- Accordo quadro con l'Archivio Storico della Pontificia Università Gregoriana
- Convenzione operativa con l'Università di Bologna
- Convenzione con il Consortium GARR
- Convenzione con l'Azienda ospedaliero-universitaria "Policlinico Riuniti" di Foggia
- Accordo quadro con il Département des Sciences de l'Antiquité dell'Université de Genève
- Memorandum of Understanding con l'Institut Curie (Parigi)
- Memorandum of Understanding con lo Science and Technology Facilities Council (UK)
- Memorandum of Understanding con Complexity Hub Vienna, Sony Roma, King's College London
- Oltre 70 convenzioni con scuole secondarie superiori per il progetto EEE e per storia della fisica
- Oltre 20 convenzioni per PCTO con scuole secondarie superiori e Sapienza Università di Roma.

Collaborazioni nazionali

- Camere di Commercio Guglielmo Tagliacarne
- CENTAI (Center for Artificial Intelligence) - Torino
- Centro di ProtonTerapia: APPS – Trento
- Centro Restauro Venaria Reale - Torino
- CNAO - Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica– Pavia
- Consorzio Scienza Insieme, Science Together-NET
- Deputazione di Storia Patria per le Province Parmensi
- DMO Es.Co – Esquilino Comunità
- Fondazione Bruno Kessler - Trento
- Fondazione e Centro di Cultura Scientifica Ettore Majorana - Erice
- Forum disuguaglianze e Diversità
- Goethe Institut - Roma
- ISTAT, Istituto Nazionale di Statistica
- Istituto della Enciclopedia Italiana Treccani
- Istituzioni museali: Egizio di Torino, Musei di Sapienza Sistema Bibliotecario Sapienza
- Ministero della Cultura
- Netabolics S.R.L
- Opificio delle Pietre Dure - Firenze
- Ospedale Pediatrico Bambino Gesù
- Politecnico di Milano
- Scuola IMT Alti Studi Lucca
- Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa
- Siemens Healthcare S.R.L.
- SIF - Società Italiana di Fisica
- SISFA - Società Italiana degli Storici della Fisica e dell'Astronomia
- SISSA - Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati, Trieste
- Società Italiana di Storia della Scienza
- SONY CSL Roma
- Università degli Studi di Bari, Bologna, Cagliari, della Calabria, Catania, Chieti-Pescara, Enna Kore, Macerata, Messina, Napoli Federico II, Parma, Pavia, Pisa, Roma Sapienza, Roma Tor Vergata, Roma Tre, del Salento, Salerno, Siena, Torino, Trento, Trieste, , Venezia Ca' Foscari, Verona
- Eventi: Quantum Weeks, Roma Future Week, Net Science Together, Festival della Scienza di Genova
- Stampa: Redazione FocusTV, Casa Editrice Castelvechi
- TV & Radio: Focus Mediaset, Rai Storia, Rai Cultura, RadioTre Scienza.

Collaborazioni internazionali

- British Museum – London, Regno Unito
- CERN - Ginevra, Svizzera
- China Centre for Economic Research (CCER)
- City College of New York, USA
- Complexity Science Hub, Vienna, Austria
- Copernicus Climate Change Service (C3S)
- Cruces University Hospital - Bio-Bizkaia Research Institute - Bilbao, Spagna
- CSIC- Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Spagna

- Ecole Normale Supérieure de Paris, Francia
- ETH Zurich, Svizzera
- European Bank of Reconstruction and Development (EBRD)
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)
- European Physical Society
- GSI - Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung – Darmstadt, Germania
- IFIN – HH - Horia Hulubei National Institute for R&D in Physics and Nuclear Engineering - Măgurele, Romania
- ISIS Spallation Neutron Source, (UK)
- Istituto di Astrofisica delle Canarie (IAC), Spagna
- Joint Research Center dell'Unione Europea, Siviglia, Spagna
- Maastricht Economic and Social Research Institute on Innovation and Technology (UNU-MERIT)
- Max Planck Institute for Human Cognitive and Brain Sciences, Leipzig, Germania
- Museo Curie, Parigi, Francia
- Oak Ridge National Laboratory, USA
- Paul Scherrer Institut, Villigen, Svizzera
- Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK)
- Ruđer Bošković Institute, Zagabria, Croazia
- SONY CSL Parigi, Francia
- Stefan Meyer Institute (SMI), Vienna, Austria
- Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India
- Università: Budapest (Ungheria), Ginevra (Svizzera), Granada (Spagna), Jagiellonian University (Polonia), King's College London (UK), Konstanz (Germania), London (UK), Minnesota (USA), Namur (Belgio), New York (USA), Northeastern London (UK), Oslo (Norvegia), Oxford (UK), Parigi (Francia), Pechino (Cina), Politecnica de València (Spagna), Princeton (USA), Queen's University Belfast (UK), Regensburg (Germania), Sichuan (Cina), Shanghai Jiao Tong (Cina), Technical University of Munich (Germania), University College London (UK), València (Spagna), Vienna (Austria), Yale (USA), Yangpu – Shanghai (Cina), Zurigo (Svizzera)
- Weizmann Institute for Science, Israele
- World Bank group: IFC - International Finance Corporation.

PERSONALE RICERCATORE, TECNOLOGO, TECNICO, AMMINISTRATIVO

1 - Personale CREF al 31 dicembre 2024					
Profilo	Livello	Tempo indeterminato	Tempo determinato FOE	Tempo determinato fondi esterni	Totale
Dirigente di ricerca	I	2	1 ^a		3
Primo ricercatore	II	5			5
Ricercatore	III	12			12
Dirigente tecnologo	I	1			1
Tecnologo	III	3			3
Direttore amministrativo	Dirigente II fascia		1		1
Funzionario di amministrazione	IV	1			1
	V	6			6
Collaboratore tecnico enti ricerca	V	1			1
	VI	1			1
Operatore tecnico enti ricerca	VII	1			1
Totale		33	2		35

2 - Altre tipologie di personale presenti al 31 dicembre 2024	Numerosità
Associati ^b	78
Borse di studio dottorato di ricerca	12
Collaborazioni coordinate e continuative	10
Lavoratore autonomo	1
Professionisti	5
Titolari di assegno di ricerca	14
Titolari di Borse di studio	2
Altro personale	2
Totale complessivo	124

a: Il Direttore scientifico è equiparato dal punto di vista economico ad un Dirigente di ricerca I livello

b: In questa voce non sono conteggiati i dottorandi associati CREF, le cui borse sono pagate ai rispettivi Atenei dal CREF; pertanto, sono stati inclusi nella voce "Borse di studio dottorato di ricerca."

INFRASTRUTTURE, LABORATORI di RICERCA, STRUMENTAZIONE

1) Laboratorio Beni Culturali

Il Laboratorio di Fisica per i Beni Culturali del CREF è impegnato nello studio di materiali di interesse storico-artistico attraverso tecniche di analisi non invasive e non distruttive ed è situato al piano -1 della palazzina. È attualmente dotato di strumentazione per misure di spettroscopia di fluorescenza a raggi X (XRaman, XGlab- Bruker), spettroscopia Raman (XRaman, XGlab- Bruker), spettroscopia infrarossa in trasformata di Fourier (FTIR Nicolet IS5 Conservat-IR, Thermo Fisher Scientific) e imaging iperspettrale (IQ Specim – Konica Minolta). Nel laboratorio sono inoltre presenti workstations dedicate con ampia potenza di calcolo per analisi dati di imaging tramite software dedicato (VGStudio Max, Volumegraphics) e piccola accessorìa quale una bilancia analitica da laboratorio, essiccatore, campioni standard, pressa, reagenti, stufa e materiali di base. Il laboratorio dispone inoltre di materiali consumabili necessari all'implementazione degli esperimenti. Per espandere le sue capacità diagnostiche, il laboratorio prevede l'acquisizione di un sistema per imaging in particolare di Tomografia Computerizzata (CT) a raggi X, che consentirà di esaminare la struttura interna di oggetti senza alterarne l'integrità. La CT permetterà di identificare inclusi, cavità, difetti e strutture multistrato, offrendo dettagli inaccessibili tramite altre tecniche. I dati raccolti, inoltre, consentiranno la realizzazione di modelli 3D per analisi avanzate tramite lo sviluppo di nuovi protocolli di indagine e per la valorizzazione museale. L'adozione di questa tecnologia favorirà un potenziamento delle attività di ricerca del laboratorio, promuovendo la cooperazione con altre istituzioni nell'ambito della conoscenza, tutela e fruizione del patrimonio culturale.



Figura: Spazi del laboratorio di Fisica per i Beni Culturali del CREF.

Risorse

Il laboratorio ha dimostrato capacità di attrarre finanziamenti esterni tramite la partecipazione a bandi competitivi (progetto ISIS@MACH terminato nel 2024). Si prevede quindi il rafforzamento dell'Infrastruttura tramite la partecipazione a bandi competitivi ed ulteriori occasioni di finanziamento per l'acquisto di nuova strumentazione per la ricerca.

2) Laboratorio di Fotonica Computazionale

Il Laboratorio di Fotonica Computazionale è dedicato alla linea di ricerca sperimentale in Tecnologie Fotoniche ed Intelligenza |Artificiale ed è dotato delle infrastrutture necessarie per la realizzazione dei prototipi di macchine di calcolo fotonico e l'implementazione degli esperimenti ottici associati. Il laboratorio dispone di 3 tavoli ottici stabilizzati, 2 sorgenti laser ad emissione continua nella banda spettrale del visibile ed 1 sorgente impulsata (100 femtosecondi) nel vicino infrarosso, 2 modulatori spaziali per luce visibile ed infrarossa basati su cristalli liquidi, videocamere e rivelatori ottici, componenti ottici e optomeccanici accessori. Sono presenti workstations basate su calcolatori convenzionali dedicate all'indagine teorica, alle simulazioni numeriche e all'analisi dati. Per l'ingegnerizzazione dei materiali fotonici complessi caratterizzati da disordine e non linearità che fungono da piattaforme fisiche di calcolo, il laboratorio si avvale di collaborazioni con prestigiosi istituti di ricerca internazionali come l'ETH di Zurigo.

Risorse

Il laboratorio ha attratto le risorse esterne per un totale di 520 mila euro:

- Finanziamento esterno nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) 2022, Missione 4 "Istruzione e Ricerca" - Componente 2 "Dalla Ricerca all'Impresa" - Investimento 1.2 "Finanziamento di progetti presentati da giovani ricercatori", Finanziato dall'Unione Europea - NextGenerationEU. Progetto "Comp-SECOONDO" dal titolo "Computational Second-order Nano-oxides Nonlinear Disordered Photonics". Finanziamento 300.000 euro. Durata 3 anni. Responsabile (PI) Romolo Savo
- Finanziamento nell'ambito del bando MUR PRIN 2022, Progetto PHERMIAC dal titolo "Photonic High-Energy cosmic-RaMonitoring via Ising machines and Advanced Combinatorial optimization": Claudio Conti (PI)- Sapienza Università di Roma), Fabrizio Coccetti (Co-PI, Responsabile Unità CREF), budget 220 mila euro.



Figura: Spazi del laboratorio di Fotonica Computazionale del CREF ed esperimenti in corso.

3) Laboratorio Extreme Energy Events

Il laboratorio Extreme Energy Events (EEE) è situato al piano -1, stanza 403, della palazzina storica sede del Centro Ricerche Enrico Fermi (CREF). All'interno del laboratorio, mostrato nella figura seguente, è presente uno dei telescopi traccianti per muoni comici della rete EEE.

Il telescopio è costituito da:

- 3 rivelatori di tipo Multigap Resistive Plate Chambers (MRPC): rivelatori a gas, di circa 2 m² di area, che consentono di ricostruire il punto di passaggio di particelle subnucleari con precisione del cm² e con risoluzione temporale dell'ordine di 250 ps.;
- Crate VME (CAEN Spa) per il readout che ospita: due Moduli Time to Digital Converter (V1190A e V1190B, CAEN Spa) un modulo di interfaccia crate PC (Bridge USB V1718 CAEN Spa) e una scheda elettronica di "trigger" custom (dotata di ricevitore GPS per sincronizzazione temporale del telescopio);
- una stazione meteo custom (basata su Arduino);
- 1 alimentatore custom per fornire la tensione necessaria al funzionamento dei rivelatori MRPC;
- 2 Computer: uno dedicato alla gestione dell'alimentatore ed uno dedicato all'acquisizione dati;
- Oscilloscopio Tektronix WaveRunner 8254M (2.5 GHz, 40 GS/s);
- 1 rivelatore portatile accessorio basato su scintillatori (Cosmic Box).



Il laboratorio del Progetto EEE al CREF: visibile la struttura meccanica di sostegno dei tre rivelatori MRPC, i due PC per la gestione del funzionamento del rivelatore ed un oscilloscopio per controlli.

Il telescopio, che fa parte della rete di 50 telescopi installati in tutta Italia (la maggior parte dei quali all'interno di scuole superiori che collaborano in modo attivo al Progetto EEE), consente di rivelare e tracciare con grande precisione i muoni dei raggi cosmici; è poi possibile mettere in relazione il loro flusso con parametri ambientali locali o, tramite la sincronizzazione GPS, si possono studiare correlazioni tra eventi su grandi distanze. Ad oggi sono stati acquisiti, dalla rete EEE, più di 130 miliardi di tracce di muoni, utilizzate per diverse analisi. È allo studio anche la trasformazione degli algoritmi di tracciamento e di coincidenza tra muoni dello stesso sciame con l'approccio Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO), per poter effettuare alcune analisi mediante un computer fotonico in realizzazione al CREF. Contestualmente è in corso di progettazione l'utilizzo di sistemi di Intelligenza Artificiale (AI) per gli strumenti di monitoraggio del funzionamento della rete.

Oltre alla partecipazione alle fasi di presa dati congiunte del Progetto EEE il laboratorio al CREF è utilizzato per testare nuove soluzioni hardware da utilizzare su tutta la rete per futuri possibili upgrade ma anche nell'ambito di attività di outreach quali visite guidate o per laboratori didattici giornalieri durante i quali si possono effettuare misure anche utilizzando il rivelatore portatile basato su scintillatori, denominati Cosmic-Box.

Nei prossimi anni il laboratorio sarà utilizzato per:

- test di efficienza di rivelatori di particelle basati su Silicon Photomultiplier: è possibile sfruttare la capacità di tracciamento del telescopio per misurare l'efficienza di altri rivelatori (senza influire sulla acquisizione nell'ambito del programma di misure EEE)
- assemblaggio e test di rivelatori: la strumentazione presente in laboratorio permette di assemblare e testare rivelatori basati su scintillatori per futuri upgrade della rete di rivelatori EEE.
- il materiale e le apparecchiature potranno essere utilizzati per la costruzione di rivelatori tipo camera a nebbia per attività di terza missione del Centro Fermi.
- Ampliamento dell'offerta di fruizione per eventi di outreach: installazione monitor, poster, etc.

Risorse

Si prevede il rafforzamento dell'Infrastruttura CREF tramite la partecipazione in sinergia a bandi competitivi per l'acquisto di nuovo materiale e strumentazione per la ricerca da utilizzare sia in comune che peculiare per ogni laboratorio.

4) Laboratorio Sony Csl-Rome



Figura: Dettaglio degli spazi di Sony CSL-Rome.

Il Sony Computer Science Laboratories – Rome (Sony CSL-ROME) è ospitato al primo piano (mostrato nell'immagine a lato) della palazzina storica sede del Centro Ricerche Enrico Fermi (CREF) grazie ad un accordo scientifico con il CREF. In questo senso esso rappresenta un esempio unico di collaborazione pubblico-privato per lo sviluppo scientifico e tecnologico. Il laboratorio fa parte della rete dei laboratori Sony CSL, con sedi a Tokyo, Kyoto e Parigi e si distingue per un approccio interdisciplinare volto a risolvere sfide globali.

Al centro di un nutrito ecosistema di istituzioni pubbliche e private, italiane e internazionali, il laboratorio porta avanti attività teorico-computazionale organizzata secondo tre linee di ricerca principali, ognuna delle quali si concentra su tre dei temi più dibattuti al momento: **le Città Sostenibili** e il modo in cui concepirle e realizzarle, gli **Ecosistemi dell'Informazione** e il modo in cui curare le loro patologie (disinformazione, polarizzazione, tossicità), il ruolo che **l'Intelligenza Artificiale** potrebbe avere nelle nostre vite combinata con il potere della nostra creatività. Il fine ultimo è quello di svolgere ricerca di frontiera riconosciuta sulle più importanti riviste internazionali e mirare ad avere un impatto concreto nelle diverse aree di interesse. Il laboratorio si avvale degli strumenti e dei metodi più avanzati della fisica statistica, della scienza della complessità e dei dati, della scienza delle reti, del machine learning e dell'Intelligenza artificiale. A tal fine sfrutta estese risorse computazionali sia in loco sia nel cloud e collaborazioni con i più importanti centri di supercomputing europei. Infine, il laboratorio svolge un'intensa attività di comunicazione e disseminazione atta a costruire una posizione di rilievo scientifico per l'iniziativa congiunta Sony-CREF rispetto ai principali stakeholder del territorio, a livello locale, nazionale e internazionale. Questo impegno si traduce in attività di comunicazione come event managing, partnership a scopo divulgativo e scientifico, creazione e diffusione di informazioni inerenti alle attività di ricerca. Le attività descritte mettono entrambi i centri di ricerca all'interno di un network capillare di professionisti e di una rete fruttuosa di relazioni pubbliche.

Risorse

Sony CSL finanzia l'iniziativa congiunta con undici ricercatori (tra full-time e part-time) di Sony CSL-Rome e Sony CSL-Paris, le attrezzature di ricerca, l'acquisto di dati e comprende costi di viaggio, pubblicazione e disseminazione dei risultati, organizzazione di eventi. L'investimento annuale di Sony CSL si aggira intorno ad 1.5 milioni di euro. Il CREF, oltre a mettere a disposizione di Sony CSL-Rome uno spazio dedicato all'iniziativa congiunta, fornisce servizi essenziali quali utenze, accesso alla rete, pulizia, sicurezza, etc. In aggiunta il CREF finanzia due ricercatori post-doc dedicati all'iniziativa congiunta per un costo complessivo di circa 60 mila euro l'anno. A queste risorse si aggiungono risorse provenienti da progetti esterni nazionali ed internazionali.

5) Laboratorio Neuroimmagini

Il progetto NQN ha la sua sede operativa nel Laboratorio Neuroimmagini/MARBILab. Si tratta di un laboratorio congiunto condotto in cooperazione tra CREF e Fondazione Santa Lucia, e localizzato presso la sede di quest'ultima. Il laboratorio è diretto dal responsabile scientifico di NQN, e si compone di una sezione di Neurofisica (che raggruppa le attività del CREF) e di una sezione di Neuropsicologia (che comprende le attività della Santa Lucia).

Il laboratorio dispone di spazi per il personale, che accede direttamente o in remoto alle risorse di calcolo. Queste comprendono un motore di grid computing per il calcolo distribuito (128+ nodi di calcolo), con l'infrastruttura necessaria per l'elaborazione dei dati di neuroimaging, un database completo per i dati di neuroimaging, integrato con l'archiviazione centrale su SAN (200 TB). Inoltre, sono presenti otto workstation ad alte prestazioni (incluse capacità GPU) e numerosi strumenti software ottimizzati (sia di uso generale che sviluppati localmente) per l'elaborazione dei dati di neuroimaging. Il laboratorio è permanentemente connesso alla sede del CREF mediante una VPN stabile (LAN to LAN).

La principale dotazione strumentale del laboratorio è uno scanner MRI 3T di scala umana. Lo scanner è di proprietà della Fondazione Santa Lucia ed è accessibile ai ricercatori CREF in base a una convenzione che prevede parità di condizioni rispetto al personale interno. Si tratta di uno scanner progettato, configurato e usato esclusivamente per attività di ricerca. Lo scanner (Siemens Prisma) è caratterizzato da un'eccellente stabilità (garantita da controlli di qualità quotidiani e calibrazioni mensili) e da prestazioni molto elevate (64 canali di ricezione, due canali di trasmissione, gradienti capaci simultaneamente di 80 mT/m e 200 T/m/s, magnete altamente omogeneo con amplificatori shim ad alta potenza). Sono disponibili bobine testa a 32 e 64 canali e bobine per l'acquisizione di nuclei diversi dall'idrogeno

Lo scanner è particolarmente adatto per l'imaging funzionale, e accordi con partner di ricerca internazionali (Center for Magnetic Resonance Research in Minnesota, Harvard Medical School e altri) permettono la condivisione di sequenze di scansione sperimentali (codice) non disponibili commercialmente. Un accordo di ricerca con Siemens permette inoltre la programmazione a basso livello dello scanner. Nel corso del tempo sono state sviluppate soluzioni complete e integrate per il monitoraggio fisiologico, la stimolazione e il feedback del soggetto. Si segnalano tra l'altro pulsometro, cintura respiratoria, capnografo con campionamento di CO₂ e O₂, pulsantiera, trackball e altri trasduttori per l'interazione con il volontario, sistema di telecamere per la digitalizzazione della posizione degli arti, sistemi di stimolazione divisiva anche stereoscopici per realtà virtuale. Tutti i segnali sono sincronizzati con la scansione tramite triggering ottico. Il laboratorio dispone inoltre di un'officina meccanica, di un ambiente di programmazione e simulazione stimolazioni e di spazi per la gestione dei volontari e dei pazienti.

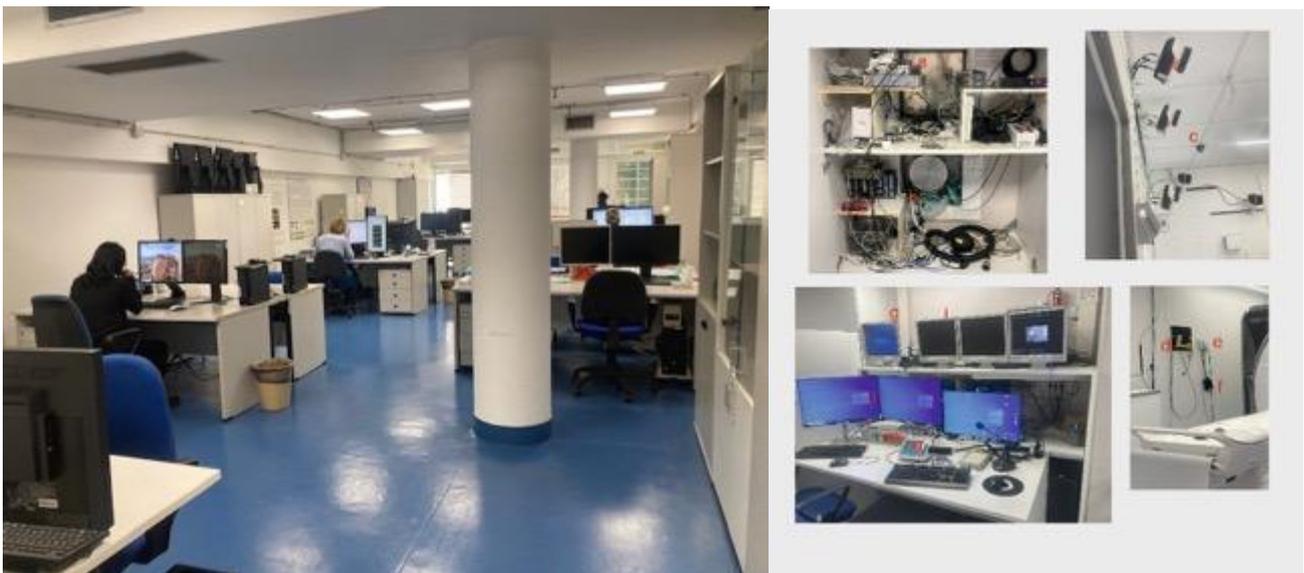


Figura: Sinistra: uno degli open space del laboratorio. Destra: strumentazione ausiliaria sviluppata per lo scanner Siemens Prisma 3T

Risorse

La fondazione Santa Lucia finanzia il laboratorio congiunto garantendo i locali, gli impianti e i servizi e la manutenzione dello scanner. L'investimento annuale della Santa Lucia si aggira sui 600000 €, di cui 240.000 € assorbiti dalla manutenzione dello scanner. Il CREF contribuisce con il proprio personale, con piccola strumentazione e con le dotazioni di calcolo.

6) Laboratorio Radio e Adro Terapia

La linea di ricerca RAT ha in programma lo sviluppo di un laboratorio situato al piano -1 dedicato alla realizzazione di strumentazione e misure presso il CREF. Si tratterà di un laboratorio congiunto condotto in cooperazione tra CREF e il Dipartimento Scienze di Base e Applicate per l'ingegneria (SBAI) della Sapienza Università di Roma. Il laboratorio sarà diretto dalla responsabile scientifica di RAT.

Il laboratorio disporrà di spazi per il personale, che accede direttamente o in remoto alla strumentazione, alle risorse di calcolo e ai sistemi di acquisizione dati. Queste comprenderanno una macchina filatrice per fibre scintillanti (attualmente ospitata presso il Dipartimento SBAI ma di proprietà del CREF), di sistemi di elettronica da banco per alimentazione di sistemi di readout e per l'acquisizione dati (create NIM e VME), un oscilloscopio, un computer per il daq e l'analisi dei dati.

Sarà inoltre presente una workstation ad alte prestazioni (includere capacità GPU) e strumenti software ottimizzati (sia commerciali che sviluppati localmente) per l'elaborazione dei dati e l'ottimizzazione di Treatment Planning System.

La principale dotazione strumentale del laboratorio in una prima fase sarà dedicata alla realizzazione di tracciatori a fibre scintillanti di diverso spessore, particolarmente dedicati alla rivelazione dei neutroni ultrafast. Verranno inoltre realizzati prototipi sistemi di imaging nucleare con scintillatori organici arricchiti con elementi ad alto Z. Gli scintillatori, prodotti presso la sezione del SBAI verranno infatti caratterizzati presso il laboratorio della sezione stessa e poi assemblati presso il laboratorio del CREF nei moduli prototipali del rivelatore di imaging SPECT. Infine, verrà assemblato, caratterizzato e valutato un wearable-dosimeter per radiometabolica con Lutezio 177.

Il laboratorio dispone inoltre di un ambiente di programmazione e simulazione e di spazi per la gestione del personale a tempo determinato ed i collaboratori.

Si prevede anche la realizzazione di installazioni per ampliare l'offerta di fruizione per eventi di outreach anche alla fisica dedicata alla cura dei tumori: installazioni, monitor, poster, etc.

Risorse

Il Dipartimento SBAI finanzia il laboratorio congiunto garantendo i locali, gli impianti e i servizi e l'utilizzo dell'officina meccanica del Dipartimento. Il CREF contribuisce con il proprio personale, con la strumentazione e con le dotazioni di calcolo.

ATTIVITÀ SCIENTIFICA E PROGETTUALE

A Breve descrizione delle principali linee di ricerca e delle loro finalità

Il CREF ha intrapreso negli ultimi anni un intenso lavoro di sviluppo di linee di ricerca strategiche ad alto impatto scientifico che quest'anno sono state organizzate principalmente in 4 principali filoni, come illustrato di seguito e descritto sotto sinteticamente.

A.1 Complessità

La Fisica e le scienze tradizionali, così come sono andate sviluppandosi negli ultimi secoli, non sono sempre strumenti sufficienti ad affrontare le complessità del mondo moderno. I grandi sconvolgimenti sociali a cui abbiamo assistito su scala locale e globale negli ultimi due decenni non possono essere pienamente descritti e spiegati attraverso un approccio di tipo riduzionista tipico della fisica tradizionale. In effetti tutti questi fenomeni possono essere descritti in termini di processi dinamici che si propagano con caratteristiche multiscala, schematizzabili ad esempio come reti complesse. Parallelamente, i recenti progressi nella comprensione della funzione e dell'organizzazione dei sistemi biologici hanno reso evidente che molti processi a livello di cellule, organi, organismi e popolazioni possono essere modellati come sistemi complessi. In campo sociale ed economico simili aspetti si ritrovano ad esempio nelle dinamiche di innovazione tecnologica e delle relative ricadute sia sulla competitività economica che sull'organizzazione sociale, con connessioni di tipo small world come quelle generate dai moderni sistemi di mobilità e trasporto.

Malgrado il suo originale impianto riduzionista, la fisica, grazie all'enorme bagaglio di tecniche analitiche e numeriche di modellizzazione di sistemi complessi e la sua capacità di adattarsi e integrare nuovi concetti, negli ultimi decenni ha comunque dimostrato di essere in grado di affrontare queste nuove sfide. In particolare, la moderna fisica statistica e la recente teoria dei sistemi complessi, unite alle sempre crescenti capacità di calcolo numerico e alla crescita esponenziale delle performance degli algoritmi di Intelligenza Artificiale, offrono strumenti fondamentali per l'analisi di grandi quantità di dati relativi a sistemi caratterizzati da un alto livello di complessità ed eterogeneità, e alla loro modellizzazione teorica.

In quest'area, l'attività del CREF si articola in quattro particolari ambiti di ricerca:

- Fisica Statistica e Sistemi Complessi nelle Scienze Naturali
- Complessità per lo sviluppo economico e tecnologico
- L'impatto dell'intelligenza artificiale sul tessuto socioeconomico e l'innovazione tecnologico
- Innovazione e Scenari Predittivi per la Sostenibilità

A.2 Fisica Applicata

La Fisica Applicata affonda le sue radici nell'origine stessa della scienza moderna e trasla in innovazione tecnologica le scoperte della Fisica Fondamentale, gettando un ponte tra l'investigazione delle leggi della natura e a loro concreta applicazione pratica. Si tratta di un'area fortemente interdisciplinare che abbraccia settori di grande rilevanza, dalla fisica medica alla conservazione dei beni culturali, dalle scienze dei materiali alle scienze ambientali. La Fisica Applicata svolge in tali settori un ruolo cruciale e favorisce una fruttuosa contaminazione tra diversi approcci metodologici.

In epoca recente abbiamo assistito ad una forte espansione dell'impatto della Fisica Applicata: dalla tecnologia dei semiconduttori fino alle sofisticate tecniche di imaging medico che hanno rivoluzionato l'assistenza sanitaria migliorando i metodi di trattamento e potenziando la ricerca biomedica. La macroarea del CREF dedicata alla Fisica Applicata si focalizza su questi due settori.

Lo studio della Fisica Medica, in particolare, è condotto in due ambiti diversi, che però convergono sulle esigenze generate da una società che invecchia.

La linea di ricerca su Radio e Adro Terapia si inserisce in tale contesto ed è dedicato all'ottimizzazione di tecniche di imaging nucleare ed allo sviluppo di terapie innovative. Nel campo dell'imaging la linea sta contribuendo allo sviluppo di sistemi di rilevazione SPECT (Tomografia a Emissione di Singolo Fotone) caratterizzati da buone prestazioni e basso costo, in modo da permettere l'uso su scala sempre più vasta. In ambito terapeutico, la linea sta realizzando un nuovo rivelatore, che consenta di stimare con più precisione la conformazione nel tempo e nello spazio della dose di radiazione rilasciata al paziente per la cura dei tumori, un parametro fondamentale per minimizzare i danni al tessuto sano.

La linea di ricerca su Neuroscienze e Neuroimaging Quantitativo unisce l'aspetto dello sviluppo tecnologico, in questo caso focalizzato su nuove tecniche MRI (Imaging con Risonanza Magnetica) per lo studio della funzione cerebrale, e la caratterizzazione dell'associazione tra l'elaborazione dell'informazione a livello corticale, il consumo di energia che la sostiene, e il substrato microstrutturale che ne permette la trasmissione. La linea studia in particolare la dinamica delle fluttuazioni cerebrali, spontanee o indotte dall'interazione con l'ambiente. A tal fine, le attività sono in parte dedicate alla caratterizzazione del segnale MRI funzionale ed allo sviluppo di metodiche per depurarlo da componenti indesiderate (per esempio fluttuazioni di origine cardiaca anziché neuronale).

La conoscenza approfondita dei materiali costituenti e dei fenomeni di degrado dei materiali di interesse storico-artistico richiede un approccio interdisciplinare che integri fisica, chimica e scienze dei materiali. La Fisica Applicata contribuisce in questo campo tramite lo sviluppo e l'utilizzo di tecniche di indagine come, ad esempio, la fluorescenza a raggi X (XRF) o la spettroscopia infrarossa (IR). La linea di ricerca su Fisica per i Beni Culturali al CREF è dedicata allo sviluppo e applicazione di metodiche analitiche per lo studio di materiali di rilevanza storico-artistica, ed ha l'obiettivo di mettere a punto tecnologie che consentano una migliore comprensione di struttura, composizione, processi di produzione e stato di conservazione dei beni culturali, sfruttando approcci analitici e computazionali. Le attività si estendono allo studio di beni librari in termini di materie prime ed efficacia di prodotti per la conservazione, alla caratterizzazione di manufatti metallici e ceramici e dei relativi metodi di produzione, allo studio di reperti organici (ossa, legni antichi, semi ritrovati in contesti archeologici, residui).

In quest'area, l'attività del CREF si articola nei seguenti particolari ambiti di ricerca:

- Neuroscienze e neuroimaging quantitativo
- Radio e Adro Terapia
- Fisica per i Beni Culturali

A.3 Fisica Fondamentale

La macroarea di Fisica Fondamentale esplora diversi ambiti innovativi, con l'obiettivo di approfondire la nostra comprensione dell'universo e superare i limiti delle attuali tecnologie.

Uno degli assi portanti è lo sviluppo di tecnologie fotoniche e intelligenza artificiale, con la realizzazione di sistemi di calcolo ottico avanzati che sfruttano l'interazione della luce laser con mezzi fotonici complessi. Questi dispositivi, basati su reti neurali ibride elettronico-fotoniche, promettono di rivoluzionare il calcolo ottimizzando la risoluzione di problemi complessi. Il machine learning viene inoltre impiegato per affinare le tecniche ottiche di caratterizzazione dei materiali, mentre modelli matematici avanzati consentono di simulare sistemi combinatoriali, esplorando sia la fisica classica che quantistica. Parallelamente, il Progetto Extreme Energy Events (EEE) porta la ricerca sui raggi cosmici direttamente nelle Scuole Superiori, coinvolgendo studenti e docenti nell'installazione e gestione di telescopi capaci di tracciare i muoni cosmici. Questa iniziativa non solo monitora il flusso di raggi cosmici a livello nazionale, ma con la missione PolarquEEEst ha esteso le osservazioni a latitudini estreme, come le Isole Svalbard, per approfondire lo studio di questi fenomeni. Nel campo della cinematica e dinamica delle galassie, si indaga la distribuzione della materia oscura attraverso l'analisi dei campi di velocità galattici. Un particolare focus è rivolto al modello del disco di materia oscura, che sfida l'ipotesi tradizionale di un alone sferico, offrendo una spiegazione più coerente con le curve di rotazione osservate nella Via Lattea e in altre galassie a spirale. L'astrofisica nucleare con sorgenti innovative si concentra invece sulla nucleosintesi, studiando i processi che hanno portato alla formazione degli elementi chimici, dal Big Bang alle reazioni stellari. In particolare, si estendono le misurazioni a condizioni di plasma ionizzato, simulando con maggiore fedeltà l'ambiente in cui questi processi avvengono in natura. Infine, i problemi aperti in meccanica quantistica rappresentano

una sfida fondamentale nella ricerca teorica e sperimentale. Attraverso l'uso di rivelatori avanzati e tecniche di machine learning, si indagano questioni come la connessione spin-statistica e il collasso spontaneo della funzione d'onda, cercando segnali di nuova fisica che possano contribuire alla formulazione di una teoria unificata della gravità quantistica. Queste linee di ricerca affrontano temi diversi ma accumulati dall'obiettivo di andare oltre i confini della conoscenza, combinando sperimentazione e teoria per rispondere ad alcune delle domande più profonde sulla natura della realtà. Il progresso in questi ambiti richiede quindi un approccio interdisciplinare, capace di mettere insieme modelli teorici avanzati, sperimentazioni all'avanguardia e l'uso di intelligenza artificiale a supporto dell'analisi e dell'interpretazione dei dati.

In quest'area, l'attività del CREF si articola nei seguenti particolari ambiti di ricerca:

- Tecnologie fotoniche e Intelligenza Artificiale
- Progetto Extreme Energy Events
- Cinematica e dinamica delle galassie
- Nuclear Astrophysics with innovative sources
- Problemi Aperti in Meccanica Quantistica

A.4 Museo Enrico Fermi

Il Museo Enrico Fermi, situato al pian terreno della palazzina di via Panisperna su una superficie di circa 400 metri, nasce dalla volontà di preservare e diffondere la memoria storica di Enrico Fermi e dei suoi collaboratori e, in generale delle vicende storiche e scientifiche che furono protagoniste in un periodo in cui la fisica italiana fu al centro del panorama della scienza.

È stato allestito in maniera permanente alla fine del 2019 e dal 2022, dopo la pandemia da Covid-19, il Museo ha riaperto i propri spazi al pubblico con l'insediamento di un Comitato tecnico, composto da ricercatori dell'Ente che si occupa dell'organizzazione, implementazione e gestione del Museo.

Il Museo vuole essere un ponte fra passato e futuro: un luogo dove la narrazione dell'eredità scientifica di Enrico Fermi si aggancia al presente e si rivolge direttamente alle nuove generazioni.

Come dimostrano le presenze, in continua crescita e nel 2024 di oltre 4.600 visitatori, di cui il 71% sono scuole. Si tengono anche attività specifiche quali PCTO e visite ai laboratori dell'ente che vengono utilizzati attivamente in percorsi di apprendimento stimolanti, proseguendo e approfondendo la visita museale.

A partire dal mese di marzo 2023 sono state organizzate alcune visite pilota per le scuole secondarie di primo grado (fascia di età degli studenti 11-13 anni) che hanno riscosso un grande successo. Questo ha comportato la creazione di un target di visita differente, adatta all'età e alla preparazione dei giovani studenti, anche attraverso l'utilizzo di materiali didattici e giochi educativi realizzati appositamente per l'occasione.

Il Museo è aperto altresì a Società e organizzazioni scientifiche mentre per la cittadinanza si organizzano Open-Day mensili pubblicizzati tramite il sito istituzionale del Museo e tramite i social media dell'Ente.

All'interno del Museo vengono presentate le tappe significative della vita di Fermi e delle sue scoperte, combinando in maniera innovativa oggetti e pannelli tradizionali con moderne tecnologie multimediali.

Specificamente, nel dicembre 2024 è stata inaugurata una nuova installazione, 1934 - Annus mirabilis, dedicata agli esperimenti del 1934 sulla radioattività indotta da neutroni che portarono al Nobel del 1938.

Uno degli obiettivi del Museo è infatti divulgare la scienza in maniera diversificata per avvicinare anche il pubblico di non specialisti in maniera semplice e accattivante.

Per questo il Museo partecipa, attraverso il coinvolgimento del personale di ricerca, ad attività di divulgazione come la Notte europea dei ricercatori, a festival della scienza -Genova e Roma- con laboratori, exhibit ed attività pensate anche per i più piccoli. Vengono altresì organizzate conferenze, presentazioni di libri e dibattiti sulla storia della fisica. Il Museo si propone quale punto di riferimento e hub di informazioni per produzioni televisive e radiofoniche su argomenti legati alla storia di via Panisperna.

Il Museo ha avviato un processo di inserimento sempre più efficace all'interno di un network per la diffusione della museologia scientifica in Italia e all'estero creando collegamenti con le Istituzioni e gli operatori interessati, attraverso uno scambio di opinioni e di notizie. Le collaborazioni in atto sono con l'Associazione Musei Scientifici Italiani (AMSI), il Museo Curie di Parigi, il Museo di Fisica di Sapienza di Roma e il Museo Egizio di Torino.

Centrale per la vita e valorizzazione del Museo è il ruolo della comunicazione. Attraverso una grafica moderna, l'uso di foto d'archivio e la definizione di uno stile verbale coerente, è stato progettato e realizzato un sito web dedicato al Museo, in grado di guidare i visitatori in tutto il percorso della visita, dalla prenotazione all'approfondimento dei contenuti.

Dal 2023 funziona anche una newsletter mensile.

Il lavoro di concerto tra Museo, personale di ricerca e comunicazione, ha permesso di creare una identità forte come punto di riferimento per la diffusione della storia legata a Fermi e al gruppo di via Panisperna, ma anche come luogo di scambio e di dialogo, in un confronto continuo tra storia, ricerca e divulgazione della scienza.

Oltre all'attività museale e di diffusione della cultura scientifica, sono attivi i seguenti ambiti di ricerca:

- Il Regio Istituto di Fisica a via Panisperna tra storia e ricerca. Protagonisti, metodi, scoperte, strumenti scientifici
- Sulle orme dei Ragazzi di via Panisperna: tra ricerca scientifica e impegno civile
- La Comunicazione del CREF e del Museo Enrico Fermi

B. Risultati ottenuti e obiettivi futuri

B.1. Complessità

L'area di ricerca sulla Complessità è articolata in diverse attività strettamente interconnesse. Questo campo di studi spazia dalla fisica statistica alle sue applicazioni nelle scienze naturali, nello sviluppo socioeconomico e nell'analisi dell'impatto dell'intelligenza artificiale.

Nell'ambito della **Fisica Statistica e dei Sistemi Complessi nelle Scienze Naturali**, un risultato di spicco è stato lo sviluppo dell'innovativo Gruppo di Rinormalizzazione Laplaciano (LRG). Questo metodo offre un nuovo potente strumento per analizzare la struttura multiscala delle reti complesse eterogenee, superando i limiti delle tecniche tradizionali. Permette una semplificazione iterativa delle reti, identificando cluster di nodi "simili" a diverse risoluzioni, e ha ottenuto riconoscimenti internazionali, come la copertina di Nature Physics nel 2023. Ha inoltre fornito nuove prospettive per lo studio della modularità e dell'organizzazione mesoscopica delle reti. Parallelamente, sono stati elaborati modelli stocastici di grafi basati sulla massima entropia, utili come modelli nulli per la validazione e la ricostruzione di reti reali. Questi approcci teorici sono stati applicati con successo a diverse aree interdisciplinari, tra cui l'analisi della robustezza degli ecosistemi, lo studio di serie temporali di attività cerebrale (fMRI), la modellizzazione epidemiologica durante la pandemia e l'analisi preliminare delle dinamiche climatiche.

Gli obiettivi futuri in quest'area prevedono di potenziare ulteriormente la teoria "LRG", completandone la formulazione fisico-statistica attraverso l'estensione delle relazioni di Fluttuazione-Dissipazione e applicandola a nuovi tipi di reti, come quelle segnate, rilevanti per lo studio dei vetri di spin e delle neuroscienze. Si punta a migliorare le tecniche di clusterizzazione per gestire reti di grandi dimensioni e consentire analisi in tempo reale, oltre a caratterizzare sistemi disordinati invariati di scala e analizzare fenomeni non-ergodici come le fasi di Griffiths. Le applicazioni della "LRG" verranno estese a un vasto spettro di sistemi: dalle reti di attivazione genica e cerebrali (per comprendere meccanismi patologici e disturbi psichiatrici) alla modellizzazione della genesi tumorale, dalle interazioni farmacologiche alle reti infrastrutturali (elettriche, di comunicazione), epidemiologiche, di disinformazione online ed economiche. Proseguirà inoltre lo studio dei modelli nulli massimamente entropici e l'applicazione di modelli stocastici e machine learning, come il Reservoir Computing, all'analisi multiscala e alla previsione a breve termine delle dinamiche climatiche, in collaborazione con enti come il Copernicus Climate Change Service (C3S) e SONY CSL. Infine, si esplorerà il legame tra le strutture ottimali osservate nelle reti mutualistiche ecologiche ed economiche e la teoria del trasporto ottimale.

Nel campo della **Complessità per lo Sviluppo Economico e Tecnologico**, il CREF ha consolidato il metodo dell'Economic Fitness and Complexity (EFC). Questo approccio innovativo, data-driven e basato su reti complesse e machine learning, modella le economie per prevederne la crescita e la competitività, dimostrando capacità predittive superiori a quelle del FMI e venendo adottato da istituzioni internazionali

come la World Bank e il Joint Research Center (JRC) della Commissione Europea. Attraverso l'analisi di network bipartiti, come quelli Paese-Prodotto, l'EFC identifica capacità produttive e suggerisce traiettorie di sviluppo. Accanto all'EFC, sono stati analizzati dati digitali e studiati fenomeni come la diffusione di (dis)informazione e le dinamiche online, portando all'identificazione di strutture quali le "echo chambers". Sono stati inoltre sviluppati e applicati metodi derivati dalla Network Theory, in particolare modelli nulli basati sulla massima entropia, per distinguere segnali rilevanti dal rumore statistico in complesse reti economiche e sociali, permettendo di validare strutture e identificare comportamenti significativi, come il coordinamento nella diffusione di disinformazione.

Per il futuro, l'obiettivo è potenziare l'EFC per affrontare temi concreti legati all'innovazione tecnologica, alla sostenibilità ambientale e sociale, al mercato del lavoro e alle catene globali del valore, con un occhio alle ricadute di policy. Si approfondiranno le basi teoriche dell'EFC, studiando le dinamiche spaziali delle "capabilities", integrandolo con dati microeconomici aziendali e collegandolo alla teoria del trasporto ottimale e ad altre teorie economiche ed ecologiche. L'analisi verrà estesa a nuovi "items" come i servizi e la mobilità lavorativa. Si studierà la complessità economica multilayer, integrando dati su produzione industriale, lavoro, brevetti e ricerca scientifica, e si analizzerà l'innovazione "verde" e il legame tra competitività e impatto ambientale. Proseguirà lo sviluppo e l'applicazione di modelli nulli massimamente entropici per diverse tipologie di reti e le ricerche in Computational Social Science, anche in collegamento a progetti finanziati come il PRIN PNRR "CODE". Una forte enfasi sarà posta sulla disseminazione dei risultati attraverso attività formative e divulgative, come la EFC Spring School.

Rispetto all'impegno sul tema dell'**impatto dell'Intelligenza Artificiale** (AI) sul Tessuto Socioeconomico e l'Innovazione, la ricerca ha portato allo sviluppo di nuovi algoritmi di IA, come il "Dreaming Learning", che permette un apprendimento continuo e creativo esplorando l'"Adiacente Possibile", gestendo dati non stazionari e mitigando problemi noti come il "Catastrophic Forgetting" e il "Model Collapse". È stato introdotto anche il "Lyapunov Learning", basato sul principio dell'"Edge of Chaos", per estendere queste capacità a dati multidimensionali. Strumenti di AI, in particolare i Large Language Models (LLM), sono stati impiegati con successo per analizzare grandi moli di dati non strutturati, come i brevetti, al fine di mappare competenze tecnologiche e prevedere traiettorie di innovazione, un approccio che ha ricevuto un riconoscimento dall'European Patent Office. Sono stati inoltre avviati studi preliminari sull'impatto dell'AI nel mondo del lavoro e sull'evoluzione delle dinamiche sociali online, con particolare attenzione al ruolo dei valori morali.

Gli obiettivi futuri in questo settore si concentrano sull'esplorazione delle potenzialità e dei limiti dell'AI. Si prevede di utilizzare intensivamente gli LLM per studiare e predire le dinamiche dell'innovazione, specialmente in relazione alla sostenibilità (inquinamento, materie prime critiche, transizione energetica), estendendo l'analisi a pubblicazioni scientifiche e repository di codice come GitHub. Si mirerà a mappare le competenze tecnologiche su base geografica e semantica e a misurare le distanze tra ambiti tecnici per anticipare innovazioni ricombinanti. Gli LLM saranno anche usati per indagare fenomeni sociali complessi, come scontento e disuguaglianze, a partire dalle discussioni nelle comunità online. Sul fronte teorico, si approfondiranno gli algoritmi di Creatività Artificiale come il Dreaming Learning e il Lyapunov Learning, studiandone le basi formali e applicandoli a problemi reali (clima, ecosistemi) e a diversi tipi di IA generativa. Verranno sviluppati sistemi AI di supporto alla creatività umana, inclusi agenti autonomi e modelli per l'analisi del movimento umano (Large Movement Model - LMM), con un focus iniziale sulla danza. Si quantificherà l'impatto socioeconomico dell'IA sul mercato del lavoro, analizzando l'esposizione occupazionale, le competenze emergenti e il ruolo dell'opinione pubblica e dell'etica. Infine, si studierà l'interazione tra valori umani e valori incorporati nei sistemi di IA ("IA Responsabile"), valutando come l'IA comprende i costrutti morali e quale ruolo gioca nelle discussioni online.

L'attività sull'**innovazione e gli Scenari Predittivi per la Sostenibilità** è al centro dell'Iniziativa Congiunta CREF-Sony (JICS). Questa collaborazione unica tra pubblico e privato mira a integrare scienza, arte e impegno pubblico per affrontare le sfide globali allineate agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs). Tra i risultati già ottenuti vi è il potenziamento della piattaforma "what-if" dedicata al concetto di "città dei 15 minuti", il cui studio è stato pubblicato su Nature Cities, ottenendo risonanza internazionale. È stata avviata l'applicazione del framework EFC all'analisi dell'accessibilità e della mobilità urbana ed è stato lanciato un progetto pilota smart city, in collaborazione con Sony Semiconductor Solutions e Sapienza, che utilizza sensori avanzati per analisi del traffico e della sicurezza stradale nel rispetto della privacy. Sono inoltre

iniziate le analisi sull'ecosistema dell'informazione (Infosfera) e sull'interazione uomo-IA per la Creatività Aumentata, sfruttando metodi come il Dreaming Learning e avviando lo sviluppo del Large Movement Model.

Per il futuro, JICS si propone di sviluppare ulteriormente tecnologie "what-if" per analizzare l'accessibilità, l'inclusività e le dinamiche economiche urbane, creando metriche avanzate e strumenti di modellazione per la pianificazione urbana globale, che verranno implementati in dashboard per policy maker. Continuerà la ricerca sulla città dei 15 minuti e sull'uso di EFC per comprendere le disuguaglianze urbane. Sul fronte dell'Infosfera, si approfondirà l'analisi delle dinamiche informative (bias, sistemi di raccomandazione) e si svilupperanno strumenti e strategie per migliorare la qualità, la diversità e la trasparenza dell'informazione accessibile online, contrastando la polarizzazione e la tossicità, ad esempio tramite una piattaforma di analisi del discorso pubblico e un plugin per browser. Nell'ambito della Creatività Aumentata, si studierà la sinergia uomo-IA, si potenzieranno gli approcci di IA non stazionaria e si svilupperà il Large Movement Model estendendone le applicazioni dalla danza alla riabilitazione, allo sport e alla conservazione culturale, con l'obiettivo di favorire la nascita di una nuova generazione di IA a supporto delle capacità umane.

B.2 Fisica Applicata

La Fisica Applicata trasla in innovazione tecnologica le scoperte della Fisica Fondamentale, gettando un ponte tra l'investigazione delle leggi della natura e a loro concreta applicazione pratica. Si tratta di un'area fortemente interdisciplinare che abbraccia settori di grande rilevanza, dalla fisica medica alla conservazione dei beni culturali, dalle scienze dei materiali alle scienze ambientali. La Fisica Applicata svolge in tali settori un ruolo cruciale non solo nell'ambito più tradizionale dello sviluppo di nuove tecnologie di indagine, ma anche favorendo una fruttuosa contaminazione tra diversi approcci metodologici sia di carattere sperimentale, sia di carattere modellistico e computazionale.

In particolare, gli sviluppi della fisica medica hanno rivoluzionato l'assistenza sanitaria migliorando da un lato le capacità diagnostiche e i metodi di trattamento, dall'altro il potenziale della ricerca biomedica. D'altro canto, il crescente ruolo della fisica nell'ambito della conoscenza e valorizzazione dei beni culturali contribuisce alla più efficace salvaguardia del patrimonio culturale, obiettivo di grande importanza in particolare per una nazione ricca di patrimonio culturale. La macroarea del CREF dedicata alla Fisica Applicata si focalizza su questi due settori.

Nel corso degli ultimi anni l'area di Fisica applicata ha prodotto numerosi risultati nelle sue diverse articolazioni.

Riguardo la linea su **Neuroscienze e Neuroimaging quantitativo**, abbiamo messo a punto tecniche di misura della reattività cerebrovascolare (CVR). La CVR è la capacità dei vasi sanguigni di rispondere a stimoli vasoattivi. Abbiamo messo a punto la tecnica di misura della CVR mediante somministrazione di piccole dosi di CO₂, e abbiamo acquisito dati su volontari sani e pazienti alzheimeriani. Abbiamo anche iniziato la messa a punto della metodica per estrarre informazioni metaboliche (consumo di ossigeno) da dati CVR. Tali informazioni saranno combinate con le informazioni di carattere metabolico ottenute da dati spettroscopici al fine di arricchire la caratterizzazione metabolica della funzione cerebrale su cui abbiamo già ottenuto e pubblicato numerosi risultati. Gli esperimenti funzionali con spettroscopia MR hanno incluso uno stimolo visivo in grado di generare una deattivazione funzionale, somministrato in un design a blocchi. I risultati hanno confermato una significativa disattivazione nel lobo occipitale. I dati spettroscopici supportano l'ipotesi di un disaccoppiamento metabolico durante la deattivazione. Abbiamo in particolare osservato un mismatch tra le dinamiche di lattato e glutammato, che suggerisce un transiente disaccoppiamento tra metabolismo citoplasmatico e mitocondriale.

Va notato che l'affidabilità della quantificazione spettrale è alterata dal movimento del paziente. Tale effetto è particolarmente critico in studi funzionali, che studiano variazioni temporali del contenuto metabolico, e sono soggetti a progressiva stanchezza del volontario. Per risolvere questo limite abbiamo messo a punto, in collaborazione con Sapienza, INFN e CNR, una innovativa tecnica di motion correction predittiva basata su AI, in grado di identificare i movimenti del soggetto e, in base ad un modello, di prevedere il movimento nell'immediato futuro, in modo da adattare in tempo reale i parametri di scansione.

L'estensione di tecniche metaboliche a soggetti affetti da patologie cerebrali non è immediata. Abbiamo pertanto sviluppato tecniche di risonanza magnetica basate sull'imaging ²³Na in combinazione con la risonanza magnetica quantitativa per identificare potenziali biomarcatori della malattia ed esplorare i

processi fisiopatologici alla base del danno tissutale microstrutturale e del deterioramento cognitivo. Il sodio, infatti, ha un ruolo fondamentale in molte funzioni fisiologiche e biochimiche. In particolare, l'omeostasi del sodio è associata a neuroinfiammazione, con potenziale sensibilità ad alterazioni vascolari e metaboliche. Uno dei problemi più importanti dell'imaging del sodio è il suo scarso SNR, dovuto principalmente al basso rapporto giromagnetico ed al rilassamento quadrupolare. Per mitigare tale problema abbiamo messo a punto apposite tecniche di denoising (basate su Unbiased Non Local Mean, U-NLM) e le abbiamo integrate con tecniche di calibrazione per la quantificazione assoluta del sodio. Al momento è in corso l'acquisizione dei dati su una coorte di pazienti AD.

la linea su **Radio e Adroterapia** ha ottenuto risultati su tutti i progetti in corso. In particolare, il progetto ReSPECT punta a utilizzare scintillatori plastici, noti per rapidità di segnale, basso costo e facilità di fabbricazione, arricchendoli con impurità ad alto Z (come il Bismuto) per migliorare l'assorbimento fotoelettrico dei raggi gamma. Il Laboratorio di Elettrochimica e Sintesi Organica (LEOS) e il CREF hanno sviluppato scintillatori polimerizzati contenenti queste impurità. La caratterizzazione di tali campioni è stata un'attività cruciale per il progetto e ha permesso di selezionare il comportamento di vari fluorofori al variare della concentrazione di "impurezze", al fine di massimizzare le prestazioni. Inoltre, le performance del rivelatore nella sua interezza sono state valutate tramite Montecarlo. Questo ha richiesto lo sviluppo di un tool di simulazione che potesse tenere in conto del sistema nella sua interezza. Le performance così ottenute guidano la scelta dei parametri cruciali come dimensione dei segmenti di scintillatore e le caratteristiche dell'elettronica di lettura. Riguardo *Radioterapia e Terapia con particelle pesanti*, il progetto MULTIPASS fonda le sue radici nei risultati ottenuti con il tracciatore Dose Profiler (oggi al CNAO). Inoltre, il progetto MONDO, ci ha permesso di realizzare dei primi prototipi di rivelatore a fibre compatte, e di sviluppare una prima versione del sensore di readout. I risultati ottenuti e il know how acquisito sono stati poi approfonditi e rielaborati grazie allo sviluppo di tool MC dedicati che hanno permesso di simulare il rivelatore di MULTIPASS nella sua completezza. Questi studi in silico sono i primi passi cruciali per il miglioramento della radioterapia e dell'analisi neutronica e hanno permesso di individuare in un tracciatore a fibre multi-particle lo strumento ottimale. Al fine di poter studiare il contesto clinico della RT e CPT, in sinergia con il dipartimento SBAI, è stato sviluppato FRED (Fast paRticle thErapy Dose evaluator), un software per la pianificazione di trattamenti basato su simulazioni Monte Carlo rapide (fino a mille volte più veloci grazie alle GPU). FRED ottimizza i piani terapeutici, riducendo la dose e i danni agli organi sani, e supporta valutazioni per tecniche VHEE e fotoni. È stato anche studiato l'effetto FLASH, che diminuisce la tossicità nei tessuti sani in condizioni UHDR. È stato inoltre portato avanti uno studio di fattibilità per la realizzazione di un rivelatore di monitor di fascio erogato in modalità di UHDR che sfrutta la fluorescenza dell'aria. In questi ultimi due anni sono state portate a termine delle campagne di misure che hanno permesso di verificare la fattibilità di un tale rivelatore.

La linea di **Fisica per i Beni culturali** è stata attiva nello sviluppo di nuove metodologie di indagine applicate allo studio di materiali compositi di interesse storico-artistico nell'ambito dei beni librari, dei metalli, dei reperti ossei e legni, e delle ceramiche. L'utilizzo di tecniche di machine learning e intelligenza artificiale a dati spettroscopici ha fornito significativi risultati nell'ambito della classificazione e estrazione di benchmark microscopici.

Nell'ambito dello studio di *beni librari* è stata sviluppata una nuova metodologia di indagine per lo studio di testi manoscritti. In particolare, sono state applicate tecniche di spettroscopia e machine learning per la definizione dell'attribuzione del testo sulla base della composizione degli inchiostri. La procedura è stata applicata con successo allo studio di un manoscritto autografo del gesuita Antonio Vieira, uno dei grandi autori europei del XVII secolo, considerato il padre della lingua portoghese. Sono stati identificati, in particolare, un autore principale e quattro autori secondari, i quali hanno contribuito al processo di revisione, censura e riorganizzazione dell'opera.

Nell'ambito dello studio dei *metalli* è stata dimostrata l'efficacia di una nuova metodologia per l'identificazione delle tecniche di lavorazione delle leghe metalliche nell'antico Egitto tramite diffrazione e fluorescenza a raggi X in combinata con tecniche di machine learning applicando metodi di classificazione ed integrando i risultati con informazioni relative a caratteristiche macroscopiche. Lo studio ha riguardato 12 oggetti in lega di rame, parte del corredo funerario dell'architetto del faraone Kha e di sua moglie Merit, risalente alla metà della XVIII dinastia, custodito presso il Museo Egizio di Torino. Lo studio ha permesso l'identificazione dei metodi e i processi di lavorazione delle leghe.

Nell'ambito dello studio dei *reperti ossei e legni* sono stati effettuati i primi studi riguardanti l'individuazione di biomarcatori di riferimento in funzione delle condizioni di combustione tramite l'applicazione di tecniche combinate di spettroscopia infrarossa, diffrazione e scattering di neutroni. Sono stati studiati i cambiamenti microstrutturali dei reperti ossei durante il processo di combustione. La metodologia sviluppata è stata applicata con successo a reperti provenienti dal contesto sepolcrale denominato "Ipogeo delle Ghirlande", (Grottaferrata, Lazio) e risalente al I-II secolo d.C. Lo studio ha fornito significative indicazioni riguardo ai riti funerari in età imperiale.

Lo studio delle *ceramiche* è stato condotto nell'ambito del progetto PRIN 2022 SLOW SUMER che intende esaminare l'utilizzo, il riutilizzo e il riciclo di materiali nella antica società sumera tra il 2500 e il 2000 a.C. Il progetto si basa sull'integrazione di dati chimico-fisici, archeologici e filologici e l'applicazione di metodi scientifici avanzati e machine learning.

B.3. Fisica fondamentale

La vasta area di ricerca della Fisica di base si articola in quattro tematiche, già consolidate, che spaziano dalle *Tecnologie Fotoniche e Intelligenza Artificiale* allo studio di *Problemi Aperti in Meccanica Quantistica*, passando per il *Progetto Extreme Energy Events* e dallo studio della *Cinematica e Dinamica delle Galassie*. Ad esse si aggiunge, in prospettiva, l'apertura della nuova linea di ricerca dedicata alla *Astrofisica Nucleare con Sorgenti Innovative*. L'area di ricerca della Fisica di Base del Centro Fermi è caratterizzata da una rapida evoluzione, con un numero crescente di ricercatori, un ottimo livello qualitativo dei prodotti della ricerca e un altrettanto ottimo livello di citazioni delle pubblicazioni.

Il progetto di ricerca sulle **Tecnologie Fotoniche e Intelligenza Artificiale**, mira a sviluppare nuovi sistemi fotonici con lo scopo di realizzare macchine di calcolo ottico innovative, capaci di superare i limiti delle macchine di calcolo tradizionali, di essere più performanti e di consumare meno energia. All'interno di questo progetto di ricerca si articolano sia attività sperimentali sia attività teoriche. L'attività sperimentale esplora l'uso della luce laser e la sua interazione con mezzi fotonici complessi per affrontare problemi di ottimizzazione combinatoria e per implementare reti neurali ibride elettroniche e fotoniche. L'attività teorica è volta a sviluppare modelli matematici avanzati per la simulazione di sistemi combinatoriali che siano rappresentabili come sistemi di spin e testare l'efficienza di nuovi algoritmi di calcolo. Nel lungo termine, l'inclusione di algoritmi quantistici potrà aumentare la velocità di calcolo, oltreché suggerire innovativi metodi di crittografia. L'utilizzo di sorgenti laser impulsate "ultraveloci" (femtosecondo) è un elemento chiave della ricerca del laboratorio e consente di studiare i materiali di interesse nel regime ottimo non lineare. Il laboratorio ha recentemente dimostrato la realizzazione della prima rete neurale fotonica, di tipo "deep", su larga scala basata su scattering multiplo di impulsi laser e sulla generazione non lineare di seconda armonica in campioni policristallini disordinati fabbricati assemblando nanocristalli di niobato di litio (LNO). Nel futuro si prospetta la possibilità di: realizzare una macchina di Ising fotonica con interazione a multi-corpo, basata su scattering multiplo di impulsi laser e sulla generazione non lineare di seconda armonica in campioni policristallini disordinati fabbricati assemblando nano cristalli di niobato di litio (LNO); realizzare una macchina di Ising in regime lineare su larga scala che utilizza luce laser continua e propagazione in spazio libero; sviluppare una tecnica innovativa di "phase unwrapping" per mappe di fase bidimensionali a quadranti, basata su una procedura di classificazione da reti neurali artificiali convolutive.

Il **Progetto Extreme Energy Events (EEE)** è un esperimento per la misura e lo studio dei Raggi Cosmici a terra, cui si associa un innovativo e incisivo programma per la diffusione della cultura scientifica. EEE, infatti, con l'intento di distribuire capillarmente i rivelatori sul territorio, prevede l'installazione di telescopi traccianti per muoni cosmici nelle scuole italiane: studenti e insegnanti sono coinvolti in tutte le fasi, dalla costruzione dei rivelatori all'analisi dei dati. Nonostante siano stati scoperti oltre un secolo fa, lo studio dei raggi cosmici è ancora oggi al centro di ricerche avanzate, che affrontano questioni fondamentali della fisica, dell'astrofisica e della cosmologia. Il Progetto EEE rappresenta un unicum, per continuità di operazioni e diffusione sul territorio nazionale, come esperimento per la misura monitoraggio al suolo della radiazione cosmica, con un forte ed innovativo programma di diffusione della cultura scientifica, che, dal 2005, vede ogni anno diverse centinaia di studenti impegnati nelle sue attività. All'interno del Progetto EEE è nata la Missione PolarquEEEst per la quale sono stati costruiti, tre rivelatori a scintillazione compatti per lo studio e monitoraggio del flusso dei raggi cosmici a latitudini estreme, i rivelatori POLA-R (POLA-01/02/03). Nel 2018 POLA-01 è stato installato a bordo del battello Nanuq che ha circumnavigato le Svalbard misurando

il flusso di raggi cosmici fino a 82° N e successivamente i tre rivelatori sono stati installati nella base di Ny Alesund, alle isole Svalbard (Norvegia), presso la stazione Dirigibile Italia, per lo studio e monitoraggio continuo del flusso dei raggi cosmici a latitudini estreme. Il flusso misurato dai rivelatori in funzione rivela la periodicità annuale (effetto estate inverno) e può investigare il possibile calo del flusso in accordo con il ciclo solare. La prosecuzione della campagna di misura a Ny Alesund permetterà di coprire l'intera durata del ciclo solare (11 anni) e continuare gli studi di periodicità in corso.

La linea di ricerca relativa alla **Cinematica e Dinamica delle Galassie** ha tra i principali obiettivi lo studio, attraverso la misurazione dei campi di velocità galattici, del modello del disco di materia oscura (DM) dove si ipotizza sia confinata la DM e in particolare nei dischi delle galassie a spirale. A questi corrispondono, infatti, profili di massa e cinematici distinti rispetto al modello standard, in cui la DM forma un alone quasi sferico con una distribuzione di velocità isotropa. Viene, inoltre, investigata la struttura cinematica dello spazio delle fasi, sia della nostra galassia sia in galassie esterne, mettendola in relazione al meccanismo dinamico che ne ha dato origine. Questi studi sono resi possibili grazie ai dati raccolti dal satellite Gaia dell'Agenzia Spaziale Europea, lanciato nel 2013, che ha rivoluzionato la nostra comprensione della Via Lattea (MW) grazie a misurazioni angolari con una precisione compresa tra 20 e 200 microarcosecondi. I futuri dataset della missione Gaia potranno ulteriormente estendere gli studi cinematici e contemporaneamente fornire un'ulteriore conferma del metodo di deconvoluzione statistica sviluppato per misurare in maniera quantomai precisa la curva di rotazione della MW. Tra gli obiettivi futuri possiamo considerare: *l'analisi del campo di velocità della Via Lattea (MW)*, per ricavarne informazioni preziose sulla curva di rotazione e sulla dipendenza di questa curva dall'altezza verticale rispetto al piano galattico. Queste indagini offriranno una visione completa della cinematica e della dinamica della Via Lattea; *la mappatura dei campi di velocità delle galassie esterne*, attraverso l'uso di misurazioni bidimensionali delle componenti di velocità radiale e trasversale ottenute con l'innovativo metodo sviluppato. Questo approccio consentirà di vincolare i flussi in ingresso e in uscita di idrogeno neutro nelle regioni esterne delle galassie. Analizzando l'interazione tra materia oscura (DM) e materia barionica (BM), sarà possibile studiare la formazione dei bracci a spirale e la distribuzione della materia, fornendo nuove prospettive sulla formazione e l'evoluzione delle galassie; *l'analisi della geometria della distribuzione della materia oscura (DM)*, in particolare tramite le curve di rotazione della Via Lattea e delle galassie esterne; *l'indagine della DM nelle galassie a disco* tramite osservazioni di lensing gravitazionale forte.

La linea di ricerca sui **Problemi Aperti in Meccanica Quantistica (PAMQ)** prevede un programma integrato teorico e sperimentale volto ad affrontare problemi aperti della meccanica quantistica e della sua unificazione con la gravità. La ricerca si concentra principalmente sull'analisi della connessione spin-statistica e sul collasso spontaneo della funzione d'onda, impiegando tecniche avanzate di fisica atomica in una serie di esperimenti che sfruttano tecnologie all'avanguardia. Ad oggi i due principali filoni teorici che prevedono una violazione della spin-statistica sono: il "Quon" model e la Gravità Quantistica (QG). PAMQ indaga i modelli di collasso spontaneo (Continuous Spontaneous Localization (CSL)) ed i modelli di collasso indotto dalla gravità sviluppati da Diosi e Penrose (DP) che offrono un approccio fenomenologico rigoroso. PAMQ si prefigge di testare le simmetrie fondamentali del Modello Standard con risoluzione sempre crescente. Questi risultati forniscono l'input fondamentale ai modelli fenomenologici, come Quon, e permetteranno la verifica sperimentale dei nuovi modelli di parastatistica. Tra i risultati significativi, PAMQ ha già vincolato i modelli NCQG theta-Poincaré e Minimal Length fino a circa un decimo della scala di Planck. È in fase di sviluppo un *prototype setup* basato su un rivelatore attivo Broad-Energy-Germanium (BEGe), con l'obiettivo di testare theta-Poincaré NCQG e Minimal Length fino alla scala di Planck, migliorando la sensibilità di oltre un ordine di grandezza. L'esperimento *VIP-sistemi-aperti*, con l'apparato migliorato sta producendo valori limiti per la violazione del *Principio di Esclusione di Pauli* (PEP) di ordini di grandezza superiori rispetto a quanto è noto. Per quanto riguarda i modelli di collasso spontaneo, PAMQ incrementerà la sensibilità delle misure di radiazione spontanea, sia dal punto di vista teorico, applicando la nuova teoria a modelli di collasso generalizzati (non-Markoviani), sia dal punto di vista sperimentale con nuovo rivelatore al germanio, che permetterà di esplorare recenti modelli unificati di gravità e quantistica.

La nuova linea relativa alla **Nuclear Astrophysics with innovative sources** si prefigge lo studio e la misura dei processi nucleari che partecipano alla formazione degli elementi in ambito astrofisico, estendendo le misure delle sezioni d'urto dei processi nucleari di rilievo – fino ad oggi misurati principalmente in

laboratorio, con gli elementi in forma neutra – all'ambiente di plasma, dove gli elementi compaiono nella loro forma ionizzata. Quest'ultimo scenario riproduce più accuratamente, infatti, l'ambiente stellare in cui i processi avvengono in natura, e permette una stima più realistica dei parametri di interesse. La fisica nucleare svolge quindi un ruolo fondamentale nello studio delle abbondanze relative degli elementi dell'universo: una accurata misura delle sezioni d'urto per i processi di fusione, di cattura neutronica e delle vite medie per decadimento beta, risulta strategica per valutare la competizione tra i possibili processi e stimare quale di essi avrà luogo. Il progetto si prefigge di delineare una campagna sperimentale volta alla misura dei processi di fusione e delle vite medie per decadimento beta in ambiente ionizzato. Quest'ultimo può essere creato attraverso un laser ad alta intensità, che raggiungendo un bersaglio composto dall'isotopo da analizzare produce un'immediata ionizzazione dello stesso portando alla formazione di un plasma, nel tentativo di riprodurre il più accuratamente possibile l'ambiente stellare. Ad oggi, sono presenti misure di sezioni d'urto per processi di fusione con elementi neutri, e un'unica misura in ambiente di plasma, ma è necessario raccogliere una statistica sufficiente per stimare significativamente la presenza di un effetto nel processo di fusione dovuto allo screening elettronico. Un altro aspetto riguarda lo studio della variazione delle vite medie per decadimento beta nel plasma con alcune osservazioni effettuate presso gli anelli di accumulazione. Il presente progetto, pianificato in collaborazione con il gruppo sperimentale del progetto PANDORA, si prefigge un'estensione del programma scientifico di PANDORA. In particolare, il progetto ambisce ad un'espansione del dominio termodinamico del plasma prodotto con il metodo dell'Electron Cyclotron Resonance (ECR) attraverso la realizzazione delle misure in un plasma prodotto da laser.

B.4. Museo Enrico Fermi

La duplice missione del CREF intreccia la valorizzazione del patrimonio storico-scientifico legato all'Istituto di Fisica di via Panisperna con la promozione della ricerca d'avanguardia. Le attività di ricerca storica e la strategia di comunicazione sono intrinsecamente connesse per raggiungere questi scopi.

La **ricerca storica** condotta dal CREF si è concentrata sulla ricostruzione delle vicende scientifiche, istituzionali e biografiche legate al Regio Istituto di Fisica nel periodo cruciale in cui la fisica italiana era protagonista sulla scena internazionale. Tra i risultati ottenuti, vi è un approfondimento significativo delle figure chiave come Pietro Blaserna e Orso Mario Corbino, analizzando il loro ruolo direttivo, le relazioni con Enrico Fermi e il suo gruppo, e i rapporti con altre figure eminenti come Guglielmo Marconi, anche in relazione alla politica della ricerca dell'epoca. Un'attenzione particolare è stata dedicata al contributo, spesso trascurato, delle scienziate che lavorarono all'Istituto (da Matilde Marchesini a Ginestra Giovene) e alle collaborazioni di Fermi con scienziate negli Stati Uniti (come Leona Woods e Maria Goeppert-Mayer), contribuendo anche alle finalità del Gender Equality Plan del CREF. Sono state studiate le traiettorie scientifiche di figure come Gian Carlo Wick, Franco Rasetti e Bruno Pontecorvo, e analizzato il periodo successivo alla partenza di Fermi, con la leadership di Edoardo Amaldi e l'entrata in funzione dell'acceleratore Cockroft-Walton. Questi studi, basati su rigorosa analisi di fonti archivistiche e pubblicazioni, hanno già prodotto risultati concreti per l'outreach e il mondo multimediale, alimentando direttamente i contenuti del Museo Enrico Fermi, come la timeline storica nel nuovo ingresso e l'installazione "1934-Annus mirabilis".

Gli obiettivi futuri della ricerca storica mirano a indagare aspetti ancora poco noti del periodo tra l'Unità d'Italia e il secondo dopoguerra, utilizzando un approccio multidisciplinare. Per il 2025, in occasione di importanti anniversari, si prevede una ricerca specifica sulla figura di Arturo Malignani e sul suo brevetto per le lampadine elettriche, finalizzata a una pubblicazione storico-scientifica. È inoltre prevista la realizzazione di un docufilm dedicato a Ginestra Giovene. Si continuerà a ricostruire la ricerca fisica a Roma durante la guerra, ad approfondire le traiettorie di figure "minori" e a celebrare il centenario della meccanica quantistica (2025) studiandone la ricezione in Italia attraverso riviste come "Il Nuovo Cimento" e il ruolo delle accademie. L'obiettivo è fornire un quadro più fedele di questo periodo storico, evidenziando il valore culturale e didattico della storia della fisica.

La strategia di **comunicazione** del CREF ha ottenuto risultati significativi nel connettere passato, presente e futuro. È stato rinnovato il sito web istituzionale e creato un sito dedicato al Museo, moderno e interattivo, che facilita la prenotazione e offre materiali di approfondimento. È cresciuta la consapevolezza pubblica della storica Palazzina di via Panisperna grazie a eventi e conferenze, supportata da un'identità visiva dinamica che unisce elementi storici e moderni. La divulgazione è stata potenziata tramite conferenze

("Lezioni Aperte", ciclo sul Progetto Manhattan), archiviate su YouTube, e una gestione strategica dei canali social (con crescita dimostrata dei follower) e della newsletter. La partecipazione a eventi nazionali (Quantum Weeks, Rome Future Week) e le collaborazioni con i media (Rai, Mediaset) hanno consolidato il CREF come punto di riferimento per la storia della fisica italiana.

Gli obiettivi futuri della comunicazione sono volti a supportare ulteriormente la crescita e la visibilità dell'Ente e del Museo. Si punta a semplificare la comunicazione della ricerca raggruppandola in aree di ricerca, diffondendone i risultati e promuovendo il CREF come centro di formazione per attrarre talenti. Si intendono favorire collaborazioni e valorizzare le infrastrutture di ricerca. Per il Museo, si vuole facilitare l'accesso alla visita, arricchire l'esperienza online pre e post visita, preservare la memoria storica e promuovere un'idea di museo scientifico dinamico. Si lavorerà per aumentare la visibilità e coinvolgere pubblici diversi con contenuti mirati e scientificamente rigorosi. Verranno anche offerti seminari per migliorare le capacità di divulgazione dei ricercatori. L'obiettivo generale è rafforzare la consapevolezza del ruolo del CREF, fornire informazioni chiare e coinvolgere il pubblico, consolidando l'identità dell'ente come luogo d'incontro tra storia, ricerca e divulgazione.

C. - Elenco dei principali progetti di ricerca previsti per il triennio, con breve descrizione degli obiettivi e dei risultati attesi

C.1 Fisica Statistica e Sistemi Complessi nelle Scienze Naturali

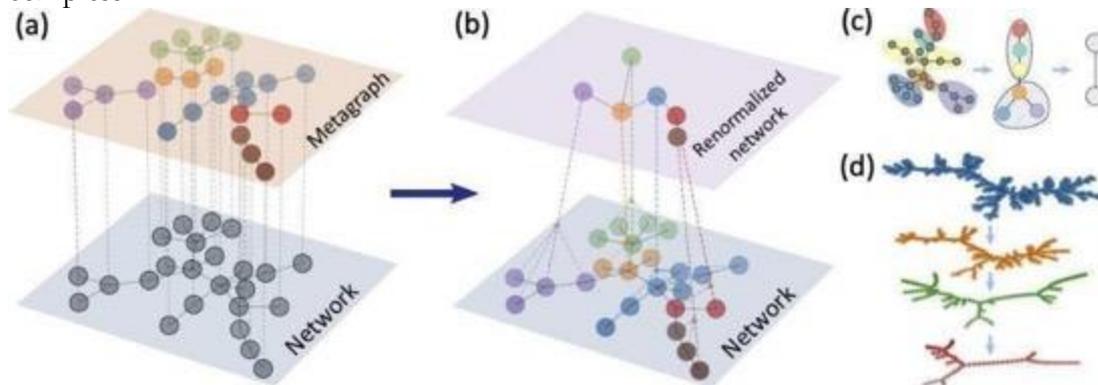
Il progetto di Fisica Statistica e Sistemi Complessi nelle Scienze Naturali si sviluppa attorno a diverse linee di ricerca strettamente interconnesse, ognuna focalizzata su un aspetto cruciale per comprendere e affrontare la complessità dei sistemi naturali. Le principali aree di ricerca sono: l'applicazione del Gruppo di Rinormalizzazione per lo studio delle proprietà multiscala delle reti complesse eterogenee; le applicazioni interdisciplinari in vari ambiti delle scienze naturali; lo sviluppo di tecniche avanzate di teoria dei sistemi complessi e Reservoir Computing per l'analisi dell'attività cerebrale; l'uso di modelli stocastici e machine learning per esplorare dinamiche climatiche su brevi periodi di tempo.

Stato dell'arte

Fisica Statistica e Gruppo di Rinormalizzazione Laplaciano per reti complesse

Un gruppo di ricercatori del CREF ha sviluppato un metodo innovativo, basato sulla rinormalizzazione per studiare reti complesse con nodi eterogenei. L'approccio semplifica iterativamente la rete a diverse scale, identificando gruppi di nodi fortemente connessi e analizzandone le proprietà dinamiche. Pubblicato su Nature Physics (maggio 2023), il lavoro offre una nuova prospettiva sull'analisi mesoscopica, superando i limiti dei modelli nulli tradizionali. L'LRG (Likelihood Renormalization Group) rivela strutture nascoste e modularità, con applicazioni in biologia, sociologia e neuroscienze. Collaborando con IMT Lucca e Ca' Foscari, i ricercatori hanno ottimizzato processi critici come la diffusione di epidemie o la gestione energetica. In parallelo, con l'Università di Roma "Tor Vergata", sono stati creati modelli stocastici ispirati alla massima entropia vincolata, utili per costruire modelli nulli e ricostruire reti reali da dati parziali.

Questi avanzamenti uniscono fisica statistica e teoria delle reti, aprendo strade per interventi mirati in sistemi complessi.



Riduzione di una rete complessa grazie all'LRG. (a) individuazione delle strutture intrinseche; (b) cambiamento di risoluzione conseguente e riduzione della complessità del sistema; (c) e (d) illustrazione nel caso di albero random

Approccio di sistemi complessi per sistemi biologici, ecologici e climatici

La collaborazione tra il nostro team, l'IMT di Lucca e l'Università di Venezia ha permesso di esplorare come la disposizione delle piante influenzi la stabilità degli ecosistemi, utilizzando strumenti all'avanguardia tratti dalla fisica statistica e dalla teoria delle reti complesse. Parallelamente, nel campo delle neuroscienze, abbiamo sviluppato con IMT Lucca e Bocconi innovative metodologie per interpretare i segnali cerebrali ottenuti dalla risonanza magnetica funzionale, mentre con l'Istituto Superiore di Sanità e il centro BioBizkaia di Bilbao stiamo perfezionando l'analisi dei dati cerebrali attraverso tecniche di machine learning. La pandemia ci ha spinto a stringere una fruttuosa collaborazione con l'istituto croato Ruđer Bošković per creare modelli epidemiologici più precisi, che tengano conto dell'impatto dei test diagnostici. Questo lavoro si è evoluto includendo lo studio delle complesse interazioni sociali nella diffusione virale insieme all'IFISC di Maiorca. Recentemente abbiamo esteso le nostre ricerche al campo climatico, collaborando con il Copernicus Climate Change Service per applicare i nostri metodi di analisi all'interpretazione dei dati

ambientali. Questi progetti dimostrano come l'integrazione di diverse discipline scientifiche possa fornire strumenti potenti per affrontare sfide cruciali, dalla conservazione degli ecosistemi alla salute pubblica, fino alla comprensione dei cambiamenti climatici.

Finalità e obiettivi

Il progetto si propone un duplice obiettivo:

1. Sviluppo di metodi generali: Formulare e studiare modelli e metodi basati sulla fisica statistica, sia in equilibrio che fuori equilibrio, per fornire strumenti teorici e numerici innovativi. Questi saranno applicabili in diverse aree delle scienze naturali, con particolare attenzione al settore bio-medico, e nelle scienze sociali quantitative per l'analisi di reti complesse e l'estrazione di segnali da serie temporali correlate.
2. Applicazioni ad alto impatto: Sviluppare applicazioni concrete di questi metodi nei settori bio-medico, sociale, ecologico e ambientale, con la possibilità di estendere tali strumenti ad altri ambiti di ricerca dell'Ente, i nuovi sistemi di intelligenza artificiale, basati su reti di Hopfield.

Un focus particolare sarà dedicato all'ulteriore sviluppo della tecnica dell'LRG, avanzando nell'analisi teorica delle reti complesse. Questo permetterà di studiare le proprietà di organizzazione e correlazione intrinseca di sistemi naturali, come reti biologiche ed ecologiche, e di caratterizzarne l'evoluzione dinamica. Inoltre, le sue applicazioni saranno estese ad ambiti diversi, come reti sociali ed economiche, e ai nuovi sistemi di intelligenza artificiale.

Stato e risultati attesi

Sviluppi ed applicazioni del Gruppo di Rinormalizzazione Laplaciano per reti complesse

La teoria dell'LRG ha permesso, attraverso il parallelo con il Gruppo di Rinormalizzazione in fisica statistica, di studiare le proprietà multiscala di una rete complessa generica. In sintesi, l'LRG rappresenta uno strumento fondamentale per comprendere e ottimizzare il funzionamento dei sistemi complessi.

Il futuro sviluppo di questo approccio si concentrerà su tre direzioni principali:

1. **Estensione della teoria fisico-statistica:**

Si prevede di completare la visione fisico-statistica del metodo, con particolare attenzione alla formulazione locale della teoria, grazie all'estensione delle relazioni di Fluttuazione-Dissipazione all'LRG. Questo permetterà di studiare la diffusione dipendente dal tempo e di rilevare localmente le scale di correlazione e la struttura microscopica della rete. Inoltre, si estenderà la teoria al caso di reti segnate, un problema essenziale per la comprensione dei vetri di spin.

2. **Riformulazione del problema della clusterizzazione:**

Un nuovo approccio per la rilevazione della partizione ottimale della rete sarà sviluppato, ottimizzando le attuali metodologie per gestire reti di grandi dimensioni, fino a raggiungere milioni di nodi. Questo approccio consentirà l'analisi in tempo reale di dati e serie temporali, sfruttando il tempo di diffusione e modelli dinamici statistici, come quelli epidemici e il modello di Kuramoto per la sincronizzazione. L'obiettivo è studiare il comportamento di sistemi estensivi sotto trasformazioni di scala ben definite, all'interno del quadro fisico-statistico dell'LRG.

3. **Caratterizzazione dei sistemi disordinati invarianti di scala:**

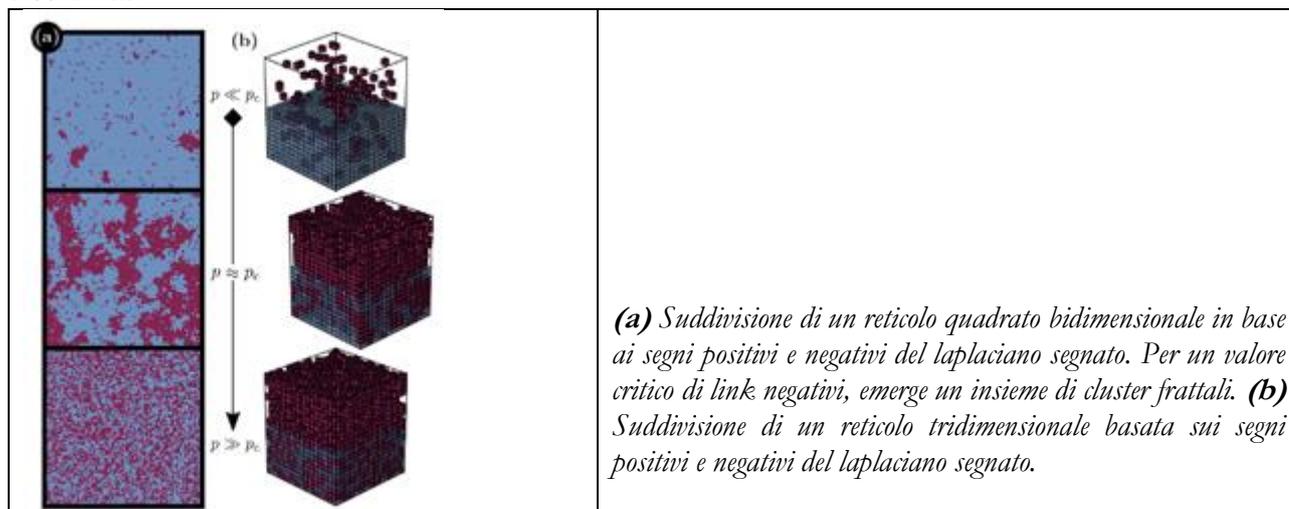
Dopo aver identificato i punti fissi non banali dell'LRG, si procederà ad analizzarne la stabilità e le implicazioni dinamiche. Questo permetterà di studiare reti frattali regolari e sistemi multiscala, con l'obiettivo di esplorare diverse dimensionalità a livello locale e globale.

Analisi e caratterizzazione di sistemi non-ergodici tramite l'LRG

Una rilevante estensione del metodo LRG riguarda l'analisi delle reti segnate, in cui le interazioni tra gli elementi possono essere sia positive (ad esempio, interazioni ferromagnetiche in fisica o eccitatorie in neuroscienze) sia negative (come le interazioni antiferromagnetiche in fisica o inibitorie nelle neuroscienze). Il progetto prevede l'applicazione di questo paradigma teorico per studiare diverse reti reali e le dinamiche che emergono al loro interno.

Dal punto di vista dei sistemi fisici, l'uso dell'LRG per le reti segnate permetterà di esplorare sistemi caratterizzati dalla frustrazione delle interazioni, come i vetri di spin, analizzando l'evoluzione delle dinamiche di diffusione su di essi. Parallelamente, in collaborazione con l'Università di Granada,

estenderemo studi recenti che hanno evidenziato l'importanza delle "fasi di Griffiths" nelle neuroscienze, in particolare nell'attività neuronale a livello sperimentale. Utilizzando l'LRG, svilupperemo modelli predittivi per l'emergere di queste fasi, che portano a fenomeni non-ergodici e effetti di memoria nei sistemi disordinati.



L'obiettivo principale di questa parte del progetto è esplorare i recenti sviluppi nell'intelligenza artificiale e nel machine learning, applicando una descrizione meccanico-statistica alle strutture emergenti in reti complesse, in particolare nei sistemi che devono apprendere in ambienti complessi.

Applicazione dell'LRG a sistemi biologici multiscala: reti neurali e genetiche

Un'importante applicazione dell'LRG riguarda lo studio delle reti di attivazione genica, in collaborazione con il gruppo del Prof. Mario Nicodemi (Università "Federico II" di Napoli). L'obiettivo è identificare i gruppi di geni che interagiscono strettamente e analizzare la loro organizzazione a vari livelli di risoluzione. Questo studio potrebbe contribuire a comprendere meglio i meccanismi multigenici che generano caratteri fenotipici e stati patologici.

Un altro progetto, avviato nel 2023, si concentra sullo studio multiscala delle reti cerebrali funzionali ottenute da serie temporali fMRI. In questo caso, si combinerà la teoria delle reti complesse con tecniche di machine learning, come reti neurali ricorrenti e reservoir computing. L'obiettivo è studiare i disturbi psichiatrici, come depressione, autismo e schizofrenia, per identificare sottotipi di pazienti basati su neuroimmagini, connettività cerebrale e sintomi. In collaborazione con il BioBizkaia Institute, si utilizzerà l'LRG per effettuare clustering non supervisionato, raggruppando i pazienti con caratteristiche simili.

Un altro progetto interdisciplinare tra biologi, medici e fisici dei sistemi complessi mira a modellizzare la genesi del fenotipo maligno e identificare strategie per il controllo di invasione e metastasi. In collaborazione con Matteo Russo, Eugenio Gaudio e Gregg Semenza, che forniscono dati su infiammazione, ipossia e proprietà maligne per analizzare dinamiche e target terapeutici.

Parallelamente, in collaborazione con S3K, si studierà la rete di interazioni tra principi attivi e stati di salute, utilizzando banche dati (Farmadati, AIFA) per creare modelli multilayer con l'obiettivo di prevedere interazioni farmacologiche non ancora documentate e validarle con dati clinici e medici.

Inoltre, applicheremo l'LRG a reti di distribuzione elettriche, ecologiche, di comunicazione e nella trasmissione delle malattie. In ambito epidemiologico, l'analisi delle reti di contagio permetterà di identificare i nodi chiave per sviluppare strategie di vaccinazione mirate. Un'applicazione simile sarà utilizzata per contrastare la disinformazione su Internet, analizzando la diffusione di notizie false e propaganda, identificando le reti di utenti che promuovono queste informazioni. Infine, sarà applicato in ambito economico per studiare le reti di produzione e identificare settori produttivi interconnessi.

Metodi nulli massimamente entropici

In collaborazione con l'IMT di Lucca e l'Università di Tor Vergata, nel corso del tempo è stato portato avanti lo studio di modelli nulli massimamente entropici per l'analisi di reti complesse. L'approccio è simile alla definizione degli ensemble statistici, ma nei quali i vincoli possono essere sia locali che globali. Nel contesto delle reti complesse, questo approccio si traduce nell'avere un riferimento statistico che riproduce

alcune proprietà del sistema, ma al contempo è completamente random per il resto. Questa costruzione teorica si adatta al sistema analizzato, pur rimanendo molto versatile, e permette di analizzare diversi tipi di reti (monopartite, bipartite, segnate, ...) e le loro estensioni non banali (ipergrafi). Sorprendentemente, è stato osservato che -in generale- le formulazioni microcanonica e canonica non sono equivalenti nel limite termodinamico quando i vincoli sono locali. Lo studio delle implicazioni di questa non equivalenza hanno un impatto importante nelle applicazioni e sono attualmente in corso. Parte di questa ricerca sarà coperta dalle attività del progetto PRIN PNRR 2022 CODE (PI nodo CREF: Fabio Saracco. Durata: 12/2023-12/2025) che studia l'effetto sulle dinamiche online di eventi offline -come la diffusione di un'epidemia- e viceversa. Mentre l'applicazione e l'interpretazione del risultato nel contesto di Computational Social Science sarà parte dell'attività della linea di ricerca "Complessità per lo sviluppo economico e tecnologico", l'ideazione, lo sviluppo teorico e lo studio analitico dei modelli necessari all'analisi sarà parte fondamentale di questo filone di ricerca.

Modelli stocastici e machine learning per le dinamiche climatiche su breve scala temporale

Questo ramo di ricerca applica metodi avanzati di reti complesse e intelligenza artificiale per analizzare le serie temporali legate ai cambiamenti climatici e ai loro impatti naturali e sociali. Il servizio Copernicus Climate Change Service (C3S) della Commissione Europea ha raccolto una vasta gamma di dati climatici su scale spaziali e temporali ampie. Il CREF, in collaborazione con C3S e altre istituzioni, sviluppa un approccio innovativo per l'analisi multiscala di questi dati, utilizzando tecniche moderne di filtraggio, estrazione, classificazione e rappresentazione del segnale, basate sulla teoria dei processi stocastici, reti complesse e neurali.

L'analisi delle serie temporali climatiche si avvale dell'applicazione del Reservoir Computing, un tipo di machine learning su reti ricorrenti, per studiare le evoluzioni a breve termine delle variabili fisiche. Utilizzando la teoria dei sistemi dinamici e stocastici, insieme ai metodi delle reti complesse, si analizzano le correlazioni tra variabili e le dipendenze tra le osservabili, al fine di sviluppare scenari di impatto climatico a livello locale e mesoscopico. In collaborazione con SONY CSL, queste tecniche vengono applicate per prevedere l'impatto naturale e sociale su scale temporali brevi (mesi o pochi anni).

Strutture ottimali di reti mutualistiche

Le reti ecologiche che descrivono sistemi mutualistici, come quelli tra piante e impollinatori, presentano una struttura triangolare nelle loro matrici di interazione. Una configurazione simile si osserva anche in altri sistemi bipartiti, come quelli legati all'export internazionale. Questo tipo di struttura è alla base dell'algoritmo di *Fitness & Complexity*, utilizzato per analizzare i sistemi ecologici e determinare un ordine gerarchico tra le specie di piante e insetti.

Recentemente, al CREF è stata identificata una connessione tra questo algoritmo e la teoria del trasporto ottimale, aprendo nuove prospettive di ricerca. Tra le questioni più rilevanti da esplorare c'è la comprensione delle frequenze (o intensità) delle interazioni tra le specie, che dipendono dalle preferenze naturali, dalle limitazioni delle risorse e dalla prevalenza delle specie in un dato territorio.

In questo progetto, verrà sviluppato un parallelo affascinante tra i sistemi ecologici e quelli economici, reso possibile grazie all'uso di tecniche di fisica statistica e della teoria del trasporto ottimale. Questo approccio promette di offrire nuove intuizioni su come le interazioni tra specie e risorse possano essere modellate in modo ottimale in contesti ecologici ed economici.

C.2. Complessità per lo sviluppo economico e tecnologico

Il progetto "Complessità Sociale ed Economica" affronta le sfide della società contemporanea utilizzando approcci innovativi basati sulla teoria dei Sistemi Complessi, Fisica Statistica e Machine Learning. Superando i limiti degli approcci tradizionali, il progetto si articola in tre aree: Economic Fitness and Complexity (EFC), che modella economie come sistemi complessi per prevedere crescita e competitività di paesi e regioni; Computational Social Science, che analizza dati digitali per studiare fenomeni come la disinformazione e le dinamiche online; e Metodi di Network Theory, che sfrutta modelli nulli per distinguere segnali significativi dal rumore nei dati. Gli obiettivi includono la sostenibilità, l'innovazione tecnologica e l'integrazione interdisciplinare, con un impatto su politiche pubbliche e strategie globali. Ampio spazio è dedicato alla divulgazione, con scuole, conferenze e iniziative per stimolare la connessione tra ricerca e società civile.

Stato dell'arte

La teoria della complessità offre un quadro concettuale e metodologico potente per analizzare fenomeni emergenti nei sistemi sociali ed economici. Tali sistemi, caratterizzati da molteplici attori interconnessi e dinamiche non lineari, richiedono approcci capaci di cogliere relazioni complesse e schemi emergenti. La teoria della complessità, nell'ambito dell'Economic Fitness and Complexity, si concentra sull'analisi delle capacità produttive e delle interazioni globali che determinano la competitività economica. Gli approcci tradizionali non bastano a cogliere questa complessità, e quindi questo progetto si articola in tre aree di indagine:

1. Economic Fitness and Complexity (EFC): metodo sviluppato a Roma dal gruppo del prof. Luciano Pietronero per costruire modelli economici data-driven, basati su Complex Networks e Machine Learning. Ha dimostrato di superare le previsioni del FMI sulla crescita dei paesi, ed è usato da istituzioni internazionali come la World Bank e il Joint Research Center (European Commission).
2. Computational Social Science: utilizza dati di mobilità, reti sociali e tracciamenti digitali per studiare fenomeni come la diffusione di epidemie, la (dis)informazione politica e le dinamiche di gruppo, integrando fisica, matematica, informatica e scienze sociali.
3. Metodi di analisi di Network Theory: analizza la struttura delle reti complesse per comprendere processi fondamentali (shock finanziari, cambiamento climatico, propagazione di malattie e informazione). Poiché le reti reali contengono rumore statistico, si sviluppano modelli nulli ispirati alla fisica statistica e teoria dell'informazione per distinguere segnali genuini da fluttuazioni casuali.

Finalità e obiettivi

Per ogni area di indagine, sono definite delle finalità e obiettivi specifici:

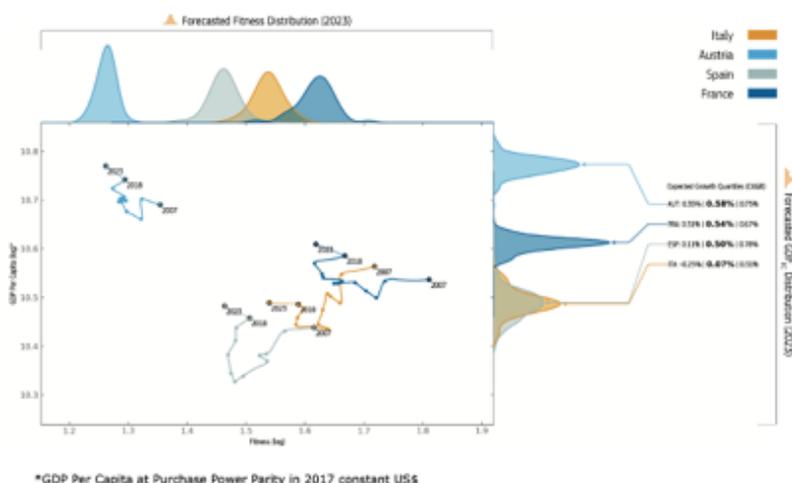
- Economic Fitness: nel prossimo triennio (2025-27), l'obiettivo principale è rafforzare l'approccio EFC per analizzare temi cruciali come innovazione tecnologica, sviluppo economico, sostenibilità e mercato del lavoro, con un focus sulle implicazioni politiche. Questo lavoro si baserà su progetti individuali e collaborativi, richiedendo un approfondimento teorico delle reti complesse in economia e una maggiore integrazione tra fisica, economia, scienze sociali e informatica per sviluppare modelli più efficaci.
- Computational Social Science: le ricerche recenti hanno utilizzato modelli nulli per identificare strutture nelle dinamiche online, come comunità discorsive e disinformazione, distinguendo tra fonti autorevoli, opinion leader e pubblico generale. Questi studi, parte del progetto PRIN PNRR 2022 CODE, esplorano anche il legame tra eventi reali (es. epidemie) e dibattiti online, offrendo nuove prospettive sociologiche sull'interazione tra mondo digitale e fisico.
- Metodi di analisi di Network Theory: l'attività si concentra sull'applicazione di modelli nulli, ispirati alla Meccanica Statistica e alla Teoria dell'Informazione, per analizzare reti economiche e sociali (come commercio internazionale, brevetti e dati occupazionali). Questi metodi permettono di filtrare il rumore nei dati e estrarre informazioni rilevanti, sia a livello topologico che ponderato, risultando fondamentali per identificare segnali significativi in contesti con elevata variabilità statistica.

Stato e risultati attesi

Economic Fitness

Fondamenti: relatedness e previsione di competitività produttiva e tecnologica: L'approccio EFC tratta l'economia come un sistema complesso e studia le interazioni tra "agenti" (paesi, regioni e città o aziende) e "items" (prodotti, settori, tecnologie, articoli scientifici). Queste interazioni sono analizzate attraverso l'uso di network bipartiti, che collegano gli agenti agli items associati. Un esempio significativo è il network paese-prodotto, che connette i paesi ai prodotti che esportano competitivamente, permettendo di prevedere il PIL dei paesi e di identificare potenziali nuovi prodotti per il futuro. Con il passare degli anni, questa metodologia è stata estesa per includere diverse tipologie di items. L'EFC oggi, quindi, punta a identificare prodotti, settori e tecnologie che possano offrire vantaggi competitivi per diversi tipi di "agenti". Sfruttando metodi di ricostruzione e armonizzazione di dati a livello di prodotto, settore industriale e tecnologia in combinazione ad applicazioni di sistemi complessi e machine learning, si ottengono previsioni molto dettagliate e si definiscono indici di *relatedness* per quantificare il legame ed effettuare previsioni di sviluppo tra "items". Recentemente, in collaborazione con il Joint Research Center della Commissione Europea e la European Bank of Reconstruction and Development, il gruppo si sta impegnando nella ricostruzione di dati di

commercio internazionale a prezzi unitari e della loro integrazione con informazioni sulle catene globali del valore — con speciale focus sul comparto automobilistico e sull'energia eolica.



Traiettorie nel piano GDP-Pro-capite/Fitness. Le traiettorie in questo spazio risultano in larga parte prevedibili sulla base della dinamica osservata in passato e consentono una previsione di crescita economica (distribuzioni di probabilità sugli assi). Questo approccio si è dimostrato essere il 25% più accurato delle stime del FMI a 5 anni¹.

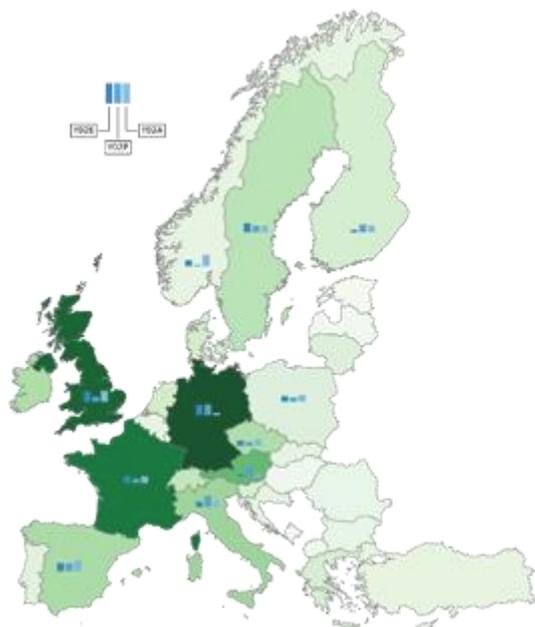
Inoltre, il gruppo si impegnerà ad ampliare sempre più gli “items” da analizzare, includendo informazioni su settori non esportabili, come i servizi, e valutando gli spostamenti di impiego tra vari settori industriali per studiare le dinamiche salariali e la polarizzazione dei mercati del lavoro a livello granulare.

Sviluppi teorici: Verranno approfondite le basi teoriche del framework EFC seguendo tre diverse direzioni d’analisi. In primo luogo, definendo metriche EFC a diverse scale geografiche, si studieranno le dinamiche spaziali delle capabilities —le competenze, infrastrutture e risorse necessarie per produrre un determinato item— studiando se e come le interazioni tra agenti e items cambiano al variare della scala ed eventuali fenomeni emergenti. In secondo luogo, si analizzeranno dati microeconomici sugli aspetti organizzativo-strategici e di bilancio delle imprese italiane per integrare la cosiddetta *capability-based theory of the firm* sviluppata nel contesto dell’economia dell’innovazione con l’EFC. Infine, ci si concentrerà anche sull’inquadramento teorico e applicativo dell’algoritmo Fitness & Complexity e dei suoi sviluppi tramite il problema del trasporto ottimale e sul collegamento con teorie economiche quali l’economia strutturalista e dell’innovazione e con teorie di evoluzione degli ecosistemi mutualistici.

Innovazione tecnologica e complessità economica multilayer: Il gruppo esaminerà diverse tecniche per valutare come produzione industriale, mercati del lavoro, attività brevettuale e ricerca scientifica interagiscono e contribuiscono alla previsione di vantaggi competitivi in nuovi “items”. Con l’obiettivo di creare multigrafi che descrivono le interazioni tra economia, scienza e innovazione, verranno analizzate le dinamiche di competitività e disuguaglianza nella produzione scientifica, e la connessione tra diversi ambiti lavorativi, settori industriali e ambiti brevettuali in Europa e USA.

Innovazione tecnologica e sostenibilità: Il gruppo approfondirà l’analisi della transizione sostenibile, indagando l’innovazione “verde” attraverso l’analisi di brevetti legati alla mitigazione e all’adattamento al cambiamento climatico con metodi di Machine Learning e reti complesse. Si studieranno le potenzialità di crescita e competitività dei sistemi d’innovazione regionali e nazionali, guardando alle interazioni tra capacità produttiva e sistemi d’innovazione verdi e non verdi. Si analizzerà poi il legame tra competitività industriale e inquinamento industriale nelle cosiddette “aree dell’abbandono”, che soffrono della stratificazione di disuguaglianze socioeconomiche e ambientali.

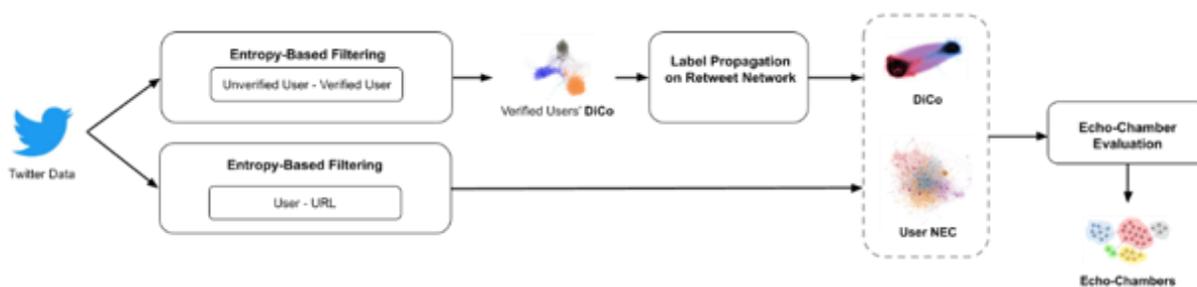
¹ <https://www.nature.com/articles/s41567-018-0204-y>



Mappa della competitività verde dei paesi europei basata sui brevetti prodotti nel 2016. Le barre identificano la competitività relativa a tre ambiti legati alla transizione verde: Y02E è legato alla generazione di energie rinnovabili, Y02P è legato alla produzione di beni in maniera sostenibile e Y02A è legato alle tecnologie per l'adattamento climatico.

Disseminazione: Oltre alle attività di ricerca, il progetto prevede la condivisione dei risultati con la comunità scientifica e il pubblico più ampio. Sono in programma, con cadenza annuale, la Economic Fitness and Complexity Spring School e giornate di studio al CREF, aperte ad accademici e società civile. Inoltre, sono previste sessioni parallele a conferenze internazionali e iniziative di divulgazione (ad esempio La Notte dei Ricercatori e la Maker Faire di Roma). Infine, i risultati delle ricerche scientifiche del gruppo sono condivisi sui canali social dell'Ente e sui siti dei progetti di ricerca.

Computational Social Science: Le ricerche si concentrano sull'identificazione e l'analisi di comunità discorsive online e sulla diffusione di (dis)informazione. Attraverso modelli nulli è stato possibile quantificare segnali statisticamente significativi delle cosiddette "echo chambers", i.e. gruppi di utenti online che hanno idee simili e che si informano sulle solite fonti di informazione. Tali strutture risultano cruciali nella comprensione dei fenomeni di disinformazione, dal momento che le opinioni degli utenti nelle echo chambers sono particolarmente difficili da modificare.



Schema della procedura di estrazione di echo chambers usando modelli massimamente entropici. Partendo dai dati delle interazione tra gli utenti e degli utenti con i vari contenuti creati, è possibile distinguere il segnale statisticamente significativo dei comportamenti non banali. Mettendo insieme queste informazioni, è possibili rilevare la presenza di echo chambers [Pratelli et al, PNAS Nexus 2024].

Metodi di analisi di Network Theory: L'uso di modelli nulli per distinguere segnale e rumore nelle reti è ormai consolidato nell'ambito della ricostruzione di reti parziali, ma solo di recente è stato applicato all'analisi dei social network online e per la validazione di dati economici. Ciò ha permesso, ad esempio, di identificare comportamenti coordinati nella diffusione di disinformazione. Sul piano teorico, si sviluppano modelli massimamente entropici, adattandoli a varie tipologie di reti (monopartite, bipartite, ipergrafi, reti

dinamiche o segnate). Sul piano applicativo, tali strumenti vengono impiegati per caratterizzare reti reali, come i network di Economic Complexity o i social network, verificando la robustezza delle strutture identificate e isolando i comportamenti realmente significativi dal rumore di fondo.

C.3 L'impatto dell'intelligenza artificiale sul tessuto socioeconomico e l'innovazione tecnologica

Questo progetto esplora il potenziale trasformativo dell'Intelligenza Artificiale (IA) con un approccio interdisciplinare che integra informatica, scienza delle reti, economia e sociologia. Da un lato, studiamo limiti e potenzialità dell'IA per comprendere le dinamiche sociali, tecnologiche ed economiche; dall'altro, applichiamo questi modelli per indagini innovative su temi complessi come l'evoluzione del lavoro, l'emergere di traiettorie di innovazione e il ruolo dei valori morali nei dibattiti online. Le attività includono lo sviluppo di nuovi algoritmi di apprendimento continuo e creativo (Dreaming Learning, Lyapunov Learning), l'analisi quantitativa delle rappresentazioni concettuali nei modelli di linguaggio e l'impiego di LLM per predire traiettorie emergenti di innovazione tecnologica. L'obiettivo è favorire un'adozione responsabile dell'IA, in grado di supportare la pianificazione strategica, la sostenibilità e il progresso collettivo.

Stato dell'arte

L'avanzamento dell'Intelligenza Artificiale sta trasformando profondamente il nostro rapporto con l'informazione e la creatività, grazie a modelli linguistici come ChatGPT e a sistemi di generazione d'immagini come DALL-E che raggiungono prestazioni sempre più vicine a quelle umane. Queste tecnologie, il cui funzionamento interno rimane in gran parte misterioso, promettono di rivoluzionare settori chiave della società, dalla comunicazione al mondo del lavoro, fino alla ricerca scientifica.

La ricerca in questo campo richiede investimenti colossali, come dimostra lo sviluppo di LLaMA3-70B, un modello open-source all'avanguardia che ha consumato milioni di ore di calcolo e risorse per oltre mezzo miliardo di dollari. Pur non potendo competere con i grandi player nel training di modelli avanzati, istituzioni come il CREF possono comunque contribuire allo studio del loro funzionamento e delle loro implicazioni.

Mentre l'adozione di questi strumenti accelera, persistono interrogativi cruciali: quali sono i loro limiti cognitivi? Come gestire i bias e garantire robustezza contro input malevoli? Cosa succede quando più IA interagiscono tra loro, come nelle chatbots dei social network? Parallelamente, si aprono opportunità entusiasmanti, dall'uso dell'IA per analizzare dati non strutturati alla sua applicazione nello studio di dinamiche economiche e sociali.

Comprendere a fondo queste questioni è essenziale per guidare l'adozione responsabile dell'IA, minimizzarne i rischi e massimizzarne il potenziale a beneficio della società. La strada è ancora lunga, ma le prospettive sono rivoluzionarie.

Finalità e obiettivi

In questo progetto ci proponiamo di analizzare il potenziale trasformativo degli strumenti di intelligenza artificiale in due direzioni: da un lato le potenzialità e i limiti dei modelli di IA, dall'altro il loro impatto sociale ed economico.

La ricerca verrà dunque articolata secondo molteplici linee che affrontano questi temi in maniera interconnessa. È doveroso premettere che, trattandosi di un campo in evoluzione estremamente rapida, la rilevanza delle domande di ricerca come quella dei metodi impiegati viene costantemente rivalutata alla luce degli avanzamenti tecnologici e scientifici.

La visione generale che adottiamo in questo progetto è che i modelli di IA possano complementare le capacità umane in molti ambiti, professionali, creativi e scientifici. Intendiamo dunque porre l'accento sull'interazione tra umani e IA, sul potenziale che questa può esprimere e sui cambiamenti sociali, economici e tecnologici che questa può portare.

Le attività di ricerca saranno variegata e spazieranno da questioni teoriche (meccanismi di apprendimento e di adattamento delle IA, interazione tra IA, stabilità dinamica delle interazioni con IA generative), ad applicazioni pratiche (uso dell'IA come strumento di analisi delle dinamiche tecnologiche, economiche e sociali, ad esempio in ambito di sostenibilità sociale ed ambientale), allo studio di come l'IA possa avere

impatti sul mercato del lavoro e sulle dinamiche sociali nelle comunità online. L'obiettivo è di individuare temi di grande impatto che sono al momento trattati dalla letteratura scientifica in maniera qualitativa ed applicarvi metodi e processi quantitativi e rigorosi.

Stato e risultati attesi

Potenzialità e limiti dell'IA

- **Uso di LLM per studiare e predire dinamiche di innovazione. Applicazioni specifiche a temi di sostenibilità (inquinamento industriale, materie prime critiche, transizione energetica).**

Grazie alla crescente disponibilità di LLM open source diventa possibile l'analisi automatizzata di enormi quantità di informazioni non strutturate liberamente disponibili, quali siti web, pubblicazioni scientifiche, brevetti, repositories di codice. Questo consente una mappatura sia geografica che semantica delle competenze tecnologiche di paesi, regioni o città. La mappatura geografica consente di individuare i profili di specializzazione territoriali in diversi ambiti innovativi e le future direzioni di innovazione tecnica con maggiori vantaggi competitivi, fornendo diversi strumenti informativi per le strategie di policy regionali. La mappatura semantica, inoltre, consente di definire e misurare una distanza tra i diversi ambiti tecnici. L'osservazione dinamica di queste distanze consente lo sviluppo di modelli per la previsione di innovazioni tecnologiche tramite la creazione di nuove combinazioni (recombinant innovation). Una implementazione pratica di questo approccio è stata recentemente (ottobre 2024) premiata dallo European Patent Office (v. Highlights). Nel corso del prossimo triennio esanderemo questa linea di ricerca ad altri set di documenti (e.s. articoli scientifici) e la integreremo con modelli che consentono di estrarre ed interpretare significati semantici dalle attivazioni delle reti neurali utilizzate per le previsioni.

Inoltre, questi strumenti possono essere utilizzati per connettere le indicazioni di policy con la presenza di capabilities nei territori, anche per quanto concerne le politiche ambientali volte al passaggio a una società e un'economia più sostenibili. Ad esempio, è possibile connettere i brevetti con le legislazioni europee sulla riduzione dell'inquinamento industriale, o è possibile mappare l'incidenza di materie prime critiche nelle tecnologie verdi e quindi individuare possibili rischi sulle catene di approvvigionamento per l'implementazione di queste politiche.

- **Uso di LLM per lo studio di fenomeni sociali a partire da comunità online**

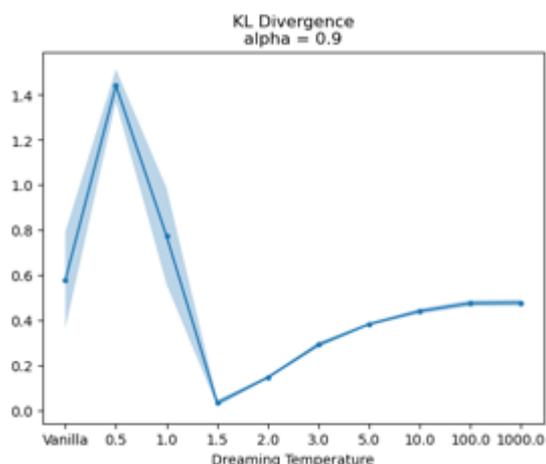
Così come gli LLM consentono l'analisi automatizzata di fonti di informazione a contenuto scientifico-tecnologico, questi possono essere allo stesso modo utilizzati per la raccolta di segnali sulle dinamiche sociali a partire dai discorsi accessibili sulle piattaforme di social networking. Nell'ambito di questo progetto ci proponiamo di esplorare la fattibilità dell'uso di questi strumenti per la mappatura di fenomeni sociali, quali ad esempio le dinamiche di scontento sociale e di disegualianza.

- **Teoria della Creatività Artificiale**

La capacità di evoluzione autonoma delle IA di fronte a eventi inattesi e dinamiche non stazionarie è ancora poco studiata. Una sfida cruciale è il Continual Learning, ossia integrare nuovi dati senza incorrere nel Catastrophic Forgetting, la perdita di conoscenze pregresse. Inoltre, la natura statistica dei dati in arrivo è spesso ignota, complicando la verifica della loro coerenza con quanto già appreso. Questi aspetti si legano anche alla creatività, intesa come esplorazione di spazi concettuali sconosciuti ma collegati alle informazioni acquisite. In tale prospettiva, il concetto di Adiacente Possibile di Stuart Kauffman ha ispirato nuove metodologie di apprendimento statistico che permettono di esplorare informazioni non presenti nel set di addestramento originale, ma basate sulla conoscenza accumulata dal sistema.

Un significativo contributo in questo ambito è rappresentato dall'algoritmo **Dreaming Learning**, il primo sistema di apprendimento statistico in grado di combinare due capacità essenziali: (1) esplorare nuove informazioni non presenti nel set di apprendimento, ma contestualmente collegate alla base di conoscenza esistente; e (2) descrivere correttamente sorgenti di dati non stazionarie. Queste caratteristiche sono state validate sia teoricamente che sperimentalmente. Sono attualmente in fase di studio ulteriori estensioni di questi algoritmi, che sfruttano le proprietà topologiche dei sistemi dinamici implementati da reti neurali, al fine di superare le limitazioni del Dreaming Learning.

Tra le applicazioni pratiche in sviluppo si annoverano sistemi di supporto alla creatività umana, come agenti autonomi intelligenti capaci di evolvere dinamicamente la propria base di conoscenza.



Esempio di mitigazione del fenomeno del Model Collapse attraverso l'uso del Dreaming Learning. In questo grafico, viene riportata la Divergenza di Kullback-Leibler (KL) nel caso di una rete neurale con apprendimento classico (Vanilla) e per varie temperature di Dreaming. Per una temperatura pari a 1.5 è visibile il minimo di tale divergenza nel confronto tra la distribuzione limite di una catena di Markov iniziale e quella prodotta dopo 1000 ricampionamenti successivi con accumulazione sui dati originari.

Un importante risultato ottenuto dal Dreaming Learning è la mitigazione del fenomeno noto come **Model Collapse**, ovvero la progressiva perdita di capacità generative da parte delle IA sottoposte all'apprendimento su dati generati da loro stesse. Questo problema, particolarmente rilevante per i **Large Language Models (LLM)**, è affrontato efficacemente dal Dreaming Learning attraverso specifici parametri, attualmente in fase di studio mediante approcci di meccanica statistica.

Un caso studio attualmente in corso riguarda un sistema per l'analisi e l'anticipazione dei movimenti umani, con applicazioni alla creatività nell'ambito della danza. In questo progetto vengono impiegate tecnologie basate su **Transformer** e **quantizzazione vettoriale**, utilizzando Self-Organizing Maps o Vector-Quantization Variational Auto-Encoders. Il dataset di riferimento è stato raccolto con un sistema di telecamere ortogonali per la ricostruzione tridimensionale delle articolazioni corporee.

Infine, è stato sviluppato un metodo denominato **Lyapunov Learning**, concepito per estendere le capacità del Dreaming Learning a variabili multidimensionali. Basato sul principio dell'**Edge of Chaos**, questo approccio avvicina la dinamica autonoma delle reti neurali a condizioni al limite del caos deterministico. Già applicato con successo a sistemi semplici, come catene di Markov e modelli dinamici artificiali, il Lyapunov Learning è ora in fase di estensione a fenomeni reali, quali il cambiamento climatico e il collasso degli ecosistemi.

Impatto socioeconomico dell'IA

• Impatto sul mercato del lavoro

Il dibattito sull'impatto dell'IA nel mondo del lavoro si concentra su come possa sostituire o complementare le competenze umane. Il progetto mira a fornire una prospettiva quantitativa su questo impatto attraverso tre task di ricerca:

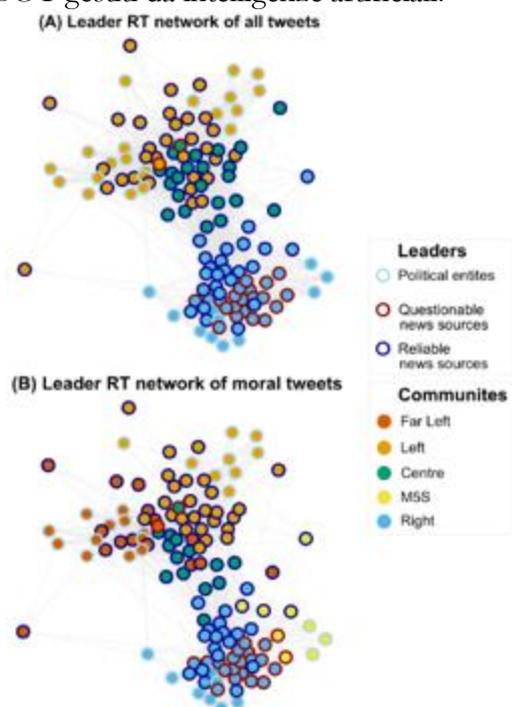
- **Misurazione dell'Esposizione Occupazionale:** Analizzeremo i pitch di startup AI per valutare l'interesse del mercato verso l'automazione di specifiche professioni, confrontandolo con indici classici di esposizione occupazionale. Questo ci permetterà di identificare le professioni vulnerabili, le ragioni della mancata automazione di alcune attività e le competenze cruciali per il futuro.
- **Identificazione delle Competenze Emergenti:** Attraverso l'analisi di annunci di lavoro e innovazioni tecnologiche, individueremo competenze in crescita e in declino, sviluppando una metodologia per prevedere quali abilità saranno fondamentali o obsolete. Una specifica area di innovazione sarà quella di includere nell'analisi repositories di codice, come GitHub.
- **Opinione Pubblica ed Etica:** Studieremo come la fiducia sociale e le considerazioni etiche influenzino l'adozione dell'IA, utilizzando dati dai social network per collegare le percezioni pubbliche agli investimenti delle startup.

Questo approccio interdisciplinare integra dati di mercato, analisi occupazionali e percezioni sociali per comprendere e guidare l'evoluzione del lavoro nell'era dell'IA.

• Valori delle persone e Valori dell'IA

Con la crescente integrazione dell'IA nella società, è essenziale che questi sistemi riflettano i valori morali locali per favorire interazioni etiche e arginare contenuti dannosi. L'obiettivo è sviluppare modelli di

“Intelligenza Artificiale Responsabile” sensibili a contesti etici, culturali e sociali. Una sfida centrale è l’effetto dell’IA sulle discussioni online, dove le filter bubbles, alimentate da pregiudizi di conferma e algoritmi di raccomandazione, limitano il dialogo tra visioni diverse. Dati da vari social media mostrano come i valori morali influenzino l’evoluzione delle opinioni all’interno delle comunità virtuali. Studi precedenti (Brugnoli 2023, 2024) indicano infatti che le dinamiche del dibattito sociale non dipendono solo dalle affiliazioni politiche, ma si radicano profondamente nei valori morali, evidenziando differenze anche tra gruppi politici apparentemente affini. Se da un lato ideologie diverse si allineano con configurazioni morali differenti, dall’altro il numero molto limitato di "irreducible basic elements" identificati dalle diverse teorie psicologiche della morale (come la MFT) per rappresentare, comprendere e spiegare l’ampiezza del dominio morale, consente di identificare radici comuni tra diverse ideologie e probabilmente la chiave per una comunicazione che trascenda la diversità e la polarizzazione. In questo ambito di ricerca studieremo fino a che punto questi “building blocks” ideologici siano rappresentati e compresi dagli algoritmi di IA e quanto questi giochino o meno un ruolo nelle discussioni online a cui, in maniera crescente, prendono parte BOT gestiti da intelligenze artificiali.



Rete di leader ottenuta considerando tutti i tweet da loro prodotti. (B) Rete di leader ottenuta considerando solo i tweet morali. I pesi degli archi sono proporzionali alla quantità di retweeter condivisi. Le posizioni dei nodi sono preservate. I colori dei nodi si riferiscono alle comunità. I colori della cornice dei nodi si riferiscono ai diversi tipi di leader: entità politiche (azzurro), fonti di notizie discutibili (rosso scuro) e fonti di notizie affidabili (blu scuro).

C.4 Innovazione e Scenari Predittivi per la Sostenibilità

L’Iniziativa Congiunta CREF-Sony (JICS) rappresenta una collaborazione pionieristica tra un’istituzione pubblica e un laboratorio di ricerca aziendale, combinando scienza, arti, coinvolgimento pubblico per promuovere l’innovazione e affrontare le sfide globali. L’iniziativa si concentra su tre progetti principali, in linea con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs). Città Sostenibili sviluppa tecnologie “what-if”, strumenti di modellazione e analisi della mobilità urbana per progettare ambienti equi ed efficienti. Infosfera affronta le distorsioni informative analizzando le dinamiche dell’ecosistema mediatico, sviluppando strumenti per una maggiore trasparenza nei sistemi di raccomandazione e proponendo strategie basate sui dati per promuovere un’informazione più pluralista e inclusiva. Creatività Aumentata esplora la sinergia tra intelligenza umana e artificiale, sviluppando metodi di IA non stazionaria per stimolare innovazione e sostenibilità. Questo approccio interdisciplinare mira a ridefinire le modalità di risposta alle crisi sistemiche, offrendo soluzioni concrete per un futuro più resiliente.

Stato dell’arte

Il nostro mondo sta affrontando trasformazioni epocali, spinte dai cambiamenti climatici, dalla globalizzazione e dalla rivoluzione digitale, che stanno ridefinendo gli equilibri sociali ed ecologici. La pandemia ha accelerato questa crisi, costringendoci a sperimentare nuovi modelli di vita e lavoro, rivelando

sia vulnerabilità che opportunità inedite. Questa fase storica richiede con urgenza un ponte tra scienza, politica e società per sviluppare soluzioni innovative che combinino tecnologia e creatività.

Di fronte a sfide così complesse, la creatività umana e artificiale diventa cruciale: mentre l'IA generativa (come GPT o DALL·E) mostra potenziale, rimane limitata dai dati esistenti e manca di vera intenzionalità. Parallelamente, nell'infosfera, algoritmi e bias cognitivi creano camere dell'eco, nonostante i tentativi normativi come il Digital Services Act. Anche nella progettazione urbana sostenibile, le conoscenze scientifiche faticano a tradursi in azioni concrete.

L'iniziativa congiunta CREF-Sony CSL nasce proprio per affrontare queste contraddizioni, promuovendo un approccio integrato che superi i divari tra innovazione tecnologica, bisogni sociali e tutela ambientale, verso un futuro più resiliente e equo.

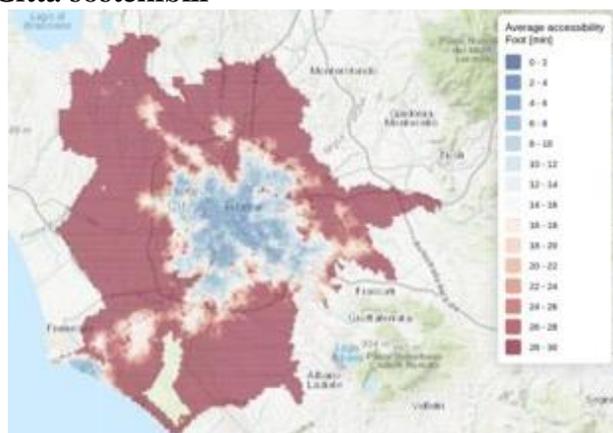
Finalità e obiettivi

L'iniziativa congiunta CREF-Sony (JICS) rappresenta un modello innovativo di collaborazione tra pubblico e privato, unendo ricerca scientifica, arte, settore pubblico e impresa per promuovere l'innovazione e gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile. L'accordo prevede tre progetti pilota interdisciplinari che integrano competenze diverse per affrontare sfide globali.

- **Città sostenibili:** il progetto sviluppa tecnologie "what-if" per ripensare gli spazi urbani, con tre obiettivi principali: analizzare mobilità sostenibile e inclusività, progettare scenari futuri per risolvere criticità socioeconomiche e creare strumenti avanzati (metriche, modelli e IA) per supportare i decisori nella pianificazione urbana globale.
- **L'ecosistema dell'Informazione (Infosfera):** JICS analizza e migliora la qualità dell'infosfera, combattendo disinformazione e camere dell'eco attraverso il monitoraggio di bias cognitivi, agenda setting e algoritmi di raccomandazione. L'obiettivo è tradurre la ricerca in soluzioni pratiche per piattaforme, media e policy maker, garantendo accesso a informazioni pluraliste e affidabili.
- **AI e Machine Learning per l'innovazione (Creatività aumentata):** il progetto esplora la sinergia tra intelligenza umana (HI) e artificiale (AI) per potenziare la creatività, sviluppando strumenti che favoriscano soluzioni sostenibili. Questo approccio potrebbe ridefinire il concetto stesso di IA, portando a una nuova generazione di sistemi intelligenti al servizio del progresso umano.

Stato e risultati attesi

Città sostenibili



Rappresentazione di Roma come una città 15-minuti. Le zone sui colori del blu sono zone in cui i cittadini hanno a disposizione i servizi a meno di 15 minuti a piedi o in bicicletta. Le zone in rosso corrispondono a zone i cui servizi sono raggiungibili in più di 15 minuti, a piedi o in bicicletta

Città dei 15 minuti. Il concetto di città di prossimità rappresenta una soluzione interessante per la transizione ecologica. Ridurre gli spostamenti quotidiani significa abbattere le emissioni e migliorare la qualità della vita. In questo contesto, l'iniziativa JICS fornisce strumenti per analizzare lo stato attuale delle città e sviluppare nuovi scenari di crescita sostenibile. JICS ha potenziato la piattaforma dedicata alle città dei 15 minuti (<https://whatif.sony CSL.it/15minicity/>), inizialmente ideata dal CSL di Parigi, rendendola più avanzata e accessibile. La ricerca è stata pubblicata su Nature Cities, ed ha avuto la cover dell'issue dedicata (sezione highlights). Lo studio ha avuto risonanza internazionale venendo ripresa da più testate giornalistiche

nazionali e internazionali (sezione highlights). Il gruppo di JICS sta continuando le ricerche su questo modello urbanistico per capirne le implicazioni in tema di sostenibilità, mobilità e tessuto socioeconomico.

Fitness ed economia urbana. JICS applica il framework Fitness and Complexity per valutare accessibilità e mobilità nei diversi quartieri urbani. Questo approccio, inizialmente sviluppato per misurare la competitività economica dei Paesi attraverso la complessità dei prodotti esportati, viene adattato al caso di città, aree metropolitane estese o regioni e produzione di brevetti, usata come proxy dell'innovazione. Un ulteriore approccio serve per analizzare il "fitness landscape" dell'accessibilità ai servizi nelle città. Il metodo prevede la suddivisione della città in settori e la connessione di ciascun settore con i vari punti di interesse (POI) presenti al suo interno. L'obiettivo è confrontare i risultati di questa metodologia con altri indicatori urbani, come la mobilità, l'accessibilità e il valore immobiliare, al fine di creare uno strumento più efficace per quantificare le disuguaglianze e i fenomeni di segregazione urbana.

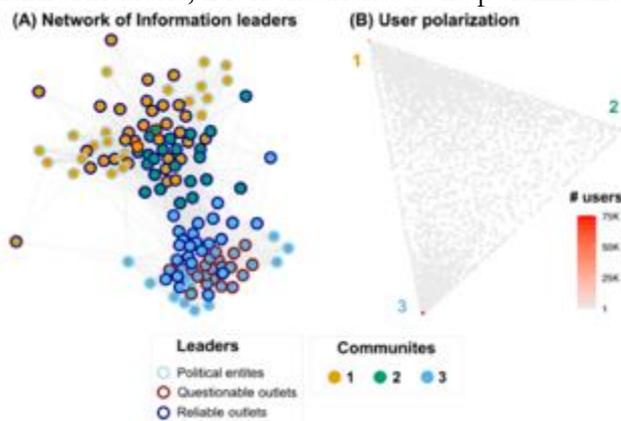


Un progetto Smart-city. CREF e Sony CSL, in collaborazione con Sony Semiconductor Solutions (SSS) e Sapienza università di Roma, stanno portando avanti un progetto innovativo basato sulle più avanzate tecnologie di computer vision applicate al contesto urbano. Il progetto pilota sfrutta il nuovo sensore intelligente Sony IMX500 per raccogliere e analizzare dati in tempo reale. Tra le attività principali, realizzate in sinergia con enti pubblici e partner privati, troviamo:

- Analisi e previsione dei flussi di traffico e pedonali nella città, mantenendo *by design* la privacy dei cittadini;
- Analisi della sicurezza stradale agli incroci, considerando parametri come il numero e la velocità dei veicoli, nonché le interazioni tra utenti vulnerabili (pedoni, ciclisti) e mezzi pesanti, con le naturali implicazioni per la prevenzione degli incidenti e il miglioramento della sicurezza urbana.

L'Ecosistema dell'Informazione (Infosfera)

Comprendere e contrastare le distorsioni nell'ecosistema informativo. Il progetto JICS si propone di studiare le dinamiche dell'ecosistema dell'informazione per comprendere e contrastare la diffusione della disinformazione, il rafforzamento della polarizzazione e il deterioramento del dibattito pubblico.

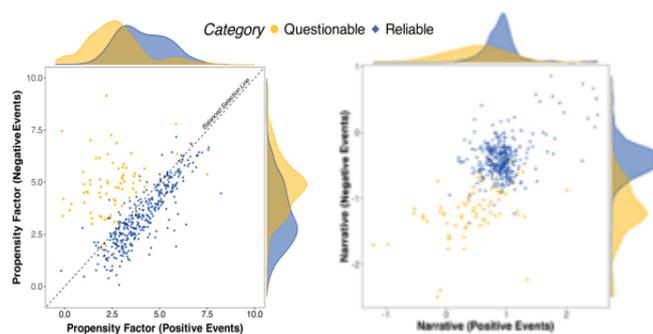


Propensione dei media italiani a riportare eventi positivi vs. negativi sulla vaccinazione (sx). Bias narrativo nel trattare eventi positivi rispetto a quelli negativi (dx). Il colore indica l'affidabilità della fonte (questionable o reliable), secondo le annotazioni di organizzazioni terze.

Tali distorsioni sono il risultato dell'azione di bias che influenzano sia la produzione che il consumo di informazione. Da un lato, l'**agenda setting** porta i media a selezionare determinati temi e dare risalto a determinate prospettive (come mostrato nella immagine superiore), plasmando così la percezione pubblica delle priorità sociali. Tuttavia, quando l'offerta informativa si irrigidisce su posizioni predefinite senza rispondere alla reale domanda di informazione, si crea uno spazio che la disinformazione può sfruttare per diffondersi più facilmente.

Dall'altro, il **confirmation bias** spinge gli utenti a consumare e condividere informazioni che confermano le proprie convinzioni preesistenti (figura seguente), riducendo l'esposizione a prospettive alternative e contribuendo alla frammentazione del dibattito pubblico. Questi meccanismi vengono ulteriormente

amplificati dai **sistemi di raccomandazione** che, ottimizzando la visibilità dei contenuti sulla base delle interazioni passate degli utenti, tendono a favorire la ripetizione di schemi informativi preesistenti,



(A) Struttura delle comunità della rete dei leader dell'informazione in Italia nel periodo 2018-2022. Il peso dei link tra due nodi è proporzionale al numero di retweeters condivisi. (B) Distribuzione dei retweet degli utenti tra le tre comunità di leader.

limitando la diversità delle fonti e restringendo la pluralità dell'informazione disponibile.

Il nostro obiettivo è sviluppare modelli in grado di anticipare i rischi legati a queste distorsioni e valutare i benefici di strategie che favoriscano un'informazione pluralista e il dialogo tra posizioni diverse, mitigando la tossicità del dibattito senza compromettere la libertà di espressione.

Soluzioni per un'informazione più equa, trasparente e inclusiva. Modifiche, anche minime, agli algoritmi dei sistemi di raccomandazione possono alterare il flusso delle informazioni e influenzare significativamente il dibattito, non solo all'interno delle piattaforme social ma anche nell'informazione tradizionale. Studiamo strategie per migliorare la trasparenza e l'equità di questi sistemi, sviluppando metriche capaci di misurare e aumentare la diversità informativa, superando i limiti delle attuali metriche basate esclusivamente su popolarità e coinvolgimento. Analizziamo inoltre i costi della polarizzazione, che non si manifestano solo nella frammentazione del dibattito, ma anche nella degradazione della qualità della comunicazione stessa: la riduzione della complessità linguistica e la rigidità delle comunità digitali limitano la capacità di costruire narrazioni articolate e di favorire il confronto tra prospettive diverse. Per questo, esploriamo soluzioni che possano incentivare la diversità nell'esposizione ai contenuti e stimolare interazioni più costruttive tra utenti con opinioni differenti, contribuendo a rendere il dibattito pubblico più inclusivo e aperto.

L'obiettivo finale della nostra ricerca è quello di tradurre queste analisi in azioni concrete, proponendo strumenti e strategie per piattaforme digitali, policy maker e giornalismo, con l'intento di migliorare l'accesso a informazioni di qualità, ridurre gli effetti negativi delle camere dell'eco e promuovere un ambiente informativo che rafforzi la democrazia anziché minarla.

AI e Machine Learning per l'innovazione (Creatività Aumentata)

AI non stazionaria. L'apprendimento automatico moderno si basa sull'ipotesi di stazionarietà, ossia che i parametri delle distribuzioni associate ai dati di addestramento rimangano invariati nel tempo. Sebbene sia evidente che la stazionarietà si verifica raramente nella vita reale, ciò è particolarmente vero per i processi creativi, per i quali le novità rappresentano un ingrediente cruciale che può portare a radicali cambiamenti di paradigma nel sistema di riferimento. Anche i sistemi di IA più recenti e di maggior successo, come ChatGPT, non prevedono la gestione delle dinamiche di innovazione. JICS svilupperà ulteriormente un nuovo metodo, chiamato Dreaming Learning, originariamente sviluppato da Sony-CSL, per incorporare efficacemente le novità spazio-temporali nei sistemi di IA. Il JICS intende approfondire ed espandere questa tecnica attraverso una più profonda comprensione teorica dei sistemi di IA non in equilibrio e applicare questa metodologia a problemi del mondo reale.

Movimento e Innovazione con AI. Il movimento è un mezzo di espressione, ma anche una manifestazione complessa che combina dinamiche fisiche, emozionali e culturali. Che cosa significa interpretare o creare attraverso il movimento? È possibile che una macchina colga questa complessità e contribuisca a espanderne i confini creativi? Queste domande non sono puramente teoriche, ma si intrecciano con le sfide pratiche legate alla progettazione di sistemi di intelligenza artificiale capaci di interagire con la dimensione espressiva e funzionale del movimento umano. In questo contesto, l'iniziativa JICS si dedica all'esplorazione del movimento come linguaggio universale e mezzo di connessione tra naturale e artificiale. JICS mira allo sviluppo di un *Large Movement Model*, un sistema basato su reti neurali progettato per osservare, comprendere e prevedere i movimenti umani. Il focus iniziale è sulla danza, un'arte performativa che rappresenta una

forma particolarmente ricca e complessa di movimento umano, intrecciando ritmo, espressione e creatività. Partendo dalla danza, il modello utilizza la tecnica innovativa del “Dreaming Learning”, sviluppato da Sony CSL – Rome, che consente al sistema di generare movimenti originali, favorendo una collaborazione creativa tra danzatori, coreografi e tecnologia. La danza, in questo senso, diventa non solo un banco di prova ideale, ma anche una fonte di ispirazione per esplorare le potenzialità espressive e trasformative del movimento in senso più ampio. Le applicazioni di questo modello si estendono ben oltre la danza: dalla riabilitazione fisica, dove l'intelligenza artificiale può aiutare a progettare esercizi personalizzati, al coaching sportivo, fino alla valorizzazione delle arti performative e alla conservazione del patrimonio culturale legato al movimento umano. JICS punta a sviluppare un framework generale per il miglioramento della qualità del movimento, rendendolo accessibile a professionisti di diversi ambiti e promuovendo un dialogo innovativo tra tecnologia e capacità umane

C.5 Neuroscienze e neuroimaging quantitativo (NQN)

Il progetto studia la dinamica della funzione cerebrale mediante approcci sperimentali quantitativi basati su imaging con risonanza magnetica nucleare (MRI), combinati con modelli computazionali. L'attività sperimentale è focalizzata sullo studio dell'associazione tra l'elaborazione dell'informazione a livello corticale, il consumo di energia che la sostiene, e il substrato microstrutturale che ne permette la trasmissione. Le attività di progetto si estendono alla dinamica funzionale indotta dall'interazione con l'ambiente e alle di fluttuazioni spontanee.

A tal fine il progetto persegue l'innovazione delle tecnologie MRI e lo sviluppo di nuove metodiche di analisi multimodale. Il progetto ha una forte connotazione interdisciplinare, e vuole in prospettiva contribuire allo sviluppo di strumenti diagnostici avanzati per la caratterizzazione, la diagnosi ed il trattamento di patologie neurologiche e psichiatriche.

I meccanismi fisiologici responsabili della funzione del cervello umano costituiscono tuttora una frontiera aperta per la scienza. L'investigazione di tali meccanismi è tanto più importante, quanto più si va chiarendo lo strettissimo legame tra proprietà elementari dei singoli fattori in gioco (metabolismo energetico, funzione dei microcircuiti) e manifestazioni complesse come il comportamento, nelle sue diverse manifestazioni, dalle attività sensoriali e motorie a fenomeni come la percezione e la coscienza. Il progresso delle neuroscienze, e più specificamente la comprensione del cervello umano e di come esso sia in grado di generare un comportamento, hanno grandemente beneficiato dello sviluppo di tecniche di neuroimmagini funzionali basate su MRI (fMRI).

Il progetto NQN si inserisce in questo contesto e vuole dare il suo contributo in tre settori strategici: lo sviluppo di nuove tecnologie MRI, la loro integrazione con tecniche avanzate di processamento e di modellistica, e l'applicazione all'identificazione di marcatori di patologie neurologiche e psichiatriche capaci di garantire una diagnosi precoce e di guidare il trattamento.

Stato dell'arte

L'MRI funzionale (fMRI) sfrutta le variazioni nel flusso sanguigno e nell'ossigenazione del sangue per mappare l'attività cerebrale. Quando una regione del cervello è attiva, richiede un maggiore apporto di ossigeno, il che provoca un aumento del flusso sanguigno in quella zona. La fMRI rileva queste variazioni, permettendo di identificare le aree cerebrali coinvolte in specifiche funzioni cognitive e comportamentali.

L'imaging a risonanza magnetica consente non solo di visualizzare strutture cerebrali con altissima risoluzione spaziale, ma anche di studiare la connettività funzionale tra diverse regioni del cervello. Le tecniche di diffusione MRI (dMRI), permettono di tracciare le strutture della sostanza bianca, rivelando il substrato strutturale delle connessioni a lungo raggio tra aree cerebrali distanti e contribuendo alla comprensione di come le informazioni siano integrate nel cervello.

Inoltre, aspetti metabolici e biochimici del cervello possono essere studiati attraverso la spettroscopia a risonanza magnetica (MRS). Questo approccio fornisce informazioni sui metaboliti presenti nel tessuto cerebrale, offrendo una finestra unica sui processi biochimici che avvengono nel cervello sano e patologico. Grazie alla continua evoluzione delle tecnologie di imaging è possibile affrontare questioni sempre più complesse, avvicinandosi alla comprensione dei meccanismi fondamentali che regolano il funzionamento del cervello. Questi avanzamenti non solo migliorano la nostra conoscenza di base del cervello, ma hanno anche importanti implicazioni cliniche, e contribuiscono allo sviluppo di nuovi trattamenti e interventi per

una vasta gamma di patologie neurologiche e psichiatriche, contribuendo in definitiva al miglioramento della qualità della vita.

Finalità e obiettivi

Il progetto ha due finalità principali: comprendere il legame tra metabolismo e funzione cerebrale, e sfruttare tale conoscenza per caratterizzare alcune patologie neurologiche di tipo neurodegenerativo. Nel contesto dell'applicazione alle patologie ci proponiamo in particolare di sviluppare la tecnologia MRI al fine di identificare marcatori precoci di degenerazione basati su neuroimmagini.

Le attività di carattere metodologico sono finalizzate all'ottimizzazione delle tecniche MRI di tipo microstrutturale e funzionale (in termini di acquisizione, in termini di pipeline di processamento, in termini di sviluppo di metodologie di mitigazione del rumore), ed allo sviluppo di strumenti appropriati per l'interpretazione quantitativa dei risultati (modellistica biofisica e approcci computazionali).

Le attività di carattere applicativo sono finalizzate alla caratterizzazione della fisiologia cerebrale, con particolare riguardo alla dinamica della funzione cerebrale, alle sue modulazioni associate a patologie ed all'invecchiamento fisiologico, al substrato microstrutturale e metabolico dell'alterazione funzionale.

Nel corso del triennio, tali finalità saranno perseguite mediante alcuni obiettivi intermedi:

- Sviluppo di tecnologie MRI per misure quantitative di dinamica metabolica, consumo di ossigeno e reattività vascolare; applicazioni allo studio dell'energetica cerebrale.
- Sviluppo dell'imaging eteronucleare con ^{23}Na per l'investigazione di alterazioni funzionali precoci nella malattia di Alzheimer (AD).
- Caratterizzazione della dinamica delle reti cerebrali e di identificazione delle componenti di origine non neuronale.
- Sviluppo dell'imaging del midollo spinale
- Caratterizzazione dell'architettura delle connessioni nella sostanza bianca e delle relative proprietà microstrutturali per lo studio dei cambiamenti progressivi nell'insorgenza della malattia di Alzheimer.

Questo progetto ha un impatto potenzialmente molto rilevante sulla salute ed il benessere delle persone. Lo sviluppo delle nostre tecniche basate su MRI può impattare su sulla comprensione dei meccanismi biologici alla base di patologie devastanti per l'individuo e la società. Inoltre, l'identificazione e la validazione di nuovi biomarcatori di patologia neurologica può permettere una diagnosi precoce, che a sua volta può migliorare le prospettive di un efficace trattamento. Le tecniche quantitative da noi sviluppate possono infine essere sfruttate per caratterizzare con maggiore accuratezza e minore bias l'efficacia di nuovi farmaci e trattamenti, contribuendo indirettamente al loro sviluppo.

Stato e risultati attesi

Sviluppo di tecnologie MRI per misure quantitative di dinamica metabolica, consumo di ossigeno e reattività vascolare; applicazioni allo studio dell'energetica cerebrale

Abbiamo messo a punto la tecnica di misura della CVR e stiamo acquisendo dati su pazienti alzheimeriani. Nel prossimo triennio in una prima fase verificheremo se la CVR fornisce utili indicazioni sui processi neurodegenerativi, e in un secondo momento svilupperemo la metodica di misura della CVR per derivare misure quantitative di consumo di ossigeno (CMRO_2).

Le misure di CMRO_2 saranno associate a misure di spettroscopia per caratterizzare l'energetica della percezione. Abbiamo recentemente mostrato che la percezione visiva induce un disaccoppiamento tra risposta funzionale e risposta metabolica; ci proponiamo di verificare se tale disaccoppiamento sia associabile ad una diversa regolazione del metabolismo aerobico, il che avrebbe importanti conseguenze sull'interpretazione dei dati funzionali e sulla comprensione di patologie o condizioni che impattano sulla percezione (per esempio, stati allucinatori).

Ci proponiamo nel corso del triennio di studiare l'associazione tra modulazioni metaboliche e dinamica del segnale BOLD, che è un potenziale biomarcatore di numerose patologie.

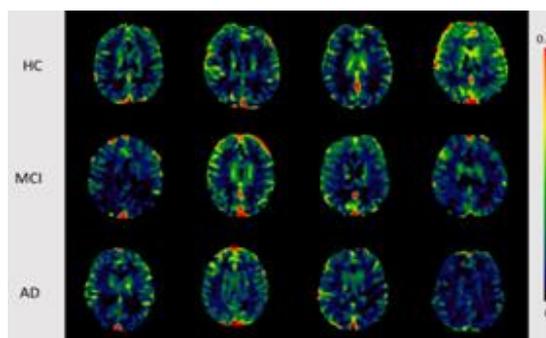


Figura: mappe di CVR ottenute su volontari sani (HC), individui con mild cognitive impairment (MCI) e con malattia di Alzheimer (AD) con un gas challenge (due epoche di somministrazione di gas contenete il 5% di CO₂). Tali mappe costituiscono un potenziale biomarcatore per patologie neurologiche legate all'invecchiamento o comunque al deterioramento vascolare.

Questa sezione è stata finanziata dalla Regione Lazio (progetto FISASMEM), ed è finanziata parzialmente da un PRIN-PNRR (MUR PRIN 2022 P202294JHK "RECENTRE").

Sviluppo dell'imaging etronucleare con ²³Na per l'investigazione di alterazioni funzionali precoci nella malattia di Alzheimer (AD)

Abbiamo recentemente sviluppato tecniche di risonanza magnetica basate sull'imaging ²³Na per identificare potenziali biomarcatori nell'AD ed esplorare i processi fisiopatologici alla base del danno tissutale microstrutturale e del deterioramento cognitivo. L'omeostasi del sodio è associata infatti a neuroinfiammazione, con potenziale sensibilità ad alterazioni vascolari e metaboliche.

Lo sviluppo metodologico è terminato. È in corso l'acquisizione di dati, che sarà conclusa nel corso dell'anno. Su tali dati testeremo l'associazione tra metriche del sodio, processi infiammatori/neurodegenerativi e disfunzione cognitiva nell'AD, in modo da caratterizzare l'utilità delle metriche ²³Na come biomarcatori.

Questa sezione è correntemente finanziata dal PNRR con un progetto sinergico incardinato presso la Fondazione Santa Lucia (PNRR MAD-2022-12376889).

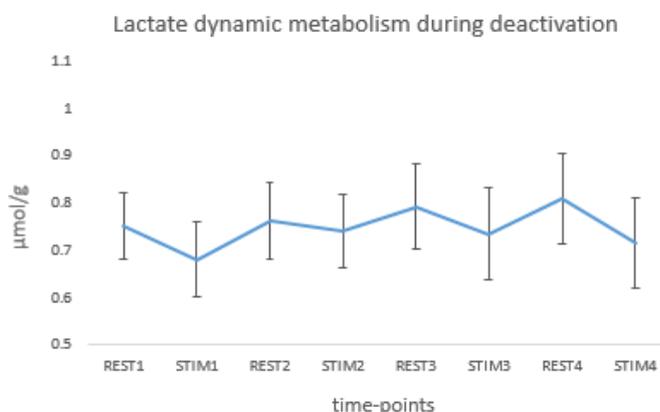
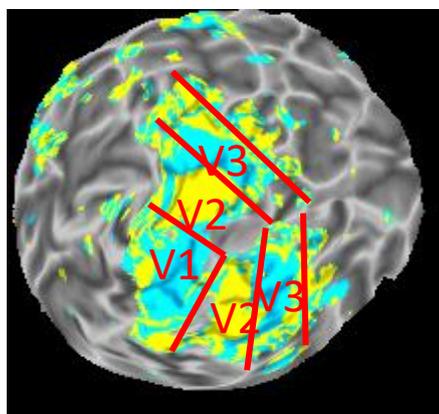


Figura: a sinistra: parcellazione delle aree visive primarie su corteccia "flattened" (emisfero destro). A destra: riproducibilità della risposta metabolica (riduzione di lattato durante tutte le epoche di rest). Il segnale spettroscopico proviene dalla corteccia visiva primaria (V1).

Caratterizzazione della dinamica delle reti cerebrali e identificazione delle componenti di origine non neuronale.

Le tecniche di analisi connettomica sono basate sull'apprezzamento della struttura di covarianza dei dati e sono assai sensibili a segnali spuri coerenti, fra i quali il cosiddetto "rumore fisiologico" (ossia le variazioni indotte da ritmi fisiologici come la respirazione, il movimento o il battito cardiaco).

Nel prossimo futuro finalizzeremo lo studio sulla mitigazione del rumore nella connettività funzionale ad alta risoluzione. La connettività funzionale tra gli strati corticali ha il potenziale di valutare la direzionalità delle connessioni, distinguere l'attività di input e output, ed investigare più direttamente la funzione dei microcircuiti. La qualità dei dati fMRI ad alta risoluzione è tuttavia fortemente degradata dal rumore. Abbiamo messo a punto un approccio di denoising che combina il riallineamento spaziale dei volumi fMRI,

il denoising termico e metodiche per la mitigazione del rumore fisiologico. I nostri risultati mostrano un differente effetto delle varie componenti di rumore nei layer corticali, e una corrispondente modulazione di connettività intracorticale di origine spuria.

A partire dal 2025 questa sezione sarà sostanzialmente ampliata, realizzando anche una convergenza con la sezione su “Sviluppo di tecnologie MRI”. Ci proponiamo infatti di fornire una caratterizzazione completa degli aspetti funzionali della dinamica delle vene piali in termini di caratteristiche salienti, transitori, composizione in frequenza. L’obiettivo è spingere i limiti dell’imaging funzionale con MRI a 3 tesla fino a 1 mm³, migliorare le tecniche di denoising termico e fisiologico, e fornire nuovi biomarcatori di salute cerebrovascolare. Il comportamento delle vene piali sarà modulato nella fase sperimentale mediante la somministrazione di semplici compiti funzionali di diversa durata e tipologia, mentre lo stato basale dei vasi sarà modulato attraverso lieve ipercapnia e iperossia. Estrarremo indicatori fisiologici e metabolici in funzione dello strato corticale di dati fMRI, e separeremo la componente di origine vascolare. Combineremo metodi di imaging consolidati (BOLD a eco di gradiente) con contrasti meno convenzionali (VASO, Vascular Space Occupancy per la mappatura del volume sanguigno e pCASL per il flusso sanguigno) e diverse condizioni sperimentali (iperossia, ipercapnia, compiti visivi, stato di riposo). I challenge respiratori permetteranno la calibrazione del segnale MRI e quindi di stimare le variazioni del CMRO₂ nei diversi strati corticali. Tuttavia, poiché il segnale fMRI a una certa profondità non riflette necessariamente l’attività di un singolo strato, è essenziale considerare la circuiteria corticale e la richiesta metabolica specifica del compito. Per questo, utilizzeremo un modello corticale consolidato, che incorpora la plasticità sinaptica non lineare, per prevedere il profilo atteso delle variazioni di CMRO₂ nei compiti visivi, confrontandolo con i dati fMRI acquisiti.

Mentre le dimensioni ridotte dei voxel causeranno un elevato rumore termico, che non dipende dalla profondità corticale, il rumore fisiologico ha un contributo rilevante negli strati superiori. Proseguiremo l’ottimizzazione del denoising in modo da massimizzare l’uniformità del rumore all’interno della sostanza grigia e ridurre le connettività spurie, che in base ai nostri risultati reputiamo riguardino principalmente gli strati superiori. Nel prosieguo di questo studio verificheremo se tali tecniche di denoising permettano la realizzazione di fMRI ad alta risoluzione a campo clinico (3 T) con tempistiche compatibili con l’acquisizione su paziente. La durata di questa sezione di progetto è stimabile in tre anni.

Questa sezione è correntemente finanziata dal PNRR con il progetto M4 C2, “MNESYS SINVASC”. Il sostanziale ampliamento descritto nell’ultima parte di questa sezione richiederà il reclutamento di un’unità di personale ricercatore a tempo determinato con profilo coerente con l’attività pianificata e per la durata delle attività (3 anni). Tale esigenza è determinata sia dall’entità delle attività previste, sia dalle specifiche competenze necessarie, che richiedono il coinvolgimento di personale con pregressa esperienza sulla tematica.

Sviluppo dell’imaging del midollo spinale

Sebbene l’imaging clinico del midollo spinale basato sulla risonanza magnetica sia comunemente usato, finora si è dimostrato incapace di fornire metriche quantitative affidabili per la caratterizzazione completa del danno tissutale. In questo contesto, abbiamo ottimizzato un protocollo sperimentale e di analisi dei dati del midollo spinale al fine di studiare pazienti con lesioni traumatiche e infiammatorie del midollo spinale, sia a livello cervicale che dorsale. Stiamo applicando il protocollo ottimizzato soggetti sani e pazienti con lesioni cervicali o dorsali. Per caratterizzare l’entità del danno e prevedere gli esiti clinici, la segmentazione delle lesioni rappresenta uno step necessario, che stiamo mettendo a punto. La segmentazione delle lesioni consentirà una localizzazione precisa del danno, permettendo il calcolo locale di misure morfometriche avanzate.

Questa sezione è correntemente finanziata dal PNRR con un progetto sinergico incardinato presso la Fondazione Santa Lucia (MCNT2-2023-12378303)

Caratterizzazione dell’architettura delle connessioni nella sostanza bianca e delle relative proprietà microstrutturali per lo studio dei cambiamenti progressivi nell’insorgenza della malattia di Alzheimer

I fasci di sostanza bianca nel cervello umano costituiscono il substrato fondamentale per l’integrazione delle diverse aree di sostanza grigia e formano una vera e propria infrastruttura che sta alla base della funzione cerebrale. Il danneggiamento dei fasci, localizzato in aree circoscritte (lesioni) o diffuso ad intere strutture

anatomiche, è centrale nella patofisiologia di numerose malattie neurologiche. Tramite la risonanza magnetica di diffusione è possibile non solo ricostruire le connessioni a breve e lungo raggio che costituiscono la rete cerebrale, ma anche caratterizzare proprietà microscopiche dei relativi tessuti tramite modelli compartimentali che fanno leva su un uso estensivo dei gradienti di diffusione.

Nel prossimo triennio caratterizzeremo la macro- e microstruttura della sostanza bianca in diverse coorti di pazienti che coprono buona parte dello spettro del deficit cognitivo: i pazienti con declino cognitivo soggettivo, quelli con declino cognitivo lieve, e infine quelli affetti da AD.

Questo studio esplorerà in parallelo l'insorgenza e la caratterizzazione delle lesioni e le differenze localizzate in strutture di sostanza bianca associate con funzioni cognitive di interesse.

C.6 Radio e Adro Terapia

L'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro ha stimato un rischio del 25% di incidenza tumorale nella popolazione europea. Si prevede che i casi aumenteranno, raggiungendo i 23,6 milioni di nuovi tumori all'anno entro il 2030, con un enorme costo per il sistema sanitario e i cittadini. La prevenzione e la diagnosi precoce rimangono strumenti fondamentali, e l'imaging nucleare svolge un ruolo importante per la diagnosi non invasiva. Al contempo, il trattamento di tumori attraverso radioterapia con fotoni e particelle cariche è in continuo sviluppo. Una profonda sinergia tra il mondo della ricerca tecnologica, la fisica applicata e il mondo della clinica ha portato un innalzamento della qualità dei trattamenti grazie ad un impiego di tecniche di irraggiamento/monitoring e pianificazione via via più efficienti ed efficaci. L'imaging diagnostico e il trattamento dei tumori con la radioterapia e/o terapia con particelle sono due aspetti fondamentali di questa linea di ricerca.

In particolare, il miglioramento delle prestazioni delle **tecniche di imaging nucleare** riveste un ruolo fondamentale. Le tecniche di tomografia a emissione (ET), come la Tomografia a Emissione di Singolo Fotone (SPECT), sono tecniche di imaging medico che sfruttano le radiazioni per monitorare i processi fisiologici all'interno del corpo del paziente. Il progetto reSPECT si inserisce nel contesto dell'imaging nucleare, mirando ad aprire la strada a una nuova famiglia di sistemi di rilevazione SPECT che offrono una capacità di conteggio senza precedenti a basso costo, con la possibilità di realizzare uno scanner per il corpo intero compatibile anche con studi MRI.

La **Terapia con Particelle Cariche** (CPT) utilizzando protoni e ioni di carbonio è una valida alternativa ben consolidata alla **radioterapia** (RT) con fotoni per il trattamento del cancro, in combinazione/o come alternativa alla rimozione chirurgica e la chemioterapia. Tuttavia, i vantaggi dei trattamenti CPT nella precisione balistica del rilascio della dose non sono ancora pienamente sfruttati. Una grande frazione di medici e fisici medici considera ancora *l'incertezza del range del fascio* come uno dei principali ostacoli affinché la CPT diventi una pratica comune, poiché sono necessari ampi fattori di sicurezza, riducendo il suo potenziale impatto e l'efficacia della terapia.

In questo contesto, il progetto MULTIPASS ha l'obiettivo di progettare, costruire e testare un nuovo rivelatore a fibre scintillanti, in grado di rilevare molteplici tipi di particelle secondarie per il monitoraggio inter-frazionale della portata. Il progetto è ambizioso, poiché attualmente non esistono rivelatori con tali prestazioni.

Al di là dei limiti intrinseci specifici della RT e della CPT, le tecniche di trattamento potrebbe cambiare in modo sostanziale: è stato dimostrato che la somministrazione di dose con fasci terapeutici di intensità molto alta riduce il danno ai tessuti sani pur preservando l'efficacia dosimetrica sul volume tumorale. Il fenomeno, chiamato effetto Flash, è indipendente dalla particella con cui viene pianificato il trattamento, possiamo parlare di radioterapia in condizione di **Ultra High Dose Rate** (UHDR), ma dipende fortemente da due parametri: il tempo totale di irraggiamento e la dose istantanea. Il suddetto fenomeno deve essere investigato in tutti i suoi aspetti: dallo sviluppo di nuovi monitor di fascio a queste intensità, alla realizzazione di nuove macchine acceleranti fino alla implementazione di piani di trattamento che tengano conto del "dose modifying factor" legato all'effetto FLASH.

Questa linea di ricerca vuole contribuire **allo studio di tecniche di imaging nucleare** e allo **sviluppo di tool dedicati** al monitor di fascio e allo sviluppo di strumenti di pianificazione di **trattamenti radioterapici**, in modalità convenzionale e di ultra-high dose rate.

Stato dell'arte

Le principali tecnologie SPECT attuali sono le Anger Camera e i rivelatori basati su CZT. Le Anger Camera utilizzano un cristallo scintillante di NaI(Tl) letto da PMT, offrendo costi contenuti ma limitazioni come bassa gestione di alte rate e incompatibilità con ambienti MRI. I rivelatori CZT digitalizzano direttamente le radiazioni gamma, garantendo alta velocità, compatibilità MRI e ottima risoluzione spaziale, ma il loro costo elevato e complessità produttiva ne limitano l'adozione. Il sistema ReSPECT mira a superare queste limitazioni.

Le sezioni d'urto di produzione dei frammenti secondari carichi prodotti durante i trattamenti di CPT dal target e dal bersaglio sono oggetto di continuo studio e misure al fine di permettere una definizione sempre più accurata della fisica alla base dello sviluppo dei piani di trattamento (TPS).

Inoltre, la radiazione secondaria prodotta dai neutroni deve essere caratterizzata sperimentalmente con alta precisione, per migliorare la valutazione dell'insorgenza di neoplasie maligne secondarie e definire la finestra terapeutica del trattamento. Ad oggi non esiste una completa caratterizzazione delle sezioni d'urto di produzione dei neutroni nel range energetico di interesse per CPT.

La radioterapia UHDR e i progressi tecnologici negli acceleratori compatti per elettroni riaprono la strada all'uso degli elettroni di alta energia (VHEE) per il trattamento di tumori profondi. Innovazioni come i LINAC a banda C e X, capaci di raggiungere gradienti di accelerazione più elevati, e la scoperta dell'effetto FLASH hanno rinnovato l'interesse per la terapia VHEE. Tuttavia, la mancanza di un sistema di pianificazione terapeutica (TPS) dedicato rappresenta un ostacolo significativo alla sua implementazione. Un TPS è fondamentale per pianificare e calcolare con precisione la distribuzione delle dosi, bilanciando efficacia e sicurezza. Senza un TPS specifico per VHEE, è difficile integrare questa terapia nella pratica clinica, soprattutto considerando i complessi effetti biologici della FLASH, che richiedono condizioni precise per essere attivati. Poiché VHEE e FLASH-RT non sono ancora disponibili clinicamente, i TPS commerciali non possono essere testati su casi reali e l'adattamento dei codici di calcolo esistenti al VHEE è ancora limitato. Attualmente, pochi strumenti di ricerca consentono di testare modalità FLASH o VHEE in geometrie complesse o di integrare l'effetto FLASH nei modelli di ottimizzazione della dose.

Finalità e obiettivi

Il progetto reSPECT mira a migliorare le prestazioni dei sistemi di imaging SPECT attualmente disponibili. Il rivelatore gamma innovativo proposto utilizza scintillatori plastici dopati con elementi ad alto Z, combinando i vantaggi di segnali di scintillazione rapidi per sostenere elevati tassi di eventi e una maggiore probabilità di assorbimento fotoelettrico per mantenere una buona risoluzione energetica. La struttura del sistema comprende un collimatore in tungsteno, che funziona sia come collimatore che come contenitore per i segmenti scintillatori, e un sistema di lettura personalizzato con fotorivelatori al silicio, ciascuno dotato di un canale indipendente. Questo design promette una migliore risoluzione spaziale e una produzione più economica rispetto ai sistemi CZT, oltre alla compatibilità con MRI, rendendolo adatto per imaging ibridi e applicazioni teragnostiche. Simulazioni Monte Carlo hanno evidenziato miglioramenti significativi rispetto ai sistemi convenzionali in termini di sensibilità, risoluzione spaziale e discriminazione energetica.

La teragnostica, che combina terapia e diagnostica, è particolarmente utile nel trattamento di tumori con radiofarmaci. Un esempio è la terapia con Lutetio-PSMA per il cancro alla prostata metastatico o resistente ai trattamenti. Il Lutetio-177, oltre a emettere elettroni β^- per danneggiare le cellule tumorali, emette raggi gamma da 208 keV, rilevabili con sistemi SPECT per monitorare la biocinetica del radiofarmaco. Attualmente, la dose somministrata ai pazienti è standardizzata, ma un approccio teragnostico permetterebbe di ottimizzare il trattamento in termini di quantità e tempi, bilanciando efficacia e tossicità. Questo approccio personalizzato potrebbe aumentare significativamente la sopravvivenza media dei pazienti, attualmente pari a circa 30 mesi.

Grazie alla sua elevata sensibilità, alla compatibilità con MRI e alla capacità di gestire tassi elevati di eventi, il sistema reSPECT è un candidato ideale per essere utilizzato anche come dosimetro nei trattamenti teragnostici.

Il CREF partecipa all'esperimento FOOT, finanziato dall'INFN, con il quale si vogliono misurare le sezioni d'urto doppio differenziali in angolo ed energia per i frammenti prodotti dei fasci utilizzati in CPT sugli elementi costituenti della materia del corpo umano.

Il CREF fa anche parte della collaborazione INSIDE, che ha sviluppato, in collaborazione con il CNAO, un rivelatore tracciante basato su fibre scintillanti chiamato Dose Profiler, il cui scopo è quello di monitorare il trattamento durante l'irradiazione con ioni di carbonio. Questo rivelatore sfrutta la correlazione tra il picco di Bragg e il profilo di emissione dei frammenti lungo l'asse del fascio. Durante il primo trial clinico presso il CNAO, conclusosi nel 2023, siamo stati in grado di rilevare i cambiamenti morfologici inter-frazioni di diversi pazienti. I risultati sono i primi dati clinici ottenuti con questo tipo di secondari carichi e questa tecnica di misura e sono stati pubblicati su Scientific Reports. Ad oggi, la seconda parte del trial clinico è in corso (inizio dicembre 2024) con un ulteriore campione di 10 pazienti (trattamenti con fasci terapeutici di ioni di carbonio e protoni). Ci aspettiamo i risultati nel prossimo triennio.

Il progetto MULTIPASS punta a sviluppare un prototipo compatto e affidabile per monitorare in tempo reale la radiazione secondaria prodotta durante i trattamenti CPT. Questo dispositivo consentirà di verificare i cambiamenti morfologici del paziente, monitorare la distribuzione della dose assorbita e la radiazione neutronica indotta, sfruttando una matrice di tracciatori di fibre scintillanti con elettronica personalizzata, ottimizzata tramite simulazioni Monte Carlo rapide.

La radioterapia con elettroni ad altissima energia (VHEE) offre una soluzione più economica rispetto alla terapia protonica, eliminando la necessità di infrastrutture costose come sincrotroni. Inoltre, la VHEE presenta vantaggi in termini di precisione, evitando i margini di sicurezza necessari nella terapia protonica per il Planned Target Volume (PTV).

L'effetto FLASH, che riduce i danni agli Organi a Rischio (OARs), sta aprendo nuove possibilità per la VHEE, specialmente nei tumori profondi. Sebbene gli acceleratori VHEE non siano ancora clinicamente disponibili, studi in silico dimostrano che la VHEE in modalità UHDR, combinata con l'effetto FLASH, potrebbe trasformare la radioterapia moderna, migliorando precisione e riducendo significativamente gli effetti collaterali.

È importante sottolineare che comprensione precisa del danno indotto dalle radiazioni su scala nanometrica richiede l'identificazione e la quantificazione dei siti di danno appropriati. Data la loro somiglianza strutturale e dimensionale con il DNA, i microtubuli rappresentano bersagli ideali per valutare gli effetti delle radiazioni ionizzanti. Il progetto RADAMES (Radiation Damage Assay on MicrotubulES) è un metodo recentemente sviluppato dal gruppo di Parma per caratterizzare il danno strutturale ai microtubuli (MT) in seguito all'irradiazione con dosi terapeutiche, sia in modalità a UHDR che in modalità convenzionale. Alcune attività verranno svolte con approccio innovativo per l'analisi dei microtubuli in assenza di cellule consentendo un'analisi più mirata del danno strutturale che potrebbe aprire nuove prospettive per applicazioni in dosimetria.

Stato e risultati attesi

Imaging Diagnostico. Gli scintillatori sviluppati da LEOS e CREF saranno integrati modularmente con elettronica al silicio per una lettura segmentata e una risoluzione spaziale avanzata (Figura seguente). Questo sistema si propone come un'opzione economica e innovativa per l'imaging nucleare, con potenziale anche per applicazioni dosimetriche in trattamenti teranostici, come l'uso del Lutezio-177. Ulteriori validazioni sono necessarie per tradurre queste innovazioni nella pratica clinica.

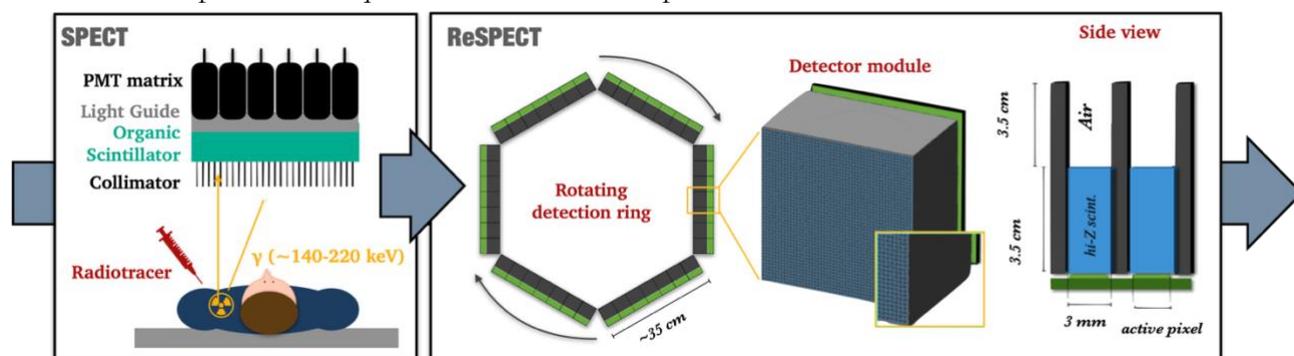


Figura. Sinistra: schema di funzionamento di una SPECT commerciale basata su cristalli inorganici (es. NaI(Tl)). Destra: elementi del principio di realizzazione di ReSPECT basata sull'impiego di scintillatore organico dopato con elementi ad alto Z.

RT e CPT. Il progetto MULTIPASS mira a sviluppare un tracciante a fibre per neutroni ultraveloci (10-200 MeV) basato sul doppio scattering elastico, colmando una lacuna tecnologica con il rivelatore MONDO. L'obiettivo è costruire un dispositivo compatto ($10 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$) per caratterizzare neutroni secondari in CPT.

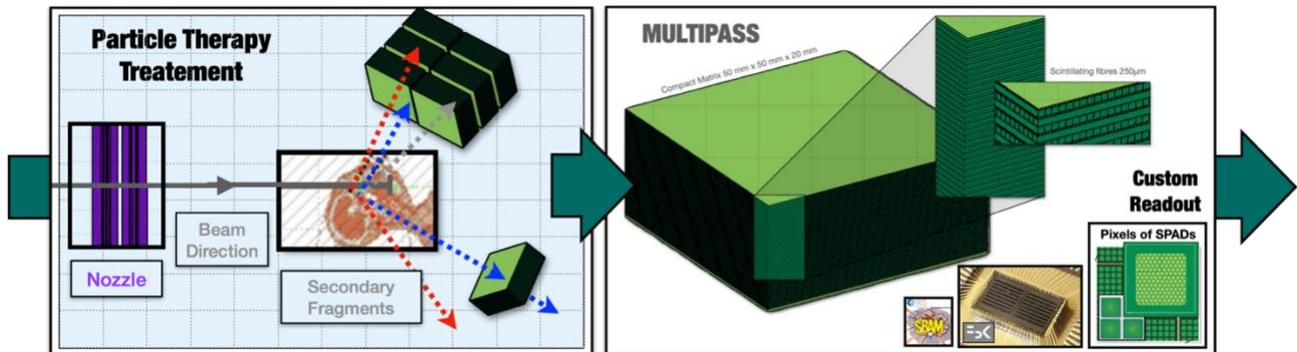


Figura sinistra: schema di CPT, i secondari carichi e neutri prodotti nel paziente possono essere sfruttati per monitoring. Figura destra: elementi della geometria del tracciante a fibre scintillanti di MULTIPASS e dell'elettronica di readout-custom che andrà implementata a partire da SBAM0 (sensore CREF-FBK).

Nel contesto dello sviluppo del *tool di ottimizzazione* del piano di trattamento abbiamo inoltre studiato le potenzialità dell'impiego di metodologie di ottimizzazione che derivano dalla teoria del trasporto ottimale e dalla meccanica statistica. Negli ultimi anni la regolarizzazione del trasporto ottimale ha permesso di raggiungere uno scaling quasi lineare con la complessità (numerica) del problema, velocizzando enormemente la convergenza numerica. Il vantaggio, quanto meno concettuale, di usare la teoria del trasporto ottimale è che si possono modellizzare sia i vincoli del problema sia la ricerca dei minimi di una funzione di dose rilasciata, aumentando la praticità del modello. In questo modo si vincola la dose rilasciata sul PTV ad essere almeno quella richiesta dal piano di trattamento, minimizzando la dose sugli altri organi. I risultati di questa sinergia tra le attività di questa linea di ricerca con quella del gruppo del CREF dei sistemi complessi sono promettenti. Ci prefiggiamo di poter migliorare le performance attuali sia in termini di tempo di calcolo complessivo, sia in termini di allargamento dei parametri di interesse ottimizzabili in contemporanea.

C.7 Fisica per i Beni Culturali

Il progetto Fisica per i Beni Culturali affronta tematiche di carattere archeologico, artistico e conservativo, sviluppando nuove metodologie analitiche basate sulla caratterizzazione dei materiali e sull'utilizzo del Machine Learning. L'obiettivo è di fornire un contributo allo studio dei materiali compositi di rilevanza storico-artistica, tramite lo sviluppo di nuove metodologie per l'identificazione di benchmark microscopici in relazione al contesto archeologico, storico e conservativo. Le tematiche trattate presentano una forte valenza interdisciplinare e riguardano aspetti quali attribuzione, tecniche di lavorazione, stato di conservazione, e eventuali interazioni con materiali di restauro in fase di sviluppo. Le attività sperimentali sono svolte presso il laboratorio di Fisica per i Beni Culturali del CREF, la cui strumentazione portatile permette di effettuare all'occorrenza misure in-situ, eventualmente integrate da indagini svolte presso Large Scale Facilities attraverso programmi di accesso a strumentazione avanzata di neutroni e radiazione di sincrotrone.

I Beni Culturali costituiscono un valore inestimabile per la memoria e l'identità culturale delle generazioni passate e future in quanto testimonianze avente valore di civiltà. Pertanto, la protezione e la conservazione dei beni culturali risultano aspetti fondamentali della società contemporanea per mantenere il legame con la nostra storia e per tramandare alle future generazioni il ricco patrimonio del passato. In questo contesto, lo studio dei materiali fornisce importanti indicazioni.

Il progetto Fisica per i Beni Culturali svolge attività di ricerca nell'ambito delle scienze applicate ai beni culturali attraverso lo sviluppo di nuove strategie e metodologie applicate all'analisi di tali beni tramite l'identificazione di benchmark microscopici attraverso tecniche analitiche e computazionali. La finalità consiste nella ricostruzione delle informazioni relative all'oggetto materiale, alla sua storia e funzione, nonché alla sua collocazione rispetto al contesto archeologico e storico-artistico.

Stato dell'arte

I Beni Culturali comprendono una straordinaria varietà di materiali eterogenei, ciascuno dei quali racconta una storia unica e richiede approcci specifici per il suo studio, la conservazione e la valorizzazione. Tra i materiali di natura inorganica si annoverano, ad esempio, i lapidei, i metalli, le ceramiche e i vetri mentre tra i materiali organici si classificano il legno, la carta, i tessuti, la pelle e le pergamene. La maggior parte dei materiali d'interesse sono soggetti a fenomeni di degrado di natura biologica e/o fisico-chimica reagendo alle varie fenomenologie di degrado in maniera differenziata. Spesso la compresenza di materiali differenti comporta lo sviluppo di altri composti, detti secondari, i quali si formano attraverso reazioni chimiche o processi fisici tra i materiali originari, alterandone le caratteristiche e dando origine a nuove proprietà o strutture. Inoltre, le condizioni microclimatiche di conservazione, la presenza di contaminanti, e l'applicazione di prodotti per il restauro, aggiungono un ulteriore elemento di complessità al sistema da indagare. I manoscritti, ad esempio, sono composti da parti differenti tra cui un supporto cartaceo a base di fibre vegetali, da inchiostri a base ferro-gallico, pigmenti e da rilegature realizzate generalmente con altri materiali organici. A causa dell'acidità degli inchiostri e della denaturazione del supporto cartaceo, come la depolimerizzazione, spesso sono soggetti a processi di deacidificazione periodica con prodotti di cui non si conosce la stabilità a lungo termine e che potrebbero compromettere la leggibilità delle opere. La conoscenza approfondita dei materiali costituenti e dei fenomeni di degrado richiede dunque un approccio interdisciplinare che integri fisica, chimica e scienze dei materiali. Le tecniche analitiche avanzate quali la spettroscopia infrarossa in trasformata di Fourier (FTIR), la fluorescenza a raggi X (XRF) e l'imaging iperspettrale giocano un ruolo fondamentale nello studio delle proprietà dei materiali permettendo l'identificazione di elementi, composti e loro distribuzione spaziale.

Il più recente utilizzo di tecniche di machine learning, in questo contesto, sta trasformando il modo di affrontare tali problematiche fornendo nuove soluzioni di interpretazione dati. Questo nuovo approccio permette di trattare problematiche più complesse fornendo nuovi strumenti di indagine con la possibilità di gestire grandi quantità di dati e di considerare simultaneamente più parametri.

Finalità e obiettivi

La linea di ricerca *Fisica per i Beni Culturali* è dedicata all'analisi di beni storico-artistici, tramite l'integrazione di metodologie analitiche avanzate e tecniche di intelligenza artificiale con l'obiettivo di approfondire la conoscenza, ottimizzazione della conservazione e promozione della valorizzazione del patrimonio culturale. Le attività di ricerca sono strutturate in quattro fasi operative: a) individuazione delle problematiche emergenti e specifiche nell'ambito dei beni culturali, mediante un dialogo costante con professionisti nei settori correlati quali archeologi, museologi, conservatori, antropologi e storici; b) ricerca e sviluppo di nuove metodologie e protocolli di analisi oltre lo stato dell'arte; c) sviluppo e applicazione di metodi di classificazione ed estrazione di benchmark microscopici, tramite tecniche di machine learning per un potenziamento dell'efficacia delle indagini; d) interpretazione dei risultati ottenuti su scala microscopica nel contesto specifico tramite un approccio integrato e interdisciplinare.

In relazione alle tematiche di ricerca, sono state avviate collaborazioni di medio-lungo termine con istituzioni museali e accademiche i quali detengono i beni oggetto di studio, attraverso la stipula di accordi quadro di collaborazione. Le aree di interesse comprendono i seguenti ambiti:

- **Beni librari:** studio delle materie prime (inchiostri, pigmenti, adesivi, leganti, disegni, stampe ed emulsioni fotografiche) e la loro interazione con nuovi prodotti di restauro, valutazione della funzionalità e ecosostenibilità.
- **Metalli:** studio delle produzioni e delle materie prime che hanno caratterizzato la storia tecnologica dell'antichità.
- **Reperti ossei e legni:** analisi di materiali organici, quali ossa, legno e semi, rinvenuti in contesti preistorici e protostorici.
- **Ceramiche:** studio delle tecniche di produzione e reperimento dei materiali nell'antichità, nonché analisi dei residui organici e vegetali.

Nel corso del triennio, le finalità della linea di ricerca saranno perseguite attraverso il raggiungimento dei seguenti obiettivi scientifico-strategici:

1. Sviluppo di metodologie e protocolli innovativi per la caratterizzazione di materiali compositi nei settori indicati.
2. Implementazione di protocolli per la classificazione e estrazione di benchmark microscopici, tramite tecniche di machine learning e intelligenza artificiale.
3. Studio e caratterizzazione degli effetti a breve e lungo termine e sostenibilità di nuovi prodotti di restauro applicati ai materiali di interesse.
4. Potenziamento delle collaborazioni mediante nuovi accordi di ricerca, partecipazione a networks nazionali ed internazionali e progetti congiunti.

Gli obiettivi della linea di ricerca sono concepiti per generare innovazione contribuendo in modo decisivo al progresso delle conoscenze e delle tecnologie nel campo della conservazione del patrimonio culturale. Lo sviluppo di protocolli avanzati per la caratterizzazione di materiali e l'implementazione di tecniche basate su machine learning e intelligenza artificiale permetterà una ottimizzazione dei processi diagnostici rafforzando significativamente la capacità di analisi rispondendo alle esigenze di un settore in continua evoluzione. Il potenziamento delle collaborazioni nazionali e internazionali favorirà lo scambio di conoscenze e l'avvio di progetti congiunti che arricchiranno la ricerca scientifica, aumenteranno la visibilità internazionale.

Stato e risultati attesi

I risultati attesi si articolano in diversi ambiti di applicazione, con particolare attenzione all'innovazione metodologica, all'approfondimento delle pratiche di restauro/conservazione e allo sviluppo di nuovi protocolli di indagine. Nel prossimo triennio, si prevede di apportare un contributo significativo allo studio dei *beni librari*, attraverso l'ottimizzazione della metodologia innovativa per l'attribuzione dei testi manoscritti di cui si è realizzato il primo studio. Questa metodologia si baserà sull'analisi della composizione degli inchiostri generalizzata al caso dei pigmenti, mirando a correlare informazioni microscopiche a quelle macroscopiche. Parallelamente, sarà introdotto un nuovo approccio metodologico per l'analisi dei dipinti a

olio e delle stampe artistiche, finalizzato all'identificazione delle tecniche esecutive impiegate. L'approccio integrerà i dati ottenuti tramite tecniche di caratterizzazione avanzata e machine learning, correlando le informazioni relative alla struttura microscopica, alle ricette originali, alle modalità di esecuzione e allo stato di conservazione delle opere.

Nel prossimo triennio, sarà affrontato inoltre lo studio approfondito degli effetti dell'applicazione di nuovi prodotti di restauro a classi di materiali differenti di interesse storico-artistici. L'obiettivo principale sarà quello di comprendere i meccanismi di interazione e metodi di applicazione nel caso reale dei prodotti, contribuendo alla definizione di pratiche di restauro basate su dati quantitativi. In questo contesto, è previsto un primo studio sugli effetti a medio e lungo termine di prodotti basati sull'utilizzo di nanoparticelle applicate a supporti cartacei, per una maggior efficacia degli interventi e identificazione di soluzioni operative e innovative per la salvaguardia del patrimonio librario e delle opere artistiche.

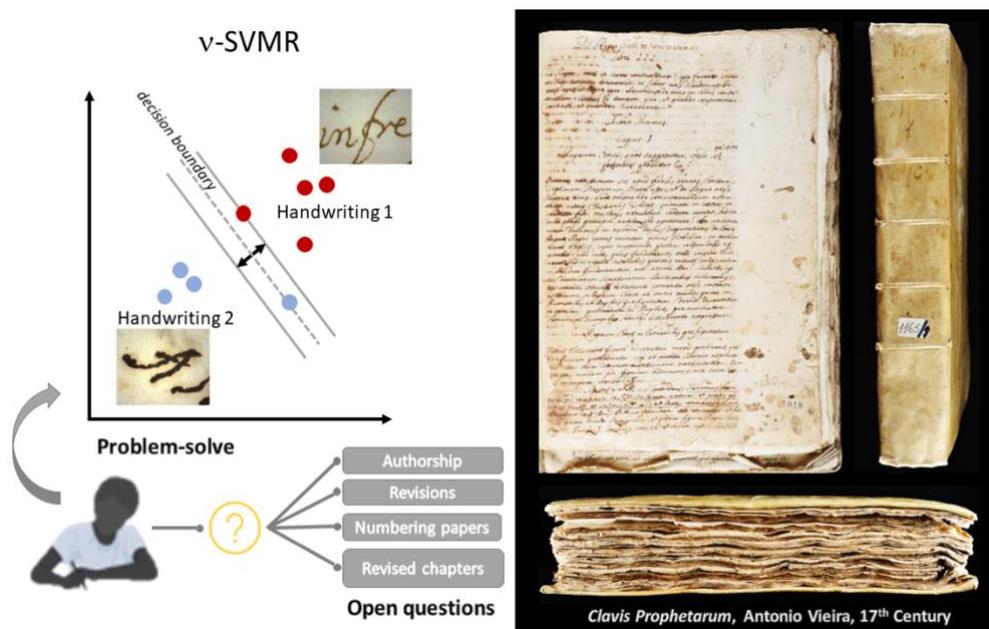


Figura: Sviluppo di una nuova metodologia per l'attribuzione delle opere librarie



Figura: Oggetti in metallo appartenenti al corredo funerario di Kha e Merit (Museo Egizio, Torino).

Sulla base dello stesso approccio integrato che coniuga attività sperimentali e analisi tramite machine learning, si intende contribuire allo studio delle produzioni in *metallo* che hanno caratterizzato la storia tecnologica in antichità. L'approccio proposto consentirà l'identificazione e classificazione delle leghe metalliche, evidenziando le relazioni tra la composizione chimica, le proprietà fisiche e le tecniche di produzione. L'impiego di algoritmi di machine learning permetterà di interpretare e correlare i dati, identificando pattern e tendenze che potenziano le capacità diagnostiche. Questo approccio fornirà una comprensione più profonda dei metodi di lavorazione della metallurgia antica.

Lo studio dei *materiali organici*, in particolare ossa e legni, richiede l'adozione di tecniche avanzate per l'analisi. In questo contesto, si intende contribuire tramite lo sviluppo di nuovi protocolli di indagine basati su spettroscopia e machine learning per l'identificazione di benchmark correlati alle condizioni di combustione dei reperti. I risultati attesi includono una significativa comprensione dei riti sepolcrali e degli eventi ad essi correlati, aprendo la strada a nuove scoperte e favorendo un'interpretazione più completa dei materiali combusti con possibili ricadute in campi limitrofi come, ad esempio, le scienze forensi.

Lo studio dei reperti ceramici e residui organici si focalizzerà sull'integrazione di dati chimico-fisici e archeologici utilizzando algoritmi di machine learning per la ricostruzione dell'utilizzo, il riutilizzo e il riciclo dei materiali nella civiltà mesopotamica. Questo approccio contribuirà alla comprensione dei processi sociali e tecnologici che hanno influenzato la produzione ceramica, offrendo nuove prospettive sulle pratiche quotidiane. Le attività sono attualmente in corso nell'ambito del progetto PRIN 2022 SLOW SUMER. Si prevedono inoltre possibili ricadute in campi affini, quali lo studio dei residui organici in contesti archeologici per l'identificazione di abitudini alimentari.

In conclusione, i risultati attesi della linea la ricerca intendono rafforzare le capacità analitiche del laboratorio nel campo della conservazione del patrimonio coniugando tecnologie avanzate per un impatto duraturo sulla protezione e valorizzazione dei beni culturali.

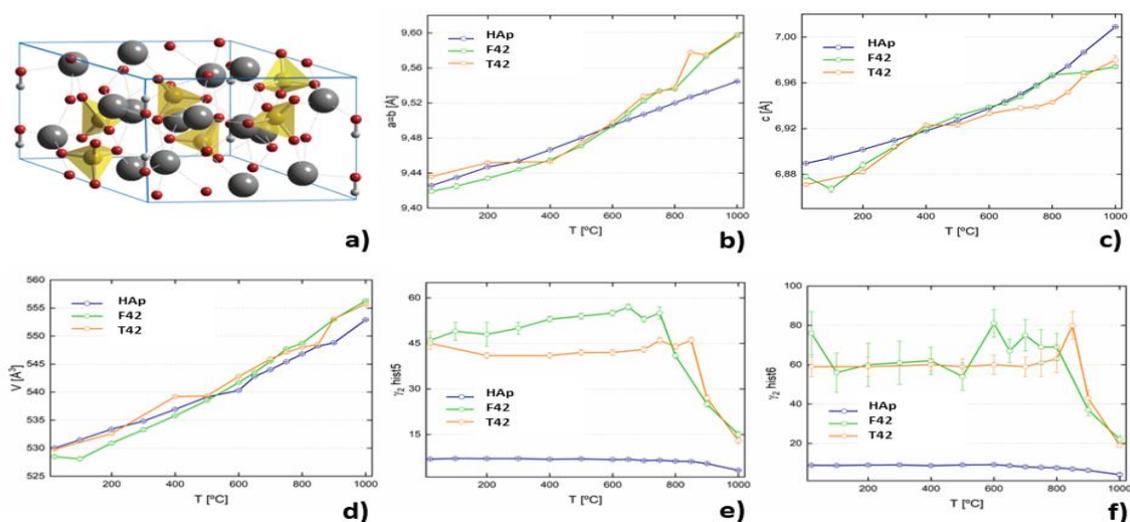


Figura. Parametri strutturali della matrice ossea durante il processo di combustione in-situ, in funzione della temperatura

C.8 Tecnologie fotoniche e Intelligenza Artificiale

Il progetto si propone di sviluppare nuovi sistemi fotonici principalmente con lo scopo di realizzare macchine di calcolo ottico innovative in grado di superare i limiti delle macchine di calcolo tradizionali. L'attività sperimentale esplora l'uso della luce laser e la sua interazione con mezzi fotonici complessi per accelerare la soluzione di problemi di ottimizzazione combinatoria e per implementare reti neurali ibride elettroniche e fotoniche. La ricerca verte anche sull'utilizzo del machine learning per rendere più efficaci alcune delle tradizionali tecniche ottiche di caratterizzazione di materiali. L'attività teorica è volta a sviluppare modelli matematici avanzati per la simulazione di sistemi combinatoriali che siano rappresentabili come sistemi di spin, con lo scopo di esplorare la fisica classica e quantistica alla base dei dispositivi in esame, e di testare l'efficienza di nuovi algoritmi di calcolo.

Stato dell'arte

Enrico Fermi è stato un pioniere nella realizzazione e nell'utilizzo di macchine calcolatrici, esempi sono presenti anche nel Museo del CREF.

In anni recenti il concetto di macchina computazionale si è notevolmente allargato ed esiste un'intensa attività per l'ideazione di nuovi calcolatori che includono tecnologie quantistiche e fotoniche. In questa direzione sono largamente coinvolte le maggiori realtà industriali nel mondo, tra cui IBM, NTT, HUAWEI e numerose startup in varie nazioni tecnologicamente avanzate. La leva per le nuove tecnologie computazionali è data dalla cosiddetta fine della legge di Moore, la regola empirica che ha descritto nel corso dell'ultimo ventennio la rapida crescita della potenza di calcolo nei sistemi a semiconduttori tradizionali. Negli ultimi anni si è osservata la fine di questa crescita, evidenziando uno stallo nelle prestazioni dovuto principalmente a limiti fisici.

Questa circostanza ha motivato numerose ricerche per nuove tecnologie per il calcolo. Queste ricerche sono ulteriormente alimentate dai risultati recenti in merito all'impatto ambientale delle nuove metodologie di intelligenza artificiale. Gli algoritmi che oggi stanno cambiando la società necessitano di risorse di calcolo che crescono esponenzialmente con gli anni e il cui impatto ambientale si può capire osservando che l'addestramento di una singola intelligenza artificiale produce emissione di carbonio confrontabile con quello di decine di voli intercontinentali.

È quindi necessario sviluppare nuove tecnologie che siano più performanti dei processori convenzionali e consumino meno energia: per esempio, operando a temperatura ambiente senza necessità di sistemi di raffreddamento.

La fotonica è considerata ad oggi la tecnologia più promettente in questo contesto. Studi dimostrano l'elaborazione parallela di enormi quantità di dati tramite raggi laser che codificano l'informazione mediante tecniche avanzate di modulazione. Nel lungo termine l'inclusione di algoritmi quantistici può radicalmente accelerare la velocità di calcolo, oltreché innovativi metodi di crittografia.

I sistemi fotonici e quantistici possono risolvere problemi di ottimizzazione in un tempo polinomiale con le dimensioni del sistema: una possibilità spesso indicata come "Vantaggio Quantistico." Ciò che il CREF vuole perseguire attraverso linea di ricerca "Tecnologie fotoniche ed intelligenza artificiale" è lo sviluppo di quantistici fotonici per l'accelerazione della computazione, che forniscano il risultato del calcolo in una forma classica robusta, che non sia soggetta a decoerenza e quindi sia immediatamente interfacciabile con calcolatori tradizionali.

Il lavoro è portato avanti su due linee di ricerca parallele: una sperimentale, incentrata intorno al lavoro del Laboratorio di Fotonica Computazionale del CREF, il cui responsabile è il Dr. Romolo Savo, ed una teorica, incentrata sullo sviluppo di modelli matematici per testare l'efficienza su larga scala di nuovi algoritmi di calcolo combinatorio attraverso simulazioni numeriche, il cui responsabile è il Dr. Marcello Calvanese Strinati.

Finalità e obiettivi

L'attività sperimentale del Laboratorio di Fotonica Computazionale si distribuisce su due linee di ricerca che guardano alla fotonica ed alle tecnologie di intelligenza artificiale (IA) in maniera speculare. La prima direzione di ricerca - "Fotonica per il machine learning" - ha lo scopo di realizzare macchine di calcolo innovative basate su sistemi fotonici, in grado di accelerare il calcolo combinatorio nei problemi di ottimizzazione (es. macchine di Ising) e di implementare su larga scala reti neurali fotoniche. Entrambe le architetture di calcolo sono largamente diffuse nelle intelligenze artificiali e la loro implementazione analogica basata sulla propagazione di luce ha il potenziale di ridurre in modo significativo le risorse computazionali, il consumo energetico e l'impatto ambientale associate all'uso dell'IA. La seconda direzione di ricerca - "Machine learning per la fotonica" - mira ad utilizzare le potenti tecniche di elaborazioni dati offerte dal machine learning per rendere più efficaci alcune delle tradizionali tecniche ottiche di caratterizzazione di materiali, come l'interferometria e lo scattering di luce. I risultati ottenuti in questa direzione permetteranno di semplificare i protocolli di implementazione delle tecniche ottiche e di estendere il loro utilizzo a situazioni e materiali più complessi.

Anche l'attività teorica si divide in due direzioni, in questo caso "classica" e "quantistica". L'analisi classica riguarda la formulazione e lo studio di nuovi modelli di dinamica nonlineare di un sistema di oscillatori parametrici accoppiati. Lo scopo è simulare il rilassamento di un sistema di spin vettoriali verso il minimo

dell'energia di interazione tra gli spin. Questo sistema chiamato “macchina di hyperspin” è proposto con un duplice scopo: (i) Trovare il minimo dell'energia di interazione tra gli spin simulati; (ii) Implementare nuovi schemi di “annealing dimensionali”, per aumentare la capacità del sistema di trovare il minimo energetico di un sistema di spin binari (Ising). L'analisi quantistica è basata principalmente sul formalismo dei sistemi dissipativi aperti. Lo scopo è trovare effetti quantistici non banali in questi modelli di oscillatori e capire se essi possano essere usati per potenziare il calcolo classico.

Stato e risultati attesi

La ricerca sperimentale: il laboratorio di fotonica computazionale

Il laboratorio ha l'infrastruttura per sviluppare prototipi di macchine di calcolo fotonico e condurre gli esperimenti ottici correlati. I metodi sperimentali si basano sulla modulazione di luce laser mediante modulatori di luce spaziali e sull'interazione della luce con materiali fotonici complessi. La modulazione spaziale della fase del campo ottico consente di codificare milioni di variabili in un singolo punto luminoso di pochi millimetri. La propagazione della luce nello spazio libero e attraverso materiali fotonici con proprietà controllate consente l'elaborazione parallela di questa enorme quantità di dati. I materiali di interesse sono mezzi complessi e policristallini ingegnerizzati con disordine fotonico e non linearità del secondo ordine, utilizzati come piattaforme fisiche per l'elaborazione dell'informazione trasportata dalla luce. Lo studio e lo sviluppo di questo tipo di materiali è parte dell'attività di ricerca del laboratorio e viene condotto nell'ambito di collaborazione internazionali (ETH Zurigo, Université Sorbonne, TATA institute Mumbai). L'utilizzo di sorgenti laser impulsive “ultraveloci” (femtosecondo) è un elemento chiave della ricerca del laboratorio che permette di utilizzare e studiare i materiali di interesse nel regime ottimo non lineare.

Il laboratorio ha recentemente dimostrato la realizzazione della prima rete neurale fotonica di tipo “deep” su larga scala basata su scattering multiplo di impulsi laser e sulla generazione non lineare di seconda armonica in campioni policristallini disordinati fabbricati assemblando nanocristalli di niobato di litio (LNO). Uno schema dell'apparato sperimentale è mostrato in Fig. 1. Questo risultato è stato ottenuto all'interno di una collaborazione internazionale (Université Sorbonne, ETH Zurigo, Tsinghua University Pechino) e pubblicato sulla prestigiosa rivista Nature Computational Science. Il risultato è stato anche selezionato tra i dieci “breakthrough” dell'anno 2024 dalla rivista IEEE Photonics.

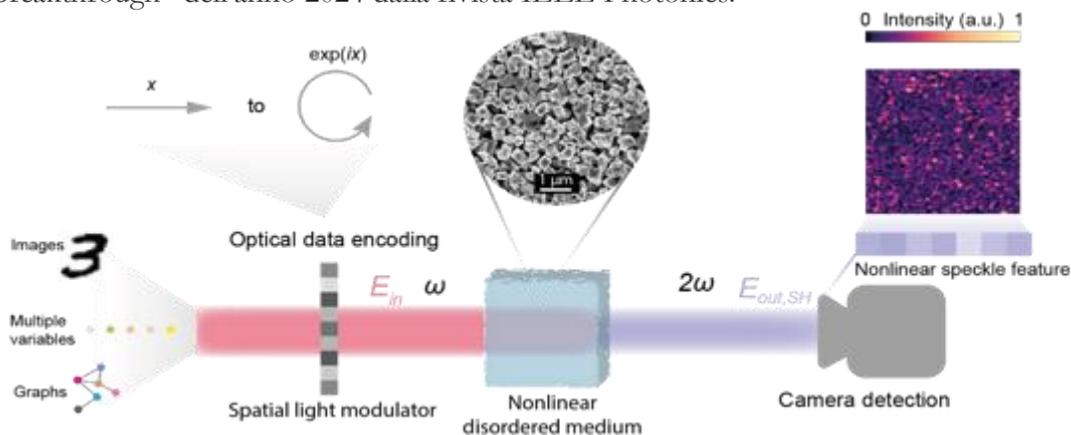


Figura: Schema dell'apparato sperimentale utilizzato per la realizzazione di una rete neurale fotonica “deep” su larga scala basata su scattering multiplo di impulsi laser e sulla generazione non lineare di seconda armonica in campioni policristallini disordinati fabbricati assemblando nanocristalli di niobato di litio (LNO). [figura riprodotta da Nat. Comp. Sci. , 1-11 (2024)]

Ulteriori attività sperimentali in corso comprendono:

1. la realizzazione di una macchina di Ising fotonica con interazione a multi-corpo, basata su scattering multiplo di impulsi laser e sulla generazione non lineare di seconda armonica in campioni policristallini disordinati fabbricati assemblando nano cristalli di niobato di litio (LNO). Sono in fase di sperimentazione tre tipologie di algoritmo di ottimizzazione: i) sequenziale, ii) genetico e iii) *simulate annealing*. Questo studio sta permettendo una migliore comprensione dei fenomeni non lineari in mezzi

fotonici disordinati. La realizzazione di questa macchina permetterà di implementare su piattaforma fotonica problemi di ottimizzazione combinatoriale finora difficilmente trattabili.

2. la realizzazione di una macchina di Ising in regime lineare su larga scala che utilizza luce laser continua e propagazione in spazio libero, contenente un innovativo schema interferometrico che permette di monitorare simultaneamente il piano ottico di elaborazione dati (piano di Fourier) ed il piano ottico di codificazione dati (piano fasi reale). Questa macchina fotonica di Ising vuole essere la prima utilizzata per la classificazione di dati nell'ambito della fisica delle alte energie, nello specifico per classificare le coordinate di rivelazioni di raggi cosmici.
3. lo sviluppo di una tecnica innovativa di "phase unwrapping" per mappe di fase bidimensionali a quadranti basata su una procedura di classificazione da reti neurali artificiali convolutive. Il lavoro prevede la creazione in laboratorio della collezione di immagini interferometriche necessarie all'addestramento della rete neurale, consistente in decine di migliaia di immagini. Questa tecnica è potenzialmente applicabile in numerosi altri campi, come i radar, l'acustica e le telecomunicazioni

Il laboratorio sviluppa anche una linea di ricerca numerica che indaga tramite simulazioni la realizzazione di sistemi fotonici integrati in niobato di litio per la manipolazione della luce tramite scattering multiplo (collaborazione con ETH Zurigo).

La ricerca teorica

Data la sua recente idealizzazione, la macchina di hyperspin rimane al momento implementata a livello numerico in due modi: Descrivendo la dinamica degli oscillatori parametrici in tempo continuo come un sistema di numerose equazioni differenziali accoppiate (nello specifico equazioni nonlineari di Mathieu), oppure simulando la dinamica in tempo discreto tramite opportune mappe nonlineari, simulando ad ogni tempo i processi fisici fondamentali che regolano la dinamica del sistema (amplificazione parametrica, perdite intrinseche, accoppiamento e non linearità). Mentre il primo approccio permette di mostrare la validità generale del sistema proposto in quanto il modello analitico non è direttamente pensato per una specifica realizzazione sperimentale, il secondo approccio risulta particolarmente versatile e numericamente efficiente per proporre e soprattutto testare specifiche realizzazioni sperimentali della macchina di hyperspin, simulando nella maniera desiderata i processi fondamentali sopra indicati.

L'analisi fino ad ora effettuata dalla presente attività teorica sulla macchina di hyperspin, e in precedenza anche da attività sulle macchine di Ising, ha mostrato come l'efficienza della macchina per i due scopi sopra indicati dipenda in maniera non banale da tutti i parametri fisici che governano la dinamica del sistema. Abbiamo osservato che la macchina di hyperspin usata come minimizzatore dell'energia di interazione di spin vettoriali mostra una capacità di convergere al minimo globale che dipende in particolar modo da quanta potenza (in termini del campo di pompa che realizza l'amplificazione parametrica) viene immessa nel sistema. Similmente, è noto che un problema analogo si osserva nelle macchine di Ising, dove la performance del sistema come minimizzatore del modello di Ising dipende fortemente dai parametri fisici. Abbiamo recentemente testato con successo la capacità della macchina di hyperspin con annealing dimensionale di incrementare notevolmente la performance del sistema come minimizzatore del modello di Ising e di ridurre la dipendenza di essa dai vari parametri (in particolare il campo di pompa) rispetto alla macchina di Ising convenzionale. L'analisi è stata condotta implementando numericamente sia la macchina di hyperspin sia la macchina di Ising basandosi sul formalismo delle mappe nonlineari in tempo discreto, simulando due possibili implementazioni sperimentali: ottica e opto-elettronica.

Rimane aperta la domanda di come limitare la sensibilità della macchina di hyperspin usata come minimizzatore di modelli di spin vettoriali. Nel prosieguo di questa analisi studieremo un'estensione del modello di oscillatori parametrici usato per la macchina di hyperspin su larga scala con lo scopo di garantire sia una maggiore accuratezza del sistema nel convergere verso il minimo dell'energia del modello di spin simulato, sia una robustezza dei risultati ottenuti a variazioni dei parametri del sistema.

Un altro aspetto che l'attività teorica si pone di studiare sono gli effetti quantistici in questi sistemi. Abbiamo recentemente proposto uno studio di correlazioni quantistiche (entanglement) descrivendo la dinamica del sistema quantistico con il formalismo dei sistemi dissipativi aperti (formalismo di Lindblad), ottenendo numericamente la matrice densità completa del sistema grazie a metodi di diagonalizzazione esatta. L'analisi è limitata a pochi (due o tre) oscillatori a causa della notevole complessità numerica del problema, ma è

riuscita a mostrare come la presenza dell'accoppiamento tra oscillatori responsabile della formazione degli hyperspin dia origine ad uno stato fortemente correlato anche nei regimi di parametri dove invece il sistema usato come macchina di Ising realizza uno stato semi-classico. Le implicazioni di questo risultato sono attualmente in esame.

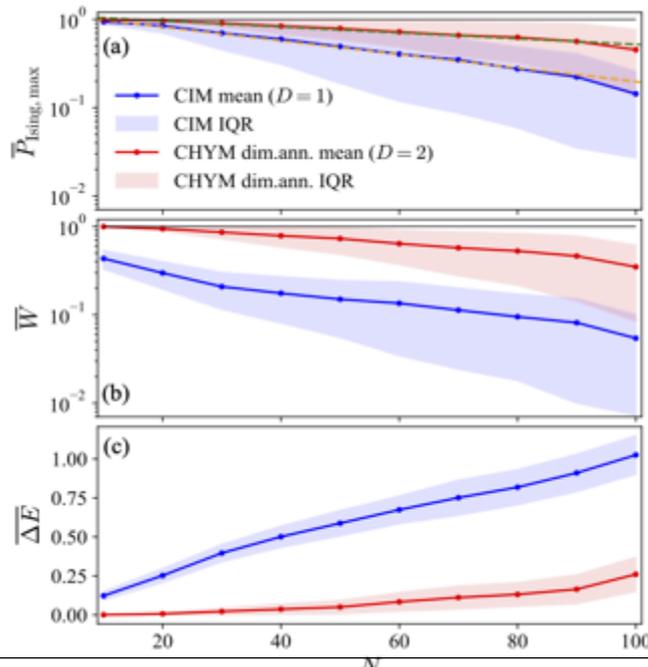


Figura: Test di scala della macchina di hyperspin tramite mappe nonlineari descritte in questa sezione. L'analisi quantifica il vantaggio nell'uso della macchina di hyperspin con annealing dimensionale rispetto alla macchina di Ising. L'analisi è stata effettuata simulando sia la macchina di hyperspin con annealing dimensionale (dati in rosso) sia la macchina di Ising (dati in blu) e confrontando i risultati nei due casi. I pannelli riportano (alto) Probabilità di successo di trovare il minimo del modello di Ising simulato, (centro) Sensibilità ai parametri, (basso) Accuratezza con cui il minimo energetico del modello di Ising viene trovato. La macchina di hyperspin con annealing dimensionale performa meglio della macchina di Ising in base a tutte e tre le metriche utilizzate, dimostrando la validità del metodo computazionale proposto come nuovo risolutore euristico del modello di Ising [figura riprodotta da Phys. Rev. Lett. **132**, 017301 (2024)]

C.9 Progetto Extreme Energy Events

Il Progetto Extreme Energy Events (EEE) è un esperimento per la misura e lo studio dei Raggi Cosmici a terra con un innovativo e incisivo programma per la diffusione della cultura scientifica; EEE prevede infatti l'installazione di telescopi traccianti per muoni cosmici nelle scuole italiane: studenti e insegnanti sono coinvolti in tutte le fasi, dalla costruzione dei rivelatori all'analisi dei dati. Lanciato nel 2005 con una fase pilota, oggi comprende circa 70 scuole superiori italiane con centinaia di studenti che partecipano annualmente alle attività. EEE rappresenta un osservatorio nazionale per il monitoraggio del flusso di raggi cosmici e consente studi di correlazione tra gli eventi registrati dalla rete.

Nel 2018, la Missione PolarquEEEst ha ampliato il Progetto EEE attraverso l'installazione di tre rivelatori a scintillazione a Ny Ålesund, nelle Isole Svalbard, nel 2019, in collaborazione con la stazione Dirigibile Italia del CNR, per studiare i raggi cosmici a latitudini estreme.

Stato dell'arte

I raggi cosmici, scoperti oltre un secolo fa, continuano a essere di fondamentale importanza ed interesse lo studio dell'Universo; nonostante molto sia stato compreso riguardo i raggi cosmici, la loro composizione, la loro origine e, in parte, anche sui meccanismi di accelerazione (uno dei quali fu proposto da Enrico Fermi intitolato "On the Origin of the Cosmic Radiation" pubblicato nel 1949 sulla rivista Physical Review) vi sono ancora alcune domande, e altre se ne sono aggiunte negli ultimi anni, alle quali ancora oggi si cerca di dare una risposta. Molte sono legate alla natura, composizione e meccanismo in grado di originare i raggi cosmici di energia ultraelevata (Ultra High Energy Cosmic Rays, UHECR). Altre domande sono legate alla possibile produzione di raggi cosmici da decadimento o dall'annichilazione di particelle di materia, uno dei

temi caldi della fisica moderna. Altre domande riguardano l'evoluzione chimica delle molecole nello spazio interstellare, il loro effetto sullo sviluppo della vita sui pianeti o il possibile legame tra raggi cosmici e clima. I raggi cosmici possono essere studiati rivelando a terra le particelle dello sciame atmosferico generato dall'interazione di un raggio cosmico primario con l'atmosfera terrestre; esperimenti volti a tali misure prevedono quindi l'installazione a terra di una rete di rivelatori che può essere utilizzata per monitorare costantemente il flusso di raggi cosmici secondari.

Oltre alla loro importanza scientifica, i raggi cosmici offrono straordinarie opportunità didattiche per introdurre i giovani a concetti avanzati di fisica moderna. L'idea del Progetto Extrem Energy Events, presentato dal suo ideatore il Prof. A. Zichichi nel 2004, prevede che gli studenti delle scuole superiori italiane possano partecipare ad ogni fase di un esperimento di fisica dei raggi cosmici, dalla costruzione del rivelatore: questo approccio pratico e interdisciplinare, che richiama l'eredità di Enrico Fermi, non solo stimola l'interesse per la scienza, ma incoraggia anche il pensiero critico e la comprensione delle connessioni tra fenomeni microscopici e l'universo su larga scala.

Includere il tema dei raggi cosmici nei programmi scolastici può trasformare l'apprendimento in un'esperienza coinvolgente e formativa, avvicinando i giovani alle frontiere della ricerca scientifica e ispirando una nuova generazione di scienziati. La possibilità di creare una rete nazionale per il monitoraggio della radiazione cosmica rappresenta un altro elemento di formazione ed educazione scientifica attraverso il lavoro di gruppo.

Lo studio dei raggi cosmici avviato agli inizi del XX secolo ha dato un forte impulso allo studio della fisica delle particelle, con la scoperta di nuove particelle e l'approfondimento della comprensione delle interazioni fondamentali della natura. Nonostante siano stati scoperti oltre un secolo fa, lo studio dei raggi cosmici è ancora oggi al centro di ricerche avanzate, che affrontano questioni fondamentali della fisica, dell'astrofisica e della cosmologia.

Oggi sappiamo che sono per lo più protoni, ma anche nuclei più pesanti, che viaggiano attraverso lo spazio e che possono interagire con l'atmosfera terrestre. Il loro spettro energetico si estende per varie decadi, da 109 eV (elettronvolt) fino a raggiungere i 1020 eV; sappiamo che maggiore è la loro energia minore è il flusso (per i più energetici il flusso atteso è di una particella al km² all'anno o anche inferiore). Sappiamo che le particelle di energia moderata, che possono essere studiate direttamente perché il loro flusso è abbastanza elevato, provengono principalmente dalla nostra galassia, accelerate da fenomeni come esplosioni di supernove. L'origine dei raggi cosmici di energia ultraelevata (oltre 10¹⁸eV) rimane ancora oggetto di studio (potrebbero derivare da fenomeni extragalattici estremi, come nuclei galattici attivi, jet relativistici di buchi neri o altro). Gli esperimenti che studiano tali raggi cosmici sono basati su array di rivelatori a terra che rivelano, con varie tecniche sperimentali, lo sciame generato dall'interazione del raggio cosmico primario con l'atmosfera terrestre. Diversi sono gli esperimenti in corso, altri sono in fase di progettazione e costruzione anche per lo studio di possibili correlazioni di sciame a grande distanza.

Vi è poi un settore di ricerca legato allo studio della possibile influenza dei raggi sul clima, della possibile relazione tra flusso di raggi cosmici e copertura nuvolosa e temperatura. Anche per questi studi il funzionamento di reti di monitoraggio risulta particolarmente importante.

In questo panorama il Progetto EEE rappresenta un unicum, per continuità di operazioni e diffusione sul territorio nazionale, come esperimento per la misura monitoraggio al suolo della radiazione cosmica, con un forte ed innovativo programma di diffusione della cultura scientifica, che, dal 2005, vede ogni anno diverse centinaia di studenti impegnati nelle sue attività.

Finalità e obiettivi

L'obiettivo del Progetto EEE è quello di realizzare un esperimento scientifico sui raggi cosmici e portarlo all'interno delle scuole superiori italiane in modo da coinvolgere i giovani studenti e favorire quindi la diffusione della cultura scientifica. In particolare, si vogliono studiare, attraverso un opportuno apparato sperimentale, i muoni generati dall'interazione dei raggi cosmici primari (principalmente protoni) con l'atmosfera terrestre. I muoni, essendo particelle penetranti, possono essere rivelati anche all'interno degli edifici scolastici che diventano dei laboratori di Fisica Subnucleare.

Il Progetto EEE prevede, quindi, la costruzione ed installazione di rivelatori traccianti per muoni, i telescopi, su tutto il territorio nazionale. In tal modo si coinvolge il maggior numero possibile di istituti scolastici ed è possibile studiare le caratteristiche del flusso di raggi cosmici su base locale ma è anche possibile studiare

possibili correlazioni tra eventi su tutta la rete. EEE è un osservatorio unico di raggi cosmici su scala nazionale che, attraverso un costante monitoraggio della radiazione cosmica permette studi multidisciplinari e a carattere STEM; le scuole possono aderire al Progetto EEE anche senza installare un telescopio nei locali scolastici, entrano così a far parte di una rete e possono eseguire le analisi su qualunque set di dati. L'avvio della missione PolarquEEEst rappresenta un ulteriore sviluppo della rete di monitoraggio del Progetto EEE.

Tramite questa organizzazione il coinvolgimento degli studenti, e dei professori, è totale ed avviene in ogni fase dell'esperimento, dalla costruzione dei rivelatori all'analisi dei dati acquisiti. Dal 2005 quando è iniziata la fase pilote con poche scuole coinvolte siamo arrivati oggi ad avere circa 70 scuole che partecipano ogni anno attivamente alle attività del Progetto EEE coinvolgendo un elevato numero di studenti di tutta Italia; il confronto sia con incontri da remoto che in presenza permette un ulteriore momento formativo di confronto tra gli studenti.

Stato e risultati attesi

Il Progetto EEE consiste in una rete di telescopi traccianti per raggi cosmici, ciascuno costituito da tre rivelatori di tipo Multigap Resistive Plate Chamber (MRPC) di grande area sensibile (2 m²). Nella figura seguente a destra, è mostrato uno dei telescopi. La rete EEE è costituita attualmente da circa 50 telescopi, tanto da rendere EEE il più esteso osservatorio per raggi cosmici basato sulla tecnologia delle MRPC. A sinistra della figura seguente è mostrata la distribuzione geografica delle scuole partecipanti ad oggi al Progetto EEE: i cerchi rossi ed arancioni indicano la collocazione dei telescopi scolastici e in sedi INFN rispettivamente, mentre i cerchi azzurri indicano le scuole aderenti al progetto senza telescopio. Nella stessa figura sono anche riportati i

Come evidenziato precedentemente, il coinvolgimento degli studenti inizia dalla costruzione dei rivelatori al CERN e prosegue con la loro installazione negli istituti scolastici, nelle Università ed Enti Pubblici di Ricerca (CREF, Sezioni INFN).



Figura: A sinistra la distribuzione dei telescopi del Progetto EEE (cerchi rossi e arancioni) e delle scuole aderenti (cerchi blu) e dei rivelatori POLA-R a Ny Alesund (Isole Svalbard). Destra: uno dei telescopi della rete EEE

I dati acquisiti dai singoli telescopi permettono di studiare le caratteristiche del flusso locale dei raggi cosmici secondari. Ogni telescopio è in grado di misurare con la precisione del cm² il punto di passaggio dei muoni su ciascuna camera in modo da ottenere la traccia della particella e la sua direzione. Un ricevitore GPS permette la sincronizzazione temporale dei telescopi in modo da poter studiare correlazioni tra stazioni vicine (studio di sciame atmosferici estesi per stazioni a distanze fino a qualche km) e anche molto distanti, per studi su eventi come le tempeste solari. La distribuzione sul territorio dei rivelatori, organizzata in cluster o in stazioni singole, offre la possibilità unica al mondo di ricercare direttamente correlazioni tra stazioni poste a centinaia di km tra loro: un eventuale segnale positivo sarebbe indicazione diretta di meccanismi ipotizzati ma non ancora verificati sperimentalmente.

A partire dal 2014 il Progetto EEE è organizzato in fasi coordinate di acquisizione dati denominate Run, la cui durata coincide temporalmente con l'anno scolastico. In tale periodo i telescopi della rete sono in funzione contemporaneamente e massima attenzione è posta al funzionamento dei telescopi, per garantire la massima efficienza dell'osservatorio; a tal fine gli studenti e i professori partecipano a riunioni periodiche, i Run Coordination Meeting, che permettono di avere e fornire aggiornamenti sullo stato della rete. Dal 2022, finita l'emergenza COVID-19, è stata avviata l'attività di ripartenza dei telescopi con l'utilizzo di una nuova miscela ecologica di gas che garantisce prestazioni in linea con le richieste dell'esperimento e non richiede maggiori modifiche alle installazioni. Nella seguente immagine è mostrata l'efficienza di rivelazione misurata con la nuova miscela confrontata con la miscela precedente.

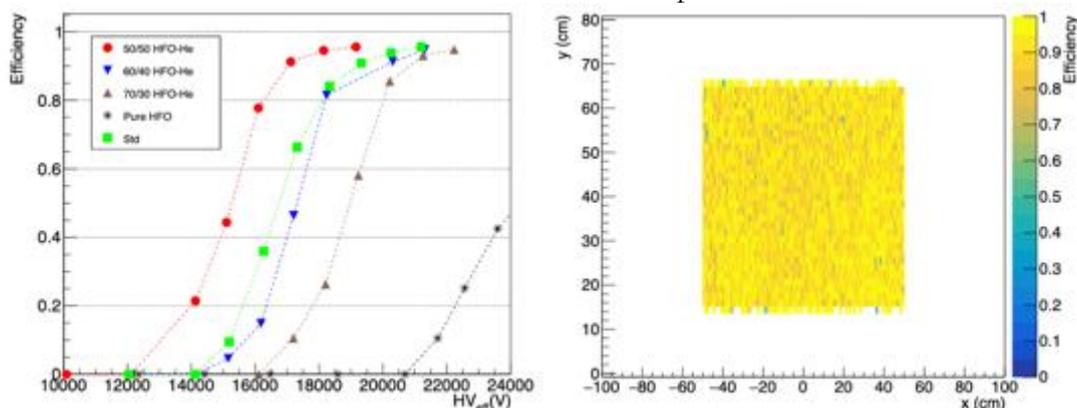


Figura: A Sinistra la scansione dell'efficienza di una MRPPC con diverse miscele in funzione della tensione applicata. A destra, la mappa dell'efficienza per la miscela 50/50 HFO-He per una tensione di circa 18 kV

La fase di ripartenza dei telescopi, l'ulteriore sfida di una transizione ecologica, è tutt'ora in corso e proseguirà nei prossimi due anni. Nonostante l'interruzione (anche dovuta all'emergenza sanitaria legata al COVID-19) delle attività sperimentali il Progetto EEE ha continuato ad organizzare le riunioni mensili online, i Run coordination meeting che sono il primo campo di confronto tra tutti gli studenti partecipanti al Progetto EEE, inserendo nel programma degli incontri anche seminari su temi anche non direttamente connessi alle attività del Progetto EEE. Ai Run Coordination Meeting online sono presenti abitualmente centinaia di studenti (via collegamento individuale o di gruppo). Ad oggi le attività sui telescopi sono riprese in circa 20 scuole e in diversi laboratori INFN e al CERN. La ripresa delle attività è visibile dalla pagina web di monitor dell'esperimento (open, <https://iatw.cnaf.infn.it/eee/monitor/>) come mostrato nella figura seguente: dopo un periodo di stop delle attività caratterizzato da una crescita minima del numero di tracce acquisite a partire dal 2024 con la riaccensione dei telescopi la statistica a ripreso a crescere.

Today's plot of the total number of candidate tracks vs months of data acquisition

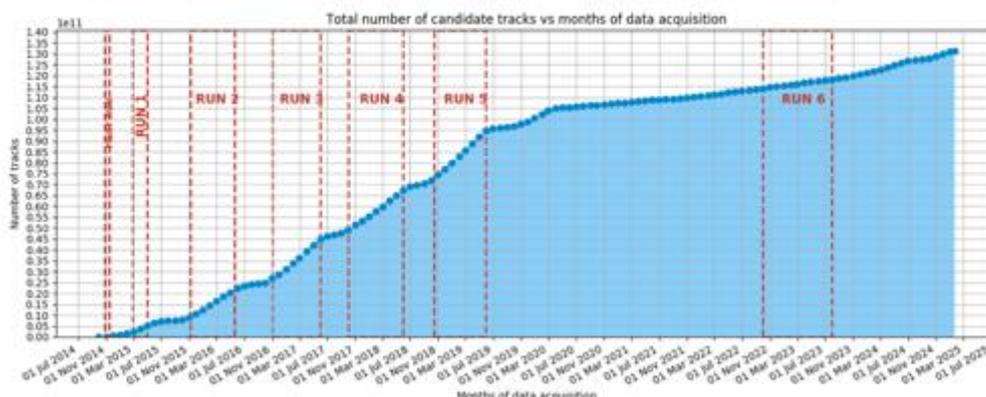


Figura: Grafico rappresentante il numero di tracce acquisite a partire dal 2014.

Dal 27 al 29 novembre 2024, tramite un Bando del Centro Fermi per l'assegnazione di contributi per le Scuole aderenti al Progetto E.E.E. si è tenuto un meeting in presenza presso il CREF con circa 100

partecipanti (figura seguente), la maggior parte dei quali studenti delle scuole superiori. L'incontro che ha permesso di festeggiare i 20 anni dalla presentazione del Progetto EEE al CERN, si è svolto in concomitanza con l'International Cosmic Day (organizzato dal laboratorio di fisica DESY di Amburgo), appuntamento annuale che riunisce le scuole di tutto il mondo per una giornata di studi sui raggi cosmici.



Figura: Partecipanti alla riunione in presenza del Progetto EEE del novembre 2024.

L'evento centrale è stata una masterclass in cui le studentesse e gli studenti hanno in prima persona analizzato e poi presentato dati acquisiti da vari telescopi in funzione con le nuove miscele. All'interno del Progetto EEE è nata la Missione PolarquEEEst per la quale sono stati costruiti, coinvolgendo scuole superiori Norvegesi e Svizzere, tre rivelatori a scintillazione compatti per lo studio e monitoraggio del flusso dei raggi cosmici a latitudini estreme, i rivelatori POLA-R (POLA-01/02/03). Nel 2018 POLA-01 è stato installato a bordo del battello Nanuq che ha circumnavigato le Svalbard misurando il flusso di raggi cosmici fino a 82° N. Il rivelatore compatto si presta a misure anche in itinere e oltre a varie campagne di misura in auto sono state effettuate misure anche a bordo della Nave Scuola "Amerigo Vespucci". Nel 2019, grazie alla collaborazione del CNR, i tre rivelatori sono stati installati a Ny Alesund alle isole Svalbard (Norvegia), presso la stazione Dirigibile Italia per lo studio e monitoraggio continuo del flusso dei raggi cosmici a latitudini estreme, come mostrato nella figura seguente, da un'analisi preliminare mostrata alla conferenza Cosmic-Ray International Studies and Multi-messenger Astroparticle Conference, CRIS-MAC 2024, tenutasi a Trapani dal 17 al 21 giugno 2024. Come si può notare il rate misurato dai rivelatori in funzione mostra sia la periodicità annuale (effetto estate inverno); ancora in fase di studio il possibile calo del flusso in accordo con il ciclo solare. La prosecuzione della campagna di misura a Ny Alesund permetterà di coprire l'intera durata del ciclo solare (11 anni) e continuare gli studi di periodicità in corso.

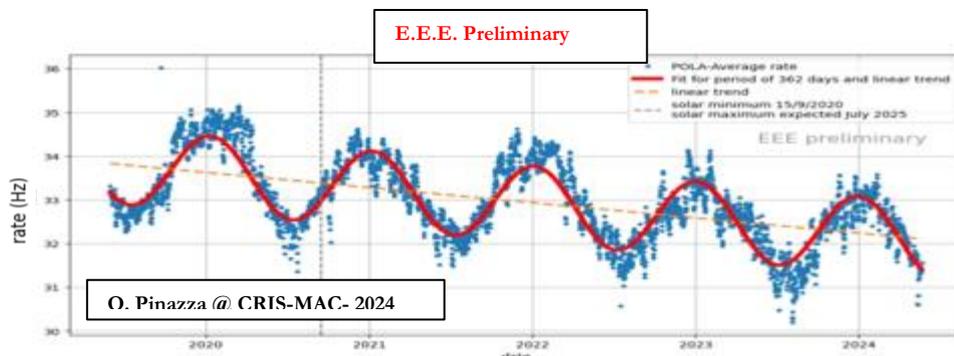


Figura: Monitoraggio del flusso dei raggi cosmici secondari da parte dei rivelatori POLA-R a Ny Alesund in funzione del tempo.

Avendo a disposizione un ulteriore rivelatore della famiglia POLA-R sono in programma campagne di misura a latitudini variabili in Nord Europa, accompagnate da eventi di outreach con il coinvolgimento di scuole locali e campagne annuali di manutenzione dei telescopi a Ny Alesund. Inoltre, è in fase di studio la

possibilità di costruire altri rivelatori di questa famiglia da affiancare, nella rete EEE, ai telescopi già esistenti sia nelle sedi in cui è presente un telescopio MRPC sia nelle sedi in cui il telescopio non è presente.

Ogni anno nell'ambito del Progetto EEE sono attivati circa 20 Progetti per le Competenze Trasversali e l'Orientamento (PCTO, ex Alternanza Scuola Lavoro).

C.10 Cinematica e dinamica delle galassie

Stato dell'arte

Il modello della Materia Oscura Fredda (CDM), il quadro dominante in cosmologia, ipotizza che il 95% della materia dell'universo sia costituito da componenti oscure rilevabili solo indirettamente, principalmente attraverso i loro effetti gravitazionali. Questi effetti includono la cinematica galattica, il lensing gravitazionale e la geometria su larga scala dell'universo. In questo modello circa il 25% della materia dell'universo è ipotizzato essere materia oscura non barionica (DM), circa il 70% è costituito da una forma di energia repulsiva nota come energia oscura (DE), e solo circa il 5% è materia ordinaria barionica (BM). La DM e la BM luminosa sono previste mostrare proprietà cinematiche e dinamiche distinte.

Nonostante decenni di ricerche, non è stata trovata alcuna evidenza diretta dell'esistenza della DM non barionica. Le sue proprietà fisiche ipotetiche sono state ottimizzate a posteriori per garantire la concordanza tra osservazioni e previsioni teoriche del modello. Per quanto riguarda la DE, una misurazione diretta della sua esistenza rimane impossibile.

L'obiettivo della ricerca al CREF è mettere in discussione l'assunzione dei modelli CDM che la DM si comporti in modo identico su scale galattiche e cosmologiche, e quindi sviluppare un quadro teorico che consideri gli effetti legati alla DM in modo diverso a seconda delle scale spaziali, disaccoppiando la dinamica galattica dalle strutture cosmologiche.

Su scale galattiche, che vanno da 1 kpc a 100 kpc, la necessità di una quantità significativa di materia oscura deriva da modelli teorici sviluppati per spiegare le curve di rotazione osservate nelle galassie a disco che introducono una componente di massa non visibile. Il modello standard ipotizza che la DM abbia proprietà distinte dalla materia luminosa (LM) ma tuttavia non è l'unico in grado di spiegare le osservazioni.

Di recente è stato introdotto un nuovo modello, quello del disco di materia oscura (DMD) che considera la possibilità che la DM sia confinata ai dischi galattici, come la LM.

Questo modello è ispirato a evidenze che suggeriscono una correlazione tra la DM e la distribuzione del gas di idrogeno neutro (HI) nelle galassie a disco. Tale correlazione è stata notata per la prima volta da Albert Bosma negli anni '80 (Astron. J., 86, 1791, 1981) e successivamente confermata da numerosi altri studi (es. Sylos Labini et al., Mon. Not. R. Astron. Soc., 527, 2697, 2024 e riferimenti ivi inclusi). L'idrogeno neutro, che si osserva dall'emissione della riga a 21 cm, è molto più diffuso nel disco della componente stellare. Il modello DMD assume che ovunque vi sia un atomo di HI che emette la linea a 21 cm. Questa forma di DM potrebbe consistere potenzialmente di materia ordinaria (barionica) fredda. Ad esempio, le nubi di idrogeno freddo (a temperature inferiori a 15 Kelvin) non emettono la linea a 21 cm, e sono perciò quasi invisibili alla rilevazione elettromagnetica. In sintesi, i punti chiave sono l'ipotesi che la DM sia tracciata dall'HI (la cui densità decresce più lentamente con il raggio rispetto alla componente stellare) ed il fatto che il potenziale gravitazionale di un disco è più intenso di quello di una distribuzione sferica, permettendogli così di fornire lo stesso contributo alla velocità circolare con una massa minore. I vincoli sulla distribuzione geometrica della componente di DM sono dunque cruciali per distinguere tra il modello standard di alone e il modello DMD.

Finalità e obiettivi

È possibile distinguere osservativamente tra una galassia con una grande massa in un alone sferico e una con una massa inferiore confinata a un disco mediante l'analisi delle curve di rotazione generalizzate, non solo sul piano galattico ma anche fuori. Questa analisi fornisce nuove informazioni sulla geometria della DM, poiché il disco appiattito del modello DMD influenza significativamente le accelerazioni verticali, a differenza del modello di alone sferico simmetrico, che ha effetti gravitazionali fuori piano trascurabili.

Un'altra possibilità per distinguere tra una distribuzione a disco ed una sferica consiste nell'analizzare gli effetti di lente gravitazionale forte. Sebbene osservazioni ad alta risoluzione di lente gravitazionale forte su scale galattiche non siano ancora disponibili, è necessaria un'indagine numerica dettagliata dei modelli teorici per studiare il ruolo della geometria della distribuzione di massa nelle osservazioni future di lensing gravitazionale.

Stato e risultati attesi

Il satellite Gaia dell'Agencia Spaziale Europea, lanciato nel 2013, ha rivoluzionato la nostra comprensione della Via Lattea (MW) grazie alla precisione ha permesso una mappatura dettagliata della galassia, coprendo fino a ~ 20 kpc con elevata accuratezza. Ad oggi, Gaia ha rilasciato tre dataset (2016, 2018, 2022), con altri due previsti per il 2025-2026 e il 2030 e ha permesso di misurare con precisione la curva di rotazione della MW.

Il gruppo del CREF ha sviluppato un metodo statistico che, basandosi sulla plausibile ipotesi che gli errori osservativi siano Gaussiani, permette di raggiungere distanze in cui il rapporto segnale rumore è dell'ordine dell'unità. Tutte queste diverse determinazioni hanno coerentemente mostrato un declino della curva di rotazione fino a 30 kpc, al contrario delle precedenti misure che hanno determinato un profilo piatto. I best fit dei tra i modelli di massa teorici ed i dati (vedi la figura seguente) mostrano che un modello DMD si accorda meglio di un modello ad alone sferico.

Anche l'analisi delle curve di rotazione della MW al di fuori del piano galattico suggerisce che il modello DMD si adatta meglio ai dati. Un ulteriore test del metodo sarà fornito con nuovi dati della missione Gaia, che permetteranno di conoscere meglio l'estensione spaziale dei moti coerenti e di grande ampiezza in tutte le componenti di velocità, già rilevati nelle precedenti versioni dei dati (vedi la seconda figura)

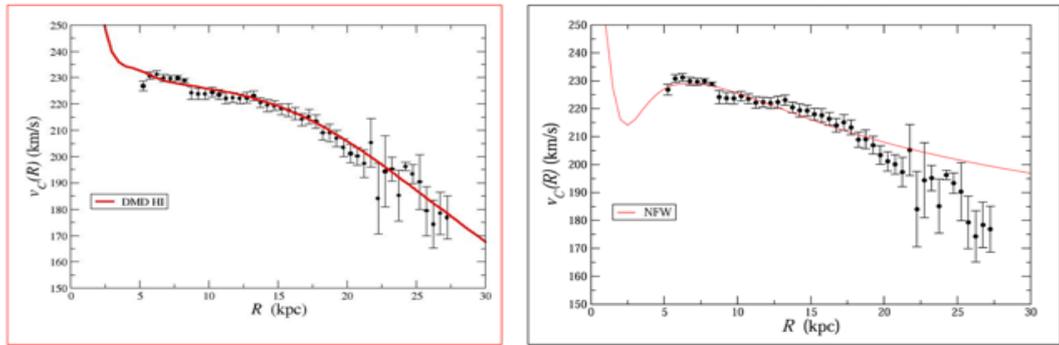
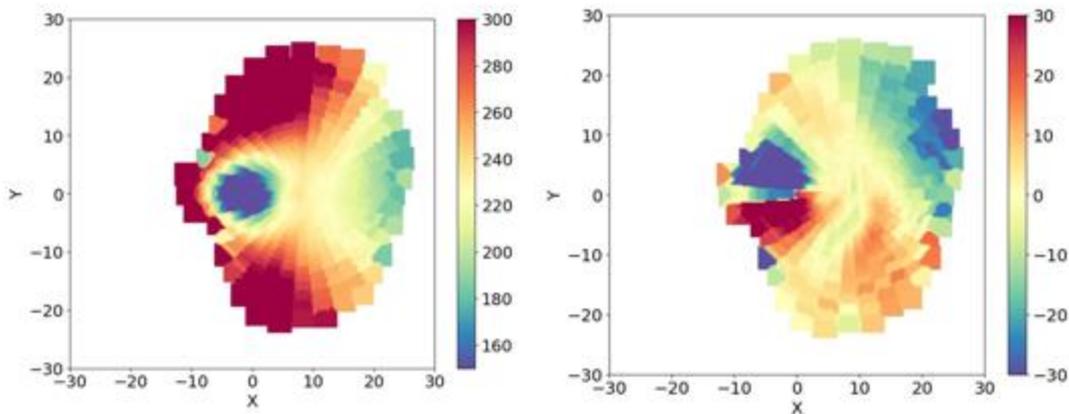


Figura Curva di rotazione della Via Lattea basata sulle più recenti misurazioni del campione Gaia-DR3, insieme al miglior modello di disco di materia oscura (a sinistra) e al modello di alone (a destra) (Sylos Labini et al., *Astrophys.J.*, 945, 3, 2023)



La figura mostra le mappe ricostruite delle componenti di velocità trasversale (a sinistra) e radiale (a destra) proiettate sul piano galattico (adattato da Wang et al., *Astrophys. J.* 942, 12, 2023).

Infine, Gaia migliorerà la nostra comprensione delle regioni esterne della MW grazie a un campionamento più dettagliato delle stelle dell'alone e ammassi globulari. Questi oggetti, che si prevede mostrino una dispersione di velocità quasi isotropa, potrebbero rivelare deviazioni dall'equilibrio causate da effetti mareali o altri fenomeni. Quantificare le anisotropie spaziali nella distribuzione delle velocità aiuterà a validare le ipotesi di equilibrio o a scoprire dinamiche fuori equilibrio. Gaia consentirà anche studi dettagliati di galassie vicine come M31, M33 e le Nubi di Magellano, fornendo campioni 6D delle loro distribuzioni stellari.

Questi dati, analizzati attraverso il nostro metodo di deconvoluzione, rappresentano un ponte tra studi cinematici basati su osservazioni stellari precise e quelli derivati da mappe di velocità lungo la linea di vista HI.

La formulazione del modello DMD è stata sviluppata attraverso uno studio accurato delle mappe di velocità e dispersione HI ad alta risoluzione di galassie vicine, fornite da due importanti survey: (i) The HI Nearby Galaxy Survey (THINGS): include 34 galassie vicine con un'ampia gamma di morfologie e luminosità e (ii) La LITTLE THINGS survey che si concentra su galassie piccole e deboli, complementando THINGS.

Altre survey recenti e in corso che saranno utili per sviluppare ulteriormente questa linea di ricerca.

Milestones previste:

M1. Campo di Velocità della Via Lattea (MW)

L'analisi del campo di velocità della Via Lattea (MW) fornirà informazioni preziose sulla curva di rotazione e sulla dipendenza di questa curva dall'altezza verticale rispetto al piano galattico. Studi dettagliati sulla distribuzione delle velocità attraverso il disco galattico permetteranno di collegare strutture spaziali, come i bracci a spirale e i satelliti, alla cinematica e alla dinamica galattica. Dati avanzati consentiranno lo studio delle stelle dell'alone, degli ammassi globulari e delle galassie satelliti entro un intervallo di 30–200 kpc, affinando la comprensione della dinamica galattica e delle interazioni all'interno del Gruppo Locale. Queste indagini offriranno una visione completa della cinematica e della dinamica della Via Lattea.

M2. Campi di Velocità delle Galassie Esterne

La mappatura dei campi di velocità delle galassie esterne, utilizzando misurazioni bidimensionali delle componenti di velocità radiale e trasversale ottenute con il metodo da noi sviluppato, rivelerà la relazione tra la cinematica e le strutture spaziali, come i bracci a spirale, i satelliti, ecc. Questo approccio consentirà di vincolare i flussi in ingresso e in uscita di idrogeno neutro nelle regioni esterne delle galassie. Analizzando l'interazione tra materia oscura (DM) e materia barionica (BM), affronteremo questioni fondamentali, come la formazione dei bracci a spirale e la distribuzione della materia, fornendo nuove prospettive sulla formazione e l'evoluzione delle galassie.

M3. Geometria della Distribuzione della Materia Oscura su Scala Galattica

Attraverso l'analisi della geometria della distribuzione della materia oscura (DM), in particolare tramite le curve di rotazione della Via Lattea e delle galassie esterne, questa ricerca imporrà vincoli rigorosi sui modelli di massa galattica. Confrontando il modello standard dell'alone con il modello del disco di materia oscura (DMD), sarà possibile determinare quale si allinea meglio ai dati osservativi. Comprendere il ruolo della DM nel plasmare la struttura e la dinamica delle galassie contribuirà a chiarirne la natura (ad esempio, barionica o non barionica) e a perfezionare i modelli di formazione delle galassie.

M4. Modellizzazione del lensing gravitazionale forte

Le galassie a disco rappresentano laboratori ideali per testare modelli di materia oscura (DM) concorrenti o teorie alternative della gravità, poiché consentono di vincolare rigorosamente le simmetrie della loro distribuzione di massa. Un altro compito si concentra sull'indagine della DM nelle galassie a disco tramite osservazioni di lensing gravitazionale forte. Sebbene queste osservazioni siano ancora in corso, è essenziale sviluppare simulazioni di galassie a disco come forti lenti gravitazionali, variando le frazioni di massa della DM all'interno del raggio di Einstein. Queste simulazioni permetteranno di valutare in dettaglio quanto i dati di lensing gravitazionale siano sensibili alle masse delle diverse componenti di una galassia e alla geometria della distribuzione della DM.

C.11 Nuclear Astrophysics with innovative sources

Lo studio della nucleosintesi degli elementi presenti sulla terra e, in generale, nell'universo, è un ambito di ricerca fondamentale finalizzato alla comprensione dei meccanismi di produzione dei diversi elementi, sia quelli più leggeri (idrogeno, deuterio, elio, litio), creati durante la Big Bang Nucleosynthesis, sia quelli più pesanti, sintetizzati nei nuclei delle stelle o in fasi specifiche dell'evoluzione stellare. La linea di ricerca si prefigge lo studio e la misura dei processi nucleari che partecipano alla formazione degli elementi in ambito

astrofisico, estendendo le misure delle sezioni d'urto dei processi nucleari di rilievo – fino ad oggi misurati principalmente in laboratorio, con gli elementi in forma neutra – all'ambiente di plasma, dove gli elementi compaiono nella loro forma ionizzata. Quest'ultimo scenario riproduce più accuratamente, infatti, l'ambiente stellare in cui i processi avvengono in natura, e permette una stima più realistica dei parametri di interesse.

Stato dell'arte

Gli elementi presenti sulla terra e le relative abbondanze rappresentano un'osservabile di rilievo nell'ambito della fisica fondamentale. I nuclei degli elementi che popolano la tavola periodica sono stati prodotti in diverse fasi: quelli più leggeri (idrogeno, deuterio, elio, litio) durante la cosiddetta Big Bang Nucleosynthesis, che ha avuto luogo entro pochi minuti dal Big Bang e che, in un processo di espansione e raffreddamento, ha portato alla transizione dai gradi di libertà elementari – i quark e i gluoni – a gradi di libertà più complessi, quali i nucleoni e, combinando questi ultimi, ai nuclei leggeri.

La successiva fase di sintesi, che ha prodotto gli elementi fino al ferro, ha invece luogo all'interno del nucleo stellare, dove le condizioni termodinamiche permettono di raggiungere stati di densità ed energia tali da superare la barriera Coulombiana e dare luogo al processo di fusione. Quest'ultimo risulta energeticamente favorito fino al ferro; dopo tale elemento l'energia di legame tende invece a diminuire con il numero atomico e il processo di fusione non è più spontaneo.

La sintesi degli elementi oltre il ferro avviene quindi attraverso processi diversi, basati sulla cattura neutronica da parte di nuclei pesanti. Aggiungendo un neutrone a un nucleo atomico, infatti, si prospettano due differenti esiti: se il decadimento beta del nucleo prodotto è meno probabile di un'ulteriore cattura neutronica l'elemento tenderà a formare un isotopo più pesante catturando un ulteriore neutrone, ma mantenendo invariate le proprietà elettromagnetiche. Se, al contrario, il nucleo decade per decadimento beta, uno dei neutroni si trasformerà in un protone, incrementando il numero atomico e trasformando l'elemento di partenza nel successivo della tavola periodica.

La fisica nucleare svolge quindi un ruolo fondamentale nello studio delle abbondanze relative degli elementi dell'universo: una accurata misura delle sezioni d'urto per i processi di fusione, di cattura neutronica e delle vite medie per decadimento beta risulta strategica per valutare la competizione tra i possibili processi e stimare quale di essi avrà luogo.

Ad oggi, sono presenti misure di sezioni d'urto e vite medie realizzate con elementi neutri. Tuttavia, nell'ambiente stellare gli elementi compaiono in forma ionizzata – ovvero con il nucleo spoglio, non più circondato dalla nube elettronica – e per produrre modelli realistici dei fenomeni che avvengono in ambiente stellare è necessario tenere conto dello stato di ionizzazione dell'elemento. È stato infatti predetto - e osservato in esperimenti sugli anelli di accumulazione - che le vite medie per decadimento beta cambiano significativamente nel caso l'elemento in esame sia ionizzato: l'assenza degli elettroni nelle orbite atomiche ampie, infatti, lo spazio delle fasi raggiungibile dall'elettrone proveniente dal decadimento beta del neutrone, che non deve più raggiungere necessariamente il continuo – ovvero abbandonare il sistema atomico – ma può andare ad occupare gli orbitali liberi dell'atomo (Takahashi et al. 1987, Phys Rev C36 (1987) 1522, Takahashi and Yokoi, Nucl. Phys. A404 (1983) 578). Allo stesso tempo, la misura delle sezioni d'urto dei processi di fusione sembra essere influenzata dall'electron screening, e quindi l'assenza della nube elettronica potrebbe alterare il potenziale elettromagnetico che si instaura tra i due nuclei protagonisti del processo di fusione.

Alla luce delle precedenti considerazioni, il progetto si prefigge di delineare una campagna sperimentale volta alla misura dei processi di fusione e delle vite medie per decadimento beta in ambiente ionizzato. Quest'ultimo può essere creato attraverso un laser ad alta intensità, che raggiungendo un bersaglio composto dall'isotopo da analizzare produce un'immediata ionizzazione dello stesso portando alla formazione di un plasma, le cui caratteristiche possono essere controllate calibrando opportunamente l'intensità del laser e le caratteristiche del bersaglio al fine di riprodurre il più accuratamente possibile l'ambiente stellare.

Finalità e obiettivi

Ad oggi, sono presenti misure di sezioni d'urto per processi di fusione con elementi neutri, e un'unica misura in ambiente di plasma (Lattuada et al., Phys. Rev. C 93, 045808 (2016)). Quest'ultima, pur producendo una reaction rate sistematicamente inferiore rispetto alle prime (black markers – figura seguente), risulta tuttavia

compatibile con esse all'interno delle incertezze sperimentali. È dunque necessario pianificare una campagna di misure che permetta di raccogliere una statistica sufficiente per stimare significativamente la presenza di un effetto nel processo di fusione dovuto allo screening elettronico.

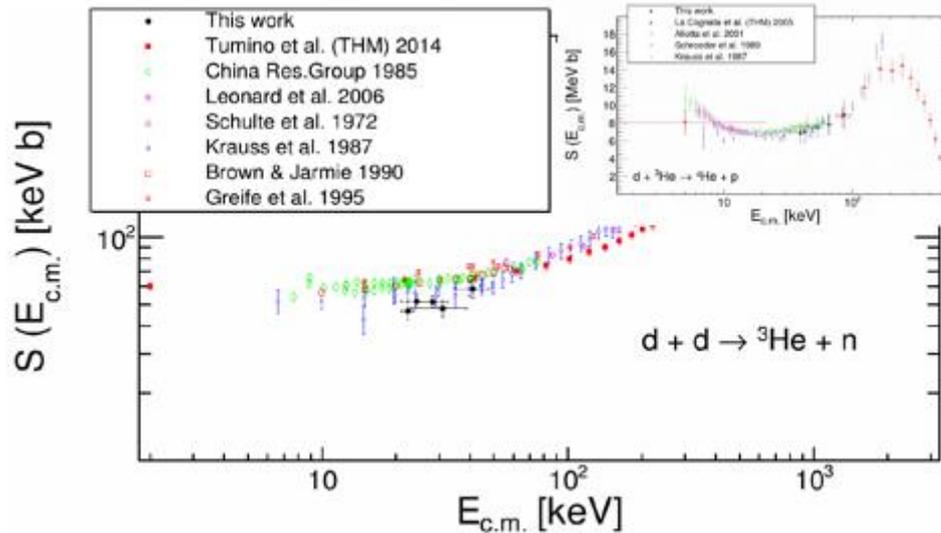


Figura: Reaction rate del processo di fusione del deuterio misurato in plasma (Lattuada et al., Phys. Rev. C 93, 045808 (2016)).

Per quanto riguarda lo studio della variazione delle vite medie per decadimento beta nel plasma, prime osservazioni sono state effettuate presso gli anelli di accumulazione, ad esempio per il $^{163}\text{Dy}^{66+}$ (Jung et al., First observation of bound-state β^- decay, Phys. Rev. Lett. 69, 1992), per il $^{187}\text{Re}^{75+}$ (F. Bosch et al., Observation of Bound-State β^- Decay of Fully Ionized ^{187}Re : ^{187}Re - ^{187}Os Cosmochronometry, Phys. Rev. Lett. 77, 1996) e per il $^{140}\text{Pr}^{58+}$ (Y. Litvinov et al., Measurement of the β^+ and orbital electron capture decay rates in fully ionized, hydrogen-like and helium-like ^{140}Pr Ions Phys. Rev. Lett. 99, 2007, 262501), constatando l'instaurarsi di un comportamento radioattivo nel primo caso (il Dy è stabile in forma neutra) e l'abbassamento della vita media di fattori significativi (9 ordini di grandezza nel caso del Re) negli altri due.

Al fine di estendere le misure precedenti stimando la modifica delle vite medie per decadimento beta in un ambiente di plasma, l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sta avviando un programma sperimentale attraverso l'esperimento PANDORA, volto alla misura del decadimento beta di isotopi di interesse astrofisico in un plasma prodotto attraverso il metodo della Electron Cyclotron Resonance. L'apparato è in fase di costruzione, e i primi dati sono attesi verso la fine del 2026.

Il presente progetto, pianificato in collaborazione con il gruppo sperimentale di PANDORA, si prefigge un'estensione del programma scientifico di PANDORA. In particolare, il progetto ambisce ad un'espansione del dominio termodinamico del plasma prodotto con il metodo ECR attraverso la realizzazione delle misure in un plasma prodotto da laser. Se nel primo, infatti, il bagno ionico rimane freddo – con temperature degli ioni dell'ordine di 1 eV – e non è possibile aspettarsi un Full Thermodynamical Equilibrium, nel secondo caso la maggior energia trasmessa al bersaglio dal laser può portare ad una termalizzazione del sistema ionico e al raggiungimento di temperature che possono portare al popolamento degli stati nucleari eccitati. Quest'ultimo scenario permetterebbe di studiare in modo più accurato le variazioni di decadimento beta in ambiente ionizzato, disaccoppiando gli effetti dovuti al sistema atomico da quelli nucleari.

Stato e risultati attesi

Studio dei processi di fusione del deuterio in un plasma prodotto da laser.

Una prima campagna di misure verrà effettuata presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, utilizzando il laser di FLAME, che opera ad una potenza di 300 TW.

Esso verrà indirizzato su un bersaglio di deuterio gassoso mantenuto in condizioni termodinamiche controllate. In particolare, in opportune configurazioni di pressione e temperatura il gas di D_2 si organizza in cluster, e questa configurazione massimizza l'assorbimento dell'energia trasmessa dal laser e il

conseguente regime di repulsione Coulombiana indotto dalla totale ionizzazione dei deuteri, che si ritrovano privati degli elettroni e risentono, dunque, di un'immediata repulsione elettrostatica ad opera degli altri ioni. Questo regime porta ad un'accelerazione degli ioni tale da consentire il superamento della barriera di Gamow e l'instaurarsi dei processi di fusione.

Al fine di identificare un sistema di rivelazione ottimizzato per la ricostruzione dei processi di fusione, sono necessari alcuni passaggi preliminari, che costituiranno l'attività del prossimo triennio:

- Caratterizzazione del bersaglio gassoso attraverso misure preliminari a FLAME
- Progettazione di un sistema di rivelazione per l' identificazione di ioni e di neutroni
- Stima dell' effetto dell' impulso elettromagnetico sull' apparato sperimentale e identificazione di strumentazione adatta ad operazioni in ambiente laser
- Caratterizzazione dei rivelatori

Studio dei decadimenti beta in un plasma prodotto da laser

La definizione di un programma scientifico volto alla misura di vite medie per decadimento beta in un plasma prodotto da laser costituisce un'iniziativa nuova nell'ambito della fisica nucleare e richiede quindi una fase preliminare volta a realizzare uno studio di fattibilità.

Da una parte, è necessario impostare uno studio basato su simulazioni che permetta di caratterizzare il plasma prodotto da laser in termini di regimi termodinamici instaurati, durata dello stato ionizzato e riproducibilità dello stesso. In secondo luogo, alla luce dello studio di apparati di misura adatti ad operare in ambiente laser portato avanti per la misura descritta nel paragrafo precedente, verranno identificate potenziali criticità sperimentali e verranno studiate possibili configurazioni che permettano di misurare i prodotti di decadimento volti a identificare il processo beta.

C.12 Problemi Aperti in Meccanica Quantistica

Il progetto consiste in un programma integrato teorico e sperimentale volto ad affrontare problemi aperti della meccanica quantistica e della sua unificazione con la gravità. La ricerca si concentra principalmente sull'analisi della connessione spin-statistica e sul collasso spontaneo della funzione d'onda, impiegando tecniche avanzate di fisica atomica in una serie di esperimenti che sfruttano tecnologie all'avanguardia. Nell'ambito del progetto vengono sviluppati e utilizzati innovativi Silicon-Drift-Detectors e rivelatori al Germanio ad alta purezza. Algoritmi Machine Learning e Convolutional Neural Network sono ottimizzati per la pulse shape analysis e la selezione degli eventi, oltre che per l'interpretazione dei dati al fine di identificare deviazioni o caratteristiche spettrali inattese, che potrebbero indicare segnali di nuova fisica. PAMQ pone i limiti più forti su vari modelli di gravità quantistica e di collasso spontaneo, fornendo un potente strumento per indagare le simmetrie fondamentali della natura e avanzando la nostra comprensione verso una teoria unificata.

Stato dell'arte

La violazione del Principio di Esclusione di Pauli (PEP) è una diretta conseguenza del teorema spin-statistica, un pilastro della fisica moderna, responsabile, ad esempio, della stabilità della materia quantistica e connesso con i principi fondamentali del Modello Standard della fisica delle particelle, come l'invarianza di Lorentz e la simmetria CPT.

Ad oggi i due principali filoni teorici che prevedono una violazione della spin-statistica sono:

- 1) il "Quon" model, che è soggetto alla regola di superselezione di Messiah-Greenberg (MG), che permette la sua verifica sperimentale esclusivamente utilizzando sistemi aperti, immettendo fermioni test in un sistema di fermioni preesistente e testando lo stato di simmetria risultante.
- 2) Gravità Quantistica (QG) - Nonostante un secolo di sforzi, la QG rimane una delle sfide più complesse della fisica moderna, aggravata dall'impossibilità di condurre indagini sperimentali dirette vicino alla scala di Planck. PAMQ ha dimostrato che la verifica sperimentale di modelli effettivi di QG (come Non-Commutative QG (NCQG) e modelli Minimal Length), mediante la ricerca di transizioni atomiche PEP-violanti, pone i vincoli più forti in assoluto su varie teorie di QG, con una sensibilità che può raggiungere la scala di Planck.

Modelli di collasso spontaneo - Il principio di sovrapposizione consente sovrapposizioni coerenti di configurazioni fisiche distinguibili, una conseguenza diretta della linearità dell'equazione di Schrödinger. Questo principio è stato verificato con notevole precisione a livello microscopico. Tuttavia, non osserviamo sovrapposizioni livello macroscopico, e il meccanismo responsabile della transizione quanto-classica non è codificato nel framework originale della Teoria Quantistica (QT).

PAMQ indaga i modelli di collasso spontaneo (Continuous Spontaneous Localization (CSL) ed i modelli di collasso indotto dalla gravità sviluppati da Diosi e Penrose (DP)) che offrono un approccio fenomenologico rigoroso [Rev. Mod. Phys. 85, 471 (2013)]. Si sta sviluppando un nuovo approccio fenomenologico/sperimentale per testare teorie di campo unificate.

L'attività sperimentale di PAMQ è svolta nel contesto dell'esperimento INFN VIP (di cui il responsabile PAMQ è anche responsabile nazionale INFN) che opera presso i laboratori LNGS diversi apparati all'avanguardia per raggi X e gamma a bassissimo background.

Oggi, lo studio della violazione di PEP sta ponendo limiti ancora più forti sui modelli di QG.

PAMQ ha analizzato l'intero complesso delle transizioni elettroniche K-shell PEP violanti in un target di Pb Romano ultra-radio-puro, e migliorando la sensibilità di circa due ordini di grandezza rispetto ai dati esistenti. Al CREF è stato anche effettuato il primo studio sperimentale in assoluto del modello QG Triply Special Relativity e delle implicazioni su spin-statistica dei modelli Minimal Length, dimostrando che questo approccio migliora di diversi ordini di grandezza i limiti esistenti.

Nel contesto del Quon model, l'indagine tramite sistemi aperti può essere effettuata monitorando fermioni che non hanno mai interagito con nessun altro fermione. L'esperimento VIP-sistemi-aperti si basa invece sull'introduzione di elettroni nuovi tramite una corrente continua, in un target di Cu, utilizzando rivelatori Silicon-Drift-Detectors (SDD) di spessore 0.45 mm per misurare i raggi-X emessi in transizioni atomiche. L'esperimento monitora transizioni $K_{\alpha 1,2}$ che violano PEP, la cui energia caratteristica è inferiore di 300 eV rispetto alle transizioni standard. Con questa strategia PAMQ ha posto il limite più stringente in letteratura.

Attualmente, il nostro gruppo sta effettuando un upgrade dell'esperimento VIP-sistemi-aperti, basato sullo sviluppo di rivelatori SDD innovativi per investigare elementi di numero atomico intermedio.

L'intensa attività sperimentale dedicata ai modelli di collasso spontaneo si basa su una pletora di metodologie (cold atoms, setup optomeccanici, phonon excitations in cristalli, rivelatori di onde gravitazionali oppure misure di "radiazione spontanea" X o gamma). PAMQ studia principalmente la radiazione spontanea emessa nel range (1-15) keV (un effetto intrinseco della dinamica del collasso spontaneo che impone alle particelle un moto diffusivo) stabilendo i limiti più forti in letteratura.

Finalità e obiettivi

Lo scopo di PAMQ è investigare problemi ancora aperti in meccanica quantistica, ed in particolare la relazione tra il mondo quantistico e la gravità, spingendo la sensibilità sperimentale alla soglia della scala di Planck dove potrebbero emergere proprietà quantistiche del campo gravitazionale. Le ripercussioni sono enormi, sulla comprensione dei fondamenti del Modello Standard, e delle teorie che cercano di spiegare il collasso della funzione d'onda.

PAMQ intende discriminare fra le varie proposte di QG, fornendo una guida sperimentale nello sviluppo dei modelli, con la potenzialità di misurare, per la prima volta, un segnale di QG.

Stato e risultati attesi

L'esperimento VIP-sistemi-aperti, con l'apparato migliorato sta producendo valori limiti per la violazione PEP di ordini di grandezza superiori rispetto a quanto è noto.

Per quanto riguarda i modelli di collasso spontaneo, PAMQ incrementerà la sensibilità delle misure di radiazione spontanea, sia dal punto di vista teorico, applicando la nuova teoria a modelli di collasso generalizzati (non-Markoviani), sia dal punto di vista sperimentale con nuovo rivelatore al germanio, che permetterà di esplorare recenti modelli unificati di gravità e quantistica.

Contenuti e metodi

Il setup sperimentale si basa su un high-purity co-axial p-type germanium detector (HPGe) circondato da piombo romano utilizzato per ricercare di un segnale di violazione di PEP nelle transizioni elettroniche

(raggi-X). Lo shift delle righe, rispetto alle transizioni standard, è indipendente dal modello. Con un algoritmo basato sul metodo Bayesiano viene estratta la distribuzione “posterior” del segnale atteso. Allo scopo di migliorare la sensibilità di oltre un ordine di grandezza, il gruppo sta sviluppando un rivelatore prototipo del tipo Broad-Energy-Germanium (BEGe). Per abbattere il rumore, migliorare la risoluzione e massimizzare la detection efficiency si sta realizzando un sistema di isolamento dedicato e si stanno sviluppando algoritmi di pulse shape analysis.

L’esperimento VIP-sistemi-aperti pone limiti più stringenti sulla violazione con i dati del 2019-2024 ora in analisi.

Diverse migliorie dell’esperimento sono in corso:

- ottimizzazione di una presa dati in corrente modulata e relativo modello simultaneous spectral and discrete Fourier transform Bayesian analysis, con un incremento del 32% sulla sensibilità.
- Una nuova tecnica di calibrazione basata su algoritmi Machine Learning che migliora la risoluzione energetica dei rivelatori SDD.
- Un nuovo setup con rivelatori SDD (Fig.1), sviluppati in collaborazione con la Fondazione Bruno Kessler ed il Politecnico di Milano, e nell’ambito degli esperimenti su particelle con quarks “strani” ai laboratori LNF(Frascati) e J-PARC (Giappone). Con questi rivelatori si potrà mappare la violazione del PEP per elementi con numero atomico fino a 60.

Le misure di radiazione spontanea sono effettuate a energie dei raggi-gamma con il rivelatore a semiconduttore HPGe. Queste misure ci hanno permesso di porre i limiti più forti sulla lunghezza di correlazione - oltre la quale sovrapposizioni spaziali sono soppresse.

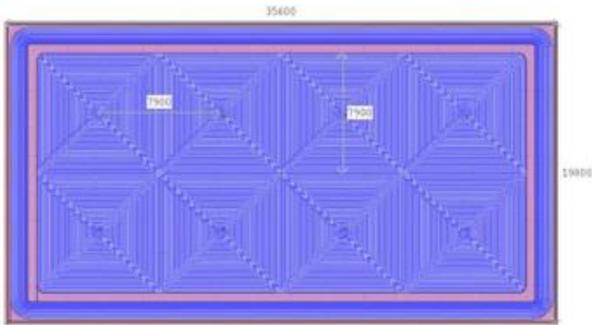


Figura - Layout dell’array di SDD da 1mm dal lato dell’anodo.

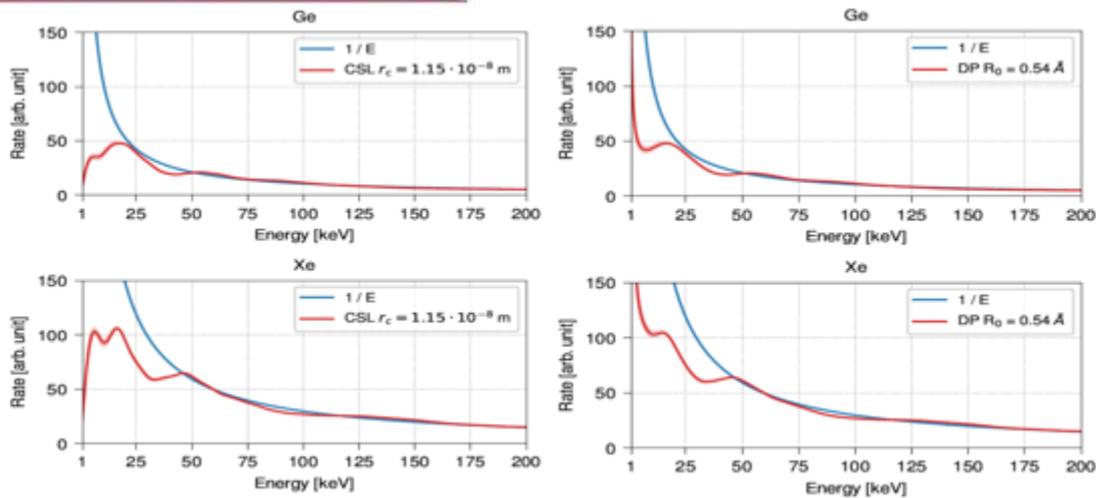


Figura - Rate di radiazione spontanea per il modello CSL (sinistra) e DP (destra), calcolati per un atomo di Ge (pannelli superiori) ed un atomo di Xe (pannelli inferiori). In blu è mostrata la precedente teoria approssimata.

Il gruppo CREF ha esteso i modelli CSL e DP e fornito previsioni del rate di radiazione spontanea con energia nell’intervallo dei raggi-X (vedi Fig.2). È stato trovato che :

- l’intensità della radiazione spontanea dipende fortemente dalla struttura atomica dell’emettitore;
- lo spettro energetico della radiazione spontanea nell’intervallo 1-15 keV è caratterizzato dello specifico meccanismo di decoerenza. Questo intervallo energetico è al di fuori dal limite inferiore del rivelatore che è approssimativamente 20 keV.

Il gruppo sta attualmente portando avanti un programma ambizioso incentrato su un'attività di R&D per migliorare il rivelatore HPGe al fine di misurare radiazione nell'intervallo 1-15 keV. Quest'attività presente e futura permetterà di effettuare misure simultanee ed indipendenti di violazione di PEP e di radiazione spontanea, abbattendo eventuali effetti sistematici.

C.13 Il Regio Istituto di Fisica a via Panisperna tra storia e ricerca. Protagonisti, metodi, scoperte, strumenti scientifici

Il progetto, pensato nel contesto della rinnovata sede storica del Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche 'Enrico Fermi' (CREF), intende ripercorrere la storia del Regio Istituto di Fisica nel periodo in cui la sede fu in via Panisperna, conservando e diffondendo la memoria dei suoi protagonisti e delle ricerche che qui vennero portate avanti, in un periodo in cui la fisica italiana fu protagonista della scena internazionale.

Il progetto è strettamente connesso al lavoro di aggiornamento dei contenuti del Museo Enrico Fermi e di organizzazione e implementazione delle attività di Terza Missione del CREF, in uno scambio di continua e reciproca collaborazione.

Gli ultimi risultati raggiunti sono, non a caso, prodotti legati all'*outreach* e al mondo multimediale.

Stato dell'arte

Il progetto, pensato nel contesto della rinnovata sede storica del Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche 'Enrico Fermi' (CREF), intende ripercorrere la storia del Regio Istituto di Fisica nel periodo in cui la sede fu in via Panisperna, conservando e diffondendo la memoria dei suoi protagonisti e delle ricerche che qui vennero portate avanti, in un periodo in cui la fisica italiana fu protagonista della scena internazionale.

Proseguendo il lavoro iniziato con lo studio della biografia scientifica del fondatore e primo direttore del Regio Istituto di Fisica, Pietro Blaserna (1836-1918), si è approfondita la figura e l'opera del suo successore, il fisico Orso Mario Corbino (1876-1937), ponendo speciale attenzione ad alcuni eventi particolarmente significativi legati alla direzione di Corbino, sia a livello istituzionale e organizzativo, con specifico riferimento ai rapporti con Enrico Fermi e il suo gruppo di collaboratori; sia a livello di comunicazione e alta diffusione della cultura scientifica, e in particolare della Fisica.

Si stanno inoltre approfondendo i rapporti istituzionali e di politica della ricerca tra Orso Mario Corbino e Guglielmo Marconi, sia per quanto riguarda l'impatto sull'appoggio e il finanziamento delle ricerche portate avanti dal gruppo capitanato da Fermi; sia riguardo temi più generali della politica della ricerca nei primi trent'anni del Novecento che portarono, tra l'altro, alla fondazione dell'Istituto di Elettroacustica del CNR nella sede di via Panisperna, con Corbino direttore e Marconi, all'epoca presidente del CNR, sostenitore del progetto.

Inoltre, in un contesto di studi di genere, si stanno studiando ed evidenziando, da un lato, l'opera e le figure di alcune scienziate che lavorarono al Regio Istituto di Fisica nel periodo preso in esame: tra queste, Matilde Marchesini e Margarethe Traube, Evangelina Bottero e Carolina Magistrelli, Nella Mortara, sino a Laura Capon e Ginestra Giovene.

Dall'altro, le collaborazioni di Enrico Fermi con scienziate donne nel periodo americano (1939-1954). Tra i nomi presi in esami: Joan Hinton, che collaborò con Fermi in occasione del Progetto Manhattan; Leona Woods, presso l'Università di Chicago e altri laboratori; Maria Goeppert-Mayer, Premio Nobel nel 1963, con la quale condivise ricerche e scambi proficui di idee.

Infine, il 2025 è il 160 ° anniversario della nascita di Arturo Malignani, nato a Udine nel 1865, nonché il 130° anniversario del brevetto depositato dallo stesso Malignani per risolvere il problema dello svuotamento delle ampole delle lampadine elettriche. Malignani, inventore geniale, studioso autodidatta e curioso, ebbe un ruolo importante nella messa a punto della lampadina elettrica a incandescenza in un momento importante della storia italiana circa la nascita della tecnologia e lo sviluppo dell'uso della corrente elettrica. In virtù del reperimento di nuovi materiali archivistici, si intende riprendere e sviluppare questa tematica, legata altresì agli interessi del Regio Istituto di Fisica di via Panisperna nel periodo della direzione di Blaserna e della sua collaborazione con Guglielmo Mengarini, progettista dell'impianto di trasmissione di energia elettrica realizzato dalla centrale di Tivoli a Roma per il trasporto dell'energia elettrica nella capitale.



Figura n. 1 Orso Mario Corbino; sullo sfondo: Regio Istituto di Fisica di Roma, primi del Novecento

Finalità e obiettivi

Il progetto, attraverso una ricerca storica rigorosa, si pone l'obiettivo di indagare aspetti ancora poco noti legati alle vicende scientifiche e istituzionali, alle biografie di protagonisti e alle scoperte connesse all'Istituto di Fisica di via Panisperna a partire dalla sua fondazione all'inizio degli anni Ottanta dell'Ottocento, fino alla metà degli anni Quaranta del Novecento.

Il progetto è strettamente connesso alle attività di ampliamento e di potenziamento del Museo Enrico Fermi, soprattutto rispetto ai nuovi contenuti integrati, a partire dal nuovo ingresso realizzato a luglio 2023 e dalla time-line sulla storia della Palazzina ospitata nel corridoio d'accesso e, specificamente, in rapporto allo storyboard realizzato per l'installazione *1934-Annus mirabilis*, inaugurata nel dicembre 2024.

Il progetto ha altresì una forte connessione rispetto ad azioni di Terza missione, in accordo con la mission dell'ente: le competenze degli studiosi impegnati sono infatti una risorsa preziosa per consulenze scientifiche e collaborazioni legate ad attività di divulgazione come la Notte europea dei ricercatori, alla partecipazione di festival della scienza -Genova e Roma- con l'ideazione di laboratori ed exhibit; per l'organizzazione di conferenze, presentazioni di libri e dibattiti sulla storia della fisica; per produzioni televisive e radiofoniche su argomenti legati alla storia di via Panisperna; per l'ideazione e l'organizzazione di PCTO, in virtù di un'attenzione speciale rivolta alle scuole, in un confronto continuo tra storia, ricerca e divulgazione della scienza.

In virtù delle competenze e degli interessi rispetto al tema dei rapporti tra donne e scienza, il progetto ha inoltre un impatto importante sulle attività e le finalità del Gender Equality Plan (GEP) del CREF, con particolare riferimento all'integrazione e diffusione della cultura di genere nella ricerca e nella divulgazione.



Figura *‘I ragazzi di via Panisperna’: E. Fermi, F. Rasetti, E. Amaldi, E. Segrè, O. D’Agostino; la fotografia venne scattata da Bruno Pontecorvo*



Figura *Ginestra Giovane Amaldi, si laureò in Fisica all’Istituto di via Panisperna nel 1931; fu una pioniera nella divulgazione e nella educazione scientifica, utilizzando anche strumenti quali la radio e la televisione.*

Stato e risultati attesi

Il campo di studi prende in esame il periodo compreso tra l’Unità d’Italia e la fine della Seconda Guerra mondiale, analizzando le figure di alcuni protagonisti della fisica italiana e il loro rapporto all’interno di un più ampio contesto istituzionale che metta in risalto finalità, obiettivi e risultati della politica della ricerca in Italia nel periodo preso in esame e il coinvolgimento degli scienziati, oltre che l’impatto della scienza e della tecnologia nella società del tempo.

Le ricerche comprendono uno studio trasversale e multidisciplinare a livello di letteratura critica, oltre che il reperimento e l’analisi di scambi epistolari, pubblicazioni scientifiche, materiali archivistici editi e inediti. Nel 2025, in particolare, il progetto prevede predisposizione e ricerca di materiali inediti riguardo la figura e l’opera di Arturo Malignani e un brevetto per la produzione industriale di lampadine elettriche a incandescenza nel contesto della nascita della tecnologia e dello sviluppo dell’uso della corrente elettrica in Italia, con un’attenzione particolare al contesto internazionale, finalizzati alla realizzazione di una pubblicazione storico-scientifica. Inoltre, è prevista la realizzazione di un docufilm dedicato alla figura e all’opera di Ginestra Giovane, “Omaggio a Ginestra”, con ideazione e sceneggiatura a cura di M. Focaccia et al.

C.14 Sulle orme dei Ragazzi di via Panisperna: tra ricerca scientifica e impegno civile

Il progetto si concentra sulle ricerche condotte a Roma dopo la partenza di Enrico Fermi per gli Stati Uniti nel 1939. Attraverso fonti archivistiche e altre fonti primarie a stampa, si cercherà di dare un'approfondita descrizione della ricerca svolta a Roma nella nuova situazione, evidenziando le caratteristiche più notevoli della direzione strategica generale scelta da Amaldi. Parte integrante del progetto sarà anche lo studio delle traiettorie scientifiche seguite da altri fisici che in vari momenti frequentarono l'Istituto di Fisica Via Panisperna, quali Gian Carlo Wick, Franco Rasetti, Aldo Pontremoli e Bruno Pontecorvo.

In occasione dei cento anni della meccanica quantistica (MQ), nell'ambito di questo progetto sarà anche approfondito il ruolo della rivista della Società Italiana di Fisica "Il Nuovo Cimento" come canale di pubblicazione di memorie relative alla MQ e si approfondirà il ruolo di alcuni fisici italiani, quali Antonio Garbasso e Antonino Lo Surdo, nel favorire l'ingresso della MQ tra i temi di ricerca della fisica in Italia.

Stato dell'arte

È ben noto che la partenza di Enrico Fermi per gli Stati Uniti nel 1939 pur essendo un colpo gravissimo per le ricerche di Fisica Nucleare svolte a Roma; tuttavia, segna un momento di crescita per i suoi principali collaboratori, in particolare Edoardo Amaldi, che si trovano improvvisamente investiti di responsabilità strategiche.

Inoltre, entra in funzione a Roma l'acceleratore Cockroft-Walton progettato da Fermi, prima della sua partenza, che però entra in fase operativa solo più tardi presso l'Istituto Superiore di Sanità (*figura seguente*). Il gruppo di Fisici operanti a Roma si trova quindi in possesso di una nuova attrezzatura, di grande importanza scientifica e tecnologica.

Anche il materiale umano si è profondamente rinnovato. Persi Fermi, Rasetti, Segrè, si acquisiscono i resti lasciati dalla diaspora di Arcetri e di Padova, in particolare Daria Bocciarelli. Anche Giulio Cesare Trabacchi viene acquisito alla ricerca di base, in seguito alla disponibilità del nuovo acceleratore. Ovviamente il capo indiscusso diventa Edoardo Amaldi, che si trasforma dal più assiduo collaboratore di Fermi, a guida dell'intero gruppo, almeno nel settore della fisica nucleare di base. Inoltre, nuovi elementi si affacciano alla ribalta.

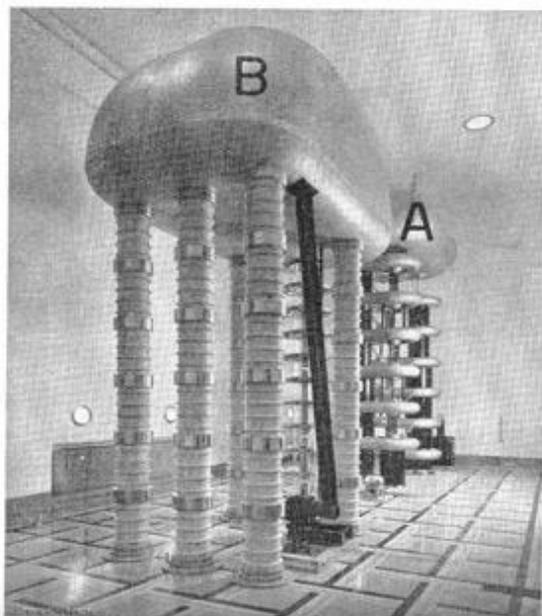


Fig. 3

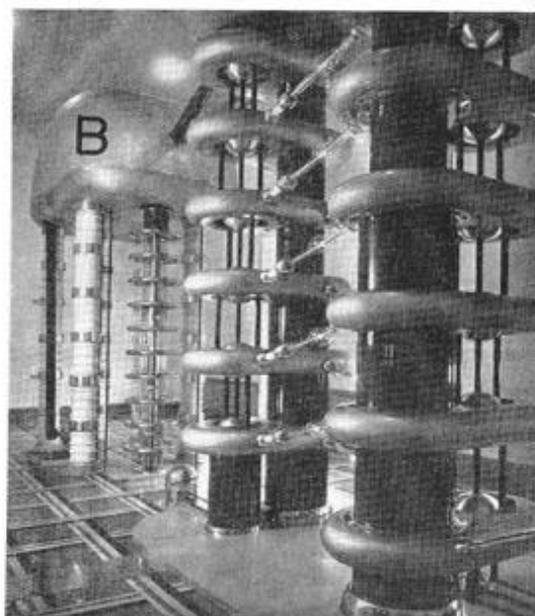


Fig. 4

Due diverse prospettive dell'acceleratore Cockroft-Walton da 1,1 MeV presso l'Istituto Superiore di Sanità (1940), poi ricostruito presso i laboratori nazionali dell'INFN a Frascati

Finalità e obiettivi

Il progetto ha tre finalità principali, le prime due strettamente connesse tra loro e la terza legata a un'importantissima ricorrenza per la storia della fisica che si celebra nel primo anno di progetto (2025). La prima finalità è la ricostruzione dello stato della ricerca in fisica a Roma negli anni della Seconda guerra mondiale, subito dopo la partenza di Enrico Fermi per gli Stati Uniti d'America (*figura seguente*), con particolare riferimento per la fisica nucleare. Una seconda finalità consiste nello studio delle traiettorie scientifiche e accademiche di alcuni dei personaggi "minori" dell'Istituto di Fisica di Via Panisperna. In ultimo, il progetto si propone di celebrare il centenario della meccanica quantistica con particolare attenzione per il ruolo di una rivista italiana, "Il Nuovo Cimento" della Società Italiana di Fisica, e per il ruolo delle Accademie scientifiche dell'epoca nello sviluppo e nell'accettazione della meccanica quantistica in Italia.

Da un punto di vista metodologico il progetto intende avvalersi essenzialmente di fonti primarie, archivistiche (quali manoscritti e corrispondenza) e a stampa (articoli scientifici).

In riferimento alle prime due finalità si procederà a un'analisi della letteratura primaria avente per autori i fisici attivi presso l'Istituto di Fisica di Roma e, successivamente, all'analisi della corrispondenza scientifica, con particolare riferimento per figure quali Edoardo Amaldi, Gian Carlo Wick, Emilio Segrè.

Per quanto riguarda la terza finalità, è prevista la catalogazione dei principali articoli relativi alla meccanica quantistica apparsi sulle pagine de Il Nuovo Cimento nel periodo (1910-1940) e l'analisi di alcuni contributi particolarmente rilevanti.

L'impatto atteso del progetto è a due livelli: da un lato il progetto prevedibilmente restituirà un quadro più fedele su un periodo scarsamente studiato della storia della fisica in Italia e su protagonisti di tale storia spesso trascurati. Dall'altro il progetto, concentrandosi sulla storia interna della fisica, contribuirà a mettere in evidenza il valore culturale di questa disciplina, nonché le sue potenzialità didattiche.



Enrico Fermi con la moglie, Laura Capon, ed i figli Giulio e Nella sulla nave per New York (1938)



Da sinistra a destra, Edoardo Amaldi, Gian Carlo Wick ed Enrico Fermi al lido di Ostia in una foto del 1936

Stato e risultati attesi

Motivazioni e caratteristiche delle ricerche a Roma sulla diffusione protone nucleone

Daremo una approfondita descrizione della ricerca svolta a Roma nella nuova situazione, concentrandoci in particolare, sulle motivazioni e lo svolgimento degli studi sulla diffusione protone nucleone. Esistono alcune notevoli caratteristiche nella direzione strategica generale scelta da Amaldi (*figura a destra*). Ad esempio, è di straordinario interesse l'uso di caratteristiche del nuovo fenomeno di fissione nucleare per lo sviluppo di innovativi metodi di indagine sullo scattering protone neutrone. I risultati preliminari di Amaldi e collaboratori puntavano verso una asimmetria nel baricentro dell'ampiezza di diffusione in completo disaccordo con quanto previsto, e poi effettivamente trovato. Il rapporto complessivo tra il gruppo di Roma e il resto del mondo mostra una evoluzione estremamente significativa. Si passa dal tentativo di convincere

la comunità scientifica sulla effettiva realtà della asimmetria, ad una seconda fase, in cui l'asimmetria è definitivamente scartata ma si tratta di evitare la pubblicazione del corrispondente lavoro principale sulla *Physical Review*. Studieremo anche in dettaglio il ruolo di Gian Carlo Wick (seconda figura in alto a destra) su queste questioni e i suoi rapporti con Heisenberg anche su tematiche che riguardano il progetto nucleare tedesco.

Traiettorie scientifiche e accademiche di alcuni dei personaggi “minori” di Via Panisperna

Inoltre, intendiamo continuare l'investigazione delle traiettorie scientifiche e accademiche di alcuni dei personaggi “minori” di Via Panisperna.

Un case-study è costituito da Wick, di cui ora è possibile ricostruire le modalità di inserimento nello staff di Via Panisperna nel 1931, in apparenza “contro” Ettore Majorana, e le sofferte modalità di chiamata a Palermo dopo il concorso nazionale vinto nel 1937. L'archivio Segrè di Berkeley fornisce molte informazioni sull'azione di Segrè, nel rendere valida la chiamata a Palermo di Wick, e l'azione di Fermi nel rendere possibile la chiamata alternativa a Padova. La situazione era ingarbugliata a causa del possibile interesse di Majorana, allora in servizio a Napoli, a essere chiamato a Palermo.

Un altro case-study, basato sui nuovi documenti dei servizi segreti inglesi, che intendiamo analizzare, riguarda la mancata partecipazione di Franco Rasetti al progetto militare Tube Alloys organizzato dagli Inglesi in Canada in parallelo e in collaborazione col Progetto Manhattan.

È anche prevista la prosecuzione delle ricerche su Aldo Pontremoli con riferimento al suo coinvolgimento nella spedizione polare del dirigibile “Italia” e alla sua attività scientifica presso l'Istituto di Fisica di Roma.

Un altro tema di ricerca è l'attività scientifica e anche politica svolta da Bruno Pontecorvo a Parigi dal 1935, quando, con una borsa di studio, si trasferì da via Panisperna, a Parigi, fino al 1938, quando emigrò negli Stati Uniti. Questa ricerca, allargata anche all'attività svolta dalla moglie, Marianne Nordblom (recentemente sono stati aperti alla consultazione gli archivi al Churchill College che la riguardano), dovrebbe aiutare a far luce sulla decisione presa alcuni anni più tardi da Pontecorvo di trasferirsi definitivamente in Unione Sovietica.

Sviluppo della Meccanica quantistica in Italia: 1900-1940.

In vista del Centenario della nascita della meccanica quantistica (anno 2025), si intendono selezionare, catalogare e studiare gli articoli apparsi sulle pagine dell'organo della Società Italiana di Fisica “Il Nuovo Cimento” riguardanti la meccanica quantistica a partire dai lavori di Planck (1900) fino allo scoppio della Seconda Guerra Mondiale (1940). Si analizzeranno anche i contributi dati dalle varie Accademie italiane alla diffusione di questa nuova Meccanica, attraverso anche l'istituzione di premi e borse di studio.

Sono inoltre previsti due approfondimenti tematici. Il primo di essi riguarda il contributo di fisici italiani quali Antonio Garbasso e Antonino Lo Surdo alla vecchia meccanica quantistica (1913), attraverso la scoperta del cosiddetto “effetto Stark – Lo Surdo” e la sua interpretazione teorica alla luce della teoria di Bohr. Il secondo approfondimento è legato alle prime formulazioni della legge del corpo nero e cioè alla cosiddetta legge di Rayleigh-Jeans. Sebbene questa legge venga universalmente citata come un esempio del fallimento delle teorie classiche, essa non è mai stata scritta né da Rayleigh, né da Jeans, ma rappresenta una ricostruzione a posteriori, fatta per giustificare il successo della legge di Planck e l'affermarsi del “quanto di energia”.

C.15 La Comunicazione del CREF e del Museo Enrico Fermi

Il Centro Ricerche Enrico Fermi (CREF) si trova a un crocevia tra storia e futuro della fisica. La sua missione è duplice: valorizzare l'eredità di Enrico Fermi e promuovere la ricerca scientifica contemporanea. La comunicazione istituzionale del CREF deve quindi saper coniugare la divulgazione storica con la promozione della ricerca all'avanguardia, rivolgendosi a un pubblico eterogeneo. In un contesto in cui la comunicazione scientifica è sempre più importante, il CREF si impegna a sviluppare una strategia di comunicazione efficace, capace di raggiungere un pubblico ampio e diversificato, e di consolidare il proprio ruolo nel panorama della ricerca italiana.

Finalità e obiettivi

La comunicazione del CREF ha l'obiettivo di supportare la crescita e la visibilità dell'ente di ricerca e del museo, traducendo le strategie in azioni concrete e coinvolgendo un pubblico ampio e diversificato.

Per quanto riguarda la ricerca:

- Semplificare la comunicazione: Lavorare insieme alla governance dell'ente per dare maggiore coerenza e impatto alle diverse linee di ricerca, raggruppandole in macro-aree tematiche.
- Valorizzare i risultati: Diffondere i risultati delle ricerche ottenuti, sottolineando l'impatto scientifico e sociale.
- Promuovere la formazione: Attrarre giovani talenti attraverso borse di studio, dottorati e opportunità di tesi, valorizzando il ruolo del CREF come centro di formazione d'eccellenza.
- Favorire le collaborazioni: Creare sinergie con altri enti di ricerca, università e aziende per ampliare le prospettive di ricerca e innovazione.
- Evidenziare le infrastrutture: Mettere in luce l'importanza dei laboratori e delle attrezzature disponibili per la ricerca.
- Promuovere la terza missione: Sottolineare il ruolo del CREF nella diffusione della cultura scientifica e nella valorizzazione del patrimonio storico-scientifico.

Per quanto riguarda il Museo:

- Facilitare l'accesso alla visita: Creare una navigazione del sito che renda facile immediato prenotare la propria visita al Museo
- Arricchire l'esperienza del visitatore: Rendere il sito web un punto di riferimento sia prima che dopo la visita, offrendo informazioni utili e approfondimenti sia per la didattica scolastica che per gli appassionati o i giornalisti.
- Preservare la memoria: Mantenere viva la figura di Enrico Fermi e il suo gruppo, attraverso iniziative culturali e divulgative.
- Rilanciare il concetto di museo scientifico: Promuovere un'idea di museo dinamico e interattivo, in grado di stimolare la curiosità e la riflessione.
- Aumentare la visibilità: Partecipare a eventi e manifestazioni scientifiche, collaborare con i media e rafforzare la presenza online.
- Coinvolgere il pubblico: Creare contenuti ad hoc per diversi target, dalle scuole ai singoli visitatori, utilizzando un linguaggio semplice e coinvolgente pur mantenendo la precisione scientifica.

In sintesi, la comunicazione del CREF mira a:

- Aumentare la consapevolezza del ruolo del CREF come centro di eccellenza nella ricerca e nella divulgazione scientifica.
- Fornire informazioni chiare e complete sulle attività dell'ente.
- Coinvolgere un pubblico ampio e diversificato, promuovendo la cultura scientifica e la curiosità intellettuale.
- Rafforzare l'identità del CREF come luogo di incontro tra storia e futuro, tra ricerca e divulgazione.



Illustrazione realizzata per il booklet del Museo rivolto alle scuole

Stato e risultati attesi

La strategia di comunicazione digitale del Centro Ricerche Enrico Fermi (CREF), che mira a connettere passato, presente e futuro attraverso un approccio articolato e diversificato. Il CREF ha rinnovato il suo sito web, rendendolo moderno e intuitivo, con sezioni dedicate a notizie, eventi e collaborazioni, mentre il sito del Museo Storico della Fisica offre un percorso interattivo per i visitatori, con prenotazioni online, materiali didattici e approfondimenti. La Palazzina di via Panisperna, luogo simbolo della fisica italiana, è al centro di un lavoro di "awareness" per far conoscere la sua storia e le sue attività al pubblico, con eventi e conferenze che attirano sempre più partecipanti.



Cartolina realizzata in occasione dell'evento di presentazione della nuova installazione del Museo.

L'identità visiva del CREF unisce elementi storici, come foto in bianco e nero, a grafiche moderne e pop, creando un'immagine dinamica e accattivante. Le conferenze, come le "Lezioni Aperte" e il ciclo sul "Progetto Manhattan", sono strumenti di divulgazione scientifica e storica, spesso archiviate su YouTube per un pubblico più ampio. La comunicazione con i ricercatori è fondamentale per tradurre il linguaggio tecnico in contenuti accessibili, e sono previsti seminari per migliorare le

competenze di divulgazione del personale scientifico.

I canali social del CREF (Facebook, Instagram, LinkedIn, Twitter/X e presto BlueSky) sono gestiti con linguaggi differenziati per raggiungere pubblici diversi, mentre la newsletter mensile mantiene un contatto diretto con gli iscritti. La partecipazione a eventi nazionali e locali, come le Quantum Weeks e la Rome Future Week, amplia la visibilità del centro.

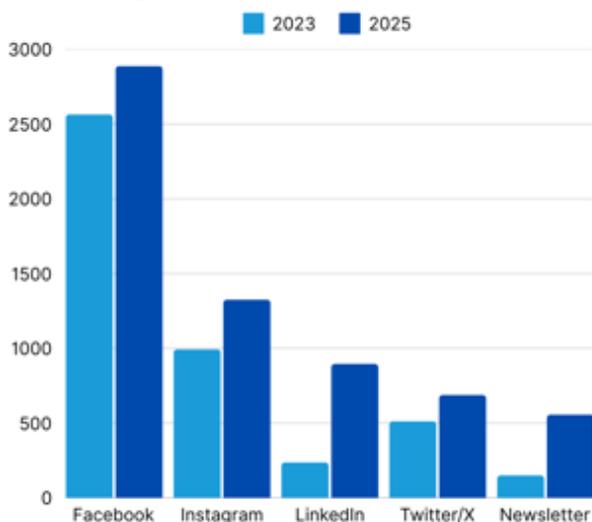


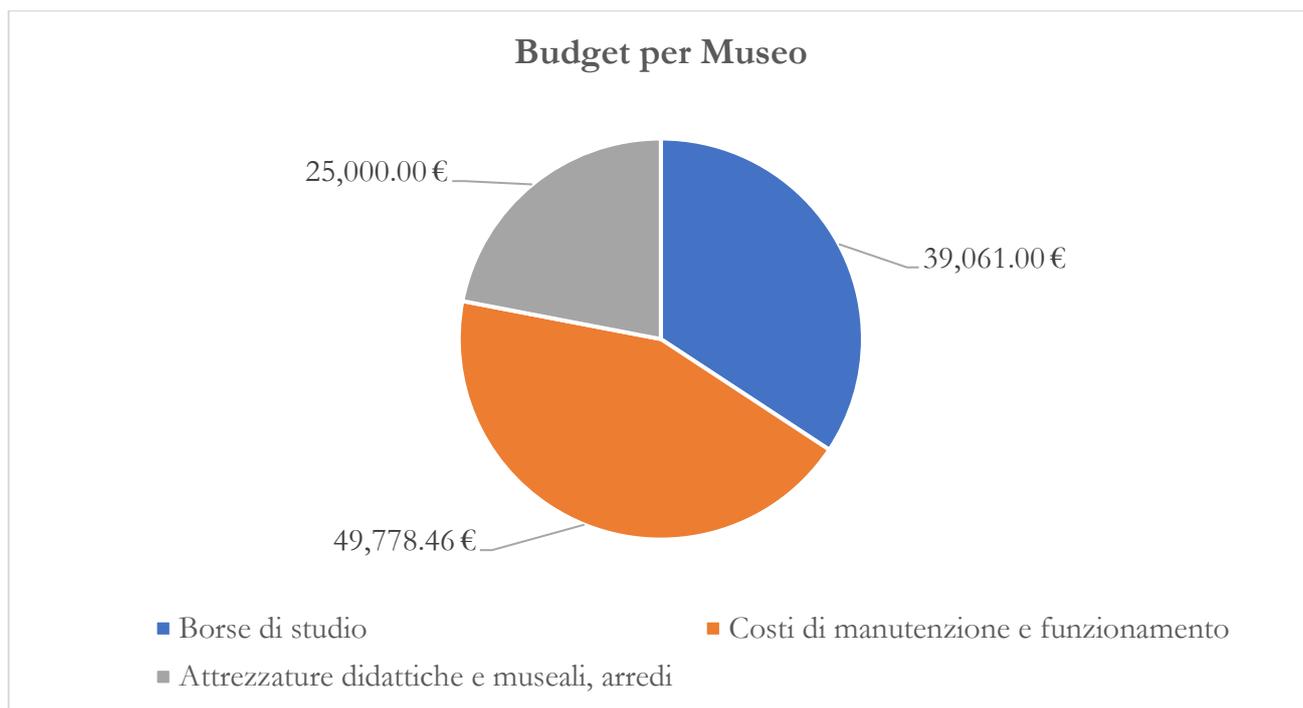
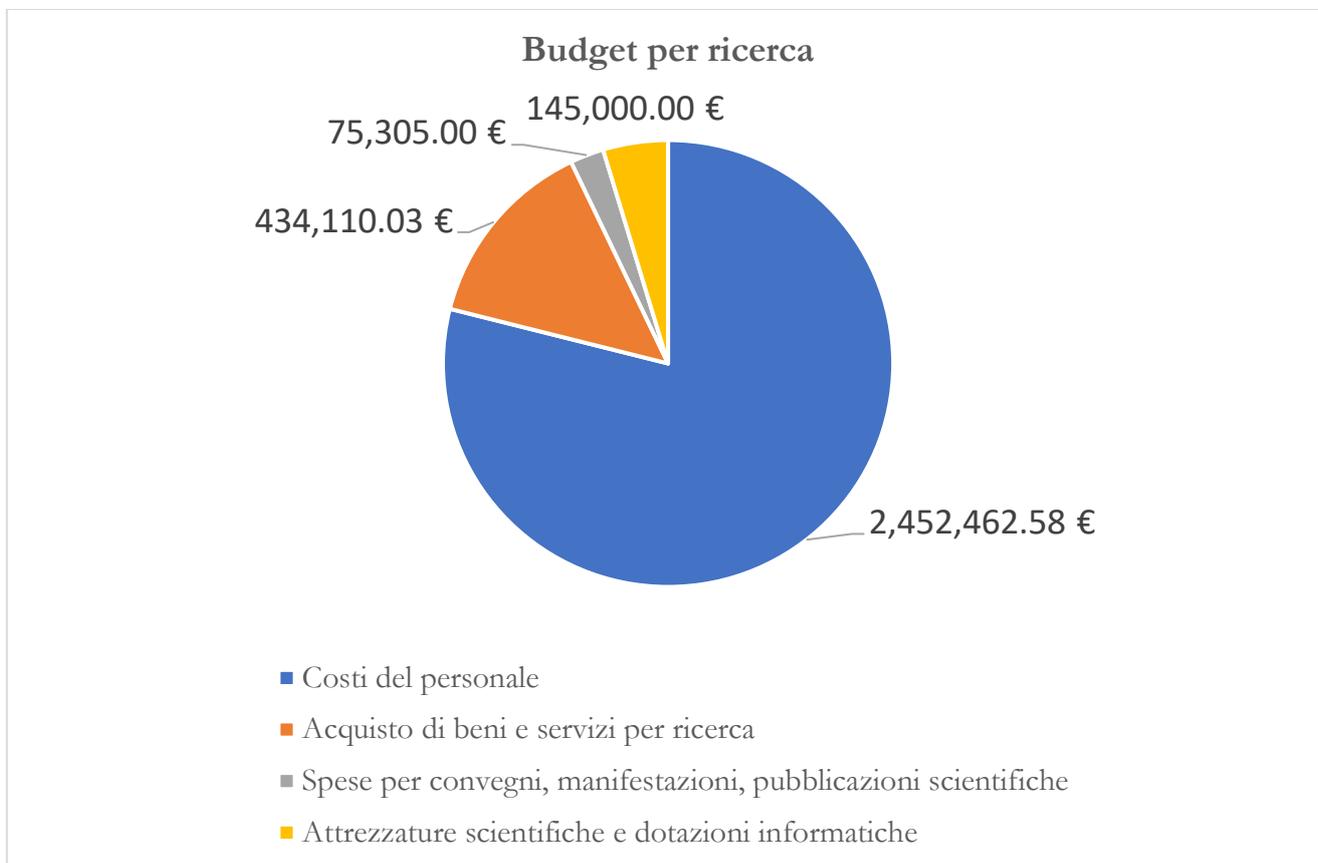
Grafico che mostra la crescita dei canali social del CREF da dicembre 2023 a gennaio 2025.

Grazie a questa strategia, il CREF è diventato un punto di riferimento per la storia della fisica italiana del '900, collaborando con istituzioni e media (come Rai e Mediaset) per documentari e trasmissioni. I risultati includono un aumento di visite ai siti, follower sui social e partecipazione agli eventi, con prospettive future di ulteriore sviluppo nella comunicazione digitale e nell'interazione con il pubblico.

D. Tabelle riassuntive:

i) budget; ii) fonti di finanziamento; iii) ricercatori coinvolti (%).

i) Budget dedicato alla ricerca e al museo



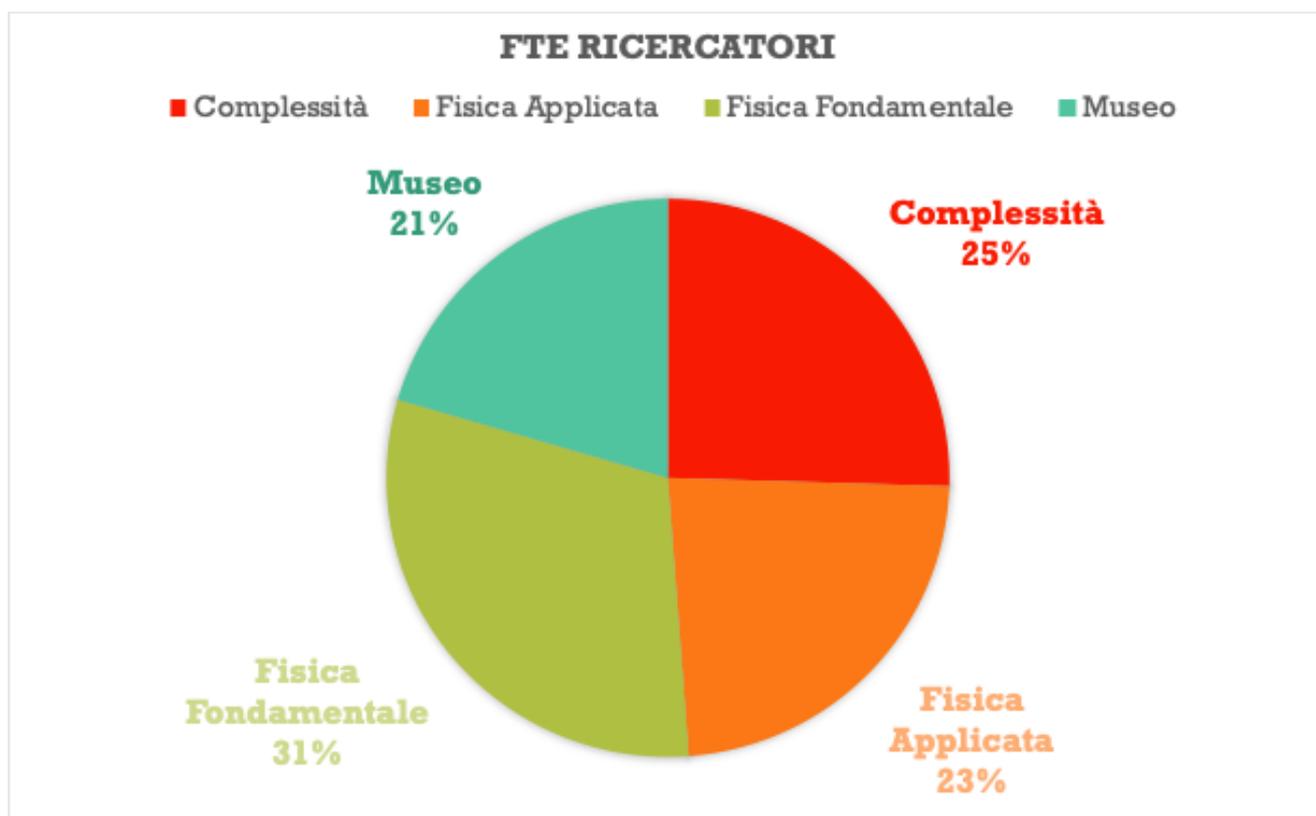
ii) Progetti in corso e fonti di finanziamento

Oltre al FOE 2025 pari a € 3.678.503,00, si indicano di seguito i finanziamenti esterni dei progetti di ricerca in corso:

ID PROGETTO	TITOLO PROGETTO	ENTE FINANZIATORE	IMPORTO COMPLESSIVO PROGETTO	STANZIAMENTI DI BUDGET 2025
2022_Savo_PNRR_SECOONDO	Comp-SECOONDO	Ministero università e ricerca	300.000,00 €	183.349,30 €
2024_CODE_PRINPNRR22	Coupling Opinion Dynamics with Epidemics	Ministero università e ricerca	32.591,00 €	27.040,79 €
2024_DIGITRANSITION_PNRR	Transizione Digitale M1C1 PNRR NextGenerationEU	Presidenza del Consiglio dei ministri - Dipartimento per la trasformazione digitale	286.048,00 €	164.700,00 €
2024_FONDO_TUCCI_TIBETANO	Studio diagnostico dei manoscritti 1326 ga e 1326 ka del Fondo Tucci Tibetano - convezione CREF-CNR-ISC	C.N.R. - Istituto dei Sistemi Complessi	1.500,00 €	1.500,00 €
2024_MULTIPASS_PRINPNRR22	MULTIPLE trACKer for Secondary particleS monitoring	Ministero università e ricerca	131.645,00 €	130.071,70 €
2024_NET	ScieNce Together - HORIZON-MSCA-2023-CITIZENS-01	Consiglio Nazionale delle Ricerche	19.968,31 €	13.135,18 €
2024_PHERMIAC_PRIN22	Photonic High-Energy cosmic-RaMonitoring via Ising machines and Advanced Combinatorial optimization	Ministero università e ricerca	49.400,00 €	21.830,69 €
2024_RECENTRE_PRINPNRR22	REal-time motion CorrEctioN in magneTic REsonance	Ministero università e ricerca	20.264,00 €	14.668,97 €
2024_RESPECT_PRIN22	Towards a new family of nuclear imaging gamma detectors	Ministero università e ricerca	106.408,80 €	76.069,45 €
2024_SINVASC	SINVASC_ The signal in the noise: advanced MRI methods for the characterization of the vascular component of BOLD spontaneous fluctuations - PNRR- PE MNESYS SPOKE 2 - Bando a cascata	Seconda Università degli Studi di Napoli	249.618,75 €	226.741,21 €
2024_SLOWSUMER_PRIN22	SLOW SUMER. Repair, Reuse, Recycling and Southern Mesopotamian Society in the Changing World of 2500-2000 BC	Ministero università e ricerca	56.205,18 €	41.997,89 €
2024_TRIPLE_T_PRINPNRR22	Triple T – Tackling a just Twin Transition: a complexity approach to the geography of capabilities, labour markets and inequalities	Ministero università e ricerca	177.497,00 €	138.261,18 €
2024_WECARE_PRIN22	WEaving Complexity And the gReen Economy	Ministero università e ricerca	89.134,00 €	69.791,41 €
<i>Progetto da codificare</i>	Attivazione contratto di ricerca PNRR M4C2 - Inv. 1.2 "Sviluppo di imaging funzionale MR ad alta risoluzione per lo studio di fisiologia e funzione cerebrale"	Ministero università e ricerca	109.000,00 €	<i>In attesa del decreto di concessione del finanziamento</i>
IMPORTO COMPLESSIVO DEI PROGETTI DI RICERCA			1.629.280,04 €	1.109.157,77 €

iii) Grafici ricercatori coinvolti (%).

Ricercatori strutturati (Full-Time Equivalent) coinvolti per area di ricerca



AREA	Complessità	Fisica Applicata	Fisica Fondamentale	Museo	Totale
FTE ricercatori	5.35	4.9	6.45	4.3	21
FTE Postdoc	6	3	4		13
FTE Dottorandi	8	1	2	1	12
Personale associato	47	15	28	9	99

ATTIVITÀ DI TERZA MISSIONE / IMPATTO SOCIALE

Azioni di supporto all'alta formazione

Il CREF promuove attivamente la formazione di giovani talenti scientifici attraverso un programma di alta formazione strutturato e diversificato, in linea con la sua missione di terza missione e in stretta collaborazione con istituzioni accademiche e partner strategici. Tra le iniziative

- **Borse di dottorato.** Attraverso convenzioni (Sapienza, Tor Vergata, Roma Tre e l'Università di Bologna), il CREF finanzia borse di dottorato di ricerca in Fisica, Storia della Fisica e Ingegneria Elettronica. I dottorandi vengono coinvolti nelle attività museali e di divulgazione scientifica del CREF.
- **Tirocini curriculari** in fisica e comunicazione e **borse di studio formative** per laureandi, laureati e dottorandi interessati a partecipare alle attività di divulgazione e didattica legate al Museo.
- **Aggiornamento scientifico e networking per studenti universitari, Phd e Post Doc: Giornata Internazionale della Luce 2024**, organizzata dal gruppo Young Minds di via Panisperna su percorsi di Ottica e Fotonica con talk di esperti provenienti da università (Sapienza, Roma Tre), dal Consiglio Nazionale delle Ricerche e dal CREF e una tavola rotonda su temi di frontiera come "Fotonica tra Intelligenza Artificiale e Informazione Quantistica". Il CREF ha ospitato inoltre dei PhD Day, giornate di scambio e formazione per Phd Students, con le Università di Roma Tre e IMT di Lucca.
- **Seminari** tenuti da importanti personalità del mondo accademico su ricerche di punta nel campo della fisica, aperti a studenti/e e ricercatori/trici di altre università ed enti di ricerca, anche da remoto (es: Rachel Grange ETH Zurich, Sushil Mujumdar (Optics Laboratory in TIFR, Mumbai), prof François Lafond (Oxford University), Samir Suweis (Università di Padova)
- **Scuole e Workshop per competenze interdisciplinari: Summer school su "Economic fitness and complexity"** in collaborazione con UNU-MERIT di Maastricht. (Terza edizione) Rivolta a dottorandi, giovani ricercatori e professionisti, la summer school offre un'introduzione completa al framework dell'economic complexity, alternando corsi teorici e pratici con interventi di esperti sulle applicazioni avanzate della metodologia in diverse aree delle scienze sociali. Nell'aprile 2025 verrà organizzata la prima edizione di un Hackathon multidisciplinare (neuroscienze, fisica statistica e dei network, computer science) nell'ambito del progetto internazionale "**BrainHack**". Questa iniziativa coinvolgerà giovani ricercatori provenienti da diverse facoltà universitarie, promuovendo la collaborazione, il networking e lo scambio di competenze in ambiti complementari, con un focus specifico sul cervello.
- **Competenze emergenti nell'Intelligenza Artificiale:** Consapevole del potenziale trasformativo dell'Elaborazione del Linguaggio Naturale (NLP) e dei Grandi Modelli Linguistici (LLM) per la ricerca scientifica, il CREF, in collaborazione con Pi School, ha organizzato un corso avanzato per i propri ricercatori e collaboratori esterni. Questa iniziativa mira a fornire competenze avanzate in queste tecnologie per accelerare la scoperta e l'innovazione in varie discipline scientifiche, con un focus particolare sulla fisica. La partnership con Pi School, fondata da Translated e leader nella formazione pratica in IA, garantisce un elevato standard qualitativo dell'offerta formativa.

Formazione professionale continua e permanente

Il CREF ha collaborato con il consorzio Science Net nell'organizzazione di giornate di formazione per giornalisti scientifici (edizioni 2024 e 2025) con la partecipazione del proprio personale di Ricerca. Il focus della prima edizione era sul nucleare, mentre il secondo sulla meccanica quantistica.

Nel 2024 ha partecipato a una masterclass pedagogica per offrire a dirigenti scolastici, insegnanti e educatori l'opportunità di informarsi sull'insegnamento delle nuove tecnologie e le attività che offerte in questo settore nell'ambito del Progetto Karriere Quantum, organizzato dal Ministero della ricerca tedesco in collaborazione con i Goethe Institut d'Europa

Nuove metodologie di comunicazione e diffusione della conoscenza.

Il CREF è attualmente impegnato in strategie di comunicazione multicanale per ampliare la diffusione della conoscenza scientifica e raggiungere un pubblico diversificato. In particolare, articoli su LinkedIn e caroselli con grafica su Instagram. Inoltre, partecipa a documentari e trasmissioni radiofoniche e televisive offrendo consulenza redazionale e scientifica. L'impegno è anche nell'ideazione di iniziative mirano a sperimentare nuovi approcci didattici che siano coinvolgenti e con un elevato rigore scientifico.

- **Giochi scientifici interattivi** ispirati a format ludici comuni (come tombola e memory) e adattati a diverse fasce d'età, a partire dalla scuola dell'infanzia. L'obiettivo è rendere l'apprendimento dei concetti base della fisica delle particelle un'esperienza diretta e coinvolgente attraverso il movimento e la riproduzione di esperimenti. I materiali prodotti sono disponibili per la riproduzione, il prestito e l'esportazione in festival scientifici.
- **Percorsi diversificati all'interno del Museo** per le varie fasce d'età con specifiche modalità di interazione e gioco (caccia al tesoro, modello di Winterthur per l'analisi di oggetti, installazione interattiva "Fermioni e Bosoni").
- **Mostra "Scienza e Arte"**: in collaborazione con istituzioni come Città della Scienza, CNR-INO e Università di Firenze (UniFI), a maggio 2025 verrà organizzata una mostra che esplorerà l'intersezione tra oggetti artistici e di design e concetti fondamentali dell'ottica, offrendo una prospettiva inedita sulla scienza.
- **Installazione Multimediale "Gli Esperimenti del 1934"**: in occasione del novantesimo anniversario, il CREF ha realizzato un'installazione multimediale e immersiva dedicata agli storici esperimenti del 1934. Attraverso testimonianze, narrazioni, documenti e ricostruzioni 3D, i visitatori potranno esplorare in modo autonomo il percorso scientifico e umano di questa fondamentale scoperta, connettendo il racconto delle memorie personali con una rigorosa ricostruzione storica e scientifica.

Produzione e gestione di beni culturali: fruizione e accesso a strutture museali e collezioni scientifiche.

Ospitato nella storica palazzina di via Panisperna (sede del CREF) su circa 400 mq e riaperto al pubblico nel marzo 2022 dopo la pandemia, il Museo Enrico Fermi si pone come un **dinamico punto di riferimento per la divulgazione scientifica**, connettendo l'eredità scientifica di Enrico Fermi e del suo gruppo con le sfide scientifiche contemporanee e le nuove generazioni.

Un **Comitato Tecnico**, composto da ricercatori del CREF e supervisionato dal Direttore Scientifico, coordina e valorizza le attività e le collezioni del Museo, monitorando costantemente l'operato attraverso relazioni semestrali su funzionamento, affluenza e interventi di sviluppo.

Il Museo ambisce a essere un **ponte tra passato e futuro**, illustrando come le esplorazioni della materia si siano intrecciate con gli eventi storici del Novecento, rendendo la scienza accessibile anche a un pubblico non specialistico attraverso un **percorso di apprendimento informale, diversificato e coinvolgente**.

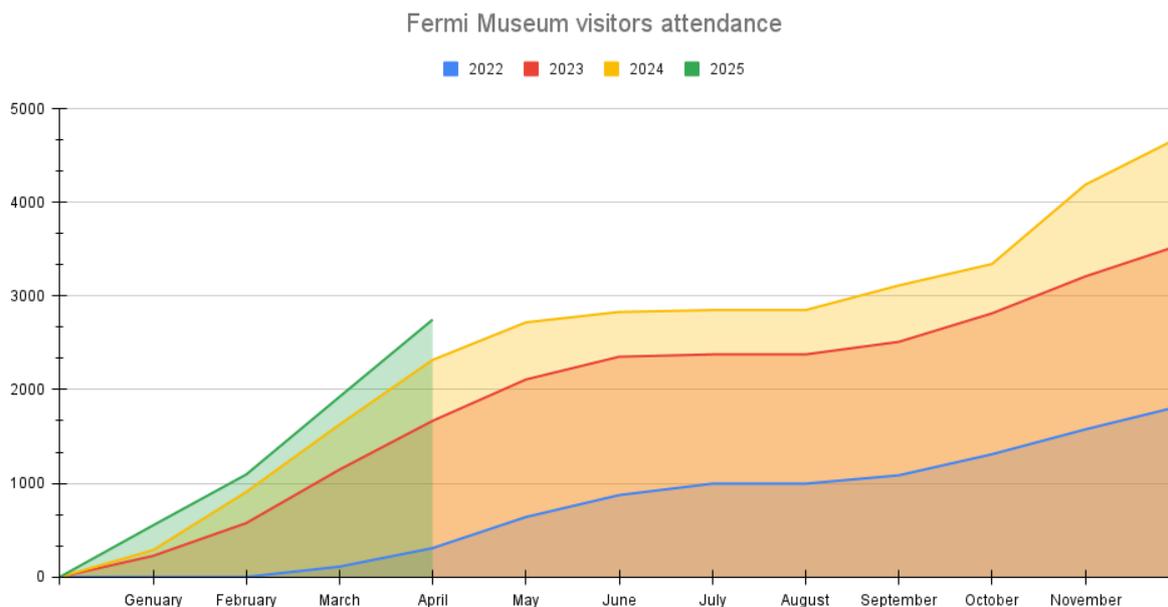
Per raggiungere questo obiettivo, il Museo:

- **Coinvolge attivamente il personale di ricerca in attività di outreach e terza missione**, partecipando a festival scientifici, allestendo laboratori, exhibit e mostre temporanee, organizzando conferenze, presentazioni e dibattiti sulla storia della fisica, e offrendosi come **hub informativo per produzioni mediatiche** legate alla storia di via Panisperna.
- **Organizza attività specifiche per le scuole**, inclusi PCTO e visite interattive ai laboratori del CREF, arricchendo l'esperienza museale.
- **Promuove una politica di network** attraverso collaborazioni con prestigiose istituzioni museali italiane e internazionali (AMSI, Museo Curie, Museo di Fisica di Sapienza, Museo Egizio).
- Ha creato una **forte identità** come punto di riferimento per la storia di Fermi e del gruppo di via Panisperna, ma anche come **luogo di scambio e dialogo continuo tra storia, ricerca e divulgazione**.

L'accesso al Museo e alle collezioni è garantito principalmente alle scuole il mercoledì mattina su appuntamento, con aperture aggiuntive (martedì e giovedì) nei periodi di maggiore affluenza scolastica. Per la cittadinanza vengono organizzati **open day mensili**. Sono inoltre possibili visite dedicate per società scientifiche e piccoli gruppi su prenotazione.

Sebbene il target principale siano le scuole superiori, dal 2023 sono state avviate con successo **visite pilota per scuole secondarie di primo grado e classi quinte della primaria**, portando allo sviluppo di materiali didattici e attività specifiche per queste fasce d'età.

Nel 2024, il Museo ha accolto **oltre 4.600 visitatori**, di cui il 71% studenti, confermando **un interesse di pubblico in continua crescita**.



A livello organizzativo, le visite guidate sono condotte dal **personale scientifico dell'Ente** (che dedica il 10% del proprio tempo a queste attività), supportato da **borse di studio junior e formative** dedicate specificamente alle attività museali.

In sintesi, il Museo Enrico Fermi rappresenta un'iniziativa strategica del CREF per la **diffusione della cultura scientifica**, la **valorizzazione della propria storia** e l'**engagement del pubblico**, con un focus particolare sulle nuove generazioni e sul territorio.

Attività di public engagement

Il CREF si configura come un dinamico **punto di connessione tra l'eredità scientifica del passato e le sfide del futuro**, ponendosi l'obiettivo di rendere la scienza accessibile e rilevante per le nuove generazioni.

- **Rendere accessibili i risultati della ricerca** attraverso il sito web e i canali sociali, in particolare LinkedIn dove vengono pubblicati e diffusi attraverso una newsletter quindicinale articoli divulgativi sulle pubblicazioni dell'ente.
- **Contatto diretto con il lavoro e la metodologia di ricerca** attraverso l'**interazione diretta con i ricercatori e le visite ai laboratori** come parte integrante del percorso di visita Museale per le scuole.
- **Percorsi di competenze trasversali e orientamento (PCTO)**: nel 2025 CREF ha attivato un PCTO in collaborazione con l'Archivio e la Biblioteca di Fisica di Sapienza: gli studenti liceali avranno la possibilità di fare ricerca in archivio su un argomento inerente alla storia dell'Istituto Regio di Fisica e di restituire la propria ricerca in modo creativo (video, laboratorio, grafica,

racconto), in un percorso in ottica MAB. Per l'anno accademico 2025-2026 è in programma un secondo PCTO su Fisica per i Beni culturali.

- **Il progetto Extreme Energy Events (EEE) – “La scienza dentro le scuole”** è un programma innovativo di diffusione della cultura scientifica incentrato sulla misurazione e l'analisi della radiazione cosmica a livello del suolo. Nato come progetto pilota nel 2005, coinvolge attivamente circa 80 scuole superiori italiane in un esperimento di fisica dei raggi cosmici. Studenti e insegnanti partecipano a tutte le fasi, dalla costruzione di rivelatori di muoni (telescopi basati su camere a piastre resistive Multigap) installati nelle scuole, all'analisi dei dati raccolti. L'EEE costituisce un osservatorio nazionale di raggi cosmici che studia il flusso a livello locale e indaga correlazioni su vasta scala. Nel 2018 è stata avviata la Missione PolarquEEEst, con l'installazione nel 2019 di tre rivelatori compatti a scintillazione a Ny Ålesund (Svalbard) in collaborazione con il CNR, per studiare i raggi cosmici a latitudini estreme.
- **Open day Santa Lucia Settimana del Cervello** Anche nel 2024, per la [Settimana del Cervello](#), il Centro Ricerche Enrico Fermi e la Fondazione Santa Lucia organizzano un Open Day per studenti e studentesse delle scuole superiori e Università: un'occasione preziosa per vedere da vicino come funzionano le neuroscienze applicate alla riabilitazione e scoprire nuove frontiere della ricerca medica sul cervello.
- Contribuire attivamente alla discussione sulle discipline **STEAM** e sull'importanza del **gender balance** attraverso conferenza sulla presenza delle donne nella scienza nel corso della storia. In particolare, conferenze su: La presenza delle ricercatrici a via Panisperna tra fine '800 e prima metà del '900, Laura Fermi, Lise Meitner, Marie Curie e una giornata di studio dedicata a Ginestra Amaldi, tra le prime a fare divulgazione scientifica in Italia utilizzando i Mass Media.
- Organizzare **cicli di conferenze sulla storia della scienza** per incoraggiare una riflessione aperta e critica sulle implicazioni delle scelte scientifiche nella società odierna. **Per il ciclo 2024 delle “Lezioni aperte. Intrecci tra fisica e storia il CREF ha proposto quattro conferenze dal titolo “Manhattan Project. Un racconto a più voci”** Nel corso delle conferenze, il Progetto Manhattan è stato raccontato dal punto di vista scientifico e storico, con le sue implicazioni umane ed etiche. Per farlo, abbiamo scelto di affidarci alle voci di testimoni d'eccezione, con una prospettiva sugli eventi tanto più interessante quanto meno ufficiale e celebrata.
- Intensificare l'impegno nella diffusione della cultura scientifica attraverso la partecipazione a eventi e manifestazioni scientifiche e culturali. In particolare, il CREF partecipa **alla Notte dei Ricercatori alla Città dell'altra Economia (Roma)**: una 'Notte speciale' dedicata alla scienza, con numerosi eventi gratuiti, tra cui esperimenti e dimostrazioni scientifiche dal vivo, mostre e visite guidate, conferenze e seminari divulgativi, spettacoli e concerti. Un progetto voluto e promosso dalla Commissione Europea fin dal 2005 e finanziato da HORIZON-MSCA-2023-CITIZENS-01-01 con le azioni Marie Skłodowska-Curie. Il CREF è socio anche al Festival della Scienza di Genova, e partecipa ogni anno con laboratori per i più piccoli, conferenze e Virtual Tour del Centro.
- **Utilizzare strategicamente i canali social dell'Ente**: per amplificare la portata delle iniziative, condividere contenuti divulgativi e stimolare l'interazione con il pubblico.

Indicazione del budget e del personale (%) coinvolto nelle varie attività.

Il CREF destina alle suddette iniziative una quota rilevante del suo budget le cui principali voci sono di seguito indicate.

Azioni di supporto all'alta formazione (personale di ricerca impegnato per un FTE pari a 2,8):

- dottorati di ricerca euro 239.508 (circa per questa voce è previsto un incremento rilevante nel corso del 2025, con l'intenzione di garantire a regime il finanziamento almeno 5 borse di dottorato per ciascun ciclo);
- borse di ricerca euro 36.000;
- borse di studio premiali euro 2.000;
- attrezzature didattiche e museali euro 15.000.

Attività di public engagement (personale di ricerca impegnato per un FTE pari a 2,25):

- Progetto EEE euro 250.000, di cui euro 100.000 sotto forma di costi di personale di ricerca, tecnico e amministrativo strutturato
- conferenze e seminari per euro 40.000;
- servizi per pubblicazione articoli scientifici valorizzata per euro 15.000.

Servizi conto-terzi: indicazione ricavi ottenuti e personale impegnato (%), previsione per il triennio.

Il CREF nel triennio 2025-2027 sarà impegnato nella seguente attività conto-terzi:

- commessa assegnata dall'Istituto superiore di Sanità per servizio di supporto alla risonanza magnetica per valutare l'attività cerebrale prima e dopo un intervento di meditazione mindfulness della durata di sei mesi per ricavi complessivi pari ad euro 39.880,00, tutti previsti nel 2025. Nel progetto è impegnato un dirigente di ricerca I livello per un FTE (full-time equivalent o equivalente a tempo pieno) pari al 10%;
- contratto assegnato da European Commission, Joint Research Centre (JRC), Directorate B, C. Inca Garcilaso 3, 41092 Sevilla (Spagna) di cui alla call for tenders EC JRC/SVQ/2024/VLVP/3238 - Measuring technological specialisation - Ares(2024)8487492 ad oggetto servizio di measuring technological specialisation using network inference methods - TechSpec della durata di dodici mesi per ricavi complessivi pari ad euro 14.750,00, tutti previsti nel 2025. Nel progetto sono impegnati un primo ricercatore II livello e tre ricercatori III livello per un FTE pari al 13%;
- contratto assegnato da European Commission, Joint Research Centre (JRC), Directorate B, C. Inca Garcilaso 3, 41092 Sevilla (Spagna) di cui alla call for tenders EC-JRC/SVQ/2024/VLVP/3019 - FindInnovators4INCITE - Ares(2024)8170796 ad oggetto servizio development and testing of Language Model for identification of INCITE relevant innovations and innovators della durata di dodici mesi per ricavi complessivi pari ad euro 14.900,00, tutti previsti nel 2025. Nel progetto sono impegnati un primo ricercatore II livello e tre ricercatori III livello per un FTE pari al 13%.

Partecipazioni a spin-off, società e fondazioni.

Il CREF non detiene partecipazioni in spin-off, società e fondazioni.

Al 31 dicembre 2023, secondo l'ultima rilevazione dell'ultima rilevazione prevista dal testo unico in materia di società a partecipazione pubblica (TUSP), decreto legislativo 19 agosto 2016, n. 17, effettuata il 31 dicembre 2024, il CREF deteneva una partecipazione pari allo 0,75% (pari alla quota di adesione di 25.000 euro interamente versata nel 2022) del valore del fondo di dotazione consortile al 31 dicembre 2023 di euro 3.329.226 di CINECA consorzio interuniversitario.

Brevetti depositati: titolo, anno pubblicazione, entrate, etc.

Il CREF ha depositato i seguenti due brevetti, che per ora non hanno prodotto entrate:

- "Intraoperative detection of tumor residues using beta- radiation and corresponding probes", WO 2014118815 A2. PCT/IT2014/00002. Proprietà condivisa tra autori di INFN, Dip. SBAI e CREF (2014).
- "Development of a new class of plastic scintillators for the realization of fast timing detectors". Registrazione nazionale P3080IT00. Proprietà condivisa tra autori di SBAI e CREF (2021).

Il CREF è in fase di deposito del seguente brevetto, nato nel proprio laboratorio di fotonica computazionale:

- "Time tagging photonic device to detect coincidences", to be submitted. Proprietà condivisa tra autori di CREF, Sapienza, ISC-CNR (2025).

Eventi Terza Missione

12 marzo 2024: “Open day Santa Lucia Settimana del Cervello”

Anche nel 2024, per la [Settimana del Cervello](#), il CREF e la Fondazione Santa Lucia organizzano un Open Day per studenti e studentesse delle scuole superiori e Università: un’occasione preziosa per vedere da vicino come funzionano le neuroscienze applicate alla riabilitazione e scoprire nuove frontiere della ricerca medica sul cervello.

15 aprile 2024: “1,2,3 Particella!”

Un percorso sperimentale per le classi della primaria al Museo Fermi, scuola elementare Principe di Piemonte

16 maggio 2024: “Giornata della Luce”

Un workshop per la Giornata Internazionale della Luce, organizzato dal gruppo [Young Minds](#) di Via Panisperna, e diretto a studenti/e dottorandi/e e post-doc di Fisica che abbiano interesse nei percorsi di Ottica e Fotonica.

Durante la mattinata si approfondiranno alcune tematiche riguardanti l’Ottica e la Fotonica attraverso molteplici talk tenuti da professori, ricercatori e ricercatrici provenienti da Sapienza Università di Roma, Università Roma Tre, Consiglio Nazionale delle Ricerche e direttamente dal CREF. Nel primo pomeriggio una tavola rotonda permetterà agli ospiti di confrontarsi sul tema: **Fotonica tra Intelligenza Artificiale e Informazione Quantistica**.

5 luglio 2024: “Raggi Cosmici. Il progetto EEE nella tappa romana della Transglobal car expedition”

24-25-26 settembre 2024: “Aperture straordinarie per le scuole aspettando la Notte dei Ricercatori e delle Ricercatrici”. Nell’ambito dei “pre-eventi” della Notte dei Ricercatori, per il progetto Net Scienza Insieme, sono state organizzate delle aperture speciali per le scuole.

27-28 settembre 2024: “Partecipazione alla Notte dei Ricercatori alla Città dell’altra Economia (Roma) “

Una ‘Notte speciale’ dedicata alla scienza, con numerosi eventi gratuiti, tra cui esperimenti e dimostrazioni scientifiche dal vivo, mostre e visite guidate, conferenze e seminari divulgativi, spettacoli e concerti. È la Notte Europea dei Ricercatori e delle Ricercatrici, un progetto voluto e promosso dalla Commissione Europea fin dal 2005 e finanziato da HORIZON-MSCA-2023-CITIZENS-01-01 con le azioni Marie Skłodowska-Curie.

24 ottobre - 1° novembre 2024: “Partecipazione al Festival della Scienza di Genova con il laboratorio “La tombola degli elementi” sugli esperimenti del 1934 di Fermi”

6-8 novembre 2024: “Partecipazione al progetto Karriere Quantum con il Goethe Institut di Roma”

20 studenti di diverse scuole europee hanno visitato il Museo nell’ambito del progetto Karriere Quantum con il Goethe Institut di Roma

L’8 novembre il CREF ha partecipato a una masterclass pedagogica per offrire a dirigenti scolastici, insegnanti e educatori l’opportunità di informarsi sull’insegnamento delle nuove tecnologie e le attività che offerte in questo settore.

25-26-27 novembre 2024: “meeting in presenza con le scuole del Progetto EEE”

Studenti e docenti provenienti dalle scuole superiori di tutta Italia sono stati ospiti al CREF per partecipare a seminari, masterclass e all’International Cosmic Day in collegamento con studenti da tutto il mondo, per analizzare e studiare i raggi cosmici.

Per il ciclo 2024 delle “Lezioni aperte. Intrecci tra fisica e storia il CREF ha proposto quattro conferenze dal titolo “Manhattan Project. Un racconto a più voci”

Nel corso delle conferenze, il Progetto Manhattan è stato raccontato dal punto di vista scientifico e storico, con le sue implicazioni umane ed etiche. Per farlo, abbiamo scelto di affidarci alle voci di testimoni d'eccezione, con una prospettiva sugli eventi tanto più interessante quanto meno ufficiale e celebrata.

“Manhattan Project” con Gianni Battimelli (Fisico e Storico della fisica, Sapienza Università di Roma) e Leopoldo Nuti (Storico e Politologo, Roma Tre), farà da introduzione alle altre facendo emergere il contesto storico, sociale e scientifico nel quale si è definito il progetto della bomba atomica.

“La forza dell'atomo. Lise Meitner si racconta” con Simona Cerrato Fisica, Scrittrice, Comunicatrice della Scienza - ECSA, Berlino).

La storia di Lise Meitner, la scienziata che per prima ha saputo fornire la spiegazione scientifica della fissione. Appassionata, geniale e determinata, Meitner nella sua vita ha ricevuto riconoscimenti e umiliazioni, subendo l'emarginazione come donna e come ebrea.

“Fascismo, Manhattan Project e Guerra fredda: Laura Capon Fermi si racconta” con Paola Govoni (Storica della Scienza, Università di Bologna) Divulgatrice scientifica, compagna di vita di Enrico Fermi, in “Atomi in famiglia” Laura Capon ha saputo raccontare con ironia e lucidità non solo la biografia umana e scientifica del marito, ma un'epoca storica di cambiamenti e decisioni.

“Maksimovič. La storia di Bruno Pontecorvo” con Giuseppe Mussardo (Professore ordinario di fisica Sissa di Trieste) Bruno Pontecorvo, anche lui negli Stati Uniti dal 1940, fu escluso dal Progetto Manhattan per le sue idee comuniste. La sua storia, il suo impegno politico nella Parigi dei Joliot Curie e la sua fuga in URSS.

Eventi Istituzionali

16 luglio 2024: Riunione CoPer presso il CREF

La CoPER è composta dai Presidenti di enti nazionali che rappresentano le principali istituzioni di ricerca in Italia, e ha il compito di pianificare, promuovere e sostenere le attività di ricerca, di attuare il Piano Nazionale della Ricerca (PNR) e di monitorare l'applicazione della Carta europea dei ricercatori.

16 novembre 2024: Delegazione della Classe di Fisica della Reale Accademia Svedese delle Scienze e del Comitato Nobel

Una delegazione della Classe di Fisica dell'Accademia Reale Svedese delle Scienze ha effettuato un viaggio presso alcune delle più importanti istituzioni scientifiche di Roma. Come tappa conclusiva del tour, la delegazione ha visitato il Centro di Ricerca Enrico Fermi (CREF) il 16 novembre.

10 dicembre 2024: “Annus Mirabilis. Gli esperimenti del 1934”: Inaugurazione dell'installazione immersiva al Museo Enrico Fermi di Roma

Realizzata in occasione dei 90 anni dagli esperimenti che in via Panisperna furono condotti dal fisico italiano, l'installazione “Annus Mirabilis. Gli esperimenti del 1934” consente agli spettatori, navigando tra testimonianze e narrazioni audio, documenti e ricostruzioni in 3D, di muoversi in modo autonomo lungo un percorso in cui la suggestione delle memorie personali è corredata da una puntuale ricostruzione storica e scientifica.

AZIONI PER GENDER EQUALITY

Gender Equality Plan (GEP)

Il Gender Equality Plan (GEP) del Centro Ricerche Enrico Fermi (CREF) nasce in linea con i principi fondamentali dell'uguaglianza di genere sanciti dall'Unione Europea (Trattato di Lisbona) e con la Strategia Europa 2020, che mira a costruire un'Europa garante della parità, libera da violenza di genere, discriminazioni e disuguaglianze strutturali. L'adozione del GEP rappresenta un requisito imprescindibile per l'accesso ai finanziamenti del programma Horizon Europe e costituisce una misura chiave della Commissione Europea per promuovere l'uguaglianza di genere nella ricerca e nell'innovazione.

Il GEP del CREF è concepito come un insieme di azioni volte a promuovere un cambiamento istituzionale e culturale, in conformità con i quattro requisiti essenziali definiti dalla Commissione Europea: **pubblicità, risorse dedicate, raccolta e monitoraggio dati, e formazione.**

Il piano affronta inoltre le cinque aree tematiche individuate dalla Commissione Europea come prioritarie:

- **equilibrio tra lavoro – vita privata e cultura organizzativa:** Attraverso iniziative volte a favorire una cultura del lavoro inclusiva e flessibile;
- **equilibrio di genere nella leadership e nel processo decisionale:** Promuovendo una rappresentanza equilibrata di genere nei ruoli di leadership e nei processi decisionali;
- **parità di genere nelle assunzioni e nella progressione di carriera:** Implementando processi di selezione e valutazione equi e trasparenti;
- **integrazione della dimensione di genere nella ricerca e nei contenuti dell'insegnamento:** Sensibilizzando alla prospettiva di genere nella ricerca e nei materiali didattici;
- **misure contro la violenza di genere, comprese le molestie sessuali:** definendo policy e procedure per prevenire e contrastare ogni forma di violenza e molestia.

Al fine di rafforzare ulteriormente l'impegno verso l'inclusione e il benessere aziendale, è stato costituito un **Comitato Unico di Garanzia (CUG)**, che opererà in coordinamento con il GET per potenziare le rispettive attività.

Per avviare un percorso strutturato di sensibilizzazione e formazione, il CREF ha affidato tramite bando un incarico triennale di consulenza alla società Dadaop per un importo di 6.500 euro. La consulente avrà il compito di:

- fornire consulenza per la stesura e l'implementazione di linee guida per un **linguaggio gender sensitive o gender neutral** nelle comunicazioni interne ed istituzionali;
- fornire consulenza nella stesura di una **policy antidiscriminazione e antimolestie**;
- realizzare **formazione specifica per il GET e il CUG** sulle politiche di genere;
- svolgere attività di progettazione e ricerca per identificare soluzioni organizzative pratiche;
- realizzare **attività di formazione per il personale del CREF** su tematiche quali equità di genere, bias e stereotipi di genere, rappresentanza di genere nelle discipline scientifiche e linguaggio inclusivo (almeno 3 incontri per 6 ore totali);
- ricoprire il ruolo di **Consigliera di fiducia**, previa definizione di una specifica policy;
- misure contro la violenza di genere, comprese le molestie sessuali.

Budget:

Per la redazione e l'implementazione del GEP, il CREF ha istituito un **Gender Equality Team (GET)**, composto da dipendenti con competenze specifiche e sensibilità sul tema. A seguito dell'adozione del Piano GEP 2022-2024, sono stati stanziati **13.000 euro** per la sua attuazione, risorse rinnovabili per il successivo triennio. Nel personale impegnato nel GEP nominato con determina n. 48/2023 del 15 marzo 2023 il GET (Gender Equality Team) sono presenti 7 dipendenti, nel rispetto della parità di genere.

RISORSE

Ricavi e proventi per l'attività istituzionale

Nella seguente tabella sono esposti i ricavi e i proventi iscritti nel bilancio di previsione triennale del CREF.

	2025	2026	2027
Contributo ordinario dello Stato	3.678.503,00	3.678.503,00	3.678.503,00
Contributi dallo Stato	293.447,54	65.869,43	64.801,10
Contributi da Regione	851,54	746,41	925,78
Contributi da altri enti pubblici	4.639,36	0,00	0,00
Contributi da privati	36.000,00	36.000,00	36.000,00
Ricavi per cessione di prodotti e prestazioni servizi	15.643,10	15.643,10	15.643,10
Altri ricavi e proventi	159.101,87	120.788,80	59.270,69
Totale ricavi e proventi	4.190.211,41	3.919.576,74	3.857.170,67

Il **contributo ordinario dello Stato** si riferisce al trasferimento corrente del Ministero dell'università e della ricerca, secondo quanto previsto dal decreto di riparto del Fondo Ordinario per gli enti e le istituzioni di ricerca n. 1096, del 25 luglio 2024. Ai fini dell'elaborazione del bilancio di previsione triennale 2025-2027, l'art. 2 del decreto prevede che gli enti possano considerare quale riferimento il 100% dell'ammontare dell'assegnazione complessiva per l'esercizio 2024.

I **contributi dallo Stato**, quali contributi in conto esercizio, si riferiscono, per euro 209.384,06, a progetti pluriennali di ricerca finanziati dal MUR il cui stanziamento, in via prudenziale in ragione delle fasi di avanzamento delle attività di ricerca, è stato previsto in parte nel bilancio di previsione 2024 ed in parte nell'esercizio 2025.

Parte dei contributi dello Stato si riferiscono altresì a ricavi di progetti finanziati esternamente, maturati nei precedenti esercizi, che sulla base del criterio cost to cost sono riscontati negli esercizi successivi e destinati a coprire i costi di ammortamento di immobilizzazioni acquisite con i fondi di tali progetti.

In tale casistica, rientrano anche i **contributi da Regioni**.

La voce **contributi da altri enti pubblici**, stanziata per il solo esercizio 2025, è relativa al contributo pari ad euro 4.639,36 che l'Università degli Studi di Torino erogherà al CREF come rimborso degli oneri stipendiali relativi un'unità di personale ricercatore III livello distaccato presso tale ateneo in virtù della convenzione protocollo 439/2023 del 31 gennaio 2023.

La voce **contributi da privati** è relativa al contributo pari ad euro 35.000 (al netto dell'IVA) che Sony Europe B.V. erogherà al CREF in base agli accordi di cui alla convenzione per collaborazione scientifica di durata triennale stipulata in data 1° ottobre 2021 (prot. 1452 del 14 ottobre 2021) e rinnovata in data 21 agosto 2023 (prot. 3169).

Inoltre, per far fronte ad eventuali procedure concorsuali per il reclutamento di figure amministrative, tecniche e di ricerca nel corso del 2025, a causa del recente cambiamento della normativa in tema di concorsi, che impone l'utilizzo di strumenti informatici e digitali per le prove scritte e per le prove orali l'ente, il CREF non essendo dotato delle necessarie risorse umane e strumentali, dovrà richiedere il supporto esterno, sostenendone i relativi costi. Da qui la previsione di richiedere ai partecipanti alle prove un contributo di ammissione di euro 10, per un totale stimato di euro 1.000.

La voce **ricavi per cessioni di prodotto e prestazioni di servizi**, ricomprende i proventi derivanti dall'organizzazione di eventi scientifici all'interno della sede del CREF, prevalentemente presso l'Aula Fermi.

Negli **altri ricavi e proventi** confluiscono i proventi a copertura degli ammortamenti futuri derivanti dall'acquisizione di immobilizzazioni provenienti dalla COFI e finanziati dal FOE, così come definito nei principi contenuti nel Manuale tecnico operativo di contabilità per le università (art. 8, decreto interministeriale MIUR-MEF 14 gennaio 2014, n. 19).

Principali voci del bilancio preventivo CREF 2025-2027

Costi complessivi per il personale

Gli stanziamenti previsti nel bilancio di previsione triennale 2025-2027 per i costi del personale, comprensivi degli oneri sociali e dell'accantonamento TFR, sono di seguito rappresentati:

2025	2026	2027
3.174.822,71	2.997.490,50	2.943.585,71

Nella tabella seguente, sono indicati i costi complessivi per il personale per l'esercizio 2025:

Voce budget annuale	Tempo indeterminato	Dir. amm e Dir. sci.	Assegni di ricerca	Contratti di ricerca	Borse di addestramento alla ricerca (di studio)
B.9.a Salari e stipendi	1.562.204,68	173.774,77	334.740,21	136.625,69	36.000,00
oltre ad accantonamento per produttività personale TA e DA	8.192,76	26.380,00			
B.9.b Oneri sociali	375.403,10	42.132,14	80.573,78	31.906,65	
Oltre ad INAIL	15.000,00			726,85	
B.9.c TFR	107.782,29	12.030,29		9.440,83	
B.9.e Altri costi, di cui:	210.722,63				
<i>welfare</i>	23.292,88				
<i>buoni pasto</i>	30.926,75				
<i>formazione</i>	38.000,00				
<i>visite fiscali</i>	1.000,00				
<i>missioni</i>	117.503,00				
					<i>(compresa quota a carico dei progetti per euro 14.503,00)</i>

Personale dipendente

Per i dati analitici relativi al personale dipendente si rimanda alla successiva sezione relativa al piano di fabbisogno del personale.

Assegni di ricerca

Sono attualmente attivi presso il CREF 12 assegni di ricerca. Il bilancio preventivo triennale è stato costruito nell'ipotesi che si proceda al rinnovo di tutte le posizioni in scadenza per il 2025, mentre per gli esercizi 2026 e 2027 non sono stati ipotizzati rinnovi, in attesa della regolamentazione dei contratti di ricerca ex art. 22 legge n. 240/2010. Gli stanziamenti, pertanto, risultano in progressiva riduzione nell'arco del triennio.

2025	2026	2027
415.313,98	60.008,61	0,00

Per l'esercizio 2026, a quelli relativi al bilancio di previsione triennale, si aggiungono gli stanziamenti previsti in sede di destinazione del risultato economico dell'esercizio 2023, pari ad euro 201.000,00.

Borse di ricerca/studio

Sono attualmente tre le borse di ricerca/studio attivate dal CREF nei primi mesi del 2025. Il costo complessivo delle tre posizioni ammonta ad euro 57.700,00, di cui 36.000,00 euro stanziati per il triennio 2025-2027 nel bilancio di previsione, e 21.700,00 stanziati in sede di destinazione del risultato economico dell'esercizio 2023.

Contratti di ricerca

Per i contratti di ricerca a di cui al all'art. 22, comma 6, della legge 240/2010, l'importo del contratto è stabilito in sede di contrattazione collettiva, in ogni caso in misura non inferiore al trattamento iniziale spettante al ricercatore confermato a tempo definito. La spesa complessiva per l'attribuzione dei contratti non può essere superiore alla spesa media sostenuta nell'ultimo triennio per l'erogazione degli assegni di

ricerca, come risultante dai bilanci approvati. Sulla base di tale spesa media, sono stati stanziati i seguenti importi:

2025	2026	2027
190.313,21	380.626,41	380.626,41

Manutenzione del Museo e della Palazzina

Per la manutenzione dell'immobile il budget è stato ripartito nelle seguenti voci:

	2025	2026	2027
Manutenzione ordinaria e riparazioni di mobili e arredi	1.000,00	1.000,00	1.000,00
Manutenzione ordinaria e riparazioni di impianti e macchinari (impianto idraulico, riscaldamento, condizionamento, ascensori, antincendio, elettrico, ecc.)	89.841,05	85.255,32	85.173,50
Manutenzione ordinaria e riparazioni di attrezzature (Aula Fermi, videoproiettori, pannelli informativi)	36.578,46	36.578,46	36.578,46
Manutenzione ordinaria e riparazioni di macchine per ufficio	2.000,00	2.000,00	2.000,00
Manutenzione ordinaria e riparazioni di beni immobili (lavori edili, infissi, porte, ecc.)	5.354,62	5.354,62	5.354,62
Totale	134.774,13	130.188,40	130.106,58

Di particolare rilevanza è la stipula ad agosto 2023 del contratto su convenzione CONSIP Facility Management 4 per la maggior parte dei servizi di manutenzione dell'immobile dell'Ente (comprese le pulizie) e per una durata di anni sei, con subentro definitivo dell'operatore economico prescelto nelle attività di cui ai contratti in essere negli esercizi precedenti al 2025 e giunti alla loro fisiologica scadenza.

Circa i servizi destinati all'infrastruttura informatica del CREF deve essere segnalata l'adesione a luglio 2023 alla convenzione CONSIP Reti locali 7 per la fornitura di nuove più moderne attrezzature di rete (switch, access point, ecc.) e la relativa manutenzione pluriennale, comprese le dorsali cablate.

Rilevante, sempre nell'ambito delle manutenzioni ordinarie di attrezzature, l'esigenza di un accordo quadro di manutenzione dei sistemi audio video dell'aula Fermi e del Museo Fermi.

Assicurazioni

Nel corso del secondo semestre del 2022 il CREF si è dotato di nuovi strumenti assicurativi, per far fronte ad imprevisti nell'esercizio delle sue attività, incrementate dopo il termine dell'emergenza Covid. Il costo totale annuo è pari ad euro 48.600,00, ed è stato così ripartito nel bilancio preventivo triennale:

	2025-2027
Kasko missioni dipendenti	4.200,00
All risks Palazzina e Museo (compreso il contenuto)	13.200,00
Responsabilità civile verso terzi	9.6000,00
Infortuni assegnisti, dottorandi, frequentatori e visitatori Museo	13.200,00
Tutela legale	8.400,00

Utenze e altri costi indiretti (elenco non esaustivo)

Per lo svolgimento delle attività istituzionali il CREF ha attualmente bisogno di sostenere, tra gli altri, i seguenti costi annui:

	2025	2026	2027
Energia elettrica	134.523,12	130.000,00	130.000,00
Acqua	5.000,00	5.000,00	5.000,00
Gas	90.054,79	70.000,00	70.000,00
Telefonia fissa	15.000,00	15.000,00	15.000,00
Accesso ad Internet	14.818,93	14.818,93	14.372,34
Servizi di pulizia e lavanderia	53.051,72	53.088,73	53.088,73
Servizio di tesoreria	20.000,00	20.000,00	20.000,00
Software gestionale (contabilità, protocollo, ecc.)	136.728,43	136.728,43	136.728,43

	2025	2026	2027
Prestazioni di natura contabile, tributaria e del lavoro	23.899,20	23.899,20	23.899,20
DPO, RSPP, Medico Competente, Esperto museo, consulenza al GET e CUG	28.322,40	28.322,40	28.322,40
Indennità C.d.A. e Compensi agli organi istituzionali di revisione, di controllo	100.552,00	100.552,00	100.552,00
Compensi agli altri incarichi istituzionali dell'amministrazione (OIV)	6.546,32	6.546,32	6.546,32
Totale delle voci precedenti	628.496,91	603.956,01	603.509,42

Altri costi per attività istituzionale (elenco non esaustivo)

Ulteriori costi per lo svolgimento delle attività istituzionali del CREF sono indicati nella seguente tabella.

	2025	2026	2027
Organizzazione di manifestazioni e convegni	60.305,00	60.000,00	60.000,00
Servizi per pubblicazione articoli scientifici	15.000,00	15.000,00	15.000,00
Materiale di consumo per laboratorio (gas Progetto EEE)	90.000,00	90.000,00	90.000,00
Altri beni e materiali di consumo (progetti di ricerca)	85.000,00	85.000,00	85.000,00
Trasporti, traslochi e facchinaggio (Progetto EEE, facchinaggi Colser)	16.360,00	16.360,00	16.360,00
Carta, cancelleria e stampati	5.000,00	5.000,00	5.000,00
Totale delle voci precedenti	271.665,00	271.360,00	271.360,00

I costi per i gas del progetto EEE sono stati calcolati in modo conservativo tenendo presente la progressiva eliminazione dal mercato dei gas utilizzati nel progetto, con conseguenti difficoltà di reperimento.

Sicurezza

A partire dal secondo semestre del 2022 si è provveduto a ripristinare tutti i controlli di sicurezza sui luoghi di lavoro previsti dalla normativa vigente.

Una lista non esaustiva è la seguente:

- costituzione delle squadre di emergenza e formazione antincendio/pronto soccorso;
- predisposizione del documento di valutazione dei rischi;
- attivazione dell'impianto rilevazione incendi (centrale, sensori, ecc.);
- revisione attrezzature antincendio (contratto per manutenzioni);
- collaudo periodico ascensori;
- nomina e formazione preposti;
- installazione cartellonistica;
- sostituzione delle lampade di emergenza fuori uso e integrazione di quelle mancanti;
- controlli Legionella e operazioni di bonifica;
- predisposizione piano di evacuazione;
- prova di evacuazione;
- prima ispezione delle coperture e stasamento degli scarichi.

Tra le criticità da segnalare, le persiane di cui sono dotate le finestre del CREF (circa 180) versano in gravi condizioni e richiedono di essere mantenute e/o sostituite; transitoriamente si è provveduto a rimuovere e conservare quelle che costituivano un pericolo per i passanti.

La convenzione stipulata con l'Agenzia del Demanio il 20 dicembre 2024 per la realizzazione dell'intervento di ristrutturazione della palazzina B ex F.A.P., sede del CREF, ha previsto il trasferimento delle risorse necessarie ad eseguire, tra gli altri, l'intervento di sostituzione delle persiane danneggiate.

Si segnala, inoltre, che il CREF sta valutando la possibilità di adottare un piano di transizione ecologica mediante il quale effettuare gradualmente il passaggio a fonti di energia rinnovabili.

Strumentazioni di ricerca e altri investimenti

Gli stanziamenti del bilancio di previsione triennale in attrezzature scientifiche sono le seguenti:

2025	2026	2027
90.000,00	80.000,00	80.000,00

Sono poi previsti acquisti di postazioni di lavoro informatiche da assegnare anche ai nuovi assunti, la sostituzione di materiale obsoleto, interventi legati alla sicurezza, quali ad esempio l'adeguamento degli impianti di rilevazione incendi ed evacuazione, la videosorveglianza. Infine, sempre per ciò che concerne le attrezzature, sono previsti investimenti destinati all'ammodernamento delle attrezzature audio e video per uno svolgimento più funzionale ed efficiente delle videoconferenze nella sala Touschek, nonché per un ammodernamento della dotazione dell'Aula Fermi e del Museo, come di seguito indicato.

	2025	2026	2027
Impianti	140.000,00	140.000,00	140.000,00
Macchine per ufficio	20.000,00	20.000,00	20.000,00
Attrezzature informatiche/hardware	15.000,00	15.000,00	15.000,00
Attrezzature didattiche e museali	15.000,00	15.000,00	15.000,00
Altre attrezzature	15.000,00	15.000,00	15.000,00

Dal punto di vista funzionale il budget 2025 è così ripartito:



FABBISOGNO DEL PERSONALE E DOTAZIONE ORGANICA

Personale dipendente in servizio al 31 dicembre 2024

Nel corso del 2024 il CREF ha sostenuto spese per personale dipendente prevalentemente a valere sul fondo ordinario per gli enti e le istituzioni di ricerca (FOE).

Al termine dell'anno 2024 la composizione del personale in servizio presso il CREF risultava la seguente.

Personale CREF al 31 dicembre 2024					
Profilo	Livello	Tempo indeterminato	Tempo determinato FOE	Tempo determinato fondi esterni	Totale
Dirigente di ricerca	I	2	1*		3
Primo ricercatore	II	5			5
Ricercatore	III	12			12
Dirigente tecnologo	I	1			1
Tecnologo	III	3			3
Direttore amministrativo	Dirigente II fascia		1		1
Funzionario di amministrazione	IV	1			1
	V	6			6
Collaboratore tecnico enti ricerca	V	1			1
	VI	1			1
Operatore tecnico enti ricerca	VII	1			1
Totale		33	2		35

*: Il Direttore scientifico è equiparato dal punto di vista economico ad un Dirigente di ricerca I livello.

a) Va segnalato che tra i ricercatori di III livello in servizio al 31 dicembre 2024, uno è stato reclutato (bando 7(20)) a valere sul finanziamento previsto dal decreto ministeriale MUR 29 ottobre 2020 n. 802, mediante concorso pubblico riservato a giovani di elevato livello scientifico. Tale posizione è stata finanziata in via straordinaria e deve essere considerata al di fuori della dotazione organica approvata con il piano triennale di attività, nonché esclusa dai limiti di cui all'art. 9 del decreto legislativo 25 novembre 2016, n. 218. La quota parte delle relative risorse appositamente assegnate a partire dal 2021, pari ad euro 88.361,00, non utilizzata per il reclutamento è rimasta nella disponibilità del CREF come assegnazione ordinaria dell'anno e dei successivi. Il suddetto decreto ministeriale fissava il termine del 30 novembre 2022 per l'attivazione dei relativi contratti e la presa di servizio.

b) Come nel caso precedente, il 1° novembre 2022 ha preso servizio il ricercatore III livello previsto dal bando 10(22). Tale posizione era riservata a giovani di elevato livello scientifico e tecnologico ed è stata finanziata a valere sulle risorse di cui al decreto ministeriale 29 ottobre 2020 n. 802 (per la quota di euro 88.361,00 non ancora utilizzata di cui al precedente punto 1a) e al decreto ministeriale 19 maggio 2021 n. 614 (per euro 24.456,00). Anche in questo caso tale posizione deve essere considerata al di fuori della dotazione organica approvata con il piano triennale di attività, ed il relativo costo risulta escluso dai limiti di cui all'art. 9 del decreto legislativo 25 novembre 2016, n. 218.

c) In data 1° dicembre 2022 l'organico CREF si è incrementato di un'unità grazie all'arrivo per mobilità dell'operatore tecnico VIII livello (progredito al 31 dicembre 2024 al VII livello) previsto dal bando 12(22). Si precisa che tale reclutamento è da intendersi obbligatorio secondo quanto disposto dalla legge 12 marzo 1999, n. 68 sul collocamento mirato. Tale posizione non incide sul limite alla sostenibilità ex art. 9, c. 2, del

decreto legislativo 25 novembre 2016, n. 218, non rilevando quindi in termini di punti organico. Per tale figura andranno comunque previste annualmente le risorse necessarie al pagamento degli emolumenti, attualmente stimati in euro 44.457,00 annui.

Calcolo del punto organico

Secondo quanto previsto dalla lettera c), sesto comma, del citato art. 9 del decreto legislativo 25 novembre 2016, n. 218 che introduce il concetto di punto organico nel comparto degli enti pubblici di ricerca, il Dipartimento della funzione pubblica, con nota 13 dicembre 2017, n. 72298-P, ha definito il costo medio annuo di riferimento per ciascuna qualifica di personale, esprimendola in relazione al costo del dirigente di ricerca.

Calcolo del punto organico art. 9, c. 6, lett. c), d.lgs. 218/2016 riferito al dirigente di ricerca		
Costo medio annuo	Accantonamento TFR annuo	Totale annuo
112.838,00 €	5.239,66 €	118.077,66 €

Di seguito la corrispondenza tra ciascun profilo-livello e la percentuale di costo medio relativo per il CREF.

Costi medi annui CREF				
nota DFP-0072298-P-13/12/2017 Dipartimento della funzione pubblica				
Livello	Qualifica	Percentuale	Punti organico	Costo annuo
II a	Dirigente amministrativo	125,28%	1,2528	147.927,69 €
I	Dirigente di ricerca	100,00%	1,0000	118.077,66 €
II	Primo ricercatore	71,01%	0,7101	83.846,95 €
III	Ricercatore	42,53%	0,4253	50.218,43 €
I	Dirigente tecnologo	100,37%	1,0037	118.514,55 €
II	Primo tecnologo	54,48%	0,5448	64.328,71 €
III	Tecnologo	34,41%	0,3441	40.630,52 €
IV		54,62%	0,5462	64.494,02 €
V		48,60%	0,4860	57.385,74 €
VI		38,52%	0,3852	45.483,51 €
VII		34,95%	0,3495	41.268,14 €
VIII		32,14%	0,3214	37.950,16 €

Verifica del limite di sostenibilità

La verifica della sostenibilità delle spese di personale presuppone il confronto tra le spese per personale dipendente (ricercatore, tecnologo, tecnico, amministrativo) e le entrate dell'ente nell'ultimo triennio.

Il triennio di riferimento dipende, concretamente, dalla tempistica con cui il piano viene adottato. Quest'anno il piano del fabbisogno viene adottato ad esercizio 2025 avviato. In questo caso si fa riferimento ai dati dell'ultimo bilancio disponibile, e cioè il 2024. Si noti che, a regime, il piano del fabbisogno dovrà essere approvato ancor prima, insieme al piano triennale delle attività cui fa riferimento, nel mese di dicembre dell'anno precedente.

I dati utilizzati sono ricavati dai rispettivi conti consuntivi. In ottica prudenziale, per quanto riguarda le entrate nei calcoli si è fatto riferimento esclusivamente a quelle derivanti dal fondo ordinario per gli enti e le istituzioni di ricerca (FOE).

Indicatore di sostenibilità 2024 (valori a consuntivo) art. 9, c. 2, decreto legislativo 25 novembre 2016, n. 218			
	2022	2023	2024
Entrate complessive dell'ente (\approx FOE)	2.604.985,00 €	3.624.862,00 €	3.678.503 €
Media entrate nel triennio 2022-2024 (E)	3.302.783,33 €		
Spese personale 2024 non da finanziamenti esterni (S)	1.927.303,23 €		
Rapporto spese personale 2024/media entrate ($R=S/E$)	58,35%		

Ai sensi del quarto comma dell'articolo 9 del decreto legislativo 25 novembre 2016, n. 218 il calcolo delle spese complessive del personale è dato dalla somma algebrica delle spese di competenza dell'anno di riferimento, comprensive degli oneri a carico dell'Amministrazione, al netto delle spese sostenute per personale con contratto a tempo determinato la cui copertura sia stata assicurata da finanziamenti esterni di soggetti pubblici o privati.

Dal calcolo precedente risulta che il CREF negli esercizi precedenti ha tenuto un comportamento prudentiale in quanto il rapporto tra le spese di personale sostenute del 2024 e la media delle entrate complessive dell'ultimo triennio, come risultanti dai relativi conti consuntivi, è inferiore all'80%, e più precisamente pari a circa il 58%.

Di conseguenza il CREF può procedere a nuove assunzioni, fino ad arrivare un organico teorico complessivo equivalente a 22,377 punti organico, come di seguito determinati.

Punti organico utilizzabili (limite 80% S/E)	
Media entrate nel triennio 2022-2024 (E)	3.302.783,33 €
Limite di spesa per personale ($L=80\% E$)	2.642.226,67 €
Valore del punto organico \approx dirigente ricerca (P)	118.077,66 €
Punti organico totali a disposizione Ente ($T=L/P$)	22,377

Trattandosi di valori medi forniti dal Dipartimento della funzione pubblica, gli importi così calcolati hanno valore solo ai fini della determinazione del limite al reclutamento. I valori che saranno effettivamente inseriti nella contabilità del CREF (bilancio di previsione, conto consuntivo) rispecchieranno invece i reali costi associati alle singole posizioni.

Formulazione ipotesi organico 2025-2027

Per il periodo 2025-2027, al momento non sono attualmente previste cessazioni relative a posizioni a tempo indeterminato o determinato.

Per quanto riguarda l'ambito della ricerca è richiesta una nuova posizione da ricercatore III livello a tempo determinato di durata triennale da attivarsi entro l'anno 2025 da dedicare specificamente alle attività della linea di ricerca Neuroscienze e neuroimaging quantitativo (per maggiori dettagli si rinvia alla sezione scientifica del Piano triennale delle attività).

Allo stato attuale il CREF non prevede di effettuare, oltre a quanto già descritto, ulteriore reclutamento nel triennio 2025-2027. Quanto fino a qui descritto è sintetizzato nelle seguenti tabelle.

2025														
Profilo	Livello	Punti organico	Costo medio	Tempo indeterminato				Tempo determinato FOE				Organico totale @31/12	Organico soggetto ai limiti	Punti organico 2025
				al 01/01	nuovi	cessati	al 31/12	al 01/01	nuovi	cessati	al 31/12			
Dirigente amministrativo	2F	1,253	147.927,69 €	0			0	1			1	1	1	1,253
Dirigente di ricerca	I	1,000	118.077,66 €	2			2	1			1	3	3	3,000
Primo ricercatore	II	0,710	83.846,95 €	5			5				5	5	5	3,551
Ricercatore	III	0,425	50.218,43 €	12			12		1		1	13	11	4,678
Dirigente tecnologo	I	1,004	118.514,55 €	1			1				1	1	1	1,004
Primo tecnologo	II	0,545	64.328,71 €	0			0				0	0	0	0,000
Tecnologo	III	0,344	40.630,52 €	3			3				3	3	3	1,032
Collaboratore tecnico ER	IV	0,546	64.494,02 €	0			0				0	0	0	0,000
	V	0,486	57.385,74 €	1			1				1	1	1	0,486
	VI	0,385	45.483,51 €	1			1				1	1	1	0,385
Operatore tecnico	VI	0,385	45.483,51 €	0			0				0	0	0	0,000
	VII	0,350	41.268,14 €	1			1				1	0	0	0,000
	VIII	0,321	37.950,16 €	0			0				0	0	0	0,000
Funzionario di amministrazione	IV	0,546	64.494,02 €	1			1				1	1	1	0,546
	V	0,486	57.385,74 €	6			6				6	6	6	2,916
Collaboratore di amministrazione	V	0,486	57.385,74 €	0			0				0	0	0	0,000
	VI	0,385	45.483,51 €	0			0				0	0	0	0,000
	VII	0,350	41.268,14 €	0			0				0	0	0	0,000
Operatore di amministrazione	VII	0,350	41.268,14 €	0			0				0	0	0	0,000
	VIII	0,321	37.950,16 €	0			0				0	0	0	0,000
Totale				33	0	0	33	2	1	0	3	36	33	18,8510

2026														
Profilo	Livello	Punti organico	Costo medio	Tempo indeterminato				Tempo determinato FOE				Organico totale @31/12	Organico soggetto ai limiti	Punti organico 2026
				al 01/01	nuovi	cessati	al 31/12	al 01/01	nuovi	cessati	al 31/12			
Dirigente amministrativo	2F	1,253	147.927,69 €	0			0	1			1	1	1	1,253
Dirigente di ricerca	I	1,000	118.077,66 €	2			2	1			1	3	3	3,000
Primo ricercatore	II	0,710	83.846,95 €	5			5	0			5	5	5	3,551
Ricercatore	III	0,425	50.218,43 €	12			12	1			1	13	11	4,678
Dirigente tecnologo	I	1,004	118.514,55 €	1			1	0			0	1	1	1,004
Primo tecnologo	II	0,545	64.328,71 €	0			0	0			0	0	0	0,000
Tecnologo	III	0,344	40.630,52 €	3			3	0			3	3	3	1,032
Collaboratore tecnico ER	IV	0,546	64.494,02 €	0			0	0			0	0	0	0,000
	V	0,486	57.385,74 €	1			1	0			1	1	1	0,486
	VI	0,385	45.483,51 €	1			1	0			1	1	1	0,385
Operatore tecnico	VI	0,385	45.483,51 €	0			0	0			0	0	0	0,000
	VII	0,350	41.268,14 €	1			1	0			1	0	0	0,000
	VIII	0,321	37.950,16 €	0			0	0			0	0	0	0,000
Funzionario di amministrazione	IV	0,546	64.494,02 €	1			1	0			1	1	1	0,546
	V	0,486	57.385,74 €	6			6	0			6	6	6	2,916
Collaboratore di amministrazione	V	0,486	57.385,74 €	0			0	0			0	0	0	0,000
	VI	0,385	45.483,51 €	0			0	0			0	0	0	0,000
	VII	0,350	41.268,14 €	0			0	0			0	0	0	0,000
Operatore di amministrazione	VII	0,350	41.268,14 €	0			0	0			0	0	0	0,000
	VIII	0,321	37.950,16 €	0			0	0			0	0	0	0,000
Totale				33	0	0	33	3	0	0	3	36	33	18,851

2027														
Profilo	Livello	Punti organico	Costo medio	Tempo indeterminato				Tempo determinato FOE				Organico totale @31/12	Organico soggetto ai limiti	Punti organico 2027
				al 01/01	nuovi	cessati	al 31/12	al 01/01	nuovi	cessati	al 31/12			
Dirigente amministrativo	2F	1,253	147.927,69 €	0			0	1			1	1	1	1,253
Dirigente di ricerca	I	1,000	118.077,66 €	2			2	1			1	3	3	3,000
Primo ricercatore	II	0,710	83.846,95 €	5			5	0			5	5	5	3,551
Ricercatore	III	0,425	50.218,43 €	12			12	1			1	13	11	4,678
Dirigente tecnologo	I	1,004	118.514,55 €	1			1	0			0	1	1	1,004
Primo tecnologo	II	0,545	64.328,71 €	0			0	0			0	0	0	0,000
Tecnologo	III	0,344	40.630,52 €	3			3	0			3	3	3	1,032
Collaboratore tecnico ER	IV	0,546	64.494,02 €	0			0	0			0	0	0	0,000
	V	0,486	57.385,74 €	1			1	0			1	1	1	0,486
	VI	0,385	45.483,51 €	1			1	0			1	1	1	0,385
Operatore tecnico	VI	0,385	45.483,51 €	0			0	0			0	0	0	0,000
	VII	0,350	41.268,14 €	1			1	0			1	0	0	0,000
	VIII	0,321	37.950,16 €	0			0	0			0	0	0	0,000
Funzionario di amministrazione	IV	0,546	64.494,02 €	1			1	0			1	1	1	0,546
	V	0,486	57.385,74 €	6			6	0			6	6	6	2,916
Collaboratore di amministrazione	V	0,486	57.385,74 €	0			0	0			0	0	0	0,000
	VI	0,385	45.483,51 €	0			0	0			0	0	0	0,000
	VII	0,350	41.268,14 €	0			0	0			0	0	0	0,000
Operatore di amministrazione	VII	0,350	41.268,14 €	0			0	0			0	0	0	0,000
	VIII	0,321	37.950,16 €	0			0	0			0	0	0	0,000
Totale				33	0	0	33	3	0	0	3	36	33	18,851

Note:

1. L'incarico del Direttore scientifico è equiparato ad un Dirigente di ricerca I livello a tempo determinato.
2. Le posizioni dei ricercatori III livello di cui ai bandi 7(20) e 10(22) e l'operatore tecnico VII livello non incidono sul limite di cui all'art. 9, c. 2, del decreto legislativo 25 novembre 2016, n. 218.

Verifica della compatibilità dell'ipotesi con il limite di sostenibilità

L'ipotesi di evoluzione dell'organico del CREF nel triennio 2025-2027 deve quindi essere confrontata con il limite di sostenibilità calcolato ai sensi dell'art. 9, c. 2, del decreto legislativo 25 novembre 2016, n. 218.

Anno	Punti organico massimi	Costo teorico massimo	Punti organico utilizzati	Costo effettivo
2025	22,3770	2.642.226,67 €	18,8510	2.225.881,97 €
2026			18,8510	2.225.881,97 €
2027			18,8510	2.225.881,97 €

La verifica dimostra la compatibilità dell'ipotesi formulata con il limite stabilito dalla legge.

Copertura finanziaria

Nel bilancio preventivo per l'esercizio 2025 è stata data la necessaria copertura ai costi effettivi del personale previsto negli ultimi documenti di programmazione approvati nell'anno 2024.

Sembra opportuno ricordare che i costi del personale indicati nella presente programmazione sono calcolati, in ossequio alla norma, con il costo medio derivante dal cd. "punto organico". Tali costi sono generalmente di molto superiori al costo effettivo del personale che, essendo reclutato nella posizione iniziale del profilo/livello, di norma percepirà una retribuzione relativa alle fasce stipendiali più basse.

Si segnala infine che, rispetto al Piano di fabbisogno di personale 2024-2027, sul quale è stato costruito il bilancio unico 2025, il saldo netto dell'organico effettivo per gli anni 2025 e 2026 è ridotto di due unità, con conseguenti risparmi rispetto a quanto preventivato e per il quale era stata già verificata, in sede di approvazione del bilancio 2025, la sostenibilità finanziaria.

Rispetto delle norme sul turn over di cui alla legge 30 dicembre 2024, n. 207

In questa sezione si fa riferimento a quanto previsto dalla legge 30 dicembre 2024, n. 207, recante "Bilancio di previsione dello Stato per l'anno finanziario 2025 e bilancio pluriennale per il triennio 2025-2027", in particolare ai commi da 823 a 834, nonché alla circolare MEF-RGS n. 8 prot. 77139 del 7 aprile 2025 ad oggetto "Indicazioni operative in merito alla riduzione del turn over per l'anno 2025 prevista dall'articolo 1, commi 822-830, della legge 30 dicembre 2024, n. 207, recante "Bilancio di previsione dello Stato per l'anno finanziario 2025 e bilancio pluriennale per il triennio 2025-2027"".

In particolare, relativamente a quanto richiesto al punto 3.2 della richiamata circolare si rappresenta che:

- il CREF nel 2026 potrebbe procedere ad assunzioni di personale a tempo indeterminato nei limiti della spesa determinata sulla base dell'ordinamento vigente, secondo quanto sopra specificato, ridotta di un importo pari al 25 per cento di quella relativa al personale di ruolo cessato nel 2025, da computarsi in ragione d'anno, vale a dire a prescindere dalla data di cessazione dal servizio del medesimo personale, ma attualmente (cfr. sezione 4 del presente piano) non sono previste cessazioni nel corso del 2025, né assunzioni a tempo indeterminato nel 2026;
- di conseguenza la riduzione della capacità assunzionale prevista per l'anno 2026 è prevista pari a zero;
- i risparmi di spesa derivanti dalle cessazioni dal servizio del personale di ruolo intervenute nel corso dell'annualità 2025 sono previsti pari a zero;
- la determinazione della consistenza dell'organico è stata effettuata (cfr. sezioni precedenti) assicurando la soppressione di un numero di posti (nello specifico pari a zero) il cui valore finanziario sia non inferiore all'entità della prevista riduzione del turn over del 25 per cento;
- le somme da versare all'erario, nonché per l'eventuale quota da far confluire, ai sensi del comma 832, nei fondi per il trattamento economico accessorio sono pari a zero.

MONITORAGGIO E AUTOVALUTAZIONE

Descrizione dei meccanismi per il monitoraggio interno dell'avanzamento delle attività e dei progetti

Il CREF adotta un sistema strutturato di monitoraggio interno, organizzato su base annuale, per garantire il corretto avanzamento delle attività e dei progetti. Il processo di autovalutazione è strutturato in quattro aree: qualità della produzione scientifica, capacità di attrarre finanziamenti competitivi, sviluppo del capitale umano e contributo alla società. Il Direttore Scientifico conduce audit interni periodici, per verificare lo stato di avanzamento delle ricerche, valutare la qualità scientifica dei risultati e identificare eventuali criticità, proponendo azioni correttive quando necessario.

Parallelamente, vengono organizzati seminari in cui le varie linee espongono i propri risultati recenti, per favorire il confronto costante, condividere aggiornamenti sui progressi e discutere eventuali difficoltà. Questi incontri rappresentano un momento fondamentale per garantire il coordinamento tra i diversi team e ottimizzare le risorse disponibili.

Su base annuale, viene effettuata una verifica complessiva degli obiettivi, analizzando i risultati ottenuti rispetto alle milestone prefissate, anche in base al report del Comitato Interno di Valutazione. Questa valutazione consente di misurare il livello di avanzamento dei progetti, individuare eventuali scostamenti rispetto alla pianificazione iniziale e definire strategie di miglioramento per l'anno successivo.

Autovalutazione dell'impatto delle attività di ricerca a livello scientifico, economico e sociale

Il CREF promuove linee di ricerca originali e di grande impatto, improntate ai metodi della fisica, ma con un forte carattere interdisciplinare e in relazione con i principali problemi della moderna società della conoscenza. Le attività di ricerca includono aree a forte impatto scientifico e culturale (complessità per le scienze naturali e lo sviluppo economico, fisica applicata alla medicina ed a i beni culturali, intelligenza artificiale, tecnologie fotoniche, sostenibilità, astrofisica, meccanica quantistica, storia della fisica), la gran parte delle quali hanno anche un intrinseco impatto in una società che invecchia progressivamente e che deve affrontare sfide importanti nello sviluppo sostenibile e nell'ottimizzazione di nuove tecnologie e conoscenze. D'altro canto, le attività museali sono completamente dedicate a finalità di promozione della cultura scientifica e di disseminazione destinate a una popolazione che include molti giovani delle scuole secondarie superiori, per i quali la visita al museo è non solo un'occasione di approfondimento culturale, ma anche uno strumento di orientamento pre-universitario. Infine, il progetto EEE costituisce un ibrido che persegue simultaneamente finalità scientifiche e divulgative. Il dettaglio dell'impatto scientifico di ciascuna linea di ricerca è riportato nel capitolo "Attività scientifica e progettuale".

L'impatto sociale delle attività del CREF è amplificato dalle attività di supporto all'alta formazione e di public engagement, dettagliate nel capitolo "Attività di terza missione/impatto sociale".

A livello di ente, dal 2020 al 2024 sono stati pubblicati oltre 600 articoli su rivista indicizzata, oltre a un numero rilevante di altri contributi editoriali. Gli articoli hanno complessivamente attratto circa 20000 citazioni dal 2020 al 2025, per una media di oltre 32 citazioni per articolo.

La progettualità espressa dai ricercatori del CREF continua ad attrarre fondi esterni, i progetti in corso totalizzano un budget di circa 1.6 milioni di euro.

L'impatto economico indiretto delle attività di ricerca sviluppate dal CREF non è facilmente stimabile, ma una fiorente attività in conto terzi (capitolo "Servizi conto-terzi: indicazione ricavi ottenuti e personale impegnato") è fortemente suggestiva di un valore economico intrinseco delle competenze di cui il CREF dispone.