



PIANO  
**TRIENNALE**  
DELLE ATTIVITÀ  
2026-2028

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



Approvato con delibera del C.d.A. n. 17/2026 del 26/03/2026

## INDICE

<b>INDICE</b> .....	2
<b>EXECUTIVE SUMMARY</b> .....	5
<b>DESCRIZIONE DELL'ENTE</b> .....	10
<b>MISSIONE e STRATEGIE di SVILUPPO</b> .....	11
<b>ADERENZA verso il PNR 2021-2027</b> .....	12
<b>POSIZIONAMENTO dell'ENTE</b> .....	12
<i>Affinità con altri Enti mono- o multi-tematici</i> .....	12
<i>Produzione scientifica e suo andamento negli ultimi tre anni</i> .....	13
<b>COLLABORAZIONI NAZIONALI E INTERNAZIONALI</b> .....	20
<i>Accordi quadro e convenzioni</i> .....	20
<i>Collaborazioni nazionali</i> .....	21
<i>Collaborazioni internazionali</i> .....	22
<b>PERSONALE RICERCATORE, TECNOLOGO, TECNICO, AMMINISTRATIVO</b> .....	24
<b>INFRASTRUTTURE, LABORATORI di RICERCA, STRUMENTAZIONE</b> .....	25
1) <i>Laboratorio Beni Culturali</i> .....	25
2) <i>Laboratorio di Fotonica Computazionale</i> .....	26
3) <i>Laboratorio Extreme Energy Events</i> .....	27
4) <i>Laboratorio Neuroimmagini</i> .....	28
5) <i>Laboratorio Radio e Adro Terapia</i> .....	29
6) <i>Laboratorio Sorgenti</i> .....	30
<b>ATTIVITÀ SCIENTIFICA E PROGETTUALE</b> .....	31
<b>A Breve descrizione delle principali linee di ricerca e delle loro finalità</b> .....	31
<i>A.1 Complessità</i> .....	31
<i>A.2 Fisica Applicata</i> .....	32
<i>A.3 Fisica Fondamentale</i> .....	33
<i>A.4 Museo Enrico Fermi</i> .....	34
<b>B. Risultati ottenuti e obiettivi futuri</b> .....	35
<i>B.1. Complessità</i> .....	35
<i>B.2 Fisica Applicata</i> .....	37
<i>B.3. Fisica fondamentale</i> .....	40
<i>B.4. Museo Enrico Fermi</i> .....	42
<b>C. - Elenco dei principali progetti di ricerca previsti per il triennio, con breve descrizione degli obiettivi e dei risultati attesi</b> .....	44
<i>C.1 Fisica Statistica e Sistemi Complessi nelle Scienze Naturali</i> .....	44

C.2. Complessità per lo sviluppo economico e tecnologico.....	49
C.3 L'impatto dell'intelligenza artificiale sul tessuto socioeconomico e l'innovazione tecnologica .....	51
C.4 Innovazione e Scenari Predittivi per la Sostenibilità.....	53
C.5 Neuroscienze e neuroimaging quantitativo (NQN).....	56
C.6 Radio e Adro Terapia.....	59
C.7 Fisica per i Beni Culturali.....	62
C.8 Fisica Nucleare per l'Energia, l'Ambiente e la Radioprotezione.....	65
C.9 Tecnologie fotoniche e Intelligenza Artificiale .....	68
C.10 Progetto Extreme Energy Events.....	71
C.11 Cinematica e dinamica delle galassie.....	74
C.12 Nuclear Astrophysics with innovative sources .....	78
C.13 Problemi Aperti in Meccanica Quantistica.....	79
C.14 Il Regio Istituto di Fisica a via Panisperna tra storia e ricerca. Protagonisti, metodi, scoperte, strumenti scientifici.....	82
C.15 Sulle orme dei Ragazzi di via Panisperna:.....	84
C.16 La Comunicazione del CREF e del Museo Enrico Fermi .....	88
<b>D. Tabelle riassuntive: i) budget; ii) fonti di finanziamento; iii) ricercatori coinvolti (%). .....</b>	<b>96</b>
i) Budget dedicato alla ricerca e al museo.....	96
ii) Progetti in corso e fonti di finanziamento .....	97
iii) Grafici ricercatori coinvolti (%). .....	98
<b>ATTIVITÀ DI TERZA MISSIONE / IMPATTO SOCIALE .....</b>	<b>99</b>
Azioni di supporto all'alta formazione .....	99
Attività di public engagement.....	102
Indicazione del budget e del personale (%) coinvolto nelle varie attività.....	103
Servizi conto-terzi: indicazione ricavi ottenuti e personale impegnato (%) .....	103
Partecipazioni a spin-off, società e fondazioni .....	103
Brevetti depositati: titolo, anno pubblicazione, entrate, etc.....	104
Eventi Terza Missione.....	104
Eventi Istituzionali.....	107
<b>AZIONI PER GENDER EQUALITY.....</b>	<b>108</b>
Gender Equality Plan (GEP).....	108
Il gruppo di lavoro del CREF .....	109
Analisi del contesto e situazione di genere.....	109
Formazione.....	109
Integrazione della dimensione di genere nel Public Engagement .....	109
Obiettivi a breve termine.....	110
Budget .....	110

<b>RISORSE.....</b>	<b>111</b>
<i>Ricavi e proventi per l'attività istituzionale.....</i>	<i>111</i>
<i>Principali voci del bilancio preventivo CREF 2026-2028 .....</i>	<i>112</i>
<b>FABBISOGNO DI PERSONALE E DOTAZIONE ORGANICA .....</b>	<b>116</b>
<i>Indicatore di sostenibilità, punti organico.....</i>	<i>116</i>
<i>Piano di reclutamento nel triennio, con Tabella riassuntiva: nuove assunzioni e passaggi interni.....</i>	<i>117</i>
<i>Pianificazione di borse (di studio, dottorato), assegni di ricerca .....</i>	<i>124</i>
<b>MONITORAGGIO E AUTOVALUTAZIONE.....</b>	<b>125</b>
<i>Descrizione dei meccanismi per il monitoraggio interno dell'avanzamento delle attività e dei progetti .....</i>	<i>125</i>
<i>Autovalutazione dell'impatto delle attività di ricerca a livello scientifico, economico e sociale .....</i>	<i>125</i>

## EXECUTIVE SUMMARY

---

Il **Museo storico della fisica e Centro studi e ricerche Enrico Fermi** (CREF) ha sede nella **palazzina di via Panisperna** è stata sede dello 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. Sulle solide fondamenta costituite dalla scuola e dalla tradizione di Enrico Fermi e dei suoi discepoli, sul loro metodo di lavoro e sulla loro etica della ricerca, è cresciuta la fisica italiana nel secondo dopoguerra, continuando a produrre eccellenza fino ai giorni nostri. 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.

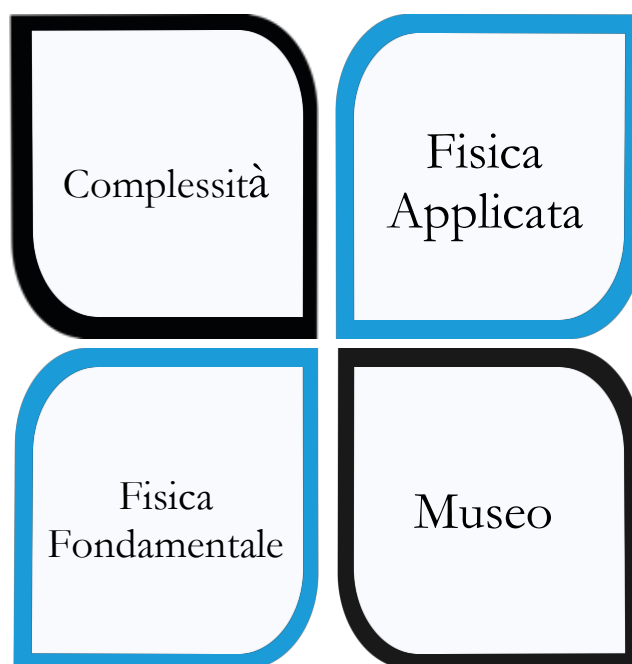
Il parziale restauro della palazzina di via Panisperna, concluso nel novembre 2019, ha reso questo luogo il centro strategico dello sviluppo dell'Ente.

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 straordinaria **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**, numerosi progetti delocalizzati presso centri e laboratori di ricerca nazionali e internazionali. Le attività legate al Museo e alla diffusione della cultura scientifica sono state condotte, in quella fase, presso diversi luoghi espositivi e numerosi istituti scolastici. Dal 2019, con la consegna della palazzina, solo in parte restaurata, si sono realizzate le condizioni per perseguire gli obiettivi prioritari dell'Ente: sfruttare le potenzialità di un contesto storico e affascinante per 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 nazionale e internazionale attraverso un'attività di ricerca originale su diverse tematiche della fisica, tutte di avanguardia e 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 **tematiche di ricerca** strategiche ad alto impatto scientifico che sono organizzate in **quattro linee principali**.

**Le quattro linee di ricerca**, così articolate: **Complessità - Fisica Applicata - Fisica Fondamentale - Museo**, nell'ambito delle quali possono essere raggruppate 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 2026-2028 ripropone le quattro tematiche principali nelle quali il Centro Fermi sta esprimendo 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.



In questi anni stiamo potenziando queste attività con l'obiettivo di rendere sempre più competitive le diverse linee di ricerca.

Un **obiettivo** confermato anche in questo piano triennale e sul quale si concentrano particolarmente gli sforzi del CREF, è la realizzazione, già avviata e da completarsi nei tempi più brevi, del **restauro** di alcuni locali della Palazzina di Via Panisperna, in parte ancora allo stato grezzo, per dedicare nuovi locali e laboratori al **potenziamento delle attività di ricerca dell'Ente**.

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

L'approccio scientifico tradizionale, ricco di risultati che hanno arricchito enormemente la nostra conoscenza dell'universo, dei sistemi biologici e sociali e portato a innovazioni tecnologiche impressionanti, sembra tuttavia non rappresentare uno strumento efficace per descrivere e spiegare le **complessità** di alcuni sistemi. I grandi sconvolgimenti sociali a cui si assiste su scala locale e globale 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: **Fisica Statistica e Sistemi Complessi nelle Scienze Naturali, Complessità per lo sviluppo economico e tecnologico, 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 alle applicazioni della fisica nucleare al settore energetico, all'ambiente. 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** ai quali si aggiunge, a partire da quest'anno, il settore della **Fisica Nucleare per l'Energia, l'Ambiente e la Radioprotezione**.

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, nella stima della **dose di radiazione** rilasciata al paziente per la cura dei tumori. La linea di ricerca su **Neuroscienze e Neuroimaging Quantitativo** unisce l'aspetto dello sviluppo tecnologico, in questo caso focalizzato su **nuove tecniche MRI** (Imaging da 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.

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)**.

Il progetto **Fisica Nucleare per l'Energia, l'Ambiente e la Radioprotezione** propone un approccio sinergico dove le metodologie della fisica nucleare si declinano in soluzioni tecnologiche per la sicurezza e la sostenibilità. Le attività di ricerca, che prevedono l'allestimento di un nuovo laboratorio Sorgenti all'interno dei locali della palazzina di via Panisperna, hanno l'obiettivo di definire **nuovi protocolli nel settore energetico**, nella **dosimetria d'avanguardia** e nel settore ambientale. Tale finalità si integra con le attività sperimentali di calibrazione di sensori innovativi e con la caratterizzazione isotopica dei materiali, offrendo strumenti essenziali con impatto su altri settori di interesse quali la fisica dei raggi cosmici, fisica per i beni culturali e la fisica medica.

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. Parte della ricerca è dedicata anche allo studio della possibile influenza dei raggi sul clima, della possibile relazione tra flusso di raggi cosmici e copertura nuvolosa e temperatura. 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 accomunati 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 2025 oltre 5.800 visitatori** con un incremento di oltre il 25% rispetto al 2024. Di questi, oltre il 70% 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. Uno degli obiettivi del Museo è **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** consolida la strategia già annunciata nel precedente piano triennale e continua **l'azione di potenziamento delle attività in corso** 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 640.656,66 € la raccolta complessiva degli ultimi due anni. Sono ancora in corso le acquisizioni di fondi richiesti al Ministero rivolte al potenziamento infrastrutturale, 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 **24 unità di personale ricercatore e tecnologo**, circa **100 associati alle ricerche**, **11 dottorandi** finanziati dal CREF, e 24 tra **assegnisti/incarichi di ricerca, borsisti e altri collaboratori**.

La **produzione scientifica** dell'Ente è estremamente ricca e variegata e conta oltre 200 pubblicazioni, su riviste indicizzate o su volume, nel triennio 2023-2025 e nel I trimestre 2026, con una regolare crescita nel corso degli anni e con oltre 10.000 citazioni. Nell'ultimo anno è stato prodotto un brevetto. 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 proseguire in questo percorso.

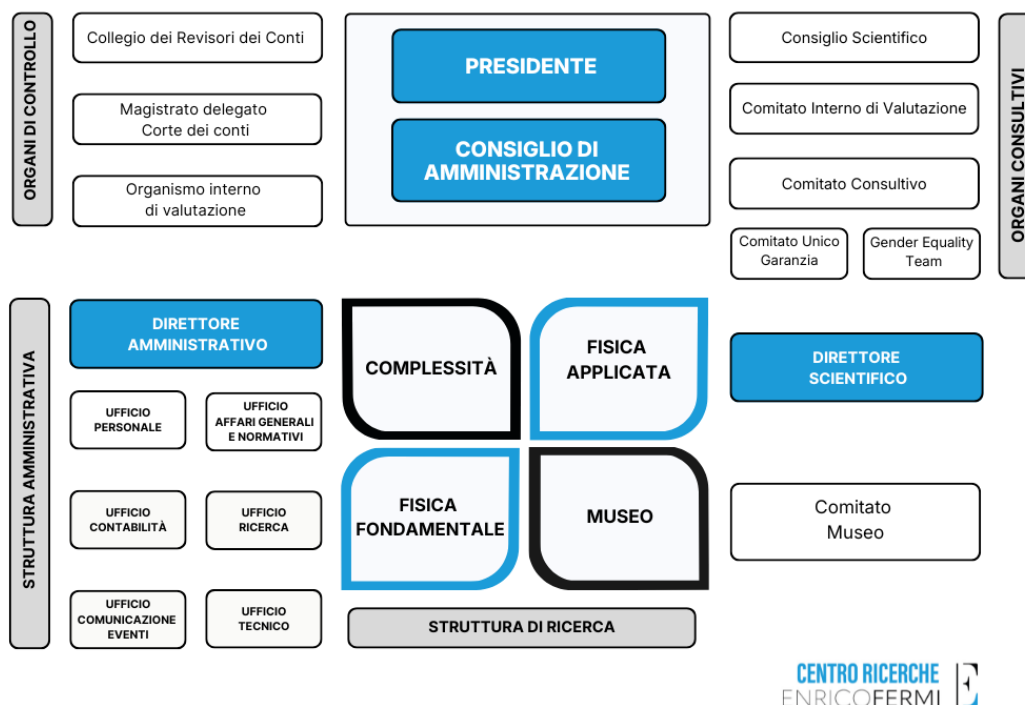
## DESCRIZIONE DELL'ENTE

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, favorendo, allo stesso tempo, 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.

Le sue attività riguardano quattro principali 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 disponibile nei laboratori del CREF o 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. Nel corso delle riunioni vengono presentate tutte le Attività dell'Ente. Nella presentazione delle attività sono coinvolti anche i giovani ricercatori. Il Consiglio Scientifico e il Comitato Interno di Valutazione redigono in forma scritta pareri e suggerimenti sulle varie attività svolte dall'Ente.

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 uguali 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 i 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 in base ai 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 plasm, 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. Infine, di recente avvio presso il CREF, un progetto dedicato alle applicazioni della Fisica Nucleare per l'Energia, l'Ambiente e la Radioprotezione, che propone un approccio sinergico dove le metodologie della fisica nucleare si declinano in soluzioni tecnologiche per la sicurezza e la sostenibilità.

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, promuovendo l'acquisizione di fondi aggiuntivi, e potenzierà gli sforzi presso il pubblico e le comunità studentesche, scolastiche e accademiche, per attrarre sempre più visitatori presso una realtà in costante rinnovamento. 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, si conferma 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. Il recente avvio delle attività sulle applicazioni della Fisica Nucleare all'Energia, l'Ambiente e la Radioprotezione si inserisce nel solco indicato dal PNR 2021-2027, in particolare negli ambiti Salute, Energia e Sostenibilità.

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 ed 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. Dal momento in cui la sede si è resa disponibile, sono stati attrezzati i laboratori di ricerca ed è stato allestito il Museo con una esposizione

permanente. Queste strutture sono cresciute costantemente nel tempo e costituiscono oggi un patrimonio di infrastrutture che continua a far progredire in intensità e prestigio il complesso le attività promosse negli anni dal Museo storico della fisica e Centro Studi e ricerche Enrico Fermi definendo le sue strategie di ricerca, sempre all'insegna dell'interdisciplinarietà e dell'eredità scientifica di Enrico Fermi e incrementando, allo stesso tempo, la raccolta di materiale, reperti, testimonianze e allestimenti, rivolte ad arricchire la dotazione del Museo che riscuote ogni anno sempre più interesse da parte dei numerosi visitatori.

### **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

#### **2023**

- Aaron, E. et al. Measurement of isotopic separation of argon with the prototype of the cryogenic distillation plant Aria for dark matter searches. *The European Physical Journal. C, Particles And Fields* (2023). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-11430-0>
- Abbene, L. et al. Potentialities of CdZnTe Quasi-Hemispherical Detectors for Hard X-ray Spectroscopy of Kaonic Atoms at the DAΦNE Collider. *SENSORS* (2023). <https://doi.org/10.3390/s23177328>
- Abrescia, M. et al. The ecological transition of the extreme energy events experiment. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors And Associated Equipment* (2023). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168431> EA JUL 2023
- Abrescia, M. et al. Measurement of the cosmic charged particle rate at sea level in the latitude range  $35^\circ \div 82^\circ$  N with the PolarquEEEst experiment. *The European Physical Journal. C, Particles and Fields* (2023). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-11353-w>
- Aad, G. et al. Search for dark matter produced in association with a Higgs boson decaying to tau leptons at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector. *Journal of High Energy Physics* (2023). [https://doi.org/10.1007/jhep09\(2023\)189](https://doi.org/10.1007/jhep09(2023)189)
- Agnes, P. et al. Sensitivity projections for a dual-phase argon TPC optimized for light dark matter searches through the ionization channel. *PHYSICAL REVIEW D* (2023). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.107.112006>
- Agodi, C. et al. Nuclear physics midterm plan at LNS. *The European Physical Journal Plus* (2023). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-04358-7>
- Albora, G., Pietronero, L., Tacchella, A., Zaccaria, A. Product progression: a machine learning approach to forecasting industrial upgrading. *Scientific Reports* (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28179-x>
- Bossini, E. et al. Studies on new Eco-gas mixtures for Extreme Energy Events Project. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (2023). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167754> EA NOV 2022
- Bruno, M. et al. Inferring comparative advantage via entropy maximization. *Journal of Physics. Complexity* (2023). <https://doi.org/10.1088/2632-072x/ad1411>
- Carnesecchi, E. et al. Measurements of the Cherenkov effect in direct detection of charged particles with SiPMs. *The European Physical Journal Plus* (2023). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-04397-0>
- Carnesecchi, F. et al. Understanding the direct detection of charged particles with SiPMs. *The European Physical Journal Plus* (2023). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-03923-4>
- Cartechini, G. et al. Loading the tumor with  $^{31}\text{P}$ ,  $^{63}\text{Cu}$  and  $^{89}\text{Y}$  provides an in vivo prompt gamma-based range verification for therapeutic protons. *Frontiers in Physics* (2023). <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1071981>
- Cetrulo et al. Non-Voting Party and Wage Inequalities: Long-Term Evidence from Italy. *Intereconomics* (2023).
- Colamarino, E. et al. DiSCIoSer: unlocking recovery potential of arm sensorimotor functions after spinal cord injury by promoting activity-dependent brain plasticity by means of brain-computer interface technology: a randomized controlled trial to test efficacy. *BMC Neurology* (2023). <https://doi.org/10.1186/s12883-023-03442-w>
- Costa, S. et al. From organizational capabilities to corporate performances: at the roots of productivity slowdown. *Industrial and Corporate Change* (2023). <https://doi.org/10.1093/icc/dtad030>
- Dainelli, R., Saracco, F. Bibliometric and Social Network Analysis on the Use of Satellite Imagery in Agriculture: An Entropy-Based Approach. *AGRONOMY* (2023). <https://doi.org/10.3390/agronomy13020576>
- Daniele, R. et al. TOPS fast timing plastic scintillators: Time and light output performances. *Nuclear Instruments & Methods In Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors And Associated Equipment* (2023). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168277>
- Di Bartolomeo, G. et al. Linear-friction many-body equation for dissipative spontaneous wave-function collapse. *Physical Review A* (2023). <https://doi.org/10.1103/physreva.108.012202>
- Elersich, A. et al. Study of cosmogenic activation above ground for the DarkSide-20k experiment. *Astroparticle Physics* (2023). <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2023.102878> EA JUL 2023
- Festa, G. et al. In-Situ Anaerobic Heating of Human Bones Probed by Neutron Diffraction. *Analytical Chemistry* (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.2c04721>

- Festa, G., Maria Stella, M., Lorenzo, T., Scatigno, C. Ancient handwriting attribution via spectroscopic benchmarks and machine learning: ‘Clavis Prophetarum’ by Antonio Viera. *Expert Systems With Applications* (2023).
- Franciosini, G. et al. GPU-accelerated Monte Carlo simulation of electron and photon interactions for radiotherapy applications. *PHYSICS IN MEDICINE & BIOLOGY* (2023). <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aca1f2>
- Grazzi, S. et al. A cosmic muon test facility with the MRPC telescopes of the EEE Project. *Nuclear Instruments & Methods In Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors And Associated Equipment* (2023). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167612>
- Guidi, M. et al. Towards high-resolution quantitative assessment of vascular dysfunction. *Frontiers in Physics* (2023). <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1248021>
- Guidi, M., Dinuzzo, M., Giove, F. Invecchiamento cerebrale – Valutazione mediante neuroimmagini MR. *La Neurologia Italiana*.
- Labini, F. S., Chrobáková, Ž., Capuzzo-Dolcetta, R., López-Corredoira, M. Mass Models of the Milky Way and Estimation of Its Mass from the Gaia DR3 Data Set. *The Astrophysical Journal* (2023). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/acb92c>
- Maugeri, L. et al. Lesion Extension and Neuronal Loss after Spinal Cord Injury Using X-Ray Phase-Contrast Tomography in Mice. *Journal of Neurotrauma* (2023). <https://doi.org/10.1089/neu.2021.0451>
- Miliucci, M. et al. Topological charge-sharing background reduction for the Silicon Drift Detectors used by the VIP experiment at LNGS. *Applied Radiation and Isotopes* (2023). <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110822>
- Muscato, A. et al. Treatment planning of intracranial lesions with VHEE: comparing conventional and FLASH irradiation potential with state-of-the-art photon and proton radiotherapy. *Frontiers in Physics* (2023). <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1185598>
- Napolitano, F. et al. Underground Tests of Quantum Mechanics by the VIP Collaboration at Gran Sasso. *Symmetry* (2023). <https://doi.org/10.3390/sym15020480>
- Napolitano, F. et al. Novel machine learning and differentiable programming techniques applied to the VIP-2 underground experiment. *Measurement Science & Technology* (2023). <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad080a>
- Nikolaidis, A. et al. Proceedings of the OHBM Brainhack 2021. *Aperture Neuro* (2023). <https://doi.org/10.52294/258801b4-a9a9-4d30-a468-c43646391211>
- Ottaviani, C. et al. Intrusive thinking unravels aberrant GABAergic reactivity and increased functional connectivity within the central autonomic network: A combined imaging spectroscopy and ecological study. *International Journal of Psychophysiology* (2023). <https://doi.org/10.1016/J.IJPSYCHO.2023.05.045>
- Patelli, A. et al. Capability accumulation patterns across economic, innovation, and knowledge-production activities. *Scientific Reports* (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29979-x>
- Patelli, A., Roventini, A., Sbardella, A. Politiche per la transizione verde. *Il Mulino* (2023).
- Patuelli, A., Saracco, F. Sustainable development goals as unifying narratives in large UK firms’ Twitter discussions. *Scientific Reports* (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34024-y>
- Piscicchia, K. et al. Experimental test of noncommutative quantum gravity by VIP-2 Lead. *Physical Review D* (2023). <https://doi.org/10.1103/physrevd.107.026002>
- Piscicchia, K. et al. First Experimental Survey of a Whole Class of Non-Commutative Quantum Gravity Models in the VIP-2 Lead Underground Experiment. *Universe* (2023). <https://doi.org/10.3390/universe9070321>
- Pecorino V., Di Matteo T., et al. Empirical analysis of hourly rainfall data in Sicily from 2002 to 2023. *The European Physical Journal B* 97, 154 (2024). DOI: 10.1140/epjb/s10051-024-00792-3
- Piscicchia, K. et al. First simultaneous  $K^- p \rightarrow \pi^0, \pi^0$  cross section measurements at 98 MeV/c. *Physical Review C* (2023). <https://doi.org/10.1103/physrevc.108.055201>
- Podobnik B., Dabic M., Wild D., Di Matteo T. The impact of STEM on the growth of wealth at varying scales, ranging from individuals to firms and countries: the performance of STEM firms during the pandemic across different markets. *Technology in Society* 72 (2023) 102148.
- Pohan et al. Testing growth rate dependence in cosmological perturbation theory using scale-free models. *Physical Review D* (2023). <https://doi.org/10.1103/physrevd.108.023509>
- Skurzok, M. et al. A review of the low-energy  $K^-$ -nucleus/nuclei interactions with light nuclei AMADEUS investigations. *Frontiers in Physics* (2023). <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1237644>
- Raddant M., Di Matteo T., *Journal of Economic Interaction and Coordination*, DOI: 10.1007/s11403-023-00389-6
- Sylos Labini F., Straccamore M., De Marzo G., Comoron S. Mapping non-axisymmetric velocity fields of external galaxies. *Monthly Notices Of The Royal Astronomical Society* (2023). <https://doi.org/10.1093/mnras/stad1916>
- Tacchella A., Zaccaria A., Miccheli M., Pietronero, L. Relatedness in the era of machine learning. *Chaos, Solitons And Fractals* (2023). <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2023.114071>
- Teghil, A. et al. Intrinsic hippocampal connectivity is associated with individual differences in retrospective duration processing. *Brain Structure & Function* (2023). <https://doi.org/10.1007/s00429-023-02612-3>
- Villegas, P., Gili, T., Caldarelli, G., Gabrielli, A. Laplacian renormalization group for heterogeneous networks. *Nature Physics* (2023). <https://doi.org/10.1038/s41567-022-01866-8>
- Wang, X. S. et al. Graph model for multiple scattering in lithium niobate on insulator integrated photonic networks. *Optics Express* (2023). <https://doi.org/10.1364/oe.492431>
- Wycech, S., Piscicchia, K. Pionization: A method to study the nuclear surface. *PHYSICAL REVIEW C* (2023). <https://doi.org/10.1103/physrevc.108.014313>
- Zarella, R. et al. Characterization of the FOOT neutron detectors for nuclear fragmentation measurements at the n\_TOF facility. *Journal Of Instrumentation* (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/04/c04006>

**2024**

- Abbene, L. et al. First Stability Characterization for a CZT Detection System in an  $e^+e^-$  Collider Environment. *Sensors* (2024). <https://doi.org/10.3390/s24237562>
- Abbrescia, M. et al. First results on new helium based eco-gas mixtures for the Extreme Energy Events Project. *Journal of Instrumentation* (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/11/P11003>
- Acerbi, F. et al. DarkSide-20k sensitivity to light dark matter particles. *Communications Physics* (2024). <https://doi.org/10.1038/s42005-024-01896-z>
- Agnes, P. et al. Constraints on directionality effect of nuclear recoils in a liquid argon time projection chamber. *The European Physical Journal. C, Particles And Fields* (2024). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-12312-1>
- Alice, C. et al. A large-area SiPM readout plane for the ePIC-dRICH detector at the EIC: Realisation and beam test results. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (2024). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169669> EA AUG 2024
- Angelini, O. et al. Forecasting the countries' gross domestic product growth: The case of Technological Fitness. *Chaos, Solitons and Fractals* (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2024.115006>
- Acharya, S et al. The ALICE experiment: a journey through QCD. *European Physical Journal. C, Particles and Fields* (2024). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-12935-y>
- Aufiero, S., De Marzo, G., Sbardella, A., Zaccaria, A. Mapping job fitness and skill coherence into wages: an economic complexity analysis. *Scientific Reports* (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61448-x>
- Baudis, L. et al. Search for Pauli Exclusion Principle violations with Gator at LNGS. *European Physical Journal. C, Particles And Fields* (2024). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13510-1>
- Buompane, R. et al. Nuclear Physics Mid Term Plan at LNGS. *The European Physical Journal Plus* (2024). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-04840-2>
- Caldarelli, G., Gabrielli, A., Gili, T., Villegas, P. Laplacian renormalization group: an introduction to heterogeneous coarse-graining. *Journal of Statistical Mechanics: Theory And Experiment* (2024). <https://doi.org/10.1088/1742-5468/ad57b1>
- Caldarola, B. et al. Economic complexity and the sustainability transition: a review of data, methods, and literature. *Journal Of Physics. Complexity* (2024). <https://doi.org/10.1088/2632-072x/ad4f3d>
- Calvanese Strinati, M., Conti, C. Non-Gaussianity in the quantum parametric oscillator. *Physical Review A* (2024). <https://doi.org/10.1103/physreva.109.063519>
- Calvanese Strinati, M., Conti, C. Hyperscaling in the Coherent Hyperspin Machine. *Physical Review Letters* (2024). <https://doi.org/10.1103/physrevlett.132.017301>
- Cossio, F. et al. ALCOR: A mixed-signal ASIC for the dRICH detector of the ePIC experiment at the EIC. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (2024). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169817> EA SEP 2024
- Dinuzzo, M. et al. Neurovascular coupling is optimized to compensate for the increase in proton production from nonoxidative glycolysis and glycogenolysis during brain activation and maintain homeostasis of pH, pCO<sub>2</sub>, and pO<sub>2</sub>. *Journal of Neurochemistry* (2024). <https://doi.org/10.1111/jnc.15839>
- Diodato, D., Napolitano, L., Pugliese, E., Tacchella, A. Handbook of Economic Complexity for Policy. (2024). <https://doi.org/10.2760/9006857> (online), [10.2760/4649938](https://doi.org/10.2760/4649938) (print)
- Fessina, M., Albora, G., Tacchella, A., Zaccaria, A. Identifying Key Products to Trigger New Exports: An Explainable Machine Learning Approach. *Journal Of Physics. Complexity* (2024). <https://doi.org/10.1088/2632-072x/ad3604>
- Focaccia, M. Una donna tra arte e scienza. Anna Morandi e la ceroplastica anatomica settecentesca. *Donne, Filosofia Della Natura E Scienza* (2024).
- Focaccia, M. Past, present and future of the Enrico Fermi museum. *Europhysics News* (2024). <https://doi.org/10.1051/epn/2024202>
- Franciosini, G. et al. IOeRT conventional and FLASH treatment planning system implementation exploiting fast GPU Monte Carlo: The case of breast cancer. *PHYSICA MEDICA* (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2024.103346>
- Franciosini, G. et al. Preliminary study on the correlation between accelerated current and dose in water for an electron-based LINAC. *Frontiers in Physics* (2024). <https://doi.org/10.3389/fphy.2024.1249393>
- Galati, G. et al. Charge identification of fragments produced in 16O beam interactions at 200 MeV/n and 400 MeV/n on C and C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> targets. *Frontiers in Physics* (2024). <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1327202>
- Gallo, A. et al. Testing structural balance theories in heterogeneous signed networks. *Communications Physics* (2024). <https://doi.org/10.1038/s42005-024-01640-7>
- Giove, F., Zuo, X.-N., Calhoun, V. D. Editorial: Insights in brain imaging methods: 2023. *Frontiers in Neuroscience* (2024). <https://doi.org/10.3389/FNINS.2024.1488845>
- Jerry Jones D. ...Di Matteo T. et al. Functional Hypergraphs of Stock Markets. *Entropy* 26 (2024), 848. DOI: [10.3390/e26100848](https://doi.org/10.3390/e26100848)
- Kaniadakis G., Di Matteo T. et al. New trends in statistical physics of complex systems: theoretical and experimental approaches *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)
- Kritikaki, E. et al. Constructing representative group networks from tractography: lessons from a dynamical approach. *Frontiers in Network Physiology* (2024). <https://doi.org/10.3389/fnetp.2024.1457486>
- Manti, S. et al. Testing the Pauli Exclusion Principle across the Periodic Table with the VIP-3 Experiment. *Entropy* (2024). <https://doi.org/10.3390/e26090752>
- Mariani, M. S. et al. Ranking species in complex ecosystems through nestedness maximization. *Communications Physics* (2024). <https://doi.org/10.1038/s42005-024-01588-8>

- Mazzilli, D., Mariani, M. S., Morone, F., Patelli, A. Equivalence between the Fitness-Complexity and the Sinkhorn-Knopp algorithms. *Journal of Physics. Complexity* (2024). <https://doi.org/10.1088/2632-072x/ad2697>
- Mencarelli, L. et al. Macro and micro structural preservation of grey matter integrity after 24 weeks of rTMS in Alzheimer's disease patients: a pilot study. *Alzheimer's Research & Therapy* (2024). <https://doi.org/10.1186/s13195-024-01501-z>
- Neal, Z. P. et al. Pattern detection in bipartite networks: A review of terminology, applications, and methods. *Plos Complex Systems* (2024). <https://doi.org/10.1371/journal.pcsy.0000010>
- Noumi, H. et al. Measurement of KN scattering below the KN mass threshold. *EPJ Web of conferences* (2024). <https://doi.org/10.1051/epjconf/202429105011>
- Piscicchia, K. et al. X-Ray Emission from Atomic Systems Can Distinguish between Prevailing Dynamical Wave-Function Collapse Models. *Physical Review Letters* (2024). <https://doi.org/10.1103/physrevlett.132.250203>
- Piscicchia, K. et al. Optimization of a BEGe Detector Setup for Testing Quantum Foundations in the Underground LNGS Laboratory. *Condensed Matter* (2024). <https://doi.org/10.3390/condmat9020022>
- Porcelli, A. et al. VIP-2 with modulated current: pathfinder for enhanced Pauli exclusion principle violation studies. *European Physical Journal. C, Particles and Fields* (2024). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-12599-8>
- Pratelli, M., Petrocchi, M., Saracco, F., De Nicola, R. Online disinformation in the 2020 U.S. election: swing vs. safe states. *EPJ Data Science* (2024). <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-024-00461-6>
- Pratelli, M., Saracco, F., Petrocchi, M. Entropy-based detection of Twitter echo chambers. *Pnas Nexus* (2024). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgae177>
- Rignanese, L. et al. A readout system based on SiPM for the dRICH detector at the EIC. *Journal of Instrumentation* (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/02/C02062>
- Ripoli, C. et al. Involving high school teams in the upgrade phase of the Extreme Energy Event Project: a review of recent activities. *POS Proceedings Of Science* (2024).
- Ripoli, C. et al. Ecological transition for the gas mixtures of the MRPC cosmic ray telescopes of the EEE Project. *Journal of Instrumentation* (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/03/C03060>
- Scatigno, C., Festa, G., Maguregui, M. New Insights into the Assessment of Archaeological Crystalline Structures. *Crystals* (2024). <https://doi.org/10.3390/cryst14060534>
- Scatigno, C., Teodonio, L., Di Rocco, E., Festa, G. Spectroscopic Benchmarks by Machine Learning as Discriminant Analysis for Unconventional Italian Pictorialism Photography. *Polymers* (2024). <https://doi.org/10.3390/polym16131850>
- Schettino, M. et al. Resting-state brain activation patterns and network topology distinguish human sign and goal trackers. *Translational Psychiatry* (2024). <https://doi.org/10.1038/s41398-024-03162-w>
- Sgaramella, F. et al. Characterization of the Siddharta-2 Setup via the Kaonic Helium Measurement. *Condensed Matter* (2024). <https://doi.org/10.3390/condmat9010016>
- Sylos Labini, F. Generalized Rotation Curves of the Milky Way from the GAIA DR3 Data Set: Constraints on Mass Models. *The Astrophysical Journal* (2024). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad88f1>
- Sylos Labini et al. The Tully–Fisher relation and the Bosma effect. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (2024). <https://doi.org/10.1093/mnras/stad3278>
- Trigilio, A. et al. Test beam results of a fluorescence-based monitor for ultra-high dose rates. *Journal of Instrumentation* (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/02/C02043>
- Trusso, S. et al. Neutron sensing at spallation neutron sources by SERS. *Applied Surface Science* (2024). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.159186>
- Venezia, A. et al. Investigating the effects of artificial baroreflex stimulation on pain perception: A comparative study in no-pain and chronic low back pain individuals. *The Journal of Physiology* (2024). <https://doi.org/10.1113/jp286375>
- Villegas, P., Gili, T., Caldarelli, G., Gabrielli, A. Evidence of scale-free clusters of vegetation in tropical rainforests. *Physical Review. E* (2024). <https://doi.org/10.1103/physreve.109.1042402>
- Wang, H. et al. Large-scale photonic computing with nonlinear disordered media. *Nature Computational Science* (2024).
- Yassine, R. et al. Hadron production and propagation in pion-induced reactions on nuclei. *European Physical Journal. A, Hadrons and Nuclei* (2024). <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-024-01346-y>

## 2025

- Abbrescia, M. et al. Bringing Science in the Heart of the Young. *Giornale di Fisica della Società Italiana di Fisica* (2025). <https://doi.org/10.1393/gdf/i2025-10595-2>
- Abbrescia, M. et al. Measurement of the muon flux in the tunnels of Doss Trento hill. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors And Associated Equipment* (2025). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.170163>
- Acerbi, F. et al. Benchmarking the design of the cryogenics system for the underground argon in DarkSide-20k. *Journal Of Instrumentation* (2025). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/20/02/P02016>
- Acerbi, F. et al. Flow and thermal modelling of the argon volume in the DarkSide-20k TPC. *Journal of Instrumentation* (2025). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/20/06/p06046>
- Acerbi, F. et al. Quality assurance and quality control of the 26 "m" <sup>2</sup> SiPM production for the DarkSide-20k dark matter experiment. *European Physical Journal. C, Particles And Fields* (2025). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-025-14196-9>
- Acerbi, F. et al. Production, quality assurance and quality control of the SiPM Tiles for the DarkSide-20k Time Projection Chamber. *European Physical Journal. C, Particles And Fields* (2025). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-025-14940-1>
- Achari, B. R. et al. The SiPM photodetector of the ePIC dual-radiator RICH at the EIC: overview and beam test results. *Journal Of Instrumentation* (2025). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/20/08/c08025>

- Benachenhou, D., Cader, M., Mazzilli, D., Tacchella, A. Beyond arbitrage: machine learning for financing impactful economic activity. *AI AND ETHICS* (2025). <https://doi.org/10.1007/s43681-025-00697-6>
- Bonarota, S. et al. Integration of automatic MRI segmentation techniques with neuropsychological assessments for early diagnosis and prognosis of Alzheimer's disease. A systematic review. *Neuroimage* (2025). <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2025.121264>
- Bortolotti, N. et al. Fundamental limits on clock precision from spacetime uncertainty in quantum collapse models. *PHYSICAL REVIEW RESEARCH* (2025). <https://doi.org/10.1103/p6tj-lg8l>
- Buffa, L. et al. Maximum entropy modelling of sub-optimal transport. *Communications Physics* (2025). <https://doi.org/10.1038/s42005-025-02468-5>
- Calvanese Strinati, M., Conti, C. Equalized hyperspin machine. *Physical Review A* (2025). <https://doi.org/10.1103/cxjt-53qy>
- Calvanese Strinati, M., Conti, C. Quantum hyperspins: Highly nonclassical collective behavior in quantum-optical parametric oscillators. *PHYSICAL REVIEW A* (2025). <https://doi.org/10.1103/physreva.111.043712>
- Casaburi P. ... Di Matteo T. et al. Resilience of mobility network to dynamic population response across COVID-19 interventions: Evidences from Chile *PLoS Comput Biol* (2025) 21(2) DOI: 10.1371/journal.pcbi.1012802
- Casamitjana, A. et al. A probabilistic histological atlas of the human brain for MRI segmentation. *NATURE* (2025). <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09708-2>
- Chiavazzo, S., Calvanese Strinati, M., Conti, C., Pierangeli, D. Ising Machine by Dimensional Collapse of Nonlinear Polarization Oscillators. *PHYSICAL REVIEW LETTERS* (2025). <https://doi.org/10.1103/qs29-2xqc>
- De Gruttola, D. et al. Studies of radiation damage and mitigation strategies for the SiPM of the ePIC-dRICH detector at the EIC. *Il Nuovo Cimento C* (2025). <https://doi.org/10.1393/ncc/i2025-25194-x>
- De Simone M. et al. Long-term associative memory and spatial pattern separation impairments in individuals with subjective cognitive decline: A neuropsychological and medial temporal lobe subregions volumetric analysis. *CORTEX* (2025). <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2025.09.009>
- Di Matteo T., Moret, M.A., de Barros Pereira, H.B. et al. Editorial – EPJ B topical collections: recent advances in complex systems. *Eur. Phys. J. B* 98, 171 (2025). <https://doi.org/10.1140/epjb/s10051-025-01011-3>
- Dong, Y. et al. The FLUKA Monte Carlo simulation of the magnetic spectrometer of the FOOT experiment. *Computer Physics Communications* (2025). <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2024.109398>
- Dong, Y. et al. Corrigendum to «The FLUKA Monte Carlo simulation of the magnetic spectrometer of the FOOT experiment» [*Computer physics communications*, Volume 307, (2025) 109398]. *Computer Physics Communications* (2025). <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2024.109466>
- Egidi, I., Guidi, M., Giove, F. Compartmentalization of sodium in the human brain: a mini-review of <sup>23</sup>Na-MRI methods. *Frontiers in Physics* (2025). <https://doi.org/10.3389/fphy.2025.1487822>
- Festa, G. et al. Studying ancient Egyptian copper-alloy objects via X-ray diffraction and Machine Learning. *Journal of Cultural Heritage* (2025). <https://doi.org/10.1016/j.culher.2025.01.002>
- Festa, G. et al. Support Vector Machine Approach to the Spectroscopic Classification of Archaeological Bitumen Composites in Ancient Mesopotamia. *JOURNAL OF COMPOSITES SCIENCE* (2025).
- Focaccia, M. Laura Capon. Intellettuali in fuga dall'Italia fascista. Migranti, esuli e rifugiati per motivi politici o razziali (2025).
- Focaccia, M. Marconi, Corbino e l'Istituto di Fisica di via Panisperna. *Giornale di Fisica della Società Italiana di Fisica* (2025). <https://doi.org/10.1393/gdf/i2025-10621-5>
- Focaccia, M. Un museo per Enrico Fermi. Ma non solo. *Giornale di Fisica della Società Italiana di Fisica* (2025). <https://doi.org/10.1393/gdf/i2025-10588-1>
- Gallo, A. et al. Patterns of link reciprocity in directed, signed networks. *Physical Review. E* (2025). <https://doi.org/10.1103/physreve.111.024312>
- Gallo, A. Saracco F., Squartini T. - Statistically validated projection of bipartite signed networks. *npj Complexity* 2, 22 (2025). <https://doi.org/10.1038/s44260-025-00043-1>
- Guidi, M. et al. Cortical depth-dependent effects of thermal and physiological denoising in BOLD fMRI. *Il Nuovo Cimento C* (2025). <https://doi.org/10.1393/ncc/i2025-25230-y>
- Lasaponara, S. et al. Changes in Brain Functional Connectivity Underlying the Space-Number Association. *Journal of Cognitive Neuroscience* (2025). [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_02240](https://doi.org/10.1162/jocn_a_02240)
- Mancini, M., Cercignani, M. Magnetization transfer imaging in multiple sclerosis. *Handbook of Imaging in Multiple Sclerosis* (2025). <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-95739-7.00003-4>
- Mangia, S. et al. Reduced removal of waste products from energy metabolism takes center stage in human brain aging. *Scientific Reports* (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90342-3>
- Mangini, F. et al. Towards whole brain mapping of the hemodynamic response function. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism* (2025). <https://doi.org/10.1177/0271678X251325413>
- Mazza, F. et al. Impact of behavioral heterogeneity on epidemic outcome and its mapping into effective network topologies. *Physical Review. E* (2025). <https://doi.org/10.1103/xps9-qqvp>
- Oliverio, I., Scatigno, C., Festa, G. Elemental Feature Extraction from Historical Pigments through X-ray Fluorescence Spectroscopy and Machine Learning. *CHEMOSENSORS* (2025).
- Perciballi, C. et al. How spontaneous brain activity encodes the observation of grasping movements. *Neuroimage* (2025). <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2025.121396>
- Poggialini, A., Villegas, P., Muñoz, M. A., Gabrielli, A. Networks with Many Structural Scales: A Renormalization Group Perspective. *Physical Review Letters* (2025). <https://doi.org/10.1103/physrevlett.134.057401>

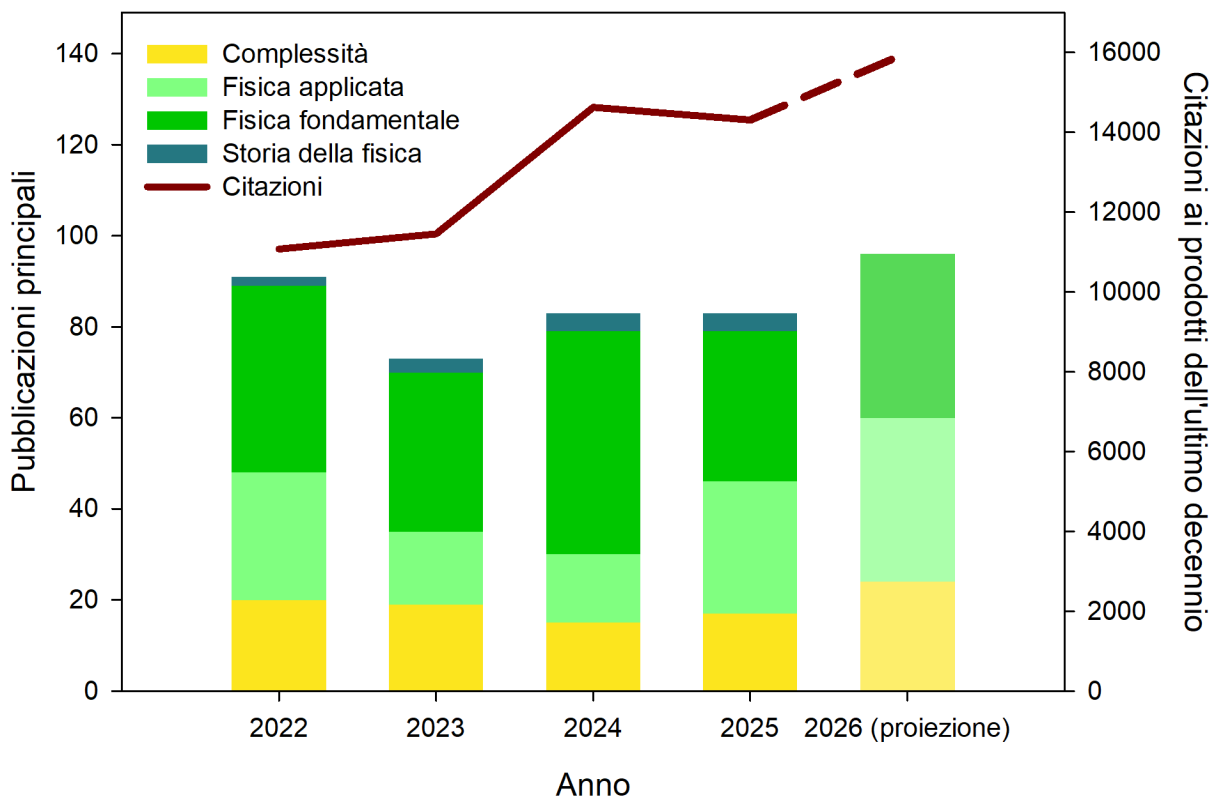
- Preghenella, R. et al. Beam test results of the SiPM photodetector prototype for the ePIC-dRICH detector at the EIC. *Journal of Instrumentation* (2025). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/20/07/C07005>
- Riggi, F. et al. High latitude observation of the Forbush decrease during the May 2024 solar storms with muon and neutron detectors on Svalbard. *Advances In Space Research* (2025). <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.05.023>
- Rubini, N. et al. The SiPM readout plane for the ePIC-dRICH detector at the EIC: Overview and beam test results. *Nuclear instruments & methods in physics research. Section a, accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment* (2025). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170890>
- Samson R., ...Di Matteo T., et al. Supervised Similarity for Firm Linkages, Risk.net, Cutting Edge Investments: Machine Learning, pp. 1–6, 29 October 2025.
- Saracco, F., Petri, G., Lambiotte, R., Squartini, T. Entropy-based models to randomise real-world hypergraphs. *Communications Physics* (2025). <https://doi.org/10.1038/s42005-025-02182-2>
- Scatigno, C. et al. Unveiling Renaissance Drawing Techniques: A Multimodal Machine Learning Approach to the Analysis of Giulio Romano's Amazzonomachia. *Journal of Molecular Structure* (2025).
- Scatigno, C., Dominijanni, S., Pedretti, I., Festa, G. Estimation of the Alkaline Reserve of Calcite-Based Nanoparticles Over Time Using Machine Learning for Benchmark Recognition on Historical Substrates. *ACS Applied Nano Materials* (2025).
- Schettino, M. et al. State-dependent reactivity of anterior cingulate cortex neurochemistry and downstream autonomic arousal in intrusive thinking. *Journal of Neural Transmission* (2025). <https://doi.org/10.1007/s00702-025-02992-2>
- Schettino, M. et al. Predicting Repetitive Negative Thinking in Daily Life: Insights From Brain-Based Graph-Theoretical Predictive Modeling. *Biological Psychiatry* (2025). <https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2025.09.020>
- Simonetti A., ... Di Matteo T. et al., Statistically validated network for analysing textual data. *Applied Network Science* (2025) 10:5. DOI: 10.1007/s41109-025-00693-z
- Straccamore, M., Bruno, M., Tacchella, A. Comparative analysis of technological fitness and coherence at different geographical scales. *PLOS ONE* (2025). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0329746>
- Sulpizio, V. et al. Unveiling the neural network involved in mentally projecting the self through episodic autobiographical memories. *SCIENTIFIC REPORTS* (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97515-0>
- Sylos Labini F. et al. "Exploring the Dark Matter Disc Model in Dwarf Galaxies: Insights from the LITTLE THINGS Sample" *Astronomy and Astrophysics*. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202452556>.
- Sylos Labini F. et al. "Breaking the degeneracy between warps and radial flows in external galaxies". *The Astrophysical Journal*, Volume 988, Number 1, 2025 <https://doi.org/10.3847/1538-4357/adc71c>
- Tosca, J., Strinati, M. C., Conti, C., Ciuti, C. Emergent Equilibrium in All-Optical Single Quantum-Trajectory Ising Machines. *Physical Review Letters* (2025). <https://doi.org/10.1103/fk9d-k8dc>
- Verga, C. et al. Temporal dynamics of full-body ownership and vicarious touch sensations as inferred from embodying a virtual avatar. *Experimental Brain Research* (2025). <https://doi.org/10.1007/S00221-025-07055-2>
- Villegas, P., Gabrielli, A., Poggialini, A., Gili, T. Multi-scale Laplacian community detection in heterogeneous networks. *Physical Review Research* (2025). <https://doi.org/10.1103/physrevresearch.7.013065>
- Villegas, P. Strange attractors in complex networks. *Phys. Rev. E* 111.4, L042301-<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.111.L042301>
- Wang, H. et al. Photonics Breakthroughs 2024: Nonlinear Photonic Computing at Scale. *IEEE Photonics Journal* (2025). <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2025.3547948>.

## 2026

- Artibani, F. et al. Time-based selection of kaonic atom x-ray events with quasi-hemispherical CZT detectors at the DAΦNE collider. *Measurement Science & Technology* (2026). <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ae3203>
- Bencivenga, F. et al. MOTUM. A system for motion online tracking under MRI. *IMAGING NEUROSCIENCE* (2026). <https://doi.org/10.1162/IMAG.a.1081>
- Bracco A. et al. « Via Panisperna. Il nuovo ha la sua storia », in Romarivista. Il magazine culturale di Roma Capitale, numero rosso gennaio-marzo 2026
- Caruso, V. et al. Decoding Sumerian Craft Technologies: morphological image processing and mesoscopic feature analysis of archaeological bitumen mixtures. *Journal of Archaeological Science: Reports* (2026).
- Giampaolo, S. et al. Residues on unglazed Roman pottery: extraction of organic spectral signatures via ATR-FTIR and machine learning. *NPJ SCIENCE OF FOOD* (2026). <https://doi.org/10.1038/s41538-025-00665-8>
- Guidi, M. et al. Impact of thermal and physiological denoising on laminar functional connectivity. *Scientific Reports* (2026). <https://doi.org/10.1038/s41598-026-37599-4>
- Serra, L. et al. Surface-based but not voxel-based morphometry reveals structural abnormalities in individuals with subjective cognitive decline. *Journal of Alzheimer's Disease* (2026). <https://doi.org/10.1177/13872877251400747>
- Serra, L. et al. Bridging cognitive reserve and cerebellar networks: counteracting brain damage in patients with Alzheimer's disease at different clinical stages. *Frontiers in Cellular Neuroscience* (2026). <https://doi.org/10.3389/fncel.2026.1716783>
- Sylos Labini F. « The Hidden Role of Anisotropies in Shaping Structure Formation in Cosmological N-Body Simulations », *Physical Review D* 113, 023510, 2026 <https://doi.org/10.1103/5tj-tbs5>
- Sylos Labini F. et al. "Large-Scale Galaxy Correlations from the DESI First Data Release". *Astronomy and Astrophysics* Volume n. 707-2026, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202558271>.

### 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 agli inizi di 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](https://mediasetinfinity.mediaset.it/documentari/nelregnodeifatti-storiadienricofermi_SE000000002359)).

2024, assistenza riprese, sopralluoghi, partecipazione e comunicazione "Fermi tutti: c'è la vasca dei pesci rossi" su Radio3scienza.

2024, assistenza e organizzazione riprese: "Ettore Majorana. L'enigma di un genio scomparso", Focus Tv ([https://mediasetinfinity.mediaset.it/movie/ettoremajoranalenigmadiungenioscomparso/ettore-majorana-lenigma-di-un-genio-scomparso\\_F313370101000101](https://mediasetinfinity.mediaset.it/movie/ettoremajoranalenigmadiungenioscomparso/ettore-majorana-lenigma-di-un-genio-scomparso_F313370101000101)).

2025, assistenza e organizzazione riprese per lo speciale "Hiroshima e Nagasaki: i giorni che cambiarono il mondo" del programma "Ulisse il piacere della scoperta", Rai Cultura - lunedì 2 giugno ore 21.30 su Rai 1.

2025 assistenza e organizzazione riprese "Fermi tutti" – Radio3scienza <https://www.raiplaysound.it/audio/2025/08/Radio3-Scienza-del-22082025-8b4fcbf3-8eec-432e-a562-b08af8048460.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>

### Conferenze, workshop, referaggio per riviste, comitati scientifici

Nel triennio 2024-2026, 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 (dal 19/03/2025 al 18/03/2030)
- Accordo di ricerca con il Dipartimento nucleare dell'ENEA (dal 30/06/2025 al 29/06/2028)
- Accordo quadro e convenzione operativa con l'INFN (dal 26/11/2024 al 25/11/2029)
- Accordo quadro finalizzato alla costituzione presso l'IRCCS di una "Piattaforma congiunta integrata di ricerca e di ricerca traslazionale IRCCS - CREF" (dal 05/09/2025 al 04/09/2030)
- Accordo quadro con Università telematica Mercatorum e il Centro Studi delle Camere di Commercio G. Tagliacarne (dal 01/03/2024 al 31/03/2027)
- Accordo quadro con L'Accademia Belle Arti di Brera (dal 26/03/2025 al 25/03/2028)
- Accordo di collaborazione nell'ambito del Progetto Extreme Energy Events con il Dipartimento di Fisica - Università della Calabria (dal 15/12/2025 al 14/12/2028)
- Accordo di collaborazione per il finanziamento di n. 3 borse di dottorato in fisica – 41° ciclo – Sapienza Università di Roma (triennio 2025-2028)
- Accordo di collaborazione scientifica CREF, Intesa Sanpaolo S.p.a., L.B. Servizi per le aziende S.r.l. (dal 10/09/2025 al 09/09/2027)
- Accordo per attività di ricerca CREF e Forward Partners SARL-S (dal 10/9/2025 al 10/09/2027)
- Accordo quadro con L'Università Tor Vergata - Dipartimento di Storia, Patrimonio culturale, Formazione e Società (dal 01/06/2024 al 30/06/2027)
- Accordo quadro con l'Istituto Centrale per la Grafica (dal 01/05/2024 al 31/05/2027)
- Accordo quadro con il Comune di Mentana nell'ambito della Fisica Applicata ai Beni Culturali (dal 01/06/2023 al 30/06/2026)
- Accordo quadro con l'Accademia di Belle Arti di Roma (dal 01/06/2023 al 30/06/2026)
- Accordo quadro con l'Istituto Centrale per la Patologia degli Archivi e del Libro (dal 01/06/2023 al 30/06/2026)
- Accordo quadro con l'Archivio Storico della Pontificia Università Gregoriana (dal 01/09/2021 al 30/09/2026)
- Convenzione operativa con l'Università di Bologna - Dipartimento di Filosofia e Comunicazione per lo svolgimento di attività di ricerca, di consulenza scientifica, tecnica e di formazione (dal 01/07/2023 al 31/07/2026)
- Convenzione con il Consortium GARR (dal 1/12/2024 al 31/12/2027)
- Accordo quadro con il Département des Sciences de l'Antiquité dell'Université de Genève (dal 01/07/2023 al 31/07/2026)
- Memorandum of Understanding con l'Institut Curie (Parigi) (dal 27/03/2025 al 26/03/2028)
- Memorandum of Understanding con Complexity Hub Vienna, Sony Roma, King's College London (dal 01/12/2024 al 30/11/2029)
- Protocollo di intesa per promozione e divulgazione scientifica e tecnologica con Fondazione Idis - Città della Scienza (dal 20/10/2025 al 19/10/2028)
- Oltre 68 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
- Convenzione di collaborazione scientifica con la Società italiana di Fisica (SIF) (dal 03/06/2026 al 31/12/2028)
- Convenzione quadro CREF e Sapienza Università di Roma (dal 01/10/2025 al 30/09/2028)
- Convenzione per ospitare un dottorando nell'ambito del corso di dottorato di ricerca in Heritage Science del Dipartimento di Scienze dell'Antichità di Sapienza Università di Roma – 40° ciclo (dal 27/11/2025 al 31/10/2028).

## **Collaborazioni nazionali**

- Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna
- Associazione al Festival della Scienza
- Associazione ai Musei Scientifici Italiani (AMSI)
- Azienda Ospedaliera Pisana (Electron-Flash)
- Camera di Commercio di Roma
- Camere di Commercio Guglielmo Tagliacarne
- Centro di ProtonTerapia: APPS – Trento
- Centro Restauro Venaria Reale – Torino
- Città Metropolitana di Roma Capitale
- CNAO - Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica– Pavia
- CNEL – Consiglio Nazionale dell'Economia e del Lavoro
- 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
- Fondazione ISI, Torino
- Fondazione Italia-Giappone
- Fondazione Nazionale della Danza / Aterballetto
- Forum disuguaglianze e Diversità
- Goethe Institut – Roma
- IIT Istituto Italiano di Tecnologia
- IMT Scuola Alti Studi Lucca
- ISTAT, Istituto Nazionale di Statistica
- Istituto della Enciclopedia Italiana Treccani
- Istituto di Cultura Giapponese di Roma
- ISIA Roma Design - Istituto Superiore per le Industrie Artistiche
- Ministero della Cultura (Istituto per la Grafica – Biblioteca Nazionale di Roma)
- Musei di Sapienza Sistema Bibliotecario Sapienza
- Museo Egizio (Torino)
- Netabolics S.R.L.
- Opificio delle Pietre Dure - Firenze
- Ospedale Pediatrico Bambino Gesù
- Politecnico di Milano
- Policlinico Umberto I (Sapienza)
- Polo Culturale Mentana (MuCaM – museo civico archeologico di Mentana e dell'agro nomentano, MuGa – museo garibaldino, MASCO - Mentana Archivio Storico Comunale)
- 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
- SIT Sordina – Aprilia (LT), Italia
- Società Italiana di Storia della Scienza
- Società Italiana degli Storici della Fisica e dell'Astronomia

- SONY CSL Roma
- Studio Stelluti
- Translated.com
- Università degli Studi di Bari, Bologna, Cagliari, della Calabria, Catania, Cattolica del Sacro Cuore, Chieti-Pescara, Enna Kore, Europea di Roma, Genova, LUISS Business School, Messina, Napoli Federico II, Padova, Palermo, Parma, Pavia, Pisa, Roma 1 Sapienza, Roma 2 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, Complexity in Economics & Finance Workshop
- **Stampa:** Redazione FocusTV, Casa Editrice Castelvechi
- **TV & Radio:** Focus Mediaset, Rai Play Sound, Rai Storia, Rai Cultura, RadioTre Scienza.
- **Mostre nazionali e internazionali:**
  - Installazione multimediale dedicata al Laboratorio per i Beni Culturali del CREF come parte dell'exhibition Spectres, Triennale di Architettura di Lisbona 2025, 2-4 ottobre 2025 - [https://www.trienaldelisboa.com/programme/triennali/2025\\_en](https://www.trienaldelisboa.com/programme/triennali/2025_en)
  - Collaborazione all'Exhibition «Restituzioni – Tesori d'Arte Restaurati» 2025 - Palazzo Esposizioni, Roma

### **Collaborazioni internazionali**

- Accademia polacca delle Scienze, Varsavia, Polonia
- British Museum – London, Regno Unito
- CERN - Ginevra, Svizzera
- China Centre for Economic Research (CCER) at Peking University
- 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
- École 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
- Fundación Épica La Fura dels Baus Barcelona (Spagna)
- GSI - Centro Helmholtz per la ricerca sugli ioni pesanti– Darmstadt, Germania
- HLRS High Performance Computing Center Stuttgart (Germania)
- Hospital del Mar Research Institute – Barcelona (Spagna)
- IAS Princeton (US)
- IFIN – HH - National Institute for R&D in Physics and Nuclear Engineering - Măgurele, Romania
- ISIS Spallation Neutron Source (UK)
- Istituto di Astrofisica delle Canarie (IAC), Spagna
- Institute Curie – Parigi, Francia
- Joint Research Center della Commissione Europea, Siviglia, Spagna
- Max Planck Institute for Human Cognitive and Brain Sciences, Leipzig, Germania
- MSC and HLRS High Performance Computing Centre Stuttgart, Germania
- Museo Curie, Parigi, Francia
- NBLA, Copenaghen

- 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, Sony CSL - Tokyo, Sony CSL - Kyoto
- Stefan Meyer Institute (SMI), Vienna, Austria
- Tata institute of fundamental research, Mumbai, India
- Tuftel Lab – Berlino, Germania
- Università: Aalto (Helsinki - Finlandia), Barcellona (Spagna); Beihang (Cina), Eötvös University (Budapest - Ungheria), ETH di Zurigo (Svizzera), Fudan (Cina), Ghent (Belgio), Ginevra (Svizzera), Granada (Spagna), Jagiellonian University (Polonia), King's College London (UK), Konstanz (Germania), KU Leuven (Belgio); Melbourne (Australia) Minnesota (USA), Namur (Belgio), Northeastern London (UK), Oslo (Norvegia), Oxford (UK), Parigi (Francia), Pechino (Cina), Politècnica de València (Spagna), Princeton (USA), Regensburg (Germania), Shanghai Jiao Tong (Cina), Sichuan (Cina), Sorbonne (Francia), Technical University of Munich (Germania), València (Spagna), Vienna (Austria), Yale (USA), UNU-MERIT (United Nations).
- World Bank group: IFC - International Finance Corporation.

## PERSONALE RICERCATORE, TECNOLOGO, TECNICO, AMMINISTRATIVO

1 - Personale CREF al 31 dicembre 2025					
Profilo	Livello	Tempo indeterminato	Tempo determinato FOE	Tempo determinato fondi esterni	Totale
Dirigente di ricerca	I	2	1 <sup>a</sup>		3
Primo ricercatore	II	5			5
Ricercatore	III	12			12
Dirigente tecnologo	I	1			1
Tecnologo	III	3			3
Contratto di ricerca				1	1
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
<b>Totale</b>		<b>33</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>36</b>

2 - Altre tipologie di personale presenti al 31 dicembre 2025	Numerosità
Associati <sup>b</sup>	104
Borse di studio dottorato di ricerca	11
Collaboratori esterni	4
Titolari di assegno di ricerca	13
Titolari di Borse di studio	5
<b>Totale complessivo</b>	<b>137</b>

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 strumentazione accessoria quale una bilancia analitica da laboratorio, essiccatore, campioni standard, pressa, reagenti, stufa, cappa chimica e materiali di base. Il laboratorio dispone inoltre di prodotti 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 ed attrezzature del laboratorio di Fisica per i Beni Culturali*

### **Risorse**

Il laboratorio ha dimostrato capacità di attrarre finanziamenti esterni tramite la partecipazione a bandi competitivi (ISIS@MACH budget da progetto pari a 800keuro). 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. È inoltre in corso di finalizzazione la sottoscrizione della convenzione di ricerca per l'inserimento nel network INFN-CHNet.

## 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, terminato nel 2025. 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 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 è costituito da: 3 rivelatori di tipo Multigap Resistive Plate Chambers (MRPC), che consentono di ricostruire il punto di passaggio di particelle subnucleari con risoluzione spaziale del cm<sup>2</sup> e risoluzione temporale dell'ordine di 250 ps; nel laboratorio sono presenti inoltre una stazione meteo custom (basata su Arduino), due alimentatori DC, due Computer, un Oscilloscopio Tektronix WaveRunner 8254M (2.5 GHz, 40 GS/s). Il telescopio, che fa parte della rete di 50 telescopi installati in tutta Italia; è possibile mettere in relazione i dati dei muoni rivelati con parametri ambientali locali o, tramite la sincronizzazione GPS, si possono studiare correlazioni tra eventi su grandi distanze. È in fase di studio 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.

Nei prossimi anni il laboratorio sarà utilizzato per:

- test di efficienza di rivelatori di particelle basati su Silicon Photomultiplier;
- assemblaggio e test di rivelatori nella nuova area sperimentale al piano -1 della Palazzina
- 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.

Si prevede inoltre un ampliamento delle aree sperimentali al piano -1 all'interno delle quali uno spazio sarà dedicato all'assemblaggio di rivelatori compatti trasportabili per estendere la rete EEE.

#### 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 Neuroimmagini**

Il progetto NQN ha la sua base operativa presso il Laboratorio Neuroimmagini/MARBILab, situato all'interno della Fondazione Santa Lucia. Si tratta di una struttura congiunta, nata dalla collaborazione tra la Fondazione stessa e il CREF, sotto la guida del responsabile scientifico di NQN. Il laboratorio è suddiviso in due aree principali: Sezione di Neurofisica: gestisce le attività più tecnologiche e di data science, Sezione di Neuropsicologia: coordina le attività relative alla valutazione clinica e psicologica dei volontari e dei pazienti.

Il personale dispone di spazi di lavoro dedicati, connessi stabilmente alla sede centrale del CREF tramite una VPN sicura (LAN-to-LAN). L'accesso alle risorse, disponibile sia in locale che da remoto, include:

- Motore di grid computing per il calcolo distribuito con oltre 128 nodi e due GPU di classe enterprise installate su server di ultima generazione
- Database per neuroimmagini supportato da un sistema di archiviazione centrale SAN da oltre 400 TB
- Otto workstation ad altissime prestazioni, dotate di GPU
- Ampia gamma di software ottimizzati per l'elaborazione dei dati, sia di uso generale che sviluppati internamente.

#### **Risorse**

Il funzionamento del Laboratorio Neuroimmagini/MARBILab si basa su una solida partnership strategica, in cui gli oneri strutturali, tecnologici e operativi sono ripartiti in modo complementare tra i due enti promotori. La Fondazione garantisce l'infrastruttura di base e il mantenimento delle apparecchiature principali, sostenendo un impegno finanziario annuo di circa 600.000 €. Questo fondamentale contributo si articola in due aree principali: logistica e infrastruttura, che includono messa a disposizione degli spazi fisici (locali), gestione degli impianti e fornitura di tutti i servizi generali necessari alla piena operatività quotidiana della struttura, e manutenzione ad alta tecnologia, che comprende principalmente i costi di manutenzione dello scanner MRI. Questa voce assorbe da sola circa 240.000 € dell'investimento annuale.

A fronte dell'impegno infrastrutturale della Santa Lucia, il CREF contribuisce alle attività del laboratorio fornendo il nucleo operativo e le risorse tecnologiche specifiche per l'analisi. Il capitale Umano include l'impiego del proprio personale scientifico, mentre le risorse informatiche e strumentali comprendono la fornitura e gestione dell'intera architettura di calcolo (reti, server e workstation ad alte prestazioni) e della piccola strumentazione di supporto, fondamentali per l'acquisizione e l'elaborazione dei complessi dati di neuroimaging.

Il laboratorio attrae sperimentatori da tutto il centro Italia, e gli sperimentatori esterni sono chiamati a contribuire alle spese di mantenimento del laboratorio. Inoltre, il laboratorio attrae finanziamenti infrastrutturali per grandi attrezzature.

## **5) 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 risorse comprenderanno una macchina filatrice per fibre scintillanti (attualmente ospitata presso il Dipartimento SBAI ma di proprietà del CREF), dei 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.

La principale dotazione strumentale del laboratorio in una prima fase sarà dedicata alla realizzazione di tracciatori a fibre scintillanti di diverso spessore, principalmente dedicati alla rivelazione dei prodotti secondari della terapia con particelle, quali i neutroni ultrafast. Verranno inoltre realizzati prototipi di 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 di rivelatore di imaging SPECT e dosimetria. Verrà assemblato, caratterizzato e valutato un wearable- dosimeter per radiometabolica con Lutezio 177.

Il laboratorio disporrà inoltre di un ambiente di programmazione e simulazione e di spazi per la gestione del personale a tempo determinato ed i collaboratori. Sarà inoltre presente una workstation ad alte prestazioni (incluse capacità GPU) e strumenti software ottimizzati (sia commerciali che sviluppati localmente) per l'elaborazione dei dati, ottimizzazione di TPS e l'addestramento delle reti neurali sviluppate per la ricostruzione delle immagini.

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 allo stato attuale il laboratorio presente presso SBAI 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.

## 6) Laboratorio Sorgenti

Il nuovo Laboratorio Sorgenti è in allestimento al piano -1 nella stanza n. 402 del CREF e sarà fruibile con setup sperimentali variabili per lo svolgimento di misure quali ad esempio calibrazioni, misure di efficienza di rivelatori e spettroscopia gamma. L'acquisto delle sorgenti e l'iter previsto per legge in materia di radioprotezione sono stati avviati e sono in fase finale. L'acquisto delle sorgenti radioattive rappresenta il primo passo fondamentale per dotare il CREF della strumentazione necessaria allo svolgimento di tali esperimenti di laboratorio.

### *Impatto sulle Linee di Ricerca in corso*

Si prevede un impatto significativo del nuovo laboratorio su diverse linee di ricerca in corso con interessi multipli all'interno del CREF tra cui:

- Fisica Nucleare per l'Energia, Ambiente e Radioprotezione - saranno impiegate per l'avvio delle nuove attività di ricerca
- Fisica per i Beni Culturali - saranno impiegate in attività di ricerca di spettroscopia gamma e applicazioni per l'analisi isotopica di materiali di interesse storico-artistico.
- Fisica Medica e sviluppo di rivelatori - saranno impiegate per la calibrazione e la misura dell'efficienza di rivelatori sviluppati nell'ambito della fisica medica.
- Progetto EEE - saranno utili per supportare le attività legate al progetto EEE (Extreme Energy Events) e lo sviluppo di nuovi rivelatori di particelle.
- Storia della Fisica e Didattica - permetteranno di riprodurre esperimenti simili a quelli condotti da Enrico Fermi e i "ragazzi di Via Panisperna", offrendo un'importante risorsa per la realizzazione di materiali didattici e di divulgazione scientifica.

### *Informazioni aggiuntive*

Le sorgenti gamma puntiformi  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  e  $^{22}\text{Na}$  verranno utilizzate all'occorrenza in tutti i laboratori del piano -1 compresa la zona in fase di ristrutturazione riportata in Figura 1 – denominata area nuovi laboratori - per misure di calibrazione di rivelatori. Per queste sorgenti sono previste due postazioni di stoccaggio: la prima nella stanza del laboratorio sorgenti e la seconda negli spazi della zona in fase di ristrutturazione non appena disponibili (area nuovi laboratori). La sorgente  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  sarà utilizzata esclusivamente all'interno del Laboratorio Sorgenti. Questa stanza sarà attrezzata con una dotazione di base che prevede uno spazio apposito per lo stoccaggio in sicurezza delle sorgenti, per lo svolgimento degli esperimenti in sicurezza ed in particolare prevedendo schermature dedicate tramite appositi shielding di piombo e materiali idrogenati (i.e. paraffina) per il montaggio del setup che potrà essere variabile a seconda della funzione e dell'utilizzo. Sarà predisposto un tavolo dedicato per l'allestimento dei setup sperimentali. Saranno inoltre impiegati rivelatori specifici a seconda dell'utilizzo e sistemi di acquisizione dedicati (i.e. digitalizzatore) in funzione del particolare set-up sperimentale.

---

## **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 da un anno sono state organizzate principalmente in quattro principali filoni, come illustrato di seguito e descritto sotto sinteticamente.

#### **A.1 Complessità**

L'approccio scientifico tradizionale, pur avendo prodotto risultati fondamentali per la comprensione della natura e per lo sviluppo tecnologico, non è sempre sufficiente a descrivere fenomeni caratterizzati da molteplici interazioni, forte eterogeneità e organizzazione su scale diverse. Processi biologici, dinamiche sociali ed economiche, fenomeni climatici, reti di mobilità, sistemi informativi e innovazione tecnologica presentano infatti proprietà emergenti che richiedono strumenti teorici e computazionali capaci di coglierne la struttura multiscala e la natura non lineare. In questo quadro, la teoria dei sistemi complessi, la fisica statistica, la scienza delle reti e l'intelligenza artificiale costituiscono oggi un insieme metodologico essenziale per analizzare grandi quantità di dati e costruire modelli interpretativi e predittivi robusti.

L'attività del CREF nell'area della Complessità si sviluppa lungo una direttrice fortemente interdisciplinare, nella quale metodi originati nella fisica vengono applicati a problemi rilevanti nelle scienze naturali, nell'economia, nello studio dell'innovazione, nell'analisi dei sistemi sociali e nelle sfide della sostenibilità. Un elemento distintivo di questa linea è l'integrazione tra modellizzazione teorica, simulazione numerica avanzata, metodi data-driven, machine learning e sviluppo di indicatori quantitativi utili sia alla comprensione dei fenomeni sia al supporto dei processi decisionali.

Un primo ambito di ricerca riguarda la Fisica Statistica e i Sistemi Complessi nelle Scienze Naturali, con particolare attenzione allo sviluppo di strumenti per l'analisi multiscala di reti complesse eterogenee. In questo contesto, il CREF sta consolidando approcci innovativi come il Laplacian Renormalization Group, applicato allo studio di strutture invarianti di scala, fenomeni critici e processi emergenti in sistemi biologici, ecologici, cerebrali, epidemiologici e climatici. A questa attività si affianca lo sviluppo di modelli nulli massimamente entropici per la validazione statistica di strutture osservate in reti complesse, con applicazioni che vanno dalle neuroscienze alla climatologia, fino all'analisi di ipergrafi e sistemi segnati.

Un secondo ambito è costituito dalla Complessità per lo sviluppo economico e tecnologico, dove il CREF sviluppa strumenti quantitativi per lo studio della competitività, delle capabilities produttive, dell'innovazione e delle traiettorie di sviluppo di economie e territori. In questo filone si colloca il framework Economic Fitness and Complexity, che interpreta economie e sistemi produttivi come reti complesse e consente di inferire livelli di competitività, potenziale innovativo e possibilità di upgrading industriale. La ricerca si estende inoltre a modelli multilayer che mettono in relazione produzione, lavoro, brevetti e attività scientifica, con particolare attenzione alla transizione verde, alle materie prime critiche, alle catene globali del valore e agli effetti delle trasformazioni tecnologiche su disuguaglianza, occupazione e politiche industriali. In parallelo, si rafforza la linea di Computational Social Science, dedicata allo studio di polarizzazione, echo chambers, disinformazione e strutture discorsive online mediante strumenti di teoria delle reti, modelli nulli e analisi data-driven.

Un terzo ambito riguarda l'impatto dell'intelligenza artificiale sul tessuto socioeconomico e sull'innovazione tecnologica. In questa area il CREF affronta sia problemi metodologici sia questioni di impatto. Sul piano metodologico, vengono sviluppati nuovi algoritmi di apprendimento continuo, modelli ispirati alla dinamica dei sistemi complessi e approcci basati su Large Language Models per l'analisi di grandi corpora non strutturati, quali brevetti, pubblicazioni scientifiche, repository di codice e dati digitali. Sul piano applicativo, tali strumenti vengono impiegati per mappare competenze emergenti, prevedere traiettorie di innovazione,

misurare l'esposizione occupazionale all'IA e analizzare il ruolo dei valori morali nei processi di interazione uomo-macchina e nelle dinamiche delle comunità online. Questa linea di ricerca si caratterizza per una forte attenzione ai temi della IA responsabile, della trasparenza algoritmica e della misurazione quantitativa degli effetti dell'IA su lavoro, innovazione e organizzazione sociale.

Il quarto ambito è dedicato a Innovazione e Scenari Predittivi per la Sostenibilità, sviluppato anche nell'ambito dell'iniziativa congiunta CREF–Sony CSL. In questo contesto, il CREF realizza strumenti predittivi e piattaforme “what-if” per l'analisi di scenari urbani, accessibilità, inclusività, mobilità e trasformazioni socioeconomiche, con applicazioni alla cosiddetta “città dei 15 minuti”, alla pianificazione di reti urbane e alla costruzione di dashboard per policy maker. Questa attività comprende inoltre lo studio dell'ecosistema dell'informazione online, dei bias dei sistemi di raccomandazione, della qualità del discorso pubblico e della cooperazione sociale, nonché una linea sulla creatività aumentata, in cui l'interazione tra essere umano e sistemi di IA viene esplorata in contesti quali danza, riabilitazione, sport e conservazione culturale.

## **A.2 Fisica Applicata**

La Fisica Applicata rappresenta il naturale ponte di collegamento tra la scoperta delle leggi fondamentali della natura e la loro concreta traduzione in innovazione tecnologica, ed affonda le proprie radici agli albori della scienza moderna. Si tratta di un ambito profondamente interdisciplinare che, favorendo un costante e proficuo scambio metodologico, abbraccia settori nevralgici quali le scienze ambientali, lo studio dei materiali, la conservazione del patrimonio storico e la medicina. Soprattutto in epoca recente, l'impatto di questa disciplina ha registrato un'espansione senza precedenti, spaziando dallo sviluppo dei semiconduttori fino alle più avanzate tecniche di diagnostica per immagini, le quali hanno radicalmente trasformato la ricerca biomedica e l'assistenza clinica.

All'interno del CREF, la macroarea dedicata alla Fisica Applicata concentra le proprie attività proprio su queste direttrici, articolandosi in tre specifici ambiti di ricerca: la Radio e Adroterapia, le Neuroscienze con il Neuroimaging Quantitativo e, infine, la Fisica per i Beni Culturali.

Per quanto riguarda la declinazione medica della disciplina, gli sforzi del CREF convergono sulle crescenti necessità cliniche di una società in progressivo invecchiamento, procedendo lungo due filoni d'indagine paralleli. Il primo risponde alle sfide poste dalla crescente incidenza di patologie neoplastiche, ed è focalizzato su Radio e Adroterapia. Tale filone punta a ottimizzare le metodiche di imaging nucleare e a sviluppare percorsi terapeutici all'avanguardia. Sul fronte diagnostico, i ricercatori lavorano alla creazione di sistemi indossabili, al fine di permettere il monitoraggio continuo del paziente e dunque la personalizzazione del trattamento. In ambito terapeutico, l'obiettivo primario è la realizzazione di un innovativo rivelatore capace di monitorare la distribuzione temporale e spaziale della dose radioterapica somministrata durante i trattamenti oncologici basati su particelle cariche, un parametro vitale per ridurre al minimo i danni ai tessuti sani.

Il secondo filone medico, dedicato a Neuroscienze e Neuroimaging Quantitativo, unisce lo sviluppo tecnologico di nuove metodiche di Risonanza Magnetica (MRI) allo studio approfondito delle funzioni cerebrali. Questa linea di ricerca indaga le complesse associazioni tra l'elaborazione delle informazioni a livello corticale, il relativo dispendio energetico e l'infrastruttura microstrutturale che ne garantisce la trasmissione. Un'attenzione particolare è rivolta all'analisi delle fluttuazioni cerebrali, sia spontanee che stimulate dall'interazione con l'ambiente, affinando al contempo tecniche computazionali capaci di "ripulire" il segnale MRI funzionale da interferenze non neuronali, come le fluttuazioni di origine cardiaca. Parallelamente all'ambito medico, il CREF applica le proprie competenze alla salvaguardia del patrimonio storico-artistico. La linea di ricerca in Fisica per i Beni Culturali adotta un approccio fortemente sinergico, integrando fisica, chimica e scienza dei materiali per analizzare a fondo la composizione delle opere e i loro intrinseci processi di degrado. Attraverso lo sviluppo e l'impiego di metodologie analitiche e computazionali avanzate, tra cui la fluorescenza a raggi X (XRF) e la spettroscopia infrarossa (IR), i ricercatori studiano la struttura, le antiche tecniche produttive e lo stato di conservazione dei manufatti. Le indagini sono estremamente variegate: spaziano dall'analisi dei beni librari e dell'efficacia dei relativi prodotti per il restauro, alla caratterizzazione di oggetti in metallo e ceramica, fino allo studio di reperti organici di scavo, come ossa, legni antichi e sementi.

### **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.

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.

Uno degli assi portanti delle attività dell'Ente nella Fisica Fondamentale 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. L'obiettivo della linea di ricerca "Tecnologie fotoniche ed intelligenza artificiale" è lo sviluppo di sistemi 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, 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. 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. Molte sono ancora alcune domande alle quali si cerca di dare una risposta. Tra queste, quelle legate al meccanismo in grado di originare i raggi cosmici di energia ultraelevata (Ultra High Energy Cosmic Rays, UHECR). Altre riguardano la loro possibile produzione da particelle di materia oscura, 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. Il Progetto Extreme Energy Events rivela e studia i raggi cosmici in collaborazione con le scuole italiane introducendo un approccio pratico e interdisciplinare, che richiama l'eredità di Fermi.

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. In questa fase l'attività di ricerca si articola lungo due principali linee tematiche: (i) la cinematica e la dinamica della Via Lattea e di alcune galassie esterne irregolari; (ii) lo studio della struttura a larga scala dell'universo.

L'astrofisica nucleare con sorgenti innovative si concentra invece sulla nucleosintesi degli elementi presenti sulla terra e nell'universo, 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. Questo scenario riproduce più accuratamente l'ambiente stellare in cui i processi avvengono in natura, e permette una stima più realistica dei parametri di interesse. Il progetto si prefigge quindi la definizione e la realizzazione di una campagna sperimentale volta alla misura dei processi di fusione e delle vite medie per decadimento beta in ambiente ionizzato.

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. Nell'ambito del progetto vengono sviluppati e utilizzati innovativi Silicon-Drift-Detectors (SDD) e rivelatori al Germanio ad alta purezza (HPGe). Algoritmi Machine Learning (ML) e Convolutional Neural Network (CNN) sono ottimizzati per la pulse shape analysis, la selezione degli eventi e l'interpretazione dei dati al fine di identificare deviazioni o caratteristiche spettrali inattese, che potrebbero indicare segnali di nuova fisica.

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.

#### **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.

Dalla riapertura effettiva del 2022, le presenze sono in continua crescita e la tendenza positiva si è confermata anche nell'anno 2025, con oltre 5800 visitatori, di cui il 74% sono scuole. I primi mesi del 2026 hanno visto un'affluenza quasi raddoppiata rispetto a quella dell'anno precedente.

Per le scuole si tengono anche attività specifiche quali FSL e visite ai laboratori dell'ente che vengono utilizzati attivamente in percorsi di apprendimento stimolanti, proseguendo e approfondendo la visita museale.

A partire dall'anno scolastico 2025/26 il Museo ha lanciato un progetto di avvicinamento alla scienza rivolto alle classi delle scuole primarie e secondarie di primo grado (fascia di età 8-13 anni) al fine di far conoscere la scienza, la fisica in particolare, sin dai primi anni del periodo di istruzione. Sono stati scelti percorsi correlati ai contenuti museali e la metodologia unisce la divulgazione della scienza, la storia della scienza e l'esperimento scientifico in modalità hands-on. 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 mese di febbraio 2026 è stata inaugurata una nuova installazione, dedicata allo studio dei raggi cosmici, fortemente immersiva e coinvolgente.

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 Niels Bohr Archive di**

**Copenaghen**, il Museo di Fisica di Sapienza di Roma, **Idis Città della Scienza di Napoli** 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, con quasi 1000 iscritti e un tasso del 75% di apertura.

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 si articola in attività strettamente interconnesse che spaziano dalla fisica statistica alle applicazioni nelle scienze naturali, nello sviluppo economico e tecnologico, nello studio dell'impatto dell'intelligenza artificiale e nella costruzione di scenari predittivi per la sostenibilità. Il tratto distintivo della linea è l'integrazione tra sviluppo teorico, modellizzazione quantitativa, analisi di reti complesse e strumenti data-driven, con l'obiettivo di comprendere fenomeni caratterizzati da forte eterogeneità, dinamiche emergenti e organizzazione multiscala.

Nell'ambito della Fisica Statistica e Sistemi Complessi nelle Scienze Naturali, l'attività si è concentrata sullo sviluppo di strumenti teorici e computazionali per la descrizione multiscala di sistemi complessi naturali, con particolare riferimento a reti eterogenee, sistemi disordinati e serie temporali ad alta dimensionalità. Un risultato centrale è stato il consolidamento del Laplacian Renormalization Group (LRG) come quadro teorico per l'analisi multiscala di reti complesse, capace di preservare informazione locale e proprietà topologiche rilevanti, identificando strutture invarianti di scala e flussi di rinormalizzazione in reti disordinate o diluite. Parallelamente, sono stati sviluppati approcci spettrali e topologici per la descrizione di configurazioni metastabili in sistemi di spin, chiarendo il legame tra geometria spettrale e strutture emergenti. Questi metodi sono stati applicati a sistemi ecologici, neuroscienze, epidemiologia e climatologia, anche attraverso modelli nulli massimamente entropici utilizzati per validare strutture osservate e ricostruire reti da informazione parziale.

Le attività future in questo ambito mirano a rafforzare il ruolo del CREF come riferimento internazionale nello studio della criticità e dell'organizzazione geometrica dei sistemi complessi. Le principali direttrici riguardano l'avanzamento teorico dell'LRG, lo studio della criticità geometrica e dei fenomeni non ergodici, lo sviluppo di metodi di clusterizzazione multiscala per reti di grandi dimensioni e serie temporali complesse, nonché l'estensione delle applicazioni a reti genetiche, reti cerebrali funzionali, sistemi biomedici e dinamiche climatiche a breve termine. Proseguirà inoltre la ricerca su modelli nulli avanzati per reti monopartite, bipartite, segnate e ipergrafi.

Nel settore della Complessità per lo sviluppo economico e tecnologico, il CREF ha ulteriormente consolidato un programma di ricerca che applica teoria dei sistemi complessi, fisica statistica, network science e approcci data-driven alla comprensione delle dinamiche economiche e sociali. Un risultato cardine è il rafforzamento del framework Economic Fitness and Complexity (EFC), che consente di modellizzare economie e territori come sistemi complessi e di inferire capabilities, livelli di competitività e traiettorie di

sviluppo. A questa linea si affianca lo sviluppo di strumenti basati su modelli nulli e principi di massima entropia per distinguere segnale e rumore nelle reti economiche e sociali, validare pattern strutturali e ricostruire interdipendenze in modo statisticamente fondato. In parallelo, la componente di Computational Social Science ha esteso l'analisi di comunità online, polarizzazione, echo chambers e disinformazione, con particolare attenzione al legame tra dinamiche digitali ed eventi offline.

Per il prossimo triennio, questa linea evolverà verso un uso sempre più integrato del framework EFC per lo studio dell'innovazione tecnologica, delle catene globali del valore, della competitività territoriale e della transizione verde, con ricadute dirette per le politiche industriali e pubbliche. Un obiettivo importante sarà inoltre lo sviluppo di modelli multilayer capaci di mettere in relazione produzione, lavoro, brevetti e scienza, così da descrivere in modo più coerente la coevoluzione di competenze e capabilities. Sul fronte della sostenibilità, verrà rafforzata l'analisi della transizione verde e del ruolo delle materie prime critiche, mentre la componente di Computational Social Science punterà a rendere ancora più robuste le misure di comunità, polarizzazione ed echo chambers attraverso l'uso sistematico dei modelli nulli.

La linea dedicata a L'impatto dell'Intelligenza Artificiale sul tessuto socioeconomico e l'innovazione tecnologica ha prodotto risultati rilevanti sia sul piano metodologico sia su quello applicativo. Tra i contributi più significativi si collocano lo sviluppo di nuove famiglie di algoritmi per apprendimento continuo e creativo, come Dreaming Learning e Lyapunov Learning, e l'impiego di architetture Transformer per la modellizzazione del movimento umano nel progetto Duetto. Parallelamente, il CREF ha consolidato l'uso di Large Language Models per l'analisi di grandi corpora non strutturati — brevetti, pubblicazioni, codice — con l'obiettivo di mappare competenze tecnologiche, prevedere traiettorie emergenti di innovazione e analizzare l'interazione tra intelligenza artificiale, sostenibilità e organizzazione sociale. Di particolare rilievo è anche lo sviluppo di metriche quantitative dell'esposizione occupazionale all'IA, nonché l'avvio di una linea su IA responsabile, valori morali, polarizzazione online e osservazione del discorso pubblico digitale.

Nel triennio 2026–2028 questa attività sarà ulteriormente sviluppata attraverso un'impostazione interdisciplinare che combina informatica, teoria delle reti, economia e sociologia. Tra gli obiettivi figurano l'estensione delle analisi a repository di codice e dati occupazionali, lo sviluppo di strumenti LLM per lo studio delle materie prime critiche e delle traiettorie tecnologiche, l'estensione di Dreaming Learning a Graph Neural Networks e sistemi generativi, e la realizzazione di una piattaforma dedicata all'osservazione dei contenuti social e dei marker morali nel discorso pubblico. L'intento complessivo è comprendere meglio potenzialità e limiti dei modelli di IA e, al tempo stesso, produrre strumenti quantitativi utili a misurarne l'impatto economico e sociale.

L'attività su Innovazione e Scenari Predittivi per la Sostenibilità, sviluppata nell'ambito dell'iniziativa congiunta CREF–Sony CSL, ha ulteriormente rafforzato l'integrazione tra ricerca quantitativa, sperimentazione e impatto pubblico. Tra i risultati già ottenuti vi è il potenziamento della piattaforma “what-if” dedicata alla città dei 15 minuti, cui si sono aggiunti moduli sull'accessibilità urbana, la pianificazione di reti ciclabili e la dipendenza dall'auto. È stato inoltre completato un progetto pilota smart city con sensori avanzati per l'analisi del traffico e della sicurezza stradale nel rispetto della privacy. In parallelo, sono state avviate attività sull'ecosistema dell'informazione online, sui bias dei sistemi di raccomandazione, sull'interazione uomo-IA nella creatività aumentata e sulla quantificazione della cooperazione in ambito sociale.

Per il futuro, l'obiettivo è sviluppare ulteriormente tecnologie “what-if” e strumenti quantitativi per l'analisi dell'accessibilità, dell'inclusività e delle dinamiche economiche urbane, traducendoli in dashboard e strumenti operativi per i policy maker. Saranno inoltre approfonditi lo studio dell'infosfera, la costruzione di strumenti per migliorare qualità e pluralismo dell'informazione accessibile online, e lo sviluppo del Large Movement Model, con applicazioni che vanno dalla danza alla riabilitazione, dallo sport alla conservazione culturale. In questo modo, la linea Complessità conferma la propria vocazione a coniugare avanzamento teorico, innovazione metodologica e rilevanza applicativa, ponendosi come uno degli assi strategici del CREF per affrontare problemi scientifici e sociali ad alta complessità.

## **B.2 Fisica Applicata**

La Fisica Applicata rappresenta il motore vitale che traduce le scoperte della ricerca fondamentale in innovazione tecnologica tangibile, gettando un solido ponte tra l'indagine delle leggi della natura e la loro concreta applicazione. Si tratta di un'area profondamente interdisciplinare che abbraccia settori nevralgici come la medicina, le scienze dei materiali, l'ambiente e la conservazione del patrimonio storico-artistico. In questi ambiti, la disciplina svolge un ruolo cruciale non solo nello sviluppo di nuove tecnologie d'indagine, ma soprattutto come catalizzatore di una proficua contaminazione tra approcci sperimentali, modellistici e computazionali.

All'interno di questo vasto panorama, la macroarea del CREF dedicata alla Fisica Applicata concentra le proprie risorse e competenze su direttrici strategiche fortemente interconnesse, ponendosi ambiziosi obiettivi scientifici e sociali che spaziano dalla Fisica Medica, alla Fisica per i Beni Culturali, fino alle applicazioni della Fisica Nucleare per l'Energia e l'Ambiente.

Nel campo della Fisica Medica, gli sforzi sono indirizzati ad affrontare le complesse sfide di una società in evoluzione. L'obiettivo è potenziare le capacità diagnostiche precoci attraverso strumentazioni sempre più sensibili e meno invasive, essenziali per svelare meccanismi fisiologici intricati come le dinamiche cerebrali. Allo stesso tempo, si punta a ottimizzare i trattamenti terapeutici supportando l'avanzamento della medicina di precisione, come nel caso della radio e adroterapia, per massimizzare l'efficacia sul bersaglio tumorale riducendo al minimo i danni ai tessuti sani. A questa vocazione clinica si unisce un forte impegno sociale: democratizzare l'accesso alle cure di eccellenza, progettando sistemi di rilevazione tecnologicamente avanzati ma caratterizzati da costi contenuti.

Parallelamente, il crescente ruolo della fisica nella conoscenza e valorizzazione delle opere d'arte risulta strategico, specialmente per una nazione custode di un patrimonio inestimabile come l'Italia. In questo settore, l'impegno del CREF mira a promuovere una diagnostica rigorosamente non distruttiva, fondendo tecnologie fisiche e strumenti digitali avanzati come la spettroscopia, l'imaging e il machine learning. Questo approccio metodologico permette di studiare a fondo i materiali e le antiche tecniche esecutive senza alterare minimamente i reperti originali, segnando un fondamentale passaggio dal tradizionale restauro alla più moderna conservazione preventiva. La capacità di estrarre dati complessi per creare modelli predittivi consente infatti di anticipare i fenomeni di degrado, garantendo una salvaguardia più efficace e aprendo nuove e affascinanti prospettive per la valorizzazione dell'arte.

A completamento di questa visione interdisciplinare, il progetto dedicato alla Fisica Nucleare per l'Energia, l'Ambiente e la Radioprotezione, lanciato quest'anno, declina le metodologie nucleari in soluzioni tecnologiche all'avanguardia per la sicurezza e la sostenibilità. Le attività si concentrano sull'ottimizzazione dei sistemi di nuova generazione, affrontando sfide cruciali come lo sviluppo di reattori ibridi fusione-fissione (progetto TRHYB) per garantire l'autosufficienza di trizio, e sulla definizione di protocolli avanzati per il monitoraggio ambientale e la dosimetria, coadiuvati dal machine learning. Questo filone, supportato dal potenziamento delle infrastrutture laboratoriali per l'impiego di sorgenti gamma e neutroniche, fornisce strumenti trasversali essenziali per la calibrazione dei sensori e la caratterizzazione dei materiali, alimentando una sinergia diretta e continua proprio con le ricerche in ambito medico e storico-artistico.

La linea di ricerca **Neuroscienze e Neuroimaging quantitativo** ha già conseguito importanti traguardi sia in ambito metodologico che clinico. Riguardo lo studio dell'energetica cerebrale, supportato da fondi regionali e PNRR, è stata messa a punto con successo un'avanzata tecnica per misurare la reattività cerebrovascolare (CVR) agli stimoli, permettendo l'acquisizione di dati preziosi su pazienti affetti da Alzheimer. È stato inoltre sviluppato e validato, grazie ai dati di risonanza, un dettagliato modello biofisico capace di simulare le risposte metaboliche e vascolari in condizioni di ipercapnia. Nei prossimi tre anni, l'obiettivo sarà verificare il potenziale clinico della CVR come indicatore neurodegenerativo e ricavare misure quantitative del consumo cerebrale di ossigeno. Parallelamente, nell'ambito dell'imaging del midollo spinale, i ricercatori hanno ottimizzato un rigoroso protocollo sperimentale e di analisi per esaminare soggetti sani e pazienti con lesioni traumatiche e infiammatorie, sia a livello cervicale che dorsale. Attualmente, con il supporto di fondi PNRR gestiti in sinergia con la Fondazione Santa Lucia, l'attenzione è rivolta al perfezionamento degli algoritmi di segmentazione delle lesioni, passaggio cruciale per localizzare il danno con estrema precisione e calcolare avanzate misure morfometriche locali. Infine, per quanto concerne il legame tra sostanza bianca e Alzheimer, l'uso combinato di risonanza magnetica di diffusione e

tecniche di imaging quantitativo ha permesso di ricostruire con successo la morfologia e le proprietà microstrutturali delle connessioni nervose. Sono state già caratterizzate preliminarmente le differenze tra soggetti sani e pazienti con vari gradi di declino cognitivo.

La linea di ricerca si pone l'obiettivo di investigare il complesso legame che unisce il metabolismo alla funzione cerebrale, sfruttando queste nuove conoscenze per una migliore caratterizzazione delle patologie neurodegenerative. La finalità è l'identificazione di biomarcatori precoci di degenerazione basati sulle neuroimmagini. Per raggiungere questo traguardo, le attività di ricerca si articolano in modo sinergico su due fronti complementari. Dal punto di vista metodologico, il team punta ad affinare le tecniche MRI di tipo microstrutturale e funzionale, migliorando sia le fasi di acquisizione sia le complesse pipeline di processamento dei dati. A questo si affianca lo sviluppo di sofisticati modelli biofisici e computazionali, indispensabili per un'interpretazione rigorosamente quantitativa dei risultati. Sul fronte applicativo, invece, l'intento è caratterizzare la complessa fisiologia cerebrale, studiandone le dinamiche funzionali, le fisiologiche alterazioni legate all'invecchiamento e le specifiche modulazioni indotte dalle patologie, analizzandone i substrati microstrutturali e metabolici. Nel corso del prossimo triennio, questi sforzi convergono verso traguardi specifici: lo sviluppo di tecnologie MRI per misurare la dinamica metabolica, il consumo di ossigeno e la reattività vascolare; l'analisi approfondita delle reti cerebrali; l'avanzamento tecnologico dell'imaging del midollo spinale; e, infine, la mappatura dettagliata delle connessioni della sostanza bianca per indagare l'insorgenza della malattia di Alzheimer. 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  $^{23}\text{Na}$  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 delle concentrazioni 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, 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 1000 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** si dedica allo sviluppo di metodologie d'indagine innovative per lo studio di materiali compositi di interesse storico-artistico. Le attività abbracciano un ampio spettro di manufatti, includendo il patrimonio librario, i metalli antichi, i reperti organici, le ceramiche archeologiche e le opere pittoriche. L'impiego sinergico di intelligenza artificiale e machine learning, applicato a complessi dati spettroscopici e di imaging, ha permesso di conseguire significativi risultati nella classificazione e nell'estrazione di benchmark microscopici. Nel campo dei beni librari, i ricercatori hanno messo a punto un protocollo diagnostico all'avanguardia basato sulla "data fusion" di spettroscopia multimodale (fluorescenza a raggi X e infrarossa) e algoritmi avanzati. Testato su un'opera di Giulio Romano conservata all'Istituto Centrale per la Grafica, questo approccio ha superato i tradizionali limiti analitici. Ha infatti permesso di discriminare con grande precisione i materiali di bottega, definendo un nuovo standard capace di rivelare le complesse correlazioni tra tecniche esecutive e dinamiche di degrado.

Per quanto concerne l'archeometallurgia, è stata dimostrata l'efficacia di un nuovo approccio nello studio delle leghe dell'antico Egitto, combinando diffrazione, fluorescenza a raggi X e machine learning. L'analisi ha riguardato dodici oggetti in lega di rame del corredo funerario di Kha e Merit (XVIII dinastia), custoditi al Museo Egizio di Torino. Lo studio ha fornito dettagli inediti sui processi di lavorazione di questi manufatti, ritenuti tra i più sofisticati del Nuovo Regno. Parallelamente, il progetto PRIN 2022 SLOW SUMER ha permesso di sviluppare un protocollo innovativo per studiare i materiali organici legati a pratiche di riparazione e riciclo nella civiltà sumera. L'integrazione di imaging, FTIR e modelli predittivi ha decodificato la struttura molecolare di reperti in bitume, mentre è in sviluppo un'ulteriore metodologia per analizzare ossa combuste e resti faunistici.

Nel settore ceramico, un nuovo framework analitico ha identificato biomarcatori lipidici nei reperti della città romana di Peltuinum. Unendo la spettroscopia ATR-FTIR al machine learning, sono stati isolati i complessi segnali molecolari di resine e oli degradati, superando le interferenze del suolo archeologico. Questo metodo non distruttivo indaga le interazioni tra residui organici e matrici inorganiche, permettendo di ricostruire antiche pratiche culinarie e rituali. Per le opere pittoriche, si sta invece sviluppando una metodologia che fonde indagini XRF, FTIR, imaging iperspettrale e intelligenza artificiale per caratterizzare le tecniche esecutive dei dipinti a olio. Le attività di sviluppo metodologico proseguono ininterrottamente sia sfruttando la strumentazione del laboratorio CREF, sia esplorando la neutronica applicata ai Beni Culturali. Questo avviene tramite il nuovo laboratorio Sorgenti, in collaborazione con la linea di Fisica Nucleare per l'Energia, e attraverso l'accesso a large-scale facilities internazionali.

La linea di ricerca dedicata a **Fisica Nucleare per l'Energia, l'Ambiente e la Radioprotezione** ha come obiettivo primario quello di creare un solido ponte tra la ricerca nucleare e le grandi sfide contemporanee, quali la transizione verso un'energia pulita, la tutela della salute e la salvaguardia ambientale.

La finalità è sviluppare tecnologie che rendano l'energia nucleare del futuro sempre più sicura e sostenibile, affinando contestualmente gli strumenti per il monitoraggio accurato della radioattività, sia essa di origine naturale o artificiale.

Dal punto di vista tecnico, le attività si sviluppano fluidamente su tre fronti interconnessi.

In ambito energetico, il progetto contribuisce attivamente allo sviluppo di sistemi ibridi fusione-fissione, come evidenziato dal progetto TRHYB. In questo contesto, i ricercatori studiano le alterazioni strutturali dei materiali esposti a campi di radiazione di neutroni veloci attraverso l'uso combinato di simulazioni avanzate e test sperimentali. Sul fronte della radioprotezione, l'innovazione passa per l'integrazione dell'intelligenza artificiale: lo sviluppo di nuovi metodi di lettura basati sul machine learning per i sensori di radiazioni ionizzanti (come i rivelatori CR39) permette di estrarre dati cruciali e di misurare con estrema accuratezza l'esposizione a minacce invisibili, come il gas Radon. Infine, per quanto riguarda la tutela del territorio, si lavora al continuo perfezionamento di tecniche di spettrometria gamma e di monitoraggio neutronico ad alta risoluzione, strumenti fondamentali per l'analisi in tracce di contaminanti ambientali.

### 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 fino all'Astrofisica Nucleare con Sorgenti Innovative.

Il progetto di ricerca sulle **Tecnologie Fotoniche e Intelligenza Artificiale** mira a sviluppare macchine di calcolo ottico innovative che permettano di superare i limiti delle macchine di calcolo digitali tradizionali, in modo da essere più performanti e consumare meno energia. All'interno di questo progetto di ricerca si articolano sia attività sperimentali sia attività teoriche.

#### ***Calcolo ottico tramite scattering multiplo di luce e generazione di seconda armonica***

Il laboratorio è stata realizzata la 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). Utilizzando gli stessi materiali, nell'ultimo anno è stata implementata un'operazione di ottimizzazione della fase pompa per la focalizzazione della luce non lineare di seconda armonica. Questa operazione è stata implementata per la prima volta in trasmissione (non in riflessione) e ha permesso di comprendere più approfonditamente le capacità di elaborazione contenute nel tensore non lineare di trasmissione del mezzo. Nel corso dello studio, è stata osservata una nuova legge di scala per il guadagno (enhancement) massimo di intensità focalizzata della luce non lineare in funzione dei canali di input. È in corso la scrittura di 1-2 articoli per la pubblicazione dei risultati.

#### ***Calcolo ottico tramite interferometria***

È stata realizzata una “photonic extreme learning machine” che utilizza l'interferometria per elaborare informazione costituita da numeri complessi. L'architettura di calcolo ottico utilizza la misura del pattern di interferenza creata dall'input e dal fascio di riferimento seguita dalla misura della fase “wrapped” del segnale. La macchina permette di classificare pattern spaziali binari che differiscono per una fase globale e anche per minime variazioni di contrasto. È in corso la scrittura di 1 articolo per la pubblicazione dei risultati.

#### ***Classificatore ottico di prossimità numerica***

È stata realizzata una macchina ottica capace di quantificare il livello di prossimità tra due numeri reali. La macchina utilizza otticamente la rappresentazione binaria dei numeri reali, codificati sulla fase della luce da una successione di fasi 0 per 0 e di fasi  $\pi$  per 1. Maggiore è il numero di fasi codificate, maggiore è la precisione decimale del numero. Sono stati ottenuti risultati sperimentali che confermano il funzionamento del progetto nel caso di codifica a 8 bit. È stata fatta domanda di brevetto.

#### ***Sistemi di oscillatori parametrici accoppiati***

L'attività teorica ha analizzato due aspetti principali di sistemi di oscillatori parametrici accoppiati, sempre nel contesto generale di usare oscillatori parametrici per simulare sistemi di spin, principalmente o binari (Ising) o vettoriali (hyperspins). Il primo aspetto riguarda l'analisi quanto-meccanica di pochi (da uno a tre) oscillatori parametrici ottici. L'analisi viene effettuata basandosi sul formalismo dei sistemi dissipativi aperti (Lindblad master equation) e lo stato quantistico viene numericamente ottenuto usando metodi numerici di diagonalizzazione esatta. Il secondo aspetto riguarda invece il prosieguo dello studio sulla macchina di hyperspin (introdotta nel 2022) usando oscillatori puramente classici. Lo studio propone un metodo di “equalizzazione delle ampiezze degli hyperspin” ispirato a metodi simili nelle macchine di Ising per sistemare un aspetto rimasto aperto nei lavori precedenti sulla macchina di hyperspin. Sono stati pubblicati 4 articoli su queste tematiche. Nel futuro si prospetta la possibilità di realizzare una macchina di Ising fotonica con interazione a multi-corpo; Dal punto di vista teorico l'inclusione di algoritmi quantistici potrà aumentare la velocità di calcolo, oltretutto suggerire innovativi metodi di crittografia.

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. All'interno del Progetto EEE è nata la Missione PolarquEEEst per la quale sono stati costruiti rivelatori a scintillazione trasportabili e compatti per lo studio e monitoraggio del flusso dei raggi cosmici anche a latitudini estreme. Tre di tali rivelatori nel 2019 sono stati installati nella base di Ny-Ålesund, alle isole Svalbard (Norvegia), presso la stazione Dirigibile Italia, per lo studio e monitoraggio continuo del flusso dei

raggi cosmici a latitudini estreme. Dal 2024 la rete nazionale EEE ha ripreso l'attività di monitoraggio del flusso di raggi cosmici, dopo una fase di ricerca e sviluppo e ammodernamento dei rivelatori. Nel 2024 e nel 2025 sono stati rivelati, congiuntamente ai rivelatori situati alle Svalbard, diversi Forbush decrease, diminuzioni del numero di raggi cosmici su scale temporali di qualche giorno legati a tempeste solari. Le misure hanno permesso studi in collaborazione con altri esperimenti internazionali di monitoraggio dei neutroni cosmici. Sono proseguiti, con i rivelatori alle Svalbard, gli studi sulla periodicità annuale (effetto estate inverno) e su effetti minori e su effetti legati al profilo di temperatura dell'atmosfera. La prosecuzione della campagna di misura a Ny-Ålesund permetterà di coprire l'intera durata del ciclo solare (11 anni) e continuare gli studi di periodicità in corso. Nel 2025 con una campagna di misure in auto da Bologna a Tromsø (Norvegia) è stata completata la misura del flusso dei raggi cosmici in funzione della latitudine nell'intervallo che va da  $35^\circ$  a  $82^\circ$ . Sono in corso test preliminari su nuovi rivelatori compatti e trasportabili con capacità di tracciamento dei raggi cosmici per il potenziamento della rete EEE.

La linea di ricerca relativa alla **Cinematica e Dinamica delle Galassie** nel corso del 2025 ha prodotto risultati rilevanti sia sul piano metodologico sia su quello dell'interpretazione fisica dei dati osservativi e simulativi.

### **1. Caratterizzazione del campo di velocità fuori dal piano della Via Lattea**

È stata sviluppata e applicata una nuova analisi sistematica del campo di velocità di rotazione della Via Lattea al di fuori del piano galattico. È stato dimostrato che lo studio della dipendenza verticale della velocità di rotazione fornisce vincoli stringenti sulla distribuzione di massa totale della Galassia, permettendo in particolare di discriminare tra diversi modelli di materia oscura.

In questo contesto, è stato testato il modello di dark matter disk recentemente introdotto dal nostro gruppo, mostrando come esso produca firme cinematiche specifiche osservabili fuori dal piano.

La metodologia è stata applicata ai dati di Gaia DR3 e i risultati sono attualmente in fase di referaggio (Sylos Labini & Capuzzo Dolcetta, submitted, 2026).

### **2. Introduzione di un nuovo strumento statistico per la quantificazione delle anisotropie**

È stato introdotto un nuovo strumento statistico per la quantificazione delle anisotropie in distribuzioni di particelle, progettato per essere sensibile a deviazioni anche deboli dall'isotropia su diverse scale spaziali.

Tale metodo è stato applicato alle simulazioni cosmologiche ad N-corpi, consentendo di identificare anisotropie già presenti nelle condizioni iniziali delle simulazioni. Il risultato principale è che queste anisotropie, spesso trascurate, vengono amplificate in modo significativo durante l'evoluzione dinamica non lineare, influenzando la formazione delle strutture su larga scala.

Questo lavoro ha portato alla pubblicazione di un articolo su Physical Review D (Sylos Labini, Phys. Rev. D 113, 023510, 2026).

### **3. Analisi della distribuzione delle galassie su grande scala con i dati DESI**

È stata condotta un'analisi dettagliata della distribuzione spaziale delle galassie utilizzando la prima tranche di dati della survey DESI. Lo studio evidenzia la presenza di fluttuazioni di ampiezza elevata su scale cosmologiche e mostra che la distribuzione delle galassie rimane disomogenea fino a scale dell'ordine di 400 Mpc. Questi risultati estendono e rafforzano conclusioni precedenti ottenute con survey di dimensioni più ridotte, fornendo nuove evidenze osservative grazie alla qualità e alla statistica senza precedenti dei dati DESI. I risultati sono stati accettati per la pubblicazione su Astronomy & Astrophysics (Sylos Labini & Antal, 2026, in press).

Nel corso del 2026, la linea di ricerca si concentrerà sui seguenti obiettivi principali:

#### **1. Studio dei campi di velocità di galassie esterne e test del modello di dark matter disk**

Estensione dell'analisi cinematica sviluppata per la Via Lattea a galassie esterne, con l'obiettivo di testare la validità e la generalità del modello di dark matter disk in contesti galattici differenti.

#### **2. Studio delle condizioni iniziali delle simulazioni cosmologiche ad N-corpi**

Analisi critica delle condizioni iniziali comunemente adottate nelle simulazioni cosmologiche e sviluppo di nuovi metodi per la loro generazione, con particolare attenzione al controllo delle anisotropie e delle correlazioni spurie introdotte dalle procedure standard.

### **3. Analisi delle anisotropie nella distribuzione delle galassie su larga scala**

Applicazione dei nuovi strumenti statistici sviluppati allo studio delle anisotropie nella distribuzione osservata delle galassie, combinando dati DESI e simulazioni numeriche, al fine di comprendere l'origine fisica delle strutture anisotrope e il loro impatto sui test cosmologici standard.

La linea di ricerca sui **Problemi Aperti in Meccanica Quantistica (PAMQ)** prevede un programma integrato teorico e sperimentale volto ad affrontare questioni fondamentali della meccanica quantistica e della sua possibile unificazione con la gravità, con un impatto diretto sullo studio delle simmetrie fondamentali del Modello Standard. Ad oggi, i due principali filoni teorici che prevedono una possibile violazione della connessione spin-statistica sono rappresentati dalle parastatistiche, come nel modello “Quon”, e dalla Gravità Quantistica (QG). In questo contesto è stato completato l'upgrade dell'esperimento VIP-sistemi-aperti; è stato pubblicato il limite più stringente al mondo sul modello Quon; inoltre, i modelli di QG basati su theta-Poincaré e su Minimal Length sono stati testati fino a un decimo della scala di Planck, ottenendo i limiti sperimentali più stringenti attualmente disponibili. Per quanto riguarda i modelli di collasso spontaneo, PAMQ ha pubblicato i limiti sperimentali più forti sull'intera classe dei modelli più accreditati (GRW, CSL, DP e Karolyhazi), falsificando i modelli GRW e Karolyhazi, nonché la generalizzazione non-Markoviana del CSL, di cui abbiamo dimostrato la natura gravitazionale. L'obiettivo futuro di PAMQ è testare con risoluzione progressivamente crescente le simmetrie fondamentali del Modello Standard e i modelli più promettenti di unificazione tra gravità e meccanica quantistica. Nello specifico, è stato completato lo sviluppo del prototype setup basato su un rivelatore attivo Broad-Energy Germanium. Sono stati inoltre sviluppati algoritmi dedicati basati su CNN per l'analisi della pulse shape, la calibrazione e la selezione degli eventi. Questo consentirà di testare i principali modelli di Gravità Quantistica fino alla scala di Planck. Inoltre, sulla base del modello fenomenologico da noi sviluppato per le estensioni non-Markoviane dei modelli di collasso, saremo in grado di testare, per la prima volta, il meccanismo fisico responsabile del collasso della funzione d'onda.

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. Al fine di ideare e realizzare una campagna di misure volta all'estrazione delle osservabili di interesse presso le facility laser - presenti e future - dei Laboratori Nazionali di Frascati, nel corso del 2025 è stato realizzato uno studio sulle caratteristiche dell'equipaggiamento di cui dotare il setup sperimentale da installare presso FLAME, con particolare attenzione al nozzle, ovvero al sistema di iniezione del gas e al controllo criogenico dello stesso per ottimizzare l'assorbimento da parte delle molecole di deuterio della radiazione elettromagnetica. In parallelo, è in via di definizione l'integrazione del sistema sulla camera di scattering di FLAME presso gli LNF, per la quale sarà necessario realizzare un nuovo coperchio che possa accogliere il sistema di flange necessario all'installazione del nozzle. Per quanto riguarda l'apparato di rivelazione, verranno completati gli studi sul TimePix (<https://home.cern/tags/timepix>), e verrà finalizzata l'identificazione degli altri rivelatori, nonché dei sistemi complementari per una ricostruzione efficace dello stato finale. Il 2027 verrà dedicato alla caratterizzazione dei rivelatori per la ricostruzione dei prodotti di reazione della fusione del deuterio, in particolare ioni deuterio e neutroni, mentre nel 2028 si vorrebbero effettuare le prime misure dei processi di fusione.

## **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, l'installazione "1934-Annus mirabilis" e la realizzazione di un docufilm dedicato a Ginestra Giovene in collaborazione con la casa editrice Zanichelli.

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 2026, in occasione del centenario della cattedra di Fisica teorica a Roma, sulla quale salì Enrico Fermi, si prevede una ricerca specifica per la realizzazione di un podcast in collaborazione con RaiPlay Sound.

Sta proseguendo il lavoro sulla figura di Arturo Malignani e sul suo brevetto per le lampadine elettriche, finalizzata a una pubblicazione storico-scientifica.

Sulla base di documenti archivistici, si sta inoltre realizzando una ricerca sulla figura di Emilio Segrè e sul lavoro che ha portato al Nobel del 1959.

Infine, si sta approfondendo la figura e l'opera di Laura Capon Fermi, con particolare attenzione al suo ruolo di *independent scholar* a partire dal 1955.

Si continueranno ad approfondire le traiettorie scientifiche e accademiche poco studiate di alcuni dei personaggi legati a Via Panisperna. A questo proposito, è previsto lo studio del ruolo avuto da Pontremoli nell'organizzazione, in veste di segretario, del celebre congresso internazionale dei fisici, svoltosi a Como nel 1927. Un altro tema di ricerca sarà l'attività scientifica di Oscar D'Agostino, con l'obiettivo di studiare, tra le altre cose, le motivazioni che portarono allo scioglimento del gruppo nel 1935. In ultimo si studierà 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.

In vista del bicentenario della morte di Alessandro Volta, si intende infine proseguire lo studio dello sviluppo della meccanica quantistica in Italia attraverso l'analisi del contributo della Fondazione Alessandro Volta, annessa alla R. Accademia d'Italia, all'organizzazione di congressi internazionali di fisica in Italia.

**La strategia di comunicazione** del CREF ha ottenuto risultati significativi nel connettere passato, presente e futuro. Questo percorso è iniziato con un profondo lavoro di analisi del brand, che ha permesso non solo di definire una visual identity dinamica — capace di far coesistere l'eredità storica di via Panisperna con la modernità della ricerca — ma anche di delineare con precisione gli obiettivi strategici dell'Ente nel lungo periodo. In quest'ottica, è stato rinnovato il sito web istituzionale ed è stato creato un portale dedicato al Museo, moderno e interattivo, che semplifica le prenotazioni e offre materiali di approfondimento.

La consapevolezza pubblica della storica Palazzina è cresciuta esponenzialmente grazie a eventi e conferenze, sostenuta da una narrazione che mette in luce non solo il museo, ma anche le attuali linee di ricerca, rendendo la scienza di frontiera accessibile a tutti. La divulgazione è stata potenziata tramite cicli di incontri che intrecciano l'aspetto storico culturale con quello scientifico, tutti disponibili sul canale YouTube dell'ente. Un ruolo centrale è affidato alla gestione dei canali social e della newsletter istituzionale, strumenti diventati fondamentali per nutrire e coinvolgere la community del CREF, come dimostrato dalla costante crescita dei follower e del tasso di interazione. Le collaborazioni con i media (Rai, Mediaset) e la partecipazione a eventi nazionali (Quantum Weeks, Rome Future Week) hanno infine consolidato il CREF come punto di riferimento nel panorama scientifico italiano. Per il futuro la comunicazione punta a: semplificare il racconto dell'attività di ricerca, diffondendone i risultati per attrarre talenti e promuovere il CREF come centro di formazione d'eccellenza; facilitare l'accesso alla visita e arricchire l'esperienza digitale (pre e post-visita), con un'idea di museo scientifico dinamico e inclusivo; offrire seminari per migliorare le competenze divulgative dei ricercatori e creare contenuti mirati per pubblici diversi, mantenendo sempre il massimo rigore scientifico. L'obiettivo generale resta quello di rafforzare l'identità dell'Ente come luogo d'incontro unico tra storia e innovazione, fornendo informazioni chiare e costruendo un legame sempre più solido con il pubblico e la comunità scientifica.

## 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 articola in linee di ricerca strettamente interconnesse, focalizzate sulla comprensione e modellazione multiscale di sistemi complessi naturali. Le principali direttrici includono: (i) lo sviluppo e il consolidamento del Gruppo di Rinormalizzazione Laplaciano per l'analisi multiscale di reti complesse eterogenee; (ii) applicazioni interdisciplinari in diversi ambiti delle scienze naturali; (iii) lo sviluppo di tecniche avanzate di teoria dei sistemi complessi e Reservoir Computing per l'analisi dell'attività cerebrale; (iv) l'impiego di modelli stocastici e strumenti di machine learning per lo studio delle dinamiche climatiche su scale temporali brevi. Il progetto mira a rafforzare il ruolo del CREF come riferimento internazionale nello sviluppo di una descrizione geometrica della criticità e dei fenomeni di scala in sistemi complessi e disordinati.

Comprendere l'organizzazione multiscale delle reti complesse è cruciale per analizzare fenomeni collettivi dinamici in ambiti quali il funzionamento cerebrale, le crisi finanziarie e la diffusione epidemica. Le tecniche tradizionali di rinormalizzazione risultano poco adatte a reti generiche, poiché non tengono conto dell'eterogeneità locale e della struttura microscopica delle connessioni. In questo contesto, il Gruppo di Rinormalizzazione Laplaciano (LRG) rappresenta uno degli approcci più efficaci per trattare reti fortemente eterogenee preservando informazione locale e organizzazione multiscale.

Il progetto mira al consolidamento e all'estensione dell'LRG verso classi di universalità dinamiche e alla sua applicazione a reti biologiche, ecologiche e ad altri sistemi complessi. Particolare attenzione sarà dedicata all'identificazione di strutture mesoscopiche e marker precoci di transizioni critiche. Risultati recenti suggeriscono inoltre che fenomeni critici estesi possano emergere da vincoli puramente geometrici e topologici, indicando che l'organizzazione strutturale gioca un ruolo centrale nella dinamica dei sistemi complessi. Inoltre, il progetto esplorerà la categorizzazione di ensemble di grafi e l'analisi di reti neurali artificiali, contribuendo alla progettazione di architetture modulari e robuste. Nel complesso, il progetto contribuisce a strutturare un quadro teorico e applicativo per l'analisi multiscale delle reti complesse, favorendo l'avanzamento della conoscenza in diversi domini scientifici.

#### ***Stato dell'arte***

#### **Fisica Statistica e Gruppo di Rinormalizzazione Laplaciano per reti complesse**

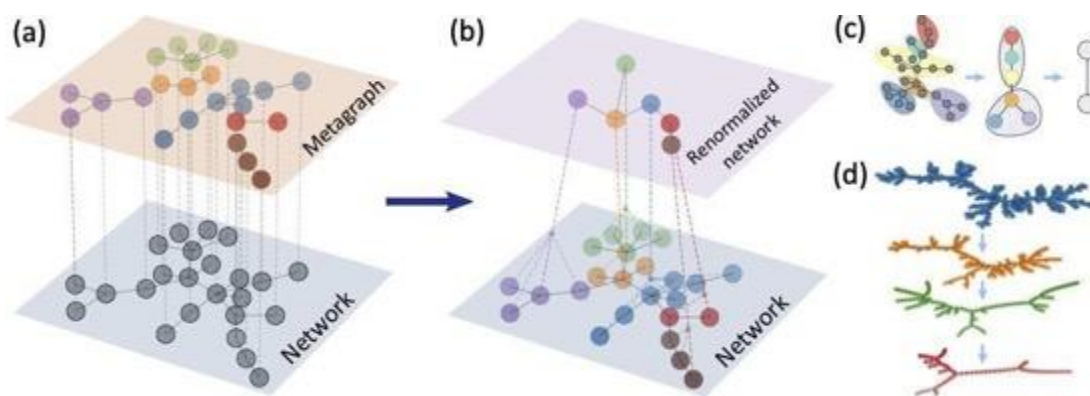
Negli ultimi anni, un gruppo di ricercatori del CREF ha sviluppato un approccio innovativo per studiare la struttura delle reti complesse, ossia reti con nodi aventi connettività eterogenea e non locale. Questo approccio si basa sulla tecnica della rinormalizzazione e delle trasformazioni di scala, originariamente sviluppata nella fisica statistica per spazi omogenei e nella teoria dei campi per la fisica delle particelle (Premio Nobel per la Fisica 1982 a K. G. Wilson). Gli sviluppi realizzati permettono di semplificare iterativamente la rete a diverse scale di risoluzione, identificando gruppi di nodi "simili" fortemente connessi tra loro a ciascuna scala. Ciò consente di studiare come le proprietà intrinseche della rete evolvano durante la procedura di rinormalizzazione.

Questo lavoro, portato avanti in collaborazione con l'IMT di Lucca e l'Università Ca' Foscari di Venezia, ha ottenuto un notevole riconoscimento nella comunità scientifica, come testimoniato dalla copertina di *Nature Physics* (maggio 2023) e da un articolo di *News & Views* sulla stessa rivista. Tali risultati hanno contribuito a consolidare l'LRG come riferimento nello studio multiscale delle reti complesse.

Negli sviluppi più recenti, l'LRG è stato utilizzato per caratterizzare reti invarianti di scala, identificare punti fissi strutturali e analizzare flussi di rinormalizzazione su reti disordinate o diluite. Questi risultati indicano che il formalismo può essere esteso verso una descrizione geometrica della criticità, in cui proprietà topologiche e vincoli strutturali giocano un ruolo analogo a quello del disordine nei sistemi fisici tradizionali. In modo complementare, approcci spettrali basati su autovettori laplaciani hanno mostrato la capacità di descrivere e ricostruire pattern metastabili in reticoli di spin, evidenziando un legame diretto tra geometria spettrale e strutture topologiche emergenti.

Un'importante conseguenza di questa teoria è l'analisi mesoscopica dei sistemi eterogenei, finora prevalentemente basata sull'uso di modelli nulli per studiare l'emergere di strutture significative. L'analisi della modularità, che ha richiesto notevoli sforzi da parte della comunità delle reti complesse negli ultimi vent'anni, ha trovato una nuova prospettiva con l'introduzione dell'LRG. Questo approccio consente di analizzare le strutture interne delle reti complesse identificando proprietà e dinamiche non evidenti con metodi tradizionali, con applicazioni potenziali nella diffusione epidemica, nella gestione dell'energia e nell'analisi dell'attività cerebrale.

Nell'ambito delle applicazioni della fisica statistica alle reti complesse, sviluppate dal CREF in collaborazione con l'IMT di Lucca e l'Università di Roma "Tor Vergata", si colloca una linea di ricerca di grande impatto nelle scienze naturali e sociali. Questa linea si concentra su modelli stocastici di grafi eterogenei, ispirati alle tecniche di massima entropia vincolata e alle statistiche di ensemble. Tali modelli sono utilizzati sia per costruire modelli nulli che preservano proprietà statistiche di basso livello (utili a validare proprietà di ordine superiore nelle reti reali), sia per ricostruire reti reali a partire da informazioni topologiche parziali.



**Figura: 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 un albero casuale.

### Approccio di sistemi complessi per sistemi biologici, ecologici e climatici

La ricerca condotta in collaborazione con l'IMT di Lucca e l'Università di Venezia ha analizzato la correlazione tra le proprietà geometriche di distribuzione delle specie vegetali e la robustezza dei sistemi ecologici, utilizzando approcci basati su reti complesse, fisica statistica e processi stocastici. Questi studi hanno fornito benchmark rilevanti per il settore.

Nell'ambito delle neuroscienze, in collaborazione con l'IMT Alti Studi di Lucca e l'Università Bocconi di Milano, è stato condotto uno studio sull'estrazione del segnale da serie temporali di attività cerebrale ottenute tramite risonanza magnetica funzionale (fMRI). Parallelamente, sono stati avviati progetti con l'Istituto Superiore di Sanità e il BioBizkaia Health Research Institute di Bilbao, focalizzati sull'applicazione di metodi di sistemi dinamici, processi stocastici e tecniche di machine learning, tra cui il reservoir computing, per l'analisi delle serie temporali fMRI.

In seguito alla crisi Covid, è stata avviata una collaborazione tra il CREF e il Ruđer Bošković Institute di Zagabria per lo sviluppo di modelli epidemiologici compartimentali. Successivamente, la collaborazione si è estesa allo studio delle interazioni epidemiche di alto ordine e delle transizioni di fase esplosive, in collaborazione con l'IFISC di Mallorca. Questi studi mirano a comprendere la propagazione delle malattie in sistemi disordinati e a caratterizzare il ruolo delle interazioni di alto ordine nelle dinamiche epidemiche.

A partire dal 2023 sono stati avviati studi sull'applicazione di metodi avanzati all'analisi delle serie temporali climatiche, in collaborazione con il Copernicus Climate Change Service (C3S) della Commissione Europea, attualmente in corso.

### ***Finalità e obiettivi***

Il progetto si propone un duplice obiettivo:

1. **Sviluppo di metodi generali:** Sviluppare e consolidare modelli e metodi di fisica statistica, in equilibrio e fuori equilibrio, per l'analisi multiscale di reti complesse e serie temporali ad alta dimensionalità. Tali strumenti saranno applicabili in ambiti naturali, biomedici e socio-economici.
2. **Applicazioni ad alto impatto:** Validare tali metodi su dati reali in ambiti biomedici, sociali, ecologici e ambientali, estendendoli anche a sistemi di intelligenza artificiale e apprendimento su reti complesse.

Un focus particolare sarà dedicato all'ulteriore sviluppo della tecnica dell'LRG, avanzandone la formulazione teorica e computazionale. Questo consentirà di studiare in modo sistematico le proprietà di organizzazione e correlazione intrinseca di sistemi naturali (reti biologiche ed ecologiche) e di caratterizzarne l'evoluzione dinamica. Le applicazioni dell'LRG saranno inoltre estese a reti sociali, economiche e a sistemi di intelligenza artificiale, rafforzando l'integrazione tra fisica statistica e metodi di apprendimento. Un obiettivo trasversale del progetto è la costruzione di strumenti generali di analisi multiscale applicabili a classi ampie di sistemi complessi, indipendentemente dal dominio applicativo.

### ***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 multiscale di reti complesse generiche. L'LRG costituisce oggi uno strumento teorico maturo per l'analisi dell'organizzazione multiscale dei sistemi complessi. Risultati recenti hanno mostrato come l'LRG permetta di identificare strutture invarianti di scala e classi strutturali di universalità, nonché di analizzare transizioni tra regimi dimensionali differenti in reti disordinate o diluite.

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

1. **Estensione della teoria fisico-statistica.** Completare la formulazione fisico-statistica del metodo, con particolare attenzione alla descrizione locale della teoria e all'estensione delle relazioni di Fluttuazione–Dissipazione all'LRG. Questo consentirà di studiare processi diffusivi dipendenti dal tempo e di rilevare localmente scale di correlazione e struttura microscopica della rete. Il formalismo include inoltre il caso di reti segnate, rilevante per la comprensione dei vetri di spin. In parallelo, svilupperemo un asse metodologico spettrale/topologico per la descrizione e ricostruzione di configurazioni metastabili in reticoli di spin e sistemi tipo spin-glass (Topological Pattern Reconstruction, TPR), con l'obiettivo di ottenere descrittori quantitativi e robusti di metastabilità e dinamiche di rilassamento.
2. **Riformulazione del problema della clusterizzazione.** Sviluppare approcci per la rilevazione di partizioni ottimali in reti di grandi dimensioni, fino a milioni di nodi. Tali metodi consentiranno l'analisi di dati e serie temporali mediante tempi di diffusione e modelli dinamici statistici, inclusi modelli epidemici e il modello di Kuramoto. L'obiettivo è studiare sistemi estensivi sotto trasformazioni di scala definite nel quadro fisico-statistico dell'LRG.
3. **Criticità geometrica e meccanismi border–bulk.** Studiare l'emergere di criticità estesa in sistemi in cui il rapporto tra nodi di bordo e nodi bulk non è trascurabile. Risultati recenti indicano che strutture gerarchiche o frattali possono generare regimi tipo Griffiths anche in assenza di disordine quenched, suggerendo un ruolo puramente geometrico nell'origine della criticità estesa. Questa linea mira a chiarire il ruolo della geometria della rete come meccanismo generativo universale, indipendentemente dalla presenza di disordine quenched.

## 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 sia negative. Il progetto prevede l'applicazione di questo paradigma teorico per studiare reti reali e le dinamiche emergenti al loro interno.

Dal punto di vista dei sistemi fisici, l'uso dell'LRG per reti segnate permetterà di esplorare sistemi caratterizzati dalla frustrazione delle interazioni, come i vetri di spin, analizzando l'evoluzione delle dinamiche di diffusione. Parallelamente, in collaborazione con l'Università di Granada, verranno estesi studi sulle fasi di Griffiths nelle neuroscienze. Utilizzando l'LRG, saranno ulteriormente sviluppati modelli predittivi per l'emergere di tali fasi, associate a fenomeni non-ergodici ed effetti di memoria nei sistemi disordinati.

Questa linea contribuisce anche all'analisi di sistemi di apprendimento complessi, collegando descrizioni meccanico-statistiche e strumenti di machine learning.

### 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 moduli di geni fortemente interagenti e analizzarne l'organizzazione su diversi livelli di risoluzione, contribuendo alla comprensione di meccanismi multigenici associati a fenotipi e stati patologici.

Un altro progetto, avviato nel 2023, riguarda lo studio multiscala delle reti cerebrali funzionali ottenute da serie temporali fMRI. In questo caso si combineranno teoria delle reti complesse e tecniche di machine learning (incluse reti neurali ricorrenti e reservoir computing) per l'identificazione di sottotipi clinici in disturbi psichiatrici (depressione, autismo, schizofrenia), basati su neuroimmagini, connettività e sintomi. In collaborazione con il BioBizkaia Institute, l'LRG sarà utilizzato per clustering non supervisionato e per l'analisi multiscala della variabilità inter-soggetto.

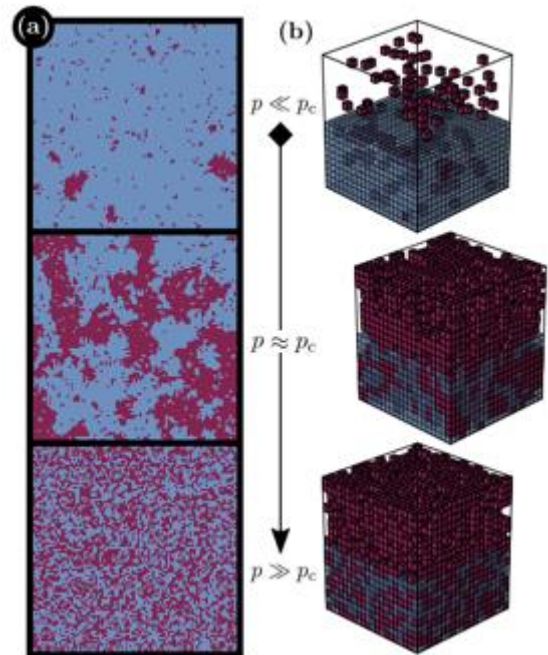
Recenti sviluppi metodologici indicano che approcci di coarse-graining strutturale combinati con filtraggio spettrale permettono di separare rumore e struttura funzionale, migliorando la stima di connettività in condizioni di campionamento limitato.

Un ulteriore 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. 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.

Infine, l'LRG sarà applicato a reti di distribuzione elettrica, reti ecologiche e di comunicazione e a reti di contagio. In ambito epidemiologico, l'analisi di reti di contagio consentirà di identificare nodi chiave per strategie di vaccinazione mirate. Analogamente, saranno sviluppate applicazioni per la disinformazione online e per reti economiche (reti di produzione e interdipendenze settoriali).

### 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



**(a)** Suddivisione di un reticolo quadrato bidimensionale in base ai segni positivi e negativi del laplaciano segnato. Per un valore critico di link negativi, emerge un insieme di cluster frattali. **(b)** Suddivisione di un reticolo tridimensionale basata sui segni positivi e negativi del laplaciano segnato.

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 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 concettuale 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 può fornire strumenti per modellizzare 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. 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.

Gli approcci tradizionali non bastano a cogliere la complessità del mondo sociale in cui viviamo. La fisica, con la teoria dei sistemi complessi e la fisica statistica, offre strumenti quantitativi utili ad affrontare sfide socio-economiche, che spesso le discipline economiche tradizionali non riescono a interpretare.

La crescente disponibilità di Big Data e il sempre maggiore potere computazionale richiedono nuove metodologie in grado di identificare schemi e comportamenti emergenti che i modelli tradizionali non sono in grado di cogliere. I sistemi complessi offrono una cornice teorica per comprendere come interazioni locali producano fenomeni collettivi non lineari, analogamente a quanto accade in medicina o biologia. In questo contesto, il progetto non solo approfondisce le basi teoriche della complessità, ma propone applicazioni pratiche con impatti misurabili sull'economia, sulla società e sull'ambiente, creando un ponte tra ricerca accademica e politiche.

### ***Stato dell'arte***

Nel caso dei social networks, la teoria della complessità permette di esaminare fenomeni come la diffusione dell'informazione, la formazione di comunità e il ruolo delle strutture ricorrenti, mentre nell'Economic Fitness and Complexity si concentra sull'analisi delle capacità produttive e delle interazioni globali che determinano la competitività economica. Entrambi i contesti condividono la necessità di strumenti quantitativi avanzati, come reti complesse, algoritmi di Machine Learning e modelli basati su dati, per interpretare e prevedere i comportamenti collettivi.

La fisica, con la teoria dei sistemi complessi e la fisica statistica, ha fornito strumenti quantitativi essenziali per affrontare sfide socio-economiche che le discipline classiche spesso non riescono ad interpretare. Non è possibile condurre esperimenti diretti, ma si possono analizzare serie temporali e proprietà statistiche per prevedere il comportamento collettivo dei sistemi. Con questa visione in mente, il progetto di Complessità Sociale ed Economica si articola nelle tre seguenti 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 (JRC).
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:** analizzano la struttura delle reti complesse per comprendere processi fondamentali (shock finanziari, cambiamento climatico, propagazione di malattie e informazione). Qui si sviluppano modelli nulli ispirati alla fisica statistica e alla teoria dell'informazione per distinguere segnali genuini da fluttuazioni casuali.

### ***Finalità e obiettivi***

**Economic Fitness:** Nel triennio 2026-28, il primo obiettivo è potenziare l'approccio EFC per affrontare temi concreti, legati a innovazione tecnologica, sviluppo economico e competitività territoriale, sostenibilità ambientale e sociale, mercato del lavoro e catene globali del valore, con particolare attenzione alle ricadute di policy di tali del lavoro di ricerca. Tale lavoro procederà in base agli obiettivi delle attività di ricerca individuali e dei progetti scientifici che coinvolgono i membri del gruppo. Tali attività richiederanno un sempre maggiore approfondimento dei fondamenti teorici della teoria delle reti e della complessità in

economia, l'integrazione di dati e metodi al fine di attivare una efficace integrazione tra fisica, economia, scienze sociali e computer science.

**Computational Social Science:** Le recenti ricerche hanno evidenziato strutture online (comunità discorsive, flussi di disinformazione, “camere d’eco”) grazie all’uso di modelli nulli, anche su piattaforme online su cui non erano mai state misurate. Parte di questa ricerca rientra nel progetto PRIN PNRR 2022 CODE, che studia l’interazione tra eventi offline (ad esempio, epidemie) e dinamiche di opinione nelle discussioni online.

**Metodi di analisi di Network Theory:** Le attività si concentrano sull’applicazione di modelli nulli a reti monopartite e bipartite derivati dalla Meccanica Statistica e dalla Teoria dell’Informazione attraverso un approccio di Maximum Entropy. Le metodologie da noi sviluppate permettono di filtrare il rumore e ricostruire le informazioni rilevanti a livello sia topologico che pesato.

### ***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. L’EFC oggi, 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”.

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. Un particolare focus sarà fatto sulla relazione tra nuove tecnologie e i ‘critical raw materials’.

*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, in continuazione col triennio 2023-2025, la Economic Fitness and Complexity Spring School aperta ad accademici e società civile.

**Computational Social Science:** Le ricerche si concentrano sull'identificazione e sull'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.

**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 alla 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.

Nell'ambito di questo progetto, si propone l'analisi del potenziale trasformativo dell'Intelligenza Artificiale (IA) attraverso un approccio marcatamente interdisciplinare, che integra la Computer Science, la scienza delle Reti e della Complessità, l'economia e la sociologia. La prospettiva adottata è duplice: in primo luogo, si indagheranno le potenzialità e i limiti dell'IA come strumento di analisi per le dinamiche sociali, tecnologiche ed economiche; in secondo luogo, si farà uso di tali metodologie per condurre studi innovativi in questi ambiti, superando l'impiego prevalente di approcci qualitativi a favore di un'analisi quantitativa rigorosa, essenziale per affrontare la loro intrinseca complessità.

Le attività includono lo sviluppo di nuove metodologie di addestramento per le reti neurali e la realizzazione di studi empirici su questioni di rilevanza economica e sociale, quali l'emergenza di traiettorie di innovazione (attraverso l'analisi dei brevetti), la dinamica di sostituzione e complementarità dell'IA nel mercato del lavoro e l'evoluzione delle opinioni all'interno delle comunità online. L'integrazione di basi quantitative e teoriche con l'analisi della letteratura proveniente dalle diverse discipline costituisce l'elemento essenziale per affrontare con rigore le sfide delineate.

#### ***Stato dell'arte***

Il panorama dell'Intelligenza Artificiale (IA) è in continua evoluzione, guidato dai progressi nei Modelli Linguistici di Grandi Dimensioni (LLM, come Gemini e ChatGPT) e nei Modelli di Diffusione (DM, come DALL-E e Midjourney). Questi strumenti generativi stanno ridefinendo la produzione di contenuti e l'elaborazione delle informazioni, ma i loro meccanismi interni rimangono solo parzialmente compresi.

La ricerca attuale è focalizzata non solo sulle capacità, ma anche sulle grandi incertezze: si dibatte sui limiti cognitivi, sui bias intrinseci, sulla robustezza rispetto a input malevoli e sull'interazione emergente tra gli AI-Agents. Parallelamente, lo sviluppo di modelli all'avanguardia comporta costi infrastrutturali esorbitanti (es. LLaMA3-70B ha richiesto circa 6.4 milioni di ore di calcolo GPU, con un costo stimabile oltre il mezzo miliardo di dollari per la sola infrastruttura).

Non potendo competere nella creazione di modelli di IA su larga scala, il CREF sfrutta la disponibilità di modelli open-source per concentrarsi su un campo di ricerca cruciale: la comprensione del loro funzionamento e l'esplorazione del loro potenziale applicativo. Questo include lo studio della loro capacità di adattamento a contesti non-stazionari (continual learning) e l'uso dell'IA come strumento di indagine quantitativa nelle dinamiche economiche, sociali e tecnologiche (ad esempio, per prevedere le evoluzioni professionali o analizzare dati non strutturati). Comprendere questi aspetti è essenziale per informare un'adozione di massa responsabile, mitigare i rischi e accelerare il progresso nelle applicazioni concrete.

### ***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***

Come anticipato sopra, il lavoro in questo progetto è diviso in due macroaree, descritte schematicamente in quanto segue.

#### **1. 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).**

L'utilizzo di Large Language Models (LLM) open-source consente l'analisi automatizzata di grandi volumi di dati non strutturati (brevetti, pubblicazioni, codice) per la mappatura geografica e semantica delle competenze tecnologiche. Questo approccio è impiegato per la previsione di traiettorie di innovazione tramite nuove combinazioni (recombinant innovation) e per connettere le indicazioni di policy con le capacità territoriali, in particolare per le politiche ambientali (es. materie prime critiche e riduzione dell'inquinamento industriale).

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

Si esplora la fattibilità di utilizzare gli LLM per raccogliere segnali e mappare dinamiche sociali (come lo scontento sociale e la disuguaglianza) a partire dai discorsi accessibili sulle piattaforme di social networking.

**Teoria della Creatività Artificiale.**

La ricerca si focalizza sul Continual Learning per l'integrazione progressiva di nuove informazioni, evitando il Catastrophic Forgetting. Contributi fondamentali includono il Dreaming Learning (pubblicato a NeurIPS 2024), che mitiga il Model Collapse e abilita l'esplorazione controllata di nuove configurazioni informative. A supporto, il lavoro teorico First-Extinction Law for Resampling Processes fornisce una descrizione analitica del Model Collapse. Si sviluppa inoltre il Lyapunov Learning (pubblicato a ICML 2025), basato

sull'Edge of Chaos, per estendere le capacità del Dreaming Learning a variabili multidimensionali complesse (es. cambiamento climatico). Applicazioni pratiche includono il progetto Duetto, un sistema avanzato che utilizza architetture Transformer e quantizzazione vettoriale per l'analisi e l'anticipazione in tempo reale del movimento umano nella danza.

## **2. Impatto socio-economico dell'IA**

### **Impatto sul mercato del lavoro.**

L'obiettivo è fornire una prospettiva quantitativa sull'impatto dell'IA sul lavoro, articolata in tre task: 1) Misurazione dell'Esposizione Occupazionale tramite l'analisi dei pitch di startup AI; 2) Identificazione delle Competenze Emergenti attraverso l'analisi di annunci di lavoro e repositories di codice (GitHub); 3) Studio di Opinione Pubblica ed Etica per comprendere l'influenza della fiducia sociale sull'adozione dell'IA. Metodologicamente si prevede l'uso di LLMs per connettere descrizioni di startup (da dataset come Crunchbase) e del contenuto dei repositories di codice (dal file readme) con descrizioni di attività occupazionali (da O\*NET) al fine di misurare l'attività di ricerca, sviluppo e finanziamento in ambito AI finalizzata all'automazione di tasks specifici.

### **Valori delle persone e Valori dell'IA.**

Si mira allo sviluppo di modelli di "Intelligenza Artificiale Responsabile" che riflettano i valori morali locali, con l'obiettivo di arginare i contenuti dannosi e favorire interazioni etiche. La ricerca analizza come i valori morali influenzino l'evoluzione delle opinioni nelle comunità online e in che misura gli "elementi base irriducibili" della morale siano rappresentati e compresi dagli algoritmi di IA, inclusi i BOT.

## **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 e coinvolgimento del 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 di analisi dell'accessibilità 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 l'intelligenza umana e quella artificiale, sviluppando metodi di IA non stazionaria per stimolare l'innovazione e la sostenibilità. Questo approccio interdisciplinare mira a ridefinire le modalità di risposta alle crisi sistemiche, offrendo soluzioni concrete per un futuro più resiliente.

Il nostro ambiente e le società affrontano trasformazioni strutturali spinte da cambiamenti climatici, globalizzazione e digitalizzazione, che minacciano la sicurezza planetaria. La recente pandemia ha reso evidente l'urgenza di un ripensamento radicale dei nostri stili di vita, dal rapporto tra le aree urbane e rurali al superamento dei limiti ecologici. La crisi ci ha proiettati in una realtà alternativa, permettendoci di sperimentare nuovi equilibri nel lavoro, nella scuola e nel tempo libero. In questo contesto, è prioritario colmare il divario tra la scienza e i decisori politici ed economici. L'obiettivo è identificare soluzioni tempestive che integrino tecnologie avanzate e pensiero creativo per gestire una transizione che cambierà in modo permanente le nostre abitudini.

### **Stato dell'arte**

La creatività è lo strumento chiave per riprogettare la società di fronte a sfide complesse. L'intelligenza artificiale attuale esplora questa direzione con modelli generativi (GANs, Transformers), ma resta limitata dalla dipendenza da dati esistenti e dalla mancanza di intenzionalità. Nell'infosfera, il bias di conferma e gli algoritmi di raccomandazione intrappolano gli utenti in echo chambers. Nonostante normative come il Digital Services Act, mancano soluzioni concrete per il pluralismo. Anche nella sostenibilità urbana, l'impatto della ricerca è spesso limitato; l'iniziativa JICS nasce per superare questi divari attraverso un approccio interdisciplinare.

### **Finalità e obiettivi**

L'iniziativa congiunta CREF-Sony (JICS) è un modello unico che unisce istituzioni pubbliche e laboratori aziendali. L'accordo mira a creare un'entità di ricerca che integri scienze, arti e imprese per guidare l'innovazione verso gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs). Il lavoro si articola su tre pilastri:

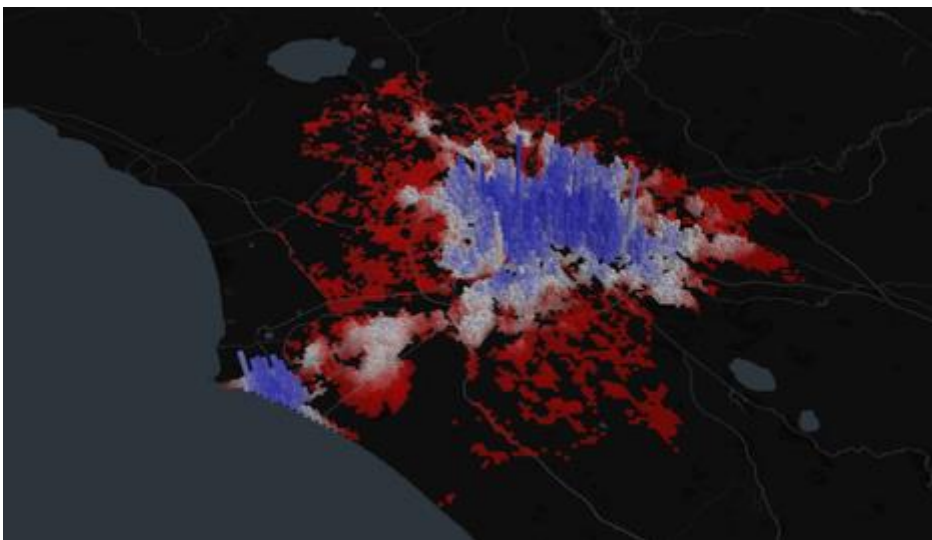
**Città sostenibili:** le trasformazioni in atto nelle nostre città rendono necessario un approccio strategico e intelligente per avanzare verso gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs). Questo progetto si propone di sviluppare tecnologie "what-if" per (i) analizzare l'accessibilità ai servizi con mezzi sostenibili, per migliorare l'inclusività e comprendere le dinamiche economiche nei contesti urbani; (ii) progettare e sperimentare scenari futuri per affrontare le sfide socio-economiche delle città; (iii) creare metriche avanzate, strumenti di modellazione e assistenti basati sull'intelligenza artificiale, che possano essere adottati da istituzioni e decisori politici a livello globale per ottimizzare la pianificazione urbana e ridefinire lo spazio cittadino.

**L'ecosistema dell'Informazione (Infosfera):** Il JICS si propone di analizzare e migliorare le dinamiche degli ecosistemi informativi, ambienti in cui l'accesso a un'informazione affidabile, pluralistica e di qualità sia favorito, nel rispetto dei principi fondamentali delle società democratiche. A tal fine, sviluppiamo strumenti in grado di monitorare la produzione e il consumo di informazione, analizzando l'attivazione di euristiche comportamentali, l'agenda setting e i sistemi di raccomandazione che influenzano la diffusione delle informazioni e la frammentazione del dibattito pubblico. Oltre all'analisi, il nostro obiettivo è tradurre la ricerca in soluzioni concrete, ovvero fornire strumenti ai diversi stakeholder (piattaforme digitali, media, utenti e policy maker) al fine di migliorare l'accesso a informazioni affidabili e diversificate e ridurre la formazione di camere dell'eco.

**AI e Machine Learning per l'innovazione (Creatività aumentata)** Il JICS si propone di studiare le interazioni tra l'intelligenza umana (HI) e l'intelligenza artificiale (AI) per favorire l'emergere di quella che potremmo definire "Creatività Aumentata", ovvero la creatività umana supportata da nuovi strumenti di AI. La sintesi tra HI e AI, realizzata dalla Creatività Aumentata, apre nuovi scenari per lo sviluppo di nuove idee e tecnologie per il miglioramento dell'umanità e la ricerca di soluzioni sostenibili alle attuali sfide sociali. L'effetto collaterale di questo processo, ancora agli inizi, sarà anche un ripensamento globale di ciò che oggi chiamiamo Intelligenza Artificiale, con l'obiettivo finale di favorire la nascita di una nuova generazione di agenti artificialmente intelligenti in grado di sostenere le imprese cognitive umane.

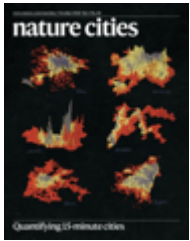
### **Stato e risultati attesi**

#### **Città sostenibili**



*Figura: 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. L'altezza delle colonnine indica la popolazione residente su ogni esagono in cui è divisa la città.*

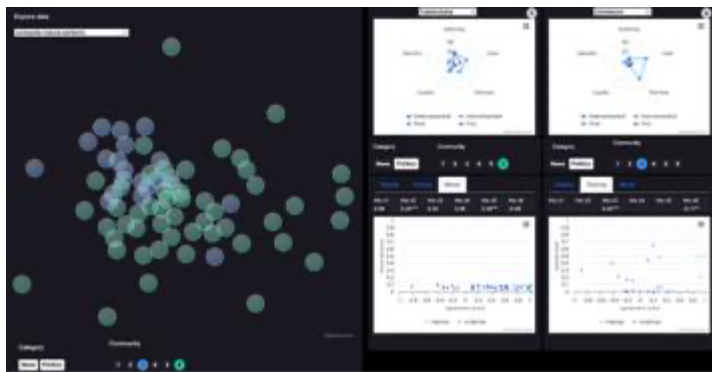
Il concetto di città dei 15 minuti favorisce la transizione ecologica riducendo le emissioni e migliorando la qualità della vita. JICS ha sviluppato una piattaforma avanzata (<https://whatif.sonycsll.it/15mincity/>) per mappare la prossimità urbana, la cui ricerca ha ottenuto rilevanza internazionale sulla copertina di Nature Cities. Utilizzando dati geolocalizzati e il framework Fitness and Complexity, il centro valuta l'impatto di nuove infrastrutture (metropolitane, ciclabili) sul tessuto socioeconomico. Un progetto pilota Smart-city utilizza i sensori intelligenti Sony IMX500 per analizzare in tempo reale i flussi veicolari e pedonali, creando misure di sicurezza agli incroci nel pieno rispetto della privacy.



### L'Ecosistema dell'Informazione (Infosfera)

JICS studia le distorsioni informative causate da incentivi sistemici. L'agenda setting dei media e meccanismi cognitivi come il confirmation bias riducono l'esposizione a prospettive diverse, trasformando gli algoritmi in "gatekeeper" che limitano il pluralismo. Adottiamo modelli di teoria dei giochi e fisica dei sistemi disordinati per anticipare i rischi di polarizzazione. Sviluppiamo sistemi di navigazione basati sulla curiosità per costruire "ponti" tra comunità divise. Strumenti come la Piattaforma Taiwa (<http://162.19.65.115/>) analizzano il dibattito online (engagement, tossicità, morale), mentre il relativo plugin Chrome suggerisce in tempo reale contenuti di fonti distanti per ridurre i bias degli utenti.

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



*Figura:*  
Piattaforma Taiwa per l'analisi del dibattito pubblico online. Il sistema analizza le principali fonti informative e politiche italiane sui social media, includendo l'engagement, il clustering delle fonti, l'accordo/disaccordo tra gli attori, l'analisi morale e la tossicità dei contenuti, restituendo una visualizzazione interattiva del network del dibattito.

L'IA contemporanea soffre dell'ipotesi di stazionarietà, risultando inadatta a gestire l'emergere di novità. JICS sviluppa il Dreaming Learning, un approccio originale di Sony-CSL per integrare novità spatio-temporali e analizzare la stabilità neurale mediante strumenti di Lyapunov. Appliciamo queste teorie allo sviluppo di un Large Movement Model, un sistema neurale in grado di comprendere e prevedere il movimento umano. Partendo dalla danza come linguaggio complesso, il modello favorisce la collaborazione tra coreografi e tecnologia. Le applicazioni spaziano dalla riabilitazione fisica al coaching sportivo, fino alla conservazione del patrimonio culturale immateriale.

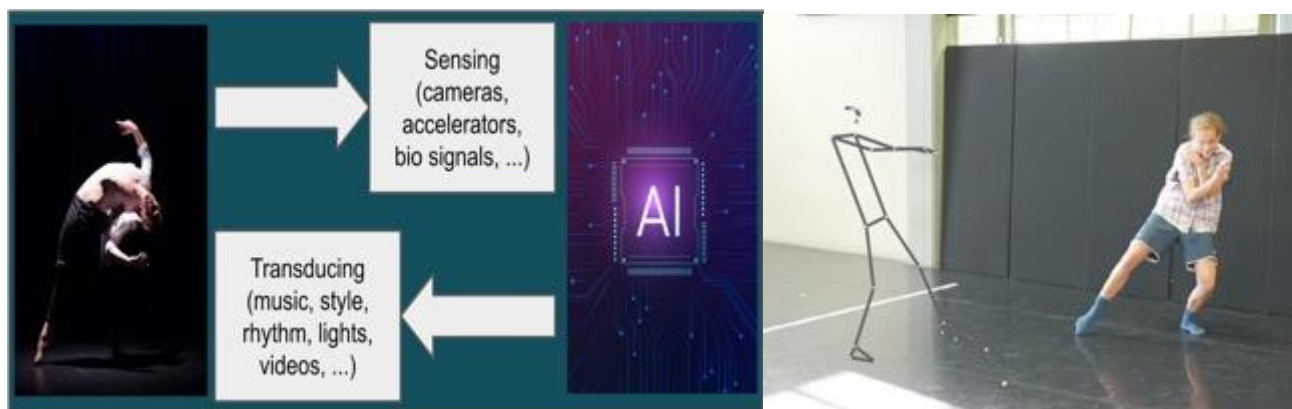


Figura: (A) Schema concettuale di Creatività Aumentata basata sull'AI. Il movimento umano viene acquisito tramite sistemi di sensing multimodale (camere, sensori inerziali, segnali biologici), elaborato tramite modelli di intelligenza artificiale e convertito in output espressivi multisensoriali (musica, stile, ritmo, luci e contenuti audiovisivi), creando un ciclo continuo di co-creazione tra corpo e tecnologia.

Figura (B) Esempio di interazione performativa in cui un danzatore umano dialoga con una rappresentazione scheletrica del movimento generata dall'AI. Lo scheletro digitale, prodotto dal modello come previsione o reinterpretazione del gesto, abilita nuove forme di collaborazione creativa tra i performer e il sistema artificiale.

## 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. L'avanzamento delle neuroscienze ha tratto grande beneficio dalle tecniche di neuroimaging basate su fMRI, che permettono di studiare il cervello umano in modo del tutto non invasivo. Grazie alla possibilità di eseguire misure ripetute e di modulare la sensibilità a diversi fenomeni, l'MRI si è affermata come una tecnica multiparametrica capace di indagare processi complessi come l'invecchiamento, le patologie neurodegenerative e gli effetti della riabilitazione, rivoluzionando sia la diagnostica che la ricerca neuroscientifica.

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. La fMRI 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.

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 la caratterizzazione di patologie neurodegenerative. 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 e di pipeline di processamento), 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.
- Caratterizzazione della dinamica delle reti cerebrali.
- Sviluppo dell'imaging del midollo spinale.
- Caratterizzazione dell'architettura delle connessioni nella sostanza bianca e delle relative proprietà microstrutturali per lo studio dell'insorgenza della malattia di Alzheimer.

### **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**

La reattività cerebrovascolare (CVR) è la capacità dei vasi sanguigni di rispondere a stimoli vasoattivi. Abbiamo messo a punto la tecnica di misura della CVR e abbiamo acquisito dati su pazienti alzheimeriani. Nel prossimo triennio verificheremo se la CVR fornisce utili indicazioni sui processi neurodegenerativi e svilupperemo la metodica di misura della CVR per derivare misure quantitative di consumo di ossigeno (CMRO<sub>2</sub>). Un modello biofisico dettagliato è stato sviluppato per simulare le risposte metaboliche e vascolari durante l'ipercapnia, e validato con i dati acquisiti in risonanza.

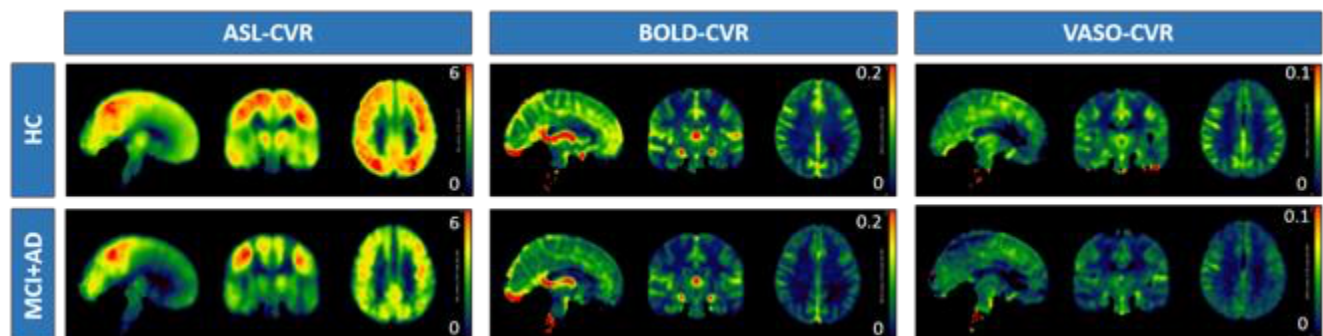


Figura: mappe di CVR ottenute su volontari sani (HC), individui con mild cognitive impairment (MCI) e con malattia di Alzheimer (AD) con un gas challenge. I contrasti utilizzati sono arterial spin labeling (ASL), blood oxygenation level dependent (BOLD), e vascular space occupancy (VASO). Tali mappe costituiscono un potenziale biomarcatore per patologie neurologiche legate al deterioramento vascolare.

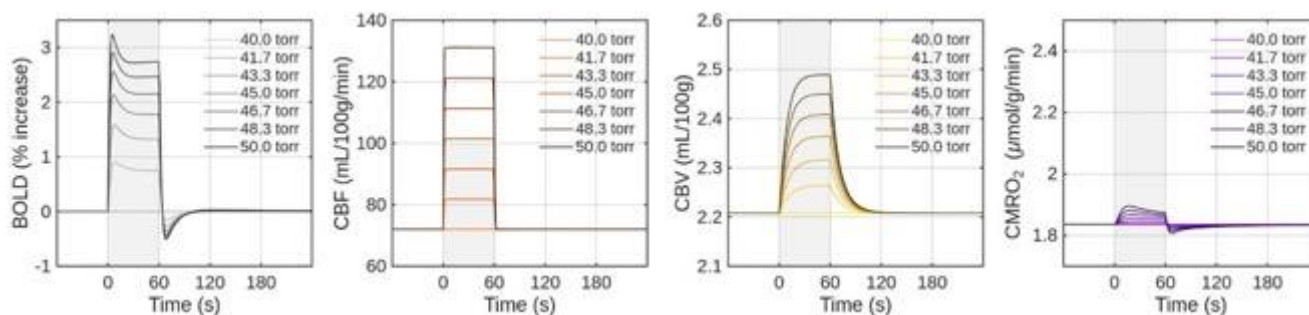


Figura: Risposte simulate a vari livelli di ipercapnia per gli andamenti temporali previsti di BOLD, CBF, CBV, e CMRO<sub>2</sub> durante una simulazione di aumento della pCO<sub>2</sub> arteriosa da 40 a 50 mmHg.

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 del midollo spinale

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.

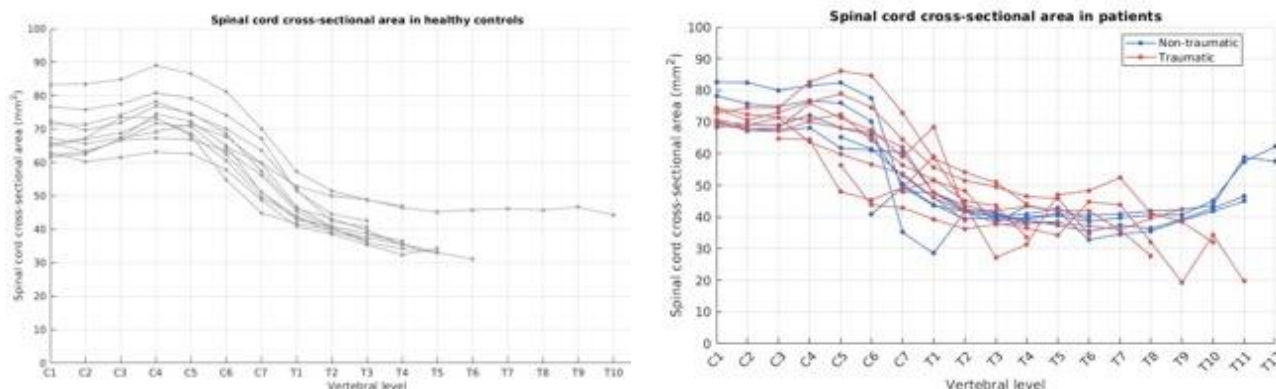


Figura. Cross-sectional area (CSA) a vari livelli vertebrali (C1-T12) del midollo spinale su soggetti sani (sinistra) e su soggetti affetti da lesioni cervicali e dorsali (destra). Le misure sono fatte su immagini pesate in T2.

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 dell'insorgenza della malattia di Alzheimer

I fasci di sostanza bianca nel cervello umano costituiscono il substrato fondamentale alla base della funzione cerebrale, e il loro danneggiamento è centrale nella patofisiologia di numerose malattie neurologiche. Tramite la risonanza magnetica di diffusione e altre tecniche di imaging quantitativo (in particolare rilassometria e stima della suscettività magnetica) è possibile ricostruire la morfologia di queste connessioni e le loro proprietà microstrutturali. Con queste tecniche, abbiamo caratterizzato preliminarmente le differenze tra soggetti sani e pazienti (in particolare affetti da declino cognitivo soggettivo, declino cognitivo lieve, e AD) considerando fasci specificatamente coinvolti nelle funzioni cognitive affette dalla patologia. Nel prossimo triennio la caratterizzazione verrà fatta su un campione più ampio, in particolare andando a studiare potenziali marcatori per identificare la progressione lungo lo spettro del deficit cognitivo.

## 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 aumentino, 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 innovative di irraggiamento/monitoring e pianificazione via via più efficienti ed efficaci. L'imaging diagnostico e il trattamento dei tumori con la radioterapia e terapia innovativa sono due aspetti fondamentali di questa linea di ricerca.

Il miglioramento delle prestazioni delle **tecniche di imaging nucleare** riveste un ruolo fondamentale. Le tecniche di imaging medico di tipo teragnostico sfruttano le radiazioni per monitorare i processi fisiologici all'interno del corpo del paziente durante la somministrazione del radiotracciante potenzialmente anche nella fase successiva, grazie allo sviluppo di dosimetria indossabile.

**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 nasce la necessità di progettare, costruire e testare un rivelatore, in grado di rilevare molteplici tipi di particelle secondarie, inclusi protoni, fotoni prompt e neutroni, al fine di monitorare i trattamenti. Il progetto è ambizioso, poiché attualmente non esistono rivelatori in grado di operare in tempo reale; il vantaggio di un rivelatore tracciante è la possibilità di integrare un gran numero di tracce per poi avvalersi in fase di ricostruzione di reti neurali addestrate a questa tipologia di eventi.

Questa linea di ricerca vuole contribuire allo **studio di tecniche di imaging nucleare** e allo **sviluppo di tool dedicati** alla misura delle sezioni d'urto nucleari, al monitor dei trattamenti e allo sviluppo di strumenti di advanced computing e Intelligenza Artificiale per la pianificazione e il monitoring di **trattamenti radioterapici innovativi**.

### *Stato dell'arte*

**Imaging Diagnostico.** La terapia radioligandica con  $^{177}\text{Lu}$ -PSMA-617 ha recentemente acquisito una crescente rilevanza nella gestione del carcinoma prostatico metastatico resistente alla castrazione (mCRPC), consentendo un approccio sistemico mirato in cui il radiofarmaco si lega selettivamente alle cellule tumorali che esprimono l'antigene di membrana specifico della prostata (PSMA). La rilevanza teranostica di questa metodica deriva dallo schema di decadimento del  $^{177}\text{Lu}$ , caratterizzato dall'emissione  $\beta^-$  a scopo terapeutico e da transizioni gamma associate a 208 keV e 113 keV, che consentono l'imaging post-somministrazione. Attualmente, tutti i pazienti ricevono un'attività somministrata fissa, senza tenere conto della biocinetica e della clearance specifiche del paziente. Sebbene tali protocolli standardizzati mirino a ridurre gli effetti collaterali, essi possono portare a un diffuso sottodosaggio o a un aumento del rischio di tossicità in sottogruppi di pazienti. Sono pertanto necessari approcci dosimetrici personalizzati per ottimizzare l'efficacia terapeutica, garantendo al contempo la protezione degli organi a rischio e il controllo della dose cumulativa associata a una prolungata ritenzione del radiofarmaco. Attualmente, i protocolli dosimetrici si basano su acquisizioni SPECT, che tuttavia richiedono notevoli risorse e possono essere effettuate solo in tempi prestabiliti.

**Frammentazione secondaria.** 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.

### Finalità e obiettivi

**Imaging Diagnostico.** Per superare le limitazioni, si sta sviluppando un rivelatore di raggi  $\gamma$  indossabile, consentendo un campionamento temporale denso della curva tempo-attività di washout (TAC). Questo approccio permette la caratterizzazione della farmacocinetica specifica del paziente, rendendo possibile la personalizzazione dell'attività da somministrare nei cicli di trattamento successivi. Per garantire l'aderenza del paziente, i rivelatori sono progettati per essere compatti e leggeri, basati su scintillatori plastici drogati con elementi ad alto numero atomico (high-Z). In questo contesto, la fattibilità e le prestazioni attese del sistema di rivelazione proposto in condizioni clinicamente realistiche vengono studiate mediante simulazioni Monte Carlo. Un tale approccio personalizzato potrebbe aumentare significativamente la sopravvivenza media dei pazienti, attualmente pari a circa 30 mesi.

**Radioterapia Innovativa.** 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.

L'obiettivo di punta di questa linea di ricerca è quello di sviluppare tracciatore compatto e affidabile per monitorare in tempo reale la radiazione secondaria prodotta durante i trattamenti. 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.

### 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 (Figura1). 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.

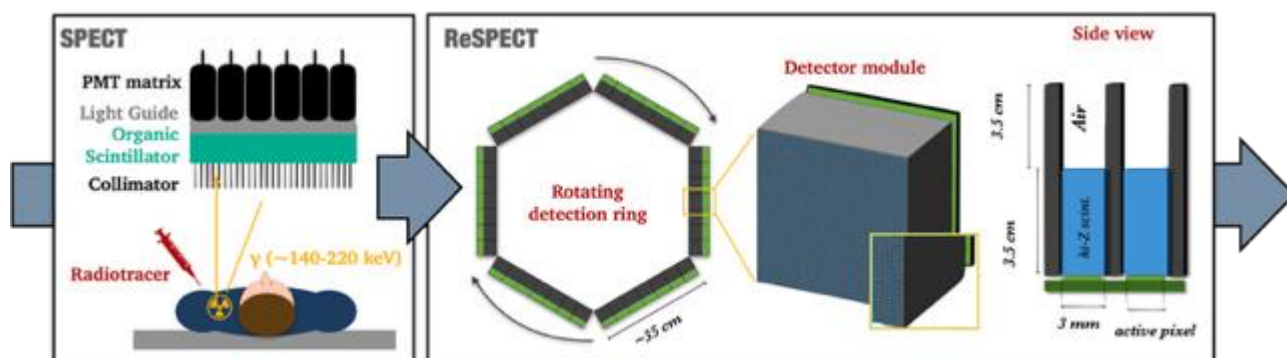


Figura. Sinistra: schema di funzionamento di una SPECT commerciale basata su cristalli inorganici (es. NaI(Tl)). Destra: elementi del principio di realizzazione di ReSPECT basata sull'impiego di scintillatore organico drogato con elementi ad alto Z.

**RT e CPT.** Il progetto MULTIPASS mira a sviluppare un tracciatore 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 x 10 x 20 cm<sup>3</sup>) per caratterizzare neutroni secondari in CPT.

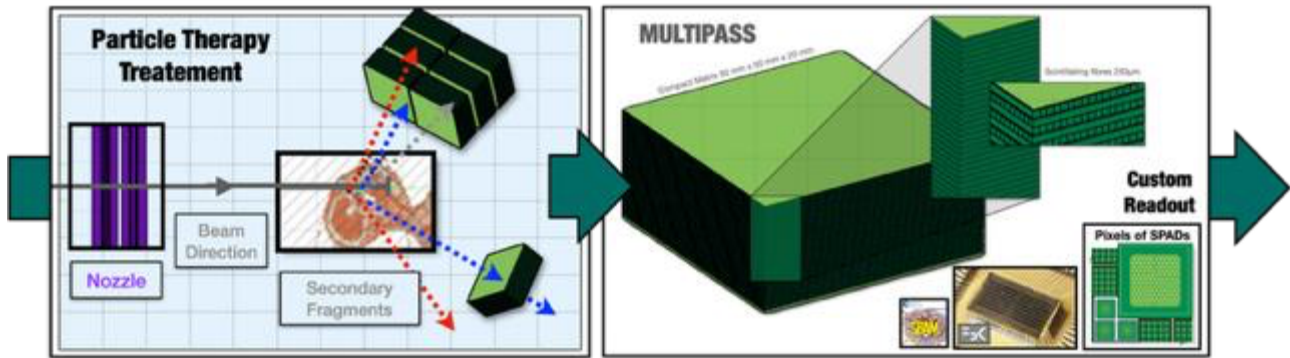


Figura sinistra: schema di CPT, i secondari carichi e neutri prodotti nel paziente possono essere sfruttati per monitoring. Figura destra: elementi della geometria del tracciatore a fibre scintillanti di MULTIPASS e dell'elettronica di readout-custom che andrà implementata a partire da SBAM0 (sensore 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* applica i principi e le metodologie della fisica della materia a problematiche di carattere archeologico, artistico e conservativo, sviluppando protocolli analitici basati sulla caratterizzazione spettroscopica e strutturale dei materiali e sull'integrazione di tecniche di 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, ed eventuale interazione con materiali di restauro in fase di sviluppo. Le attività sperimentali sono svolte presso il laboratorio di Fisica per i Beni 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 luce di sincrotrone.

I Beni Culturali comprendono un'ampia ed eterogenea classe di materiali che compongono il patrimonio storico-artistico, monumentale, archeologico, archivistico e librario. In questo scenario, la caratterizzazione chimico-fisica dei materiali fornisce parametri essenziali relativi alla microstruttura, all'attribuzione, alle tecniche di manifattura e allo stato di conservazione, contribuendo alla conoscenza e alla tutela dei manufatti attraverso un approccio analitico rigoroso. Il progetto *Fisica per i Beni Culturali* svolge attività di ricerca nell'ambito della Fisica applicata ai beni culturali attraverso lo sviluppo di nuove strategie e metodologie per l'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. 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 per l'interpretazione dati. Questo nuovo approccio permette di trattare problematiche più complesse fornendo nuovi strumenti di indagine per la gestione di grandi quantità di dati e di considerare simultaneamente più parametri, facendo quindi emergere informazioni non distinguibili con metodi analitici tradizionali.

### **Finalità e obiettivi**

La finalità principale del progetto *Fisica per i Beni Culturali* è quella di sviluppare ricerca rilevante per lo studio di beni di interesse storico-artistico tramite strategie innovative e interdisciplinari per l'analisi di materiali compositi attraverso tecniche analitiche e computazionali. Tale approccio è finalizzato alla ricostruzione delle informazioni inerenti ai manufatti, alla loro genesi storica e funzione, nonché alla loro corretta integrazione nel contesto archeologico e storico-artistico. Il progetto punta, inoltre, a consolidare l'attuale posizione del CREF nel settore della Fisica applicata ai beni culturali, valorizzando i risultati di ricerca ottenuti, e promuovendo un percorso di sviluppo delle attività a livello nazionale e internazionale tramite collaborazioni con Enti e Università. Le attività di ricerca si articolano in 4 fasi strategiche di seguito elencate: 1) *individuazione delle problematiche emergenti e specifiche*; 2) *ricerca e sviluppo* riguardo a *nuove metodologie e protocolli di analisi*; 3) *sviluppo e applicazione* di metodi di classificazione ed estrazione di benchmark microscopici tramite tecniche di *machine learning*; 4) *interpretazione dei risultati microscopici* in un contesto *macroscopico*.

Riguardo alle tematiche specifiche sono state avviate con successo collaborazioni a medio e lungo termine con istituzioni museali e accademiche riguardanti le seguenti tematiche: a) Beni librari: studio delle materie prime (inchiostri e pigmenti, adesivi e leganti, disegni, stampe ed emulsioni fotografiche) e dell'interazione

con nuovi prodotti di restauro, funzionalità e ecosostenibilità. b) Metalli: studio delle produzioni e delle materie prime che hanno caratterizzato la storia tecnologica dell'antichità. c) Reperti organici: studio di materiali bio-archeologici quali ossa e resti faunistici, legno, semi e residui alimentari ritrovati in contesti storici, archeologici, preistorici e protostorici. d) Ceramiche e lapidei: studio delle produzioni tecnologiche, del reperimento dei materiali in antichità. e) Opere Pittoriche: Caratterizzazione delle tecniche esecutive, dei materiali costitutivi e degli strati preparatori. L'innovazione introdotta nell'applicazione di metodologie analitiche attraverso l'impiego di tecniche avanzate, tra cui il machine learning, ha un impatto diretto sull'efficacia delle indagini scientifiche, potenziandone le capacità di analisi e accedendo così ad informazioni altrimenti difficili da rilevare.

### Stato e risultati attesi

**Beni librari.** È stato sviluppato un protocollo diagnostico d'avanguardia basato sulla data fusion di spettroscopia multimodale (XRF e FTIR) e Machine Learning per l'analisi dell'Amazzonomachia, opera di Giulio Romano - figura centrale del Manierismo e principale allievo di Raffaello. L'integrazione di algoritmi avanzati ha permesso di superare i limiti dell'analisi tradizionale, discriminando i materiali di bottega e definendo un nuovo standard analitico multimodale capace di estrarre correlazioni complesse tra tecniche esecutive e dinamiche di degrado. È previsto un ulteriore sviluppo delle metodologie nell'ambito dei beni librari.

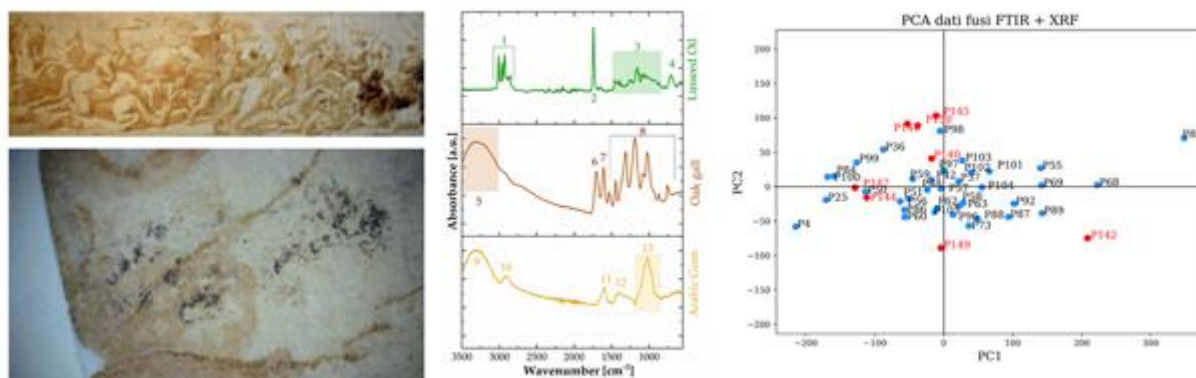


Figura: Amazzonomachia opera di Giulio Romano

**Metalli.** Abbiamo dimostrato l'efficacia di un nuovo approccio allo studio delle tecniche di lavorazione delle leghe metalliche dell'antico Egitto tramite l'applicazione della diffrazione e della fluorescenza a raggi X, e il machine learning applicando metodi di classificazione. Lo studio ha riguardato 12 oggetti in lega di rame, parte del corredo funerario di Kha e sua moglie Merit, risalente alla metà della XVIII dinastia (ca. 1425-1352 a.C.), attualmente preservato presso il Museo Egizio di Torino. È in fase di sviluppo l'applicazione ad ulteriori casi complessi su materiali metallici.

**Reperti organici.** È stato sviluppato un protocollo innovativo per lo studio delle pratiche antiche di riparazione, riutilizzo e riciclo di materiali d'uso quotidiano nella civiltà sumera (III millennio a.C.) nell'ambito del progetto PRIN 2022 SLOW SUMER. L'integrazione tra imaging, spettroscopia FTIR e modelli di Machine Learning ha permesso di decodificare la struttura molecolare di reperti in bitume. È inoltre in fase di sviluppo una nuova metodologia dedicata all'analisi di ossa combuste e reperti faunistici.

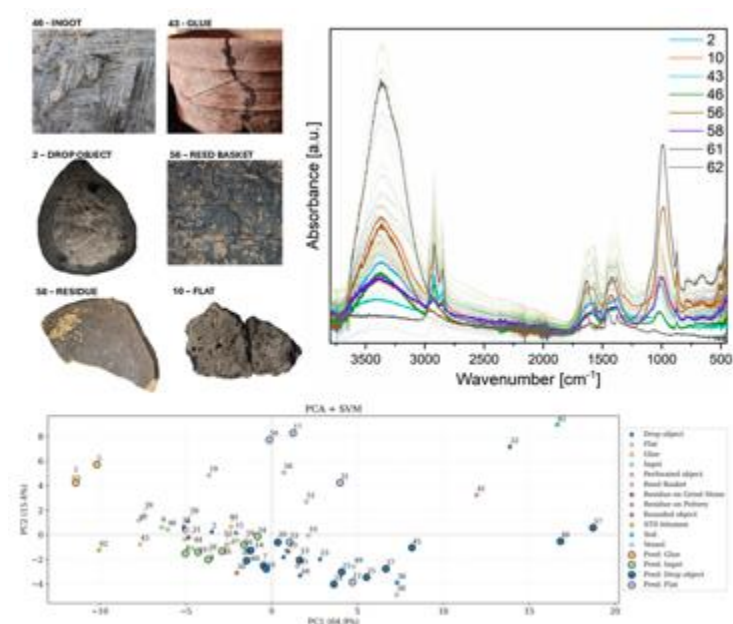


Figura 10. Analisi bitume Sumero (Abu Tbeirah - Iraq)

sviluppato permette di indagare le interazioni tra residui organici e matrici inorganiche porose, definendo un nuovo standard non distruttivo per la ricostruzione delle pratiche culinarie e rituali nel mondo romano attraverso la diagnostica fisica avanzata. Sono in programma ulteriori studi riguardo ai residui alimentari ritrovati in contesti storici e archeologici.

**Opere pittoriche.** È in corso di sviluppo una nuova metodologia che integri indagini di spettroscopia XRF, FTIR, imaging iperspettrale e analisi basate sul machine learning per la caratterizzazione delle tecniche esecutive impiegate nella realizzazione di dipinti a olio.

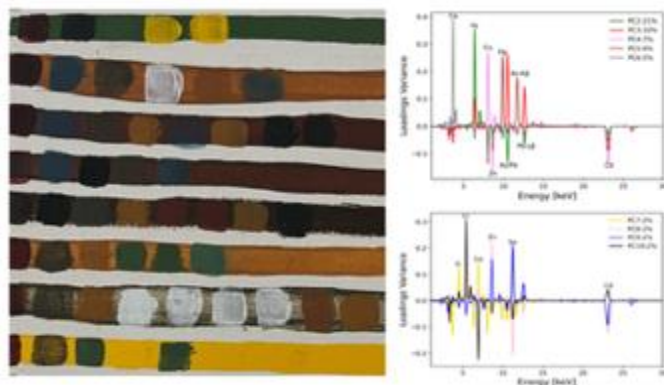


Figura. Analisi XRF di campioni mockup nell'ambito dello studio delle superfici pittoriche

**Ceramiche.** È stato sviluppato un protocollo analitico innovativo per l'identificazione di biomarcatori lipidici in reperti ceramici. L'integrazione tra spettroscopia ATR-FTIR e modelli di Machine Learning ha permesso di estrarre segnali molecolari complessi relativi a resine e oli degradati, superando le interferenze causate dai suoli archeologici. Il framework

**Sviluppo metodologico.** Sono in fase di implementazione nuove metodologie e protocolli per la caratterizzazione dei materiali mediante spettroscopia gamma e analisi isotopica. Tali attività, applicate ai settori dei Beni Culturali e delle Scienze Ambientali, sono condotte in stretta sinergia con le attività di ricerca del progetto 'Fisica Nucleare per l'Energia, l'Ambiente e la Radioprotezione'.

È stata inoltre avviata una nuova attività di ricerca all'interno del progetto “**Spectral Intelligence Space Lab**” (Referente Claudia Scatigno) dedicata allo sviluppo di pipeline automatiche e scalabili per l'elaborazione di dati satellitari, finalizzate all'estrazione di indicatori ambientali avanzati e al supporto della creazione di uno spin-off accademico. L'iniziativa si propone, tra i vari obiettivi, di contribuire al monitoraggio e alla gestione sostenibile dei beni culturali esposti ai cambiamenti climatici e ai fenomeni di degrado ambientale, promuovendo approcci innovativi per la conservazione preventiva e per il rafforzamento della resilienza climatica del patrimonio culturale.

## **C.8 Fisica Nucleare per l'Energia, l'Ambiente e la Radioprotezione**

Il progetto Fisica Nucleare per l'Energia, l'Ambiente e la Radioprotezione propone un approccio sinergico dove le metodologie della fisica nucleare si declinano in soluzioni tecnologiche per la sicurezza e la sostenibilità. Le attività di ricerca hanno l'obiettivo di definire nuovi protocolli nel settore energetico, della dosimetria d'avanguardia e nel settore ambientale. Tale finalità si integra con le attività sperimentali di calibrazione di sensori innovativi e con la caratterizzazione isotopica dei materiali, offrendo strumenti essenziali con impatto su altri settori di interesse quali la fisica dei raggi cosmici, fisica per i beni culturali e la fisica medica. Il raggiungimento di questi obiettivi è supportato dal potenziamento in corso di infrastrutture laboratoriali dedicate all'impiego di sorgenti di taratura, gamma e neutroniche.

Il progetto intende sviluppare una linea di ricerca che coniughi la fisica nucleare fondamentale con applicazioni di alto impatto tecnologico. In un contesto globale caratterizzato dalla necessità di una transizione energetica sicura e di una tutela ambientale rigorosa, il progetto propone un approccio interdisciplinare dove la comprensione dei processi nucleari diventa lo strumento per lo sviluppo di nuove metodologie. La ricerca si articola su tre pilastri interconnessi: l'ottimizzazione dei sistemi energetici di nuova generazione, la definizione di nuovi protocolli di radioprotezione e applicazioni in fisica ambientale. In ambito energetico, la sfida è rappresentata dai sistemi ibridi fusione-fissione, come il progetto TRHYB in collaborazione con ENEA e RFX. La ricerca scientifica è qui focalizzata sulla progettazione di componenti critici, quali il Tritium Breeding Blanket e le schermature per magneti superconduttori. L'obiettivo è garantire l'autosufficienza di trizio e la gestione del danno da radiazione, elementi essenziali per la fattibilità tecnica dei futuri reattori. Parallelamente, il monitoraggio ambientale, la prevenzione e protezione dalle radiazioni ionizzanti richiede un continuo avanzamento delle tecniche di dosimetria e della spettroscopia gamma. Sono in fase di avvio studi dedicati all'ottimizzazione delle tecniche di rivelazione e quantificazione in ambito dosimetrico coadiuvate da metodi computazionali e di machine learning.

### ***Stato dell'arte***

Il panorama scientifico attuale nella fisica nucleare applicata - energia, radioprotezione e ambiente - è orientato verso lo sviluppo di sistemi a ridotto impatto ambientale e ad elevata sicurezza intrinseca. In questo quadro, la modellistica e il monitoraggio delle radiazioni ionizzanti risultano determinanti. Lo stato dell'arte di interesse per il progetto si articola su tre direttrici principali:

- a) Nuove frontiere dell'Energia: Sistemi Ibridi e Breeding. Nello sviluppo di sistemi ibridi fusione-fissione, il superamento dello stato dell'arte si focalizza sulla progettazione di Breeding Blanket in grado di massimizzare il Tritium Breeding Ratio (TBR) per garantire l'autosufficienza del combustibile. La ricerca attuale mira all'integrazione tra le simulazioni e i dati sperimentali per modellare l'invecchiamento dei materiali e il danno da radiazione, criticità tuttora aperta a causa degli intensi flussi di neutroni veloci che inducono fenomeni di trasmutazione e infragilimento strutturale.
- b) Dosimetria avanzata. La frontiera della radioprotezione riguarda l'ottimizzazione di sistemi dosimetrici attivi e passivi e l'impiego di tecniche di Machine Learning per la feature extraction a partire da dati provenienti da rivelatori attivi e passivi. Un punto focale è la caratterizzazione della concentrazione di attività del Radon e dei suoi prodotti di decadimento a vita breve in ambienti confinati nell'ambito dello studio dei fattori fisici di rischio ambientale. Essi sono infatti considerati tra i principali inquinanti dell'aria indoor, classificati come agenti cancerogeni di gruppo 1 quindi agenti di accertata cancerogenicità per l'uomo dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC/OMS).
- c) Fisica del monitoraggio ambientale e spettrometria gamma. L'analisi di matrici ambientali si avvale di tecniche non distruttive basate sulla spettrometria gamma ad alta risoluzione. Tali metodologie consentono la determinazione di radionuclidi in traccia e il monitoraggio dei rapporti isotopici. L'integrazione di algoritmi di machine learning fornisce strumenti per una più accurata misura, migliorando la discriminazione tra il fondo naturale ed il segnale di interesse. Ulteriori sviluppi potrebbero portare alla creazione di una rete di monitor ambientali per neutroni.

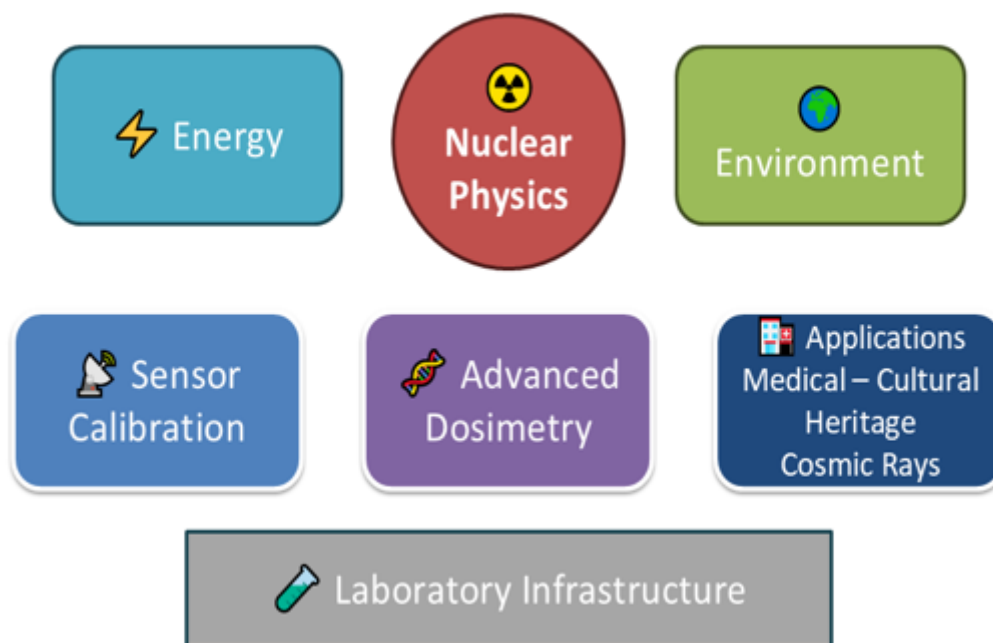
### **Finalità e obiettivi**

La finalità generale del progetto *Fisica Nucleare per l'Energia, l'Ambiente e la Radioprotezione* è creare un ponte solido tra la fisica nucleare e le sfide della nostra società: l'energia pulita, la tutela della salute e la protezione dell'ambiente. L'obiettivo è quindi di sviluppare tecnologie che rendano l'energia nucleare del futuro più sicura e sostenibile, affinando al contempo la nostra capacità di leggere e monitorare la radioattività che ci circonda, sia essa naturale o artificiale. Si intende quindi arrivare a questo obiettivo tramite i seguenti traguardi tecnici:

- Contribuire alla ricerca in materia di sviluppo dei sistemi ibridi fusione-fissione (come nel progetto TRHYB), studiare il danno da radiazione tramite simulazioni avanzate e verifiche sperimentali in campi di radiazione di neutroni veloci, i quali modificano la struttura dei materiali.
- Sviluppare nuovi metodi per la lettura di sensori sensibili alle radiazioni ionizzanti anche tramite tecniche di machine learning per estrazione di features significative, ad esempio da rivelatori CR39. Questo è fondamentale in molte applicazioni, tra cui il monitoraggio del gas Radon, garantendo misure di dose con un alto grado di accuratezza.
- Perfezionamento di tecniche per spettrometria gamma e monitor di neutroni ad alta risoluzione, che permettano analisi in traccia di contaminanti di interesse nel settore ambientale e campi limitrofi.

Le attività di ricerca presentate hanno un alto impatto tecnologico poiché potranno fornire soluzioni chiave nei campi presentati ed esportabili ad altri campi limitrofi come lo studio di materiali storico-artistici, la calibrazione di rivelatori di interesse per Fisica Medica e per i raggi cosmici.

## **Nuclear Physics for Energy, Environment & Radioprotection**

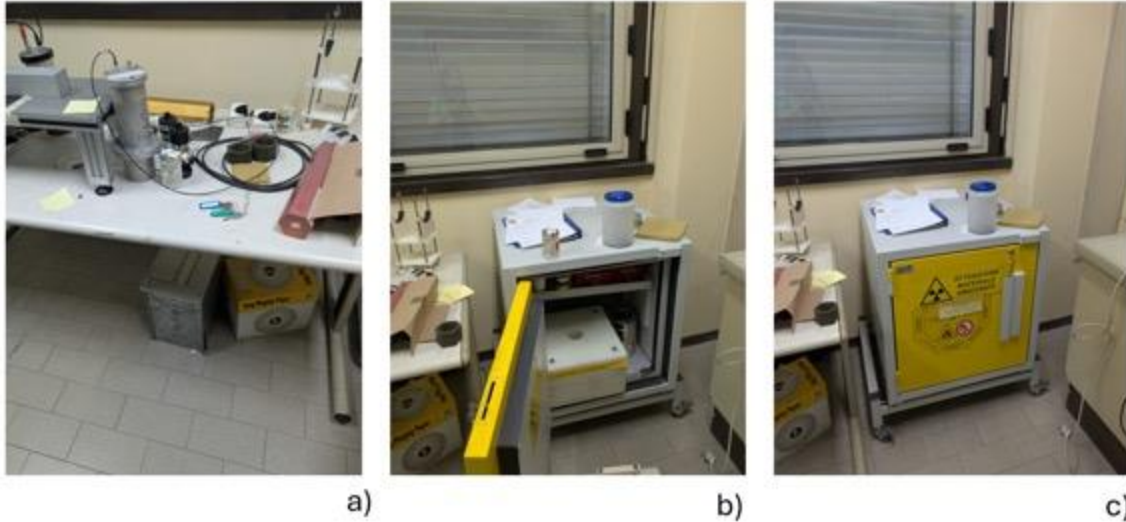


*Figura: Schema dei campi di interesse per la nascente linea di ricerca Fisica Nucleare per l'Energia, l'Ambiente e la Radioprotezione.*

### **Stato e risultati attesi**

Per sostenere le nuove attività previste è in corso il potenziamento delle infrastrutture del CREF attraverso l'allestimento di un Laboratorio Sorgenti presso il piano -1 (maggiori dettagli sono riportati nella sezione Infrastrutture). La prima fase delle attività di ricerca prevede il completamento dell'allestimento del laboratorio. Tale fase è già in corso di svolgimento. Lo spazio sarà fruibile da setup sperimentali variabili per lo svolgimento di misure quali ad esempio calibrazioni, misure di efficienza di rivelatori e spettroscopia gamma. In questa prima fase è previsto il conseguimento dei seguenti obiettivi strategici intermedi:

- a) Completamento del Laboratorio Sorgenti: messa a norma e autorizzazione definitiva per la detenzione e l'uso delle sorgenti di calibrazione e neutroniche;
- b) Allestimento set-up specifici;
- c) Validazione strumentale: definizione di un set di procedure standardizzate per la calibrazione di rivelatori, la dosimetria e il monitoraggio ambientale. Nella seguente figura è riportato un esempio di allestimento strumentale.



*Figura. Foto esplicativa a titolo di esempio; a) possibile set-up che si intende sviluppare, b) e c) cassaforte per lo stoccaggio delle sorgenti.*

Il CREF ha inoltre investito sulla formazione del personale interno finanziando una borsa di Master universitario di II livello in Protezione dalle Radiazioni Ionizzanti, per il potenziamento delle conoscenze specialistiche interne.

### ***Risorse esterne***

Il progetto avviato di recente e in questo contesto sono state avviate due collaborazioni di ricerca anche in vista di una partecipazione congiunta a bandi competitivi ed in particolare nel settore Energia tramite un accordo di ricerca in collaborazione tra il CREF e il Dipartimento Nucleare dell'ENEA (NUC-ENEA) e nell'ambito della Radioprotezione con Intesa Sanpaolo SpA e L.B. Servizi per le Aziende Srl. In particolare:

- Accordo di collaborazione scientifica CREF - Intesa Sanpaolo SpA e L.B. Servizi per le Aziende S.r.l. con validità dal 10/09/2025 al 10/09/2027 per lo svolgimento di attività di ricerca in ambito radioprotezionistico con particolare attenzione alla quantificazione dei valori di concentrazione di attività di gas Radon in aria.
- Accordo di collaborazione scientifica CREF – ENEA Dipartimento Nucleare (NUC) con validità dal 30/06/2025 al 29/06/2028 nell'ambito dei reattori ibridi fusione-fissione (“FFHR”).

## C.9 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. 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. 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 la linea di ricerca "Tecnologie fotoniche ed intelligenza artificiale" è lo sviluppo di sistemi 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 ha lo scopo di realizzare macchine di calcolo innovative basate su sistemi fotonici principalmente di tipo *free-space*, in grado di accelerare il calcolo combinatorio nei problemi di ottimizzazione (es. macchine di Ising) e di implementare architetture di calcolo neuromorfico (es. reti neurali artificiali). Tali tipologie di calcolo sono largamente diffuse nelle intelligenze artificiali (IA) e la loro implementazione analogica basata sulla propagazione di luce ha il potenziale di ridurre in modo significativo l'utilizzo delle risorse computazionali necessarie, abbattendo l'impatto ambientale associato all'uso dell'IA.

L'attività teorica si divide in due direzioni, "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 conduce attività sperimentali di ottica avanzata volte all'indagine dei meccanismi fisici fondamentali del calcolo fotonico, nonché alla progettazione e alla realizzazione di prototipi di macchine di calcolo che utilizzano la luce per l'elaborazione dell'informazione.

I principali metodi sperimentali utilizzati sono:

1) la modulazione di luce laser, in particolare della fase del campo ottico, ottenuta mediante modulatori spaziali di luce, la quale consente di codificare milioni di variabili in un singolo punto luminoso di pochi millimetri; 2) la propagazione della luce attraverso materiali fotonici complessi, in particolare policristallini ingegnerizzati con disordine fotonico e nonlinearietà del secondo ordine, utilizzati come piattaforme fisiche per l'elaborazione in parallelo dell'informazione trasportata dalla luce; 3) l'utilizzo di sorgenti laser impulsate "ultraveloci" (femtosecondo) che permette di utilizzare i mezzi materiali di interesse nel regime ottico nonlineare; 4) Acquisizione di immagini con tecniche interferometriche per ottenere un'altissima sensibilità nell'elaborazione dell'informazione codificata nella fase del campo ottico.

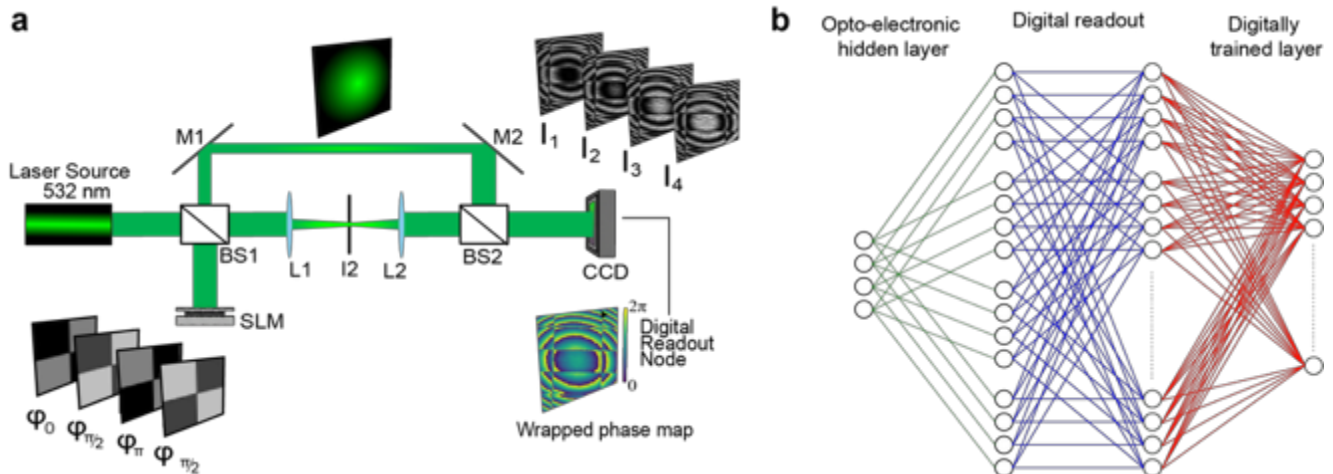
Il laboratorio ha recentemente dimostrato la realizzazione della prima rete neurale fotonica di tipo "deep" su larga scala che utilizza lo scattering multiplo di impulsi laser e la generazione nonlineare di seconda armonica in campioni policristallini disordinati di niobato di litio (LNO). Il risultato è stato ottenuto all'interno di una collaborazione internazionale con Université Sorbonne, ETH Zurigo, Tsinghua University Pechino e pubblicato sulla prestigiosa rivista Nature Computational Science, nonché selezionato tra i dieci "breakthrough" dell'anno 2024 dalla rivista IEEE Photonics.

Gli ulteriori esperimenti attivi in laboratorio riguardano:

1. La focalizzazione, tramite manipolazione del fronte d'onda, della luce di seconda armonica generata da un campione disordinato di niobato di litio. Il confronto delle osservazioni con modelli teorici basati sul formalismo dell'ottica mesoscopica e del tensore nonlineare di trasmissione, svelano la complessa natura computazionale del processo di focalizzazione della luce nonlineare, permettendone una futura applicazione nelle macchine di calcolo fotonico. (Articolo in preparazione).

2. La progettazione e realizzazione di una interferometric *photonic extreme learning machine* (IPELM): rete neurale ibrida (fotonica-elettronica) che sfrutta la rivelazione interferometrica del segnale per la classificazione di immagini la cui informazione è codificata tramite numeri complessi (Fig.1). L'IPELM permette di distinguere immagini che si differenziano solo per phase-shift globali o per minime variazioni di contrasto. (Articolo in preparazione).

3. La progettazione e realizzazione di un sistema fotonico per il calcolo delle coincidenze tra eventi nello studio dei raggi cosmici. Il dispositivo è in grado di determinare, tra un insieme di numeri reali, quelli che hanno la minima differenza numerica tra loro con risoluzione fino a migliaia di digits. Il sistema è pensato per velocizzare il monitoraggio delle coincidenze temporali tra eventi provenienti dalla misura di raggi cosmici secondari appartenenti allo stesso sciame. (Domanda di brevetto inviata).



**Figura:** Interferometric photonic extreme learning machine (IPELM) progettata e realizzata nel laboratorio di fotonica del CREF.  
 a) Schema dell'apparato sperimentale. b) Rete neurale corrispondente al processo di elaborazione dell'informazione eseguito dalla macchina.

### La ricerca teorica

L'attività teorica in questi ultimi anni è stata incentrata su (i) Formulare e studiare nuovi modelli classici di oscillatori parametrici accoppiati su larga scala (dai 100 a oltre 10.000 oscillatori), principalmente per scopi computazionali, e (ii) Analizzare proprietà quantistiche di oscillatori parametrici su piccoli sistemi (2 o 3 oscillatori), con lo scopo di comprendere come fenomeni quanti-meccanici si manifestino, e conseguentemente se essi possano essere usati per aumentare la capacità computazionale delle macchine di calcolo basate su oscillatori parametrici.

Per quanto riguarda la prima direzione, il tema centrale è stato la macchina di hyperspin. Proposta nel 2022, tale macchina consiste in un sistema di oscillatori parametrici con accoppiamento lineare e nonlineare.

Il suo scopo è duplice: Primo, usare oscillatori parametrici per realizzare un simulatore di modelli di spin vettoriali in dimensione arbitraria completamente generale e programmabile, e non più solo di spin binari (ossia di Ising). Secondo, sfruttare la dinamica di spin ad alta dimensione con specifici protocolli di "annealing dimensionale" per aumentare l'efficienza del sistema come macchina di Ising. In altre parole, si simulano spin vettoriali (alta dimensione) per poi proiettare gradualmente la loro dinamica su spin binari (bassa dimensione). L'attività teorica dal 2022 sino ad oggi ha sia mostrato come questi protocolli di annealing aumentino notevolmente la capacità delle macchine di hyperspin di operare come macchina di Ising, sia ha proposto due possibili modi per realizzare sperimentalmente la macchina di hyperspin usando sistemi ottici o ibridi opto-elettronici.

Un aspetto importante finalizzato recentemente dall'attività teorica è stato lo studio della macchina di hyperspin accoppiata ad un sistema di oscillatori ausiliari, chiamati equalizzatori. Il lavoro è riuscito a mostrare simulando fino a 10.000 spin vettoriali che tale sistema misto (macchina di hyperspin ed equalizzatori) risolve concettualmente un problema che era rimasto aperto nei lavori precedenti, ossia evitare che l'efficienza della macchina di hyperspin dipendesse fortemente da specifici parametri fisici. In questo contesto, avendo sul lungo periodo in mente la realizzazione sperimentale della macchina di hyperspin, l'attività teorica si propone di affinare i modelli fino ad ora studiati, con la funzione concreta di progettare un possibile esperimento, nonché studiare nuove proprietà per ora non analizzate per aumentare ulteriormente il campo di applicazione della macchina di hyperspin.

Per quanto riguarda l'analisi della proprietà quantistiche, l'attività teorica ha recentemente concluso con successo uno studio di correlazioni quantistiche (entanglement) tra due o tre oscillatori, descrivendo la dinamica con il formalismo dei sistemi dissipativi aperti e calcolando lo stato del sistema numericamente tramite diagonalizzazione esatta. L'analisi ha mostrato che gli hyperspin quantistici descrivono uno stato fortemente correlato anche nei regimi di parametri dove invece il sistema usato come macchina di Ising realizza uno stato semi-classico. Un altro aspetto che l'attività teorica ha affrontato in collaborazione con il gruppo di Cristiano Ciuti (Parigi) è stato mostrare che il rumore quantistico in un sistema di oscillatori parametrici ottici, descritti in approssimazione Gaussiana e quindi semi-classica, faccia esplorare le configurazioni di spin agli oscillatori con una statistica di tipo termico (Boltzmann) con una temperatura efficace dipendente dalla ampiezza relativa del rumore. Questo studio permette di estendere l'uso delle

macchine di Ising come macchine di Boltzmann. Il prosieguo della attività teorica su questo percorso sarà estendere l'analisi quanto-meccanica ad altri tipi di oscillatori (detti oscillatori Kerr) nonché di trovare approcci alternativi alla diagonalizzazione esatta o metodi semi-classici per descrivere macchine di Ising o di hyperspin in regime in cui gli effetti quantistici si manifestano su scale maggiori.

## **C.10 Progetto Extreme Energy Events**

Il Progetto Extreme Energy Events (EEE) – "La scienza nelle Scuole" è un esperimento per la rivelazione e lo studio dei Raggi Cosmici a terra con un innovativo programma per la diffusione della cultura scientifica; prevede l'installazione di telescopi per muoni cosmici nelle scuole italiane: studenti e insegnanti sono coinvolti in tutte le fasi dell'esperimento, dalla costruzione dei rivelatori all'analisi dei dati. Lanciato nel 2005, oggi comprende 80 scuole superiori italiane con centinaia di studenti che partecipano annualmente alle attività e rappresenta un osservatorio nazionale per il monitoraggio del flusso di raggi cosmici e consente studi di correlazione tra gli eventi della rete. La missione PolarquEEEst, iniziata nel 2018, ha ampliato la rete attraverso l'installazione di tre rivelatori a scintillazione a Ny Ålesund (Isole Svalbard) nel 2019, in collaborazione con il CNR.

I raggi cosmici, scoperti più di un secolo fa, continuano a essere di fondamentale interesse. Nonostante molto sia stato compreso sulla 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 alle quali si cerca di dare una risposta. Molte sono legate al meccanismo in grado di originare i raggi cosmici di energia ultraelevata (Ultra High Energy Cosmic Rays, UHECR). Altre riguardano la loro possibile produzione da particelle di materia oscura, 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. Offrono anche straordinarie opportunità didattiche per introdurre i giovani a concetti avanzati di fisica moderna. Il Progetto Extreme Energy Events rivela e studia i raggi cosmici in collaborazione con le scuole italiane introducendo un approccio pratico e interdisciplinare, che richiama l'eredità di Fermi.

### ***Stato dell'arte***

L'origine dei raggi cosmici di energia ultraelevata (oltre  $10^{18}$  eV) rimane oggetto di studio. Gli esperimenti che li studiano sono basati su reti di rivelatori a terra (in superficie, in quota o livello del mare, sotto montagne o sotto i ghiacci dell'Antartide ed anche nelle profondità marine) che rivelano, con varie tecniche, lo sciame generato dall'interazione del raggio cosmico primario con l'atmosfera o, come per i neutrini, il primario stesso. 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.

### ***Finalità e obiettivi***

Il Progetto EEE è un esperimento scientifico per il monitoraggio continuo e lo studio dei raggi cosmici con rivelatori situati prevalentemente all'interno degli istituti superiori di secondo grado, in modo da coinvolgere i giovani studenti e favorendo la diffusione della cultura scientifica. EEE prevede quindi l'installazione di rivelatori traccianti per i muoni cosmici, i "telescopi", su tutto il territorio nazionale. La distribuzione dei telescopi permette di studiare le caratteristiche del flusso di raggi cosmici su base locale, ma anche di correlare eventi sull'intera rete. EEE rappresenta quindi un osservatorio di raggi cosmici su scala nazionale che, attraverso un costante monitoraggio, permette studi multidisciplinari e a carattere STEM. Partecipano anche istituti scolastici che non hanno a disposizione un telescopio: EEE propone diverse attività, mette a disposizione rivelatori portatili e gli studenti hanno inoltre la possibilità di analizzare i dati acquisiti dalla rete, proporre e discutere analisi. Oggi 80 scuole collaborano ad EEE coinvolgendo un elevato numero di studenti; il confronto durante incontri sia da remoto che in presenza permette un ulteriore momento formativo. La missione PolarquEEEst rappresenta un ulteriore sviluppo e ampliamento della rete di monitoraggio dei raggi cosmici del Progetto EEE.

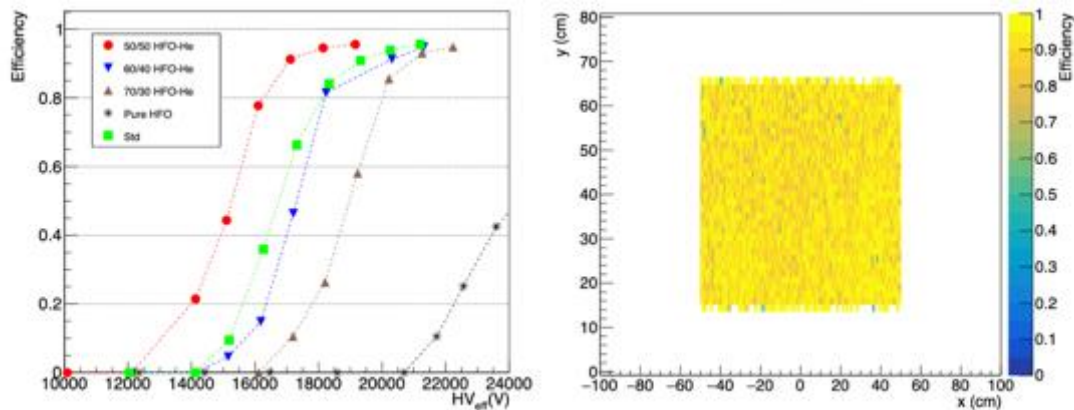
### Stato e risultati attesi

Il Progetto EEE consiste in una rete di 50 telescopi (figura 1 a sinistra) traccianti per raggi cosmici, ciascuno costituito da tre rivelatori di tipo Multigap Resistive Plate Chamber (MRPC), figura 1 a destra. I dati dei singoli siti permettono di studiare le caratteristiche del flusso locale dei raggi cosmici secondari: ogni telescopio è in grado di ricostruirne la direzione e, grazie ad un ricevitore GPS, il tempo di arrivo dei muoni permettendo lo studio di correlazioni tra stazioni poste anche a grande distanza.



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

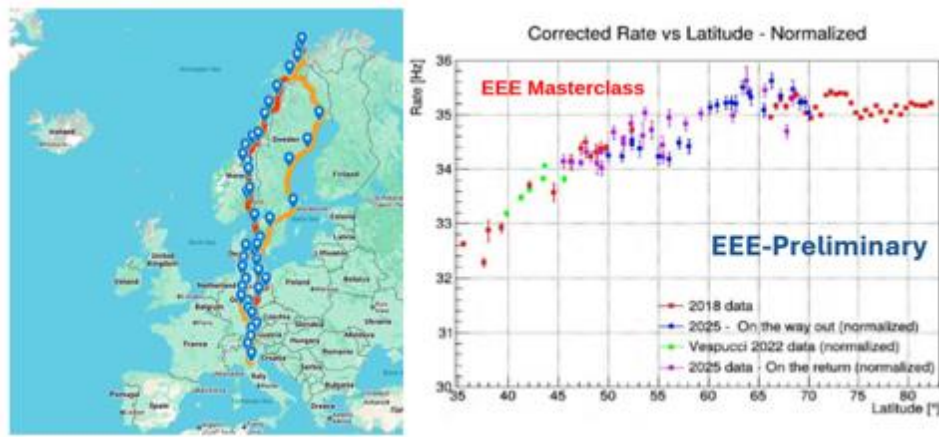
Dal 2022, finita l'emergenza COVID-19 e superata la sfida tecnologica legata all'introduzione di una nuova miscela ecologica di gas per i rivelatori, è iniziata l'attività di riaccensione dei telescopi. In figura 2 è mostrata l'efficienza di rivelazione misurata con la nuova miscela confrontata con la miscela precedente.



**Figura:** A sinistra l'efficienza di una MRPPC con diverse miscele in funzione della tensione applicata. A destra, la mappa dell'efficienza per la miscela 50/50 Freon ecologico-He per una tensione di circa 18 kV.

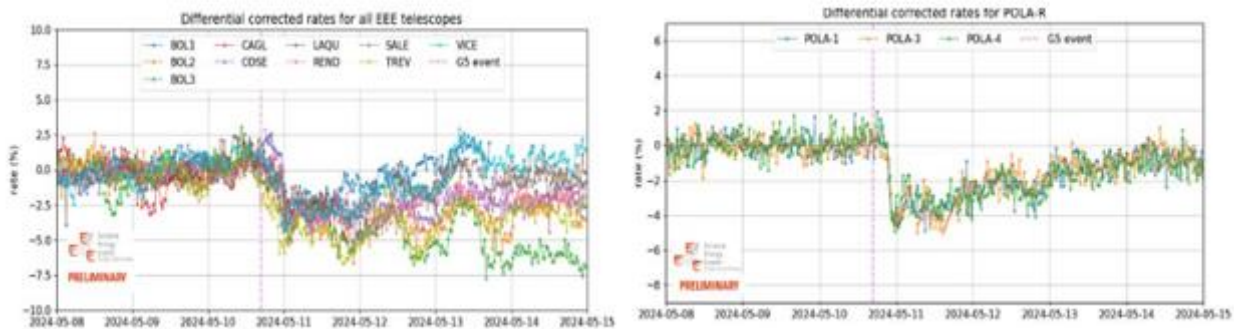
Ad oggi le attività sono riprese in circa 30 siti e i dati acquisiti sono già stati utilizzati per analisi di Fisica; mensilmente centinaia di studenti partecipano ai Run Coordination Meeting online per avere e/o fornire aggiornamenti sullo stato della rete. Dal 2022 sono ripartiti i Meeting annuali in presenza, l'ultimo dei quali si è svolto dal 12 al 14 novembre 2025 presso il CREF (100 partecipanti da tutta Italia).

All'interno del Progetto EEE è nata la Missione PolarquEEEst per la quale sono stati costruiti, coinvolgendo scuole superiori Norvegesi e Svizzere, rivelatori a scintillazione compatti per la misura del flusso dei raggi cosmici anche a latitudini estreme: i rivelatori POLA-R (R= 01,02,03 o 04). Nel 2018 POLA-01 a bordo del battello *Nanuq* ha circumnavigato le Svalbard misurando il flusso di raggi cosmici fino a 82° N. Nel 2019 tre rivelatori sono stati installati stabilmente a Ny Ålesund sund, per monitoraggio continuo dei raggi cosmici. Sono state effettuate varie campagne di misura in auto e anche a bordo della Nave Scuola "Amerigo Vespucci"; a settembre 2025 è stata effettuata un'ulteriore campagna di misura del flusso di raggi cosmici in funzione della latitudine in auto (*OpEEErland2025*, Bologna-Tromso e ritorno, figura 3 a sinistra); i risultati preliminari di tutte le misure sono in figura 3 a destra.



**Figura:** A sinistra: Tragitto della missione PolarquEEEst-OvEEErland2025. A destra: flusso dei raggi cosmici secondari in funzione della latitudine con i nuovi dati acquisiti nel 2025 (OvEEErland) e analizzati dagli studenti delle scuole del Progetto EEE.

Nella Prossima Figura è mostrato come sia i telescopi EEE (a sinistra) basati su tecnologia MRPC e funzionanti con la nuova miscela ecologica sia i rivelatori a scintillazione POLA-R alle Svalbard (a destra) hanno misurato simultaneamente una diminuzione del numero di muoni rivelati (effetto Forbush) in concomitanza con intensi brillamenti solari che si sono verificati a partire dall'8 maggio 2024, durante il ciclo solare 25. I risultati sono stati pubblicati su riviste internazionali e ulteriori analisi sono in corso.



**Figura:** Rate differenziale corretto nel periodo di osservazione relativo al Forbush del 2024, simultaneamente registrato da 10 telescopi EEE in Italia (sinistra) e da 3 alle Svalbard (destra).

È in corso la fase di design e test di primi prototipi di rivelatori traccianti trasportabili in grado di unire le caratteristiche di compattezza dei rivelatori POLA-R alle ottime prestazioni di tracciamento dei rivelatori basati su MRPC. Tali rivelatori saranno affiancati ai telescopi e amplieranno ulteriormente la rete EEE.

## **C.11 Cinematica e dinamica delle galassie**

Nel corso del 2025 la nostra attività di ricerca si è articolata lungo due principali linee tematiche: (i) la cinematica e la dinamica della Via Lattea e di alcune galassie esterne irregolari; (ii) lo studio della struttura a larga scala dell'universo. Per quanto riguarda la prima linea, abbiamo analizzato la cinematica della Via Lattea al di fuori del piano galattico, ottenendo nuove indicazioni sulla geometria della distribuzione di massa. Inoltre, abbiamo sviluppato un metodo originale per determinare i campi di velocità bidimensionali e le deformazioni del disco in galassie esterne, applicandolo con successo per ricavare nuovi vincoli sulla loro dinamica interna. Nel secondo ambito, ci siamo concentrati sull'elaborazione di un nuovo metodo statistico per analizzare quantitativamente le anisotropie nella distribuzione di massa su grande scala. Questo approccio è stato applicato con risultati promettenti all'analisi di simulazioni cosmologiche ad N corpi.

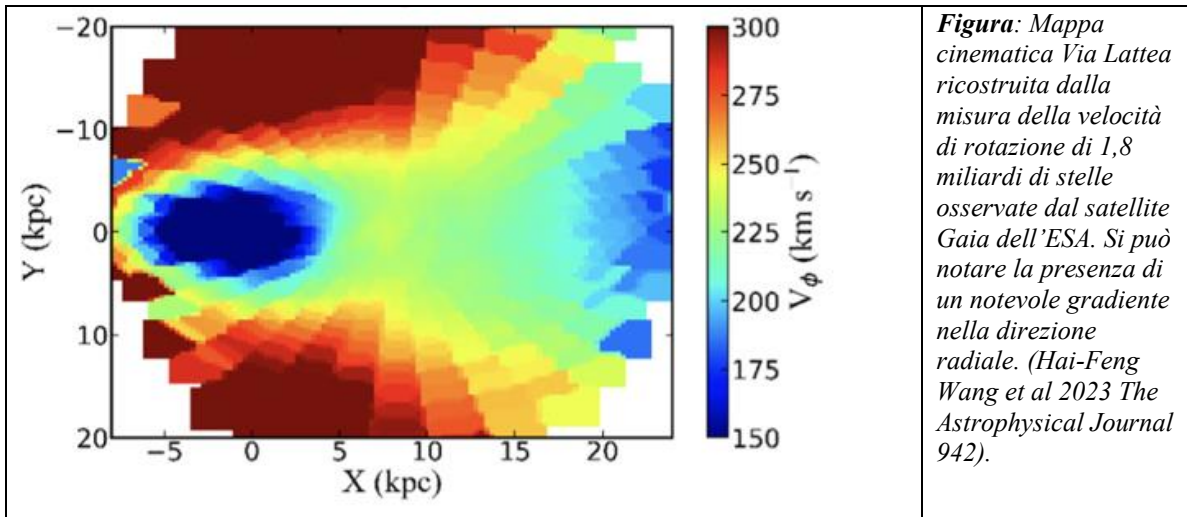
In the course of 2025, our research activity was structured around two main lines of investigation: (i) the kinematics and dynamics of the Milky Way and several irregular external galaxies; (ii) the study of the large-scale structure of the universe. Regarding the first area, we analyzed the kinematics of the Milky Way outside the galactic plane, obtaining new insights into the geometry of the mass distribution. In addition, we developed a novel method to determine two-dimensional velocity fields and disk deformations in external galaxies, applying it successfully to derive new constraints on their internal dynamics. In the second area, we focused on developing a new statistical method to quantitatively analyze anisotropies in the large-scale mass distribution. This approach was applied with promising results to the analysis of cosmological N-body simulations.

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).

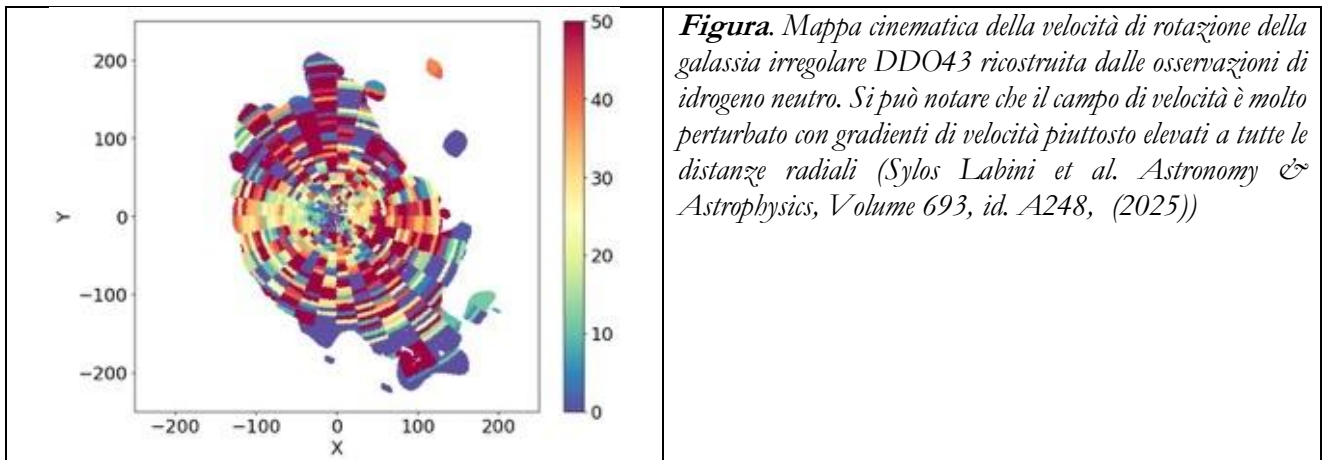
In particolare, il modello prevede che DM e BM luminosa mostrino proprietà cinematiche e dinamiche distinte, il che significa che le osservazioni della materia luminosa non possono vincolare direttamente quelle della materia oscura. Nonostante decenni di ricerche, non è stata trovata alcuna evidenza 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. Non intendiamo proporre una nuova teoria che, come gli approcci standard, tenti di spiegare le osservazioni su un vasto intervallo di scale spaziali—dalle galassie nane ( $\approx 1-10$  kpc) alle strutture più grandi osservabili ( $\approx 100-1000$  Mpc). Invece, ipotizziamo che il mistero legato alla DM non risieda solo nelle quantità immense richieste, ma anche nell'assunzione che un unico quadro teorico per la DM debba essere necessariamente adatto a spiegare processi fisici diversi su scale spaziali che coprono 5-6 ordini di grandezza. Infatti, un'ipotesi fondamentale dei modelli CDM è che la DM si comporti in modo identico su scale galattiche e cosmologiche, creando una forte connessione fisica tra fenomeni locali e fenomeni su larga scala. Il nostro obiettivo è esplorare se sia possibile 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.

### ***Stato dell'arte***

**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. Di recente abbiamo introdotto un nuovo modello che considera la possibilità che la materia oscura (DM) sia confinata ai dischi galattici, come la materia luminosa (LM): il modello del disco di materia oscura (DMD). Questo modello per la distribuzione della DM è ispirato a evidenze che suggeriscono una correlazione tra la DM e la distribuzione del gas di idrogeno neutro (HI) nelle galassie a disco. Abbiamo dunque studiato sia la Via Lattea, utilizzando i dati cinematici forniti dal satellite Gaia (Fig.1), sia galassie esterne (Fig.2). In entrambi i casi abbiamo mostrato che il DMD si accorda con le osservazioni in modo statisticamente soddisfacente.

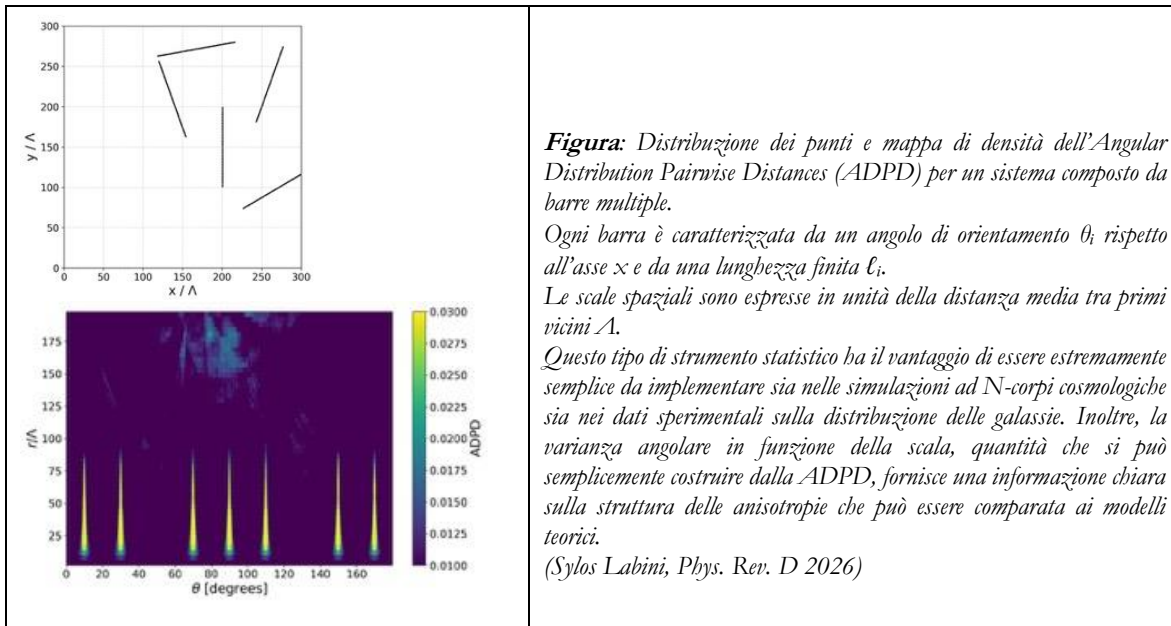


Le mappe ad alta risoluzione dell'emissione dell'idrogeno neutro nelle galassie esterne rappresentano osservazioni fondamentali per lo studio della loro cinematica e dinamica. Le curve di rotazione di campioni di galassie a disco (Sylos Labini et al., 2024) e di galassie nane (Sylos Labini et al., 2025) sono state descritte con buona precisione sia dal modello con alone che dal modello DMD, con livelli di accuratezza simili. È quindi necessario uno studio più esteso della loro cinematica. A questo scopo, abbiamo sviluppato (Sylos Labini et al., 2023) un metodo per analizzare i dati di velocità che consente di ottenere mappe bidimensionali delle velocità, a grana grossa e risolte angularmente, che permettono di mettere in correlazione le strutture spaziali con caratteristiche anisotrope del campo di velocità. Inoltre, abbiamo messo a punto un metodo per identificare eventuali deformazioni del disco galattico (Sylos Labini et al., 2025).

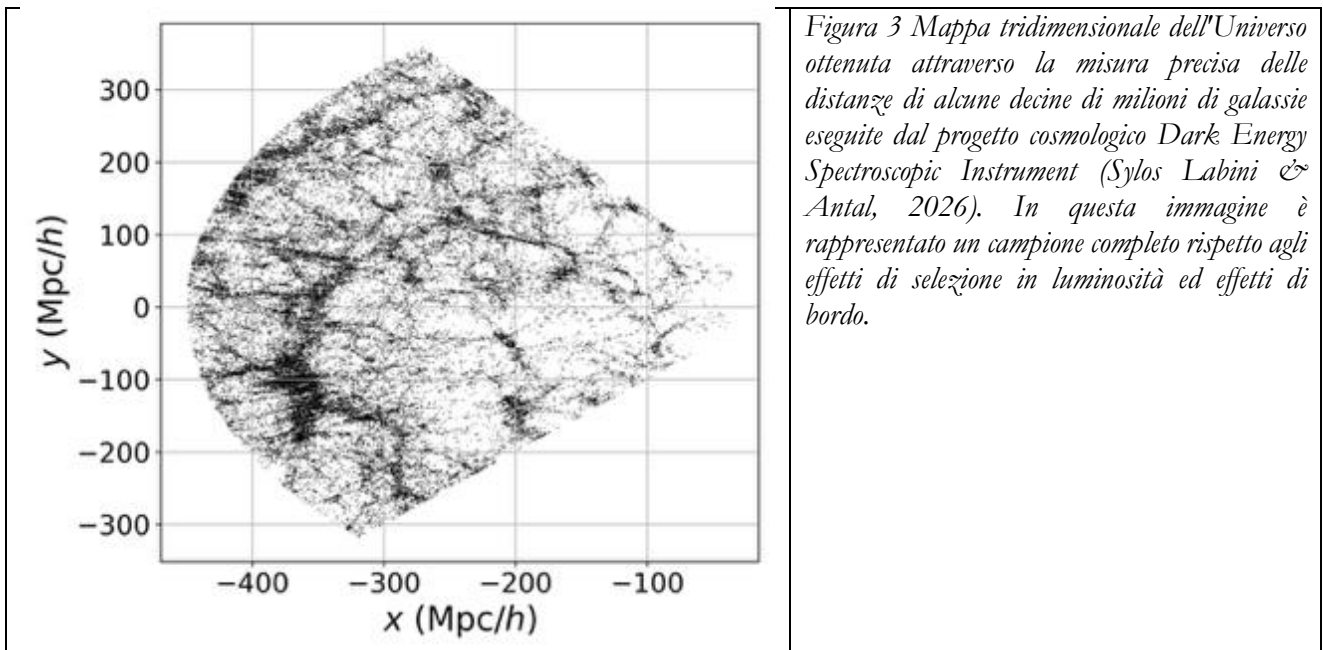


**La struttura a larga scala delle galassie** nell'universo rappresenta uno degli esempi più sorprendenti di complessità cosmica (Sylos Labini, 2011; Sylos Labini et al., 2014; De Marzo et al., 2021) e coinvolge le strutture più estese mai osservate. I dati osservativi hanno mostrato che questa distribuzione presenta correlazioni di tipo legge di potenza, indicative di una struttura frattale con dimensione  $D = 2$ , che si estende fino a diverse decine di megaparsec, con un possibile passaggio alla omogeneità su scale dell'ordine di 100 Mpc/h (Joyce et al., 2005; Hogg et al., 2005; Antal et al., 2009).

Rimane ancora oggetto di dibattito se questo comportamento di scala transisca o meno verso l'omogeneità a scale maggiori (Whitbourn & Shanks, 2014; Sylos Labini et al., 2014; Conde-Saavedra et al., 2015; Alonso et al., 2015; Pandey & Sarkar, 2015; Shirokov et al., 2016; Heinesen, 2020; Teles et al., 2021). L'identificazione di questa scala caratteristica pone significative sfide metodologiche, in particolare nella selezione e nell'interpretazione degli stimatori della funzione di correlazione. In questo contesto, il nostro lavoro si sta sviluppando lungo due linee complementari. In primo luogo, stiamo sviluppando strumenti statistici raffinati, capaci di esplorare le correlazioni direzionali e le anisotropie nella struttura su larga scala di una distribuzione di particelle (Figura in calce).



In secondo luogo, integreremo e analizzeremo i dati provenienti dai nuovi cataloghi di galassie man mano che saranno resi pubblicamente disponibili e faremo una analisi della correlazione a due punti e delle anisotropie spaziali (Figura seguente).



### Finalità e obiettivi

- (i) Dalle mappe cinematiche della Via Lattea e delle galassie esterne è possibile ottenere vincoli sulla distribuzione geometrica della componente di DM. Questi cruciali per distinguere tra il modello standard di alone e il modello DMD. Tali vincoli consentono di imporre condizioni fisiche stringenti sulla natura della DM, poiché generalmente non ci si aspetta che particelle di materia oscura esotica (non barionica) si aggregino in dischi galattici.
- (ii) La distribuzione spaziale delle galassie è un osservabile fondamentale per studiare la struttura a larga scala dell'Universo. Quantificarne con precisione le proprietà statistiche rappresenta tuttora una sfida importante, poiché la distribuzione galattica presenta schemi complessi e fortemente disomogenei, che comprendono le strutture più estese conosciute nel cosmo — esempi straordinari di complessità naturale. Un compito centrale della cosmologia osservativa è dunque la caratterizzazione quantitativa di queste

strutture su larga scala, con particolare attenzione alla loro estensione spaziale, al fine di permettere confronti significativi con i modelli teorici di formazione galattica.

### ***Stato e risultati attesi***

Il satellite Gaia dell'Agenzia Spaziale Europea, lanciato nel 2013, ha rivoluzionato la nostra comprensione della Via Lattea (MW) grazie a misurazioni angolari con una precisione compresa tra 20 e 200 microarcosecondi. Questa precisione ha permesso una mappatura dettagliata della galassia, coprendo fino a  $\sim 20$  kpc con elevata accuratezza e raggiungendo  $\sim 30$  kpc nelle regioni esterne, sebbene con una precisione inferiore. Ad oggi, Gaia ha rilasciato tre dataset (2016, 2018, 2022), con altri due previsti per il 2025-2026 e il 2030. Il secondo dataset ha fornito posizioni e velocità 3D per 7 milioni di stelle, successivamente estese a 33 milioni nel terzo dataset. La precisione delle misurazioni angolari migliora con il progredire della missione.

I dati 6D per un ampio campione stellare hanno permesso di misurare in maniera quantomai precisa la curva di rotazione della MW. In particolare, mentre diversi gruppi hanno usato dei sottocampioni con specifici tipi di stelle (giganti rosse, ecc.), il nostro gruppo 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 mostrano che un modello DMD si accorda meglio di un modello ad alone sferico. Gaia consente inoltre l'analisi delle curve di rotazione della MW al di fuori del piano galattico. Anche in questo caso i risultati suggeriscono che il modello DMD si adatta meglio alle curve di rotazione generalizzate — funzioni della distanza radiale e dell'altezza verticale — rispetto al modello di alone (Sylos Labini, 2024; Sylos Labini & Capuzzo-Dolcetta, 2026). I futuri dataset della missione Gaia potranno ulteriormente estendere questi studi cinematici e contemporaneamente forniranno un test del nostro metodo di deconvoluzione statistica.

Inoltre, i dati di Gaia consentiranno di caratterizzare l'estensione spaziale dei moti coerenti e di grande ampiezza in tutte le componenti di velocità, già rilevati nelle precedenti versioni dei dati, e permetteranno di esplorarne la relazione con le strutture spaziali della Galassia caratterizzandone in questo modo lo spazio delle fasi.

Per quanto riguarda le galassie esterne abbiamo condotto un'analisi del campo di velocità delle galassie nane appartenenti al campione raccolto dai progetti Local Irregulars That Trace Luminosity Extremes e The Hi Nearby Galaxy Survey (LITTLE THINGS), concentrandoci sulla ricostruzione di mappe bidimensionali della velocità che includono sia il campo di velocità trasversale sia quello radiale (Sylos Labini et al., 2025). Nell'intervallo di distanze radiali in cui le anisotropie del campo di velocità sono sufficientemente piccole da permettere di considerare il disco supportato dalla rotazione, e dove la geometria deformata del disco può essere trascurata, abbiamo ricostruito la curva di rotazione tenendo conto dell'effetto della deriva asimmetrica (asymmetric drift). Per il fit delle curve di rotazione, abbiamo utilizzato sia il modello standard con alone che il modello di DMD. La nostra analisi ha mostrato che i fit ottenuti con il modello DMD sono statisticamente comparabili a quelli derivati dal modello con alone standard, ma le masse inferite delle galassie nel modello DMD risultano essere circa da 10 a 100 volte inferiori rispetto a quelle ottenute con il modello standard.

## C.12 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 essi 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.

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: un'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, e per produrre modelli realistici dei fenomeni che avvengono in ambiente stellare è necessario tenere conto dello stato di ionizzazione dell'elemento. Il progetto si prefigge quindi la definizione e la realizzazione di 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. Dato il carattere innovativo dell'approccio è necessaria un'attività preliminare volta all'identificazione delle osservabili di rilievo - anche in funzione dei modelli teorici disponibili - per la caratterizzazione dei processi nucleari, alla definizione di un opportuno apparato di misura che permetta di operare in ambienti con alti impulsi elettromagnetici (come quelli prodotti dal laser) e all'ottimizzazione del sistema di rivelazione, che dovrà presentare opportune caratteristiche in termini di efficienza e tempi di reazione, così da essere efficace nella ricostruzione dello stato finale dei processi.

### ***Stato dell'arte nel campo / finalità, obiettivi e impatto***

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)). 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, constatando l'instaurarsi di comportamenti radioattivi o l'abbassamento della vita media di fattori significativi. 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.

### ***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. 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.13 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 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 (SDD) e rivelatori al Germanio ad alta purezza (HPGe). Algoritmi Machine Learning (ML) e Convolutional Neural Network (CNN) sono ottimizzati per la pulse shape analysis, la selezione degli eventi e 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.

**Violazione della connessione spin-statistica** – Il Principio di Esclusione di Pauli (PEP) discende dal teorema spin-statistica, fondamentale per la stabilità della materia quantistica e legato a principi del Modello Standard (MS) come l'invarianza di Lorentz e la simmetria CPT. La sua indagine fenomenologica costituisce

un test estremamente sensibile dei fondamenti del MS. Fin dai lavori di Fermi sono state esplorate possibili violazioni delle statistiche; oggi emergono due principali filoni:

- 1) Gravità Quantistica (QG) – La QG è una sfida centrale della fisica moderna, anche per l'inaccessibilità sperimentale diretta della scala di Planck. PAMQ ha dimostrato che la ricerca di transizioni atomiche PEP-violanti consente di testare modelli effettivi di QG, come Non-Commutative-QG (NCQG) e Minimal Length, imponendo vincoli estremamente stringenti, con sensibilità fino alla scala di Planck. In tali teorie l'invarianza di Lorentz risulta deformata, implicando violazioni della spin-statistica e del PEP.
- 2) “Quon” model [Phys. Rev. Lett. 83,4460 (1999)] – Soggetto alla superselezione Messiah-Greenberg MG, consente test solo in sistemi aperti, introducendo fermioni test in sistemi pre-esistenti. La natura fenomenologica richiede l'esplorazione di un ampio spettro di processi PEP-violanti lungo la tavola periodica. Recenti sviluppi nei modelli di parastatistica [Nature 637,314–318 (2025)] richiedono verifiche dedicate. PAMQ ha posto il limite più stringente [4].

**Modelli di collasso spontaneo** – Il principio di sovrapposizione, valido a livello microscopico, non si manifesta macroscopicamente, generando il problema della misura. PAMQ studia modelli di collasso spontaneo, come quelli gravitazionali di Diosi e Penrose (DP) o il CSL, che risolvono il problema [Rev. Mod. Phys. 85, 471 (2013)] e prevedono una caratteristica radiazione spontanea. Il DP ha stimolato sviluppi nella decoerenza gravitazionale in QG [Nat. Comm. 12,4449 (2021)] e [38], nonché le Hybrid Dynamics [Phys. Rev. X 13,041040, (2023)]. In questo contesto PAMQ sviluppa un nuovo approccio che combina spin-statistica e decoerenza per testare teorie di campo unificate.

L'attività sperimentale di PAMQ si svolge nell'ambito dell'esperimento VIP, che utilizza rivelatori avanzati di raggi X e gamma nell'ambiente a bassissimo background dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'INFN, di cui il responsabile PAMQ è anche responsabile nazionale INFN.

### ***Stato dell'arte***

Fino a pochi anni fa, i limiti più stringenti sulla scala di emergenza della QG ( $\Lambda$ ) derivavano principalmente dalla modifica delle relazioni di dispersione [Living Rev. Relativ. 16,5 (2013)]. Più recentemente, lo studio della violazione di PEP ha fornito vincoli ancora più forti. Nel settore leptonic, la ricerca di transizioni atomiche PEP-violanti sfrutta il fatto che le ampiezze di transizione dipendono da  $\Lambda$  e dal modello di QG. La collaborazione DAMA/LIBRA ha ottenuto  $\Lambda > 4 \times 10^{-3}$  Planck scales per il modello NCQG theta-Poincaré. PAMQ ha generalizzato questo approccio analizzando l'intero complesso delle transizioni K in Pb, migliorando la sensibilità di circa due ordini di grandezza [3], e ha condotto il primo studio sperimentale del modello Triply Special Relativity [9] e delle implicazioni dei modelli Minimal Length sulla spin-statistica, ottenendo il miglior limite al mondo.

Nel contesto del Quon model, gli esperimenti su sistemi aperti monitorano fermioni che non hanno mai interagito con altri fermioni. Studi pionieristici [Phys. Rev.,73(12):1472, (1948)] hanno analizzato la cattura di  $^{14}\text{C}$   $\beta$ -rays da Pb, mentre misure più recenti [Nature Phys.,20(7):1078–1083, (2024)] hanno ottenuto un limite sulla probabilità di violazione di PEP  $P < 10^{-3}$ . L'esperimento VIP introduce elettroni nuovi in Cu tramite corrente continua, misurando raggi-X da transizioni  $K_{\alpha 1,2}$  PEP-violanti con rivelatori SDD da 0.45 mm. PAMQ ha così stabilito il limite più stringente su P [4] e migliorato di un ordine di grandezza il limite per Pb [10]. Nel 2025 è stato completato l'upgrade di VIP-sistemi-aperti con rivelatori SDD innovativi da 1 mm [14,40], per testare P su elementi di numero atomico intermedio.

L'attività sui modelli di collasso spontaneo utilizza approcci interferometrici e non-interferometrici [Nat. Phys.,18,243-250(2022)], tra cui la radiazione spontanea, su cui PAMQ si concentra imponendo i limiti più stringenti. In particolare, PAMQ ha falsificato il modello di Karolyhazi [37] e la generalizzazione non-Markoviana del CSL che abbiamo dimostrato essere di natura gravitazionale [5]. È stato inoltre sviluppato il primo metodo capace di distinguere il meccanismo fisico responsabile della decorrenza spontanea [1]. Le verifiche sperimentali in collaborazione con XENONnT hanno permesso di porre i limiti più forti sui modelli CSL e DP ed escludere per la prima volta il modello GRW [2].

Nel 2025 PAMQ ha avviato una collaborazione con l'esperimento PandaX per testare violazioni di spin-statistica e decoerenza gravitazionale indotte da modelli Minimal Length.

### Finalità e obiettivi

PAMQ sfrutta predizioni comuni dei modelli di QG (non-commutatività degli operatori spazio-temporali e Minimal length) che comportano violazioni di spin-statistica, fornendo i limiti più forti al mondo, con lo scopo di spingerli fino alla scala di Planck. PAMQ agisce da rasoio di Occam nel discriminare fra le varie proposte di QG. L'esperimento VIP-sistemi-aperti ha migliorato di oltre due ordini di grandezza il limite su P [4]; l'upgrade mapperà P lungo la tavola periodica, per verificare i modelli Quon e parastatistica.

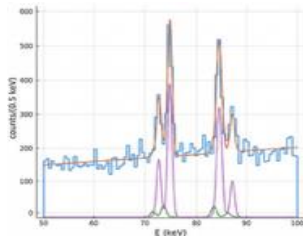


**Figura** - Nuovo setup basato su rivelatore Broad Energy Germanium (BEGe). Il setup è supportato da sospensioni meccaniche per minimizzare le vibrazioni meccaniche. Un soundproof box minimizza le vibrazioni acustiche ed agisce da gabbia di Faraday

PAMQ sta incrementando la sensibilità delle misure di radiazione spontanea, per testare teorie non-Markoviane, Hybrid Dynamics e collasso indotto da QG. Nel 2025 ha completato il setup con rivelatore BEGe [11] e sistema di isolamento dedicato, per sondare il meccanismo fisico responsabile della decorrenza [1] (Fig.1). Ha sviluppato algoritmi CNN per analisi pulse shape e selezione degli eventi [6]. Questo permetterà a PAMQ di esplorare i più promettenti modelli unificati di gravità e quantistica.

### Stato e risultati attesi

Sulla base del calcolo delle ampiezze di transizione atomica violanti [3], e derivando lo shift energetico delle righe tramite un algoritmo multiconfiguration Dirac-Fock and General Matrix Elements [14], PAMQ ha posto i limiti:  $\Lambda > 1.6 \times 10^{-1}$  Planck scales per theta-Poincaré e  $\Lambda > 5.6 \times 10^{-9}$  Planck scales per Triply Special Relativity [3,9]. Sulla scala di emergenza di Minimal Length PAMQ ottiene  $\beta < 10$  (Fig.2), migliorando di circa 15 ordini di grandezza il limite più stringente in letteratura [Phys. Rev. D 108(2023)6,066008]. Il setup sfrutta rivelatori HPGe e targets di Pb Romano. Per estendere la sensibilità fino alla scala di Planck è stata avviata la presa dati con il nuovo setup BEGe.



**Figura** - Fit (arancione) dello spettro misurato (blu). Best Bayesian fit alle transizioni standard in viola. La distribuzione verde mostra lo spettro delle transizioni violanti (modello Minimal Length) corrispondente ad un upper bound sul segnale con confidence level del 95%, che esclude il modello fino a  $\beta < 10$ .

VIP-sistemi-aperti ha posto il limite più stringente su P nel rispetto della superselezione (MG),  $P < 2.47 \times 10^{-43}$  [4]. È stato completato l'upgrade con innovativi rivelatori SDD da 1 mm, sviluppati in collaborazione con FBK e Politecnico di Milano. Sono previsti tre run (di un anno) con target di Ag, Sn e Zr per mappare P su elementi di numero atomico intermedio. La sensibilità sarà ulteriormente migliorata: a) presa dati in corrente modulata e analisi Bayesiana spettrale/Fourier (miglioramento del 32% [12]); b) calibrazione basata su ML e Differentiable Programming, che migliora la risoluzione energetica delle SDD del 6% [15]. L'R&D sui rivelatori è condotto in sinergia con SIDDHARTA/AMADEUS (DAFNE, LNF-INFN) ed E15, E31 (J-PARC), con ricadute sullo studio della stranezza in fisica atomica e nucleare.

Le misure di radiazione spontanea (X e gamma), effettuate con HPGe ed in collaborazione con XENONnT, hanno permesso di porre i limiti più stringenti sulla lunghezza di correlazione dei modelli CSL e DP [1,2,16], e di escludere: il DP nella versione parameter-free, i modelli GRW, Karolyhazi e un prototipo di CSL non-Markoviano [5,37]. Sono state sviluppate estensioni dissipative [17] e non-Markoviane [1] di CSL e DP, sensibili per la prima volta al meccanismo fisico del collasso nel range (1–15) keV.

Su questa base è in corso l'R&D per un upgrade del setup BEGe, studiato per la rivelazione di fotoni da target ottimizzati nel range (1–15) keV. Ciò consentirà misure simultanee e indipendenti di violazione di PEP e radiazione spontanea, riducendo gli effetti sistematici. Ci proponiamo un programma fenomenologico ambizioso, che sarà in grado di verificare i più recenti modelli di collasso, e nuove teorie unificate che prevedono sia violazione di spin-statistica che meccanismi di decoerenza gravitazionale.

## **C.14 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.

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.

Sono stati altresì studiati 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 con particolare attenzione alla storia della 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, oltre all'approfondimento dell'opera di alcune scienziate che collaborarono alle ricerche svolte presso il Regio Istituto di Fisica nel periodo preso in esame, si è approfondita la figura di Laura Capon Fermi e il suo lavoro di storica e di attivista nel periodo americano della sua vita.

Sta proseguendo il lavoro di ricerca e di studio sulla figura e l'opera di Arturo Malignani, inventore geniale, studioso autodidatta e curioso, che 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 sta sviluppando 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:** Orso Mario Corbino; sullo sfondo: Regio Istituto di Fisica di Roma, primi del Novecento

### **Stato dell'arte**

Il Regio Istituto di Fisica di via Panisperna rappresenta un capitolo fondamentale della storia della scienza: è una delle istituzioni più iconiche della fisica italiana e mondiale, legata alle ricerche che hanno contribuito a gettare le basi per la fisica moderna. Tra gli anni '20 e '30, sotto la guida di Enrico Fermi, il gruppo di via Panisperna ottenne risultati straordinari che, da un lato, hanno aperto la strada a nuove frontiere della ricerca; dall'altro, hanno avuto un impatto profondo sulla società.

La bibliografia e le ricerche in questo campo di studi sono ampie e numerose e affrontano vari aspetti della storia legata a via Panisperna. Dalle biografie dei protagonisti, a partire da Enrico Fermi, fino al fondatore e primo direttore dell'istituto, Pietro Blaserna; sono stati presi in esame il metodo, le scoperte e gli esperimenti dei ragazzi di via Panisperna; è stata analizzata la vasta eredità della scuola capitanata da Enrico Fermi che ha lasciato un'impronta indelebile nella storia della fisica.

Una storia altresì protagonista di varie produzioni televisive e radiofoniche, supportate dal personale di ricerca afferente al Cref.



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

### **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 FSL (ex 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:** *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.

## **C.15 Sulle orme dei Ragazzi di via Panisperna: tra ricerca scientifica e impegno civile**

Il progetto si concentra sulle ricerche condotte a Roma da quei fisici che, pur frequentando l'Istituto Fisico di Roma, non facevano parte della cerchia ristretta dei "Ragazzi" riunitasi attorno alla figura di Enrico Fermi oppure che, pur facendone parte, furono a Roma per un periodo di tempo assai limitato, quali in particolare Aldo Pontremoli, Bruno Pontecorvo e Oscar D'Agostino. In continuità con il passato, il progetto si baserà su fonti primarie, fornite dalla letteratura scientifica originale, e sui documenti d'archivio.

Inoltre, in occasione del bicentenario della morte di Alessandro Volta (1827), sarà approfondito il ruolo avuto dalla Fondazione intitolata a suo nome, annessa alla R. Accademia d'Italia, nel favorire lo sviluppo della fisica moderna in Italia negli anni '20 e '30 del Novecento attraverso l'organizzazione di congressi internazionali e il finanziamento di borse di ricerca all'estero.

Come è ben noto, con l'espressione colloquiale "Ragazzi di Via Panisperna" si intende solitamente il gruppo di giovani fisici che si riunì nei primi anni Trenta presso l'Istituto di Fisica della Regia Università di Roma in Via Panisperna, attorno alla figura di Enrico Fermi. A volte, sono stati anche definiti i "Ragazzi del "Senatore Corbino" – in particolare da Laura Fermi nel 1954. Infatti, Orso Mario Corbino era nei primi anni Trenta il Direttore dell'Istituto, ed era molto interessato agli sviluppi strategici della ricerca. Il leader riconosciuto dei "Ragazzi" era, naturalmente, lo stesso Fermi. Gli altri esponenti di spicco erano Edoardo Amaldi, Oscar D'Agostino, Bruno Pontecorvo, Franco Rasetti, Emilio Segrè e, a un livello di vicinanza un po' diverso, Ettore Majorana.

Motivazione scientifica di questo progetto è lo studio delle ragioni che portarono allo scioglimento del gruppo nel 1935, con particolare riferimento per il destino scientifico di D'Agostino e Pontecorvo. Si intende inoltre ampliare il raggio d'azione sul versante dei protagonisti, ovvero approfondendo i contributi

di fisici che pur frequentando l'Istituto fisico di Roma, quali Aldo Pontremoli, non facevano parte del gruppo dei Ragazzi. In continuità con il passato, queste ricerche storiografiche si baseranno su fonti primarie, fornite dalla letteratura scientifica originale, e sui documenti d'archivio.

Parte integrante del progetto sarà lo studio del ruolo avuto dalla Fondazione intitolata a Volta, annessa alla R. Accademia d'Italia, nel favorire lo sviluppo della fisica moderna in Italia attraverso l'organizzazione di congressi internazionali (quali il celebre "congresso internazionale dei fisici" del 1927) e il finanziamento di borse di ricerca all'estero.

### ***Stato dell'arte***

Negli ultimi anni abbiamo iniziato un'esplorazione delle attività presso l'Istituto di Fisica di Roma con lo scopo di ricostruire, in particolare, la scoperta di Fermi della radioattività artificiale indotta dal bombardamento di neutroni e la sua teoria del decadimento beta, due pietre miliari della fisica dell'epoca. Strumenti di studio essenziali sono stati gli archivi, alcuni dei quali sono stati da noi catalogati (come l'archivio di Fermi presso la Domus Galilaeana di Pisa e l'archivio D'Agostino ad Avellino). Abbiamo inoltre studiato l'attività accademico-scientifica di Majorana e la sua scomparsa nel 1938 e l'attività di Pontecorvo in Italia e all'estero, con particolare riferimento per le sue ricerche sui neutrini nell'ambito del progetto anglo-canadese Tube Alloys. Per quanto riguarda Pontremoli, assistente di Corbino all'inizio degli anni Venti, abbiamo studiato nel dettaglio il suo ruolo all'interno della spedizione scientifica del "dirigibile Italia", conclusasi tragicamente il 25 maggio 1928.

### ***Finalità e obiettivi***

Il progetto ha due finalità principali, tra loro connesse. La prima finalità è lo studio delle traiettorie scientifiche e accademiche di alcuni personaggi meno studiati dell'Istituto di Fisica di Via Panisperna, quali Aldo Pontremoli – già assistente di Corbino e ternato nel concorso di Fisica teorica tenutosi a Roma nel 1926 – Oscar D'Agostino – il chimico del gruppo – e Bruno Pontecorvo – il più giovane dei "ragazzi di Via Panisperna".

La seconda finalità è lo studio dello sviluppo della meccanica quantistica in Italia attraverso l'analisi di una serie di indicatori. Se in occasione dello scorso PT ci si concentrò sul ruolo di una rivista italiana, "Il Nuovo Cimento" della Società Italiana di Fisica, in questo progetto ci si focalizzerà sull'organizzazione in Italia di congressi internazionali, con particolare riferimento per il ruolo giocato dalla Fondazione Alessandro Volta in tale organizzazione. Questa ricerca si inserirà nelle celebrazioni del 2027 per il bicentenario della morte di Alessandro Volta.

Da un punto di vista metodologico il progetto intende avvalersi essenzialmente di fonti primarie, archivistiche (quali manoscritti e corrispondenza) e a stampa (articoli scientifici e atti di convegni). Obiettivo di questo progetto sarà quello di arricchire la nostra conoscenza sulla storia della fisica negli anni '20 e '30 del Novecento attraverso l'analisi delle attività di fisici meno studiati nell'ambito dei programmi di ricerca portati avanti presso l'Istituto di Fisica di Roma.

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.

### ***Stato e risultati attesi***

Traiettorie scientifiche e accademiche poco studiate di alcuni dei personaggi legati a Via Panisperna. Intendiamo continuare l'investigazione delle traiettorie scientifiche e accademiche di alcuni dei personaggi legati a Via Panisperna (Fig. 1). In questo ambito è prevista la prosecuzione delle ricerche su Aldo Pontremoli, del quale nello scorso PT si è analizzato il coinvolgimento nella spedizione polare del dirigibile "Italia" (1928). A questo proposito, è previsto lo studio del ruolo avuto da Pontremoli nell'organizzazione, in veste di segretario, del celebre congresso internazionale dei fisici, svoltosi a Como nel 1927. Per questa ricerca faremo uso delle fonti documentarie e archivistiche preservate dall'Accademia dei Lincei e dal Museo Casartelli di Como.

Un altro tema di ricerca sarà l'attività scientifica di Oscar D'Agostino, in particolare attraverso il suo archivio conservato in Avellino, l'archivio Amaldi presso la Sapienza Università di Roma e l'archivio Segrè a Berkeley. Parte integrante di questa ricerca sarà lo studio delle motivazioni che portarono allo scioglimento del gruppo nel 1935.

In ultimo si studierà 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.



Figura: Tre personaggi legati a Via Panisperna: Aldo Pontremoli, Oscar D'Agostino, Bruno Pontecorvo

### **Sviluppo della Meccanica quantistica in Italia: 1900-1940**

In vista del bicentenario della morte di Alessandro Volta, si intende proseguire lo studio dello sviluppo della meccanica quantistica in Italia attraverso l'analisi del contributo della Fondazione Alessandro Volta, annessa alla R. Accademia d'Italia all'organizzazione di congressi internazionali di fisica in Italia. Il primo di questi, il Congresso internazionale dei fisici, svoltosi a Como nel 1927 proprio in occasione del centenario della morte di Volta, portò in Italia i maggiori protagonisti della meccanica quantistica (Fig. 2). Molto importante, per quanto riguarda le applicazioni della meccanica quantistica, fu poi il congresso internazionale di fisica nucleare organizzato dalla Fondazione Volta a Roma nel 1931, che ebbe in Enrico Fermi il segretario generale e in Orso Mario Corbino il Presidente. Questa ricerca rappresenta uno spin-off delle ricerche condotte nell'ambito del precedente PT che, in occasione del centenario della meccanica quantistica, hanno prodotto la catalogazione e lo studio degli articoli apparsi sulle pagine dell'organo della Società Italiana di Fisica "Il Nuovo Cimento" riguardanti la meccanica quantistica, nonché l'analisi del contributo 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.



**Figura:** I partecipanti al Congresso internazionale dei fisici tenutosi a Como nel 1927 (sopra).  
Tre partecipanti illustri: Enrico Fermi, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli (sotto).



## C.16 La Comunicazione del CREF e del Museo Enrico Fermi

Il Centro Ricerche Enrico Fermi (CREF) si trova a un crocevia tra la storia e il 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 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.

Il Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche Enrico Fermi rappresenta, fin dalla sua denominazione, la volontà di fare da ponte tra un passato glorioso della fisica italiana e le sfide del presente. La comunicazione del Centro deve quindi saper coniugare la valorizzazione dell'eredità storica e del prestigio del luogo stesso in cui risiede, con la promozione della ricerca più attuale. Da un lato, deve comunicare l'attività di ricerca all'avanguardia che lo contraddistingue, utilizzando linguaggi specialistici e canali accademici. Dall'altro, deve rendere accessibile al grande pubblico l'affascinante storia della fisica italiana e l'eredità di Enrico Fermi, attraverso il Museo Storico. Questa duplice missione richiede una strategia di comunicazione articolata, capace di dare un'identità forte e definita all'ente e coniugare rigore scientifico e divulgazione efficace, coinvolgendo un pubblico eterogeneo che va dall'ambiente accademico alle scuole, fino agli appassionati e ai semplici curiosi.

### **Stato dell'arte**

Negli ultimi anni abbiamo iniziato un'esplorazione delle attività presso l'Istituto di Fisica di Roma con lo scopo di ricostruire, in particolare, la scoperta di Fermi della radioattività artificiale indotta dal bombardamento di neutroni e la sua teoria del decadimento beta, due pietre miliari della fisica dell'epoca. Strumenti di studio essenziali sono stati gli archivi, alcuni dei quali sono stati da noi catalogati (come l'archivio di Fermi presso la Domus Galilaeana di Pisa e l'archivio D'Agostino ad Avellino). Abbiamo inoltre studiato l'attività accademico-scientifica di Majorana e la sua scomparsa nel 1938 e l'attività di Pontecorvo in Italia e all'estero, con particolare riferimento per le sue ricerche sui neutrini nell'ambito del progetto anglo-canadese Tube Alloys. Per quanto riguarda Pontremoli, assistente di Corbino all'inizio degli anni Venti, abbiamo studiato nel dettaglio il suo ruolo all'interno della spedizione scientifica del "dirigibile Italia", conclusasi tragicamente il 25 maggio 1928.

**La comunicazione istituzionale degli enti di ricerca è in un periodo di grande evoluzione.** Da un lato, c'è una crescente consapevolezza dell'importanza di comunicare al grande pubblico i risultati della ricerca, di coinvolgere i cittadini nel processo scientifico e di promuovere collaborazioni. Dall'altro, le sfide sono molteplici: la necessità di semplificare linguaggi complessi, di utilizzare canali comunicativi sempre più diversificati (dai social media ai podcast), di misurare l'impatto delle azioni di comunicazione e di adattarsi a un panorama mediatico in continua trasformazione.

Gli enti di ricerca stanno investendo sempre più in uffici stampa, attività di divulgazione scientifica e progetti di *citizen science*, per colmare il divario tra il mondo della ricerca e la società.

Tuttavia, persistono ancora criticità legate alla frammentazione delle iniziative, alle difficoltà di operare in un mondo che cambia molto velocemente, all'insufficienza di risorse dedicate e alla difficoltà di valutare a lungo termine gli effetti della comunicazione istituzionale.

Da questo punto di vista, il CREF ha saputo intuire l'importanza di dotarsi di un ufficio comunicazione in grado di veicolare un'immagine e un messaggio coerenti con l'ente, attraverso canali differenziati e la capacità di creare relazioni e collaborazioni con le istituzioni del mondo accademico e civile.

**Anche i musei scientifici si trovano a un crocevia cruciale tra scienza e società.** L'International Council of Museums (ICOM) ha recentemente modificato la definizione di museo, mettendo in risalto, tra le altre cose, il legame con la ricerca e il ruolo di luogo di discussione aperta e libera sulla cittadinanza su temi di attualità. Di conseguenza, la comunicazione museale, un tempo incentrata sull'esposizione di reperti e sull'offerta di visite guidate tradizionali, ha conosciuto una forte evoluzione. Grazie all'avvento delle nuove tecnologie e alla crescente consapevolezza dell'importanza della divulgazione scientifica, si sono moltiplicate

le strategie per coinvolgere il pubblico, dalle mostre interattive alle esperienze di realtà virtuale, fino alla produzione di contenuti digitali e alla promozione di eventi divulgativi. Il Museo Enrico Fermi ha abbracciato fin dall'inizio la volontà di offrire un'esperienza coinvolgente e al passo con i tempi, rinnovando nel tempo l'allestimento e le proposte di divulgazione: laboratori, percorsi diversificati, PCTO, conferenze e presentazioni. L'ufficio comunicazione del CREF sostiene e promuove tutte le iniziative del Museo, partecipando anche alla fase di ideazione e proponendo attività e collaborazioni, così da creare un'identità visiva e verbale coerente e una vera e propria community intorno al Museo.

### **Un'identità visiva distintiva**

Per sottolineare la doppia anima del CREF, nel 2023 è stato realizzato un restyling completo dell'immagine coordinata, con la creazione di un nuovo logo e di due siti web dedicati, uno al Centro di Ricerca e l'altro al Museo, entrambi completamente bilingui in italiano e inglese. Il logo, caratterizzato dal monogramma di Fermi, esprime l'unità dell'istituzione attraverso una palette cromatica distintiva per ciascun ambito: azzurro e nero per la ricerca, rosso e nero per il museo. Nonostante le differenze, i due siti condividono uno stile grafico coerente e un link reciproco, sottolineando l'interconnessione tra le due anime del CREF.

### **Comunicazione omnicanale**

Oltre ai siti web, la comunicazione del CREF si avvale di diversi canali:

- **Social media:** Per raggiungere un pubblico ampio e variegato e favorire l'interazione,
- **Newsletter:** Per informare regolarmente i visitatori e gli interessati alle attività del CREF,
- **Liste di diffusione:** Per comunicare con un pubblico più specifico, come scuole e ricercatori,
- **Relazioni pubbliche:** Per promuovere l'istituzione e le sue iniziative presso i media,
- **Video:** Per creare un archivio di contenuti per la didattica e la ricerca in storia della fisica.

### **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:** diffonderli, sottolineandone 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.**

Il CREF si conferma come un polo culturale di riferimento, in grado di coniugare la valorizzazione del patrimonio storico-scientifico con la promozione della ricerca d'avanguardia. Grazie a una comunicazione sempre più efficace e a una programmazione ricca di eventi e iniziative, la comunicazione si propone di aiutare il CREF a crescere e a consolidare il suo ruolo nel panorama culturale italiano.

### ***Stato e risultati attesi***

#### **La comunicazione digitale del CREF: un ponte tra passato, presente e futuro**

Il CREF ha sviluppato una strategia di comunicazione digitale articolata e diversificata, con l'obiettivo di raggiungere un pubblico ampio e variegato, dalla comunità scientifica agli appassionati di storia della scienza, fino alle scuole.

#### **I due siti web: vetrine digitali dell'istituzione**

- **Sito web del Centro Ricerche:** Il sito è stato completamente rinnovato, offrendo un'immagine moderna e curata, più in linea con i siti degli enti europei che con quelli italiani. Il fondo bianco, gli elementi azzurri e la scelta di un font di facile lettura danno una sensazione di ariosità e contemporaneità, con un'interfaccia intuitiva e contenuti organizzati in modo chiaro e conciso. Le sezioni di notizie, eventi e seminari sono state messe in rilievo direttamente dalla Home page, per un maggiore coinvolgimento del pubblico. Nel Menu principale sono messe in evidenza sia la sezione delle gare, con apertura alle collaborazioni, che la parte di Terza Missione, con un link al Museo.

**Nel prossimo futuro:** saranno messe in evidenza macro aree delle linee di ricerca e la parte dei ricercatori e delle pubblicazioni andrà direttamente nella home page. La parte di terza missione sarà arricchita da descrizioni dei PCTO, delle scuole e dei workshop per PhD e post-doc.

- **Museo Storico della Fisica: Il sito web del Museo è pensato per accompagnare il visitatore in un percorso di scoperta interattivo, prima e dopo la visita.** Le informazioni su come prenotare e accedere al Museo sono messe in evidenza tramite sezioni distinte per gruppi, scuole e singoli. Abbiamo dato la possibilità di prenotare direttamente dal sito tramite modulo e di consultare il calendario degli Open Day e il programma degli eventi.

La sezione dedicata alle scuole offre materiali didattici e attività per facilitare la preparazione delle visite e l'approfondimento dei temi trattati. In particolare, la sezione "Un giro al museo" permette di avere una panoramica delle varie sale e del percorso museale. Dalla sezione approfondimenti è possibile scaricare una guida in PDF realizzata da una borsista nell'ambito di un progetto di ricerca, sulla quale la comunicazione ha lavorato alla revisione del testo e alla ricerca grafica, con la realizzazione di immagini accattivanti ed esemplificative che mescolano le foto d'archivio a stilemi ed elementi

iconografici ispirati alla pop art, al mondo dei comics e dei social media. Una sezione “bibliografia” e una “filmografia” offrono inoltre una selezione continuamente aggiornata di materiali di studio e di ricerca. Il sito è arricchito da un blog con brevi articoli di approfondimento sulle attività svolte, la storia della fisica legata al museo e le visite di rilievo.

**Nel prossimo futuro: l’impatto visivo della sezione “Un giro al Museo” sarà migliorato e la parte di articoli di approfondimento sarà potenziata. Verrà inserita una parte dedicata alle scuole elementari con la presentazione di laboratori dedicati e attività scaricabili.** La sezione relativa alle visite, il *copy* e il *microcopy* delle sezioni di informazione e relazione con il pubblico vengono aggiornati in base ai feedback continui che riceviamo, nell’ottica di rendere ogni interazione più immediata e accessibile possibile.



*Figura: illustrazione realizzata per il booklet del Museo rivolto alle scuole*

### **La Palazzina di via Panisperna: un luogo iconico**

La palazzina di via Panisperna, che ospita l’ente di ricerca e il Museo, è un luogo iconico della fisica italiana e costituisce parte integrante del percorso di visita. Costruita alla fine dell’800 come sede del nuovissimo Istituto Regio di Fisica in una Roma appena divenuta capitale d’Italia, è diventata il simbolo della fisica italiana della prima metà del ‘900. Qui, nel 1931, è stato organizzato il primo Congresso di Fisica Nucleare, che ha riunito, in una foto scattata sulle scale del cortile interno e divenuta emblematica, molti premi Nobel dell’epoca. E sempre qui, negli anni ‘30, si è formata la prima squadra scientifica del mondo. Guidati da Enrico Fermi, i ragazzi “di via Panisperna” hanno condotto gli esperimenti che hanno portato al Nobel. Il legame di Fermi con gli Stati Uniti, le molteplici linee di ricerca partite da qui, le collaborazioni intrecciate da ognuno dei “ragazzi” e l’enorme lavoro di Edoardo Amaldi nella rifondazione della fisica romana fanno sì che siano moltissime le persone del mondo della ricerca scientifica nazionale e internazionale (soprattutto in fisica, ma anche in ingegneria) che sentono un forte legame con questo luogo e con ciò che rappresenta. Uno dei primi obiettivi della comunicazione è stato quello di costruire quella che, in termini tecnici, si chiama awareness, ovvero consapevolezza, del luogo. Dopo aver perso la sua funzione scientifica alla metà degli anni ‘30, la palazzina è stata inglobata nel complesso del Viminale ed è stata per decenni utilizzata come archivio della Polizia. Dopo essere stata restaurata e restituita alla sua funzione di centro di ricerca, l’accesso al pubblico è stato rallentato dalle misure di contrasto alla pandemia. Nel 2022, quindi, è iniziato il lavoro di comunicazione sull’esistenza stessa del luogo e sulla possibilità di accedervi. Le prime conferenze sono state organizzate senza streaming proprio per incoraggiare le persone a venire. L’affluenza del pubblico è cresciuta grazie al lavoro capillare e continuo della comunicazione. Dalle poche decine di presenze delle

prime conferenze e Open Day del Museo siamo passati ad aperture su quasi tutti i giorni della settimana, e posti esauriti a pochi giorni dall'invio della newsletter.

Il prestigio della palazzina fa sì che diverse istituzioni richiedano l'organizzazione di eventi e convegni di natura scientifica nella nostra sede. Grazie alla presenza di un ufficio eventi, coordinato dalla dott.ssa Marta Pepe, e dell'Ufficio tecnico, è possibile offrire un supporto organizzativo e logistico di alto livello.



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

### **Identità visiva e verbale**

**L'identità visiva del Centro Ricerche e Museo Enrico Fermi si presenta come un affascinante connubio tra passato e presente.** Le fotografie in bianco e nero, che evocano l'atmosfera storica della palazzina di via Panisperna, si intrecciano con elementi grafici moderni e pop, creando un'immagine dinamica e accattivante. La scelta dei colori, dei font e degli elementi grafici è stata accurata e coerente, dalla segnaletica interna ed esterna fino alla grafica dei social media e del sito web. L'uso sapiente di questi elementi visivi contribuisce a creare un'atmosfera accogliente e stimolante, che invita il pubblico a scoprire la storia e l'attualità della fisica. **L'identità verbale, pur mantenendo un tono istituzionale, è caratterizzata da un linguaggio caldo e coinvolgente,** che trasmette la passione e l'impegno del team che lavora dietro le quinte. I contenuti sui social media, pur adattandosi ai diversi linguaggi delle varie piattaforme, mantengono una coerenza di fondo, sottolineando l'importanza della comunicazione e della divulgazione scientifica. In questo modo, il Centro Ricerche e Museo Enrico Fermi si presenta al pubblico come un luogo in cui la storia della scienza si incontra con la ricerca contemporanea, in un'atmosfera accogliente e stimolante.

### **Cicli di Conferenze**

Le 'Lezioni Aperte' sono un'iniziativa del Centro Ricerche Enrico Fermi che ha l'obiettivo di far incontrare la storia e la fisica. Questo approccio ci permette di comprendere come la scienza si evolva nel tempo, affrontando sfide e contesti culturali sempre nuovi. L'archiviazione delle conferenze su YouTube ne fa un prezioso strumento di divulgazione e ricerca. Molti sono stati i temi trattati, dalla storia della palazzina a protagonisti della fisica che hanno avuto legami con Enrico Fermi, con un particolare focus sulla questione di genere e il ruolo delle scienziate.

**Di particolare riscontro è stato il ciclo di conferenze "Manhattan Project. Un racconto a più voci"** che aveva l'obiettivo di offrire uno sguardo approfondito e multidisciplinare su uno dei capitoli più controversi della storia del Novecento. Attraverso le testimonianze di scienziati, storici e divulgatori, il progetto ha esplorato le implicazioni scientifiche, umane ed etiche della bomba atomica, mettendo in luce un intreccio inestricabile tra passato e presente. Ogni conferenza, arricchita da letture tratte da opere letterarie e da un'attenta ricostruzione storica, invitava il pubblico a riflettere su temi universali quali la responsabilità della scienza, il ruolo delle donne nella ricerca e le scelte etiche di fronte a sfide epocali. L'obiettivo era offrire un'analisi critica e sfaccettata di un evento che ha segnato profondamente il corso della storia.

Le "Lezioni aperte" hanno sempre un grande riscontro presso il pubblico. In particolare, nell'ultimo anno abbiamo lavorato sulla comunicazione verso le scuole per avere un maggiore impatto sulle nuove generazioni, con conferenze, come quella su Lise Meitner, concepite appositamente per interagire attraverso immagini e "giochi" con un pubblico più giovane.

Il prossimo anno lavoreremo anche con studenti delle scuole di specializzazione.

### **La comunicazione della ricerca e il rapporto con il personale di ricerca**

Comunicare la scienza in modo chiaro e conciso, senza semplificare eccessivamente i concetti, rappresenta una sfida costante. Il dialogo con i ricercatori è fondamentale per superare queste difficoltà e garantire un'informazione accurata e affidabile. Questo scambio permette non solo di cogliere l'essenza e l'impatto delle scoperte scientifiche, ma anche di capire e quindi poter meglio comunicare le difficoltà, gli ostacoli e il quotidiano della ricerca. La creazione di un rapporto di fiducia reciproco aiuta anche ricercatori e ricercatrici a capire come funziona la comunicazione e a raccontare il loro lavoro imparando a uscire dal gergo specifico del proprio ambito e a valutare il proprio lavoro in un contesto più ampio.

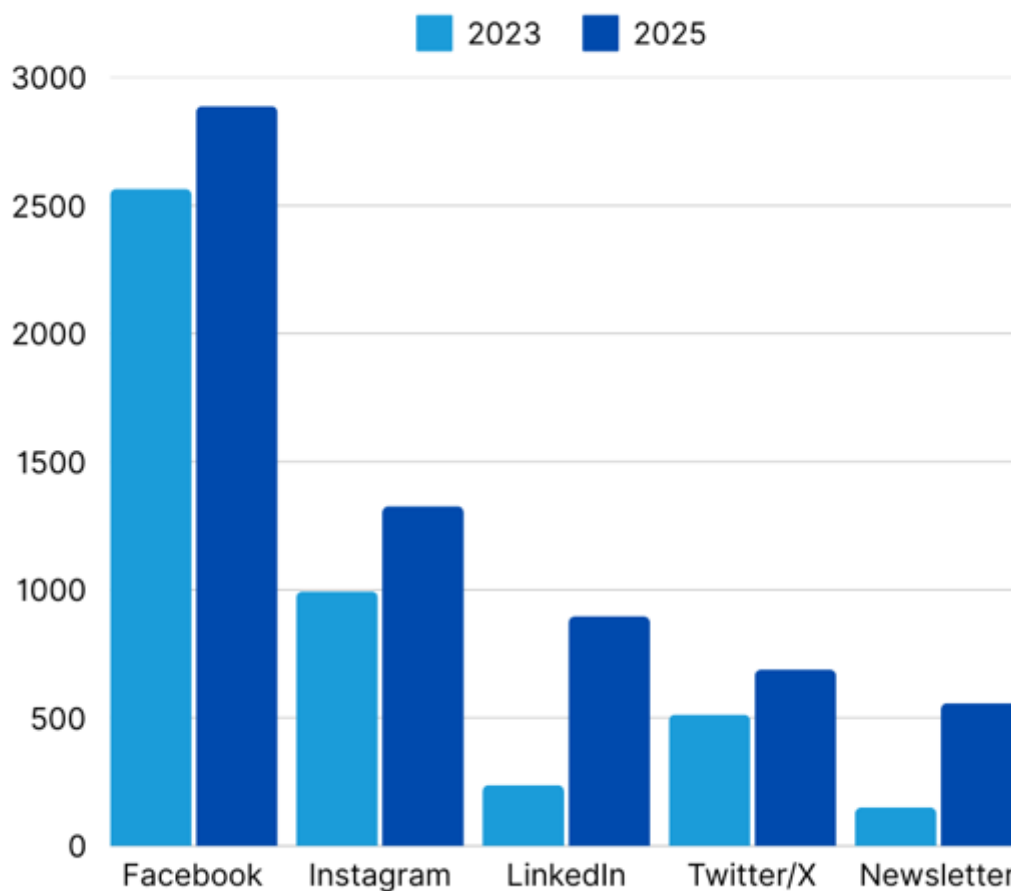
**La comunicazione della ricerca si articola su molteplici canali:** le pubblicazioni più rilevanti entrano come **news del sito**, mentre i comunicati stampa, nella forma di articoli divulgativi per un pubblico non specialistico ma competente, mettono in evidenza già quali sono i vari agganci interessanti per essere ripresi sui media. A questo proposito, su **LinkedIn** si sta sfruttando la sezione "articoli" che fino ad ora ha ottenuto un certo successo di apprezzamenti e condivisioni, contribuendo ad aumentare l'engagement e il numero di contatti della pagina. Su **Instagram**, invece, si sta sperimentando un format di caroselli di approfondimento su alcuni contenuti che si prestano per una divulgazione immediata ma non superficiale. Grazie a questa varietà di strumenti, è possibile raggiungere un pubblico ampio e diversificato, adattando il messaggio alle specifiche esigenze di ogni target.

### **Canali social: una presenza attiva e coinvolgente**

Il CREF è presente su diverse piattaforme social, ciascuna con un target e un linguaggio specifici. Dal 2023 al gennaio 2025 si registra una crescita nel numero di follower e nell'engagement per tutti gli account del CREF, con una particolare rilevanza di LinkedIn e soprattutto della Newsletter, che sono i canali più nuovi - aperti rispettivamente a fine 2022 e a fine 2023.

- **Facebook:** utilizzato per una comunicazione più generale, con notizie sugli eventi, sulle iniziative e sulle attività di divulgazione.
- **Instagram:** focalizzato su un pubblico più giovane, con contenuti visivi accattivanti e una narrazione più leggera e coinvolgente. Contenuti di divulgazione tramite caroselli e grafiche, sia sulla ricerca che sulla storia della fisica.
- **LinkedIn:** destinato principalmente alla comunità scientifica, per la diffusione di pubblicazioni, seminari e news di ricerca. A breve si avvierà la migrazione su BlueSky.
- **YouTube:** piattaforma fondamentale per la divulgazione scientifica, grazie in particolare alle "Lezioni aperte al CREF" che raggiungono un pubblico sempre più vasto.
- **Newsletter:** un legame diretto con il pubblico

La newsletter mensile informa gli iscritti sugli eventi aperti al pubblico, consentendo di mantenere un contatto diretto con i destinatari. Aperta alla fine del 2023, la newsletter conta attualmente oltre 900 iscritti, con un tasso di apertura del 70%.



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

### **Comunicazione potenziata attraverso la partecipazione a eventi di divulgazione locali e nazionali**

Il CREF ha puntato sulla collaborazione con gli uffici di comunicazione delle università romane e degli enti di ricerca. La partecipazione a eventi come le Quantum Weeks, la Rome Future Week e i Festival locali ha permesso di raggiungere un pubblico eterogeneo, stimolando l'interesse verso la scienza e la ricerca anche al di fuori dei luoghi istituzionali. Le partnership con istituzioni come il Goethe Institut e realtà locali come la DM Eco Esquilino hanno arricchito la nostra offerta culturale, favorendo lo scambio di conoscenze e promuovendo la valorizzazione del nostro patrimonio scientifico.

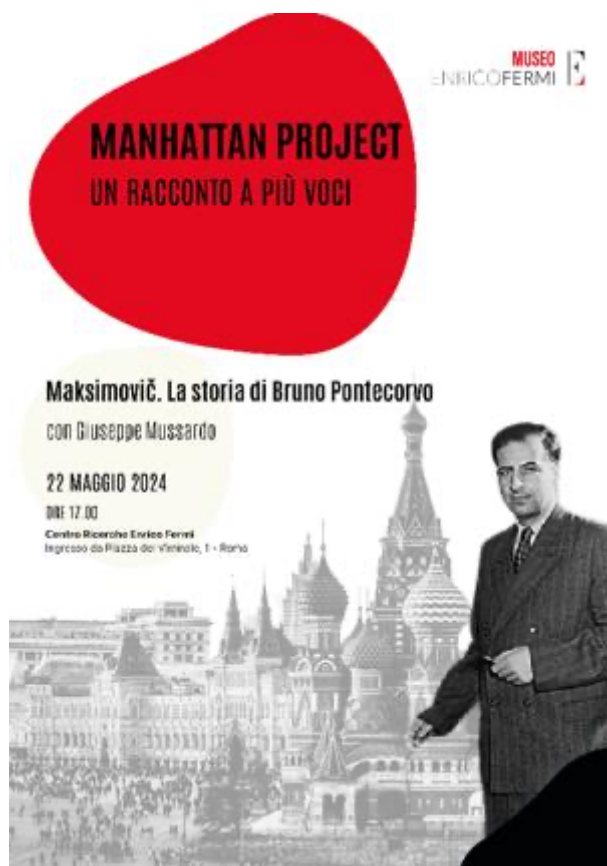
### **Punto di riferimento per approfondimenti sulla storia della fisica italiana del '900**

Grazie alla coerente e capillare opera di comunicazione, il Centro Ricerche Enrico Fermi si è affermato come punto di riferimento imprescindibile per chi desidera approfondire la storia della fisica nucleare in Italia. La ricerca storica condotta nel centro, e la capacità, in questi anni, di tessere relazioni di collaborazione con chi fa ricerca in questo campo, con particolare riferimento al Museo della Fisica e all'archivio della biblioteca di Sapienza, con i quali la palazzina condivide una storia comune, hanno fatto sì che molti si rivolgano a noi come hub di informazioni. Inoltre, il prestigio della palazzina e la struttura del museo ne fanno uno scenario ideale per trasmissioni e approfondimenti dedicati a Enrico Fermi e ai protagonisti di via Panisperna. Nell'ultimo anno, grazie anche alla ricorrenza degli esperimenti del '34, il CREF ha partecipato alla realizzazione di trasmissioni radiofoniche e documentari per la Rai e Mediaset. Questa

visibilità ha contribuito a far conoscere a un pubblico sempre più vasto l'importanza delle ricerche condotte a Roma negli anni Trenta e il loro impatto sulla storia del Novecento.

### **Risultati e prospettive**

La strategia di comunicazione digitale del CREF ha già portato a risultati significativi: aumento delle visite ai siti web, crescita del numero di follower sui social media, successo delle iniziative di divulgazione. In futuro, il CREF continuerà a investire nella comunicazione digitale, sviluppando nuovi contenuti, sperimentando nuove modalità di interazione con il pubblico.

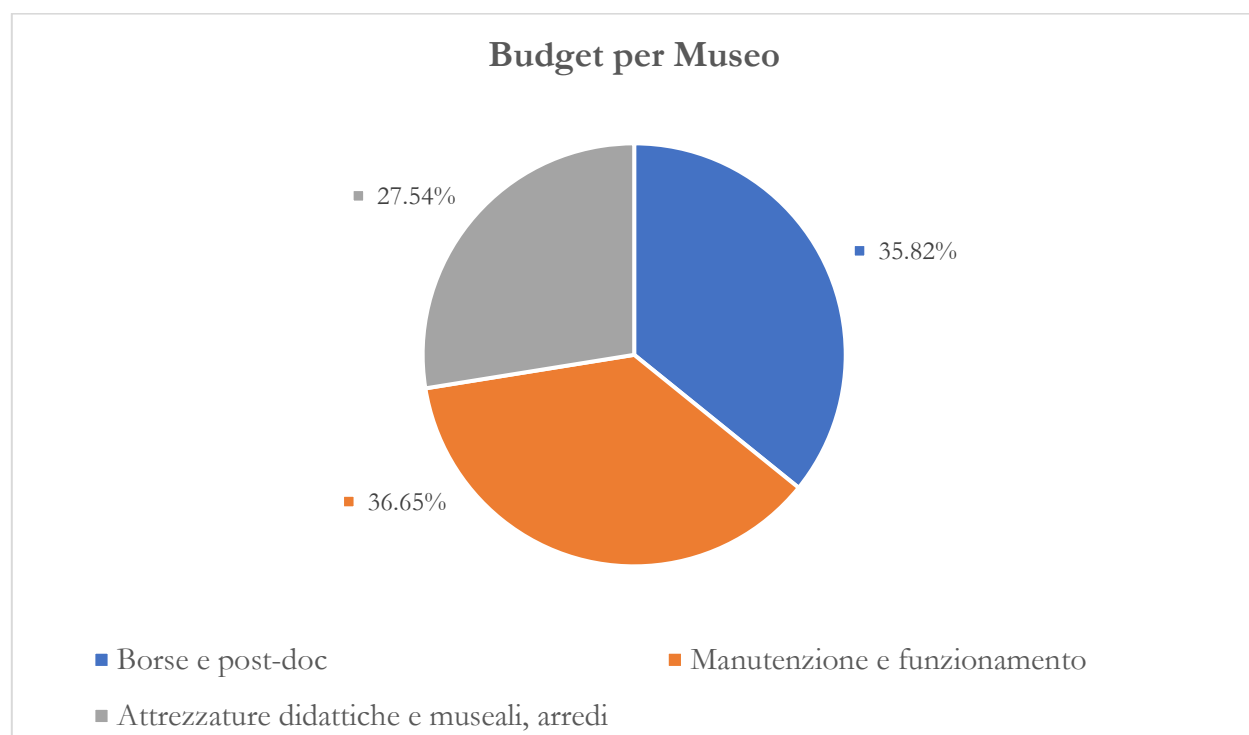
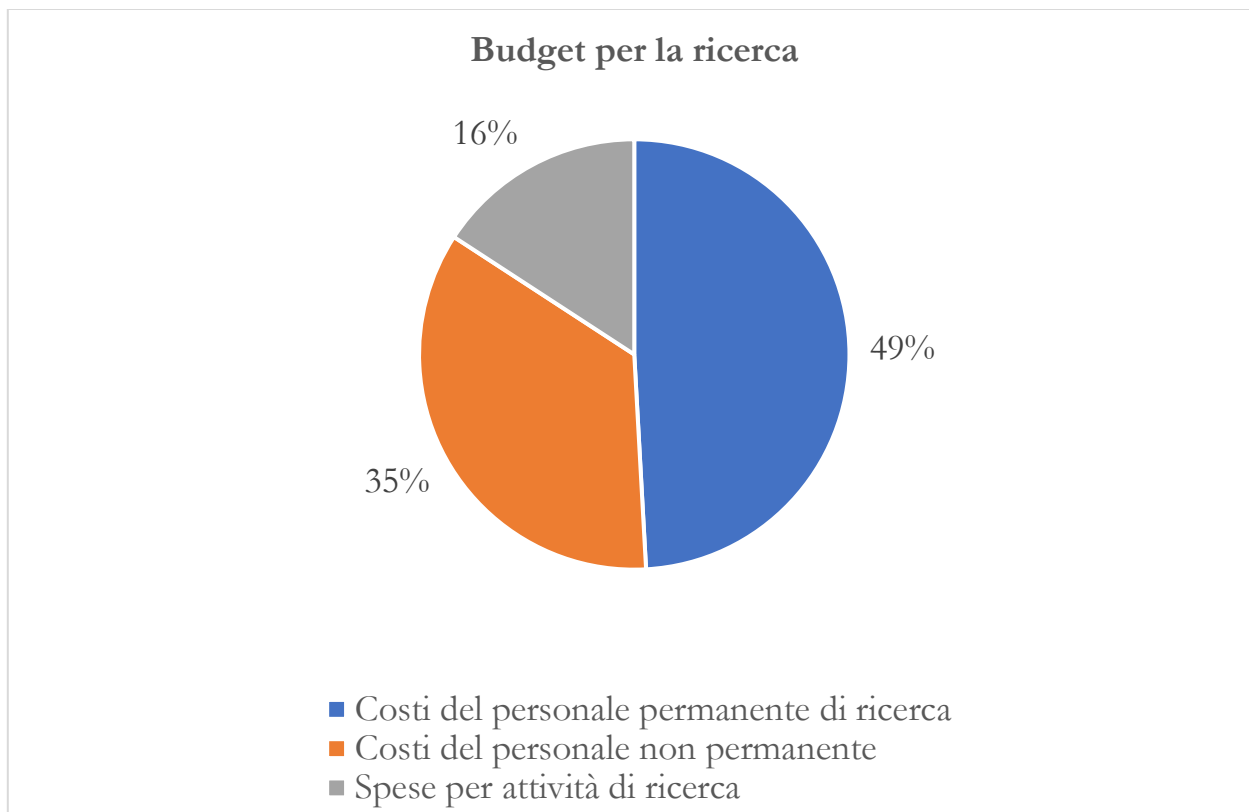


**Figura:** Locandina realizzata in occasione della conferenza “Maksimovic. La storia di bruno Pontecorvo, nell’ambito del ciclo “Manhattan Project. Un racconto a più voci”.

**D. Tabelle riassuntive:**

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

**i) Budget dedicato alla ricerca e al museo**



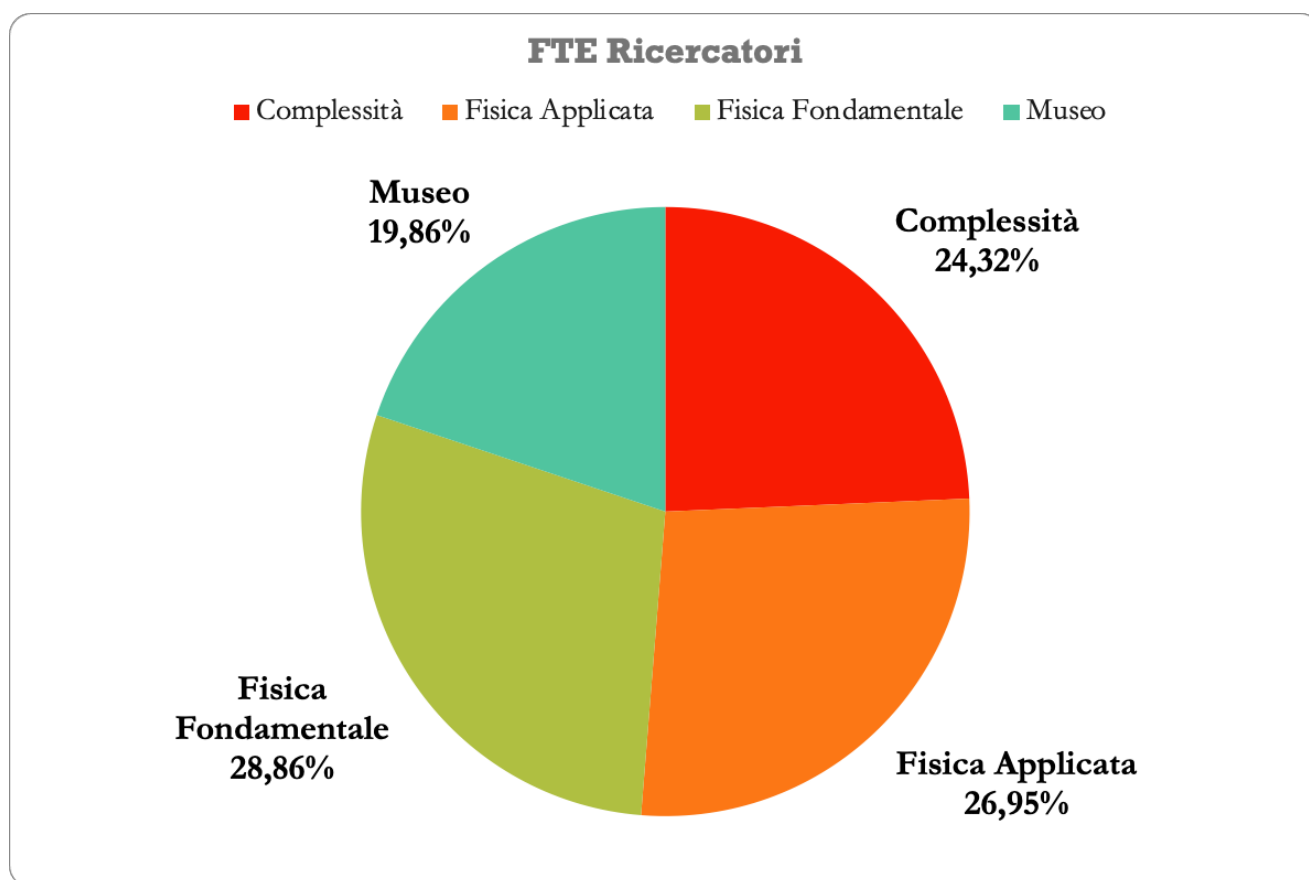
## ii) Progetti in corso e fonti di finanziamento

Oltre al FOE 2026 pari a € 3.720.634,00, si indicano di seguito i finanziamenti esterni dei progetti di ricerca in corso:

TIPOLOGIA PROGETTO	ID PROGETTO	TITOLO PROGETTO	ENTE FINANZIATORE	STANZIAMENTI DI BUDGET 2026 (derivanti da economie 2025)
PRINPNRR22	2024_CODE_PRINPNRR22	Coupling Opinion Dynamics with Epidemics	Ministero Università e Ricerca	25.801,30 €
PNRR NextGenerationEU	2024_DIGITRANSITION_PNRR	Transizione Digitale M1C1 PNRR NextGenerationEU	Presidenza del Consiglio dei Ministri - Dipartimento per la trasformazione digitale	119.150,87 €
Convenzioni di ricerca	2024_FONDO_TUCCL_TIBETANO	Studio diagnostico dei manoscritti 1326 ga e 1326 ka del Fondo Tucci tibetano - convezione CREF-CNR-ISC	ISTITUTO DEI SISTEMI COMPLESSI DEL C.N.R.	1.500,00 €
PRINPNRR22	2024_MULTIPASS_PRINPNRR22	MULTIPLE TRACKER for Secondary particleS monitoring	Ministero Università e Ricerca	5.596,70 €
PRIN22	2024_PHERMIAC_PRIN22	Photonic High-Energy cosmic-RaMonitoring via Ising machines and Advanced Combinatorial optimization	Ministero Università e Ricerca	18.145,68 €
PRINPNRR22	2024_RECENTRE_PRINPNRR22	REal-time motion CorrEctioN in magnEtic REsonance	Ministero Università e Ricerca	12.086,50 €
PRIN22	2024_re-SPECT_PRIN22	Towards a new family of nuclear imaging gamma detectors	Ministero Università e Ricerca	25.521,65 €
PRINPNRR22	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	71.514,19 €
PRIN22	2024_WECARE_PRIN22	WEaving Complexity And the gReen Economy	Ministero Università e Ricerca	32.250,95 €
HORIZON-MSCA-2023-CITIZENS-01	2024_NET	ScieNE Together - HORIZON-MSCA-2023-CITIZENS-01	Unione Europea	3.379,94 €
PNRR NextGenerationEU	2025_IMAGING_FUNZIONALE_MR_PNRR	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	77.505,56 €
Convenzioni di ricerca	2025_RT3	RT3 - reSRight Tech, Right Team, Right Time: Data-driven prediction of startup success and exit	Forward Partners SARL-S	100.000,00 €
PRIN22	2024_SLOWSUMER_PRIN22	SLOW SUMER. Repair, Reuse, Recycling and Southern Mesopotamian Society in the Changing World of 2500-2000 BC	Ministero Università e Ricerca	17.031,25 €
PNRR NextGenerationEU	2024_SINVASC	SINVASC_ The signal in the noise: advanced MRI methods for the characterization of the vascular component of BOLD spontaneous fluctuations	Ministero Università e Ricerca	131.172,07 €
<b>IMPORTO COMPLESSIVO DEI PROGETTI DI RICERCA</b>				<b>640.656,66 €</b>

### 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	5,93	6,35	4,37	22
FTE Postdoc	8	4	4	5	21
FTE Dottorandi	7	3		1	11
Personale associato	41	22	33	8	104

Si evidenzia che il CREF attualmente finanzia **undici borse di dottorato** di ricerca in fisica, storia della fisica e ingegneria elettronica nell'ambito del XXXVIII – XXXIX e XL ciclo, attraverso convenzioni con Sapienza, Tor Vergata e l'Università di Bologna. I dottorandi sono coinvolti nelle attività museali e di divulgazione scientifica del CREF.

## 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 e in stretta collaborazione con istituzioni accademiche e partner strategici. Tra le iniziative:

- **Tirocini curriculari in fisica e comunicazione della scienza** attraverso convenzioni con le Università di Roma Sapienza, Tor Vergata e Roma Tre.
- **Erogazione di borse di dottorato** legate alle attività del Museo in Storia della Fisica (le altre borse di dottorato sono elencate nella sezione precedente a pag. 99).
- **Aggiornamento scientifico e networking per studenti universitari, Phd e Postdoc.**

Il CREF ha ospitato il PhD Day, giornate di scambio e formazione per Phd Students, insieme alle Università di Roma Tre e IMT di Lucca, con le quali ha un accordo di collaborazione. Ha inoltre ospitato il primo PhD Day dell'Associazione Italiana di Archeometria, in collaborazione con il laboratorio di Fisica per i Beni Culturali del CREF e l'AIAR.

- **Seminari tenuti da importanti personalità del mondo accademico su ricerche di punta nel campo della fisica, aperti a studenti/esse e ricercatori/trici di altre università ed enti di ricerca, anche da remoto (es.: Rachel Grange (ETH Zurich), Sushil Mujumdar (Optics Laboratory, TIFR, Mumbai), Prof. François Lafond (Oxford University), Samir Suweis (Università di Padova).** Nell'ambito di questi seminari segnaliamo quello a cura di **Francesco Matteucci**, esperto di innovazione con esperienza ventennale, focalizzato sulle strategie pratiche per navigare nel complesso ecosistema dei finanziamenti della **Commissione Europea**. L'obiettivo è fornire strumenti concreti per trasformare la ricerca scientifica in progetti d'impatto, facilitando il passaggio dalla teoria all'applicazione pratica nel mondo reale.
- **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 è stata organizzata la prima edizione di un hackathon multidisciplinare (neuroscienze, fisica statistica e dei network, computer science) nell'ambito del progetto internazionale **"BrainHack"**. Questa iniziativa ha coinvolto 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. Il gruppo di Risonanza Magnetica Funzionale del CREF, che fa capo alla Fondazione Santa Lucia, ha organizzato la XIV edizione dell'International School on Magnetic Resonance and Brain Function (ISMRBF), dedicata a tecniche e metodi MRI per lo studio integrato del cervello, della sua fisiologia e delle sue dinamiche funzionali, a Erice (TP) presso il Centro di Cultura Scientifica Ettore Majorana.
- **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 per 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 Translatedleader 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 è stato sul nucleare, mentre quello del secondo sulla meccanica quantistica.

### **Nuove metodologie di comunicazione e di diffusione della conoscenza.**

Il CREF è attualmente impegnato in strategie di comunicazione multicanale per ampliare la diffusione della conoscenza scientifica e raggiungere un pubblico più 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 volte a sperimentare nuovi approcci didattici, coinvolgenti e ad alto rigore scientifico.

- **Giochi scientifici interattivi ispirati a formati ludici comuni (come la tombola e la memoria) e adattati a diverse fasce d'età, a partire dalla scuola dell'infanzia.** L'obiettivo è rendere l'apprendimento dei concetti di 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 ai festival scientifici.
- **Percorsi diversificati all'interno del Museo per le varie fasce d'età,** con modalità di interazione e di gioco specifiche (caccia al tesoro, modello di Winterthur per l'analisi degli oggetti, installazione interattiva "Fermioni e Bosoni").
- **Unire scienza e arte:** In collaborazione con istituzioni come Città della Scienza, CNR-INO e Università di Firenze (UniFI), a maggio 2025 è stata organizzata una mostra con l'obiettivo di esplorare l'intersezione tra oggetti artistici e di design e concetti fondamentali dell'ottica, offrendo una prospettiva inedita sulla scienza. Nel settembre 2025, il laboratorio di Fisica applicata ai Beni Culturali del CREF è stato invitato a partecipare alla sezione "Quanto pesa una città?" all'interno della Triennale di architettura di Lisbona, con una videoinstallazione. La sezione rimane in mostra fino a gennaio 2026.
- **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 autonomamente il percorso scientifico e umano di questa fondamentale scoperta, connettendo il racconto delle memorie personali a una rigorosa ricostruzione storica e scientifica. Il contenuto dell'installazione è stato concepito per essere trasferito in musei, gallerie e istituzioni dotate di una tecnologia compatibile. In questo modo è stato possibile portare l'installazione al Festival della Scienza di Genova 2025, allestendo una sala presso il Galata Museo del Mare.

### **Produzione e gestione dei beni culturali: fruizione e accesso alle strutture museali e alle 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 alle sfide scientifiche contemporanee e alle 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 sul funzionamento, sull'affluenza e sugli 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

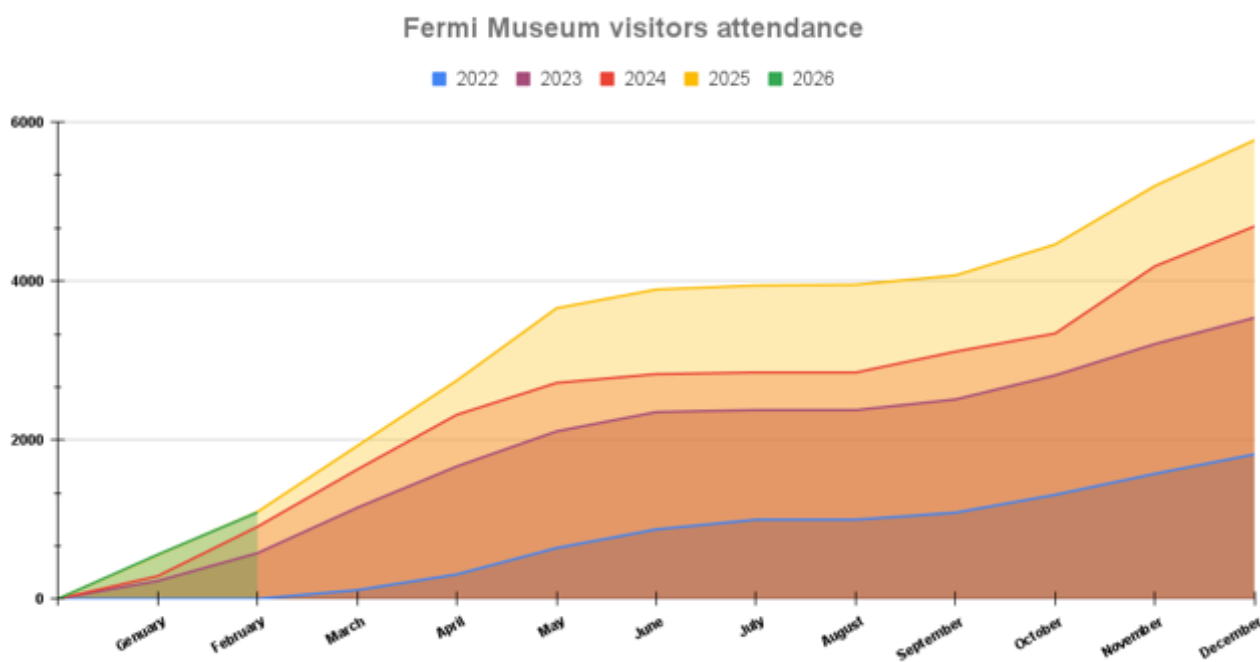
conferenze, presentazioni e dibattiti sulla storia della fisica, e offrendosi come **hub informativo per produzioni mediatiche** legate alla storia di via Panisperna.

- **Organizza attività specifiche per le scuole**, tra cui percorsi di Formazione Scuola Lavoro (ex PCTO) e visite interattive ai laboratori del CREF, per arricchire 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, IDIS-Città della Scienza di Napoli).
- Ha creato una **forte identità**, punto di riferimento per la storia di Fermi e del gruppo di via Panisperna, ma anche come **luogo di scambio e di 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 si organizzano 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 le scuole secondarie di primo grado e per le classi quinte della primaria, che hanno portato allo sviluppo di materiali didattici e di attività specifiche per queste fasce d'età.

Nel **2025**, il Museo ha accolto **oltre 5700 visitatori**, di cui il 74% studenti, confermando **un interesse del 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 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**, con 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, nonché tramite una newsletter quindicinale con articoli divulgativi sulle pubblicazioni dell'ente.
- **Contatto diretto con il lavoro e la metodologia di ricerca**, attraverso l'interazione 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, che verrà replicato anche nel 2026. Per l'anno accademico 2025-2026 è in programma un secondo PCTO organizzato dal laboratorio di 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, fino 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 larga 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”** Come ogni anno 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 conferenze ed eventi sulla presenza delle donne nella scienza nel corso della storia.
- **Organizzare cicli di conferenze sulla storia della scienza** per favorire una riflessione aperta e critica sulle implicazioni delle scelte scientifiche nella società odierna e per rendere la scienza parte integrante del patrimonio culturale dei cittadini e delle cittadine. Dopo il ciclo 2024 delle “Lezioni aperte”. Intrecci tra fisica e storia dal titolo “Manhattan Project”. Un racconto a più voci”, nel 2025 sono state organizzate tre conferenze, rispettivamente su Marie e Irène Curie e sul loro rapporto con la società del tempo, sulla storia degli albori della meccanica quantistica e sulle relazioni tra le ricerche di Majorana e la fisica della complessità. Per il 2026 è in programma un nuovo ciclo di quattro conferenze che prendono spunto dall'immaginario cinematografico per parlare di scienza. Il titolo è “Ciak, si fa scienza! Visioni del possibile”.
- **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 Europea delle Ricercatrici e 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 del Festival della Scienza di Genova: fa parte del comitato scientifico e del comitato di programmazione, e ogni anno contribuisce con laboratori e installazioni.

- **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 proprio budget, le cui principali voci sono di seguito indicate.

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

- Borse di studio premiali euro 2.000;
- Attrezzature didattiche e museali: 10.000 euro.

Attività di public engagement (personale di ricerca impegnato per 2,3 FTE):

- 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 60.000;
- Servizi per la pubblicazione di articoli scientifici valorizzati per euro 20.000.

### **Servizi conto-terzi: indicazione ricavi ottenuti e personale impegnato (%)**

Il CREF nel triennio 2026-2028 sarà impegnato nella seguente attività conto-terzi:

- Sarà finalizzato il 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 incassati 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/2025/VLVP/5739 - EComBatt -Ares(2025)9469385 avente ad oggetto un servizio di analisi inerente alla tematica "Economic complexity of the EU battery value chain and innovation in critical raw materials", della durata di nove mesi per ricavi complessivi pari ad euro 14.850,00, tutti previsti nel 2026. Nel progetto sono impegnati un primo ricercatore II livello e tre ricercatori III livello per un FTE pari al 11%.

### **Partecipazioni a spin-off, società e fondazioni**

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

Al 31 dicembre 2024, secondo l'ultima rilevazione obbligatoria 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 2024 di euro 3.354.226 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).

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

"Photonic system and method for detecting and tagging numerical proximity at high resolution"- "Sistema fotonico e metodo per la marcatura della prossimità numerica ad alta risoluzione". La proprietà è condivisa tra autori di CREF, Sapienza e ISC-CNR (2025), in particolare: Fabrizio Coccetti, Romolo Savo, Marcello Calvanese Strinati, Claudio Conti, Davide Pierangeli, Silvia Gentilini, Islam Md Deen.

Reference Number CREF 0005813 (24/11/2025), CNR 2587 (2/12/2025) e Sapienza.

## **Eventi Terza Missione**

**2026**

**gennaio - aprile 2026: Ciclo di conferenze "Ciak si fa Scienza! Visioni del possibile"**

La scienza non vive solo nei laboratori, ma abita i nostri sogni, le nostre paure e, soprattutto, i nostri schermi. Da questa idea prende spunto "Ciak, si fa Scienza! Visioni del possibile", un ciclo di conferenze aperte al pubblico da gennaio ad aprile 2026, presso il Centro Ricerche Enrico Fermi.

La rassegna nasce con l'obiettivo di scardinare l'idea della scienza come disciplina isolata. Attraverso il linguaggio universale del cinema, quattro esperti e fantastici divulgatori accompagneranno il pubblico in un viaggio tra realtà e finzione, svelando come la cultura popolare abbia interpretato le più grandi questioni scientifiche del nostro tempo.

**22 gennaio 2026 | Segnali dal Cosmo. Gli alieni, il paradosso di Fermi e la vita oltre la Terra con Amedeo Balbi.**

Cosa sappiamo davvero sulle possibilità di vita oltre la Terra e come l'immaginario cinematografico ha interpretato le ricerche scientifiche.

**25 febbraio 2026 | Enigma. Dalla macchina Enigma alla crittografia quantistica**

Con Fabrizio Coccetti

Dalla sfida contro il tempo per decifrare i codici segreti durante il conflitto mondiale alle nuove promesse della sicurezza informatica moderna.

**19 marzo 2026 | Copenaghen – Il principio del dubbio. La scienza, le scelte, la guerra**

Con Olivia Levrimi

Un'analisi profonda dei dilemmi etici e delle responsabilità dei fisici, partendo dal celebre incontro-scontro tra Bohr e Heisenberg.

**8 aprile 2026 | La fisica di Frankenstein: contesto storico e rivisitazioni di un mito moderno.**

Con Marco Ciardi

Un'immersione nelle scoperte scientifiche che hanno alimentato il capolavoro di Mary Shelley, tra galvanismo e fascino per l'ignoto.

**2025**

**10 marzo 2025: "Open day presso la Fondazione Santa Lucia per la Settimana del Cervello"**

Anche nel 2025, per la Settimana del Cervello, il CREF e la Fondazione Santa Lucia organizzano un Open Day per studenti e studentesse delle scuole superiori e delle università: un'occasione preziosa per vedere da vicino come funzionano le neuroscienze applicate alla riabilitazione e scoprire nuove frontiere della ricerca medica sul cervello.

**6 febbraio 2025: evento inaugurale del PCTO (Percorso per le Competenze Trasversali e l'Orientamento) “Via Panisperna e la fisica a Roma tra passato e futuro”**

Il progetto - realizzato in partenariato tra il Museo Enrico Fermi e la Biblioteca del dipartimento di Fisica di Sapienza Università di Roma - ha lo scopo di fornire a studenti e studentesse gli strumenti necessari per effettuare una ricerca storico-scientifica sull'istituto di via Panisperna e sui suoi protagonisti, attraverso la consultazione di documenti archivistici e bibliografici, e per individuare il modo più efficace per comunicare i risultati della ricerca.

**26 febbraio 2025 Intrecci tra fisica e storia: L'atomo svelato. Un viaggio nella Parigi dei Curie**

Camilla Maiani - Responsabile della Mediazione del Museo Curie di Parigi - le ha raccontato la storia delle Curie, dalle scoperte della radioattività naturale e artificiale, alle applicazioni pratiche del radio negli anni Venti e Trenta del Novecento; fino all'impegno politico e ai valori che ne hanno caratterizzato il percorso. Gli scambi tra i Joliot-Curie e il gruppo di via Panisperna sono stati fondamentali per gli esperimenti del 1934 e per la nascita della fisica nucleare in Italia. L'evento rientra tra le iniziative del Gender Equality Plan del CREF e tra gli eventi realizzati nell'ambito del progetto NET – scieNcE Together, finanziato nell'ambito del Programma HORIZON-MSCA-2023-CITIZENS-01-01 e realizzato tramite le azioni Marie Skłodowska-Curie.

**10 marzo 2025 Open Day al Santa Lucia**

La Fondazione Santa Lucia IRCCS e il Centro Ricerche Enrico Fermi partecipano alla “Settimana del Cervello” con una giornata a porte aperte presso il laboratorio di neuroimmagini all'interno dell'ospedale rivolta a studenti e studentesse di scuola superiore e università.

**11-12 marzo 2025 - Workshop sull'utilizzo di LLMs per la fisica in collaborazione**

Consapevole del forte potenziale di trasformazione che l'elaborazione del linguaggio naturale (NLP) e i grandi modelli linguistici (LLM) possono avere nell'indagine scientifica, il Centro Ricerche Enrico Fermi (CREF), in collaborazione con Pi School, ha organizzato un corso completo per fornire formazione avanzata su queste tecnologie ai propri ricercatori e ai collaboratori di altre università e istituzioni. Questa iniziativa risponde direttamente alla crescente domanda di competenze nello sfruttamento della potenza dell'intelligenza artificiale basata sul linguaggio per accelerare la scoperta e l'innovazione in varie discipline scientifiche, tra cui la fisica.

**20 marzo 2025 Intrecci tra fisica e storia: “Entangled: Protagonisti, esperimenti e incredibili ipotesi alla nascita della Meccanica Quantistica”**

Nella seconda conferenza della rassegna “Intrecci tra Fisica e Storia”, organizzata dal CREF, abbiamo invitato Giovanni Battimelli (già Professore Associato di Storia della Fisica all'Università Sapienza di Roma), Giuseppe Mussardo (Professore Ordinario di Fisica Teorica alla SISSA di Trieste), Edwige Pezzulli, (Fisica e divulgatrice scientifica) per ripercorrere insieme - attraverso il racconto di teorie, esperimenti, incontri e scontri tra scienziati - le tappe fondamentali che hanno portato alla nascita della meccanica quantistica all'inizio del XX secolo.

Una rivoluzione senza precedenti nella storia della fisica che ha visto menti brillanti come Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, Werner Heisenberg ed Erwin Schrödinger sfidare le certezze della fisica classica, aprendo le porte a un mondo subatomico governato da leggi sorprendenti e controintuitive.

**8-11 aprile 2025 - “Brainhack Rome 2025: connecting the dots between structure and function”.**

Ai quattro giorni di workshop hanno partecipato una quarantina di giovani ricercatori e ricercatrici provenienti da numerose istituzioni nazionali (Politecnico di Milano, Università di Padova, Università Magna Graecia) e internazionali (Cardiff University, University Hospital Schleswig-Holstein). I partecipanti hanno collaborato in gruppo su numerose proposte di progetti, lanciate con pitch sulla creazione di nuovi strumenti software, lo sviluppo di modelli di interpretazione e predizione nel campo delle neuroscienze e, in generale, la condivisione di nuove risorse per la comunità scientifica.

### **16 maggio 2025 - Enlighting CoVision**

In occasione della Giornata Internazionale della Luce che ricorre oggi 16 maggio, il Centro Ricerche Enrico Fermi (CREF) ha aperto le porte del suo Museo dedicato a Enrico Fermi per la mostra ***Enlighting Covisions - Ibridazioni tra fisica arte e design***, un'esposizione di innovativi oggetti di design, exhibit interattivi e opere di arte contemporanea che, attraverso la loro forma e funzione, narrano affascinanti fenomeni ottici, instaurando un dialogo con le installazioni permanenti e gli spazi ricchi di storia del Museo. L'esposizione ha coinvolto diverse istituzioni, tra cui Fondazione IDIS - Città della Scienza, il Dipartimento di Architettura DiARC dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università degli Studi di Firenze, il Consiglio nazionale delle ricerche con l'Istituto Nazionale di Ottica (Cnr-Ino) e l'Istituto di scienze applicate e sistemi intelligenti "Eduardo Caianiello" (Cnr-Isasi), l'Osservatorio Astronomico di Capodimonte dell'INAF e la delegazione campana dell'ADI Associazione per il Disegno Industriale.

### **28 maggio 2025 - Intrecci tra fisica e storia - L'ultima lezione di Majorana**

Conferenza tenuta da Vittorio Loreto (Sapienza) sull'ultimo scritto di Ettore Majorana, "Il valore delle leggi statistiche nella fisica e nelle scienze sociali", pubblicato postumo, che rappresenta una riflessione profonda e interdisciplinare sull'uso della statistica come strumento interpretativo della realtà.

### **9-13 giugno 2025 Summer School Economic Fitness and Complexity**

Nel 2025 il CREF ha ospitato la terza edizione della Summer School dedicata ai metodi dell'Economic Fitness and Complexity (EFC), organizzata in collaborazione con [UNU-MERIT](#) (Maastricht), [UNU-CRIS](#) (Bruges) e la [Young Scholar Initiative dell'Institute for New Economic Thinking](#).

### **7-8 luglio 2025 Collaboration Meeting del Progetto EEE**

Il 7 e l'8 luglio 2025, il Centro Ricerche Enrico Fermi (CREF) ha ospitato il meeting della Collaborazione EEE (Progetto Extreme Energy Events). Frutto della sinergia tra CREF e INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), l'esperimento è dedicato allo studio dei raggi cosmici e alle attività di outreach nelle scuole superiori (oltre 70) che partecipano al Progetto.

### **10-11 luglio 2025 "Enrico Fermi e la nascita della meccanica statistica in Italia"**

Partecipazione a una delle conferenze satellite di StatPhys29. Lo scopo del convegno è stato quello di mettere in risalto i contributi di Enrico Fermi alla meccanica statistica, ma anche di sottolineare come, nel periodo post-bellico, l'Italia sia stata un punto di riferimento per lo sviluppo della disciplina.

### **Settembre 2025 - gennaio 2026 - Partecipazione alla Triennale di Architettura di Lisbona**

Il Laboratorio di Fisica Applicata ai Beni Culturali del CREF ha presentato una videoinstallazione dal titolo "Quanto pesa una città?" all'interno della sezione espositiva "Spectre". La videoinstallazione è stata curata da Hilla Laufer.

### **16 settembre - 8 ottobre 2025 - Incontri con le scuole Missione Polar QuEEEst**

Nel corso della missione PolarquEEEst 2025 – OvEEErland, dedicata allo studio, a diverse latitudini, del flusso dei raggi cosmici con uno dei rivelatori POLA-R (CREF, INFN Università di Oslo), si sono svolte tappe scientifiche ed eventi divulgativi presso istituti scolastici tedeschi e norvegesi: il Gymnasium Villa Elisabeth di Wildau (con il supporto di Carolin Gnebner responsabile del gruppo DESY-Zeuthen per l'International Cosmic Day), il Dipartimento di Fisica dell'Università di Oslo e la Thora Storm Videregående Skole di Trondheim.

### **26-27 settembre 2025 - Notte delle Ricercatrici e dei ricercatori al NET Village (Roma)**

Per il terzo anno consecutivo il CREF ha partecipato alla Notte delle Ricercatrici e dei ricercatori come parte del progetto NET – scieNcE Together.

Presente con uno stand nello spazio allestito all'interno dell'ex mattatoio, il CREF ha organizzato laboratori per bambini e ragazzi, presentato in anteprima il film "La ragazza di via Panisperna" su Ginestra Giovene

Amaldi, ha partecipato all'evento Inside Marie sull'impegno di Marie Curie in campo medico e gli sviluppi attuali, e presentato lo spettacolo Dalla Terra alla Luna.

#### **2 ottobre 2025 - PhD Day AiAr**

Il CREF ha ospitato il primo Ph.D. Day dell'Associazione Italiana di Archeometria (AiAr), realizzato in collaborazione con il [Laboratorio di Fisica per i Beni culturali](#). L'evento si propone di diventare un incontro annuale sullo stato dell'arte nella ricerca in archeometria, con un focus sulla produzione scientifica dei giovani ricercatori e ricercatrici.

#### **13 ottobre 2025 - Evento per il pubblico "Raggi cosmici attraverso Roma"**

Un pomeriggio per raccontare in che modo la storia della scoperta dei raggi cosmici si lega a Roma e mostrare una "spark chamber", un rivelatore che permette di vedere in tempo reale la traiettoria delle particelle cosmiche. Con **Davide Pinci (INFN), Fabrizio Vitali (INAF) e Marco Garbini (CREF)**.

#### **23 ottobre - 2 novembre 2025 - Partecipazione al Festival della Scienza di Genova**

Il CREF ha presentato la mostra "Viaggio al centro dell'atomo". Gli esperimenti del 1934 tra storia e scienza". Allestita nella Galleria al secondo piano del Galata - Museo del Mare, la mostra racconta la storia del gruppo di via Panisperna attraverso un'installazione multimediale interattiva che consente di giocare con simulazioni. Una serie di pannelli, sagome e riproduzioni di oggetti utilizzati negli esperimenti completa il racconto.

#### **24-29 ottobre 2025 - organizzazione International School on Magnetic Resonance**

Il gruppo di ricerca su MRI del CREF ha organizzato la XIV edizione dell'International **School on Magnetic Resonance and Brain Function (ISMRFB)**, su **tecniche e metodi MRI per lo studio integrato del cervello, della sua fisiologia e delle sue dinamiche funzionali**. a Erice (TP) presso il Centro di Cultura Scientifica Ettore Majorana.

**4 dicembre 2025 : Partecipazione alle giornate della Terza Missione organizzate dall'Università di Salerno.** Per le Giornate della Terza Missione, il dott. Marco Garbini ha presentato le attività di EEE Extreme Events Project alla conferenza "Ricerca e Sviluppo per la Transizione Sostenibile: Interconnessioni ed Ecosistemi per l'Innovazione con Enti di Ricerca", organizzata dal Dipartimento di Fisica "E. R. Caianiello" dell'Università di Salerno.

#### **1-5 dicembre 2025 - Convegno Nazionale Comunicazione della Scienza di Trieste**

Partecipazione al convegno con un laboratorio per educatori ispirato al metodo dell'autrice per bambini Keri Smith.

#### **18-19 dicembre 2025: Fostering Research Synergies (FRS) workshop presso IMT di Lucca**

Workshop organizzato in collaborazione tra i PhD del CREF e dell'IMT **School for Advanced Studies Lucca** che mescola formazione scientifica e incontri di networking.

## **Eventi Istituzionali**

### **2026**

**28 gennaio 2026 - Workshop "Prospettive per i laureati in fisica nelle professioni e nelle imprese":** una giornata di studi dedicata alle prospettive professionali dei laureati in fisica, organizzata dalla Società Italiana di Fisica (SIF), in collaborazione con il nostro ente, confermando la volontà condivisa di creare un ponte solido tra la formazione e il mondo del lavoro.

### **2025**

#### **24 gennaio 2025 - riunione del Consiglio Direttivo della Fisica Medica**

Il Centro Ricerche Enrico Fermi ha ospitato una riunione del ConDir, il Consiglio Direttivo della Fisica Medica, in cui si è discusso dell'importanza della formazione e le prospettive della disciplina. Durante la

riunione, presieduta dalla Presidente Cristina Lenardi, si è discusso del futuro delle Scuole di Specializzazione, con le sfide e le opportunità legate alla formazione dei futuri fisici medici. In particolare, il riconoscimento delle qualifiche professionali conseguite all'estero è un tema cruciale per favorire la mobilità dei professionisti e l'arricchimento del nostro sistema sanitario.

### **15-16 aprile 2025 Meeting della Commissione Scientifica Nazionale 3 (CSN3) dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN)**

Il Centro Ricerche Enrico Fermi (CREF) ha ospitato la riunione della Commissione Scientifica Nazionale 3 (CSN3) dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), l'organo che coordina le attività di ricerca dell'Ente in ambito nucleare.

**1-3 dicembre 2025 - Riunione INFN Commissione 5** Dal 1° al 3 dicembre il CREF ha ospitato la riunione della Commissione Scientifica Nazionale 5 (CSN5) dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), l'organo che coordina le attività di ricerca tecnologica, lo sviluppo di applicazioni e la diffusione di strumenti, metodi e tecnologie della fisica fondamentale in altri settori.

---

## **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 dei 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 della divulgazione:** 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 per 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, incluse le molestie sessuali.

### **Il gruppo di lavoro del CREF**

Per raggiungere gli obiettivi necessari alla parità di genere, nonché per individuare azioni concrete e strategie dedicate, il Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche “Enrico Fermi” (CREF), con determina del Direttore Amministrativo n. 40 del 26/04/2022, ha istituito il Gruppo di Lavoro GEP per la redazione del Gender Equality Plan, successivamente modificato con la Determina n. 48/2023 del 15 marzo 2023.

A seguito di un avviso aperto e rivolto a tutto il personale dell’Ente, con determina del Direttore amministrativo n. 38 del 7 febbraio 2025 è stato nominato il nuovo Gender Equality Team (GET) per la predisposizione del GEP 2025-2027. La nuova composizione è la seguente:

- Dott.ssa Anna Lo Piano, tecnologa e coordinatrice del gruppo di lavoro;
- Dott.ssa Miriam Focaccia, prima ricercatrice;
- Dott. Dario Mazzilli, ricercatore;
- Dott. Aurelio Patelli, ricercatore;
- Dott.ssa Marta Pepe, funzionaria di amministrazione;
- Dott.ssa Angelica Sbardella, ricercatrice;
- Dott. Jacopo Signorini, funzionario di amministrazione.

### **Analisi del contesto e situazione di genere**

Il Gender Equality Team redige ogni anno un’analisi del bilancio di genere delle figure professionali impiegate dall’ente: Governance, Amministrazione, Personale di ricerca e tecnologi/ghe, PhD, assegnisti/e di ricerca e borsisti/e.

Tale analisi è condotta tenendo conto che le ridotte dimensioni e la brevità della sua ‘nuova vita’ scientifica e istituzionale rendono difficoltosa l’interpretazione delle analisi statistiche e l’individuazione di criticità sistematiche nell’ambito dell’equità di genere.

Per questa ragione, l’assenza o la presenza di segnali di disparità di genere non può essere considerata fedelmente rappresentativa dello stato reale, bensì un aspetto da monitorare.

### **Formazione**

Nel maggio del 2025 il GET, insieme a una rappresentante del GUC, ha incontrato la dott.ssa Giorgia Ortu La Barbera per una formazione specifica di due ore sul Gender Equality Plan.

A luglio la coordinatrice del GET, la dott.ssa Anna Lo Piano, ha seguito una formazione di 8 ore dal titolo “Gender Equality Plan (GEP) e l’integrazione della dimensione di genere nei progetti di Horizon Europe” a cura di Eucore.

Il 15 ottobre è stato organizzato il primo dei workshop di due ore previsti per la formazione dell’ente sulle tematiche di genere, a cura della dott.ssa Ortu La Barbera, dal titolo: “È un fatto o uno stereotipo?”

Nel secondo trimestre del 2026 è previsto un secondo seminario, sempre a cura della dott.ssa Ortu La Barbera, sul linguaggio di genere.

### **Integrazione della dimensione di genere nel Public Engagement**

Nell’ambito del ciclo di conferenze pubbliche “Intrecci tra fisica e storia”, dedicato al Manhattan Project, due conferenze su un totale di quattro sono dedicate all’approfondimento, alla valorizzazione e al recupero

di due figure femminili fondamentali: Lise Meitner e Laura Capon Fermi. Le conferenze sono state affidate a due studiose specializzate in studi di genere, Paola Govoni (UniBo) e Simona Cerrato (SISSA) sulla vita e l'opera di Lise Meitner, scienziata che ha dato un contributo fondamentale alla comprensione della fissione nucleare; e di Laura Capon Fermi, divulgatrice scientifica eccezionale, oltre che testimone diretta di un periodo straordinario della storia della fisica italiana e internazionale.

Il 22 novembre 2024 il CREF ha organizzato una giornata di studi in onore di Ginestra Amaldi, ricostruendo la figura di scienziata e divulgatrice a partire dai suoi libri, dalle note dell'archivio Amaldi e dei documenti delle Teche Rai. Il workshop è stato organizzato in collaborazione con la famiglia Amaldi e con la Biblioteca e l'Archivio di Sapienza.

Il CREF ha anche partecipato a un docufilm, in collaborazione con la famiglia Amaldi e la casa editrice Zanichelli, dedicato alla figura di Ginestra Amaldi, diretto da Alessandro Scillitani.

Per il ciclo di conferenze del 2025 è stato organizzato un evento in collaborazione con il Musée Curie di Parigi dal titolo «L'atomo svelato». Viaggio nella Parigi dei Curie tra storie, scoperte e impegno politico. Camilla Maiani, responsabile della mediazione del Museo Curie, ha raccontato le figure di Marie e Irene Curie anche in chiave di genere.

Tra i progetti futuri di ampliamento del Museo c'è quello di un percorso espositivo dedicato alle scienziate che hanno avuto un ruolo di rilievo all'interno del Regio Istituto di Fisica e hanno contribuito alle scoperte di Enrico Fermi o collaborato direttamente con lui.

### **Obiettivi a breve termine**

L'obiettivo a breve termine per il primo trimestre 2026 è redigere una policy sulle molestie di natura morale e sessuale e sugli atti di discriminazione nei confronti del personale dell'ente, indispensabile per disciplinare questo tipo di comportamenti e avviare un percorso di formazione e sensibilizzazione in merito.

Tale attività verrà portata avanti dal GET con la collaborazione del CUG e il supporto della consigliera di fiducia.

Nel secondo trimestre il GET affronterà la questione del linguaggio, redigendo linee guida per la stesura dei documenti amministrativi e delle comunicazioni in un linguaggio il più inclusivo possibile.

### **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 per il tema.

A seguito dell'adozione del Piano GEP, dal 2023 sono stati stanziati € 13.000,00 per la sua attuazione, destinati a consulenze specialistiche di supporto al GET e al CUG, all'organizzazione di conferenze e di attività di formazione del personale sulle tematiche della parità di genere, contrasto alla discriminazione, molestie e violenze di genere. Per il 2026 l'importo stanziato residuo è pari a € 3.800,00.

## 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.

	2026	2027	2028
Contributo ordinario dello Stato	3.720.634,00	3.720.634,00	3.720.634,00
Contributi dallo Stato	77.990,04	79.094,66	48.727,05
Contributi da privati	36.000,00	36.000,00	36.000,00
Ricavi per cessione di prodotti e prestazioni servizi	15.000,00	15.000,00	15.000,00
Altri ricavi e proventi	120.788,80	59.270,69	35.071,08
<b>Totale ricavi e proventi</b>	<b>3.970.412,84</b>	<b>3.909.999,35</b>	<b>3.855.432,13</b>

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. 437, del 27 giugno 2025. Ai fini dell'elaborazione del bilancio di previsione triennale 2026-2028, l'art. 2 del decreto prevede che gli enti possano considerare quale riferimento il 100% dell'ammontare dell'assegnazione complessiva per l'esercizio 2025.

I **contributi dallo Stato**, si riferiscono a ricavi di progetti finanziati esternamente, maturati nei precedenti esercizi, che sulla base del criterio cost to cost sono riscontati negli esercizi successivi in relazione ai costi sostenuti, e che sono destinati a coprire, per la quota iscritta come stanziamento 2026, i costi di ammortamento delle immobilizzazioni acquisite con i fondi di tali progetti.

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

Inoltre, per far fronte ad eventuali procedure concorsuali per il reclutamento di figure amministrative, tecniche e di ricerca nel corso del 2026, 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. 9, D.M 15 gennaio 2025, n. 34).

## Principali voci del bilancio preventivo CREF 2026-2028

### Costi complessivi per il personale

Gli stanziamenti previsti nel bilancio di previsione triennale 2026-2028 per i costi del personale, comprensivi degli oneri sociali e dell'accantonamento TFR, sono di seguito rappresentati:

2026	2027	2028
2.831.522,42	2.803.917,38	2.724.400,63

Nella tabella seguente, sono indicati i costi complessivi per il personale per l'esercizio 2026:

Voce budget annuale	Tempo indeterminato	Tempo determinato	DA e DS	Assegni di ricerca	Incarichi di ricerca	Borse di addestramento alla ricerca (di studio)
B.9.a Salari e stipendi	1.467.564,07	38.472,13	123.618,03	95.297,33	154.000,00	120.000,00
oltre ad accantonamento per produttività personale TA e DA	9.263,97		26.400,00			
B.9.b Oneri sociali	357.266,55	9.184,42	29.915,56	23.176,40	35.964,13	
Oltre ad INAIL		17.449,98				
B.9.c TFR	113.380,46	2.914,72	9.493,86			
Oltre rivalutazione TFR		14.091,79				
B.9.e Altri costi, di cui:		184.372,99				
Welfare		20.023,47				
Buoni pasto	28.349,52					
Formazione		40.000,00				
Visite fiscali		1.000,00				
Missioni			95.000,00			

I suddetti costi sono al netto dell'IRAP retributivo, pari ad euro 155.124,48.

Oltre ai costi del personale di cui al Bilancio di previsione 2026, il CREF dispone altresì della riserva vincolata di patrimonio netto "Fondo finalizzato alla programmazione e al fabbisogno dei costi del personale - riserva ex Cofi", di consistenza pari ad euro 27.394,82.

### 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 nel corso del 2026.

2026	2027	2028
118.473,73	176.424,74	108.500,00

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 7 le borse di ricerca/studio attive al CREF nei primi mesi del 2026. Lo stanziamento previsto nel bilancio preventivo triennale ammonta complessivamente a euro 133.816,66, oneri Irap compresi. Tale stanziamento è destinato sia alla copertura economica delle sei borse attive, che all'attivazione di eventuali nuove borse.

### Contratti di ricerca

È attualmente attivo presso il CREF un contratto di ricerca di cui al all'art. 22, comma 6, della legge 240/2010, finanziato dal Decreto Direttoriale MUR n. 47 del 20 febbraio 2025 "Decreto per l'assunzione di ricercatori internazionali post-dottorato" (importo finanziamento euro 109.000,00).

### Incarichi di ricerca

Per gli incarichi di ricerca di cui al all'art. 22-ter della legge 240/2010, il trattamento economico è determinato dal soggetto che intende conferirli, e in ogni caso in misura non inferiore ad euro 22.500,00 annui. La spesa complessiva per l'attribuzione degli incarichi non può essere superiore alla spesa media sostenuta nell'ultimo triennio per il conferimento degli assegni di ricerca, come risultante dai bilanci approvati. Sulla base di tale spesa media, sono stati stanziati i seguenti importi:

2026	2027	2028
189.964,13	189.964,13	189.964,13

È attualmente attivo presso il CREF un incarico di ricerca, finanziato nell'ambito del progetto di ricerca RT3 - Right Tech, Right Team, Right Time: Data-driven prediction of startup success and exit.

### Manutenzione del Museo e della Palazzina

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

	2026	2027	2028
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.)	95.337,14	60.000,00	60.000,00
Manutenzione ordinaria e riparazioni di attrezzature (Aula Fermi, videoproiettori, pannelli informativi)	2.280,63	2.000,00	2.000,00
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
<b>Totale</b>	<b>105.972,39</b>	<b>70.354,62</b>	<b>70.354,62</b>

Tra gli stanziamenti, di particolare rilevanza è quello relativo al 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 sei anni.

### Assicurazioni

A partire dal 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:

	2026-2028
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:

	2026	2027	2028
Energia elettrica	40.000,00	35.000,00	35.000,00
Acqua	5.000,00	5.000,00	5.000,00
Gas	86.043,84	70.000,00	70.000,00
Telefonia fissa	15.000,00	15.000,00	15.000,00
Accesso ad Internet	17.303,66	16.782,20	17.303,66
Servizi di pulizia e lavanderia	57.588,73	57.588,73	57.588,73
Servizio di tesoreria	18.737,17	18.737,17	18.788,50
Software gestionale (contabilità, protocollo, ecc.)	83.955,21	66.144,33	66.031,22
Prestazioni di natura contabile, tributaria e del lavoro	26.644,80	26.644,80	26.644,80
DPO, RSPP, Medico Competente, Esperto museo, consulenza al GET e CUG	42.975,72	42.975,72	28.031,81
Indennità C.d.A. e Compensi agli organi istituzionali di revisione, di controllo	84.100,00	84.100,00	84.100,00
Compensi agli altri incarichi istituzionali dell'amministrazione (OIV)	6.546,32	6.546,32	6.546,32
<b>Totale delle voci precedenti</b>	<b>483.895,45</b>	<b>444.519,27</b>	<b>430.035,04</b>

### Altri costi per attività istituzionale (elenco non esaustivo)

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

	2026	2027	2028
Organizzazione di manifestazioni e convegni	70.000,00	70.000,00	70.000,00
Servizi per pubblicazione articoli scientifici	20.000,00	20.000,00	20.000,00
Materiale di consumo per laboratorio (compreso gas Progetto EEE)	100.000,00	100.000,00	100.000,00
Altri beni e materiali di consumo	15.000,00	10.000,00	10.000,00
Trasporti, traslochi e facchinaggio (Progetto EEE, facchinaggi Colser)	19.000,00	19.000,00	19.000,00
Carta, cancelleria e stampati	5.000,00	5.000,00	5.000,00
Acquisto riviste scientifiche e libri	15.000,00	10.000,00	10.000,00
<b>Totale delle voci precedenti</b>	<b>244.000,00</b>	<b>234.000,00</b>	<b>234.000,00</b>

### Sicurezza

Sono stati ripristinati tutti i controlli previsti dalla normativa e sono in programma gli adempimenti periodici tra cui:

- costituzione delle squadre di emergenza e formazione antincendio/pronto soccorso;
- collaudo periodico ascensori;
- nomina e formazione preposti;
- installazione cartellonistica;
- prova di evacuazione.

### Strumentazioni di ricerca e altri investimenti

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

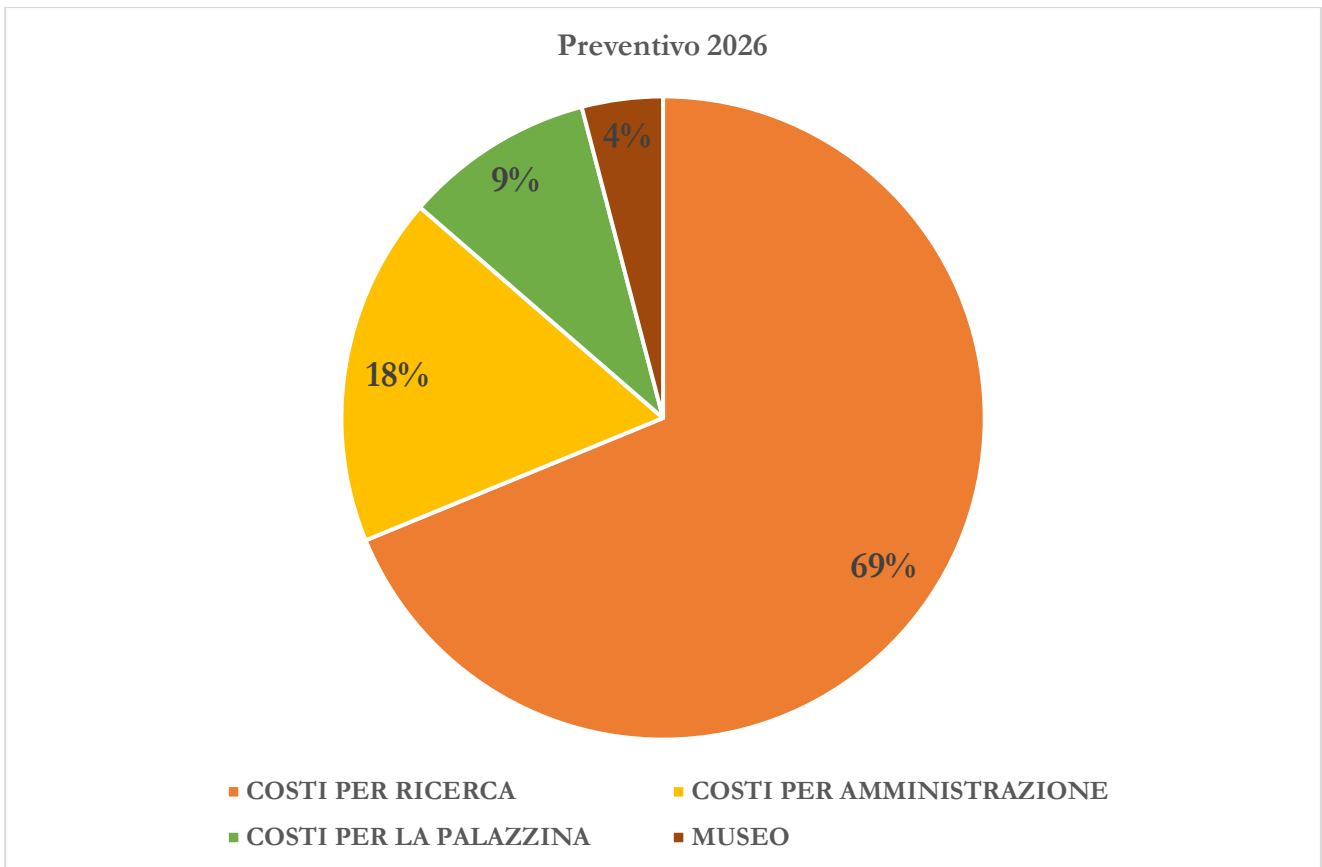
2026	2027	2028
57.000,00	57.000,00	57.000,00

Sono poi previsti acquisti di postazioni di lavoro informatiche da assegnare anche ai nuovi assunti, la sostituzione di materiale obsoleto, interventi legati alla sicurezza. 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.

	<b>2026</b>	<b>2027</b>	<b>2028</b>
Impianti	125.000,00	120.000,00	120.000,00
Macchine per ufficio	20.000,00	20.000,00	20.000,00
Attrezzature informatiche/hardware	58.000,00	23.000,00	23.000,00
Attrezzature didattiche e museali	10.000,00	10.000,00	10.000,00
Altre attrezzature	10.000,00	10.000,00	10.000,00

Dal punto di vista funzionale il budget 2026 è così ripartito:



---

## **FABBISOGNO DI PERSONALE E DOTAZIONE ORGANICA**

---

### **Indicatore di sostenibilità, punti organico**

#### **PREMESSA**

Ai sensi dell'art. 9, comma 2, del decreto legislativo 25 novembre 2016, n. 218, attuativo della legge 7 agosto 2015 n. 124 negli enti pubblici di ricerca "l'indicatore del limite massimo alle spese di personale è calcolato annualmente rapportando le spese complessive per il personale di competenza dell'anno di riferimento alla media delle entrate individuate, per gli Enti che adottano la contabilità finanziaria, dalle entrate correnti come risultanti dagli ultimi tre bilanci consuntivi approvati. Per gli Enti che adottano la contabilità civilistica si fa riferimento alle voci dei ricavi del conto economico corrispondenti. Negli Enti tale rapporto non può superare l'80 per cento. Per l'anno 2026 gli enti e gli istituti di ricerca possono procedere ad assunzioni di personale con rapporto di lavoro a tempo indeterminato nei limiti della spesa determinata sulla base dell'ordinamento vigente ridotta di un importo pari al 25 per cento di quella relativa al personale di ruolo cessato nell'anno precedente".

Il comma 4 stabilisce che 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 di quelle sostenute per personale con contratto a tempo determinato la cui copertura sia stata assicurata da finanziamenti esterni di soggetti pubblici o privati. Infine, ai sensi del comma 6, "gli Enti che, alla data del 31 dicembre dell'anno precedente a quello di riferimento riportano un rapporto delle spese di personale inferiore all'80 per cento possono procedere all'assunzione di personale con oneri a carico del proprio bilancio per una spesa media annua pari a non più del margine a disposizione rispetto al limite dell'80 per cento". A tal fine, in relazione a ogni qualifica di personale, il Ministro dell'università e della ricerca fissa un costo medio annuo, calcolato assumendo come riferimento il costo medio del personale nella qualifica di dirigente di ricerca.

Nelle more delle previste determinazioni del Ministero vigilante per i già menzionati calcoli si farà riferimento alla circolare DFP-0072298-P-13/12/2017 del Dipartimento della funzione pubblica, controfirmata dall'Ispettore generale capo dell'IGOP - Dipartimento della Ragioneria generale dello Stato del Ministero dell'economia e delle finanze.

In materia di personale degli enti di ricerca l'art. 12 del citato decreto legislativo stabilisce che "le determinazioni relative all'avvio delle procedure di reclutamento e alle relative assunzioni sono comunicate al Dipartimento della funzione pubblica della Presidenza del Consiglio dei ministri" e che "la facoltà degli Enti di reclutare il personale corrispondente al proprio fabbisogno nei limiti stabiliti dall'articolo 9, commi 2 a 4, non è sottoposta a ulteriori vincoli".

Va segnalata la novità introdotta dalla legge 30 dicembre 2024, n. 207, in particolare dall'art. 1 comma 833, che prevede che "Per effetto di quanto previsto dai commi da 822 a 830 del presente articolo, le amministrazioni, nell'ambito dei piani triennali dei fabbisogni di cui all'articolo 6 del decreto legislativo 30 marzo 2001, n. 165, provvedono ad adeguare la propria dotazione organica, anche in termini finanziari. Le amministrazioni non soggette alla adozione dei predetti piani provvedono ad adeguare la propria dotazione organica secondo i rispettivi ordinamenti. L'adeguamento della dotazione organica è asseverato dall'organo di controllo".

Ciò premesso, ai sensi dell'art. 14, comma 2, lettera i. dello Statuto, acquisite le indicazioni del Presidente, sulla base del quadro normativo sopra esposto e nel rispetto dei limiti finanziari e di bilancio appena richiamati, è predisposto il seguente piano di fabbisogno del personale per il triennio 2026-2028 del Museo storico della fisica e Centro studi e ricerche "Enrico Fermi", nel seguito indicato come CREF.

Dal punto di vista metodologico il piano si sviluppa secondo il seguente percorso:

- 1) fotografia dell'organico al 31 dicembre 2025;
- 2) definizione del punto organico e calcolo dei costi medi annuali associati ai singoli profili di inquadramento;

- 3) determinazione del limite massimo ai costi per personale e determinazione dei punti organico disponibili;
- 4) formulazione dell'ipotesi di sviluppo triennale dell'organico in base alle esigenze strategiche dell'ente;
- 5) verifica della compatibilità di tale ipotesi con i punti organico disponibili e 6) della sostenibilità finanziaria;
- 7) verifica del rispetto delle norme sul turn over e 8) di quelle sul lavoro dei disabili.

### **Piano di reclutamento nel triennio, con Tabella riassuntiva: nuove assunzioni e passaggi interni**

#### **1) PERSONALE IN SERVIZIO AL 31 DICEMBRE 2025**

Nel corso del 2025 il CREF ha sostenuto costi per personale dipendente prevalentemente a valere sul fondo ordinario per gli enti e le istituzioni di ricerca (FOE).

Al termine dell'anno 2025 la composizione del personale in servizio presso il CREF risultava la seguente.

<b>Personale CREF al 31 dicembre 2025</b>					
Profilo	Livello	Tempo indeterminato	Tempo determinato FOE	Tempo determinato fondi esterni	Totale
Dirigente di ricerca	I	2	1 <sup>a</sup>		3
Primo ricercatore	II	5			5
Ricercatore	III	12 <sup>b</sup>			12
Dirigente tecnologo	I	1			1
Tecnologo	III	3			3
Contratto di ricerca				1 <sup>c</sup>	1
Direttore amministrativo	Dirigente II		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 <sup>d</sup>			1
<b>Totale</b>		<b>33</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>36</b>

- a. Il Direttore scientifico è equiparato ad un Dirigente di ricerca I livello dal solo punto di vista economico.
- b. Va segnalato che tra i ricercatori di III livello in servizio al 31 dicembre 2025, 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.

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. È in servizio con decorrenza 29 maggio 2025 - 28 maggio 2027 un titolare di contratto di ricerca ai sensi dell'art. 22 della legge 30 dicembre 2010, n. 240, reclutato per lo svolgimento delle attività di cui al decreto direttoriale MUR n. 47 del 20 febbraio 2025 "Decreto per l'assunzione di ricercatori internazionali post-dottorato" nell'ambito del PNRR – 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 – Next Generation EU – CUP F87G25000060006. Il rapporto ha natura di lavoro dipendente a tempo determinato, come ribadito dalla circolare INPS numero 125 dell'11 settembre 2025. Questa tipologia di lavoratore dipendente non viene considerata ai fini della programmazione triennale.
- d. In data 1° dicembre 2022 l'organico CREF si è incrementato di una 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.

## 2) 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 €	<b>118.077,66 €</b>

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

<b>Costi medi annui CREF</b> <b>nota DFP-0072298-P-13/12/2017 Dipartimento della funzione pubblica</b>				
Livello	Qualifica	Percentuale	Punti organico	Costo annuo
II a	Dirigente amministrativo	125,28%	1,2528	147.927,69 €
<b>I</b>	<b>Dirigente di ricerca</b>	<b>100,00%</b>	<b>1,0000</b>	<b>118.077,66 €</b>
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 €

### 3) VERIFICA DEL LIMITE DI SOSTENIBILITÀ

La verifica della sostenibilità dei costi di personale presuppone il confronto tra i costi per personale dipendente (ricercatore, tecnologo, tecnico, amministrativo) e i ricavi 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 2026 avviato. In questo caso si fa riferimento ai dati dell'ultimo consuntivo approvato disponibile, e cioè a quello dell'esercizio 2024. Si noti che, a regime, il piano del fabbisogno dovrebbe 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 i ricavi, nei calcoli si è fatto riferimento esclusivamente a quelli derivanti dal fondo ordinario per gli enti e le istituzioni di ricerca (FOE).

<b>Indicatore di sostenibilità 2024 (valori a consuntivo)</b> <b>art. 9, c. 2, decreto legislativo 25 novembre 2016, n. 218</b>			
	2022	2023	2024
Ricavi complessivi dell'ente (≈FOE)	2.604.985 €	3.624.862 €	3.678.503 €
Media ricavi nel triennio 2022-2024 (R)	3.302.783 €		
Costi personale 2024 non da finanziamenti esterni (C)	1.927.303 €		
Rapporto costi personale 2024/media ricavi (Q=C/R)	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 dei costi di competenza dell'anno di riferimento, comprensivi degli oneri a carico dell'Amministrazione, al netto dei costi sostenuti 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 i costi di personale sostenuti nel 2024 e la media dei ricavi complessivi 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 potrebbe procedere a nuove assunzioni, fino ad arrivare un organico teorico complessivo equivalente a 22,377 punti organico, come di seguito determinati.

<b>Punti organico utilizzabili</b>	
Media ricavi nel triennio 2022-2024 (R)	3.302.783 €
Limite di spesa per personale (L=80% R)	2.642.227 €
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.

#### 4) FORMULAZIONE IPOTESI ORGANICO 2026-2028

##### Personale a tempo indeterminato

Per il periodo 2026-2028, al momento non sono attualmente previste cessazioni relative a posizioni a tempo indeterminato. Parimenti, non si prevede di reclutare nuovo personale a tempo indeterminato.

Per quanto riguarda l'ambito della ricerca sono previste due posizioni da primo ricercatore II livello, ai sensi dell'art. 15 del CCNL 7 aprile 2006, riservate al personale dipendente del CREF con rapporto di lavoro subordinato a tempo indeterminato con qualifica di ricercatore III livello e in possesso dei requisiti richiesti, finanziate attraverso le risorse proprie del CREF. In termini di punti organico, tale reclutamento inciderà per il solo differenziale primo ricercatore II livello - ricercatore III livello, pari a 0,2848 e comunque il relativo costo, stimato in euro 20.413,33, sarà garantito per la prima annualità dalle risorse aggiuntive residue di cui al decreto direttoriale MUR n. 1156 del 25 gennaio 2023 relativo alle risorse di cui all'art.1, comma 310, lett. b) della legge 31 dicembre 2021 n. 234 così come modificato dall'art. 1, comma 573, della legge 29 dicembre 2022, n. 197, finalizzate alla promozione dello sviluppo professionale di ricercatori e tecnologi di ruolo di terzo livello, ancora disponibili sul bilancio del CREF 2025 per complessivi euro 27.394.82.

Il CREF intende valorizzare le competenze acquisite dal personale tecnico amministrativo già in servizio, attivando una procedura di progressione di livello ex art. 54 CCNL 1998/2001 del 21 febbraio 2002, per il passaggio da collaboratore tecnico enti di ricerca V livello a IV livello, per un totale di 0,0602 punti organico. L'effettiva possibilità di procedere con la suddetta procedura sarà verificata in sede di ricognizione annuale dei fondi per il trattamento accessorio e in sede di contrattazione integrativa.

##### Personale a tempo determinato

Per quanto riguarda l'ambito della ricerca è confermata l'attivazione di una posizione da ricercatore III livello a tempo determinato di durata triennale prevista dal precedente piano 2025-2028 finanziata su fondi CREF da dedicare specificamente alle attività della linea di ricerca Neuroscienze e neuroimaging quantitativo (linea di ricerca Radio e Adroterapia - per maggiori dettagli si rinvia alla sezione scientifica del Piano triennale delle attività). La relativa selezione, di cui al bando n. 9(25), è in corso di svolgimento e si prevede che il vincitore possa prendere servizio entro il 1° aprile del 2026. Nella programmazione triennale tale posizione si considera prudenzialmente anche per tutto il 2028.

Per far fronte all'incremento di visitatori del Museo Fermi il CREF ritiene opportuno attivare una posizione di collaboratore tecnico VI livello a tempo parziale 50%, determinato per 12 mesi, eventualmente rinnovabile, da dedicare al supporto alle attività del museo. Tale figura, inoltre, supporterà le ricerche del progetto finanziato dal Dipartimento per la trasformazione digitale della Presidenza del Consiglio dei ministri denominato 2024\_DIGITTRANSITION\_PNRR Transizione Digitale M1C1 PNRR NextGenerationEU CUP F87H23002490006. Il costo annuo è stimato in euro 23.460, di cui 12.460 a carico del fondo ordinario CREF e 11.000 a valere sul progetto 2024\_DIGITTRANSITION\_PNRR. Nella programmazione triennale tale posizione si considera prudenzialmente anche per tutto il 2027, poiché non è possibile determinare con certezza la data di presa di servizio, all'esito della procedura di reclutamento.

A tal proposito si ricorda che continua ad applicarsi l'articolo 187 della legge 23 dicembre 2005, n. 266 (Disposizioni per la formazione del bilancio annuale e pluriennale dello Stato - legge finanziaria 2006), secondo cui "A decorrere dall'anno 2006 ... gli enti di ricerca ..., possono avvalersi di personale a tempo determinato o con convenzioni ovvero con contratti di collaborazione coordinata e continuativa, nel limite del 40 per cento della spesa sostenuta per le stesse finalità nell'anno 2003". Il totale di tale spesa sostenuta risultante dal bilancio approvato dell'esercizio 2003 risulta pari ad euro 167.036, di cui euro 66.814 costituiscono il 40%. Tale importo deve essere confrontato con il costo annuo del ricercatore III livello, stimato in euro 53.733 e il costo annuo del collaboratore tecnico VI livello a tempo parziale 50%, per la quota a carico del fondo di funzionamento CREF, stimata in euro 12.460. Dal raffronto emerge il rispetto del limite di legge.

A titolo informativo si segnala che nel corso del 2027 scadrà, senza possibilità di rinnovo, il contratto di ricerca ai sensi dell'art. 22 della legge 30 dicembre 2010, n. 240, avviato per lo svolgimento delle attività di cui al decreto direttoriale MUR n. 47 del 20 febbraio 2025 "Decreto per l'assunzione di ricercatori internazionali post-dottorato" nell'ambito del PNRR – 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 – Next Generation EU – CUP F87G25000060006, come descritto al punto 1, lettera c.

Allo stato attuale il CREF non prevede di effettuare, oltre a quanto già descritto, ulteriore reclutamento nel triennio 2026-2028.

Quanto fino a qui descritto è sintetizzato nelle tabelle seguenti:

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	2		7	0			0	7	7	4,971
Ricercatore	III	0,425	50.218,43 €	12		2	10	0	1		1	11	9	3,828
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			0	3	3	1,032
Collaboratore tecnico ER	IV	0,546	64.494,02 €	0	1		1	0			0	1	1	0,546
	V	0,486	57.385,74 €	1		1	0	0			0	0	0	0,000
	VI	0,385	45.483,51 €	1			1	0	1		1	2	2	0,770
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			0	1	0	0,000
Funzionario di amministrazione	VIII	0,321	37.950,16 €	0			0	0			0	0	0	0,000
	IV	0,546	64.494,02 €	1			1	0			0	1	1	0,546
Collaboratore di amministrazione	V	0,486	57.385,74 €	6			6	0			0	6	6	2,916
	V	0,486	57.385,74 €	0			0	0			0	0	0	0,000
Operatore di amministrazione	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
<b>Totale</b>				<b>33</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>33</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>37</b>	<b>34</b>	<b>19,866</b>

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 €	7			7	0			0	7	7	4,971
Ricercatore	III	0,425	50.218,43 €	10			10	1			1	11	9	3,828
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			0	3	3	1,032
Collaboratore tecnico ER	IV	0,546	64.494,02 €	1			1	0			0	1	1	0,546
	V	0,486	57.385,74 €	0			0	0			0	0	0	0,000
	VI	0,385	45.483,51 €	1			1	1		1	1	2	2	0,770
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			0	1	0	0,000
Funzionario di amministrazione	VIII	0,321	37.950,16 €	0			0	0			0	0	0	0,000
	IV	0,546	64.494,02 €	1			1	0			0	1	1	0,546
Collaboratore di amministrazione	V	0,486	57.385,74 €	6			6	0			0	6	6	2,916
	VI	0,486	57.385,74 €	0			0	0			0	0	0	0,000
Operatore di amministrazione	VII	0,385	45.483,51 €	0			0	0			0	0	0	0,000
	VIII	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
<b>Totale</b>				<b>33</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>33</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>37</b>	<b>34</b>	<b>19,866</b>

2028														
Profilo	Livello	Punti organico	Costo medio	Tempo indeterminato				Tempo determinato FOE				Organico totale @31/12	Organico soggetto ai limiti	Punti organico 2028
				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 €	7			7	0			0	7	7	4,971
Ricercatore	III	0,425	50.218,43 €	10			10	1			1	11	9	3,828
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			0	3	3	1,032
Collaboratore tecnico ER	IV	0,546	64.494,02 €	1			1	0			0	1	1	0,546
	V	0,486	57.385,74 €	0			0	0			0	0	0	0,000
	VI	0,385	45.483,51 €	1			1	1		1	0	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			0	1	0	0,000
Funzionario di amministrazione	VIII	0,321	37.950,16 €	0			0	0			0	0	0	0,000
	IV	0,546	64.494,02 €	1			1	0			0	1	1	0,546
Collaboratore di amministrazione	V	0,486	57.385,74 €	6			6	0			0	6	6	2,916
	VI	0,486	57.385,74 €	0			0	0			0	0	0	0,000
Operatore di amministrazione	VII	0,385	45.483,51 €	0			0	0			0	0	0	0,000
	VIII	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
<b>Totale</b>				<b>33</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>33</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>36</b>	<b>33</b>	<b>19,481</b>

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.

##### 5) 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*
2026	22,377	2.642.227 €	19,8660	2.345.730,79 €
2027			19,8660	2.345.730,79 €
2028			19,4808	2.300.247,28 €

\*: le frazioni di anno sono prudenzialmente computate per intero.

I sopra riportati calcoli dimostrano la compatibilità dell'ipotesi formulata con il limite stabilito dalla legge.

## **6) COPERTURA FINANZIARIA**

Nel bilancio preventivo per l'esercizio 2026 è stata data la necessaria copertura ai costi effettivi del personale previsto negli ultimi documenti di programmazione approvati nell'anno 2025, corrispondenti a quanto prospettato nel presente documento. In particolare, le due progressioni da primo ricercatore II livello, ai sensi dell'art. 15 del CCNL 7 aprile 2006, riservate al personale dipendente del CREF con rapporto di lavoro subordinato a tempo indeterminato con qualifica di ricercatore III livello saranno garantite nell'esercizio corrente ricorrendo alla riserva di cui alla voce di contabilità generale CG.P.1.02.02.01.002 Fondo finalizzato alla programmazione e al fabbisogno dei costi del personale - riserva ex Cofi, di consistenza pari ad euro 27.394,82, di cui si stima di utilizzare euro 20.413,33 (l'importo effettivo sarà noto solo dopo il completamento della procedura selettiva e sarà determinato dalla posizione economica in godimento di ciascun ricercatore III livello che risulterà vincitore).

Sempre nell'esercizio 2026 il reclutamento del collaboratore tecnico VI livello part-time 50% non modifica gli importi previsti a preventivo: come già descritto precedentemente, la posizione del ricercatore III livello a tempo determinato linea di ricerca Radio e Adroterapia bando n. 9(25), già valorizzata per complessivi euro 53.733, in realtà inciderà solo per 9 mensilità, pari ad euro 40.300, con un risparmio presunto di almeno euro 13.433. Il collaboratore non potrà ragionevolmente prendere servizio prima di luglio 2026, determinando un costo effettivo per il CREF pari ad euro 11.730.

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 per lo più composto da soggetti giovani, reclutati nella posizione iniziale del profilo/livello, di norma percepirà una retribuzione relativa alle fasce stipendiali più basse.

## **7) RISPETTO DELLE NORME SUL TURN OVER 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:

- a) 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 non si sono realizzate cessazioni nel corso del 2025, né sono previste assunzioni a tempo indeterminato nel 2026;
- b) di conseguenza la riduzione della capacità assunzionale prevista per l'anno 2026 è prevista pari a zero;
- c) i risparmi di spesa derivanti dalle cessazioni dal servizio del personale di ruolo intervenute nel corso dell'annualità 2025 sono pari a zero;
- d) 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;
- e) 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.

## **8) RISPETTO DELLE NORME PER IL DIRITTO AL LAVORO DEI DISABILI LEGGE 12 MARZO 1999, N. 68**

In questa sezione si fa riferimento a quanto previsto dalla legge 12 marzo 1999, n. 68, recante "Norme per il diritto al lavoro dei disabili", in particolare al comma 1 dell'articolo, secondo cui "I datori di lavoro pubblici e privati sono tenuti ad avere alle loro dipendenze lavoratori appartenenti alle categorie di cui all'articolo 1 nella seguente misura:

a) sette per cento dei lavoratori occupati, se occupano più di 50 dipendenti; b) due lavoratori, se occupano da 36 a 50 dipendenti; c) un lavoratore, se occupano da 15 a 35 dipendenti”.

L'articolo 4 comma 1 stabilisce inoltre che “Agli effetti della determinazione del numero di soggetti disabili da assumere, sono computati di norma tra i dipendenti tutti i lavoratori assunti con contratto di lavoro subordinato. Ai medesimi effetti, non sono computabili: i lavoratori occupati ai sensi della presente legge, i lavoratori occupati con contratto a tempo determinato di durata fino a sei mesi, i soci di cooperative di produzione e lavoro, i dirigenti, ...”.

Alla luce della programmazione proposta in questa sede, escludendo le figure del Direttore amministrativo (dirigente) e il Direttore scientifico, nel corso del triennio 2026-2028 l'organico del CREF sarà composto da 32 unità a tempo indeterminato (escluso quindi il lavoratore già assunto ai sensi della legge 68/1999) e 3 (incluso il contratto di ricerca, non inserito nei prospetti di cui al punto 4) a tempo determinato con durata superiore ai sei mesi, per un totale di 35 unità. Nel triennio di riferimento quindi le norme per il diritto al lavoro dei disabili risultano rispettate.

### Pianificazione di borse (di studio, dottorato), assegni di ricerca

PREVISIONE PERSONALE NON STRUTTURATO 2026 - 2028			
TIPOLOGIA CONTRATTO	2026	2027	2028
<b>ASSEGNI DI RICERCA</b>	13	4	
<b>BORSE DI STUDIO E RICERCA</b>	9	5	
<b>INCARICHI DI RICERCA</b>	2	1	
<b>Totale complessivo</b>	<b>24</b>	<b>10</b>	

PREVISIONE BORSE PHD			
CICLO	2026	2027	2028
39°	5	1	
40°	2	2	
41°	4	4	4
42°	5	5	5
43°		4	4
44°			4
<b>Totale complessivo</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>13</b>

## **MONITORAGGIO E AUTOVALUTAZIONE**

---

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

Il CREF adotta un sistema strutturato e multilivello di monitoraggio interno, ideato per garantire il corretto avanzamento delle attività e la massima qualità dei progetti di ricerca. Al centro di questo sistema valutativo, il Direttore Scientifico conduce periodici audit interni: questi incontri si rivelano fondamentali per verificare lo stato di avanzamento delle singole indagini, valutare il rigore scientifico dei risultati e individuare tempestivamente eventuali criticità, permettendo di delineare in corso d'opera le più adeguate azioni correttive.

Tale monitoraggio è costantemente affiancato dal confronto orizzontale tra i ricercatori. Vengono infatti organizzati con regolarità seminari istituzionali in cui le diverse linee di ricerca presentano i propri traguardi più recenti. Questo approccio aperto favorisce la contaminazione delle idee, la condivisione trasparente degli aggiornamenti e la discussione costruttiva delle difficoltà operative, rappresentando un momento imprescindibile per coordinare i team in modo sinergico e ottimizzare l'impiego delle risorse a disposizione. Come ulteriore potenziamento, è stata recentemente completata la realizzazione di un archivio digitale istituzionale, interamente dedicato alla raccolta e alla catalogazione dei prodotti della ricerca del CREF. Questa piattaforma svolge una duplice e strategica funzione: da un lato, essendo accessibile pubblicamente, garantisce la massima trasparenza e diffusione della conoscenza scientifica prodotta dall'ente; dall'altro, si configura come uno strumento tecnologico essenziale per il monitoraggio interno. L'archivio permette infatti di tracciare in tempo reale la produttività scientifica, offrendo parametri quantitativi e qualitativi sempre aggiornati sull'output dei vari gruppi di lavoro.

L'insieme di questi flussi informativi confluisce infine nella verifica complessiva su base annuale. Durante questa fase di bilancio, i risultati ottenuti vengono analizzati rispetto alle milestone prefissate, integrando le valutazioni con i riscontri forniti dal report del Comitato Interno di Valutazione. Questo processo conclusivo consente di valutare con oggettività il livello di maturità dei progetti, intercettare eventuali scostamenti rispetto alla pianificazione originaria e, di conseguenza, definire strategie di miglioramento e di sviluppo sempre più mirate 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 rigorosi metodi della fisica ma caratterizzate da una forte vocazione interdisciplinare, in stretta connessione con le principali sfide della società e della conoscenza. Le attività abbracciano aree ad alto valore scientifico e culturale — dallo studio della complessità per lo sviluppo economico all'intelligenza artificiale, fino alle tecnologie fotoniche, la sostenibilità, l'astrofisica, la meccanica quantistica e la storia della fisica. A queste si integrano i recenti traguardi della Fisica Applicata che, spaziando dalla medicina ai beni culturali fino alla transizione energetica e ambientale, generano un impatto diretto in una società che invecchia progressivamente e che necessita di tecnologie sempre più sicure e sostenibili.

L'impatto sociale delle attività del CREF è ulteriormente amplificato dal forte impegno nella terza missione, nell'alta formazione e nel public engagement. Le attività museali sono interamente dedicate alla promozione della cultura scientifica, rivolgendosi in particolare ai giovani delle scuole secondarie superiori, per i quali la visita rappresenta un'occasione di arricchimento e un fondamentale strumento di orientamento pre-universitario. A questo si affiancano iniziative come il Progetto EEE, un ibrido di successo che persegue simultaneamente indagini scientifiche d'avanguardia sui raggi cosmici e capillare divulgazione nelle scuole. Ad accrescere questa trasparenza e condivisione concorre oggi la recente realizzazione di un archivio digitale pubblico dei prodotti della ricerca, che rende il patrimonio di conoscenze dell'Ente pienamente accessibile alla collettività.

Sotto il profilo strettamente scientifico e bibliometrico, la produttività dell'istituto si mantiene su livelli di assoluta eccellenza. Nell'ultimo triennio (2023-2025), sono stati pubblicati oltre 200 articoli su riviste indicizzate, accompagnati da numerosi altri contributi editoriali. Questi lavori hanno complessivamente attratto circa 10.000 citazioni, mantenendo una media superiore alle 30 citazioni per articolo, a testimonianza dell'elevata risonanza internazionale delle ricerche.

La capacità di attrazione delle risorse (progetti competitivi e attività per conto di terzi) confermano la solidità strutturale dell'Ente. La progettualità espressa dai ricercatori del CREF continua ad attrarre importanti fondi competitivi esterni, inclusi i finanziamenti legati al PNRR in conclusione. Sebbene l'impatto economico indiretto dell'innovazione tecnologica sviluppata non sia facilmente quantificabile in cifre assolute, la sempre più fiorente attività in conto terzi rappresenta un indicatore tangibile dell'altissimo valore economico intrinseco e della spendibilità industriale delle competenze di cui il CREF dispone.

Infine, l'impatto sociale si riflette nei benefici diretti e tangibili per la collettività. In ambito sanitario, i progressi nel neuroimaging quantitativo per la diagnosi precoce di patologie neurodegenerative come l'Alzheimer, uniti all'ottimizzazione dei piani terapeutici oncologici, contribuiscono a un'assistenza medica più mirata, sicura e accessibile a fasce sempre più ampie di popolazione. Parallelamente, l'applicazione di rigorose tecniche non distruttive per la salvaguardia dei Beni Culturali assicura la tutela e la valorizzazione dell'inestimabile patrimonio storico-artistico italiano, difendendolo dal degrado. Tutto questo si completa con un forte impegno istituzionale verso la divulgazione e la democratizzazione del sapere, restituendo valore alla società e promuovendo una solida cultura dell'innovazione sostenibile.