

POLITECNICO DI MILANO



Dipartimento di Fisica

Progetto Scientifico



Dipartimento di Fisica

Progetto Scientifico e Didattico

Descrizione generale

In coerenza con la sua collocazione in una Scuola di Ingegneria, dalla sua fondazione il Dipartimento di Fisica si è posto l'obiettivo di sviluppare attività di ricerca nell'ambito della Fisica Applicata, in particolare nella Fisica della Materia, e di fornire una formazione didattica di base e avanzata in Fisica. L'attuale progetto proposto dai firmatari si presenta con una linea di completa continuità con la struttura attualmente esistente e ne estende in prospettiva gli obiettivi.

Negli ultimi 40 anni i settori principalmente sviluppati sono stati quello della Fotonica e della Fisica dei solidi micro e nano strutturati e delle superfici.

La ricerca in Fotonica è iniziata con la scoperta del laser e il gruppo di ricerca del Dipartimento ha costituito uno dei primi laboratori laser in Italia. Fin dall'inizio l'attività si è focalizzata su laser a impulsi brevi (laser a Rubino e Neodimio in mode-locking) e misure nel dominio del tempo. Questa è stata la base delle successive attività e il Dipartimento ha consolidato ed espanso il suo ruolo internazionale nello sviluppo di nuovi sistemi laser nel dominio del tempo e nelle loro applicazioni.

L'attività in Fisica dei solidi micro e nanostrutturati è iniziata con i primi innovativi esperimenti di spettroscopia elettronica successivamente estesi all'uso di fasci di elettroni polarizzati in spin. Il Dipartimento ha costituito una intensa e permanente collaborazione con le grandi infrastrutture di sincrotrone quali l'European Synchrotron Radiation Facility di Grenoble e la Swiss Light Source. La ricerca in questo settore si è ampliata nel corso degli anni con significativi risultati di trasferimento tecnologico, estendendo i campi di interesse e promuovendo la costituzione di nuovi laboratori in settori di frontiera, quali ad esempio la sintesi e la caratterizzazione di materiali nanostrutturati.

Dalla sua iniziale costituzione il Dipartimento è cresciuto in termini di personale di ruolo e l'acquisizione di un numero consistente di contratti nazionali e internazionali ha consentito di ampliare il numero dei laboratori sperimentali attrezzati con strumentazione allo stato dell'arte, che costituiscono lo strumento fondante delle attività di ricerca. Indicativamente sono attualmente attivi 40 laboratori sperimentali, ubicati presso i campus di Milano Leonardo, Como e Lecco.

La ricerca in Fotonica è articolata in vari settori, quali la generazione di impulsi ultrabrevi nel regime temporale dei femtosecondi e attosecondi, lo sviluppo di sistemi fotonici per applicazioni in settori interdisciplinari quali la biomedicina, l'agroalimentare e i beni culturali, lo studio e realizzazione di laser a stato solido e dispositivi fotonici integrati per applicazioni al monitoraggio ambientale, al fotovoltaico, alle telecomunicazioni e al controllo coerente della luce.

Per la Fisica dei solidi micro e nanostrutturati le principali attività si sviluppano nell'ambito della sintesi e caratterizzazione di materiali artificiali nanostrutturati (tipicamente crescita epitassiale di strati di spessore nanometrico o subnanometrico) per applicazioni microelettronica, optoelettronica e spintronica, e dello studio delle proprietà elettroniche e magnetiche di solidi cristallini mediante l'uso di tecniche innovative anche basate sull'uso della radiazione di sincrotrone

Le attività e i progetti di ricerca su cui il Dipartimento intende fondare la propria attività sono descritti con maggiore dettaglio nei successivi paragrafi.

La scelta del Dipartimento è sempre stata quella di muoversi in settori di ricerca strategici. A conferma delle sue strategie, va sottolineato che sia la Fotonica che le Nanotecnologie sono attualmente indicate dalla Comunità Europea come "key enabling technologies" cioè tecnologie fondanti per i grandi temi di ricerca descritti come obiettivi nel documento Horizon 2020 del prossimo programma quadro.

La collocazione della ricerca in queste tematiche rilevanti ha inoltre potenziato la posizione nazionale e internazionale del Dipartimento, consentendo la promozione di collaborazioni interdisciplinari sia interne con altri Dipartimenti del Politecnico che esterne con Enti e Università italiane e con Laboratori e grandi Infrastrutture di ricerca internazionali. I risultati più significativi a livello italiano sono evidenziati dalla costituzione presso il Polo di Como del Centro Interuniversitario per lo Studio e le Applicazioni Industriali di Nanostrutture Epitassiali su Silicio e per lo Sviluppo della Spintronica (LNESS) e la presenza presso il Dipartimento della sede dell'Istituto di Fotonica e Nanotecnologie del CNR. La stretta collaborazione con il CNR è una lunga tradizione del Dipartimento, che ha portato ad una proficua integrazione del personale CNR e dei laboratori CNR con il personale universitario e le strutture dipartimentali.

La qualità della ricerca e dei laboratori sperimentali del Dipartimento ha portato al riconoscimento da parte della Comunità Europea dello status di *large scale facility* europea con la costituzione presso il Dipartimento del Center for Ultrafast Science and Biomedical Optic (CUSBO). Dal 6° programma quadro, CUSBO fa parte del network LaserLab Europe che comprende 28 grandi infrastrutture europee nel campo dei laser. Dalla costituzione di CUSBO ogni anno una decina di gruppi di ricerca europei lavorano presso la struttura su specifici progetti approvati dal network utilizzando le apparecchiature messe a disposizione.

IIT ha recentemente istituito presso il Politecnico "*Center for Nano Science and Technology@PoliMi*" e fin dall'insediamento di questa nuova struttura sono attive proficue collaborazioni con il Dipartimento, che riguardano non solo gli aspetti di progetti comuni di ricerca ma anche l'uso complementare di strumentazioni.

Con la recente acquisizione di diversi contratti di ricerca di ammontare significativo (2 ERC advanced, 1 FIRB Ideas più diversi progetti europei) si prevede di procedere alla realizzazione di nuovi laboratori

e attrezzature di ricerca, ampliando lo spettro di attività e la competitività internazionale del Dipartimento.

Fino dalla sua costituzione il Dipartimento ha fornito il supporto formativo per i corsi di Fisica di base offrendo per questa disciplina un riferimento organizzativo e culturale per l'Ateneo .

In particolare con il nuovo ordinamento 3+2 ha coordinato la formulazione dell'offerta formativa in accordo con le esigenze dei Corsi di Studio dell'Ateneo, armonizzandone i contenuti e la struttura didattica in termini di lezioni, esercitazioni e laboratori sperimentali e trasferendo una visione unitaria della formazione fisica per l'ingegneria, in sinergia propedeutica con la ricerca dipartimentale.

Con il nuovo ordinamento, anche sulla base di una verifica con il mondo industriale e produttivo, il Dipartimento ha promosso un nuovo corso di studi in Ingegneria Fisica per formare una figura professionale di Ingegnere con una solida preparazione scientifica ed una ampia visione delle applicazioni ingegneristiche, capace quindi di comprendere e trasferire l'innovazione scientifica alla tecnologia e alla produzione. Il Dipartimento è inoltre sede di un Corso di Dottorato in Fisica con allievi italiani e stranieri. In particolare la presenza di allievi stranieri è cresciuta negli ultimi anni attestandosi su una percentuale del 25%.

La didattica, soprattutto per gli ambiti dell'Ingegneria Fisica e del Dottorato, presenta una continua interazione con le attività di ricerca. Fino dal terzo anno, nell'ambito dei laboratori progettuali, gli studenti svolgono una attività sperimentale nei laboratori di ricerca del Dipartimento su apparecchiature di ricerca con una offerta di tematiche specifiche (circa 60 per anno) che coinvolgono tutte le attività del Dipartimento. Nel prosieguo degli studi, la didattica per la Laurea Magistrale e il Dottorato viene costantemente aggiornata in modo da fornire una formazione adeguata alla comprensione degli sviluppi internazionali della ricerca e della tecnologia.

Il Dipartimento intende proseguire con questa attività di coordinamento dell'offerta didattica per la Fisica in accordo con le Scuole dell'Ateneo, fornendo il supporto formativo e collaborando strettamente con le Scuole per la proposizione e realizzazione di progetti didattici innovativi.

Posizionamento Interno ed Esterno

La vocazione interdisciplinare della ricerca dipartimentale e l'ampia collocazione delle competenze maturate, hanno portato a proficue e continue interazioni con i Dipartimenti dell'Ateneo, rafforzando quella stretta interazione tra ricerca scientifica e tecnologia che costituisce uno dei fondamenti della cultura politecnica. A tal fine il Dipartimento ha promosso anche progetti di ricerca in collaborazione con altri Dipartimenti.

Sotto l'aspetto didattico il Dipartimento interagisce con tutte le Scuole di Ingegneria dell'Ateneo fornendo una didattica di qualità e armonizzata sui fondamenti di base. E' inoltre attivo per i diplomi di doppia laurea sia con altri corsi di studio dell'Ateneo che con Atenei esteri. Supporta inoltre attraverso la propria rete di ricerca le tesi di studenti presso laboratori internazionali.

Dato che il finanziamento per la ricerca proviene per una parte consistente da progetti internazionali, il Dipartimento ha costituito una ampia relazione di partnership con molti gruppi europei. Questa

base di relazioni consente di rispondere in modo adeguato alla formazione dei consorzi indispensabili per competere sugli attuali bandi e in prospettiva sulle prossime call del 8° programma quadro.

Il Dipartimento è inoltre attivo nel trasferimento tecnologico e nei limiti della disponibilità delle imprese italiane per investimenti nella ricerca avanzata, partecipa a bandi PON e favorisce queste iniziative. Presso il Dipartimento è inoltre attivo un Centro di Taratura dell'Ateneo per misuratori di vuoto (LAT n.104).

Organizzazione del Dipartimento e Logistica.

La struttura del Dipartimento si articola attraverso una organizzazione per linee di ricerca. Sebbene gli obiettivi di ciascuna linea siano chiaramente individuati (come riportato con dettaglio nel documento) il carattere interdisciplinare delle ricerche determina significative attività complementari tra di esse rafforzando l'appartenenza dei ricercatori al progetto comune del Dipartimento. L'attività sperimentale è inoltre supportata da servizi comuni gestiti dal personale tecnico-amministrativo quali l'officina meccanica (una delle poche strutture di questo tipo presenti in Ateneo), il servizio elettronico e informatico, il servizio di amministrazione e contabilità e la segreteria didattica. Le strutture di supporto sono gestite in qualità, con una sperimentazione avviata già da alcuni anni.

Il Dipartimento occupa attualmente circa 4500 m² presso il Campus Leonardo di cui circa la metà sono occupati da laboratori sperimentali. Il Dipartimento dispone anche di 1300 m² (900 m² di laboratori) presso il Polo di Como (LNESS) e 50 m² presso il Polo di Lecco (25 m² di laboratorio).

Soprattutto presso la sede di Leonardo l'ampliamento degli spazi di laboratori è un problema cruciale per la crescita del Dipartimento. Difatti i progetti acquisiti richiedono lo sviluppo di strumentazioni dedicate che non possono essere collocate negli attuali spazi ormai completamente saturati. La competizione internazionale si basa sulla disponibilità di nuove tecnologie e la loro realizzazione ha consentito fino ad ora al Dipartimento di partecipare con successo ai progetti internazionali. Si auspica pertanto che, nei limiti delle disponibilità, questi aspetti siano valutati positivamente nella gestione degli spazi di Ateneo.

Composizione del Dipartimento

Al Dipartimento hanno dato adesione formale 11 professori Ordinari, 13 professori Associati, 21 Ricercatori e 5 Ricercatori a tempo determinato, per un totale di 50 unità di personale strutturato. Alla attuale struttura afferiscono inoltre 18 unità di personale tecnico – amministrativo che si presume vengano confermate.

Linee di Ricerca

1 - Generazione di impulsi ultrabrevi e loro applicazioni alla fisica della materia

L'attività di ricerca riguarda lo sviluppo di nuove sorgenti laser per la generazione d'impulsi ultrabrevi (nel dominio dei femtosecondi e attosecondi) e la loro applicazione allo studio di processi dinamici nella materia. Tale ricerca si avvale di tecnologie e metodologie altamente innovative nel settore dei laser, con importanti ricadute nel campo dell'ottica non lineare, della fisica atomica e molecolare e della fisica dei materiali organici e inorganici

2 - Laser a stato solido e dispositivi fotonici per sistemi integrati

L'attività di ricerca riguarda lo sviluppo di laser a stato solido e di dispositivi fotonici integrati per applicazioni alla spettroscopia molecolare, alla sensoristica optofluidica, al controllo coerente della luce ed alla informazione quantistica. Tale ricerca si caratterizza per un elevato contenuto innovativo. In particolare, da un lato è orientata ad una comprensione dei fenomeni fisici di base e dall'altro è tesa ad individuare soluzioni di frontiera nei campi di applicazione a cui si rivolge

3 - Fotonica per la salute, l'agroalimentare e i beni culturali

La ricerca spazia in diversi campi di applicazione della spettroscopia laser, con particolare interesse per le tematiche della diagnostica medica e della biologia molecolare. Il comune denominatore di tutte le metodologie di indagine è lo sviluppo e l'utilizzo di strumenti di misura della luce con elevata risoluzione temporale e sensibilità. La vocazione applicativa di questa linea di ricerca ha portato alla realizzazione sia di strumentazione da laboratorio che di dispositivi medici coerenti con le normative ministeriali. Queste ultime realizzazioni hanno consentito di trasferire i risultati della ricerca di base nell'ambito clinico con validazioni su volontari sani e su pazienti a fronte di protocolli etici approvati. Le principali basi diagnostiche sono legate all'analisi della emissione della fluorescenza e della propagazione della radiazione ottica in mezzi altamente diffondenti. Le competenze acquisite hanno consentito inoltre di estendere queste metodiche ad altri settori quali i Beni Culturali e l'Agroalimentare.

4 - Crescita epitassiale e fabbricazione di nanostrutture

L'attività di ricerca è incentrata sulla crescita di materiali artificiali nanostrutturati (in genere a strati di spessore nano o subnanometrico), ottenuta mediante deposizione in vuoto su substrati monocristallini, e la loro caratterizzazione con varie tecniche spettroscopiche e microscopiche. Particolare attenzione viene dedicata alla progettazione, costruzione e utilizzo di strumentazione innovativa. Vengono studiati materiali magnetici, semiconduttori e ossidi, confinati spazialmente su scala nanometrica, per applicazioni nano tecnologiche in elettronica, fotonica e spintronica. Si utilizzano anche tecniche litografiche (sia ottiche che da fascio elettronico) per la definizione laterale delle nanostrutture in dispositivi prototipo.

5 - Proprietà elettroniche, ottiche e magnetiche di sistemi a bassa dimensionalità

L'attività di ricerca punta allo studio delle proprietà fondamentali di sistemi a bassa dimensionalità tramite svariate tecniche spettroscopiche e microscopiche. Vengono in particolare utilizzate: *i*) spettroscopie basate su raggi ultravioletti e X (radiazione di sincrotrone inclusa) e su fasci di elettroni e di positroni; *ii*) microscopia elettronica e ottica a campo vicino (sotto il limite di diffrazione); *iii*) tecniche di magnetometria ottica (avvalendosi anche di laser a impulsi ultrabrevi). E' anche presente un'attività di progettazione, costruzione e utilizzo di strumentazione avanzata da installare presso le grandi *facilities* internazionali.

Linee di Ricerca: attività, progetti e prospettive

In questa sezione viene riportata una sintesi più articolata della attività di ricerca in corso e delle prospettive di sviluppo. La descrizione, per semplicità, è strutturata secondo le linee di ricerca, anche se come già citato è presente una forte interazione tra le linee che rende più omogeneo l'intero progetto del Dipartimento.

Linea di Ricerca 1: Generazione di impulsi ultrabrevi e loro applicazioni alla fisica della materia

L'attività di ricerca riguarda lo sviluppo di nuove sorgenti laser per la generazione di impulsi ultrabrevi (nel dominio dei *femtosecondi*, 10^{-15} s, e *attosecondi*, 10^{-18} s) e le loro applicazioni allo studio di processi dinamici nella materia. Tale ricerca si avvale di tecnologie e metodologie altamente innovative nel settore dei laser, con importanti ricadute nel campo dell'ottica non lineare, della fisica atomica e molecolare, della fisica dei materiali organici e inorganici e dei dispositivi fotonici. L'attività della linea si basa su di una esperienza accumulata nell'arco di oltre vent'anni, che si è sviluppata parallelamente ai progressi scientifici ottenuti nel settore dei laser e in particolare nella generazione di impulsi di radiazione ultrabrevi, stabilendo anche record a livello internazionale. I settori quali "*ultrafast optics*" (generazione di impulsi a femtosecondi dall'infrarosso al vicino ultravioletto), "*extreme photonics*" (generazione di impulsi ad attosecondi nella regione dei raggi X) e "*ultrafast phenomena*" (studio delle dinamiche ultrabrevi nella materia) costituiscono con le loro interconnessioni i tre assi portanti della linea di ricerca, la cui attività si articola come segue:

Imaging molecolare" mediante generazione di radiazione XUV e diffrazione di elettroni

La comprensione dei processi molecolari è di particolare importanza in svariati ambiti della fisica, chimica e biologia. Le indagini vengono generalmente svolte in modo indiretto mediante misure di assorbimento o emissione di luce. La visualizzazione diretta ("*imaging molecolare*") dei cambiamenti della struttura elettronica durante i processi fornirebbe una serie di informazioni sulla conformazione molecolare e la sua evoluzione non altrimenti accessibili. L'attività di ricerca, di recente introduzione, persegue queste finalità mediante l'interazione delle molecole con impulsi laser ad alta intensità. Gli elettroni prodotti dal processo di ionizzazione possono ricombinarsi con la molecola stessa dando luogo a radiazione coerente nell'XUV o esserne diffratti. Lo spettro della radiazione XUV emessa così come la mappatura della diffrazione elettronica consentono di ricostruire le variazioni della distribuzione elettronica molecolare con risoluzione nel dominio dei femtosecondi. L'attività si propone di studiare le evoluzioni della struttura di molecole di media grandezza e in particolare di risolvere nel dominio temporale processi di foto-dissociazione e foto-isomerizzazione.

Scienza degli attosecondi

I risultati rilevanti sin qui ottenuti nella generazione, misura e utilizzo di impulsi XUV nel regime degli attosecondi dimostrano che il settore è altamente innovativo e in rapida evoluzione, e inoltre consente di poter disporre di strumenti formidabili per l'indagine e il controllo di processi elettronici di carattere fondamentale a livello atomico e sub-atomico. L'attività di generazione si concentrerà sullo sviluppo di schemi di produzione di impulsi ad attosecondi mediante diverse tecniche di gating temporale (es.: *polarization gating*, *ionization gating* e *two color gating* basato sulla combinazione di impulsi nel vicino infrarosso). L'utilizzo degli impulsi ad attosecondi richiede lo sviluppo di sistemi di misura di particelle cariche basati sull'impiego di strumentazioni (spettrometri per "*velocity map imaging*" e "*reaction microscope*") che consentono di ottenere informazioni sui processi di migrazione di carica in molecole e sui processi di dissociazione molecolare sulla scala temporale degli attosecondi. L'applicazione a molecole di interesse biologico consente di studiare i meccanismi di trasmissione del segnale biologico sulla scala degli attosecondi.

Generazione e manipolazione di impulsi a banda larga dall'IR all'UV

L'attività di ricerca relativa allo sviluppo di sorgenti di radiazione ultrabreve accordabili in un ampio intervallo spettrale dall'infrarosso al visibile ha ottenuto notevoli riconoscimenti a livello internazionale fornendo una serie di potenti strumenti di indagine in campo spettroscopico che ha consentito l'osservazione diretta di dinamiche elettroniche e vibrazionali nella fisica dei materiali finora largamente inesplorate. La programmazione della ricerca in questo settore prevede un'evoluzione verso nuove direzioni quali: (i) la capacità di arrivare al controllo della forma del campo elettrico degli impulsi ultrabrevi (mediante stabilizzazione passiva della fase assoluta) che consentirà lo studio di processi sensibili al campo di eccitazione in sistemi alla nanoscala in fisica dello stato solido; (ii) l'estensione della generazione di impulsi di pochi cicli ottici al vicino UV (mediante tecniche non lineari innovative) in una regione spettrale di estremo interesse per le applicazioni alla spettroscopia elettronica di biomolecole; (iii) la combinazione coerente di sorgenti a larga banda con emissione in regioni spettrali contigue per la sintesi di impulsi al limite teorico di durata (un solo singolo ciclo ottico).

Spettroscopia ultrabreve e applicazioni alla fisica dei materiali

Molti processi fondamentali nella fisica dei materiali avvengono su scale temporali ultrabrevi, la cui evoluzione può essere misurata grazie all'impiego di sorgenti di impulsi di radiazione nel dominio dei femtosecondi e allo sviluppo di tecniche spettroscopiche adeguate. Sono state implementate spettroscopie pump-probe con caratteristiche uniche a livello internazionale in termini di accordabilità (dal visibile all'infrarosso) e risoluzione temporale (10 fs). Gli sviluppi previsti riguardano l'implementazione di nuove metodologie. Si prevede la realizzazione della tecnica di misura denominata "*two-dimensional (2-D) electronic spectroscopy*" nel visibile e nell'UV (basata sull'uso di sequenze di impulsi agganciati in fase) che consente, se applicata a sistemi molecolari complessi, di ottenere informazioni generalizzate sui meccanismi interni di interazione tra cromofori e sui processi di scambio di energia. Si prevede inoltre di accoppiare la spettroscopia ultraveloce alla microscopia confocale ottenendo così contemporaneamente un'alta risoluzione sia spaziale sia temporale. Lo spettro delle tematiche applicative è ampio e comprende: (i) lo studio dei sistemi "light harvesting", sia naturali sia artificiali, per la produzione di energia; (ii) lo studio dei meccanismi primari alla base della visione; (iii) studio dei meccanismi di riparazione nelle biomolecole; (iv) lo studio della dinamica di stati elettronici in sistemi a ridotta dimensionalità a base di carbonio (nanotubi e grafene), polimeri coniugati e semiconduttori inorganici (nanocristalli). Inoltre, in collaborazione con la Linea di Ricerca n.2, si perseguirà lo sviluppo di tecniche di misura Raman coerenti utilizzando impulsi ampiamente accordabili per l'imaging vibrazionale di sistemi complessi.

Dispositivi fotonici: sviluppo di materiali, caratterizzazione e fabbricazione

L'attività di ricerca verte sulla preparazione e caratterizzazione fotofisica di materiali organici e ibridi (organico-inorganico) per la realizzazione di dispositivi-prototipo in optoelettronica e fotonica. Varie tecniche quali "*spin coating*", "*vacuum evaporation*", "*drop-casting*" sono utilizzate per la preparazione di film sottili su substrati utili all'indagine spettroscopica e alla realizzazione di prototipi. L'attività di ricerca prevede lo studio dei meccanismi di base quali generazione e ricombinazione di carica e di eccitoni, trasporto di cariche (mobilità), effetti di interfaccia e il guadagno ottico. I dispositivi-prototipo riguarderanno diverse tipologie, soprattutto celle fotovoltaiche, laser e modulatori ottici. L'uso di tecniche spettroscopiche ad alta risoluzione spaziotemporale consentirà di localizzare e seguire l'evoluzione dei vari processi all'interno del dispositivo e il ruolo determinante delle interfacce (organico-metallico, organico-organico e organico-inorganico).

La linea di ricerca basa la sua programmazione su diverse fonti di finanziamento a livello nazionale e internazionale. In considerazione dell'elevato contenuto di ricerca di base presente, tipologie di progetti quali FIRB e ERC (*Starting* e *Advanced*) rappresentano un importante contributo al finanziamento. Tale strategia è avvalorata dalla storia recente che dimostra l'acquisizione di un progetto FIRB-IDEAS e due progetti ERC-Advanced. Le azioni nell'ambito dei programmi quadro dell'Unione Europea dedicate allo sviluppo di ricerche ad alto grado di innovazione (ad es. progetti

FET “Future Emerging Technologies”) rappresentano ulteriori fonti di finanziamento. Un importante elemento strategico nel perseguimento delle attività è costituito dalle collaborazioni internazionali. I laboratori della linea di ricerca sono parte integrante della Facility Europea “Centre for Ultrafast Science and Biomedical Optics” (CUSBO) che consente di ospitare gruppi di ricerca europei per condurre e favorire attività in collaborazione.

Qui di seguito vengono elencati i laboratori più significativi: (i) Laboratorio laser al terawatt e spettroscopia ultrabreve XUV; (ii) Laboratorio spettroscopia pump-probe IR-VIS; (iii) Laboratorio spettroscopia elettronica 2D; (iv) Laboratorio dispositivi fotonici; (v) Laboratorio spettroscopia Raman coerente (in collaborazione con la Linea di Ricerca n.2).

Linea di Ricerca 2: Laser a Stato Solido e Dispositivi Fotonici Integrati

La linea prosegue una lunga tradizione nel campo dei laser a stato solido iniziata nella seconda metà degli anni '60, che ha avuto ampio riconoscimento a livello nazionale ed internazionale. Attualmente l'attività è focalizzata sullo sviluppo di sorgenti laser innovative a larga sintonizzabilità e su pettini di frequenze ottiche per applicazioni nel campo della spettroscopia molecolare, del monitoraggio ambientale e della metrologia di frequenza. Nel campo dei dispositivi fotonici integrati, un nuovo settore di ricerca che ha avuto una rapidissima crescita nell'ultimo decennio e nel quale il gruppo ha acquisito una *leadership* a livello internazionale, è quello della micro-fabbricazione di dispositivi fotonici ed optofluidici con laser a femtosecondi. Questa tecnologia costituisce una versatile alternativa agli approcci convenzionali, consentendo inoltre lavorazioni tridimensionali che rendono possibili nuove architetture di dispositivi, con applicazioni altamente innovative in campo biomedico e sensoristico. Un ulteriore settore di frontiera della fotonica riguarda la manipolazione di luce classica e quantistica in strutture fotoniche ingegnerizzate alla micro e nano-scala e lo studio di meta-materiali e protocolli innovativi per il controllo di singoli fotoni. In questo ambito, le principali attività riguardano la simulazione classica di fenomeni quantistici nella materia, la propagazione di luce classica e quantistica in guide d'onda accoppiate e la propagazione e localizzazione ottica in mezzi nano strutturati ed in meta-materiali complessi.

Le tematiche di ricerca sopra descritte costituiscono i filoni principali lungo i quali, nel prossimo quadriennio, si svilupperanno le diverse attività della linea, articolandosi come segue:

Laser e amplificatori a stato solido nel vicino e medio infrarosso

La regione spettrale che si estende nel vicino e medio infrarosso tra 1 e 4 micron riveste estremo interesse dal punto di vista spettroscopico per la presenza di forti assorbimenti dovuti alle bande rotovibrazionali ed ai primi sovratoni di numerose specie molecolari. Si colloca in tale contesto lo sviluppo di sorgenti laser a stato solido e amplificatori ottici a larga banda, basati su cristalli innovativi drogati con ioni trivalenti di terre rare (quali, ad es., erbio, tulio e olmio) o ioni di metalli di transizione (titanio e cromo), pompati otticamente con laser a diodi o laser in fibra ottica, e di oscillatori parametrici, per estendere l'intervallo di emissione anche nel medio infrarosso oltre 4 micron. Scopo principale è la realizzazione di sorgenti di luce coerente con elevata purezza spettrale, ampia sintonizzabilità della lunghezza d'onda di emissione e, nel caso di funzionamento in regime impulsato, larga banda di emissione e ridottissima durata temporale (femtosecondi). Tutte queste sorgenti si avvalgono di tecniche innovative per la stabilizzazione attiva della frequenza, della fase e dell'intensità della radiazione emessa. Lo sviluppo di particolari amplificatori multipasso consente di innalzare la potenza generata a livelli superiore al watt, preservando le caratteristiche della radiazione iniettata. L'interesse applicativo di tali sorgenti riguarda la spettroscopia molecolare in cavità ad alta finesse, i sistemi LIDAR, la metrologia di frequenza, la sensoristica di precisione e le telecomunicazioni.

Spettroscopia molecolare mediante pettini di frequenze ottiche

Nell'ultimo decennio i pettini di frequenza ottici hanno rivoluzionato il campo della metrologia di

frequenza, rendendo possibili misure assolute di frequenze ottiche con livelli di accuratezza prima inaccessibili. Dal punto di vista scientifico sono state misurate frequenze di transizioni ottiche di atomi, ioni e molecole con livelli di incertezza inferiori a 10^{-14} , sufficienti per la validazione di modelli descrittivi quanto-meccanici nonché per effettuare test di fisica fondamentale, quali la misura della costante di struttura fine e il rapporto tra massa del protone e massa dell'elettrone. In settori più applicativi giocano un ruolo importante nel campo delle comunicazioni ottiche, nei sistemi GPS di nuova generazione e come strumenti di analisi di miscele di gas in traccia. L'attività di ricerca si sviluppa lungo tre direttrici principali: i) la prima, di carattere tecnologico, è volta alla realizzazione di sintetizzatori di pettini di frequenza nel medio-infrarosso, regione non coperta da sorgenti commerciali e di particolare interesse spettroscopico per via dell'intensità delle righe di assorbimento; ii) una seconda direttrice, nel campo della fisica molecolare, è orientata alla determinazione accurata di parametri spettroscopici di specie molecolari in fase gassosa, da utilizzarsi per la comprensione della loro struttura energetica; iii) una terza direttrice, di taglio più applicativo, ambisce alla realizzazione di spettrometri capaci di rivelare specie molecolari multiple con tempi di acquisizione brevi ed elevata sensibilità, con lo scopo specifico di effettuare un'analisi quantitativa del respiro umano per la diagnosi non invasiva di patologie di vario genere. Inoltre, in collaborazione con la linea di ricerca RL.1, si utilizzano i pettini di frequenza per diversi tipi di spettroscopie vibrazionali coerenti.

Micro-fabbricazione di dispositivi fotonici e opto-fluidici mediante laser a femtosecondi

L'idea di base di questa innovativa tecnologia di fabbricazione è l'assorbimento non lineare della radiazione laser. L'intensità che si raggiunge nel volume focale di un impulso a femtosecondi focalizzato in un dielettrico trasparente è talmente elevata da indurre ionizzazione multi fotonica o per effetto tunnel, seguita da ionizzazione a valanga. Tali fenomeni producono un trasferimento di energia molto localizzato nel volume del materiale che, con un'adeguata movimentazione del campione, consente di realizzare modifiche strutturali, come guide d'onda o canali microfluidici, anche tridimensionali. I principali sviluppi previsti riguardano: (i) la realizzazione di dispositivi optofluidici monolitici per biofotonica, in particolare per la rivelazione integrata di biomolecole in *lab-on-a-chip* e la manipolazione, l'intrappolamento e la deformazione di singole cellule in *chip* optofluidici; (ii) la fabbricazione di dispositivi fotonici con architetture tridimensionali per la propagazione di *qubit* codificati in polarizzazione e la dimostrazione del funzionamento di porte logiche per il *quantum computing*, la biosensoristica quantistica e la simulazione quantistica; tali dispositivi saranno ampiamente utilizzati anche per dimostrazioni sperimentali legate agli studi teorici e modellistici descritti nel paragrafo seguente; (iii) la fabbricazione di micro/nano strutture mediante polimerizzazione a due fotoni; questa innovativa metodologia consentirà la fabbricazione di impalcature 3D per la crescita e la differenziazione di cellule staminali, la realizzazione di filtri porosi per circuiti microfluidici e di *pixel* nano strutturati per *e-paper*.

Luce classica e quantistica in strutture fotoniche complesse e analogie ottico-quantistiche

Nell'ambito della manipolazione di luce classica e quantistica, dello studio di materiali artificiali (meta-materiali) complessi e di protocolli innovativi per il controllo di singoli fotoni, l'attività di ricerca propone una investigazione teorica di fenomeni ottici lineari, non lineari e quantistici in strutture dielettriche e plasmoniche. Le principali tematiche riguardano: (i) lo studio e la progettazione di strutture fotoniche per la simulazione classica di fenomeni quantistici della materia, con particolare interesse per fenomeni non-relativistici e relativistici a singola particella, simulatori di dinamiche a molti corpi e di teorie quantistiche di campo; (ii) la propagazione di luce classica e quantistica in guide d'onda accoppiate, con particolare riferimento ai fenomeni di interferenza classica e quantistica e di trasporto non classico, invisibilità in strutture fotoniche con difetti localizzati, generazione di stati non-classici della luce; (iii) la propagazione e localizzazione ottica in mezzi nanostrutturati e meta-materiali complessi, comprendenti strutture fotoniche con simmetria PT e cristalli complessi, guide d'onda e risonatori metallo-dielettrici (plasmonici) per applicazioni

sensoristiche alla nano-scala, e meta-materiali metallici e nano-strutture plasmoniche non-lineari per applicazioni alla commutazione ottica ultra-veloce.

La programmazione delle attività di ricerca sopra presentate si basa su diverse fonti di finanziamento a livello nazionale e internazionale, in linea con quanto già avvenuto in passato. La ricerca a carattere più fondamentale si avvarrà prevalentemente di strumenti quali progetti FIRB (nazionali) e, potenzialmente, progetti ERC (europei). Le tematiche applicative fanno riferimento a progetti PRIN in ambito nazionale, a progetti della Unione Europea, a progetti dell'Agencia Spaziale Europea (ESA), nonché a vari finanziamenti regionali (Regione Lombardia, progetti Cariplo) ed a contratti con l'industria. Importanti elementi strategici sono rappresentati dalla sinergia con l'IFN (Istituto di Fotonica e Nanotecnologie del CNR), i cui laboratori sono ospitati all'interno del dipartimento, e dalle numerose collaborazioni internazionali.

Qui di seguito sono elencati i laboratori più significativi:

1. *Lab* laser a stato solido e spettroscopia laser ad elevata risoluzione;
2. *Lab* pettini di frequenza (Campus Point, polo di Lecco);
3. *Lab* micro-fabbricazione con impulsi laser ultrabrevi;
4. *Lab* caratterizzazione di dispositivi fotonici e optofluidici;
5. *Lab* polimerizzazione a due fotoni con laser a femtosecondi;
6. *Lab* spettroscopia vibrazionale coerente (in collaborazione con la linea RL.1).

Linea di Ricerca 3: Fotonica per la salute, l'agroalimentare e i beni culturali

L'attività di ricerca si estende a diversi campi di applicazione della spettroscopia laser, con particolare attenzione per le tematiche della diagnostica medica e della biologia molecolare. Le competenze disponibili consentono lo sviluppo di innovativi e versatili strumenti da laboratorio per diagnostica medica e per studi di fisiologia basati principalmente su tecniche di spettroscopia e imaging dei tempi di vita della fluorescenza e di spettroscopia ottica diffusa nel vicino infrarosso. L'attività di ricerca della Linea 3 sostiene dalla sua fondazione la sezione di Biomedical Optics di CUSBO.

Tutte le attività di ricerca condividono l'uso di tecniche di rivelazione ottica con elevata sensibilità e risoluzione temporale. Queste competenze hanno consentito di proporre e sperimentare approcci diagnostici innovativi in settori quali l'oncologia la neurologia e la riabilitazione.

L'esperienza acquisita in ambito biomedico è stata trasferita ad altri settori, quali i Beni Culturali e l'Agroalimentare, dando inizio ad attività che hanno poi acquistato autonomia e carattere originale sia nei metodi che nelle specifiche applicazioni.

Di seguito sono descritti i principali temi di ricerca e le linee di sviluppo previste:

Mammografia ottica: diagnostica e stima dei fattori di rischio

In Europa il tumore della mammella colpisce una donna su dieci. Le tecniche ottiche, intrinsecamente non invasive, potrebbero potenzialmente essere utilizzate per lo screening mammografico e/o per aumentare la specificità diagnostica, riducendo il ricorso a biopsie. L'approccio scelto al Dipartimento di Fisica prevede la valutazione delle proprietà ottiche del tessuto mediante misure di trasmittanza risolta nel tempo in un ampio intervallo spettrale. La ricerca gravita su due laboratori, dedicati ad attività rispettivamente di: i) ricerca di base per la caratterizzazione delle proprietà ottiche del tessuto mammario, che si avvale di strumentazione per spettroscopia, complessa ma versatile, e ii) sperimentazione clinica, indirizzata allo sviluppo di strumenti dedicati, portatili ed ottimizzati per la specifica applicazione. In particolare, è stato progettato e realizzato un mammografo ottico multispettrale, unico a livello internazionale, che consente l'acquisizione di immagini mammografiche e la quantificazione dei principali costituenti del tessuto. Il complesso di queste informazioni è in corso di analisi per valutarne la rilevanza diagnostica per la rivelazione e identificazione di lesioni e per la determinazione della densità del tessuto mammario, che rappresenta uno dei principali fattori di rischio per lo sviluppo di tumori. Gli sviluppi futuri saranno quindi dedicati alla valutazione della densità mammaria ed al miglioramento della diagnosi attraverso

analisi simultanee di riflettanza e ecografiche con la realizzazione di sonde integrate ottiche e ultrasuoni.

Spettroscopia ottica di mezzi diffusivi nel dominio del tempo

Il Dipartimento di Fisica è all'avanguardia nello studio dell'ottica in mezzi diffusivi, con tecniche risolte nel tempo, che consentono di ricavare lo spettro di assorbimento (composizione chimica) e di scattering (struttura microscopica) del materiale indagato, con interessanti applicazioni per la diagnostica medica ed industriale. In quest'ambito è stata sviluppata una strumentazione unica per spettroscopia risolta in tempo nell'intervallo 600-1700 nm, con prestazioni record per quanto concerne estensione spettrale e range dinamico. Sono state ottenute le prime misure spettrali risolte in tempo di assorbitori tissutali (lipidi, collagene, farmaci fotosensibilizzanti), di tessuti biologici in vivo (mammella per la diagnosi dei tumori, calcagno per il monitoraggio dell'osteoporosi), di materiali diffusivi (prodotti ortofrutticoli, legno, polveri sottili ...), aprendo nuovi campi applicativi. Sono stati proposti e realizzati nuovi approcci sperimentali, quali metodi per spettroscopia diffusa a distanza sorgente-rivelatore nulla tramite rivelatori a singolo fotone con gate temporale, che hanno aperto nuove prospettive verso la biopsia ottica da singola fibra, l'imaging diffusivo senza contatto, la tomografia ottica diffusa risolta in tempo. Ulteriori sviluppi saranno finalizzati ad espandere ulteriormente il range spettrale, a implementare nuove sorgenti laser impulsate e ad individuare nuove strategie di rivelazione.

Spettroscopia funzionale nel vicino infrarosso

La spettroscopia funzionale nel vicino infrarosso (fNIRS) è una recente tecnica ottica per il monitoraggio e l'imaging non invasivo dell'emodinamica e del metabolismo ossidativo nel muscolo e nella corteccia cerebrale. La tecnica fNIRS viene impiegata in ricerca di base e applicata in campi quali neuroscienze, medicina dello sport, psicologia e riabilitazione. Il carattere innovativo della ricerca sviluppata in Dipartimento è legato all'uso di strumentazione fNIRS anche approvata per uso clinico operante nel dominio del tempo (pico e nanosecondi) in grado di quantificare e localizzare le variazioni di emodinamica disaccoppiandole dalle variazioni fisiologiche sistemiche. Studi pilota sono stati effettuati su pazienti epilettici e su pazienti emiplegici. Le prospettive di sviluppo di questa attività mirano alla progressiva miniaturizzazione della strumentazione, all'ottimizzazione dei modelli fisici e dei metodi statistici per l'interpretazione dei dati, al confronto e all'integrazione con altre metodiche di imaging, e ad estendere il ventaglio di applicazioni cliniche (es. studio dell'apprendimento del linguaggio nei neonati, studio della fatica neuro-muscolare).

Fotonica per l'Agroalimentare

L'uso di tecniche ottiche (es. spettroscopia vicino infrarosso, NIR) per la valutazione non distruttiva della qualità dei prodotti agroalimentari è un importante filone di ricerca a livello internazionale non solo per le ricadute industriali (es. superamento delle analisi distruttive a campione), ma anche per i benefici sulla salute grazie al consumo di cibi nutrienti e di qualità. L'attività di ricerca del Dipartimento si è focalizzata sulla applicazione di strumentazione NIRS e di tecniche ottiche avanzate in diversi settori della filiera agroalimentare (es. stima della maturazione alla raccolta e evoluzione post raccolta dei parametri di qualità dei frutti. Il carattere innovativo della ricerca è legato alla capacità della tecnica NIRS operante nel dominio del tempo di fornire una caratterizzazione ottica completa in termini del coefficiente di assorbimento, legato ai costituenti (es. clorofilla, acqua, carotenoidi, e zuccheri), e del coefficiente di diffusione, legato alla struttura del campione (es. consistenza, durezza). Le prospettive di sviluppo di questa attività mirano alla progressiva miniaturizzazione della strumentazione adattandola alle esigenze operative sul campo, all'ottimizzazione dei modelli fisici per l'interpretazione dei dati e dei metodi statistici per la loro correlazione con i parametri di qualità classici (i.e. distruttivi), e ad estendere il ventaglio di applicazioni (es. qualità dei prodotti caseari e della carne, precision agriculture).

Molecular Imaging

Il *Molecular Imaging* si propone di visualizzare l'insorgenza e la progressione di patologie in animali modello studiando l'interazione "molecolare" di sonde con il substrato biologico. Presso il Dipartimento di Fisica, il *Molecular Imaging* viene declinato in due attività principali: a) Tomografia ottica di fluorescenza di piccoli animali basati su luce strutturata dove l'utilizzo di "pattern" di eccitazione e di metodi di compressione delle immagini di fluorescenza, permette di ottenere immagini tomografiche in tempi molto ridotti rispetto ai metodi in uso nel contesto internazionale. L'attività di ricerca, ha portato alle prime ricostruzioni di *target* fluorescenti in topi. La metodica è in corso di implementazione per future applicazioni con molecole target specifiche. b) Sviluppo di tecniche di tomografia ottica di proiezione (OPT) che permette la ricostruzione 3D, con risoluzione di poche decine di micron, delle strutture interne di animali modello, quali lo Zebrafish. Mediante OPT, è stata ricostruita la rete dei vasi sanguigni di Zebrafish giovanili. Mediante impulsi laser a femtosecondi (Time-Gated OPT) sono state inoltre ottenute immagini preliminari di Zebrafish adulti riducendo significativamente il contributo aberrante della diffusione della luce. In prospettiva, l'OPT verrà usata per ricostruire il profilo vettoriale della velocità del sangue, mentre la Time-Gated OPT verrà applicata *in-vivo*.

Fotonica e imaging per i beni culturali

La diagnostica non invasiva di manufatti di interesse storico-artistico è una premessa essenziale per un corretto intervento di restauro e di conservazione. Il Dipartimento di Fisica ha una consolidata tradizione nello sviluppo di strumenti innovativi basati sull'impiego di tecnologie laser e di spettroscopia ottica per lo studio del patrimonio artistico. Sono stati sviluppati strumenti per misurare il tempo di vita e lo spettro della fluorescenza indotta da luce UV, sia in punti di analisi discreti che per intere immagini. Le tecniche di spettroscopia per immagine sviluppate presso il Dipartimento costituiscono un riferimento a livello internazionale e sono state impiegate su opere di rilevanza mondiale, tra cui il David di Michelangelo, affreschi rinascimentali (Masolino da Panicale e Filippo Lippi) e opere di Impressionisti. Accanto allo sviluppo di strumentazione innovativa, il Dipartimento studia metodi statistici per la trattazione chemiometrica dei dati raccolti dai diversi strumenti. Il futuro dell'attività di ricerca vedrà l'integrazione di diverse tecniche complementari (ad esempio fluorescenza ultravioletta e spettroscopia vibrazionale) sia dal punto di vista strumentale, che dal punto di vista dell'analisi dei dati. E' inoltre in programma una estensione delle capacità di analisi spettrale verso la banda infrarossa dello spettro e.m.

Il finanziamento di questa linea si basa in modo significativo su progetti europei quali ad esempio il progetto nEUROPt (di cui il Dipartimento è stato coordinatore internazionale) per l'imaging funzionale del cervello e progetti INSIDEFOOD e MOSAIC per l'agroalimentare. Sono inoltre attivi progetti nazionali (PRIN, progetti regionali etc.) e progetti industriali anche nell'ambito di convenzioni quadro stipulate dall'Ateneo. Si intende proseguire con l'impegno di acquisire queste fonti di finanziamento, valorizzando gli aspetti interdisciplinari della attività.

Di seguito sono elencati i principali laboratori:

1)Fast Fluorescence Molecular Tomography (fastFMT), 2) Mammografia Ottica (Mammot), 3) Rivelazione di Fotoni in Finestre Temporali Ultra-veloci (GAP), 4) Sistemi Modello di Mezzi Diffondenti (Phantom), 5) Spettroscopia di Fluorescenza (Fluo), 6) Spettroscopia funzionale nel vicino Infrarosso (fNIRS), 7) Spettroscopia nel vicino Infrarosso per l'Agroalimentare (NIRf), 8) Spettroscopia Ottica in Mezzi Diffondenti (DOS), 9) Spettroscopia per Immagini per i Beni Culturali (ArtIS), 10) Tomografia a proiezioni ottiche (OPT).

Linea di Ricerca 4: Crescita epitassiale e fabbricazione di nanostrutture

L'attività di ricerca è incentrata sulla crescita epitassiale di campioni nano strutturati lungo la direzione di crescita (eterostrutture, film sottili e multistrati di spessore nanometrico e subnanometrico), e la loro caratterizzazione mediante diverse tecniche spettroscopiche e

microscopiche. Particolare attenzione viene dedicata alla progettazione, costruzione e utilizzo di strumentazione innovativa. Vengono studiati materiali magnetici, semiconduttori e ossidi, confinati spazialmente su scala nanometrica, per applicazioni nano tecnologiche in elettronica, fotonica e spintronica. La sintesi di questi nuovi materiali artificiali nanostrutturati è ottenuta mediante deposizione in vuoto su substrati monocristallini: il punto di forza della linea di ricerca è senza dubbio la disponibilità di molteplici tecniche complementari per tal fine. Infatti, oltre a processi di crescita "tradizionali", come la MSE (Magnetron Sputtering Epitaxy), si utilizzano tecniche più sofisticate, quali la deposizione assistita da laser impulsato (PLD, Pulsed Laser Deposition), l'epitassia da fasci molecolari (MBE, Molecular Beam Epitaxy) e la deposizione da fase vapore assistita da plasma a bassa energia (LEPECVD, Low Energy Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition). Quest'ultima tecnica in particolare, sviluppata dai ricercatori del gruppo di ricerca, offre le maggiori potenzialità applicative nel campo della micro- e opto- elettronica a semiconduttore. Le attività di crescita sono supportate da una serie di tecniche di caratterizzazione strutturale *ex-situ* quali la diffrazione di raggi X (XRD), la microscopia ottica ed elettronica (SEM), la microscopia a forza atomica e a forza magnetica (AFM, MFM), la spettroscopia di massa (SIMS). I campioni nanostrutturati sono caratterizzati ed analizzati *in-situ* con molteplici diagnostiche quali: diffrazione di elettroni a bassa e alta energia (LEED e RHEED), spettroscopia Auger, fotoemissione eccitata da raggi X e ultravioletti (XPS, UPS), diffrazione di fotoelettroni (XPD), microscopia a scansione a effetto tunnel (STM). Le proprietà elettroniche e magnetiche vengono analizzate sempre *in-situ* mediante spettroscopie elettroniche, anche con risoluzione in spin, e tecniche basate sull'effetto Kerr magnetoottico (MOKE). Nel seguito vengono brevemente presentati alcuni tra progetti di ricerca attualmente attivi.

Magnetismo e proprietà di spin in superfici, interfacce e film sottili.

La ricerca è volta alla comprensione delle proprietà fisiche connesse con il magnetismo e la struttura di spin in sistemi cristallini ad alta qualità morfologica e con bassa dimensionalità. In particolare, in strutture magnetiche a film sottile, multistrati, monostrati, nanofili o nanoparticelle, le configurazioni elettroniche e di spin sono spesso profondamente modificate da effetti di rottura della simmetria, ridotta coordinazione, formazione di legami chimici e, in generale, di dimensionalità finita. Questo può indurre l'insorgere di fenomeni non osservati negli stessi materiali in forma volumetrica, con notevoli potenzialità applicative. Inoltre, tali proprietà possono essere fortemente influenzate dalle caratteristiche delle interfacce formate tra i materiali magnetici e diversi substrati, sia metallici che semiconduttori o isolanti. I sistemi investigati vengono cresciuti in ultraalto vuoto mediante MBE e analizzati *in-situ* con molteplici tecniche, tra cui le più importanti sono le spettroscopie con elettroni polarizzati in spin (il nostro è forse l'unico laboratori al mondo in cui tali studi possono essere fatti sia per livelli elettronici occupati che non occupati) e la microscopia STM, in grado di fornire immagini con risoluzione sub-atomica, permettendo una visione diretta della morfologia e della disposizione degli atomi sulla superficie. Si tratta di studi di carattere fondamentale, ma, come accennato sopra, anche con notevoli ricadute tecnologiche nel campo della miniaturizzazione dei dispositivi e dell'immagazzinamento dati. Un interessante esempio è costituito da film sottili e multistrati Fe/Cr che trovano applicazione nei dispositivi a magnetoresistenza gigante. Tra i risultati più rilevanti citiamo lo studio dell'accoppiamento all'interfaccia tra materiali ferro- e antiferro-magnetici, di interesse per comprendere i fenomeni di exchange-bias alla base di molti dispositivi di lettura e immagazzinamento dati su supporto magnetico attualmente in uso.

Processi litografici e fabbricazione di dispositivi.

Si tratta di una attività con spiccata vocazione applicativa che punta alla realizzazione di prototipi di dispositivi innovativi. A tal fine la linea dispone di una "clean room" classe 1000 per processi in ambiente pulito. A partire dalle varie eterostrutture sintetizzate, si realizzano dispositivi mediante definizione laterale delle nano strutture, il che si ottiene tramite tecniche litografiche (sia con luce che con fasci elettronici), unitamente a tecniche di attacco chimico-fisico (**RIE**, Reactive Ion Etching, **IBE**, Ion Beam Etching). In particolare la litografia da fascio elettronico (**EBL**, Electron Beam Lithography), grazie alla piccola lunghezza d'onda degli elettroni, permette di definire strutture della

dimensione di 10 nm. La tecnica EBL viene utilizzata, congiuntamente alla tecnica RIE, sia per la fabbricazione di dispositivi nanometrici (strutture di tipo split-gate su quantum well), sia per la preparazione dei substrati prima della crescita epitassiale in modo da creare dei siti preferenziali per la nucleazione di quantum dot. Misure di trasporto in un criostato all'elio con magneti superconduttore permettono lo studio delle caratteristiche elettriche e di magneto-trasporto dei dispositivi modello realizzati.

Dispositivi nanostrutturati a semiconduttore.

L'attività di ricerca è principalmente focalizzata alla deposizione (mediante LEPECVD) e caratterizzazione di eterostrutture e nanostrutture di silicio-germanio e di silicio nanocristallino su substrati di silicio. Lo scopo è fabbricare dispositivi innovativi, quali ad esempio transistor ad alta velocità basati sulla tecnologia strained silicon, già realizzati e funzionanti. Recentemente, inoltre, la LEPECVD ha dimostrato la propria superiorità rispetto alle altre tecniche di deposizione per quanto riguarda la mobilità di lacune in eterostrutture con strained germanium (record mondiale ottenuto dai ricercatori del gruppo). Ulteriori utilizzi prevedono la realizzazione di dispositivi optoelettronici basati sul silicio-germanio (SiGe) come fotorivelatori e guide d'onda, nonché di celle fotovoltaiche e sensori a base silicio nano cristallino. Attualmente sono in funzione due reattori LEPECVD, il primo in grado di processare substrati da 3 e 4 pollici il secondo substrati da 6 e 8 pollici. Accanto all'uso di materiali tradizionali come i semiconduttori Si e Ge (seppure con proprietà molto peculiari derivanti dalla nano strutturazione), si utilizzano anche materiali del tutto nuovi, come il grafene (sistema bidimensionale composto da un singolo strato di atomi di carbonio, la scoperta del quale ha fruttato il premio Nobel per la Fisica nel 2010). Anche in questo campo sono stati già ottenuti risultati di grande rilievo con la realizzazione di nano dispositivi elettronici (inverter e porte logiche) basati sul grafene.

Elettronica di spin e applicazioni nano-biomedicali.

L'elettronica di spin, o spintronica, è un campo in costante e rapida crescita, che combina elementi magnetici nanostrutturati con la più convenzionale elettronica a semiconduttore. L'aggiunta dello spin dell'elettrone come nuovo grado di libertà, insieme alla carica elettrica, permette infatti di realizzare dispositivi con migliori prestazioni o anche del tutto innovativi. Obiettivo di questa attività è la fabbricazione, tramite tecniche litografiche (EBL inclusa) e bombardamento ionico, di dispositivi spintronici di nuova generazione, basati su materiali nanostrutturati, per applicazioni in elettronica di spin e nano-medicina. I sistemi investigati includono ossidi (ferro-ferrimagnetici, half-metals, antiferromagnetici), metalli 3d e semiconduttori. Come esempio, è stato recentemente realizzato un fotodiodo di spin, oggetto di domanda di brevetto, che sfrutta l'accoppiamento tra lo spin degli elettroni e la polarizzazione della luce incidente per convertire la polarizzazione circolare della luce in un segnale elettrico. Sono inoltre in corso studi su dispositivi con controllo elettrico della magnetizzazione, con risultati preliminari di grande interesse. Nano-dispositivi spintronici vengono utilizzati anche per applicazioni biologiche e nella nano-medicina. In particolare, si effettuano esperimenti di riconoscimento molecolare con sensibilità alla singola molecola, manipolazione cellulare ecc., utilizzando come vettori nanoparticelle magnetiche con superfici funzionalizzate, trasportate per mezzo del moto di pareti di dominio magnetico in nanostrutture (tecnica sviluppata e brevettata dal gruppo di ricerca), e rivelate per mezzo di sensori magnetici basati sulla magnetoresistenza anisotropa e a effetto tunnel. Ci si avvale di misure magneto-elettriche e microscopiche per caratterizzare dispositivi integrati con celle microfluidiche e chimicamente funzionalizzati con molecole e/o cellule.

La linea ha propri laboratori sia presso il campus di Milano Leonardo che presso il Polo di Como, i principali sono qui elencati: laboratorio VESI (Versatile Electron Spectroscopy Instrumentation, Milano), laboratorio SiGe (Silicon-Germanium, Como), laboratorio EBL (Electron Beam Lithography, Como), laboratorio STM (Scanning Tunneling Microscopy, Milano), laboratorio NANOBIO (Como), laboratorio LASSE (Layered Artificial Structures for Spin Electronics, Como).

La linea di ricerca, le cui attività sono tutte inserite all'interno del Centro Interuniversitario (Politecnico di Milano-Università di Milano Bicocca) [LNESS](#) (Laboratorio di Nanostrutture Epitassiale su Silicio e per Spintronica), è particolarmente interessata al trasferimento tecnologico, che costituisce proprio una delle finalità del centro LNESS. Tale interesse si esplica in numerosi contratti e collaborazioni, anche all'interno di progetti di ricerca tecnologica presentati alle varie agenzie di finanziamento (nazionali o internazionali) che coinvolgono aziende operanti sul territorio lombardo ma anche a livello internazionale.

Tutte le attività di ricerca sono inserite in prestigiose collaborazioni sia a livello nazionale che internazionale.

Linea di Ricerca 5: Proprietà elettroniche, ottiche e magnetiche di sistemi a bassa dimensionalità

L'attività di ricerca punta allo studio delle proprietà fondamentali di sistemi a bassa dimensionalità tramite svariate tecniche spettroscopiche e microscopiche, nonché allo sviluppo di nuovi metodi sperimentali in tale campo. In particolare essi includono tecniche di spettroscopia basate su raggi ultravioletti e X (inclusa la radiazione di sincrotrone) e su fasci di elettroni e di positroni, tecniche di microscopia elettronica e ottica a campo vicino (sotto il limite di diffrazione) e tecniche di magnetometria ottica (avvalendosi anche di laser a impulsi ultrabrevi). È anche presente un'attività di progettazione, costruzione e utilizzo di strumentazione avanzata da installare presso le grandi *facilities* internazionali.

All'interno di questa linea vengono effettuati studi di carattere fondamentale sulle proprietà ottiche, elettroniche e magnetiche di diversi materiali a bassa dimensionalità di alto interesse scientifico, quali ossidi magnetici, semiconduttori, metalli e superconduttori. Molteplici sono comunque anche le ricadute tecnologico-applicative, soprattutto nel campo dei dispositivi per spintronica, delle proprietà meccaniche e dei difetti in leghe metalliche, della fotonica basata su nanostrutture a semiconduttore, dei sistemi nanostrutturati per *food packaging*, del fotovoltaico con celle solari di nuova concezione basate su semiconduttori organici.

Oltre che nei locali del Dipartimento (Campus Milano-Leonardo e presso il Polo di Como) la linea ha anche proprie apparecchiature installate e utilizzate in laboratori presso i sincrotroni. I principali laboratori siti presso il Dipartimento sono elencati qui di seguito:

- Magneto Optical Kerr Effect (MOKE); - Ultrafast Photoemission and Optical Spectroscopy (UPhOS); Scanning Auger Microscopy (SAM); - Scanning Near-field Optical Microscopy (SNOM); - Variable energy positron annihilation spectroscopy (VEPAS).

Per finanziare le proprie attività di ricerca la linea accede con propri progetti ai programmi delle varie agenzie di finanziamento sia nazionali (pubbliche, come i progetti PRIN e FIRB del Ministero e quelli della Regione Lombardia, o private come per esempio quelli della Fondazione Cariplo) che internazionali (soprattutto europei, progetti grandi apparecchiature). In questo contesto sono anche importanti, seppure di minore entità, i contratti aziendali, attualmente soprattutto nel campo della caratterizzazione materiali e nel *food-packaging*.

Infine, per la grande versatilità delle tecniche disponibili, la linea è inquadrata in una fitta rete di collaborazioni nell'ambito di attività di ricerca sia all'interno del Dipartimento che presso altre istituzioni nazionali e internazionali.

Le principali attività di ricerca sono le seguenti:

Fisica statistica dei sistemi magnetici

L'attività è dedicata allo studio di fenomeni magnetici, principalmente mediante tecniche magnetoottiche con le quali lo stato di magnetizzazione di un materiale viene rivelato facendovi incidere un fascio laser e misurando la variazione di polarizzazione di quest'ultimo. Con questa

tecnica sono state misurate le caratteristiche magnetiche di film sottili, microcristalli, materiali compositi, campioni di dimensioni molto ridotte. Oltre alla misura delle proprietà magnetiche in se stesse, i materiali magnetici vengono studiati anche come sistemi campione di fisica statistica, ottenendo importanti risultati nel campo dei fenomeni statistici con distribuzione a legge di potenza. Per questa attività la linea dispone di un banco magnetoottico, un criostato all'elio a circuito chiuso (fino a temperature di 10 K), un elettromagnete per campi elevati, strumenti per l'acquisizione dati ad elevata sensibilità (*lock-in*, amplificatori a basso rumore, analizzatore di spettro), oltre alla consueta strumentazione scientifica (oscilloscopi, generatori di funzione, alimentatori).

Dinamiche elettroniche e di spin sulla scala dei femtosecondi

L'attività è dedicata allo studio dei fenomeni ultraveloci che si manifestano in solidi perturbati da un impulso intenso di radiazione luminosa. La sorgente di fotoni utilizzata è un laser che genera impulsi ultrabrevi. Gli esperimenti vengono svolti in modalità detta di *pump-probe*, dove il *pump* è l'impulso intenso che eccita il materiale e il *probe* rivela a ritardi successivi lo stato del campione, e quindi la dinamica dei processi ultrarapidi che coinvolgono i gradi di libertà elettronici, magnetici e reticolari. Tramite questa tecnica è stato possibile studiare la dinamica di inversione della magnetizzazione di materiali ferromagnetici: a seguito dell'impulso di *pump* l'anisotropia magnetica viene fortemente ridotta permettendo così la modifica della direzione di magnetizzazione del materiale sulla scala di tempi delle decine di picosecondi. Il comportamento dinamico osservato sperimentalmente viene modellizzato mediante una descrizione di tipo fondamentale, fornendo una comprensione microscopica del fenomeno che permette di seguire il moto collettivo dello spin degli elettroni. Le dinamiche temporali mostrate aprono orizzonti di tipo applicativo nel campo della scrittura di supporti magnetici.

Cinetica e diffusione atomica in nanostrutture a base germanio-silicio

L'attività riguarda lo studio della diffusione superficiale e crescita di nanostrutture di Silicio-Germanio integrate su substrati di Silicio. La microscopia Auger a scansione e la microscopia a forza atomica permettono di determinare le costanti di diffusione superficiale su scala nanoscopica e la loro variazione in funzione della temperatura e della presenza di un film sottile di Carbonio agente da *surfattante*. In contemporanea è possibile caratterizzare il processo di nucleazione e crescita di isole auto-organizzate di SiGe e sua transizione continua tra due diverse modalità di crescita. Inoltre è stato quantificato per la prima volta lo stato di *stress* delle nanostrutture tramite diffrazione di raggi X in collaborazione con il sincrotrone ESRF, Grenoble e CEA, Saclay, Francia. È inoltre in fase di sviluppo un nuovo microscopio (in collaborazione con IIT@PoliMi) mirato all'unione della risoluzione nanometrica tipica della microscopia elettronica con la risoluzione temporale disponibile tramite gli attuali laser impulsati. La tecnica fornirà informazioni nuove e complementari alla microscopia ottica ultraveloce con applicazioni all'elettronica organica e inorganica ultraveloce, alla dinamica dei processi molecolari e chimici di interfaccia e in generale agli *smart materials*.

Plasmonica e Nano-Ottica

Per queste attività si dispone di tecniche microscopiche e spettroscopiche comprendenti microscopia ottica confocale, microscopia a scansione a forza atomica e a forza magnetica, e microscopia ottica a scansione a campo prossimo. L'attività è particolarmente incentrata sulle proprietà ottiche di nanostrutture metalliche e sullo sviluppo di tecniche ad elevata risoluzione spaziale per l'analisi di film sottili e sistemi molecolari. Strutture costituite da polimeri e particelle plasmoniche costituiscono una frontiera in applicazioni per il fotovoltaico, la sensoristica medica e biologica, lo sviluppo di fotorivelatori ed emettitori di luce. In tale ambito, le nanoparticelle plasmoniche rappresentano a tutti gli effetti delle antenne per la radiazione visibile, capaci di confinare ed irraggiare efficacemente la luce in analogia con le comuni antenne per radiofrequenze e microonde. Le tecniche microscopiche disponibili vengono anche applicate ad analisi mediante luce polarizzata, permettendo lo studio con alta risoluzione dell'ordine magnetico o molecolare in film sottili e

nanostrutture ordinate, con applicazioni allo studio di film molecolari e alla scrittura di bit in sistemi innovativi per la memorizzazione di dati digitali.

Radiazione di Sincrotrone

Per questa attività si utilizzano sorgenti di radiazione elettromagnetica di altissima qualità disponibile presso i vari laboratori europei (soprattutto ESRF-Grenoble, ELETTRA-Trieste, SLS-Villigen, Soleil-Parigi, Diamond-Oxford) per la ricerca nei campi della spettroscopia, della diffrazione e dello *scattering* risonante e magnetico. Negli ultimi 20 anni il gruppo ha contribuito alla realizzazione di strumentazione per *Resonant Inelastic X-ray Scattering* (RIXS) ad altissima risoluzione di assoluta preminenza a livello mondiale: AXES presso ID08 di ESRF, interamente realizzato al Politecnico e di proprietà del CNR; SAXES, presso ADDRESS di SLS, progettato e costruito al Politecnico e di proprietà del Paul Scherrer Institut in Svizzera, e in futuro ERIXS, in fase di progettazione in collaborazione con ESRF, e hRIXS, che verrà costruito per il laser a elettroni liberi nei raggi X (XFEL, *X-ray Free Electron Laser*) di Amburgo nell'ambito di un consorzio europeo. Oltre allo sviluppo della strumentazione il gruppo del Dipartimento conduce un'attività di uso avanzato del RIXS ad alta risoluzione per lo studio di materiali innovativi quali i superconduttori ad alta temperatura, le manganiti ed altri ossidi di metalli di transizione *3d*, con risultati di grande rilievo a livello internazionale.

Studio della difettosità in materiali avanzati

Per questa attività ci si avvale di un fascio di positroni (le antiparticelle degli elettroni) per lo studio delle proprietà dei materiali avanzati. I positroni sono molto adatti allo studio dei difetti reticolari e della porosità in funzione della loro profondità di penetrazione nei solidi. I materiali studiati sono: celle solari di terza generazione, film sottili e interfacce di materiali magnetici per la spintronica (controllo elettrico della magnetizzazione), semiconduttori (p. es. SiGe, GaN, *quantum wells* GaAs/AlGaAs), materiali porosi e polimeri. Risultati importanti vengono ottenuti anche nel campo delle leghe leggere avanzate (base di Mg e Al) per applicazioni aerospaziali. L'attività include inoltre la partecipazione al progetto AEgIS (*Antimatter Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy*) al CERN di Ginevra, dove si propone per prima volta lo studio delle proprietà gravitazionali dell'antimateria confinata a bassa energia.

Strutture dipartimentali, Attività presso Grandi Infrastrutture Internazionali e Collaborazioni con Enti e Istituti di Ricerca Nazionali

Il Dipartimento ha sviluppato e sostenuto diverse iniziative che hanno favorito e stimolato: (i) la realizzazione di strutture dipartimentali che aggregano alcune delle attività delle linee di ricerca su tematiche di ampio respiro; (ii) la partecipazione alle grandi infrastrutture di ricerca internazionali in termini di sviluppo di strumentazione e tematiche di ricerca; (iii) la collaborazione con enti e istituti di ricerca nazionali mediante convenzioni. Tali iniziative con i relativi sviluppi vengono qui di seguito brevemente descritte.

Strutture dipartimentali

Le strutture dipartimentali che attualmente aggregano alcune delle attività delle linee di ricerca sono *LNESS* (Laboratory for Nanometric Epitaxial structures on Silicon and for Spintronics), che opera nel settore delle Nanoscienze, e *CUSBO* (Centre for Ultrafast Science e Biomedical Optics) che opera nel settore della Fotonica.

LNESS è un centro di ricerca interuniversitario costituito dal Dipartimento di Fisica del Politecnico e dal Dipartimento di Scienza dei Materiali dell'Università degli Studi di Milano Bicocca istituito ufficialmente nel 2002 (ma attivo già dal 1999). Il cuore del Centro è costituito da una serie di

laboratori sperimentali del Dipartimento di Fisica situati presso il Polo di Como. Il Centro dispone di diversi sistemi di deposizione sotto vuoto (Molecular Beam Epitaxy, Pulsed Laser Deposition, Plasma Etched Chemical Vapour Deposition, Magnetron Sputtering Epitaxy), di una camera pulita e di sistemi per la litografia, occupando un'area di 1300 m² (di cui 900 m² per laboratori). La missione del Centro consiste nel: (i) promuovere e coordinare la ricerca sulla crescita, caratterizzazione e applicazione industriale di materiali epitassiali e strutture nanometriche, con particolare attenzione alla compatibilità con la tecnologia del silicio e al settore della spintronica; (ii) sviluppare attività di ricerca nel campo dei materiali e dispositivi per nanoelettronica, optoelettronica, sensoristica, conversione fotovoltaica dell'energia e per spintronica; (iii) favorire l'interscambio di ricercatori del settore all'interno di collaborazioni con altri istituti, dipartimenti universitari e centri di ricerca nazionali e internazionali; (iv) promuovere il trasferimento tecnologico verso piccole e medie imprese attraverso progetti congiunti con elevato potenziale innovativo in ambito regionale (LNESS è parte del Centro di Eccellenza e Trasferimento Tecnologico istituito dalla Regione Lombardia presso il Polo di Como).

CUSBO nasce da una lunga tradizione nel campo della generazione di impulsi ultrabrevi, dello sviluppo di sorgenti laser innovative e dell'ottica biomedica, grazie alla quale il Dipartimento di Fisica ha prodotto strumentazione e conoscenze sotto certi aspetti uniche. CUSBO raggruppa i laboratori di ricerca nel settore della Fotonica e si presenta verso l'esterno come una facility aperta agli utilizzatori sia nazionali che internazionali per poter effettuare esperimenti in diversi ambiti quali: ottica non-lineare, interazioni radiazione-materia ad alta intensità, processi ultrabrevi nella materia, caratterizzazione ottica non invasiva di sistemi biologici (anche *in vivo*) e spettroscopie di fluorescenza a larga banda. CUSBO nel 2002 è stata riconosciuta come "Large Scale Infrastructure" dall'Unione Europea. CUSBO ha fornito finora accesso a oltre una sessantina di gruppi di ricerca provenienti da diverse nazioni europee. A partire dal sesto programma quadro CUSBO fa parte di una "Integrated Initiative Infrastructure" (I3) denominata "LASERLAB-Europe", un consorzio che attualmente conta 28 grandi infrastrutture laser distribuite su 19 nazioni europee. La missione di LASERLAB consiste nel: (i) rafforzare il ruolo preminente dell'Europa nella ricerca in campo laser favorendo nuove applicazioni attraverso progetti di ricerca congiunti; (ii) gestire in modo coordinato l'accesso dei ricercatori europei alle infrastrutture garantendo la qualità scientifica dei progetti e la competitività; (iii) aumentare la dimensione europea della ricerca e favorire lo sviluppo delle singole infrastrutture. In un'ottica di sviluppo LASERLAB potrebbe evolvere verso un consorzio europeo con un suo status legale (ERIC) che consentirebbe di poter accedere a diverse fonti di finanziamento.

Attività presso le Facility internazionali di Radiazione di Sincrotrone

Da circa 20 anni il Dipartimento conduce un'importante attività di ricerca basata sulla radiazione X generata dai sincrotroni e, in futuro, dai laser a elettroni liberi (free electron laser, FEL) presso e in collaborazione con alcune importanti infrastrutture europee, quali: European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) a Grenoble, Swiss Light Source (SLS) presso il Paul Scherrer Institut in Svizzera e l'European X-Ray Free-Electron Laser Facility (XFEL) ad Amburgo. Il campo è quello della spettroscopia di raggi X per lo studio della struttura elettronica e magnetica dei solidi a forte correlazione elettronica. Presso il Dipartimento sono stati realizzati speciali spettrometri per la radiazione X poi installati presso le sorgenti di sincrotrone ESRF e SLS. Sono strumenti leader assoluti a livello mondiale nel campo della tecnica RIXS (resonant inelastic x-ray scattering), utilizzati da decine di gruppi di ricerca presso i sincrotroni. Accanto allo sviluppo di strumentazione il Dipartimento conduce presso i sincrotroni un'attività di uso del RIXS ad alta risoluzione per lo studio di materiali innovativi. Il Dipartimento è ufficialmente coinvolto nei nuovi progetti RIXS presso ESRF e XFEL, quest'ultimo nel quadro di un consorzio europeo.

Collaborazioni con Enti e Istituti di Ricerca Nazionali

Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

Esiste una collaborazione di lunga tradizione tra il Dipartimento e il CNR che ha portato ad una integrazione del personale e dei laboratori CNR con il personale (attraverso il meccanismo dell'associazione) e le strutture dipartimentali. Il Dipartimento ospita la sede dell'Istituto di Fotonica e Nanotecnologie (IFN) del CNR. L'IFN conta quattro unità organizzative di supporto a Bari, Padova, Roma e Trento. Il personale della sede consta di una quindicina di ricercatori a cui si affianca personale a tempo determinato. L'IFN svolge ricerche innovative nel campo della fotonica e delle nanotecnologie, considerando sia gli aspetti più fondamentali legati all'interazione radiazione-materia sia quelli più applicativi collegati allo sviluppo di nuove tecnologie per la realizzazione di sistemi e dispositivi fotonici, optoelettronici ed elettronici avanzati. Tali ricerche hanno significative ricadute in svariati settori portanti quali, ad esempio, le scienze dei materiali, la medicina, la biologia, il monitoraggio ambientale, le telecomunicazioni a larga banda e i beni culturali. Le tematiche sviluppate nell'ambito dell'IFN ben si inquadrano nelle linee di ricerca del Dipartimento e la sinergia che ne deriva rappresenta un elemento importante di sviluppo futuro.

Istituto Italiano di Tecnologia (IIT)

L'IIT, in un'ottica di decentramento delle proprie attività e di collaborazione con le Università, ha recentemente istituito presso il Politecnico di Milano il "*Center for Nano Science and Technology@PoliMi*" la cui attività si inquadra nelle piattaforme "*Energia*" e "*Materiali intelligenti*". In particolare il Centro opera nella scienza e tecnologia dei nanomateriali per optoelettronica focalizzando l'attività nella conversione fotovoltaica, la foto-rivelazione e i sistemi biomimetici. Nell'ambito della convenzione IIT-Politecnico, il Centro collabora con il Dipartimento su diverse tematiche quali la spettroscopia ultraveloce, le micro-lavorazioni laser, la spettroscopia di fotoemissione e altre caratterizzazioni ottiche su nanostrutture organiche ed inorganiche. Inoltre le strutture specifiche per la realizzazione di dispositivi organici e materiali presenti nel Centro sono complementari a quelle di caratterizzazione del Dipartimento e offrono un'opportunità per affrontare progetti di ricerca di ampio respiro condivisi dalle due strutture.

Didattica

Il progetto del Dipartimento di Fisica per quanto riguarda la didattica si articola in molteplici attività, interne ed esterne, in ambito nazionale ed internazionale, a diversi livelli del percorso formativo.

Corsi di Fisica di base:

Il Dipartimento di Fisica fornisce corsi di Fisica di base (Meccanica, Termodinamica, Elettromagnetismo e Ottica) a tutti i corsi di Laurea in Ingegneria nell'ambito della Laurea di Primo Livello. L'offerta didattica serve circa 9500 studenti per un totale di 600 CFU erogati in 74 corsi.

Corso di Laurea in Ingegneria Fisica (Laurea di Primo Livello e Laurea Magistrale):

Il corso di studio in Ingegneria Fisica, istituito dal 2001, si è posto fin dall'inizio l'obiettivo di formare laureati in possesso di una solida cultura ingegneristica di base, con una approfondita preparazione in aree applicative della Fisica moderna. La trasformazione delle conoscenze scientifiche in nuova tecnologia e il trasferimento dell'innovazione nel sistema produttivo ormai rappresentano per molte aziende un passo obbligato, dettato anche da un mercato sempre più globale. Per rispondere a quest'esigenza il corso di laurea unisce un'ampia preparazione culturale di base ad una formazione avanzata in settori di punta di fisica della materia, ottica, laser, tecnologie e strumentazioni fisiche, con particolare attenzione alle tematiche di maggiore interesse per l'industria e la ricerca. Fra i settori oggetto di approfondimento e continuo aggiornamento rivestono un ruolo essenziale fotonica, nanotecnologie e materiali avanzati, che fanno parte delle *key enabling technologies* riconosciute dalla Commissione Europea come essenziali per rispondere alle grandi sfide della società

futura e dello sviluppo sostenibile. Il corso di studi si propone di preparare lo studente verso una figura professionale di “tecnico dell’innovazione” in grado di gestire e progettare prodotti e processi ad elevato contenuto tecnologico ed innovativo in svariati settori industriali. La presenza nei vari insegnamenti di laboratori sperimentali consente inoltre di porre lo studente di fronte a problematiche concrete durante tutto il percorso formativo.

Corso di Dottorato in Fisica:

Il Dipartimento è sede del Corso di Dottorato in Fisica, facente capo alla Scuola di Dottorato del Politecnico, che si propone di attirare studenti brillanti con un buon background scientifico e chiaro interesse verso lo sviluppo e le applicazioni di nuove idee e tecnologie. Il corso è caratterizzato da un forte carattere sperimentale, con lo scopo principale di sviluppare un approccio sperimentale in tecniche di *problem solving* e il raggiungimento di un livello elevato di qualificazione professionale. I contenuti del programma di dottorato sono strettamente correlati alle attività di ricerca svolte nei laboratori del Dipartimento di Fisica. Oltre alla ricerca sperimentale, uno sforzo costante è dedicato alla progettazione e allo sviluppo di nuova strumentazione. Le attività di ricerca vengono effettuati in collaborazione con diverse istituzioni internazionali di prestigio (per es. ETH-Zürich, EPL-Lausanne, Lund Institute of Technology, University of Paris-sud, Ecole Polytechnique-Paris, University of Barcelona, University of Berkeley, Technical University of Wien, University of Bordeaux, MIT-Cambridge, ESRF-Grenoble, STU- Copenhagen...) e in effetti gran parte degli studenti di dottorato passa un periodo (in genere 6 mesi) all’estero presso tali laboratori.

Il corso è attivo dal 1° ciclo, con un numero medio di circa 5 borse Ministeriali per anno, cui vanno aggiunte altre borse attivate su temi di ricerca specifici (anche in convenzione con altri enti di ricerca e aziende) il cui numero è negli ultimi tempi è cresciuto fino a superare la decina di borse per anno. E’ parallelamente cresciuta anche l’attrattività del dottorato per studenti provenienti dall’estero: dei circa 50 studenti di dottorato attualmente attivi sui tre anni di corso oltre un quarto sono stranieri.

Attività di outreach:

Il Dipartimento svolge attività di *outreach* nell’ambito dei programmi di Ateneo (Open Day, Summer School e HighTech). In tale ambito, oltre a presentazioni in aula, il Dipartimento organizza visite ai laboratori di ricerca e attività dimostrative di laboratorio, per meglio sottolineare la sua vocazione fortemente sperimentale.

Inoltre ogni anno viene svolto un ciclo di seminari, rivolti a alunni e docenti della scuola secondaria, su temi di grande attualità che riguardano la ricerca avanzata nei settori di riferimento del Dipartimento (fisica della materia, fotonica, nanotecnologie e fisica delle superfici) e le sue ricadute applicative. Il ciclo, dal titolo “Le grandi sfide della Fisica nel mondo dell’Ingegneria” è articolato su un totale di 6-7 seminari per anno scolastico, tenuti al pomeriggio presso il Politecnico, ed ha suscitato nelle passate edizioni un ottimo interesse con più di 400 presenze per anno tra studenti e docenti. Anche in questo caso, i seminari vengono completati da una visita ai laboratori di ricerca.

Il Dipartimento intende proseguire tali attività, ampliandole nelle modalità e rinnovandole nei contenuti.

Attività internazionali:

Il Dipartimento si è fatto promotore della partecipazione del Politecnico alla rete internazionale ECOP (European Centres for Outreach in Photonics) di cui è fra i soci fondatori e membro del comitato direttivo. Scopo dell’accordo è la creazione di una rete di istituzioni impegnate in un’azione coordinata di lungo periodo che promuova l’Ottica e la Fotonica (la “Scienza e Tecnologia della Luce”) a livello europeo. Scopo ultimo è quello di permeare tutti i livelli della società europea, attraverso attività di *outreach*, e di favorire le collaborazioni multidisciplinari e quelle fra industria e mondo accademico, sia nell’ambito della formazione che della ricerca.

Inoltre il Dipartimento svolge un ruolo attivo nell’ambito del Gruppo di Lavoro 7 (Research, Education and Training, <http://www.photonics21.org/trainingeducation.php>) della Piattaforma Tecnologica

Europea Photonics21 (<http://www.photonics21.org>), il cui attuale coordinatore è membro del Dipartimento. Tale Gruppo di Lavoro si occupa della definizione delle strategie Europee per quanto riguarda didattica, formazione e ricerca di base nell'ambito della Fotonica.