

Università degli Studi di Firenze

La Didattica  
e  
la Ricerca  
in  
Fisica

## *Il Corso di Laurea in Fisica e Astrofisica*

### **Finalità del corso**

Il contributo dei fisici è da sempre essenziale per il progresso scientifico e gli avanzamenti tecnologici. Il motivo di ciò non va solo ricercato nelle scoperte che la Fisica ha compiuto e continua a compiere, ma anche e soprattutto nel metodo scientifico di indagine che i fisici sistematicamente applicano nell'affrontare i problemi che sono chiamati a risolvere, spesso anche in contesti esterni alla Fisica.

Tale metodo consiste in uno stimolante susseguirsi e intrecciarsi di osservazione accurata del fenomeno in studio, schematizzazione ed enucleazione dei fatti fondamentali, costruzione di un modello del fenomeno (quasi sempre su basi matematiche), risoluzione formale del modello e infine la verifica sperimentale della coerenza fra il modello introdotto e il fenomeno esaminato.

La necessità di saper schematizzare modelli, compiere le indispensabili verifiche sperimentali e trarne le conclusioni oggettive, richiedono, da una parte, buone conoscenze teoriche nel campo della fisica e della matematica, capacità di sintesi e di logica, da un'altra, padronanza di tecniche di laboratorio e di analisi dati.

Il Corso di Laurea, oltre a fornire la preparazione culturale necessaria, aiuta gli studenti a sviluppare questa corretta attitudine mentale, stimolando lo studente fin dal primo anno di corso sia con conoscenze teoriche sia con l'apprendimento di tecniche sperimentali di laboratorio. Il Corso di Laurea presenta una didattica strutturata sia in corsi a carattere teorico (con esercitazioni numeriche), intesi a fornire le competenze di base in fisica classica e moderna e in matematica, sia in corsi di laboratorio, mirati a fornire le tecniche di indagine sperimentale e di elaborazione dei dati (sempre più sofisticate nel corso dei tre anni).

### **Obiettivi formativi**

Gli obiettivi formativi del Corso di Laurea in Fisica e Astrofisica consistono nel fornire allo studente una solida preparazione di base in fisica classica e moderna. Ciò consente al laureato di perfezionare le sue capacità scientifiche e professionali in corsi di studi di secondo livello, di inserirsi in attività lavorative che richiedano familiarità con il metodo scientifico e una mentalità aperta e flessibile, predisposta al rapido apprendimento di metodi di indagine e di tecnologie innovative. Il laureato acquisisce inoltre la capacità di utilizzare attrezzature complesse.

## **Organizzazione didattica del Corso di Laurea**

Tutte le lezioni del Corso di Laurea si svolgono presso il nuovo "Polo Scientifico" di Sesto Fiorentino.

Gli insegnamenti sono di norma organizzati in unità didattiche "semestrali". Le lezioni vengono svolte al mattino (dal Lunedì al Venerdì) mentre le esercitazioni in laboratorio impegnano alcuni pomeriggi.

Ai nuovi iscritti vengono offerti frequenti contatti con professori, ricercatori e dottorandi per superare le eventuali difficoltà iniziali e per un più facile inserimento nella didattica universitaria.

La frequenza ai corsi è una condizione essenziale per un proficuo inserimento dello studente nell'organizzazione didattica del Corso di Laurea.

Le lezioni vengono svolte nel periodo: metà Settembre – metà Giugno.

### **Riferimenti**

#### **Presidente del Corso di Laurea**

Prof. Andrea Stefanini - [pres-cdl@fisica.unifi.it](mailto:pres-cdl@fisica.unifi.it)

#### **Delegato all'orientamento per gli studenti**

Prof. Luca Del Zanna – [ldz@arcetri.astro.it](mailto:ldz@arcetri.astro.it)

#### **Sito web del Corso di Laurea**

[www.unifi.it/clfisi/](http://www.unifi.it/clfisi/)

## **Formazione professionale**

Il Corso di Laurea in Fisica e Astrofisica, mediante attività formative appositamente previste, fornisce:

conoscenze di base di algebra, geometria, calcolo differenziale e integrale, chimica e informatica;

conoscenze fondamentali di fisica classica, fisica teorica e meccanica quantistica e delle loro basi matematiche;

conoscenze di base di fisica moderna relative all'astrofisica, alla struttura della materia e alla fisica nucleare e subnucleare;

conoscenze di metodiche sperimentali, di misura e di elaborazione dei dati acquisite in corsi di laboratorio.

Gli sbocchi professionali principali per il laureato in Fisica e Astrofisica sono quelli elencati qui di seguito:

- ✓ inserimento nella ricerca (come dipendenti dell'Università o degli enti di ricerca sia in Italia che all'estero) attraverso il Dottorato di ricerca;
- ✓ inserimento nel settore informatico (industria, banche, istituti di statistica ed altre strutture presenti sul territorio);
- ✓ inserimento nell'industria elettronica e a contenuto tecnologico avanzato;
- ✓ insegnamento nell'ambito dell'istruzione secondaria

## LA RICERCA IN FISICA A FIRENZE

La ricerca in Fisica a Firenze è condotta da alcune centinaia di ricercatori appartenenti all'Università:

- Dipartimento di Fisica
- Dipartimento di Astronomia e Scienza dello Spazio

e agli Enti Pubblici di Ricerca presenti nell'area

- ❖ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
- ❖ Consiglio Nazionale delle Ricerche
- ❖ Istituto Nazionale di Fisica della Materia
- ❖ Istituto Nazionale di Astrofisica
- ❖ Istituto Nazionale di Ottica Applicata
- ❖ Laboratorio Europeo di Spettroscopia non Lineare
- ❖ Osservatorio Astrofisico di Arcetri
- ❖ Ente per le nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente

Si tratta di ricerca fondamentale e di ricerca applicata.

Nel seguito sono illustrate brevemente le principali attività che vengono svolte nei settori:

- Astrofisico
- Fisica della Materia
- Fisica Nucleare
- Fisica Subnucleare
- Fisica Applicata
- Fisica Teorica

## **Astrofisica**

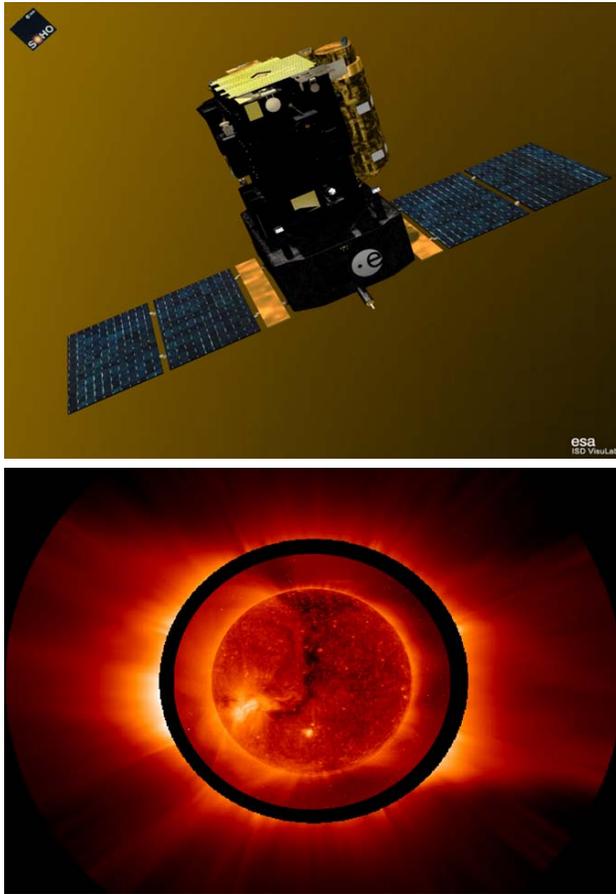
L'astrofisica è uno dei settori di ricerca tradizionali della fisica fiorentina, settore che vede riuniti sul colle di Arcetri, oltre al Dipartimento di Astronomia e Fisica dello Spazio dell'Università di Firenze, l'Osservatorio Astrofisico di Arcetri, facente capo all'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF), e la sezione di Firenze dell'Istituto di Radioastronomia del Consiglio Nazionale delle Ricerche. Queste tre istituzioni collaborano tra loro o svolgono attività complementari, cosicché l'insieme delle loro attività copre una buona parte dei settori trainanti della ricerca astrofisica attuale.

Una caratteristica generale dell'attività di ricerca in astrofisica che si svolge a Firenze è rappresentata dalla vasta rete di collaborazioni scientifiche nazionali e internazionali e dall'accesso ai migliori telescopi e strumenti oggi esistenti, sia per quel che riguarda le osservazioni da terra, che per quelle effettuate per mezzo dei satelliti scientifici artificiali. Gli astrofisici fiorentini eseguono osservazioni ai telescopi delle isole Canarie, del Cile, delle Hawaii, ai radiotelescopi americani ed europei e utilizzano gli strumenti a bordo dello Hubble Space Telescope, del satellite solare SOHO e sono stati in generale presenti come utilizzatori, e talvolta come costruttori di strumentazione, su larga parte delle missioni astronomiche spaziali degli anni recenti.

L'inizio della ricerca moderna in astrofisica a Firenze data dagli anni '20, epoca in cui la fisica fiorentina trovava la sua sede nell'edificio che attualmente ospita il Dipartimento di Astronomia e Scienza dello Spazio, nei pressi dell'Osservatorio. La presenza a Firenze di illustri scienziati, primo fra tutti Enrico Fermi, e l'apertura culturale dell'allora Direttore dell'Osservatorio, Giorgio Abetti, permettevano l'instaurarsi di una feconda interazione tra fisici e astronomi, di cui è testimonianza il "Seminario Matematico, Fisico e Astrofisico" che consentiva ai cultori delle tre discipline di ritrovarsi

regolarmente e di seguire, anche attraverso conferenze di visitatori, i progressi straordinari di quell'epoca.

Settore prioritario dell'astrofisica fiorentina di quel periodo era lo studio del Sole. Viene realizzata ad Arcetri la Torre Solare, prima in Europa e seconda nel mondo. La scuola di fisica solare fiorentina si afferma come una delle migliori in campo internazionale e quest'area di ricerca è tuttora uno dei punti di forza dell'astrofisica di Arcetri. Le domande a cui cerca di rispondere la fisica solare moderna riguardano la struttura del Sole, unica stella di cui possiamo conoscere i dettagli, la dinamica dell'atmosfera solare ed in particolare quella della sua componente più esterna, la corona. L'interesse di questo tipo di studi dipende dal fatto che la corona permea in effetti l'intero spazio interplanetario fino ed oltre l'orbita terrestre. La sua dinamica influisce quindi direttamente sia sulla cosiddetta meteorologia spaziale, cioè sulle condizioni prevalenti nello spazio esterno, di evidente importanza per le missioni spaziali abitate, che sull'ambiente circumterrestre e quindi sul clima. La fisica solare ha compiuto recentemente grandi progressi grazie alle innovazioni tecnologiche nella strumentazione astronomica e all'avvento di nuovi telescopi e di satelliti artificiali per lo studio del Sole alle lunghezze d'onda ultraviolette e dei raggi X che sono assorbite dall'atmosfera. Uno strumento progettato e costruito ad Arcetri si trova presso il più moderno telescopio solare del mondo, il telescopio franco-italiano THEMIS sull'isola di Tenerife, un altro strumento realizzato con la partecipazione e sotto la supervisione degli astrofisici fiorentini si trova a bordo della missione spaziale SOHO. A fianco di questa attività di progettazione e realizzazione di strumentazione astronomica, vi è un vasto e variegato insieme di ricerche di carattere osservativo, interpretativo e teorico che coprono la quasi totalità dei diversi settori della fisica solare. Le osservazioni vengono effettuate presso i migliori osservatori del mondo e ricercatori fiorentini fanno regolarmente parte dei gruppi di ricerca



*La sonda SOHO (sopra). Immagine composita del Sole ottenuta con strumenti di SOHO (sotto). L'immagine del disco solare, ottenuta dallo strumento EIT nell'estremo ultravioletto, mostra come appare il disco alla lunghezza d'onda di emissione del ferro 11 volte ionizzato, che corrisponde a circa due milioni di gradi. La corona esterna, ottenuta con lo strumento UVCS, è in luce ultravioletta emessa dall'ossigeno 5 volte ionizzato che viene trascinato dal vento solare.*

che analizzano e interpretano i dati ottenuti da telescopi a terra e dalle varie missioni spaziali che studiano il Sole. Una importante attività è legata allo sviluppo ed al continuo aggiornamento del software scientifico necessario all'interpretazione dei dati spettroscopici (solari e stellari) a lunghezze d'onda ultraviolette, una regione spettrale solo parzialmente nota da studi di laboratorio. Inoltre, la crescente importanza dell'attività spaziale nell'ambito della ricerca in fisica solare ha indotto a realizzare un laboratorio dedicato alla strumentazione per l'ultravioletto e per i raggi X che consenta la progettazione ed il collaudo delle apparecchiature e dei rivelatori di radiazione in questo intervallo spettrale per applicazioni da terra e dallo spazio. Attualmente si lavora allo sviluppo di strumentazione per un coronografo UV e visibile per Solar Orbiter, la prossima missione spaziale solare dell'ESA, e per il telescopio World Space Observatory (WSO) dedicato all'osservazione dell'universo nell'UV..

Dal punto di vista teorico è particolarmente attivo lo studio dei processi fondamentali nei plasmi, cioè nei gas ionizzati, che compongono oltre il 90% della materia costituente dell'Universo. Questo studio richiede lo sviluppo di sofisticati programmi di calcolo scientifico che vengono poi utilizzati su super-calcolatori italiani o stranieri a cui i ricercatori del gruppo hanno accesso. Il gruppo si occupa dell'origine e della dinamica della corona solare e stellare, oltre che dell'accelerazione dei venti e dei getti a partire dal caso solare fino ai venti e alle magnetosfere delle pulsar. Lo studio della corona e del vento solare viene effettuato anche utilizzando la grande quantità di dati da misure raccolte in situ dalle sonde Ulysses, Helios, Voyager oltre che dalle osservazioni remote della corona con i telescopi a bordo della sonda SOHO. Un altro campo di ricerca particolarmente attivo riguarda lo studio del magnetismo solare, realizzato per mezzo dell'analisi spettropolarimetrica della radiazione. La polarizzazione osservata

nelle righe spettrali costituisce infatti un potente strumento diagnostico attraverso il quale è possibile risalire alla misura del vettore campo magnetico negli strati più esterni dell'atmosfera solare.

Nel corso degli anni, alla tradizionale attività nel campo della fisica solare molte altre se ne sono affiancate. La fisica delle stelle è un argomento di ricerca assai attivo e si articola su diversi settori. Fra questi citiamo quello della formazione stellare che riguarda le prime fasi dell'evoluzione di una stella. Lo studio delle stelle giovani è oggi un campo in rapida evoluzione, grazie anche alle scoperte dovute sia allo Hubble Space Telescope che ad altre missioni spaziali in grado di osservare a lunghezze d'onda infrarossa (le più adatte per questo tipo di ricerche).

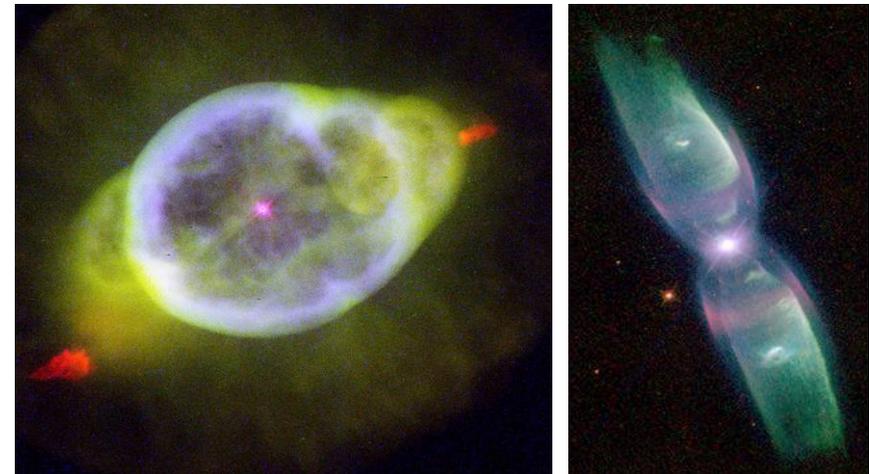
Particolare attenzione viene dedicata al fenomeno della perdita di massa dalle stelle che cedono allo spazio circostante parte della materia che le costituisce, dando luogo ad una fenomenologia quanto mai ricca. Tra gli argomenti di studio a Firenze citiamo le nebulose planetarie e i getti stellari. Le nebulose planetarie sono costituite da un involucro di materia che si va espandendo da una stella centrale che lo ha recentemente espulso. Tutte le stelle, ad esclusione delle poche stelle sufficientemente massicce per diventare Supernovae di tipo implosivo, attraversano questa fase di



---

#### *Il Telescopio spaziale HUBBLE (HST)*

*Illustrazione di HST (in alto), il più grande telescopio spaziale astronomico attualmente in orbita. Il diametro dello specchio primario è 2.4 metri. Non essendo disturbato dalla turbolenza atmosferica ottiene immagini astronomiche di estrema nitidezza. Ha scoperto per esempio oltre 1500 galassie lontanissime entro uno spazio di appena 2.5 x 2.5 primi d'arco quadrati. In basso immagini di due nebulose planetarie: NGC 3242 (a sinistra) e M 2-9 (a destra) ottenute con lo strumento WFPC2 di HST.*



evoluzione durante gli stadi finali della loro esistenza prima di raffreddarsi definitivamente. Il materiale espulso va ad arricchire il mezzo interstellare di materia chimicamente modificata rispetto a quella originaria di formazione della stella, per via di reazioni nucleari intercorse durante le fasi precedenti. Da tale materiale si formeranno successive generazioni di stelle. I getti stellari sono flussi di materia altamente collimati e costituiscono una caratteristica comune a molte stelle giovani. Essi riproducono su scala minore la morfologia dei getti osservati in molte galassie.

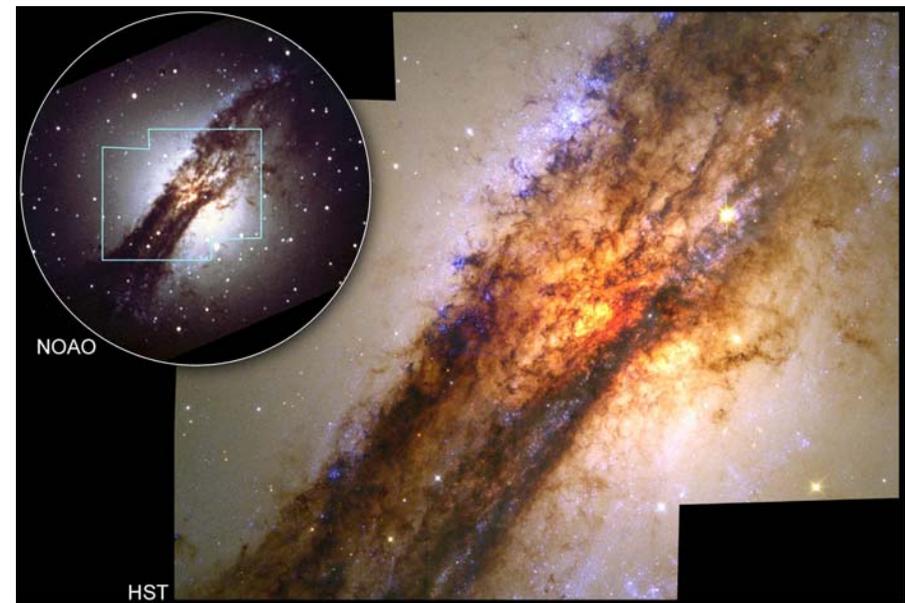
Un campo di interesse strettamente legato a quello delle stelle di recente formazione è quello del mezzo interstellare, cioè della "materia prima" da cui le stelle si formano. Questo tipo di studi necessita l'integrazione di discipline e metodi di indagine assai diversificati, che vanno dalla fisica dei solidi (il mezzo interstellare contiene infatti una notevole quantità di grani di polvere), alla chimica delle reazioni che coinvolgono ioni, atomi e molecole, agli effetti degli intensi campi di radiazione a cui il mezzo interstellare è sottoposto.

Nella moderna ricerca astrofisica una sorgente importante di informazione deriva dal confronto tra osservazioni dello stesso oggetto compiute a diverse lunghezze d'onda. Nel campo della fisica stellare, per esempio, sono state compiute da ricercatori di Arcetri osservazioni congiunte di una particolare stella sia a lunghezze d'onda radio, utilizzando la rete mondiale di radiotelescopi "VLBI", sia in raggi X, con il satellite astronomico italiano BeppoSax.

Un altro campo di ricerca che vede impegnati ricercatori universitari e dell'Osservatorio è quello dell'astrofisica delle alte energie. Di particolare rilevanza sono le ricerche sui Nuclei Galattici Attivi (AGN). Questa classe di oggetti astronomici è stata al centro di un grandissimo interesse in anni recenti. Gli AGN sono infatti la sede dei processi più energetici che si conoscano e l'individuazione della natura di tali processi attraverso l'interpretazione delle

osservazioni ha rappresentato una delle principali sfide dell'astrofisica moderna. Si ritiene oggi che la sorgente primaria delle immense energie che gli AGN sprigionano sia legata alla presenza di un buco nero massiccio all'interno del nucleo galattico.

Studi recenti hanno mostrato come l'attività degli AGN abbia una influenza profonda sulla formazione delle galassie che li ospitano. Questo stretto legame si manifesta nella stretta relazione esistente tra la massa di una galassia e la massa del buco nero massiccio esistente al centro della galassia stessa. Per tale motivo uno dei campi di



*Immagine della regione centrale della galassia Centauro A ottenuta con HST e con telescopi del National Optical Astronomical Observatory (NOAO, USA). Al centro di Centauro A, astronomi fiorentini hanno rivelato la presenza di un buco nero di 200 milioni di masse solari.*

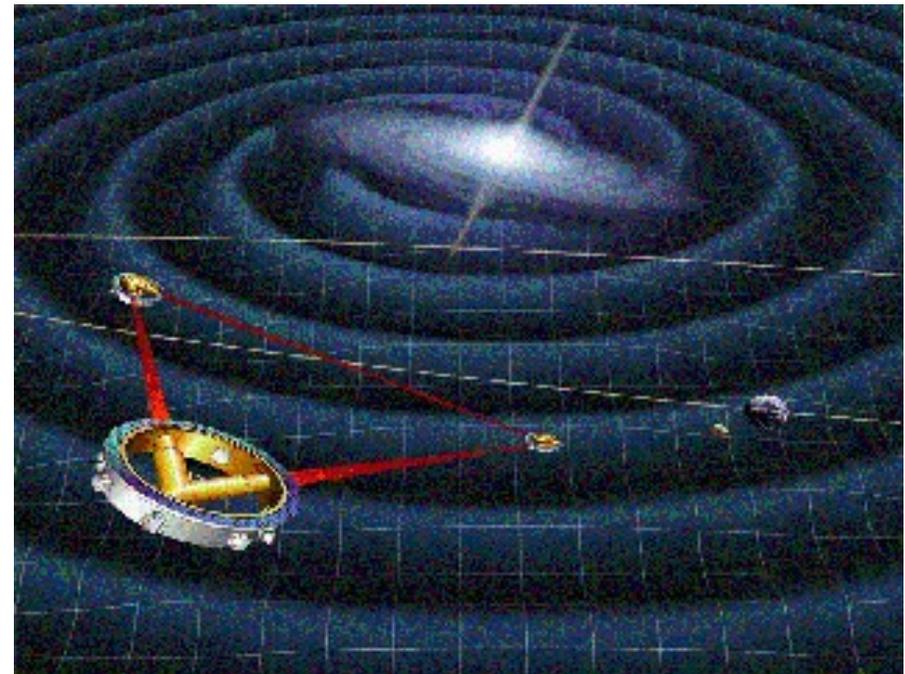
ricerca seguiti dagli astronomi fiorentini riguarda in particolare lo studio dei buchi neri nei nuclei galattici e la loro relazione con l'evoluzione delle galassie.

La disponibilità di osservazioni sempre più accurate ha permesso di riunire in modello unificato la complessa fenomenologia degli AGN e di cominciare a comprendere i meccanismi fisici che vi operano. È interessante osservare che i progressi sono spesso legati alla possibilità di procedere per analogia con situazioni studiate in contesti assai diversi. L'integrazione delle conoscenze diviene quindi un metodo assai potente di indagine e una larga concentrazione di ricercatori in settori diversi nello stesso luogo permette fruttuose interazioni. Nel campo dell'astrofisica delle alte energie altri studi riguardano i residui delle esplosioni stellari note come "supernovae" e la struttura temporale dei tuttora misteriosi "lampi gamma", cioè dell'emissione sporadica di raggi gamma osservata da satelliti scientifici.

A fianco di questa attività di tipo osservativo ed interpretativo si sono sviluppate negli anni recenti iniziative di tipo più prettamente tecnologico e sperimentale, in connessione con grandi progetti astronomici da terra e dallo spazio. Firenze è partner con università americane del progetto Large Binocular Telescope (LBT) per la costruzione di un telescopio composto di due specchi di 8 metri di diametro. L'ottica di tale strumento, di concezione fortemente innovativa, è in grado di correggere lo sfuocamento dell'immagine dovuto alla turbolenza dell'atmosfera grazie ad uno specchio deformabile posto lungo il percorso della luce, la cui superficie viene modificata in tempo reale in modo da compensare l'errore introdotto dalla turbolenza atmosferica. Il telescopio è operativo in Arizona.

Ricercatori fiorentini sono inoltre attivi in due esperimenti che intendono rivelare le onde gravitazionali: l'esperimento VIRGO, e l'esperimento LISA.

Le onde gravitazionali sono variazioni periodiche dello spazio tempo previste dalla Teoria della Relatività Generale, e vengono prodotte in un' ampia gamma di eventi astrofisici: dal moto di rivoluzione delle stelle doppie, all'esplosione di supernovae, alla collisione di stelle di neutroni, alla cattura di stelle da parte dei buchi neri al centro delle galassie. A differenza delle onde elettromagnetiche, possono viaggiare praticamente indisturbate anche nelle regioni più dense, e il loro studio può dare informazioni sui primi istanti dell'Universo, ancora più vicini al Big Bang di quanto sia possibile fare con la radiazione elettromagnetica di fondo.



*Schema della costellazione di tre satelliti del progetto LISA*

Le onde gravitazionali sono disturbi estremamente deboli, e a tutt'oggi esistono solo prove indiziarie della loro esistenza, che provengono dalla raffinata analisi del moto di alcuni sistemi binari composti da due stelle di neutroni. La rivelazione diretta permetterà un confronto sperimentale fra le diverse teorie della gravitazione che sono state prodotte, ed aprirà una nuova finestra di osservazione sull' Universo: ricordiamo, al proposito, che secondo le stime ottenute dalle più recenti osservazioni, solo il 4% del contenuto di massa dell'Universo è osservabile tramite le onde elettromagnetiche, ed il restante è individuabile solo grazie agli effetti gravitazionali esercitati sulle masse circostanti.

Per alcuni cenni su VIRGO e LISA si rimanda al paragrafo "Fisica delle onde gravitazionali".

Da quanto precede dovrebbe risultare chiaro che l'astrofisica moderna richiede l'uso di strumentazione sofisticatissima, alla frontiera dell'attuale ricerca tecnologica, oltre all'uso continuo di calcolatori di ultima generazione.

Queste caratteristiche fanno sì che gli studenti che si sono formati a questa scuola non debbano vedere il proprio futuro ristretto al solo ambito astronomico. Infatti, molte delle tecnologie sviluppate per l'astrofisica trovano applicazione in altri settori. Per esempio, i già citati rivelatori per radiazione UV e X potranno essere fruttuosamente impiegati nel campo della dosimetria della radiazione per la radioterapia del cancro o nell'industria della microelettronica. La strumentazione per la rivelazione delle onde gravitazionali necessita, ad esempio: della soluzione di problemi relativi ai laser, il cui utilizzo nei settori più disparati è sotto gli occhi di tutti; di un raffinato studio dei materiali utilizzati per gli apparati; di accurate tecniche computazionali per l'analisi dei segnali raccolti. Il calcolo scientifico e la simulazione del comportamento di sistemi complessi al calcolatore sono altri esempi di competenze, acquisibili nella ricerca astrofisica, facilmente

"riciclabili" al di fuori di questa. Queste considerazioni fanno capire che gli sbocchi professionali di laureati in fisica con specializzazione astrofisica siano assai più ampi di quanto non si possa ritenere a prima vista. È prova di ciò il fatto che tutti coloro che hanno conseguito il Dottorato di Ricerca in Astronomia hanno trovato rapidamente una collocazione in vari settori della ricerca e dell'industria in Italia o all'estero e che circa la metà di questi ha attualmente un impiego permanente.

## **Fisica della materia**

La Fisica della Materia nel Dipartimento di Fisica dell'Università di Firenze è in una fase di grande sviluppo in particolare dopo la costituzione del nuovo Istituto Nazionale di Fisica della Materia che coordina le ricerche italiane in questo campo. Il gruppo fiorentino è composto da circa 80 fra docenti universitari, ricercatori, dottorandi e borsisti ed è coinvolto nelle seguenti linee di ricerca:

1. *Fisica Atomica e Molecolare, Elettronica Quantistica, Fisica dei Plasmi*
2. *Liquidi e sistemi disordinati*
3. *Magnetismo, Metalli, Superconduttività*
4. *Semiconduttori ed isolanti*
5. *Fisica teorica e Computazionale, Cibernetica.*

Molte di queste ricerche sono svolte in collaborazioni internazionali e nazionali avendo tra l'altro accesso anche ai fondi di ricerca comunitari. Ciò permette di inserire i laureati in queste discipline in laboratori e centri di ricerca europei.

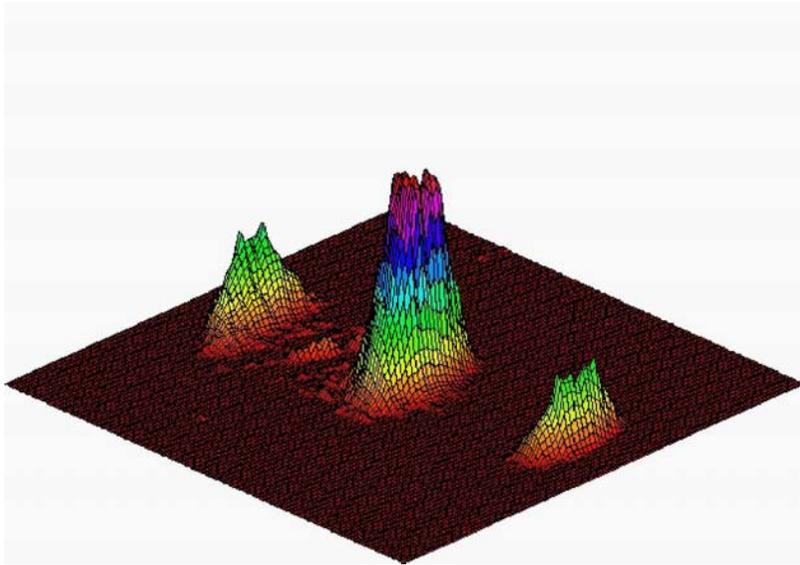
Le ricerche suddette sono svolte nelle varie strutture di ricerca fiorentine, quali il Dipartimento di Fisica dell'Università, l'Istituto Nazionale di Fisica della Materia (INFN), l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), il Laboratorio Europeo di Spettroscopia Non Lineare (LENS), il CNR, l'Istituto Nazionale di Ottica (INO) ed in stretta collaborazione con il Dipartimento di Chimica dell'Università.

## **Fisica Atomica e Molecolare, Elettronica Quantistica, Fisica dei Plasmi**

Le ricerche di Fisica atomica e molecolare hanno lo scopo di approfondire le conoscenze sulle proprietà più fondamentali di atomi e molecole, in particolare allo stato gassoso, e delle loro interazioni con la radiazione ottica, in particolare coerente e molto intensa, come quella dei laser. Vengono impiegate tecniche sperimentali molto sofisticate di spettroscopia laser ad altissima risoluzione, e con impulsi di durata temporale piccolissima (pico e femto secondi). Le metodologie della spettroscopia ottica sono poi applicate allo sviluppo di strumentazione di interesse industriale, ambientale, biomedico, ecc.. L'elevata intensità della radiazione laser consente la generazione di "armoniche", ovvero radiazione con frequenza doppia, tripla, ecc. di quella originaria, e lo studio di comportamenti molto particolari di atomi e molecole.

La radiazione laser viene inoltre utilizzata per "raffreddare" gli atomi fino a temperature molto basse, tali da mettere in evidenza processi basati sulla natura quantistica della materia. Il raffreddamento laser è un processo fondamentale nella realizzazione di campioni degeneri di bosoni (condensazione di Bose-Einstein) e di fermioni di cui vengono studiate le caratteristiche fondamentali.

Presso il Dipartimento di Fisica ed il LENS sono presenti diversi esperimenti in cui vengono studiate le proprietà fondamentali di gas atomici quantistici degeneri. I campioni degeneri prodotti vengono manipolati con potenziali ottici e magnetici ed utilizzati per la simulazione sperimentale di problemi fondamentali della fisica quantistica.



*Un array di atomi condensati intrappolati nei minimi di potenziale di un reticolo ottico e lasciati espandere producono la figura di interferenza riportata in figura*

La realizzazione di campioni atomici ultrafreddi ha portato allo sviluppo dell'ottica atomica che si basa sulla natura ondulatoria della materia così come l'ottica si basa sulla natura ondulatoria della luce. L'ottica atomica ha già dimostrato di avere applicazioni al limite della tecnologia. Interferometri atomici e orologi atomici possono raggiungere sensibilità tali da poter effettuare test di leggi fondamentali della fisica.

L'ottica classica costituisce un substrato culturale e strumentale di grande valore per questi campi di ricerca e sviluppo, con profonde e antiche radici nell'area fiorentina, anche industriale; gli importanti sviluppi locali della fisica e della tecnologia dei laser e dell'Elettronica Quantistica in generale hanno infatti creato le

condizioni favorevoli allo sviluppo di un'area di eccellenza per l'industria laser. Nuovi tipi di laser vengono studiati e realizzati, e applicati nelle indagini di fisica della materia. Sono anche attive ricerche nei campi della microottica, delle guide ottiche e dei dispositivi ottici integrati, della sensoristica a fibra ottica per applicazioni biomedicali ed ambientali.

Nel campo dell'ottica quantistica si inserisce l'investigazione del caos e della complessità in vari sistemi ottici e in modelli artificiali (automi cellulari). Un laser a singolo modo è il sistema più semplice per studiare il caos deterministico; in particolare il cosiddetto caos omoclinico è un modello della dinamica del singolo neurone, e l'accoppiamento in rete di più laser, attraverso metodi di controllo e sincronizzazione del caos, rappresenta una rete semantica che permette di studiare la complessità sia di reti biologiche (ad esempio, aree sensoriali del cervello) sia di reti artificiali (ad esempio, Internet).

Una menzione merita anche lo studio della propagazione della radiazione ottica in mezzi disomogenei, come l'atmosfera e i tessuti biologici, per le importanti ricadute applicative, quali le tecniche "lidar" (radar ottico) per il sondaggio atmosferico e la visione in mezzi torbidi (come la "tomografia ottica").

Particolare sviluppo hanno recentemente ricevuto le applicazioni della spettroscopia di fluorescenza per immagini per la diagnosi tumorale in cellule e tessuti biologici, e le tecniche ottiche per l'analisi delle opere d'arte e per la loro conservazione.

## **Liquidi e sistemi disordinati**

Appartengono alla categoria dei liquidi nell'accezione più vasta del termine, oltre a quelli comunemente intesi (acqua, alcool, etc.), anche gas liquefatti per effetto di un forte abbassamento di temperatura o di un forte aumento di pressione, liquidi semplici atomici e molecolari, miscele di gas nobili, metalli liquidi, liquidi

quantici, vetri e fluidi cosiddetti complessi. Nel vetro l'assetto molecolare è molto simile a quello di un liquido (stato disordinato) e profondamente diverso dall'organizzazione del solido (struttura cristallina ben definita). Infatti il vetro, anche se molto lentamente, fluisce. I fluidi complessi sono composti da più sostanze che formano aggregati macromolecolari. Tali aggregati sono dispersi in un liquido, possono essere di dimensioni del nanometro; in tal caso vengono chiamate "nanoparticelle". In questi composti gioca un ruolo fondamentale la presenza, dentro il fluido, dell'interfase cioè della zona di separazione fra l'aggregato disperso e il liquido disperdente. I fluidi complessi coprono vari gradi di complessità fino a quella del sistema biologico. Nei sistemi biologici molte delle reazioni biochimiche avvengono nelle regioni interfacciali come ad esempio alla superficie di separazione tra membrana cellulare e ambiente circostante.

La caratterizzazione delle proprietà di tali sistemi si realizza mediante l'utilizzo di varie tecniche sperimentali. Queste consentono di ottenere fondamentali informazioni sia sulle proprietà macroscopiche che sulle strutture microscopiche di questi sistemi. Risultano di particolare interesse le indagini di tipo spettroscopico in grado di fornire sia dati di tipo strutturale che dinamico. I gruppi di ricerca locali utilizzano tecniche di spettroscopia ottica, neutronica, con raggi X e dielettrica. Nei vari casi, la sonda di radiazione che viene fatta interagire con il materiale da studiare è di tipo elettromagnetico, rispettivamente nel visibile per la spettroscopia ottica (luce laser), raggi X, radioonde e microonde per la spettroscopia dielettrica. Nel caso della spettroscopia neutronica la sonda è il neutrone (particella subatomica) e l'interazione è di tipo nucleare.

Nell'ambito delle spettroscopie ottiche sono presenti sia esperimenti di spettroscopia risolta nel dominio delle frequenze che nel dominio

del tempo. Entrambe questi esperimenti studiano la luce diffusa dai materiali in esame per ricavarne informazioni fisiche indispensabili al fine di verificare la validità dei modelli teorici. Tra gli esperimenti risolti nel tempo si realizzano sia misure sulle proprietà dinamiche delle fluttuazione spontanee (proprietà di equilibrio) che sui fenomeni di fluttuazione indotti da forze esterne (proprietà di non-equilibrio), quali ad esempio l'interazione con impulsi laser ultracorti. Gli esperimenti di spettroscopia neutronica e raggi X vengono condotti presso i più moderni laboratori internazionali come l'Institut Laue Langevin e la European Synchrotron Radiation Facility, entrambi a Grenoble (F), il laboratorio Leon Brillouin di Saclay (F) e il Rutherford Appleton Laboratory di Didcot (UK). In particolare, l'attività di spettroscopia neutronica comprende sia misure di diffrazione per la determinazione del fattore di struttura statico dei sistemi sopra citati e lo studio dei potenziali di interazione tramite il confronto con le più moderne teorie per lo stato liquido, sia misure di scattering anelastico per risalire al fattore di struttura dinamico e alle curve di dispersione dei modi acustici nei liquidi di interesse. Un'altra consistente parte dell'attività riguarda anche la realizzazione di nuova grande strumentazione (finalizzata allo studio di liquidi e sistemi disordinati) presso i laboratori menzionati, nonché l'esecuzione di simulazioni al computer che permettono di mettere a punto il comportamento degli spettrometri durante le fasi di progetto e sviluppo. Tutto ciò coinvolge ricercatori e studenti operanti sia presso il Dipartimento, sia presso i laboratori all'estero, facilitando l'instaurarsi di collaborazioni internazionali e la possibilità di trascorrere periodi di studio e approfondimento anche presso i centri di ricerca europei.

Fra le tecniche non spettroscopiche usate ci sono la microcalorimetria differenziale per lo studio della transizione vetrosa sia in liquidi molecolari che in fluidi complessi e per l'individuazione dei diversi stati di legame dell'acqua all'interno dei

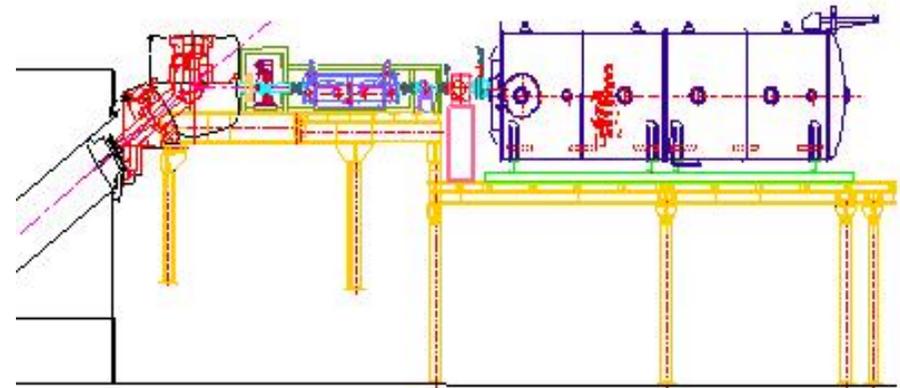
fluidi complessi. Ci sono poi alcune tecniche importanti per lo studio delle regioni interfaseali; le misure di adsorbimento all'interfase tra una soluzione elettrolitica ed una superficie, per studiare le proprietà tensioattive delle sostanze; la microscopia a effetto "tunnel" che consente lo studio diretto della conformazione delle superfici a livello atomico e molecolare.

### **Magnetismo, metalli e superconduttività**

Lo studio delle proprietà magnetiche e di trasporto dei materiali conduttori e isolanti costituisce uno dei campi nei quali si manifesta maggiormente la relazione fra ricerca fondamentale ed applicata.

I superconduttori trovano oggi larga applicazione in settori della vita quotidiana, come per esempio nella diagnostica medica, sia per la produzione di intensi campi magnetici (necessari nella risonanza magnetica nucleare) che per la costruzione di sensori per misure di alta precisione; nuove prospettive sono inoltre state aperte dalla scoperta dei cosiddetti superconduttori ad alta temperatura. Per quanto riguarda i materiali magnetici, le loro applicazioni spaziano dalle macchine elettriche più tradizionali (motori, trasformatori, etc..) ai più sofisticati dispositivi impiegati negli apparati elettronici, in particolare nella costruzione dei supporti di registrazione e dei loro apparati di lettura, che trovano largo impiego sia negli elaboratori elettronici che nell'elettronica di consumo. Lo studio di strutture magnetiche planari e multistrato, nelle quali giuoca un ruolo fondamentale la natura quantistica del sistema fisico, hanno costituito l'indispensabile base per la realizzazione dei nuovi dischi rigidi ad alta capacità.

L'attività di ricerca nel campo del magnetismo e della superconduttività svolta a Firenze si concentra sull'indagine degli



*Schema di progetto dello spettrometro anelastico a neutroni BRISP (BRILLouin SPectrometer) presso l'ILL di Grenoble e stato attuale di avanzamento dell'installazione dei vari componenti. Tale spettrometro consentirà lo studio della struttura dinamica dei sistemi disordinati nella regione dei bassi impulsi scambiati fra neutroni (sonda) e campione.*

effetti quantistici in sistemi con carattere unidimensionale o bidimensionale sia dal punto di vista teorico che sperimentale.

A puro titolo di esempio vogliamo citare:

1. Strutture cresciute su di un substrato di metallo non magnetico tipo Au, Ag, Cu, W, ecc., sul quale in condizioni di ultra alto vuoto si fanno cadere atomi magnetici tipo Fe, Co, Ni, Gd, ecc. In questo modo è possibile avere uno strato di spessore atomico che copre l'intera superficie. Questa è la migliore realizzazione possibile di un sistema magnetico bidimensionale.
2. Grandi molecole magnetiche. È oggi possibile ottenere molecole il cui momento magnetico è molto più grande di quello di atomi e molecole fin qui studiati. Tali grandi molecole costituiscono un esempio particolare dei cosiddetti sistemi mesoscopici.

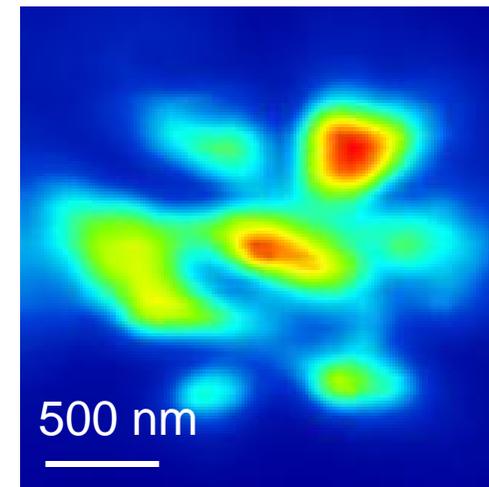
Possiamo dire che i sistemi mesoscopici stanno a metà strada fra il mondo microscopico (quello degli atomi) ed il mondo macroscopico (quello degli oggetti con cui abbiamo a che fare nella vita di tutti i giorni). Tali sistemi possono manifestare comportamenti "inusuali", di tipo quantistico, solitamente confinati nell'ambito microscopico, e pertanto costituiscono un campo di studio particolarmente stimolante e promettente di nuove interessanti applicazioni.

## Semiconduttori ed isolanti

La fisica dei semiconduttori è senza dubbio una delle aree della ricerca scientifica con più dirette e vaste ricadute ed influenze nella vita di tutti i giorni. Vastissima è la tipologia dei dispositivi a semiconduttore (diodi, transistor, celle solari, laser, etc.) e ancora più ampia è la gamma delle loro applicazioni nei vari settori dell'attività quotidiana, dalle applicazioni biomediche a quelle industriali, dai computers alle trasmissioni satellitari, per non parlare dell'enorme impatto che l'elettronica di consumo ha avuto nel modificare abitudini e stili di vita.

Questa vera e propria rivoluzione tecnologica, non solo ha origine dalla ricerca scientifica di base, ma la alimenta spingendo verso materiali sempre più puri e/o verso la realizzazione di materiali sintetici innovativi. Tale spinta propulsiva fa della ricerca di base dei semiconduttori un settore di punta anche sul piano puramente conoscitivo e speculativo della fisica di oggi, consentendo di approfondire le conoscenze sulle proprietà fondamentali dello stato solido. Recentemente lo sviluppo di nanotecnologie ha consentito di poter controllare e manipolare le proprietà elettroniche dei materiali, così come l'avvento dei cristalli fotonici permette di progettare di strutture dielettriche per controllare e manipolare la luce.

Le ricerche svolte a Firenze hanno carattere prevalentemente sperimentale e si concentrano sullo studio di eterostrutture semiconduttrici a bassa dimensionalità sintetizzate con tecniche



*Mapa dell'emissione di punti quantici inseriti in una microcavità ottica a cristallo fotonico. La linea indica la scala spaziale di 500 nm, ovvero 500 miliardesimi di metro*

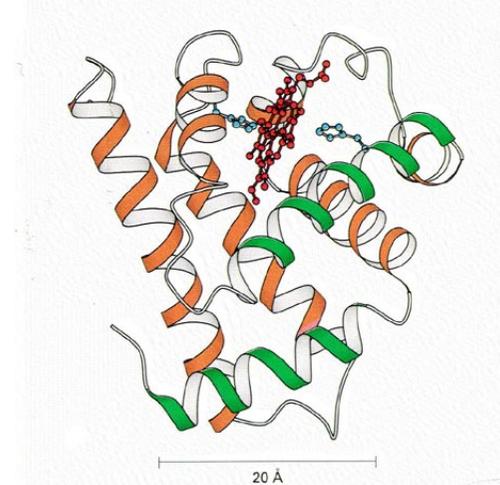
epitassiali che consentono il controllo della crescita al livello di un singolo strato atomico. Le nanostrutture possono essere inserite in risuonatori ottici nanoscopici in modo da manipolare e ottimizzare le proprietà ottiche degli emettitori, come nel caso dell'esempio riportato in figura. Vengono utilizzate tecniche di spettroscopia laser con altissima risoluzione temporale (fino a qualche parte di decimillesimo di miliardesimo di secondo) e spaziale (dell'ordine di dieci miliardesimi di metro). La purezza dei materiali (GaAs, InAs, GaN, ZnSe, etc.) e l'uso di sofisticate tecniche sperimentali consente di investigare, anche nella fase condensata, delicati e sottili effetti quantistici della materia e dell'interazione fra radiazione e sistemi materiali.

Le metodologie della spettroscopia ottica sono anche utilizzate per lo studio e la caratterizzazione di materiali innovativi con dirette applicazioni tecnologiche. Un esempio per tutti è lo studio dei nitru di Gallio e derivati direttamente connessi allo sviluppo di laser con emissione nel blu che sono alla base di una nuova generazione di dispositivi fra cui i lettori DVD. Lo studio e la realizzazione di nuovi prototipi di dispositivi è una ulteriore attività svolta nei laboratori di ricerca dell'Università di Firenze.

## Fisica teorica e Computazionale, Cibernetica

Il concetto di caos deterministico è stato introdotto allo scopo di comprendere la natura dinamica dei fenomeni turbolenti presenti in natura. Infatti lo studio della circolazione atmosferica (essenziale per le previsioni del tempo) così come quello delle instabilità convettive nei fluidi o della dinamica di interfacce in processi chimici di reazione-diffusione si basa sull'uso di modelli dinamici deterministici descritti da un numero assai ristretto di variabili dinamiche, a dispetto del numero enorme di particelle di materia presenti in una piccola porzione di fluido. Nonostante questa

drastica operazione di riduzione (che è peraltro giustificata sulla



*Molecola di mioglobina, responsabile del trasporto di ossigeno nei muscoli. Nella struttura complessa della proteina formata da eliche unite da filamenti, i gruppi rossi blu indicano la componente attiva della proteina.*

base di argomenti rigorosi) la “dinamica effettiva” mostra un comportamento imprevedibile, che di fatto si manifesta appunto sotto forma di moti turbolenti.

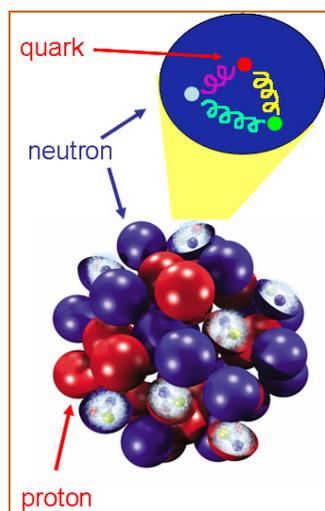
I fenomeni complessi si situano invece in una zona di confine tra ordine e caos. Per intuire la loro importanza basta considerare che essi si manifestano non solo nel mondo fisico ma anche in quello della materia vivente. Esempio tipico sono i recenti studi sulla dinamica delle popolazioni, sulla propagazione di epidemie fino alla dinamica delle proteine e del DNA. Nell'ambito dei fenomeni complessi sembrano rientrare persino meccanismi legati all'economia.

Sul piano metodologico, gran parte di queste ricerche teoriche richiedono l'uso combinato di tecniche analitiche e numeriche, queste ultime rese possibili dall'impressionante accelerazione che da anni sta caratterizzando la crescita delle prestazioni dei moderni elaboratori elettronici. Il legame con indagini di tipo sperimentale è per molti versi ancora in via di crescita e di definizione, soprattutto nei settori di interesse interdisciplinare.

## Fisica nucleare

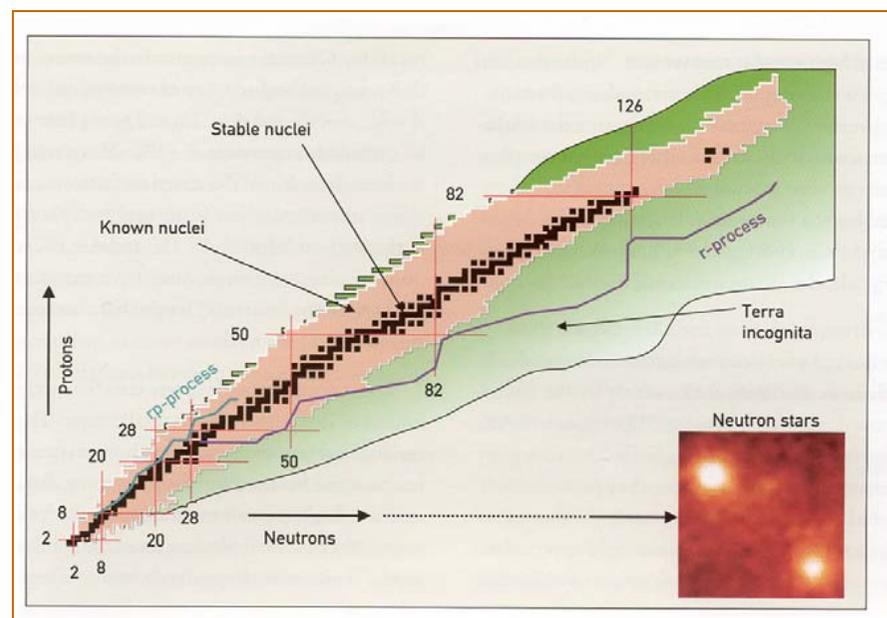
Da oltre 40 anni a Firenze esiste un attivo Gruppo di Fisica del Nucleo dell'Università e della Sezione locale dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, attualmente costituito da circa 30 fisici tra docenti universitari, ricercatori e dottorandi, nonché da tecnici e tecnologi.

**I Nuclei Atomici** sono composti da nucleoni (protoni e neutroni), a loro volta costituiti dai “quarks”, tenuti insieme dallo scambio di “gluoni” (le molle in figura).



Salvo che in condizioni eccezionali, come quelle che si verificarono entro qualche microsecondo dopo il BigBang, quark e gluoni sono confinati all'interno dei nucleoni che hanno dimensioni di pochi milionesimi di miliardesimo di metro. Nei nuclei i protoni e i neutroni stanno insieme grazie a forze a corto raggio di azione (forze nucleari). Il Gruppo di Fisica del Nucleo di Firenze studia il comportamento dei nuclei atomici anche quando essi sono portati molto lontano dalle condizioni usuali.

**Gli Isotopi** - Esistono circa cento tipi di atomi (gli elementi chimici) caratterizzati da corrispondenti nuclei atomici, ciascuno con un preciso numero di protoni ( $Z$ ). In natura esistono meno di 300



isotopi stabili (si chiamano isotopi nuclei con un dato  $Z$  e differente numero di neutroni,  $N$ ) e il loro insieme costituisce la cosiddetta valle di stabilità (vedi figura sopra). Essi formano una zona con energia di legame massima. Siccome questa energia convenzionalmente ha segno negativo gli isotopi stabili si possono immaginare al fondo di una valle (punti neri). Gli altri isotopi sono radioattivi e decadendo più o meno rapidamente si trasformano in nuclei stabili. E' per questo che sulla Terra i nuclei instabili sono quasi assenti eccetto quei pochi che originano da nuclei che decadono molto lentamente. Isotopi instabili sono invece prodotti in abbondanza nelle stelle sia durante la loro vita normale (come quella attuale del nostro Sole) sia nelle ultime fasi del loro ciclo. Molti di questi isotopi possono essere prodotti anche in laboratorio ed essere così studiati a livello terrestre. Si prevede che di isotopi in

totale ne esistano circa seimila ma solo di circa la metà si è provata l'esistenza.

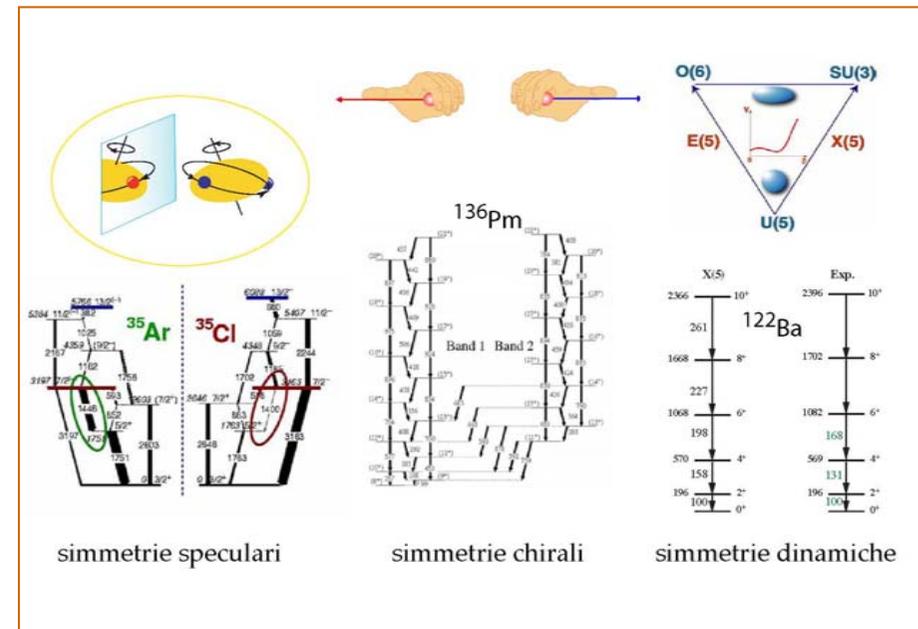
## REAZIONI NUCLEARI

A Firenze, in collaborazione con altri gruppi italiani e stranieri, si studia il comportamento dei nuclei atomici portati in condizioni estreme, molto lontane dalla condizione di equilibrio o di decadimento naturale. Per produrre nuclei in uno stato eccitato, o più in generale per studiare il comportamento della materia nucleare lontano dall'equilibrio, si utilizzano le "reazioni nucleari" ovvero si bombardano i nuclei di un campione di materiale ("bersaglio") con un fascio di ioni di sufficiente energia, prodotto da una macchina acceleratrice. Fino ad oggi i fasci sono stati prodotti con ioni stabili. Nei prossimi anni, anche in Italia, si costruiranno acceleratori per ioni radioattivi in modo da cercare di spingerci ancora più verso nuclei esotici (Terra incognita). Anche il gruppo di Firenze partecipa a questi sviluppi che porteranno a esperimenti sempre più raffinati. In generale, gli esperimenti seguono due linee di ricerca principali:

## SPETTROSCOPIA GAMMA

Anche per i nuclei atomici, come per gli atomi e le molecole, esistono, sopra al livello energetico "fondamentale" dello stato di equilibrio, molti livelli eccitati e instabili, ognuno dei quali decade verso un livello più basso, di solito emettendo un quanto di radiazione elettromagnetica (raggi g). Lo studio dei livelli nucleari e dei loro modi di decadimento costituisce la "spettroscopia nucleare". Essa consente di individuare, al variare di N, Z e dell'energia fornita, i diversi meccanismi di eccitazione dei nuclei (alcuni simili a quelli degli elettroni atomici, altri ai moti collettivi di rotazione e vibrazione delle molecole complesse), le differenti strutture (forme sferiche, ellissoidali, triassiali...) che essi assumono e i vari tipi di

simmetrie (dinamiche, chirali...) che ne governano il comportamento. Uno degli aspetti più interessanti della ricerca



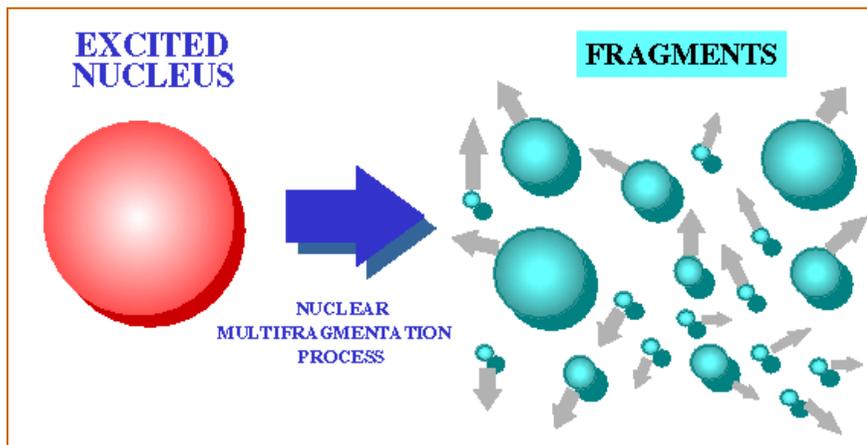
attuale riguarda lo studio delle proprietà dei nuclei via via che si allontanano dalla valle di stabilità.

I primi risultati in questo campo mettono in luce una profonda evoluzione che implica importanti conseguenze per la teoria che descrive la struttura nucleare.

## MECCANISMI DI REAZIONE E TERMODINAMICA NUCLEARE

L'altra linea di ricerca ricostruisce i processi di formazione dei nuclei eccitati (dinamica) e studia come si comporta la materia nucleare interagente, schematizzabile come una porzione di liquido

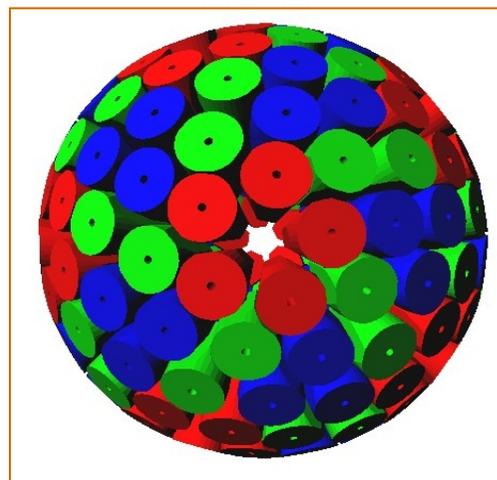
che si scalda e si deforma. Questa ultima parte si chiama termodinamica nucleare proprio perché tenta di dare una descrizione globale del sistema eccitato in funzione di pochi variabili (energia interna, temperatura, densità). Nelle collisioni tra nuclei pesanti, per superare la repulsione dovuta alla forza di Coulomb, è necessario



dare ai nuclei una velocità di almeno 1/5 della velocità della luce (pari a una energia cinetica di centinaia di MeV ( $1 \text{ MeV} = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ Joule}$ )). Quando due nuclei pesanti così veloci si urtano, si assiste a fenomeni che dipendono dalla massa dei nuclei, dalla loro energia e dal grado di centralità della collisione. Si ottiene una varietà di processi molto diversi che vengono studiati nell'esperienza sfruttando i dati forniti dalle misure effettuate con gli opportuni rivelatori. Si noti che i processi nucleari accadono in tempi che raramente superano i 10-20 ns mentre i prodotti di reazione sono rivelati in tempi più di un miliardo di volte superiori (ns).

## I RIVELATORI, ovvero i nostri OCCHI

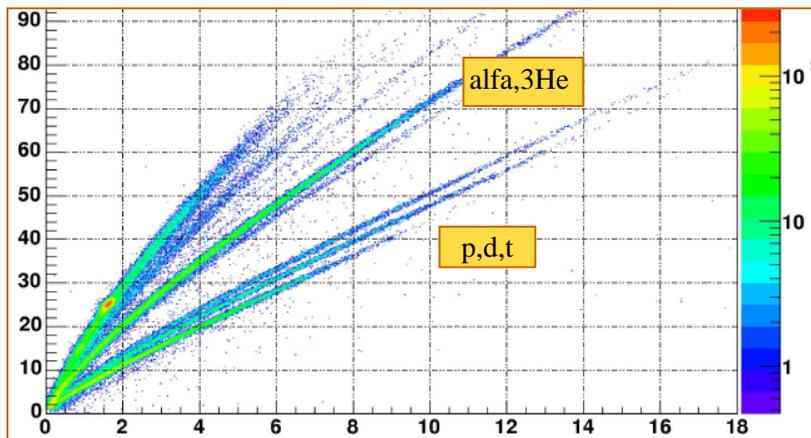
Per misurare in modo efficiente e preciso i raggi gamma e le particelle, emessi in gran numero nelle reazioni, sono necessari potenti sistemi di rivelazione posti attorno al bersaglio composti da un gran numero di rivelatori. Il gruppo di Firenze ha partecipato a



schema del rivelatore futuro  
AGATA

molti esperimenti sia usando apparati presenti nei laboratori che costruendone di propri. Per la spettroscopia gamma la maggiore attività si svolge presso il Laboratorio di Legnaro (Pd) nell'ambito di importanti collaborazioni che utilizzano grandi apparati di rivelatori come GASP, CLARA-PRISMA (a sx) e nel prossimo futuro AGATA (a dx), un insieme di rivelatori al germanio sensibili alla posizione. Gli apparati di ultima generazione sono sempre più raffinati e complessi perché si studiano nuclei sempre più lontani dalla valle di stabilità, prodotti con bassa probabilità nelle reazioni nucleari.

Il nostro gruppo è molto attivo anche nel campo dei rivelatori impiegati negli studi di dinamica e termodinamica nucleare (apparato GARFIELD a Legnaro, CHIMERA a Catania) dove servono grandi strumenti per identificare possibilmente tutti i frammenti emessi. Sono in corso progetti per migliorare sensibilmente le prestazioni dei rivelatori al silicio e a scintillazione nonché importanti sviluppi di elettronica verso una completa digitalizzazione dell'informazione che proviene dai segnali prodotti nei rivelatori (a dx in basso un esempio).



*Spettro per identificazione di particelle leggere con scintillatori ottenuto con analisi digitale*

## **Fisica Subnucleare**

Il settore della fisica subnucleare a Firenze è molto attivo e in continuo sviluppo. Il gruppo, composto da più di 40 fisici tra docenti universitari, ricercatori, dottorandi e borsisti, è coinvolto in varie linee di ricerca a media e lunga scadenza.

I filoni principali di ricerca sono:

- a) la Fisica con gli acceleratori di alta energia,
- b) la Fisica con i raggi cosmici,
- c) la Fisica delle onde gravitazionali.

Accanto a queste tre linee di ricerca si svolge un'importante attività collaterale per lo sviluppo di rivelatori e nuove tecnologie software e hardware. Tutti gli esperimenti sono inseriti in collaborazioni internazionali che permettono ai giovani laureati di entrare in contatto con i più attivi Istituti di ricerca europei ed extraeuropei con scambi culturali e possibilità di usufruire di borse di studio o di dottorato all'estero.

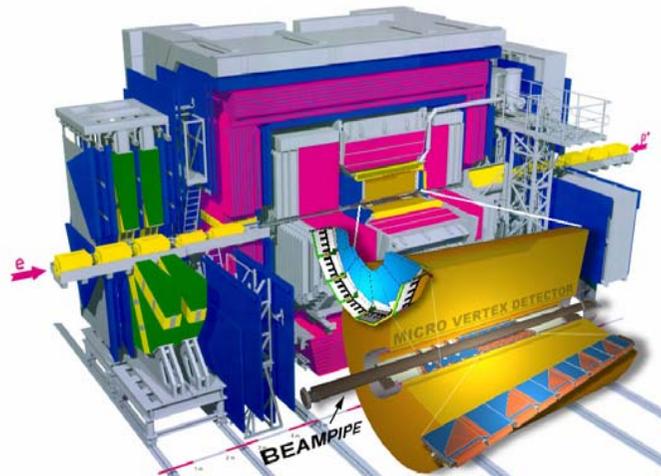
## **Fisica con gli acceleratori di alta energia**

Usando fasci di particelle di alta energia prodotte negli acceleratori è possibile mettere in evidenza i più piccoli costituenti della materia, studiarne i meccanismi di interazione e risalire così alla natura delle forze fondamentali. Con gli acceleratori di alta energia per esempio è stato possibile mettere in evidenza l'esistenza delle tre famiglie di quarks (i più piccoli costituenti della materia fino ad oggi noti).

Gli esperimenti nei quali è coinvolto il gruppo di Firenze usano gli acceleratori del CERN (Centro Europeo per la Ricerca Nucleare, il più grande laboratorio per la fisica delle particelle al mondo) di Ginevra e del laboratorio DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) di Amburgo.

## 1. Esperimenti in funzione

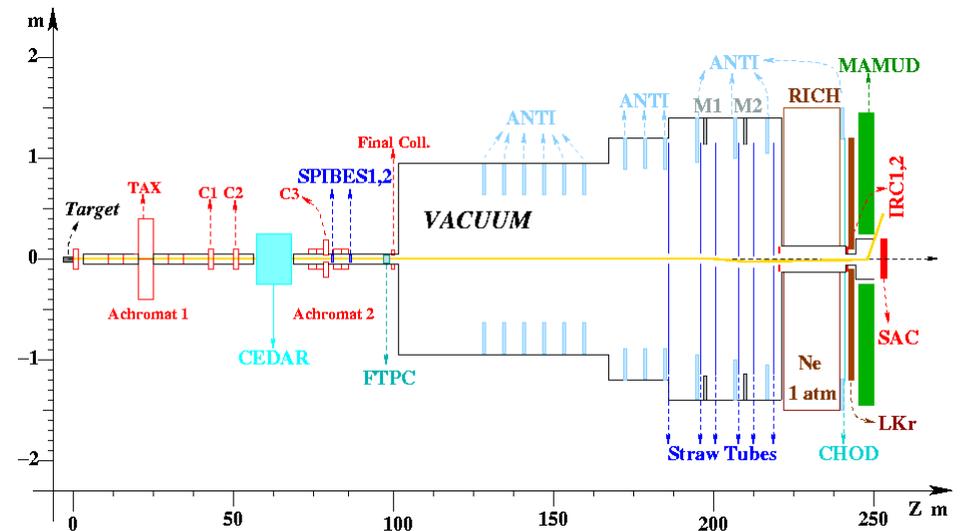
L'esperimento ZEUS a DESY usa un acceleratore dove collidono fasci di elettroni (o positroni) con una energia di 27.5 GeV e protoni con energia di 920 GeV per studiare la struttura del protone.



*Vista tridimensionale dell'esperimento ZEUS*

L'esperimento prenderà dati fino all'estate 2007. Quest'anno, oltre a misurare le usuali funzioni di struttura del protone e le sezioni d'urto di Scattering Profondamente Anelastico, ci si sta concentrando sulla misura della funzione di struttura  $F_L$  con due run ad energia intermedia dei protoni (460 e 575 GeV). Continua lo studio della fotoproduzione, dei fenomeni diffrattivi e quello della produzione di Heavy Flavour (Charm e Beauty) che ora si avvale del rivelatore a microvertice di silicio. Si investigano inoltre gli stati finali adronici e i jet, e più in generale si fanno test di QCD. Si cercano infine fenomeni e particelle oltre il Modello Standard (per esempio i Leptoquark, previsti in un certo numero di estensioni). Gli studenti

interessati possono svolgere lavoro di analisi sui dati raccolti, su uno degli argomenti appena menzionati.



*Vista schematica del rivelatore LHCb*

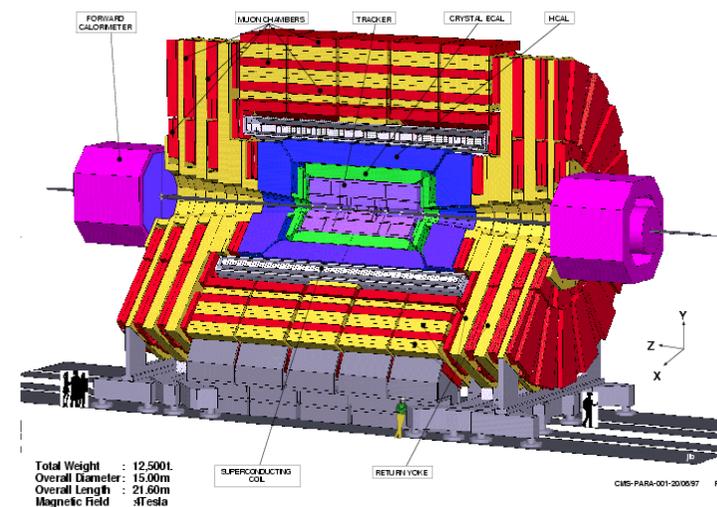
L'esperimento NA48 al CERN studia una caratteristica fondamentale delle interazioni deboli che spiega il diverso comportamento tra materia ed antimateria. Questo fenomeno può aver avuto un ruolo essenziale nello sviluppo dell'universo conosciuto ed insieme ad altri fenomeni, quali il decadimento del protone, può spiegare la mancata osservazione di antimateria nel cosmo. L'asimmetria materia-antimateria viene studiata da NA48 nei decadimenti dei mesoni K. Con i dati raccolti tra il 1997 ed il 2001 si è scoperta una forma di asimmetria materia-antimateria, detta violazione diretta di CP, raccogliendo diverse decine di milioni di decadimenti in 2 pioni di mesoni K neutri, sia del tipo a vita media lunga che del tipo a vita media breve. Questa scoperta è considerata uno degli avanzamenti più importanti nella conoscenza della Fisica

delle Particelle Elementari e delle Interazioni Fondamentali degli ultimi anni. I dati raccolti nel 2002 sono stati invece utilizzati per la ricerca di alcuni decadimenti super-rari del mesone K neutro a vita media più breve. Nel 2003 e 2004 sono stati studiati i decadimenti dei mesoni K carichi in tre pioni mettendo dei limiti molto significativi sulla differenza, in questi decadimenti, tra il  $K^+$  ed il  $K^-$ . Nel 2007 NA48 prenderà dati per misurare con grande precisione il decadimento del K carico in un elettrone ed un neutrino, processo per il quale la supersimmetria predice effetti misurabili

## 2. Esperimenti in partenza

Il gruppo di Fisica delle Alte Energie di Firenze è coinvolto in due importanti esperimenti in fase di installazione e test al CERN, che cominceranno la presa dati nel 2008: CMS e LHCb. E' inoltre coinvolto in un piccolo esperimento che verrà installato sempre al Cern (LHCf), interdisciplinare tra la fisica delle particelle e la fisica dei raggi cosmici.

L'esperimento principale che coinvolge il gruppo di Firenze è il Compact Muon Solenoid (CMS). Questo esperimento utilizzerà il futuro acceleratore LHC, il più grande acceleratore di protoni mai costruito, in fase di test al CERN e che comincerà a funzionare nel 2008. In LHC due fasci di protoni si scontrano ad energie mai raggiunte fin'ora. CMS è stato progettato per rivelare il maggior numero possibile di reazioni fisiche nello scontro tra i protoni. Si potranno così scoprire un gran numero di nuove particelle elementari predette da modelli fisici che cercano di spiegare le incongruenze del cosiddetto Modello Standard, la teoria ad oggi più accreditata per spiegare i costituenti e le interazioni fondamentali della natura. In particolare si spera di poter finalmente rivelare la particella di Higgs, e di osservare le particelle previste dalla Supersimmetria.



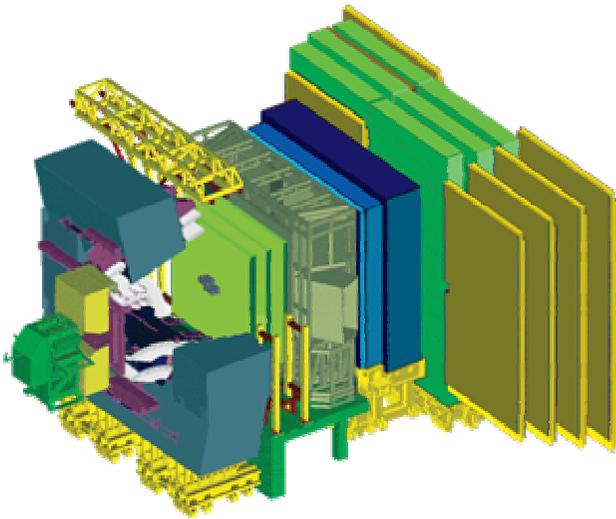
*Vista in sezione dell'esperimento CMS*

La partecipazione all' esperimento riguarda il test, il controllo e la manutenzione di uno degli elementi fondamentali dell'esperimento, cioè il tracciatore al silicio, il più grande e più complesso apparato con rivelatori a stato solido mai realizzato fin'ora, che è stato in gran parte progettato e realizzato a Firenze. Altrettanto importante è la partecipazione alla realizzazione del software necessario per la ricostruzione dei dati e per l'analisi dei processi fisici, che sfrutta le più avanzate tecnologie di calcolo (ad esempio la GRID)

Il secondo importante esperimento a cui partecipa il gruppo di Firenze è LHCb.

LHCb è un esperimento concepito per studiare l'asimmetria materia-antimateria ("violazione della simmetria CP") nel decadimento dei

mesoni B, ad LHC. LHC è un acceleratore ideale per produrre un numero enorme di mesoni B ( $10^{12}$  all'anno !) e permette quindi di fare misure di grande precisione con queste particelle. Lo studio dettagliato di decadimenti estremamente rari del mesone B permetterà di mettere in evidenza eventuali processi fisici non previsti dal Modello Standard contribuendo così alla scoperta di nuove particelle in modo complementare a quanto fatto da CMS. Il cuore dell'esperimento LHCb è il sofisticatissimo sistema di trigger che consente di individuare i mesoni B in un "fondo" di altre particelle che è 2000 volte più grande. Uno degli elementi fondamentali del trigger è il rivelatore di muoni che è stato in gran parte costruito a Firenze.



*Vista schematica del rivelatore LHCb*

La partecipazione all'esperimento riguarda il test del rivelatore per muoni, la realizzazione del software di acquisizione e di controllo della qualità dei dati e l'analisi di processi fisici.

Il terzo esperimento a cui partecipa il gruppo di Firenze è LHCf, che è il più piccolo esperimento che sarà installato su LHC. L'esperimento verrà posizionato simmetricamente a 140 m dal punto di interazione dei fasci di protoni, e studierà le particelle prodotte a piccolissimo angolo nelle interazioni protone-protone. Questo studio è importante per la comprensione dei meccanismi di interazione dei Raggi Cosmici di altissima energia con l'atmosfera terrestre. Infatti, queste particelle di elevata energia che arrivano dal cosmo vengono identificate attraverso lo studio delle loro interazioni con l'atmosfera, andando a misurare il numero e l'energia delle particelle secondarie prodotte nello sviluppo degli sciami. Due protoni di alta energia che si scontrano nel collisionatore LHC permettono di riprodurre una situazione simile a quella che si ha nell'interazione di un Raggio Cosmico di altissima energia ( $E > 10^{17}$  eV) con l'atmosfera.

Il gruppo di Firenze si è in particolare occupato della progettazione e produzione del sistema di rivelazione del punto di impatto delle particelle sull'apparato, realizzato con un insieme di rivelatori al silicio a microstrisce.

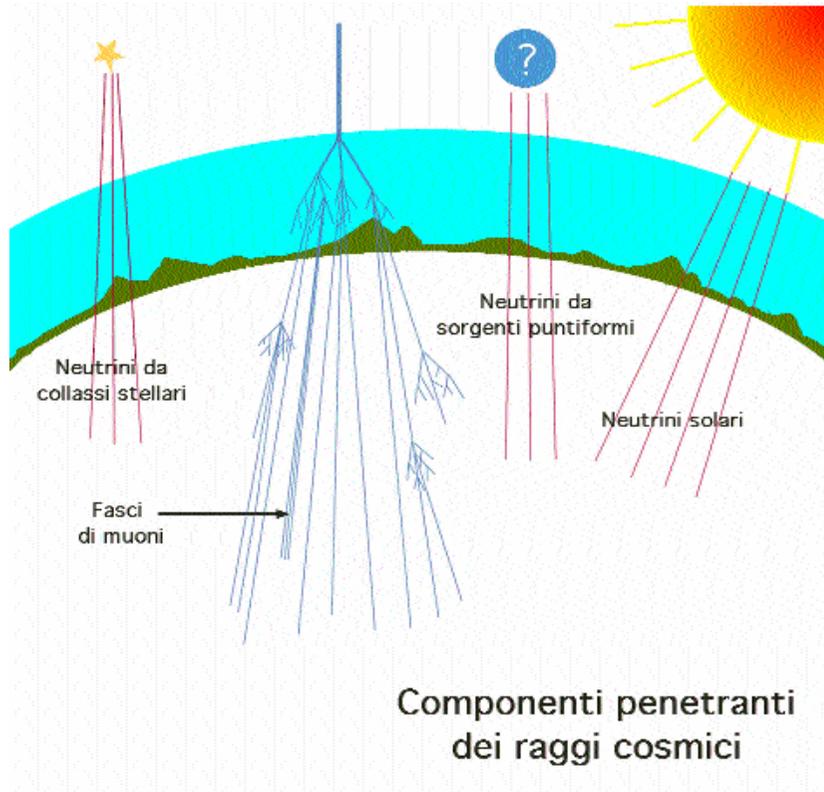
### 3. Esperimenti futuri

Il gruppo di Fisica delle Alte Energie ha allo studio un miglioramento di NA48 chiamato per il momento P326 che avrà il compito di studiare un decadimento super-raro del K carico, quello in un pione carico ed una coppia neutrino-antineutrino che costituisce il canale più importante da studiare per capire la fisica dei flavor, l'asimmetria materia-antimateria e per trovare segnali di nuova fisica. Un ingrediente fondamentale del nuovo esperimento sarà il più grande rivelatore Cherenkov del tipo RICH mai realizzato, la cui progettazione e costruzione è guidata dal gruppo di Firenze.

L'attività del gruppo di Fisica delle Alte Energie permette agli studenti e ai neolaureati coinvolti negli esperimenti di acquisire competenze nel campo dei sistemi di acquisizione dati, nel campo dell'elettronica sia logica che digitale e nel campo informatico. In tutti questi campi i livelli di conoscenza che vengono acquisiti sono al "top" delle moderne tecnologie.

## Fisica dei raggi cosmici

Lo studio delle particelle provenienti dal cosmo è complementare alle ricerche effettuate agli acceleratori di alta energia; infatti i raggi



cosmici sono costituiti da oltre 400 specie diverse di particelle, **con energie anche ben superiori alle energie che è possibile ottenere agli acceleratori**. L'indagine dei raggi cosmici permette quindi di ricavare una quantità molto vasta di informazioni di grande interesse sia in campo astrofisico che cosmologico. In particolare lo studio della composizione e degli spettri dei raggi cosmici permette di aprire una finestra di osservazione sull'universo, fornendo un banco di prova per le varie teorie sull'origine dell'universo e sulla struttura delle galassie.

Gli esperimenti sui raggi cosmici in cui è coinvolto il gruppo di Firenze seguono essenzialmente due distinte linee di ricerca; la prima è basata su **misure dirette di raggi cosmici in orbita o in alta atmosfera** (collaborazione WiZard), la seconda è volta allo **studio di raggi cosmici di energia estrema** attraverso lo studio dello sciame secondario prodotto nell'atmosfera.

### 1) Misure dirette di raggi cosmici.

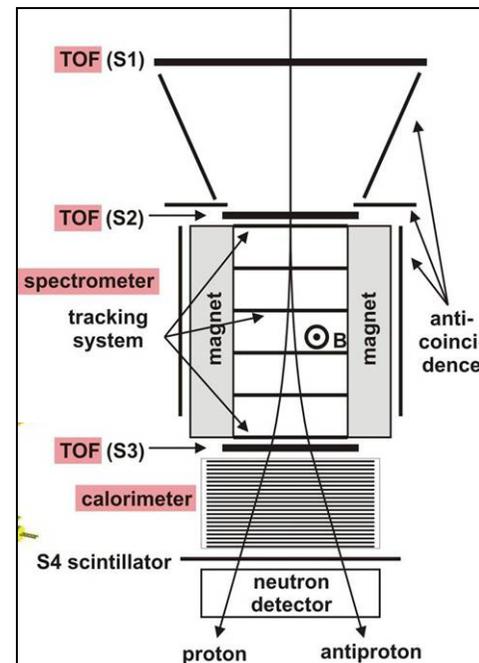
Il programma della collaborazione WiZard è incentrato sulla misura diretta degli spettri di raggi cosmici, con lo scopo primario di misurarne le componenti di **antimateria**, identificando antiprotoni, positroni ed eventualmente antinuclei, e di determinare gli spettri energetici di particelle e antiparticelle. Il programma della collaborazione si sviluppa attraverso diversi esperimenti:

- ✓ misure su **pallone stratosferico ad alta quota** (40 km) per l'identificazione di antiprotoni e positroni di energia inferiore a 20 GeV (rivelatore **CAPRICE**), effettuati più volte nel corso degli anni passati;
- ✓ misure **in orbita** con l'apparato **PAMELA**, il cui lancio è stato effettuato nel corso del 2006 dalla base spaziale di

Bajkonour, nel Kazakhstan. L'esperimento è dedicato alla misura precisa di **antiprotoni e positroni fino a oltre 200 GeV con alta statistica**, e alla ricerca di antinuclei. Il rivelatore orbiterà per un periodo di circa tre anni attorno alla terra a un'altezza compresa fra 350 e 600 km per permettere lo studio delle particelle primarie escludendo le interazioni con l'atmosfera terrestre. La parte centrale dell'esperimento è uno spettrometro magnetico, realizzato con un magnete permanente e con un sistema preciso di ricostruzione della traiettoria delle particelle realizzato con rivelatori al silicio a microstrisce. Complementano l'apparato un calorimetro elettromagnetico e un sistema per la misura della velocità delle particelle. Combinando tra loro le informazioni di tutti i vari rivelatori è possibile identificare il tipo di particella che ha attraversato lo strumento e misurarne la sua energia. Pamela, attualmente nella fase di presa dati, consentirà di ottenere nuovi e più precisi risultati sulle abbondanze di antiparticelle nei raggi cosmici, permettendo di verificare in maniera quantitativa le previsioni delle teorie cosmologiche sulla presenza di antimateria nell'Universo.

Gli studenti potranno inserirsi nel lavoro di analisi dei dati che l'apparato invia giornalmente a terra nelle stazioni riceventi di Mosca;

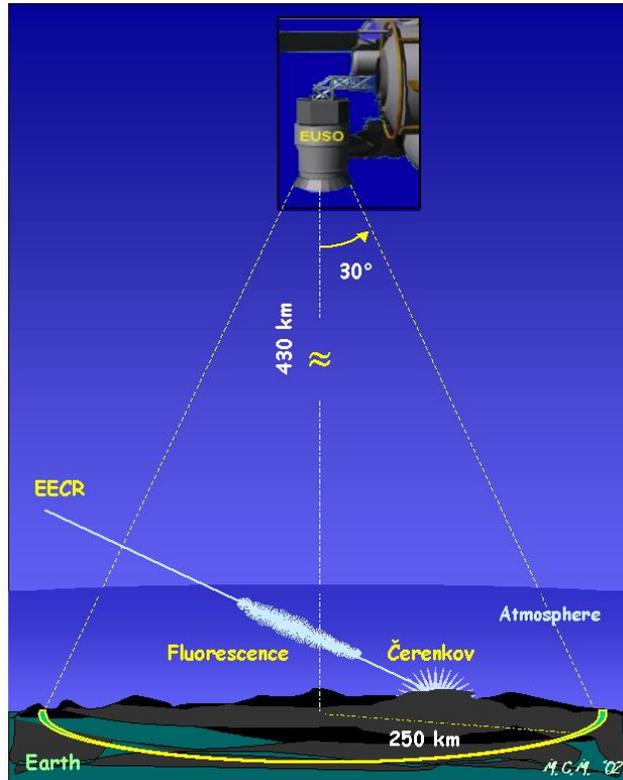
- ✓ misure di raggi cosmici **a terra** con lo spettrometro magnetico **ADAMO**, con lo scopo di determinare lo spettro energetico dei raggi cosmici secondari, prodotti dell'interazione delle particelle di origine galattica con l'atmosfera terrestre.



*Disegno schematico e fotografia dell'apparato PAMELA, composto da vari sottorivelatori che consentono l'identificazione delle particelle cosmiche.*

## 2) Studio di raggi cosmici di energia estrema

L'esperimento AIRWATCH è dedicato allo studio della componente di energia estrema ( $E > 10^{20}$  eV) dei raggi cosmici. La natura e la provenienza di questi raggi cosmici di immane energia rappresenta attualmente un problema insoluto. In particolare rimane inspiegabile



*Schema di principio dell'esperimento AIRWATCH*

come queste particelle possano propagarsi nel cosmo senza l'inevitabile interazione con la radiazione cosmica di fondo che ne dovrebbe degradare l'energia. La frequenza di eventi di tale energia è circa di una particella per secolo per chilometro quadrato, e lo studio sistematico di tali fenomeni richiede apparati di rivelazione di enorme estensione. L'esperimento AIRWATCH si propone di osservare dallo spazio la luce di fluorescenza prodotta in atmosfera dagli sciame giganti di particelle indotti dalle interazioni dei raggi

cosmici primari. Con tale tecnica innovativa è possibile osservare una superficie di estensione superiore a  $100000 \text{ km}^2$  e una massa di atmosfera superiore a 1000 tonnellate. Un progetto per la realizzazione di tale esperimento è stato proposto all'Agenzia Spaziale Europea ed è in attesa di approvazione.

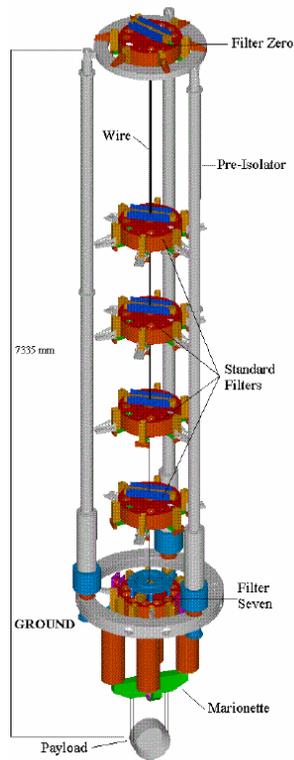
## Fisica delle onde gravitazionali

L'esistenza delle onde gravitazionali (OG) è stata prevista da Einstein nel 1916, ma non è mai stata provata da una misura diretta. Oggi disponiamo solo di una misura indiretta fornita dalla osservazione della pulsar binaria PSR1913+16. A causa della debolissima interazione delle OG con la materia, la rivelazione delle OG richiede apparati di sensibilità particolarmente elevata, in grado di misurare spostamenti dell'ordine di  $10^{-18} \text{ m}$ . La tecnologia attuale permette di realizzare rivelatori interferometrici con queste prestazioni.

### 1) VIRGO

Nella piana di Cascina (PI) è stato realizzato VIRGO, un rivelatore interferometrico di OG a due bracci ortogonali, ciascuno lungo 3 km, che potrà rivelare OG nella banda 10 Hz-5 kHz. Insieme all'americano LIGO sarà il rivelatore di OG più sensibile al mondo. VIRGO si pone naturalmente l'ambizioso obiettivo della *first detection*, ma, soprattutto, mira ad aprire la strada ad una astronomia ad OG.

Raggiungere la sensibilità di progetto comporta saper ridurre tutti i rumori ai limiti consentiti dalla tecnologia. L'attività sperimentale copre una vasta area di attività e competenze: dall'ottica alla fisica dei materiali, dall'elettronica a basso rumore alla teoria dei controlli. Nel Maggio 2007 è iniziata una serie di run in coincidenza con LIGO, l'esperimento americano di pari classe, e la successiva attività di analisi dati sarà incentrata sulla ricerca dei segnali di OG in coincidenza. Il gruppo di Firenze/Urbino è attivamente impegnato



*Veduta aerea del rivelatore VIRGO, nella piana di Cascina (PI)*

*Il Superattenuatore: la sospensione degli specchi di VIRGO progettata per estendere il limite inferiore della banda di sensibilità*

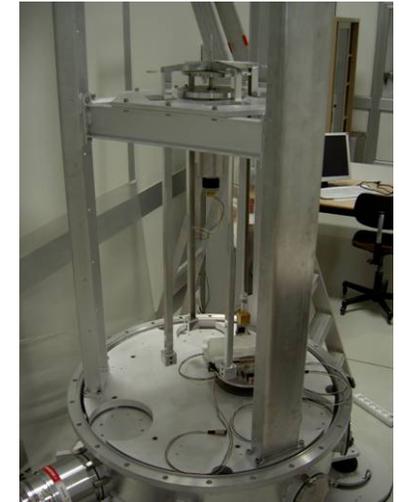
nell'esecuzione dei run di VIRGO e nell'analisi dei dati; nei laboratori Virgo di Sesto esse sta inoltre sviluppando una attività sperimentale che riguarda lo studio di nuovi materiali poco dissipativi per la riduzione del rumore termico in interferometri di seconda generazione.

## 2) LISA

Non solo da terra, ma anche dallo spazio si cercano le OG. NASA ed ESA, le agenzie spaziali americana ed europea, stanno lavorando al progetto LISA: un interferometro spaziale, in orbita intorno al Sole, ad una distanza di 1 AU dal sole: un'orbita di tipo terrestre.

L'interferometro è costituito da tre satelliti, distanti 5 milioni di chilometri l'uno dall'altro, e sarà sensibile a OG di frequenza molto bassa: da 0.1 mHz, a 0.1 Hz: sarà dunque complementare alle antenne gravitazionali terrestri, ed osserverà le OG emesse da fenomeni che coinvolgono oggetti massicci (come cattura di stelle

*Strumenti di test al suolo per LISA a Firenze: il pendolo roto-traslazionale*



da parte di buchi neri di grande massa), o molto lenti, come la rivoluzione di due stelle nane bianche intorno al comune centro di massa. Il lancio dei satelliti di LISA è previsto intorno al 2015, e sarà preceduto da una missione esplorativa, LISA Pathfinder, che collauderà in volo alcune componenti di LISA, e che verrà lanciato nel 2009.

Numerosi sono i problemi da risolvere, come si può immaginare. Il gruppo di LISA di Firenze/Urbino si sta occupando sia di test a terra che riguardano l'hardware di volo, sia dello studio di quanta carica elettrica i satelliti assumono nelle loro interazioni con i raggi cosmici, e di quali conseguenze ciò può avere sulla missione.

## **Fisica Applicata**

A Firenze vengono studiate applicazioni di tecniche caratteristiche della ricerca in Fisica a campi di interesse anche pratico e sociale. Si tratta del sondaggio elettromagnetico, ottico, gamma, X o corpuscolare dell'atmosfera, di strutture del corpo umano, di oggetti di interesse storico e artistico, del territorio ecc...

Un fascio laser con lunghezza d'onda dell'ordine del micron (1 micron = 1/1000 mm) o frazione di micron o un fascio di onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda maggiore (tipicamente nell'ordine del cm o dm), può essere impiegato per illuminare una delle strutture sopraindicate allo scopo di ottenere informazioni su importanti aspetti dell'oggetto in esame.

L'informazione si ottiene esaminando le caratteristiche della radiazione diffusa o trasmessa dall'oggetto illuminato, le quali dipendono dalle proprietà dell'oggetto stesso. Analogamente radiazione come fasci di protoni, raggi X, raggi gamma inviata ad esempio su un manoscritto, un'opera d'arte, o anche un residuo di filtraggio d'atmosfera di cui si vuole rivelare il livello e la qualità della sospensione di polvere più o meno nociva, provoca da parte dell'oggetto illuminato una riemissione di radiazione che porta informazioni sullo stato e le caratteristiche di ciò che è esposto all'indagine.

Un vantaggio generale di queste tecniche è di non danneggiare minimamente quanto in esame. L'attività si rivolge in particolare alle seguenti tematiche:

- 1. Ottica di tessuti biologici e ottica dell'atmosfera***
- 2. Spettroscopia IR e di autofluorescenza su scala cellulare***
- 3. Applicazioni di tecniche nucleari***
- 4. Applicazioni mediche delle radiazioni ionizzanti***
- 5. Applicazioni di acustica.***
- 6. Applicazioni di biofisica***

## **Propagazione della luce attraverso mezzi torbidi: applicazioni all'ottica dei tessuti biologici e all'ottica dell'atmosfera**

Tutti i mezzi naturali presentano una certa torbidità per quanto riguarda la propagazione della radiazione luminosa. Nel propagarsi infatti la radiazione subisce gli effetti di assorbimento dovuti all'interazione con le molecole che costituiscono il mezzo e gli effetti di scattering prodotti dalle discontinuità dell'indice di rifrazione dovuti alla presenza di particolato in sospensione. Ne consegue che un fotone, che nel vuoto si muoverebbe indefinitamente in linea retta, a causa dei fenomeni di scattering che subisce segue delle traiettorie spezzate che possono essere anche molto caotiche e che si concludono quando il fotone viene assorbito. I principali parametri che caratterizzano la torbidità del mezzo sono la lunghezza del cammino che in media il fotone percorre prima di essere assorbito e la lunghezza del cammino che in media il fotone percorre fra due successivi eventi di scattering.

Lo studio della propagazione di radiazione luminosa nei mezzi torbidi riveste un notevole interesse applicativo, in quanto dallo studio della radiazione che si è propagata attraverso il mezzo torbido si possono ricavare preziose informazioni sulle proprietà chimiche e fisiche del mezzo. In particolare, la dipendenza dell'assorbimento dalla lunghezza d'onda della radiazione permette di determinare tipo e concentrazione di molecole responsabili dell'assorbimento, mentre dalle caratteristiche di scattering è possibile avere informazioni sulle dimensioni, concentrazione e indice di rifrazione del particolato.

Presso il Dipartimento di Fisica la propagazione della luce nei mezzi torbidi viene studiata con riferimento a diverse applicazioni.

Riportiamo alcuni esempi nel campo dell'Optica dei Tessuti Biologici e dell'Optica dell'Atmosfera.

### **Esempi di applicazione nel campo dell'Optica dei Tessuti Biologici**

Per la radiazione luminosa il tessuto biologico è un mezzo fortemente scatterante: il cammino che un fotone mediamente percorre fra due eventi di scattering è di poche decine di micron. L'assorbimento, determinato soprattutto dalla concentrazione di emoglobina, dipende fortemente dalla lunghezza d'onda della radiazione. Nel visibile l'assorbimento è molto forte e la radiazione difficilmente penetra per più di 1 mm all'interno del tessuto. Nella regione del rosso e vicino infrarosso (fra 650 e 1000 nm) invece, l'assorbimento è basso e il cammino mediamente percorso prima che il fotone venga assorbito è dell'ordine della decina di centimetri, molto maggiore di quello percorso fra due eventi di scattering. Di conseguenza la propagazione avviene con le modalità tipiche di un processo diffusivo e i fotoni, seguendo traiettorie estremamente caotiche, possono penetrare anche per alcuni centimetri all'interno del tessuto. Si osservi a titolo di esempio in Fig. 1 come appare una mano illuminata dalla luce bianca di una torcia: la componente di luce rossa riesce a transilluminare la mano. Per avere un'idea della caoticità delle traiettorie percorse si osservi in Fig. 2 un esempio di traiettorie generate con un programma di simulazione.

Studiando la radiazione che riemerge dal tessuto dopo essersi propagata all'interno è possibile avere preziose informazioni sullo stato di salute del tessuto, e in particolare sulla concentrazione e sul grado di ossigenazione dell'emoglobina. C'è un forte interesse per lo sviluppo di tecniche per la diagnostica e per il monitoraggio dei tessuti biologici basate sull'utilizzo di radiazione luminosa. La ragione principale è dovuta al fatto che la radiazione luminosa,

essendo non ionizzante, non produce danni al tessuto e permette quindi di sviluppare metodologie di misura che, essendo non invasive, possono essere usate anche con continuità.



*Fig 1. Illuminando con la luce bianca di una torcia il palmo di una mano si può osservare come la radiazione di colore rosso possa penetrare in profondità per riemergere dopo essersi propagata anche per alcuni centimetri all'interno del tessuto. Da questa radiazione si possono ottenere informazioni di interesse biomedico anche sui tessuti profondi.*

Le applicazioni per le quali si fa ricerca presso il Dipartimento di Fisica riguardano in particolare:

- Sviluppo di tecniche per monitorare la concentrazione e il grado di ossigenazione del tessuto;

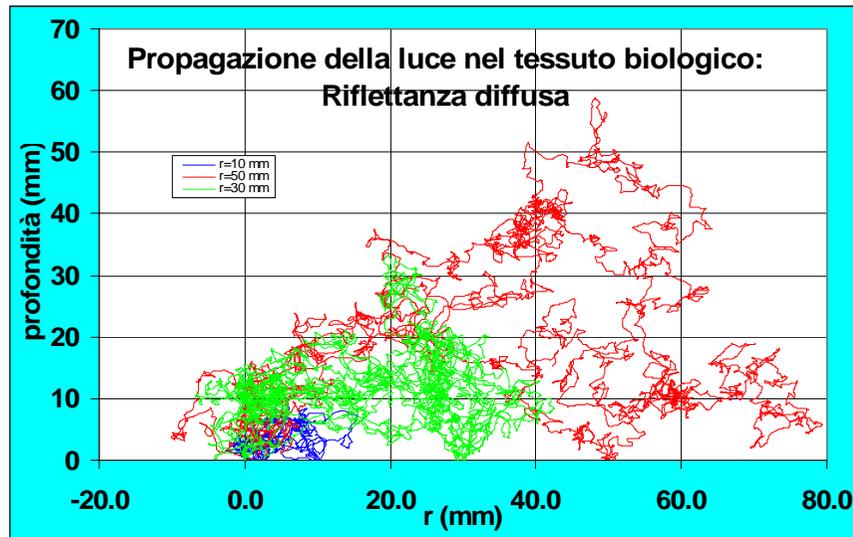


Fig.2 Esempio di traiettorie simulate con un programma Monte Carlo. Il mezzo ha proprietà di scattering tipiche del tessuto biologico. Il fascio di luce incide sul tessuto in  $r=0$ . Si riportano alcuni esempi di traiettorie di fotoni che riemergono a distanza  $r=10$ ,  $30$ , e  $50$  mm. Come si può osservare i fotoni che riemergono a distanza maggiore hanno percorso in media cammini di lunghezza maggiore e hanno raggiunto profondità maggiori all'interno del tessuto.

- Sviluppo di tecniche per l'*imaging* di tessuti biologici (es. mammografia ottica);
- Sviluppo di tecniche per l'*imaging* funzionale del cervello.

Per tutte queste applicazioni è di fondamentale importanza lo sviluppo di modelli efficienti e accurati per descrivere la propagazione della radiazione e lo sviluppo di metodologie di misura delle proprietà ottiche di mezzi diffusivi. Per quanto riguarda i modelli sono stati sviluppati sia simulatori numerici basati su

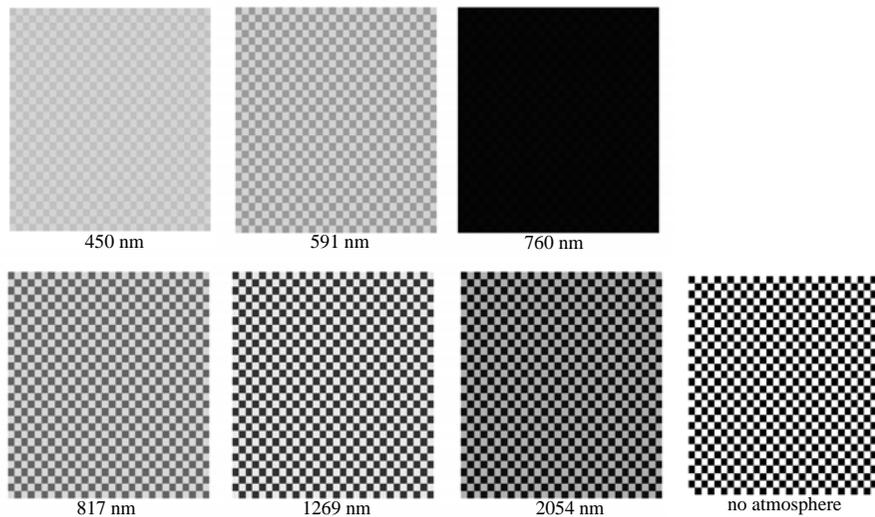
tecniche Monte Carlo che modelli analitici basati sulla soluzione dell'equazione della diffusione, sia per mezzi omogenei che disomogenei. Per quanto riguarda la misura delle proprietà ottiche sono state sviluppate diverse metodologie che possono essere utilizzate per svariate applicazioni.

### Esempi di applicazione nel campo dell'Ottica dell'Atmosfera

Anche l'atmosfera è un mezzo torbido. La presenza dei gas atmosferici e del particolato sospeso (aerosol, nubi, ecc.) complica la propagazione della radiazione luminosa. La torbidità dell'atmosfera da una parte costituisce un disturbo per molte applicazioni (es. la qualità dell'immagine del suolo terrestre presa da aereo o da satellite risulta degradata a causa degli effetti di scattering e assorbimento in atmosfera), ma dall'altra fornisce un tramite attraverso il quale indagare le proprietà chimiche e fisiche dell'atmosfera (telerilevamento).

Presso il Dipartimento di Fisica sono stati sviluppati diversi modelli basati su tecniche Monte Carlo per simulare la propagazione attraverso l'atmosfera. In particolare si è studiata la propagazione di un impulso ultracorto di radiazione, come supporto per la elaborazione dell'eco misurato da un LIDAR. Il LIDAR, o radar ottico, è un importante strumento per il telerilevamento dell'atmosfera: con un laser si inviano impulsi di radiazione luminosa in atmosfera e con un telescopio si riceve la radiazione retrodiffusa per effetto del particolato atmosferico. Dall'eco misurato si può risalire ad importanti informazioni sul particolato sospeso e sui gas atmosferici. Per fare questo è essenziale disporre di efficienti modelli di propagazione.

Un'altra applicazione ha riguardato lo studio dell'effetto dell'atmosfera su immagini multispettrali del suolo terrestre illuminato dalla radiazione solare. E' stato sviluppato un software, McCART, che permette di simulare l'immagine del suolo alle lunghezze d'onda di interesse. Un esempio di risultati è mostrato in Fig. 3.



*Fig. 3 Esempio di immagini generate col software McCART. Una superficie, costituita da pixels alternativamente bianchi e neri, è osservata da un sensore posto su satellite a 600 Km di quota. Il sole è ad un angolo di zenit di 30 gradi e l'atmosfera è moderatamente torbida (visibilità al suolo di circa 10 Km). Le immagini sono state costruite con la sola radiazione ricevuta alle lunghezze d'onda indicate. Per confronto è stata riportata anche l'immagine che si otterrebbe con atmosfera perfettamente trasparente.*

La figura mostra le immagini ricostruite usando la sola radiazione ricevuta alle lunghezze d'onda indicate. Le immagini si riferiscono ad un sensore posto su satellite a 600 Km di quota. Si può osservare

come le immagini alle lunghezze d'onda più basse siano affuscate per effetto dello scattering atmosferico (più forte a queste lunghezze d'onda) che produce una perdita di contrasto. Alle lunghezze d'onda a partire dal vicino infrarosso si hanno anche importanti effetti dovuti all'assorbimento. Si veda in particolare l'immagine a 760 nm che appare nera per effetto della forte attenuazione dovuta all'assorbimento dei gas atmosferici a quella lunghezza d'onda. Anche per queste applicazioni la disponibilità di un efficiente modello per la simulazione della propagazione costituisce il primo elemento essenziale per poter sviluppare algoritmi di elaborazione dell'immagine atti a migliorarne la qualità.

### Spettroscopia IR e di autofluorescenza su scala cellulare

Presso il Dipartimento di Fisiopatologia Clinica, accanto alle attività di ricerca riguardanti l'utilizzazione di radiazioni ionizzanti a fini diagnostici e terapeutici, è studiata, con gli stessi fini applicativi, l'utilizzazione di radiazioni e.m. entro la banda compresa tra il medio infrarosso (MIR) e l'ultravioletto (UV).

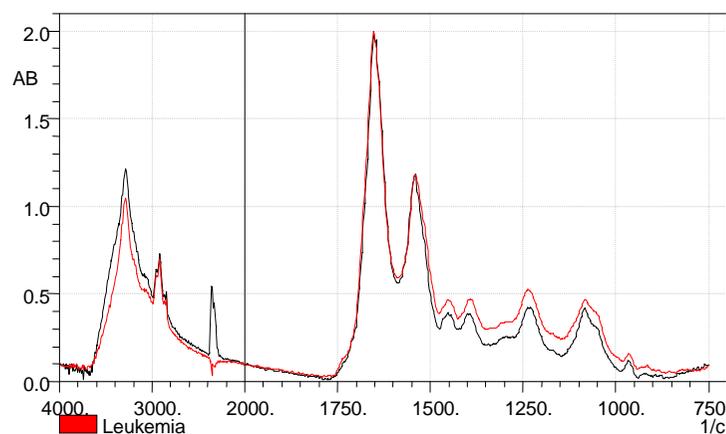
Possiamo individuare quattro diversi "indirizzi" applicativi:

1. - **Spettroscopia InfraRossa a Trasformata di Fourier (FTIRS)** su campioni biologici macroscopici (dimensioni lineari dell'ordine del centimetro) in trasmissione e microscopici (diametro del campo fino a 50  $\mu\text{m}$ ) sia in trasmissione che in riflessione. Lo spettrofotometro FTIR è della ditta Shimadzu così come il microscopio. Lo spettro di assorbimento è la sovrapposizione di innumerevoli bande derivanti dall'eccitazione di tipo vibrazionale di gruppi funzionali individuabili in base alla energia del picco di banda. Lo spettro IR è quindi in grado di fornire informazioni di carattere strutturale cumulative dei numerosi costituenti macromolecolari appartenenti alla cellula in toto. L'informazione è

per lo più disseminata nella parte spettrale detta "fingerprint" (tra 1800 e 800  $\text{cm}^{-1}$ ). Questo fatto conferisce una apparente indistinguibilità tra spettri derivanti da tipi cellulari anche molto differenti. Ciononostante la differenza nel contenuto di informazione è recuperabile mettendo in atto tecniche statistiche multivariate (clusterizzazione, analisi fattoriale ed altre fino all'uso di reti neurali).

Misure di questa tipologia sono state effettuate su colture cellulari indifferenziate (linea FLG29.1) derivanti da linfociti umani di un soggetto leucemico allo scopo di verificare se un fattore differenziante verso il comportamento osteoclasto-simile potesse alterare la morfologia della risposta spettrale, con risultato affermativo. Allo stesso modo sono state evidenziate differenze significative tra porzioni di tessuti istologicamente sani e tumorali che coinvolgono frequentemente le bande più evidenti degli acidi nucleici.

Al momento è in atto una collaborazione con colleghi di medicina e



biologia per caratterizzare spettroscopicamente eventuali differenze tra linfociti "normali" e appartenenti a pazienti affetti da leucemia mieloide acuta (vedi figura). Allo stesso modo stiamo

caratterizzando gli spettri di cellule leucocitarie (linfociti monociti, granulociti), previa separazione a monte dallo stesso campione ematico, per identificare eventuali differenze tra soggetti normali e soggetti settici, al fine di ottenere un tassello informativo supplementare su questa alterazione del sistema immunitario o, al limite, usare questa informazione empirica, se riproducibile, per seguire il decorso della setticemia.

Nel tentativo di individuare variazioni nella struttura della sola membrana cellulare stiamo mettendo a punto una tecnica di superficie mediante l'utilizzo di un obiettivo ATR che sfrutta l'assorbimento superficiale delle cellule depositate sulla faccia di un cristallo sulla quale si è prodotta un'onda evanescente, dovuta alla riflessione totale sulla stessa faccia all'interno del cristallo medesimo.

Avendo la possibilità di programmare micrometricamente gli spostamenti della piattaforma del microscopio secondo due direzioni orizzontali ortogonali, è possibile acquisire ed elaborare i dati misurati per produrre immagini anche spettroscopiche (cioè per ciascuna banda di assorbimento significativa) su strati cellulari macroscopici o su fette tissutali di pochi micron di spessore ottenute con tecniche crioscopiche (per es. noduli linfatici nella leucemia o nella sepsi).

## 2. - Analisi Microspettroscopica di fluorescenza naturale.

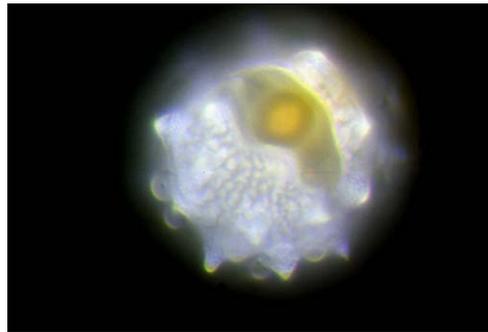
Nelle cellule avvengono sequenze sia di catabolismo sia di anabolismo dei processi di ossido riduzione. In questi processi, la piridina, insieme con altri coenzimi carrier di elettroni (FAD etc.), viene sottoposta a trasformazioni cicliche da stato ossidato a ridotto e viceversa. Seguire il pool dei differenti coenzimi intracellulari (NAD, NADH(f), NADH(b)) e le loro mutue relazioni permette di valutare lo stato redox cellulare, che è correlato allo stato fisiologico della cellula. L'analisi in autofluorescenza è un metodo interessante per seguire in tempo reale il pool dei coenzimi intracellulari, per le

loro diverse caratteristiche di fluorescenza sia come efficienza quantica sia come spettro

Questa tecnica, che può fornire informazioni di carattere funzionale, è stata ed è adottata in parallelo alla microspettroscopia FTIR descritta in precedenza, al fine di tentare di ottenere una conferma reciproca dei modelli posti in essere, nonostante la differenza di scala spaziale alla quale le due tecniche possono essere adottate.

L'apparato sperimentale si compone di un microscopio per epifluorescenza dotato di obiettivi ad immersione ad alta apertura numerica. Per le misure su cellule vitali viene utilizzato un microincubatore Biopchs che permette di avere condizioni controllate in temperatura e perfusione. La sorgente di eccitazione è costituita da una lampada a vapori di mercurio, con filtri interferenziali per selezionare le lunghezze d'onda. La fluorescenza raccolta dall'obiettivo può essere inviata alternativamente alla camera CCD digitale, o, tramite fibra ottica, allo spettrometro. La CCD è munita di cambia-filtri computerizzato per l'acquisizione di immagini entro bande differenti, la cui ricombinazione in una singola immagine a colori consente di ottenere un incremento notevole del potere discriminante spaziale. Tutto il sistema è gestito da computer.

Gli spettri di fluorescenza sono analizzati con procedure di deconvoluzione, usando spettri di riferimento, ottenuti da campioni puri dei fluorofori endogeni e con tecniche di accordo con forme gaussiane per definire i picchi relativi e le larghezze di banda. I parametri così ottenuti sono usati per valutare il contributo relativo delle singole componenti spettrali all'intera emissione di fluorescenza:



### 3. - Ricostruzione di immagini tridimensionali di fluorescenza

Le tecniche di microscopia classica forniscono una visione bidimensionale dell'oggetto osservato. Le cellule, pur contenendo in un volume approssimativo di  $500 \mu\text{m}^3$  un gran numero di strutture, risultano semitrasparenti nel visibile ed i relativi spettri di assorbimento, trasmittanza e riflettanza, presentano un rapporto segnale rumore estremamente basso. Le tecniche isto-citologiche classiche (fissazione e colorazione) accoppiate con la microscopia bidimensionale producono una immagine della struttura cellulare in parte distorta, a causa del trattamento, e proiettata su un solo piano fornendo informazioni morfologico-strutturali. Non rispondente alla complessità tridimensionale.

Le sole tecniche che attualmente consentono una visione tridimensionale (3D) dell'oggetto osservato sono la microscopia elettronica a scansione, limitatamente allo studio delle superfici, e la microscopia confocale, applicata generalmente a cellule marcate con fluorofori esogeni specifici. In entrambi i casi le intensità di eccitazione utilizzate sono troppo elevate per essere compatibili con lo stato di vitalità di qualsiasi cellula.

Per realizzare questo sistema di microscopia 3D è stato seguito un metodo alternativo al microscopio confocale, che si basa sull'uso di un microscopio convenzionale e di una sofisticata elaborazione delle immagini. Il microscopio convenzionale rivela la luce proveniente da vari piani, anche sopra e sotto il piano focale. L'informazione contenuta nella luce fuori-fuoco, che non è utile nella visione 2D e che viene eliminata nel sistema confocale, viene invece utilizzata per ricostruire l'immagine a fuoco del campione mediante deconvoluzione. Con l'uso di un sistema optomeccanico di scansione di profondità, vengono acquisite e memorizzate un certo numero di immagini di fluorescenza, in base alla risoluzione spaziale desiderata. Successivamente, le varie immagini bidimensionali vengono processate in modo da ottenere

un'immagine 3D, con qualità paragonabile a quelle ottenibili con un microscopio confocale.

#### **4. - Terapia fotodinamica**

In collaborazione con l'Azienda Ospedaliera di Careggi è stata messa a punto una sorgente con filtri intercambiabili e uscita in fibra ottica con la possibilità di regolare l'intensità del fascio emergente da utilizzare come luce di eccitazione di particolari traccianti che, accanto alla risposta di fluorescenza, presentano anche una seconda via di diseccitazione, producendo un radicale libero (ossigeno di singoletto) altamente reattivo e tossico per le strutture biologiche. Questo è il fenomeno sul quale si innesta la terapia fotodinamica, in particolare di tumori di superficie (p.e. melanomi). Cospargendo un gel, contenente il tracciante, sulla superficie in questione e illuminando con la luce di eccitazione si può giungere alla distruzione totale delle cellule tumorali. La tecnica può funzionare anche con somministrazione per via sistemica del tracciante purchè il carrier sia altamente selettivo nei confronti del tessuto tumorale, la mucosa sia accessibile alla luce (p.es. esofago, bronchi etc.) e sufficientemente trasparente per i tumori più profondi.

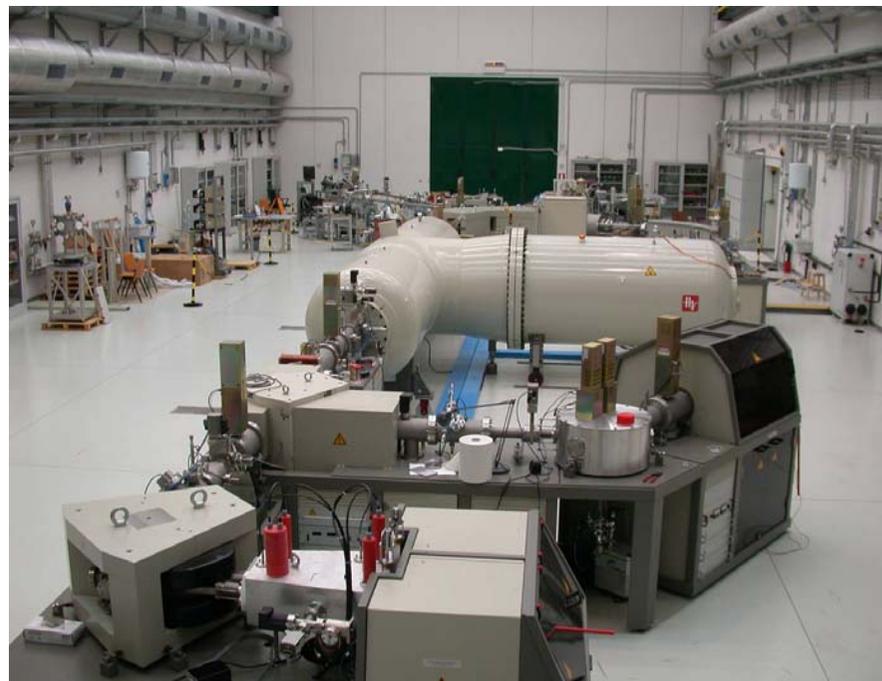
La ricerca chimica e fotobiologica è rivolta ad ottenere questo risultato migliorando entrambi i fronti di attacco.

#### **Applicazioni di tecniche nucleari**

Presso il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Firenze è installato un acceleratore di particelle di tipo Tandetron, con 3 milioni di Volt di tensione massima.

Il laboratorio, gestito dalla Sezione di Firenze dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare in convenzione con l'Università, ha il nome LABEC, che significa LABoatorio di tecniche nucleari per i BENi Culturali; vi si svolgono però attività anche in altri settori applicativi

come lo studio dell'inquinamento atmosferico, la geologia, la scienza dei materiali in genere.



*Veduta generale della sala misure dell'acceleratore Tandetron di Firenze*

Al LABEC, mediante le tecniche cosiddette di Ion Beam Analysis (IBA), si è in grado di analizzare in maniera quantitativa e non distruttiva, e in tempi brevissimi (da qualche secondo a qualche minuto per misura) la composizione di ogni tipo di materiale. Il principio su cui si basano le tecniche IBA è il seguente: gli atomi, o i nuclei, di un "bersaglio" colpito da un fascio di particelle energetiche (quali ad esempio protoni o particelle alfa, accelerati

dalla nostra macchina), emettono raggi X, raggi gamma o particelle cariche, di energie caratteristiche dell'atomo, o nucleo, "bombardato". Analizzando le energie delle radiazioni emesse sotto bombardamento del fascio di particelle, si riesce perciò a scoprire la composizione del materiale bersaglio. L'analisi è molto sensibile, quantitativa, multi-elementale (cioè in grado di determinare in un campione, con una sola misura, la presenza e la quantità di pressoché tutti gli elementi della tavola periodica) e completamente "innocua" per il bersaglio bombardato: il campione analizzato non subisce alcun deterioramento in seguito all'analisi. Per questo motivo, in particolare, si può senza problemi analizzare la composizione di oggetti preziosi, di interesse artistico o storico, per i quali non sono permessi prelievi di materiale da destinare all'analisi



*Una lettera di Galileo durante l'analisi della composizione dell'inchiostro, effettuata nel laboratorio con l'acceleratore. L'informazione che si raccoglie sulla composizione degli inchiostri di lettere di varie date è usata per confrontarla con quella degli inchiostri in documenti non datati. Il confronto può consentire di collocarli cronologicamente: si è verificato infatti che una determinata composizione di inchiostro caratterizza un determinato periodo (in genere dell'ordine di qualche mese)*

né sarebbe possibile effettuare un'analisi chimica distruttiva. D'altro canto, la conoscenza di tale composizione porta preziose informazioni storiche: esistenza o meno di determinate materie prime nel luogo di produzione, esistenza di canali commerciali con altri luoghi lontani, sviluppo di determinate "tecnologie" di fabbricazione nel passato, attribuzioni cronologiche indirette, fino alla scoperta di possibili falsi o artefatti.

Come esempio citiamo le analisi, effettuate con misure di *Particle-Induced X ray-Emission* (PIXE), della composizione degli inchiostri in un'importante raccolta di manoscritti di Galileo contenenti i suoi personali appunti "scientifici" sui problemi del moto (note di esperimenti, calcoli, bozze di teoremi). Con queste misure si è potuto portare un contributo importante alla ricostruzione cronologica dei vari appunti.

Di recente, grazie anche allo sviluppo di set-up innovativi e unici al mondo (ad esempio un punto di misura con un microfascio esterno di particelle, di dimensioni di circa un centesimo di millimetro), si sono realizzate misure di avanguardia su preziose tavole pittoriche rinascimentali (un dipinto di Leonardo e uno di Antonello da Messina), ottenendo informazioni molto importanti per conoscerne la tecnica pittorica e per effettuare correttamente gli interventi conservativi.

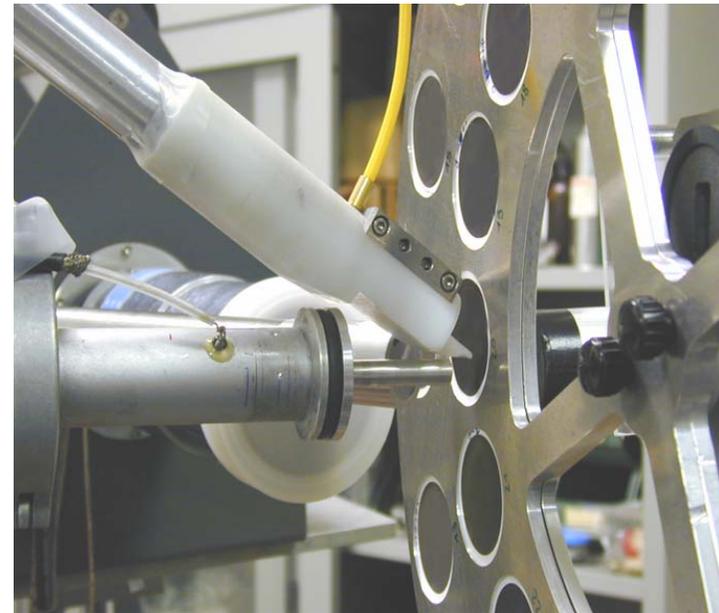
Altri tipi di analisi IBA che si effettuano nel laboratorio riguardano la composizione degli aerosol atmosferici (raccolti su opportuni filtri che vengono poi bombardati dal fascio dell'acceleratore) per determinare il loro impatto sulla salute, sull'ambiente, e individuarne le sorgenti. Grazie alla rapidità delle tecniche di analisi è possibile analizzare lunghe serie temporali (stagioni/anni) di campioni giornalieri, per più siti di campionamento e quindi ottenere risultati rappresentativi. Inoltre, grazie all' elevata sensibilità e alla

*Il dipinto Madonna dei Fusi di Leonardo durante le misure IBA con fascio esterno all'acceleratore di Firenze*



*Il dipinto "Ritratto Trivulzio" di Antonello da Messina, durante le analisi IBA al punto di misura con microfascio esterno del laboratorio LABEC di Firenze.*

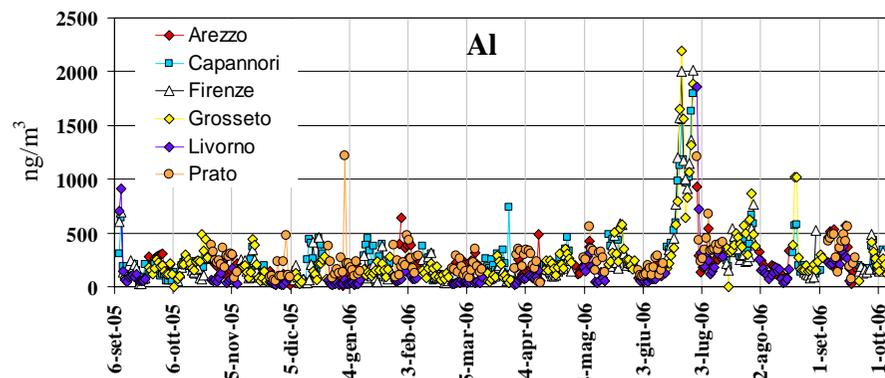
possibilità di analizzare il campione 'puntualmente' è possibile analizzare campioni raccolti con elevata risoluzione temporale (oraria) e con separazione per classe dimensionale. Infine, grazie alla simultanea determinazione in un campione di numerosi elementi, è possibile stabilire correlazioni che spesso portano alla identificazione della causa dell'inquinamento.



*Il set-up per le misure di campioni di aerosol atmosferico. I campioni sono analizzati direttamente senza alcun pretrattamento.*

Il nostro gruppo di ricerca lavora in questo settore ormai da diversi anni, occupandosi dello sviluppo delle tecniche analitiche e partecipando a specifiche campagne di studio del particolato atmosferico che hanno portato a risultati rilevanti. È stato studiato l'aerosol presente in ambienti urbani (Firenze, Genova, La Spezia,

Milano, Napoli, Siviglia, Madrid, Elche), industriali (Montelupo Fiorentino, acciaierie di Genova e Taranto) e remoti (Monte Cimone, Lampedusa, Antartide, Sahel), in collaborazione con le Agenzie Regionali per la Protezione Ambientale e con altri enti di ricerca Italiani e stranieri.



*Le concentrazioni dell'elemento alluminio ottenute tramite la tecnica PIXE nell'ambito di una campagna riguardante 6 città toscane (progetto PATOS) nel periodo settembre 2005-ottobre 2006. Il picco di concentrazione presente è dovuto a un episodio di trasporto di aerosol dal Sahara che è stato possibile mettere in evidenza grazie alle nostre misure.*

Il nuovo acceleratore Tandatron da 3 MV el LABEC, che ha sostituito una più anziana macchina acceleratrice, con la quale fino al 2003 le tecniche IBA erano applicate nel vecchio laboratorio di Arcetri, oltre ad aver grandemente potenziato le prestazioni del laboratorio per quanto riguarda queste tecniche ha anche la possibilità di effettuare un altro tipo di misure, quelle cosiddette di spettroscopia di massa con acceleratore (inglese Accelerator Mass Spectrometry, acronimo AMS). Con questa tecnica si è potuta

avviare un'attività di datazione di reperti archeologici col metodo del  $^{14}\text{C}$ , che ha già portato importanti contributi nell'ambito di collaborazioni con sovrintendenze, istituti religiosi, dipartimenti archeologici universitari. La tecnica AMS raggiunge limiti di rivelabilità impressionanti, dell'ordine di una parte su  $10^{15}$ : questo permette nel caso della datazione con  $^{14}\text{C}$  di "sacrificare" per l'analisi quantità trascurabili dei campioni da datare (meno di 1 mg) e i tempi di misura sono molto brevi, permettendo così l'analisi di un elevato numero di campioni.

### Applicazioni mediche delle radiazioni ionizzanti

Le applicazioni della Fisica in Medicina sono molteplici; molte sono legate all'uso delle radiazioni ionizzanti, sia nel campo della diagnostica che in quello della terapia. I settori d'attività coinvolti sono essenzialmente la Radiologia, la Medicina Nucleare, la Radioterapia. I fisici vi apportano il loro contributo professionale, metodologico e di ricerca.

Dalla scoperta dei raggi X nel 1895 e della radioattività naturale nel 1896 le radiazioni ionizzanti sono state largamente usate per la salute dell'uomo, ma, a dispetto delle potenzialità e dei vantaggi offerti, ben presto utilizzatori e scienziati si sono accorti degli effetti dannosi cui possono dar luogo. E' diventato quindi di vitale importanza lo sviluppo di conoscenze e normative radioprotezionistiche, che consentano di lavorare in sicurezza con le sorgenti di radiazione. Anche per questo aspetto è fondamentale l'apporto del Fisico.

La **diagnostica radiologica** tradizionale forniva immagini proiettive delle strutture attraversate dal fascio di raggi X su pellicole radiografiche, sovrapponendo le informazioni provenienti da piani diversi. Grazie allo sviluppo di nuovi rivelatori e alla potenza di calcolo dei computer è stata poi rivoluzionata negli anni '70

dall'introduzione della tomografia computerizzata (CT), che consente di ottenere immagini morfologiche di sezioni trasverse del paziente con qualità elevata. Alcuni anni dopo immagini tomografiche sono state ottenute senza far ricorso a radiazioni ionizzanti, ma sfruttando le proprietà magnetiche dei nuclei atomici. In presenza di forti campi magnetici omogenei, i nuclei atomici emettono un segnale se opportunamente eccitati da impulsi elettromagnetici a radiofrequenza. Questa è la tecnica della Risonanza Magnetica Nucleare (NMR), che consente di ottenere informazioni complementari a quelle ottenibili dalla CT. In questo settore sono attivi a Firenze numerosi filoni di ricerca (spettroscopia NMR, ricostruzione di immagini, studi di flusso, imaging di diffusione e perfusione dei tessuti).

I recenti sviluppi nella tecnologia dei computer permettono oggi di sovrapporre le immagini ottenute con i raggi X con quelle provenienti da altre modalità, comprese la Risonanza Magnetica Nucleare e le scansioni con radionuclidi, in modo da "co-registrare" le informazioni anatomiche con quelle funzionali. Un'altra innovazione importante nella diagnostica radiologica riguarda lo sviluppo di nuove generazioni di rivelatori che consentano un "imaging" digitale (in contrapposizione ai rivelatori a film dei sistemi convenzionali). I vantaggi dei sistemi digitali risiedono nella possibilità di manipolazione delle immagini, loro immagazzinamento, trasmissione a distanza e, possibilmente, costo inferiore.

Se in diagnostica radiologica vengono usati fondamentalmente i raggi X, in **medicina nucleare** vengono impiegati isotopi radioattivi. Esami tipici effettuati sono la misura della concentrazione di un radioisotopo, la scintigrafia, la SPECT ("Single Photon Emission Tomography") e la PET ("Positron Emission Tomography").

Nel caso della scintigrafia una molecola (un farmaco o un metabolita) marcato con un isotopo radioattivo  $\gamma$  emittente (nella

maggior parte dei casi  $^{99m}\text{Tc}$ ) viene iniettato nel paziente. Tale composto segue le vie metaboliche normali e si accumula quindi selettivamente nell'organo da studiare. I fotoni emessi dal marcatore radioattivo della molecola vengono rivelati da una gamma camera (rivelatore a scintillazione accoppiato ad un collimatore a fori multipli e ad una matrice di fotomoltiplicatori). Con questo sistema di rivelazione si discrimina la posizione spaziale dell'evento radioattivo all'interno del paziente: si può così avere una visione dell'accumulo del complesso ed eventualmente una mappa di funzionalità.

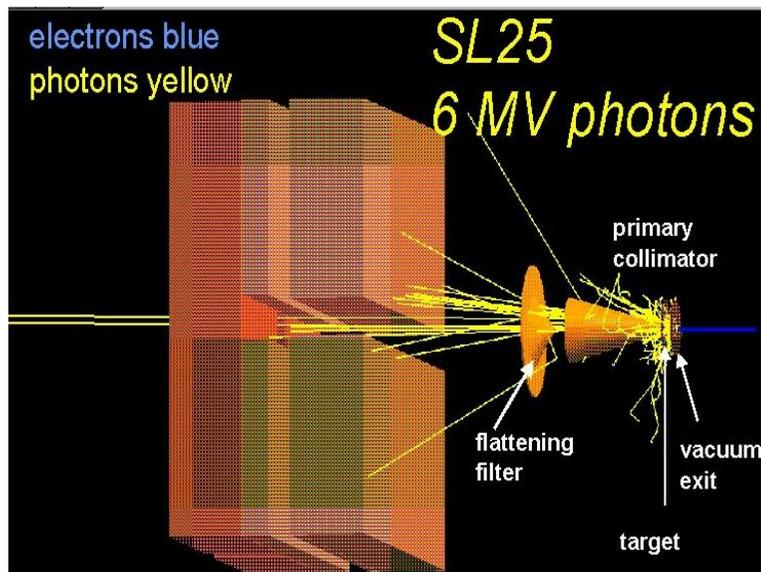
Nella SPECT, una gamma camera ruota intorno al paziente e per ogni posizione acquisisce una proiezione dell'organo da studiare. A partire dalle varie proiezioni, utilizzando algoritmi matematici, è possibile ricostruire immagini di sezioni assiali in cui si visualizza la distribuzione di concentrazione del radionuclide. Nella PET, una molecola marcata con un isotopo radioattivo emettente positroni viene iniettata nel paziente. I positroni interagendo con gli elettroni contenuti nei tessuti si annichilano emettendo due fotoni in direzioni opposte. Un anello di rivelatori registra i due fotoni in coincidenza e consente la ricostruzione delle immagini di sottili sezioni assiali. I radioisotopi che emettono positroni sono prodotti da un acceleratore di particelle, in genere un ciclotrone.

Il campo dominante dell'applicazione terapeutica delle radiazioni ionizzanti in medicina è quello della **Radioterapia** oncologica, in cui vengono rilasciate alte dosi di radiazione a volumi tumorali da fasci provenienti dall'esterno del paziente (teleterapia) o da sorgenti interne (brachiterapia). Le sorgenti interne sono costituite da isotopi radioattivi, mentre in teleterapia i fasci sono generati da acceleratori di particelle e sono costituiti da fotoni di alta energia, elettroni veloci o, molto recentemente, anche da protoni e ioni leggeri.

Presso la struttura di Radioterapia dell'Università di Firenze sono in funzione 4 acceleratori lineari di elettroni, le tecniche di irradiazione dei pazienti sono altamente "conformate", nel senso che la

distribuzione di dose è modellata sul volume da irradiare, in particolare è stata da poco implementata la Radioterapia ad Intensità Modulata (IMRT), tecnica molto sofisticata che richiede verifiche sperimentali accurate.

La dosimetria dei fasci per il trattamento radioterapico è comunque sempre una procedura molto importante perché l'efficacia del trattamento si basa su un rilascio accurato della dose a un volume di tessuto ben delimitato. Le attività che il Fisico svolge in questo settore sono fondamentalmente legate alla dosimetria dei fasci, allo sviluppo di tecniche innovative e allo studio di modelli per il calcolo delle distribuzioni di dose. Sulla base della conoscenza della



*Simulazione della linea del fascio per l'acceleratore lineare SL25 di Firenze. Il fascio di fotoni in uscita ha un'energia massima di 6 MeV.*

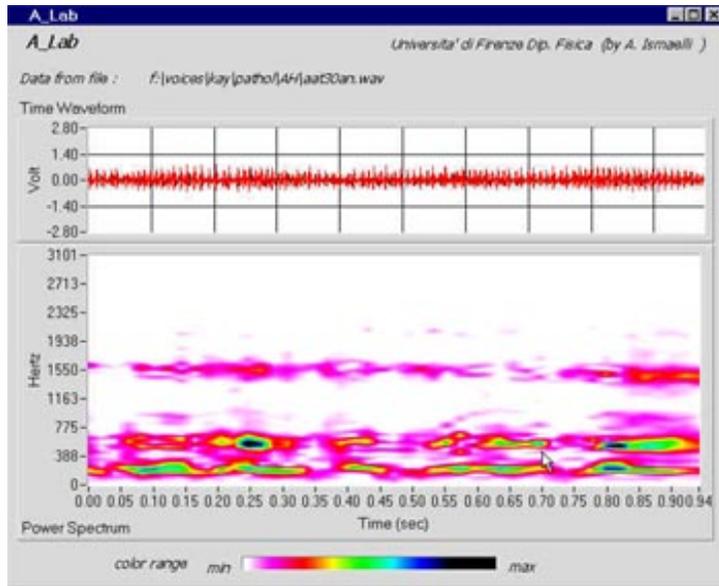
composizione e della geometria delle strutture coinvolte dai fasci di radiazione (dati provenienti dalle immagini di varia modalità), dopo accurate misure in fantoccio d'acqua delle dosi rilasciate in corrispondenza di vari parametri di trattamento, deve essere infatti ricostruita la distribuzione di dose all'interno del paziente.

A Firenze, le ricerche in corso in questo settore sono molteplici e possono essere sinteticamente classificate nei campi di Dosimetria delle radiazioni ionizzanti, Sviluppo di nuovi rivelatori, Modelli ed algoritmi di calcolo della dose, Studio di nuove tecniche di ricostruzione e di analisi di immagini mediche. Fra i modelli di calcolo in particolare viene seguito l'approccio della simulazione MonteCarlo, che permette di seguire, su base statistica, la "storia" delle varie particelle che costituiscono il fascio di radiazione, analizzando tutte le interazioni che si verificano dalla sorgente fino all'assorbimento nel paziente.

## Applicazioni di Acustica

Lo stato di salute dell'insieme dell'organo vocale umano, in particolare della glottide (sede delle corde vocali) può essere controllato per mezzo di un esame della voce, per quanto riguarda alcuni parametri rilevabili con metodi fisici. Durante l'emissione di una parola o di un singolo fonema, si esamina direttamente o su registrazione l'andamento più o meno regolare nel tempo della frequenza fondamentale e delle zone più importanti dello spettro di frequenza (le formanti) e del livello di rumore (fluttuazioni casuali dell'intensità vocale).

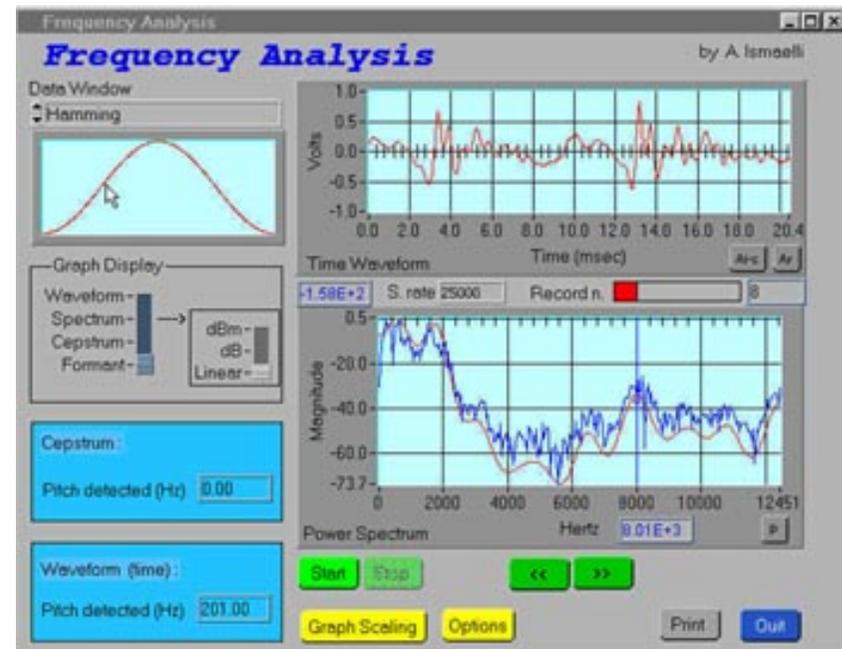
Il grafico della successiva figura mostra una registrazione del segnale sonoro di pressione (convertito in segnale elettrico) corrispondente alla pronuncia della vocale /a/ sostenuta per 0.94



secondi. Si nota una periodicità di circa 5 millisecondi (voce femminile con circa 200 Hertz di frequenza fondamentale). Il tempo è in ascisse. Nella parte centrale della stessa figura è mostrato un sonogramma. In ordinata la scala delle frequenze, da 0 a circa 3100 Hertz.

Le zone di intensità maggiore corrispondono a bande di frequenza dove lo spettro è di livello più alto. E' da notare che nel linguaggio la distinzione tra le vocali avviene per la posizione e la intensità di queste bande (le formanti), che chi parla ottiene in modo diverso articolando opportunamente il cavo orale.

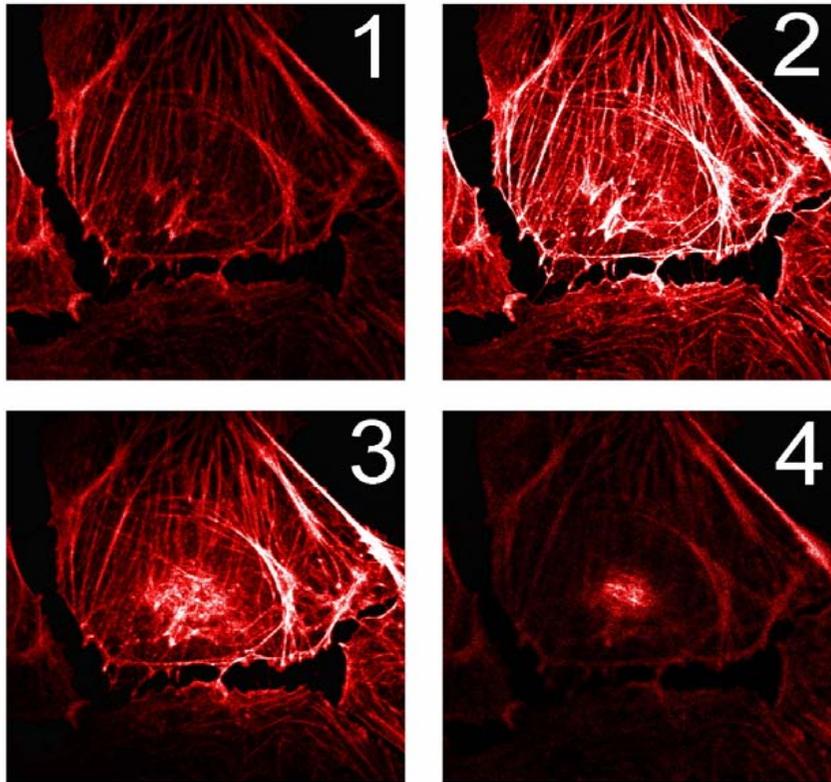
La successiva figura mostra due dei tipici risultati di analisi di un tratto di 20.4 millisecondi. La pressione sonora è nel riquadro più in alto a destra. Nel riquadro in basso a destra è mostrato il risultato della analisi in frequenza dello stesso tratto. La frequenza è qui in



ascisse. Le zone di frequenza di livello maggiore (sottolineate dalla linea continua) corrispondono alle zone più intense della parte in alto della figura (formanti). A sinistra alcune indicazioni sul "menu" utilizzabile per l'analisi.

## Applicazioni di Biofisica

Il laboratorio di Biofisica presso il Laboratorio Europeo di Spettroscopie Non Lineari (Polo Scientifico a Sesto Fiorentino) si occupa della biofisica di singola unità biologica. L'attività principale del laboratorio ([www.lens.unifi.it/bio](http://www.lens.unifi.it/bio)) si suddivide in due tipi di linee guida: uno di ricerca e sviluppo, mentre il secondo è più



ed imaging di singole bio-molecole, singole cellule e tessuti. I manipolatori qui sviluppati sono basati sull'interazione con luce laser (pinzette ottiche, laser scissor, nanoablatori) e permettono operazioni di biomeccanica su singole biomolecole (DNA, motori molecolari, etc..) o singole cellule (surgery, trapping, intracellular particle trapping, nanosurgery, etc.). Inoltre lo sviluppo di nuove tecniche di microscopia laser basate sull'alta risoluzione, sensibilità e rapidi tempi di acquisizione, permettono operazioni di imaging 3D di cellule in vivo evidenziandone sia le caratteristiche morfologiche (i.e. struttura citoscheletro, etc.) che funzionali (locomozione, traffico intracellulare, etc.). In particolare sono state sviluppate nuove microscopie basate sull'interazione multifotone (Multispot, Multiphoton Microscopy) e sull'interazione non lineare (second harmonic generation microscopy). Quest'ultima si è dimostrata particolarmente adatta a rivelare l'attività elettrica cellulare (reti neurali).

Le applicazioni di tali microscopie a sistemi complessi come i tessuti ci permettono lo studio di sistemi come la cute, con le eventuali evoluzioni di patologie tumorali, o sistemi di reti neurali intatte per la caratterizzazione computazionale neurale.

*Microscopia multifotone: immagine sezionata in altezza (1mwatt di potenza media del laser pulsato incidente con impulsi di 140 fs e frequenza di ripetizione 80 MHz) di una cellula endoteliale di arteria polmonare bovina (BPAE). Il citoscheletro della cellula è marcato in rosso. Le dimensioni dell'immagine sono di  $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ , la risoluzione radiale è di 250 nm, le sezioni verticali distano tra loro 500 nm.*

incentrato su obiettivi biologici. La ricerca e sviluppo in particolare è incentrata sulla realizzazione di nuove tecniche di manipolazione

## **Fisica Teorica**

La Fisica Teorica a Firenze ha una lunga tradizione di ricerca e copre molti degli aspetti di punta del settore.

Nell'ambito della fisica delle interazioni fondamentali sono in corso da decenni ricerche di notevole interesse sulle teorie fenomenologiche delle particelle elementari rivolte alla interpretazione di esperimenti condotti presso laboratori italiani ed esteri. È prevedibile che tale attività continuerà a svilupparsi negli anni a venire, principalmente in relazione ai nuovi dati prodotti dai grandi acceleratori, nonché dagli esperimenti sui raggi cosmici. Parallelamente a queste attività di tipo fenomenologico sono state sviluppate anche linee di ricerca di carattere più fondamentale, ma non certo di minor interesse.

Ad esempio da anni si analizzano con metodi perturbativi e non, le proprietà della teoria di campo delle interazioni forti tra i costituenti adronici (quarks) della materia, la cosiddetta cromodinamica quantistica. Lo scopo è quello di individuare i meccanismi e le forze che confinano i quarks a costituire gli adroni. La difficoltà intrinseca nell'esecuzione di calcoli a partire dalla formulazione rigorosa della teoria richiede anche la messa a punto di raffinate tecniche di calcolo, la cui acquisizione fornisce ulteriori competenze professionali.

Nell'ambito più generale delle teorie di campo è opportuno ricordare le attività riguardanti lo studio delle proprietà generali delle teorie di "gauge" dell'elettromagnetismo, delle teorie quantistiche e della relatività generale. In tal senso vanno ricordati gli studi sui gruppi quantici, nonché le ricerche sulla costruzione di una teoria quantistica dell'interazione gravitazionale. Mentre per le interazioni fondamentali forte, debole ed elettromagnetica esiste una teoria quantistica unificata (il cosiddetto "modello standard") che rende conto in larga misura della fenomenologia, lo stesso non può dirsi per l'interazione gravitazionale. Questo approccio mira di fatto

alla possibilità di trovare una formulazione unificata delle interazioni fondamentali della materia, cercando così di stabilire un legame comune tra i fenomeni fisici e astrofisici, come la formazione dei buchi neri.

Un altro campo di ricerca riguarda lo studio dei sistemi nucleari e più in generale dei sistemi quantistici a più corpi fortemente interagenti. In questo ambito due sono le linee principali seguite. Una concerne i sistemi a molte particelle, nuclei atomici e gas atomici ultrafreddi, sia nella fase normale che in quella superfluida. Particolarmente studiata è la transizione di fase liquido-vapore della materia nucleare in condizioni fisiche lontane da quelle ordinarie. Lo scopo è di ricavare l'Equazione di Stato della materia nucleare, che è determinante per predire la struttura delle stelle compatte e dei nuclei lontano dalla regione di stabilità. Un'altra linea di ricerca riguarda lo studio delle reazioni indotte da fotoni, elettroni e neutrini su nuclei leggeri, che permettono di mettere alla prova i potenziali di interazione nucleare e la teoria delle interazioni elettrodeboli a livello adronico. L'attività di ricerca teorica in fisica nucleare è strettamente correlata a quella sperimentale sia per l'interpretazione dei risultati sperimentali che come supporto per la progettazione degli esperimenti.

Il decennio appena trascorso ha visto un grande sviluppo internazionale della ricerca teorica e sperimentale della produzione di un nuovo stato della materia adronica in cui i costituenti fondamentali, quarks e gluoni, sono liberati dal loro normale stato di confinamento (quark-gluon plasma). Questo stato viene prodotto nelle collisioni di nuclei pesanti di energia ultrarelativistica. In questo settore esiste un notevole sviluppo di modelli teorici per spiegare le osservazioni sperimentali e identificare univocamente la formazione del plasma. Tali modelli coinvolgono l'uso della teoria dei campi a temperatura e densità finite, della fluidodinamica e della meccanica statistica relativistica.

Passando dalla fisica dei costituenti fondamentali della materia a quella dei sistemi formati da un gran numero di oggetti ci si addentra nel settore di ricerca, non meno appassionante, relativo allo studio della materia nelle sue forme di aggregazione macroscopica: gas, liquidi e solidi. Anche in questo caso sono presenti varie linee di ricerca teoriche riconducibili alla vasta area culturale della Meccanica Statistica.

Negli ultimi anni il legame con la teoria dei campi ha portato allo sviluppo di approcci teorici fondati sullo studio delle cosiddette teorie conformi, come modelli in grado di descrivere alcuni aspetti fisici di grande interesse, ad esempio l'effetto Hall quantistico e la superconduttività ad alta temperatura, come manifestazione di generali proprietà di simmetria delle leggi fisiche.

Un altro settore di ricerca assai attivo negli ultimi anni riguarda lo studio dei processi fuori equilibrio e in particolare le problematiche dei fenomeni di trasporto in sistemi classici e quantistici. Sono state sviluppate anche altre nuove linee di ricerca che riguardano lo studio di modelli matematici di biomolecole, di sistemi neurali e di sistemi evolutivi. Tali problematiche rientrano nell'ambito più generale delle ricerche dedicate ai cosiddetti Sistemi Complessi, che negli ultimi anni hanno assunto un carattere eminentemente interdisciplinare attraverso collaborazioni scientifiche con chimici, biologi e ingegneri.

Una corretta formazione in questo settore di ricerca presuppone la conoscenza di un ampio spettro di metodi matematici e computazionali la cui integrazione rappresenta spesso l'approccio più efficace e completo per ottenere risposte ai problemi in esame. Pertanto, è necessario anche in questo caso acquisire buona padronanza delle tecniche di calcolo con particolare riferimento ai metodi di simulazione numerica.

Questi aspetti della ricerca teorica assieme a quelli sopraelencati indicano in modo inequivocabile che la formazione del fisico teorico non solo si basa sull'acquisizione di un orizzonte

culturale sufficientemente vasto, ma presuppone anche la creazione di un soggetto la cui capacità principale sia quella di risolvere problemi in modo, ove possibile, esatto o, più spesso, approssimato, prescindendo dalla loro presunta o reale difficoltà e facendo leva su una solida conoscenza di concetti matematici e, ove necessario, computazionali.

È questo dato distintivo che potenzialmente consente ad un giovane in possesso di tali competenze di ambire anche a collocazioni occupazionali non solo nell'ambito della ricerca accademica e di collocarsi, talvolta con successo, anche sul mercato internazionale del lavoro.