

CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

Progetti Premiali DM 949/RIC del 19 dicembre 2012



**Progetto premiale:**

Materiali e dispositivi magnetici e superconduttivi per sensoristica e ICT

**Coordinatore:**

7Uf`c`7UfVcbY

Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

Febbraio 2013

## **Progetto**

Materiali e dispositivi magnetici e superconduttivi per sensoristica e ICT

## **Ambito di afferenza**

ICT e Dispositivi sensoriali

## **Action**

DUE

## **Coordinatore**

7Uf'c'7UfVcbY

Istituto di Gfifi fu'XY''U'A UHyf]U'!'=GA

## **Elenco dei partecipanti al Progetto**

### *Dipartimenti CNR*

Dipartimento Scienze Fisiche e Tecnologie della Materia, DSFTM

Dipartimento di Scienze Biomediche

### *Istituti CNR*

ICIB – Istituto di Cibernetica *E.Caianello*

IMEM - Istituto dei materiali per l'elettronica ed il magnetismo

IOM - Istituto Officina dei Materiali

ISM - Istituto di struttura della materia

NANO - Istituto di Nanoscienze

SPIN - Istituto Superconduttori, Materiali Innovativi e Dispositivi

IBP - Istituto di Biochimica delle Proteine

### *Altrir EPR Coinvolti*

Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (**INRiM**) - Ente vigilato dal MIUR -

### *Altri Soggetti Coinvolti*

Fluxonics: The European Foundry for Superconductive Electronics eV, Braunschweig (D).

Advanced Technologies Biomagnetic srl, Pescara

Seconda Università degli Studi di Napoli, Dipartimento Ingegneria dell'Informazione

Università degli Studi di Genova, Dipartimento di Matematica

Università degli Studi di Napoli "Parthenope"

NJMS---UH Cancer Center New Jersey Medical School Newark USA

## **Parole chiave**

Magnetismo, Superconduttività, Materiali e Dispositivi Innovativi, Sensori

## **Obiettivi finali che il progetto si propone di raggiungere**

Il progetto si propone l'obiettivo di coordinare le competenze in ambito fisico, chimico, ingegneristico e biologico presenti nei dipartimenti allo scopo di promuovere lo sviluppo di materiali e di nuovi dispositivi magnetici e superconduttivi di interesse nel campo delle tecnologie per l'informazione e comunicazione (ICT) e della sensoristica.

La sintesi di nuovi materiali, ed in particolare di nano-materiali con struttura e morfologia ben definita, ha significativamente contribuito negli ultimi anni a rilevanti progressi scientifici nella fisica dei semiconduttori e nel magnetismo, i due tradizionali pilastri della ICT. Il sempre più diffuso interesse nelle comunità scientifica verso i nanomateriali magnetici deriva in larga misura dalla scoperta e dalle conseguenti molteplici applicazioni di fenomeni magnetoelettrici e spintronici, in cui le caratteristiche di trasporto elettrico sono intimamente connesse allo stato magnetico del materiale.

La capacità di manipolare congiuntamente lo stato magnetico ed elettrico ha aperto l'opportunità di sviluppare sensori veloci e memorie non-volatili ed ad alta densità, con prospettive, oltre che ad applicazioni già realizzate, nell'industria della registrazione magnetica, nella sensoristica, nella elettronica di consumo e nella tecnologia della informazione. Data la complessa relazione dei processi magnetici con fattori strutturali e chimici, lo studio e lo sviluppo di nuovi materiali per applicazioni nella disposivistica e sensoristica richiede progressi sia nella comprensione dei processi fondamentali della materia, che nella capacità di progettare e fabbricare materiali con le caratteristiche funzionali desiderate. Accanto a ciò l'interplay tra superconduttività e magnetismo ha recentemente aperto nuove ed interessanti possibilità nel campo dell'elettronica superconduttiva in generale, e della sensoristica in particolare. Infatti, strutture ibride superconduttore/ferro magnetite rappresentano un campo di frontiera della ricerca in questo campo dal momento che esse offrono da un lato la possibilità di controllare la dipendenza spaziale del parametro d'ordine superconduttivo nello strato F, introducendo anche un controllo sul parametro di fase che caratterizza lo stato superconduttivo, dall'altro di intervenire sui meccanismi di scattering elettronico che stanno alla base dei processi di rilassamento in molti sensori e rivelatori di radiazione elettromagnetica. Vale la pena inoltre osservare nel campo dello sviluppo di nano dispositivi superconduttivi, in particolare quelli ad interferenza quantistica (nanoSQUIDs) basati su giunzioni tunnel Josephson sono stati recentemente oggetto di attenzione da parte della comunità scientifica grazie alle possibilità da loro offerte di investigare, per esempio, piccoli sistemi di spin quali magneti a singola molecola, nuvole di atomi freddi o singoli atomi/elettroni. Lo studio di tali sistemi prevede promettenti ed interessanti aspetti applicativi in diversi campi quali la scienza dei materiali, la chimica, la tecnologia dell'informazione, le scienze mediche e biologiche. Particolarmente interessante è lo studio tramite i nanoSQUIDs di nanoparticelle magnetiche. Avendo una area di rivelazione meno di  $1 \text{ um}^2$ , i nanoSQUID consentono di investigare piccoli ammassi di nanoparticelle permettendo di studiare caratteristiche e proprietà non investigabili mediante tecniche convenzionali. Lo studio di nanoparticelle magnetiche, in particolare quelle iron-free, è di grande interesse ed attualità, in quanto esse trovano impiego in nuove tecniche diagnostiche in biomedicina.

Gli Istituti coinvolti nel programma dispongono di competenze e di esperienza consolidata nella sintesi di nuovi materiali, nell'indagine strutturale, elettronica e magnetica sia con metodi sperimentali che teorici, nella caratterizzazione di proprietà di trasporto, meccaniche, chimiche (etc...), nei processi di fabbricazione e di sistemi funzionali, nella progettazione e realizzazione di dispositivi. Risultati di eccellenza sono stati ottenuti dagli istituti coinvolti nel progetto in ambiti di ricerca riconducibili alle nuove tipologie di sensori magnetici e superconduttivi.

Il progetto integrato tra il dipartimento DSFTM e l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) per la continuità e il rafforzamento delle numerose collaborazioni scientifiche tra i due enti si pone l'obiettivo di promuovere lo studio di materiali magnetici e superconduttivi per lo sviluppo e la realizzazione di nuovi sensori e dispositivi.

Obiettivi strategici del progetto sono:

- Ob.1 Progettare materiali e sistemi innovativi per dispositivi e sensori magnetici e superconduttivi
- Ob.2 Realizzare prototipi di dispositivi e sensori con potenzialità applicative in nanoelettronica, spintronica e metrologia
- Ob.3 Creare un consorzio in ambito nazionale per amalgamare competenze complementari e convogliare potenziali sinergie per renderle competitive a livello internazionale

Per il raggiungimento di questi obiettivi sono patrimonio sostanziale dell'Ente le competenze disponibili in alcune tecnologie abilitanti di natura pervasiva individuate dalla Commissione Europea tra le KETs capaci di fornire quei *mattoni* della conoscenza e della tecnologia idonei alla creazione di aree prioritarie di intervento e sviluppo.

## **Durata del progetto**

36 mesi

## **Articolazione del Progetto**

Il Progetto si articola in cinque Workpackages:

### WP.1 Dispositivi spintronici per memorie e sensori magnetici.

- t1 Proprietà di materiali e crescita di multilayer
- t2 Nanofabbricazione di strutture ad effetto GMR e TMR
- t3 Realizzazione di dispositivi e verifica delle prestazioni

### WP.2 Nuovi materiali multifunzionali e sistemi nanocompositi per sensori e dispositivi magnetici

- t1 Preparazione dei materiali e proprietà
- t2 Realizzazione di strutture nanocomposite e proprietà.
- t3 Nanofabbricazione e realizzazione di nuovi dispositivi.

### WP.3 Sensori magnetici

- t1 Sensori TMR
- t2 Magnetometri integrati su Si
- t3 MicroSonde di Hall
- t4 Sensori magneto-elastici
- t5 Sensori magnetici per il Bio-Medicale

### WP.4 Nano sensori superconduttivi ad interferenza quantistica

- t1 Sviluppo di micro e nanosensori SQUID
- t2 Caratterizzazione ed ottimizzazione di nanoSQUID
- t3 Misura della magnetizzazione e del rilassamento di nanoparticelle magnetiche
- t4 Progettazione e realizzazione di un rilassometro SQUID prototipale

### WP.5 Dispositivi mesoscopici superconduttivi per la rivelazione di fotoni

- t1 Fabbricazione e caratterizzazione di nanowires ibridi superconduttore/ferromagnete per la rivelazione ottica avanzata
- t2 Fabbricazione e caratterizzazione di giunzioni Josephson mesoscopiche del tipo SNS e SFS per la rivelazione di radiazione IR
- t3 Fabbricazione di dispositivi e sensori con nuovi materiali a base di ferro

In dettaglio:

## **WP.1 - Dispositivi spintronici per memorie e sensori magnetici**

*Responsabile:* Carlo Carbone

*Istituti CNR partecipanti:* ISM, NANO, SPIN, IMEM

**Stato dell'arte:** I notevoli progressi nella fisica del magneto-trasporto (spintronica) hanno favorito lo sviluppo di nuove tecnologie in cui si utilizzano dispositivi il cui principio di funzionamento è basato sulla dipendenza delle proprietà di trasporto dallo spin dei portatori di carica (1). Un importante esempio di tali tecnologie emergenti sono le memorie magnetiche ad accesso casuale (MRAM), composte da una matrice di celle spin-valve, in cui ciascuna cella rappresenta un bit registrato. L'informazione viene codificata nell'orientazione relativa della magnetizzazione di film sottili, separati da uno strato isolante, e viene letta utilizzando l'effetto di magneto-resistenza di tunneling (TMR), in modo analogo al funzionamento di giunzioni metalliche (spin valve) con effetto GMR (giant-magneto-resistance) (2).. La tecnologia MRAM è la più promettente per la creazione di memorie con caratteristiche universali vantaggiose (non-volatilità, rapidità di accesso alle informazioni registrate, basso consumo, alta densità di immagazzinamento), rispetto ad altri tipi di memorie non-volatili (e.g. flash, DRAM, SRAM, phase change), ed attira un interesse sempre maggiore anche in vista di applicazioni nei settori della difesa e sicurezza del paese. L'industria informatica persegue, ad esempio, sulla base di considerazioni di efficienza ed risparmio energetico, lo sviluppo di memorie non-volatili di alta capacità, in grado di conservare lo stato operativo allo spegnimento senza consumo elettrico e di assicurare un avviamento istantaneo con piena funzionalità. Memorie MRAM sono in fase di limitata produzione commerciale, mentre le maggiori aziende nel campo (tra cui IBM, Hitachi, Samsung, NEC) presentano sistemi prototipi con performance in continuo progresso.

**Obiettivi del WP:** Ulteriori avanzamenti in questo settore di ricerca e sviluppo sono perseguibili principalmente nella ottimizzazione di nuovi metodi operativi per la scrittura e lettura delle informazioni, al fine di migliorarne l'efficienza (tempi di risposta e velocità), i metodi di produzione (architettura semplificata, integrazione in verticale di dispositivi multifunzionali) ed il consumo energetico (p.e. la corrente per bit switching) e nella introduzione di nuovi materiali multifunzionali. Nel quadro del programma, entro il WP1 ed in connessione con le attività degli altri WP, verranno affrontati aspetti che riguardano i processi operativi di base, la fabbricazione e l'ottimizzazione funzionale di elementi di memoria non-volatile e di dispositivi spintronici, operanti per effetto TMR e GMR. Il progetto farà uso in modo coordinato ed integrato delle facilities degli istituti partecipanti per la crescita e la caratterizzazione di nuovi nanomateriali magnetici, per la nanostrutturazione di elementi funzionali per via litografica e la loro integrazione in dispositivi nano elettronici. Verranno prodotti ed esaminati processi di scrittura e lettura in elementi di tipo MRAM e spin-valve con i seguenti obiettivi:

**i) Acquisire la capacità di ottimizzare le proprietà di strutture a multistrato, per la lettura dell'informazione, e di manipolarne efficientemente lo stato magnetico per iniezione di correnti polarizzate.**

La lettura per TMR, in congiunzione con la scrittura per effetto di spin-transfer torque (STT), consente un'architettura efficientemente integrata e rappresenta attualmente un obiettivo di frontiera per lo sviluppo di memorie non-volatili. A tale scopo verranno prodotti ed ottimizzati nell'ambito di questo progetto, con il supporto di calcoli teorici e modellizzazione micromagnetica, strutture a strati, con materiali isolanti a alto effetto TMR, quali l'MgO, e materiali compositi, tra cui materiali formati da nanocluster ferromagnetici o core-shell in matrice non magnetica. L'ottimizzazione del processo di scrittura verrà perseguita realizzando elementi magnetici funzionali, integrati in strutture TMR, su scala estremamente miniaturizzata ed operanti a bassa corrente di switching. La riduzione di scala, oltre ad aumentare la densità di informazione, risulta essere determinante per l'efficienza nel processo di scrittura, in quanto la corrente di bit-switching è proporzionale alle dimensioni laterali dell'elemento.

**ii) Produrre elementi su scala inferiore ai 50 nm, per i quali la scrittura per STT implica correnti significativamente ridotte rispetto a quelle richieste dall'uso di campi indotti.**

Verranno a questo fine fabbricate ed esaminate nanostrutture a multistrato di tali dimensioni, mediante tecniche top-down, con tecniche litografiche FIB, EBL e ottiche, e bottom-up, per via di crescita su templates, di materiali magnetici compositi (film hard/soft) e con geometrie ed interfacce controllate(3). Tali metodi verranno utilizzati inoltre per la produzione di strutture spin-valve, di dimensione sub micrometrica. Lo sviluppo di tali nano sistemi, con caratteristiche strutturali ben definite, anisotropia magnetica perpendicolare, e alta risposta GMR, sarà diretto ed ottimizzato per la realizzazione di array submicrometrici di sensori di campo magnetico, per i quali si prevedono diverse applicazioni, tra le quali, come magnetometri triassiali per misure

di datazione archeomagnetica.

**iii) Realizzare valvole di spin planari di dimensione nanometrica iniettando correnti spin polarizzate in canali semiconduttivi ad alta mobilità.**

Questa attività, oltre a perseguire la realizzazione di specifici sensori e dispositivi magnetici, permette in prospettiva l'integrazione di dispositivi per spintronica con dispositivi elettronici. Inoltre, la geometria planare si presta alla realizzazione di transistor di spin in cui le proprietà di trasporto di spin sono modificate dalla presenza di un elettrodo di gate. Infine, si basano essenzialmente strutture planari e sul trasferimento di momento angolare da una corrente spin-polarizzata, anche altri schemi innovativi e promettenti per memorie magnetiche non-volatili, tra cui le memorie racetrack. Tali dispositivi magnetici, con nano-costrizioni, hanno principio di funzionamento basato su pinning e depinning delle pareti di dominio per fenomeni di STT. L'ampio parco di tecniche litografiche disponibili nel progetto permetterà di modulare opportunamente il comportamento di tali dispositivi, che operando attraverso il controllo dalla corrente applicata, garantiscono la possibilità di alta integrazione in nano elettronica.

(1) S.D. Bader and S.S.P. Parkin, Annual Review of Condensed Matter Physics, 1, 71 (2010)

(2) Wei-Gang et al. Nature Materials 11, 64 (2012)

(3) Ion Bitai et al Science, 321, 939 (2008).

**Tasks:**

[Task 1.1] **Proprietà di materiali e crescita di multilayer:**

Multilayer ed effetto TMR saranno prodotti ed ottimizzati mediante controllo su scala atomica della struttura e spessore degli strati isolanti intercalati e della struttura chimica ed elettronica delle interfacce, da parte di NANO-CNR, IMEM-CNR e SPIN-CNR. ISM-CNR, IMEM-CNR e INRIM cresceranno e studieranno, con analogo approccio, multilayer metallici con proprietà modulate dalla interazione di scambio alla interfaccia tra magneti hard e soft. Le caratteristiche di GMR di questi sistemi di film verrà esaminata, controllata e ottimizzata, anche con il supporto di calcoli ab-initio e modellizzazione micro-magnetica. Inoltre, CNR-SPIN produrrà ed esaminerà eterostrutture epitassiali basate su composti di elementi di transizione adatti alla realizzazione di spin-valve e di spin-transistor.

[Task 1.2] **Nanofabbricazione di strutture ad effetto GMR e TMR:**

NANO-CNR ottimizzerà i parametri di processi litografici, al fine di strutturare per mezzo di scrittura diretta FIB e litografia EB multilayer magnetici in forma di pattern regolari, di elementi GMR, TMR e racetrack memories. INRIM produrrà arrays di nano strutture, mediante nano litografia per self-assembling, utilizzando nanosfere di polistirene a block copolimeri, per utilizzo come sensori di campo magnetico (costituiti da film sottili di Ni, Py, Co, Fe), per registrazione magnetica ad alta densità (film di FePt, FePd) e per nano-oscillatori di alta frequenza (film di Py, FePd).

[Task 1.3] **Realizzazione di dispositivi e verifica delle prestazioni:**

CNR-SPIN produrrà e caratterizzerà dispositivi di tipo spin-valve su scala nanometrica ed in geometria planare. Verranno inoltre eseguite misure della lunghezza di diffusione di spin in eterostrutture epitassiali, allo scopo di valutare la dipendenza della lunghezza di diffusione di correnti spin-polarizzate dalla tensione applicata al gate. Sulla base di queste indagini si arriverà alla realizzazione e caratterizzazione di transistor di spin. La configurazione magnetica di array costituiti da elettrodi a spin-valve verrà ottimizzata rispetto alla risposta magnetoresistiva (GMR) dei sensori. Tali strutture costituiranno infine gli elementi funzionali di magnetometri triassiali, dei quali verranno eseguiti test di funzionamento e confrontati con soluzioni in commercio (p.e. flux gates magnetometri) (CNR-ISM).

**Milestones:**

MS1 mese 12 Produzione di multilayer epitassiali di tipo TMR, comprendenti strati di ossido con funzione di spin-filter, ed alto effetto magnetoresistivo a temperatura ambiente.  
Ottimizzazione dello spessore di ossido e delle interfacce al fine di ottenere completa polarizzazione di spin nell'elettrodo ad alta mobilità nello strato semiconduttore.

Definizione di condizioni di fabbricazione ottimizzate per spin-valve ad effetto GMR e di protocolli per la misura di strutture GMR e TMR in funzione di campi magnetici applicati.

Produzione di array di nanostrutture mediante nanolitografia per self-assembly; ottimizzazione di processo per via di modelli micro magnetici.

MS2 mese 24 Realizzazione e caratterizzazione di spin-valve planari e valutazione della lunghezza di diffusione di spin in differenti ossidi semiconduttori. Ottimizzazione dei processi litografici a delle dimensioni laterali per ottenere singole spin-valve di minima dimensione per via di litografia FIB e EBL, caratterizzazione delle spin-valve così prodotte.

Ottimizzazione della risposta magnetoresistiva (per DC e alta-frequenza) in strutture autoassemblate per via nano litografica, mediante raffinamento dei processi di produzione, della composizione chimica e dei parametri geometrici.

MS3 mese 36 Produzione di strutture ad array di spin-valve per litografia FIB ed EBL. Realizzazione e caratterizzazione di un transistor di spin. Realizzazione e caratterizzazione di sensori magnetici e di un magnetometro triassiale..

## WP.2 - Nuovi materiali multifunzionali e sistemi nanocompositi per sensori e dispositivi magnetici

*Responsabile:* Franca Albertini

*Istituti CNR partecipanti:* IOM, ISM, NANO, SPIN, IMEM

**Stato dell'arte:** Gran parte della ricerca di frontiera nel magnetismo è volta a controllare le proprietà magnetiche attraverso l'applicazione di correnti, campi elettrici, sforzi, impulsi ottici, oltre a campi magnetici e variazioni di temperatura. D'altra parte oggi sta diventando possibile controllare varie proprietà fisiche (di trasporto, strutturali, termodinamiche, plasmoniche, ottiche, meccaniche) con il campo magnetico in sistemi multifunzionali. Questi progressi aprono la strada ad applicazioni innovative nel campo dei sensori, attuatori, dispositivi "smart" e dispositivi di spin.

La ricerca attuale si sta indirizzando sia verso nuove classi di materiali multifunzionali in cui gradi di libertà magnetici, strutturali, meccanici, ferroelettrici ed elettronici sono intimamente legati (leghe di Heusler martensitiche, sistemi multiferroici) [1-3], sia verso la realizzazione di sistemi nanocompositi in cui vengono utilizzate ed integrate in un unico dispositivo le proprietà complementari dei materiali componenti (es. magnetismo, ferroelettricità, superconduttività, proprietà ottiche e di trasporto ecc.) sfruttando le interazioni all'interfaccia tra diversi materiali [4].

Un esempio notevole è rappresentato da materiali multiferroici [5] che possono svolgere un ruolo chiave anche nello sviluppo di nuovi dispositivi nano compositi. Attualmente, numerosi gruppi di ricerca in tutto il mondo propongono progetti di ricerca per sfruttare l'interfaccia multiferroico/ferromagnete nei dispositivi di spin, modulando efficacemente la densità dei portatori che l'accoppiamento magnetico di interfaccia, dopo la dimostrazione della possibilità di controllo con campo elettrico del ferromagnetismo locale alle interfacce BiFeO<sub>3</sub>/CoFe [5, 6],

[1] Ramesh Nature 461, 1218-1219, 2009

[2] Durand et al. Adv. Mater. 23, 216-232, 2011

[3] Kainuma et al. Nature 439, 957-960, 2006

[4] Pantel et al. Nature Materials 11, 289-293, 2012

[5] Eerenstein, N. D. Mathur, and J. F. Scott, Nature 442, 759, 2006.

[6] Chu et al., Nat. Mater. 7, 478, 2008.

**Obiettivi del WP:** il WP si prefigge di dare un impulso alla ricerca nazionale in questo settore strategico promuovendo lo sfruttamento sinergico delle competenze complementari e di eccellenza presenti nel Dipartimento e nell'Istituto INRIM che spaziano dalla modellizzazione e determinazione sperimentale di nuovi fenomeni fisici (compresa la messa a punto di sofisticate tecniche di misura) alle modellizzazioni di nuovi materiali, dalla realizzazione e ottimizzazione

attraverso diversificate tecniche di crescita, alla nanolavorazione e realizzazione di nanostrutture e dispositivi. In particolare, ci si prefigge di approfondire la comprensione di nuovi fenomeni e proprietà fondamentali di nuovi materiali e sistemi multifunzionali di notevole interesse e di realizzare alcuni nuovi dispositivi "proof-of-concept" per applicazioni innovative nell'ICT e nella nanomedicina. In particolare il WP è incentrato su tre principali obiettivi:

**Realizzazione e comprensione delle proprietà di base di nuovi materiali:** nuovi sistemi multiferroici (materiali che presentano la coesistenza di ferroelettricità e ferromagnetismo, ossidi magnetici e isolanti topologici (materiali in cui lo spin e il regime conduttivo all'interfaccia alla superficie è protetto da fenomeni quantistici, ed in particolare dall'interazione spin-orbita) sono candidati promettenti. Verranno inoltre esplorate leghe di Heusler che presentano straordinarie proprietà multifunzionali (memoria di forma, proprietà magnetomeccaniche, di trasporto, e magnetocaloriche giganti dovute alla possibilità di controllare le proprietà magnetiche, strutturali elettroniche, termodinamiche applicando campi magnetici, pressioni e stress.

**Realizzazione di nuovi sistemi nanocompositi, comprensione delle mutue interazioni e controllo proprietà funzionali:** eterostrutture basate su ossidi magnetici, eterostrutture multiferroico-ferromagnete, e metallo-isolante-semiconduttore. Un ruolo molto importante per una migliore comprensione l'accoppiamento tra i vari componenti è svolto dalla approfondimento delle proprietà guidate all'interfaccia attraverso la realizzazione e la caratterizzazione di interfacce nano-ingegnerizzate. L'accoppiamento magnetoelettrico (la possibilità di indurre magnetizzazione applicando un campo elettrico o di indurre polarizzazione elettrica applicando mezzo di un campo magnetico) sui sistemi multiferroici sarà approfondita a partire da strutture a multistrato di tipo spin-valve basate sulla ferrite di bismuto  $\text{BiFeO}_3$ . Applicando un campo elettrico attraverso l'elettrodo di controllo è possibile modulare la direzione di magnetizzazione e l'accoppiamento di scambio, o il campo coercitivo degli elettrodi superiori magnetici (source e drain), permettendo così il controllo del trasporto di spin del dispositivo. Verrà inoltre verificata la possibilità di controllare l'anisotropia magnetica in eterostrutture metallo-isolante-semiconduttore modificando la concentrazione delle buche attraverso l'applicazione di un campo elettrico. L'accoppiamento magnetoelastico in ossidi magnetici cristallini sarà ottimizzato e sfruttato per la realizzazione di dispositivi in cui la risposta elettrica e magnetica sono controllate dallo strain. Inoltre superfici e interfacce di ben noti materiali solidi esibiscono proprietà molto diverse da quelle del bulk. Gli esempi vanno dagli stati di conduzione al livello di Fermi, topologicamente protetti, sulla superficie dei cosiddetti isolanti topologici, ai gas elettronici bidimensionali che si formano alla interfaccia tra due ossidi isolanti, di carattere ferromagnetico e superconduttore.

**Nanofabbricazione e realizzazione di nuovi dispositivi "proof-of-concept"** per sensori nano-attuatori, e nuova elettronica di spin realizzati attraverso lo sfruttamento della vasta gamma di tecniche litografiche e di nanofabbricazione allo stato dell'arte disponibili nel progetto. Micro/nanoleve sfruttabili anche nell'energy harvesting verranno prodotte a partire dal film epitassiali di leghe Heuslers meta-magnetiche che mostrano un grande salto di magnetizzazione alla transizione martensitica, ottenibile attraverso stress e variazioni di temperatura. Micro-sistemi free-standing quali membrane e micro-leve per sensori magnetici e MEMS saranno prodotti anche a partire da ossidi magnetici sfruttando l'accoppiamento magnetoelastico. Un obiettivo notevole è la produzione di nano-dischi di leghe Heusler free-standing a memoria di forma per la realizzazione di nano-trasduttori su scala di cellulare che potrebbero essere attivati da variazioni di temperatura e campi magnetici statici nonché campi a radiofrequenza (attraverso l'effetto ipertermico). Saranno inoltre realizzati nano-dispositivi controllati da campo elettrico: saranno film multiferroici integrati in nanogiunzioni MESA (brevettato). Uno degli obiettivi finali di questa attività sarà la realizzazione di un transistor a singolo spin per controllare la risposta dei dispositivi di spin alla nanoscala con un gate multiferroico.

## Tasks

**[Task 2.1] Preparazione dei materiali e proprietà.** Film sottili multiferroici ( $\text{BiFeO}_3$ ), e ossidi magnetici verranno depositati attraverso PLD. Verranno inoltre preparate soluzioni solide di  $\text{BiFeO}_3$  con  $\text{PbTiO}_3$  e  $\text{Ba}(\text{Cu}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})$  per ottenere miglioramenti significativi nelle proprietà dielettriche e magnetiche (NANO, SPIN, IOM). Film sottili di leghe di Heusler multifunzionali basate su  $\text{NiMnGa}$  e  $\text{NiMnIn}$  saranno cresciuti in modo epitassiale su substrati adeguati

attraverso sputtering rf (IMEM). Un'indagine multiscala strutturale, morfologica, elettrica e magnetica verrà effettuata al fine di comprendere la dipendenza delle proprietà principali dalla composizione e dai parametri di crescita (INRIM, NANO, SPIN, IOM, ISM, IMEM)

**[Task 2.2] Realizzazione di strutture nanocomposite e proprietà.** Eterostrutture basate su ossidi magnetici, eterostrutture multiferroico-ferromagnete, e metallo-isolante-semiconduttore verranno realizzate (NANO, SPIN, IOM). Oltre ad una caratterizzazione multiscala approfondita delle caratteristiche funzionali dei nanocompositi (NANO, SPIN, IOM, ISM) verrà utilizzata la spettroscopia elettronica a raggi X con sensibilità magnetica e composizionale per contribuire alla comprensione delle proprietà complessive e dei fenomeni guidati da superfici-interfacce: i) misure 'in tempo reale', ad esempio, di un dispositivo in regime di funzionamento (applicando una tensione e/o corrente) ii) contributo di interfacce sepolte e sistemi 2D di elettroni confinati iii) la dinamica di magnetizzazione e la magnetizzazione di commutazione sotto processo di polarizzazione, con ultraveloci pump-probe esperimenti basati su Free Electron Laser radiazioni (IOM)

**[Task 2.3] Nanofabbricazione e realizzazione di nuovi dispositivi.** Micro/nanocantilever e membrane free-standing verranno prodotte con tecniche litografiche a partire da film sottili di NiMnGa (In) e di nanostrutture composite di ossidi (SPIN, NANO, INRIM). Nanodischi free standing di leghe di Heusler verranno realizzate litografia a nanosfere: auto assemblaggio di nanosfere seguita da RIE e sputter-etching (INRIM). BiFeO<sub>3</sub> sarà integrato come gate multiferroico sui strutture MESA (brevettate). In particolare, nanogiunzioni saranno preparate con wet-etching a ossidazione selettiva di una buca quantica di AlGaAs/GaAs struttura quantistica bene, al fine di ottenere grandi array di nanodispositivi (NANO). Le prestazioni dei nanodispositivi saranno testate con set-up sperimentali realizzati ad-hoc.

## Milestones

- MS1 mese12 Definizione delle condizioni di preparazione (incluso la scelta del substrato) per la produzione di sistemi multiferroici, ossidi magnetici e leghe di Heusler a film sottile con struttura ottimizzata e idonee proprietà funzionali. Realizzazione di strutture di nanocompositi a base di ossidi magnetici, multiferroico-ferromagnete, metallo-isolante-semiconduttore) e studio delle proprietà principali (INRIM, NANO, SPIN, IOM, ISM, IMEM). Messa a punto di tecniche di nanofabbricazione e del processo di litografia nanosfere (INRIM).
- MS2 mese 24 Ottimizzazione delle proprietà funzionali (ferroelettriche, magnetomeccaniche, magnetiche, elettriche) dei materiali sfruttando le opportune modifiche composizionali. Studio di fenomeni guidati alla superficie interfaccia, modellazione e ottimizzazione. Realizzazione di micro/nano leve e membrane e studio degli effetti dei processi litografici, della geometria scelta e della riduzione delle dimensioni nella determinazione delle proprietà principali.
- MS3 mese 36 Realizzazione e test di micro/nanocantilever, e membrane e studio della risposta "magnetica" in funzione dell'applicazione di stress o variazione di temperatura. Realizzazione di nanodisk free standing e loro attuazione mediante temperatura e campi statici. Dispersione dei nano dischi in un'opportuna soluzione e attuazione attraverso campi alle radiofrequenze. Integrazione di film multiferroici in nanogiunzioni MESA per nanodispositivi tunabili elettricamente.

## WP3 - Sensori magnetici

*Responsabile:* Marco Affronte

*Istituti CNR partecipanti:* IMEM, NANO, IOM, SPIN

**Stato dell'arte:** Al di fuori dell'ambito della registrazione delle informazioni, sensori magnetici consentono di rilevare segnali provenienti da oggetti di piccole dimensioni [(sub-)micrometriche] o da correnti di alimentazione. I dispositivi di interesse si basano su principi di funzionamento diverso. I sensori a magnetoresistenza gigante o tunnel (GMR e TMR) hanno variazioni di resistenza tipiche del 15 % (GMR) e 200% (TMR), isteresi < 30e e

linearità > 5% e sono quindi dispositivi adatti per applicazioni sensoristiche a basso costo. Oltre ai sensori GMR e TMR, sistemi a bassa dimensionalità con alte mobilità e basse concentrazioni di portatori presentano effetto Hall molto elevato e quindi sono sistemi ideali per la realizzazione di magnetometri estremamente sensibili. Ad esempio, gas elettronici bidimensionali costituiti da eterostrutture (Al/In)GaAs con dimensioni laterali di 1-10 micrometri presentano sensibilità di campo magnetico di  $10^{-6}$   $10^{-8}$  T/Hz<sup>-1/2</sup> e di flusso magnetico di  $10^{-4}\Phi_0$ . Questi sensori sono particolarmente adatti a lavorare come magnetometri per la caratterizzazione di piccoli cristalli in condizioni diverse di temperatura (0.1-300K), campo magnetico (fino a 10T) e anche in presenza di radiazione elettromagnetica. Recentemente sensori Hall e magnetometri flux-gate ad alta sensibilità (nT) sono stati realizzati anche con vetri di spin cresciuti con tecnologie integrate a quella del Si. Altri sensori, realizzati con materiali elastomagnetici costituiti da micro o nano particelle, ferromagnetiche e conduttive, disperse in una matrice elastica, o elastomerica, a frazioni volumetriche vicine alla soglia di percolazione, hanno dimostrato di possedere una sensibilità piezo-resistiva e magneto-piezo-resistiva altissime. Queste proprietà sono impiegate per realizzare sensori di spostamento e di oscillazioni, come pure per misurare piccole variazioni in campo magnetico, fornendo delle prestazioni molto competitive anche rispetto ad altre tecnologie.

Sensori magnetici con caratteristiche diverse trovano applicazione in svariati settori: per la sicurezza con il monitoraggio di correnti di alimentazione ad esempio nello "smart monitoring" dell'auto elettrica e nei sistemi di trasporto (treni, aerei); in sistemi di misura di precisione di proprietà magnetiche e imaging; come sensori di spostamento e oscillazioni a bassa frequenza, da integrare in sistemi di controllo e prevenzione, ad esempio, dei terremoti; fino ad applicazioni nel bio-medico per la detezione di marker magnetici. La possibilità di effettuare complesse analisi di laboratorio con sensori biomedicali utilizzando dispositivi miniaturizzati (lab-on-a-chip) [1] costituisce infatti un obiettivo estremamente attuale e di grande impatto nella società. Nel campo della biosensoristica, le sfide attuali riguardano l'ottenimento di dispositivi ultra-sensibili, specifici e capaci di analisi multiple. Accanto alle industrie Europee principali del settore quali Phillips, Siemens e STMicroelectronics (per elettronica), tecnologie basate su sensori ad alte prestazioni danno la possibilità a piccole e medie aziende di sviluppare applicazioni dedicate nei diversi settori sopra indicati in maniera competitiva.:

**Obiettivi del WP:** La ricerca internazionale nel settore è oggi rivolta a: i) aumentare la sensibilità dei magnetometri; ii) ridurre le dimensioni dei sensori; iii) integrare sensori magnetici in tecnologie correnti (CMOS) e di punta (lab-on-a-chip); iv) ridurre il consumo dei sensori; v) operare in condizioni ambientali difficili e disparate.

Su queste linee principali, gli obiettivi di questo WP sono rivolti a sviluppare conoscenze fondamentali e tecnologie integrate basate su sensori magnetici e mirate ad applicazioni specifiche. A questo scopo verrà perseguito un approccio multidisciplinare volto a condividere le conoscenze più avanzate e ad ottimizzare le infrastrutture esistenti nei vari Istituti, mentre progetti specifici verranno sviluppati da singoli gruppi di ricerca anche in collaborazioni con industrie nazionali e internazionali.

Obiettivi condivisi di questo WP nel campo dei bio-sensori magnetici sono: 1) innovare le strategie di trasduzione, utilizzando un approccio nanotecnologico e sviluppando nuovi metodi di trasduzione ed amplificazione del segnale basati su moderni sensori magnetoresistivi con struttura TMR, sensori Hall e sensori magnetoelettrici; (2) ottimizzare la piattaforma generica di rilevazione per una specifica applicazione biomedica mediante un'opportuna funzionalizzazione e la realizzazione di array di sensori integrati.

Obiettivi più specifici nel settore dello smart monitoring di correnti elettriche prevedono la realizzazione da parte di CNR-IMEM di sensori di Hall e magnetometri di tipo flux-gate con vetri di spin integrati su Si per applicazione nell'industria automobilistica. CNR-NANO ha il know how per integrare sonde di Hall a eterostrutture (Al/In)GaAs in sistemi crio-magnetici [2] e intende sviluppare magnetometri ad alta sensibilità e funzionanti in condizioni di temperatura e campo diverse per la caratterizzazione di materiali. Sonde Hall di dimensioni laterali submicrometriche (100nm) con elevata sensibilità di flusso magnetico [3] verranno anche sviluppate con materiali diversi e mediante tecniche di nano-litografia (EBL, FIB) per funzionare come sonde magnetiche in microscopi a scansione.

CNR-SPIN ha strumentazione ed esperienza per la produzione, caratterizzazione e applicazione in dispositivi, di sensori di nuovi materiali compositi costituiti da micro o nano particelle magnetiche e conduttive in una matrice elastica, in percentuali volumetriche intorno alla percolazione. Tali materiali compositi coniugano proprietà magnetoelastiche e

piezomagnetice, dando luogo a nuovi accoppiamenti tra proprietà di trasposto e di magnetoelasticità, come l'effetto magneto-piezoresistivo gigante [4]. Sulla base della grande sensibilità nella misura sia di gradienti di campi magnetici locali o di deformazioni ottenuta mediante tale effetto, verranno sviluppati prototipi di sensori di oscillazioni e di campi magnetici localizzati.

[1] Lab on a Chip 13, 730 (2013)

[2] Application note (2/08) - 1084-701 in <http://www.qdusa.com/techsupport/index.html>

[3] Nanotechnology 17 2105 (2006)

[4] J. Appl. Phys. 110, 063903 (2011)

### Tasks:

[Task 3.1] **Sensori TMR.** Strutture ottimizzate a multistrati magnetici con un'elevata magneto-resistenza saranno fabbricati dal CNR-NANO e INRIM usando MgO come barriera tunnel e strati magnetici quali NiFe, CoFe e IrMn con l'obiettivo di una loro integrazione in dispositivi biomedici. Mentre i dispositivi GMR sono più facili da integrare con componenti microfluidiche, le giunzioni TMR presentano un segnale maggiore pur mantenendo un costo limitato.

[Task 3.2] **Magnetometri integrati su Si.** Sfruttando competenze presenti a Istituto CNR-IMEM verranno sviluppati micro-sensori Hall e magnetometri flux-gate ad alta sensibilità, basati su vetri di spin cresciuti con tecnologie integrate a quella del Si per impiego nella sensoristica elettrica nell'auto elettrica ad alta efficienza energetica in collaborazione con STMicroelectronics (FP7-ENIAC JU e3car).

[Task 3.3] **MicroSonde di Hall.** Sensori Hall (sub-)micrometrici realizzati da CNR-NANO con eterostrutture a semiconduttore verranno integrati in sistemi commerciali come magnetometri ad elevata sensibilità oppure come sonde magnetiche per microscopi a scansione.

[Task 3.4] **Sensori magneto-elastici.** CNR-SPIN svilupperà dispositivi magneto-elastici da utilizzare in particolari ambienti di lavoro, in ambito civile, meccanico e biomedico, come sensori di spostamento e oscillazioni a bassa frequenza, da integrare in sistemi di controllo e prevenzione dei terremoti, delle vibrazioni meccaniche nei sistemi di trasposto pubblico (treni-aerei).

[Task 3.5] **Sensori magnetici per il Bio-Medicale.** Utilizzando sensori magneto-resistivi TMR e sonde di Hall, CNR-NANO svilupperà rivelatori di markers magnetici in sistemi biologici. Attività previste sono: 1) identificazione della funzionalizzazione adatta (basata su sistema geni e antigeni) per l'ancoraggio delle bio-molecole con marker magnetici; 2) integrazione di sensori magnetici in un sistema lab-on-a-chip contenente apposite componenti microfluidiche; 3) sviluppo di sistema elettronico per il riconoscimento del segnale magnetico.

### Collaborazioni:

Siemens

Quantum Design

ST-Microelectronics,

Nanomagnetics

### Milestones:

Task 3.1            Sensori TMR

MS1 mese 12    Identificazione di benchmark e dispositivi per applicazione specifiche.

MS2 mese 24    Sviluppo di dispositivi per applicazione specifiche.

MS3 mese 36    Test di dispositivi in condizioni di lavoro specifiche.

Task 3.2            Magnetometri integrati su Si

MS1 mese 12    Disegno di nuovi materiali, crescita e ottimizzazione delle proprietà;  
Progettazione di array di sensori magnetici e identificazione dei segnali.

MS2 mese 24    Realizzazione di film sottili ottimizzati come concentratori di flusso e integrazione con le tecnologie del Si.

MS3 mese 36    Ottimizzazione della micro/nanofabbricazione, sviluppo e test di prototipi Bio-medicale: sviluppo e test di prototipo funzionante.

Task 3.3            MicroSonde di Hall

MS1 mese 12    Test in condizioni di lavoro diverse.

MS2	mese 24	Integrazione si sonde Hall in sistemi commerciale.
MS3	mese 36	Test dei sistemi integrati di misura.
Task 3.4		Sensori magneto-elastici
MS1	mese 12	Test su materiali compositi innovativi.
MS2	mese 24	Sviluppo e test di sensori magneto-elastici.
MS3	mese 36	Test di sensori magneto-elastici in condizioni di lavoro.
Task 5.5		Sensori magnetici per il Bio-Medicale
MS1	mese 12	Identificazione marker magnetici e loro funzionalizzazione.
MS2	mese 24	Funzionalizzazione di nano-particelle magnetiche e superfici.
MS3	mese 36	Sviluppo e test di prototipo funzionante.

## WP.4 - Nano sensori superconduttivi ad interferenza quantistica

*Responsabile:* Carmine Granata

*Istituti CNR partecipanti:* ICIB, IBP

**Stato dell'arte:** I dispositivi superconduttori ad interferenza Quantistica (SQUIDs) sono tra i più sensibili rilevatori di flusso magnetico e sono usati con successo già da molti anni per misure di campo magnetico e del relativo flusso, di tensioni e correnti elettriche e più in generale per misura qualsiasi quantità fisica che può essere espressa in termini di campo o di flusso magnetico.

Un dc-SQUID è in grado di misurare flussi magnetici con densità spettrali inferiori a  $1\mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$  che corrispondono a campi magnetici dell'ordine di qualche femtoTesla su area efficaci dell'ordine di pochi  $\text{mm}^2$ .

Poiché la sensibilità di uno SQUID in termini di momento magnetico è inversamente proporzionale alla dimensione dell'area di cattura del flusso dello SQUID è stato calcolato che riducendo tale dimensione alla scala nanometrica è possibile ottenere sensibilità dell'ordine di pochi magnetoni di Bohr. Questa proprietà rende tali dispositivi particolarmente adatti alla misura di segnali magnetici estremamente piccoli rappresentando un potente strumento per l'analisi delle proprietà magnetiche di singole nanoparticelle (nanomagnetismo), molecole magnetiche, film di materiali magnetici particolarmente sottili e in applicazioni quali la microscopia magnetica a scansione, la magnetorilassometria, la nanoelettronica e molto altro.

Sulla base di queste considerazioni, negli anni recenti un grosso sforzo a livello internazionale è stato prodotto nella fabbricazione di sensori SQUIDs con dimensioni dell'anello di cattura del flusso inferiori al micron (nanoSQUIDs). I principali gruppi di ricerca impegnati in questo ambito sono il Quantum Team presso il National Physical Laboratory (Gran Bretagna), CSIRO (Australia), il gruppo NanoSpin presso l'istituto Néel, CNRS, (Francia), l'università di Tubingen (Germany) e l'Istituto di Cibernetica in Italia.

Allo stato attuale è stata raggiunta una densità spettrale di rumore in flusso pari a  $250 \text{ n}\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$  usando giunzioni tunnel di tipo SNS in Nb/HfTi/Nb fabbricate tramite electron beam lithography sebbene tale dispositivo è utilizzabile per campi magnetici di eccitazione piccoli. Molto recentemente è stato realizzato un dispositivo SQUID basato su giunzioni Josephson di YBCO del tipo grain boundary (GBJs) caratterizzato da una densità spettrale di  $2 \Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$  fino a campi magnetici di 1 Tesla [1].

In ogni caso questi dispositivi non sono ancora stati usati nella misura delle proprietà magnetiche di oggetti reali. Il gruppo dell'istituto di Cibernetica ha recentemente pubblicato la misura dell'isteresi magnetica di nanoparticelle di magnetite usando un nanoSQUID, mostrando al contempo le misure di rilassamento su scale temporali non raggiungibili dagli attuali strumenti commerciali [2]. I risultati sono molto incoraggianti anche in vista di studi sperimentali legati a "Exploring the No-Man's Land between Molecular Nanomagnets and Magnetic Nanoparticles" come suggerito da Gatteschi et al. in una recente review [3].

[1] T. Schwarz et al., ACS Nano, 7, 844, 2013

[2] R. Russo et al, Appl. Phys. Lett., 101, 122601 (2012)

[3] Gatteschi et al., Angewandte Chemie 124, 4792 (2012).

**Obiettivi del WP:** Scopo del progetto è lo sviluppo di dispositivi nanoSQUIDs per misure di materiali magnetici e nanoparticelle. I dispositivi realizzati saranno impiegati per lo studio delle

proprietà magnetiche di nanoparticelle e materiali magnetici forniti dagli altri partners e per lo sviluppo di un sistema di magnetorilassometria per diagnostica medica.

Schematicamente si possono definire per il WP quattro obiettivi principali:

- Ob 4.1 Progettazione, realizzazione e caratterizzazione di nanoSQUID basati sulla tecnologia del niobio mediante processi di litografia a fascio elettronico e focused Ion Beam sculpting.
- Ob 4.2 Ottimizzazione di sensoristica SQUID per l'analisi di della magnetizzazione di micro e nano particelle e rilassometria magnetica.
- Ob 4.3 Realizzazione di un rilassometro SQUID dimostratore per misure su campioni biologici in vitro.
- Ob 4.4 Realizzazione di un rilassometro SQUID prototipale per impieghi in campo biomedicale.

Un dc nanoSQUID consiste in un anello superconduttore con diametro inferiore al micrometro interrotto da due giunzioni Josephson. Attualmente i nanoSQUID sono fabbricati tramite litografia a fascio elettronico e realizzati con film superconduttori di Niobio, Alluminio o YBCO e tipicamente hanno giunzioni realizzate tramite nanostrutture del materiale superconduttore (Dayem Bridge).

In alcuni casi le giunzioni sono del tipo SNS definite tramite Electron Beam Lithography (EBL) o Focused Ion Beam (FIB). Il nostro gruppo ha una consolidata esperienza nella realizzazione e nella caratterizzazione di nanoSQUIDs in Niobio basati su Dayem bridges ottenuti tramite EBL; tuttavia la tecnica di realizzazione tramite FIB è una tecnica di nanolitografia complementare che dà la possibilità di ottenere giunzioni Josephson submicrometriche a partire da un multistrato di Nb/Al-AIOx/Nb che rappresenta il miglior approccio di realizzazione di giunzioni affidabili e riproducibili. Nel corso del progetto entrambe le tecniche nanolitografiche verranno usate per realizzare nanoSQUIDs comparando poi i risultati. I nanoSQUID realizzati tramite FIB in Nb/Al-AIOx/Nb saranno prodotti in configurazione verticale ovvero con il loop nello stesso piano delle giunzioni (tipo interferometro) e planare avente il loop ortogonale alle giunzioni. In entrambi i casi le dimensioni del anello avranno area inferiore a  $0.1 \mu\text{m}^2$ , mentre le giunzioni di tipo quadrato avranno un lato di  $0.2\text{-}0.4 \mu\text{m}$ . La tecnica di fabbricazione tramite EBL permette la realizzazione della sola configurazione planare e presenta limitazioni nella riproducibilità delle correnti critiche in quanto queste dipendono fortemente dal rapporto tra le dimensioni del Dayem bridge e la lunghezza di coerenza del film superconduttore, per cui piccole variazioni si traducono in grosse variazioni di corrente critica. Inoltre, per i nanobridges le modulazioni di corrente sono dell'ordine del 20-30% con correnti fino ai  $100 \mu\text{A}$  e decrescono al crescere della corrente critica.

Per contro, il principale vantaggio dei nanobridges prodotti tramite EBL risiede nella insensibilità dei Dayem bridge ai campi magnetici applicati fintanto che non si raggiungono i campi critici del film di Niobio dal quale sono costituiti, offrendo la possibilità di usare tali nanoSQUID in campi magnetici fino ad alcuni Tesla.

Tramite il processo di fabbricazione con tecnica FIB ci aspettiamo di ottenere risultati migliori in termini di controllo della corrente critica e della sua modulazione in campo magnetico. In particolare prevediamo di ottenere profondità di modulazione fino al 60-70% della corrente critica massima. Questo risultato rappresenterebbe un enorme miglioramento in termini del rapporto segnale-rumore e della sensibilità in spins.

Lo svantaggio è rappresentato dal basso valore di campo magnetico utilizzabile rispetto al nano bridge consentendo l'applicazione di campi magnetici fino ad alcune centinaia di Gauss.

Tali intensità di campo sono sufficienti per lo studio della rilassometria magnetica delle nanoparticelle ma sono troppo piccole per raggiungere il campo magnetico di saturazione per molti materiali magnetici di interesse.

In una prospettiva progettuale pluriennale l'attività descritta trova interessanti aspetti di natura applicativa in campo biomedico legati alla misura di rilassometria magnetica di nanoparticelle magnetiche.

Tale metodica si basa sulla rivelazione e studio delle proprietà superparamagnetiche di nanoparticelle utilizzate come marcatori. Le nanoparticelle magnetiche opportunamente funzionalizzate si legano a targets biologici (antigeni, cellule tumorali..); un debole campo magnetico polarizza le nanoparticelle che, dopo la rimozione del campo, rilassano. Misurando il rilassamento magnetico con opportuni dispositivi, è possibile determinare la posizione e la quantità dei targets. Utilizzando cellule vive e modelli animali, è stato mostrato che il suddetto

metodo ha numerosi vantaggi nella rivelazione e nell'imaging di campioni biologici. Le applicazioni sono di grande interesse ed includono la rivelazione di cellule T associate al rigetto nei trapianti, studio di piastrine e cellule leucemiche, diagnosi del tumore al seno, drug delivery e immunologia. Tale tecnica risulta inoltre essere molto promettente anche per la diagnostica in vivo in numerose patologie. Nell'ambito del progetto verrà realizzato un sistema prototipale basato su micro e nanoSQUID per la suddetta applicazione.

### **Tasks:**

[Task 4.1] **Sviluppo di micro e nanosensori SQUID:** La progettazione dei micro e nanoSQUID sarà effettuata da ICIB e prevede due diverse configurazioni: una verticale e una planare. Per ogni configurazione saranno valutati e scelti i parametri di base (densità di corrente critica, induttanza totale del dispositivo, parametri di rumore  $\beta_L$  and  $\Gamma$ ) al fine di ottimizzare la sensibilità in flusso magnetico e in spin. La fabbricazione sarà effettuata sia presso ICIB con l'utilizzo di litografia a fascio elettronico (EBL) che presso INRiM tramite fascio ionico focalizzato (FIB sculpting). Tramite EBL si fabbricheranno nanoSQUID basati su Dayem nanoBridges mentre con la tecnologia del FIB sculpting si fabbricheranno nanoSQUIDs con giunzioni tunnel Josephson submicrometriche.

[Task 4.2] **Caratterizzazione ed ottimizzazione di nanoSQUID:** La caratterizzazione verrà effettuata da ICIB e prevede misure in ambiente criogenico (4.2-1.2 K) e schermato contro i disturbi elettromagnetici sia a bassa che ad alta frequenza. La caratterizzazione consisterà in misure di corrente vs tensione, corrente critica e tensione vs flusso magnetico esterno, densità spettrale di rumore in flusso magnetico e in momento magnetico elementare (magnetone di Bohr). Verranno inoltre effettuate misure di rumore in funzione sia della corrente che del flusso magnetico di polarizzazione al fine di individuare il punto di lavoro ottimale dei nanodispositivi.

[Task 4.3] **Misura della magnetizzazione e del rilassamento di nanoparticelle magnetiche:** Micro e nanoparticelle fornite da ISM, verranno caratterizzate da ICIB utilizzando i nanoSQUIDs realizzati. In particolare si effettueranno misure di magnetizzazione e rilassamento magnetico al variare delle dimensioni delle nanoparticelle (4-12 nm) e della temperatura (7-1.2 K). Per queste misure verrà utilizzato un innovativo schema di lettura che prevede anche per i nanodispositivi isteretici un aumento del *range* dinamico lineare mediante un opportuno schema di retroazione negativa. Sia le misure di rilassamento che quelle di magnetizzazione verranno confrontate con le misure effettuate da strumenti commerciali. Presso l'IBP saranno effettuate misure preliminari con sensori SQUID in configurazione gradiometrica opportunamente progettati la cui sensibilità verrà testata su modelli cellulari (T47D o MCF7) e animali (topi transgenici Balb-C) utilizzando nanoparticelle funzionalizzate con recettori di membrana che riconoscono cellule tumorali metastatiche di cancro al seno.

[Task 4.4] **Progettazione e realizzazione di un rilassometro SQUID prototipale:** ICIB progetterà e realizzerà un sistema dimostratore basato su SQUIDs per la rilassometria magnetica finalizzati ad impieghi in biologia e medicina. Sulla base di opportune simulazioni e delle misure sperimentali sui diversi nano e micro dispositivi verrà scelta la configurazione ottimale da impiegare nel sistema di rilassometria. Particolare attenzione in fase progettuale sarà rivolta agli aspetti criogenici e di schermaggio elettromagnetico e alle bobine di eccitazioni dei campioni. Presso l'IBP verranno effettuati test preliminari su campioni biologici al fine di verificare il corretto funzionamento. La sperimentazione effettuata consentirà la realizzazione, in partenariato pubblico-privato, di un rilassometro SQUID prototipale per impieghi in campo Biomedico.

### **Collaborazioni**

Fluxonics: The European Foundry for Superconductive Electronics eV, Braunschweig (D).

Advanced Technologies Biomagnetic srl, Pescara

Seconda Università degli Studi di Napoli, Dipartimento Ingegneria dell'Informazione

Università degli Studi di Genova, Dipartimento di Matematica

Università degli Studi di Napoli "Parthenope"

NJMS---UH Cancer Center New Jersey Medical School, Newark (USA)

### **Milestones**

- MS4.1 mese 12 Progettazione di diverse configurazioni di dispositivi SQUID con risoluzione micrometrica e nanometrica e relativa fabbricazione attraverso Electron beam lithography o Focused Ion beam sculpting
- Caratterizzazione dei dispositivi realizzati con particolare riferimento alle densità spettrali di rumore in flusso allo scopo di determinarne la sensibilità e prime misure di magnetizzazione e rilassamento di micro e nanoparticelle magnetiche
- MS4.2 mese24 Analisi teorica e caratterizzazione tramite SQUID di nanoparticelle magnetiche "iron-free" per possibili applicazioni in ambito biomedico. Analisi delle prestazioni dei vari dispositivi realizzati dal punto di vista sperimentale e/o tramite simulazioni numeriche allo scopo di determinare il sensore ottimale per la caratterizzazione e per le misure di rilassamento magnetico delle nanoparticelle "iron-free".
- Progettazione di un sistema basato su sensori SQUIDs per studi di rilassometria magnetica di nanoparticelle di interesse biomedico con particolare attenzione agli aspetti di riduzione del rumore.
- MS4.3 mese 36 Realizzazione di un sistema per misure di rilassometria magnetica per applicazioni biomediche.
- Set-up del sistema di rilassometria magnetica e primi test di funzionamento

## WP.5 - Dispositivi superconduttivi mesoscopici per la rivelazione di fotoni

*Responsabile:* Gian Piero Pepe

*Istituti CNR partecipanti:* SPIN, NANO, ICIB

**Stato dell'arte:** I superconduttori sono sempre stati considerati come materiali di elezione per la realizzazione di rivelatori di radiazione, ciò a causa della bassissima energia di eccitazione (energy gap dell'ordine di 1 meV), del bassissimo rumore elettronico generato (dovuto anche alle temperature criogeniche di operazione) e dei tempi di risposta estremamente brevi. Attualmente molti dispositivi superconduttori sono utilizzati come rivelatori per radiazione nelle bande: X (MKIDs, STJ, TES) IR (SSPD) mmWaves (SIS). I principi su cui si basa il meccanismo di rivelazione vanno dall'induttanza cinetica propria di un superconduttore (MKIDS) all'effetto tunnel (STJ) alla transizione dallo stato Superconduttore a quello normale (TES e SSPD) al mixing non-lineare (SIS). Le possibilità offerte dalle moderne tecnologie di accedere alla dimensione nanometrica della materia (nanolitografia, e-beam lithography, FIB, AFM) permettono di studiare, ed utilizzare a fini applicativi, proprietà mesoscopiche, a metà strada tra il classico e il quantistico, che non hanno equivalente nel mondo macroscopico. Tali tecnologie, quando applicate ai materiali superconduttori anche di recente scoperta e caratterizzati da proprietà del parametro d'ordine superconduttivo non convenzionali, permettono la realizzazione di dispositivi con proprietà estreme in termini di sensibilità e velocità di risposta.

Il gruppo SPIN ha una lunga tradizione di studi e ricerche sulla superconduttività sia per quello che riguarda le proprietà di trasporto che per l'effetto Josephson. In particolare, una attività di studio ad alto impatto scientifico legata allo sviluppo di dispositivi superconduttivi basati su giunzioni Josephson nel contesto dei rivelatori di radiazione oppure nello studio del tunneling quantistico macroscopico e nei fenomeni di coerenza quantistica ad esso collegati hanno caratterizzato la produzione di molti ricercatori che oggi operano all'interno di PSIN. In questo contesto, l'Istituto ospita all'interno delle proprie strutture molti sistemi di deposizione basati su tecniche differenti (dallo sputtering alla deposizione assistita da laser al fascio elettronico), che sono utilizzati per depositare tutti i materiali superconduttori dai metallici convenzionali agli ossidi superconduttivi, ai pnictidi, agli organici. Inoltre, vari criostati disponibili consentono misure fino a 20mK. La maggior parte dei criostati sono schermati rispetto ai campi magnetici esterni proprio per consentire misure di effetto Josephson con la massima accuratezza possibile. I laboratori SPIN hanno anche dei laboratori di micro e nano litografia per la fabbricazione di giunzioni Josephson, che si appoggiano anche a facilities di supporto

come sistemi per la deposizione controllata di ossidi isolanti, di etching selettivi, di etching chimici e di etching fisici basati su ion milling a bassa energia.

Il gruppo NANO con sede al NEST-CNR ha tradizione in caratterizzazioni magnetoeltriche di nanodispositivi a temperature criogeniche. Il laboratorio e' attualmente equipaggiato con svariati criostati ad  $^3\text{He}$  in grado di raggiungere temperature fino a 230 mK, e criostati a diluizione per il raggiungimento di temperature ultrabasse (<10 mK). Tali criostati sono equipaggiati con campi magnetici fino a 16 T.

Dal punto di vista della fabbricazione dei nanodispositivi, tutti i processi nanolitografici realizzati al NEST utilizzano la propria camera bianca. Quest'ultima e' equipaggiata con litografia UV ed elettronica, microscopia SEM, TEM, STM, AFM, SGM, sistemi di deposizione (evaporatori resistivi e a fascio elettronico, sputtering) per metalli ed isolanti, etching di tipo RIE ed ICP-RIE, e ALD per la deposizione film dielettrici di alta qualità.

Il gruppo ICIB ha una consolidata tradizione di studi e ricerche sulla superconduttività ed in particolare sullo studio e lo sviluppo di rivelatori quantistici e dispositivi superconduttori non convenzionali. Le competenze vanno dalle tecnologie di micro e nano-fabbricazione di dispositivi superconduttori basati sia su superconduttori LTS (NbN, Nb, Ta, Al) che HTS (YBCO, Fe-based supercond). Il gruppo ha competenze nella misura a basse temperature di rivelatori sotto radiazione di diversa natura (sorgenti laser, sorgenti nucleari) e possiede vari criostati che consentono misure a basso rumore fino a 50mK.

**Obiettivi del WP:** Scopo del WP5 è di **coniugare le tecniche di strutturazione della materia su scala nanometrica con i materiali superconduttori e magnetici per realizzare dispositivi dalle caratteristiche avanzate e con grande potenziale applicativo**. La rivelazione di fotoni singoli apre molte possibilità applicative nei settori delle telecomunicazioni ottiche su lunga distanza, della crittografia quantistica, della biologia molecolare con marcatori ottici, della metrologia ottica, dell'astronomia, ecc. La realizzazione di giunzioni Josephson su scala nanometrica permette di studiare proprietà dei materiali superconduttori su scale confrontabili con le lunghezze caratteristiche della superconduttività e di sfruttare le proprietà quantistiche macroscopiche associate all'effetto Josephson per rivelare con estrema sensibilità perturbazioni dovute all'assorbimento di radiazione elettromagnetica.

## Tasks

[Task 5.1] **Fabbricazione e caratterizzazione di nanowires ibridi superconduttore/ferromagnete per la rivelazione ottica avanzata:** Tra i dispositivi elettronici superconduttori quelli che oggi prevedono una ibridizzazione tra materia superconduttiva e magnetismo sembrano essere alquanto promettenti sia nel campo dell'elettronica digitale (sviluppo di memorie, spin-valve superconduttive, generatori controllati di fase in dispositivi quantistici, et..) sia nel campo più specifico dei sensori di radiazione elettromagnetica attraverso la possibilità che essi offrono di controllare il valore della corrente critica attraverso meccanismi di pinning intrinseci, di rendere più veloci le dinamiche delle eccitazioni prodotte, agendo contestualmente come protective layers in processi di definizione geometrica nanometrici. Da questo punto di vista nano strutture ibride del tipo S/F impieganti sia materiali convenzionali (Nb, NbN, Al) accoppiati con deboli ferro magneti (es. FePd, NiCu) od anche ossidi superconduttivi (e.g. YBCO) accoppiati a manganiti possono costituire interessanti configurazioni per lo sviluppo di rivelatori di fotoni e/o per lo sviluppo di dispositivi elettronici in cui il controllo dello spin passa anche per la presenza dello stato superconduttivo. Una attività teorica di supporto è prevista sulla base delle conoscenze sviluppate all'interno degli Istituti coinvolti nell'ambito dello studio dell'interplay tra ferromagnetismo e superconduttività.

[Task 5.2] **Fabbricazione e caratterizzazione di giunzioni Josephson mesoscopiche del tipo SNS e SFS per la rivelazione di radiazione IR:** La realizzazione di rivelatori Josephson mesoscopici per applicazioni nel campo dell'IR riveste un grande interesse in questo campo: si tratta dello sviluppo di sensori superconduttivi recentemente ideati e brevettati, frutto di una collaborazione tra l'Istituto Nanoscienze, l'Istituto SPIN e la Helsinki University of Technology (TKK). Essi sono basati sulla realizzazione di giunzioni mesoscopiche tipo in line di tipo superconduttore-normale-superconduttore, e viene sfruttata la dipendenza esponenziale della supercorrente Josephson dalla temperatura per la rivelazione di radiazione ad elevata sensibilità. Tale rivelatore superconduttivo risulta particolarmente adatto alla regione del lontano e medio infrarosso. Il rivelatore può operare sia come bolometro, cioè misurando l'intensità della radiazione incidente in maniera continua, che come calorimetro, cioè

misurando l'energia dei singoli fotoni. Le performance di tale detector saranno notevoli, basti pensare che in linea di principio è possibile ottenere NEP (NoiseEquivalentPower) dell'ordine di  $7 \times 10^{-20}$  WHz-1/2 a 300 mK se operante in configurazione bolometrica (cioè ~7 ordini di grandezza migliori che nei sensori commerciali a semiconduttore), e rapporto segnale/rumore (S/N) di  $\sim 10^3$  a 40 THz nella configurazione di detector a singolo elettrone. In questa configurazione sarà molto interessante verificare la possibilità offerta dalla natura ferromagnetica del contatto intermedio normale della giunzione, dove anche il ruolo dello spin elettronico può essere tenuto in conto per il controllo della risposta del dispositivo ad un agente perturbativo esterno.

[Task 5.3] **Fabbricazione di dispositivi e sensori con nuovi materiali a base di ferro:** Il grande potenziale offerto dai materiali superconduttori a base di ferro (iron-based superconductors, IBS) recentemente scoperti può rappresentare un banco di prova ideale per sviluppare dispositivi basati sull'interazione tra magnetismo e superconduttività, per le loro proprietà magnetiche intrinseche e per la loro realizzabilità come strati epitassiali su film sottili di ferro. Inoltre dispositivi di tipo Josephson basati su IBS possono contribuire a fornire informazioni importanti sul tipo e simmetria del parametro d'ordine responsabile della superconduttività in questi materiali.

Gli IBS hanno una struttura atomica abbastanza complessa e richiedono tecnologie specifiche di fabbricazione e manipolazione. Gli IBS saranno realizzati in forma di film sottili, nell'ambito del progetto coordinato Europa-Giappone IRONSEA, dal CNR SPIN di Genova e dall'IFW di Dresda, oltre che dai partner giapponesi del progetto. Per la realizzazione e la caratterizzazione elettrica e magnetica dei dispositivi di tipo SF e utilizzando IBS, si utilizzeranno le strutture di fotolitografia, criogeniche e di misura disponibili presso il CNR SPIN e ICIB. In questo modo verranno realizzati:

- sensori a strip di dimensione micrometrica e sub micrometrica per la rivelazione di radiazione ottica nel visibile ed IR,
- giunzioni Josephson di tipo a bordo di grano utilizzando substrati bi-cristallini
- giunzioni utilizzando superconduttori differenti, di tipo SIS' o SNS'.

I dispositivi realizzati verranno caratterizzati nelle proprietà di trasporto elettrico e magnetico, e tramite misure sensibili sia alla fase sia all'ampiezza del parametro d'ordine, non convenzionale in questi materiali. Verranno inoltre effettuate analisi di foto risposta elettrica veloce, di foto risposta ottica con pump probe e di spettroscopia di rumore.

## Collaborazioni

Università degli Studi di Napoli Federico II  
Università degli Studi di Salerno  
Seconda Università di Napoli

## Milestone per i tre anni

Task 5.1 Fabbricazione e caratterizzazione di nanowires ibridi superconduttore/ferromagnete per la rivelazione ottica avanzata

- MS5.1.1 mese 12 Realizzazione di strutture F/S basate su superconduttori tradizionali ed ad alta Tc.
- MS5.1.2 mese 24 Misura di foto risposta e misure di dark-counts
- MS5.1.3 mese 36 Realizzazione di dispositivi ibridi per la rivelazione di radiazione ottica

Task 5.2 Fabbricazione e caratterizzazione di giunzioni Josephson mesoscopiche del tipo SNS e SFS per la rivelazione di radiazione IR

- MS5.2.1 (mese 12) Realizzazione di giunzioni mesoscopiche SNS
- MS5.2.2 (mese 24) Caratterizzazione proprietà di rivelazione di radiazione  
Realizzazione di interferometri tipo SQUID SNS  
Dimostrazione proprietà di NEP e rapporto S/N dei rivelatori realizzati

Task 5.3 Fabbricazione di dispositivi e sensori con nuovi materiali a base di ferro

- MS5.3.1 (mese 12) Definizione processo di fabbricazione dispositivi rivelatori basati su IBS

**Articolazione temporale delle attività del Progetto**

		mesi					
W	T	1 - 6	7 - 12	13 - 18	19 - 24	25 - 30	31 - 36
1	1						
	2						
	3						
2	1						
	2						
	3						
3	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
4	1						
	2						
	3						
	4						
5	1						
	2						
	3						

**Elenco dei partecipanti al Progetto suddivisi per Istituto CNR***PERSONALE STRUTTURATO (ricercatori, tecnologi, tecnici, amministrativi)*

ICIB: L.Arena, R.Boccaccio, C.Camerlingo, R.Cristiano, A.D’Orazio, M.Ejernaes, E.Esposito, V.Formicola, C.Granata, M.Lisitskiy, P.Mignano, R.Monaco, C.Nappi, S.Piscitelli, A.Rosa, B.Ruggiero, M.Russo, R.Russo, E.Sarnelli, C.Tortiglione, A.Vetoliere, E.Vitale;

IMEM: F.Albertini, F.Casoli, R.Cabassi, L.Nasi, C.De Julian Fernandez,

IOM: G.BiasioL, G.Pennaccione, I.Vobornik

ISM: E.Agostinelli, A.Barla, V.Bellini, C.Carbone, V.Foglietti, S.Laureti, P.Moras, A.M.Testa, G.Varvaro

NANO: S.Benedetta, A.Di Bona, F.Giazotto, P.Luches, G.Marruccio, L.Sorba, V.Tasci,

SPIN: L.Aruta, E.Bellingieri, F.Bisio, C.Cirillo, M.Cuoco, P.Gentile\*, G.Lamura, P.Lucignano\*, A.Martinelli, N.Martucciello, R.Moroni, P.Orgiani, I.Pallecchi, L.Pellegrino, G.P.Pepe, S.Picozzi, A.Stroppa, M.Salluzzo, M.Valentino

IBP: G.F.Peluso

*PERSONALE A TEMPO DETERMINATO*

NANO: C.Altimiras, V.Arima, L.Laureana Del Mercato, M.Amado Montero,

SPIN: P.Gentile,

*PERSONALE NON STRUTTURATO**ASSEGNISTI:*

ICIB: A.Ambrosone, S.Rombetto;

*DOTTORANDI:*

ICIB: A.Iuliano, A.Polverino;

Sei persone facenti parte del personale di ICIB saranno in parte impiegate per la gestione tecnico-amministrativa del Progetto e per promuovere la disseminazione dei risultati conseguiti. Tutto il rimanente personale esposto sarà dedicato alla Ricerca.

Donne e giovani di età inferiore ai 35 anni sono indicati rispettivamente con sottolineatura e asterisco.

A livello nazionale le unità CNR che si occupano di sensori magnetici e superconduttivi sono al centro di una rete estesa di **collaborazioni** scientifiche e tecnologiche con **Università**, altri **Enti di Ricerca** ed **industrie** di differente dimensione e ben articolate nel territorio nazionale. Sono altresì importanti le collaborazioni e le commesse di ricerca radicate sul territorio con enti locali come **Regioni** e loro **Distretti** e **Poli Tecnologici** che operano in ambito elettronico. In accordo con ciò, larga parte dei fondi a disposizione dei ricercatori che operano in questo settore proviene dal successo avuto in risposta a bandi ministeriali MIUR (FISR, FIRB, PRIN), MISE (PON), MAE ecc.

La reputazione dei ricercatori coinvolti è ben testimoniata dalla partecipazione ad un gran numero di progetti di ricerca internazionali, in cui i ricercatori di CNR hanno ruoli di coordinamento o di leadership. A titolo di esempio:

- European Science Fundation(ESF), Eurographene programme(2010-2013). Graphene-based systems for spintronics: Magnetic interactions at the graphene/3d-metal interface (SPINGRAPH)
- FP7-REGPOT2010- "MAMA: unlocking research potential for multifunctional advanced materials and nanoscale phenomena", Grant Agreement No. 264098 (2010-2013) .
- European Science Fundation (ESF), SONS programme (2007-2010). Self-assembled Nanoscale Magnetic Network (SANMAG)
- FP7-STREP 2008- Macroscopic Interference Devices for Atomic and Solid-State Systems, Grant agreement No. 214025 (2008-2011)
- Progetto FP7 ENIAC-JU "Nanoelectronics for an Energy Efficient Electrical Car (E3car)" 2009-2012
- FP7 MAGDRIVE "Magnetic superconductor Cryogenic Non-harmonic Drive –MAGDRIVE" 2011-2014
- TERASUPER "Superconducting Proximity Josephson Detectors for THz vision and Imaging", Finanziamento Ministero Italiano della Difesa (2011-2014)
- PRIN 2009: Dispositivi ad effetto di campo basati su nanofili e superconduttori ad alta temperatura critica
- FUTURO IN RICERCA "Nanostrutture ibride superconduttore-semiconduttore: applicazioni nanoelettroniche, proprietà topologiche, correlazione e disordine. Codice: RBFR1236VV\_001" (partenza 2013)
- Partenariato in *Fluxonics: the European Foundry for Superconductive Electronics eV* (Braunschweig, D)

## Costo del Progetto

La tabella sottostante fornisce una stima del costo del Progetto sulla sua intera durata triennale

	I anno	II anno	III anno	
FOE 7%	2.50	0	0	[M€]
Cofinanziamento	0.40	0.72	0.72	
Totale	2.90	0.72	0.72	

I costi relativi al primo anno, dettagliati per voci di spesa, sono riportati nella relativa tabella. Essa rispecchia, anche se ciò non è esplicitamente visibile, una sostanziale equivalenza di costo a gravare sui FOE7% fra i WP. In tabella, inoltre, si riporta un cofinanziamento di relativamente modesta portata legato all'attività programmata nell'ambito del WP.4 e dovuto principalmente agli aspetti applicativi a breve range dell'attività.

Relativamente ai due anni successivi viene data una valutazione approssimativa del finanziamento/autofinanziamento al momento prevedibile.

La copertura finanziaria del II e III anno è legata a convenzionali forme di finanziamento quali Progetti Bandiera, POR, PON, accordi con le Regioni che coinvolgono, in varia misura, tutti gli Istituti della compagine; tuttavia nel corso del I anno si agirà attivamente nell'identificazione di aziende e partner europei e internazionali interessati allo sviluppo di sensori magnetici al fine

di coinvolgere più efficacemente il mondo imprenditoriale in questo settore che già offre interessanti opportunità a livello applicativo ma ancor più interessanti prospettive per il futuro.

#### STIMA dei COSTI del PROGETTO

Macrovoce di spesa	Ammontare previsto	Fonte FOE 7%	Cofinanziamento Altre fonti di copertura	Incidenza percentuale
<b>Personale</b>	€ 1.597.000,00	€ 1.500.000,00	€ 97.000,00	55,13%
<i>Strutturato (ricercatori, tecnologi, tecnici, amministrativi)</i>	€ 1.500.000,00	€ 1.500.000,00	€ 0,00	51,78%
<i>Tempo determinato</i>	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	0,00%
<i>Non Strutturato (borsisti, assegnisti, etc..)</i>	€ 97.000,00	€ 0,00	€ 97.000,00	3,35%
<b>Prestazione di terzi</b>	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	0,00%
<b>Materiali</b>	€ 780.000,00	€ 480.000,00	€ 300.000,00	26,92%
<b>Attrezzature</b>	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	0,00%
<b>Infrastrutture</b>	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	0,00%
<b>Spese generali</b>	€ 500.000,00	€ 500.000,00	€ 0,00	17,26%
<b>Altre tipologie</b>	€ 20.000,00	€ 20.000,00	€ 0,00	0,69%
<i>Missioni e pubblicazioni</i>	€ 20.000,00	€ 20.000,00	€ 0,00	0,69%
<b>Totale</b>	€ 2.897.000,00	€ 2.500.000,00	€ 397.000,00	100,00%

### Ruolo dell'INRiM

L'INRiM coordina e partecipa ai seguenti progetti sulle attività del programma qui proposte:

- Progetto PRIN: Controllo della Dinamica della Magnetizzazione in Nano strutture Magnetiche per Applicazioni nelle Tecnologie dell'Informazione e della Comunicazione (DyNanoMag, codice - 2010ECA8P3)
- Progetto Premiale P4: Nanotecnologie per la metrologia elettromagnetica (Giorgio Bertotti)
- Progetto Premiale: Realization of the International System units from the fundamental constants of Physics”  
Task 2.1: Quantum national standard of ac voltage

### Risultati attesi dalla ricerca, loro interesse per l'avanzamento delle conoscenze ed eventuali potenzialità applicative

I principali risultati attesi sono riportati nel contesto dei singoli WP ed in particolare il loro raggiungimento è scandito dai Milestones che si susseguono con frequenza annuale. Evitando di riportare una lunga serie di Deliverables, per altro in assenza di un finanziamento certo per gli anni successivi, vale la pena evidenziare le tipologie dei risultati che la presente iniziativa si propone.

La coerenza con gli obiettivi strategici, i risultati attesi in generale vanno a costituire una filiera che ha origine dallo studio e caratterizzazione di materiali magnetici per poi sviluppare tecnologie di fabbricazione (in particolare di nanofabbricazione) e infine sviluppare dispositivi e sensori innovativi. Il Progetto porterà quindi, oltre ad un avanzamento di conoscenze, anche un progresso delle capacità tecnologiche ai fini dello sviluppo di dispositivi e sensori reali. Aspetto rilevante è legato al ruolo rilevante che il Progetto potrà svolgere quale catalizzatore per una numerosa comunità di ricercatori non solo del CNR ma anche dell'Università. Essa infatti, pur non comparando esplicitamente nella programmazione delle attività, è ben presente attraverso l'alto numero di associati universitari che lavorano negli Istituti CNR e che hanno preso parte attiva alla stesura del Progetto.

Le ricadute attese per il Progetto riguarderanno:

- La disseminazione dei risultati scientifici ottenuti (pubblicazioni su riviste internazionali, comunicazioni a congressi, organizzazione di meeting)
- La messa a disposizione, in maniera coordinata, di competenze e tecnologie ad una utenza esterna
- Una azione di trasferimento tecnologico alle imprese

Le potenzialità applicative dell'attività svolta sarà testimoniata dalla realizzazione di un'ampia serie di dispositivi e sensori (dimostratori), in alcuni casi, da sistemi prototipali che trovano applicazione in vari campi dall'ICT alla diagnostica Biomedica. Tali sistemi sono già di interesse di partner industriali con i quali sono in fase avanzata accordi di collaborazione e partenariato. Identificazione di aziende e partner europei e internazionali interessate a sviluppo di sensori magnetici.

## **Elementi e criteri proposti per la verifica dei risultati raggiunti**

La valutazione del Progetto avverrà sulla base delle seguenti azioni:

- Stesura di un report semestrale delle attività
- Organizzazione di un Workshop annuale (in eventuale concomitanza con altra manifestazione a carattere nazionale)
- Pubblicazioni su riviste internazionali, comunicazioni a congressi, brevetti
- Messa a disposizione a livello italiano e/o europeo di KETs
- Operatività di dispositivi e sensori dimostratori
- Operatività di sistemi prototipali
- Partecipazione coordinata dei partner del Progetto ad ulteriori iniziative progettuali (In generale: presentazione di progetti di ricerca applicata in ambito Horizon2020 e internazionale)

**Project**

Materiali e dispositivi magnetici e superconduttivi per sensoristica e ICT

**Area of interest**

ICT e Sensors

**Action**

TWO

**Coordinator**

7Uf'c'7UfVcbY

Istituto X]Ghfi hi fU'XY''U'A UHYf]U'!'=-GA

**List of participants***CNR Departments*

Dipartimento Scienze Fisiche e Tecnologie della Materia, DSFTM

Dipartimento di Scienze Biomediche

*CNR Institutes*

ICIB – Istituto di Cibernetica *E.Caianello*

IMEM - Istituto dei materiali per l'elettronica ed il magnetismo

IOM - Istituto Officina dei Materiali

ISM - Istituto di struttura della materia

NANO - Istituto di Nanoscienze

SPIN - Istituto Superconduttori, Materiali Innovativi e Dispositivi

IBP - Istituto di Biochimica delle Proteine

*Other EPR Involved*

Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (**INRiM**) - Ente vigilato dal MIUR -

*Other Institutions Involved*

Fluxonics: The European Foundry for Superconductive Electronics eV, Braunschweig (D).

Advanced Technologies Biomagnetic srl, Pescara

Seconda Università degli Studi di Napoli, Dipartimento Ingegneria dell'Informazione

Università degli Studi di Genova, Dipartimento di Matematica

Università degli Studi di Napoli "Parthenope"

NJMS---UH Cancer Center New Jersey Medical School Newark USA

**Key words**

Magnetism, Superconductivity, Innovative Materials and Devices, Sensors

**Goals the project aims to achieve**

The target of the project is to coordinate the expertises in Physic Chemistry, Engineering, Biology of departments aimed to the promotion of the research and development of materials, new magnetic and superconducting devices. The interest of this research covers the technologies for the information and communication (ICT) and the sensor fields.

The synthesis of new materials and in particular of nano-materials having a peculiar morphology and structure, in the recent years has produced significant contributions to the semiconductor physics and magnetism, which represent the basis of ICT. The growing interest of the scientific community for the magnetic nano-materials mainly arises from the discovery of magnetoelectrical and spintronic phenomena where the electric transport properties are strongly related to the magnetic state of the material.

The ability to jointly manipulate the magnetic and electric state offered the opportunity to develop fast sensors and high density non-volatile memories with promising applications in the

magnetic recording industry, sensors, consumer electronics and information technology, in addition to the applications already developed. Due to the complex relationship between the magnetic and chemical processes and the structural factors, the study and development of new materials for applications in sensor and device technologies requires advances in both understanding the fundamental processes of the matter and the ability to design and to fabricate materials having specific functionalities. Furthermore, the interplay between superconductivity and magnetism has recently opened new and interesting possibilities in the field of superconducting electronics and in particular in the sensor technology. In fact, superconductor/ferromagnetic hybrid structures represent a new stimulating researches since they offer the ability to control the spatial dependence of the superconducting order parameter in the F layer, introducing also a control on the phase parameter which characterizes the superconducting state. Furthermore these hybrid structures allow to modify the mechanisms of electron scattering underlying the relaxation processes in many sensors and electromagnetic radiation detectors. It is worth to note that, recently, special efforts have been devoted to the development of superconducting nanodevices, and in particular the nano superconducting quantum interference devices (nanoSQUIDs) based on Josephson tunnel junctions. This interest is due to the capability of these nanodevices to investigate small spin populations like single magnet molecule, cold atoms clouds and single atom/electron. The study of such systems provides interesting and encouraging applications in different fields like the material science, the chemistry, the information technology, the medical and biological sciences. The study of magnetic nanoparticles using the nanoSQUIDs is very interesting. In fact, they have a magnetic flux capture area less than  $1 \mu\text{m}^2$  allowing the investigation of small clusters of nanoparticles which are not detectable by using conventional techniques. The magnetic nanoparticles study, in particular the iron-free ones, is an interesting and relevant topic in view of its employment in the new biomedical diagnostic techniques. The institutes involved in the research program have expertise and experience in the new materials synthesis, in the electronic and magnetic structural investigation using both experimental and theoretical methods, in the characterization of transport, mechanical and chemical properties, in the manufacturing processes and functional systems, in the design and the realization of devices. Furthermore, the institutes involved in this project have been obtained excellent results in research areas related to new types of superconducting and magnetic sensors. The aim of the integrated project between the DSFTM Department and the National Institute of Metrological Research (INRiM) in view of reinforcement of actual many scientific collaborations, is to promote the study of superconducting and magnetic materials for the development and realization of novel sensors and devices.

Strategic targets of the project are:

- Ob.1 Development of innovative materials and systems for devices and superconducting and magnetic sensors
- Ob.2 Realization of prototype devices and sensors for possible applications in nanoelectronics, spintronics and metrology
- Ob.3 Create a national consortium to combine complementary expertise and convey potential synergies in order to compete at the international level

In order to achieve these objectives, the skills available in some enabling technologies of CNR institution are fundamental. In fact they correspond to those identified by the European Commission among the KETs able to create the knowledge and the technology suitable to creation of priority development areas.

### **Duration of the project**

36 months

### **Articulation of the Project**

The project is divided into five workpackages:

## WP.1 Spintronic devices for magnetic memories and sensors

- t1 Material properties and multilayer growth:
- t2 Nanofabbricazione di strutture ad effetto GMR e TMR
- t3 Nanofabrication of GMR and TMR structures

## WP.2 New multifunctional materials and nano-composite systems for sensors and magnetic devices

- t1 Materials - preparation and properties.
- t2 Nanocomposites structures - realization and properties
- t3 Nanofabrication and new devices

## WP.3 Magnetic sensors

- t1 TMR sensors
- t2 Magnetometers integrated on Si
- t3 Hall Microprobes
- t4 Magneto-elastic Sensors
- t5 Magnetic Sensors for Bio-Medical applications

## WP.4 Superconducting quantum interference nanosensors

- t1 Design and fabrication of micro and nanoSQUIDs
- t2 Characterization and optimization of nanoSQUIDs
- t3 Measurements of magnetization and relaxation of magnetic nanoparticles
- t4 Design and implementation of a prototypal SQUID relaxometer

## WP.5 Mesoscopic superconducting devices for photon detection

- t1 Fabrication and Characterization of hybrid superconductor/ferromagnetic (S/F) nanowires for advanced optical detectors
- t2 Fabrication and characterization of mesoscopic Josephson junctions of SNS type for infrared radiation detection
- t3 Fabrication of devices and sensors with novel superconducting materials based on iron

In greater detail:

## WP.1 - Spintronic devices for magnetic memories and sensors

*Responsible:* Carlo Carbone

*CNR Institutes involved:* ISM, NANO, SPIN, IMEM

**State of the art** : Significant progresses in the physics of magnetotransport (spintronics) are nowadays largely favoring the development of new technologies which utilize nanoelectronics devices operating by spin-dependent carrier transport (1). An important example of such emerging technologies is represented by the magnetic random access memories (MRAM), made by a matrix of spin valve cells, where each individual cell stores an information bit. The information is coded by the magnetization orientation of thin metallic films separated by

insulating layers. It is read by means of the tunneling magneto-resistance effect (TMR), similarly to the operation of metallic spin-valves exploiting the giant-magneto-resistance effect (GMR) (2). The MRAM technology is extremely promising for the creation of non-volatile memories, with several attracting properties, such as an easy access to the recorded information, low-energy consumption, and high storage density, with an overall advantage over other types of non-volatile storages (e.g. flash, DRAM, SRAM, phase change). It attracts for these reasons increasing interest, also in view of a manifold of diversified applications, including national defense and security purposes. The informatics industry pursues, for instance, on the basis of efficiency and energy saving consideration, the developments of high density non-volatile memories capable of maintaining the operative state when turned off without energy consumption and able of instantaneously recovering the full functionality (normally off- instantaneously on). MRAM memories are presently in a state of limited commercial production, while major companies in the ICT field (e.g. IBM, Hitachi, Samsung, NEC) are developing prototypes with continuously improving performances.

**WP objectives:** Further advances in this research and development field are mainly foreseen in the optimization of new operative methods for the information writing and reading, with the goal of increasing efficiency (e.g. response time and speed), developing convenient production schemes (simplified architecture, vertical integration of different devices), lowering the energy consumption (e.g. the current for bit-switching) and in the introduction of new multifunctional materials. In the frame of the present project, the WP1 in conjunction with other WPs activities will address various aspects regarding fundamental and material specific processes, the fabrication and the optimization of functional properties in non-volatile memory elements and spintronics devices, operating by TMR and GMR effects. The project will make a coordinated and integrated use of the facilities available to the participating institutes for the growth and characterization of new nanomaterials, for the nanofabrication of functional elements by lithography methods, and for their integration in nanoelectronic devices. Writing and reading processes will be examined and purposely tailored in MRAM and spin-valve elements with the following goals:

***I ) To acquire the capabilities for optimizing multilayer properties in order to read the magnetic state by TMR and GMR, and to efficiently manipulate the magnetic state by spin-polarized current injection.***

TMR and GMR reading, in combination with writing by spin-transfer torque (STT), allow highly integrated new architectures (all-current driven), which constitute a key step for the developments of new non-volatile magnetic memories. To this purpose we intend to produce and optimize, with the support and guide of theoretical calculations and micro-magnetic models, multilayer structures including high-TMR insulating and non-magnetic spacers, such as MgO and composite materials (e.g. nanoclusters and core shell assemblies in non magnetic matrixes). Optimization of the writing processes will be accomplished by manufacturing magnetic metallic elements, integrated in TMR structures, of extremely miniaturized lateral scale and with low magnetic switching current. The reduced scale, besides for increasing the information storage density, is essential for achieving high writing efficiency, because the bit-switching current is proportional to the lateral size of the elements.

***ii) To fabricate elements of size below 50 nm, for which STT-writing requires significantly lower currents compared to magnetic field-induced switching.***

To this scope, we will produce and optimize multilayer nanostructures of nm-size by top-down techniques, via FIB, EBL and optical lithography, and by bottom-up methods, by growth on appropriate templates of composite made by (hard/soft films) magnetic materials, with well defined geometries and interfaces properties (3). Such methods will also be utilized for the production of GMR spin-valves of sub-micrometric dimensions. The developments of nano-spin-valves, with controlled structure, perpendicular magnetic anisotropy, and high GMR response, will be directed towards to realization of submicrometric-arrays of magnetic field sensors, for which several types of applications can be foreseen, among which, for instance, three-axial magnetometry for archeomagnetism.

***iii) To realize nanometric planar spin valve by injecting spin polarized currents in high mobility semiconductors.*** Such activity besides the realization of innovative magnetic sensors and devices opens in perspective the way to the integration of spintronics and electronic devices. Furthermore, the planar geometry allows for the manipulation of the valve

transfer characteristics by applying a gate voltage (i.e it allows for the realization of a spin transistor). Finally, other innovative schemes for non-volatile magnetic information storage, such as the racetrack memories, are based on planar structuring and on angular momentum transfer induced by spin-polarized currents. The working principle of these magnetic devices, constructed by an array of nanoconstrictions, relies on the pinning and depinning of domain walls by STT effects. The wide set of lithographic techniques available to the project partners will allow us to properly modulate the characteristics of these devices, which, since they operate through current control, provide good opportunities of high integration in nanoelectronics.

(1) S.D. Bader and S.S.P. Parkin, Annual Review of Condensed Matter Physics, 1, 71 (2010)

(2) Wei-Gang et al. Nature Materials 11, 64 (2012)

(3) Ion Bitai et al Science, 321, 939 (2008).

## **.Tasks:**

### **[Task1.1] Material properties and multilayer growth:**

TMR multilayers will be produced and optimized through an atomic scale control of the structure and thickness of the insulating spacer and of the chemical and electronic structure of the interfaces, by NANO-CNR, IMEM-CNR and SPIN-CNR. ISM-CNR, IMEM-CNR and INRIM will similarly grow hard-soft all-metal multilayers with properties modulated by exchange coupling at hard-soft interface. The GMR characteristics of these layer systems will be examined, controlled and optimised, also through the help of ab-initio calculations and micromagnetic modeling. CNR-SPIN will produce and characterize epitaxial heterostructures based on transition metal compounds suitable for the realization of planar spin valves and spin transistors

### **[Task1.2] Nanofabrication of GMR and TMR structures:**

NANO-CNR will optimize lithographic process parameters to pattern multilayered films into arrays of GMR and TMR structures and racetrack memories by FIB direct writing and EBL lithography. INRIM will nanofabricate arrays of nanostructures by self-assembling nanolithography, using polystyrene nanospheres and Block-copolymer, for magnetic field sensors (made of Ni, Py, Co, Fe thin films), for high-density magnetorecording (FePt, FePd) and for high-frequency nano-oscillators (Py, FePd).

### **[Task1.3] Devices realization and performance test:**

CNR-SPIN will fabricate and characterize nanometric planar spin valve devices. Successive step will consist of measurement of the spin diffusion length in the epitaxial heterostructures, in order to evaluate the dependence of the spin diffusion length on the applied gate voltage, and the realization and characterization of a spin transistor. The magnetic configuration of spin valve electrode arrays will be optimized with respect to magnetoresistive GMR sensor response. Validation tests of a triaxial-magnetometer will follow, by a comparison with commercially available solutions (ex. flux gates magnetometers) (CNR-ISM).

## **Milestones:**

MS1 month 12 Production of epitaxial TMR multilayers with oxide spin-filter spacers with high RT magnetoresistive effect; optimization of oxide thickness and interfaces to obtain full spin polarization in the electrode and high mobility in the semiconducting layer. Definition of optimized fabrication conditions for GMR spin valves and of a measure protocol for magnetotransport properties of GMR-TMR as a function of magnetic field. Fabrication of nanostructure arrays by self-assembling nanolithography: process optimization through micromagnetic modeling.

MS2 month 24 Realization and characterization of a planar spin valve and evaluation of the spin diffusion length in different semiconducting oxides. Optimization of lithographic process and of the lateral size to obtain a single low dimensional

spin valve by FIB direct writing and EBL lithography; characterization of the obtained spin valve. Optimization of the magnetotransport response (DC and high-frequency) of self-assembled nanolithographic structures by tuning fabrication process, chemical composition, array geometry parameters .

MS3 month 36 Production of arrays of spin valves by FIB direct writing and EBL lithography, realization and characterization of a spin transistor. Realization and full characterisation of magnetic sensors and of a triaxial magnetometer

## WP.2 - New multifunctional materials and nano-composite systems for sensors and magnetic devices

*Responsible:* Franca Albertini

*CNR Institutes involved:* IOM, ISM, NANO, SPIN, IMEM

**State of the art:** Most of the frontier research involving magnetism is nowadays focused on enabling the control of the magnetic properties through the application of currents, electric fields, mechanical stresses, optical impulses, in addition to magnetic fields and temperature. On the other hand the possibility to control the physical properties (such as transport, structural, thermodynamic, plasmonic, optical and mechanical) via magnetic fields in multifunctional systems, pave the way to many innovative applications: sensors, actuators, "smart" devices, spin devices. Current research efforts are now converging both on new classes of multifunctional materials where their magnetic, structural, mechanical, ferroelectric and electronic degrees of freedom are tightly connected (i.e. martensitic Heusler alloys, multiferroics) [1-3], and on nano-composite systems where complementary properties from different materials (e.g. magnetism, ferroelectricity, superconductivity, optical and transport properties, etc.) are integrated in a single device [4] exploiting the interface interactions between different materials. A noticeable example is represented by multiferroic materials [5] which can play a key role also in the development of new nanocomposite devices. Presently, many research groups across the world, after the demonstration of the electric field control of local ferromagnetism at BiFeO/CoFe interfaces [5, 6], are proposing projects to utilize the multiferroic/ferromagnetic interface in spin devices, where both carrier density and interfacial magnetic coupling strengths can be effectively modulated.

**WP objectives:** This WP is aimed at generating momentum within the national research frame in this strategic sector by exploiting synergistically the complementary skills and excellences available within the Department and the INRIM Institute, spanning from the modeling and experimental determination of new physical phenomena (including the development of advanced measurement techniques) to the modeling of new materials and their realization and refinement through manifold growth techniques, to the implementation of nanostructures and devices. In detail, this proposal aims at improving the comprehension of new phenomena and fundamental properties of new materials and multifunctional systems of interest and to the realization of completely new proof-of-concept devices for applications in ICT and nanomedicine. The main goals of the workpackage are:

**Realization and basic understanding of new materials:** new multiferroics (materials in which ferroelectricity and ferromagnetism coexist), magnetic oxides and topological insulators (materials where the spin and conductive regime at the surface is protected by quantum mechanics law, and in particular by the spin-orbit interaction) are promising candidates to be explored. Moreover, Heuslers alloys showing remarkable multifunctional properties (shape memory, giant magnetomechanical, magnetotransport and magnetocaloric properties) due to the possibility to control magnetic, structural, electronic and thermodynamic properties by the application of magnetic fields, pressure and stress will also be explored.

**Realization of new nanocomposite systems, basic understanding of mutual interactions and tailoring of their functional properties:** heterostructures based on magnetic oxides, multiferroics-ferromagnetics, metal-insulator-semiconductor. A very important role for a better understanding of the coupling between the different components will be played by the comprehension of the interface-driven properties also through the

realization and characterization of nano-engineered interfaces. Magnetoelectric coupling (the possibility to induce magnetization by applying an electric field or an electric polarization by means of a magnetic field) in multiferroic systems will be deepened exploited in spin-valve-like magnetic multilayer devices based on bismuth ferrite  $\text{BiFeO}_3$ . Moreover, the possibility to control the magnetic anisotropy through the modification of the holes concentration by applying an electric field in metal-insulator-semiconductor heterostructures will be investigated. The magneto-elastic coupling in crystalline magnetic oxides will be optimized and exploited for the realization of devices where the magnetic and electric response is controlled by strain. Surfaces and interfaces of otherwise well understood solid materials have been shown to exhibit properties much different from those of the bulk. Examples range from topologically spin-protected conducting surface states of so-called topological insulators which are insulating in the bulk to two-dimensional electron gases forming at the interface of two otherwise insulating oxides, with both ferromagnetic and superconducting properties.

**Nanofabrication and realization of new proof-of-concept devices** for sensors, nano-actuators, and novel spin electronics by the synergistic exploitation of the wide set of state-of-the-art lithographic and nanofabrication techniques available to the project partners.

Micro/nanocantilevers exploitable also in energy harvesters will be produced starting from epitaxial thin films of meta-magnetic Heuslers showing an optimized magnetization change at the martensitic transition, drivable by stress and temperature variations. Self-sustained micro-systems such as membranes and micro-levers for magnetic sensors and MEMS will also be realized by exploiting the magneto-elastic coupling in crystalline magnetic oxides. A noteworthy goal will be the production of shape memory free-standing Heusler nano-disks for the realization of nano-transducers at the cellular scale which could be possibly actuated by static magnetic fields as well as radio-frequency fields (through hyperthermic effect). Furthermore, multiferroic films will be integrated in the (patented) MESA nanojunctions to implement electrically controlled magnetic nano-devices such as single electron spin transistors with a multiferroic gate. In these devices, by applying an electric field through the control electrode it will be possible to modulate the magnetization direction and the exchange coupling, or the coercive field of the upper magnetic electrodes (source and drain), thus allowing for the control of spin transport.

#### References

- [1] Ramesh *Nature* 461, 1218-1219, 2009
- [2] Durand et al. *Adv. Mater.* 23, 216–232, 2011
- [3] Kainuma et al. *Nature* 439, 957-960, 2006
- [4] Pantel et al. *Nature Materials* 11, 289–293, 2012
- [5] Eerenstein, N. D. Mathur, and J. F. Scott, *Nature* 442, 759, 2006.
- [6] Chu et al., *Nat. Mater.* 7, 478, 2008.

#### Tasks

- [Task2.1] **Materials - preparation and properties.** Multiferroic thin films ( $\text{BiFeO}_3$ ), and magnetic oxides will be deposited by pulsed laser deposition. Solid solutions of  $\text{BiFeO}_3$  with  $\text{PbTiO}_3$  and  $\text{Ba}(\text{Cu}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  will be also prepared to achieve significant dielectric and magnetic enhancements (NANO, SPIN, IOM). Multifunctional Heusler thin films based on  $\text{NiMnGa}$  and  $\text{NiMnIn}$  will be epitaxially grown on suitable substrates by sputtering r.f. (IMEM). A multiscale structural, morphological, electric, magnetic investigation will be performed in order to model the main properties as a function of composition and growth parameters (INRIM, NANO, SPIN, IOM, ISM)
- [Task2.2] **Nanocomposites structures - realization and properties.** Magnetic oxides, multiferroic-ferromagnetic metal-insulator-semiconductor heterostructures will be realized (NANO, SPIN, IOM). In addition to a multiscale thorough characterization of the functional properties of the nanocomposites (NANO, SPIN, IOM, ISM), X-ray based electron spectroscopy will also be performed at i) 'real-time' measurements, e.g. a device in operation regime (applying voltage and/or current), ii) subsurface contribution, e.g. buried interfaces and confined 2D electron systems, with chemical

and magnetic sensitivity, iii) magnetization dynamics and magnetization switching under biasing process, via ultrafast pump-probe experiments based on Free Electron Laser radiation (IOM) contributing to comprehension of the resultant properties and of the surface-interface driven phenomena.

[Task2.3] **Nanofabrication and new devices.** Micro/nanocantilevers and self sustained membranes will be produced by lithographic techniques starting from optimized NiMnGa(In) thin films and composite oxide structures (SPIN, NANO, INRIM). Free-standing Heusler nano-disks will be obtained by nanosphere lithography: self assembling of nanosphere followed by RIE and sputter etching (INRIM, IMEM). BFO will be integrated as multiferroic gate in MESA nanojunctions prepared by the selective wet-etching and oxidation of an AlGaAs/GaAs quantum well structure in order to obtain large arrays of electrically controllable spin nanodevices (NANO), whose performances will be tested in ad-hoc realized experimental set-up (IMEM, SPIN, NANO, IOM).

### **Milestones.**

MS2.1 month12 Definition of the preparation conditions (including substrate choice) for the production of multiferroic, magnetic oxides, and Heusler thin films with optimized structure and suitable functional properties. Realization of nanocomposite structures based on magnetic oxides, multiferroics-ferromagnetic, metal-insulator-semiconductor and study of the main properties. Set up of nanofabrication techniques and of nanosphere lithography process.

MS2.2 month24 Optimization of the functional (ferroelectric, magnetomechanical, magnetic, electrical) properties of the materials exploiting suitable changes in compositions. Comprehension of surface-interface driven phenomena and their modelling and optimization. Realization of micro/nanocantilevers and membranes and study of the effect of the lithographic process, choice of geometrical parameters and size reduction in the determination of the main properties.

MS2.3 month36 Realization and test of micro/nanocantilevers and membranes and study of their "magnetic" response as a function of the application of stress or temperature variation. Realization of free standing nanodisk and their actuation by means of temperature and static magnetic fields. Dispersion of nanodisks in proper solutions and actuation by means of hyperthermic effect in radio-frequency fields. Integration of multiferroic films in MESA nanojunctions for electrically tunable magnetic nanodevices.

### **WP3 - Magnetic Sensors**

*Responsible:* Marco Affronte

*CNR Institutes involved:* IMEM, NANO, IOM, SPIN

**State of the art:** Besides data recording, magnetic sensors allow to detect signals from small objects [(sub-)micrometer] or from feeding currents. The devices of interest here are based on different principles of operation. Giant and Tunneling magnetoresistance (GMR and TMR) sensors are suitable for low cost applications. Typical figures of merits for these sensors are a maximum resistance change of 15% (GMR) and 200% (TMR), a hysteresis smaller than 30e and a linearity better than 5%. In addition to GMR and TMR sensors, low-dimensional systems with high mobility and low concentrations of carriers present very high Hall effect and therefore are ideal systems for the realization of extremely sensitive magnetometers. For example, two-dimensional electron gases consisting of (Al/In)GaAs heterostructures with lateral dimensions of 1-10 micrometers exhibit sensitivity to magnetic field of  $10^{-6}$  and  $10^{-8}$  T/Hz<sup>-1/2</sup> and magnetic flux of  $10^{-4}\Phi_0$ . These sensors are particularly suited to work as magnetometers for the characterization of small crystals under different conditions of temperature (0.1-300K), magnetic field (up to 10T) and also in presence of electromagnetic

radiation. Recently, Hall sensors and flux-gate magnetometer with high sensitivity (nT) have been realized with spin glasses integrated in CMOS technologies. Other sensors, made with materials elasto-magnetic consisting of micro or nano particles, ferromagnetic and conductive dispersed in an elastic matrix, or elastomeric, at volume fractions close to the percolation threshold, have been shown to have a very high piezo-resistive and piezo-magneto-resistive sensitivity. These properties are used to implement displacement and oscillations sensors, as well as to measure small variations in the magnetic field, providing performance very competitive as compared with other technologies.

Magnetic sensors with different characteristics are used in various sectors: for the safety, for example by the "smart monitoring" of power supply currents in electric cars and other transportation systems (trains, planes); in systems for precision measurement of magnetic properties of materials and surfaces imaging; as displacement and low frequency oscillations sensors, to be integrated into systems of control and prevention of earthquakes; and finally in applications as bio-medical devices for the detection of magnetic markers. The ability to perform complex laboratory analysis with biomedical sensors using miniaturized (lab-on-a-chip) [1] is, in fact, extremely timely and it has great potentialities for great impact in society. In the field of biosensors, the current challenges is obtaining devices ultra-sensitive, specific, and capable of multiple analysis.

In addition to the key European industries in the sector such as Phillips, Siemens, STMicroelectronics (for electronics), high performance magnetic sensor technologies make it possible for small and medium-sized companies to develop dedicated applications in the different areas mentioned above in a very competitive way.

**Objectives:** The international research in the field is now focused on: i) increasing the sensitivity of magnetometers; ii) reducing the size of the sensors; iii) integrating magnetic sensors in current technologies CMOS and lab-on-a-chip; iv) reducing the consumption of sensors v) operating in harsh environmental conditions.

Along these main lines, the objectives of this WP aim at developing fundamental knowledge and integrated technologies based on magnetic sensors and targeted to specific applications. For these purposes, a multidisciplinary approach will be pursued aimed at sharing the key enabling technologies and optimizing the infrastructures running in the various institutes, while specific projects will be developed by individual research teams in collaboration with national and international industries.

Shared goals of this WP in the field of bio-magnetic sensors are: 1) to innovate strategies for transduction, using a nanotechnological approach and developing new methods of transduction and amplification of the signal based on modern magnetoresistive sensors with TMR structure, Hall sensors and magnetoelastic sensors; (2) to optimize the platform of detection for a specific biomedical applications through appropriate functionalizations and the realization of arrays of integrated sensors.

More specific objectives in the field of the "smart monitoring" of electric currents include the realization of Hall sensors and flux-gate magnetometers with spin glasses integrated on Si for applications in the automotive industry by CNR-IMEM. CNR-NANO has the know-how to integrate Hall sensors in (Al/In)GaAs heterostructures in cryo-magnetic systems and to develop high-sensitivity magnetometers working in different conditions of temperature and field for the characterization of materials<sup>1</sup>. Hall probes of submicron lateral dimensions (100nm) with high sensitivity in terms magnetic flux will also be developed with different materials and techniques by means of nano-lithography (EBL, FIB)<sup>2</sup> to function as a magnetic probes in scanning microscopes.

[1] Lab on a Chip 13, 730 (2013)

[2] Application note (2/08) - 1084-701 in <http://www.qdusa.com/techsupport/index.html>

[3] Nanotechnology 17 2105 (2006)

[4] J. Appl. Phys. 110, 063903 (2011)

### Tasks:

[Task 3.1] **TMR sensors.** Optimized magnetic multilayer structures with high magnetoresistance will be fabricated at CNR-Nano and INRIM using MgO as tunnel barrier and

---

<sup>1</sup> application note (2/08) - 1084-701 in <http://www.qdusa.com/techsupport/index.html>

<sup>2</sup> Nanotechnology 17 2105 (2006)

NiFe, CoFe and IrMn as magnetic layers for their integration in biomedical devices. While the GMR-devices are easier to integrate in microfluidics, tunnel junctions (TMR) promise a larger signal still maintaining a low cost.

[Task 3.2] **Magnetometers integrated on Si.** Using competencies at IMEM-CNR Institute micro-Hall sensors and flux-gate magnetometer with high sensitivity will be developed based on spin glasses grown up with CMOS technologies for use as electric sensors in energy efficient car in collaboration with STMicroelectronics (FP7-ENIAC JU E3CAR).

[Task 3.3] **Hall Microprobes.** (sub-)micrometer Hall sensors made by CNR-NANO with semiconductor heterostructures will be integrated into commercial systems such as high-sensitivity magnetometers or as probes for magnetic scanning microscopes.

[Task 3.3] **Hall Microprobes.** (sub-)micrometer Hall sensors made by CNR-NANO with semiconductor heterostructures will be integrated into commercial systems such as high-sensitivity magnetometers or as probes for magnetic scanning microscopes.

[Task 3.4] **Magneto-elastic Sensors.** CNR-SPIN will develop magneto-elastic composites to be used as displacement or low-frequency sensors in particular workplaces, civil, mechanical and biomedical fields. These sensors will be integrated into control systems for the prevention of earthquakes, or in detectors of mechanical vibrations in public transport vehicles (trains-planes). Furthermore CNR-SPIN will develop devices for the monitoring of position and relative displacements in parts of the human body and aimed at the control of particular deficits and also to their correction.

[Task 3.5] **Magnetic Sensors for Bio-Medical applications.** Using magnetoresistive TMR sensors and Hall sensors, CNR-NANO will develop detectors of magnetic markers in biological systems. Planned activities include: 1) identification of suitable functionalization (based on genes and antigens systems) for anchoring of biomolecules with magnetic markers, 2) integration of magnetic sensors in lab-on-a-chip including suitable microfluidic components and 3) development electronic systems for the recognition of the magnetic signals.

#### **Collaborazioni:**

Siemens  
Quantum Design  
ST-Microelectronics,  
Nanomagnetics

#### **Milestones:**

- MS1 month 12 Integrated magnetometers: identification of new materials, growth and properties optimization. Bio-Medical devices: identification of magnetic markers and their functionalization. Design of arrays of magnetic sensors and identification of signals. Detection of currents: identification of benchmarks and of application-specific devices. Magnetometers for the research: test in different working conditions. Magneto-elastic: test of innovative composite materials. In general: identification of companies and European and international partners interested in the development of magnetic sensors.
- MS2 month 24 Integrated magnetometers: realization of optimized thin films as flux concentrators and integration in Si technology. Bio-Medical: functionalization of nano-magnetic particles and surfaces. Realization of arrays of magnetic sensors and signal analysis. Detection of currents: development of devices for specific applications. Magnetometers for research: integration Hall probes in commercial systems. Magneto-elastic: development and testing of magneto-elastic sensors. In general presentation of applied research projects within the framework of Horizon2020 and internationally.
- MS2 month 36 Integrated magnetometers: Optimization of micro/nanofabrication, developing and testing of prototypes. Bio-Medical: development and testing of prototypes. Detection of currents: test devices in specific working conditions.

Magnetometers for research: testing of integrated systems of measurement.  
Magneto-elastic: test of magneto-elastic devices in working conditions.

## WP.4 - Superconducting quantum interference nanosensors

*Responsabile:* Carmine Granata

*Istituti CNR partecipanti:* ICIB, IBP

**State of the art:** Superconducting Quantum interference Devices (SQUIDS) are the most sensitive magnetic sensors and they are successfully used since several years to measure magnetic flux and magnetic fields, voltage, electrical current and in general whatever physical quantity that can be expressed in terms of a magnetic flux and magnetic field.

A DC-SQUID can detect magnetic flux lower than  $1 \mu\Phi_0$ , corresponding to magnetic fields of the order of a few fT on an effective area of a few square millimeters.

However the SQUID sensitivity expressed in terms of magnetic moment is inversely proportional to the size of the loop. It has been calculated that reducing the loop size to the nanometer scale it would be possible to obtain a sensitivity of a few elementary units of magnetic moment (Bohr magneton). This feature makes these devices suitable for measuring extremely small magnetic signals arising from magnetic nano-objects and thus they represent a powerful tool for different types of studies and applications such as the study of single magnetic nanoparticles (nanomagnetism), molecular magnets, magnetic scanning microscopy, very thin magnetic films, magnetorelaxometry, nanoelectronics....

For these reasons in the recent years there have been a worldwide effort devoted to the fabrication of SQUIDS having loop dimensions less than  $1 \mu\text{m}$  (nanoSQUIDS). The main groups involved in this research are: the Quantum Team at National Physical Laboratory (United Kingdom), the Lam's group at CSIRO (Australia), the group NanoSpin at Institut Néel, CNRS, (France), the Koelle's group of Tübingen University (Germany) and (last but not least) the Quantum Device group at Istituto di Cibernetica, CNR, Italy.

Up to now the best obtained results is a flux noise as low as  $250\text{n}\Phi_0$  per root square Hertz (corresponding to about 30 Bohr magnetons per root square hertz) using a SNS junction based on Nb/HfTi/Nb tunnel junction [1] fabricated by Electron Beam Litography (EBL) that is limited at low magnetic field. In a very recent paper [2] YBCO based Grain Boundary Josephson junctions (GBJs) has been used to obtain a  $2 \mu\Phi_0$  per root square Hertz flux noise up to 1 Tesla. However these devices have not yet been used to perform a measurement of the magnetic properties with a real magnetic object. The group at CNR has recently published an hysteresis loop on magnetite nanoparticles using a nanoSQUID [3] showing also the ability to perform relaxation measurement on a time scale shorter than the time scale of commercial instrument.

The results are very encouraging in view of experimentally "Exploring the No-Man's Land between Molecular Nanomagnets and Magnetic Nanoparticles" as suggested by Gatteschi et al in a recent review [4]

[1] J.Nagel et al., Appl. Phys. Lett. **99**, 032508 (2011)

[2] T. Schwarz et al., ACS Nano **7**, 844 (2013)

[3] R. Russo et al., Appl. Phys. Lett. **101**, 122601 (2012)

[4] Gatteschi et al., Angewandte Chemie **51**,4792 (2012).

**Objectives of WP:** Aim of the project is the development of nano superconducting quantum interference devices (nanoSQUIDS) for measurement of magnetic materials and nanoparticles. The fabricated devices will be employed to study the properties of magnetic material produced by project partners and also to develop a magnetorelaxometry system for biomedical diagnostics.

Schematically it is possible to identify four main objectives:

Ob 4.1 Design, fabrication and characterization of nanoSQUIDS based on niobium technology by using both the Focused Ion Beam (FIB) sculpting technique and the Electron Beam Litography (EBL).

- Ob 4.2 Optimisation of SQUID sensors for magnetization measurement of micro and nano magnetic nanoparticles and magnetic relaxometry.
- Ob 4.3 Realization of a SQUID relaxometer demonstrator for in vitro measurements of biological samples
- Ob 4.4 Realization of a SQUID relaxometer prototype for biomedical application

A nanoSQUID consists in a loop having a side length less than 1 micrometer interrupted by two Josephson junction. Up to now the nanoSQUID fabrication was usually achieved by electron beam lithography and based on niobium, aluminium or YBCO as superconducting thin film and the junctions were obtained by nanometric constrictions of the superconducting material (Dayem bridges) . In few cases the junctions were SNS junction defined by EBL or constriction obtained by Focussed Ion Beam (FIB). Our group has a large experience in producing and characterizing nanoSQUID based on Niobium Dayem bridges fabricated by EBL, however the FIB is a complementary nanolithographic technique that enables to produce the sub-micron Josephson junctions starting from a Nb/Al/Nb trilayer which represents the best approach to the fabrication of reliable and reproducible Josephson tunnel junctions (JJs). In the framework of this project both nanolithographic techniques will be used to produce nanoSQUIDS and the results will be compared. The nanoSQUID based on Nb/Al/Nb sculptured by FIB will be produced in vertical (loop in the same plane of JJs, also known as Interferometers) and planar (loop orthogonal to the JJs) configuration. In both cases the loop will have an area down to  $0.1 \mu\text{m}^2$ , and the JJs will be square with a  $0.2\text{-}0.4 \mu\text{m}$  side. The EBL process allows the realization of planar configuration only and it has a limitation in the critical current reproducibility: since the critical current depends on the ratio between the geometrical dimension of the bridges (mainly the length and the width) and the superconducting coherence length, small variation of the latter can induce relative large variation in the critical current. Moreover nanobridges usually modulate up to 20-30% with maximum current modulation of about  $50 \mu\text{A}$ . The main advantage of nanobridges produced by EBL is the large critical magnetic field of thin niobium films; it enables the use of nanoSQUIDS in magnetic field up to few Tesla.

Using the FIB fabrication process we expect to obtain a better result in term of control of the critical current and its modulation. In particular we expect that the modulation will be larger than 60% or more. This result will represent an enormous improvement in term of signal to noise ratio and Spin sensitivity.

The drawback will be the smaller critical magnetic field respect to the nanobridge, hiding the applicability to magnetic field smaller than about 200G. This field are large enough to study relaxometry of nanoparticles, but it is too low to reach the saturation magnetic field of interesting magnetic material.

A very interesting application related to the study of magnetic nanoparticles is the magnetic relaxometry applied to the biomedicine. It is based on the detection and the study of the superparamagnetic properties of the magnetic nanoparticles employed as markers. The fictionalized nanoparticles attach to biological targets (antigen, cancer cells); a weak magnetic field polarize the nanoparticles which relax after the removal of the magnetic field. By measuring the magnetic relaxation with suitable sensors, it is possible to detect the position and the number of the targets. By using living cells and animal models, it has been proven that this diagnostic offers many advantages in view of the detection and the imaging of biological samples. The applications are very interesting and include the detection of the T-cells related to the transplant rejection, blood platelets, leukemia cells, breast cancer, drug-delivery and immunoassay. Furthermore this method is also very promising for the in vivo diagnostic of several diseases. In the framework of this project, it will be designed and realized a system based on micro and nanoSQUIDS for this interesting biomedical application.

#### **Tasks:**

[Task 4.1] **Design and fabrication of micro and nanoSQUIDS:** Design of micro and nanoSQUIDS will be realized at ICIB. Two different configurations will be designed: planar and vertical. For each configuration parameters (as for example critical current, total inductance, noise parameters  $\beta L$  and  $\Gamma$ ) will be chosen to optimize magnetic flux sensitivity and spin sensitivity. Fabrication will be made at ICIB, using Electron Beam Lithography (EBL) facility and at INRIM using Focused Ion beam (FIB) facility. Using EBL, nanoSQUID with Dayem bridge

junctions will be realized, while using FIB sculpting technique, nanoSQUID with submicron Josephson junctions will be realized.

[Task 4.2] **Characterization and optimization of nanoSQUIDs:** Characterization will be performed at ICIB by means of measurements at cryogenic temperatures (4.2-1.2 K) in a shielded environment to avoid electromagnetic noise at high and low frequency. For characterization measurements of current vs voltage, critical current and voltage vs external magnetic flux, noise spectral density and elemental magnetic moment (Bohr magneton) will be provided. Moreover noise will be measured as a function of current and as a function of the magnetic flux in order to find the optimal working point.

[Task 4.3] **Measurements of magnetization and relaxation of magnetic nanoparticles:** The nano and micro particles will be provided by ISM, and will be characterized by using nanoSQUIDs realized at ICIB. In particular, we will carry out measurements of magnetization and magnetic relaxation as a function of nanoparticles size (4-12 nm) and as a function of temperature (7-1.2 K). For these measurements will be used an innovative readout scheme, which allows to increase, also for hysteretic nanodevice, the linear dynamic range by using a suitable feedback circuit. Both relaxation and magnetization measurements will be compared with measurements made using commercial tools. At the IBP will be carried out preliminary measurements with SQUID sensors in gradiometric configuration suitably designed whose sensitivity will be tested on cellular models (T47D and MCF7) and animals (transgenic mice Balb-C) using functionalized nanoparticles with membrane receptors that recognize tumor cells of metastatic breast cancer.

[Task 4.4] **Design and implementation of a prototypal SQUID relaxometer:** ICIB will design and implement a sample system based on SQUIDs for magnetic relaxometry realized for applications to biology and medicine. In the basis of ad hoc simulations and of experimental measurements on several nano and micro devices, the optimal configuration to be used the relaxometry system will be chosen. We will pay particular attention to the design, to cryogenic aspects, to electromagnetic shielding and to excitation coils. Preliminary tests will be carried out on biological samples in order to test the device. At the IBP will be carried out preliminary testing of biological samples in order to verify the correct operation. The experimental results will allow the realization, in public-private partnership, of a relaxometer SQUID prototype for use in Biomedical field.

## **Collaborations**

Fluxonics: The European Foundry for Superconductive Electronics eV, Braunschweig (D).

Advanced Technologies Biomagnetic srl, Pescara

Seconda Università degli Studi di Napoli, Dipartimento Ingegneria dell'Informazione

Università degli Studi di Genova, Dipartimento di Matematica

Università degli Studi di Napoli "Parthenope"

NJMS---UH Cancer Center New Jersey Medical School, Newark (USA)

## **Milestones**

- |                |   |
|----------------|---|
| MS4.1 month 12 | Design of SQUID devices in different configurations having micro and nano resolution. Fabrication of the devices by using Electron beam lithography or focused ion beam sculpting   |
|                | Devices characterization paying specific attention to the magnetic flux noise spectral density in order to calculate the device sensitivity and first magnetization measurements and relaxation of micro and nano magnetic particles                  |
| MS4.2 month 24 | Theoretical analysis and characterization, by using SQUID, of magnetic "iron-free" nanoparticles for possible applications in the biomedical field.   |
|                | Performance analysis of the different SQUID devices from the experimental point of view and/or by numerical simulations, in order to define the optimum sensor for magnetic characterization measurements and relaxation of "iron-free" nanoparticle. |

Design of a SQUIDS based system for studies of magnetic nanoparticles relaxometry having biomedical interest paying specific attention to noise reduction.

MS4.3 month 36 Realization of a system for measurements of magnetic relaxometry for biomedical applications.

Set-up of the system for magnetic relaxometry and first operating test

## WP.5 - Mesoscopic superconducting devices for photon detection

*Responsible:* Gian Piero Pepe

*CNR Institutes involved:* SPIN, NANO, ICIB

**State of the art** Superconductors have been studied as suitable material for the detection of radiation due to the low energy needed to create excitations (the energy gap is of the order of 1 meV), the very low detector noise (which is further enhanced by the cryogenic operating temperature) and the fast response time. Superconducting devices are currently used in state of the art radiation detectors in the spectral regions: X-ray (MKID, STJ, TES), Infrared (SSPD) and mm-wave (SIS). The physical principles on which the detection mechanisms are based vary from the transition of state from superconductor to normal metal (TES and SSPD), the quantum tunnel effect (STJ and SIS) and the superconductor kinetic inductance (MKID). Modern technologies, that gives access to nanometric dimensions, allows to study and use mesoscopic properties in devices, that belong to a middle ground between classic and quantum physics often without any equivalent in the macroscopic world. When these technologies are applied to superconductors, and particularly those recently discovered with unconventional order parameters, allows to realize devices with extreme performances in terms of sensitivity and response time.

The SPIN group has a long tradition in superconductivity both for transport properties investigations and Josephson effect.

In particular, an outstanding activity related to superconducting devices ranging from Josephson junctions as advanced detectors for nuclear particles to Josephson junctions in the context of macroscopic quantum tunneling and coherence studies have characterized the scientific activity of many of the researchers of SPIN. Accordingly, the Institute is equipped with several VUHV deposition systems employing different techniques (from sputtering to pulsed laser deposition, electron beam evaporation) which are very useful for obtaining high quality thin films of all type of superconductors (conventional metals, unconventional oxides, pnictides, organic thin films). Moreover, several cryostat are also available at SPIN covering the temperature range between 20mK to room temperature. Most of cryostats are shielded with respect external magnetic fields in order to measure Josephson currents with the highest accuracy. The SPIN laboratories are also equipped with optical photolithographic systems for Josephson junction fabrication, and all the process from oxide deposition to reactive ion etching and chemical etchings, and ion beam milling are also available.

The NANO group at NEST has a long tradition on magneto-electrical characterization of nanodevices at very low temperatures. The Laboratory is equipped with several He-3 cryostats which allow temperature down to 230mK, and dilution cryostats for very low temperature (<10mK) also in the presence of high external magnetic fields (16T). On the fabrication side, all nanolithographic processes used a clean room inside the NANO laboratory: ranging from UV and electron beam lithography, to SEM, TEM, STM, AFM, SGM, deposition systems (evaporators and electron beam deposition, sputtering) etching systems (RIE and IC-RIE), and ALD for high quality dielectric thin film deposition.

The ICIB Group has a well established tradition in the investigation of superconductivity and in particular in the study and development of quantum detectors and unconventional superconducting devices. The expertise covers the micro and nano-fabrication technologies of superconducting devices based on LTS (NbN, Nb, Ta, Al) and HTS (YBCO, Fe-based supercond), the measurements at low temperature of detectors under radiation from various sources like lasers and nuclear sources and the theoretical modelling of superconducting and Josephson structures. ICIB has various cryostat for experiments at low noise down to 50 mK.

**General WP objective** The object of WP5 is to **realize advanced devices with large application potential based on nano-structured superconducting and magnetic materials**. The detection of single photons opens possible applications in optical telecommunication across long distances, quantum cryptography, molecular biology with optical markers, optical metrology, astronomy, etc. The realization of Josephson junctions on a nanometric scale allows to study the material properties on a length scale comparable to the characteristic superconducting length scales and exploit macroscopic quantum properties, associated with the Josephson effect, to detect with extreme precision perturbations caused by the absorption of electromagnetic radiation.

## Tasks

[Task 5.1] **Fabrication and Characterization of hybrid superconductor/ferromagnetic (S/F) nanowires for advanced optical detectors** In the field of superconducting devices a growing class necessitates a hybridization of both superconducting and magnetic material, especially the family of digital electronics (development of memories, superconducting spin-valves, controlled phase generators in quantum electronics, etc) but also in the specific category of electromagnetic radiation detectors due to the degree of control over the value of the critical current through pinning mechanisms and the increase in response time of the excitations, acting also as a protection layer during the in nanometric patterning process. From this point of view, S/F nanostructures based on conventional materials (Nb, NbN, Al) coupled to weak ferromagnets (e.g. FePd, NiCu) or also superconducting oxides (e.g. YBCO) coupled to manganites can form interesting configurations for the research in single photon detectors or the development of electronics devices where the spin control necessitates the presence of a superconducting state. The necessary supporting theoretical activity is based on the knowledge developed in the participating institutes concerning the interplay between ferromagnetism and superconductivity.

[Task 5.2] **Fabrication and characterization of mesoscopic Josephson junctions of SNS type for infrared radiation detection** The realization of mesoscopic Josephson detectors for application in the field of infrared detection is of significant interest in this field: Specific superconducting detectors has recently been developed and patented by a collaboration between the Institute NANO, the institute SPIN and the Helsinki University of Technology. They are based on the realization of in-line SNS type mesoscopic junctions that exploit the exponential dependence of the critical current on the temperature for extremely sensitive detection. This particular superconducting detector results particularly well suited for the far and medium infrared spectral region. The detector can be operated both as a bolometer, i.e. measuring the incident radiation intensity continuously, and as a calorimeter, i.e. measuring the energy of single photons. The performance of such a detector is very promising, it should be possible to obtain a noise equivalent power (NEP) of  $7 \times 10^{-20}$  WHz<sup>-1/2</sup> at 300 mK if operated in a bolometric configuration (that is about 7 orders of magnitude better than commercial semiconducting sensors), and a signal to noise ratio (SNR) of about  $10^3$  at 40 THz in the single photon configuration. It is of particular interest to investigate if the role of electronic spin can be used to control the response of the device to external perturbations.

[Task 5.3] **Fabrication of devices and sensors with novel superconducting materials based on iron** Il grande potenziale offerto dThe great potential offered by iron based superconductors (IBS) recently discovered can represent an ideal work-bench system for developing devices based on the interaction of superconductivity and magnetism, due to their intrinsic magnetic properties and the possibility of epitaxial growth of IBS materials on iron thin films. Furthermore, IBS-type Josephson devices can contribute important information on the order parameter symmetry characterizing the superconducting state in IBS.

IBS materials have a complex atomic structure and necessitates specific fabrication and manipulation technologies. The IBS will be realized in thin films, in the framework of the Europe-Japan project IRONSEA, by the CNR institute SPIN, by IFW in Dresden and by the Japanese project partners. For the realization and characterization, of both electric and magnetic properties, of S/F devices based IBS, the project will use photolithography and cryogenic measurement systems available at SPIN and ICIB. In this way the project will realize:

Micrometric and nanometric strip sensors for visible and infrared radiation detection.

Grain-boundary Josephson junctions using bi-crystal substrates

SIS' or SNS' type Josephson junctions with different superconductors

The realized devices will be characterized focusing on their electronic transport and magnetic properties, by using measurements sensitive to the phase and magnitude of the non-conventional order parameter present in these materials. Finally photo-response measurements will be performed characterizing the electrical response as well as the femtosecond optical response with pump and probe and spectroscopic noise measurements.

### Collaborazioni

Università degli Studi di Napoli Federico II

Università degli Studi di Salerno

Seconda Università di Napoli

### Milestone per i tre anni

Task 5.1 Fabrication and Characterization of hybrid superconductor/ferromagnetic (S/F) nanowires for advanced optical detectors

MS5.1.1 mese 12 Realization of F/S structures based on conventional superconductors and high Tc

MS5.1.2 mese 24 Misura di foto risposta e misure di dark-counts

MS5.1.3 mese 36 Realization of hybrid devices for optical detection

Task 5.2 Fabrication and characterization of mesoscopic Josephson junctions of SNS type for infrared radiation detection

MS5.2.1 (mese 12) Realization of mesoscopic SNS junctions

MS5.2.2 (mese 24) characterization of devices as detectors

realization of SNS-based SQUIDS

Dimostrazione proprietà di NEP e rapporto S/N dei rivelatori realizzati

Task 5.3 Fabrication of devices and sensors with novel superconducting materials based on iron

MS5.3.1 (mese 12) definition of the fabrication processes of iron-based superconducting detectors

MS5.3.2 (mese 36) Final device based on optimized IBS

### Project GANTT

		mesi					
W	T	1 - 6	7 - 12	13 - 18	19 - 24	25 - 30	31 - 36
1	1						
	2						
	3						
2	1						
	2						
	3						
3	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
4	1						
	2						
	3						
	4						
5	1						
	2						
	3						

## Elenco dei partecipanti al Progetto suddivisi per Istituto CNR

### PERSONALE STRUTTURATO (ricercatori, tecnologi, tecnici, amministrativi)

ICIB: L.Arena, R.Boccaccio, C.Camerlingo, R.Cristiano, A.D'Orazio, M.Ejernaes, E.Esposito, V.Formicola, C.Granata, M.Lisitskiy, P.Mignano, R.Monaco, C.Nappi, S.Piscitelli, A.Rosa, B.Ruggiero, M.Russo, R.Russo, E.Sarnelli, C.Tortiglione, A.Vetoliere, E.Vitale;

IMEM: F.Albertini, F.Casoli, R.Cabassi, L.Nasi, C.De Julian Fernandez,

IOM: G.BiasioL, G.Pennaccione, I.Vobornik

ISM: E.Agostinelli, A.Barla, V.Bellini, C.Carbone, V.Foglietti, S.Laureti, P.Moras, A.M.Testa, G.Varvaro

NANO: S.Benedetta, A.Di Bona, F.Giazotto, P.Luches, G.Marruccio, L.Sorba, V.Tasci,

SPIN: L.Aruta, E.Bellingieri, F.Bisio, C.Cirillo, M.Cuoco, P.Gentile\*, G.Lamura, P.Lucignano\*, A.Martinelli, N.Martucciello, R.Moroni, P.Orgiani, I.Pallecchi, L.Pellegrino, G.P.Pepe, S.Picozzi, A.Stroppa, M.Salluzzo, M.Valentino

IBP: G.F.Peluso

### PERSONALE A TEMPO DETERMINATO

NANO: C.Altimiras, V.Arima, L.Laureana Del Mercato, M.Amado Montero,

SPIN: P.Gentile,

### PERSONALE NON STRUTTURATO

#### ASSEGNISTI:

ICIB: A.Ambrosone, S.Rombetto;

#### DOTTORANDI:

ICIB: A.Iuliano, A.Polverino;

Six people on the staff of ICIB will be partly employed to manage technical and administrative management of the project and to promote the dissemination of the results achieved. All the remaining exposed personnel will be devoted to research.

Women and young researcher under the age of 35 years are indicated by underlining and asterisk.

Nationwide CNR units dealing with superconducting and magnetic sensors are at the center of an extensive network of scientific and technological collaborations with Universities, other Research Institutions and industries of different size and well structured in the national territory. They are also important collaborations and research orders rooted in the territory with local governments as Regions and their Districts and Technological Poles working in an electronic field. In accordance with this, a large part of the funds at the disposal of researchers working in this area comes from the success of calls in response to ministerial calls as MIUR (FISR, FIRB, PRIN), MISE (PON), MAE etc..

The reputation of the researchers involved is well demonstrated by the participation of a large number of international research projects, in which researchers of CNR in positions of coordination or leadership. By way of example:

- European Science Fundation(ESF), Eurographene programme(2010-2013). Graphene-based systems for spintronics: Magnetic interactions at the graphene/3d-metal interface (SPINGRAPH)
- FP7-REGPOT2010- "MAMA: unlocking research potential for multifunctional advanced materials and nanoscale phenomena", Grant Agreement No. 264098 (2010-2013) .
- European Science Fundation (ESF), SONS programme (2007-2010). Self-assembled Nanoscale Magnetic Network (SANMAG)
- FP7-STREP 2008- Macroscopic Interference Devices for Atomic and Solid-State Systems, Grant agreement No. 214025 (2008-2011)
- Progetto FP7 ENIAC-JU "Nanoelectronics for an Energy Efficient Electrical Car (E3car)" 2009-2012
- FP7 MAGDRIVE "Magnetic superconductor Cryogenic Non-harmonic Drive -MAGDRIVE"

2011-2014

- TERASUPER "Superconducting Proximity Josephson Detectors for THz vision and Imaging", Finanziamento Ministero Italiano della Difesa (2011-2014)
- PRIN 2009: Dispositivi ad effetto di campo basati su nanofili e superconduttori ad alta temperatura critica
- FUTURO IN RICERCA "Nanostrutture ibride superconduttore-semiconduttore: applicazioni nanoelettroniche, proprietà topologiche, correlazione e disordine. Codice: RBFR1236VV\_001" (partenza 2013)
- Partenariato in *Fluxonics: the European Foundry for Superconductive Electronics eV* (Braunschweig, D)
- "Guardian Angels" one of the 4 finalist for the presentation of ICT FET Flagship.
- MAE-India: Dispositivi di Spintronica per elettronica di consumo (2008-2010), progetto di grande rilevanza per la cooperazione scientifica e tecnologica tra Italia e India.
- FIRB 2011: Nanomagnetici molecolari su superfici metalliche per applicazioni in spintronica molecolare, Codice: RBAP117RWN (2011-2014).

## Project cost

The costs of first year, showing the detailed item of expenditure, are reported in the elatable here following.

	I anno	II anno	III anno	
FOE 7%	2.50	0	0	[M€]
Cofinanziamento	0.40	0.72	0.72	
Totale	2.90	0.72	0.72	

It reflects, even if it does not appear explicitly, the same level of cost burden on FOE7% among the Work Package. The table shows also a relatively modest co-financing related to scheduled activity of the WP.4 and mainly due to the application to be carried out in short terms.

With regard to the next two years a rough estimate of the self financing is given, which is unpredictable at this time.

The expenditure of the second and third year is linked to conventional forms of financing such as Flag Projects, POR, PON, agreements with the regions that involve, to varying degrees, all Institutes of the team. However, during the first year, we will act actively in order to effectively engage the business community in this area, which offers interesting opportunities at the application level and even more interesting prospects for the future could be offered.

### STIMA dei COSTI del PROGETTO

Macro voci di spesa	Ammontare previsto	Fonte FOE 7%	Cofinanziamento Altre fonti di copertura	Incidenza percentuale
<b>Personale</b>	€ 1.597.000,00	€ 1.500.000,00	€ 97.000,00	55,13%
<i>Strutturato (ricercatori, tecnologi, tecnici, amministrativi)</i>	€ 1.500.000,00	€ 1.500.000,00	€ 0,00	51,78%
<i>Tempo determinato</i>	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	0,00%
<i>Non Strutturato (borsisti, assegnisti, etc..)</i>	€ 97.000,00	€ 0,00	€ 97.000,00	3,35%
<b>Prestazione di terzi</b>	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	0,00%
<b>Materiali</b>	€ 780.000,00	€ 480.000,00	€ 300.000,00	26,92%
<b>Attrezzature</b>	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	0,00%
<b>Infrastrutture</b>	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	0,00%
<b>Spese generali</b>	€ 500.000,00	€ 500.000,00	€ 0,00	17,26%
<b>Altre tipologie</b>	€ 20.000,00	€ 20.000,00	€ 0,00	0,69%
<i>Missioni e pubblicazioni</i>	€ 20.000,00	€ 20.000,00	€ 0,00	0,69%
<b>Totale</b>	€ 2.897.000,00	€ 2.500.000,00	€ 397.000,00	100,00%

## INRiM Role

In this framework INRiM coordinates and participates in the following projects::

- Progetto PRIN: Controllo della Dinamica della Magnetizzazione in Nano strutture Magnetiche per Applicazioni nelle Tecnologie dell'Informazione e della Comunicazione (DyNanoMag, codice - 2010ECA8P3)

- Progetto Premiale P4: Nanotecnologie per la metrologia elettromagnetica (Giorgio Bertotti)
- Progetto Premiale: Realization of the International System units from the fundamental constants of Physics”  
Task 2.1: Quantum national standard of ac voltage

### **Results of the research, their interest in the advancement of knowledge and any potential applications**

The main expected results are reported in the context of individual WP and in particular their achievement is marked by Milestones that are followed annually. Avoiding to bring a long series of Deliverables, for another in the absence of a financing for certain subsequent years, it is worth highlighting the types of results that will be proposed in the framework of this project. In accordance with the strategic objectives, the expected results make up a chain which originates from the study and characterization of magnetic materials and then develop manufacturing technologies (in particular nanofabrication) and finally develop devices and innovative sensors.

In addition to an advancement of knowledge, the Project will provide also an improvement of the technological capabilities for the development of devices and real sensors.

An important aspect is related to the important role that the project can play as a catalyst to a large community of researchers not only the CNR but also the University. Even if such community not appears explicitly in the planning of activities, it is present through the large number of associated academics involved in CNR and have taken an active part in the drafting of the Project.

The expected results for the Project are:

- The dissemination of scientific results (scientific publications, international conference, organization of meetings)
- The sharing, in a coordinated manner, of skills and technologies with external users
- Technology transfer to companies

The potential applications of the research of this project will be evidenced by production of a wide series of devices and sensors (demonstrators), in some cases, prototype systems that can be employed in various fields (by ICT to biomedical diagnostics). Such systems are already of interest and the identification of companies and European and international partners interested in the development of magnetic sensors is going on; in some cases an advanced stage of collaboration and partnership agreement is already in progress.

### **Elements and criteria proposed for the verification of the achieved results**

The evaluation of the project will be based on the following elements:

- Semi-annual report of the activities
- Organization of an annual workshop (in conjunction with any other national manifestation)
- Publications in international journals, conference papers, patents
- Sharing of KETs (in Italy and Europe)
- Operation of devices and sensors demonstrators
- Operation of prototype systems
- Coordinated participation of project partners to further project initiatives (in general presentation of applied research projects in the framework of Horizon 2020)



ISTITUTO  
NAZIONALE  
DI RICERCA  
METROLOGICA

Torino, 13 febbraio 2013

Prot. n. 635/13

Al Presidente del CNR  
Prof. Luigi Nicolais  
Piazzale Aldo Moro 7  
00185 ROMA RM

e p.c. Prof. Massimo Inguscio  
Direttore  
Dipartimento Materiali e Dispositivi  
Piazzale Aldo Moro 7  
00185 ROMA RM

e p.c. Dr. Maurizio Russo  
Direttore  
Istituto di Cibernetica del CNR  
Via Campi Flegrei 34  
80078 POZZUOLI NA

e p.c. Ing. Alberto Silvestri  
Direttore  
INRiM  
Strada delle Cacce 91  
10135 TORINO TO

ICIB - CNR - ICIB	
Tit. I.	CI: AMMINISTRAT.
<b>N. 0000347</b>	<b>13/02/2013</b>



In relazione al Progetto Premiale denominato "Materiali e dispositivi magnetici e superconduttivi per sensoristica e ICT", il sottoscritto Aldo Godone, in qualità di Coordinatore Scientifico dell'INRiM, ritiene che il progetto coordinato dall'Istituto di Cibernetica del CNR, abbia un elevato valore strategico dal punto di vista dello sviluppo scientifico e sia di interesse per il nostro Istituto, pertanto si conferma l'interesse a partecipare allo stesso.

La realizzazione di questo progetto rafforzerà ulteriormente la competitività dei nostri Enti in ambito nazionale e internazionale, in particolare nel campo delle misure magnetiche e dei dispositivi quantistici superconduttivi.

Il Coordinatore Scientifico

ing. A. Godone



## CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

SCHEDA di SINTESI (Abstract) Progetto Premiale  
Articolo 5 DM n. 949 del 19 dicembre 2012

<i>Titolo progetto:</i>	<b>Materiali e dispositivi magnetici e superconduttivi per sensoristica e ICT</b>
<i>Ambito di Intervento:</i>	ICT e Dispositivi sensoriali
<i>Struttura di riferimento:</i>	<p><i>Dipartimenti CNR</i> Dipartimento Scienze Fisiche e Tecnologie della Materia, DSFTM Dipartimento di Scienze Biomediche</p> <p><i>Istituti CNR</i> ICIB – Istituto di Cibernetica <i>E.Caianello</i> IMEM - Istituto dei materiali per l'elettronica ed il magnetismo IOM - Istituto Officina dei Materiali ISM - Istituto di struttura della materia NANO - Istituto di Nanoscienze SPIN - Istituto Superconduttori, Materiali Innovativi e Dispositivi IBP - Istituto di Biochimica delle Proteine</p>
<i>Coordinatore di progetto:</i>	<del>MC</del> Carlo Carbone Istituto di Struttura della Materia
<i>Altri EPR coinvolti:</i>	<b>INRIM Ente terzo (vigilato dal MIUR)</b>
<i>Altri organismi e soggetti coinvolti:</i>	<p><i>Altre collaborazioni</i></p> <p>Fluxonics: The European Foundry for Superconductive Electronics eV, Braunschweig (D). Advanced Technologies Biomagnetic srl, Pescara Seconda Università degli Studi di Napoli, Dipartimento Ingegneria dell'Informazione Università degli Studi di Napoli <i>Federico II</i> Università degli Studi di Salerno Università degli Studi di Genova, Dipartimento di Matematica Università degli Studi di Napoli "Parthenope" NJMS--□UH Cancer Center New Jersey Medical School Newark USA</p>
<i>Descrizione breve progetto:</i>	Il progetto si propone l'obiettivo di coordinare le competenze in ambito fisico, chimico, ingegneristico e biologico presenti nei dipartimenti allo scopo di promuovere lo sviluppo di materiali e di nuovi dispositivi magnetici e superconduttivi di interesse nel campo delle tecnologie per l'informazione e comunicazione (ICT) e della sensoristica.

	<p>Il progetto integrato tra il dipartimento DSFTM e l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) per la continuità e il rafforzamento delle numerose collaborazioni scientifiche tra i due enti. Gli Istituti coinvolti nel programma dispongono di competenze e di esperienza consolidata nella sintesi di nuovi materiali, nell'indagine strutturale, elettronica e magnetica sia con metodi sperimentali che teorici, nella caratterizzazione di proprietà di trasporto, meccaniche, chimiche (etc...), nei processi di fabbricazione e di sistemi funzionali, nella progettazione e realizzazione di dispositivi.</p> <p>Le attività del progetto si concentrano sui seguenti cinque temi:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispositivi spintronici per memorie e sensori magnetici.</li> <li>• Nuovi materiali multifunzionali e sistemi nanocompositi per sensori e dispositivi magnetici</li> <li>• Sensori magnetici</li> <li>• Nano sensori superconduttivi ad interferenza quantistica</li> <li>• Dispositivi mesoscopici superconduttivi per la rivelazione di fotoni</li> </ul>
<p><i>Obiettivi del progetto:</i></p>	<p>Obiettivi strategici del progetto sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Progettare materiali e sistemi innovativi per dispositivi e sensori magnetici e superconduttivi</li> <li>• Realizzare prototipi di dispositivi e sensori con potenzialità applicative in nanoelettronica, spintronica e metrologia,</li> <li>• Creare un consorzio in ambito nazionale per amalgamare competenze complementari e convogliare potenziali sinergie per renderle competitive a livello internazionale.</li> </ul> <p>Per il raggiungimento di questi obiettivi, sono patrimonio sostanziale dell'ente le competenze disponibili in alcune tecnologie abilitanti di natura pervasiva individuate dalla Commissione Europea tra le KETs capaci di fornire quei "mattoni" della conoscenza e della tecnologia con cui sviluppare aree prioritarie di sviluppo ed intervento</p>
<p><i>Linea di intervento ai sensi dell'articolo 3</i></p>	<p>DUE</p>
<p><i>Criteri di valutazione Sviluppo delle competenze:</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diffusione dei risultati di avanzamento delle conoscenze mediante pubblicazioni su riviste internazionali</li> <li>• Presentazione dei risultati raggiunti in occasione di conferenze nazionali ed internazionali specifiche del settore</li> <li>• Sviluppo di tecnologie innovative e loro trasferimento</li> <li>• Realizzazione di dimostratori di interesse applicativo</li> <li>• Realizzazione di dispositivi e strumentazione prototipale</li> <li>• Azioni tendenti all'alta formazione di giovani laureati ed al loro inserimento lavorativo</li> <li>• Capacità di fornire servizi tecnologici ad utenza esterna</li> <li>• Capacità di rispondere in maniera coordinata ad iniziative progettuali</li> </ul>

*Grado di coinvolgimento di soggetti pubblici e privati:*

A livello nazionale le unità CNR che si occupano di sensori magnetici e superconduttivi sono al centro di una rete estesa di **collaborazioni** scientifiche e tecnologiche con **Università**, altri **Enti di Ricerca** ed **industrie** di differente dimensione e ben articolate nel territorio nazionale. Sono altresì importanti le collaborazioni e le commesse di ricerca radicate sul territorio con enti locali come **Regioni** e loro **Distretti e Poli Tecnologici** che operano in ambito elettronico. In accordo con ciò, larga parte dei fondi a disposizione dei ricercatori che operano in questo settore proviene dal successo avuto in risposta a bandi ministeriali MIUR (FISR, FIRB, PRIN), MISE (PON), MAE ecc.

La reputazione dei ricercatori coinvolti è ben testimoniata dalla partecipazione ad un gran numero di **progetti di ricerca internazionali**, in cui i ricercatori di CNR hanno **ruoli di coordinamento o di leadership**. A titolo di esempio:

- FP7-REGPOT2010- “MAMA: unlocking research potential for multifunctional advanced materials and nanoscale phenomena”, Grant Agreement No. 264098 (2010-2013) .
- European Science Foundation(ESF), Eurographene programme(2010-2013). Graphene-based systems for spintronics: Magnetic interactions at the graphene/3d-metal interface (SPINGRAPH)
- European Science Foundation (ESF), SONS programme (2007-2010). Self-assembled Nanoscale Magnetic Network (SANMAG)
- FP7-STREP 2008- Macroscopic Interference Devices for Atomic and Solid-State Systems, Grant agreement No. 214025 (2008-2011)
- Progetto FP7 ENIAC-JU “Nanoelectronics for an Energy Efficient Electrical Car (E3car)” 2009-2012
- FP7 MAGDRIVE “Magnetic superconductor Cryogenic Non-harmonic Drive –MAGDRIVE” 2011-2014
- TERASUPER “Superconducting Proximity Josephson Detectors for THz vision and Imaging”, Finanziamento Ministero Italiano della Difesa (2011-2014)
- PRIN 2009: Dispositivi ad effetto di campo basati su nanofili e superconduttori ad alta temperatura critica
- FUTURO IN RICERCA "Nanostrutture ibride superconduttore-semiconduttore: applicazioni nanoelettroniche, proprietà topologiche, correlazione e disordine. Codice: RBFR1236VV\_001" (partenza 2013)
- “Guardian Angels” one of the 4 finalist for the presentation of ICT FET Flagship.
- MAE-India: Dispositivi di Spintronica per elettronica di consumo (2008-2010), progetto di grande rilevanza per la cooperazione scientifica e tecnologica tra Italia e India.
- FIRB 2011: Nanomagnetici molecolari su superfici metalliche per applicazioni in spintronica molecolare, Codice: RBAP117RWN (2011-2014).

Corrispondentemente l’INRIM coordina e partecipa ai seguenti progetti sulle attività del programma qui proposte:

- Progetto PRIN: Controllo della Dinamica della Magnetizzazione in Nano-

	<p>strutture Magnetiche per Applicazioni nelle Tecnologie dell'Informazione e della Comunicazione (DyNanoMag, codice - 2010ECA8P3)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Progetto Premiale P4: Nanotecnologie per la metrologia elettromagnetica (Giorgio Bertotti)</li> <li>• Progetto Premiale: Realization of the International System units from the fundamental constants of Physics”</li> </ul> <p>Task 2.1: Quantum national standard of ac voltage</p>																
<p><i>Attrazione degli investimenti, impatto socio-economico e sostenibilità economico finanziaria:</i></p>	<p>La crescente richiesta di tecnologie innovative che permettano di mantenere alto il livello di competitività delle imprese suggerisce una più efficiente organizzazione del supporto tecnico-scientifico chiamato a fornire il suo contributo. Ciò però riveste anche una rilevante importanza nell'affrontare i problemi che la nostra società sarà chiamata ad affrontare nei prossimi anni, basti pensare all'invecchiamento della popolazione. L'organizzazione di una rete che, al di della suddivisione in Istituti, sappia far fronte in maniera coordinata e coerente alle necessità connesse alla sviluppo di un settore di notevoli prospettive potrebbe giocare da <b>utile</b> attrattore di risorse. La sua sostenibilità economica scaturirebbe dall'attenzione che potrebbe essere dedicata agli aspetti applicativi ed al un non sporadico rasferimento tecnologico.</p>																
<p><i>Team di programma/progetto e governance (con dimostrazione dei profili coinvolti e dei giovani):</i></p>	<p>Si prevede una articolazione del Progetto in cinque Workpackages coordinati da relativi responsabili. Per ottimizzare la diffusione della informazione ciascun Workpackage è formato da ricercatori provenienti da più Istituti CNR, partecipa alle attività, anche se non esplicitamente esposta, una significativa componente universitaria; ciò grazie all'alto numero di associati che caratterizza gli Istituti del DSFTM. Prevista ampia partecipazione di ricercatori di età minore di 35 anni e di donne.</p> <p>Lo staff di governance è assai semplice: si si basa sui cinque responsabili di WP e identifica la figura del coordinatore con quella del responsabile scientifico. Gli aspetti amministrativi e tecnico gestionali saranno affidati a personale di ICIB che già offre la propria collaborazione ad altri Istituti in area campana.</p>																
<p><i>Valore economico del Progetto previsioni di copertura e di autofinanziamento</i></p>	<p>La tabella sottostante fornisce una stima del costo, in M€, del Progetto sulla sua intera durata triennale</p> <table border="1" data-bbox="462 1467 1236 1691"> <thead> <tr> <th></th> <th>I anno</th> <th>II anno</th> <th>III anno</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>FOE7%.....</td> <td>2.50.....</td> <td>0.....</td> <td>0.....</td> </tr> <tr> <td>Cofinanziamento.....</td> <td>0.4.....</td> <td>0.72.....</td> <td>0.72.....</td> </tr> <tr> <td>Totale.....</td> <td>2.90.....</td> <td>0.72.....</td> <td>0.72.....</td> </tr> </tbody> </table> <p>La copertura dell'auto finanziamento è prevedibile venga da contratti con imprese del settore specialmente impegnate nello sviluppo di strumentazione innovativa</p>		I anno	II anno	III anno	FOE7%.....	2.50.....	0.....	0.....	Cofinanziamento.....	0.4.....	0.72.....	0.72.....	Totale.....	2.90.....	0.72.....	0.72.....
	I anno	II anno	III anno														
FOE7%.....	2.50.....	0.....	0.....														
Cofinanziamento.....	0.4.....	0.72.....	0.72.....														
Totale.....	2.90.....	0.72.....	0.72.....														
<p><i>Potenziati ulteriori coperture finanziarie:</i></p>	<p>Progetto Bandiera, POR, PON, accordi con le Regioni. Grazie ad un'opera di identificazione a livello internazionale di imprese interessate all'impiego di dispositivi e sensoristica magnetica per micro e nano elettronica, ICT, strumentazione innovativa, sono in fase avanzata accordi di partenariato legati</p>																

	allo sviluppo congiunto di sistemi prototipali.
<i>Status del progetto</i>	Nuovo
<i>Durata del progetto (anni e mesi):</i>	36 mesi
<i>Parole chiave proposte:</i>	Magnetismo, Superconduttività, materiali e dispositivi innovativi, Sensori



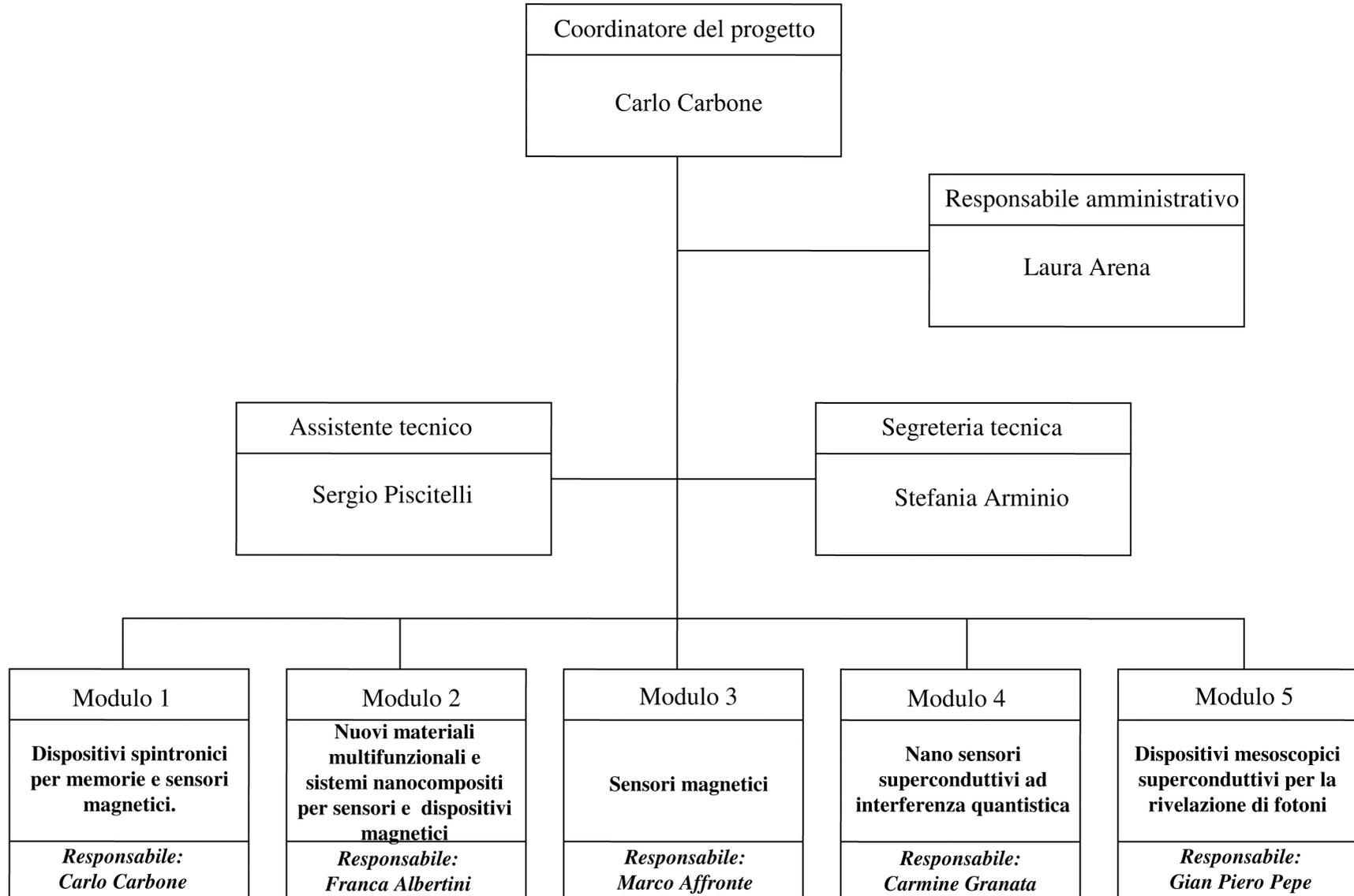
## CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

SCHEDA di SINTESI (Abstract) Progetto Premiale  
Articolo 5 DM n. 949/RIC del 19 dicembre 2012

### STIMA dei COSTI del PROGETTO

Macrovoce di spesa	Ammontare previsto	Fonte FOE 7%	Cofinanziamento Altre fonti di copertura	Incidenza percentuale
<b>Personale</b>	€ 1.597.000,00	€ 1.500.000,00	€ 97.000,00	55,13%
<i>Strutturato (ricercatori, tecnologi, tecnici, amministrativi)</i>	€ 1.500.000,00	€ 1.500.000,00	€ 0,00	51,78%
<i>Tempo determinato</i>	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	0,00%
<i>Non Strutturato (borsisti, assegnisti, etc..)</i>	€ 97.000,00	€ 0,00	€ 97.000,00	3,35%
<b>Prestazione di terzi</b>	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	0,00%
<b>Materiali</b>	€ 780.000,00	€ 480.000,00	€ 300.000,00	26,92%
<b>Attrezzature</b>	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	0,00%
<b>Infrastrutture</b>	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	0,00%
<b>Spese generali</b>	€ 500.000,00	€ 500.000,00	€ 0,00	17,26%
<b>Altre tipologie</b>	€ 20.000,00	€ 20.000,00	€ 0,00	0,69%
<i>Missioni e pubblicazioni</i>	€ 20.000,00	€ 20.000,00	€ 0,00	0,69%
<b>Totale</b>	€ 2.897.000,00	€ 2.500.000,00	€ 397.000,00	100,00%







## CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

### SUMMARY SHEET (Abstract) Progetto Premiale Articolo 5 DM n. 949/RIC del 19 dicembre 2012

<i>Project title:</i>	Materials and superconducting and magnetic devices for sensors and ICT
<i>Intervention field:</i>	ICT and sensors
<i>Reference Departments:</i>	<p><i>CNR Departments:</i> Department of Physics and matter technology, DSFTM Department of biomedical sciences</p> <p><i>CNR Institutes:</i> ICIB – Istituto di Cibernetica <i>E. Caianiello</i> IMEM - Istituto dei materiali per l'elettronica ed il magnetismo IOM - Istituto Officina dei Materiali ISM - Istituto di struttura della materia NANO - Istituto di Nanoscienze SPIN - Istituto Superconduttori, Materiali Innovativi e Dispositivi IBP - Istituto di Biochimica delle Proteine</p>
<i>Project coordinator:</i>	Carlo Carbone Istituto di Struttura della Materia
<i>Other EPR involved:</i>	<b>INRIM</b> ( <i>supervised by MIUR</i> )
<i>Other institutions involved:</i>	<p>Other collaborations:</p> <p>Fluxonics: The European Foundry for Superconductive Electronics eV, Braunschweig (D). Advanced Technologies Biomagnetic srl, Pescara Seconda Università degli Studi di Napoli, Dipartimento Ingegneria dell'Informazione Università degli Studi di Napoli <i>Federico II</i> Università degli Studi di Salerno Università degli Studi di Genova, Dipartimento di Matematica Università degli Studi di Napoli "Parthenope" NJMS-UH Cancer Center New Jersey Medical School Newark USA</p>
<i>Brief description of project:</i>	<p>The aims of the project is to coordinate the skills in the physical, chemical, engineering and biological fields of the departments in order to promote the development of materials and new magnetic and superconducting devices of interest in the field of information and communication technologies (ICT) and sensors.</p> <p>The integrated project between the Department DSFTM and the National Institute of Metrological Research (INRiM) for the continuity and reinforcement of the numerous scientific collaboration between the two</p>

	<p>institutions. The institutes involved in the program have expertise and extensive experience in the synthesis of new materials and in the electronic, magnetic and structural analysis by using both experimental and theoretical methods, in the characterization of transport, mechanical and chemical properties (etc ...), in the fabrication processes and functional systems, in the design and device fabrication.</p> <p>Project activities will be focused on the following five items:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Spintronic devices for memories and magnetic sensors.</li> <li>• New multifunctional materials and nanocomposites systems for sensors and magnetic devices</li> <li>• Magnetic sensors</li> <li>• Superconducting quantum interference nano sensors</li> <li>• Mesoscopic superconducting devices for photon detection</li> </ul>
<p><i>Objectives of the project:</i></p>	<p>Strategic objectives of the project are:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Design innovative materials and systems for devices and superconducting and magnetic sensors</li> <li>• Realization of prototype devices and sensors having potential applications in nanoelectronics, spintronics and metrology.</li> <li>• Creation of a national consortium to combine complementary expertise and to convey potential synergies in order to compete at an international level.</li> </ul> <p>To achieve these goals, are substantial shareholders of the CNR the skills available in some enabling technologies identified by the European Commission among the KETs able to provide those "building blocks" of knowledge and technology useful to develop priority areas for the research and the development.</p>
<p><i>Line of action pursuant to Article 3</i></p>	<p>Two</p>

<p><i>Evaluation Criteria Skills development:</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dissemination of the results through publications in international journals aimed to the advancement of knowledge</li>   <li>• Presentation of achieved results at national and international conferences specific to the sector</li>   <li>• Development of innovative technologies and their transfer</li>   <li>• Realization of demonstrator of practical interest</li>   <li>• Development of devices and prototype instrumentation</li>   <li>• Actions aiming to a high education of young graduates and their job placement</li>   <li>• Ability to provide technological service to external users</li>   <li>• Ability to meet the project initiatives in a coordinated manner</li> </ul>
<p><i>Involvement of public and private:</i></p>	<p>Nationwide CNR units dealing with superconducting and magnetic sensors are at the center of an extensive network of scientific and technological collaborations with <b>Universities</b>, other <b>Research Institutions</b> and <b>industries</b> of different size and well structured in the national territory. They are also important collaborations and research orders rooted in the territory with local governments as <b>Regions</b> and their <b>Districts</b> and <b>Technological Poles</b> working in an electronic field. In accordance with this, a large part of the funds at the disposal of researchers working in this area comes from the success of calls in response to ministerial calls as MIUR (FISR, FIRB, PRIN), MISE (PON), MAE etc..</p> <p>The reputation of the researchers involved is well demonstrated by the participation of a large number of <b>international research projects</b>, in which researchers of CNR in positions of leadership or coordination. By way of example:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• FP7-REGPOT2010- “MAMA: unlocking research potential for multifunctional advanced materials and nanoscale phenomena”, Grant Agreement No. 264098 (2010-2013) .</li> <li>• European Science Foundation(ESF), Eurographene programme(2010-2013). Graphene-based systems for spintronics: Magnetic interactions at the graphene/3d-metal interface (SPINGRAPH)</li> <li>• European Science Foundation (ESF), SONS programme (2007-2010). Self-assembled Nanoscale Magnetic Network (SANMAG)</li> <li>• FP7-STREP 2008- Macroscopic Interference Devices for Atomic and Solid-State Systems, Grant agreement No. 214025 (2008-2011)</li> <li>• Progetto FP7 ENIAC-JU “Nanoelectronics for an Energy Efficient Electrical Car (E3car)” 2009-2012</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FP7 MAGDRIVE “Magnetic superconductor Cryogenic Non-harmonic Drive –MAGDRIVE” 2011-2014</li> <li>• TERASUPER “Superconducting Proximity Josephson Detectors for THz vision and Imaging”, Finanziamento Ministero Italiano della Difesa (2011-2014)</li> <li>• PRIN 2009: Dispositivi ad effetto di campo basati su nanofili e superconduttori ad alta temperatura critica</li> <li>• FUTURO IN RICERCA "Nanostrutture ibride superconduttore-semiconduttore: applicazioni nanoelettroniche, proprietà topologiche, correlazione e disordine. Codice: RBFR1236VV_001" (partenza 2013)</li> <li>• “Guardian Angels” one of the 4 finalist for the presentation of ICT FET flagship.</li> <li>• MAE-India: Spintronic devices for consumer electronics (2008 - 2010), a project of great relevance for scientific and technological cooperation between Italy and India</li> <li>• FIRB 2011: Nanomagnetismi molecolari su superfici metalliche per applicazioni in spintronica molecolare, Codice: RBAP117RWN (2011-2014).</li> </ul> <p>INRIM coordinates and participates to the following projects on program activities listed here:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Progetto PRIN: Controllo della Dinamica della Magnetizzazione in Nano-strutture Magnetiche per Applicazioni nelle Tecnologie dell'Informazione e della Comunicazione (DyNanoMag, codice - 2010ECA8P3)</li> <li>• Progetto Premiale P4: Nanotecnologie per la metrologia elettromagnetica (Giorgio Bertotti)</li> <li>• Progetto Premiale: Realization of the International System units from the fundamental constants of Physics” Task 2.1: Quantum national standard of ac voltage</li> </ul>
<p><i>Attracting investment, socio-economic and economic-financial sustainability:</i></p>	<p>The growing demand for innovative technologies that make it possible to maintain a high level of competitiveness suggests a more efficient organization of the scientific and technical support. This, however, is also of great importance in addressing the problems that our society will face in the coming years, such as the aging population. The organization of a network that will be able to satisfy the needs related to the development of an area of outstanding prospects (in a coordinated and consistent way) could play a useful attractor of resources. Its economic sustainability would arise from the attention that could be dedicated to the use and application to a non-sporadic technological transfer.</p>

<p><i>Team program / project and governance (with proof of the profiles involved and young people):</i></p>	<p>The project consists of five workpackages coordinated by the relative responsible. To optimize the dissemination of information, each Workpackage is formed by researchers from several institutes CNR. Even if not explicitly shown, a significant team of research staff from the University participates in the activities, This is due to the great number of associate members that characterizes the Institutes of DSFTM. Expected broad participation of researchers under the age of 35 years and women. The governance staff is very simple: it is based on five WP responsible and identifies the role of coordinator with the scientific supervisor. The administrative and technical management will be assigned to the ICIB staff which already offers its cooperation to other institutes in the Campania area.</p>																
<p><i>Economic value of Project, forecasts coverage and self-financing</i></p>	<p>The table below provides an estimate of the cost (M €), of the project over its entire three-year duration</p> <table border="1" data-bbox="462 801 1316 952"> <thead> <tr> <th></th> <th>I year</th> <th>II year</th> <th>III year</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>FOE7%.....</td> <td>2.50.....</td> <td>0.....</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Co-financing .....</td> <td>0.4.....</td> <td>0.72.....</td> <td>0.72</td> </tr> <tr> <td>Total.....</td> <td>2.90.....</td> <td>0.72.....</td> <td>0.72</td> </tr> </tbody> </table> <p>The self-financing coverage is expected to come from contracts with industry especially involved in the development of instrumentation innovative</p>		I year	II year	III year	FOE7%.....	2.50.....	0.....	0	Co-financing .....	0.4.....	0.72.....	0.72	Total.....	2.90.....	0.72.....	0.72
	I year	II year	III year														
FOE7%.....	2.50.....	0.....	0														
Co-financing .....	0.4.....	0.72.....	0.72														
Total.....	2.90.....	0.72.....	0.72														
<p><i>Additional financial coverage</i></p>	<p>Flag project, POR, PON, agreements with the regions, identification at international level of companies interested in the use of magnetic sensors and devices for micro and nano electronics, ICT, innovative instrumentation. Agreements of partnership related to the conjunct development of prototype systems are in progress.</p>																
<p><i>Project status</i></p>	<p>New</p>																
<p><i>Project duration (years and months):</i></p>	<p>36 months</p>																
<p><i>Keywords:</i></p>	<p>Magnetism, superconductivity, materials and innovative devices, sensors</p>																



## CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

SCHEDA di SINTESI (Abstract) Progetto Premiale  
Articolo 5 DM n. 949/RIC del 19 dicembre 2012

### STIMA dei COSTI del PROGETTO

Macrovoce di spesa	Ammontare previsto	Fonte FOE 7%	Cofinanziamento Altre fonti di copertura	Incidenza percentuale
<b>Personale</b>	€ 1.597.000,00	€ 1.500.000,00	€ 97.000,00	55,13%
<i>Strutturato (ricercatori, tecnologi, tecnici, amministrativi)</i>	€ 1.500.000,00	€ 1.500.000,00	€ 0,00	51,78%
<i>Tempo determinato</i>	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	0,00%
<i>Non Strutturato (borsisti, assegnisti, etc..)</i>	€ 97.000,00	€ 0,00	€ 97.000,00	3,35%
<b>Prestazione di terzi</b>	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	0,00%
<b>Materiali</b>	€ 780.000,00	€ 480.000,00	€ 300.000,00	26,92%
<b>Attrezzature</b>	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	0,00%
<b>Infrastrutture</b>	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	0,00%
<b>Spese generali</b>	€ 500.000,00	€ 500.000,00	€ 0,00	17,26%
<b>Altre tipologie</b>	€ 20.000,00	€ 20.000,00	€ 0,00	0,69%
<i>Missioni e pubblicazioni</i>	€ 20.000,00	€ 20.000,00	€ 0,00	0,69%
<b>Totale</b>	€ 2.897.000,00	€ 2.500.000,00	€ 397.000,00	100,00%



