

## RA diazione per l'IN novazione 2015

M. ALESSANDRONI [A], L. AVALDI [B\*], S. BACCARO [C], A. BALERNA [D], G. BAZZANO [E], R. BEDOGNI [D], J. BELTRANO [F], S. BOLLANTI [E], F. BONFIGLI [E], G. BORGESE [D], F. BORGOGNONI [E], B. BUONOMO [D], G. CAMPOGIANI [G], M. CARTA [C], M.G. CASTELLANO [H], M. CASTELLI GUIDI [D], D. CATONE [B\*], G. CAVOTO [I], A. CEMMI [C], A. CIANCHI [LM\*], F. CIOCCI [E], G. CLAPS [E], S. COLONNA [B], P. CONSOLE CAMPRINI [N], C. CONTI [G,S\*], A. CRICENTI [B], M. CROIA [G], A. CURCIO [D], G. DATTOLI [E], D. DE MEIS [E], E. DEL RE [G], C. DI GIULIO [D], A. DI CIACCIO [LM], P. DI LAZZARO [E], A. DORIA [E], A. ESPOSITO [D], R. FACCINI [G,I\*], A. FALONE [D], M. FERRARIO [D\*], S. FIORE [C], F. FLORA [E], L. FOGGETTA [D], G.P. GALLERANO [E], A. GERARDINO [H], F. GHIO [I], A. GIORDANO [Z], E. GIOVENALE [E], D. GIULIETTI [OPQ], A. GUSTAPANE [R], S. IACOBUCCI [R], P. IMPERATORI [B], L. INDOVINA [Z], A. LONARDO [I], M. LUCE [B], F. LUCIBELLO [D], S. LUPI [G,L], C. MAZZOTTA [E], R. MESSI [L], L. MEZI [E], M. MISSORI [S], R.M. MONTEREALI [E], D. MURRA [E], R. NATALINI [Y], F. NGUYEN [E], P. O'KEEFFE [B\*], M. OSIPENKO [T], C. PACE [F], D. PACELLA [E], B. PACI [B], A. PALADINI [B], A. PALMA [B], L. PICARDI [E], A. PIETROPAOLO [E\*], M. PILLON [E], R. POMPILI [D], T. PROSPERI [B], F. RONDINO [E], L. QUINTIERI [C], J. RAU [B], R. RISPOLI [U], T. SCOPIGNO [G,S\*], B. SPATARO [D], V. SURRENTI [E], O. TARQUINI [W], L. TEODONIO [V], A. TORRE [E], F. TOSCHI [B], D. TRUCCHI [B], G. TURCHETTI [D], S. TURCHINI [B], M. VADRUCCHI [E], P. VALENTE [I\*], M.A. VINCENTI [E], N. ZEMA [B], M. ZERBINI [E]

[A] RMP-Acilia

[B] CNR Istituto di Struttura della Materia

[C] ENEA C.R. Casaccia

[D] INFN Laboratori Nazionali di Frascati

[E] ENEA C.R. Frascati

[F] Università della Calabria

[G] Università La Sapienza Dipartimento di Fisica

[H] CNR Istituto di Fotonica e Nanotecnologie

[I] INFN Sezione di Roma 1

[L] Università Tor Vergata Dipartimento di Fisica

[M] INFN Sezione Roma Tor Vergata

[N] ENEA C.R. Brasimone

[O] Università di Pisa Dipartimento di Fisica

[P] INFN Sezione Pisa

[Q] Istituto Nazionale di Ottica, Sezione di Pisa

[R] Selex ES Finmeccanica

[S] CNR Istituto dei Sistemi Complessi

[T] INFN Sezione di Genova

[U] INAF

[V] Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo-IRCPAL

[Y] CNR Istituto per le Applicazioni del Calcolo

[W] CNR Istituto di Cristallografia

[Z] *Università Cattolica del Sacro Cuore*

[\*] *Workshop organizers*

**Summary.** — Questo documento è il risultato di un workshop (RAIN15) tenutosi il 12-13 Ottobre 2015. In esso viene presentata una panoramica di infrastrutture per la produzione di radiazione presenti nel territorio della Regione Lazio e se ne illustrano le possibili applicazioni nella ricerca applicata e industriale. Si discute infine di come un consorzio tra gli enti dei partecipanti (CNR, ENEA, INFN ed Università) è necessario perchè queste risorse siano pubblicizzate ed utilizzate opportunamente.

---

3	Introduzione
3	1. Infrastrutture Esistenti
3	1'1. THz radiation
4	1'2. UV, Visibile, Infrarosso
5	1'3. Raggi X
6	1'4. Radiazione di Sincrotrone
6	1'5. Radiazione $\gamma$
7	1'6. Particelle cariche
8	1'7. Neutroni
8	2. Potenzialità delle infrastrutture
8	2'1. Irraggiamento
8	2'2. Imaging
10	2'3. Composizione elementale
11	2'4. Altro
11	3. Esempi di applicazione
11	3'1. Aerospazio
12	3'2. Scienze della Vita
12	3'3. Beni Culturali
13	3'4. Green Economy
14	3'5. Agrifood
14	3'6. Sicurezza
14	3'7. ICT
14	Conclusioni

---

## Introduzione

Nel territorio della regione Lazio esistono numerose e importanti attività di ricerca di base, sia presso le Università sia presso i Centri di Ricerca. Tra queste molte attività, un particolare rilievo assume il ricco panorama di infrastrutture nell'ambito della produzione di radiazione, intesa nel senso più ampio e ricomprendendo: fotoni su tutto lo spettro di energia, elettroni, neutroni, protoni e altri adroni cariche. Si tratta di infrastrutture di caratteristiche e dimensioni molto diverse, che vanno dalla sorgente intensa con radio-nuclide all'acceleratore di particelle lungo decine di metri. La condivisione di queste infrastrutture all'interno della comunità scientifica stessa, e un'apertura al mondo della ricerca industriale e applicata porterebbero a un incremento del tasso di innovazione in ambito regionale e ad una reale crescita delle realtà esistenti sia nel mondo della ricerca di base sia in quello delle imprese.

Per avviare il processo di creazione di un laboratorio diffuso sul territorio che metta a sistema le infrastrutture esistenti nel campo della radiazione, INFN, ENEA, CNR e ricercatori delle Università di Roma "La Sapienza", "Tor Vergata" e "Roma Tre", hanno promosso un workshop con tre obiettivi di base:

- Condividere le informazioni sulle caratteristiche e prestazioni delle infrastrutture esistenti, attuali e a seguito di miglioramenti programmati o proposti;
- Mettere a confronto i ricercatori che gestiscono tali infrastrutture sulle esperienze di cooperazione con la ricerca industriale ed applicata;
- Discutere i prossimi passi verso la creazione di un laboratorio diffuso.

Questo documento vuole dunque riassumere quanto è emerso su questi tre aspetti per tutte le infrastrutture presentate durante il workshop, che si è tenuto nei Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN e nel Centro di Ricerca di Frascati dell'ENEA nei giorni 12-13 ottobre 2015, mettendo in evidenza le potenziali applicazioni.

Il documento si struttura quindi in tre parti: nella prima si elencano le infrastrutture che sono state presentate, confrontandone le caratteristiche; nella seconda viene presentata una panoramica delle tecniche esistenti che fanno uso delle radiazioni prodotte in queste infrastrutture; nella terza si riportano esempi di applicazione di queste tecniche negli ambiti di interesse industriale identificati dalla Regione Lazio.

### 1. – Infrastrutture Esistenti

**1.1. THz radiation.** – Nell'area romana quattro sedi ospitano sorgenti di radiazione THz: il laboratorio TERALAB e il laboratorio THEIA (Istituto dei sistemi complessi del CNR), presso l'Università degli studi di Roma "La Sapienza", il laboratorio SPARCLAB presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN (LNF) e la facility CETRA dei laboratori ENEA di Frascati. Nella tabella seguente sono riportate le principali caratteristiche di ciascuna sorgente. Ognuna delle sorgenti coinvolge sistemi diversi di generazione della radiazione, che si riflettono in caratteristiche temporali e spettrali diverse.

La stretta collaborazione tra Università la Sapienza e LNF offre già un insieme di sorgenti uniche e complementari, che inoltre coprono un range di frequenza molto ampio: dai 20 GHz ai 5 THz. Da un lato le antenne fotoconduttive (PCA) e i cristalli non lineari (NLC) permettono di avere un dispositivo molto compatto, a spese ovviamente del campo di picco, dall'altro l'acceleratore SPARC di LNF è in grado di produrre radiazione

Sede	Tecnologia	Potenza media	Campo picco	Ripetizione	Banda
Sapienza	PCA	1 $\mu$ W	$\approx$ 10-100 V/cm	80 MHz	50 GHz-2 THz
Sapienza	NLC	1 $\mu$ W	$\approx$ 10-100 V/cm	80 MHz	50 GHz-4 THz
ISC CNR	PCA	1 $\mu$ W	$\approx$ 10-100 V/cm	100 MHz	50 GHz-4 THz
LNF	CTR	300 $\mu$ W	$\approx$ 1.5 MV/cm	10 Hz	500 GHz-5 THz
ENEA	FEL	10 mW	$\approx$ 3 kV/cm	2.5 Hz	90-150 GHz
ENEA	FEL	40 mW	$\approx$ 6 kV/cm	2.5 Hz	0.4-0.7 THz

TABLE I.: Principali caratteristiche delle sorgenti THz nell'area romana. Le frequenze di ripetizioni riportate sono quelle tipiche di operazione e non le massime ottenibili.

impulsata con ampiezza di picco sino ai MV/cm, ma ovviamente con gli ingombri propri di questo tipo di strutture.

Il Compact FEL e la sorgente FEL-CATS dell'ENEA sono sorgenti compatte basate anch'esse su di un acceleratore, ma a bassa energia (pochi MeV), che pilota un FEL (free electron laser) in una banda accordabile, rispettivamente 90 - 150 GHz e 0.4 - 0.7 THz.

1.2. *UV, Visibile, Infrarosso.* – Diversi laboratori specializzati nella produzione ed utilizzo della radiazione ultra-violetta, visibile ed infrarossa sono presenti nella regione Lazio: EFSL, Femtoscopy e ISM-FL. I laboratori Femtoscopy ed EFSL sono entrambi equipaggiati di sistemi laser a femtosecondo amplificati, in grado di produrre impulsi laser ultra-brevi in un ampio intervallo di energia e potenza. Il laboratorio ISM-FL presenta invece sorgenti laser accordabili a nanosecondo e in continuo.

Il laboratorio Femtoscopy dell'Università di Roma "La Sapienza", è in realtà composto da tre distinte facility che operano in condizioni ed intervalli di energia differenti:

- Lab 1 (800 nm, 30fs, 80 MHz, 3 mJ 1kHz; OPA e NOPA, 8fs, 300-1000 nm);
- Lab 2 (Er fibra, 40MHz, 1.5 $\mu$ m 60 fs 700-950 nm, 1 ps);
- Lab 3 (Nd-Van 80 MHz, 1064 e 532 nm, 6 ps; OPO 600 nm-2  $\mu$ m)

Lab 1 è specializzato nella spettroscopia vibrazionale ultra-veloce basata sull'innovativa tecnica Raman a femtosecondo, mentre Lab 2 e Lab 3 sono specializzati nella microscopia (Coherent Anti-Stokes Raman Scattering) che permette di caratterizzare chimicamente materiali biologici su scala nanometrica.

Il laboratorio EFSL (EuroFEL Support Laboratory) dell'Istituto di Struttura della Materia (ISM) del CNR, è equipaggiato con un sistema laser a femtosecondo amplificato (oscillatore: 800 nm, 80 MHz, 20fs, 500 mW; amplificatore: 800 nm, 4 mJ, 1kHz; OPA: 35-40fs, 240 - 2000nm). A breve questo laboratorio verrà equipaggiato con una nuova sorgente per la generazione di armoniche superiori in gas rari che permetterà di produrre ed utilizzare radiazione nell'intervallo dell'EUV (20-90 eV).

Il laboratorio ISM-FL (Fotochimica e Spettroscopia Laser) è equipaggiato con un sistema laser a nanosecondo costituito da un laser Nd:YAG (10 Hz, 6 ns, 800 mJ/impulso a 1064 nm, oppure 400 mJ/impulso a 532 nm) che pompa un laser a coloranti (10 Hz, 6

ns, 220-800 nm, 5-50 mJ/impulso), e con un laser in continuo a ioni di Argon (514 nm, 2 W).

La Sorgente SPARC-FEL (Free Electron Laser) è stata sviluppata presso LNF per ricerca e sviluppo sulle sorgenti di radiazione. Può operare in regimi molto diversi, da cui derivano differenti caratteristiche energetiche e spettrali della radiazione prodotta. L'armonica fondamentale è nel visibile, a 500 nm.

Finora sono stati effettuati run per ottenere radiazione tra 800 nm e 37 nm. Ovviamente l'energia per impulso è molto diversa a secondo della lunghezza d'onda utilizzata e del modo di operazione. Sono due i modi di operazione fondamentali, chiamati SASE (Self-Amplified-Spontaneous-Emission) e seeding. Nel secondo caso l'energia del singolo impulso può essere circa un centinaio di volte superiore. In generale questa al massimo è stata misurata in 380  $\mu$ J e al minimo a qualche frazione di nJ. La banda percentuale è di norma intorno al 0.5%-0.8%. Da notare però che nel modo seeding è possibile operare o nella fondamentale (800 nm) o nelle armoniche di un laser di seme Ti:Sa. Le principali caratteristiche della sorgente sono riassunte nella Tabella II. Anche se la macchina è

Lunghezza d'onda	37-800 nm
Energia	1 nJ-380 $\mu$ J
Larghezza di banda	0.5%-0.8%

TABLE II.: Principali caratteristiche della sorgente FEL presso LNF.

dedicata più ad esperimenti che ad utenti, e sebbene non ci sia una sala sperimentale dedicata, è comunque possibile ospitare setup di dimensioni abbastanza contenute, che si possano alloggiare su un tavolo ottico.

1.3. *Raggi X.* – Sono numerosi i laboratori presenti nella regione Lazio in grado di generare ed utilizzare la radiazione X. Per l'ENEA ci sono i laboratori NIXT ed SAD-Eccimeri, per il CNR sono presenti il laboratorio di raggi-X dell'ISM (ISM-RX) ed il laboratorio ICLA, e per l'INFN è attivo il laboratorio FISMEL. Le caratteristiche specifiche di questi laboratori sono descritte di seguito.

I laboratori NIXT, ISM-RX ed ICLA sono tutti equipaggiati con tubi a raggi-X, generati dall'impatto di elettroni ad alta energia cinetica (decine di kV) su anodi di diversi materiali (W, Mo, Cu), in modo che si possa cambiare la lunghezza d'onda della radiazione prodotta. Le differenti tecniche sperimentali impiegate in questi laboratori garantiscono un'ampia molteplicità di applicazioni e caratterizzazioni di materiali, sebbene le caratteristiche delle sorgenti siano molto simili in termini di flusso fotonico ed energia (NIXT: 1-80 keV, ISM-RX: 12-55 keV e ICLA: 10-60 keV).

Il laboratorio NIXT si concentra sulla spettroscopia a raggi-X (dispersione di energia), sul 2-D imaging e su tecniche di tomografia e radiografia. La combinazione di queste tecniche con avanzati rivelatori consente di effettuare misure imaging con discriminazione in energia ad un alto frame rate (1 - 100 kHz).

Il laboratorio ISM-Diff ha sviluppato approcci di caratterizzazione delle proprietà chimico/fisiche dei materiali che si avvalgono di tecniche non distruttive e complementari tra di loro. Il punto di forza del Laboratorio è l'utilizzo di tecniche di raggi-X non

convenzionali quali la Diffrazione e la Riflettometria di Raggi-X in Dispersione di Energia (EDXD/EDXR).

Il laboratorio ICLA è in grado di combinare diverse tecniche spettroscopiche X: fluorescenza di raggi-X (ED-XRF); diffrazione di raggi-X (XRD); radiografie a raggi-X.

Il laboratorio SAD-Eccimeri è equipaggiato con EGERIA, una sorgente di radiazione dall'estremo ultravioletto (EUV) ai raggi-X molli basata su plasma prodotto da laser (LPP), che funziona focalizzando un laser di alta potenza (fino a 5J/5Hz o 0.5J/50Hz) su un bersaglio mobile di rame o tantalio. L'energia e lo spettro della radiazione emessa possono essere modulate, cambiando le condizioni di focaggio del laser. Tale sorgente ha caratteristiche molto diverse rispetto alle sorgenti convenzionali ed in particolare è caratterizzata dalla struttura temporale del laser che genera la radiazione X (durata impulso 30/100 ns). EGERIA può essere utilizzata per microlitografia in proiezione in accoppiamento con il MET (Mirco-Exposure Tool) per raggiungere risoluzioni di scrittura fino a 100 nm. Il laboratorio è equipaggiato anche con una sorgente che produce radiazione nell'EUV(10-20 nm), mediante plasma generato da scarica (DPP).

Il laboratorio FISMEL è equipaggiato con sorgenti di raggi-X da decadimento radioattivo di  $^{55}\text{Fe}$  (<60 keV), che vengono impiegate per effettuare caratterizzazioni mediante tecniche di fluorescenza di raggi-X in dispersione di energia per la determinazione quantitativa della composizione elementare di materiali di interesse.

**1.4. Radiazione di Sincrotrone.** – L'anello di accumulazione DAΦNE, in funzione presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN, produce radiazione di sincrotrone in un ampio intervallo di energia, che va dall'infrarosso ai raggi X. La radiazione è prodotta da elettroni relativistici (ossia che si muovono ad una velocità prossima a quella della luce) sottoposti ad una accelerazione centripeta, indotta da campi magnetici, che ne curvano le traiettorie.

Nel laboratorio di luce di sincrotrone, DAΦNE-Luce, ci sono cinque linee che consentono di effettuare diverse tipologie di esperimenti che vanno dalla scienza dei materiali, ai test di ottiche e rivelatori. Le linee di luce in funzione presso DAΦNE sono: la linea SINBAD (1.24 meV-1.24 eV) che usa la radiazione infrarossa, la linea DXR1-Soft X-ray (900 eV - 3000 eV) che usa la radiazione X e la linea DXR2 UV-VIS (2 eV - 10 eV) per la radiazione visibile e UV. Altre due linee, Low Energy Beamline (35eV-200 eV) e High Energy Beamline (60 eV - 1000 eV), sono ancora da mettere a punto. Il laboratorio è fornito anche di una stazione per spettroscopia Raman per la caratterizzazione di film come il grafene.

**1.5. Radiazione  $\gamma$ .** – Nella Regione sono due i siti nei quali è possibile produrre raggi  $\gamma$ : i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN e il Centro ENEA della Casaccia.

Le sorgenti radioattive in dotazione a LNF sono tutte del tipo sigillato. Una sorgente sigillata è formata da sostanze radioattive solidamente incorporate in materiali solidi e inattivi, o sigillate in un involucro inattivo, che presenta una resistenza sufficiente per evitare, in condizioni normali d'impiego, qualsiasi dispersione di sostanze radioattive e qualsiasi possibilità di contaminazione. Sono tutte di attività modesta e non adatte per prove di resistenza alle radiazioni. Da una collaborazione tra LNF e centro ENEA di Frascati è stato possibile realizzare una piccola facility quasi-SIT (Servizio Italiano Taratura), i cui dati sono riportati nelle tabelle seguenti.

La sorgente CALLIOPE presso i laboratori ENEA della Casaccia costituisce invece un vero e proprio centro di irraggiamento, sia per test di qualificazione dei materiali, sia per ricerche chimico-fisico e biologiche sugli effetti delle radiazioni. Si tratta di una

TABLE III.: Sorgenti sigillate

TABLE IV.: Sorgenti a LNF

TABLE V.: Sorgenti ENEA-LNF quasi-SIT

Sorgente	Energia media	Attività	Sorgente	Energia media	Attività
Co-60	1.25 MeV	3 MBq	Am-241	0.028 MeV	1070 MBq
Cs-137	0.66 MeV	1040 MBq	Cs-137	0.66 MeV	21500 MBq
Na-22	01.27 MeV	0.2 kBq	Co-60	1.25 MeV	170 MBq

facility pool-type, con una piscina di 7x6x3.9 m<sup>3</sup>.

Sorgente	Energia media	Attività
Co-60	1.25 MeV	3.7 10 <sup>15</sup> MBq

TABLE VI.: Sorgente Calliope

Permette di fare dosimetria assoluta con diversi sistemi dosimetrici:

Sistema	Dose
Fricke	20-200 Gy
Red-Perspex	5-40 kGy
radiochromic	1 kGy-3 MGy
Thermo Luminescent Dosimeter (TLD)	1 mGy-100 Gy
ESR dosimeter with alanine	1Gy-500 kGy

TABLE VII.: Sistemi dosimetrici della sorgente Calliope

1'6. *Particelle cariche.* – La produzione di fasci di particelle cariche avviene tramite acceleratori di dimensioni crescenti con l'energia finale. Nel Lazio ci sono o sono in fase di progetto acceleratori in grado di produrre fasci di elettroni e di protoni.

Un fascio di elettroni di bassa energia si trova presso la sede di Roma dell'Istituto di Fotonica e Nanotecnologie del CNR. Questo fascio, utilizzato per nanolitografia, è generato da un Field Emission Gun di 500kV con un beam spot di 8nm.

Un fascio di elettroni (o positroni) tra i 25 ed i 750 MeV (550) è invece prodotto alla Beam Test Facility (BTF) dei Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN. Gli elettroni o positroni vengono estratti dal LINAC del complesso DAΦNE, prima di essere iniettati nell'anell di accumulazione. La sala sperimentale BTF è abilitata fino a  $3.125 \times 10^{10}$  elettroni/s. Può operare sia a bassa rate ed alta intensità per sparo, sia con una rate di 50 Hz attenuando il fascio per mezzo di un bersaglio e risezionando l'energia per mezzo

di uno spettrometro magnetico (fino a un massimo di  $10^5$  elettroni). La risoluzione in energia è dello 0.5% e la dimensione trasversa del fascio può essere focalizzata fino a 0.5 mm (in aria). La durata dell'impulso (micro-bunched a 2856 MHz) può essere variata tra 1 e 40 ns.

Fasci di protoni da 13–19 MeV sono prodotti dal ciclotrone del Policlinico Gemelli. Ci sono due linee di estrazione, per cui una delle due può essere usata per applicazioni diverse da quelle terapeutiche.

Infine, e' in fase di costruzione un acceleratore lineare per protoni da 80-150 MeV per fini adroterapici presso l'Istituto Regina Elena.

**1.7. Neutroni.** – Diverse sorgenti di neutroni di alta intensità (con rateo di emissione  $\geq 10^{11}$  ns<sup>-1</sup>) sono presenti nell'ambito della regione Lazio: una guidata da acceleratori di elettroni (n@BTF presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN), una da acceleratore elettrostatico lineare di deutoni (Frascati Neutron Generator, FNG, presso il Centro Ricerche Frascati dell'ENEA) e due reattori, TRIGA e TAPIRO (presso il Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA), come riportato in dettaglio nella tabella VIII.

Nella stessa tabella sono elencati anche i campi termici ottenuti da sorgenti di laboratorio moderate, attualmente realizzati e fruibili presso, rispettivamente, i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN (la sorgente ETHERNES), il Centro Ricerche di Frascati dell'ENEA (la sorgente HOTNES) e il Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA (lo standard primario di rateo di fluenza termica).

Per concludere, molteplici sorgenti sigillate di laboratorio (Americio- Berillio, Americio-Boro, ecc), di media e bassa intensità (rateo di emissione  $\geq 10^8$  n s<sup>-1</sup>), sono in dotazione ai succitati istituti, e sono, tipicamente, utilizzate per creare campi di riferimento per tarature di strumentazione e rivelatori.

## 2. – Potenzialità delle infrastrutture

**2.1. Irraggiamento.** – Fasci di particelle (tipicamente elettroni, protoni, gamma o neutroni) sono spesso utilizzati per verificare l'effetto di un elevato e/o intenso irraggiamento su materiali e dispositivi. Si studia, per esempio, il cambiamento delle proprietà di materiali sottoposti a elevata radiazione, ovvero la possibilità di malfunzionamento di dispositivi elettronici dopo una elevata esposizione alla radiazione. La caratteristica più rilevante dei fasci che si utilizzano per questa applicazione è la loro intensità, ma è ovviamente anche rilevante che lo spettro in energia riproduca, per quanto possibile, lo spettro reale nei casi di interesse.

L'irraggiamento di campioni può causare, se particolarmente intenso, reazioni nucleari che arricchiscono il bersaglio di nuovi isotopi, tipicamente instabili. Fasci di protoni o di neutroni sono pertanto alla base della produzione di nuovi radio-isotopi e in generale nuovi materiali.

Il danneggiamento di bio-materiali indotto da radiazione, es. raggi ultravioletti, viene studiato sottoponendo sistemi biologici ad adeguate e controllate dosi di radiazione, con lo scopo di studiarne gli effetti a livello strutturale e molecolare. Tali studi sono di fondamentale importanza nella comprensione su scala cellulare di un'ampia serie di patologie e di come danneggiamenti a livello molecolare possano riflettersi su malfunzionamenti di tipo biologico.

**2.2. Imaging.** – Per conoscere informazioni relative all'interno di un corpo in modo non distruttivo si ricorre a tecniche di imaging. Nel caso di fasci di particelle la logica

Sorgente	tipologia	Locazione	Rateo di fluenza [ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]
TRIGA	reattore di ricerca	ENEA-CR Casaccia	$10^{13}$ (termico)
TAPIRO	reattore di ricerca	ENEA-CR Casaccia	$10^{12}$ (veloce)
ETHERNES	AmBe in polietilene	INFN-LNF	$6.0 \cdot 10^2$ (termico *)
HOTNES	AmB in polietilene	ENEA CR Frascati	$10^3$ (termico **)
Standard termico primario	AmBe in grafite/polietilene	ENEA-CR Casaccia	$1.2 \cdot 10^4$ (***)
			Rateo di emissione [ $\text{s}^{-1}$ ]
n@BTF	elettroni su target di W	INFN-LNF	$10^9$ ( $\sim 1\text{MeV}$ )
FNG	Deutoni su target di Trizio	ENEA-CR Frascati	$10^{11}$ (DT-14 MeV)
FNG	Deutoni su target di Deuterio	ENEA-CR Frascati	$10^9$ (DD-2.5 MeV)
AmLi	2 sorgenti sigillate	ENEA-CR Casaccia	$10^5, 4.0 \cdot 10^4$
AmF	2 sorgenti sigillate	ENEA-CR Casaccia	$4.5 \cdot 10^5$
AmB	2 sorgenti sigillate	ENEA-CR Casaccia	$4.0 \cdot 10^5$
AmBe	4 sorgenti sigillate	ENEA-CR Casaccia	$2.24 \cdot 10^6$ $2.89 \cdot 10^6$ $2.4 \cdot 10^6$ $7.2 \cdot 10^4$
PoLi	sorgente sigillata	ENEA-CR Casaccia	$1.3 \cdot 10^1$

TABLE VIII.: Sorgenti di Neutroni nel territorio della Regione Lazio.

(\*) fluenza uniforme ( $\pm 1\%$ ) su una superficie quadrata di lato 45 cm;(\*\*) fluenza uniforme ( $\pm 1\%$ ) su una superficie circolare di diametro 30 cm;

(\*\*\*) flusso termico uniforme dentro cavit cilindrica di 5 cm di diametro e 10 cm di altezza

dell'investigazione è sempre la stessa: il corpo sotto esame viene investito da un campo di radiazione e viene rivelata la frazione di quest'ultimo che attraversa il corpo. Le informazioni che si ottengono sull'interno del corpo dipendono dal tipo di radiazione utilizzata, perché varia quale componente frena la radiazione stessa attenuando il fascio. In particolare:

- la radiazione THz rivela la composizione interna di materiali opachi. Realizzando una mappa della variazione dell'intensità e della fase di un impulso THz si possono visualizzare difetti nei materiali. A differenza degli ultrasuoni l'imaging THz non richiede mezzi di accoppiamento. La radiazione THz apre pertanto nuove possibilità per il controllo anche on-line della qualità e per la diagnostica non distruttiva di materiali e prodotti industriali, prodotti alimentari, tessuti biologici. Senza dimenticare che viene anche usata nella diagnostica di opere d'arte.
- la radiazione X nell'attraversare la materia viene in parte assorbita e in parte trasmessa in funzione della densità e della composizione atomica della materia stessa. Registrando, su un opportuno rivelatore, le variazioni d'intensità della radiazione trasmessa, queste generano il contrasto necessario per ottenere delle immagini radiografiche. Quando per i raggi X attraversano materiali con basso numero atomico, tipo i tessuti molli, l'assorbimento diventa esiguo e in questo caso

si possono ottenere delle ottime immagini utilizzando il contrasto di fase ossia lievi deviazioni che fasci coerenti di raggi X subiscono quando penetrano attraverso materiali di differente densità.

- i neutroni vengono fermati dai nuclei leggeri, in particolare l'idrogeno, mentre l'attenuazione da nuclei pesanti viceversa è bassa. L'imaging con neutroni è pertanto complementare a quello con raggi X: si riescono a vedere elementi leggeri all'interno di strutture fatte di nuclei pesanti, in particolare metalli. Si tratta dunque di uno strumento ideale per indagini non distruttive di oggetti con involucri metallici.

In tutti i casi, l'immagine risultante è la proiezione della densità dei materiali di interesse sullo schermo utilizzato per stimare la radiazione residua dopo l'attraversamento. Se però si prendono più immagini, ottenute ruotando il sistema fascio più schermo rispetto all'oggetto o viceversa, è possibile, tramite una trasformazione di Radon, estrarre immagini tridimensionali dell'oggetto. In questo caso, che richiede fasci più intensi o esposizioni più lunghe, si parla di *tomografia*.

Se l'intensità del fascio la permette si può fare una tomografia risolta nel tempo e studiare l'evoluzione della composizione interna dell'oggetto in particolari condizioni. Una tipica applicazione è lo studio tramite tomografia neutronica del movimento del carburante (che è ad alto numero di atomi di idrogeno) all'interno di un motore.

La microscopia ottica è una tecnica di imaging che utilizza radiazione IR-Vis-UV e consente una completa caratterizzazione chimica, strutturale e morfologica su scala nanometrica di vari materiali. Tali avanzate metodologie consentono la diagnosi precoce di patologie e la mappatura dettagliata di tessuti biologici in maniera molto più efficace ed efficiente rispetto alle tecniche di laboratorio tradizionali.

**2.3. Composizione elementale.** – Se invece di limitarsi a misurare l'attenuazione di un fascio di particelle nell'attraversare un materiale, si studia una particolare interazione delle particelle con il bersaglio, si possono ricavare informazioni riguardo alla composizione del bersaglio stesso. In particolare:

- Se si irraggia con radiazione THz si possono discriminare tra i composti chimici, in particolare tra gli isomeri (quali per esempio fruttosio e glucosio).
- Se si irraggia un campione con radiazione luminosa è possibile ottenere informazioni complete sulle diverse caratteristiche elementali, chimiche e strutturali del bersaglio. Le differenti proprietà del sistema irraggiato possono essere messe in evidenza scegliendo accuratamente l'intervallo di energia dei fotoni utilizzati (IR, Visibile, UV, EUV), e analizzando il segnale luminoso residuo che è stato assorbito e/o riflesso dal sistema in esame.
- Se s'irraggia un campione con radiazione X si possono ottenere informazioni sulle caratteristiche elementali, chimiche e strutturali del materiale studiato. Usando la spettroscopia di fluorescenza si può ottenere una mappa bidimensionale degli elementi atomici che costituiscono il materiale stesso. Utilizzando invece tecniche di diffrazione o assorbimento X si possono ottenere informazioni sulla struttura atomica e anche sulla composizione chimica. Questo tipo di studi diventa fondamentale se si vuole individuare la presenza di specifici composti tipo ossidi o studiare le reazioni chimiche in materiali di interesse tecnologico come ad esempio i catalizzatori.

- Se si irraggia un campione con neutroni e si studia lo spettro in emissioni di raggi gamma, si rivelano i processi di attivazione neutronica che sono specifici del materiale composto (Nuclear Activation Analysis). Come nel caso dell'imaging, gli elementi che si riescono a discriminare sono diversi rispetto alla radiazione fotonica.
- Se si irraggia una superficie con protoni di qualche MeV di energia e si rivelano i fotoni emessi, si può discriminare sulla composizione in elementi sullo strato superficiale del campione sotto studio (Ion Beam Analysis). È dunque molto utile quando, come nel caso dei beni culturali, l'interesse è su strutture superficiali.

2.4. *Altro.* – Altri possibili utilizzi sono i seguenti:

- Fasci di elettroni possono inoltre essere utilizzati per fabbricare strutture di dimensioni inferiori a 100nm tipicamente in sostanze plastiche (nanolitografia).
- Fasci di adroni (in particolare protoni) possono essere utilizzati per la produzione, tramite interazioni nucleari, di isotopi radioattivi a scopo terapeutico (radio-farmaci).

### 3. – Esempi di applicazione

Le infrastrutture descritte nella Sez. 1, permettono di utilizzare le tecniche descritte in Sez. 2, le quali a loro volta possono essere applicate in numerosi campi. In questa sezione evidenzieremo esempi di applicazioni nei vari ambiti di interesse per l'industria. La corrispondenza tra ambiti e tipologia di infrastruttura è riportata in Tab. IX.

Sorgente	Aerospazio	Sc. Vita	Beni Culturali	Agrifood	Sicurezza	ICT	Green Eco
THz	X	X	X	X	X		X
IR	X	X	X				
Vis		X	X				
raggi X		X	X		X	X	X
raggi $\gamma$	X	X	X	X			
elettroni	X				X	X	
protoni	X	X	X				
neutroni	X	X	X	X	X	X	

TABLE IX.: Corrispondenza tra ambiti di interesse e tipologia delle infrastrutture.

3.1. *Aerospazio.* – Nel campo aerospaziale la caratterizzazione e lo studio di nuovi materiali dal punto di vista strutturale ed elementale pu essere di enorme utilità. La microtomografia di raggi-X, l'analisi imaging della fluorescenza di raggi-X, la diffrazione e la riflettometria di raggi-X in dispersione di energia (NIXT, ISM-RX), permettono di caratterizzare la morfologia e la struttura interna di ogni tipo di materiale impiegato nell'industria areospaziale, mettendone in evidenza le qualità e/o i difetti.

La componentistica areospaziale richiede anche di realizzare elementi di alta precisione. Uno strumento di nano-litografia è a disposizione per queste applicazioni all'IFN del CNR. È stato per esempio realizzato un giroscopio per la misura di movimenti angolari di dimensioni micrometriche.

Un altro aspetto critico nel campo areospaziale é garantire la sicurezza dei voli accertandosi che la componentistica, in particolare quella elettronica, non subisca danni a causa delle maggiori radiazioni presenti nello spazio. E' dunque necessario accertarsi che i maggiori flussi di particelle, dagli elettroni, ai protoni, ai neutroni ed ai raggi gamma, non danneggino i componenti elettronici. A tal fine si utilizzano i fasci intensi di particelle prodotte alla BTF dei Laboratori Nazionali di Frascati INFN (elettroni), l'FNG ed i reattori Triga e Tapiro, rispettivamente nel Centro Ricerche di Frascati e della Casaccia dell'ENEA (neutroni). Inoltre, presso l'impianto di irraggiamento gamma Calliope (ENEA Casaccia) vengono condotti test di qualifica di componenti e sistemi elettronici secondo le normative standard europee ed internazionali (ESA, MIL). È possibile, se i flussi sono da considerarsi sufficienti, estendere questo utilizzo anche ai protoni accelerati dal Ciclotrone del Policlinico Gemelli.

**3'2. Scienze della Vita.** – La microscopia ottica CARS (Femtoscopia) e SNOM nel Visibile e nell'IR (ISM) permettono una profonda e completa caratterizzazione chimica dei materiali biologici su scala nanometrica. Queste tecniche di microscopia consentono di ottenere una mappatura dettagliata dei tessuti e di evidenziare le singole specie (es. i lipidi via la tecnica CARS del laboratorio Femtoscopia) pi' efficacemente rispetto alle tecniche di microscopia tradizionale. L'utilizzo di tali tecniche permette, per esempio, la diagnosi precoce di patologie neoplastiche a partire da tessuti biologici appositamente trattati (ISM).

L'intervallo spettrale della water window (0.28-0.53 keV) emesso dalla sorgente EGERIA permette di effettuare microscopia di campioni biologici (cellule) in vivo con risoluzione nanometrica ed evidenza di strutture interne. I raggi X molli intorno al keV permettono di effettuare microradiografie.

Anche nelle scienze della vita si fa uso di microstrutture modellate con la nanolitografia elettronica dell' INFN-CNR.

I ciclotroni, in particolare quello installato presso il Policlinico Gemelli, sono utilizzati per la produzione di radio-farmaci per la medicina nucleare. Modificando opportunamente il bersaglio si possono studiare diversi radio-farmaci per diverse applicazioni.

I neutroni veloci (nella regione dei MeV) generati da reattori o da sorgenti ad acceleratore possono essere utili per la produzione di radiofarmaci come il Tecnezio, in particolare  $^{99m}\text{Tc}$ . Mentre nei reattori la separazione del Tecnezio deve essere fatta attraverso procedure di attacco chimico, usando sorgenti monocromatiche (1 MeV per esempio) il  $^{99m}\text{Tc}$  si ottiene irraggiando Molibdeno ( $^{110}\text{Mo}$ ) il quale attraverso reazioni (n,2n) si trasforma appunto in  $^{99m}\text{Tc}$ . La sorgente FNG che produce fasci monocromatici di neutroni particolarmente adatta per uno studio di questo canale di reazione che potrebbe essere utile a livello industriale qualora fosse disponibile una sorgente monocromatica a 14 MeV molto pi' intensa.

Fasci di neutroni a 14 MeV sono utilizzati per determinare il danneggiamento cellulare dovuto ad irraggiamento neutronico, aspetto importante per lo studio di fattibilità di missioni umane di esplorazione spaziale a lunghe distanze. Tale danneggiamento può essere studiato tramite spettroscopia IR es. (DAFNE-Luce). FNG è utilizzato da biologi per tale studio.

**3'3. Beni Culturali.** – La caratterizzazione strutturale ed elementale di materiali di interesse nei beni culturali (pigmenti, fibre, vetri, ceramiche, ecc) tramite metodi basati sull'utilizzo dei raggi-X è di enorme utilità per la comprensione completa dell'opera in analisi (ICLA, NIXT, FISMEL).

In particolare, il laboratorio ICLA offre inoltre la grande opportunità di effettuare caratterizzazioni in situ mediante raggi-X, così di poter studiare reperti non rimovibili dal loro sito (affreschi, dipinti, materiale architettonico, ecc).

Altre tecniche che utilizzano luce visibile e IR (LIBS, Raman, microRaman, microspettroscopia FTIR) impiegate nei laboratori ISM-FL e DAFNE-luce permettono la caratterizzazione microscopica di questi materiali dal punto di vista elementale e strutturale.

Per monitorare e quantificare l'invecchiamento di documenti cartacei attraverso la misura non distruttiva della cristallinità della cellulosa è usata la radiazione THz, impiegata anche per individuare dipinti nascosti sotto strati di gesso o biacca, per caratterizzare la presenza di diversi strati in affreschi e pitture murarie, nonché per l'identificazione spettrale di pigmenti.

Tecniche di spettroscopia in riflettanza diffusa UV-Vis utilizzate nei laboratori ISC, in combinazione con simulazioni computazionali ab-initio (Dip. di Fisica, Università di Tor Vergata), permettono di ricavare in maniera non distruttiva informazioni chimiche quantitative sui processi di degradazione ottica di beni culturali su carta. Questo approccio è stato applicato all'autoritratto di Leonardo da Vinci.

Fasci di neutroni termici e freddi possono essere utilizzati per indagini non distruttive di reperti archeologici o di opere d'arte attraverso tecniche di imaging (radiografia e tomografia) così come indagini di analisi strutturale microscopica usando tecniche di diffrazione a piccoli e grandi angoli. Il reattore TRIGA può facilmente essere utilizzato per imaging (soprattutto radiografia) e diffrazione grazie alla possibile futura implementazione di un diffrattometro di neutroni. Inoltre i fasci di neutroni termici del reattore possono essere utilizzati per misure di Prompt Gamma Activation Analysis per la determinazione della composizione elementale ed isotopica dei materiali.

Presso la facility di irraggiamento gamma Calliope vengono condotte diverse attività nel campo dei beni culturali. La radiazione gamma è utilizzata per l'eliminazione di organismi biodeteriogeni (funghi, batteri) da materiale archivistico e librario, determinando, allo stesso tempo, gli effetti dell'irraggiamento su tali materiali da un punto di vista chimico-fisico (caratterizzazione ottica e spettroscopica). Vengono condotte inoltre ricerche volte al consolidamento ed alla protezione di manufatti porosi (lignei o lapidei) di interesse artistico, mediante processi di polimerizzazione in-situ effettuati con l'ausilio della radiazione gamma.

**3'4. Green Economy.** – La radiazione X permette di caratterizzare dal punto di vista strutturale un'enorme varietà di materiali attivi di interesse energetico (celle fotovoltaiche, batterie, ecc.). Questo è possibile in particolare presso ISM-RX. Correlare tali caratteristiche con l'efficienza del materiale attivo è di grande utilità nella progettazione e realizzazione di nuovi dispositivi nell'ambito della green economy.

Il trattamento di materiali con impulsi laser ultra-brevi nel Vis-IR (EFSL, Femtoscopia) o con radiazione EUV (EGERIA/DPP) permette, inoltre, di realizzare nuovi dispositivi con avanzate caratteristiche di efficienza. Un esempio di quest'ultimo è il Black Diamond sviluppato dal gruppo del Dr. Trucchi del ISM-CNR che permette di aumentare l'efficienza dei dispositivi di conversione per la concentrazione solare.

La separazione e la produzione di idrogeno ultrapuro utilizzando permeatori metallici (basati su Palladio o leghe alternative senza di esso) un'attività molto importante per lo studio di fattibilità e lo sviluppo di dispositivi per la produzione di energia da fonti rinnovabili. Le tecniche neutroniche di imaging e diffrazione sono molto utili per la caratterizzazione di questi materiali soprattutto in fase di caricamento di idrogeno (isotopo molto ben visibile dai neutroni). Il reattore TRIGA pu essere utilizzato (con l'opportuno

upgrade di strumentazione) per questo tipo di applicazioni.

**3'5. Agrifood.** – Controlli di qualità sul cibo sono effettuati mediante radiazione THz. Ci sono esempi di utilizzo su processi produttivi di barrette di cioccolato, dove la presenza di eventuali e nocive intrusioni viene rivelata. **Presso impianto Calliope vengono effettuati irraggiamenti su campioni biologici per studi in campo agroalimentare, quali il controllo degli infestanti tramite sterilizzazione, trattamento di campioni vegetali, ed anche studi su nuovi materiali per packaging alimentare.**

**I neutroni (sia veloci che termici) possono essere efficacemente utilizzati per la certificazione della provenienza di prodotti alimentari (vini, olii per esempio) dal riconoscimento di tracce di elementi che sono strettamente correlati con il terreno dove le varie colture sono servite per la produzione dei diversi prodotti.**

**3'6. Sicurezza.** – La microlitografia su film di fluoruro di litio mediante radiazione EUV è efficacemente utilizzata come strumento anti-contraffazione, grazie alla possibilità di apporre marcature invisibili su un'ampia varietà di materiali e dispositivi (chip, metalli, pietre preziose, contenitori, ecc) (EGERIA).

La radiografia neutronica con fasci di neutroni veloci una tecnica relativamente nuova per lo studio strutturale (indagine di stress meccanici, termici e chimici per esempio) in materiali strutturali (metalli, cementi) o in dispositivi di grandi dimensioni (motori, turbine) non facilmente accessibili (a causa del grande spessore) con tecniche di imaging con neutroni termici e freddi.

I fasci di FNG a 2.5 e 14 MeV possono essere utilizzati per questo tipo d'indagini.

**3'7. ICT.** – La microlitografia in proiezione EUV permette di effettuare trattamenti su materiali su scala nanometrica per la produzione di dispositivi utile per l'industria microelettronica (MET-EGERIA).

## Conclusioni

Il workshop ha evidenziato una gamma molto ampia di infrastrutture disponibili, in grado di produrre sia fotoni, sia particelle cariche e di neutroni, come riassunto nelle Fig. 1-3. Le applicazioni possibili di queste sorgenti di radiazione coprono tutti gli ambiti di interesse per il tessuto industriale, come dettagliato nella Sez. **3** e riassunto nella Tab. IX.

Per sfruttare opportunamente queste risorse, si propone di utilizzare un consorzio tra enti di ricerca e università, da costituire o tramite uno già esistente, che assolva le seguenti funzioni:

- Identifichi, documenti e diffonda le informazioni sulle infrastrutture che producono radiazioni presenti all'interno delle diverse istituzioni. Dovrebbe per esempio produrre un database con le infrastrutture esistenti e uno strumento web per la diffusione delle informazioni relative all'utilizzo applicato ed industriale delle radiazioni prodotte dalle varie facility;
- Promuova l'utilizzo di queste infrastrutture con le realtà che si occupano di ricerca applicata ed industriale, in primis regionali, e altre realtà pubbliche e private (Agenzia per l'Ambiente, Sovrintendenze per i Beni Culturali, ASL, Ospedali, CREA,

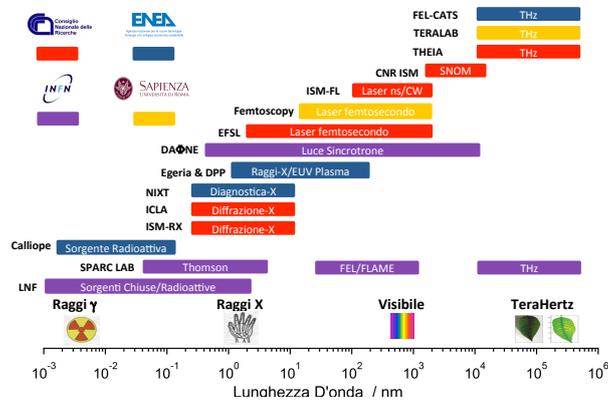


Figure 1.: Riassunto delle sorgenti di fotoni presenti nella Regione Lazio, in funzione della banda energetica del fascio.

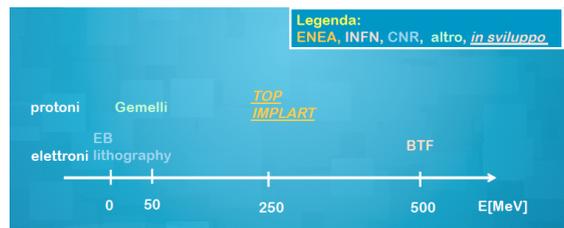


Figure 2.: Riassunto delle sorgenti di particelle cariche presenti nella Regione Lazio, in funzione della banda energetica e del tipo del fascio.



Figure 3.: Riassunto delle sorgenti di neutroni presenti nella Regione Lazio, in funzione dell'intensità del flusso prodotto.

Università, aziende). Per esempio tramite l'organizzazione di incontri per scambio di informazione tra il mondo della ricerca e quello dell'industria finalizzato all'utilizzo delle singole infrastrutture.

- Curi l'utilizzo delle infrastrutture da parte di terzi. Il consorzio dovrebbe cioè raccogliere gli interessi di utilizzo delle infrastrutture e fornire supporto amministrativo affinché questo utilizzo si realizzi. Inoltre, dovrebbe razionalizzare le procedure di accesso alle infrastrutture da parte di personale esterno. Infine dovrebbe gestire gli upgrade necessari alle infrastrutture per l'accesso sistematico di utenti esterni (strumentazioni, sicurezze, automazioni e remotizzazioni).

Questo consorzio avrebbe quindi lo scopo di mettere in connessione tre realtà diverse: quella delle istituzioni scientifiche che realizzano, ospitano e mantengono le infrastrutture, utilizzandole per la propria ricerca, quella delle università che hanno molto più personale scientifico qualificato ed in via di formazione, ed infine quella dell'industria, che spesso non ha i mezzi o la formazione sufficiente per perseguire certe forme di ricerca industriale. L'ammodernamento delle infrastrutture ed il rinnovamento delle loro utenze permette di valorizzare ulteriormente le strutture già esistenti, aumentando il rendimento degli investimenti passati.

Questo consorzio non avrebbe lo scopo di amministrare finanziamenti, ma avrebbe bisogno di personale amministrativo e tecnico (per lo più informatico) e di spazi per incontri. Il resto delle risorse risiederebbe negli enti che lo compongono o che collaborano al progetto.

Questo documento contiene una prima ricognizione delle infrastrutture esistenti. Va però sottolineato che il loro censimento completo e la loro promozione nelle realtà industriali o di altre istituzioni sono parte integrante del progetto. È pertanto necessario che questo progetto si sviluppi in due fasi:

- Fase 1, Istruttoria) in cui si censiscono le infrastrutture, si incontrano le realtà potenzialmente interessate e si sperimentano le prime esperienze di utilizzo delle infrastrutture da parte di enti esterni a quelli che le ospitano.
- Fase 2, Operativa) in cui, dopo aver valutato l'efficacia del progetto con una revisione, si avvia l'uso estensivo delle infrastrutture.