

Anno scolastico 2025-2026

**Assistenti di misura:
una settimana tra arte e scienza**

Particle Induced
X-ray Emission
PIXE

INFN LNL 285/2025

Legnaro, 6-7-8-9 ottobre 2025

Autori: studenti e studentesse di scuola secondaria di secondo grado del Veneto

Astolfi Agnese (5)
Bevilacqua Filippo (8)
Buratti Rossana (7)
Ceccon Tommaso (3)
Chiarentin Nicole (5)
Conte Eleonora (6)
Cristiani Ginevra (5)
Cuccato Matteo (5)
Da Villa Jeremy Francesco (7)
Dani Maddalena (8)
D'Elia Camilla (7)
Forgiarini Cristiano (4)
Gallo Giulia (3)
Godi Alberto (8)
Khan Andrea (3)
Licursi Cristian (4)
Liotto Greta (1)
Maione Gianmarco (4)
Maragno Sara (1)
Maretto Giulia Adriana (2)
Marini Giulio (1)
Marson Arianna (2)
Mattivi Agata (7)
Miotto Marco (7)
Pavan Sofia (1)
Picelli Giulio (1)
Pietrogrande Marco (7)
Quintarelli Rachele (1)
Rampazzo Giulia (1)
Rizzi Alessandro (1)
Silvestri Giulia (3)
Spolaor Nicolò (6)
Tommasini Chiara (4)
Trevisan Elena (3)
Trez Isabel (2)
Venuti Emma (4)
Vistosi Matilde (6)
Xu Jia Quiang (8)
Zagolin Lisa (2)
Zilio Giulia (2)

- (1) IIS Rolando da Piazzola di Piazzola sul Brenta (PD)
- (2) IIS Einstein di Piove di Sacco (PD)
- (3) IIS Duca degli Abruzzi di Treviso (TV)
- (4) IIS Pacinotti di Venezia Mestre (VE)
- (5) IIS Scalcerle di Padova (PD)
- (6) IIS Bruno-Franchetti di Venezia Mestre (VE)
- (7) LS Fermi di Padova (PD)
- (8) IIS Veronese di San Bonifacio (VR)

INDICE

Riassunto

1. I concetti teorici della tecnica PIXE
2. L'apparato sperimentale
3. Spettroscopia
4. Calibrazione
5. Composizione elementale dei colori incogniti
6. Caratteristiche della tecnica PIXE
7. Risultati, interpretazione e verifica
8. Conclusioni

Ringraziamenti

Bibliografia

RIASSUNTO

Tramite la tecnica Particle Induced X-ray Emission (PIXE) abbiamo analizzato alcuni colori, certi noti usati nella retta di calibrazione e altri incogniti di cui abbiamo scoperto la composizione chimica. La misura è stata svolta presso i Laboratori Nazionali di Legnaro dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare all'acceleratore AN2000.

1. I CONCETTI TEORICI DELLA TECNICA PIXE

La tecnica di analisi multielementale PIXE Particle Induced X-ray Emission è introdotta nel mondo analitico dal Lund Institute of Tecnology nel 1970. Essa rientra nella famiglia delle tecniche di Ion Beam Analysis (IBA). Le IBA si basano su reazioni nucleari o atomiche, di sezione d'urto nota, indotte irraggiando con un fascio di particelle un bersaglio. L'analisi dei prodotti di reazione (particelle, radiazione γ , radiazione X nel caso della PIXE) consente di ricavare la composizione elementare del campione in esame. Le particelle incidenti possono provenire da sorgenti radioattive ma per i maggiori flussi ottenibili si usano soprattutto acceleratori elettrostatici come il Van der Graaf semplice o il tandem con energia al terminale di range 2 – 6 MeV.

Le più note tecniche IBA (Figura 1) sono:

- PIXE che sfrutta l'emissione di raggi X da parte del campione;
- PIGE che sfrutta l'emissione di raggi γ da parte del campione;
- RBS Rutherford Backscattering Spectrometry in cui le particelle analizzate sono gli ioni primari retro-diffusi;
- NRA Nuclear Reaction Analysis in cui si analizzano le particelle emesse a seguito di reazioni nucleari.

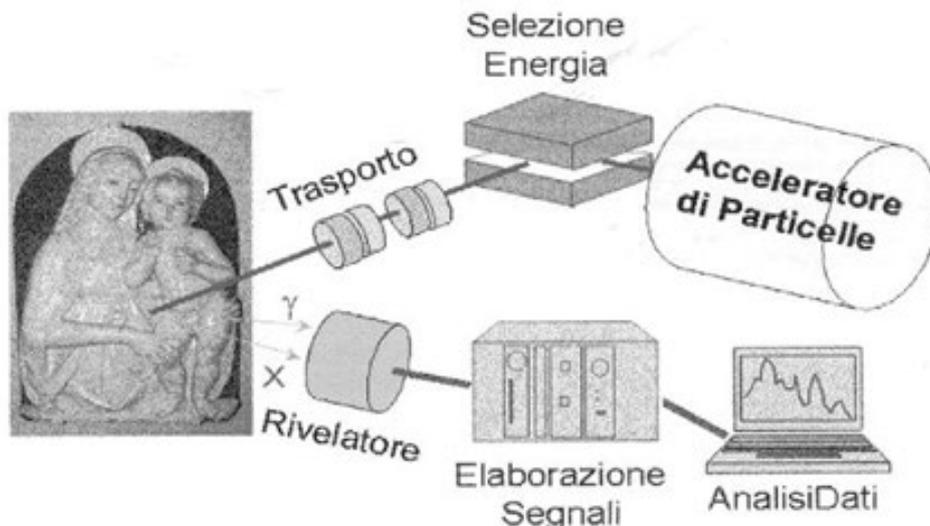


Fig. 1: schema degli elementi essenziali di un apparato sperimentale per IBA.

2. L'APPARATO SPERIMENTALE

Presso i Laboratori Nazionali di Legnaro dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, abbiamo un acceleratore di particelle AN2000 con all'interno un'ampolla contenente idrogeno (estrazione di protoni) che poi vengono portati all'interno di una camera di reazione. I protoni viaggiano in alcuni tubi dove è fatto il vuoto (ordine di 10^{-10} bar). I protoni vengono direzionati attraverso magneti (dipoli per curve e quadripoli per forma) sulla linea di fascio di 90° (magnete selezionatore o di analisi) e poi 0° (magnete di switching). Alla fine del loro percorso, i protoni colpiscono alcuni pigmenti colorati incollati su uno scotch di grafite (color nero) aderente ad un porta-campioni di metallo. I protoni colpiscono gli elettroni degli orbitali interni degli elementi chimici presenti nel colore: essi vengono successivamente rimpiazzati dagli elettroni degli orbitali più esterni. Questo salto di posizione degli elettroni comporta un rilascio di energia sotto forma di raggi X. L'energia del raggio X è la firma dell'elemento. Si indaga così la composizione elementare del pigmento, a livello qualitativo e quantitativo. La posizione del fascio è fissa; i motori muovono il porta-campioni secondo i comandi dati nell'interfaccia grafica per utente di LabVIEW.

3. SPETTROSCOPIA

La spettroscopia è la parte della fisica che studia gli spettri delle reazioni nucleari.

La stazione sperimentale per la spettroscopia con PIXE è composta da:

- un rivelatore a stato solido a semiconduttore al germanio (Ge), che lavora alla temperatura dell'azoto liquido -69°C ;
- una catena elettronica;
- un software di acquisizione dati Maestro (con 2048 canali in accordo con il multicanale).

Abbiamo guardato gli spettri nella scala lineare (non su quella \log_{10}); sull'asse delle x troviamo i canali e sull'asse delle y i conteggi.

Abbiamo analizzato un picco per ricavare una risoluzione approssimata e attribuire un errore sulla lettura del canale: si tratta della piena larghezza a mezza altezza (il picco si approssima ad una curva di Gauss).

4. CALIBRAZIONE

La retta di calibrazione pone in relazione energia del raggio X emesso e canale: per costruirla abbiamo analizzato gli spettri di tre pigmenti: Giallo Cobalto, Bianco Titanio e Nero Manganese.

Abbiamo costruito un grafico su carta millimetrata nella quale sull'asse x abbiamo messo i canali (da 0 a 2047) e sull'asse y l'energia (da 0 a 20 KeV).

Nel grafico della retta di calibrazione sono inserite crocette, a causa dell'errore di circa 8 canali sull'asse x .

Un metodo più preciso di calibrazione implica di avere come bersaglio un cubo di una lega metallica standard contenente anche il Molibdeno ($\text{Mo K}\alpha = 17,427 \text{ KeV}$ e $\text{Mo K}\beta = 19,787 \text{ KeV}$).

La retta di calibrazione non passa per l'origine a causa del rumore dell'elettronica.

Dato un canale letto sullo spettro, si ricava l'energia e dunque dalla tabella apposita l'elemento incognito.

5. COMPOSIZIONE ELEMENTALE DEI COLORI INCOGNITI

I colori incogniti da noi analizzati sono stati:

- Cinabro (Kremer 42000);
- Azzurrite (Kremer 10201);
- Caput Mortum (Kremer 48700);
- Milori Blau (Kremer 45200).

Tramite la retta di calibrazione siamo pervenuti alla conclusione che il cinabro contiene mercurio e zolfo (HgS , solfuro di mercurio) e l'azzurrite il rame ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$). Il rosso cinabro è un colore rosso intenso, mentre l'azzurrite è una tonalità di azzurro. Il caput mortum (Fe_2O_3) e il milori blau ($\text{C}_{18}\text{Fe}_7\text{N}_{18}$) contengono ferro. Un'analisi dei conteggi nei picchi fornisce anche informazioni quantitative. La presa dura intorno ai 20 minuti per campione, nelle condizioni standard di macchina.

6. CARATTERISTICHE DELLA TECNICA PIXE

La PIXE è un valido supporto per numerose scienze: fisica dei beni culturali, fisica dell'ambiente, farmacologia, mineralogia, archeologia. L'uso della PIXE in complementarità con altre tecniche - possibile perché la PIXE non è invasiva - di tipo nucleare quali RBS e PIGE consente molto spesso un'analisi su tutta la tavola periodica degli elementi.

7. RISULTATI, INTERPRETAZIONE E VERIFICA

La fisica nucleare abbraccia l'osservazione e lo studio dei pigmenti, aiutando gli storici dell'arte. I risultati della misura sono di tipo qualitativo: data la retta di calibrazione, per ogni colore si individuano gli elementi di cui è composto. Si interpreta e si valuta il collegamento tra colore ed elemento chimico. Si legge la scheda tecnica del colore sul sito della ditta Kremer. I risultati ottenuti sono confrontati con le schede tecniche dei pigmenti trovate nel sito ufficiale della Kremer: l'individuazione qualitativa è corretta per ogni colore analizzato.

8. CONCLUSIONI

Il gruppo di ricerca ha analizzato alcuni pigmenti incogniti con la tecnica PIXE. La tecnica ha consentito di individuare il ferro (presente nel Caput Mortum e nel Milori Blau), il potassio (presente nel giallo cobalto), il rame (presente nell'azzurrite), lo zolfo e il mercurio (presenti nel rosso cinabro).

I risultati ottenuti sono coerenti con le schede tecniche dei pigmenti trovate nel sito ufficiale della Kremer.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano Leonardo La Torre e gli operatori di macchina Luca Maran e Gianluca Finocchiaro e alla coordinatrice delle macchine acceleratrici Anna Selva.

Uno speciale ringraziamento è riservato a Sujata Coccato e Luisa Pegoraro per avere realizzato questa iniziativa.

Si ringrazia il personale INFN LNL per il supporto all'iniziativa.

BIBLIOGRAFIA

<https://www.kremer-pigmente.com/it/>

<https://it.scribd.com/document/202778709/Analisi-Pixe-e-Pige-Per-La>