

TECNICA PIXE:

LA FISICA CHE SVELA I SEGRETI DELL'ARTE

Patricia Amadeo,¹ Laura Balma,² Moreno Cervera,³ Elisabetta Vinci,⁴ Matilde D'Alò,⁵ Stefano Ferri⁶

¹ Liceo Scientifico G. Vailati, Genzano di Roma (RM).

² IIS J. Monnet, Mariano Comense (CO).

³ ITIS A. Volta, Napoli (NA).

⁴ IC di Villafranca Padovana e Limena (PD).

⁵ IISS Alpi-Montale, Rutigliano (BA).

⁶ Liceo Scientifico A. Righi, Bologna (BO).

ABSTRACT

In questo articolo riportiamo le misure effettuate utilizzando la tecnologia Particle Induced X-Ray Emission (PIXE) su pigmenti prodotti dalla ditta Kremer. L'obiettivo dell'attività laboratoriale è stato scoprire la composizione chimica del pigmento per identificarlo; successivamente, si è verificata l'applicabilità della tecnica nell'analisi dei beni culturali e si è ideata un'attività didattica per le classi. Le misure sono state svolte presso i Laboratori dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare di Legnaro (Padova) durante il Programma INFN per Docenti 2024 (PID 2024).

PAROLE CHIAVE: PIXE, Raggi X, beni culturali, attività didattica

INFN-LNL-281/2024

FISICA DEI BENI CULTURALI: PARTICLE INDUCED X RAY EMISSIONE (PIXE) ALL'ACCELERATORE AN2000

Introduzione

I PID, Programma INFN per Docenti, sono corsi di aggiornamento organizzati dall'istituto Nazionale di Fisica Nucleare presso i suoi Laboratori Nazionali: INFN-LNL Legnaro (PD), INFN-EGO Cascina (PI), INFN-LNGS Gran Sasso (AQ), e INFN-LNS Catania (CT). Ogni corso dura cinque giorni e le lezioni teoriche si alternano a quelle in laboratorio, dove si trattano argomenti di fisica nucleare, astrofisica e acceleratori di particelle. In ogni corso viene sottolineato l'aspetto multidisciplinare della ricerca e vengono forniti spunti per realizzare attività didattiche. In questo articolo analizzeremo l'attività "Fisica dei beni culturali: PIXE all'acceleratore AN2000" svolta sotto la guida del Dr. Andrea Gozzelino durante il PID 2024, svoltosi presso i laboratori di Legnaro (21-25 ottobre 2024).

PIXE, Particle Induced X-ray Emission, è una tecnica non distruttiva che sfrutta l'emissione di raggi X indotta da particelle cariche in un campione la cui composizione è ignota; la tecnica permette di determinarne con elevata sensibilità gli elementi presenti all'interno del campione. Esso infatti viene bombardato con particelle cariche di alta energia, tipicamente protoni, che colpendo gli atomi del campione ignoto inducono l'emissione di raggi X caratteristici e permettono così di individuarne la composizione chimica (Fig. 1).

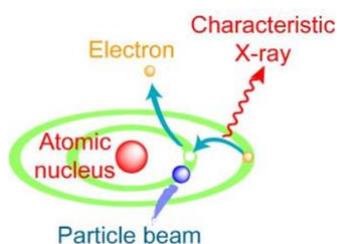


Fig. 1: Schema Emissione raggi X
<https://www.ge.infn.it/geant4/physics/pixe/>

Con PIXE è possibile rilevare elementi con numero atomico maggiore di quello del sodio ($Z > 11$); al contrario, le energie degli elementi con numero atomico inferiore sono così basse da essere assorbite prima di giungere al rivelatore. La tecnica si basa sull'eccitazione atomica: le particelle cariche, nel nostro caso un fascio di protoni, causano per interazione coulombiana la ionizzazione degli atomi colpiti. Gli elettroni presenti nei livelli più interni (chiamati K, L, M, N...) vengono espulsi creando delle lacune; esse sono subito riempite dagli elettroni presenti nei livelli più alti, che

decadendo rilasciano raggi X di energia pari alla differenza delle energie di legame degli elettroni delle orbite interessate. Viene riportata in figura 2 la nomenclatura per i raggi X corrispondenti alle transizioni tra i diversi livelli energetici.

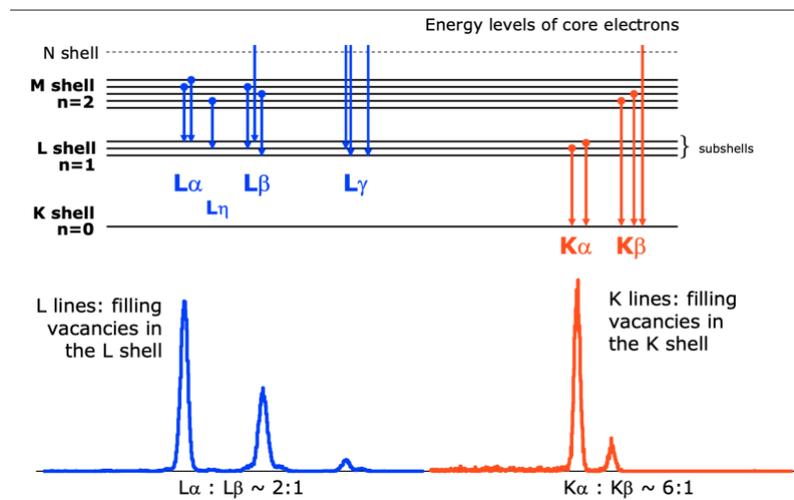


Fig. 2: Struttura dei livelli energetici

<https://indico.ictp.it/event/a05196/session/16/contribution/8/material/0/0.pdf>

La rilevazione dei raggi X permette di determinare gli elementi chimici contenuti nel campione in quanto *la struttura dei livelli energetici è unica e ogni elemento della tavola periodica ha uno spettro di emissione X caratteristico: è la sua impronta digitale*. Invece, l'ampiezza dell'emissione X è proporzionale alla concentrazione dell'elemento nel campione.

Nella nostra attività di laboratorio, il campione da analizzare viene bombardato da un fascio di protoni di 2 MeV di energia ottenuti tramite l'acceleratore AN2000. AN2000 è un acceleratore Van de Graaff orizzontale, cioè è un generatore elettrostatico in grado di accumulare una notevole quantità di carica elettrica in un conduttore creando tra questo e un elettrodo di riferimento (solitamente messo a terra) un'altissima tensione. Il suo funzionamento sfrutta i principi fondamentali dell'elettrostatica ed è composto da un guscio sferico conduttore sorretto da un isolante. Al suo interno vi è una cinghia isolante tesa tra due pulegge messa in rotazione da un motore. La cinghia è posta in contatto con delle punte metalliche collegate a un generatore di tensione continua. Queste trasferiscono per induzione le cariche elettriche positive alla cinghia che ruotando le trascina. La cinghia, nella parte superiore dello strumento, è a contatto con punte metalliche collegate al conduttore sferico e tramite esse cede le cariche acquisite al guscio e si carica. La carica accumulata dà luogo a una differenza di potenziale rispetto alla terra. La tensione sarà quindi pari a $V = \frac{Q}{C}$ dove Q è la carica che si accumula sul terminale (superficie esterna della sfera) e C è la capacità elettrica del terminale. AN2000 raggiunge una tensione di circa 2 milioni di Volt. I raggi X emessi dal campione vengono rilevati da diodi al germanio.

Poiché la tecnica PIXE permette il riconoscimento di campioni ignoti, essa può essere utilizzata nel campo della diagnostica dei beni culturali. Ha i seguenti vantaggi: (a) in un'unica misura permette di determinare tutti gli elementi presenti nel bersaglio (nel nostro caso il pigmento); (b) non è distruttiva; (c) ha ridotti tempi di misura, pochi minuti. Al contrario, presenta i seguenti limiti: (a) non vede gli elementi con numero atomico $Z < 11$, in particolare gli elementi organici, in quanto i raggi X emessi hanno energie così basse da essere assorbite prima di raggiungere il rivelatore; (b) non fornisce informazioni su legami chimici, struttura molecolare e cristallina; (c) non fornisce informazioni sulla stratigrafia e la distribuzione in profondità degli elementi

Setup sperimentale

I protoni (H^+) vengono emessi da una sorgente, chiamata bottiglia (vedi Fig. 3), posta sul terminale posta a tensione positiva dall'acceleratore AN2000, accelerati lungo l'asse principale del generatore ed indirizzati, mediante dei dipoli magnetici che ne deviano la traiettoria secondo la legge di Lorentz, verso una delle cinque camere di reazione (vedi Fig. 4).



Fig. 3: Foto della sorgente

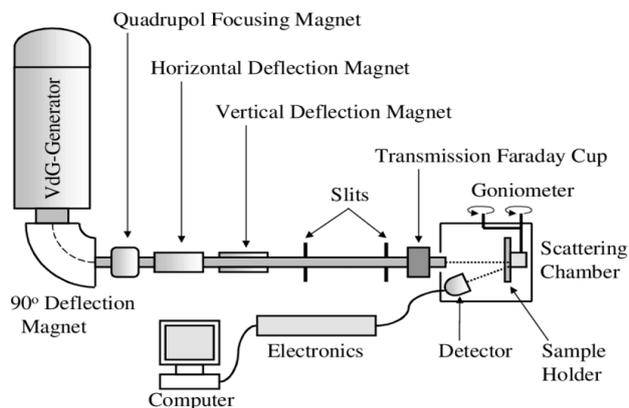


Fig. 4: Schema setup sperimentale e foto di AN2000

https://www.researchgate.net/figure/Schematic-picture-of-the-EG-2R-Van-de-Graaff-accelerator-beam-guiding-scattering_fig25_238762581

Le linee del fascio analizzate sono quelle a $90^\circ/0^\circ$, che selezionano protoni pari a 2 MeV e la corrente stimata del fascio impiegato nell'esperimento è prossima a 5000 nA. Il canale di misura utilizzato è dotato di una camera a vuoto in cui viene inserito il campione da analizzare. È possibile muovere il porta-campioni attraverso un meccanismo di alta precisione controllato a distanza che consente di posizionare i vari bersagli in corrispondenza del fascio incidente senza dover riaprire la camera e perdere il vuoto. Una telecamera posta su un lato della camera a vuoto consente all'operatore di controllare la posizione del campione e del fascio prima di incominciare l'acquisizione dei dati. I raggi X emessi vengono acquisiti da un sensore a stato solido al germanio (HPGe, High-Purity Germanium), raffreddato a -69°C con azoto liquido.

I sensori HPGe sono grandi diodi. Il fotone ad alta energia penetra nel volume sensibile del cristallo di germanio ed interagisce con il materiale semiconduttore producendo coppie elettrone-lacuna. Il numero delle coppie elettrone-lacuna è proporzionale all'energia della radiazione incidente. Sotto l'influenza di un campo elettrico gli elettroni e le lacune migrano verso gli elettrodi, dove producono un impulso misurato tramite un circuito esterno. Questo impulso trasporta l'informazione relativa all'energia della radiazione incidente originale. Il numero degli impulsi per unità di tempo fornisce anche un'informazione sull'intensità della radiazione. Il segnale analogico proveniente dal diodo, dopo essere stato amplificato, viene raccolto da un convertitore analogico-digitale che è in grado di discriminare e acquisire attraverso 2048 canali diversi gli impulsi di differente energia. Un software analizza il segnale digitale e mostra i conteggi relativi a ciascuna energia: in un tipico spettro PIXE in ascissa abbiamo le energie mentre in ordinata l'intensità dei picchi conteggiati. I dati acquisiti sono salvati su hard disk per permettere una successiva analisi degli spettri raccolti.

Processo di misura

Per una manutenzione programmata alla rete elettrica degli acceleratori, il tempo di misura a nostra disposizione è stato ridotto impedendoci di analizzare tutti i pigmenti ignoti disposti sul porta-campioni (vedi Fig. 5).

		Lato A		
X=			X=	
Kremer 47500 Nero Manganese Y =			Kremer 23350 Indischgelb Y =	
Kremer 66200 Bianco Titano Y =			Kremer 41600 Terra Ercolano Y =	
Kremer 45200 MiloriBlau Y =			Kremer 11140 Aegirin Y =	
Kremer 43500 Giallo Cobalto Y =			Kremer 40503 Roter Bolus Y =	
Y = 0	Allumina e retina		Y = 0	
Kremer 10201 Azurite Y =			Kremer 36005 Indigo Blu Y =	
Kremer 48700 Caput Mortuum Y =			Kremer 42000 Zinnblei Y =	
			Kremer 58490 Bianco con Ca Y =	

Fig. 5: Schema porta campione pigmenti



Fig. 6: Foto del fascio sul monitor

I pigmenti analizzati sono prodotti dalla ditta Kremer e sono montati su un supporto di allumina secondo lo schema riportato in figura 5. Lo zero del sistema di riferimento del porta-pigmenti deve essere fissato in corrispondenza dell'allumina. In questo modo se durante il movimento del porta-campioni si perde il fascio, è facilmente ritrovabile con un reset. Allineato il fascio abbiamo calibrato l'apparato sperimentale per ottenere il fattore di conversione canale-energia. Questo è stato fatto utilizzando tre pigmenti noti. Il nostro gruppo ha utilizzato il Giallo Cobalto (Kremer 43500), il Bianco Titanio (Kremer 66200) e il Nero Manganese (Kremer 47500). La retta di calibrazione permette di risalire, partendo dal numero del canale in corrispondenza del quale si rileva il picco, all'energia dei fotoni X rilevati da quel canale. Fondamentale per associare i picchi degli spettri alle righe di emissione X, la tabella con la lista delle energie di emissione K, L ed M (espresse in KeV) degli elementi atomici dal sodio all'uranio appesa alla parete della sala di controllo.

Dopo alcuni minuti di acquisizione, necessari per avere dei valori statisticamente attendibili, sul monitor appare la curva caratteristica con picchi che sovrastano il rumore di fondo in corrispondenza delle frequenze degli elementi che caratterizzano il colore analizzato. L'allestimento e la calibrazione ha richiesto quasi tutto il tempo macchina a nostra disposizione pertanto siamo riusciti ad analizzare un solo pigmento sconosciuto, il Milori blau (Kremer 45200).

Risultati

Calibrazione

Di seguito riportiamo gli spettri PIXE dei tre pigmenti. I grafici sono stati realizzati utilizzando i dati da noi acquisiti.

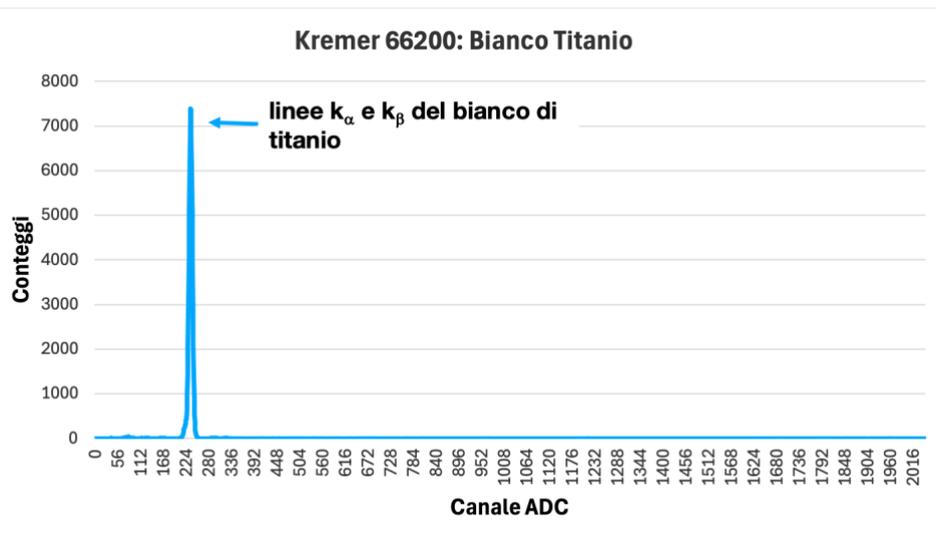


Fig. 7: Conteggi per il campione di Bianco Titanio - canali da 0 a 2047

Se limitiamo l'analisi dei conteggi all'intervallo tra i canali 200 e 270, notiamo che appare un solo picco in prossimità del canale 238 (vedi Fig.8) contrariamente a quelli previsti corrispondente alla linea K_{α} di 4,508 KeV e quella corrispondente alla linea K_{β} di 4,9508 KeV (vedi Fig.9)

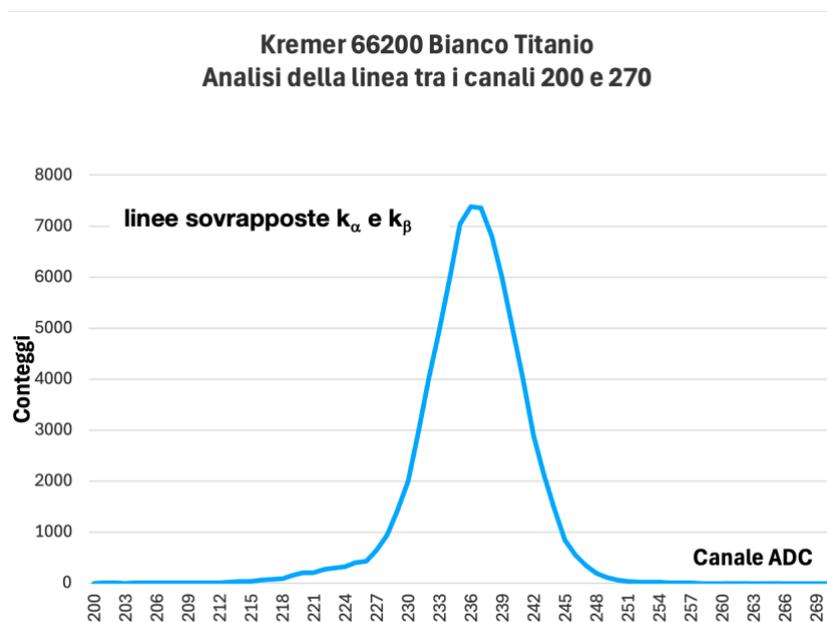


Fig. 8: Particolare dei conteggi per il campione Bianco Titanio tra i canali 200 e 270

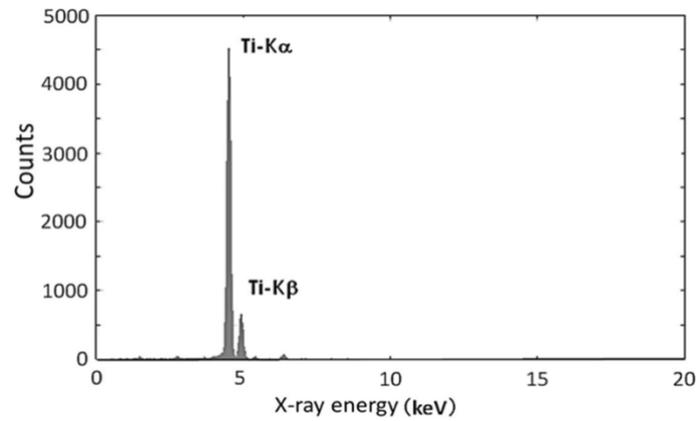


Fig. 9: Spettro atteso per il Bianco Titanio (Ishii - PIXE and Its Applications to Elemental Analysis -Jun 2019) https://www.researchgate.net/publication/333685861_PIXE_and_Its_Applications_to_Elemental_Analysis/citation/download

Questo è probabilmente dovuto alla risoluzione non adeguata dello strumento utilizzato che non permette di risolvere le due linee di transizione. Si osserva inoltre che anche gli spettri dei pigmenti Giallo Cobalto (Fig. 10) e Nero Manganese (Fig. 12) presentano una riga anomala dovuta alla contaminazione del Bianco Titanio (vedi Fig. 14).

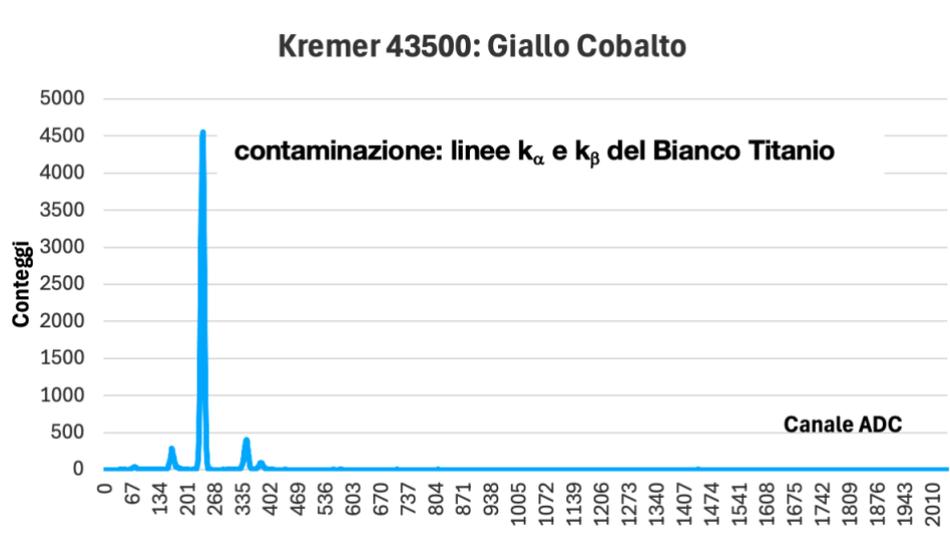


Fig. 10: Conteggi per il campione Giallo Cobalto - canali da 0 a 2047. La linea più alta dei conteggi intorno ai canali 230-240 è dovuta alla contaminazione del Bianco Titanio, come evidenziato nella figura 14 e presente in tutti i campioni analizzati.

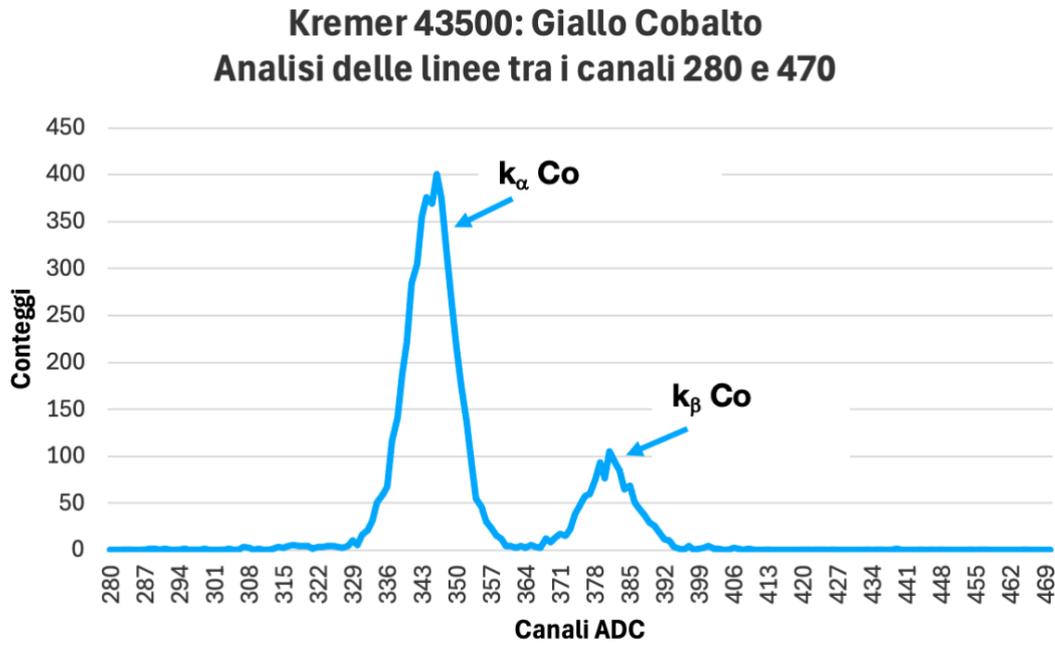


Fig. 11: Particolare dei conteggi per il campione Giallo Cobalto tra i canali 280 - 470: linea K_{α} : 6,923 KeV (canale 347) e linea K_{β} 7,648 KeV (canale 380)

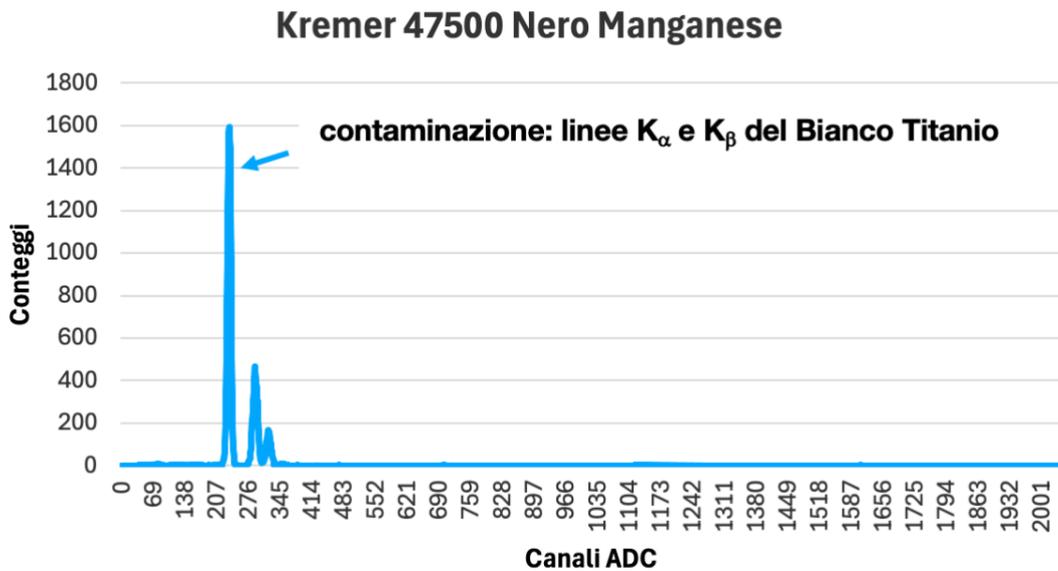


Fig. 12: Conteggi per il campione Nero Manganese - canali da 0 a 2047. La linea più alta dei conteggi intorno ai canali 230-240 è dovuta alla contaminazione del Bianco Titanio, come evidenziato nella figura 14, e presente in tutti i campioni analizzati.

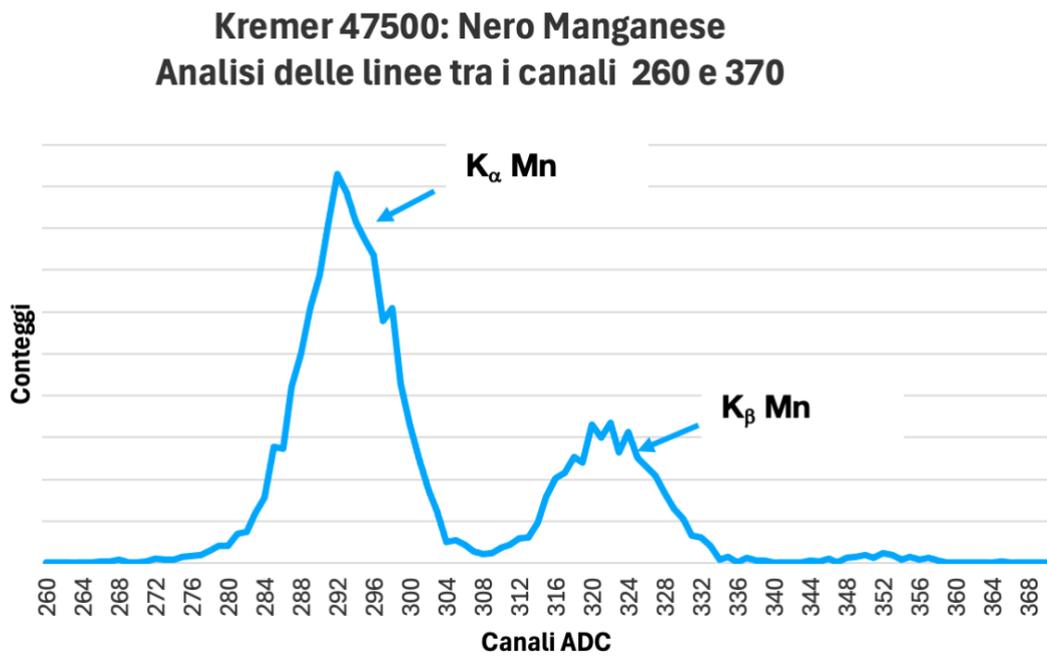


Fig. 13: Particolare dei conteggi per il campione Nero Manganese tra i canali 200 - 370: linea K_{α} : 5,893 KeV (canale 293) e linea K_{β} 6,489 KeV (canale 322)

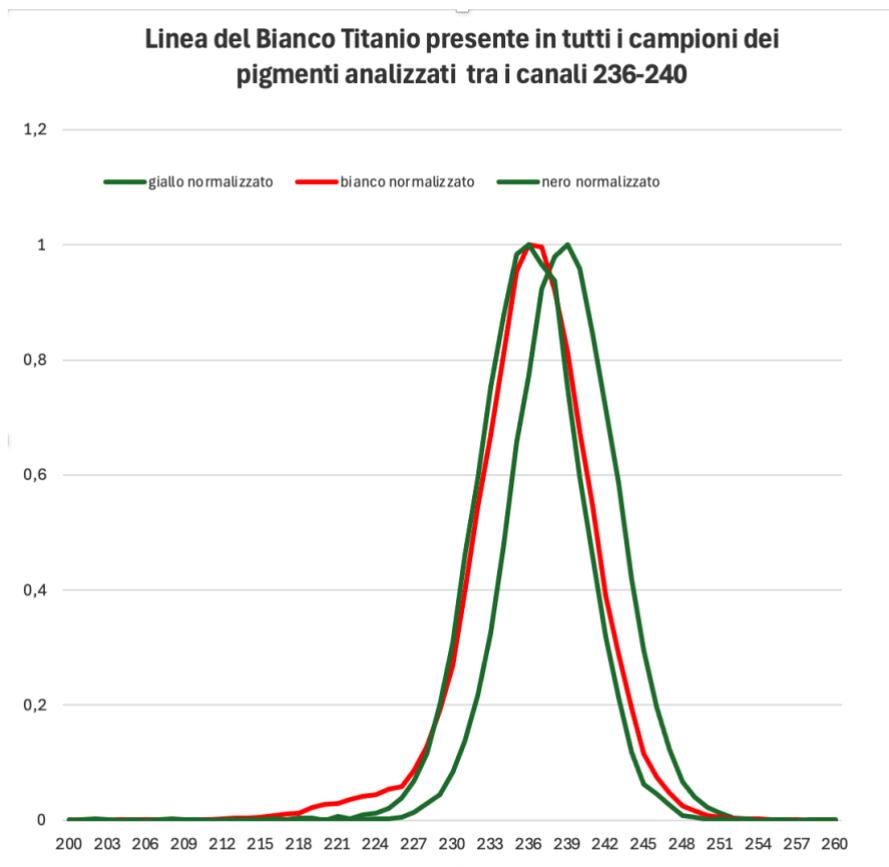


Fig. 14: Particolare della linea presente nei campioni Giallo Cobalto e Nero Manganese nei canali da 236 a 240 (normalizzata rispetto al numero massimo dei conteggi) messa a confronto con la linea Bianco Titanio.

La rilevazione della linea spettrale caratteristica del biossido di titanio (Bianco Titanio) può essere attribuita ad una contaminazione accidentale del campione verosimilmente dovuta al trasferimento superficiale di particelle del pigmento su quelli adiacenti in seguito a manipolazione. Poiché i tempi di acquisizione differiscono per i vari target, i conteggi sono stati normalizzati rispetto al valore massimo registrato per ciascun campione. Nella Tabella 1 si riportano i dati di calibrazione.

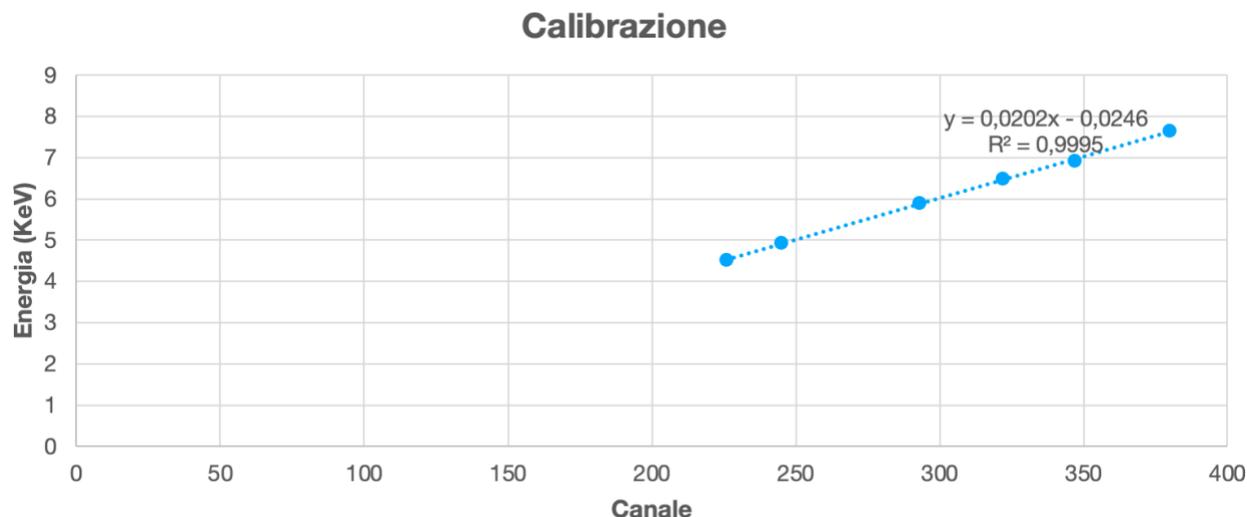
Tabella 1				
Pigmento	E (KeV)	Canale	Elemento	Riga
43500 – Giallo Cobalto	6,923	347	Co	K _α
43500 - Giallo Cobalto	7,648	380	Co	K _β
66200 – Bianco Titanio	4,508	226	Ti	K _α *
66200 – Bianco Titanio	4,932	245	Ti	K _β *
47500 – Nero Manganese	5,893	293	Mn	K _α
47500 – Nero Manganese	6,489	322	Mn	K _β

* I dati sono stati forniti dal Dr. A. Gozzelino in quanto, come precedentemente spiegato, il nostro gruppo non è riuscito a risolvere i due picchi del Bianco Titanio.

Nel grafico seguente viene mostrata la retta di regressione

$$E \text{ [KeV]} = m \text{ [KeV/canale]} \cdot \text{canale} + q \text{ [KeV]}$$

calcolata con i dati della Tabella 1 dove $m = 0,020 \text{ [KeV/canale]}$ e $q = -0,025 \text{ [KeV]}$.



La retta di regressione ci ha permesso di correlare il numero del canale (x) del convertitore analogico-digitale all'energia caratteristica (y) dei fotoni emessi dall'elemento e di calibrare lo strumento di misura.

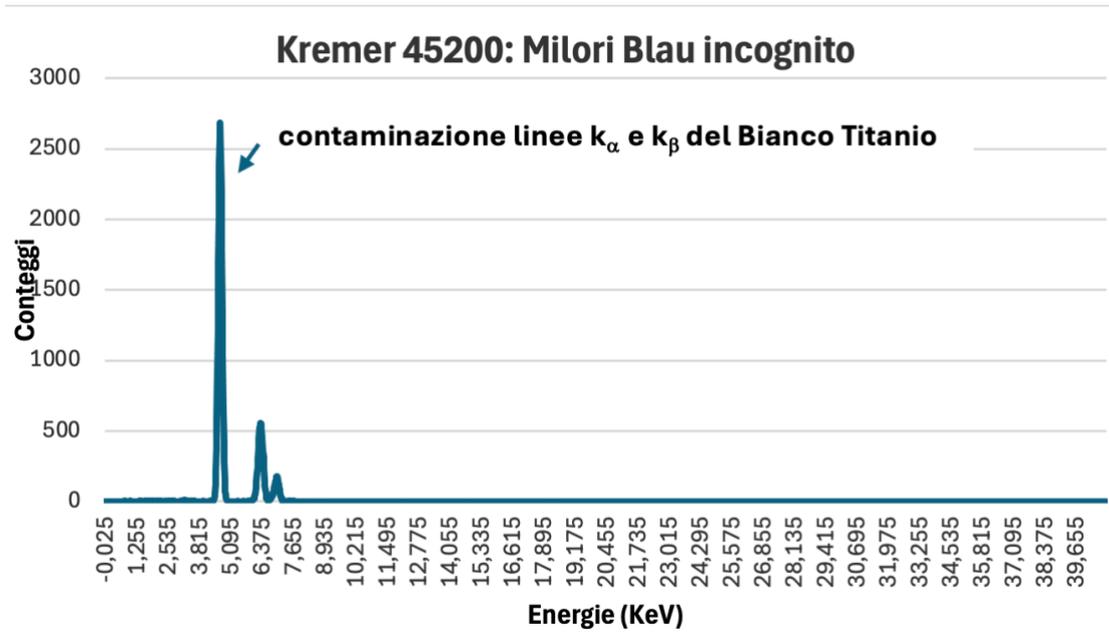


Fig. 15: Conteggi per il campione incognito con calibrazione in energia dei canali da 0 a 2047. La linea più alta dei conteggi intorno all' energia di 4,4 KeV è dovuta alla contaminazione del Bianco Titanio come evidenziato nella figura 14.

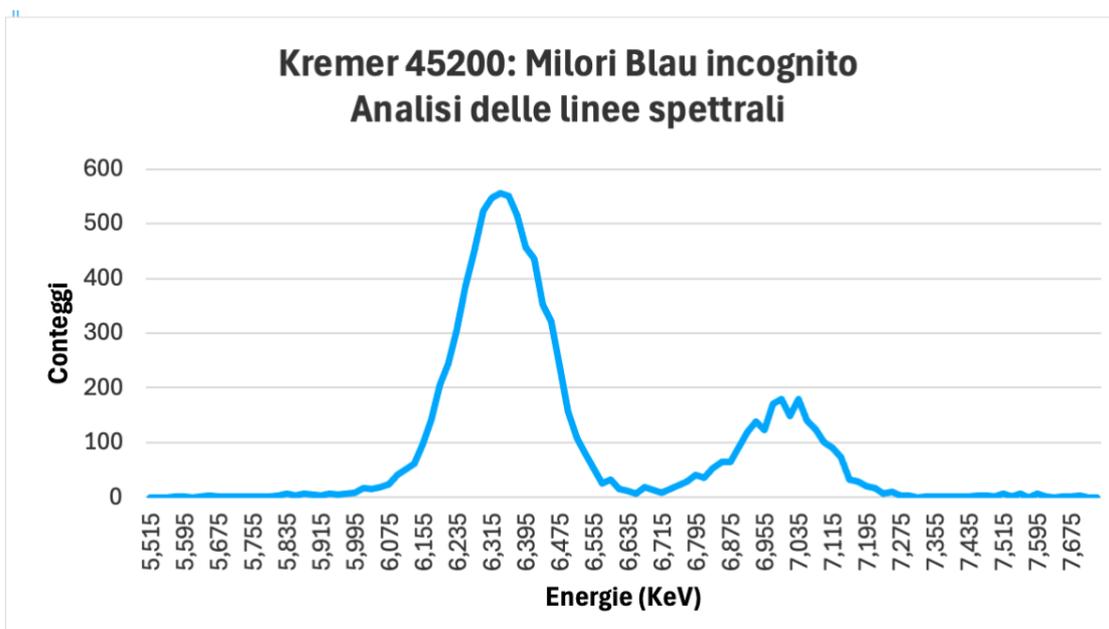


Fig. 16: Particolare dei conteggi del campione incognito tra 5,5 e 7,7 KeV

Il grafico in Fig. 16 evidenzia due picchi a (1) 6,315 KeV (canale 319) e a (2) 6,975 KeV (canale 350). Confrontando i nostri risultati con la tabella che associa le energie alle righe di emissione degli elementi chimici (Fig. 17), deduciamo che (1) corrisponde alla K_{α} del ferro (6,398 KeV) e che (2) corrisponde alla K_{β} del ferro (7,058 KeV) che ci ha permesso di stabilire che il pigmento incognito era il Milori Blau (Kremer 45200) che ha la seguente composizione chimica: $C_{18}Fe_7N_{18}$.

Dalla calibrazione si osserva inoltre che il picco del Bianco Titanio, rilevato tra i canali 230 e 240, include effettivamente le transizioni attese a 4,5 KeV e 4,9 KeV caratteristiche del titanio.

NA	Element	K α	K β	L1	L α	L β	L γ	M α	M β	M γ
6	C	0.280	0	0	0	0	0	0	0	0
7	N	0.391	0	0	0	0	0	0	0	0
8	O	0.525	0	0	0	0	0	0	0	0
9	F	0.677	0	0	0	0	0	0	0	0
10	Ne	0.846	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Na	1.041	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Mg	1.254	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Al	1.487	0	0	0	0	0	0	0	0
14	Si	1.740	0	0	0	0	0	0	0	0
15	P	2.010	0	0	0	0	0	0	0	0
16	S	2.307	0	0	0	0	0	0	0	0
17	Cl	2.622	0	0	0	0	0	0	0	0
18	Ar	2.953	3.187	0	0	0	0	0	0	0
19	K	3.312	3.589	0	0	0	0	0	0	0
20	Ca	3.690	4.012	0	0	0	0	0	0	0
21	Sc	4.086	4.460	0	0	0	0	0	0	0
22	Ti	4.508	4.932	0	0	0	0	0	0	0
23	V	4.948	5.428	0	0	0	0	0	0	0
24	Cr	5.410	5.940	0	0	0	0	0	0	0
25	Mn	5.893	6.489	0	0	0	0	0	0	0
26	Fe	6.398	7.058	0.615	0.705	0.756	0	0	0	0
27	Co	6.923	7.648	0.678	0.775	0.829	0	0	0	0
28	Ni	7.469	8.262	0.743	0.851	0.903	0	0	0	0
29	Cu	8.038	8.905	0.811	0.930	0.986	0	0	0	0
30	Zn	8.627	9.571	0.884	1.012	1.071	0	0	0	0

Fig. 17: Tabella che associa ad ogni elemento le energie delle linee di emissione.

<https://www1.infn.it/~ceccato/energie/energie.html>

Attività didattica

Lo scopo dell'attività, dettagliatamente descritta nell'Appendice, è quello di proporre un percorso didattico interdisciplinare per studenti della scuola secondaria di primo grado, sfruttando quanto potuto affrontare da noi docenti ai laboratori INFN di Legnaro durante il programma PID 2024. Gli studenti diventano "detective dei colori", impegnati a risolvere misteri nascosti nei dipinti attraverso l'analisi di spettri semplificati. L'attività consente di esplorare concetti di fisica atomica e spettroscopia in modo concreto e motivante, e al contempo di approcciarsi alla storia dell'arte da un altro punto di vista, mostrando come il patrimonio artistico possa a volte diventare uno strumento efficace per approfondire alcuni temi di fisica moderna. Al contempo, il percorso favorisce lo sviluppo di competenze scientifiche, culturali e trasversali stimolando curiosità, collaborazione e capacità di ragionamento critico.

Conclusioni

L'attività laboratoriale svolta nei Laboratori Nazionali di Legnaro può essere applicata allo studio e all'analisi dei beni culturali, permettendo di identificare falsi o aggiunte non d'autore e aiutando i restauratori nel loro lavoro. La spettroscopia permette di identificare campioni non conosciuti dal ricercatore, dunque – applicando lo stesso metodo all'arte – è possibile risalire a elementi ignoti presenti nei dipinti o nei quadri, che possono gettare luce sulla loro datazione o sulla loro autenticità. In Italia, LANDIS (Laboratori Nazionali del Sud, Catania) ha sviluppato strumenti PIXE portatili capaci di analizzare le opere direttamente all'interno dei musei. LABEC, il Laboratorio di tecniche nucleari per l'Ambiente e i Beni Culturali (INFN e Dipartimento di Fisica e Astronomia di Firenze), è invece un centro di riferimento per lo sviluppo di tecnologie basate su acceleratori e radiazioni ionizzanti, sfruttate per la valorizzazione e lo studio del patrimonio culturale italiano.

L'attività didattica proposta in questo articolo si ispira a pratiche reali come quelle svolte al Louvre, dove con l'acceleratore AGLAE i manufatti vengono bombardati con protoni e particelle alfa, generando emissioni di raggi X (PIXE) e raggi gamma (PIGE). Le emissioni rivelano tracce elementari – vere e proprie “impronte digitali” – senza danneggiare l'opera. In questo modo, è possibile scoprire chi ha modificato il manufatto, con quale oggetto e in quale periodo storico. Tecniche analoghe costituiscono la base scientifica del nostro gioco investigativo. La fisica può trovare nella cultura artistica un contesto vivo e rilevante, e grazie al laboratorio svolto a Legnaro siamo riusciti a ideare un percorso didattico integrando discipline scientifiche, artistiche e culturali e favorendo l'apprendimento interdisciplinare e l'educazione alla cittadinanza culturale, l'orientamento scientifico e l'equità di genere, avvicinando ragazze e ragazzi alle scienze.

Guardando al futuro, questo modello è flessibile: nelle scuole primarie si possono proporre giochi semplificati sui colori, mentre nelle secondarie di secondo grado si può collaborare con università e musei sfruttando strumenti reali di diagnostica per esperienze ancora più concrete. Mettere gli studenti nei panni di “detective dei colori” trasforma la fisica da materia astratta a strumento narrativo e culturale. Tecniche come PIXE e PIGE non solo svelano i segreti delle opere d'arte, ma mostrano come la scienza sia intimamente legata alla cultura e al patrimonio, rendendo l'apprendimento significativo e stimolante.

APPENDICE: PROPOSTA DIDATTICA

Diventare Detective dell'Arte

L'attività nasce dall'idea di trasformare la scienza in un vero e proprio gioco investigativo. Gli studenti diventano “*detective dell'arte*”, chiamati a scoprire i segreti nascosti nei dipinti. L'attività può essere stimolata da una domanda guida, ad esempio: “*Come fanno i fisici a capire se un quadro è autentico senza rovinarlo?*”. Questa curiosità diventa il filo conduttore del percorso, permettendo di introdurre concetti complessi in modo graduale, stimolando l'interesse dei ragazzi e il piacere della scoperta.

La fisica moderna può apparire lontana agli studenti della scuola secondaria di primo grado, che spesso non affrontano molti argomenti di fisica a causa della vastità degli obiettivi previsti dall'insegnamento delle scienze previsto per le scuole secondarie di I grado. Concetti come spettroscopia, modelli atomici o radiazioni, inoltre, rischiano di apparire astratti e difficili da collegare all'esperienza quotidiana, e spesso le conoscenze di base di matematica e chimica non sono sufficienti a comprenderli appieno. Tuttavia, è possibile stimolare curiosità e comprensione a un livello intuitivo, soprattutto attraverso attività ludiche e che pongono lo studente al centro dell'apprendimento. Da questa osservazione nasce l'idea di un'unità didattica interdisciplinare che unisce scienze, arte e storia, attraverso un approccio laboratoriale basato sull'investigazione e sul gioco di ruolo, con l'ottica sia di mostrare come le varie discipline scolastiche non siano a compartimenti stagni, ma anche con l'obiettivo di stimolare curiosità, collaborazione e pensiero critico. Anche senza strumenti sofisticati, non avendo a disposizione nelle scuole un acceleratore di particelle, gli studenti possono approfondire l'argomento grazie a simulazioni didattiche o casi studio. Attraverso schede e spettri semplificati, imparano quindi a leggere i segnali degli atomi e a ricavare informazioni scientifiche. Per catturare l'attenzione, si può iniziare mostrando come nei musei e nei laboratori di ricerca si utilizzino tecniche non invasive per studiare i materiali dei dipinti. Una di queste è la PIXE, che può essere spiegata con parole semplici: bombardando un materiale con particelle, gli atomi reagiscono emettendo segnali caratteristici, vere e proprie “impronte digitali” che rivelano quali elementi sono presenti. Anche senza un laboratorio attrezzato, quindi, gli studenti possono simulare il processo e collegarlo alla scoperta dei pigmenti.

Dopo questa breve introduzione scientifica, l'attività si arricchisce di un approfondimento di storia dell'arte. Attraverso linee del tempo o brevi lezioni interattive, i ragazzi esplorano l'evoluzione dei pigmenti tipici del Rinascimento fino ai colori sintetici del Novecento, comprendendo così i dati scientifici in un contesto storico e culturale più ampio. Il momento centrale dell'attività è l'analisi degli spettri. Utilizzando schede grafiche con picchi stilizzati, gli studenti imparano a leggere i

segnali, collegarli agli elementi chimici e ai pigmenti corrispondenti. Ogni gruppo riceve una “scheda missione” con un caso da risolvere: un pigmento misterioso, un presunto falso, un restauro nascosto, una tavolozza da ricostruire o una firma sotto lo strato di colore. Come in un’indagine scientifica, gli studenti raccolgono indizi, discutono, formulano ipotesi e presentano le proprie conclusioni. Infine, i gruppi possono esporre le loro scoperte attraverso poster, presentazioni multimediali o brevi video, trasformando così la scienza in narrazione creativa. L’attività favorisce non solo competenze scientifiche, ma anche abilità comunicative, collaborative e digitali.

Questo percorso si presta naturalmente a un lavoro interdisciplinare, mostrando che la scienza non è separata dalla cultura, ma uno strumento prezioso per comprenderla ed eventualmente tutelarla. Inoltre l’esperienza stimola riflessioni sull’orientamento: la fisica moderna non è solo formule astratte, ma una chiave per indagare, ad esempio, l’arte e salvaguardare il patrimonio, avvicinando così molti studenti – e in particolare le ragazze – ai percorsi STEM.

Obiettivi dell’attività

- Far conoscere concetti base di fisica atomica, come atomi, elettroni e spettroscopia.
- Mostrare come la fisica possa essere applicata concretamente nella conservazione e nello studio dei beni culturali.
- Sviluppare competenze trasversali, come l’osservazione attenta, l’analisi dei dati e il lavoro di gruppo.

Prerequisiti

- Conoscenza del modello atomico di Bohr.
- Concetto di spettro elettromagnetico.
- Nozioni di base di chimica: elementi, simboli e composti.

Metodologia

Il percorso segue i principi dell’Inquiry Based Science Education (IBSE): gli studenti non ricevono semplicemente informazioni, ma sono guidati a formulare domande, raccogliere indizi, interpretare dati e costruire le proprie spiegazioni. La componente ludica, attraverso la gamification – cioè trasformando la lezione in un gioco investigativo con missioni da risolvere – aumenta la motivazione e favorisce la collaborazione tra i ragazzi.

Struttura dell'attività

Fase	Descrizione
Introduzione (Scienze)	Presentazione semplificata della tecnica PIXE e delle sue applicazioni.
Approfondimento (Arte e Immagine)	Panoramica sull'evoluzione dei pigmenti dal Medioevo al Novecento.
Lettura degli spettri	Esercitazione guidata su spettri PIXE semplificati.
Laboratorio investigativo	Analisi di casi-studio e formulazione di ipotesi.
Discussione plenaria	Condivisione dei risultati e riflessione.

Connessioni curriculari e competenze

Questa attività permette agli studenti di sviluppare diverse competenze chiave europee in modo integrato:

- **Scientifica:** osservare, analizzare dati e formulare ipotesi basate su evidenze.
- **Culturale:** apprezzare e valorizzare il patrimonio artistico, comprendendone storia e materiali.
- **Digitale:** utilizzare strumenti multimediali per documentare e presentare le proprie indagini.
- **Collaborativa:** lavorare in gruppo, confrontarsi, risolvere problemi e prendere decisioni condivise.

L'approccio proposto è coerente con le Indicazioni Nazionali per il primo ciclo, perché incoraggia il ragionamento scientifico, l'apprendimento cooperativo e offre spunti di orientamento formativo, mostrando come la scienza possa diventare uno strumento per capire e proteggere la cultura.

Casi di studio proposti

L'attività propone diversi casi di indagine, ciascuno presentato come una "scheda missione", pensata per stimolare l'approccio investigativo e favorire la collaborazione tra studenti.

- Il pigmento misterioso: i picchi di Hg, S permettono di identificare il cinabro (HgS), il prezioso pigmento rosso del Rinascimento.
- Falso d'autore?: la presenza di Ti (biossido di titanio, introdotto nel XX secolo) suggerisce la possibilità di un falso o di un ritocco moderno.
- Restauro invisibile: due aree dello stesso dipinto mostrano composizioni diverse, portando a ipotizzare un intervento di restauro localizzato.
- Tavolozza del pittore: spettri multipli permettono di ricostruire la palette originale, ad esempio ocra rossa (Fe), azzurrite (Cu), bianco piombo (Pb), nero carbone (C).
- Firma nascosta: anomalie localizzate di Cu e Sn indicano la possibile presenza di un pentimento o di una firma nascosta.

Materiali didattici

Per ogni caso vengono forniti:

- schede spettroscopiche semplificate con picchi stilizzati,
- tabelle di corrispondenza elementi–pigmenti,
- riproduzioni di opere famose,
- schede investigative dei casi,
- presentazioni multimediali introduttive.

Esempi di schede missione

Scheda Missione 1: Il pigmento misterioso

<i>Titolo</i>	“Il rosso segreto del Rinascimento
<i>Scenario</i>	Vi trovate nel laboratorio segreto di un museo. Davanti a voi c'è un piccolo campione prelevato senza danneggiare il dipinto. Gli storici dell'arte sospettano che sia un'opera rinascimentale, ma serve una conferma scientifica. Il vostro compito è scoprire quale pigmento ha creato quel rosso brillante.
<i>Indizi scientifici</i>	Lo spettro PIXE semplificato mostra picchi corrispondenti a Hg (mercurio), S (zolfo) e O (ossigeno).
<i>Tabella di riferimento</i>	<ul style="list-style-type: none">• Ocri rosso → Fe• Azzurrite → Cu• Cinabro → Hg + S• Bianco di piombo → Pb• Titanio → Ti (XX secolo)
<i>Domande per il team</i>	<ul style="list-style-type: none">• Quali elementi compaiono nello spettro?• A quale pigmento corrispondono?• In quale epoca veniva usato questo pigmento?• La vostra ipotesi conferma l'autenticità dell'opera?
<i>Ipotesi finale</i>	Scrivete quale pigmento avete identificato e cosa significa per il dipinto.

Scheda Missione 2: Falso d'autore?

<i>Titolo</i>	“Il mistero del quadro moderno travestito da antico”
<i>Scenario</i>	Un collezionista afferma di possedere un dipinto del XVII secolo, ma alcuni esperti sospettano un falso. Dovete analizzare il colore bianco della tela.
<i>Indizi scientifici</i>	Lo spettro PIXE mostra un picco di Ti (titanio).
<i>Tabella di riferimento</i>	<ul style="list-style-type: none">• Bianco di piombo → Pb• Bianco di titanio → Ti• Ocri gialla → Fe• Azzurrite → Cu
<i>Domande per il team</i>	<ul style="list-style-type: none">• Quale elemento anomalo compare nello spettro?• Era disponibile nel XVII secolo?• Cosa implica la presenza di titanio?• La tela può appartenere davvero al XVII secolo?
<i>Ipotesi finale</i>	Scrivete se si tratta di falso, copia moderna, o ritocco.

Scheda Missione 3: Restauro invisibile

<i>Titolo</i>	“Due anime nello stesso quadro”
<i>Scenario</i>	Alcune zone del dipinto appaiono di un blu meno intenso; potrebbe esserci stato un restauro nascosto?
<i>Indizi scientifici</i>	<ul style="list-style-type: none">• Area A: picchi di Cu → azzurrite• Area B: picchi di Co → blu di cobalto (XIX secolo)
<i>Tabella di riferimento</i>	<ul style="list-style-type: none">• Azzurrite → Cu• Blu di cobalto → Co• Lapislazuli → Na, Si, Al
<i>Domande per il team</i>	<ul style="list-style-type: none">• Cosa rivelano le due aree?• Cosa significa la presenza di cobalto?• Potrebbe trattarsi di un restauro localizzato?• Quali conclusioni sulla storia del dipinto?
<i>Ipotesi finale</i>	Scrivete se l'opera è autentica con interventi di restauro o interamente moderna.

Scheda Missione 4: La firma nascosta

<i>Titolo</i>	“Il segreto sotto il colore”
<i>Scenario</i>	In un'analisi di routine emergono tracce insolite in un angolo del dipinto.
<i>Indizi scientifici</i>	Picchi di Cu e Sn non presenti nel resto dell'opera.
<i>Tabella di riferimento</i>	<ul style="list-style-type: none">• Bronzo (Cu + Sn) → pigmenti metallici o firma• Pigmenti standard → Fe, Pb, Hg
<i>Domande per il team</i>	<ul style="list-style-type: none">• Quali elementi insoliti compaiono?• Potrebbero indicare un segno intenzionale o decorativo?• Perché solo in quel punto?• È una firma nascosta o un pentimento?
<i>Ipotesi finale</i>	Scrivete cosa si nasconde sotto il colore.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori di questo articolo ringraziano i relatori e tutto lo staff INFN-LNL che ci hanno supportato durante le attività di laboratorio dedicando parte del loro tempo alla nostra formazione durante il PID2024. Un particolare grazie alla dott.ssa Luisa Pegoraro e al dott. Andrea Gozzelino per l'organizzazione e il costante aiuto durante tutta la settimana di corso e al Prof. Giorgio Chiarelli e alla Dott.ssa Silvia Miozzi che rendono possibili queste esperienze formative all'interno delle attività dei progetti di Terza Missione INFN. Uno speciale ringraziamento al Dott. Oleksander per aver condiviso con noi l'attività di ricerca che conduceva presso il National Science Center “Kharkov Institute of Physics and Technology” di Kharkiv, Ucraina

BIBLIOGRAFIA

- Esposito, Adolfo. *Tecniche diagnostiche non distruttive applicate ai Beni Culturali*.
<https://www.lnf.infn.it/edu/seminaridivulgativi/relazioni09/ArcheometriaFisBeniCulturali.pdf>
- Gozzelino, Andrea. *Nuclei per la cultura: Seminari nelle scuole e per la cittadinanza*.
https://agenda.infn.it/event/37448/sessions/27147/attachments/112225/160556/Nuclei_Cultura.pdf.
- Howes, Laura. 2016. "Analizzare l'arte al Louvre." *Science in School* 35.
<https://www.scienceinschool.org/it/article/2016/analysing-art-louvre-it/>
- INFN. *Labec*. <https://web.infn.it/labec/>
- Introduzione a tecnica PIXE e mappatura elementare*.
https://www.lnf.infn.it/edu/incontri/2009Labec/relazioni/scheda%20pixe_e_mappe%20def.pdf
- Kremer Pigmente. <https://www.kremer-pigmente.com/>.
- Mandò, P.A. 2011. *Tecniche di fisica nucleare per i beni culturali al laboratorio LABEC di Firenze*. https://www.gsr.unito.it/doc/2011/Mando_2.pdf
- Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca. 2011. *Indicazioni nazionali per il curricolo della scuola dell'infanzia e del primo ciclo d'istruzione*.
https://www.mim.gov.it/documents/20182/51310/DM+254_2012.pdf
- PID. 2024. *Acceleratori*. https://agenda.infn.it/event/43142/timetable/#20241021:Acceleratori_PID_2024.pptx.
- Varaschin, Antonella. 2017. "Benvenuti a Bordo. Intervista a Giorgio Riccobene, ricercatore dei Laboratori Nazionali del Sud nell'INFN". *Asimmetrie* 23.
<https://asimmetrie.it/tags/tag/laboratori-del-sud?>