

La fisica si fa bella: attività didattica relativa alla fisica quantistica applicata ai beni culturali.

Alessandra Ciarla¹, Stefania Fadda², Monica Merri³, Giuseppina Modica⁴, Libera Nasti⁵

1. IIS Campus dei Licei "Ramadù" Cisterna di Latina (LT)

2. Liceo "Giorgio Spezia", Domodossola (VB)

3. Liceo Scientifico Statale "A. Einstein" Milano

4. IIS "Galilei-Campailla", Modica (RG)

5. Scuola secondaria di primo grado "Tito Livio", Napoli e "Accademia di Belle Arti", Napoli

ABSTRACT

Presso i Laboratori Nazionali di Legnaro (Padova), afferenti all'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), nell'ambito del Programma INFN per Docenti (PID) 2021, sono state svolte dalle insegnanti autrici del presente articolo misure con la tecnica PIXE (*Particle induced X-ray emission*) su pigmenti e campioni di pietra dura di cui si è indagata la composizione chimica. Nel presente articolo, che prende l'avvio da tale esperienza, ci si propone di suggerire un'attività didattica da effettuare in una classe quinta liceo allo scopo di mostrare un'interessante applicazione della fisica moderna nel campo della storia dell'arte e dell'archeologia.

PAROLE CHIAVE: PIXE, BENI CULTURALI, ATTIVITA' DIDATTICA, LIVELLI ATOMICI, SPETTRI DI EMISSIONE, SERIOUS GAME

INTRODUZIONE

L'attività laboratoriale svolta in affiancamento ai ricercatori INFN, realizzata durante i corsi per insegnanti PID, rappresenta un'esperienza di grande valore.

L'obiettivo di questo articolo è quello di riversare nell'attività didattica almeno una parte di quanto appreso e sperimentato, considerando che solo un numero molto ristretto di studenti possono ogni anno accedere agli stages estivi organizzati da INFN ed effettuare un'esperienza di immersione nel mondo della fisica sperimentale molto simile a quella vissuta dai docenti.

L'attrezzatura per l'effettuazione dell'analisi non è evidentemente alla portata di un laboratorio scolastico, e dunque non è pensabile replicare nell'ambito della didattica ordinaria l'esperienza nella sua totalità. Volendo però presentare agli studenti le applicazioni della fisica atomica allo studio delle opere d'arte, e la metodologia PIXE in particolare, evitando la pura lezione frontale, si è pensata un'attività incentrata sulla fase successiva rispetto alla raccolta dati, cioè sull'analisi degli spettri e sulla loro interpretazione.

Ritenendo che la semplice interpretazione di uno spettro potesse risultare poco accattivante per gli studenti, se non contestualizzata in un ambito più coinvolgente, si è provato ad ideare un'attività di "serious game" che suscitasse interesse e curiosità, creando un "caso" investigativo o un enigma da risolvere.

L'attività proposta nel presente articolo è pensata come lavoro interdisciplinare di collaborazione tra l'insegnamento di Fisica e quello di Storia dell'Arte. Può essere utile

svolta in un contesto CLIL, se si sceglie di fornire ai ragazzi materiale in lingua originale e si chiede loro di produrre una relazione o una presentazione in lingua straniera.

L'attività si inserisce in modo naturale nell'ambito del programma di Fisica della classe quinta, secondo quanto proposto dalle Indicazioni Nazionali per i Licei.

I prerequisiti sono la conoscenza del modello atomico di Bohr, del concetto di quantizzazione delle orbite e di spettro atomico.

L'attività didattica prende l'avvio da una presentazione da parte del docente di Storia dell'Arte sulle tecniche di produzione dei colori usate in passato e l'evoluzione subita dalla composizione di pigmenti e colori utilizzati nelle diverse tecniche pittoriche. In questo contesto si farà riferimento alla composizione di alcuni pigmenti particolari, la cui conoscenza risulterà utile in seguito, durante l'attività laboratoriale dei ragazzi.

Segue poi la presentazione da parte del docente di Fisica che illustra la metodologia PIXE.

Completata la parte teorica, è prevista una lezione, possibilmente in compresenza tra i due docenti, che fornirà esempi pratici di interpretazione di spettri X ottenuti da pigmenti dalla composizione semplice e nota, in modo da mostrare ai ragazzi come individuare concretamente i componenti chimici di un campione a partire dal suo spettro PIXE.

Inizia a questo punto l'attività di tipo laboratoriale: si propongono agli studenti, divisi in piccoli gruppi, differenti casi da analizzare, come ad esempio:

Originale, copia o restauro? Si propone un'opera composta in stile seicentesco che presenta però pigmenti di produzione successiva (Blu di Prussia, Bianco di Titanio, ...)

Quando lo ha scritto? Si analizza la composizione dell'inchiostro usato da Galileo Galilei in testi scientifici non datati per confrontarla con quella di testi epistolari datati, per ricostruire la corretta cronologia del suo lavoro (4).

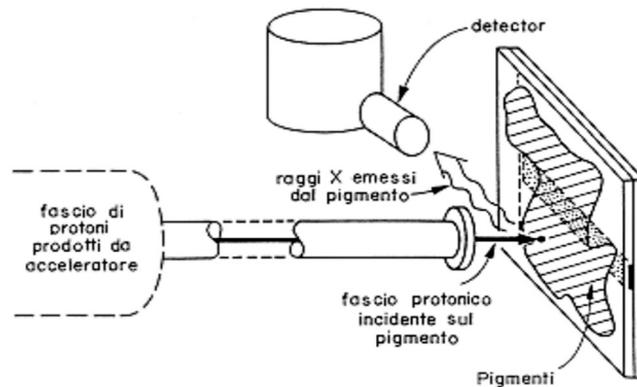
Chi lo ha dipinto? Si propone di riconoscere la composizione dei pigmenti blu utilizzati per le montagne dello sfondo e per la veste della *Madonna dei fusi* attribuita a Leonardo da Vinci e di ricavare informazioni sulla realizzazione delle due parti dell'opera (5)(6)(7).

Chi è il colpevole? Si analizzano gli spettri ottenuti dai colori utilizzati tipicamente da Van Gogh per individuare la presenza di sostanze nocive che potrebbero avergli causato intossicazioni tali da minare la sua salute fisica e mentale (8)(9)(10)(11)(12)(13)(14).

In ogni "caso da risolvere" verranno date agli studenti delle schede di lavoro comprendenti documenti di tipo storico-artistico per la contestualizzazione del lavoro e gli spettri ottenuti mediante la tecnica PIXE. L'analisi degli spettri permetterà agli studenti di ricavare informazioni sui tipi di pigmenti utilizzati e di formulare un'ipotesi di soluzione per il "caso" studiato.

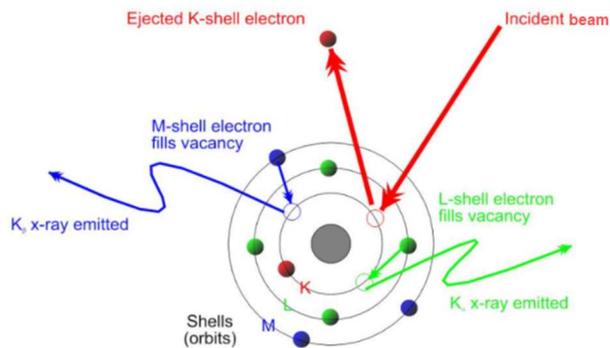
LA TECNICA PIXE

La tecnica PIXE si basa sulla rivelazione dei raggi X emessi da un campione bombardato, in modo non distruttivo, con un fascio di particelle cariche accelerate ad alta velocità e ha lo scopo di determinare la composizione chimica del campione.



La tecnica PIXE (1)

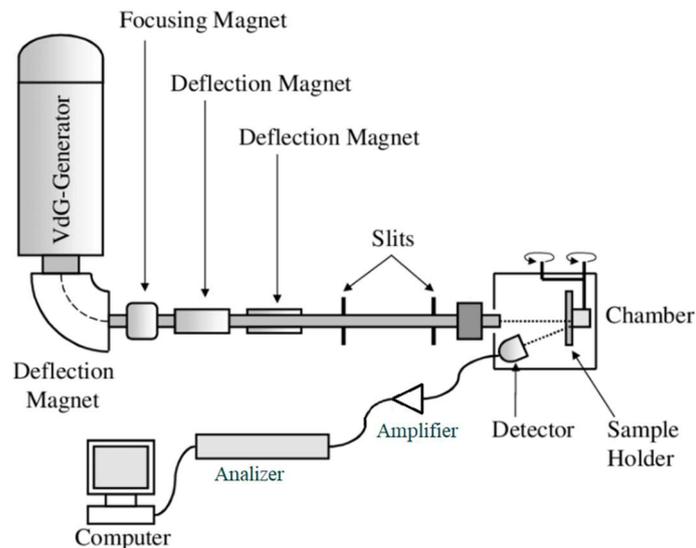
Quando le particelle cariche accelerate, ad esempio protoni, incidono sul campione rimuovono gli elettroni dalle shell più interne degli atomi del target. Tali atomi ionizzati, trovandosi in uno stato instabile, si diseccitano in tempi molto brevi per raggiungere una nuova condizione di stabilità. La lacuna lasciata dall'elettrone rimosso viene riempita da un elettrone che occupava un'orbita più esterna e l'energia rilasciata nella transizione è emessa sotto forma di un fotone X, di energia pari alla differenza delle energie di legame degli elettroni nelle orbite interessate dalla transizione ($E_X = \Delta E = E_f - E_i$).



Effetto del bombardamento da parte del fascio di H⁺(2)

Poiché le energie dei livelli elettronici sono caratteristiche di ogni specie atomica, le energie dei raggi X sono caratteristiche dell'elemento che li ha emessi. Quindi è possibile dedurre la composizione del pigmento analizzando i raggi X emessi dal campione in studio.

Il fascio di protoni di energia di 2 MeV utilizzato nei Laboratori Nazionali di Legnaro è prodotto da un acceleratore tipo Van der Graaf (AN2000). Tramite diversi magneti il fascio viene incurvato e indirizzato sul campione da analizzare.



Setup sperimentale

La rilevazione dei raggi X prodotti viene effettuata mediante un sensore a stato solido al germanio, raffreddato con azoto liquido. Il fotone ad alta energia prodotto dalla diseccitazione degli atomi del campione penetra nel volume sensibile del cristallo di germanio e interagisce con il materiale semiconduttore, producendo un impulso elettrico che può essere misurato mediante un circuito esterno.

Questo impulso trasporta l'informazione relativa all'energia della radiazione incidente originale. Il numero di tali impulsi per unità di tempo fornisce inoltre informazioni sull'intensità della radiazione.

Il segnale analogico proveniente dal sensore viene raccolto da un convertitore analogico-digitale che, mediante un set di comparatori, è in grado di discriminare ed acquisire attraverso canali diversi gli impulsi dotati di energia differente.

Un software dedicato analizza il segnale digitale e mostra i conteggi relativi a ciascuna differente energia, come in figura.

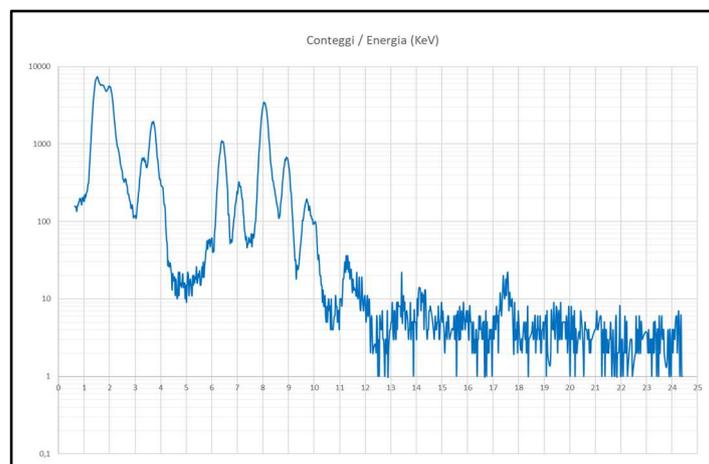


Grafico conteggi/energia(KeV)

Proposta di attività didattica

I materiali di lavoro da fornire ai ragazzi comprendono:

- Documenti/articoli che presentino il caso in esame inserendolo in un contesto: presentazione dell'artista, storia dell'opera d'arte, problema da risolvere o quesito a cui rispondere.
- Gli spettri PIXE relativi al caso in esame, in formato elettronico o cartaceo;
- Le tabelle contenenti le energie caratteristiche delle transizioni di ogni elemento atomico;
- Un elenco di pigmenti con l'indicazione della composizione chimica di ciascuno;
- Una scheda che includa le indicazioni di lavoro.

Qui di seguito si propone a titolo di esempio la scheda di lavoro sull'indagine dal titolo "Chi è il colpevole?".

Esempio di scheda di lavoro:

Chi è il colpevole? Indagine sull'ipotesi di avvelenamento per Vincent Van Gogh

- Documenti preliminari per la contestualizzazione del lavoro.
 - note biografiche su Vincent Van Gogh (15).
 - esempi di opere di Van Gogh.
 - articolo sulla pericolosità di alcuni pigmenti. (12)(13)(14)
 - articolo sull'ipotesi di avvelenamento da piombo per Van Gogh. (8) (9) (10)



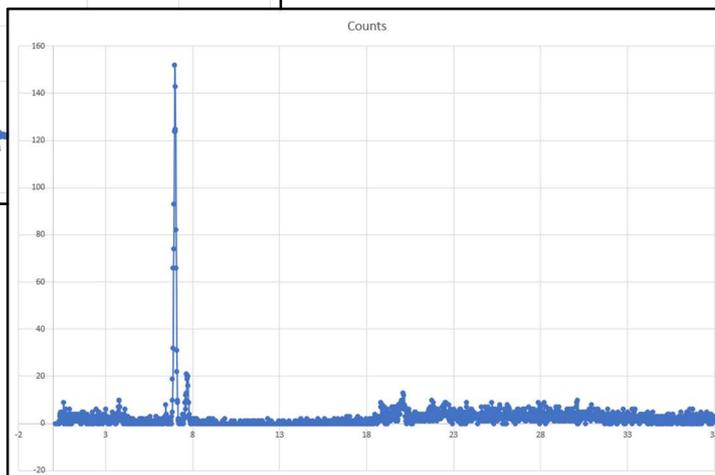
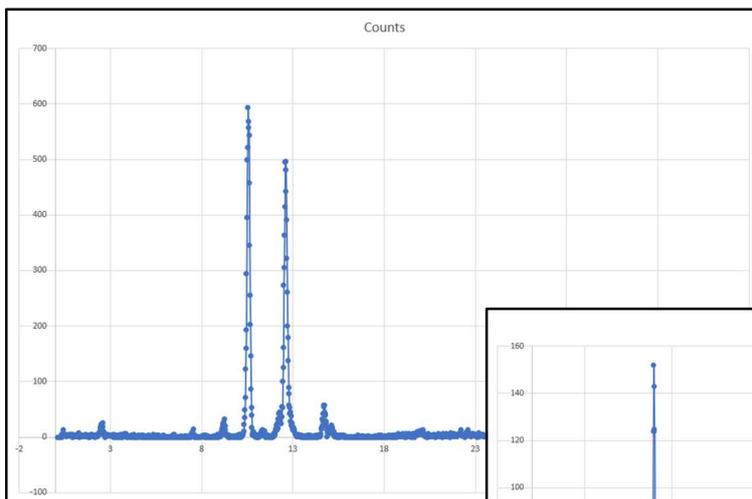
B. Gli spettri di energia di alcuni pigmenti in formato elettronico o cartaceo. Risulta particolarmente interessante fornire i dati grezzi originali, ottenuti testando i pigmenti nei laboratori INFN (reperibili in rete all'indirizzo <https://chsopensource.org/pigments-checker>), ed invitare i ragazzi a costruire i grafici prima di analizzarli.

a. files .txt contenenti i dati degli spettri di alcuni pigmenti presenti nelle opere dell'artista.

Energy (KeV)	Counts	Channel
0,1189	0	1
0,1376	0	2
0,1563	0	3
0,175	0	4
0,1937	0	5
0,2124	0	6
0,2311	0	7
0,2498	0	8
0,2685	0	9
0,2872	0	10
0,3059	0	11
0,3246	0	12
0,3433	1	13
0,362	3	14
0,3807	4	15
0,3994	3	16
0,4181	5	17
0,4368	2	18
0,4555	1	19
0,4742	2	20
0,4929	3	21
0,5116	1	22
0,5303	5	23
0,549	1	24
0,5677	9	25

Energy (KeV)	Counts	Channel
0,1189	0	1
0,1376	0	2
0,1563	0	3
0,175	0	4
0,1937	0	5
0,2124	0	6
0,2311	0	7
0,2498	0	8
0,2685	0	9
0,2872	0	10
0,3059	0	11
0,3246	0	12
0,3433	5	13
0,362	7	14
0,3807	5	15
0,3994	3	16
0,4181	13	17
0,4368	5	18
0,4555	2	19
0,4742	5	20
0,4929	3	21
0,5116	2	22
0,5303	4	23
0,549	5	24
0,5677	1	25

b. i grafici ottenuti:



C. Le tabelle contenenti le energie caratteristiche delle transizioni di ogni elemento atomico (3);

Z	Element	$K\alpha_1$	$K\beta_1$	$L\alpha_1$	$L\beta_1$
3	Li Lithium				
4	Be Beryllium	0.108			
5	B Boron	0.277			
6	C Carbon	0.283			
7	N Nitrogen	0.392			
8	O Oxygen	0.525			
9	F Fluorine	0.677			
10	Ne Neon	0.849			
11	Na Sodium	1.040			
12	Mg Magnesium	1.254			
13	Al Aluminium	1.486			
14	Si Silicon	1.740			
15	P Phosphorus	2.010			
16	S Sulfur	2.309			
17	Cl Chlorine	2.622			
18	Ar Argon	2.958			
19	K Potassium	3.314			
20	Ca Calcium	3.692			
21	Sc Scandium	4.093			
22	Ti Titanium	4.512			
23	V Vanadium	4.953			
24	Cr Chromium	5.415			
25	Mn Manganese	5.900			
26	Fe Iron	6.405			
27	Co Cobalt	6.931			
28	Ni Nickel	7.480			
29	Cu Copper	8.046			
30	Zn Zinc	8.637			
31	Ga Gallium	9.251			
32	Ge Germanium	9.886			
33	As Arsenic	10.543			

Z	Element	$K\alpha_1$	$K\beta_1$	$L\alpha_1$	$L\beta_1$
34	Se Selenium	11.224	12.497	1.379	1.419
35	Br Bromine	11.924			
36	Kr Krypton	12.648			
37	Rb Rubidium	13.396			
38	Sr Strontium	14.165			
39	Y Yttrium	14.958			
40	Zr Zirconium	15.775			
41	Nb Niobium	16.615			
42	Mo Molybdenum	17.480			
43	Tc Technetium	18.367			
44	Ru Ruthenium	19.279			
45	Rh Rhodium	20.216			
46	Pd Palladium	21.177			
47	Ag Silver	22.163			
48	Cd Cadmium	23.173			
49	In Indium	24.210			
50	Sn Tin	25.271			
51	Sb Antimony	26.359			
52	Te Tellurium	27.473			
53	I Iodine	28.612			
54	Xe Xenon	29.775			
55	Cs Cesium	30.973			
56	Ba Barium	32.194			
57	La Lanthanum	33.442			
58	Ce Cerium	34.720			
59	Pr Praseodymium	36.027			
60	Nd Neodymium	37.361			
61	Pm Promethium	38.725			
62	Sm Samarium	40.118			
63	Eu Europium	41.542			
64	Gd Gadolinium	42.996			

Z	Element	$K\alpha_1$	$K\beta_1$	$L\alpha_1$	$L\beta_1$	$M\alpha_1$	$M\beta_1$
65	Tb Terbium	44.482	50.385	6.273	6.975	1.240	1.269
66	Dy Dysprosium	45.999	52.113	6.498	7.248	1.293	1.325
67	Ho Holmium	47.547	53.877	6.720	7.526	1.348	1.383
68	Er Erbium	49.128	55.674	6.949	7.811	1.404	1.448
69	Tm Thulium	50.742	57.505	7.180	8.102	1.462	1.503
70	Yb Ytterbium	52.388	59.382	7.416	8.402	1.526	1.573
71	Lu Lutetium	54.070	61.290	7.655	8.710	1.580	1.630
72	Hf Hafnium	55.790	63.244	7.899	9.023	1.646	1.700
73	Ta Tantalum	57.535	65.222	8.146	9.343	1.712	1.770
74	W Tungsten	59.318	67.244	8.398	9.672	1.775	1.838
75	Re Rhenium	61.141	69.309	8.652	10.010	1.843	1.906
76	Os Osmium	63.000	71.414	8.911	10.354	1.907	1.978
77	Ir Iridium	64.896	73.560	9.175	10.708	1.980	2.052
78	Pt Platinum	66.831	75.750	9.442	11.071	2.050	2.127
79	Au Gold	68.806	77.982	9.713	11.443	2.123	2.203
80	Hg Mercury	70.818	80.255	9.989	11.824	2.195	2.281
81	Tl Thallium	72.872	82.573	10.269	12.213	2.271	2.363
82	Pb Lead	74.970	84.939	10.551	12.614	2.342	2.444
83	Bi Bismuth	77.107	87.349	10.839	13.023	2.423	2.526
84	Po Polonium	79.291	89.803	11.131	13.446	2.499	2.614
85	At Astatine	81.516	92.304	11.427	13.876	2.577	2.699
86	Rn Radon	83.785	94.866	11.727	14.315	2.654	2.784
87	Fr Francium	86.106	97.474	12.031	14.771	2.732	2.868
88	Ra Radium	88.478	100.130	12.339	15.236	2.806	2.949
89	Ac Actinium	90.884	102.846	12.652	15.713	2.900	3.051
90	Th Thorium	93.351	105.605	12.968	16.202	2.996	3.149
91	Pa Protactinium	95.868	108.427	13.291	16.703	3.082	3.240
92	U Uranium	98.440	111.303	13.614	17.220	3.171	3.336
93	Np Neptunium	101.059	114.234	13.946	17.751	3.250	3.435
94	Pu Plutonium	103.734	117.228	14.282	18.296	3.339	3.534
95	Am Americium	106.472	120.284	14.620	18.856	3.438	3.646

D. Un elenco di pigmenti con l'indicazione della composizione chimica di ciascuno (11);

Yellow	
Naples yellow	$Pb_2Sb_2O_7$
Zinc yellow (lemon yellow)	$4ZnO_4 \cdot CrO_3 \cdot K_2O \cdot 3H_2O$
Chrome yellow and orange	CrO_8Pb_2S
Van Dyke brown	$Fe_2O_3(H_2O) + MnO_2(n H_2O)$
Reds	
Red lakes (geranium lake)	$Y(C_{20}H_6Br_4Na_2O_5) + Pb$ or Al
Vermillion	HgS
Cochineal lake (Carmine)	$C_{22}H_{20}O_{13}$
Madder lake (Alizarin)	$C_{14}H_8O_4C_{14}$ or H_8O_5
Blues	
Cobalt blue	$CoAl_2O_4$
Prussian blue	$Fe_4[Fe(CN)_6]_3$
French ultramarine	$Na_7Al_6Si_6O_{24}S_3$
Cerulean blue	$CoSnO_3$
Greens	
Viridean	$Cr_2O_3 + 2H_2O$
Emerald green	$3Cu(AsO_2)_2 \cdot Cu(CH_3COO)_2$
Backs and Whites	
Lead Black,	$Pb_{12}O_{19}$
Lead white	$(PbCO_3)_2 \cdot Pb(OH)_2$
Zinc white	ZnO

E. Indicazioni di lavoro.

Chi è il colpevole? **Van Gogh è stato avvelenato dai suoi colori?** **Indicazioni di lavoro**

Ci si propone di determinare se i pigmenti usati da Vincent Van Gogh nella realizzazione delle sue opere abbiano potuto causargli intossicazioni tali da minare la sua salute fisica e mentale, conducendolo in modo indiretto alla morte. A questo scopo si analizzano con la tecnica PIXE i pigmenti presenti nei suoi dipinti, per individuare eventuali elementi tossici.

- Dopo aver esaminato la documentazione fornita prendere in considerazione i dati raccolti nel corso dell'indagine PIXE.
- Graficare i dati in scala lineare e logaritmica per evidenziare i picchi che indicano le transizioni più frequenti.
- Raccogliere in una tabella le energie relative ai picchi.
- Cercare, nelle tavole fornite, gli elementi e le transizioni che corrispondono alle energie trovate.
- Una volta individuati gli elementi chimici presenti nel pigmento, ricercare nella lista dei pigmenti e colori fornita, il pigmento che meglio si attaglia al profilo chimico individuato.
- Stendere un breve testo che sintetizzi i risultati trovati e ne dia un'interpretazione anche alla luce delle informazioni trovate nella documentazione inizialmente fornita.

A conclusione dell'attività di indagine, si prepari una breve presentazione (~ 8 slides) corredata di immagini e testi esplicativi, che consenta di relazionare il lavoro svolto per gli altri gruppi di lavoro impegnati in attività differenti.

Conclusione

L'attività proposta nasce dalla partecipazione delle autrici al corso di aggiornamento organizzato presso i Laboratori Nazionali di Legnaro (Padova) nell'ambito del Programma INFN Docenti (PID) 2021 e ha l'obiettivo di avvicinare gli studenti al mondo della fisica moderna, introducendoli ad alcune applicazioni concrete nel campo dei beni culturali. L'attività è proposta come una sorta di "serious game", nel quale gli studenti sono spinti a mobilitare le loro conoscenze, la capacità di analisi, l'intuito ed il lavoro collaborativo per rispondere ad un quesito stimolante.

Ad avviso delle autrici, la capacità di spaziare in modo trasversale, facendo dialogare conoscenze e competenze afferenti a vari ambiti disciplinari (in questo caso arte e scienza), costituisce il nucleo fondante di una cultura aperta e completa, il punto d'arrivo ideale di un percorso formativo liceale. (tentativo di sintesi di Stefania)

Ringraziamenti

Le autrici di questo articolo ringraziano sentitamente tutto lo staff del PID 2021 e in particolare la dott.ssa Silvia Miozzi, il dott. Giorgio Chiarelli e il dott. Andrea Gozzelino.

Bibliografia e sitografia

Tecniche nucleari di analisi e datazione dei beni culturali con l'acceleratore tandem del CEDAD L. Calcagnile CEDAD – Centro di Datazione e Diagnostica Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Università del Salento Conservation Science in Cultural Heritage <https://conservation-science.unibo.it>

PIXE applicata ai beni culturali A.Ciarla, S.Fadda, M.Merri, G.Modica, L.Nasti, https://www1.inl.infn.it/~agozzeli/Internal_Report_LNL/INFN_LNL_265.pdf

CHSOS Pigments Checkers <https://chsopensource.org/pigments-checker>

Riferimenti per le immagini:

- (1) *La chimica dei materiali per i beni culturali* di L. Nodari, Università degli Studi Padova <http://wwdisc.chimica.unipd.it/antonio.toffoletti/pubblica/Scuola-Perf-2011-12/Luca-Nodari-Didatt-Chimica.pdf>
- (2) https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-characteristic-X-ray-formation-after-the-incident-electron-beam-kicks_fig18_330534026
- (3) *PeriodicTable and Xray Energies, Bruker User Manual*; <https://usermanual.wiki/Pdf/PeriodicTableandXrayEnergies.1969160263>

Fonti per le attività didattiche:

- (4) *Studying the Chronology of Galileo's Writings with PIXE, January 1996, Nuclear Physics News 6(2):24-31, DOI:10.1080/10506899609411075, Authors: F. Lucarelli, P. A. Mandò.*
- (5) <https://www.foglidarte.it/il-rinascimento-oggi/463-la-madonna-dei-fusi-splendore-e-impotenza-del-femminile-in-leonardo.html>
- (6) <https://www.stilearte.it/tutto-sulla-madonna-dei-fusi-di-leonardo-originale-perduto-repliche-e-copie/>
- (7) <https://www.arte-mag.it/2021/10/20/lo-strano-caso-della-madonna-dei-fusi/>
- (8) <https://historyofyesterday.com/did-van-gogh-have-lead-poisoning-86313e634381>
- (9) *Implication of lead poisoning in psychopathology of Vincent van Gogh, Review Actas Luso Esp. Neurol. Psiquiatr. Cienc. Afines, 1997, F J González Luque, A L Montejo González, PMID: 9428166*
- (10) *Vincent van Gogh (1853-90): the plumbic artist, Journal of Medical Biography, June 2008, Edward Weissman*
- (11) <http://www.vangoghreproductions.com/art-techniques/palette.html>
- (12) <https://historyofyesterday.com/how-many-artists-were-poisoned-by-their-paints-346a93459b7e>
- (13) <https://youcolorsite.wordpress.com/2019/03/14/pigmenti-mortali/>
- (14) <https://www.serenacomar.it/index.php/arte-e-immagine/colori/19-tossicita-nei-color>
- (15) <https://www.treccani.it/>