

Un percorso didattico inquiry-based in remoto sulle radiazioni elettromagnetiche dall'infrarosso all'ultravioletto.

Marina Carpineti, Martina Mulazzi e Marco Giliberti

Dipartimento di Fisica "Aldo Pontremoli" Università degli Studi di Milano

Riassunto. Nell'ambito del PLS abbiamo proposto un percorso didattico per studenti degli ultimi due anni di scuola superiore che affronta il tema della radiazione elettromagnetica con un approccio *inquiry-based*. Vista l'emergenza provocata dal COVID-19, il percorso è stato ripensato per potersi svolgere da remoto. Gli studenti possono lavorare in modo indipendente e sono invitati a riflettere autonomamente sui temi che vengono presentati, mettendo alla prova le loro teorie e i loro modelli e scartandoli quando non sono esplicativi o predittivi di ulteriori fenomeni. Le fasi svolte in autonomia sono seguite da momenti di confronto gestiti dall'insegnante.

Per poter offrire l'attività anche al di fuori del PLS, è necessario prevedere un supporto per gli insegnanti. A questo scopo abbiamo pensato a un loro coinvolgimento attivo sia nella progettazione del percorso didattico – perché le motivazioni e il rationale delle scelte fossero compresi – sia nella sperimentazione che gli insegnanti svolgono come se fossero studenti.

Discuteremo di questo approccio e delle prossime verifiche da fare per valutarne l'efficacia anche nella capacità degli insegnanti di progettare autonomamente attività analoghe su altri temi scientifici.

Abstract. As part of the PLS, we have proposed an educational path for students of the last two years of high school that addresses the issue of electromagnetic radiation with an *inquiry-based* approach. Given the emergency caused by COVID-19, the path was modified to be used even remotely. Students can work independently and are invited to reflect autonomously on the subjects that are presented, testing their theories and models and discarding them when they are not explanatory or predictive of further phenomena. The phases carried out independently are followed by moments of discussion managed by the teacher. Aiming to propose the activity outside the PLS, it is necessary to provide support for teachers. To this end, we thought of an active involvement of them both in the planning of the educational path – to clarify the motivations and rationale of the choices – and in the experimentation that teachers carry out as if they were students.

We will discuss this approach and the next checks to be made to evaluate its effectiveness, also concerning the ability of teachers to independently plan similar activities on other scientific topics.

1. Introduzione

Esiste una grande mole di ricerca in didattica della fisica che mette in luce l'importanza per l'apprendimento di attività sperimentali che sviluppino il senso critico degli alunni, la loro capacità di porre domande scientifiche a partire dall'osservazione attenta dei fenomeni e la capacità di trasferire le conoscenze tra contesti diversi riconoscendo le connessioni ed elaborando modelli [1–5]. L'impostazione tradizionale del laboratorio, volta a eseguire esperimenti precostituiti che verifichino leggi studiate in

corsi teorici ha dimostrato di non riuscire sempre nell'intento di aiutare gli studenti a ragionare come fisici e a comprendere effettivamente il metodo scientifico [6,7]. Si sente perciò l'esigenza di laboratori organizzati diversamente che guidino gli studenti in un percorso di scoperta e li abituino a ragionare sui fenomeni.

Nell'ambito del PLS abbiamo progettato e realizzato un percorso didattico sulle onde elettromagnetiche che si prefigge l'intento di guidare gli studenti a esplorare fenomeni diversi tra loro che coinvolgono l'interazione tra radiazione di diverse lunghezze d'onda e materia [8,9]. Scopo ultimo dell'attività è quello di condurli all'elaborazione di modelli e di utilizzarli per fare previsioni e verificarli alla luce di nuove evidenze sperimentali. Gli studenti lavorano per buona parte in autonomia, mettendo alla prova le loro conoscenze e rielaborandole nel caso che si rivelino inadeguate. Le fasi di lavoro autonomo sono intervallate da momenti di confronto con i compagni e i docenti. Questo tipo di attività è molto apprezzato dagli studenti che dimostrano di cogliere la somiglianza tra l'approccio proposto e quello della vera ricerca scientifica [10], tuttavia la sua efficacia dipende indissolubilmente dalla guida dei docenti che li accompagnano nel percorso didattico.

Come verrà discusso nel seguito, il percorso, che a causa della pandemia di COVID-19 è stato successivamente adattato per essere svolto on-line [8,9], richiede in particolare una preparazione adeguata degli insegnanti per gestire le fasi di discussione che si alternano alle parti svolte individualmente.

In questa comunicazione discuteremo delle strategie che abbiamo adottato per formare gli insegnanti a utilizzare questa particolare attività. Discuteremo inoltre quello che, a partire da questa esperienza, crediamo possa essere utile fare per fornire agli insegnanti l'autonomia necessaria per progettare altre attività *inquiry-based* su temi differenti.

2. Il percorso didattico e il ruolo degli insegnanti

Diversi studi in letteratura dimostrano la difficoltà degli studenti nell'ordinare le bande dello spettro elettromagnetico in funzione della frequenza o della lunghezza d'onda, associando a esse le diverse proprietà di interazione con la materia [11,13]. Inoltre, gli studenti spesso riconoscono e suddividono le diverse regioni dello spettro elettromagnetico solo in base al loro campo di applicazione, piuttosto che alle caratteristiche fisiche delle radiazioni [12,13].

In questo contesto si inserisce l'attività PLS "I colori visibili e quelli invisibili ai confini dell'arcobaleno" progettata dal Dipartimento di Fisica "Aldo Pontremoli" dell'Università degli Studi di Milano che era pronta per essere sperimentata con i primi studenti nella primavera 2020 [8,9]. Si tratta di un'attività rivolta agli studenti di IV e V superiore con un'impostazione *Inquiry-based* in cui si alternano dimostrazioni, esperimenti, esercizi e discussioni svolti in parziale autonomia dagli studenti e organizzati secondo lo schema delle 5E (*Engage, Explore, Explain, Extend, Evaluate*) [14]. Era originariamente pensata come complementare alla visione dello spettacolo di teatro scientifico "Luce dalle Stelle" nato nell'ambito del progetto "Lo spettacolo della fisica" [15,16]. Esso trae spunto dall'osservazione del cosmo alle varie lunghezze d'onda per introdurre numerosi temi di fisica classica e moderna, creando curiosità e interesse per successivi approfondimenti e con una critica esplicita alla divulgazione scientifica che spesso, per semplificare gli argomenti, snatura la fisica e dà l'illusione al pubblico di aver compreso la materia.

Il percorso didattico si compone di tre parti distinte che affrontano, rispettivamente, il visibile, le radiazioni più vicine al visibile (ultravioletto e vicino infrarosso), e infine il cosiddetto "infrarosso termico", la radiazione emessa da corpi a temperature

prossime alla temperatura ambiente. La parte che tratta della radiazione visibile conduce gli studenti a ragionare sul processo di visione e sul significato di colore, frutto dell'interazione tra luce, materia e occhio umano. Chiarito che anche l'occhio ha un ruolo essenziale del processo di visione, nella seconda parte si osserva il mondo con altri occhi, per la precisione con telecamere sensibili a radiazioni prossime al visibile (UV e vicino infrarosso), ma invisibili all'occhio umano. Esportando a questo nuovo caso i concetti appresi nella prima parte, gli studenti possono elaborare un modello che porta alla definizione di trasmissione, riflessione e assorbimento e dei relativi coefficienti spettrali. L'ultima parte sfrutta le termocamere per condurre gli studenti a introdurre in modo naturale il tema dell'emissione di radiazione e giungere, attraverso un approccio sperimentale e fenomenologico, a definire il corpo nero e la dipendenza dello spettro di emissione dalla temperatura (legge di Stefan Boltzmann e legge di Wien). Ha infine un ruolo fondamentale la fase di discussione che segue ogni attività svolta in autonomia dagli studenti, che ha lo scopo di far emergere le difficoltà incontrate ed eventuali nodi concettuali.

Il ruolo fondamentale della sperimentazione per l'apprendimento purtroppo rischia di venire meno con le restrizioni alla presenza a scuola imposte dalla pandemia di COVID-19 in corso. L'emergenza ci ha imposto di ripensare completamente il percorso didattico. Quello che abbiamo sviluppato, cerca di ovviare a questa mancanza fornendo a studenti e insegnanti la possibilità di un approccio alternativo alle lezioni frontali che sia coinvolgente e stimolante.

Abbiamo lavorato per trasformare il percorso didattico in un'attività fruibile on-line che mantenesse però l'impostazione *inquiry-based* e consentisse agli studenti di lavorare in autonomia [8–10]. Gli esperimenti che i ragazzi avrebbero dovuto eseguire in laboratorio utilizzando termocamere, telecamere UV e a infrarossi vicini, ormai disponibili sul mercato a prezzi accessibili, sono stati trasformati in filmati che i ragazzi visualizzano on-line. Analogamente la visione dello spettacolo è stata sostituita da una selezione di video estratti dallo spettacolo. Si perde necessariamente il fascino della sperimentazione diretta, ma il percorso è costruito in modo da mantenere la sorpresa e coinvolgere i ragazzi, come testimoniato dall'esito di un questionario su un campione di circa 60 studenti che hanno sperimentato il percorso nell'anno scolastico corrente (2020/2021) [10].

Come detto, l'attività si propone di sviluppare la capacità di ragionare sui problemi, l'attenzione critica al mondo circostante e le abilità deduttive degli studenti. Fornisce inoltre definizioni precise e, attraverso gli esercizi, richiede agli studenti di applicare a casi concreti quanto appreso. Una particolarità del percorso, descritto in maggior dettaglio in altri lavori [8–10], è quella di stimolare gli studenti a utilizzare le conoscenze acquisite per predire cosa si devono aspettare in una nuova situazione e successivamente verificare se la previsione è corretta. Talvolta, la verifica viene utilizzata per introdurre un nuovo tema, sfruttando l'*engagement* prodotto dall'effetto sorpresa.

Un esempio di questo tipo di approccio si trova nell'attività I dedicata allo spettro visibile. Agli studenti vengono mostrate tre immagini di un cartoncino, che appare bianco se osservato in luce naturale, illuminato da luci di diverso colore (rosso, verde e blu). Naturalmente, come si può osservare in Figura 1 A, il cartoncino assume il colore della luce che lo illumina. Viene dunque chiesto agli studenti cosa si potrebbero aspettare se, illuminandolo con luce bianca, lo osservassero ponendosi davanti agli occhi un filtro colorato. Come predetto dalla maggioranza degli studenti, la figura 1 B mostra che non c'è differenza apprezzabile tra i due casi e che il cartoncino appare del colore del filtro, come prima appariva del colore della luce. Sarebbe pertanto che le due operazioni siano perfettamente equivalenti. D'altra parte, a questo punto

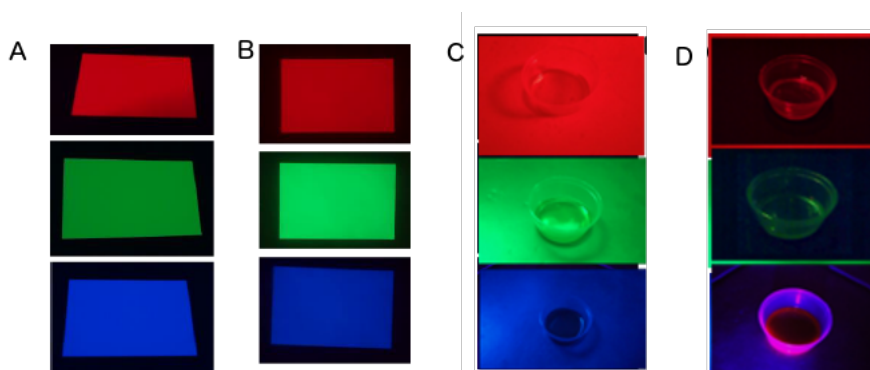


Fig. 1. – Nelle figure di sinistra sono rappresentate le immagini del cartoncino bianco illuminato da luci colorate (colonna A) e viste attraverso filtri dei colori corrispondenti (colonna B). Nelle figure di destra sono rappresentate un

dell'attività, gli studenti hanno maturato la consapevolezza che il colore che percepiamo è dovuto sia alle proprietà della luce che lo illumina, sia a quelle di riflettanza del materiale e sia a quelle del nostro occhio. Se un cartoncino appare bianco in luce naturale, significa che riflette in egual misura tutta la radiazione visibile che lo colpisce. Pertanto, se viene illuminato con una luce verde, la rifletterà tutta e l'effetto sul nostro occhio sarà lo stesso che possiamo ottenere filtrando la luce bianca riflessa e facendo passare solo la componente verde.

A questo punto però viene proposto il caso di un liquido trasparente che viene mostrato come appare se, illuminato da luce bianca, viene osservato attraverso i tre filtri. Di nuovo si osserva che il liquido assume il colore dei filtri come mostrato in figura 1 C. Cosa dobbiamo aspettarci di vedere se ora invece illuminiamo il liquido con ciascuna delle tre luci? La risposta spontanea sarebbe che, nuovamente, non ci sarà differenza con il caso dei filtri. Tuttavia, a sorpresa, le cose non vanno esattamente così e, come si vede in figura 1 D, il liquido illuminato con la luce blu assume un colore rosso. Cosa sta succedendo? Il problema viene lasciato agli studenti che devono formulare ipotesi e proporre esperimenti con i quali verificarle.

Si tratta di un fenomeno di fluorescenza. Il liquido, che poi viene detto essere olio di oliva, assorbe la luce blu e ri-emette una luce di colore differente, impossibile da rivelare se lo si illumina con luce bianca e lo si osserva attraverso un filtro blu. Il tema viene affrontato e risolto nelle attività successive, ma è argomento di discussione con l'insegnante che avrà il compito di mantenere viva la curiosità su questo problema, e di riproporlo via via che gli studenti acquisiranno nuove conoscenze, per verificare se queste riescono a spiegarlo [17, 18].

Un aspetto che si è rivelato particolarmente critico è che la modalità on-line, rende ancora più difficile mantenere viva l'attenzione dei ragazzi nella parte di discussione e per alcuni di loro può essere molto facile isolarsi, complice la possibilità di oscurarsi spegnendo la videocamera. E' fondamentale perciò che chi conduce l'attività sappia cogliere le loro difficoltà e sappia stimolare la discussione.

3. La formazione insegnanti

Gli studenti svolgono le loro attività in modo autonomo, ma, come detto, questo non è sufficiente per una piena comprensione degli argomenti. Questo sarebbe vero anche se il percorso potesse essere seguito nella sua modalità originaria in presenza. Sono necessari momenti di discussione e confronto con i compagni e con gli insegnanti che devono interagire con gli studenti supportando il loro apprendimento. E' necessario in particolare che gli insegnanti diano suggerimenti che possono spingere gli studenti a trovare le soluzioni ai loro dubbi in una prospettiva *inquiry-based*. Attualmente il percorso è stato sperimentato con 13 studenti universitari che frequentano un corso di preparazione di esperienze didattiche (PED) e con 43 studenti delle scuole superiori insieme ai loro docenti. In entrambi i casi, i partecipanti sono stati guidati da alcuni degli autori di questa attività. Tuttavia, l'idea è di fornire l'attività agli insegnanti delle scuole superiori che la utilizzino in modo autonomo. Perché ciò possa avvenire è necessario formare adeguatamente gli insegnanti.

Le strategie che stiamo adottando sono le seguenti:

- 1) Gli insegnanti devono provare il percorso come se fossero studenti, per sperimentare personalmente le difficoltà che questi possono incontrare [19].
- 2) E' necessario condividere con i docenti gli obiettivi dell'attività, l'intento formativo e le motivazioni che hanno ispirato le scelte fatte per progettare il percorso. Questo punto è fondamentale per aiutarli a diventare autonomi nella gestione dell'attività con gli studenti.
- 3) Agli insegnanti devono essere forniti suggerimenti e letture di approfondimento sugli argomenti presentati nel percorso. Nel nostro caso abbiamo incluso articoli o testi, ma anche scritti appositamente realizzati dagli autori dell'attività.
- 4) Gli insegnanti devono essere avvertiti di alcuni possibili problemi concettuali degli studenti. Va inoltre spiegato loro che molte attività sono state concepite proprio per risolvere delle difficoltà che gli studenti incontrano e che sono documentate nella letteratura di ricerca (si vedano per esempio le Refs. [11–13, 20–22]).
- 5) Infine, devono essere suggeriti esperimenti in cui vengono utilizzati oggetti di facile reperibilità, al fine di semplificare il compito dei docenti rispetto alla parte sperimentale.

Si osservi che tutti i punti sopraelencati sono stati scelti non solo per formare i docenti all'uso di questo specifico percorso didattico, ma anche per fornire loro gli strumenti per diventare autonomi nella progettazione di nuove attività, tema pressante nella formazione degli insegnanti.

Il primo punto dell'elenco ha lo scopo fondamentale di sviluppare le capacità di comprendere le difficoltà che gli studenti possono incontrare, elemento imprescindibile per la progettazione di un'attività [23].

La condivisione, degli obiettivi e delle scelte (punto 2) servono perché i docenti apprendano un metodo di lavoro e si abituino a porsi domande analoghe nella progettazione di nuove attività [24].

E' necessaria una buona conoscenza disciplinare e ai docenti è richiesto di approfondire i temi che vogliono affrontare con gli studenti (punto 3).

Fornire referenze di lavori in didattica della fisica (punto 4) ha invece lo scopo di abituare gli insegnanti a riferirsi alla letteratura di riferimento sulle problematiche che gli studenti incontrano. E' importante che comprendano che per un buon insegnamento la conoscenza della materia deve necessariamente affiancarsi a una buona conoscenza delle difficoltà che essa pone agli studenti [23].

Infine il punto 5 serve a rendere questa particolare attività facile da realizzare, ma anche a mostrare agli insegnanti che per proporre attività di laboratorio agli studenti non è per forza necessaria strumentazione sofisticata e di difficile reperibilità.

4.5 Fluorescenza

La fluorescenza viene solo accennata e viene fornito un approfondimento autonomo sull'argomento. Alla fine dell'attività gli studenti potrebbero non aver chiaro perché guardando il liquido (olio da cucina in Figura 2) con un filtro colorato (o gelatina colorata) esso appaia nero invece che rosso, diversamente da come si comporta se illuminato da luce blu. La risposta è che il filtro trasmette solamente un intervallo di radiazione visibile (un colore), in questo caso quello corrispondente al colore blu. La fluorescenza dell'olio, invece, è nel rosso, la cui lunghezza d'onda non è trasmessa dal filtro e per questo non risulta visibile. Tale condizione può essere dimostrata illuminando il liquido con luce blu, meglio se si utilizza una torcia ultravioletta con picco di emissione a 395 nm, e poi guardandolo attraverso dei filtri rossi, o gelatine rosse.

Inoltre nel percorso si parla di fluorescenza indotta dalla luce ultravioletta, ma va sottolineato che il fenomeno si può ottenere anche con altre radiazioni. Ad esempio esiste una fluorescenza stimolata da radiazione visibile che fa emettere al materiale radiazione nella banda dell'infrarosso. Questo fenomeno viene utilizzato in tecniche per la rilevazione di alcuni pigmenti nei dipinti³.

4.6 Sintesi sottrattiva

Si parla di sintesi sottrattiva compiuta dai filtri colorati, o gelatine colorate, in opposizione alla sintesi additiva che permette una "somma" delle luci approssimativamente monocromatiche. In realtà l'operazione che compie il filtro non è una sottrazione, ma una moltiplicazione del segnale (la luce) incidente su di esso per una funzione di trasmissione che ha valore diverso da zero solamente nell'intervallo di lunghezze d'onda di interesse.

³Per approfondire questa tecnica si consigliano gli articoli scaricabili ai siti: <https://chscopensource.org/infrared-fluorescence-lamp/> e <https://link.springer.com/article/10.1186/2050-7445-2-8>

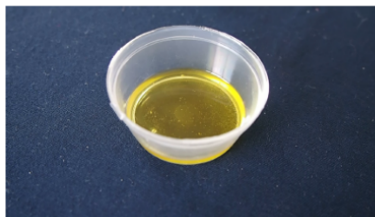


Figura 2

Come appare in luce bianca il liquido di cui si cerca di capire il colore nel percorso. Il liquido è semplice olio da cucina che se illuminato da luce blu (con parte di emissione nell'ultravioletto) fa fluorescenza nel rosso visibile

5 Approfondimenti

In caso si volessero approfondire gli argomenti trattati nel percorso didattico qui presentato suggeriamo i seguenti titoli:

§ L. Gunther (2012), *The Physics of Music and Color*. Massachusetts: Springer – Libro di livello fisico universitario, in lingua inglese. I capitoli di interesse sono principalmente il Capitolo 13 e Capitolo 14, sulla visione a colori e sulla fisica dei colori.

§ K. Nassau (1963), *The Physics and Chemistry of Color - The Fifteen Causes of Color*. Wiley-Interscience – Libro di livello universitario, in inglese, che propone un *excursus* sui fenomeni che riguardano il colore da un punto di vista fisico e chimico.

Fig. 2. – Estratto della guida per gli insegnanti per la prima attività. Ai docenti vengono forniti elementi di approfondimento e chiarimenti rispetto ad alcune definizioni riportate nel testo, come quella di sintesi sottrattiva che sarà particolarmente importante nell'attività successiva.

Tutti questi punti sono implementati in una guida per gli insegnanti che, per ciascuna attività, li conduce attraverso i temi presentati nel percorso di apprendimento e attraverso domande, esercizi e concetti con cui gli studenti devono confrontarsi. La guida è uno strumento che serve prima di tutto a rendere gli insegnanti consapevoli delle problematiche legate alle attività. La parte principale della guida contiene alcuni suggerimenti per avviare e gestire la discussione con gli studenti, le soluzioni degli esercizi delle attività e alcune spiegazioni formali di quei fenomeni che sono presentati nelle attività ma non sono descritti in modo esaustivo. Alcune parti sono state arricchite dopo la prima sperimentazione con gli studenti universitari di PED e con gli studenti delle scuole superiori in cui sono stati segnalati o sono emersi alcuni punti critici. Nella figura 2 è mostrato un esempio tratto dalla prima attività che affronta, tra le altre cose, il tema presentato in figura 1.

Nella sperimentazione fin qui svolta gli insegnanti hanno avuto un ruolo fondamentale. Alcuni sono stati coinvolti nella progettazione e hanno sperimentato in diretta con i propri studenti l'approccio che volevamo proporre. Altri invece hanno seguito il percorso didattico come se fossero studenti, mettendosi in gioco e affrontando le sfide che si presentavano di volta in volta. In questo la modalità on-line ha aiutato, perché ha permesso agli insegnanti di esporsi con gli organizzatori dell'attività, senza doverlo fare con gli studenti, problema che spesso causa una resistenza alla partecipazione attiva degli insegnanti alle proposte innovative. Le risposte ai vari quesiti che compaiono nei form on-line vengono ricevute dai docenti organizzatori dell'attività, ma non vengono viste dagli altri partecipanti. Gli insegnanti sembrano avere apprezzato l'approccio ed essere interessati a utilizzarlo con le loro classi. In una fase successiva, soprattutto quando avremo raggiunto numeri sufficienti per potere fare della stati-

stica, analizzeremo le risposte degli insegnanti ai quesiti del percorso didattico, per individuare eventuali difficoltà specifiche e perfezionare la guida.

4. Prospettive e conclusioni

L'attività fin qui svolta ha incontrato il favore degli studenti e degli insegnanti [10] e sembra essere pertanto piuttosto promettente. Gli insegnanti hanno partecipato attivamente alla sperimentazione e sembrano interessati a gestire il percorso didattico in autonomia. E' in programma la valutazione del materiale raccolto finora con i docenti che hanno partecipato alla prima edizione (on-line) del laboratorio, che permetterà una valutazione della preparazione disciplinare sui temi trattati in questo percorso didattico.

In futuro ci prefiggiamo una valutazione delle difficoltà che gli insegnanti incontreranno quando gestiranno l'attività in autonomia e, una volta consolidata la sicurezza nell'utilizzo dello strumento, vorremmo proporre loro di progettare attività di laboratorio *Inquiry-based* di questo tipo, su altre tematiche e di valutarne insieme a loro l'efficacia.

Infatti, l'obiettivo ultimo che ci poniamo con l'attività di formazione degli insegnanti, non è solo di aiutarli all'utilizzo di questo particolare percorso didattico, ma di fornire loro gli strumenti per progettare ed elaborare percorsi analoghi. Nell'organizzare le attività, abbiamo perciò cercato di elaborare un metodo che aiuti i docenti nella progettazione del laboratorio. Va in questo senso tutta la programmazione svolta con gli insegnanti lungo tutti i passaggi che hanno portato all'elaborazione finale del percorso. Per tutti i docenti non coinvolti nella programmazione, crediamo che un passaggio fondamentale sia quello di condividere le motivazioni che hanno ispirato le scelte compiute.

L'attività di monitoraggio e la progettazione di nuovi percorsi, tuttavia, saranno svolte non appena potremo riprendere i laboratori in presenza, perché la didattica a distanza di questo ultimo anno rende particolarmente gravoso per gli insegnanti impegnarsi in ulteriori progetti in remoto.

Bibliografia

- [1] AMERICAN ASSOCIATION OF PHYSICS TEACHERS, *AAPT Recommendations for the Undergraduate Physics Laboratory Curriculum 2014*
- [2] AMERICAN ASSOCIATION OF PHYSICS TEACHERS, *Phys. Teach.*, **35** (1997) 546.
- [3] HOFSTEIN A. AND LUNETTA V., *Sci. Educ.*, **88** (2004) 28.
- [4] KARALINA A. AND ETKINA E., *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, **3** (2007) 020106.
- [5] OTERO V., AND MELTZER D., *PHYSICS TODAY*, **5** (2017) 50.
- [6] ETKINA E., *Am. J. Phys.*, **83** (2015) 669.
- [7] HOLMES N. G., AND WIEMAN C. E., *PHYSICS TODAY*, **71** (2018) 38.
- [8] MULAZZI M., GILIBERTI M., RIGON E., STELLATO M., LUDWIG N., CARPINETI M., *Il nuovo Cimento*, (in corso di pubblicazione) 2021.
- [9] MULAZZI M., LUDWIG N., RIGON E., STELLATO M., GILIBERTI M., CARPINETI M., *GIREP Proceedings*, (inviato per pubblicazione) 2021.
- [10] MULAZZI M., LUDWIG N., GILIBERTI M., CARPINETI M., *Giornale di Fisica*, (inviato per pubblicazione (su invito)) 2021.
- [11] EMIGH P. J., PASSANTE G., AND SHA P. S., *Student Understanding of Blackbody Radiation and Its Application to Everyday Objects in PERC Proceedings, Published by the American Association of Physics Teachers (Engelhardt, Churukian, and Jones - (Portland, (OR), 2013) 137 - doi:10.1119/perc.2013.p*

- [12] NEUMANN S. AND HOPF M. , *J. Sci. Educ. Technol.*, **21** (2021) 826.
- [13] PLOTZ T. AND HOPF M. , *International Journal of Science and Mathematics Education*, **4** (2016) 447.
- [14] BYBEE R., *Technology and Engineering Teacher*, **70** (2021) 30.
- [15] CARPINETI M., CAVALLINI G., GILIBERTI M., LUDWIG L., MAZZA C. AND PERINI L., *Il Nuovo Cimento della Società Italiana di Fisica B*, **121** (2006) 901.
- [16] CARPINETI M., CAVINATO M., GILIBERTI M., LUDWIG N. AND PERINI L., *JCOM*, **10** (2011) 1.
- [17] GUNTHER L., *The Physics of Music and Color, Published by the American Association of Physics Teachers (Engelhardt, Churukian, and Jones – (Massachusetts 2012)*
- [18] NASSAU K., *The Physics and Chemistry of Color – The fifteen causes of color, Published by the American Association of Physics Teachers (John Wiley and Sons – (New York - 1983))*
- [19] ETKINA E., *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, **6** (020110) 2010.
- [20] VIENNOT L., DE HOSSON C., *International Journal of Science Education*, **37** (1) 2014.
- [21] BESSON U., *European Journal of Physics*, **30** (995) 2009.
- [22] LIBARKIN J. C., ASGHAR A., CROCKETT C., AND SADLER P., *Astronomy Education Review*, **10** (49) 2011.
- [23] McDERMOTT L. C., SHAFFER P. S. AND CONSTANTINOU C. P., *Physics Education*, **35** (411) 2000.
- [24] KOPONEN I. T., MÄNTYLÄ T., AND LAVONEN J. , *Eur. J. Phys.* , **5** (645) 2004.