

Trattare la gravità a scuola attraverso lo spazio-tempo **Dealing with gravity at high school through the space-time**

Adriana POSTIGLIONE (*) e Ilaria DE ANGELIS

Dipartimento di Matematica e Fisica, Università degli Studi Roma Tre
Sezione INFN di Roma Tre

Riassunto. La Relatività Generale è la teoria più moderna della gravità, che spiega innumerevoli fenomeni. Nonostante ciò, essa non è abitualmente trattata nella scuola secondaria superiore. In questo articolo proponiamo una modalità di formazione docenti che ha l'obiettivo di renderli autonomi e confidenti nell'introdurre la Relatività Generale in classe attraverso il concetto di spazio-tempo e l'uso di un telo elastico. Tale modalità è stata prima testata nell'ambito delle attività PLS dedicate agli studenti portate avanti dal Dipartimento, e poi inserita nelle iniziative PLS di sviluppo professionale dei docenti. Attraverso una lunga e proficua discussione con i docenti in servizio, abbiamo quindi sviluppato e ottimizzato la modalità di formazione docenti, definendo le linee guida e i materiali necessari per trattare diversi fenomeni legati alla gravità. Per raggiungere anche docenti non appartenenti alle nostre scuole partner PLS, abbiamo infine raccolto tutti i materiali in un manuale gratuito, che può essere usato come formazione autonoma.

Abstract. General Relativity is the most modern theory of gravity and allows to explain several phenomena. However, it is not usually treated in high school. In this paper we propose a teacher training activity that aims at making them autonomous and confident in introducing General Relativity in their classrooms making use of the concept of space-time and a rubber sheet. This activity we developed was first tested among the PLS activities dedicated to students carried on by the Department, and then added to the PLS initiatives addressed to teachers. After a long and productive debate with high school teachers, we optimized our teacher training activity, defining guidelines, materials, videos and images necessary to treat different phenomena related to gravity. In order to reach teachers not belonging to our PLS partners, we finally collected all the materials developed in an open access manual, that can be used as a standalone training.

1. Introduzione

Tra le teorie della “Fisica Moderna”, ovvero quelle sviluppate agli inizi del Novecento e capaci di aprire la strada alla nostra comprensione attuale dell’Universo, la Relatività occupa certamente un ruolo di primo piano. Quando si parla degli argomenti da trattare nella scuola secondaria, però, con “Fisica Moderna” ci si riferisce solo alla Relatività Ristretta, e si abbandona completamente l’idea di introdurre la Relatività Generale, come è evidente dalle Indicazioni Nazionali introdotte nel 2010 dal MIUR [1]. I motivi sono molteplici: da un lato, la complessità matematica della Relatività Generale obbliga ad adottare un approccio solo qualitativo, e non è semplice farlo senza semplificare troppo i concetti; dall’altro, anche affrontando i concetti ad un livello puramente qualitativo, la Relatività Generale richiede di rivoluzionare il modo di vedere il mondo, a partire dagli stessi concetti di spazio e tempo. Eppure, la Relatività Generale rappresenta la migliore teoria che abbiamo della gravità, in grado di spiegare numerosissimi fenomeni che riempiono le pagine dei giornali (come buchi neri e onde gravitazionali). Limitarsi alla sola teoria Newtoniana risulta quindi sempre più limitante e anacronistico.

Per questo, negli ultimi anni sono state intraprese diverse iniziative per superare questi ostacoli e introdurre la Relatività Generale nelle scuole secondarie [2–5]. In particolare, per aiutare il docente di scuola secondaria superiore a trattare in classe la Relatività Generale, al Dipartimento di Matematica e Fisica dell’Università Roma Tre abbiamo progettato, realizzato e testato una modalità di insegnamento/apprendimento. Dopo numerosi test e miglioramenti, tale modalità è poi confluita in una vera e propria attività di sviluppo professionale dei docenti. In questo articolo descriveremo quest’attività e i passi che ci hanno portato a realizzarla, e come oggi possa essere usata dal docente come formazione autonoma.

Il modello di riferimento utilizzato è la ben nota analogia del telo elastico (in inglese, rubber sheet analogy, RSA), che paragona lo spazio-tempo introdotto da Einstein ad un telo elastico. Così come lo spazio-tempo può essere deformato dalla presenza di masse, dando vita alla gravità, così un telo elastico può essere curvato sotto il peso di diversi oggetti posti su di esso. Una biglia posizionata sul telo, quindi, verrà inevitabilmente attratta dal peso centrale: se è inizialmente ferma vi cadrà direttamente, mentre se ha una certa velocità iniziale potrà girare intorno al peso prima di cadere. In altre parole, la biglia sperimenta una sorta di *attrazione gravitazionale* prodotta dal peso posto al centro del telo.

Come tutte le analogie, anche quella del telo elastico ha molti limiti e punti di debolezza, ampiamente affrontati nel corso degli anni dalla letteratura di settore [2,

(*) adriana.postiglione@uniroma3.it

6–8]. Nonostante ciò, diversi studi hanno mostrato come essa risulti particolarmente utile ed efficace nel fornire un modo di visualizzare il concetto di spazio-tempo e introdurre così la gravità Einsteiniana a livelli pre-universitari [9–11].

Per testare questo modello, grazie all'Officina Meccanica della Sezione INFN di Roma Tre, abbiamo costruito una struttura circolare di circa 1.8 metri di diametro che potesse sorreggere un telo di lycra. La grandezza della struttura ci ha permesso di disporre attorno ad essa circa 20-25 persone. Utilizzando pesi e biglie di diversa grandezza, abbiamo quindi potuto simulare diverse deformazioni dello spazio-tempo e fenomeni legati alla gravità. Dopo una lunga prima fase di test, abbiamo progettato e realizzato una vera e propria attività di formazione docenti, che vuole renderli autonomi e confidenti nell'introdurre la Relatività Generale nelle loro classi.

Il resto dell'articolo è diviso nel modo seguente. Nella sezione 2 descriviamo la prima fase dello studio, che ha riguardato l'analisi dell'attività testata su pubblici diversi. Nella sezione 3 ci concentriamo sull'attività di formazione docenti che abbiamo sviluppato, mentre nella sezione 4 analizziamo i primi feedback che abbiamo ricevuto dai docenti coinvolti. La sezione 5, infine, fornisce un riassunto degli obiettivi raggiunti e uno sguardo ai possibili sviluppi futuri del nostro lavoro.

2. Prima fase dello studio: analisi di pubblici differenti

Per sviluppare una proposta che rendesse i docenti in grado di trattare la Relatività Generale nelle loro classi, avere un'idea chiara della sua efficacia, delle sue potenzialità e delle sue criticità, legate in particolare alla possibile nascita di concezioni erranee, abbiamo dedicato una lunga fase del nostro studio all'analisi delle reazioni di pubblici differenti.

2.1. Pubblico generico

I test con il pubblico generico hanno coinvolto più di 2000 persone (adulti, adolescenti, bambini) sono stati svolti in occasione degli eventi pubblici che il Dipartimento organizza durante l'anno. Questi eventi rappresentano l'occasione per ricercatori e professori di raccontare ai visitatori le loro ricerche scientifiche in un clima informale e spesso giocoso. Durante questi eventi abbiamo presentato il nostro modello del telo elastico, e abbiamo toccato diversi argomenti legati alla gravità: dalle leggi di Keplero alla fionda gravitazionale, dai buchi neri alle onde gravitazionali.

Da questi test abbiamo compreso uno degli aspetti più caratteristici dell'attività che stavamo proponendo: il suo aspetto giocoso e interattivo. Attraverso il coinvolgimento diretto dei partecipanti, infatti, essi seguivano con attenzione ed erano più disposti ad ascoltare temi anche complessi, e a porre molte domande. Abbiamo inol-

tre notato che anche gli argomenti che ritenevamo più “standard”, come le orbite dei pianeti e le leggi di Keplero, ricevevano molta curiosità e interesse.

2.2. Studenti di scuola secondaria superiore

Nel corso dei test con gli studenti di scuola secondaria superiore abbiamo coinvolto in totale 14 classi di Liceo e 2 gruppi misti di studenti provenienti da scuole differenti, per un totale di circa 400 studenti.

Inizialmente abbiamo inserito l'attività con il telo elastico tra quelle offerte dalla Scuola Estiva di Fisica organizzata dal Dipartimento, i cui partecipanti erano selezionati in base ai loro voti e al loro interesse verso le materie scientifiche. In questo caso, quindi, avevamo un campione di studenti molto bravi e interessati. Nel corso della scuola estiva abbiamo portato più volte il gruppo di studenti nell'aula dedicata alla struttura del telo elastico, trattando di volta in volta argomenti diversi. Dopo aver introdotto l'analogia del telo elastico, abbiamo lasciato gli studenti sperimentare in libertà i diversi fenomeni, ascoltando attentamente i loro ragionamenti e le loro domande e discutendo con loro le possibili risposte. Questo approccio ci ha portato a valutare la loro comprensione degli argomenti trattati e l'insorgere di concezioni erronee, e ci ha guidati nel definire il modo migliore di affrontare i diversi fenomeni. A seguito di questa esperienza abbiamo confezionato un'attività di un'ora e mezza che, utilizzando il telo elastico, tratta le leggi di Keplero, l'effetto fionda gravitazionale, i sistemi binari, le lenti gravitazionali e i buchi neri.

I primi test con interi gruppi classe sono stati svolti con 5 classi del Liceo Scientifico di Roma “S. Cannizzaro”. Grazie ad una docente che da anni collabora con il Dipartimento, abbiamo coinvolto una classe per ogni anno del Liceo. In tal modo abbiamo potuto testare l'attività con studenti di età diverse, analizzando di volta in volta il loro grado di comprensione e coinvolgimento. Questa parte dello studio ci ha permesso di verificare quanto avevamo già notato con il pubblico generico, e cioè che il telo elastico è efficace non solo nel trattare argomenti avanzati che non sono tipicamente trattati a scuola, come i buchi neri, ma anche nell'affrontare attraverso il concetto di spazio-tempo temi già inseriti nelle programmazioni scolastiche, come la gravità newtoniana e le leggi di Keplero.

Questo aspetto è stato pienamente confermato dalla fase successiva del nostro studio, che ha coinvolto più di 200 studenti di 9 classi di diverse scuole del territorio. In questo caso abbiamo somministrato ai partecipanti tre questionari: uno subito prima dell'attività, uno subito dopo, e uno 4 mesi dopo l'attività, in modo da quantificare il loro grado di comprensione dei fenomeni trattati e l'efficacia del nostro approccio. I questionari sono stati costruiti in modo da investigare anche la possibile presenza o persistenza delle concezioni erronee evidenziate in letteratura [2, 6–8]. L'analisi dettagliata dei questionari utilizzati in questa fase è descritta in [11]. Qui riporteremo,

nel seguito, solo gli elementi essenziali che hanno rivestito un ruolo importante nel progettare e realizzare la nostra modalità di formazione docenti.

2.3. Docenti di scuola secondaria superiore

Abbiamo iniziato a coinvolgere nel nostro studio i docenti di scuola secondaria superiore durante uno dei Corsi di Aggiornamento in presenza che il Dipartimento organizza nell'ambito delle attività PLS di sviluppo professionale dei docenti [12]. Il Corso, al quale partecipano ogni anno circa 40 docenti, ha come obiettivo principale quello di trattare la Fisica Moderna fornendo contenuti e spunti di riflessione. In questo contesto abbiamo dedicato un incontro alla trattazione della Relatività Generale, e abbiamo utilizzato la nostra struttura del telo elastico per introdurre loro lo spazio-tempo e i fenomeni ad esso legati.

I docenti coinvolti hanno valutato molto positivamente la nostra attività, ed in particolare la sua capacità di fornire un modo di visualizzare le leggi di Keplero, altrimenti affrontate in modo puramente teorico. Essi ne hanno inoltre apprezzato l'aspetto interattivo, e hanno guardato con interesse alla possibilità di toccare argomenti che, sebbene non trattati tipicamente a scuola, potevano attirare l'attenzione e l'interesse dei loro ragazzi (come i buchi neri). Alla richiesta esplicita di inserire la nostra proposta nella loro didattica, abbiamo ricevuto risposta affermativa, a patto di essere resi sufficientemente autonomi attraverso un'attività di formazione specifica.

2.4. Esito della sperimentazione

La sperimentazione della nostra proposta didattica ha mostrato che:

- 1) L'analogia del telo elastico è utile ed efficace per introdurre il concetto di spazio-tempo e per far visualizzare e comprendere meglio diversi fenomeni legati alla gravità.
- 2) L'attività è divertente e coinvolgente. Invitando i partecipanti a sperimentare con le loro mani configurazioni e situazioni diverse, è possibile mantenere alta l'attenzione anche quando sono affrontati argomenti avanzati.
- 3) I docenti di scuola secondaria superiore non solo sono interessati, ma sarebbero ben contenti di svolgere un'attività analoga nelle loro classi, a patto di essere formati attraverso una modalità specifica. Una particolare attenzione dev'essere dedicata anche all'individuazione di materiali e strumenti adatti a tal fine.
- 4) I questionari relativi ai test con gli studenti [11] mostrano che gli argomenti trattati sono compresi e ricordati più a lungo.
- 5) Il telo elastico risulta efficace per trattare con i ragazzi fenomeni legati alla gravità che essi già affrontano tipicamente a scuola, come ad esempio le leggi di Keplero [11].
- 6) L'analogia del telo elastico permette di trattare facilmente e in modo efficace anche argomenti avanzati che non fanno parte della programmazione scolastica, come i

buchi neri o le lenti gravitazionali [11]. In particolare, essa mostra con chiarezza come tali argomenti sono strettamente legati ad argomenti standard come le leggi di Keplero, e quindi rafforza l'idea che la Relatività Generale non è in opposizione all'approccio Newtoniano, ma piuttosto rappresenta una spiegazione più completa del fenomeno gravità. Questo elemento sottolinea uno degli aspetti fondamentali della scienza, che dovrebbe essere sempre presente nella didattica, e cioè che la scienza non è un insieme di prodotti scollegati tra loro, ma un processo che avanza fornendo una spiegazione sempre più raffinata del mondo che ci circonda.

- 7) I questionari hanno dato risposte importanti su come affrontare e risolvere eventuali concezioni erranee che il telo elastico può indurre [11].

Tutti questi aspetti sono stati fondamentali per costruire la nostra attività di formazione docenti.

3. L'attività di formazione docenti

La prima attività di formazione vera e propria dei docenti all'uso del telo elastico è stata svolta nell'ambito del Corso di Aggiornamento successivo realizzato presso il Dipartimento. Questa volta il focus era incentrato sul rendere i docenti autonomi nel realizzare essi stessi le attività. Per questo, abbiamo iniziato a guidarli nella trattazione dei fenomeni, suggerendogli il modo più efficace di usare il telo elastico, i pesi e le biglie. Gli argomenti affrontati hanno riguardato sia la gravità di Newton (leggi di Keplero, effetto fionda gravitazionale, sistemi doppi) che la Relatività Generale (buchi neri, lenti gravitazionali). A questi argomenti ne abbiamo poi aggiunti altri come spunti di ulteriore utilizzo del telo: come si forma il Sistema Solare, le onde gravitazionali e la dilatazione temporale.

Un'ampia parte del Corso è stata poi dedicata alla discussione con i docenti sulla possibile presenza e persistenza di concezioni erranee sulla gravità dovute all'uso del telo elastico o delle immagini che si associano alla curvatura dello spazio-tempo, e il modo in cui è possibile superarle. In effetti, diversi misconcetti sono evidenziati nella letteratura di settore [2, 6–8]; qui ne affrontiamo due.

Il primo misconcetto che può sorgere utilizzando il telo elastico per simulare lo spazio-tempo è l'idea che quest'ultimo sia bidimensionale come il telo. Quest'idea si traduce nel pensare che la gravità definisca sempre una direzione privilegiata nello spazio (un *sotto* e un *sopra*) come avviene sulla Terra. La nostra esperienza quotidiana, infatti, testimonia che gli oggetti cadono verso il basso, e così fanno anche le biglie sul telo elastico: *cadono* verso il peso centrale. In realtà, nell'Universo non esiste un basso e un alto, né alcuna direzione privilegiata: la gravità agisce in tutte le direzioni, e ha senso parlare solo di *vicino* - *lontano* alla sorgente di gravità. Questa misconcezione può risultare evidente quando si parla di buchi neri, la cui rappresentazione più diffusa è proprio quella che viene fuori dal telo elastico: un imbuto che

attira la materia circostante verso il basso, come fosse il buco di un lavandino. “*Se volessi far sfuggire la mia biglia all’attrazione del buco nero, quindi, mi basterebbe lanciarla verso l’alto in modo da farglielo scavalcare*” hanno osservato più volte i ragazzi nel corso dei nostri test. In realtà, i buchi neri sono quadridimensionali, e attirano la materia in tutte le direzioni: la biglia, se si avvicinasse troppo al buco nero, ne sarebbe attratta indipendentemente dalla direzione di avvicinamento. Ovviamente, questo è un limite intrinseco alla rappresentazione del telo elastico che non può essere eliminato. Il nostro studio, però, ha dimostrato che esso può essere superato se viene dichiarato esplicitamente, magari partendo proprio dalle osservazioni degli studenti. Dopo l’attività con gli studenti di scuola secondaria, infatti, solo il 3% di loro sceglie il distrattore “una forza che attrae verso il basso” tra le possibili risposte alla domanda “che cosa deforma lo spazio-tempo?” [11].

Un altro misconcetto legato all’uso del telo elastico per rappresentare lo spazio-tempo è che la deformazione avvenga solo nello spazio e non nel tempo [6]. Ancora una volta, questo aspetto può essere superato solo se dichiarato esplicitamente nel corso dell’attività. Per questo, abbiamo suggerito ai docenti un modo di trattare anche la dilatazione temporale.

Nella seconda attività di formazione, oltre a concentrarci sugli argomenti da trattare per rendere i docenti autonomi nello svolgimento dell’attività, abbiamo messo a sistema e ottimizzato le linee guida che i docenti avrebbero dovuto seguire. Durante questo Corso di Aggiornamento, infatti, abbiamo dato il via ad un lungo e produttivo dibattito con altri docenti di scuola secondaria superiore, e abbiamo individuato una serie di suggerimenti e idee su come guidare la discussione con i ragazzi. Inoltre, per questa seconda attività di formazione, abbiamo sempre usato una struttura più piccola ed economica della nostra per lo spazio-tempo, che potesse essere costruita ed utilizzata poi anche facilmente dai docenti nelle loro classi.

Alla fine di questa seconda attività di formazione abbiamo quindi potuto raccogliere tutto il materiale sviluppato in un manuale pubblicato sotto forma di un eBook gratuito [13]. Il manuale, scritto sia in Italiano che in Inglese, è suddiviso in 8 schede che affrontano ciascuna un argomento diverso legato al telo elastico. La prima scheda fornisce le istruzioni per costruire la struttura dello spazio-tempo utilizzando un hula-hoop, dei listelli di legno e alcuni morsetti. La seconda scheda tratta il modello del telo elastico, analizzandone i punti di forza e di debolezza e suggerendo delle possibili strategie per superarli. La terza, quarta e quinta scheda descrivono le istruzioni per trattare argomenti legati alla gravità Newtoniana (leggi di Keplero, sistemi doppi, effetto fionda gravitazionale), mentre la sesta e la settima affrontano argomenti più avanzati (buchi neri e lenti gravitazionali). Infine, l’ultima scheda è dedicata ad ulteriori temi da trattare, come la dilatazione temporale. Ogni scheda descrive in modo dettagliato i materiali e le tecniche da usare per mostrare il fenomeno, e contiene

una sezione dedicata a note e approfondimenti, nella quale sono suggeriti immagini e video da utilizzare a supporto dell'attività con il telo elastico. Una descrizione più dettagliata del manuale può essere trovata in [14]. Questo manuale oggi può quindi essere usato in autonomia da ogni docente che voglia introdurre la Relatività Generale ai suoi studenti.

Il manuale contiene anche due questionari. Il primo, da compilare dopo aver letto il libro ma prima di svolgere le attività con il telo elastico, vuole sondare la chiarezza con cui sono descritte le linee guida, e l'eventuale interesse da parte del lettore di replicare l'attività in classe. Il secondo questionario, da compilare dopo aver svolto l'attività in classe, vuole invece investigare l'efficacia dell'attività, la facilità di realizzazione e le reazioni degli studenti.

4. Primi feedback sul materiale sviluppato

Il manuale che raccoglie i materiali sviluppati per la nostra attività di formazione docenti è disponibile online da Luglio 2020 ⁽¹⁾ ed è stato scaricato oltre 300 volte. Finora abbiamo ricevuto solo 23 risposte al primo questionario, che ci permettono di avere una prima idea delle reazioni dei docenti al materiale che abbiamo sviluppato.

In particolare, i lettori dichiarano che il libro è interessante (il 69% dà il punteggio massimo di 5/5, il restante un punteggio di 4/5) e che le attività sono presentate in modo chiaro e completo (il 73% ha dato 5/5, il restante 4/5). Le schede sono ritenute utili dal 73% dei lettori (che danno un punteggio di 5/5, a fronte di un 22% che assegna punteggio 4/5) e il loro contenuto sembra essere sufficiente a portare avanti le attività all'interno delle classi (il 69% dà il punteggio massimo, mentre il restante assegna un punteggio di 4/5). Per quanto riguarda la facilità con cui è possibile costruire la struttura con il telo elastico, il 39% assegna il punteggio 5/5, il 52% 4/5 e il rimanente si divide ugualmente tra i punteggi 2/5 e 3/5.

Per quanto riguarda la possibilità di realizzare le attività in classe, il 68% dei lettori dichiara di averne l'intenzione (di cui il 23% risponde "*decisamente sì*") mentre il restante dichiara di non esserne sicuro. Gli argomenti che sollevano maggiore interesse sono l'introduzione generale allo spazio-tempo (41%), le leggi di Keplero (41%), l'effetto fionda gravitazionale (31%) e i buchi neri (27%). Il 36% dei lettori, comunque, dichiara di voler testare tutte le attività proposte all'interno del manuale. Le motivazioni che spingono i lettori a rispondere in questo modo sono: la proposta è interessante e semplice da realizzare, le attività sono divertenti, utili ed in linea con il programma scolastico.

⁽¹⁾ Il manuale può essere scaricato gratuitamente da: <https://www.edizioniefesto.it/collane/circulidimensio/379-sperimentare-la-gravita-con-il-telo-elastico-linee-guida-e-trucchi-experience-gravity-with-the-rubber-sheet-guidelines-and-tricks>

Riguardo l'anno scolastico in cui i docenti vorrebbero realizzare le attività, avendo la possibilità di scegliere più alternative, il quinto anno riceve il 63% delle preferenze, come introduzione alla Fisica Moderna, mentre il terzo anno riceve il 50% dei voti, come supporto alla trattazione delle leggi di Keplero.

In aggiunta ai risultati del questionario allegato al manuale, per avere un confronto diretto con alcuni docenti, abbiamo inoltre organizzato un focus group. I commenti ricevuti in questo caso sono in linea con quelli ottenuti dal questionario. In particolare, questi docenti hanno apprezzato molto la struttura del libro e il modo in cui le attività sono descritte. Tutti i docenti coinvolti nel focus group hanno inoltre dichiarato di voler testare le attività proposte in modo da fornire un'opinione più precisa in seguito.

Sebbene le risposte al primo questionario e al focus group mostrano chiaramente l'intenzione dei docenti di portare nelle loro classi la nostra proposta, al momento non abbiamo ancora ricevuto risposte al secondo questionario, relativo alla realizzazione delle attività. Poiché l'attività proposta è da svolgersi con i ragazzi in presenza, pensiamo che l'assenza di risposte sia dovuta alla difficoltà di svolgere attività di questo tipo a causa all'emergenza sanitaria ancora in corso.

5. Conclusioni

In questo articolo abbiamo descritto un'attività di formazione docenti che abbiamo sviluppato al Dipartimento di Matematica e Fisica dell'Università Roma Tre con l'obiettivo di introdurre lo spazio-tempo e il telo elastico per trattare diversi argomenti legati alla gravità. La nostra proposta, frutto di un lungo studio che ha coinvolto pubblico generico, studenti e docenti, è stata raccolta in un manuale gratuito che contiene le istruzioni e le linee guida che un docente di scuola secondaria superiore può seguire per poter trattare i fenomeni in autonomia e con la necessaria confidenza. Sfortunatamente, a causa dell'emergenza sanitaria dovuta al Covid-19 non abbiamo ancora testimonianze dirette di docenti che hanno potuto replicare in classe le attività proposte. Nonostante ciò, le prime reazioni che abbiamo raccolto sul materiale sviluppato dimostrano che i docenti hanno accolto molto positivamente la proposta, e che sono intenzionati a inserirla nella loro didattica non appena questo sarà possibile. Il telo elastico, in effetti, si è dimostrato uno strumento efficace per trattare sia fenomeni già trattati a scuola (come le leggi di Keplero, l'effetto fionda gravitazionale, i sistemi doppi) sia fenomeni spiegabili solo con la Relatività Generale (come lenti gravitazionali e buchi neri); in particolare, il nostro studio che ha coinvolto oltre 200 studenti di scuola secondaria superiore ha mostrato come essi riescano a comprendere e visualizzare meglio i temi trattati. Per questo, pensiamo che il nostro lavoro possa contribuire in modo significativo allo sforzo di introdurre la Relatività Generale nelle scuole secondarie superiori. Per il futuro, continueremo a monitorare le risposte ai questionari allegati al manuale, ed in particolare valuteremo le reazioni alle attività

così come realizzate in classe dai docenti lettori. Inoltre, speriamo di poter seguire da vicino il lavoro dei docenti che hanno già collaborato con noi.

Bibliografia

- [1] MINISTERO DELL'ISTRUZIONE, DELL'UNIVERSITÀ E DELLA RICERCA, *Indicazioni Nazionali*, (2010) <https://www.gazzettaufficiale.it/gunewsletter/dettaglio.jsp?service=1&datagu=2010-12-14&task=dettaglio&numgu=291&redaz=010G0232&tmstp=1292405356450>
- [2] KERSTING M, *Phys. Educ.*, **54** (2019) 035008.
- [3] KERSTING M, HENRIKSEN E K, BØE M V AND ANGELL C, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, **14** (2018) 010130.
- [4] ZAHN A AND KRAUS U, *Eur. J. Phys.*, **35** (2014) 055020.
- [5] STANNARD W, BLAIR D, ZADNIK M AND KAUR T, *Eur. J. Phys.*, **38** (2017) 015603.
- [6] KERSTING M AND STEIER R U, *Sci. Educ.*, **27** (2018) 593.
- [7] PRICE R H, *Am. J. Phys.*, **84** (2016) 588.
- [8] GOULD R R, *Rev. title*, **84** (2016) 396.
- [9] FARR B, SCHELBERT G AND TROUILLE L, *Am. J. Phys.*, **80** (2012) 898.
- [10] BALDY E, *Int. J. Sci. Educ.*, **29** (2007) 1767.
- [11] POSTIGLIONE A AND DE ANGELIS I, *Phys. Educ.*, **56** (2021) 025020.
- [12] <https://matematicafisica.uniroma3.it/terza-missione/per-la-scuola/corsi-di-formazione/>
- [13] POSTIGLIONE A AND DE ANGELIS I, *Sperimentare la gravità con il telo elastico: linee guida e trucchi. Experience Gravity with the Rubber Sheet: Guidelines and Tricks (Edizioni Efestò, Rome 2020)*
- [14] POSTIGLIONE A AND DE ANGELIS I, *Phys. Educ.*, **56** (2021) 025019.