

Storia della Fisica e Didattica della Fisica come settori di ricerca integrati per il chiarimento concettuale e l'insegnamento della disciplina

Lucio Fregonese

Università degli Studi di Pavia – Dipartimento di Fisica e
SISFA (Società Italiana degli Storici della Fisica e dell'Astronomia)
e-mail: lucio.fregonese@unipv.it

Abstract. Attingendo alla propria esperienza di insegnamento in corsi di Storia della Fisica e di Storia della Scienza dedicati a studenti universitari e alla formazione degli insegnanti, si propongono alcune considerazioni di ordine specifico e generale sul ruolo della storia della fisica e della didattica della fisica come settori di ricerca integrati per un miglioramento del bagaglio culturale e disciplinare da offrire a studenti e insegnanti. La fisica, la sua storia e la sua didattica si configurano come specifici settori disciplinari con contenuti e metodi di indagine propri ed è quindi necessaria un'attenta riflessione a monte per farli interagire in modo efficace e finalizzato. Si discutono alcune difficoltà che il trasferimento didattico lascia nell'assimilazione di argomenti e nozioni fondamentali e si indica come una prospettiva storica sullo sviluppo della disciplina possa contribuire a migliorare la situazione. Si considerano poi due workshop interdisciplinari [1] [2], sviluppati in collaborazione tra ricercatori di didattica e di storia della fisica su argomenti di meccanica e di ottica, come iniziative concrete che si sono sforzate di integrare in modo coordinato le rispettive competenze a vantaggio della formazione degli insegnanti e della preparazione degli studenti.

Parole chiave: Fisica, Storia della fisica, Didattica della Fisica, Formazione degli insegnanti.

1 Introduzione

L'obiettivo di far interagire proficuamente fisica, storia della fisica e didattica della fisica pone sfide rilevanti perché ciascuno dei tre settori richiede singolarmente specializzazioni disciplinari e professionalizzazioni che difficilmente possono coesistere in un singolo individuo. Le necessità imposte dalla specializzazione e dalla professionalizzazione tendono più a sfavorire che a favorire un'interazione che si vorrebbe invece genuinamente interdisciplinare e finalizzata al raggiungimento di risultati migliorativi. Se per la fisica si può

pensare in prima approssimazione a un nucleo di contenuti “normalizzati”¹ da porre come obiettivo dell’insegnamento, per quanto riguarda gli altri due settori si registra invece una maggiore fluidità e una più difficile “normalizzabilità” per la pluralità degli approcci storiografici e didattici che si possono adottare e per il grado di correlazione che si decide di stabilire con tutta una serie di altri settori disciplinari limitrofi. Referenti prossimi per la storia della fisica sono la storia della scienza, la storia della filosofia e dell’epistemologia, la storia della matematica e, in una prospettiva più ampia, la storia in generale. Oltre che con i contenuti odierni della disciplina, la didattica della fisica si rapporta sul piano teorico con la pedagogia, la psicologia, l’epistemologia, le scienze cognitive, la sociologia e deve inoltre confrontarsi sul piano pratico con l’applicazione mirata dei risultati della ricerca per i molteplici ordini e obiettivi che la legislazione fissa per l’insegnamento scolastico.

La ricerca evidenzia in ogni caso le difficoltà che la trasmissione didattica incontra nella realtà concreta dell’insegnamento, individuando il nodo principale in una carente o mancata *appropriazione* dei contenuti a causa della modalità prevalentemente *informativa* con cui vengono offerti a chi impara². Il problema si accentua naturalmente quando si tratta di trasmettere i contenuti delle discipline scientifiche, in particolare della fisica, a causa della sua sofisticata articolazione concettuale. Vanno considerate contemporaneamente anche le difficoltà derivanti dal fatto che la costituzione dei nuclei informativi considerati centrali per i vari tipi e livelli dell’istruzione è condizionata a monte anche dalla strutturazione dei programmi scolastici e dal variegato mondo dei libri di testo. Da rimarcare in particolare la tradizionale organizzazione dei contenuti in parti tematiche distinte che poi difficilmente vengono rivisitate o messe in comunicazione, anche a causa della separazione cronologica a cui lo svolgimento sequenziale dei programmi le costringe. Come noto esempio, accade così che la meccanica, con tutto il suo corredo di sofisticate nozioni (massa, inerzia, forze statiche, forze dinamiche, forze apparenti, leggi newtoniane del moto, energia, gravitazione universale, ecc.), sia di fatto collocata all’inizio dei percorsi scolastici, quando tra l’altro anche a livello liceale solo parzialmente si padroneggiano gli strumenti matematici appropriati. La rivisitazione concettuale viene rimandata alla successiva formazione universitaria ma si creano intanto i presupposti per una difficile appropriazione dell’informazione che si intendeva trasmettere o addirittura per la formazione di concezioni errate.

¹ Nel senso kuhniano della “scienza normale” accettata dalle comunità scientifiche e codificata nei libri di testo, contrapposta alla scienza “rivoluzionaria” (o “straordinaria”) che si sviluppa sulle frontiere e genera nuova conoscenza e riconfigurazioni scientifiche. Si usano qui le categorie kuhniane come utile strumento per fare riferimento in prima approssimazione alle dinamiche di stabilizzazione e innovazione che caratterizzano l’impresa scientifica, senza peraltro aderire in toto alla sua interpretazione del progresso scientifico. Un’utile esposizione introduttiva sul problema del progresso scientifico si trova in [3].

² Vedi [4], 530 e i riferimenti bibliografici alla fine dell’articolo.

La ricerca in didattica della fisica ha affrontato questo genere di difficoltà, individuando in particolare diversi *ostacoli epistemologici e nodi concettuali* che intralciano gli studenti nel passaggio dal senso comune all'acquisizione dei contenuti stabilizzati della disciplina e indicando, insieme alle teorie del *cam-biamento concettuale* e ad altri strumenti, anche la storia della fisica come fonte da utilizzare per contribuire al loro superamento. Come luogo in cui la disciplina e i suoi cambiamenti si determinano, la storia della fisica si presenta certo come validissimo candidato a cui guardare ma si pone parallelamente il delicato problema della selezione e di un'applicazione che vada effettivamente a vantaggio della didattica. Come scegliere in un campo che è straordinariamente vasto e non univocamente "normalizzabile" per la pluralità delle prospettive e delle impostazioni storiografiche? Il raggiungimento di risultati fruibili richiede un'attenta elaborazione e calibrazione per evitare la divergenza specialistica o, all'estremo opposto, la sovrasemplificazione dei costanti avanzamenti che la ricerca storica offre. A ciò deve corrispondere uno sforzo di effettiva interazione con la ricerca didattica per il controllo e la rielaborazione delle applicazioni suggerite dalle grandi potenzialità che lo sviluppo storico della fisica ampiamente offre.

Nel seguito si sviluppano alcune considerazioni basate sulla personale esperienza di insegnamento di corsi di storia della fisica e di storia della scienza di livello universitario per vari target studenteschi. L'approccio bottom-up a partire dall'esperienza didattica rende più concreta la focalizzazione su alcuni punti generali significativi. Si discutono poi analogamente due recenti workshop interdisciplinari su argomenti di meccanica e di ottica come iniziative che hanno concretamente cercato di integrare la storia e la didattica della fisica per arricchire la formazione degli insegnanti della scuola.

2 Insegnamento universitario

Alcuni dati essenziali sui tre insegnamenti universitari che svolgo.

1. Storia della fisica, per la Laurea Triennale in fisica, di 48 ore con l'acquisizione di 6 CFU in Fisica, mutuabile anche per la Laurea Magistrale in fisica e per la Laurea Magistrale in matematica. Il corso rientra, insieme a quelli di didattica della fisica, comunicazione scientifica e altri corsi, nel curriculum magistrale in Didattica e storia della fisica. Il corso è inoltre inserito nell'elenco di quelli utilizzabili per il PF24, il limitatissimo percorso formativo di 24 CFU a cui oggi purtroppo si riduce, in coabitazione con le discipline psicologiche, pedagogiche e antropologiche, la formazione universitaria specifica per gli insegnanti della scuola.

2. Storia delle scienze, 48 ore per 6 CFU in Storia della scienza, inserito nel curriculum magistrale in Didattica e storia della fisica, mutuabile anche per la

Laurea Triennale in Scienze e tecniche psicologiche e per la Laurea Magistrale in Scienze della natura.

3. Storia della scienza, 36 ore per 6 CFU in Storia della scienza, per la Laurea Magistrale in Conservazione e restauro dei beni culturali.

Gli ultimi due corsi sono meno strettamente pertinenti ai temi qui di maggior interesse e si lasciamo perciò da parte.

Il corso di Storia della fisica si pone contemporaneamente due obiettivi: fornire strumenti per affrontare in modo adeguato l'oggetto di studio e la sua collocazione nel più ampio contesto della storia della scienza e contribuire inoltre, visto che conferisce CFU in Fisica, anche al consolidamento e arricchimento del bagaglio fisico degli studenti. Il fatto di avere una platea studentesca con preparazioni iniziali e obiettivi abbastanza differenziati pone naturalmente una serie di problemi. Il range varia da chi si dedicherà professionalmente alla fisica; ai laureandi o laureati in matematica e altre scienze che desiderano acquisire i CFU in fisica necessari per i requisiti del proprio curriculum universitario o per l'accesso ai concorsi nelle varie classi dell'insegnamento scientifico nella scuola; agli studenti del curriculum magistrale in Didattica e storia della fisica che, oltre allo sbocco nella docenza scolastica, possono avere in vista anche l'obiettivo della ricerca in storia o didattica della fisica.

Il corso cerca di orientare e arricchire gli studenti adottando una forte impostazione *metodologica* sui due fronti della storia e dei contenuti della fisica.

Sul versante storico, si cerca di dare strumenti storiografici essenziali a una platea che, in genere, non ha mai avuto occasione di riflettere sulla natura dell'indagine storica. Si attira l'attenzione sul carattere *aperto* e sempre rivedibile della ricerca storica per la sua inevitabile dipendenza dalle domande e dalle categorie interpretative che lo storico pone, considerando di conseguenza l'intrinseca non "normalizzabilità" della storia rispetto alle materie scientifiche. Si sottolinea però come allo stesso tempo il dibattito storico converga verso "normalizzazioni" parziali e provvisorie, utilizzabili come mappa di orientamento e come punto di partenza per la ricerca. Come caso e fonte significativa, sebbene non unica, si indica la *Storia della scienza* [5] edita dall'Istituto dell'Enciclopedia Italiana, in 10 volumi per un totale di circa 9.000 pagine, con il contributo di una vasta comunità di esperti di livello internazionale e un range che spazia dalla scienza antica fino al modello della "big science", la nuova scala scientifica innescata dal progetto Manhattan per la bomba atomica, in cui non sempre gli studenti hanno la consapevolezza di essere immersi. Una discussione dei titoli dei volumi mette gli studenti di fronte a tutta una serie di categorie storiografiche, di tipo cronologico, geografico, culturale, di civiltà, usate singolarmente o in combinazione, e li invita a riflettere su questo punto e sulla vastità del campo e delle corrispondenti specializzazioni professionali richieste per affrontarlo adeguatamente.

Su questa base si giustifica la scelta del corso di delimitare l'estensione tematica a vantaggio dell'approfondimento di tappe specifiche, da cui però ricavare lezioni metodologiche generali analizzando e riflettendo sull'indagine storico-scientifica che le riguarda. Un esame del 5° volume [6], in particolare degli indici e dell'introduzione generale [7], fornisce un quadro di riferimento storiografico generale entro cui collocare la prima parte del corso, dedicata alla "Rivoluzione scientifica" e all'approfondimento di punti salienti per lo sviluppo della fisica. Particolare attenzione viene dedicata alle complesse figure di Galileo e di Newton.

L'approfondimento di Galileo offre un termine di paragone che gli studenti sono invitati a mettere in relazione con alcune ricostruzioni ingenue o anacronistiche che, grazie anche alla diffusione attraverso il web, continuano a sopravvivere nonostante il raffinamento costante della ricerca. Gli studenti sono così messi di fronte al fondamentale problema del controllo e della scelta della letteratura secondaria. Affrontando la scienza di Galileo secondo la recente prospettiva della "epistemologia storica", si fa vedere come le domande particolari che lo storico pone abbiano un senso solo all'interno di un quadro di riferimento che costantemente si sforza di ricostruire l'intera rete epistemologica originaria [8]. La fondamentale determinazione galileiana della legge della caduta dei gravi si interpreta così più adeguatamente non come obiettivo predeterminato ma come risultato che emerge in correlazione con un'intera serie di altri temi e nodi concettuali, matematici e sperimentali della meccanica galileiana: l'isocronismo del pendolo, la non immediata disponibilità di adeguati strumenti matematici per trattare il moto pendolare curvilineo, il ruolo del piano inclinato, il graduale ingresso del tempo come variabile che Galileo utilizza nella descrizione della caduta dei gravi. Per l'importanza che attribuisce alla costruzione effettiva delle rappresentazioni scientifiche del mondo, l'epistemologia storica si pone come interessante ponte con gli approcci didattici che affrontano la conoscenza scientifica da prospettive epistemologiche o evolutive.

La meccanica di Newton si caratterizza, a differenza di quella galileiana, per una forte emersione nella scienza di base e nell'insegnamento attuali e il suo nome viene immediatamente associato alle tre leggi del moto e alla legge della gravitazione universale. Si offrono così notevoli possibilità per un uso della storia a valido supporto della disciplina. Il grado di appropriazione e interiorizzazione di concetti fondamentali da parte degli studenti viene saggiato con alcuni test iniziali. Senza preavviso, si chiede ad esempio di richiamare la legge *fondamentale* (sottolineandolo) della gravitazione universale e di dire se due cubi materiali omogenei, posti a distanze non troppo grandi rispetto alle loro dimensioni (sottolineandolo), si attirano con la legge $F \propto 1/r^2$ tra i centri di massa. Da anni, la risposta affermativa, quella errata, prevale su quella corretta con percentuali ben superiori al 50%. Una discussione partecipata permette di individuare i motivi della mancata appropriazione. La stratificazione didattica

lascia di fatto un ricordo in cui la legge *fondamentale*, valida per masse *punti-formi*, si mescola confusamente con le altre due leggi $F \div 1/r^2$ che valgono invece per i corpi *estesi*: in modo rigoroso tra i centri di due sfere materiali omogenee e solo in modo approssimato per masse piccole rispetto alla distanza reciproca. A questo punto gli studenti sono in grado di ricomporre rapidamente le loro conoscenze, che in vari casi sono di livello tecnico assai avanzato per la trattazione nei corsi universitari. L'intera situazione viene utilizzata per una serie di considerazioni metodologiche e per ricostruire i contenuti fisici su base storica. Gli studenti sono invitati in primo luogo a riflettere sul carattere fortemente astratto, controintuitivo e altamente sofisticato della teoria newtoniana della gravitazione universale. Si richiede ad esempio che un punto materiale del nostro corpo interagisca con un punto materiale posto agli antipodi senza alcuna attenuazione dell'intensità dell'azione gravitazionale da parte dei quasi 13.000 km di materia terrestre interposta, in contrasto con l'esperienza comune che mostra un'elevata efficacia degli spessori materiali nello schermare le azioni fisiche. La sottolineatura di questa "assurdità" riesce sempre a risvegliare interesse e curiosità per il percorso intellettuale di Newton. Gli studenti sono anche invitati a rifocalizzare l'attenzione sul fatto analogamente controintuitivo che la gravitazione universale newtoniana apparenta fisicamente i moti che si svolgono nel piccolissimo ambito terrestre con quelli dei corpi su scala cosmologica. Un esame del percorso di Newton permette di seguire la complessa rete epistemologica che lo condusse a costruire una rappresentazione del mondo così lontana dal senso comune ma contemporaneamente così efficace nel dare una spiegazione unificata e quantitativa dei moti terrestri e celesti. Approfondendo contestualmente la formulazione delle tre leggi del moto insieme al processo di vera e propria *costruzione* del concetto di "forza" che Newton adotta, si arriva alla fine a cogliere più chiaramente il senso profondo della fisica del moto esposta nei suoi famosi *Principi matematici della filosofia naturale*. All'inizio del terzo libro Newton afferma infatti che "le leggi e le condizioni dei moti e delle forze" sono stabilite come "principi della filosofia, non tuttavia filosofici, ma soltanto matematici"³ [9], intendendo così che le leggi del moto e le leggi delle forze sono fissate come principi quantitativi che descrivono i fenomeni con grande efficacia ma senza porsi come principi "filosofici" capaci di penetrare in modo più profondo e intellegibile la realtà naturale. L'accettazione e la padronanza dei principi matematici sono in ogni caso una premessa indispensabile per poter eventualmente "disputare di cose filosofiche" [9]. In

³ Questa interpretazione dell'originale latino è confermata dalla traduzione inglese pubblicata nel 1729 da Andrew Motte, disponibile anche in riedizione moderna [10]. La traduzione italiana di riferimento [11] identifica "*haec*" (per noi i "principi soltanto matematici", ovvero "le leggi e le condizioni [matematiche] dei moti e delle forze") con le "cose [realmente] filosofiche", invertendo così la gerarchia che Newton stabilisce tra i piani della filosofia e della matematica. Nell'aggiornamento della versione italiana [12] la traduzione e l'inversione dei piani rimangono immutate.

questi fondamentali pronunciamenti si trova riassunto il complesso cammino che Newton fece per distaccarsi dai principi fondamentali del meccanicismo cartesiano – stabiliti su basi considerate razionali e quindi intellegibili ma incapaci allo stesso tempo di spiegare i dettagli fini del sistema planetario – e imboccare il cammino che lo condusse al proprio sistema alternativo. Egli stesso non rinuncerà peraltro al tentativo di comprendere la base fisica della gravitazionale, esplorando in particolare la possibilità di ricavarla dall’azione di un etere estremamente sottile ed elastico, ma senza trovare soluzioni in grado di soddisfarlo. Questa straordinaria dialettica tra fisica e matematica e tra intellegibilità diretta e astrazione scientifica viene indicata agli studenti come un’illuminante fonte storica che può aiutare a muoversi in modo costruttivo tra gli analoghi livelli e dilemmi che incontrano durante gli studi. Il famoso invito al “shut up and calculate” in cui prima o poi si imbattono viene così più chiaramente ricollegato alla profonda questione filosofica della “irragionevole efficacia della matematica” [13] che si presenta così evidente nel sistema newtoniano e che si ripropone insistentemente nello sviluppo della fisica fino ai nostri giorni.

La seconda parte del corso rivisita e approfondisce altri nuclei concettuali fondamentali sfruttando la loro evoluzione storica. Il focus è sul moto browniano e sul contributo che l’interpretazione einsteiniana di inizio Novecento diede all’accettazione fisica dell’ipotesi atomistica. Si fa vedere come, per il suo carattere universale riguardante anche la materia inorganica, lo studio del fenomeno sia passato dall’iniziale contesto biologico alla fisica ma ponendola in seria difficoltà per l’incapacità, compresa la teoria cinetico-molecolare del calore, di spiegare quantitativamente le osservazioni. Questa situazione diede tra le altre cose nuovo spazio alle teorie di stampo vitalistico. Riprendendo il dibattito storico, si approfondisce il concetto di temperatura e si riesamina l’equipartizione dell’energia giungendo successivamente, attraverso i nuovi risultati sulla pressione osmotica nei liquidi, alla nuova soluzione offerta da Einstein per il problema del moto browniano.

Complessivamente, il corso vuole fornire un bagaglio di conoscenze storiche specifiche e di strumenti metodologici generali che gli studenti e i futuri insegnanti possono tenere presenti per la riappropriazione, l’approfondimento e l’insegnamento dei corrispondenti capitoli della fisica.

3 Workshop storico-didattici per gli insegnanti della scuola secondaria

Nel 2019 e nel 2020 la SISFA (Società Italiana degli Storici della Fisica e dell’Astronomia) e l’URDF (Unità di Ricerca in Didattica della Fisica) dell’Università degli studi di Udine hanno promosso e svolto due workshop interdisciplinari di 20 ore ciascuno, in presenza il primo e in modalità webinar

il secondo, rivolti agli insegnanti della scuola secondaria, riconosciuti con valore di corso di formazione sulla piattaforma SOFIA del MIUR. Queste iniziative si sono poste l'obiettivo di integrare in forma coordinata e non occasionale le competenze specifiche della ricerca in didattica e in storia della fisica a vantaggio dell'arricchimento culturale, critico e scientifico degli insegnanti. Le relazioni e le attività offerte sono state tenute da esperti nei due settori, tra cui diversi studiosi che in passato hanno attivamente contribuito alle scuole di formazione per gli insegnanti che si sono eterogeneamente susseguite e stratificate nel tempo (SILSIS, TFA, PAS). Tra i vari scopi c'è stato quindi anche quello di rimettere a confronto competenze consolidate per stimolare nuova riflessione e progettualità in vista dell'auspicabile ripresa di un'adeguata formazione di livello universitario per l'insegnamento nella scuola.

Il primo workshop, "Il concetto di Massa tra storia e didattica della fisica e dell'astronomia" [1], ha preso spunto dalla recente ridefinizione dell'unità di massa sulla base della costante di Planck, un importante cambiamento che solleva in modo stimolante il problema dell'aggiornamento dei contenuti nei programmi e nei libri di testo. Aperto da una relazione a invito sulla ridefinizione del kilogrammo, il workshop ha poi offerto una serie di relazioni storiche che si sono snodate affrontando i passaggi storici cruciali del concetto di massa: dalla nozione newtoniana di "quantità di materia" correlata all'inerzia meccanica dei corpi, al concetto machiano della massa, alla massa elettromagnetica, alla massa relativistica, alla correlazione tra massa inerziale e massa gravitazionale secondo il principio di equivalenza di Einstein, alla massa nella teoria quantistica dei campi. Il quadro complessivamente delineato ha cercato di illustrare la complessa evoluzione del concetto per stimolare la riflessione critica degli insegnanti sul proprio bagaglio disciplinare e sul delicato compito di fornire nozioni accurate, aggiornate e accessibili agli studenti. Si può osservare a questo riguardo come i libri di testo scolastici non sempre offrano un quadro soddisfacente. Un caso limite è quello di un trasferimento che lascia implicitamente il concetto di massa nella problematica forma della "quantità di materia" da cui lo stesso Newton prese le mosse. In altri casi non si arriva a una presentazione del concetto relativistico di massa in forma aggiornata e soddisfacente. In altri casi una trattazione puramente "numerica" della massa inerziale e della massa gravitazionale (favorita dal fatto che assumono lo stesso valore numerico per la particolare scelta delle unità di misura) conduce a una perdita del contenuto concettuale delle due nozioni e oscura il significato profondo del principio di equivalenza nella relatività generale. La parte storica del workshop si è integrata con relazioni, percorsi ed esperienze didattiche che, tra le varie cose, hanno affrontato la misurazione della massa e il rapporto massa-energia nella dinamica relativistica. I partecipanti hanno svolto diversi lavori di gruppo dedicati alla progettazione e all'applicazione didattica.

Il secondo workshop, "La luce e l'ottica tra storia e didattica della fisica e dell'astronomia" [2], si è tenuto con modalità e obiettivi simili proponendo

un'ampia panoramica storica e diverse possibilità per il trasferimento didattico. Il percorso storico si è snodato affrontando l'ottica geometrica, i modelli di rappresentazione dei fenomeni luminosi, l'ottica fisica, la polarizzazione ottica, la spettroscopia, la determinazione di Foucault della velocità della luce in relazione ai coevi dibattiti sulla natura ondulatoria o corpuscolare del fenomeno, l'interpretazione elettromagnetica di Maxwell, lo sviluppo della successiva rappresentazione quantistica. La parte didattica ha offerto attività e proposte riguardanti gli esperimenti di Newton con i prismi, i fenomeni dei colori, la spettroscopia, la spettrometria, la polarizzazione, la diffrazione e l'interazione luce-materia. La progettazione e l'applicazione didattica sono state analogamente affrontate in gruppi di lavoro dedicati.

La presentazione della fisica e della sua storia come processo dinamico che adotta schemi concettuali continuamente rivisti e raffinati nel tentativo di comprendere la ricchissima complessità del mondo fisico può fornire, insieme all'individuazione delle appropriate modalità per il trasferimento didattico, un'utile base di competenze specifiche e metodologiche che possono incentivare l'aggiornamento, la riappropriazione della materia, l'analisi critica dei libri di testo e l'acquisizione dell'approccio long-term learning.

Bibliografia

- [1] *Il concetto di massa tra storia e didattica della fisica e dell'astronomia*
<http://www.sisfa.org/workshop-2019/>
<https://www.youtube.com/watch?v=etcOYKOoMCc&list=PLrM-rb3QIPdFCW-jIc7yNbrifh4oDZ3FW&index=3>
- [2] *La luce e l'ottica tra storia e didattica della fisica e dell'astronomia*
<http://www.sisfa.org/workshop-2020/>
- [3] Losee J. 2001 *A historical introduction to the philosophy of science*, Oxford: Oxford University Press, 197-209.
- [4] Michellini M. 2020 Il contributo della storia della fisica alla ricerca - *Società Italiana degli Storici della Fisica e dell'Astronomia. Atti del 39. Convegno annuale: Pisa, 9-12 settembre 2019* (a cura di La Rana A., Rossi P.), Pisa: Pisa University Press, 529-541.
- [5] *Storia della scienza 2001-2004*, Roma: Istituto della Enciclopedia italiana, 10 voll.
- [6] *La rivoluzione scientifica 2002*, [5] vol. 5, Roma: Istituto della Enciclopedia italiana.
- [7] Garber D. 2002 Introduzione. *La rivoluzione scientifica*, [6], 1-16.
- [8] Renn J., Damerow P., Rieger S., Giulini D. 2000 Hunting the White Elephant: When and How did Galileo Discover the Law of Fall? - *Science in Context* **13(3-4)** 299-419.

[9] Newton I. 1726 *Philosophiae naturalis principia mathematica. Auctore Isaaco Newtono*, Londini: apud Guil. & Joh. Innys, regiae Societatis typographos, 386.

[10] Newton I. 1962 *Sir Isaac Newton's Mathematical principles of natural philosophy and his system of the world*, Berkeley; Los Angeles: University of California press, 2 voll, vol. 2, 397.

[11] Newton I. 1965 *Principi matematici della filosofia naturale* (a cura di Pala A.), Torino: UTET, 601.

[12] Newton I. 1989 *Principi matematici della filosofia naturale* (a cura di Pala A.), Torino: UTET, 607.

[13] Wigner E. P. 1960 The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences. Richard Courant Lecture in Mathematical Sciences delivered at New York University, May 11, 1959 - *Communications on Pure and Applied Mathematics* **13** 1-14.