Laurence Viennot

UMR Laboratoire Matière et Systèmes Complexes (MSC)
Université de Paris

Pregiudizi di conferma in fisica: due varianti cui prestare attenzione[*]

A fronte della necessità di un maggiore sforzo per sviluppare le attitudini critiche negli alunni e negli studenti, questa nota si concentra su uno dei pregiudizi cognitivi che spesso sono di ostacolo in questa materia. Nella sua forma più tipica, questo pregiudizio consiste nella propensione a validare un'argomentazione perché si presume che la sua conclusione sia corretta. Tre esempi qui di seguito illustrano due varianti di questo pregiudizio, in fisica. La mongolfiera, l'espansione irreversibile di un gas ideale e la caduta libera servono per delineare questi due effetti di oscuramento del senso critico, aiutando quindi a difendersi da essi.

Introduzione

Lo sviluppo del pensiero critico viene indicato, insistentemente e con sempre maggior enfasi, come obiettivo prioritario dell'educazione scientifica. In questi tempi di voci e di smentite in merito alle acquisizioni della scienza - per esempio, la Terra sarebbe piatta - verrebbe da pensare che questo sia il bersaglio prioritario dell'educazione al pensiero critico. Senza dubbio, ma si tratta di promuovere uno sforzo globale, in grado di permeare tutto l'insegnamento.

Le spiegazioni in circolazione, anche in ambito scolastico o universitario, specie nelle lezioni di fisica, possono utilmente essere oggetto di analisi critica, sia per chi le riceve, sia per chi le propone ai propri studenti [1].

Questa nota si concentra sulla difficoltà di stimare la validità delle spiegazioni in fisica, anche in un contesto didattico ordinario. In particolare, un effetto ben noto a questo proposito è il pregiudizio di conferma (cfr. ad esempio [2])[**]. Ciò consiste nel dare più valore agli argomenti che sostengono ciò che si pensa sia vero piuttosto che a quelli che portano alla conclusione opposta. Il testo seguente si sofferma su due varianti di questo effetto. Verranno presi in esame, a titolo d'esempio, il caso dell'ipotesi "isobarica" per la mongolfiera [3], quello di una trasformazione irreversibile non quasi statica, impropriamente trattata come se fosse quasi statica [4] e infine l'elogio di un ragionamento attribuito a Galileo sulla caduta dei corpi ([5], p. 307).

Nei primi due casi [3-4], un ragionamento matematicamente corretto porta ad un buon risultato, pur essendo basato su un modello che contraddice l'obiettivo stesso perseguito per l'esercizio. Nel terzo caso, le ipotesi aggiuntive che precisano il contesto fisico salvano il risultato, senza peraltro convalidare il ragionamento. Queste analisi mirano a promuovere una vigilanza critica e una messa in discussione *a priori* utili nell'insegnamento così come nella divulgazione. Precisiamo subito che l'interesse di questi esempi è che essi non si riferiscono a ragionamenti del tutto estranei alla fisica, tutt'altro, e che essi si presentano sotto le apparenze di una legittimità formale.

L'efficienza matematica ingannevole: la mongolfiera «isobara»

È pratica corrente trattare gli esercizi sulla mongolfiera ammettendo che «la pressione atmosferica» sia ovunque la stessa all'interno e all'esterno il pallone,

---

[*] Articolo originale pubblicato sulla rivista *Bulletin de l'Union des Physiciens* [BUP] col titolo *Biais de confirmation en physique: deux variantes à surveiller* (**115**, pp.1081-9, 2021), per gentile concessione della rivista. Traduzione a cura di Giacomo Torzo e Riccardo Urigu.

[**] Nella presente traduzione si è reso ovunque con «pregiudizio» il sostantivo francese «biais» [di etimo incerto] da cui il termine inglese «bias» (obliquo, inclinato), di uso corrente negli studi di psicologia cognitiva. Cfr.: www.treccani.it/vocabolario/bias/ ; en.wikipedia.org/wiki/Confirmation_bias

aggiungendo talvolta che le cose stanno così perché l'involucro è aperto. Ma se la situazione fosse isobarica, il pallone si schianterebbe a terra e l'involucro non potrebbe restare gonfio.

In questo caso, la cosa peggiore è senza dubbio il fatto di ignorare il legame essenziale tra la portanza e il gradiente di pressione (cfr. **Riquadro 1**). Quanto ad arguire che le variazioni di pressione interna ed esterna sono molto piccole e possono quindi essere trascurate, dobbiamo constatare che tale semplificazione letteralmente «ammazza» il fenomeno. L'impressionante astensione critica a questo proposito osservata universalmente tra insegnanti di fisica e autori di libri di testo [6], ne fa un prototipo di rituale di insegnamento.

Riquadro 1

Calcolo e risultato esatti sulla base di un'ipotesi assurda

La consuetudine per gli esercizi riguardanti la mongolfiera è di assumere che le pressioni interne ed esterne siano le stesse all'interno e tutt'intorno alla mongolfiera, uguali alla «pressione atmosferica» p_0. Sulla base di questa ipotesi, il calcolo atteso è il seguente. Per una mongolfiera di massa totale m (parti solide), dato il teorema di Archimede e l'espressione della densità ρ in un gas di massa molare (media) M, $\rho=M/RT$ (R costante dei gas), il bilancio newtoniano all'equilibrio si scrive:

$$m + \left(\frac{M}{R}\frac{p_{int}}{T_{int}} - \frac{M}{R}\frac{p_{ext}}{T_{ext}}\right)V = 0 \qquad (1)$$

ovvero, supponendo che le pressioni interne ed esterne siano ovunque uguali al loro valore in prossimità dell'apertura p_0:

$$\left[\frac{1}{T_{ext}} - \frac{1}{T_{int}}\right] = \frac{mR}{p_0 MV} \qquad (2)$$

In realtà, l'assunzione di una situazione isobarica è inappropriata. In tale ipotesi, la mongolfiera non potrebbe essere né gonfiata né mantenuta in aria. Infatti la portanza in un fluido di densità ρ all'equilibrio in presenza di un campo gravitazionale g comporta un gradiente di pressione, secondo la relazione $\Delta p = -\rho g \Delta z$.
A livello dell'apertura, la pressione interna del pallone è uguale alla pressione esterna. Poiché la densità interna è inferiore alla densità esterna, la pressione interna diminuisce meno rapidamente con l'altitudine rispetto all'esterno. Essa è quindi ovunque maggiore della pressione esterna (in particolare nella parte superiore dell'involucro) tranne che all'apertura. Questo spiega perché il pallone resta gonfio e perché è possibile il suo sollevamento. Per un pallone cilindrico, un calcolo al primo ordine basato sui gradienti di pressione porta alla stessa relazione (2) della soluzione usuale. Naturalmente, il caso generale discende dal teorema del gradiente* che conduce al teorema di Archimede.

* Teorema del gradiente, applicabile ad una superficie chiusa S che delimita un volume V, e ad un campo scalare, qui p:

$$\iint_S p\,\mathbf{dS} = \iiint_V \mathbf{grad\ p}\, dV$$

in un fluido in equilibrio di densità ρ si ha grad $p = \rho g$. Segue immediatamente il teorema di Archimede.

Tuttavia, è anche il caso di notare che l'assunzione impropria conduce, a partire da un calcolo corretto della spinta di Archimede, ad un risultato non meno corretto al primo ordine.

Il valore numerico trovato per la spinta di Archimede - metodo classico - è poco condizionato dall'ipotesi incriminata, e questo rende questo esempio un caso da manuale.

Una volta assunto che le pressioni medie interne ed esterne sono uguali ad uno stesso valore, la «pressione atmosferica», l'errore commesso nel loro valore ad ogni quota è in effetti molto piccolo e modifica di poco il risultato del calcolo delle densità corrispondenti che, d'altra parte, dipendono sensibilmente dalla temperatura. La spinta di Archimede va bene, ma la differenza tra le pressioni è concettualmente indispensabile. Pur essendo di certo molto piccola, questa differenza, moltiplicata per le centinaia di metri quadrati di involucro in questione, rende bene conto della portanza. Questo esempio illustra bene la distinzione che è importante fare tra una piccola variazione senza conseguenze, ad esempio in questa fattispecie quella del campo gravitazionale con l'altitudine, rispetto ad una variazione assolutamente costitutiva del fenomeno studiato, nel caso presente quella della pressione con l'altitudine, che non si può trascurare senza danno concettuale. Ecco qui, condensato in estrema sintesi, tutto il dibattito sulla distinzione tra le semplificazioni ammissibili, senza le quali saremmo eccessivamente paralizzati, e quelle che uccidono il fenomeno.

Il punto senza dubbio più importante di questa storia è che un calcolo corretto porta a un risultato corretto - un caso di «efficienza matematica» - il tutto fondato su un'ipotesi inappropriata. In questo modo il giudizio critico viene anestetizzato.

Un calcolo che riesce sulla base di una modellizzazione distruttiva per la comprensione costituisce una trappola peggiore per l'analisi. Verosimilmente siamo in presenza di una formidabile variante del pregiudizio di conferma, a patto che non si tratti semplicemente di un rituale radicato nelle pratiche e, per questo fatto, non messo in discussione.

Un secondo esempio di «efficienza matematica ingannevole» ci mostra che ciò può avvenire senza che si tratti di un procedimento di risoluzione rituale.

Un'efficienza matematica ingannevole meno rituale: l'espansione non quasi statica di un gas perfetto

Uno studio recente [4] si concentra sia sulle difficoltà dei docenti tirocinanti verso il termine della loro formazione (master MEEF*, secondo anno) in materia di analisi critica che sulle loro eventuali decisioni per l'insegnamento. Qui si è scelto di evitare che la spiegazione contestata fosse una spiegazione abituale, in modo da distinguere i parametri interpretativi. Otto insegnanti tirocinanti hanno preso parte a interviste individuali approfondite (di circa 45 minuti) su un esercizio risolto riprodotto nel **Riquadro 2**. Si possono segnalare diversi difetti in questo procedimento risolutivo, come la notazione differenziale impropria per indicare un lavoro elementare, che non è il differenziale di una funzione di stato. Si può anche sottolineare che è il gruppo mobile gas-pistone che riceve il lavoro in questione. Ma al di là di questi aspetti criticabili, un punto del tutto paradossale ed altamente criticabile di questo testo è che, molto tipicamente, questo genere di esercizio deve sottolineare la differenza tra una trasformazione quasi statica (sequenza di stati di equilibrio, secondo la formulazione usuale) e una trasformazione non quasi statica, per la quale gli stati intermedi della trasformazione non possono essere descritti da quantità intensive (pressione e temperatura).

---

* MEEF: acronimo per "Professioni dell'insegnamento, dell'istruzione e della formazione".

Ora, questa risoluzione sembra funzionare in senso contrario a questo obiettivo. Nel caso non quasi statico e a pressione esterna assunta costante, l'espressione del lavoro ricevuto dall'insieme pistone-gas in espansione irreversibile non quasi statica tra un volume V_A ed un volume V_B a pressione esterna p_B costante può essere calcolato molto semplicemente: $W_{irr} = p_B\,(V_A - V_B)$. Basta un semplice calcolo per stabilire questa risposta corretta senza nessun altro presupposto particolare, poiché si tratta di valutare il lavoro della forza esterna costante quando il volume spazzato dal pistone è $(V_A - V_B)$. È appunto questa la risposta alla quale giunge la risoluzione del **Riquadro 2**, tramite uno svolgimento senza errore di calcolo. Ma questo si basa su un modello opposto all'obiettivo concettuale dell'esercizio: le quantità p e T vi appaiono come se fossero definite durante la trasformazione, per non parlare dell'equazione dei gas ideali, non valida al di fuori dell'equilibrio. Pur essendo matematicamente «efficiente», questa soluzione non è valida sul piano della modellizzazione. Quanto al mancato esercizio dell'analisi critica, questa situazione deriva dall'efficienza matematica ingannevole. Si sco-

Riquadro 2

Un testo altamente criticabile tratto da un opuscolo di soluzioni di esercizi per studenti universitari del primo anno

Una mole di gas perfetto si trova in un cilindro chiuso da un pistone mobile. Essa subisce un'espansione dalla pressione p_A alla pressione p_B $(p_A > p_B)$ a temperatura costante T. Calcolare il lavoro svolto su questo gas nei due casi seguenti:

- Espansione irreversibile*, a pressione esterna costante $(p_{ext} = p_B)$
- Espansione reversibile.

Caso irreversibile

Lavoro a $T = cost$ per l'espansione irreversibile di una mole di gas perfetto: W_{irrev}

$$dW = -pdV < 0$$

$$dW_{irrev} = -p_{ext}dV = -p_B dV \text{ (poiché } p_{ext} = p_B)$$

Per il nostro sistema: $pV = NRT$ e $N = 1$ mol.

Quindi

$$V = \frac{RT}{p} \quad \text{e} \quad dV = -RT\frac{dp}{p^2}$$

$$dW_{irrev} = -p_B dV = RTp_B\frac{dp}{p^2}$$

$$W_{irrev} = \int_A^B RTp_B\frac{dp}{p^2} = RTp_B\left[\frac{1}{p_A} - \frac{1}{p_B}\right] = p_B(V_A - V_B)$$

Caso reversibile

[…]

* L'esaminatrice specifica che anche questa trasformazione "irreversibile" non è quasi statica.

pre che l'effetto di due operazioni successive, una l'inversa dell'altra, una derivazione e un'integrazione, viene annullato e che alla fine contano solo gli stati iniziale e finale della trasformazione, che sono effettivamente stati di equilibrio. Ciò salva il risultato, ma non può giustificare una modellizzazione scorretta.
La definizione di due punti critici (*C1*: le quantità intensive p e T non sono definite durante la trasformazione non quasi statica; *C2*: la relazione dei gas perfetti $pV = NRT$ non è valida nel corso di una trasformazione non quasi statica) e, per ognuno dei punti, di tre livelli di atteggiamento critico (ferma accettazione del testo, ferma critica del testo, posizione mitigata) strutturano la codifica delle interviste per quanto riguarda gli aspetti critici. Relativamente all'adozione di una spiegazione per l'insegnamento nel primo anno di licenza, vengono definiti gli stessi tre livelli di consenso per il punto *C3*: «Possiamo scegliere di utilizzare nell'insegnamento la spiegazione che abbiamo appena riconosciuto come incoerente, senza alcuna critica».

Tra i principali risultati, osserviamo che, dopo venti minuti di riflessione dialogica su questo testo, solo la metà dei partecipanti aveva espresso una ferma critica all'uso di quantità intensive non definite (*C1*). Per quanto riguarda l'utilizzo dell'equazione dei gas perfetti durante la trasformazione, solo 3 docenti tirocinanti su 8 hanno espresso fermamente la necessità di rinunciarvi, gli altri mostrandosi a volte molto sicuri del fatto loro: « $pV = NRT$. È la legge dei gas perfetti, quindi questo è sicuro». E alla fine del dibattito, dopo aver preso coscienza di queste incongruenze, solo la metà dei partecipanti sosteneva decisamente di escludere dal proprio insegnamento questa affermazione complicata, inusuale ed incoerente (*C3*). Un commento sintomatico illustra la peculiarità dell'efficienza matematica: «Ah sì... sarebbe un buon esercizio però, ecco perché, direi, beh, non è comunque male come applicazione della teoria classica, trovo, mi piace come esercizio».

Alla fine di questo studio, vi è quindi una forte presunzione che quella che è stata appena definita come «efficienza matematica» (assenza di errori di calcolo, risultato corretto) possa apparire come un valore di per sé nei criteri di scelte esplicative dei docenti in formazione, e questo anche a costo della coerenza e della semplicità.

Un elemento arricchisce questa constatazione. Non è raro che i docenti in formazione caratterizzino da sé stessi (5 su 8) l'ostacolo alla critica rappresentato dall'efficienza matematica: «Si ha l'impressione che, con tutti questi calcoli, in fondo, sia corretto, sia scientifico e se qualcosa lo blocca, è colpa sua». Tuttavia, come pretesto per dispiegare alcune sequenze di calcolo algebrico nell'insegnamento, «sarebbe un buon esercizio», secondo alcuni; anche se alcuni altri esprimono il loro fermo rifiuto di insegnare in modo acritico questa correzione fallace. Almeno si tratta, alla fine dell'intervista, di scelte fatte con cognizione di causa.

Questo esempio rafforza l'idea che «l'efficienza matematica fuorviante» possa fortemente influenzare il giudizio dei docenti in tirocinio, sia per quanto riguarda l'analisi critica che la scelta della spiegazione da adottare nell'insegnamento. Quanto meno questa congettura non interferisce con il solo fattore della consuetudine, qui molto felicemente escluso.

La conclusione salvata: la caduta dei corpi

L'ultimo esempio proposto riguarda un estratto da un recente libro di Stanislas Dehaene (2) [5]: «Lo sappiamo che il famoso esperimento di Galileo, in cui fece cadere oggetti dalla torre di Pisa per provare che la caduta dei corpi non dipende dalla loro massa, potrebbe non aver mai avuto luogo? Prima di tutto si tratta di un esperimento mentale: Galileo immagina che si lascino cadere due sfere, una leggera e l'altra pesante, dalla cima della torre di Pisa. Egli ragiona per assurdo.

Supponiamo, dice, che la più pesante debba cadere più velocemente. Immaginiamo di attaccarla all'altra con un filo di massa trascurabile.

«L'insieme delle due sfere, formando un oggetto più pesante, dovrebbe cadere ancora più velocemente. Ma questo è assurdo, perché la sfera leggera, che cade meno velocemente, dovrebbe rallentare quella più pesante. Questo insieme di contraddizioni ha solo una via d'uscita: tutti gli oggetti cadono alla stessa velocità, indipendentemente dalla loro massa».

È su questa parafrasi del ragionamento galileiano che s'incentra l'analisi qui presentata, e non sul testo di Galileo (cfr. il testo «*Discorsi intorno a due nuove scienze*», citato e analizzato da Koyré [6]), che è più complesso ([3]).

Un primo sospetto di nullità deriva dal fatto che la conclusione del ragionamento proposto è contraddetta nella pratica. Tutti sanno che una bottiglia, diciamo da un litro, piena d'acqua e lanciata da un terzo piano, scende più velocemente che se fosse vuota.

Ci sono forse elementi di contesto non menzionati nel ragionamento in questione che spiegano perché è in contraddizione con i fatti osservati? Ma, appunto, nessuno di questi elementi atti a validare il ragionamento vi è menzionato. In quanto tale, il ragionamento non è valido ed è falso affermare: «Questo insieme di contraddizioni ha un solo esito: tutti gli oggetti cadono alla stessa velocità, qualunque sia la loro massa». La soluzione proposta dalla fisica, si sarà capito, è l'esistenza di un attrito viscoso con l'aria che circonda l'oggetto in moto, fenomeno che, ad esempio, incide più sul movimento di caduta di un paracadutista che su quello di un oggetto compatto con uguale massa. Qualsiasi altro fenomeno che leghi la forma degli oggetti ad una forza esercitata sull'oggetto in caduta potrebbe causare un risultato contrario al ragionamento convalidato da Stanislas Dehaene. Perché il movimento dei gravi considerati dovrebbe dipendere esclusivamente dal fattore massa? In breve, non viene considerata l'esistenza di variabili incognite: osserviamo qui un grande classico esempio di ragionamento fallace [1].

Il ragionamento, nella forma parafrasata da Dehaene, è quindi irricevibile come dimostrazione. Potremmo quindi aspettarci che il pregiudizio di conferma si ritorca contro questa argomentazione e spinga a dichiararla effettivamente non valida, a causa della non conformità con quanto osserviamo; a meno che, ovviamente, l'autore di questo elogio non sia a conoscenza dell'effetto dell'attrito viscoso sull'aria, il che è improbabile.

Notiamo fin da ora che possiamo parafrasare il testo proposto da Dehaene sostituendo la massa con il volume come variabile di interesse: «[...] Galileo immagina di far cadere due sfere, una *meno voluminosa* e l'altra più *voluminosa*, dall'alto della torre di Pisa. Ragiona per assurdo. Supponiamo, dice, che la più *voluminosa* cada più velocemente. Immagina di attaccarla all'altra con un filo di *volume* trascurabile.

L'insieme delle due sfere, formando un oggetto più *voluminoso*, dovrebbe cadere ancora più velocemente. Ma questa è una sciocchezza, perché la sfera *meno voluminosa*, che cade più lentamente, dovrebbe rallentare quella più *voluminosa*. Questo insieme di contraddizioni ha solo una via d'uscita: tutti gli oggetti cadono alla stessa velocità, indipendentemente dal loro *volume*.» Per questo tipo di parafrasi basta che la variabile considerata, in questo caso il volume, sia estensiva.

Di fatto, la conclusione che sarebbe coerente con la fisica è che, nel vuoto, tutti gli oggetti cadono alla stessa velocità (parliamo piuttosto di accelerazione), indipendentemente dalla loro massa. I bravi fisici aggiungono poi, in una sorta di imbellettamento argomentativo, questa precisazione: «nel vuoto» (cfr. per esempio [7]). E lì può entrare pienamente in gioco il pregiudizio di conferma: Galileo avrebbe prodotto un ragionamento che sembra inconfutabile, senza bisogno di alcuna garanzia sperimentale. Ma l'aggiunta non si integra con il ragionamento, è lì solo per colmare le lacune, o meglio per salvare il risultato modificando il contesto. Ma se una considerazione in aggiunta potrebbe così avvalorare un ragionamento, allora chi ci dice che una variabile diversa non potrebbe intervenire in senso opposto? Così è anche nel testo di Galileo citato da Koyré, laddove Salviati afferma giudiziosamente che il suo ragionamento si applica al caso in cui nessun altro «*impetus*», «violenza» o anche «resistenza» venga ad influenzare la caduta. In altre parole, l'aggiunta di una precisazione sul contesto salva il risultato, ma non il ragionamento.

In sintesi, si può parlare di un semplice pregiudizio di conferma per un neofita che pensa che tutti i corpi cadano alla stessa velocità e adotta la versione ridotta di Dehaene. Il caso più specifico di un fisico che aggiungerebbe «nel vuoto» a questa versione, elogiandola, è quello di un pregiudizio di conferma in qualche modo coadiuvato da chiarimenti sul contesto. Tali accorgimenti non convalidano questo ragionamento, che potrebbe benissimo mostrare, senza ulteriori precauzioni, che la caduta dei corpi non dipende dal loro volume.

È molto rassicurante che i dottorandi in fisica, nel corso di un recente dibattito durante un tirocinio didattico tenuto dall'autore, abbiano potuto concordare sul commento di uno di loro: «Comunque, credo che il ragionamento di fondo (*quello costruito da Dehaene*) sia falso, e quindi possiamo provare ad aggiungere argomenti in modo che il risultato sia finalmente vero, ma la dimostrazione è falsa. […]. Io penso che ciò che bisognerebbe dire perché la dimostrazione sia valida, se si dicesse appunto che la caduta dei corpi dovrebbe dipendere soltanto dalla variabile massa e non essendoci nessun'altra variabile che possa intervenire, che sia la superficie, che sia qualche proprietà elettromagnetica, che sia … non importa cosa, dovrebbe essere solo la massa che conta, in quel caso la dimostrazione potrebbe funzionare. »

Conclusione

Nel mezzo di un oceano di incertezza, c'è un corpo considerevole di conoscenze «consolidate» in fisica del cui insegnamento siamo responsabili. Se accettiamo che i ragionamenti che assicurano la coerenza del tutto sono essenziali nei nostri obiettivi didattici, è importante sapere a che punto siamo quanto a validità di quelli che comunemente presentiamo ad alunni e studenti. Lo sforzo di caratterizzazione qui presentato può sembrare originato da un perfezionismo fuori luogo. Il lettore, tuttavia, dispone così di un pannello di controllo per le proprie scelte. I docenti in formazione intervistati in un'indagine [4, 8] hanno assunto, per le loro scelte esplicative, posizioni divergenti quanto ai criteri di decisione prioritaria, tra semplicità, coerenza, completezza, non violazione di una legge fisica. Ma sono stati unanimi sull'importanza di essere consapevoli di ciò che stavano facendo in proposito. Ci auguriamo che una migliore caratterizzazione del pregiudizio di conferma e delle sue varianti, la valutazione del suo notevole impatto, e più in generale una formazione rafforzata sull'analisi critica delle spiegazioni, possano contribuire utilmente alla nostra formazione di insegnanti e mediatori scientifici.

Bibliografia

[1] L. Viennot et N. Décamp, *L'apprentissage de la critique - Développer l'analyse critique en physique*, Les Ulis: EDP Sciences-UGA (Grenoble), 2019.

[2] D. Kahneman, *Système 1/système 2 - Les deux vitesses de la pensée*, Paris : Flammarion (opera originale pubblicata nel 2012 con il titolo *Thinking Fast and Slow. Londres: Penguin books*), 2012.

[3] L. Viennot, “Teaching rituals and students’ intellectual satisfaction”, *Phys. Educ.*, **41** (2006), 400-408. stacks.iop.org/0031-9120/41/400

[4] L. Viennot, “Misleading mathematical legitimacy and critical passivity: discussing the irreversible expansion of an ideal gas with beginning teachers”, *Eur. J. Phys.*, **40** (April 2019).

[5] S. Dehaene, *Apprendre! Les talents du cerveau, le défi des machines*, Paris, Odile Jacob, 2018.

[6] A. Koyré, «Le De Motu Gravium de Galilée - De l’expérience imaginaire, et de son abus», *Revue d’histoire des sciences et de leurs applications*, 13, **3** (1960), 197-245.

[7] E. Klein, *Le gout du vrai*, Conférence à La Sorbonne, Fête de la Science, 9 novembre 2020, 1 h 52’ e seguenti, 2020. youtu.be/2byu0bYPj0c

[8] L. Viennot, “How to choose which explanation to use with students? Discussing the tensiometer with beginning teachers”, *International Journal of Science Education*, **42**, **17** (2020), 2898-2920.

Note del traduttore

(1) Nella presente traduzione si è reso ovunque con «pregiudizio» il sostantivo francese «biais» [di etimo incerto] da cui il termine inglese «bias» (obliquo, inclinato), di uso corrente negli studi di psicologia cognitiva. Cfr.: www.treccani.it/vocabolario/bias/ ; en.wikipedia.org/wiki/Confirmation_bias

(2) Stanislas Dehaene è professore presso il Collège de France, titolare della cattedra di Psicologia sperimentale e membro dell’Académie des sciences; www.college-de-france.fr/personne/stanislas-dehaene

(3) Favaro A. (a cura di), *Edizione Nazionale delle opere di Galileo, Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze, Giornata prima*, Barbèra ed., Firenze (1898),VIII,174 e sgg. www.liberliber.it/online/autori/autori-g/galileo-galilei/le-opere-di-galileo-galilei-volume-viii/

Lo stesso *gedanken experiment* si trova ampiamente illustrato e discusso in

A. Frova, M. Marenzana, Parola di Galileo, BUR, Milano (2000), cap. 3 - Discesa quasi libera, 58-64.

(Ultimi accessi ai siti *web* citati: 31.12.2022)