



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DEPARTMENT OF PHYSICS AND ASTRONOMY
"A. RIGHI"

SECOND CYCLE DEGREE

PHYSICS

UNA VOCE DIMENTICATA:
ÉMILIE DU CHÂTELET
TRA NEWTONIANISMO, *VIS VIVA*
E STORIOGRAFIA DI GENERE

Supervisor
Prof. Eugenio Bertozzi

Defended by
Francesco Piccoli

Graduation Session / July / 2025

Academic Year 2024/2025



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DEPARTMENT OF PHYSICS AND ASTRONOMY
"A. RIGHI"

SECOND CYCLE DEGREE

PHYSICS

UNA VOCE DIMENTICATA:
ÉMILIE DU CHÂTELET
TRA NEWTONIANISMO, *VIS VIVA*
E STORIOGRAFIA DI GENERE

Supervisor
Prof. Eugenio Bertozzi

Defended by
Francesco Piccoli

Graduation Session / July / 2025

Academic Year 2024/2025

*A Marta,
che tra poco potrò chiamare moglie*

Indice

1	Introduzione	7
1.1	Abstract	7
1.2	Metodologia di ricerca	9
1.3	Storiografia di genere	10
2	I dibattiti fisici del Settecento	14
2.1	Newtonianismo	14
2.1.1	Il contenuto dei <i>Principia</i>	16
2.1.2	In Inghilterra	18
2.1.3	In Italia	20
2.1.4	In Francia	24
2.2	Forze vive	27
2.2.1	Prima fase: Cartesio e Leibniz	28
2.2.2	Seconda fase: newtoniani e nuovi esperimenti	33
2.2.3	Terza fase: “Disputa sulle parole” e conclusione	39
3	Donne e Scienza nel Settecento	43
3.1	Quadro storico generale	43
3.1.1	Accesso all’istruzione	44
3.1.2	Alcuni esempi di donne nella Scienza	46
3.1.3	Considerazione sociale delle donne rispetto alla Scienza	54
3.1.4	Diritti delle donne e proto-femminismo	56
3.1.5	Discorso storiografico: contemporaneo vs moderno	58
3.2	Émilie du Châtelet	60
3.2.1	Biografia	60
3.2.2	Opere scientifiche principali	67
4	<i>Institutions de Physique</i>	73
4.1	Traduzione in toscano e Preambolo	75
4.1.1	Traduzione in toscano	75
4.1.2	Preambolo	77
4.2	Riflessioni teoriche	79
4.2.1	Principi ed ipotesi	80
4.2.2	Spazio e tempo	83
4.2.3	Struttura della materia	84
4.3	Leggi del moto	87
4.3.1	Moto, quiete e composizione dei moti	87
4.3.2	Moto Uniformemente Accelerato e Piano inclinato	92
4.3.3	Moto parabolico	98

4.4	Newtonianismo	103
4.4.1	Scoperte di Newton	103
4.4.2	Attrazione gravitazionale	110
4.4.3	Émilie du Châtelet e Newtonianismo	112
4.5	<i>Vis viva</i> e carteggio con de Mairan	114
4.5.1	Forze morte, forze vive e struttura dei corpi	115
4.5.2	Dentro la disputa: esperimenti e critiche	119
4.5.3	Carteggio con de Mairan	126
5	Rilettura moderna	133
5.1	Émilie du Châtelet tra passato e presente	133
5.1.1	Accoglienza dei coevi	133
5.1.2	Immagine storiografica	134
5.2	Rilettura didattica delle <i>Institutions</i>	138
5.2.1	Confronto tra contenuti <i>Institutions</i> e ricerca in Didattica	138
5.2.2	Storia della Fisica nell'insegnamento	144
6	Conclusioni	148
7	Bibliografia	154
8	Ringraziamenti	165

1 Introduzione

1.1 Abstract

Questa ricerca ha origine da alcune domande: come mai nelle scuole e nelle università si studiano così poche figure femminili in riferimento alle discipline scientifiche (in particolare alla Fisica)? È stata la storia ad escludere e limitare i contributi femminili, oppure la storiografia delle varie epoche ad essere stata selettiva e parziale? Un dubbio non di poco conto, soprattutto se posto in una prospettiva didattica: *in primis*, vale la pena insegnare la Storia della Fisica a scuola? Se sì, a quali dei tanti protagonisti dare voce, per raccontare in modo efficace e veritiero lo sviluppo delle diverse teorie scientifiche? Attraverso le esperienze di quali personaggi si possono ispirare i giovani studenti e le giovani studentesse? E infine, può essere un valore aggiunto raccontare il punto di vista di figure meno note rispetto ai celeberrimi Galileo, Newton, Maxwell ed Einstein?

Vista l'incredibile mole di persone che hanno partecipato al progresso della Fisica, per provare a rispondere a queste domande complesse sarà necessario restringere il campo di ricerca, servendosi di una lente specifica che si concentri su un determinato periodo storico – il Settecento – e su una porzione di terra confinata prevalentemente tra Francia e Italia, alzando però lo sguardo anche su altre nazioni europee. Si è scelto di osservare più nel dettaglio queste due nazioni per via del ruolo peculiare che hanno ricoperto, in modi ambivalenti, Parigi e Bologna in merito alla presenza delle donne nel panorama scientifico. È importante notare che gli studi storiografici di genere – che saranno approfonditi nel paragrafo 1.3 – sono spesso nati in ambiente umanistico. Questo ha fatto sì che molte delle scienziate siano divenute ben note dal punto di vista biografico e della loro storia istituzionale, ma anche che il loro specifico contributo scientifico sia rimasto in ombra, o solamente abbozzato.

Sulla base di queste considerazioni, la tesi sviluppa uno studio della figura di Émilie du Châtelet – fisica francese della prima metà del Settecento – con l'intento di metterne a fuoco l'operato scientifico, sulla base della convinzione che il primo elemento di parità di genere debba passare per i contenuti storici primari (prima che per la narrazione biografica). In particolare, si approfondirà nel dettaglio una delle sue pubblicazioni, le *Institutions de Physique*; si mostrerà come questo testo, insieme anche ad un carteggio tra l'autrice ed il fisico Jean Jacques Dortous de Mairan, metta in luce l'apporto di du Châtelet in merito alla questione delle forze vive e alla divulgazione del Newtonianismo, le due teorie più dibattute del Settecento.

La prima, a partire dalla data convenzionale del 1686, si diffuse a macchia d'olio come disputa attorno alle forze che animano i corpi (rivelando anche idee divergenti circa la struttura della materia). Tale dibattito, fin da subito estremamente

acceso, venne alimentato da divisioni nazionalistiche interne alla Fisica, con schieramenti di partito che per decenni hanno coinvolto i più dotti pensatori del tempo; la seconda, invece, nacque nel 1687, con le leggi della gravitazione esposte da Isaac Newton nel caposaldo *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, per poi svilupparsi in modi diversi nelle varie nazioni e trovando accoglienze più o meno positive. Dopo diverse decadi di discussioni, trattati e confronti pubblici o privati, alla fine del XVIII secolo queste due macro-questioni erano considerate “risolte”, con una quasi unanime comprensione e approvazione della teoria della gravitazione di Newton e con l’elaborazione dei concetti di *vis viva* (archetipo dell’energia cinetica) e quantità di moto come grandezze distinte e descritte in modo preciso, in termini di forze integrate rispettivamente nello spazio e nel tempo. Chiaramente, entrambe furono oggetto di ulteriore evoluzione, nei secoli successivi, arrivando da un lato alla spiegazione dell’attrazione gravitazionale in termini di deformazione dello spaziotempo, grazie alla Relatività Generale, e dall’altro alla generalizzazione del concetto di energia e al principio di conservazione dell’energia meccanica.

La tesi è strutturata come segue:

- Nel capitolo 1 si esporrà la metodologia di ricerca attuata nella realizzazione della tesi e si introdurrà il quadro teorico in cui si inserisce questo lavoro, vale a dire quello della storiografia di genere.
- Nel capitolo 2 si presenteranno le due teorie più dibattute del Settecento – il Newtonianismo e le forze vive – valutandone la diffusione e l’evoluzione: il valore dei contenuti delle opere di Émilie du Châtelet sarà compreso meglio, alla luce della contestualizzazione storica.
- Nel capitolo 3 si illustrerà la condizione socio-culturale delle donne nel Settecento, attraverso un’analisi dell’accesso all’istruzione, dei contributi di alcune scienziate dell’epoca, della considerazione delle donne in riferimento al mondo scientifico e dei primi ideali di femminismo e di uguaglianza di genere; nella parte finale del capitolo si osserverà nel dettaglio il caso di Émilie du Châtelet, raccontandone la biografia e sintetizzando le due pubblicazioni più importanti.
- Nel capitolo 4 si studierà a fondo il testo delle *Institutions de Physique*, presentando la storia editoriale della traduzione in toscano, il preambolo e il suo carattere programmatico, le riflessioni teoriche relative all’idea dell’autrice circa il modo di fare Filosofia Naturale, l’esposizione delle leggi del moto, la trattazione delle teorie newtoniane (e la collocazione della scienziate in merito) e infine le argomentazioni concernenti la *vis viva* (esaminando anche il carteggio con de Mairan).

- Nel capitolo 5 si confronterà l'immagine coeva di du Châtelet come donna di scienza con quella moderna, nata da secoli di storiografia; si svilupperà poi una breve trasposizione didattica del testo delle *Institutions*: da un lato si esamineranno alcuni errori presenti nella descrizione di certi fenomeni fisici, rivelando l'analogia tra le rappresentazioni mentali di du Châtelet e quelle degli alunni moderni (nell'affrontare la Dinamica) e dall'altro si metterà in relazione il linguaggio storico con alcuni bisogni degli studenti.

Pertanto, gli obiettivi di questo lavoro si collocano su tre livelli: il primo consiste nel mostrare come la figura di Émilie du Châtelet sia stata significativa dal punto di vista storico. Un esempio di donna coinvolta nello studio della Fisica; non solo spettatrice, ma attrice protagonista, personaggio rilevante per gli ambienti di Parigi e Bologna e capace di mettere in contatto le due realtà, facendo risaltare le contraddizioni socio-culturali del tempo.

Il secondo punta a mostrare la contrapposizione tra il riconoscimento riservato alla scienziata dai suoi contemporanei e quello riservatole successivamente, evidenziando come, nel corso dei secoli, la storiografia non abbia reso giustizia a questa scienziata. Infatti, ella è stata destinata o all'oblio, oppure al titolo di "amante", derivante dalla *liason* con Voltaire, oppure ancora relegata al tipo di narrazione agiografica della sua vita – tipica degli articoli giornalistici e di alcune monografie – senza ricevere un'analisi soppesata e critica delle sue opere. Quindi, qui si guarderà con attenzione il suo apporto scientifico, entrando nel vivo di uno dei suoi scritti originali, e lo si relazionerà con i dibattiti fisici del Settecento.

Il terzo concerne la rilevanza della Storia della Fisica per l'insegnamento di questa disciplina: la rilettura didattica del testo delle *Institutions*, unita ad alcuni risultati emersi dalla ricerca in Didattica della Fisica e della Matematica, sarà da spunto per suggerire alcune potenzialità dell'inclusione della Storia nell'apprendimento.

1.2 Metodologia di ricerca

Il metodo che si è seguito nella conduzione del lavoro di tesi è stato quello della triangolazione e complementazione delle fonti storiche, tenendo conto della loro diversità.

Le fonti storiche primarie esaminate interamente consistono nel testo storico originale *Institutions de Physique* (nella sua traduzione toscana coeva) e nel carteggio tra l'autrice Émilie du Châtelet e il fisico Jean Jacques Dortous de Mairan; entrambe costituiscono delle fonti storiche primarie e pubbliche. A queste è stata aggiunta la lettura di ulteriori testi primari, come corrispondenze private, oppure pubblicazioni dell'epoca; in modo particolare, i *Discorsi e dimostrazioni matematiche sopra due nuove Scienze* di Galileo Galilei ed i *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* di Isaac Newton. Lo studio delle fonti primarie è stato poi integrato

con quello delle fonti secondarie, ovvero un'estensiva lettura e analisi di articoli di ricerca e libri, pubblicati nel XX e nel XXI secolo. Questi si potrebbero dividere in due macro-categorie: quelli di matrice storica (la maggior parte), e quelli di stampo didattico. I primi sono stati adoperati soprattutto nel capitolo 2, per fornire una contestualizzazione settecentesca più esaustiva e significativa possibile, e nel 3, per presentare fedelmente la condizione socio-culturale delle donne, così come la figura della scienziata francese; anche nel quarto capitolo sono risultati utili, al fine di comprendere al meglio il testo originale e di presentare alcune delle interpretazioni possibili. I secondi, vale a dire quelli di stampo didattico, sono serviti per supportare le tesi sviluppate nel capitolo 5.

Vista la notevole mole di testi esaminati, è stato necessario realizzare una tabella riassuntiva in cui questi fossero organizzati sulla base degli argomenti trattati. Si è così facilitata la rielaborazione dei contenuti, presentando poi una narrazione sperabilmente lineare e comprensibile, cercando al tempo stesso di illustrare più prospettive e punti di vista.

Per quanto concerne le fonti storiche primarie, dopo una prima lettura – e conseguente riassunto dei temi principali – si è proceduto con un'analisi dettagliata dei capitoli più rilevanti, vale a dire quelli relativi alle leggi del moto, al Newtonianismo e alle forze vive (tema principale anche del carteggio con de Mairan). Si è cercato di tradurre in termini moderni il linguaggio dell'epoca, che non era di facile comprensione. Da ultimo, i contenuti sono stati resi in forma più sintetica, riordinando i passaggi logici, spesso poco chiari (per lo stile scientifico del XXI secolo) nell'esposizione originale.

1.3 Storiografia di genere

Prima di entrare nel vivo dell'analisi storica settecentesca, si ritiene conveniente introdurre un punto di vista storiografico generale, siccome una delle intenzioni di questa tesi è proprio quella di collocarsi all'interno di un determinato quadro teorico di Storia della Fisica. A partire da un breve *excursus* concernente l'evoluzione della storiografia in questo settore, specialmente in merito alla connessione tra donne e Scienza, si spera pertanto di delineare un'opportuna cornice per il lavoro di tesi.

Sebbene l'interesse e la crescente considerazione riservati alla storiografia di genere siano piuttosto recenti, come si vedrà di seguito, già nel XIV secolo si iniziarono a documentare i contributi di alcune donne, anche se raramente nel contesto delle scienze. Tra il 1355 e il 1359, Giovanni Boccaccio raccolse in *De claris mulieribus* un centinaio di biografie di donne illustri dell'antichità – principalmente regine – realmente esistite, o appartenenti al mondo mitologico (Schiebinger, 1987-b). Nel 1405, Christine de Pizan si chiedeva se le donne avessero preso parte come protagoniste allo sviluppo delle arti e delle scienze; la risposta data fu affermativa: “Molte

scienze e arti notevoli e grandi sono state scoperte grazie alla comprensione e alla sottigliezza delle donne, sia nella speculazione cognitiva, dimostrata per iscritto, che nelle arti, manifestata nei lavori manuali.”¹ Lo stile enciclopedico di Boccaccio venne ripreso anche nei lavori dei secoli successivi, come *Historia mulierum philosopharum* (1690) di Gilles Ménage, nel quale si enumeravano alcune biografie di donne capaci di partecipare al dibattito filosofico antico e moderno; l’obiettivo dell’opera era quello di convincere l’Académie ad includere anche le donne al suo interno, invano (Schiebinger, 1987-b). Un secolo più tardi, un altro francese, Jérôme de Lalande, pubblicò una delle prime vere e proprie enciclopedie astronomiche dedicate alle donne scienziate: *Astronomie des dames* (1786).

Nell’Ottocento si annovera il trattato di Christian Friedrich Harless *Die Verdienste der Frauen um Naturwissenschaft, Gesundheits-und Heilkunde* (*The contribution of women to natural science, health, and healing*), che nel 1830 considerò pure i contributi delle donne in campo antropologico, geologico e medico. Nella stessa opera, Harless denunciò la disparità di genere nella storiografia scientifica: “Fino ad ora c’è stato un gap di lunga data nella storia delle scienze naturali. . . Non c’è stata nessuna indagine storica e valutativa di tutte quelle donne che dai tempi antichi fino ai nostri si sono distinte in diverse scienze.”² La pratica storiografica-enciclopedica continuò per tutto l’Ottocento, con testi come *Les femmes-astronomes* (1885) di E. Lagrange – in cui venne attaccata la Francia per la scarsa inclusione delle donne nella pratica scientifica - *Die Leistungen der deutschen Frau* (*The achievements of German women*) di Elise Oelsner (1894) e *Les femmes dans la science* di Alphonse Rèbère (1897). In questi ultimi due si notò una novità, ovvero l’esclusione, per la prima volta, di figure mitologiche come Atena/Minerva e Iside dall’elenco alfabetico di donne illustri, dando finalmente maggiore credibilità a quelle realmente esistite (Schiebinger, 1987-b).

Soprattutto nel Novecento, parallelamente alla pratica enciclopedica per ricordare alcune donne importanti nei campi scientifici, crebbe il dissenso di alcuni pensatori antifemministi, che asserivano che questa prassi fosse ridicola, siccome per gli uomini illustri sarebbero stati compilati volumi dieci volte più lunghi. Secondo tali storici, questo assunto sarebbe stato sufficiente per definire assurdo lo studio delle donne scienziate, considerando tale approccio come una forma di inclusivismo eccessivo. In risposta a tali critiche, nacque un filone storiografico dedito a studiare le diverse forme di accesso all’istruzione per le donne, nei secoli precedenti, così da motivare il minor numero – rispetto ai colleghi uomini – di scienziate famose. Tra

¹de Pizan, C. (1405). *The Book of the City of Ladies*. Edizione di Earl Jeffrey Richards (New York: Persea Books). p. 71. Traduzione in italiano da parte dell’autore della tesi: nelle prossime note si indicherà con la sigla TAT (Traduzione Autore Tesi).

²Harless, C. F. (1830). *Die Verdienste der Frauen um Naturwissenschaft, Gesundheits-und Heilkunde, so wie auch um Linder-Volker- und Menschenkunde von der ältesten Zeit bis auf die neueste*. Gottinga: Van den Hoeck-Ruprecht, p. 9. TAT.

questi testi, spiccò quello di H. J. Mozans (pseudonimo del prete cattolico John Augustine Zahm), che nel 1913 scrisse a favore di una maggior inclusione delle donne negli ambiti scientifici e confutò le tesi di alcuni craniologici dell'epoca, i quali credevano che esse fossero biologicamente incapaci di dedicarsi alle materie scientifiche (Gelbart, 2016).

Fino alla metà del XX secolo, la storiografia di genere restò una branca altamente snobbata, portata avanti da pochi *outsiders*, che vi si impegnavano al di fuori del contesto accademico ufficiale. La nascente e sempre più robusta Storia della Fisica preferiva concentrarsi su altri temi e soprattutto sullo studio di figure ben più note. Pertanto, un vero e proprio interesse per questa disciplina restò sopito fino agli anni Settanta, quando prese forma e contorni ben definiti. Le cause che stanno alla base di questa transizione all'interno della storiografia sono molteplici: ad esempio, la seconda ondata femminista – che aveva a cuore le lotte per i diritti civili – contribuì a puntare maggiormente i riflettori sulle donne e a ragionare sulla parità di genere anche in campo storiografico (Lindner, 2009); tuttavia, come sostenuto da Evelyn Fox Keller, i primi approcci di questo tipo erano confinati alle discipline della sociologia, dell'antropologia, della letteratura e della psicoanalisi, non trovando sufficiente impegno nelle scienze (Keller, 1995). Poi, la graduale accoglienza che avvenne anche in campo scientifico tra gli anni Settanta e gli Ottanta, si può ricondurre a fattori sociali, come il numero crescente di donne assunte in aziende high-tech durante la Guerra Fredda (Haraway, 1984) e la maggiore attenzione ai diritti salariali tra sessi, che portò ad un aumento di figure femminili sia nelle aree scientifiche, che in quelle storiche. Tutto ciò confluì in un movimento di Storia della Fisica (e più in generale della Scienza), che vide molte donne coinvolte direttamente e attivamente nella storiografia di genere, dando voce a tante scienziate dimenticate dai libri di Storia.

Durante gli anni Ottanta fiorì una miriade di monografie su scienziate del passato, principalmente incentrate sulle esperienze che hanno reso il contributo della donna in questione straordinario; si puntava perciò a narrare il contesto socio-culturale, oppure gli ostacoli superati dalla protagonista, a scapito degli effettivi contenuti delle opere. Per di più, era diffusa la pratica di confrontare i risultati della scienziate in esame con gli “standard” dei colleghi maschi, per dimostrare che l'apporto scientifico era paragonabile, e quindi meritevole. Si sceglievano pertanto figure femminili eccezionali, spesso anche esaltate nel corso dell'esposizione (Schiebinger, 1987-b). Contemporaneamente, un ampio movimento di biologi e biologhe si impegnò per smentire le ostinate teorie che ritenevano che le donne fossero geneticamente inferiori (Keller, 1995).

In ambito accademico, furono istituiti i primi corsi universitari con titoli come “Gender and Science”, formalizzando il progressivo interesse per l'argomento. Per quanto riguarda i criteri con cui venivano scelte le scienziate da studiare, mentre negli anni Settanta si prediligeva uno sguardo legato all'estrazione sociale, a partire

dagli anni Ottanta si considerarono anche le minoranze etniche (precedentemente trascurate proprio per via del contesto culturale in cui avevano agito) (Lindner, 2009; Keller, 1995). Tutto ciò si consolidò sempre di più negli anni Novanta e all’inizio del XXI secolo, arrivando quindi all’attuale concetto di “Intersezionalità”, nel quale l’analisi di genere incontra gli studi di razza, classe, religione, etnia e sessualità, valutando la complessità dell’identità sociale (Petö, 2009).

L’obiettivo attuale della storiografia di genere – qui declinata nel caso specifico della Fisica – è dunque quello di non limitarsi ad un racconto compensativo, ben rappresentato dal neologismo “Herstory”, bensì di scavare a fondo nelle cause che hanno portato all’esclusione delle donne dal mondo scientifico (e alla relativa scomparsa dai testi storici). Serve pertanto esplicitare quelle che sono state le disuguaglianze storiche, così come quelle che sono le disparità moderne. Si può passare così da una scrittura storica precedentemente centrata sull’inclusione descrittiva ad una costruita sull’analisi critica (Petö, 2009). Per fare ciò, risulta necessario superare la semplicistica cronaca biografica, arrivando ad un esame approfondito delle fonti storiche primarie ed entrando così nel vivo dei testi e dei contenuti; in questo modo, si può dare pieno valore al lavoro delle scienziate dimenticate (Nature, 2021).

A sostegno di questo nuovo movimento storiografico, negli ultimi anni alcune istituzioni si stanno mobilitando, organizzando conferenze e dedicando fondi alla ricerca; ad esempio, nel luglio 2020 la British Society for History of Science ha coordinato un festival digitale per confrontare le possibili strategie che si possono adottare nel lavoro interno agli archivi storici: l’intento è quello di capire come recuperare le informazioni più importanti contenute nella mole di documenti conservati. Tra i tanti testi recentemente pubblicati nell’ambito della storiografia di genere, *Women in the History of Science* (2023) è un ottimo esempio di quanto detto finora, come si può constatare da ciò che scrivono le autrici nell’introduzione del libro: “Le donne sono state escluse troppo spesso dalla storia della scienza, e questo libro mira a recuperare le voci, i lavori e le esperienze di donne nella produzione di conoscenza attraverso lo studio delle fonti primarie.”³ Allo stesso modo, anche diversi siti web sono nati recentemente con l’intento di dare voce a protagoniste zittite dalla Storia (o dalla storiografia): tra tutti, spicca *Project Vox* della Duke University (North Carolina), intenzionato ad approfondire la vita e le opere di alcune filosofe dimenticate, fornendo agli utenti fonti storiche primarie e secondarie.

³Wills, H., Harrison, S., Jones, E., Lawrence-Mackey, F. & Martin, R. (2023). *Women in the History of Science - A sourcebook*. Londra: UCL Press, p. 1. TAT.

2 I dibattiti fisici del Settecento

Siccome questo lavoro di ricerca si svilupperà attorno allo studio di uno dei testi storici di Émilie du Châtelet, si ritiene necessario fornire innanzitutto un'approfondita descrizione del contesto scientifico dell'epoca storica in cui si inserisce; si descriveranno quindi le due teorie fisiche più discusse del tempo, ovvero il Newtonianismo e le forze vive, così da apprezzare meglio il modo in cui l'opera della marchesa francese abbia contribuito a tali dibattiti. Tutto ciò perché “i documenti storici non parlano per sé stessi, ma necessitano interpretazione. E l'interpretazione richiede contesto.”⁴ In questo capitolo, pertanto, si porrà l'attenzione sul contesto, prima di passare all'interpretazione.

2.1 Newtonianismo

Si inizierà con una panoramica delle diverse forme di accoglienza e rielaborazione delle teorie newtoniane, a partire dalla pubblicazione del testo *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687) – che in seguito sarà abbreviato in *Principia* – passando per la sua seconda edizione (1713), la terza (1726) e giungendo fino alla consacrazione della figura di Newton a fine secolo. Come anticipato nel primo capitolo, si approfondirà tale argomento negli specifici contesti italiano e francese, oltre a quello inglese, per ovvie ragioni autoriali. Questa scelta è dettata da diverse motivazioni, tra cui: la fitta rete di scambio culturale tra le città di Londra, Bologna e Parigi, con numerosi esponenti delle singole accademie che visitavano quelle in terra straniera (Cavazza, 2002); la peculiare evoluzione del Newtonianismo nelle tre nazioni, ognuna caratterizzata da substrati socio-economici e religiosi che hanno agevolato od ostacolato la sua diffusione; la necessità di capire in quali realtà si inserisca l'operato di Émilie du Châtelet.

Innanzitutto, risulta doveroso chiarire cosa si intenda con il termine “Newtonianismo”: la risposta è tutt'altro che scontata e cambia a seconda del periodo storico e del contesto. Infatti, nei decenni successivi alla prima stampa dei *Principia*, era riferito ad un nuovo sistema del mondo, basato sulla legge dell'attrazione gravitazionale universale esposta nel caposaldo di Isaac Newton. Con la pubblicazione di *Opticks* (1704), la teoria newtoniana comprese anche tutte le tesi riguardanti l'ottica e la natura della luce. Tutto questo assunse carattere ben più ampio con la seconda e la terza edizione dei *Principia*, nelle quali l'autore inserì le *regulae philosophandi* (che costituiscono le fondamenta per un nuovo metodo scientifico) e lo “Scolio Generale”, nel quale incluse diverse riflessioni di natura ontologica sullo spazio e sul tempo, oltre a considerazioni riconducibili alla sfera religiosa. Non era

⁴Hutton, S. (2004). Émilie du Châtelet's “Institutions de physique” as a document in the history of French Newtonianism. *Studies in History and Philosophy of Science*, 35, p. 517. TAT.

quindi una semplice teoria fisica, ma un modo articolato e strutturato di vedere e investigare la realtà.

Pertanto, dalla fine del XVII secolo alla metà del XVIII, il “Newtonianismo” era ben più di un insieme di leggi scientifiche: per molti assunse le sembianze di un credo. Questi adepti, solitamente denominati come “newtoniani”, si impegnarono sia nella divulgazione delle tesi che sostenevano che nella confutazione di quelle degli avversari, in uno scontro che acquistò toni piuttosto accesi e che portò ad un’exasperazione dei contenuti stessi. Con la fine del XVIII secolo ed il generale riconoscimento delle teorie newtoniane, a queste si associarono tutte le leggi che descrivevano il moto dei corpi (Findlen, 1993). Nel XIX secolo, perciò, con “Newtonianismo” si intendeva lo studio della Meccanica e dei fenomeni dinamici, sia terrestri che celesti.

Tuttavia, con l’avvento della Relatività Generale e della Meccanica Quantistica a inizio XX secolo, si riconobbe una netta frattura tra le nuove teorie e quelle di Newton, portando quindi il “Newtonianismo” a rappresentare quella che era la Meccanica “classica”, ovvero quella più vecchia e ormai superata, ma al tempo stesso fondamentale per la costruzione delle più recenti (Hall, 1988). Tutto ciò trova eco nelle parole di Niels Bohr: “I principi della meccanica enunciati da Newton, con i quali ha creato un modello per ogni descrizione causale dei fenomeni naturali, sono serviti come base per lo sviluppo seguente della scienza fisica. [...] Abbiamo ora nei processi atomici delle chiare evidenze di individualità che rifiutano tutte le analisi in termini di concetti relativi alla meccanica classica e all’elettromagnetismo. In particolare, questi concetti sono del tutto insufficienti per spiegare la straordinaria stabilità dell’atomo.”⁵

In questo lavoro di tesi si studierà il Newtonianismo tra la fine del Seicento e la fine del Settecento; sarà significativo indagare le ragioni che hanno portato ad una così lenta accettazione delle teorie newtoniane. Sebbene, come anticipato, ogni nazione abbia avuto delle motivazioni culturali specifiche (che saranno esaminate a breve), se ne riscontrano anche di comuni: *in primis*, la complessità del testo dei *Principia*, scritto in un latino criptico e sibillino che si aggiungeva alle difficoltà intrinseche ai concetti scientifici; pare addirittura che Newton avesse deciso di adottare volontariamente questa strategia per non essere compreso da tutti gli oppositori e ricevere perciò meno critiche (Cohen, 1987-a). Poi, la non banale novità relativa al sistema matematico sottostante l’opera, ovvero il calcolo infinitesimale, nonostante le dimostrazioni fossero presentate apparentemente con procedimenti geometrici. A testimoniarlo, le parole di Bernard Le Bovier de Fontenelle relative al testo dei *Principia*: “Servì molto tempo al pubblico per padroneggiarlo.

⁵The Royal Society. (1947). *Newton Tercentenary Celebrations, 15-19 July 1946*. Cambridge, p. 57. TAT.

Geometri esperti non riuscivano a capirlo senza un grande impegno.”⁶ Come si osserverà in seguito, è stato dunque cruciale il lavoro dei divulgatori affinché le teorie newtoniane venissero comprese e apprezzate veramente.

2.1.1 Il contenuto dei *Principia*

Prima di affrontare le diverse interpretazioni e reazioni al testo newtoniano, bisogna comprendere i suoi principali argomenti, soprattutto quelli meno convincenti (e quindi più discussi). Già studiando la storia editoriale dell’opera si nota una particolarità: uno dei libri che ora è considerato “la più grande produzione della mente umana”⁷ e cardine della Storia della Fisica, all’epoca (nel 1687) non ricevette il finanziamento ufficiale della Royal Society e non sarebbe stato stampato senza il sostegno economico di Edmond Halley (Cook, 1991). Questo porta a pensare che la stessa accademia londinese non avesse riconosciuto fin da subito le potenzialità del trattato.

A partire dal titolo, si coglie una caratteristica essenziale del testo: si precisa che sono dei *Principia Mathematica*, molto probabilmente per distinguersi dai *Principia Philosophiae* (1644) di Cartesio (Casini, 1988). Infatti, Newton fondò la sua teoria non su riflessioni metafisiche, bensì sulla solidità della Matematica, in particolare della Geometria, intesa in modo molto pratico, come “quella parte della meccanica universale che riduce l’arte del misurare a proporzioni e dimostrazioni esatte.”⁸ Si tratta quindi di una Geometria operativa, in cui ogni curva sta a rappresentare una traiettoria e ogni rapporto tra segmenti indica quello tra due grandezze fisiche. In questo modo, nel tipico empirismo anglosassone, l’autore ricondusse la validità delle sue affermazioni alla precisione degli strumenti che utilizzava per esporle ed articularle; radicandosi sui procedimenti matematici, ritenne pertanto che le sue tesi fossero certe e inconfutabili (Dunlop, 2012).

Lo stile geometrico, poi, si riscontra anche nella struttura dell’opera, molto simile a quella degli *Elementi* di Euclide e alla tradizione degli antichi: si inizia con alcune definizioni (come quelle di massa, quantità di moto, inerzia e forza impressa), passando poi per le celeberrime tre leggi della Dinamica e aggiungendo proposizioni e corollari (Golberg, 1987). Tuttavia, a differenza dei testi della tradizione euclidea, l’inglese introdusse il concetto di grandezze che diventano infinitamente piccole, “evanescenti” (Pourciau, 2009), in quello che ad oggi si definisce un passaggio al limite (De Gandt, 1995). Nello stile tipico del suo tempo, poi, enunciò le

⁶Fontenelle, B. (1728). *The Elogium of Sir Isaac Newton*. Londra, vol. 7. Ristampato in I. B. Cohen (Ed.) *Isaac Newton’s Papers and Letters on Natural Philosophy*. Cambridge, 1958. TAT.

⁷Jeans, J. H. (26 March 1927). Isaac Newton. *Nature*, 119 (2995 supp), p. 28.

⁸Tutte le citazioni del testo dei *Principia* sono prese dalla traduzione *Principi Matematici della Filosofia Naturale*, 1965, UTET, Torino.

leggi fisiche servendosi di proporzionalità tra grandezze e non di rappresentazioni algebriche (oggi decisamente più consuete).

Circa il metodo scientifico adottato da Newton, nella prefazione dei *Principia* si trova un passaggio programmatico: “Sembra infatti che tutta la difficoltà della filosofia consista nell’investigare le forze della natura a partire dai fenomeni del moto e dopo nel dimostrare i restanti fenomeni a partire da queste forze”. Si tratta quindi di analizzare dei fenomeni, studiandoli per mezzo di leggi empiriche, per poi astrarre da queste e ricavare delle relazioni formali che saranno a loro volta applicate ad altre situazioni pratiche. Non a caso, questo procedimento viene sviluppato attraverso i tre libri dei *Principia*: nei primi due (*De Motu Corporum*) si reinterpretano le leggi osservative di Keplero in termini dinamici, tramite una forza centrale – proporzionale al reciproco del quadrato della distanza – e presentando un gran numero di diagrammi e dimostrazioni matematiche (Cohen, 1987-b); poi, nel libro III (*De Systemate Mundi*), si applica la legge di gravitazione universale al Sistema Solare per spiegare molteplici fenomeni, come la traiettoria delle comete (lungo sezioni coniche), l’andamento delle maree (influenzate dall’attrazione del Sole e della Luna), l’appiattimento della Terra ai poli (avendo quindi la forma di uno sferoide oblatto, a causa della rotazione diurna terrestre sul proprio asse), la precessione degli equinozi (legata all’attrazione tra Terra e Luna) e molti altri (Davies, 2009). Nel terzo libro, inoltre, Newton dimostrò che la forza che subisce la Luna, gravitando verso la Terra (Proposizione IV, Teorema IV) è la stessa che subisce un corpo sulla Terra. E quindi, la legge di attrazione gravitazionale è universale: “Tutti i corpi, in ogni luogo, hanno gravità proporzionale alla loro quantità di materia” (Proposizione VII) (Cohen, 1987-b).

Un ulteriore aspetto controverso del contenuto dei *Principia* riguarda la descrizione dello spazio assoluto e di quello relativo (a cui Newton affiancò anche il vuoto assoluto), al pari del tempo assoluto e di quello relativo. Da un punto di vista più metafisico, Newton sostenne che lo spazio assoluto fosse una sostanza a sé stante, uno scenario indipendente dagli eventi e dai corpi che si muovono in esso; allo stesso modo, anche il tempo assoluto assumeva connotati sostanziali.

Da ultimo, nella seconda edizione dei *Principia*, pubblicata nel 1713 (26 anni dopo la prima), il fisico inglese corresse alcuni errori e aggiunse in coda al libro il famosissimo “Scolio Generale”. In questa sezione enunciò che al centro del suo sistema del mondo si troverebbe un “Signore-Dio, pantocratore. [...] Dura sempre ed è presente ovunque, ed esistendo sempre ed ovunque fonda la durata e lo spazio.” Proseguì poi criticando ulteriormente la teoria dei vortici di Cartesio – a cui aveva dedicato già parte del libro II – e infine si occupò dell’annoso tema della causa della forza di attrazione (Davies, 2009). Newton affermò che: “Fin qui ho spiegato i fenomeni dei cieli [...] mediante la forza di gravità, ma non ho ancora stabilito la causa della gravità.” Concluse poi con la frase più celebre, ovvero “non fingo ipotesi” (“hypotheses non fingo”), sostenendo che fosse sufficiente che la legge di

gravitazione spiegasse i fenomeni fisici, anche se non si conoscevano le basi teoriche della gravitazione stessa. Ciò che contava di più, per l'inglese, era quindi l'efficacia delle leggi, non la spiegazione delle cause prime (Cohen, 1987-a).

2.1.2 In Inghilterra

Poco dopo la pubblicazione della prima versione dei *Principia*, tra il 1688 e il 1689, la terra natia di Newton fu scossa da un evento che ne riconfigurò l'assetto socio-politico: la *Glorious Revolution*. Oltre a portare all'elaborazione del *Bill of Rights*, questa rivoluzione destituì il re Giacomo II, con la formazione di una monarchia parlamentare sotto la guida di Guglielmo III d'Orange e della moglie Maria II Stuart. Si trattò di un cambiamento epocale, che richiese tempo affinché il nuovo ordine venisse accettato, soprattutto dopo anni di scontri tra i due partiti nazionali dei *Whig* e dei *Tory*. In questo contesto, il contenuto dei *Principia* si prestò ad una strumentalizzazione politica e culturale, paragonando il nuovo ordine del sistema del mondo a quello della società inglese: così come poteva esistere una forza universale uguale in tutto l'Universo, poteva sussistere anche una nuova forma di governo, che unisse la nazione in armonia. Per di più, il libro e pure la figura di Newton furono utilizzati durante dei sermoni pubblici per sostenere la chiesa Anglicana (Jacob, 1977).

Proprio in questo modo, il fisico inglese iniziò ad essere tratteggiato come un profeta, un personaggio che andava oltre la sfera puramente scientifica: era ritenuto un uomo finalmente capace di scoprire alcuni dei segreti più profondi della Natura. Come anticipato in precedenza, protagonisti principali di questo processo di idealizzazione furono i cosiddetti newtoniani, seguaci delle sue teorie a trecentosessanta gradi; attraverso la loro attività fu possibile presentare il Newtonianismo ad un'ampia fetta di uomini appartenenti ai ceti medio-alti. A questi si aggiunse anche il sostegno economico del fisico Robert Boyle, che, quando morì (nel 1691), lasciò nel suo testamento un'ingente somma volta a finanziare la divulgazione delle teorie newtoniane; fu così che vennero pubblicate e ristampate numerose versioni delle *Boyle Lectures*, che circolarono nel paese e oltrepassarono anche la Manica (Jacob, 1977). Tra i curatori più famosi si annoverano Richard Bentley e Samuel Clarke. Il primo fu particolarmente impegnato nella lotta all'ateismo – tramite gli scritti di Newton – mentre il secondo diventò il maggiore esponente della metafisica dei *Principia*, tanto da partecipare al celebre scambio epistolare con Leibniz circa la natura dello spazio e del tempo, portando ad una formalizzazione del dibattito sostanzialismo-relazionismo (Stewart, 1981).

Oltre alle *Boyle Lectures*, ci fu un'altra modalità di trasmissione dei contenuti newtoniani, vale a dire quella delle lezioni pubbliche tenute da molteplici intellettuali: queste si rivolsero specialmente al cuore commerciale e industriale della nazione, evidenziando il carattere pragmatico dei *Principia* e le svariate applicazioni tec-

niche che potevano derivare da essi. Tralasciando quindi la sfera più astratta e generale della teoria e semplificando i formalismi matematici, fu possibile rendere accessibile alla classe media il contenuto dell'opera. Inoltre, gli scienziati che illustravano questi argomenti cominciarono a servirsi di tali eventi per presentare le proprie invenzioni e pubblicizzarle, cercando compratori (Stewart, 1986). Tra questi newtoniani si ricordano William Whiston (che lavorò al *Longitude Act* per risolvere il problema della misura in mare della longitudine), John Harris (che teneva delle lezioni alla Marine Coffee House), Francis Hauksbee (curatore degli esperimenti della Royal Society), James Jurin (professore di Filosofia naturale a Newcastle) e John Theophilus Desaguliers, uno dei più importanti, che si concentrò principalmente sulle dimostrazioni sperimentali delle teorie newtoniane, spaziando dalla dinamica all'ottica e passando per l'idrostatica (Stewart, 1986).

Un'ulteriore strategia adottata per popolarizzare il Newtonianismo in Inghilterra fu quella della traduzione dei *Principia* in lingua inglese (*Opticks* era già stato scritto originariamente in inglese). Il lavoro più noto, diventato negli anni lo standard per gli studiosi anglofoni, fu quello di Andrew Motte, pubblicato nel 1729. Egli si basò sulle prime due edizioni dell'opera, ma è probabile che poco prima di stampare la traduzione avesse consultato anche la terza versione (curata da Henry Pemberton nel 1726), per inserire delle correzioni (Cohen, 1963). Inoltre, proprio Pemberton realizzò quella che secondo I. Bernard Cohen sarebbe stata la migliore traduzione del testo newtoniano – avendo collaborato a stretto contatto con l'autore e conoscendo tutti i dettagli del testo – che però non venne mai stampata, forse perché fu scoraggiato dalla pubblicazione e dal successo di quella di Motte (Cohen, 1963).

Altri volumi furono invece riservati all'esposizione del nuovo metodo matematico inventato da Newton: il calcolo infinitesimale. Sebbene non sia esplicitamente presente nel testo dei *Principia*, negli anni successivi venne formalizzato dai fisici newtoniani, e fu al centro di una disputa feroce con i sostenitori di Leibniz circa l'originalità della teoria. Differentemente da quello che ancora oggi si studia nei corsi di Analisi (maggiormente ispirato al formalismo leibniziano), quello dell'inglese era basato su rappresentazioni grafiche peculiari e soprattutto su una nomenclatura diversa; in particolare, si adoperavano termini come “fluenti” e “flussioni”, corrispettivi dei moderni concetti di “funzioni” e “derivate”. Per il resto, le idee di quantità infinitesimali erano già presenti, anche se capite a fatica dalla maggior parte delle persone. Fondamentali per una migliore comprensione furono quindi i lavori di John Colson, con la traduzione di *De Methodis Serierum et Fluxionum* (1736) (Casini, 1988), e Colin Maclaurin, con il suo originale *Treatise on fluxions* (1742), fortemente ispirato a Newton (Cohen, 1987-a).

Da ultimo, bisogna sottolineare l'influenza che ebbe sulla società inglese un pensatore che inglese non era: Voltaire. La figura di questo *philosophe* giramondo, che sarà esaminata nel dettaglio nella sezione relativa alla Francia, fu estrema-

mente apprezzata in Inghilterra, dove i suoi lavori newtoniani furono tradotti e circolarono tra gli intellettuali. In particolare, si ammirò l'entusiasmo – tendente all'esaltazione – che il francese provava verso Newton e le sue teorie, a suo parere rivoluzionarie e definitive (Epstein, 1979).

In conclusione, l'accoglienza in patria dei *Principia* fu generalmente positiva, anche se va ricordato che lo "Scolio Generale" – incluso a partire dalla seconda edizione del 1713 – fu scritto da Newton proprio in risposta a numerose critiche, che riguardavano in particolar modo la sfera religiosa: sembrava che nel suo sistema del mondo non ci fosse spazio per una divinità creatrice. Come anticipato nel paragrafo precedente, nello Scolio si esplicitava quindi che non solo esisterebbe un dio al centro del mondo, ma che sarebbe pure la causa dello spazio e del tempo assoluti, facendo nascere, di fatto, tutta la vita (Davies, 2009).

2.1.3 In Italia

A differenza dell'Inghilterra, dove l'attività culturale era altamente concentrata attorno a Londra, nella penisola italiana si svilupparono numerosi nuclei intellettuali, parecchio diversi l'uno dall'altro, sia per tradizione che per substrato socio-culturale. Nel Settecento erano già attive da qualche secolo università e accademie (prima fra tutte Bologna, costantemente in contatto con gli istituti delle altre nazioni (Cavazza, 2002)), ma oltre alle loro pubblicazioni ufficiali c'era anche una miriade di opere e lettere scritte da liberi pensatori; tutto ciò ha reso la storia della Fisica italiana piuttosto complessa da ricostruire. A seconda dell'area geografica di riferimento si riscontrarono modi "tipici" di accogliere il Newtonianismo (anche se ci furono alcune voci fuori dal coro), che saranno illustrati di seguito, partendo dal nord e scendendo lungo la cartina.

Nell'ambito milanese spiccarono due scienziati: Maria Gaetana Agnesi e Jacopo Riccati, votati principalmente allo studio matematico del nuovo calcolo infinitesimale. Agnesi elaborò il testo delle *Istituzioni analitiche ad uso della gioventù italiana* nel 1748, intendendolo come testo didattico fruibile anche dalle persone a cui mancavano i fondamenti della disciplina. Per quanto riguarda la Fisica, negli anni Trenta del Settecento la scienziata era stata anche coinvolta nella difesa di numerose tesi newtoniane (come la natura dei colori e la causa delle maree) durante conversazioni pubbliche svoltesi assieme ad altri letterati milanesi (Mazzotti, 2019). Riccati, invece, lavorò già all'inizio del secolo sulla risoluzione di alcune equazioni differenziali, insegnando a diversi giovani dell'epoca (la stessa Agnesi gli chiese consiglio per il suo trattato). Riguardo alle teorie di Newton, il matematico apprezzò il contenuto dei *Principia* solamente a livello fenomenologico, sostenendo che la natura della gravitazione e quella della struttura ultima della materia fossero temi che andavano al di là degli obiettivi della Scienza. Espresse chiaramente questo sentimento, riferendosi al pensiero di Galilei: "Ecco il metodo insegnato a Noi

Italiani dal Galileo. [...] Afferma che non è ufficio del Fisico l'indagare l'essenza delle cose, ma semplicemente render conto delle loro proprietà ed affezioni: che la natura è inesorabile, e non è disposta ad accomodarsi alle nostre fantasie. [...] Tanto più questa scienza sarà perfetta, quanto meno verità insegnerà.”⁹ Infine, Riccati biasimò i newtoniani inglesi per la loro fede cieca, che a volte li portava a difendere le teorie di Newton senza neanche averle verificate per mezzo di esperimenti (Mazzotti, 2019).

All'interno della Repubblica di Venezia, i fisici di punta erano delle figure professionali molto più vicine agli attuali ingegneri, intente a studiare molteplici applicazioni pratiche delle leggi dell'idrostatica e dell'idrodinamica, per evidenti necessità territoriali. Ciò che interessava davvero era quindi lo studio delle acque e dell'attrito. Il centro culturale più attivo era quello di Padova, dove l'università accolse alcuni professori che diventarono esperti delle teorie fisico-matematiche newtoniane. Tra questi, si ricordano Giovanni Poleni (noto per il suo Gabinetto di Fisica, nel quale realizzava esperimenti a sostegno delle pratiche d'insegnamento) e Jacob Hermann. Pur conoscendo e divulgando i contenuti delle opere di Newton, gli scienziati padovani non si possono definire newtoniani al pari degli inglesi, anzi: criticarono diversi aspetti delle sue idee e in certi casi favorirono quelle di Leibniz o dei Bernoulli. Il dissenso relativo ai *Principia* si concentrava principalmente sul piano metafisico dell'opera, come evidenziato dalla necessità espressa da Poleni di “ripurgare la filosofia newtoniana”¹⁰, ovvero di eliminare tutte le ipotesi ontologiche (sulla gravità, sullo spazio, sul vuoto e sul tempo). Quella padovana era a tutti gli effetti un'epistemologia empirica laica, che ben separava le sfere sperimentali, metafisiche e teologiche, in netta contrapposizione con la tradizione inglese del periodo (Mazzotti, 2019).

Passando allo Stato Pontificio, si distinguono per importanza le città di Bologna e Roma, il cui contesto culturale era abbastanza differente, ma avvolto in una comune atmosfera di controllo papale, che tuttavia nel corso del XVIII secolo andò gradualmente ad affievolirsi (Cavazza, 2002).

A Bologna, già a inizio Settecento si studiava attentamente il calcolo integrale, come attestato anche dalla pubblicazione dell'opera di Gabriele Manfredi *De constructione aequationum differentialum primi gradus* (1707). Differentemente dal nord Italia, almeno per i primi tre decenni del secolo, le teorie fisiche di Newton erano esaminate – da un punto di vista ufficiale e pubblico – solo nel settore dell'ottica, tralasciando, apparentemente, la gravitazione e i moti celesti. Questo riecheggia nelle parole di uno degli intellettuali bolognesi, Giampietro Zanotti, il quale sostenne che si era newtoniani “il più che si può.”¹¹ Infatti, per paura che

⁹Riccati J. (1764). *Opere*, Vol. 3, p. 498.

¹⁰Lettera a Jacopo Riccati, p. 216.

¹¹Lettera di Giampietro Zanotti a Francesco Algarotti, 10 luglio 1728, in *Opere*. (1794). Venezia: C. Palese, Vol. XI, p. 254.

la Chiesa non approvasse la popolarizzazione della gravitazione universale, l'Istituto delle Scienze promosse degli esperimenti più prudenti, volti a ripetere quelli di Newton sulla luce: le dimostrazioni pubbliche più famose furono quelle tenute da Francesco Algarotti, tra il 1728 e il 1731 (Elena, 1991). Da queste, poi, trasse ispirazione per comporre il celebre *Newtonianismo per le dame* (1737), nel quale inserì anche una descrizione del sistema cosmologico. Molto curiosamente, questo fu l'unico libro newtoniano di quel periodo ad essere inserito nell'*Index Librorum Prohibitorum* (nel 1739). Il motivo di questa censura non si deve però ricondurre ai contenuti fisici, bensì all'approccio materialista (influenzato dalla filosofia di John Locke) (Mazzotti, 2004) e alle aspre critiche – piuttosto esplicite – rivolte alla Chiesa in quanto istituzione (Mazzotti, 2019). Ciononostante, nel resto d'Europa il libro circolò clandestinamente e ottenne un successo straordinario, specialmente per lo stile leggero e piacevole, “da salotto”, che catturò l'attenzione di numerosi aristocratici e borghesi; in modo particolare, l'opera venne apprezzata in Inghilterra, dove fu ristampata in più edizioni durante tutto il XVIII secolo (Vicentini, 2019). Per di più, nel 1736 (quindi addirittura prima di pubblicare il testo per cui ricevette la massima notorietà) Algarotti diventò *fellow* della Royal Society londinese.

Con il papato di Benedetto XIV (1740-1758), nello Stato Pontificio si iniziò a respirare un'aria diversa, anche in ambito scientifico: grazie a lui, infatti, prese vita un movimento cristiano noto come Illuminismo Cattolico, una specie di riformismo moderato che favorì la diffusione dei dialetti, della letteratura moderna e soprattutto delle scienze moderne. Sotto la sua guida, vennero riabilitate ufficialmente le teorie copernicane e galileiane, escluse finalmente nel 1757 dalla nuova edizione dei libri proibiti (Findlen, 1993). Benedetto XIV ricoprì anche il ruolo di mecenate nei confronti dell'Istituto delle Scienze di Bologna e sostenne l'inclusione di donne come Laura Bassi e Maria Gaetana Agnesi all'interno del corpo docenti. L'idea generale era quella che attraverso lo studio della Matematica e della Fisica fosse possibile avvicinarsi a Dio, conferendo dei connotati teologici a queste discipline (similmente alla teologia naturale inglese). Questo progetto cattolico, tuttavia, fallì già qualche decennio più tardi, con il merito, però, di aver dato il via ad una grande tradizione scientifica nel centro Italia; nel caso specifico del Newtonianismo, poi, già dagli anni Quaranta del Settecento le teorie circolarono liberamente tra i pensatori (e non solo) (Mazzotti, 2019).

Nell'ambito di Roma, si apprezzò in particolare un'opera, che ebbe un successo incredibile in tutta l'Europa continentale: tra il 1739 e il 1742 i frati François Jacquier e Thomas Le Seur pubblicarono una versione completa dei *Principia* in tre volumi, incorporando dei ricchi commentari originali e riportando i principali dibattiti avvenuti nel decennio precedente. Molto probabilmente, proprio questo testo diede il contributo maggiore alla divulgazione della teoria della gravitazione in Italia. In seguito, i due autori divennero anche consulenti di papa Benedetto

XIV (Mazzotti, 2019).

Osservando la situazione settecentesca in Toscana, nel dettaglio tra Firenze e Pisa, si nota immediatamente il peso dell'eredità galileiana. Infatti, rispetto al resto d'Italia, in queste zone la tradizione scientifica ispirata a Galilei condizionò notevolmente l'accoglienza del Newtonianismo, in modo trasversale e generale; nelle altre regioni della penisola, infatti, c'erano figure isolate come Riccati che si appellavano al lascito metodologico galileiano, senza però che ci fosse un sentire culturale condiviso. In Toscana, l'interpretazione degli scritti del fisico pisano fu eterogenea, in merito all'approccio da tenere nello studio della Natura. C'era chi assumeva un atteggiamento puramente fenomenologico, slegato dalla ricerca dei costituenti primi e dalla struttura del Cosmo, e chi invece ricorreva all'atomismo e al Copernicanesimo (Mazzotti, 2019). Riguardo alle teorie matematiche, poi, i *Principia* (e complessivamente il calcolo infinitesimale newtoniano, così come quello Leibniziano) trovarono poco successo, perché si preferiva il purismo geometrico tipico dei testi di Evangelista Torricelli – assistente di Galilei – e di Bonaventura Cavalieri. Per di più, circa la teoria della gravitazione universale, nell'ambiente toscano si criticò fermamente la dipendenza della forza dal reciproco del quadrato della distanza, perché convinti che nelle opere di Galilei ci fossero riferimenti ad una forza di gravità sempre costante nello spazio (e dunque non con andamento quadratico, secondo i galileiani).

In questo clima diffusamente tiepido nei confronti del Newtonianismo, spiccò un personaggio che da *outsider* riuscì ad apprezzare le teorie di Newton, senza i preconcetti relativi all'eredità galileiana. Si tratta di Guido Grandi, monaco camaldolese, che già nel 1703 scrisse un trattato sulla nuova analisi matematica: *De quadratura circuli, et hyperbolae*. Mandò copie di questo testo sia a Leibniz che a Newton, che lo gradì e rispose successivamente inviando delle stampe dei *Principia* e di *Opticks*. Il rapporto di stima tra i due culminò con la nomina di Grandi come *fellow* della Royal Society, nel 1709. Sebbene fosse estremamente entusiasta delle teorie newtoniane, l'italiano nutrì alcuni dubbi in merito all'attrazione, la cui causa restava poco chiara e occulta; poi, anche le idee concernenti il vuoto e la materia non lo convinsero del tutto (Mazzotti, 2019).

Guardando più a sud, nella zona di Napoli si mosse Faustina Pignatelli, promulgatrice del Newtonianismo e a contatto con numerosi intellettuali del resto d'Europa. Tuttavia, il suo slancio relativo alle teorie del fisico inglese trovò poco sostegno tra i suoi compaesani. A livello generale si prediligevano quelle di Cartesio, soprattutto per il sistema del mondo; in aggiunta, a differenza del resto d'Italia, lo studio della nuova matematica – del calcolo integrale – raggiunse una buona diffusione solo nelle ultime decadi del secolo. Tra le motivazioni di questo ritardo, si può ipotizzare il peculiare assetto sociale, fortemente radicato sul settore agricolo e connotato da un retaggio feudale ereditato dai secoli precedenti. Oltre alla scienziata, si distinsero solo due figure avanguardiste: i fratelli De Martino. Nicola elaborò nel 1727

Elementa statices, in cui si interpretavano i *Principia* come una generalizzazione della meccanica di Galilei; Pietro, invece, pubblicò nel 1738 *Philosophiae naturalis institutiones*, libro di testo che illustrava le leggi della Dinamica e dell'attrazione gravitazionale, anche per i corpi celesti (Mazzotti, 2019).

2.1.4 In Francia

Se a inizio Settecento in alcune zone dell'Italia si sentiva ancora l'influenza di Galilei, nello stesso periodo – in tutta la Francia – regnava incontrastata la tradizione cartesiana. La sua teoria dei vortici era da decenni considerata la migliore spiegazione dei moti dei pianeti e dei satelliti: secondo Cartesio, i corpi celesti erano mantenuti in costante orbita perché trascinati all'interno di vortici di una materia eterea; per di più, il tutto avveniva in un cosmo che era un *plenum*, ovvero in cui non esisteva il vuoto (Cohen, 1987-a). In questo modo, secondo Cartesio e i cartesiani, si riuscivano a spiegare le leggi di Keplero in termini di forze di contatto, facilmente comprensibili dagli intellettuali dell'epoca. Al contrario, la teoria di Newton presentava il problema cruciale di un'apparente azione a distanza, criticata anche da Leibniz e Huygens (al tempo tra i pensatori più stimati nel panorama europeo) (Davies, 2009); a questo si aggiungeva la mancanza di una causa per l'attrazione gravitazionale. Per questi motivi, e per uno spiccato senso di nazionalismo, soprattutto in Francia si faticava ad abbandonare la teoria cartesiana in favore di quella newtoniana, sebbene lo stesso Newton nei *Principia* avesse messo in luce numerosi errori ed incoerenze che emergevano dal sistema dei vortici; prima fra tutti, la scorretta interpretazione delle comete, che secondo Cartesio sarebbero dei vortici collassati che compiono un percorso lineare tra gli altri vortici: pertanto non farebbero ritorno, come predetto invece dalla gravitazione di Newton.

Il partito cartesiano anti-Newton fu piuttosto operoso tra il 1700 e il 1730 circa, specialmente per merito delle idee del celebre Giovanni Domenico Cassini (di origine italiana, ma naturalizzato francese), che all'interno dell'Académie des Sciences fu una delle presenze più ascoltate e seguite. Tra le tante obiezioni di Cassini alle teorie newtoniane, spiccò quella relativa alla forma della Terra, ovvero – secondo l'astronomo francese – uno sferoide prolato (schiacciato all'Equatore) e non oblato (schiacciato ai poli), come sosteneva Newton (Feingold, 2010). Un'altra critica mossa da diversi *philosophes* era quella relativa al vuoto cosmico, che era ritenuto una delle maggiori debolezze della teoria (Terrall, 2004). Tuttavia, già nel 1695 Pierre Varignon favorì una parziale accettazione dei *Principia*, almeno da un punto di vista matematico: analizzò e confermò i calcoli newtoniani circa le forze centrali alla base dell'attrazione gravitazionale, spiegando che almeno a livello teorico il sistema era plausibile. I dubbi circa *la pesanteur* (la gravità) erano dunque di natura ontologica e fisica, similmente a quanto già osservato in Italia e in Inghilterra, mentre la plausibilità matematica resisteva alle prove di verifica

(Terrall, 2004). Questo pensiero si può evincere anche da una delle prime reazioni alla pubblicazione dei *Principia*, che nel 1688 il *Journal des Sçavans* definì come il lavoro di un *géomètre* e non di un *physicien* (Casini, 1988).

Nonostante la ferma opposizione dei cartesiani, nei primi decenni del XVIII secolo iniziò ad esserci anche qualche sostenitore del Newtonianismo in Francia: il cavaliere de Louville e Joseph-Nicolas Delisle apprezzarono il suo sistema del mondo, con la descrizione dei moti celesti che sembrava finalmente convincente e universale, oltre che meno imprevedibile della teoria dei vortici. Uno dei primi e dei più importanti seguaci di Newton fu Pierre-Louis Moreau de Maupertuis, che si formò anche in Inghilterra (diventando poi *fellow* della Royal Society nel 1728) e a Basilea, da Johann Bernoulli. Egli risultò un francese atipico per il tempo, siccome rinnegò l'eroe nazionale Cartesio per promuovere le teorie di Newton (Greenberg, 1986). In aggiunta, Maupertuis criticò le idee di Cassini circa la forma della Terra e convinse l'Académie ad organizzare due spedizioni – una in Perù e l'altra in Lapponia – per effettuare delle misure geodetiche in prossimità dell'Equatore e dei Poli e stabilire definitivamente chi avesse ragione circa la curvatura terrestre; Maupertuis stesso fu a capo del viaggio in Lapponia. In seguito ai risultati raccolti dalle spedizioni, pubblicò nel 1738 *La figure de la Terre*, che fu una fondamentale conferma delle predizioni newtoniane (Casini, 1988). Assieme a lui, partecipò alla spedizione polare pure Alexis Claude Clairaut, che qualche anno più tardi lavorò con Joseph Jérôme Lalande e con Nicole-Reine de Labrière per calcolare il ritorno della cometa di Halley nel 1758, assicurando la definitiva vittoria del Newtonianismo sul sistema cartesiano.

Prima di arrivare alla consacrazione di Newton in Francia, però, fu necessario il coinvolgimento di altri personaggi illustri, affinché anche le istituzioni cambiassero il loro pensiero e favorissero la divulgazione su larga scala della teoria della gravitazione universale. L'uomo sicuramente più famoso dell'epoca fu Voltaire, nonché il più fedele ed entusiasta seguace del Newtonianismo. A differenza di Maupertuis, egli si impegnò soprattutto in un contesto informale e popolare, al di fuori delle mura dell'Académie, perché meno preparato per manipolare i tecnicismi scientifici (Greenberg, 1986). Durante il suo soggiorno a Cirey, collaborando con Émilie du Châtelet, compose un'opera che ebbe notevole successo (particolarmente in Inghilterra, come già anticipato): *Éléments de la philosophie de Newton mis à la portée de tout le monde*, pubblicato ad Amsterdam nel 1738. Similmente a quanto visto per le altre nazioni, Voltaire sottolineò il carattere predittivo e pragmatico dei *Principia*, elogiando Newton per la sua genialità. La stima nei confronti dell'inglese sfociò in una forma di venerazione, tanto da paragonare il fisico ad una specie di profeta, capace di traghettare l'umanità verso i segreti più reconditi della Natura. Addirittura, pare che sia stato Voltaire ad inventare e a far circolare l'aneddoto della mela caduta sulla testa di Newton, ispirandolo: la mela stessa avrebbe rappresentato il metodo scientifico adottato nel Newtonianismo, che par-

te da un fenomeno specifico per cogliere le leggi generali che regolano l'Universo (Epstein, 1979). All'efficace divulgazione di Voltaire fecero eco gli entusiasmi di altri pensatori, tra cui Diderot e Buffon, che erano convinti che l'opera di Newton fosse l'apice raggiungibile in ambito scientifico (Casini, 1988).

Negli anni Quaranta del XVIII secolo si osservò quindi una graduale conversione del paese al Newtonianismo, grazie ai contributi di numerosi intellettuali e alla progressiva influenza dell'Académie, che organizzò dibattiti pubblici per mettere a confronto le diverse teorie (Feingold, 2010). A sostegno di questo cambiamento ci furono anche testi di stampo matematico, come la traduzione – pubblicata da Buffon nel 1740 – del trattato di Newton sul calcolo: *De Methodis Serierum et Fluxionum* (del 1736) (Greenberg, 1986). Inoltre, circolarono alcune opere provenienti da altri paesi, come gli scritti di Colson e Maclaurin e la traduzione dei *Principia* da parte di Le Seur e Jacquier (1739-42). Pertanto, entro la metà del Settecento il Newtonianismo era generalmente accettato in Francia, pur essendoci perplessità circa la natura dell'attrazione gravitazionale e circa l'estensione della validità della legge universale; difatti, alcune misurazioni astronomiche sembravano mettere in dubbio la dipendenza dal reciproco del quadrato della distanza, soprattutto ai confini del Sistema Solare: si ipotizzarono leggi in cui compariva la distanza al cubo, oppure elevata al primo grado. Tutto ciò venne risolto solo nel secolo successivo, con la scoperta del pianeta Nettuno e la spiegazione delle bizzarrie dei moti dei corpi celesti vicini ad esso (Roe, 2018).

Uno dei pochi intellettuali che in quegli anni di generale consenso si espresse contestando esplicitamente le teorie newtoniane fu l'enciclopedista Jean Baptiste Le Rond d'Alembert, specialmente nel suo *Traité de dynamique* (del 1743). In esso, rifiutò il concetto di forza di attrazione esposta da Newton, perché la riteneva ambigua e metafisica; criticò la seconda e la terza legge della Dinamica, così come le idee circa la quiete assoluta e il moto composto; infine considerò la legge di gravitazione universale come una formula descrittiva – nel senso di efficace nella spiegazione dei fenomeni – pur senza conoscerne la causa sottostante (Casini, 1988). Qualche anno più tardi, d'Alembert affermò che: “Newton, senza assegnare la causa dell'attrazione gravitazionale, dimostrò nondimeno che il sistema del mondo è unicamente fondato sulle leggi di gravitazione.”¹²

¹²D'Alembert, J. (1752). *Essai d'une nouvelle théorie de la résistance des fluides*. Parigi, p. 24. TAT.

2.2 Forze vive

La ricostruzione storica che verrà presentata di seguito mira a riassumere i punti cruciali di una delle controversie scientifiche più interessanti del XVIII secolo. In essa confluirono i risultati dei primi studi dinamici del Seicento (di Galileo e Cartesio, soprattutto) e, *a posteriori*, si possono riconoscere le origini dei concetti che hanno poi contribuito alla cruciale formalizzazione della Fisica, nell'Ottocento. Tale dibattito, solitamente noto come “disputa sulla *vis viva*”, o “controversia delle forze vive”, riguardò quella che solitamente viene definita come la misura della “forza di movimento” di un corpo. Proprio l'ambiguità attorno alla definizione del termine “forza”, in questo caso, fu una delle principali cause della lunga discussione, con le diverse fazioni che lo interpretavano in modi diversi e quindi ricavano opportune conclusioni dagli esperimenti, per sostenere la propria posizione (Papineau, 1977). Va precisato che oltre agli aspetti che ora rientrerebbero nelle categorie della Fisica, all'epoca i substrati delle teorie comprendevano anche aspetti metafisici – a volte tutt'altro che marginali – che erano trattati alla pari di quelli empirici, se non addirittura superiori.

Ciò che più sorprende è la durata del conflitto, formalmente compresa tra le date simboliche 1686 e 1743 – anche se si vedrà che non si tratta di confini così netti (Laudan, 1968) – specialmente perché gli scienziati partecipanti al dibattito disponevano già di numerose conoscenze sia matematiche che fisiche: in una prospettiva moderna pare assurdo che non sia stato compreso prima il *qui pro quo* tra le parti. Un'altra questione piuttosto curiosa riguarda il tempo che è intercorso tra le prime intuizioni circa la conservazione dell'energia meccanica (da potenziale a cinetica e viceversa), avvenute durante la disputa sulla *vis viva*, e l'enunciato di questo principio, più di un secolo dopo (Hankins, 1965).

Per comprendere poi la portata della controversia, bisogna precisare che oltre all'estensione temporale fu notevole anche quella spaziale, con pensatori di tutta Europa implicati in carteggi, polemiche, esperimenti e pubblicazioni. Nonostante il netto atteggiamento nazionalistico di molti degli scienziati coinvolti, a differenza del paragrafo sul Newtonianismo non si affronterà il discorso delle forze vive entro i confini delle singole nazioni, bensì con uno sguardo più ampio e diffuso, vista anche l'incredibile varietà di protagonisti. Si adotterà pertanto una descrizione cronologica, che si ritiene più adatta all'argomento.

In aggiunta, da un punto di vista fisico sono rilevanti altre due questioni legate a questa disputa: le applicazioni pratiche e ingegneristiche da una parte e la teoria relativa alla struttura della materia dall'altra. Nel primo caso, si vedrà che non fu semplicemente una discussione teorica sulle definizioni delle grandezze dinamiche (van Besouw, 2017; Pacey & Fisher, 1967), come spesso viene narrata; mentre nel secondo caso si esaminerà come la “forza di movimento” di un corpo, e le sue conseguenti interazioni, nascondano in sé considerazioni ancora più complesse e

trasversali, circa i costituenti della materia stessa (Calinger, 1979).

2.2.1 Prima fase: Cartesio e Leibniz

Quasi all'unanimità, gli storici riconducono l'inizio della controversia ad un articolo di Gottfried Leibniz, datato 1686, in cui il tedesco criticò Cartesio e ne corresse (a suo dire) gli errori. Si tratta di *Brevis Demonstratio erroris memorabilis Cartesii et aliorum circa legem naturalem*, pubblicato negli *Acta Eruditorum*. Ciononostante, si reputa più opportuno ricondurre il principio della discussione proprio al trattato contestato all'intellettuale francese, vale a dire i *Principia philosophiae* del 1644. Questa considerazione viene avvalorata anche dall'importanza degli studi condotti nel periodo intercorso tra le due pubblicazioni, soprattutto nell'ambito londinese della Royal Society. Proprio per questo motivo, si ritiene necessario analizzare innanzitutto le teorie cartesiane, poi le evoluzioni dei decenni successivi – con le prime critiche al suo sistema – per giungere infine a comprendere meglio le tesi leibniziane.

Come anticipato nei paragrafi sul Newtonianismo, nel Settecento regnava una prospettiva fortemente meccanica della realtà e della Fisica. Si pensava che ogni fenomeno dovesse essere spiegato sulla base degli impatti e delle interazioni tra i corpi; la popolarità di questa visione si può ricondurre soprattutto al successo della teoria cartesiana. Difatti, nei *Principia philosophiae* Cartesio sottolineò il ruolo centrale che la materia ricoprirebbe nelle leggi naturali. Per lui, la “forza di movimento” di un corpo era pari alla sua “quantità di moto” (virgolettata, perché leggermente diversa dal concetto fisico per come definito al giorno d'oggi), che era vista come la grandezza fondamentale, siccome conservata (per Cartesio), in tutto l'Universo. Alla base del suo ragionamento stava la convinzione che Dio, nella sua infinita perfezione, fosse la causa del moto e quindi che la “forza” dei corpi restasse immutabile nel tempo, preservata dal creatore del Mondo (Iltis, 1971). Secondo Cartesio, quindi, la forza motrice era contenuta nei corpi e veniva trasmessa durante gli urti con altri oggetti. In simboli moderni, tale forza F era misurata da $F = mv$, dove m era la massa del corpo e v la sua velocità, interpretata come una grandezza scalare. Proprio per questo motivo, la “quantità di moto” cartesiana differisce dall'attuale grandezza vettoriale nota come impulso, o quantità di moto: $\vec{p} = m\vec{v}$ (Galli, 1956).

Poiché, nella visione meccanica della realtà, un corpo si muove di moto rettilineo uniforme a meno che non subisca un'azione esterna, risultò essenziale – per l'elaborazione della teoria cartesiana – lo studio degli urti tra oggetti, considerati come duri e incompressibili. Infatti, solamente l'impatto tra corpi avrebbe potuto mutare la velocità degli stessi e quindi la loro “forza”. Si delinearono perciò due scenari, a seconda delle “forze” e delle “resistenze” (non meglio definite da Cartesio)

in gioco; dato un corpo in movimento con “forza” F_1 , che urta contro un bersaglio di “resistenza” R_1 :

- Se $F_1 < R_1$, allora il corpo rimbalzerà e tornerà indietro con la stessa velocità scalare;
- Se $F_1 > R_1$, allora il corpo e il bersaglio procederanno insieme nella direzione del primo, con velocità tali da garantire la conservazione della “quantità di moto”.

Da ultimo, si evidenzia un aspetto curioso di questa teoria: un corpo in quiete non avrebbe “resistenza” nulla, ma proporzionale alla sua massa moltiplicata per la velocità del corpo che lo colpisce (Papineau, 1977).

Negli anni successivi all’opera cartesiana, numerose osservazioni e critiche vennero formulate. Tra tutte, spiccano quelle di Christiaan Huygens, John Wallis e Christopher Wren, appartenenti al contesto della Royal Society di Londra. Tra gli anni 1668 e 1669, infatti, i tre scrissero dei trattati sulle leggi degli impatti tra corpi, riprendendo alcune grandezze introdotte da Cartesio. Huygens notò l’errore concernente la natura scalare della velocità (e quindi della “quantità di moto”), illustrando la sua idea per mezzo del cosiddetto “metodo della barca”, con il quale evidenziava che il sistema di Cartesio non rendeva i moti dei corpi invarianti per due diversi sistemi di riferimento in moto relativo (uniforme) tra loro – vale a dire una persona a riva e una su una barca (Papineau, 1977). Huygens introdusse poi una nuova quantità, che a suo parere si conservava negli urti tra corpi duri: “La somma dei prodotti della massa di ogni corpo duro per il quadrato della sua velocità è sempre la stessa prima e dopo l’impatto.”¹³ Wallis e Wren, invece, analizzarono rispettivamente gli urti inelastici e quelli elastici, confermando la correzione di Huygens di introdurre il carattere vettoriale alla “quantità di moto” cartesiana (Iltis, 1971).

I risultati di Huygens, Wallis e Wren furono concordi nell’osservare che la “forza di movimento” di Cartesio (mv) non si conservava; tuttavia, per Wallis – e successivamente per i seguaci di Cartesio – ciò che restava uguale era la “forza” vettoriale, ovvero $m\vec{v}$. In ogni caso, negli anni appena successivi alle pubblicazioni, le reazioni della Royal Society e dell’Académie des Sciences furono nettamente ostili, visto che, come si è già constatato, Cartesio era ritenuto uno dei massimi esponenti del sapere (anche scientifico) (Iltis, 1971).

A questo punto si può comprendere più a fondo la posizione di Leibniz sostenuta nella *Brevis Demonstratio* del 1686. Similmente a Cartesio, anche per il tedesco doveva esserci una quantità conservata nell’Universo, sempre per ragioni metafisiche; se non ci fosse stata questa conservazione, allora l’Universo avrebbe perso

¹³Huygens, C. (1669). Regles du mouvement dans la rencontre des corps. *Journal de sçavants*, p. 21. TAT.

progressivamente la “forza” contenuta al suo interno e si sarebbe spento; in alternativa, sarebbe potuto esistere il moto perpetuo (van Besouw, 2017). A differenza della “quantità di moto” mv , però, secondo Leibniz la forza motrice conservata sarebbe stata mv^2 , ovvero la *vis viva*. Tale termine – eponimo della disputa successiva – non fu introdotto formalmente nella *Brevis Demonstratio*, bensì nel testo *Essay de dynamique* (scritto nel 1691, ma pubblicato quasi un secolo più tardi) e poi nello *Specimen Dynamicum* del 1695 (Iltis, 1971). Nell’opera del 1686, Leibniz parlò solo di *potentia viva*, che sarebbe l’analogo della moderna energia potenziale (in quel caso gravitazionale), ovvero mgs , con m massa del corpo, g accelerazione gravitazionale terrestre ed s distanza percorsa (in quel caso altezza da terra) (Bernstein, 1981).

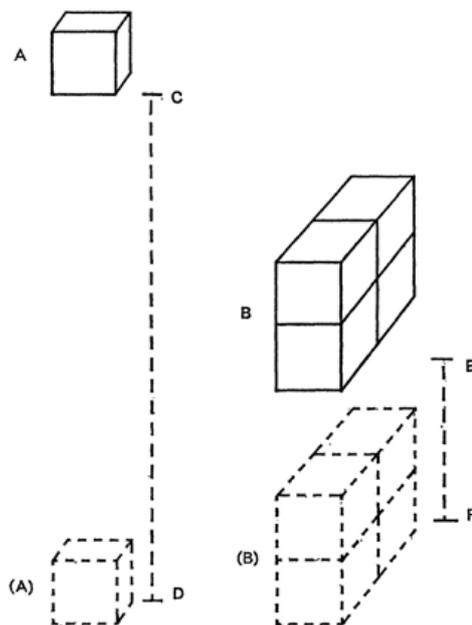
Alla base del ragionamento contenuto nella *Brevis Demonstratio*, il tedesco pose come presupposto – formalizzato poi nello *Specimen Dynamicum* – che la forza motrice dovesse essere misurata dall’effetto che poteva produrre nel consumarsi: “L’effetto deve essere uguale alla sua causa se è prodotto a spese o al consumarsi dell’intera forza.”¹⁴ Quindi, nel caso di caduta, per misurare la forza motrice di un corpo bisognava prendere in considerazione l’altezza alla quale poteva elevare sé stesso. Difatti, nel primo assunto contenuto nella *Brevis Demonstratio* asserì che: “Un corpo cadente da una certa altezza acquista la capacità di tornare al punto di partenza, facendo astrazione dalle resistenze passive.”¹⁵ Quello che si cela in questo ragionamento è il principio di conservazione dell’energia meccanica, che si converte da potenziale a cinetica, per poi tornare nella forma potenziale; tutto ciò, chiaramente, se non avvengono dissipazioni di energia per effetti di attrito. Come anticipato, Leibniz non usò in questo testo la *vis viva* nella forma mv^2 , ma si riferì alla quantità che ora si scriverebbe come mgs ; dalla legge di caduta del Moto Uniformemente Accelerato, scoperta da Galilei, segue facilmente che a gs si può sostituire il valore $\frac{1}{2}(v^2 - v_0^2)$, ottenendo così che la forza motrice è proporzionale alla massa per il quadrato della velocità.

A sostegno della sua tesi – e criticando la “forza” cartesiana – Leibniz si servì anche di un altro assunto, ovvero che: “Per elevare un corpo di una libbra all’altezza di quattro braccia, si richieda la stessa forza che per innalzare un corpo di quattro libbre all’altezza di un braccio.”¹⁶

¹⁴Leibniz, G. (1695). *Specimen Dynamicum*. *Philosophical Papers and Letters*, p. 438. TAT.

¹⁵Cit. in Galli, M. (1956). Sulle idee di Leibniz circa la legge di conservazione delle forze vive. *Bollettino dell’Unione Matematica Italiana*, Serie 3, 11(3), p. 450.

¹⁶Ibidem, pp. 450-451.

Figura 1: Da *Brevis Demonstratio*, Tabella VI.

Procedette quindi con il calcolo della “quantità di moto” cartesiana in questa situazione, per i due corpi, trovando due valori diversi; infatti, il primo corpo avrebbe avuto velocità doppia del secondo e quindi, considerando le masse, “quantità di moto” pari alla metà di quella del secondo corpo. Pertanto, secondo il suo ragionamento, se come forza motrice si usasse la *vis viva*, si otterrebbe lo stesso valore per entrambi i corpi, mentre usando la grandezza introdotta da Cartesio no. Si ritiene doveroso notare che in questo modo Leibniz avrebbe confuso la misura di una grandezza con la “dimostrazione” della sua conservazione: constatare che due corpi in caduta possiedono la stessa forza non implica che questa venga conservata, soprattutto perché non si tiene conto dell’interazione con il suolo. Come suggerito da Carolyn Iltis, per stabilire la conservazione della *vis viva* sarebbe necessario ricorrere ad uno studio meccanico circa il processo di trasferimento di questa quantità tra due corpi, ad esempio tramite una molla (Iltis, 1971).

Riguardo alla critica rivolta a Cartesio, Leibniz aggiunse poi che, secondo lui, il francese sarebbe caduto in errore per via di una prassi spesso diffusa all’epoca, ovvero quella di studiare i fenomeni dinamici sulla base di analogie con quelli statici (relativi, ad esempio, alle leggi delle leve). Nella Statica, infatti, si adoperavano come misure delle forze i valori delle velocità virtuali, rappresentate con il termine dv ; questi venivano moltiplicati per le masse dei corpi, ottenendo $F = m dv$ per calcolare le forze da bilanciare (Iltis, 1971). Va precisato che Leibniz contrappose la *vis viva* (per lui fondamento della realtà) alla *vis mortua* – o “forza morta” – che invece entrava in gioco prima che un corpo fosse messo in movimento. Per lui,

le forze morte starebbero alle vive come un punto sta ad una linea: se le morte vengono messe in moto, allora diventano vive (ad esempio, quando si superano degli ostacoli, oppure quando una molla si estende) (Terrall, 2004). Tutto ciò avverrebbe sulla base del principio di continuità di Leibniz, con le forze morte intese come delle grandezze infinitamente piccole che garantiscono le continuità tra la quiete e il moto. La misura di queste forze sarebbe data da $m \frac{dv}{dt}$, formalmente simile a quella delle “forze impresse” newtoniane, anche se concettualmente differente (Bernstein, 1981). Per di più, per Leibniz le forze morte riguardavano principalmente lo studio dei casi statici, subordinando tutta la Dinamica alle leggi delle forze vive (Papineau, 1977). Addirittura, sostenne che “quod non agit non existit”¹⁷, vale a dire che l’esistenza degli oggetti è strettamente correlata al loro movimento. Più tardi, nel trattato *Monadologia* (del 1714) Leibniz formalizzò le sue idee circa la Dinamica e la struttura della materia, definendo le “monadi” come sostanze fondamentali, indivisibili ed essenziali, continuamente in moto e alla base di tutti i fenomeni naturali (Iltis, 1971).

Tornando al problema della conservazione della *vis viva*, in *Essay de dynamique* Leibniz spiegò che esisterebbero tre equazioni – che lui attribuì ad Huygens – che permettono di descrivere tutti gli impatti tra i corpi: la conservazione delle velocità relative, quella della quantità di moto (vettoriale) e quella della *vis viva*. A differenza di Huygens, però, che considerava i corpi come duri e incomprimibili, il tedesco credeva che, negli urti, gli oggetti si comportassero in modo elastico, riprendendo la forma originale poco dopo l’impatto. Nel momento dell’urto, poi, agirebbero le forze morte, in relazione anche alla durata dell’interazione tra i corpi (Papineau, 1977). Tuttavia, in merito alle tre leggi di conservazione, ora come allora, si sapeva che negli urti non elastici la *vis viva* non restava la stessa, ma veniva persa; a questa obiezione Leibniz rispose dicendo che: “Questa perdita della forza totale [...] è assorbita dalle piccole parti e non è persa completamente per l’universo.”¹⁸ Anche in questo caso, però, non fornì alcuna prova empirica a sostegno della sua tesi.

In definitiva, già da questa prima fase della controversia sulle forze vive si possono intuire due aspetti caratteristici: le argomentazioni, sia da una parte che dall’altra, avevano poche basi empiriche (se non nelle correzioni di Huygens, Wallis e Wren), prediligendo ipotesi di stampo logico o metafisico; e poi, il dibattito non si limitava solo alla misura della “forza di movimento”, ma ad un sistema ben più ampio di descrizione della realtà. Negli anni successivi, le posizioni dei seguaci di Cartesio e di Leibniz si polarizzarono sempre di più, dando vita ad uno scontro più acceso e più supportato sul piano sperimentale. Ciò che restò invariato fu l’idea che, se una “forza” si consumava, allora significava che era stata trasferita ad un

¹⁷Cit. in Bernstein, H. R. (1981). Passivity and Inertia in Leibniz’s Dynamics. *Studia Leibnitiana*, 13(1), p. 7. TAT.

¹⁸Cit. in Iltis, C. (1971). Leibniz and the "Vis Viva" Controversy. *Isis*, 62(1), p. 34. TAT.

altro corpo per mezzo di un contatto (solitamente inteso come impatto, o urto). Il *framework* teorico, dunque, era sempre quello impostato da Cartesio. Secondo David Papineau fu proprio questo presupposto comune a rendere la disputa così intensa e duratura, perché si doveva capire quale delle due opinioni correggesse al meglio il sistema cartesiano (Papineau, 1977).

2.2.2 Seconda fase: newtoniani e nuovi esperimenti

A partire dal 1717, con la pubblicazione della corrispondenza Leibniz-Clarke, diventarono più intense le inimicizie tra newtoniani (di cui Samuel Clarke era esponente) e leibniziani. Nel carteggio in questione emersero soprattutto riflessioni di stampo metafisico, come la natura dello spazio e del tempo, con Clarke che sosteneva il sostanzialismo di Newton e Leibniz che invece ribatteva con tesi relazioniste. Per il primo, quindi (così come per gli altri seguaci di Newton), spazio e tempo sarebbero primitivi ontologici, esistenti indipendentemente da oggetti ed eventi; per il secondo, sarebbero l'ordine delle relazioni tra oggetti ed eventi, dunque ontologicamente derivati e perciò apparenze ben fondate (*phenomena bene fundatum*) per i nostri sensi (Calinger, 1979). Oltre a questi argomenti, in diverse occasioni Clarke criticò la *vis viva*, asserendo che la sua conservazione fosse impossibile, siccome negli urti non elastici sembrava che fosse dispersa; Leibniz ribadì quanto aveva già affermato in precedenza, ovvero che la perdita di *vis viva* era apparente: veniva infatti trasferita alle piccole parti costituenti i corpi (“le loro parti ricevono la forza, essendo agitate internamente.”¹⁹

Al di là di questo scambio di lettere, i newtoniani furono piuttosto partecipi al dibattito sulle forze vive, caldeggiando l'interpretazione dei cartesiani: anche secondo loro la forza motrice dei corpi era pari a $m\vec{v}$. Si delinearono quindi due fazioni, sparse in tutta Europa, ma spesso circoscrivibili a delle divisioni nazionali (e nazionaliste). Infatti, la “vecchia opinione” ($m\vec{v}$) era sostenuta principalmente dai cartesiani-francesi e dai newtoniani-inglesi, mentre la “nuova” (mv^2) era difesa dai leibniziani-tedeschi (Papineau, 1977). La discussione assunse dei toni che portarono i contendenti a servirsi di analogie belliche, come si evince da quanto scrisse Johann Bernoulli in riferimento agli avversari: “Lasciamo che sparino le loro munizioni; quando avranno esaurito tutta la loro polvere da sparo, si arrenderanno e saranno obbligati a cedere alle nostre armi.”²⁰ Ovviamente ci furono numerose eccezioni a queste categorizzazioni, però per la maggior degli intellettuali si trovava una correlazione stretta tra il paese di provenienza e lo schieramento in merito alla controversia sulle forze vive.

Uno degli aspetti che sorprende maggiormente, riguardo a questa disputa, è il

¹⁹Cit. in Papineau, D. (1977). The “Vis viva” Controversy: Do Meanings Matter?. *Studies in History and Philosophy of Science*, 8(2), p.129. TAT.

²⁰Lettera di Bernoulli a Cramer (Londra), 4 settembre 1728. Bernoulli-Edition, Basilea. TAT.

coinvolgimento dei newtoniani; infatti, a differenza delle teorie sull'attrazione gravitazionale – in cui, come si è già osservato, erano direttamente chiamati in causa per difendere le tesi di Newton – nel caso delle forze vive avevano pochi scritti del loro maestro a cui appellarsi. Nei *Principia* si tratta solo di sfuggita il tema della “forza di movimento” insita nei corpi e quando Newton parla di “forza” si riferisce o a quella impressa (pura azione), che non rimane nel corpo una volta che l'azione è finita, oppure a quella di attrazione gravitazionale, che poteva essere interpretata come azione a distanza. Pertanto, l'inglese non prese in esame il caso degli urti, né tantomeno considerò la “forza” come grandezza trasferita da un corpo all'altro, conservandosi (Papineau, 1977). Di conseguenza, mentre Newton era sostanzialmente disinteressato nei confronti dell'analisi degli urti, i suoi seguaci presero una strada diversa e li studiarono a fondo, adottando perfino un concetto di “forza” che si allontanava da quello del loro mentore, siccome era basato sul contatto.

Per queste ragioni, la partecipazione dei newtoniani fu molto probabilmente mossa dall'astio riservato verso i leibniziani, visto che in quel periodo le figure di Newton e Leibniz erano protagoniste di un “duello” a distanza che interessava la paternità del calcolo infinitesimale e anche la vera natura dello spazio e del tempo, tra i vari argomenti. Quindi, seguendo la legge di “azione e reazione”, se i leibniziani sostenevano una tesi, i newtoniani si schieravano conseguentemente dalla parte opposta. Tutto ciò venne esacerbato quando uno dei discepoli di Leibniz, Christian Wolff, iniziò a proporre le sue idee – chiaramente ispirate a quelle del maestro – che portarono ad includere nello scontro pure le sfere religiose e politiche. Per di più, secondo Wolff il sistema newtoniano era puramente matematico e dunque non degno di essere considerato in uno dibattito metafisico: per lui, infatti, ogni disciplina era subordinata alla Filosofia, capace di spiegare ogni cosa. Al pari di Leibniz, poi, era convinto che le monadi fossero l'elemento costitutivo della realtà, sostituendo gli atomi della tradizione democritea (preferiti dai newtoniani) (Calingier, 1969). Per di più, secondo lui, l'esistenza delle monadi non necessitava di prove empiriche *a posteriori*, perché la loro sussistenza era garantita *a priori* dalle verità logiche e filosofiche.

Un evento fra tanti fu emblematico per attestare i punti di vista divergenti tra newtoniani e leibniziani-wolffiani: il concorso dell'Académie des Sciences dell'anno 1724, dal titolo *Les lois du choc des corps*, ovvero “Le leggi che descrivono gli urti tra corpi”. Appare evidente, sulla base di ciò che è stato illustrato finora, quanto questo tema mettesse in disaccordo le due fazioni della disputa sulle forze vive. Non a caso, i due contributi più rilevanti furono quello di Colin Maclaurin (newtoniano), che vinse il premio, e quello di Johann Bernoulli (leibniziano), che invece fu squalificato.

Maclaurin, nel suo saggio *Demonstration des Lois du Choc des Corps*, optò ovviamente per la conservazione di $m\vec{v}$, spiegando, ad esempio, che “la variazione di forza, vale a dire, il suo aumento o la sua diminuzione, è sempre proporzionale

alla forza impressa ed è fatta nella direzione di quella forza. Con *forza impressa* si intende quella che si consuma completamente nel far aumentare o diminuire il moto di un corpo.”²¹ Aggiunse poi che, mentre negli urti inelastici c’è il semplice trasferimento della “forza” da un corpo all’altro, in quelli elastici si deve tenere conto anche della “forza” che serve a riportare i corpi alla loro forma iniziale: il corpo che perde “forza” subisce in realtà una doppia diminuzione di questa (rispetto a quella che perderebbe in un impatto inelastico) e quello che la acquista ne ottiene il doppio (sempre in relazione ad un analogo inelastico) (Papineau, 1977). Bernoulli, nella dissertazione *Discours sur les lois de la communication du mouvement*, prese una posizione antitetica, non solo proponendo mv^2 come misura della forza motrice dei corpi, ma anche confutando l’esistenza di corpi duri e incompressibili: secondo lui, tutta la materia sarebbe elastica e così le interazioni tra corpi potrebbero essere descritte tramite l’analogia con la compressione e l’estensione delle molle. Perciò, quando avviene un urto, “è come se” due molle – corrispondenti alle superfici dei due oggetti – si comprimessero, per poi rilassarsi. Procedette quindi con un esperimento mentale, in cui si servì di molle ideali e della “familiare legge dell’accelerazione”²², ovvero $\vec{p} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$, in cui p corrispondeva alla forza di pressione, o forza impressa. Per mezzo del calcolo integrale ottenne, infine, che $p\Delta x = \frac{1}{2}m(\Delta v)^2$, ovvero che la lunghezza per cui le molle (cioè, le superfici elastiche di impatto) si contraevano (o estendevano) era proporzionale alla *vis viva* distrutta (o prodotta) dall’azione delle molle stesse. Aggiunse, poi, che il numero di molle che un corpo può comprimere consecutivamente prima di fermarsi sarebbe proporzionale a mv^2 (Papineau, 1977; Terrall, 2004). Si nota che la formula ricavata da Bernoulli è molto simile alla conservazione dell’energia meccanica, ma non venne interpretata in quel modo.

²¹Maclaurin, C. (1752). *Demonstration des Lois du Choc des Corps. Recueil des Pièces qui a Remporté les Prix de l’Académie Royal des Sciences*. Parigi, Vol. 1. TAT.

²²Cit. in Hankins, T. L. (1965). Eighteenth-Century Attempts to Resolve the "Vis viva" Controversy. *Isis*, 56(3), p. 286. TAT.

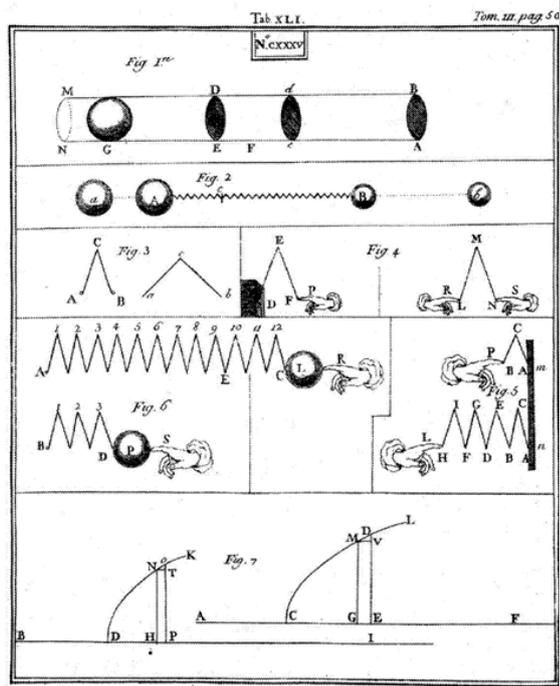


Figura 2: Diagrammi che mostrano l'analogia di Bernoulli tra le superfici dei corpi e le molle.

Come preannunciato, il testo di Bernoulli fu squalificato dal concorso, con la commissione che allegò motivazioni più o meno consistenti. È verosimile che il clima interno all'Académie abbia influenzato nettamente questa scelta, visto l'ampio sostegno alla visione cartesiana. Addirittura, nel 1721 il segretario dell'istituzione, Bernard le Bovier de Fontenelle, aveva affermato che tutti i matematici ed i fisici francesi erano concordi nella misura della "forza di movimento" tramite il valore $m\vec{v}$ (Terrall, 2004). In seguito al contributo di Bernoulli nel 1724, pare che tra i membri dell'Académie iniziasse a svilupparsi una tiepida conversione alla *vis viva*, che però sarebbe stata tenuta il più possibile segreta e gestita all'interno delle mura dell'istituto (Terrall, 2004). Nonostante ciò, nel 1727 Bernoulli pubblicò a sue spese il *Discours*, che diventò uno dei testi di riferimento per i sostenitori della *vis viva*.

Tra il 1727 e il 1728 spiccarono due figure, tra gli intellettuali francesi, una a favore della "vecchia opinione" e l'altra della "nuova". Si tratta di Jean Jacques Dortous de Mairan e Pierre-Louie Moreau de Maupertuis, i quali, come si vedrà nei prossimi capitoli, ricoprirono un ruolo cruciale nell'operato scientifico di Émilie du Châtelet.

Il primo scrisse nel 1728 il testo *Dissertation sur l'Estimation et le Mesure des Forces Motrice des Corps*, che sarà citato e criticato da du Châtelet, come si analizzerà nel quarto capitolo; ciò che è opportuno anticipare, però, è la sua idea originale

circa la “forza” dei corpi, quando incontrano degli ostacoli: per de Mairan, infatti,

- “Non è lo spazio attraversato da un corpo in moto ritardato quello che dà la stima e la misura della forza motrice, ma lo spazio *non attraversato*, che sarebbe stato attraversato se il moto fosse stato uniforme in ogni istante.
- Questi spazi *non attraversati* sono proporzionali alle semplici velocità.
- E conseguentemente questi spazi che rappresentano il ritardo o la riduzione della forza motrice, fintanto che ne consumano l’azione, sono sempre proporzionali a quella forza e alla velocità del corpo, in moto ritardato così come in quello uniforme.”²³

Pertanto, la somma di tutte le “forze” perse a causa degli ostacoli darebbe il valore totale della “forza” iniziale posseduta dal corpo. De Mairan suggerì quindi di misurare la quantità di $m\vec{v}$ persa per ogni intervallo di tempo. Da ultimo, si evidenzia la retorica adottata dal fisico, che si rifiutava di servirsi del calcolo integrale (Terrall, 2004).

Maupertuis, invece, non si schierò a favore della misura della “forza” con $m\vec{v}$, bensì aderì alla teoria della *vis viva*. Questa sua originalità si deve soprattutto al periodo di studio presso Bernoulli, avvenuto a Basilea negli anni Venti del Settecento. Il matematico svizzero lo ritenne uno dei maggiori alleati, all’interno dell’Académie, tanto da definirlo “uno degli zelanti sostenitori in favore della *vis viva*”.²⁴ Malgrado le continue diatribe tra le parti, in Francia, Maupertuis si convinse che grazie alla dissertazione di Bernoulli si fosse ormai raggiunta un’ampia adesione al sistema delle forze vive. Insomma, ciascuna fazione credeva di aver avuto la meglio sull’altra (Terrall, 2004).

Tra la seconda e la terza decade del XVIII secolo, numerosi scienziati realizzarono degli esperimenti pratici volti a trovare un riscontro empirico che andasse a decretare quale dei due schieramenti della controversia avesse ragione. Ciò che ne derivò fu una progressiva evoluzione dei concetti di impulso e di *vis viva*, via via più vicini a quelli che ora corrispondono ad integrare la forza nel tempo o nello spazio.

Particolarmente rilevanti furono i risultati sperimentali dell’olandese Willem Jacob ‘s Gravesande, che da seguace della tradizione cartesiana-newtoniana passò ad apprezzare (anche) quella leibniziana, proprio a causa di ciò che scoprì con i suoi esperimenti. Egli elaborò dei setup che permettessero di verificare qualcosa di simile a ciò che Leibniz aveva dichiarato nella *Brevis Demonstratio* (e negli scritti

²³de Mairan, J. J. (1728). *Dissertation sur l’Estimation et le Mesure des Forces Motrices des Corps*. *Mémoires de l’Académie Royale des Sciences*. Parigi, pp. 41-42. TAT.

²⁴Lettera di Bernoulli a Thiancourt, 29 maggio 1729, Bernoulli-Edition, Basilea. TAT.

successivi): fece cadere dei corpi da diverse altezze, variando sia la distanza dal suolo che la massa degli oggetti. Come superficie di impatto utilizzò degli strati di argilla, o di cera, per poter misurare la profondità del solco lasciato dai corpi, una volta caduti. Confrontò anche coppie di oggetti le cui altezze di partenza stavano in proporzionalità inversa alle loro masse, trovando che il solco era uguale. Arrivò alla conclusione che a parità di profondità corrispondeva parità di forza motrice iniziale, trovando che questa era proporzionale al quadrato della velocità. Secondo lui, quindi, sussisteva una relazione tra lo spazio percorso dai corpi e le forze consumate dai corpi stessi (Hankins, 1965). Alcuni di questi risultati vennero pubblicati nel 1722, in *Essai d'une nouvelle théorie sur le choc des corps*.

Una delle critiche principali che gli fu rivolta venne dal matematico svizzero Jean-Louis Calandrini, che obiettò che il mezzo in cui avveniva l'impatto (ed il rallentamento) dei corpi doveva essere uniforme; dunque, le "forze" degli oggetti sarebbero state consumate di quantità uguali in tempi uguali. La controrisposta di 's Gravesande fu che lo "sforzo di pressione" era proporzionale sia alla forza impressa dal corpo che alla velocità del corpo stesso e pertanto la maggior quantità di "forza" veniva persa nei primi istanti dell'impatto, quando l'oggetto era più veloce (Papineau, 1977). Un'ulteriore critica rivolta a 's Gravesande arrivò da de Mairan, nella *Dissertation* del 1728: è vero che nei primi istanti dell'impatto un corpo incontra più ostacoli nel suo percorso – per unità di tempo – ma è anche vero che in quel frangente sta andando più veloce (rispetto agli istanti successivi) e quindi gli ostacoli avrebbero meno tempo per agire. Ciò che segue, per de Mairan, sarebbe quindi una perdita di "forza" costante per ciascun intervallo di tempo (Papineau, 1977).

Un pensiero simile a quello di Calandrini era stato enunciato anche nella corrispondenza Leibniz-Clarke, relativamente ai meccanismi di accelerazione dei corpi sotto l'influenza della gravità. Nel carteggio si citava la bozza di un testo di Newton, in cui l'inglese asseriva che la gravità, essendo uniforme, doveva imprimere ai corpi in caduta (non si sapeva come) la stessa quantità di forza per ogni intervallo di tempo (Papineau, 1977). Siccome non esistevano modelli per la gravità fondati sull'impatto che potessero spiegare per quali motivi un corpo fosse accelerato in discesa, mentre ce n'erano per la salita, ne seguì che per i cartesiani e i newtoniani la misura della "forza" sarebbe stata proporzionale al tempo di ascesa di un corpo. Difatti, questo sarebbe stato decelerato uniformemente dalla gravità, che ne consumava valori costanti di "forza", al passare del tempo. A questa tesi, i leibniziani risposero confutando l'ipotetica uniformità della gravità, apportando come motivazione il maggior numero di particelle d'aria incontrate dal corpo all'inizio, quando la sua velocità era più grande. La controproposta portata dai sostenitori della *vis viva* era proprio quella illustrata da Leibniz, ovvero credevano che l'effetto che poteva misurare la forza motrice fosse l'altezza a cui si poteva elevare un corpo.

2.2.3 Terza fase: “Disputa sulle parole” e conclusione

Insomma, dopo decenni di dibattiti e di esperimenti, si cominciava a delineare una delle differenze fondamentali tra l’impulso e la *vis viva*, ovvero i differenti risultati che si ottenevano considerando gli intervalli di tempo o di spazio, nell’applicazione della forza. Lo stesso ‘s Gravesande, negli anni successivi, si rese conto che forse non era corretto scindere dicotomicamente le due grandezze – come se solo una delle due fosse corretta – ma che piuttosto coesistevano nei fenomeni d’urto; si trattava quindi di due quantità distinte ed entrambe descrittive del movimento dei corpi, anche se sotto lenti diverse. Evinse queste conclusioni da un particolare esperimento, in cui fece scontrare due sfere ineguali di rame (da direzioni opposte) contro una di argilla. Notò che, se le masse di quelle di rame erano inversamente proporzionali alle loro velocità, allora l’impulso si conservava. Osservò però che pure la *vis viva* entrava in gioco nella descrizione del fenomeno, non tanto per la sua conservazione (siccome l’urto era anelastico), ma perché si accorse che la massa minore – con velocità maggiore – aveva lasciato un solco più profondo sulla sfera di argilla: le compressioni di quest’ultima erano proporzionali alle rispettive forze vive iniziali (Hankins, 1965).

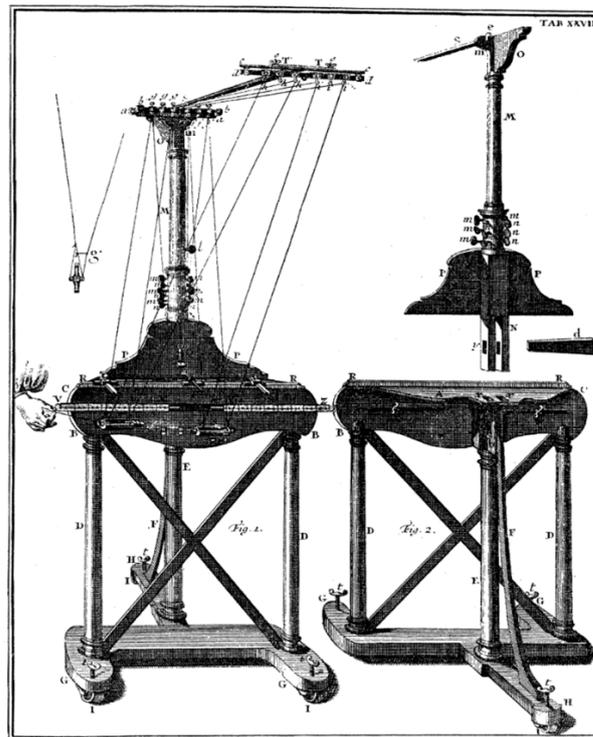


Figura 3: Esempio di pendolo balistico usato da ‘s Gravesande, illustrato in *Physices elementa mathematica, experimentis confirmata* (1748), Vol. I.

Negli anni Quaranta del Settecento questa nuova prospettiva si diffuse maggiormente, con diversi intellettuali che padroneggiavano le regole del calcolo infinitesimale e che riuscivano a comprendere le differenti origini di quantità di moto e *vis viva*. Proprio l'acceso dibattito dei decenni precedenti portò alla necessità di comprendere meglio le leggi della Dinamica e di definire con maggior chiarezza e precisione le sue grandezze caratteristiche (van Besouw, 2017; Laudan, 1968).

Solitamente, si indica come data di conclusione della controversia il 1743, facendola coincidere con la pubblicazione del *Traité de dynamique* di Jean Baptiste Le Rond d'Alembert. In quest'opera, l'enciclopedista elaborò la definizione della variazione di impulso sulla base della somma delle "resistenze", misurandola con il prodotto tra massa e velocità (vettoriale). Aggiunse poi che il numero di ostacoli superati da un corpo era proporzionale al quadrato della velocità, ammettendo quindi entrambe le definizioni di "forza". Tra le due, favorì tuttavia la misura con la quantità di moto; come già visto, criticò inoltre il concetto di forza newtoniana, in quanto oscura e metafisica (Hankins, 1965). Però, ciò che rese celebre questo trattato fu l'etichetta che d'Alembert pose sul dibattito delle forze vive: "Una disputa sulle parole"²⁵, che aveva già occupato troppo a lungo gli intellettuali europei. In sostanza, secondo lui, non c'era più alcun bisogno di discuterne, perché riguardava argomenti troppo astratti e perché, a suo parere, era ormai un problema superato, siccome era convinto che tutti fossero arrivati alla consapevolezza che entrambe le grandezze erano corrette. Si procederà ora a confutare entrambe le motivazioni presentate da d'Alembert.

Circa il carattere poco pratico della controversia, si notano almeno due controesempi: *in primis* l'aspetto meccanico, con molteplici sistemi tecnici basati sui movimenti di pesi e carrucole; fu paradigmatico il caso del vantaggio meccanico del cuneo, che impegnò scienziati di tutto il continente per trovare le proporzioni più efficienti per rompere e tagliare oggetti di vario tipo. Tra i tanti, anche i già citati 's Gravesande e Desaguliers si cimentarono in questi calcoli (van Besouw, 2017). In secondo luogo, la correlazione tra le forze vive e la nascente branca termodinamica delle macchine a vapore. Ad esempio, nell'opera *Hydrodynamica* di Johann Bernoulli, lo svizzero calcolò la *vis viva* dell'aria compressa da un pistone all'interno di un recipiente, ponendo le basi per la successiva realizzazione dei motori a vapore di Thomas Newcomen e James Watt. Per di più, Bernoulli andò molto vicino alla definizione dei concetti di energia cinetica e potenziale, poi essenziali nella Fisica dei secoli seguenti; infatti, egli trovò il valore della *vis viva* "classica", che nel suo caso valeva $\frac{1}{2}(M+m) \cdot v^2$, dove m era la massa del pistone ed M quella del peso aggiunto per comprimere. Il termine $\frac{1}{2}$ lo portò ad interpretare

²⁵Si riporta anche la frase completa originale, perché la si ritiene particolarmente esplicativa del tono di d'Alembert in merito: "Une discussion Metaphysique très futile, ou une dispute de mots plus indigne encore d'occuper les philosophes." ("Una discussione metafisica piuttosto futile, o una disputa sulle parole indegna di occupare ancora i filosofi.")

la quantità ottenuta come “mezza” *vis viva* e non come energia cinetica. Tuttavia, chiamò questo valore *vis viva actualis*, distinguendola da quella immagazzinata nel recipiente, prima di rilasciare il pistone: questa seconda grandezza era denominata *vis viva potentialis* (Pacey & Fisher, 1967) Prima di arrivare alle moderne definizioni di energie cinetica e potenziale, però, passò più di un secolo, quando nel 1873 Sir William Thomson introdusse questi termini in *Elements of natural philosophy*. Per quanto riguarda, invece, l’unanime – secondo d’Alembert – cognizione che impulso e *vis viva* non fossero concetti in contrasto, ma entrambi leciti, molteplici pubblicazioni posteriori al 1743 attestano il contrario. Nel 1745 Eulero criticò aspramente le teorie dei wolffiani (e l’idea che la materia fosse costituita dalle monadi), oltre a scrivere *De la force de percussion et de sa veritable mesure*; nel 1747 Immanuel Kant propugnò la quantità di moto come unica misura della “forza di movimento”; nel 1749 Daniel Bernoulli elaborò un trattato in favore della *vis viva*; nel 1758 Roger Boscovich, nel *Philosophiae naturalis theoria*, negò l’esistenza delle forze vive come reali grandezze fisiche (secondo lui si trattava di comode formule matematiche) (Laudan, 1968). Proprio quest’ultimo suggerì una peculiare teoria della struttura della materia, in cui le forze agirebbero tutte a distanza e i corpi non entrerebbero mai davvero in contatto: le interazioni sarebbero spiegate in termini di “punti di massa”, che a breve distanza sentirebbero tra loro delle forze di repulsione. Aumentando la distanza reciproca, si alternerebbero forze attrattive e repulsive, inframmezzate da “punti di coesione”, che corrisponderebbero ai vari stati della materia (Hankins, 1965). Per il tempo, questa fu una delle ipotesi più complesse circa la struttura della materia e si situò nella tradizione degli anni precedenti – cresciuta parallelamente alla controversia sulla *vis viva* – che vide scontrarsi la teoria corpuscolare di Newton, con atomi indivisibili, impenetrabili e passivi, e quella di Leibniz, con le monadi come sostanza della realtà in costante movimento (Calinger, 1979).

Come visto per gli scritti di Bernoulli, anche Boscovich andò molto vicino al concetto di conservazione dell’energia meccanica, trovando il corrispettivo della formula $\int_A^B F dx = \frac{1}{2}mv_B^2 - \frac{1}{2}mv_A^2$, nota adesso come “Teorema delle forze vive”, o “Teorema dell’energia cinetica”. Egli interpretò il tutto in modo simile allo svizzero, credendo che la *vis viva* potesse essere immagazzinata in qualche modo, soprattutto nelle molle compresse. Tuttavia, l’idea di un’energia che assume diverse forme non era concepibile all’epoca, perché sarebbero serviti gli esperimenti elettrici e chimici degli anni seguenti (Hankins, 1965).

In conclusione, la disputa sulle forze vive era tutt’altro che conclusa nel 1743: per quasi due decenni continuarono ad essere pubblicati testi che caldeggiavano per una misura o per l’altra. Ciononostante, si osservò che sia i toni che il numero di tali opere andò via via ad attenuarsi, portando verso una graduale risoluzione del conflitto. Tuttavia, questo non deve trarre in inganno, credendo che questo risul-

tato significasse una comprensione diffusa della contemporanea validità di impulso e *vis viva*: anzi, proprio per gli scritti di Boscovich e Maclaurin, tra gli altri, in molti restarono dell'idea che a vincere la diatriba fosse stata la quantità di moto (Laudan, 1968). Dunque, gli strascichi della disputa si prolungarono per diversi anni e fu comunque necessario lo studio approfondito dell'energia meccanica (e non solo) per riabilitare definitivamente la *vis viva*, questa volta con la veste di energia cinetica. In ogni caso, quello che attesta la controversia analizzata è la significativa difficoltà che si riscontra nella definizione delle grandezze fisiche: pur conoscendo le espressioni matematiche corrispondenti e pur avendo a disposizione molteplici esperimenti di controllo, ci vollero parecchi anni per comprendere a fondo la realtà fisica sottostante (Hankins, 1965; Terrall, 2004; Papineau, 1977).

3 Donne e Scienza nel Settecento

Dopo aver analizzato il contesto scientifico in cui si inserì Émilie du Châtelet, si approfondirà ora quello socio-culturale, in riferimento alla condizione femminile. Dapprima si esamineranno le possibilità di istruzione riservate alle donne, per poi osservare alcune strategie attuate dalle poche che sono riuscite a ritagliarsi un posto nella Scienza; si passerà quindi a considerazioni più generali sull'immaginario settecentesco in riferimento al rapporto donne-Scienza, per arrivare ai primi semi di femminismo e di lotta per la parità di genere, concludendo infine con una riflessione mirata sulla storiografia di genere nel caso specifico del Settecento. Nel secondo paragrafo si introdurrà la figura di Émilie du Châtelet, narrandone la biografia e le esperienze principali, specialmente quelle legate al suo operato scientifico; si riassumeranno poi i due scritti fisici più rilevanti, aprendo la strada per lo studio dei contenuti veri e propri, che sarà il cuore del quarto capitolo.

3.1 Quadro storico generale

Pensando al contributo storico delle donne nella Fisica, un'immagine – più di altre – salta alla mente: quella della foto scattata nel 1927 alla quinta Conferenza di Solvay (dal titolo *Electrons and Photons*), in cui si può osservare quello che all'epoca era considerato l'olimpico dei pensatori geniali, che più o meno coscientemente stava sviluppando la prima rivoluzione quantistica; ebbene, in mezzo a ventotto colleghi maschi spicca l'unica donna, Marie Curie. Solitamente, questa foto viene utilizzata per celebrare gli scienziati che, a partire da quel periodo, hanno reso la Fisica una delle discipline di punta della società, ispirando le generazioni successive.

Tuttavia, in questa ricerca si desidera concentrarsi su un altro aspetto, vale a dire il lampante esempio di disparità di genere nella Scienza, espresso in questo caso dal rapporto numerico 28:1. Tale fenomeno trova le sue origini molti secoli addietro e in questo capitolo si analizzerà la *Woman question* nel campo ristretto del Settecento, cruciale per due motivi principali. *In primis*, perché fu un periodo che pose le basi teoriche (e in certi casi anche pratiche) per quei movimenti socio-politici che nei decenni successivi avrebbero lottato in favore di una maggiore parità tra i sessi e per il suffragio universale; e poi, perché il XVIII secolo, specialmente in Francia e in Italia, mostrò con cinica chiarezza quanto siano precari e volatili i diritti che si ottengono con tanta fatica (Clinton, 1975).

Risulta necessario precisare che l'analisi seguente non potrà essere esaustiva, viste le condizioni peculiari di ogni nazione europea del tempo, però si spera che possa fornire un'immagine sufficientemente rappresentativa dei diritti riservati alle donne. Inoltre, si troveranno cenni a periodi precedenti al Settecento, constatando tuttavia che i primi veri cambiamenti sostanziali circa lo status delle donne nelle

Scienze sono avvenuti proprio nel XVIII secolo, che anche per questo motivo verrà esaminato più nel dettaglio.

3.1.1 Accesso all'istruzione

Innanzitutto, bisogna capire perché siano note così poche figure femminili nella storia della Fisica: una prima risposta, tanto semplice quanto triste, riguarda l'accesso all'istruzione. Difatti, per le donne erano precluse tutte le vie ufficiali di apprendimento, quali le accademie e le università, così come le scuole di formazione che permettevano di entrare nelle università stesse. Emblematico e surreale è il caso della Francia, la cui Académie des Sciences, fondata nel 1666, ha ammesso al suo interno la prima donna solo nel 1976, con la nomina di Yvonne Choquet-Bruhat (Gardiner, 1984).

In controtendenza con gli standard europei del tempo, va citato il caso dell'Italia, che nel 1723 vide l'Accademia de' Ricovrati – che ammetteva al suo interno la presenza di donne – istituire una serie di incontri per discutere se le donne dovessero essere ammesse a studiare le scienze e le arti figurative (Findlen, 1993); il dibattito fu molto acceso e la risposta reazionaria non tardò ad arrivare, ma questo probabilmente preparò il terreno per degli eventi unici che avvennero in Italia, ovvero il conferimento della laurea a delle donne e anche l'assegnazione di incarichi in qualità di docenti universitarie. Pure in questo caso non mancarono le critiche di alcuni uomini, come riportato dal critico Bienvenuto Robbio a fine secolo, che parlando del corpo docenti bolognese si espresse con disprezzo in merito al “plotone di insegnanti donne”.²⁶

Al di là delle forme canoniche d'istruzione, specialmente nel XVIII secolo si diffuse in Europa il fenomeno delle lezioni pubbliche, con divulgatori che intrattenevano e dilettavano chiunque potesse permettersi qualche moneta per pagarne il lavoro. Le strade di molte città europee erano popolate da personaggi che si potrebbero collocare a metà tra i cantastorie e gli attori, mettendo in scena in modo accattivante – e soprattutto comprensibile – esperimenti pratici di ogni tipo. I temi di queste lezioni spaziavano dall'elettricità (fenomeno di punta del tempo, che attirava l'attenzione di tutti) all'ottica, dalla botanica all'astronomia, dall'anatomia alla mineralogia, per arrivare alle lingue e alle arti. Questi spettacoli esplicativi differivano per complessità e ricchezza delle informazioni, proporzionalmente al prezzo del biglietto (Lynn, 2002). Le accademie e le università guardavano con diffidenza questi insegnamenti pubblici, probabilmente perché consideravano il sapere come una fiamma da dover custodire negli esclusivi templi riservati all'élite della società.

Per quanto riguarda la condizione femminile, nel 1772 Denis Diderot riportò che “a livello di stato civile, le donne sono poste nella stessa categoria dei bambini e

²⁶Robbio, B. (1798). *Disgrazia di Donna Urania ovvero degli studi femminili*. Firenze, p. 122.

degli imbecilli.”²⁷ Osservando il tessuto sociale, alle donne era affidato il compito di prendersi cura dei rispettivi nuclei domestici, accudendo sia i figli che i genitori anziani e servendo e riverendo il marito, oltre a svolgere tutte le faccende di casa (Muurling, 2021). In alcuni casi, le donne riuscivano ad ottenere dei lavori retribuiti anche al di fuori delle mura domestiche, ma si trattava sempre di mansioni sottopagate (tendenti allo sfruttamento) e che richiedevano una minima preparazione, puramente manuale (Honeyman & Goodman, 1991). Questo riguardava trasversalmente le famiglie di ceti medio-bassi, mentre per le donne borghesi ed aristocratiche aumentavano i diritti e diminuivano i doveri: conformemente al patrimonio familiare cresceva anche la possibilità di assumere dei domestici che si occupassero della gestione dell’abitazione, così come incaricare delle balie per seguire i figli. In questo modo, le signore più agiate potevano permettersi di dedicare le proprie giornate ad attività più teoriche ed entrare nella vita intellettuale della città (Scerri, 2022).

Come esposto in precedenza, le realtà accademiche erano gestite da pochi uomini, quasi tutti abbienti e di nobili origini. Alle poche donne fortunate abbastanza da ricevere un’istruzione dignitosa erano destinati i salotti letterari privati e i *café*: luoghi quotidiani di ritrovo che accoglievano persone di alta estrazione intente a discutere temi solitamente di carattere sociale, politico e filosofico (Mazzotti, 2004; Zinsser, 2007). In questi ambienti le donne trovavano spazio e voce tra gli interlocutori uomini e in certi rari casi riuscivano ad ospitare e ad organizzare questi ritrovi, ricoprendo posizioni socialmente importanti (Scerri, 2022). Ad alcune donne era permesso frequentare – e a volte gestire – i Gabinetti di Fisica, strettamente legati al sapere scientifico e con intento principalmente divulgativo.

Circa il percorso di apprendimento in età giovanile, per le bambine e le ragazze povere risultava impensabile accedere ad una qualsiasi forma d’istruzione strutturata, mentre per quelle di estrazione borghese si prospettava un breve periodo di formazione in convento, dove imparavano alcune nozioni matematiche di base, si esercitavano con la lettura e la scrittura e ricevevano lezioni di morale basate sulla Bibbia (Gardiner, 1984). Questo *iter* “scolastico” era decisamente meno regolare e approfondito di quello riservato ai maschi e quindi spesso insufficiente per poter partecipare, in età adulta, alle discussioni più alte in quasi ogni ambito del sapere (Logan, 1994).

Infatti, nella maggior parte dei casi che verranno citati in questo capitolo, le donne che sono riuscite a ritagliarsi un posto nei circoli culturali del tempo hanno ricevuto lezioni private: in alcuni casi, direttamente dal padre, mentre in altri intervenivano precettori e mentori assunti dalla famiglia (Petrovich, 1999; Zinsser, 2007). Ciononostante, questi insegnamenti erano discontinui e per di più dipendevano dal gusto e dalla formazione del tutor, che non di rado era poco preparato per fornire

²⁷Diderot, D. (1951). *Sur les femmes: Oeuvres*. Parigi, ed. André Billy. TAT.

un'educazione di livello. In aggiunta all'interazione con precettori, diverse donne di famiglie borghesi o aristocratiche potevano avvalersi di notevoli librerie private, con copie dei testi degli autori più influenti del momento.

In generale, quindi, le possibilità di accedere al sapere, soprattutto a quello scientifico, erano limitate alla formazione ricevuta grazie alla famiglia d'origine e, in certi casi, al coinvolgimento del marito: capitava spesso che alcuni scienziati chiedessero alle mogli di affiancarli negli esperimenti di laboratorio, oppure in altre mansioni meticolose e compilative. Un'altra strategia che le donne avevano per avvicinarsi al mondo più erudito e sbirciare quello che accadeva tra le mura delle accademie e delle università era quella di instaurare legami con i membri di queste realtà, per restare aggiornate sulle discussioni e sui temi più rilevanti (Petrovich, 1999; Zinsser, 2007).

In ogni caso, nel Settecento stava aumentando il divario tra amatori e professionisti, perché iniziavano a diventare necessarie apparecchiature da laboratorio più evolute (e non facilmente costruibili, o reperibili in casa) per studiare i fenomeni ancora poco conosciuti. Pertanto, le donne potevano approcciarsi alla Scienza solo a livello amatoriale e solo poche di loro sono riuscite a dare un contributo sostanziale alla ricerca (Gardiner, 1984).

3.1.2 Alcuni esempi di donne nella Scienza

Soffermandosi in particolare sulle realtà storiche di Francia e Italia nel XVIII secolo, due figure spiccano per fama e riconoscimento nel campo della Fisica: Émilie du Châtelet nell'ambito parigino (cfr. 3.2) e Laura Bassi in quello bolognese. Questa rilevanza è evidente anche studiando un'opera realizzata tra il 1741 e il 1755 dallo storico Jacob Brucker e dall'incisore Johann Jacob Haid: il *Bilder-Sal* (in tedesco), tradotto in latino come *Pinacotheca Scriptorum*, ovvero una galleria di ritratti degli "scrittori". Con questo termine non si intendevano solo quelli che ora sarebbero i saggisti o i romanzieri, bensì una classe ben più ampia di intellettuali, i quali componevano quella che è passata alla storia come la "Repubblica delle lettere" (Solleveld, 2022).

Questa era costituita da una rete di persone colte – già sviluppatasi a partire dal Seicento e di cui facevano parte personaggi del calibro di Galileo, Newton e Keplero – che facevano circolare lettere e missive. I contenuti di queste riguardavano sia discussioni private che scoperte o teorie che si volevano rendere note agli altri intellettuali dell'epoca, oltrepassando i confini nazionali. In un certo senso, ne facevano parte tutti coloro che *scrivevano*, in diversi ambiti e con diverso successo. Di solito erano legati al mondo delle università, o alle accademie, oppure partecipavano alla vita di corte e godevano del sostegno dei regnanti. In ogni caso, si trattava di persone di cultura e di potere, oltre che ricche, il più delle volte (Solleveld, 2022). Ebbene, il *Bilder-Sal* contiene i ritratti di cento intellettuali, con annessa biografia

ed elenco delle pubblicazioni; oltre a notare uno spiccato stile nazionalista, con il 75% delle figure provenienti dalla Germania, si può osservare che sono presenti solo quattro donne: Émilie du Châtelet, Laura Bassi, Luise Gottsched (poetessa) e Magdalena Sybilla Rieger (poetessa). Anche per questo motivo, in questo capitolo si dedicherà maggiore attenzione alla figura di Laura Bassi. A quest'ultima si potrebbe dedicare un intero lavoro di tesi – che si spera possa essere svolto in futuro – soprattutto in merito alle sue opere, troppo poco studiate fino ad ora; purtroppo, qui sarà possibile riservarle solo qualche pagina.

In Italia

Come anticipato nel paragrafo precedente, proprio nel Settecento il contesto accademico bolognese stava prendendo delle decisioni eccezionali e inusuali, come conferire la laurea a delle donne e assumerle come docenti; va precisato che questi casi sono da intendersi come episodi isolati e non come “precedenti”, o “apripista”, volti ad una rivoluzione sociale interna all'università (Elena, 1991). Per di più, è probabile che il senato accademico bolognese abbia preso ispirazione dall'accoglienza riservata all'evento straordinario della prima laurea assegnata ad una donna, nel 1678 a Padova. Infatti, al conferimento della laurea in Filosofia a Elena Cornaro Piscopia era presenti quasi 20000 persone, affascinate da una circostanza così insolita. Ciononostante, una volta terminata la cerimonia, i rettori dell'università di Padova si accordarono per non concedere più, nei decenni a seguire, un simile riconoscimento a delle donne (Findlen, 1993).

Negli anni Trenta del Settecento, l'università di Bologna cercava di recuperare il proprio prestigio, poiché la morte di Luigi Ferdinando Marsili (fondatore dell'Istituto delle Scienze) aveva fatto diminuire il sostegno economico di diverse famiglie nobili. Non a caso, nel 1732 – a soli 21 anni – **Laura Bassi** (1711-1778) fu chiamata a difendere 49 tesi fisiche e filosofiche davanti a diversi dotti della città, tra cui il cardinale Girolamo Grimaldi e l'arcivescovo Prospero Lambertini, poi Papa Benedetto XIV e mecenate della stessa Bassi per tutta la sua carriera. L'acclamazione degli astanti fu fragorosa e lei ottenne un mese più tardi il dottorato – non equivalente all'attuale dottorato – in Filosofia. Nello stesso anno ricevette anche l'assegnazione della cattedra di Filosofia, non potendo però insegnare regolarmente nella sede dell'Archiginnasio, per via del suo sesso (Simeoni, 1947). Ciononostante, in tutte le occasioni pubbliche di prestigio il senato accademico chiamava Bassi per mostrarla come fiore all'occhiello, quasi come se fosse un'esibizione. Paula Findlen la definisce pertanto un “ornamento pubblico”, usata per attirare attenzione e curiosità (Findlen, 1993).

Difatti, a livello concreto, Bassi non disponeva dei diritti dei suoi colleghi maschi, subendo costanti limitazioni circa la possibilità d'insegnare tra le mura universitarie; per questo motivo, a partire dal 1738 organizzò delle lezioni liberamente accessibili a casa sua (e del marito Giuseppe Veratti, anche lui fisico), che portò

avanti per 28 anni (Elena, 1991). Questi incontri pubblici di Fisica sperimentale presero il nome di “Gabinetto di Fisica” e si diffusero principalmente nell’Italia del Settecento (molto celebre è il caso di Giovanni Poleni a Palazzo del Bo, a Padova). Laura Bassi continuò a ricevere uno stipendio dall’università, che però risultava insufficiente per coprire le spese volte a realizzare apparati di laboratorio per i suoi insegnamenti domestici e per le ricerche eseguite con il marito. Insistette perciò più volte al fine di ottenere un aumento e ci riuscì, arrivando alla fine della carriera ad un compenso mensile di 1200 lire, superiore a quello dei colleghi maschi, che era compreso tra le 800 e le 900 lire (Findlen, 1993).

Per quanto riguarda il suo contributo scientifico, sono rimasti solamente i testi di quattro dissertazioni, raccolte nei *Commentarii* dell’Accademia di Bologna. Nella prima di queste, *De aeris compressione*, si concentrò sul problema termodinamico dei limiti di validità della legge di Boyle-Mariotte (proporzionalità inversa tra volume e pressione di un gas): notò che in presenza di umidità, ovvero di vapore acqueo, la legge non descriveva correttamente la relazione tra volume e pressione (Cavazza, 2006). Ad argomenti simili dedicò anche *De immixto fluidis aëre*. Negli altri lavori (*De problemate quodam mechanico* e *De problemate quodam hydrometrico*), Bassi dimostrò di saper adoperare il calcolo infinitesimale, applicandolo al comportamento dei fluidi, o ai problemi meccanici. Oltre a questo, si interessò anche di fisiologia (studiando il funzionamento dell’occhio umano), e in modo particolare di elettricità, esaminando quella atmosferica e usando macchine elettrostatiche per valutarne gli eventuali effetti benefici nella cura di alcune malattie (Cavazza, 2012).

Avendo a disposizione un salario regolare che le permetteva di svolgere i suoi esperimenti, Bassi non era obbligata a pubblicare con costanza per essere riconosciuta; per tale motivo, la sua fama è principalmente legata all’insegnamento privato e al suo lavoro di divulgazione scientifica. Bisogna inoltre precisare che, diversamente dai fisici maschi suoi contemporanei, doveva anche dedicare il tempo ai figli (otto, di cui cinque sopravvissuti all’infanzia) e alla gestione della casa. Per di più, le gravidanze ricorrenti le causavano malattie che duravano diverse settimane, impedendole di dedicarsi alla “nostra fisica”²⁸, come la chiamava in riferimento al lavoro svolto con Giuseppe Veratti.

Come attestano diverse lettere destinatele, Bassi era stimata da numerosi intellettuali, tra tutti Alessandro Volta (Elena, 1991) – che la considerava un’esperta nel settore dell’elettricità – e Voltaire, che nel 1744 le scrisse: “Onoratissima Signora: vorrei visitare Bologna per poter dire ai miei concittadini che ho visto la Signora Bassi [...] Siccome non c’è nessuna Bassi a Londra, entrerei più volentieri nella vostra Accademia di Bologna piuttosto che in quella inglese, anche se questa può

²⁸Lettera di Laura Bassi Veratti a Petronio Matteucci, 23 Feb. 1756, in Melli, *Epistolario* (cit. n. 9), p. 158.

aver prodotto un Newton.”²⁹

Laura Bassi morì nel 1778, dopo aver ricoperto per due anni il ruolo di docente di Fisica Sperimentale, con suo marito come assistente. A differenza della prima nomina – del tutto formale e strumentalizzata – in questo caso ella poté realmente esercitare la professione di insegnante; difatti, si trova il suo nome tra quelli degli altri professori universitari negli *Indici Cronologici dei Presidenti, Segretari, Professori, Bibliotecari* dell’Accademia, datati 1799: “1766. 10 maggio. Dottoressa Laura Bassi Veratti Professora.”³⁰ Tuttavia, pure per conquistare questa carica, dopo una vita dedicata alla ricerca e all’insegnamento, Bassi dovette insistere più volte con richieste scritte, lottando contro le discriminazioni di genere. Il tutto è testimoniato dalle trascrizioni dell’Istituto delle Scienze: “Per soddisfare, se mai uno potrà farlo, le richieste della Signora Laura Bassi la quale, sebbene non abbia alcun diritto di essere ammessa tra i professori dell’Istituto, ha chiesto ciò pur tuttavia per tre anni. Dato che ella è una donna celebrata e conosciuta all’intera Repubblica delle Lettere, che porta invero onore alla sua Patria, orbene pare che la sua richiesta meriti un’attenzione benigna.”³¹

Per di più, al pari del caso patavino relativo alla laurea conferita a Elena Cornaro Piscopia, anche nel senato bolognese crebbe il malumore in merito ai diritti guadagnati da una donna come Laura Bassi nel corso della sua carriera e si decise di ostacolare futuri casi simili (Findlen, 1993). Infatti, oltre all’esempio incredibile di Laura Bassi, in quegli anni altre due donne avevano ottenuto una cattedra presso l’università di Bologna: Maria Gaetana Agnesi in Matematica (nel 1751) e Anna Morandi Manzolini in Anatomia (nel 1755) (Gelbart, 2016).

Maria Gaetana Agnesi (1718-1799) viene spesso accostata ad Eulero, perché nello stesso anno (1748) in cui lo svizzero pubblicò *Introduction to Analysis of the Infinite* la matematica milanese elaborò *Istituzioni analitiche ad uso della gioventù italiana*, da intendersi – con i canoni moderni – come una commistione tra un libro di testo (infatti era stato scritto per spiegare la materia ai fratelli più piccoli) ed un’opera di carattere divulgativo. L’obiettivo del manuale era proprio quello di insegnare la Matematica, senza esigere una particolare formazione pregressa: dapprima venivano esposte le nozioni fondamentali dell’Algebra e della Geometria e poi, gradualmente, il calcolo infinitesimale, presentando numerosi problemi di massimo e minimo e lo studio delle rette tangenti alle curve (Mayfield, 2013). Non trovando editori disposti a pagarne la pubblicazione, Agnesi stampò autonomamente alcune copie del testo, che fu accolto con grande entusiasmo; venne tradotto in inglese e in francese e fu usato da Joseph-Louis Lagrange per imparare le basi di quel settore della Matematica (Mazzotti, 2015). Similmente a quanto

²⁹Voltaire. (1965). *Correspondance*. Parigi: Galland, vol. II, p. 821. TAT.

³⁰A.S.B., II. 107, Assunteria di Istituto, *Diversorum*, b. 15, n. 66.

³¹A.S.B., Assunteria dell’Istituto: Corsi, Laboratori e Professori: *Diversorum*, Vol. 15, n. 42 (6 maggio 1776).

accaduto per Bassi, pure Agnesi ricevette il sostegno economico e politico di Prospero Lambertini, che suggerì all'università di assumerla. Eppure, dopo questo *exploit*, Agnesi si allontanò progressivamente dal mondo accademico, soprattutto per dedicarsi ad opere di carità; anche per questi motivi, il suo apporto scientifico è stato sostanzialmente dimenticato dalla maggior parte degli storici, se non addirittura strumentalizzato, come si vedrà in seguito.

Un'altra donna che, come Agnesi, è stata riconosciuta per i suoi scritti matematici è la già citata **Faustina Pignatelli** (1705-1769), principessa di Colubrano (a volte Colobrarò, o Colombrano). Nel 1732, qualche mese dopo Laura Bassi, venne ammessa all'Accademia delle Scienze di Bologna, "avendo attestazioni certissime del grande, e meraviglioso valore di questa Sig.ra nella Matematica, e specialmente nell'Algebra." ³² Attiva nel contesto culturale napoletano, favorì la diffusione del Newtonianismo, assieme al fratello Pietro. Nel 1734 pubblicò a Lipsia, in forma anonima, il testo *Problemata Mathematica* (andato perduto), nel quale si oppose alle teorie leibniziane in merito al calcolo infinitesimale e alla mescolanza tra Scienza e Metafisica (Simili, 2008). In generale, Pignatelli è celebre per aver animato il circolo scientifico di Napoli, attirando intellettuali dal resto d'Europa, siccome era anche in contatto con esponenti dell'ambiente parigino (specialmente in merito alla disputa sulle forze vive). Di lei, infatti, parlò molto bene Voltaire, che la paragonò a Émilie du Châtelet in quanto non aveva "un'opinione fondata [...] su quella del maestro; esse hanno scritto entrambe da matematiche ed entrambe con punti di vista nuovi." ³³

Ad attestare il prestigio delle donne italiane sopraccitate, quando Anne-Marie du Boccage (traduttrice e drammaturga francese) fu eletta membro dell'Accademia delle Scienze di Bologna scrisse: "Nel pomeriggio abbiamo visto l'istituto in cui sono stata ammessa con cortesia. La mia gloria è grande, ci sono solo tre donne lì, la studiosa Laura Bassi, che insegna fisica e dà lezioni pubbliche in Latino, la famosa geometressa Agnesi, ritirata in un convento a Milano, e l'illustre principessa napoletana Colombrano. La Marchesa du Châtelet, ben più degna di me, è stata membro di questa Accademia." ³⁴ Da notare l'inesattezza storica concernente Maria Gaetana Agnesi, che non entrò mai in convento; tale diceria si era diffusa per via del suo impegno nelle opere di volontariato, associato al mondo religioso. Infine, nel panorama bolognese si ricorda pure la seconda donna a ricevere una laurea, dopo Laura Bassi: si tratta di **Cristina Roccati** (1732-1797), originaria di Rovigo, che nel 1751, a soli 19 anni, si laureò in Filosofia naturale presso l'Alma Mater. Venne ammessa all'interno dell'Accademia dei Concordi (a Rovigo),

³²Archivio antico dell'Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna. Atti, fasc. 5.

³³Cit. in Brigaglia, A. & Nastasi, P. (1984). Bologna e il Regno delle due Sicilie: aspetti di un dialogo scientifico (1730-1760). *Giornale critico della filosofia italiana*, LXIII, 2, p. 163.

³⁴Du Boccage, A. M. (1770). *Lettres sur l'Italie, Recueil des oeuvres complètes de Mme du Boccage*. Lione: Périsse, vol. 3, p. 127. TAT.

dove tenne numerose lezioni di Fisica attinenti alle teorie galileiane, copernicane e newtoniane e nel 1754 diventò addirittura presidentessa dell'accademia stessa. Allo stesso modo di Bassi, anche Roccati dedicò la maggior parte della sua vita all'insegnamento e alla divulgazione; delle sue pubblicazioni restano purtroppo solo opere legate agli scritti poetici, senza avere traccia di quelli scientifici (Cessi, 1901).

In Francia

Passando ora al contesto intellettuale e scientifico francese – fortemente concentrato nei dintorni di Parigi – altre donne, oltre a Émilie du Châtelet, hanno avuto modo di offrire il loro contributo. In diversi casi (oltre a quelli esaminati), tali figure hanno lavorato nell'ombra, aiutando e assistendo scienziati uomini, che solitamente hanno ricevuto il totale (o quasi) riconoscimento per il lavoro svolto. Come già anticipato, la possibilità di accedere, seppur indirettamente, al dibattito scientifico era dovuta proprio ai legami con questi uomini di Scienza.

Una figura che è comunemente etichettata come anticipatrice di Émilie du Châtelet è **Elisabeth Ferrand** (1700-1752). A differenza delle altre donne francesi presentate in questo paragrafo, Ferrand non si sposò mai e visse a Parigi con la Contessa di Vassé, rimasta vedova. Assieme a lei, organizzò incontri nel loro salotto, ricevendo numerosi intellettuali. Alcuni matematici del tempo – tra cui Alexis Claude Clairaut e Johann Bernoulli – le riconobbero sorprendenti abilità matematiche. Fervente sostenitrice delle teorie newtoniane (circa un decennio prima di du Châtelet), ben prima che fossero approvate dalla maggioranza dell'Académie parigina, si fece ritrarre da Maurice Quentin de La Tour “meditando Newton”, poco prima di morire. Nel dipinto, Ferrand è posta accanto ad una copia degli *Éléments de la philosophie de Newton* di Voltaire (Jeffares, 2024). Il quadro, reso pubblico nel 1753, restò in esposizione nel salon parigino per diversi mesi, accanto a quelli dei *philosophes* D'Alembert e Rousseau, del fisico Nollet e dell'esploratore La Condamine, comprovando la fama di Ferrand tra i contemporanei (Gelbart, 2021). Siccome non sono rimaste tracce di suoi scritti (né informazioni che facciano intendere che abbia pubblicato effettivamente delle opere scientifiche), si pensa che la sua celebrità sia dovuta soprattutto al ruolo ricoperto nel circolo intellettuale del periodo.

Nella ricerca astronomica si mosse invece **Nicole-Reine Etable de Labrière** (1723-1788), solitamente nota come Madame Lepaute, avendo sposato l'orologiaio Jean-Andre Lepaute. L'attività di de Labrière è strettamente legata a quella dell'astronomo Joseph Jérôme Lalande, amico dei coniugi Lepaute e membro dell'Académie des Sciences. Nel 1757, Lalande decise di calcolare con precisione la data del ritorno della cometa di Halley: era un'impresa in cui si cimentavano molteplici astronomi e astrofili del tempo, visto che sarebbe stato un evento epocale – non era visibile dal 1682 – e che sarebbe stata un'ulteriore conferma della teoria della gravitazione di Newton. Lalande si rivolse ad Alexis Claude Clairaut,

il quale gli spiegò che per elaborare correttamente la previsione avrebbe dovuto tenere conto dell'attrazione gravitazionale di Giove e di Saturno. Siccome i calcoli richiesti erano tanti e lunghi, Lalande chiese l'aiuto dell'amica de Labrière (Ogilvie & Harvey, 2000). Nella sua *Bibliographie Astronomique* (1803), Lalande riportò: "Per sei mesi abbiamo calcolato dalla mattina alla sera, qualche volta anche durante i pasti... l'assistenza di Mme Lepaute fu tale che senza di lei non sarei mai stato in grado di intraprendere un lavoro di tale portata." ³⁵

Nel 1758 Clairaut comunicò all'Académie che dai loro calcoli si prevedeva che la cometa raggiungesse il perielio a metà aprile 1759 (e in effetti avvenne il 13 aprile di quell'anno); nel 1760, lo stesso matematico pubblicò *Théorie des Comètes*, raccontando gli sforzi condivisi per raggiungere l'ottimo risultato predittivo. Tuttavia, non incluse Nicole-Riene de Labrière tra i collaboratori (Bernardi, 2016). Malgrado ciò, il lavoro di Madame Lepaute proseguì imperterrito, con la decennale cooperazione con Lalande, questa volta elaborando tabelle astronomiche per l'almanacco dell'Académie, noto con il titolo di *Connaissance des temps*. Questo lavoro venne poi continuato da un'altra donna, Marie-Jeanne Lefrançois de Lalande, nipote di Joseph Lalande (Petrovich, 1999).

Esplorando il campo della Chimica, **Marie-Anne Pierrette Paulze** (1758-1836) è stata infaticabile assistente di laboratorio del marito Antoine Lavoisier, ma anche notevole traduttrice di opere inglesi (di Priestley, Cavendish, Henry e Kirwan), presentando al pubblico francese diversi testi che descrivevano le nuove teorie degli acidi e del flogisto. Combatté quest'ultima attraverso l'aggiunta di *notes du traducteur*, che dimostrarono tutta la sua competenza in materia. Oltre a ciò, Paulze collaborò con il marito alla produzione del *Traité de chimie* (1789), per il quale lei realizzò tredici incisioni su rame, estremamente utili per comprendere quanto descritto nel testo (Cardillo, 2010; Petrovich, 1999). Nel complesso, si evince l'estrema poliedricità della figura di Marie-Anne Paulze, che non solo poteva lavorare alla pari con il marito, ma che lo superava anche in fatto di abilità artistiche e linguistiche, arricchendo nettamente l'eredità culturale della coppia.

Nel resto d'Europa

Allargando leggermente la zona d'interesse ad altre nazioni, risultano emblematiche le vicende di altre tre donne, divise tra Germania e Inghilterra.

La prima è **Maria Winkelmann** (1670-1720), famosa come Madame Kirch, avendo sposato l'astronomo Gottfried Kirch. L'attività di Winkelmann è strettamente connessa a quella del marito – come riscontrato pure in altri esempi precedenti – che nel 1700 venne nominato osservatore reale alla corte di Federico III, a Berlino. Il lavoro astronomico della coppia si concentrava sulle fasi lunari, su quelle solari e

³⁵Lalande, J. (1803). *Bibliographie astronomique avec l'histoire de l'astronomie depuis 1781 jusqu'à 1802*. Parigi: Imprimerie de la République. TAT.

sulla posizione dei pianeti. Nel 1702, mentre il marito dormiva, la scienziata scoprì una nuova cometa; nonostante l'entusiasmo poi condiviso anche da Kirch, quest'ultimo pubblicò i risultati solo a nome suo, perché imbarazzato all'idea di rivelare la collaborazione con la moglie (Schiebinger, 1987-a). Solo nel 1710 Gottfried Kirch rivelò “mia moglie... osservò un'inaspettata cometa.”³⁶ Winkelmann continuò con le meticolose osservazioni, studiando aurore boreali e congiunzioni tra pianeti. Nonostante il contributo notevole e l'ammirazione di diversi contemporanei – venne infatti inclusa nel sopraccitato *Bibliographie Astronomique* di Lalande – non fu ammessa all'interno dell'Accademia delle Scienze di Berlino, perché “sarebbe stata guardata a bocca aperta” (Gelbart, 2016). Alla morte del marito, chiese di mantenere la sua posizione presso l'osservatorio, ma, nonostante fosse sostenuta da Gottfried Wilhelm von Leibniz, non le fu permesso. Lavorò per qualche anno assieme al figlio Christfried in osservatori privati, fino a quando egli fu assunto all'Osservatorio reale, con la madre come assistente. Siccome in molti ritenevano che non fosse un luogo adatto per una donna, l'Accademia suggerì a Winkelmann di non farsi vedere in pubblico, svolgendo piuttosto le sue mansioni nell'ombra; poiché lei ignorò questi “consigli”, nel 1717, fu obbligata ad allontanarsi dall'osservatorio, terminando così la sua carriera scientifica (Schiebinger, 1987-a).

Restando nel mondo astronomico, ma spostandosi nei dintorni londinesi, spicca la storia di **Margaret Cooke** (1670-1730), moglie del primo astronomo reale presso l'osservatorio di Greenwich, John Flamsteed (difatti la scienziata è usualmente nota con il nome di Margaret Flamsteed). Lavorò per diversi anni come assistente del marito, mostrandosi attenta ed estremamente capace nelle misurazioni. Diversamente da Maria Winkelmann, però, il suo apporto più interessante fu elaborato dopo la morte del coniuge: ella riordinò e organizzò – assieme agli assistenti di Flamsteed – gli appunti del defunto astronomo reale, elaborando prima *Historia Coelestis Britannica* (nel 1725) e poi *Atlas Coelestis* (nel 1729); tali manuali furono capisaldi per i successivi studi celesti. Cooke pagò le pubblicazioni, gestendo in modo arguto le sottili finanze familiari (Higgitt, 2019).

Da ultimo, a cavallo tra Germania e Inghilterra, si sviluppò la vita di **Caroline Herschel** (1750-1848). Nata ad Hannover, si trasferì a Bath su proposta del fratello astronomo William, che le chiese di fargli da governante. Visto l'intenso lavoro osservativo in cui era impegnato, egli coinvolse la sorella nelle sue occupazioni scientifiche (pur continuando, lei, a svolgere tutte le faccende domestiche (Ferne, 2007)), in una dinamica ormai già vista più volte. Tuttavia, Caroline Herschel ebbe modo di guadagnare maggiore indipendenza e, conseguentemente, riconoscimento, rispetto ad altre donne. Tra il 1786 e il 1797 scoprì otto comete ed esibì i risultati alla Royal Society in modo estremamente scaltro: da un lato si

³⁶Kirch, G. (1710). De cometa anno 1702: Berolini observato, *Miscellanea Berolinensia*, pp. 213-214. TAT.

presentava con modestia, per non essere di “disturbo”, dall’altro sottolineava che la firma delle osservazioni era la sua (Herschel, 1787). Negli stessi anni, riorganizzò ed ampliò il catalogo stellare di John Flamsteed. Caroline Herschel mostrò grande duttilità nei suoi contributi, aiutando il fratello sia con la realizzazione di telescopi e strumenti di laboratorio, che nell’elaborazione di calcoli matematici. Tutto ciò facilitò la produzione di un vasto catalogo celeste (che vide la collaborazione anche di John Herschel, figlio di William), comprendente numerose galassie e nebulose; purtroppo, quando quest’opera fu pubblicata nel 1888 da John Dreyer, la partecipazione di Caroline Herschel venne oscurata. Ciononostante, l’astronoma ricevette in vita un degno premio alla sua carriera: nel 1828 la Royal Astronomical Society le conferì la medaglia d’oro (Winterburn, 2015).

3.1.3 Considerazione sociale delle donne rispetto alla Scienza

Avendo osservato le vicende e i traguardi raggiunti da alcune donne nella Scienza, si ritiene importante approfondire quale fosse l’idea generalmente diffusa circa il coinvolgimento femminile in questo campo del sapere. Sono già state osservate dinamiche che hanno visto le donne ostacolate, emarginate e addirittura cancellate dalle memorie storiche; e tutto questo accadeva per le pochissime che riuscivano ad accedere e a primeggiare nel settore scientifico di competenza.

Il legame tra donne e Scienza, però, si estendeva anche ad un immaginario comune alimentato da alcuni dei testi divulgativi più noti al tempo: in particolar modo, si fa riferimento a *Entretiens sur la pluralité des mondes* (1686) di Bernard le Bovier de Fontenelle e a *Newtonianismo per le dame* (1737) di Francesco Algarotti. Il primo mirava a spiegare le teorie dei vortici di Cartesio e il sistema copernicano, attraverso il dialogo fittizio tra un gentiluomo e una marchesa; il secondo, invece, popolarizzava l’ottica di Newton, sempre con l’espedito narrativo di un dialogo tra un uomo (dotto) e una donna (da educare). Sebbene a prima vista sembrano includere la controparte femminile nelle discussioni scientifiche, l’analisi dettagliata rivela ben altre sfumature.

Infatti, il testo di Fontenelle, il primo celebre nel suo genere e ristampato diverse volte, fece sicuramente scuola e lo stile venne ripreso da molteplici divulgatori, riproponendo quasi sempre lo stesso tono paternalistico e condiscendente nei confronti delle donne. Nell’opera si promuove lo stereotipo della donna che fatica a comprendere argomenti difficili, come quelli scientifici, tanto che la marchesa protagonista esclama: “Abbi pietà. . . Mi arrendo! Sono sopraffatta dai sistemi e dai vortici!”³⁷ Emerge pertanto l’idea che le donne vadano istruite tramite analogie con storie amorose, come *L’arte dell’amore* di Ovidio, o i racconti di Ludovico Ariosto. In aggiunta, nella prefazione delle *Entretiens*, Fontenelle rassicura le let-

³⁷Cit. in Zinsser, J. P. (2007). Mentors, the Marquise Du Châtelet and Historical Memory. *Notes and Records of the Royal Society of London*, 61(2), p. 104. TAT.

trici che sarà sufficiente seguire la trama del libro, senza sforzarsi di capire davvero il contenuto delle teorie cartesiane e copernicane. L'obiettivo principale, pertanto, non è davvero quello di facilitare l'apprendimento, bensì di intrattenere le dame borghesi ed aristocratiche (Zinsser, 2007).

Inoltre, nel libro *Troppo belle per il Nobel*, Nicolas Witkowski sostiene che, tramite la figura ingenua e poco accorta della marchesa, Fontenelle permettesse ai lettori di sentirsi meno incapaci: "Ecco qual è il segreto di un genere letterario, la vulgarizzazione scientifica, che farà furore due secoli più tardi: il sapere, d'accordo, ma non senza il piacere! Rivolgendosi al simbolo stesso dell'ignoranza, la giovane donna, alla quale si continuava a negare ogni sapere non domestico appena sistematico, e scegliendola marchesa, o principessa o contessa (è più elegante), liberò d'un tratto da qualsiasi complesso d'inferiorità il lettore che altrimenti non avrebbe mai affrontato un'opera così erudita." ³⁸

Nel caso di Algarotti, il dialogo è ambientato all'interno di una villa sul Lago di Garda e i protagonisti del testo sono un cavaliere-insegnante e una marchesa-alunna, riproponendo la dinamica di accompagnamento intellettuale da parte dell'uomo istruito nei confronti della donna poco colta. Anche nel *Newtonianismo per le dame* si sviluppano i discorsi scientifici tramite parallelismi con l'amore e il corteggiamento, usando spesso immagini erotiche che rimandano alle *liasons* tipiche del mondo altolocato del tempo (Vicentini, 2019). In questo modo, Algarotti semplificò i concetti fisici, rendendoli più accessibili: lo stile leggero ed elegante del libro contribuì al suo incredibile successo, comprovato dalla traduzione in inglese, francese, tedesco, olandese, portoghese e svedese.

In aggiunta, si evidenzia che nel testo emerge chiaramente una polarizzazione delle abilità innate, distinguendo quelle "maschili" da quelle "femminili": all'uomo apparterrebbero il pensiero astratto e matematico, mentre alla donna le emozioni, l'immaginazione e le capacità relazionali. Similmente, pure diversi *philosophes* francesi sostenevano che alla donna si dovesse associare l'istinto, mentre all'uomo la ragione; inoltre, si credeva che le donne fossero più deboli fisicamente e che avessero molti difetti caratteristici del loro sesso, come cedere a superstizioni, litigi e gelosie (Clinton, 1975). Tuttavia, secondo Algarotti, se opportunamente guidate, anche le donne potrebbero accedere alla conoscenza elevata, come testimonia la dedica a inizio libro "alla bolognese filosofessa" Laura Bassi (Mazzotti, 2004).

A documentare l'astio e la scarsa considerazione che diversi pensatori dell'epoca avevano nei confronti delle donne, si riporta una frase di Immanuel Kant – celebre per la sua misoginia, tanto da definire contronatura l'educazione scolastica femminile (Schiebinger, 1988) – circa gli scritti appena esaminati: "Anche se il galante Fontenelle voleva riservar loro un posto tra i pianeti, le donne farebbero meglio a lasciar girare i vortici di Cartesio senza preoccuparsene troppo. E anche se non

³⁸Witkowski, N. (2019). *Troppo belle per il Nobel*. Bollati Boringhieri Editore, p. 39.

hanno capito nulla di ciò che Algarotti ha scritto, apposta per loro, sulla forza di attrazione della materia bruta nella teoria di Newton, non per questo l'attrazione seduttiva del loro fascino perderà il suo potere.”³⁹

3.1.4 Diritti delle donne e proto-femminismo

Si analizzerà ora l'altro lato della medaglia, ovvero quell'insieme di riflessioni che hanno proposto ideali di uguaglianza tra i sessi, anche nella partecipazione al progresso scientifico. Si vedranno esempi sia di donne che di uomini impegnati in questo processo, con pensieri seminati nel corso del XVIII secolo e in molti casi germogliati solamente qualche secolo più tardi.

Paula Findlen riconduce ai *Principia Philosophiae* di Cartesio (1644) la possibilità che iniziasse a diffondersi l'idea che le donne avessero le stesse abilità degli uomini nel ragionamento filosofico (Findlen, 1993). Probabilmente, proprio il testo del francese fu uno di quelli che ispirarono diversi letterati dell'Illuminismo settecentesco. Ad esempio, Voltaire asserì che le donne, quando viene concesso loro, sono capaci tanto quanto gli uomini nelle attività intellettuali. A riprova di ciò, numerosi *philosophes* spiegarono il minor contributo storico delle donne nelle arti e nelle scienze proprio in termini di scarse opportunità educative e di apprendimento (Clinton, 1975).

Non a caso, una delle donne più influenti nei salotti francesi, Anne-Thérèse de Marguenat de Courcelles – nota come Madame de Lambert – denunciava che “tanta è la tirannia degli uomini! Loro vogliono che noi non facciamo uso della nostra intelligenza né dei nostri sentimenti, hanno solo un grande interesse a richiamarci ai nostri primordiali compiti. Le donne possono dire agli uomini: Che diritto avete voi di privarci dello studio delle scienze e delle belle arti? Le donne che si sono dedicate a tali studi non hanno forse raggiunto risultati più che buoni?”⁴⁰

Riguardo all'accesso all'istruzione, già nel 1678 François de Salignac de La Mothe-Fénelon aveva scritto il *Traité de l'éducation des filles* e poi nel 1728 Madame de Lambert pubblicò *Avis d'une mère à sa fille*, nei quali si evidenziava il bisogno di dare più spazio all'istruzione femminile (von Kulesa & Gehrman, 2022). Pure in Inghilterra fiorivano dei movimenti simili a quelli francesi. Nel 1697, lo scrittore Daniel Defoe propose di fondare una Accademia per le donne, ritenendo che le abilità umane fossero innate (indipendentemente dal sesso) e che fosse necessario allenamento per svilupparle; l'istruzione sarebbe servita, quindi, a raffinare il “diamante grezzo”⁴¹ dell'anima (Clinton, 1975). Analogamente, negli stessi anni Mary

³⁹Kant I. (1764). *Osservazioni sul sentimento del bello e del sublime*. Traduzione di N. M. C., Napoli, Tipografia di Palma, 1826, p. 58.

⁴⁰Lambert Mme. (1727). *Reflexions nouvelles sur les femmes, par une dame de la Cour*. Parigi. TAT.

⁴¹Dafoe, D. (1889). *"An Essay on Projects": The Earlier Life and Chief Earlier Works of Daniel DeFoe*. Londra: Henry Morley, p. 145. TAT.

Astell – ritenuta la prima femminista inglese – sosteneva l’importanza di garantire un’educazione femminile di livello (Benson, 1935). Sempre nell’isola britannica, comparivano i primi periodici che si rivolgevano anche alle donne. Un esempio fu *The Athenian Gazette: or casuistical mercury resolving all the most nice and curious questions proposed by the ingenious of either sex*, in cui gli autori rispondevano alle domande ingegnose poste via lettera dal pubblico, sia che provenissero da uomini che da donne. Nel 1704 uscì anche *The Ladies’ Diary*, rivista che parlava di Matematica (Gelbart, 2016).

Alla fine del Settecento, questi pensieri si concretizzarono sempre di più, ad esempio con le proposte politiche presentate dal Marchese de Condorcet, il quale richiedeva completa uguaglianza civile, diritto di voto, assegnazione di cariche pubbliche ed educazione e lavoro paritari per entrambi i sessi. Nello stesso periodo, Olympe de Gouges scrisse *Droits de la femme et de la citoyenne* (1791) e in altre opere ipotizzò che l’asimmetria nella divisione dei ruoli sociali derivasse dalla paura degli uomini di non riuscire a sostenere la competizione femminile. Non a caso, secondo de Gouges, la donna che desiderava imparare veniva tacciata come fastidiosa e insolente (von Kulesa & Gehrman, 2022). Rotraud Von Kulesa dà eco a questo sentimento, affermando che “la donna che parla, o peggio ancora, che si articola nella scrittura, deve giustificarsi, difendersi e combattere i pregiudizi che riguardano il fatto che a scrivere sia una donna.”⁴² Verosimilmente, le Suffragette – così come altri movimenti femministi – si basarono anche sugli scritti di de Condorcet e de Gouges (Clinton, 1975).

Sebbene nel corso del Settecento si costruì molto, in termini di ideali paritari, secondo diversi storici bastarono pochi anni, quelli della Rivoluzione Francese prima e dell’età napoleonica poi, per stroncare quasi del tutto ogni anelito di cambiamento sociale e politico, per oltre mezzo secolo (specialmente in Francia). Katherine Clinton, ad esempio, definisce il periodo repubblicano come il “precipitatore immediato”⁴³ di questi tentativi. Per Londa Schiebinger, la Rivoluzione Francese “ha suonato la campana a morto del privilegio che le donne aristocratiche avevano conosciuto nella Scienza”⁴⁴, conducendo ad un declino tale da riportare i diritti femminili indietro di decenni.

⁴²von Kulesa, R., & Gehrman, K. (2022). Between Defence and Affirmation: The Discursive Self-Representation of Eighteenth-Century Women Authors in France and Italy. In B. Vanacker & L. van Deinsen (Eds.), *Portraits and Poses: Female Intellectual Authority, Agency and Authorship in Early Modern Europe* (p. 74). Leuven University Press. TAT.

⁴³Clinton, K. B. (1975). *Femme et Philosophe: Enlightenment Origins of Feminism. Eighteenth-Century Studies*, 8(3), p. 283. TAT.

⁴⁴Schiebinger, L. (1988). Feminine Icons: The Face of Early Modern Science. *Critical Inquiry*, 14(4), p. 687. TAT.

3.1.5 Discorso storiografico: contemporaneo vs moderno

Si ritiene opportuno affrontare un primo discorso in merito alla storiografia di genere nel Settecento, che sarà approfondito nel caso specifico di Émilie du Châtelet (cfr. 5.1). Innanzitutto, risulta fondamentale distinguere i racconti biografici riportati dai contemporanei da quelli che invece portano sulle spalle secoli di storia (e di resoconti indiretti e reinterpretati). Per entrambi, bisogna prestare attenzione, nel momento in cui si raccolgono le informazioni, perché ci possono essere storpiature storiografiche di diverso tipo.

Guardando alla narrazione coeva, si è già osservato come in diversi episodi le donne siano state cancellate volontariamente dalle trascrizioni ufficiali, non vedendo riconosciuti i loro contributi (Nicole-Reine de Labrière e Maria Winkelmann), oppure siano state perse le loro opere, con il rischio di eliminarle dalla memoria collettiva (Pignatelli). Circa la scarsa presenza femminile all'interno dei libri di storia della Scienza, diversi *philosophes* del Settecento si servirono di essa come riprova delle loro convinzioni sull'innata incapacità intellettuale delle donne (Clinton, 1975).

In altri casi, quando alcune di queste donne erano ancora in vita (o morte da pochi anni), si iniziarono a diffondere esposizioni falsate, che si sono propagate nei secoli successivi: un esempio è Maria Gaetana Agnesi, che – come visto dallo stralcio scritto da Anne-Marie du Boccage – si pensava che fosse diventata suora, quando invece era semplicemente impegnata nell'assistenza dei poveri. Oppure, nel sopracitato *Bilder-Sal*, nel delineare le figure di Laura Bassi ed Émilie du Châtelet, gli autori si complimentarono con la prima per non aver trascurato i suoi doveri di madre e con la seconda per aver assecondato le richieste del figlio di pubblicare l'opera a lui indirizzata; per di più, Brucker affermò che la fisica francese si era scusata perché la sua opera non conteneva nulla di nuovo (non ci sono fonti storiche che confermino che du Châtelet abbia detto questo) (Solleveld, 2022). Si tendono così ad equiparare le conquiste scientifiche dell'italiana al ruolo educativo svolto in famiglia, mentre per la francese si sminuisce l'originalità dell'opera; nel fare ciò, du Châtelet viene per di più dipinta con lo stereotipo della donna umile, che sa stare al suo posto, quando invece numerose lettere scritte da lei dimostrano il contrario (Cosmacini, 2023; Zinsser, 2006).

Su un altro piano si pone la storiografia moderna, che va a scavare nel passato per riportare alla luce storie dimenticate (o deformate), raccontandole fedelmente. O almeno, così dovrebbe essere: purtroppo, in numerose biografie non solo compaiono errori (ormai tramandati da decenni), ma si utilizza pure una retorica – tipica della biografia di genere – che va a contaminare l'analisi dei contenuti, spesso oscurati dalla vita della scienziata in esame: per dare rilievo al fatto che a scrivere e a studiare sia una donna, si tralascia ciò che ha effettivamente scritto e studiato (Cavazza, 2015).

In questo telefono senza fili che si protrae da secoli, è complicato fornire una de-

scrizione veritiera e accurata delle protagoniste della storia scientifica, soprattutto perché le strutture sociali del passato hanno portato gli storici a sviluppare racconti con toni caratteristici dei canoni del tempo. Anche oggi c'è questo rischio, con miriadi di articoli giornalistici che puntano tutto su espressioni come “la prima donna laureata”, oppure “la prima docente universitaria donna”, o ancora “l’eccezionale vita di...”. Questo processo di mitizzazione sembra paradossalmente ripercorrere lo stile settecentesco, in cui le poche donne nella Scienza erano definite come “miracoli”, o “meraviglie del loro sesso” (Cavazza, 2015). In questo processo si inserisce la riflessione di Emily Winterburn, che nell’esplorare le biografie scritte su Caroline Herschel ha notato una narrazione simile a quella della favola di Cenerentola: infatti, molti storiografi hanno tratteggiato l’infanzia dell’astronoma come quella di un’infelice ragazza obbligata violentemente dalla madre-matrigna a svolgere mansioni domestiche, privandola di ogni altra possibilità. Invece, la vita di Herschel non era dissimile da quella di migliaia di altre giovani, riflettendo la faticosa condizione femminile dell’epoca. Raccontando così la sua storia, tuttavia, il fratello William assume le sembianze del principe azzurro, che arriva in suo soccorso dandole l’occasione di vivere il suo sogno da scienziata (Winterburn, 2015). In aggiunta, attualmente si tende a strumentalizzare la biografia femminile (o femminista) sotto una lente politica, con l’encomiabile obiettivo sociale di sensibilizzare i lettori circa la condizione delle donne, ma con l’effetto indesiderato di minimizzare il reale ruolo storico ricoperto dalle protagoniste della Scienza (Zinsser, 2009). L’immagine riduttiva che emerge è che queste donne siano da studiare solamente in quanto donne, quando invece le loro pubblicazioni sono valide e di spessore indipendentemente dal sesso delle autrici. O quantomeno, bisogna esaminarle con cura per capire quale sia la caratura di queste opere, così come si approfondiscono gli scritti di autori uomini meno conosciuti. Un’ultima riflessione in merito concerne il rapporto che intercorre tra il biografo e il personaggio storico: può capitare che chi scrive sia influenzato dalle somiglianze (o differenze) che nota tra la propria esperienza e quella da narrare, siano esse di genere, stato sociale, o contributo scientifico (Govoni, 2015).

Di ben altro tenore è quella corrente giornalistica che si riferisce alle donne con espressioni come “la moglie/la figlia/la sorella/l’amante di...”, che deturpano la memoria di grandi scienziate, le quali sembrano essere celebri – e da celebrare – solo in riferimento a uomini famosi. Addirittura, certe riviste puntano tutto sulle vicende amorose, risultando delle brutte caricature dei dialoghi di Fontenelle e Algarotti. Ne è un esempio il caso della biografia di Marie-Anne Pierrette Paulze, che per la Società Chimica Italiana (nella rubrica *Flashback – Pagine di storia*) è introdotta dal titolo *Un po’ di gossip: Marie-Anne Pierrette Paulze. Una donna e due geni per mariti*, trasmettendo come informazione principale riguardo a lei solamente il suo matrimonio con Antoine Lavoisier prima e con Benjamin Thomson poi (Cardillo, 2010).

3.2 Émilie du Châtelet

Dopo aver tratteggiato una panoramica settecentesca delle condizioni socio-culturali in cui vivevano molte donne europee, si analizzerà ora il caso specifico di Émilie du Châtelet, osservando le sue strategie per ottenere un posto al tavolo dei sapienti del tempo. Si racconterà la sua vita nel modo più oggettivo possibile, dando maggiore attenzione alle informazioni legate all'operato scientifico, piuttosto che alle relazioni sociali (a meno che queste non siano legate alla sua attività nella Fisica). Si parlerà delle sue opere, in particolar modo delle due più famose: *Institutions de Physique* e *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*. Il primo testo sarà poi approfondito in modo critico nel capitolo seguente, attraverso un esame dettagliato del suo contenuto fisico, matematico e metafisico.

3.2.1 Biografia



Figura 4: *Ritratto di Émilie du Châtelet.*

La vita di Émilie du Châtelet fu allo stesso tempo tipica e straordinaria per il suo tempo: al pari di molte dame agiate della Francia del Settecento, visse una quotidianità mondana piuttosto comune – tra balli e cerimonie dell'alta società – ma parallelamente portò avanti una inusuale ricerca scientifica, spesso lavorando di notte. Nata il 17 dicembre del 1706 a Parigi, il suo nome di battesimo era Gabrielle Émilie Le Tonnelier de Breteuil, figlia di Louis-Nicolas le Tonnelier de Breteuil, nobiluomo e comandante sotto Luigi XIV. Émilie aveva cinque fratelli

maggiori, i quali ricevettero un'educazione certosina, sovente riservata ai ragazzi provenienti da famiglie benestanti. Lei, invece, da piccola fu mandata a studiare in convento, dove imparò a leggere e a scrivere, oltre a nozioni di Aritmetica di base; il resto dell'istruzione presso il monastero fu incentrato sullo studio della Bibbia e su annesse lezioni di morale (Gardiner, 1984).

A questo punto, molte delle sue coetanee, al tempo, avrebbero visto interrotta la propria formazione scolastica. Émilie, tuttavia, ebbe l'occasione di studiare ancora, grazie al supporto del padre: egli pagò per lei diversi precettori privati, così da fornirle notevoli conoscenze in svariati campi del sapere. All'età di dieci anni ricevette lezioni di Astronomia dall'illustre (e sopraccitato) Bernard le Bovier de Fontenelle, segretario perpetuo dell'Académie (Bodanis, 2006). Poi, studiò Letteratura e Latino (Kawashima, 2004), così come Matematica euclidea, Inglese e Tedesco, a volte con lezioni tenute dal padre stesso (Gardiner, 1984). Sebbene la sua formazione fosse notevolmente ampia ed eterogenea, Émilie mantenne una forte predilizione per le materie scientifiche, imparando teoremi algebrici e geometrici sotto la guida di Nicolas Guisnée (Cosmacini, 2023). Per di più, Émilie poté servirsi di una vasta libreria presente in casa, leggendo e studiando opere antiche e contemporanee, arricchendo ulteriormente il proprio bagaglio culturale (Petrovich, 1999). Uno dei suoi maggiori biografi – Theodore Besterman – sostenne che “la sua educazione fu unica per il diciottesimo secolo”.⁴⁵

Ciononostante, a differenza dei suoi fratelli (e di tanti altri uomini dell'epoca), l'istruzione ricevuta era sicuramente meno sistematica ed efficace, non frequentando delle scuole con programmi strutturati e dovendo dedicare la maggior parte del suo tempo agli obblighi sociali, ovvero partecipare a balli e cercare un marito. Nel 1725, all'età di 19 anni, sposò Florent-Claude du Châtelet-Lomont, cambiando il suo nome in Gabrielle Émilie Le Tonnelier de Breteuil du Châtelet-Lomont; prese quindi il cognome del marito e da quel momento in poi fu sempre conosciuta come Émilie du Châtelet. Con Florent-Claude ebbe tre figli: Gabrielle-Pauline, Louis-Marie-Florent (al quale dedicò l'opera *Institutions de Physique*) e Victor-Esprit. Una volta divenuta moglie e madre, per du Châtelet aumentarono le responsabilità e gli obblighi sociali, soprattutto quelli legati all'economia familiare e alla gestione delle proprietà del marito (il quale era raramente a casa, essendo impegnato in diverse spedizioni militari). A lei spettò gestire l'assunzione e la retribuzione dei domestici, così come districare spinose questioni ereditarie legate alla famiglia del marito (Gardiner, 1984).

Pur occupandosi di numerose faccende, sia familiari che mondane, du Châtelet mantenne vivo l'interesse per la Scienza, partecipando ad alcuni incontri organizzati dal padre nel *salon* di casa. In queste occasioni, Émilie ascoltò discussioni attorno ai temi di punta del tempo, oltre a conoscerne alcuni dei massimi espo-

⁴⁵Besterman, T. (1967). *Voltaire*. New York: Harcourt. p. 179. TAT.

menti francesi. Nel 1733 Pierre-Louis Moreau de Maupertuis diventò mentore della marchesa, insegnandole sia nozioni avanzate di Algebra e Geometria sia alcuni elementi fondamentali della teoria della gravitazione newtoniana. Egli adoperò alcuni libri sui quali aveva studiato a sua volta, come *Application de l'algèbre à la géométrie* (1733) di Nicolas Guisnée. Émilie apprezzava molto le spiegazioni del maestro, come scrisse in una lettera a lui indirizzata: “La tua immaginazione sa come abbellire i materiali più scarni, senza diminuirne l'accuratezza e la precisione.”⁴⁶ Malgrado ciò, nel giro di pochi mesi Maupertuis diventò via via più evasivo e meno reperibile per le lezioni, lasciando du Châtelet a lungo in attesa (Zinsser, 2007). In quegli anni, egli era coinvolto nel vivo delle discussioni interne all'Académie e stava organizzando il già citato viaggio in Lapponia per effettuare le misure geodetiche che ponessero fine alla disputa sulla forma della Terra. Essendo l'attività didattica un extra, rispetto ai suoi impegni più impellenti, trascurò sempre di più la marchesa (Cosmacini, 2023).

Tuttavia, Émilie nutriva una smisurata passione per la conoscenza, come attestano le sue parole prese dal *Discours sur le bonheur* (*Discorso sulla felicità*): “L'amore per lo studio è, di tutte le passioni, quella che più contribuisce alla nostra felicità. Nell'amore per lo studio c'è una passione dalla quale un'anima elevata non è mai completamente libera, quella della gloria; eppure, solo metà del mondo può conquistarla in questo modo, ed è proprio questa metà alla quale l'educazione priva dei mezzi, e rende il gusto di essa impossibile.”⁴⁷

Dunque, stufa di restare in attesa di Maupertuis, du Châtelet non si arrese e – mossa dal suo fervente desiderio di apprendere – si rivolse al ventunenne Alexis Claude Clairaut, già stimato dall'Académie, nonostante la giovanissima età. Egli scrisse due manuali (simili a dei libri di testo), probabilmente finalizzati proprio all'istruzione della marchesa: *Elémens de géométrie* ed *Elémens d'algèbre*, che vennero pubblicati dopo diversi anni (rispettivamente nel 1741 e nel 1746), in seguito a correzioni e revisioni successive. In essi si ritrova uno stile dialogico, in cui si affrontano concetti matematici attraverso la risoluzione di problemi di realtà, come la divisione di terreni in forme geometriche, oppure il pagamento di lavoratori dipendenti. Tutto ciò si può ricondurre facilmente ad alcune delle mansioni in cui era occupata du Châtelet, gestendo le finanze ed i possedimenti di famiglia (Zinsser, 2007).

Nel complesso, il periodo di insegnamenti privati fu molto breve e discontinuo, sia perché il marito di Émilie non approvava che le già precarie risorse familiari venissero spese in quel modo, sia perché i precettori davano la priorità alla propria carriera. A queste strategie di apprendimento, allora, du Châtelet accompagnò an-

⁴⁶Du Châtelet a Maupertuis, n. 16, 7 giugno 1734, in *Lettres de la marquise Du Châtelet*, Vol. I (Theodore Besterman), p. 44 (Institut et Musée Voltaire, Ginevra, 1958). TAT.

⁴⁷Du Châtelet, E. (1961). *Discours sur le bonheur*, edizione di Robert Mauzi. Parigi: Les Belles Lettres, p. 20. TAT.

che la partecipazione a buona parte degli eventi pubblici organizzati dall'Académie, avendo modo di interloquire con figure del calibro di Diderot, Buffon, Fontenelle e Réaumur (Gardiner, 1984). Ciononostante, le sue opportunità di accedere alle conoscenze più specifiche ed elevate restavano scarse, non potendo frequentare università o accademie. Da tutto questo contesto, appare evidente che non fosse possibile per lei imbastire una reale opera di ricerca strutturata, per elaborare scoperte originali di grande portata. Per tale motivo, la sua prima pubblicazione fu la traduzione del poema satirico di Bernard de Mandeville dal titolo *Fable of the Bees: or, Private Vices, Publick Benefits*. In esso, l'autore olandese criticava le ipocrisie della società settecentesca, piena di disparità sociali, ma convinta di essere virtuosa (almeno, così facevano intendere i governanti). Du Châtelet colse l'occasione per unirsi all'autore nel condannare le disuguaglianze del suo tempo, specialmente quelle legate alla condizione femminile: “Sento tutto il peso del pregiudizio che così universalmente ci esclude dalle scienze [...] Non c'è posto in cui siamo portate a pensare. Riformerei un abuso che trattiene metà della razza umana dall'esprimersi [...] Sono convinta che molte donne sono o inconsapevoli dei loro talenti per mancanza di educazione, oppure li seppelliscono per mancanza di coraggio intellettuale. L'ho sperimentato io stessa. La fortuna mi ha fatto conoscere letterati che sono diventati miei amici [...] allora ho iniziato a credere che fossi anche io un essere con una mente.”⁴⁸

A proposito di intellettuali con i quali ha intessuto legami, proprio in quegli anni du Châtelet si avvicinò sempre più a Voltaire, allora già parecchio famoso e rinomato. Tra il 1733 e il 1735 i due si corteggiarono e si innamorarono, trasferendosi poi nel castello di Cirey-sur-Blaise, di proprietà della famiglia del marito di Émilie. Qui, i due lavorarono a lungo per ristrutturare l'edificio, assumendo giardinieri e domestici per riportare il castello ai fasti di un tempo (Cosmacini, 2023). In quest'oasi di pace – lontani dalla frenesia della vita cittadina – si poterono concentrare sulla loro passione comune, ovvero lo studio della Fisica; allestirono un notevole laboratorio, comprando e sistemando strumenti di misura. Voltaire adorava la sua compagna e ne riconosceva le incredibili doti intellettuali, tanto da riferirsi spesso a lei come “divine Émilie”. E ancora, nella prefazione ad *Alzire*, nel 1736, elogiò du Châtelet per il suo “genio per la geometria” (Whaley, 2022). Queste sono solo alcune delle lodi tessute da Voltaire nei suoi confronti, come dimostrano le centinaia di lettere scritte (direttamente a lei, o ad altri *savants*), nelle quali esprimeva la stima nutrita per la marchesa, specialmente da un punto di vista scientifico (Cosmacini, 2023). In esse, però, si nota anche un certo stupore dovuto all'idea maschilista – piuttosto diffusa, come si è visto nei paragrafi precedenti – che solo gli uomini dovessero occuparsi dello studio della Matematica e della Fisica: “Le

⁴⁸“Preface du Traducteur” in Ira O. Wade, *Studies on Voltaire with Some Unpublished Papers of Mme du Châtelet*. (1947). Princeton: Princeton University Press, pp. 135–136. TAT.

sue mani amabili non erano fatte per il compasso di un matematico o per la lente di un fisico, né quegli occhi affascinanti per osservare l'orbita di un pianeta.”⁴⁹ Nei primi anni di convivenza a Cirey, du Châtelet si definì la “segretaria” di Voltaire, sua assistente e collaboratrice negli esperimenti sul Newtonianismo, tanto da essere la co-autrice degli *Éléments de la philosophie de Newton*, pubblicati nel 1738 e divenuti un best-seller dell'epoca (Besterman, 1958).

Nel 1737, Voltaire decise di partecipare al concorso indetto dall'Académie des Sciences sulla natura del fuoco. In seguito a numerose discussioni – che stimolarono entrambi nel tentativo di trovare soluzioni convincenti – du Châtelet, in disaccordo con la teoria del compagno, scelse di inviare segretamente una propria proposta (Petrovich, 1999), intitolata *Dissertation sur la nature et la propagation du feu*; attraverso essa, la scienziata dimostrò la propria tenacità e la forza d'animo (a cui si appellava anche nella prefazione alla traduzione di de Mandeville). L'Académie apprezzò entrambi gli elaborati e, pur non proclamandoli vincitori, li pubblicò in quanto testi degni di nota: nel caso di Émilie, si trattò del primo contributo di una donna diffuso dall'istituzione parigina (Rey, 2024).

In quegli anni a Cirey, du Châtelet continuò a studiare intensamente, spesso di notte, intingendo le mani nell'acqua fredda per restare sveglia (Cosmacini, 2023; Gardiner, 1984); tutti questi sforzi erano mossi dalla convinzione che l'apprendimento fosse una delle poche soddisfazioni per una donna del suo tempo, oltre che un modo per lottare per la parità di diritti e per far sentire la propria voce: “Solo lo studio resta a consolare una donna per tutte le esclusioni e le dipendenze a cui si ritrova condannata dal suo posto nella società.”⁵⁰ Tutto questo impegno venne ripagato, perché il rinnovato Château di Cirey divenne uno dei centri culturali francesi, a cui affluivano pensatori da tutta Europa. Il *salon* gestito da du Châtelet era fortemente accentrato attorno alla sua figura, come attestato da Voltaire, che definiva i membri di questo circolo “*Les Émiliens*”.⁵¹ Tra questi si annoverano i sopraccitati Maupertuis e Clairaut, oltre a Francesco Algarotti (il cui *Newtonianismo per le dame* è ispirato ai dialoghi tenuti con du Châtelet a Cirey), Johann Bernoulli II e Samuel Koenig. Questi ultimi due furono anche assunti per brevi periodi dalla marchesa in qualità di precettori (Petrovich, 1999; Whaley, 2022). Koenig, in particolare, le insegnò le teorie metafisiche di Leibniz e Wolff, che furono poi il punto di partenza dell'opera originale della scienziata, *Institutions de Physique*, pubblicata prima nel 1740 e poi nuovamente nel 1742, corretta ed ampliata (Hutton, 2004). Grazie alle relazioni con i membri del circolo

⁴⁹Zinsser, J. P. (2007). *Emilie Du Châtelet: Daring Genius of the Enlightenment*. New York: Penguin, p. 79. TAT.

⁵⁰Du Châtelet, E. (2009). *Selected Philosophical and Scientific Writings*, edito da Judith P. Zinsser. Chicago: Chicago University Press, p. 357. TAT.

⁵¹Zinsser, J. P. (2006). *La Dame d'Esprit: A Biography of the Marquise du Châtelet*. New York: Viking. p. 116. TAT.

di Cirey, le *Institutions* vennero tradotte in tedesco, siccome diversi intellettuali amici di Émilie erano membri dell'Accademia di Berlino (Whaley, 2022); inoltre, François Jacquier (già nominato in precedenza per la traduzione dei *Principia* di Newton), si occupò probabilmente della trasposizione in italiano, su suggerimento di Johann Bernoulli II (Gardiner, 1984).

Con la pubblicazione di questo trattato, du Châtelet venne conosciuta e apprezzata in buona parte del contesto scientifico europeo, che ne stimò le teorie originali. La fama crescente la portò nel 1745 ad essere una delle quattro donne incluse nella sopraccitata *Pinacotheca Scriptorum* del tedesco Jacob Brucker (Solleveld, 2022). In questo volume, Voltaire scrisse e curò parte della biografia della scienziata.

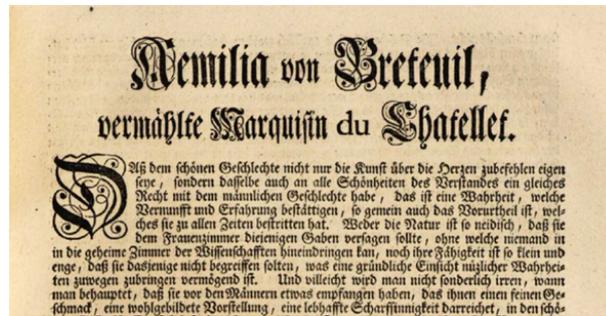


Figura 5: *Bilder-Sal*: Prima pagina della biografia di Émilie du Châtelet.

Poi, nel 1746, venne eletta membro onorario dell'Accademia degli Arcadi a Roma (Hutton, 2022) e dell'Accademia delle Scienze di Bologna (con il titolo di *Inquieta*) (Rey, 2024). Pur non riuscendo mai ad esaudire il desiderio di visitare Bologna e di partecipare alle attività dell'Accademia (perché ostacolata dal marito), du Châtelet fu onorata da questo riconoscimento e conservò la lettera di nomina tra le carte per lei più preziose (Zinsser, 2006). In occasione dell'elezione bolognese, il *Journal Universel* la definì “la nostra infaticabile Marchesa”, mostrando grande orgoglio nazionale (Zinsser, 2001). E ancora, secondo lo stesso giornale, nessuna donna avrebbe meritato più di du Châtelet di diventare membro dell'Accademia di Bologna.

Aussi jamais Dame ne mérita mieux qu'elle le glorieux titre d'*Inquieta* dont Messieurs de l'Académie de *Bologne* viennent de la décorer en la recevant dans leur savante Compagnie. UN

Figura 6: Estratto dall'articolo del *Journal Universel* (1746).

Sempre in Francia, questo evento scatenò reazioni forti, soprattutto di denuncia nei confronti delle istituzioni: “Mentre Bologna sfoggia orgogliosamente, in Italia, il proprio registro adornato con il bel nome di Émilie, perché il gentil sesso, così tanto amato da noi, è escluso, in Francia, dall’Académie?”⁵²

In quegli anni, du Châtelet aveva intrapreso la sfida a cui teneva di più, ovvero la traduzione in francese dei *Principia* di Newton (Cosmacini, 2023). Lo stesso Voltaire riferì, in una lettera a Federico II, che la marchesa, dopo aver realizzato un’ottima opera sul sistema di Leibniz (*Institutions de Physique*) si era appassionata sempre di più a Newton, decidendo di tradurne la grande opera (Voltaire, 1965). Per fare ciò, si dedicò giorno e notte allo studio e alla rielaborazione dei contenuti, con l’intento di rendere il testo latino più comprensibile ed accessibile; per questo motivo, sviluppò un Commentario, in sostegno alla traduzione. Tuttavia, in quel periodo, quando ella aveva finalmente raggiunto una formazione fisico-matematica di tutto rispetto, i doveri familiari aumentarono, tenendola occupata a lungo e costringendola a viaggiare più volte in Belgio, per un contenzioso in merito ad una proprietà della famiglia du Châtelet-Lomont (Gardiner, 1984). Pertanto, come scrisse a Jacquier in una lettera, la scienziata si dedicava all’opera “quand j’ai du temps” (“quando ho tempo”), non avendo modo di votarsi completamente ad essa (Zinsser, 2001). Inoltre, vista la mole di lavoro e la complessità dell’impresa, chiese aiuto a Clairaut per la correzione del suo trattato e per alcuni chiarimenti in merito ai contenuti più difficili.

Negli anni seguenti, il rapporto d’amore tra du Châtelet e Voltaire si deteriorò: quando nel 1748 furono accolti nel castello di Lunéville dal re (destituito) di Polonia Stanislao, Émilie apprezzò la compagnia del giovane Jean-François de Saint-Lambert e qualche mese dopo scoprì di esserne rimasta incinta. Temendo per l’esito della gravidanza – siccome affrontarne una a 42 anni, all’epoca, era piuttosto pericoloso – la marchesa si trasferì a Parigi per lavorare ininterrottamente all’opera newtoniana (Cosmacini, 2023). Dopo mesi di dedizione, inviò la bozza del testo alla Biblioteca Reale, affinché conservasse le pagine originali, in attesa di essere riviste e poi pubblicate. Nel 1749 partorì a Lunéville la figlia Stanislas-Adélaïde. Qualche giorno dopo, du Châtelet si ammalò gravemente: al tempo fu definita febbre puerperale, mentre ora sappiamo che si trattò di un’infezione dovuta alla scarsità delle condizioni igieniche durante il parto; morì il 10 settembre 1749. L’opera a cui aveva consacrato gli ultimi anni di vita venne pubblicata postuma soltanto dieci anni dopo la sua morte, nel 1759. Nonostante gli ostacoli sociali e la breve vita, “i risultati di Émilie du Châtelet rappresentano probabilmente il massimo raggiungibile nella Scienza per una donna francese – e non solamente nel diciottesimo secolo, ma anche per molto tempo a seguire.”⁵³

⁵²de Cideville, P. R. citato in Ehnman, E. (1986). *Mme. du Châtelet: Scientist, Philosopher, and Feminist of the Enlightenment*. Leamington Spa: Berg, p. 39. TAT.

⁵³Gardiner, L. (1984). Women in Science. In S. I. Spencer (Ed.), *French Women and the Age*

3.2.2 Opere scientifiche principali

Si parlerà ora delle due opere più importanti scritte da Émilie du Châtelet, ovvero le *Institutions de Physique* ed i *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*. Si prenderanno in esame le questioni relative alla storia delle rispettive pubblicazioni, oltre ad una *overview* dei contenuti. Come già anticipato, il primo dei due sarà analizzato nel dettaglio nel prossimo capitolo.

Institutions de Physique

Come si è visto, a cavallo tra gli anni Trenta e gli anni Quaranta del Settecento, il castello di Cirey era diventato un centro culturale attorno al quale gravitavano esponenti illustri della Fisica francese. Conversando con loro e approfondendo i temi più discussi – da sola, o grazie ad alcune lezioni private – du Châtelet si immerse nelle questioni relative alle leggi del moto, al Newtonianismo e alle forze vive. *Institutions de Physique* nacque dal suo studio in merito a queste teorie, elaborate in modo originale e peculiare. Con grande probabilità, il testo fu inizialmente completato prima del 1738, visto che i riferimenti alle spedizioni in Lapponia e in Perù per effettuare misure geodetiche risalgono al 1736 e nel testo l'autrice afferma che i risultati della spedizione in Sud America non erano ancora noti (Hutton, 2004). Inoltre, la prima *approbation* del libro è datata 18 settembre 1738, firmata da Henri Pitot. Tuttavia, la prima edizione fu stampata – anonima – solamente nel 1740, per via del desiderio di du Châtelet di arricchire il testo e di inserire una corposa sezione iniziale di carattere metafisico, ispirata alle teorie di Leibniz e di Wolff. Tutto ciò è confermato anche da alcune lettere scritte dalla stessa marchesa, oltre all'*Avertissement du libraire* incluso nel prologo del libro (Hutton, 2004). Per di più, le ragioni della pubblicazione in forma anonima si devono sia all'intento con cui è stata composta l'opera – ovvero quello di istruire il figlio Louis-Marie-Florent – sia alla paura che l'accoglienza fosse negativa; quest'ultima considerazione è attestata dal carteggio privato con Maupertuis, nel quale du Châtelet affermò che, non inserendo il suo nome come autrice, avrebbe potuto gioire nel caso in cui il trattato fosse stato apprezzato, “senza correre alcun rischio se il giudizio non fosse stato favorevole.”⁵⁴ In seguito, la fisica francese sostenne di essere stata convinta da un'amica (non meglio identificata) a pubblicare il libro con il proprio nome. Effettivamente, nel 1742 fu stampata ad Amsterdam la seconda edizione, contenente numerose correzioni, come evidenziato dal titolo completo: *Institutions de Physique de la Madame la Marquise du Chastelet adressée à son fils. Nouvelle édition corrigée & augmentée considérablement par l'auteur*. Va precisato che du Châtelet aveva contattato l'Académie per far stampare questa seconda edizione,

of *Enlightenment*. Indiana University Press, p. 193. TAT.

⁵⁴Lettera 241 (30 giugno 1740), in Besterman T. (1958). *Les lettres de la marquise Du Châtelet*, Vol. I. Ginevra: Institut et Musée Voltaire. TAT.

trovando un accordo iniziale, ma alla fine fu costretta a sostenere tutte le spese perché l'istituzione parigina era contraria ad alcune modifiche apportate dall'autrice (Petrovich, 1999).

Per quanto concerne il contenuto del testo, nelle *Institutions de Physique* la marchesa interpretò in modo innovativo le teorie di Newton e Leibniz (oltre a quelle di altri pensatori, primo fra tutti Galilei), riuscendo addirittura a conciliarli (Iltis, 1977; Reichenberger, 2021). A differenza degli altri *savants* dell'epoca, du Châtelet non era condizionata dalle logiche di partito che vedevano Newton e Leibniz contrapposti come nemici, o come intellettuali i cui pensieri erano inconciliabili; al contrario, la scienziata mantenne uno sguardo critico nei confronti delle diverse teorie in gioco, non conformandosi all'atteggiamento dei suoi colleghi uomini, che si comportavano più da seguaci che da scienziati (Gardiner, 1984). Proprio per questo motivo, pur stimando notevolmente il Newtonianismo, du Châtelet comprese le lacune che presentava e cercò di reinterpretarlo su una base metafisica (Janiak, 2021). Impostando quindi l'opera sulle idee di Leibniz-Wolff, l'autrice cercò di riformulare le descrizioni della struttura della materia, così come le leggi della Dinamica, introducendo qualche nuova ipotesi di spiegazione. Grande importanza venne riservata al Principio di Ragione Sufficiente (PRS), enunciato per la prima volta da Leibniz nell'opera *Monadologia* (1714): attraverso questo principio, du Châtelet giustificò l'uniformità delle leggi di natura (similmente a quanto fatto in precedenza da Galilei e da Newton), smentì la possibilità che l'attrazione gravitazionale fosse una proprietà della materia e criticò la convinzione cartesiana che la materia fosse estesa e passiva (Rey, 2024).

Dopo aver quindi riservato i primi sei capitoli a considerazioni di stampo metafisico e ontologico, in quelli seguenti la marchesa approfondì alcuni pensieri relativi alla struttura della materia. Poi, enunciò, chiarì e dimostrò le leggi del moto, citando Galilei e il piano inclinato, Newton e le tre leggi della Dinamica, così come diversi altri fisici illustri del Seicento e del Settecento. I capitoli XV e XVI vennero dedicati ad un focus sulla teoria della gravitazione: in essi, du Châtelet manifestò una profonda conoscenza dei *Principia*, che trattò come il punto massimo raggiunto fino a quel momento, in seguito agli sforzi di Cartesio, Galilei e Keplero (Hutton, 2004). Oltre a citare una rassegna di esperimenti effettuati negli ultimi due secoli, l'autrice si espresse poi anche in forte contrasto con le tesi dei fisici newtoniani, talmente accecati dal fanatismo da utilizzare la formula della gravitazione universale per spiegare ogni tipo di fenomeno naturale.

Infine, gli ultimi due capitoli (XX e XXI) vennero dedicati all'opinione di du Châtelet in merito alla teoria della forza di movimento di un corpo, entrando nel cuore del dibattito sulle forze vive. Si schierò a favore dell'interpretazione leibniziana – ovvero quella di misurare la forza di un corpo con la quantità mv^2 – e attaccò direttamente il fisico Jean Jacques Dortous de Mairan per il suo trattato dal titolo *Dissertation sur l'estimation & la mesure des forces motrices des corps* (del 1728),

che a sua volta era una risposta a Johann Bernoulli (cfr. 2.2.2). Du Châtelet scelse l'opera di de Mairan come la migliore del suo genere, vale a dire tra quelle che sostenevano la misura della forza di movimento con la quantità $m\vec{v}$; ciò malgrado, questo fu tutt'altro che motivo d'orgoglio per il fisico francese, che rispose a tono con una lettera, "per ricordare ad una marchesa errante quale fosse il giusto posto di una donna".⁵⁵ La scienziata non fece comunque attendere un'ulteriore contro-risposta, con una lettera di cui fece stampare 500 copie da distribuire ai membri dell'Académie, della Repubblica delle Lettere e di alcuni *salon* parigini (Zinsser, 2007), dimostrando ancora una volta la sua tenacia ed il desiderio di essere considerata alla pari dei colleghi uomini.

Principes mathématiques de la philosophie naturelle

La storia editoriale relativa alla traduzione dei *Principia* di Newton in francese è piuttosto complicata e ancora poco chiara; solo alcuni studi di ricostruzione sono stati fatti e non sono risultati sufficienti a dipanare tutto il mistero. Ciò che è certo è che, poco prima di morire, du Châtelet inviò alla Biblioteca Reale il suo manoscritto, ancora non impaginato e revisionato, incaricando Clairaut – che già l'aveva aiutata nella correzione – di provvedere alla pubblicazione (Cosmacini, 2023). Che sia stato effettivamente Clairaut a curare direttamente la revisione e la stampa dell'opera non è sicuro, anzi: sia Judith Zinsser che Alan Cook sostengono che questa ipotesi sia improbabile, perché in quel caso il fisico avrebbe incluso nel testo dei riferimenti alle proprie scoperte relative al ritorno della cometa di Halley (Zinsser, 2001). Infatti, proprio in quegli anni, Clairaut era impegnato – assieme ai sopraccitati Joseph Jérôme Lalande e Nicole-Reine de Labrière – nei calcoli decisivi per prevedere il ritorno della cometa, con l'intento di confermare le tesi newtoniane sulla gravitazione (Wilson, 1993).

Un ulteriore dato di fatto è che nel 1756 venne pubblicata una prima edizione dell'opera di du Châtelet, anche se incompleta e contenente alcuni errori. Finalmente, nel 1759 fu stampata la seconda edizione, il cui titolo completo era *Principes mathématiques de la philosophie naturelle par feu Madame la Marquise du Chastellet*. Sempre secondo Judith Zinsser, a questo lavoro contribuì anche Laurent François Prault, che curò parte delle illustrazioni presenti nel testo (Zinsser, 2007). È verosimile che la data di pubblicazione dell'opera di du Châtelet sia effettivamente dovuta all'attenzione mediatica riservata al ritorno della cometa di Halley; forse, quindi, chi ha realizzato il lavoro editoriale ha deciso di sfruttare quel momento per far risaltare maggiormente il contributo della scienziata (Zinsser, 2001). Secondo un articolo scritto nel settembre del 1759 dal *Journal Encyclopédique* "il pubblico ha già atteso per molti anni con impazienza: ma se alcune difficoltà hanno

⁵⁵Zinsser, J. P. (2007). Mentors, the Marquise Du Châtelet and Historical Memory. *Notes and Records of the Royal Society of London*, 61(2), p. 97. TAT.

ritardato la pubblicazione fino a questo momento, sembra che sia stato solo per rendere l'opera più affascinante, contribuendo al momento di trionfo della filosofia che spiega e commenta.”⁵⁶

Nella prefazione ai *Principes mathématiques*, Voltaire scrisse che un'opera simile l'avrebbero dovuta realizzare “gli uomini più colti di Francia”, ma che “sorprendentemente per la gloria della sua Nazione, è stata realizzata da una donna, Gabrielle Émilie de Breteuil, Marchesa du Châtelet” e che tale testo è divenuto necessario per la conoscenza del Newtonianismo. E poi, “Abbiamo visto due miracoli; uno che Newton abbia scritto quest'opera; l'altro che una dama l'abbia tradotta e spiegata.”⁵⁷

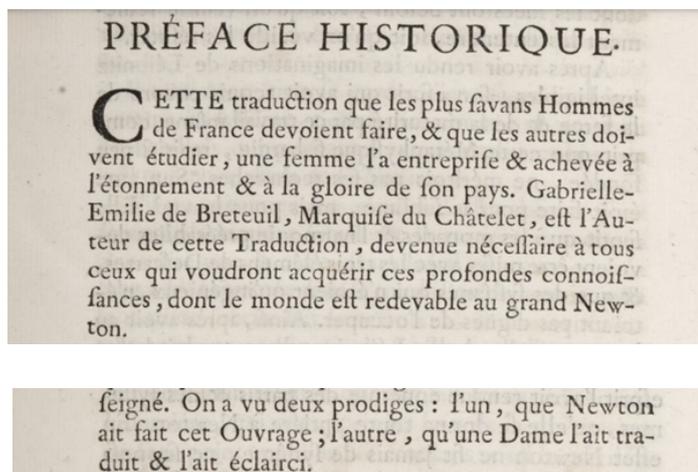


Figura 7: Estratti dalla Prefazione Storica di Voltaire alla traduzione dei *Principia*.

La prima sezione dell'opera è dedicata ad una completa e ordinata traduzione dei *Principia* di Newton; in essa, du Châtelet riorganizzò e rielaborò alcuni passaggi poco chiari nella versione originale. In questo modo, la scienziata rese più accessibile il testo, svolgendo un lavoro di divulgazione estremamente accurato (Zinsser, 2001). La stessa du Châtelet sottolineò, in una lettera a Johann Bernoulli, quanto fosse complicato il testo di Newton, soprattutto per la parte linguistica (con frasi latine poco comprensibili), che si aggiungeva al già intricato contenuto scientifico: “il latino del signor Newton è una delle difficoltà”.⁵⁸ Per di più, lo stile espositivo

⁵⁶ *Journal Encyclopédique* 6, parte 3 (settembre 1759). TAT.

⁵⁷ Newton, I. (1759). *Principes mathématiques de la philosophie naturelle [traduit du latin] par feu madame la marquise Du Chastellet [Avec une preface de Roger Cotes et une preface de Voltaire]*, p. V. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k1040149v/f13.item>. Consultato il 13 maggio 2025. TAT.

⁵⁸ Cit. in Zinsser, J. P. (2001). Translating Newton's “Principia”: The Marquise du Châtelet's Revisions and Additions for a French Audience. *Notes and Records of the Royal Society of London*, 55(2), p. 235. TAT.

di Newton non facilitava la lettura ed era ostico seguire il filo logico dei concetti esposti; spesso, alcuni argomenti venivano spiegati solo diverse pagine dopo esser stati introdotti. Pertanto, il lavoro svolto dalla marchesa fu decisivo per favorire una più limpida illustrazione delle teorie. La sua traduzione non fu solo apprezzata in relazione al testo originale latino, ma anche a confronto con una delle più famose traduzioni dell'epoca, vale a dire quella inglese di Andrew Motte (cfr. 2.1.2): nell'*Avertissement de l'Editeur* (la cui identità resta sconosciuta) presente nei *Principes mathématiques* di du Châtelet si affermò che diverse parti erano “più comprensibili in questa traduzione che nell'originale e nella traduzione inglese”.⁵⁹

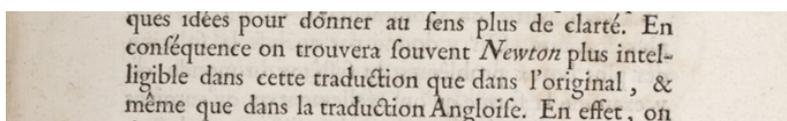


Figura 8: Estratto dall'*Avertissement de l'Editeur*.

Secondo Sarah Hutton, il trattato di du Châtelet fu fondamentale per permettere la diffusione del Newtonianismo (Hutton, 2004). Ad oggi, tale opera costituisce lo standard per studiare i *Principia* in Francia, oltre ad essere l'unica traduzione completa scritta in lingua francese (Whaley, 2022). Secondo le parole della stessa du Châtelet, il suo lavoro era mirato a “rendere con chiarezza le verità che altri hanno scoperto, la cui diversità dei linguaggi rende non fruibili per molti lettori.”⁶⁰

In aggiunta ad una scrupolosa e critica attività di traduzione e riorganizzazione, in *Principes mathématiques* la marchesa incluse un Commentario originale, volto a spiegare in modo semplice ed accessibile la complessa teoria della gravitazione (Hutton, 2004). Per realizzarlo, consultò la versione sopraccitata di Jacquier e Le Seur (2.1.3), oltre ai lavori divulgativi degli inglesi J. T. Desaguliers e di Henry Pemberton (2.1.2) e a quelli francesi di Maupertuis (Zinsser, 2001). Nel suo commentario, du Châtelet elaborò tre sezioni, via via più dettagliate; in questo modo, i lettori potevano comprendere gradualmente i nuovi concetti introdotti, vedendoli poi applicati nelle pagine successive. Nella prima parte, dal titolo *Exposition abrégée du système du monde*, l'autrice riassunse i tre libri dei *Principia*, rendendoli alla portata di tutti, senza che fosse necessaria una conoscenza di base della Matematica sottostante. Difatti, vennero definiti e spiegati termini come “orbita”, o “ellisse”, non dando nulla per scontato; tutto ciò fu condito da un fine stile divulgativo, attraverso l'uso di analogie e di parallelismi con altri campi del sapere (Zinsser, 2001). Nella seconda parte, intitolata *La méthode analytique*, la scienziata andò oltre al testo dei *Principia*, riscrivendone i contenuti in termini di calcolo

⁵⁹Newton, I. (1759), p. I. TAT.

⁶⁰Du Châtelet, E. (2009). *Selected Philosophical and Scientific Writings*, edito da Judith P. Zinsser. Chicago: Chicago University Press, p. 49. TAT.

infinitesimale: come già detto, il metodo matematico inventato da Newton non era stato usato dal fisico inglese nelle dimostrazioni dei *Principia* (cfr. 2.1.1), preferendo il linguaggio geometrico. Pertanto, du Châtelet si servì di derivate ed integrali per aprire la formula della gravitazione allo studio di sistemi più complessi, come quello della traiettoria di un corpo (e.g. di una cometa) che subisce l'attrazione di due o più corpi (Zinsser, 2001). Tutto ciò con l'intento di "mostrare il sistema di Newton in tutta la sua gloria e di perfezionarlo".⁶¹ La strategia adottata dalla scienziata francese contribuì a preparare il terreno per la successiva riformulazione newtoniana avvenuta per mano di fisici come Lagrange ed Hamilton, padri della Meccanica Razionale. Da ultimo, nella terza parte del Commentario, du Châtelet si concentrò su alcune delle prove sperimentali del Newtonianismo, analizzando un testo di Clairaut e uno di Daniel Bernoulli: del primo espose *Figure de la Terre* (1742), ispirato alla spedizione in Lapponia condotta assieme a Maupertuis per dimostrare gli effetti della gravitazione sulla forma terrestre; del secondo, invece, trattò il saggio presentato per la competizione indetta nel 1738 dall'Accademia di Berlino: in esso, Bernoulli spiegava gli effetti gravitazionali che la Luna ed il Sole hanno sulle maree (Zinsser, 2001).

⁶¹Cit. in Zinsser, J. P. (2001). Translating Newton's "Principia": The Marquise du Châtelet's Revisions and Additions for a French Audience. *Notes and Records of the Royal Society of London*, 55(2), p. 233. TAT.

4 *Institutions de Physique*

Di seguito si esploreranno le fonti primarie principali, ovvero le *Institutions de Physique* ed il seguente carteggio tra l'autrice e de Mairan. Dei 21 capitoli presenti nel testo (per un totale di 362 pagine), si porrà maggiore attenzione su quelli relativi alle leggi del moto, al Newtonianismo e alle forze vive; per questi ultimi si esaminerà anche il carteggio tra l'autrice e de Mairan (che consta di 53 pagine). Tuttavia, l'analisi non sarà limitata a questi macro-temi, ma si indagherà anche il contenuto più rilevante degli altri capitoli, particolarmente utile per capire il tenore dell'opera e la cifra stilistica di du Châtelet. Al fine di mantenere una narrazione che sia il più oggettiva possibile – dal punto di vista storiografico – si ricorrerà spesso a citazioni del testo stesso, facendo in modo che siano presenti meno filtri tra il contenuto storico e la rielaborazione personale. Per indicare da quale parte dell'opera siano prese le citazioni testuali, o le informazioni parafrasate, si utilizzeranno i numeri delle sezioni, presenti nel libro e contrassegnate dal simbolo §, in modo che siano consultabili indipendentemente dall'edizione che si possiede. Si includeranno numerose illustrazioni contenute nel testo, affinché le dimostrazioni siano più comprensibili; purtroppo, siccome nell'edizione originale tutte le figure sono inserite nell'appendice finale, esse sono talmente ravvicinate che a volte capiterà che nelle immagini presenti in questo lavoro compaiano alcune lettere non attinenti (perché relative ad altre figure). Ciononostante, la spiegazione riportata dovrebbe comunque essere comprensibile.

Va inoltre precisato fin da ora che alcuni concetti esposti nel trattato – specialmente quelli discussi nel paragrafo 4.2 – potranno sembrare più appartenenti alla sfera filosofico-metafisica, piuttosto che a quella scientifica, ma questo è dovuto alla diversa categorizzazione delle discipline tra XVIII e XXI secolo: quello che oggi appare “poco fisico”, per l'epoca era importante tanto quanto formule o grafici. Lo stesso Newton intitolò la sua opera più celebre “Principi Matematici della Filosofia Naturale”, dimostrando come l'etichetta di “Fisica” sia più recente. La commistione tra quelle che adesso sono Fisica e Filosofia risulterà quindi parte fondamentale dell'opera e sarà oggetto di una specifica riflessione storiografica, nel prossimo capitolo (cfr. 5.1.2).

Da ultimo, si precisa che i temi illustrati nei paragrafi seguenti sono frutto di una consistente rielaborazione di quanto contenuto nell'opera; non tanto nei concetti esposti, quanto nell'ordine in cui sono presentati: si è deciso di unire riflessioni presenti in capitoli piuttosto distanti (nel testo originale), per fornire un'immagine continuativa e preferibilmente esaustiva del pensiero di du Châtelet a quel riguardo. In ogni caso, si riporteranno sempre i riferimenti testuali alle sezioni, per guidare i lettori in questo processo. Alcuni estratti saranno inoltre messi a confronto con testi antecedenti, oppure con altri successivi, per mostrare come tali riflessioni si siano evolute nella Storia della Fisica.

ISTITUZIONI
DI FISICA
di Madama la MARCHESA
DU CHASTELLET

INDIRITTE A SUO FIGLIUOLO.

Traduzione dal Linguaggio Francese
nel Toscano,

Accresciuta con LA DISSERTAZIONE
SOPRA LE FORZE MOTRICI
DI M. DE MAIRAN.



IN VENEZIA, MDCCXLIII.

Presso GIAMBATISTA PASQUALI.

Con Licenza de' Superiori, e Privilegio.

Figura 9: Copertina della traduzione toscana.

4.1 Traduzione in toscano e Preambolo

4.1.1 Traduzione in toscano

La versione delle *Institutions de Physique* che verrà esaminata nel dettaglio (e di cui si citeranno numerosi estratti) sarà quella tradotta in toscano, come si può osservare dalla copertina riportata nella pagina precedente. Tale traduzione fu stampata nel 1743 a Venezia, ad opera dell'editore Giambattista Pasquali, e si riferisce alla seconda edizione dell'opera, ovvero quella stampata ad Amsterdam e contenente diverse correzioni dell'autrice. Al termine del capitolo XXI, poi, il traduttore (la cui identità resta ignota) aggiunse anche il carteggio tra de Mairan e du Châtelet, nato dalla reazione del primo al libro delle *Institutions*. Come si può leggere nell'*Avviso del Libraio al Lettore* presente all'inizio del testo, si decise di includere "la Lettera di M. DE MAIRAN su l'istessa materia, e la Risposta di MADAMA, l'Autrice delle *Instituzioni*; acciocché s'avessero in un sol luogo tutti i materiali, che servir possono, a proferir giudizio intorno a questa in oggi assai celebre Quistione"⁶², ovvero quella delle forze vive.

Nel 1743 furono stampate due traduzioni delle *Institutions de Physique*: quella toscana, appena introdotta, e quella tedesca. Si può facilmente intuire l'interesse che portò alla realizzazione di quest'ultima – visto che nell'opera venivano discusse in profondità le idee metafisiche dei connazionali Leibniz e Wolff – mentre appare meno evidente la motivazione alla base della prima traduzione. Le ragioni sono probabilmente riconducibili alla peculiare accettazione italiana delle teorie di Newton e Leibniz: come si è osservato nel secondo capitolo, a differenza dei contesti inglese e francese, dove le idee dei fisici erano più polarizzate rispetto ai sistemi discussi, in Italia regnava una più variegata adesione (Mazzotti, 2019). Ad esempio, proprio nell'ambito patavino – prossimo a quello veneziano, dove il trattato è stato tradotto – esponenti come Jacob Hermann e Giovanni Poleni iniziavano a conciliare le teorie di Newton e di Leibniz, apprezzando il pragmatismo delle applicazioni derivanti dal sistema del primo e l'efficacia del metodo matematico introdotto dal secondo (Hutton, 2022); l'opera di du Châtelet risultava quindi di grande interesse, siccome rielaborava le teorie dei due scienziati, senza contrapporle.

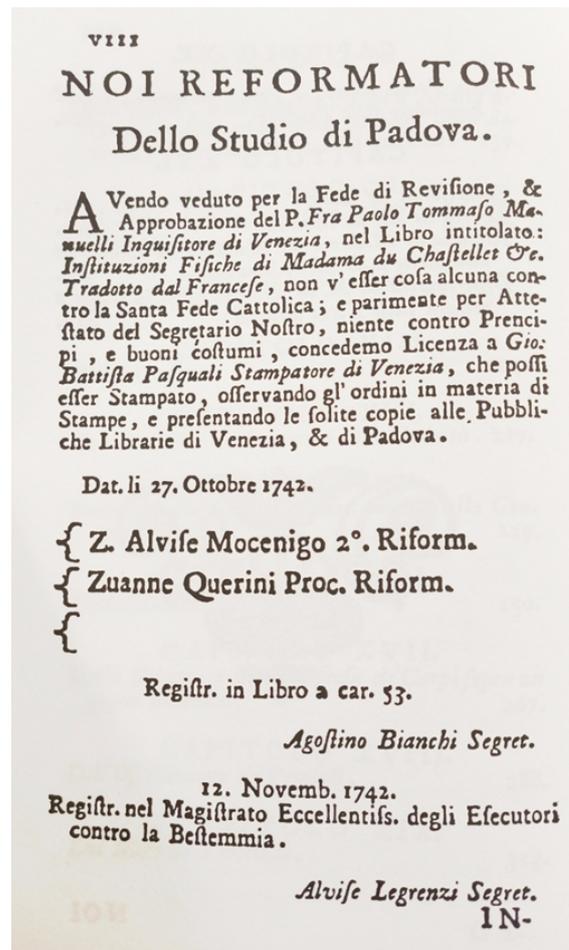
Un altro motivo che portò all'apprezzamento della marchesa in Italia e contribuì ad accrescere l'interesse per una traduzione in toscano del suo testo, fu la rete di conoscenze ed amicizie con scienziati italiani (o anche solo operanti sul suolo italiano). Tra questi spicca sicuramente Francesco Algarotti, che alloggiò a Cirey nel 1734, dove poi fece ritorno diverse volte; proprio nel castello francese, i due

⁶²Du Châtelet, E. (1743). *Instituzioni di Fisica di Madama la Marchesa du Chastellet Indiritte a suo Figliuolo. Traduzione dal Linguaggio Francese nel Toscano, accresciuta con la Dissertazione sopra le Forze Motrici di M. De Mairan*, pp. III-IV.

condivisero la stima per le teorie newtoniane, concordando sul desiderio di facilitarne la divulgazione. Va sottolineato però che du Châtelet criticò il modo in cui Algarotti realizzò la sua trasposizione popolare di Newton, sostenendo che lo stile del *Newtonianismo per le dame* fosse troppo leggero (Hutton, 2022). Un ulteriore contatto italiano per du Châtelet era François Jacquier, che è plausibile abbia seguito la traduzione italiana delle *Institutions* (Zinsser, 2006; Mazzotti, 2008). Poi, nell'ambito veneziano, si annovera l'abate Antonio Conti, a cui Voltaire dedicò gli *Éléments de la philosophie de Newton*; grande amico proprio di Voltaire e di du Châtelet, Conti visitò il castello di Cirey e mantenne una corrispondenza per lettera con i due. Stimava molto la scienziata, tanto da dedicarle un sonetto in cui diceva “che ella è figlia di Minerva e di Apollo, le due Divinità che le diedero la scienza, e le insegnarono a pubblicarla agli Uomini”.⁶³ Per alcuni storici, è possibile che sia stato Conti a curare la traduzione toscana dell'opera (Hutton, 2022). Infine, un'altra illustre conoscenza italiana per du Châtelet era Faustina Pignatelli (cfr. 3.1.2), principessa e scienziata napoletana, fervente sostenitrice del Newtonianismo. Le due donne, oltre a scambiarsi lettere di carattere scientifico, si avvicinarono anche per motivi familiari, visto che la primogenita di Émilie – Gabrielle Pauline – sposò il duca Alfonso di Montenero di Carafa, appartenente alla famiglia del marito di Pignatelli (Logan, 1998).

Per concludere il discorso in merito alla storia editoriale, si puntualizza che la traduzione del libro dovette ricevere l'*Imprimatur* da parte dell'Inquisizione, ovvero l'approvazione della Santa Sede ad essere stampato. Come si è illustrato nel paragrafo 2.1.3, solo pochi anni prima – nel 1739 – il *Newtonianismo per le dame* di Algarotti venne messo all'Indice, dimostrando quanto non fosse ancora scontato che i testi scientifici venissero avallati (Mazzotti, 2004); come già osservato, nel caso specifico del fisico italiano, la censura fu dovuta a tesi materialiste ispirate a John Locke, così come alle critiche dirette rivolte alla Chiesa (Mazzotti, 2019). Ad ogni modo, i libri relativi alle teorie galileiane e copernicane furono rimossi ufficialmente dall'Indice soltanto nel 1757, per decisione di Papa Benedetto XIV. Siccome du Châtelet sostenne in diverse pagine questi due sistemi, se ne conclude che l'approvazione data alla traduzione delle sue *Institutions* era tutt'altro che certa.

⁶³Conti, A. (1739). *Prose, e poesie del signor abate Antonio Conti, patrizio Veneto*. Venezia: Giambattista Pasquali.

Figura 10: *Imprimatur del libro.*

4.1.2 Preambolo

All'inizio del suo trattato, du Châtelet si rivolge al figlio Louis-Marie-Florent, dandogli dei consigli in merito allo studio delle Scienze e presentando alcune delle sue idee; in queste pagine si può intravedere il pensiero scientifico originale dell'autrice, così come l'intento con il quale ha composto l'opera. Fin da subito, rimarca l'importanza e la bellezza dell'istruzione (cfr. 3.2.1), sostenendo che “v'accorgete in tutt'i tempi della vostra vita, quali consolazioni si trovino nello studio, e come egli sia un opportuno asilo nelle avversità, e vedrete eziandio, ch'egli può donare dilette, e contentamenti sensibili.”⁶⁴ Poi, du Châtelet critica la condizione sociale

⁶⁴Du Châtelet, E. (1743). *Instituzioni di Fisica di Madama la Marchesa du Chastellet Indiritte a suo Figliuolo. Traduzione dal Linguaggio Francese nel Toscano, accresciuta con la Dissertazione sopra le Forze Motrici di M. De Mairan*, p. 2.

di molti ragazzi – coetanei del figlio – che non hanno l’opportunità di studiare. Entrando nel vivo della questione scientifica, l’autrice prosegue dicendo che cercherà di esporre i principali argomenti fisici ripuliti dalle complessità dell’Algebra, “la quale, separando le cose dalle immagini, s’allontana da i sensi, e parla al solo Intelletto.”⁶⁵ L’obiettivo di du Châtelet è pertanto quello di presentare le sue spiegazioni – e le dimostrazioni – per via geometrica, a suo parere più accessibile al figlio (e ai lettori). A sostegno della Geometria, l’autrice asserisce di portare alcuni esperimenti celebri, perché utili a comprendere più concretamente le teorie esposte. Per quanto concerne la Fisica, la marchesa nota che in Francia manca un trattato aggiornato con le nuove teorie, visto che l’ultimo testo a suo dire degno di nota era quello di Jacques Rohault, *Traité de physique* (1671), nel quale veniva illustrato il sistema di Cartesio. Come si è osservato nel capitolo 2, i maggiori contributi di Newton e Leibniz, così come quelli degli autori implicati nel dibattito sulla *vis viva*, sono tutti successivi alla pubblicazione del testo di Rohault. Du Châtelet sente quindi il bisogno di aggiornare il figlio in merito alle nuove scoperte, pur riconoscendo che il suo lavoro non potrà colmare tutte le lacune. Come lei stessa rivela, l’attività di revisione dei principali trattati stampati negli ultimi decenni ha richiesto grande fatica, però “non mi rincrescerà la pena ch’ella potrà costarmi, e crederolla bene impiegata, se varrà ad instillarvi l’amore delle scienze, e il desiderio di coltivare la vostra ragione.”⁶⁶

In seguito, la scienziata delinea la propria immagine della Fisica, come opera collettiva e generazionale, in cui “ogni filosofo ha veduto qualche cosa, e niuno ha veduto tutto”.⁶⁷ Si tratta di una continua evoluzione dei concetti, sulla base delle teorie precedenti: “Il Cartesio, e il Galileo han formati gli Ugenii ed i Leibnizii; [. . .] coll’approfittarsi delle fatiche di Keplero, e col far uso de’ Teoremi dell’Ugenio, il Signor Newton ha scoperta quella forza universale”.⁶⁸ In sostanza, per ognuno di questi pensatori sarebbe stato impossibile ottenere gli stessi risultati senza il lascito scientifico dei predecessori; ciascuno, nella Storia della Fisica, ha poggiato qualche pietra per edificare la conoscenza condivisa. Malgrado l’apparente pensiero positivista, però, l’autrice non esclude che numerose realtà restino oscure – anche dopo secoli di ricerche – mantenendo una visione piuttosto prudente.

A partire dalla prospettiva collettivista della Fisica, du Châtelet avverte il figlio di non cedere all’idolatria verso alcuni scienziati in particolare, pratica comune all’epoca. In queste riflessioni si nota quindi l’occhio critico e disincantato di un’intellettuale che non è mai entrata a far parte di gruppi di fanatici, come succedeva all’interno delle accademie o di circoli privati di alcuni *café* (Gardiner, 1984). Difatti, pur stimando Cartesio – orgoglio nazionale francese – per aver portato un

⁶⁵Ibidem, p. 2.

⁶⁶Ibidem, p. 4.

⁶⁷Ibidem, p. 9.

⁶⁸Ibidem, p. 5.

po' di luce nell'oblio del tempo, la scienziata ne critica le idee fisiche e le ritiene superate. Ciononostante, esorta il figlio a studiare anche il sistema cartesiano, dando un'indicazione storiografica non indifferente: nella Fisica è significativo esaminare anche le teorie che sembrano non essere più utili, se raffrontate con quelle più recenti e convincenti. Per di più, sempre in relazione al fanatismo che trionfava nella Scienza dell'epoca, du Châtelet denuncia i partiti nazionali (cartesiani contro newtoniani, newtoniani contro leibniziani ecc...), ricordando ai lettori che "la ricerca della verità è la sola cosa nella quale non dee prevalere l'amor della vostra Nazione." ⁶⁹

Infine, l'autrice dichiara che Fisica, Geometria e Metafisica sono tra loro intrecciate; e proprio quest'ultima, per du Châtelet, può essere decisiva per comprendere al meglio le prime due. Per questo motivo, preannuncia al figlio che "vi spiegherò ne' primi Capitoli le principali opinioni del Signor Leibnizio sopra la Metafisica; holle cavate dall'opere del celebre Wolfio, delle quali m'avete udito ragionare con uno de' suoi discepoli. [...] Le idee di M. Leibniz sopra la Metafisica sono ancora poco note in Francia, ma certamente meritano d'esserlo." ⁷⁰ Come si è visto nel paragrafo 3.2.1, il discepolo di Wolff a cui si riferisce l'autrice è Samuel Koenig, precettore privato presso il castello di Cirey (Iltis, 1977). Nel suo libro, a partire dalle teorie di Leibniz-Wolff, du Châtelet intende esporre un compendio di Fisica, rileggendo quindi i concetti scientifici sotto questa lente metafisica; e a questo proposito, ella vede il Principio di Ragione Sufficiente (PRS) come "una bussola atta a guidarci nell'instabile arena di questa scienza." ⁷¹ Si procederà pertanto ora con una sintesi di questi capitoli teorici dal sapore metafisico (dal punto di vista moderno), per poter intendere con maggior chiarezza la rilettura fisica successiva.

4.2 Riflessioni teoriche

Tra gli argomenti trattati nei primi dieci capitoli del libro, sono state scelte tre macro-aree ritenute di principale rilevanza: il "metodo" adottato da du Châtelet, radicato sulle ipotesi e su alcuni principi metafisici, il pensiero in merito alla natura ontologica dello spazio e del tempo, e l'idea relativa alla struttura della materia e ai suoi costituenti. Per ciascuno di questi, si riassumeranno i concetti più importanti, scelti anche sulla base della letteratura sul tema: alcuni articoli di ricerca che sono stati esaminati discutono di tali argomenti e offrono spunti per delle riflessioni critiche a riguardo.

⁶⁹Ibidem, p. 6.

⁷⁰Ibidem, p. 11.

⁷¹Ibidem, p. 11.

4.2.1 Princìpi ed ipotesi

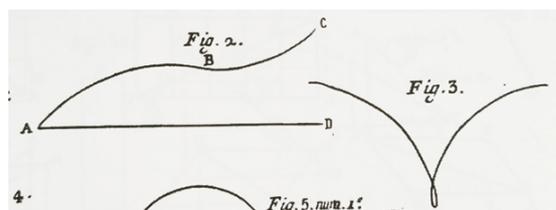
Innanzitutto, l'autrice pone le basi teoriche per lo studio della natura, esponendo alcuni princìpi per lei fondamentali al fine di orientarsi nello studio della realtà; questi sono fortemente ispirati a quelli enunciati nella *Monadologia* di Leibniz, come la stessa du Châtelet afferma nel testo. Inizia presentando il Principio di Contraddizione – originariamente attribuito ad Aristotele e agli antichi e usato anche da Cartesio – secondo il quale è impossibile che qualcosa sia e non sia allo stesso tempo: “se una volta venisse accordato che una cosa potesse esistere e non esistere nel medesimo tempo, non vi sarebbe più alcuna verità, né anco ne' numeri” (§4). Quindi, tale principio distingue ciò che è possibile – ovvero tutto quello che non implica contraddizione – dall'impossibile. Inoltre, esso si riferisce a tutte le verità necessarie, o di ragione, vale a dire quelle che sono e non possono non essere; ad esempio, tutte le verità geometriche sono verità necessarie (§8).

Per tutte le altre verità – quelle “contingenti” – serve ricorrere ad un altro principio, ovvero al Principio di Ragione Sufficiente (PRS). In questo caso, il merito per tale principio si dovrebbe a Leibniz, secondo du Châtelet: “Il Signor Leibniz, che spiava con attenzione tutti i fonti de' nostri raziocinj, abbracciò questo principio, lo sviluppò, e fu il primo che lo espose distintamente, e l'introdusse nelle scienze” (§8). Attraverso il PRS, l'autrice asserisce di avere un criterio per orientarsi tra le verità contingenti: nonostante siano più o meno tutte logicamente possibili, risulta fondamentale determinarne la causa. In questo modo, se si è in grado di spiegare un fenomeno attraverso una tesi logicamente possibile, risalendo alla causa di quel fenomeno, è più probabile che tale tesi sia quella corretta. Secondo Anne-Lise Rey, du Châtelet si serve del PRS come se fosse un nuovo “rasoio di Occam”, vale a dire uno strumento epistemologico per escludere le teorie meno solide (Rey, 2021). In alcuni passaggi del libro, la marchesa ricorre al PRS in riferimento alle scelte (o alle teorie scientifiche) più ragionevoli da seguire: a tal proposito, secondo Sarah Hutton, du Châtelet usa il PRS nella sua forma più debole – rispetto a quella introdotta da Leibniz – trattandolo come una forma di principio di “buon senso” (Hutton, 2004).

In seguito, a partire dal PRS l'autrice espone un terzo principio, quello degli Indiscernibili (sempre attribuito a Leibniz): in natura non esistono due oggetti o corpi identici, ma regna un'incredibile diversità. Come sostiene du Châtelet, “questa infinita diversità, che regna nella natura, si lascia scorgere a noi” (§12); e anche quando – all'apparenza dei nostri sensi – due cose sembrano uguali, si può scoprire un nuovo grado di osservazione che ne smentisce la similarità: è il caso del microscopio, strumento che all'epoca della scrittura del libro era in circolazione da circa un secolo e che veniva adoperato soprattutto nel campo della biologia e della zoologia. La marchesa dichiara infatti che “vi sono degli oggetti che la loro piccolezza ci fa vedere quasi simili, perché li vediamo confusamente; ma i microscopj ci

discuoprono le lor differenze” (§12).

Da ultimo, viene illustrato il Principio di Continuità, sempre derivato dal PRS. Secondo esso, “nulla si fa per salto nella natura” (§13) e ogni stato di un corpo si deve ricondurre a quello precedente, trovando sempre la causa del suo cambiamento. Du Châtelet prosegue adducendo esempi geometrici, come quelli di alcune curve continue (*Figg. 2 e 3*), oppure la variazione continua tra ellisse e parabola, se si porta uno dei due fuochi all’infinito.



Per analogia si passa poi al mondo fisico, siccome “accade nella natura la stessa cosa che nella Geometria” (§13): tramite il Principio di Continuità si potrebbero pertanto dimostrare tutte le leggi del moto, così come i fenomeni di rifrazione e di riflessione della luce.

Da questi principi si può ricavare una *summa* delle idee della Fisica “classica”, strutturalmente scosse due secoli più tardi dalla Meccanica Quantistica: che la luce – al pari di un elettrone o di altre particelle fondamentali – sia contemporaneamente onda e particella smentisce il Principio di Contraddizione (e per molto tempo è sembrato impossibile, anche agli occhi di numerosi scienziati del XX secolo); che gli atomi di uno stesso elemento siano identici in qualsiasi parte del Cosmo (così come le particelle fondamentali del Modello Standard) viola il Principio degli Indiscernibili; che gli elettroni in orbita attorno al nucleo possano “saltare” da un livello energetico ad un altro va contro al Principio di Continuità. Questi sono solo alcuni esempi, ma piuttosto convincenti di quanto il pensiero espresso da du Châtelet sia eco di un sentire comune alla Fisica – e non solo – che nel Settecento stava trovando una sua formalizzazione.

Se i principi sono le fondamenta del metodo scientifico della marchesa francese, le ipotesi e gli esperimenti sono la struttura stessa: alle prime, la scienziata dedica l’intero capitolo IV, poiché le ritiene cruciali per sviluppare l’investigazione della realtà; i secondi, invece, servono come sostegno alla logica per dimostrare le teorie (“necessario è dunque [...] verificar le tue idee, dimostrarne la realtà, e non ammetterne alcuna per indubitabile, se non si è accertato coll’esperienza e colla dimostrazione” - §5). Quando gli esperimenti e le dimostrazioni logiche – fondate sui principi sopraccitati – non bastano a districarsi tra i misteri della Natura, ecco che le ipotesi diventano efficaci.

Secondo du Châtelet, l’introduzione consistente delle ipotesi nel ragionamento

scientifico si deve a Cartesio, il quale “instillò nella gente dotta il gusto delle ipotesi” (§55). Tuttavia, nel corso del XVII secolo esse sembrarono troppo metafisiche e slegate dalla realtà, tanto che Newton prima – con la celebre frase “*hypotheses non fingo*” – e i newtoniani poi “hanno levata bandiera contro le ipotesi, ed hanno procurato di renderle sospette e ridicole, chiamandole *intossico della ragione, e la peste della Filosofia*” (§55). A questo proposito, l’autrice condivide la cautela di Newton nel far uso di ipotesi, riconoscendo che sono spesso state adoperate in modo improprio ed eccessivo, o addirittura confuse con le verità stesse che cercavano di dimostrare. Ciononostante, du Châtelet propugna l’importanza di esse nelle pratiche scientifiche, come guida per gli esperimenti e per nuove scoperte: “Le ipotesi devono trovare dunque luogo nelle scienze, poiché elleno giovano per farci scoprire la verità, e darci nuovi lumi e nuove idee, imperocché posta che sia un’ipotesi, si fanno sovente delle esperienze per assicurarsi s’ella sia buona, che non sarebbero mai forse cadute in mente” (§58).

Tutto questo ricorda quanto sostenuto da Albert Einstein in un articolo del 1919 in cui ragiona sul metodo scientifico; in esso, egli sostiene che i “pregiudizi” (ovvero le ipotesi) dello scienziato sono cruciali per orientarsi tra i dati a disposizione: “La comprensione intuitiva di un grande complesso di fatti porta il ricercatore a proporre una o più leggi ipotetiche fondamentali e a trarre da esse delle conclusioni coerenti per via puramente logico-deduttiva. [...] Il complesso delle leggi e delle loro conseguenze costituisce quello che si chiama *teoria*. Ogni esperto sa che i più grandi progressi della conoscenza scientifica (per esempio la teoria della gravitazione di Newton, la termodinamica, la teoria cinetica dei gas, l’elettrodinamica moderna, ecc...) sono nati attraverso questa via e che alla loro base si trova questo carattere ipotetico.”⁷² E ancora, in un altro scritto: “Se un ricercatore intraprendesse il proprio lavoro senza alcuna idea preconcepita, come potrebbe selezionare quei fatti dal vasto mare dell’esperienza? [...] Io stesso ho elaborato la Relatività partendo da pregiudizi metafisici.”⁷³ Non a caso, anche per Einstein sarebbe stato piuttosto complicato analizzare la mole di dati astronomici, senza la formulazione del Principio Cosmologico a guidarlo.

Restando in ambito astronomico, du Châtelet cita diversi esempi storici in cui l’utilizzo di ipotesi è risultato fondamentale per sviluppare una teoria, o per raggiungere una maggiore conoscenza dei fenomeni. Ad esempio, a partire dall’ipotesi eliocentrica di Copernico è stata elaborata la “bella Teoria dell’aberrazione delle Fisse” (§66) di Bradley, oltre allo studio della parallasse. Poi, anche partendo da ipotesi non corrette si può comunque ottenere un risultato positivo, come è successo con l’idea iniziale che i moti dei pianeti fossero circolari: grazie ad un sistema di calcolo più semplice, è stato possibile raccogliere tanti dati – ovvero

⁷²Einstein, A. Induction and Deduction in Physics. *Berliner Tageblatt*, 25 December 1919, Morgen-Ausgabe, 4. Beiblatt, p. 1. TAT.

⁷³Einstein, A. in P. Frank *Einstein: his life and times*. Knopf: 1947. TAT.

condurre molti esperimenti – che sono stati successivamente necessari per correggere la teoria stessa, arrivando alla prima legge di Keplero. A conferma di ciò, du Châtelet esprime la sua idea storico-collettivista della Scienza, per cui le ricerche più complesse, “esigono la correzione di più secoli, e l’opera di più uomini, prima di toccare una certa perfezione” (§71).

4.2.2 Spazio e tempo

Nei capitoli V e VI, la scienziata si espone in merito alla natura ontologica dello spazio e del tempo: *a posteriori*, tale dibattito viene ricondotto alle categorie di sostanzialismo (per cui si crede che spazio e tempo siano delle sostanze a sé stanti ed esistenti indipendentemente da tutto il resto) e di relazionismo (per cui spazio e tempo emergerebbero come realtà solo in relazione ad oggetti ed eventi). Questa discussione ha certamente origini antiche – già Aristotele rientrerebbe anacronisticamente nel gruppo dei relazionisti, così come Epicuro e Democrito in quello dei sostanzialisti – ma è stata ed è tuttora al centro di numerose teorie: basti pensare al modo sostanzialista di Minkowski di intendere lo spazio-tempo, contrapposto a quello relazionista di Einstein e Poincaré; oppure alla Geometrodinamica di Wheeler (di stampo sostanzialista), piuttosto che al pensiero relazionista di Rovelli, anche in merito ai paradossi della Meccanica Quantistica.

Al tempo di du Châtelet, queste due posizioni erano incarnate dai due filosofi più celebri: Newton (sostanzialista) e Leibniz (relazionista). Nei primi decenni del Settecento, tale disputa fu alimentata dalla corrispondenza Leibniz-Clarke, in cui il secondo prendeva le veci di Newton a favore del sostanzialismo (cfr. 2.1.2). Per essere più precisi, Newton e Clarke sostenevano delle tesi *realiste*, considerando spazio e tempo come due entità reali e indipendenti dal resto; al contrario, Leibniz era a favore di posizioni *idealiste*, ovvero che spazio e tempo fossero frutto dell’immaginazione umana e di una percezione confusa della Natura.

Come affermato nei *Principia*, Newton distingueva spazio e tempo assoluti da spazio e tempo relativi. I primi venivano connotati da aggettivi come “veri” e “matematici” ed erano sussistenti a prescindere dagli osservatori e dagli eventi: costituivano una specie di palcoscenico per la realtà; i secondi, invece, erano quelli percepibili dagli uomini, copie corrotte e imprecise di quelli assoluti. In questo contesto, il fisico inglese riteneva che esistesse anche il vuoto assoluto, come si è già discusso nel secondo capitolo (2.1.1). Al contrario, Leibniz pensava che il vero mondo fosse quello delle monadi, sostanza alla base della vita, e che tale realtà fosse immutabile, senza tempo e senza spazio. In questo contesto, i fenomeni – così come spazio e tempo – emergerebbero da una visione poco nitida del mondo delle monadi. Proprio accanto a questa linea di pensiero pare collocarsi du Châtelet nelle *Institutions*, asserendo che “s’ha ragione di definire lo Spazio, l’ordine de’ coesistenti, cioè la rassomiglianza nel modo di coesistere degli Esseri” (§79), e

ancora “il tempo non è altro che l’ordine de’ coesistenti” (§102).

Però, attraverso un’analisi più critica, come suggerito da Andrea Reichenbeger, si nota che l’autrice concilia a suo modo le posizioni di Newton e di Leibniz (favorendo comunque quella del secondo): per du Châtelet esisterebbero quindi spazio e tempo ideali e spazio e tempo reali. I primi sarebbero compatibili con spazio e tempo assoluti “alla Newton”, tramite un’astrazione mentale che si allontana sempre di più dalla realtà; i secondi sarebbero invece quelli simili a spazio e tempo “alla Leibniz”, ovvero definiti dall’interazione con i corpi che vi si muovono (Reichenbeger, 2021). L’idea di spazio, ad esempio, nascerebbe dal concetto di *estensione* e sarebbe alimentata da processi di astrazione, piuttosto che da percezioni sensoriali: “Ben si vede che quest’Essere ideale d’estensione [...] ci dee parere una sostanza” (§80). L’errore di Newton e dei suoi seguaci starebbe perciò nel ritenere spazio e tempo ideali (o assoluti) delle vere e proprie sostanze eterne ed immutabili, addirittura confuse con idee pseudo-teologiche: “Vedesi nello *Scolio Generale*, che sta in fine de’ Principj del Newton, aver egli creduto che lo spazio fosse l’immensità di Dio; e nella sua *Ottica*, lo chiama *Sensorium* di Dio: vale a dire ciò col di cui mezzo Dio è presente a tutte le cose” (§73). Allo stesso modo, anche il tempo “è puramente un Essere astratto, il quale fuor delle cose è niente, e non è suscettibile per conseguenza delle proprietà attribuitegli dall’immaginazione” (§96).

4.2.3 Struttura della materia

Per quanto riguarda i costituenti della materia, l’esposizione di du Châtelet nelle *Institutions* è a volte confusa e apparentemente contraddittoria, però può fornire spunti interessanti; infatti, le sue teorie si possono sia leggere in relazione a quelle a lei coeve, sia alla luce delle scoperte più recenti. In ogni caso, la sua trattazione nebulosa attorno a questo tema è uno spaccato storicamente accurato del tempo, visto che nel XVIII secolo regnava ancora molto mistero circa la struttura dei corpi. Sebbene da decenni si adoperassero microscopi per capire come fosse formata la materia a scale minori – tanto che nel 1665 Robert Hooke pubblicò *Micrografia*, nella quale introdusse il termine “cellula” per descrivere alcune strutture interne al sughero – non si riusciva a comprendere fino a che punto si potessero trovare corpuscoli di dimensioni inferiori e se mai si sarebbero individuati dei costituenti elementari e primitivi.

Nel Seicento, Cartesio si era esposto sull’argomento, come riporta du Châtelet: per lui, una caratteristica essenziale dei corpi – condivisa dall’autrice – era l’*estensione*, divisa in lunghezza, larghezza e profondità (§165). Quindi, tutto si potrebbe descrivere in questi termini, propugnando una connotazione tridimensionale della realtà. Tuttavia, lo stesso Cartesio ricorreva ad espressioni più astratte e dal sapore metafisico, come *sostanza*: ogni corpo sarebbe o una sostanza, o una modificazione di una sostanza (Watson, 1966). Cosa si intenda con questo concetto è difficile da

interpretare, soprattutto in una prospettiva moderna, e non si capisce se nasconda l'idea di un'unica sostanza (presente in più forme), o di più sostanze, in numero indefinito.

In ogni caso, du Châtelet concorda sul concetto di *estensione*, mentre si discosta dal pensiero cartesiano per quanto riguarda quello di *sostanza*: avvicinandosi alle teorie leibniziane, infatti, ella promuove una descrizione della materia in termini di estensione, forza passiva (o inerzia) e forza attiva (la celebre *vis viva*). Ciononostante, come sostenuto anche da Carolyn Iltis, l'esposizione di du Châtelet a proposito risulta a volte inconsistente e difficile da seguire. In alcune sezioni del libro, l'autrice si riferisce ad estensione, inerzia e *vis viva* come "principi", altre come "essenze", o come "proprietà essenziali della materia"; in alcuni passaggi dice che la materia consiste di questi tre principi, mutualmente indipendenti (§143-145), mentre in altri che la forza è diversa dalla materia, ma inseparabilmente legata ad essa (§149) (Iltis, 1977). Ciò che conta, come sottolinea Iltis, è che forza e materia siano sullo stesso piano ontologico e che l'estensione cartesiana non sia sufficiente a descrivere i corpi: "Convieni asserire che la forza è necessaria all'essenza del Corpo non men che l'estensione, e che per conseguenza non vi è alcuna porzione di materia nell'Universo senza moto e senza forza" (§139). A livello più speculativo, se si sostituisse il concetto di forza con quello moderno di energia e quello di materia con quello più specifico di massa, si potrebbe scorgere un'intuizione precorritrice di quella einsteiniana della Relatività, se non altro nel riconoscere lo stretto legame che intercorre tra movimento e materia.

Du Châtelet entra poi nel dettaglio delle definizioni di estensione, inerzia e forza viva. La prima viene a sua volta distinta in estensione geometrica e in estensione fisica; quella geometrica è divisibile infinite volte e le si può associare qualsiasi numero, mentre quella fisica si riconduce sempre ad un numero finito di parti. A questo riguardo, la marchesa sostiene che "le parti sensibili che compongono i Corpi si chiamano corpuscoli, e si dividono in corpuscoli primitivi e corpuscoli derivati" (§173), ma che "i corpuscoli derivati ed i corpuscoli primitivi non possono mai confondersi cogli Atomi di Epicuro" (§178). Difatti, secondo du Châtelet, gli atomi epicurei (e anche democritei e newtoniani poi) sarebbero estesi e indivisibili: i corpuscoli primitivi non possono essere estesi e quelli derivati non possono essere indivisibili, perché costituiti da quelli primitivi. Rispetto alla suddivisione dei costituenti della materia, l'autrice si riferisce spesso a recenti esperimenti con il microscopio, citando alcuni scienziati: Wolff, che ha "osservato nello spazio d'un grano di polvere cinquecento ovi, da' quali sono usciti degli animali simili a' pesci, e ne' quali ha notato un'infinità di parti, come ne' più grandi pesci del Mare" (§173); Boyle, il cui esperimento ha mostrato che "ciascun grano d'oro racchiuda in circa dodici milioni di parti visibili alla sola vista, ed in ciascuna delle quali, un Microscopio che ingrossa 30000 volte farebbe vedere ancor 30 mille parti" (§176); e ancora, osservazioni al microscopio di alcuni campioni di sangue, hanno mostrato

che “ciascun globulo rosso è composto di sei piccioli globicini feroci, che tirano al giallo, e che ciascuno di questi globicini è composto di altri sei globuletti linfatici, e non si sa fin dove una tal progressione di piccioli globi si continui” (§173). In tutto ciò, si nota come du Châtelet scongiuri prima la possibilità che i corpi fisici siano infinitamente divisibili, per poi cadere in locuzioni ambigue, che sembrano suggerire un’idea di divisibilità senza fine.

Riprendendo quanto sostenuto da Anne-Lise Rey, du Châtelet esprime sì una grande ammirazione per il microscopio e per tutti gli strumenti fisici che facilitano la sperimentazione scientifica, ma al contempo ammonisce i lettori di non porre troppa fiducia negli strumenti stessi (Rey, 2024), specialmente in merito ai costituenti della materia: “Noi non perverremo mai nelle nostre esperienze fino a questi primi elementi, che compongono i Corpi” (§136). In effetti, sebbene nei secoli successivi la ricerca abbia fatto passi da gigante, nell’ambito, vedendo nascere le discipline della Fisica Atomica prima e di quella Nucleare e Subnucleare poi, neanche ora si è risolto del tutto il mistero concernente la struttura della materia. E, se si rivelerà corretta la teoria delle stringhe, l’avvertimento di du Châtelet circa l’impossibilità di “vedere” i costituenti primi sarebbe effettivamente confermato.

Malgrado ciò, un tentativo di soluzione riguardo al problema degli elementi fondamentali della materia viene formulato dalla scienziata, riecheggiando le tesi di Leibniz contenute in *Monadologia*: sarebbero proprio le monadi le unità alla base di tutto ciò che esiste, gli *esseri semplici* che formano gli *esseri estesi*. Tutti i fenomeni che si osservano sarebbero quindi “apparenze che nascono dalla confusione di molte realtà” (§154). Le monadi avrebbero delle caratteristiche cruciali e peculiari, come essere indivisibili, invisibili (a causa della nostra visione imperfetta), diverse una dall’altra (per poter dare vita alla diversità nell’Universo e per rispettare il Principio degli Indiscernibili esposto in precedenza) e soprattutto in costante movimento. Proprio questo movimento diventa il fulcro della filosofia naturale di du Châtelet, in pieno accordo con Leibniz e Wolff: come anticipato pocanzi, le forze attive e passive sarebbero decisive per poter descrivere e studiare la realtà. La Dinamica assumerebbe quindi il ruolo di protagonista. Le monadi sarebbero le forze primitive, alla base di tutto il moto dell’Universo; le forze in gioco nel movimento dei corpi estesi sarebbero invece forze derivate, divise appunto in passive (inerzia) e attive (*vis viva*). Una trattazione più dettagliata della spiegazione delle forze nelle *Institutions* sarà riservata al paragrafo 4.5.

Da ultimo, a proposito di Dinamica, si ritiene opportuno evidenziare l’elogio scritto da du Châtelet in merito al Meccanicismo, attraverso parole che ricordano molto quelle che scriverà circa settant’anni più tardi Pierre Simon Laplace, nel celebre brano passato alla storia come il “Demone di Laplace”. La scienziata, parlando dei principi che regolano il moto all’interno dell’Universo afferma che: “In questo grande Automato dell’Universo, lo stato presente è nato dal passato, e farà nascere il susseguente; tutte le mutazioni meccaniche dirivano dalla disposizione

delle parti, e dalle regole del moto, e ciò che da tai principj non discende, non esiste” (§162). Dunque, le regole meccaniche, ovvero quelle del moto, permettono di descrivere tutto quello che è stato e si presuppone che siano valide anche per spiegare tutto ciò che sarà. Pertanto, da Meccanicismo a Determinismo il passo è breve, seguendo questo pensiero, come si riscontra nelle parole di Laplace: “Noi dunque dobbiamo ravvisare lo stato presente dell’Universo come l’effetto del suo stato anteriore e come la cagione di quello avvenire. Un’intelligenza che, per un dato istante, conoscesse tutte le forze di cui la natura è animata, e la rispettiva situazione degli esseri che la compongono, se fosse d’altronde assai vasta da sottomettere questi dati all’analisi, abbraccerebbe nella medesima formula i movimenti dei più grandi corpi dell’Universo e quei dell’atomo il più leggero: niente sarebbe incerto per essa, e l’avvenire come il passato sarebbe presente ai suoi occhi.”⁷⁴ Anche Laplace, quindi, si basa sui Principi di Continuità (tra stati successivi) e di Ragione Sufficiente (perché nulla può accadere senza una causa che lo produce).

4.3 Leggi del moto

Gli argomenti sin qui trattati riguardavano sostanzialmente i primi dieci capitoli delle *Institutions*. Per quanto concerne i capitoli successivi, si riporterà di seguito un riassunto dei temi ritenuti più importanti circa le leggi del moto: si vedranno diverse dimostrazioni elaborate da du Châtelet, confrontandole anche con i testi dei *Principia* di Newton e dei *Discorsi e dimostrazioni* di Galilei, da cui ha preso spunto. In particolare, si discuteranno la composizione dei moti, i moti Rettilineo Uniforme e Uniformemente Accelerato – visto sia nel caso della caduta libera che del piano inclinato – ed il moto parabolico.

4.3.1 Moto, quiete e composizione dei moti

Nella sua illustrazione della Cinematica e della Dinamica, l’autrice dimostra grande padronanza dei concetti fisici, così come una vasta conoscenza di esperimenti recenti (che cita frequentemente nel libro). Tuttavia, si notano alcune locuzioni che presuppongono dei preconcetti scorretti in merito alle forze in gioco nella descrizione del moto; queste imprecisioni verranno esaminate più nel dettaglio nel quinto capitolo, in un’ottica didattica (cfr. 5.2). In generale, nelle *Institutions* il linguaggio scientifico è quello tipico dell’epoca, ovvero privo di formule in notazione algebrica (con una sola eccezione) e ricco di descrizioni verbali e di esempi per casi specifici. Per tutte le dimostrazioni o le spiegazioni più tecniche, du Châtelet si rifà all’uso di disegni e di figure, riportate in appendice al libro (e qui incluse, ove particolarmente utili a comprendere meglio quanto esposto dalla marchesa).

⁷⁴Laplace, P. S. (1814). *Essai philosophique sur les probabilités*. Imprimerie de Bachelier. TAT.

Circa il moto e la quiete, alcune informazioni appaiono più interessanti di altre: innanzitutto, la scienziata afferma che un corpo resterebbe in quiete assoluta per sempre, se non intervenisse una causa esterna a metterlo in moto (“perché il moto si faccia con ragion sufficiente, è d’uopo pertanto d’una causa che metta cotesto corpo in moto” - §227); come si può osservare, innanzitutto du Châtelet non adopera il termine “forza”, bensì “causa”, e poi ricorre al PRS per avvalere la sua posizione: tale pratica sarà ripetuta in diversi passaggi relativi alla Dinamica. Quanto osservato per la quiete viene spiegato anche per un corpo in Moto Rettilineo Uniforme: “Per lo stesso principio della ragione sufficiente, un corpo in moto non cesserebbe mai di muoversi, se qualche causa non fermasse il suo moto, consumando la sua forza” (§228). Da sottolineare la frase finale “consumando la sua forza”, che cela la rappresentazione mentale di una forza interna al corpo (§225) che viene dissipata da altri corpi o da ostacoli (definiti da du Châtelet come “tutto quello che si oppone al moto d’un corpo, e che consuma la sua forza in tutto o in parte” - §234). Questa concezione dei corpi come “contenitori della forza” è presente in tutta la trattazione delle *Institutions* e rivela una potenzialità didattica che sarà ripresa nel capitolo quinto (questo errore, infatti, è tipico anche negli studenti delle scuole superiori). Per la marchesa, questa forza interna ai corpi deriva da altri corpi, che ne causano la variazione di moto; la causa stessa viene definita “forza motrice” (e sarà approfondita nel paragrafo 4.5).

A questo punto, è possibile capire il modo in cui du Châtelet presenta le tre Leggi della Dinamica.⁷⁵

Per la prima scrive:

“Un corpo persevera nello stato in cui si trova, o di quiete, o di moto, se qualche causa nol cava fuori dal suo moto o dalla sua quiete.” (§229)

Nei *Principia*, Newton enuncia tale legge come segue:

“Ciascun corpo persevera nel proprio stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, eccetto che sia costretto a mutare questo stato da forze impresse.”

La differenza principale, oltre alla precisazione di Newton circa il moto – che si specifica essere rettilineo uniforme – si trova proprio nella differente individuazione dell’agente del cambiamento: mentre per il fisico inglese sono le “forze impresse” a provocare le variazioni del moto di un corpo, per la scienziata francese si tratta più genericamente di “cause”. A questo, qualche pagina più avanti du Châtelet aggiunge che il moto di un corpo sarebbe eterno, nel vuoto assoluto, “se il vacuo fosse possibile” (§235), discostandosi ulteriormente dalla visione newtoniana.

Per la seconda legge, la scienziata sostiene che:

⁷⁵Tutte le citazioni del testo dei *Principia* sono prese dalla traduzione *Principi Matematici della Filosofia Naturale*, 1965, UTET, Torino.

“Il cambiamento che succede al moto d’un corpo, è sempre proporzionale alla forza motrice che opera sovra esso; imperocché altrimenti una tal mutazione sarebbe senza ragione sufficiente.” (§229)

Nei *Principia* si legge invece:

“Il cambiamento di moto è proporzionale alla forza motrice impressa, ed avviene lungo la linea retta secondo la quale la forza è stata impressa.”

Anche qui si osserva che Newton parla di forza motrice “impressa”, mentre du Châtelet trascura questo termine; poi, nelle *Institutions* è assente il riferimento di natura vettoriale circa la direzione lungo la quale avviene la variazione del moto. Inoltre, l’uso del PRS – caratteristico del testo della marchesa – è persistente, ma in realtà non fornisce una spiegazione più profonda della legge e pare che in questa occasione venga usato come “buon senso”, oppure come “condizione ragionevole” (Hutton, 2004).

Per la terza legge, l’autrice dichiara:

“La reazione è sempre eguale all’azione; imperocché un corpo non potrebbe agire sopra d’un altro corpo, se quest’altro corpo non gli resistesse: perciò, l’azione e la reazione sono sempre eguali ed opposte.” (§229)

Secondo Newton:

“Ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria: ossia, le azioni di due corpi sono sempre uguali fra loro e dirette verso parti opposte.”

Pure in questo caso si riscontra un carattere vettoriale nella trattazione newtoniana, che risulta assente in quella di du Châtelet. Marius Stan, analizzando l’esposizione delle *Institutions*, si sofferma su un dettaglio: l’idea di “resistenza” di un corpo, nei confronti dell’altro; secondo lui, tale considerazione – non presente nel testo dei *Principia* – sarebbe ispirata all’opera *Phoronomia* (1716) di Jacob Hermann (a sua volta radicata sulle idee di Leibniz). Difatti, nelle *Institutions* si usa il termine “lutte” (lotta), così come nel testo di Hermann si trova “luctatio”, rivelando una concezione ben precisa che vede l’interazione tra corpi come una lotta in cui entrano in gioco le forze d’inerzia (Stan, 2023). Pure in questo caso, si riscontra una rappresentazione mentale comune a molti studenti delle scuole superiori, che tendono a immaginare le forze in gioco come se fossero in conflitto, consumandosi a vicenda; tutto ciò verrà approfondito nel quinto capitolo (cfr. 5.2).

Successivamente, la marchesa dà un’interpretazione fortemente geometrica della misura dello spazio percorso da un corpo, in modo piuttosto simile a quello di Newton nei *Principia*: anche per du Châtelet, infatti, lo spazio è descritto dalla

traiettoria, intesa come linea geometrica; altre volte, i segmenti disegnati rappresentano tempi o velocità. Queste riflessioni stanno alla base di tutte le dimostrazioni seguenti, come ipotesi fondamentale. L'autrice definisce il Moto Rettilineo Uniforme, che viene espresso verbalmente e senza l'uso di formule algebriche: le correlazioni tra spazio, tempo e velocità sono espresse in termini di proporzionalità. Vengono quindi presentate tutte le relazioni in gioco (che ora verrebbero etichettate come "formule dirette e formule inverse"). In linguaggio moderno, sarebbero scritte come $s = v \cdot t$; $v = \frac{s}{t}$ e $t = \frac{s}{v}$ (§239, §255). Poi, la scienziata sostiene che "in un tempo infinitamente piccolo, si considera sempre il moto come uniforme" (§242). Tuttavia, du Châtelet precisa che il Moto Rettilineo Uniforme "perfetto" non può esistere, perché sarebbe necessario eliminare ogni forma di attrito e di resistenza: si tratta quindi di un'astrazione matematica per descrivere più agevolmente il moto dei corpi. Inoltre, viene smentita la possibilità di realizzare un moto perpetuo, proprio sulla base dell'inevitabile dissipazione di "forza" (adesso si direbbe di "energia").

Una volta introdotti alcuni ragionamenti più quantitativi circa forze e velocità, l'autrice riprende ed elabora ulteriormente la seconda legge della Dinamica, ma senza chiamarla così: "Quanto più un corpo ha di massa, meno acquista di velocità dalla medesima pressione, e viceversa" (§257) e ancora "la pressione, che fa muovere differenti corpi con una medesima velocità, è sempre proporzionale alla massa di questi corpi" (§258). Si nota che il termine "pressione" si avvicina a quello di "forza impressa" newtoniana e non come quello moderno di "pressione" (definita invece come unità di forza per unità di superficie). Successivamente, anche la terza legge della Dinamica viene approfondita, affermando che "lo stabilimento di questa legge era necessario, affinché i corpi potessero operare gli uni sopra gli altri; ed il moto una volta prodotto nell'Universo, potesse essere comunicato da un corpo ad un altro con ragione sufficiente" (§259). La retorica utilizzata da du Châtelet per parlare delle forze di azione e reazione è nuovamente quella della "lotta", in cui la forza vincitrice determina il moto conseguente.

Si prosegue poi con la distinzione tra *moti semplici* e *moti composti*, per cui i primi sono determinati da una sola forza e diretti verso un unico punto (quindi la traiettoria è rappresentata da una linea retta - §263), mentre quelli composti nascono dall'interazione di più forze agenti sullo stesso corpo, provocandone una traiettoria curva. Per du Châtelet, l'unico esempio di moto semplice è quello dei corpi verso il centro della Terra, mossi dalla forza di gravità. Circa il moto composto, l'autrice espone la cosiddetta "regola del parallelogramma" (dicitura moderna), per spiegare come si compongano direzione e velocità di un corpo sottoposto a due forze differenti. Inizia illustrando il caso di due forze tra loro perpendicolari: la dimostrazione è di stampo geometrico – come preannunciato – e si sviluppa rappresentando gli effetti delle due forze in questione con i segmenti AB e AC ; questi si riferiscono alle distanze che il corpo avrebbe percorso in ciascuna direzione, se

solo una delle due forze fosse stata presente.

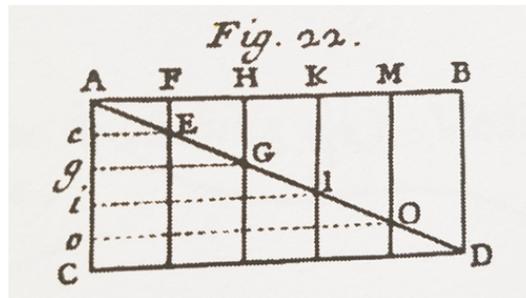


Figura 11: Regola del parallelogramma per due forze perpendicolari.

Si divide in parti uguali il segmento AB (AF , FH , HK , KM , MB) e si fa lo stesso con AC (Ac , cg , gi , io , oC). Tali segmenti sono scelti in modo tale che il corpo percorra AF nello stesso tempo in cui percorre Ac (così come FH e cg ecc...). Dopo un intervallo di tempo, quindi, il corpo si trova nel punto E , diagonale del rettangolo $AFEc$. Si ripete il procedimento per le coppie di segmenti successivi ed il corpo si troverà nei punti G , I , O e D . In conclusione, “il corpo percorre questa diagonale AD nell’istesso tempo in cui arrebbe percorse le linee AC e AB separatamente” (§275).

Il ragionamento viene poi ampliato al caso di moti composti determinati da forze tra loro non perpendicolari. Du Châtelet nota che la diagonale che descrive la traiettoria finale può essere generata da un numero infinito di parallelogrammi. Nella *Fig. 24* il segmento AD si può ottenere come diagonale del parallelogramma $AEDB$, oppure di $Afdh$ (e così via). Inoltre, la scienziata sottolinea come a partire da questo ragionamento geometrico sia possibile estrapolare una considerazione fisica: “Un corpo può percorrere la medesima linea retta nel medesimo tempo, o sia egli spinto da molte forze, o la sia da una sola” (§282). In sostanza, anche senza adoperare la teoria relativa ai vettori e alle operazioni tra essi – comunemente usata ora – si descrivono le relazioni tra segmenti e per via geometrica si ottengono gli stessi risultati.

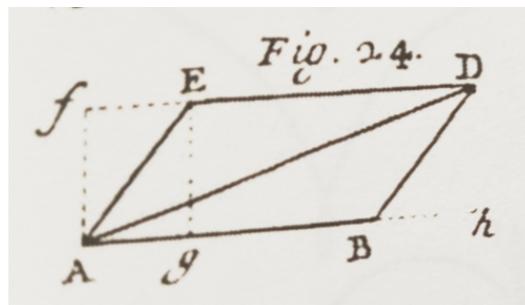
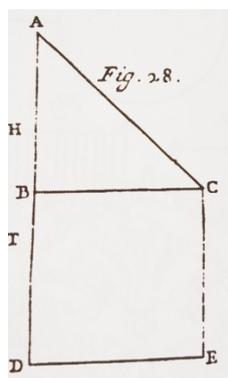


Figura 12: Regola del parallelogramma generalizzata.

considerando però direttamente l'esempio della caduta dei corpi. Il capitolo XIV è ancora dedicato ad osservazioni relative ai fenomeni di caduta, mentre i capitoli XVII e XVIII (in parte) si concentrano sul Moto Uniformemente Accelerato lungo un piano inclinato. In queste pagine, numerosi sono i riferimenti a Galileo Galilei, di cui du Châtelet cita anche alcuni estratti; oltre al fisico toscano, vengono nominati esperimenti di altri scienziati, a supporto delle tesi illustrate.

Riguardo alla gravità, fondamento dei capitoli sopraccitati, essa viene definita come “la forza in virtù della quale ogni corpo lasciato a sé stesso cade verso la superficie della Terra” (§293). A proposito della caduta dei gravi, la marchesa parte dalla teoria aristotelica – per la quale la velocità di caduta sarebbe proporzionale alle masse – per poi spiegare come Galilei sia stato il primo a correggerla e a dimostrare l'indipendenza dalle masse (§300). Ciò che condiziona il differente tempo di caduta (a volte in maniera poco percettibile) è principalmente la resistenza del mezzo in cui i corpi cadono, oltre alla grandezza della superficie degli stessi. Du Châtelet riporta che lo scienziato pisano ha effettuato degli esperimenti pratici per avvalere le sue tesi, facendo cadere oggetti dall'altezza di 100 cubiti; la conversione in unità moderne sarebbe di circa 46 metri, non distante dai 55 di altezza dal suolo della Torre di Pisa, come narrano diverse versioni. È possibile, quindi, che l'autrice si sia ispirata a numerose leggende relative agli esperimenti svolti da Galilei.

A partire dalla confutazione della teoria aristotelica, du Châtelet dichiara che “una verità scoperta ne adduce quasi sempre un'altra” (§302), e riporta la successiva realizzazione da parte di Galilei che le velocità acquisite dai corpi in caduta aumentano al crescere dell'altezza di partenza. A questo punto, segue una dimostrazione dettagliata per ricavare le formule del Moto Uniformemente Accelerato, ricalcando quella proposta da Galilei in *Discorsi e dimostrazioni matematiche sopra due nuove Scienze* (1638). In alcuni passaggi si metteranno a confronto i due testi, per evidenziare lo stile adottato dalla scienziata francese.



Partendo dalla *Fig. 28* riportata di fianco, du Châtelet dimostra che l'area del triangolo ABC è uguale allo spazio percorso in un secondo da un corpo in caduta; la scienziata dice che il segmento AB corrisponde al tempo di un secondo percorso dal corpo, mentre BC sta alla velocità raggiunta al termine di questo intervallo di caduta. A questo punto, passato un secondo, l'autrice suppone che la forza agente nel tratto AB sia interrotta: il corpo prosegue dunque di Moto Rettilineo Uniforme (§229), con velocità costante pari a quella raggiunta nel punto B (e rappresentata dal segmento BC).

Siccome lo spazio percorso per il MRU ⁷⁶ è pari a velocità per tempo (§241), esso è uguale all'area del parallelogramma $BCED$ (in cui $BD = AB$, tempo, e $DE = BC$, velocità). La conseguenza è quindi che l'area del parallelogramma è doppia di quella del triangolo, siccome i lati del primo sono uguali a base e altezza del secondo (§304); in termini fisici, significa che lo spazio percorso di MRU con velocità uguale a quella finale del Moto Uniformemente Accelerato è doppio rispetto a quello percorso con MUA ⁷⁷.

Dunque, du Châtelet continua dicendo che lo spazio percorso al termine del secondo intervallo (quindi dopo due secondi) sarà triplo rispetto a quello percorso nel primo (ovvero dopo un secondo); e così via, dopo tre secondi lo spazio sarà cinque volte quello iniziale e dopo quattro secondi sarà sette volte tanto. La relazione sarà quindi tra gli intervalli di tempo (espressi dai numeri naturali 1, 2, 3, 4...) e gli spazi ineguali percorsi (rappresentati dai “numeri impari” (§306) 1, 3, 5, 7...): tali spazi, se sommati, danno i “numeri quadrati” (§307) 1, 4, 9, 16..., che corrispondono ai quadrati dei tempi trascorsi. Da ultimo, pertanto, “gli spazi che i corpi percorrono cadendo verso la terra debbono essere come il quadrato de' tempi della loro caduta, e delle velocità acquistate cadendo, se cadono d'un moto uniformemente accelerato; come avea supposto il Galileo” (§307).

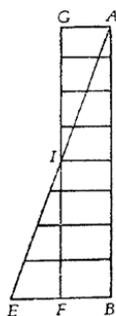


Figura 14:
Teor. 1, Prop. 1

Nel testo dei *Discorsi e dimostrazioni* di Galilei, nella Terza Giornata, l'esposizione è differente per alcuni aspetti: innanzitutto, la relazione tra MUA e MRU – enunciata nel *Teorema 1, Proposizione 1* – si basa su una rappresentazione differente, in cui il fisico toscano eguaglia il tempo di un MUA con quello di un MRU con velocità pari al “sudduplo del grado di velocità ultimo e massimo” ⁷⁸, ovvero metà della velocità raggiunta al termine del MUA. Tale risultato era noto già nel XIV secolo con il nome di “Teorema della media”, o “Teorema di Merton”.

Poi, nel *Teorema 2, Proposizione 2* enuncia e dimostra la relazione tra gli spazi percorsi ed il quadrato dei tempi; infine, nel *Corollario 1* elabora una dimostrazione molto simile a quella già vista nelle *Institutions*: “Se dal primo istante o inizio del moto avremo preso successivamente un numero qualsiasi di tempi eguali, come ad esempio AD , DE , EF , FG , nei quali siano percorsi gli spazi HL , LM , MN , NI , questi spazi staranno tra di loro come i numeri impari *ab unitate*, cioè come 1, 3, 5, 7.” ⁷⁹

⁷⁶Verrà usata come sigla per Moto Rettilineo Uniforme.

⁷⁷Sigla per Moto Uniformemente Accelerato.

⁷⁸Galilei, G. (1638). *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica e i movimenti locali*. Torino: Boringhieri (1958), a cura di Adriano Carugo e Ludovico Geymonat, p. 208.

⁷⁹Ibidem, p. 211.

Figura 15: *Illustrazione per Corollario 1.*

Quindi, oltre alla rappresentazione geometrica e ad alcuni dettagli specifici, anche l'ordine degli argomenti si rivela differente, tra i due testi. Il metodo adottato da du Châtelet risulta più accessibile e si nota la semplificazione attuata – nelle parole e nelle figure – per rendere sia le tesi che le dimostrazioni più facilmente comprensibili (dal figlio adolescente e da altri lettori non necessariamente esperti di Matematica).

Al di là di queste dimostrazioni teoriche e geometriche circa le leggi del Moto Uniformemente Accelerato, du Châtelet ne riporta anche di pratiche. Innanzitutto, nel capitolo XIII nomina gli esperimenti dei fisici bolognesi Giovanni Riccioli e Francesco Maria Grimaldi: ella riferisce che i due hanno fatto cadere dei pesi “dall’alto di varie torri differentemente elevate” (§311), misurando i tempi di caduta tramite le oscillazioni di un pendolo; ciò che è emerso dai risultati è che “coteste altezze appuntino come i quadrati de’ tempi delle cadute” (§311). Poi, la scienziata riporta gli esperimenti elaborati da Galilei, per mezzo del piano inclinato. Pure in questo caso, nelle *Institutions* non si trova un’esposizione unica e lineare, ma è stato necessario unire e riorganizzare quanto scritto nei capitoli XIII e nel XVII, al fine di fornire un’argomentazione completa. Si metteranno a confronto alcuni stralci dei due testi (prendendo quello di Galilei sempre dalla Terza Giornata dei *Discorsi e dimostrazioni sopra due nuove scienze*), per evidenziare l’opera divulgativa della scienziata francese.

Dopo aver descritto le misure per realizzare il piano inclinato utilizzato da Galilei, du Châtelet spiega perché egli abbia adoperato questo strumento: “Rallentava il movimento del mobile, e ne rendeva così la velocità discernibile” (§310) e ancora: “Operandosi la loro caduta obliqua più lentamente, gli era più facile discernere gli spazj che i corpi percorrevano in un dato tempo, cadendo per un piano inclinato,

che quando cadevano perpendicolarmente” (§427). L’obiettivo è dunque quello di studiare il Moto Uniformemente Accelerato in modo più semplice, avendo la possibilità di prendere le misure con maggiore precisione. Come per le dimostrazioni geometriche, anche in questo caso l’autrice delle *Institutions* non si sofferma sui dettagli tecnici, ma si focalizza sulle informazioni principali, tralasciando alcune parti: circa la misura dei tempi, infatti, riferisce solamente che Galilei “misurò egli questo tempo mercé la quantità d’acqua ch’era caduta da un vaso, mentre il corpo percorreva questi differenti spazj” (§310).

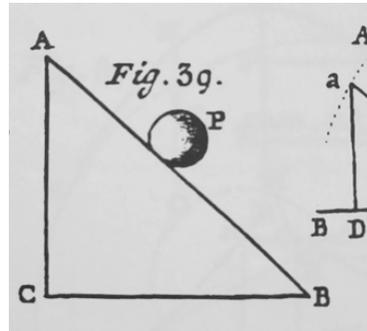
Lo scienziato pisano, invece, spiegava che “quanto poi alla misura del tempo, si teneva una gran secchia piena d’acqua, attaccata in alto, la quale per un sottil cannellino, saldatogli nel fondo, versava un sottil filo d’acqua, che s’andava ricevendo con un piccol bicchiere per tutto ‘l tempo che la palla scendeva nel canale e nelle sue parti: le particelle poi dell’acqua, in tal guisa raccolte, s’andavano di volta in volta con esattissima bilancia pesando, dandoci le differenze e proporzioni de i pesi loro le differenze e proporzioni de i tempi.”⁸⁰ In sostanza, quindi, pesando le differenti quantità di acqua che usciva dal vaso – maggiori se il tratto percorso era più lungo – era possibile risalire alle distanze; per fare ciò, si ricorreva a rapporti tra masse (e quindi tra lunghezze), prese per coppie di esperimenti.

Come evidenzia Thomas Settle, la proporzionalità diretta tra distanza percorsa e massa dell’acqua è fondamentale per garantire la buona efficacia dell’esperimento: la linearità di caduta dell’acqua risulta pertanto cruciale. L’esperimento di Galilei era piuttosto accurato, per gli strumenti a sua disposizione, ma le considerazioni sperimentali relative alla misura del tempo si rivelano decisive: se la quantità d’acqua contenuta nel vaso più alto non è sensibilmente maggiore di quella che fuoriesce dal cannellino (e che viene pesata poi), allora si rischia che la variazione dell’altezza dell’acqua nel vaso sia non trascurabile. In questo caso cambierebbe anche la velocità di uscita, perdendo la linearità sperimentale necessaria (Settle, 1961). Il racconto di du Châtelet appare invece più incentrato sulla teoria e sugli esiti dell’esperimento, che sulla pratica sperimentale. Questa scelta potrebbe essere dovuta al carattere didattico-divulgativo dell’opera, che non ha l’obiettivo di fungere da manuale di fisica sperimentale.

Un altro aspetto peculiare concernente il piano inclinato è la correlazione tra il Moto Uniformemente Accelerato di un corpo in caduta libera e di quello di un corpo che scorre lungo il piano stesso. Come si è visto, la scienziata spiega i vantaggi ottenuti da Galilei tramite questo strumento – ovvero rallentare le velocità e poter misurare più agevolmente gli spazi percorsi – ma poi si sofferma anche sulle differenze tra questo tipo di caduta e quella libera (o verticale). La fisica francese sostiene che nel moto lungo un piano inclinato un corpo sente una “gravità assoluta” e una “gravità rispettiva” (vale a dire la forza di gravità meno la resistenza

⁸⁰Ibidem, p. 234.

del piano) e che “la gravità rispettiva d’un corpo in un piano inclinato, è alla sua gravità assoluta, come l’altezza del piano alla sua lunghezza” (§406); e poi, “la gravità rispettiva del medesimo corpo sopra piani differentemente inclinati è come il seno dell’angolo d’inclinazione di cotesti piani” (§407).



Quindi, stando alla *Fig. 39* e traducendo in termini moderni, $\frac{g_r}{g_a} = \frac{AC}{AB} = \sin(\widehat{ABC})$. Dove g_r sta per gravità rispettiva e g_a per gravità assoluta. Il ragionamento di du Châtelet prosegue poi servendosi di triangoli simili, rappresentanti piani inclinati come ABC e tutti quelli aventi l’angolo d’inclinazione in comune e un angolo retto (§417 e §440).

Ciò che l’autrice delle *Institutions* non elabora, tuttavia (e che nemmeno Galilei aveva colto) è che lungo la discesa da un piano inclinato un corpo subisce un moto di roto-traslazione, diverso da quello di caduta libera. Come evidenziano Thomas Settle e Ron Naylor, infatti, si dovrebbe includere un fattore di correzione del valore di $5/7$ per l’inerzia rotazionale della sfera. Quindi, invece che calcolare lo spazio di caduta come quello della caduta libera

$$s = \frac{1}{2}gt^2$$

Quello lungo il piano inclinato sarebbe

$$s = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{5}{7}\right) \cdot \left(\frac{a}{c}\right) gt^2$$

In cui a/c rappresenta il rapporto tra l’altezza verticale del piano e la pendenza (Settle, 1961; Naylor, 1974). Ciononostante, gli errori teorici di Galilei e du Châtelet non condizionano i risultati sperimentali, poiché le relazioni tra spazi e tempi vengono considerate sulla base dei rapporti tra gli spazi e dei rapporti tra i rispettivi tempi; in questo modo, i fattori costanti di correzione si annullano.

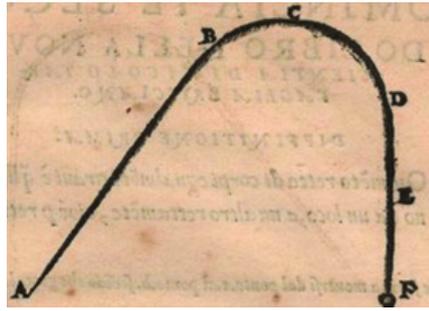


Figura 17: Traiettoria di una palla di cannone per Tartaglia.

In quest'opera, egli rappresentava come in figura la traiettoria di una palla di cannone: prima in linea retta per la prevalenza del “moto violento”, poi in arco di circonferenza per la tendenza degli oggetti ad andare verso il centro della Terra, e infine in linea retta per esaurimento del moto violento (Renn et al., 2000).

La stessa du Châtelet – pur proponendo una traiettoria corretta, sulla base degli studi di Galilei – esprime una rappresentazione mentale di forza peculiare: lanciando un sasso verso l'alto, si imprimerebbe inizialmente una forza (“la forza ch'io imprimo alla pietra da me gittata, chiamasi la *forza proiettile*” - §503), che si consuma gradualmente. Questa concezione (già osservata nei paragrafi precedenti), risulta lampante nella trattazione dell'autrice: “Se questa forza spigne il corpo secondo una linea che tende perpendicolarmente all'insù, allora esso corpo ascenderà perpendicolarmente; ma il moto che in alto lo porta, s'indebolirà ad ogni istante, e quando l'avrà perduto affatto, discenderà verso la terra per la forza della gravità, che allora opererà sola sopra di esso” (§503). Pertanto, l'idea della marchesa è quella che durante la salita il corpo sia sottoposto a due forze – quella proiettile che lo spinge verso l'alto e quella di gravità che lo rallenta e consuma la prima forza – mentre in discesa subisce solo l'azione della forza di gravità, che lo accelera verso il basso. Questa visione è attualmente molto studiata in ambito didattico, perché condivisa da molti studenti che non padroneggiano ancora a fondo la teoria della Dinamica; per questo motivo verrà ripresa nel prossimo capitolo (cfr. 5.2). Nonostante questo errore concettuale, la scienziata afferma correttamente (nel capitolo XVII) che la velocità finale di caduta e quella iniziale di salita (per arrivare alla stessa altezza) sono uguali (§440).

Se invece di scagliare la pietra verso l'alto, la si lancia orizzontalmente, “allora il moto di questo corpo diverrà un moto composto di quello che la forza esteriore gli ha comunicato, e del moto che la gravità gl'imprime ad ogni istante” (§505). Si genera quindi un moto composto, come visto nella sezione §289 del capitolo XII. Fedelmente a quanto detto nella sezione §274, allora, du Châtelet procede con la regola del parallelogramma per determinare la figura geometrica che descrive il moto di un proiettile lanciato orizzontalmente.

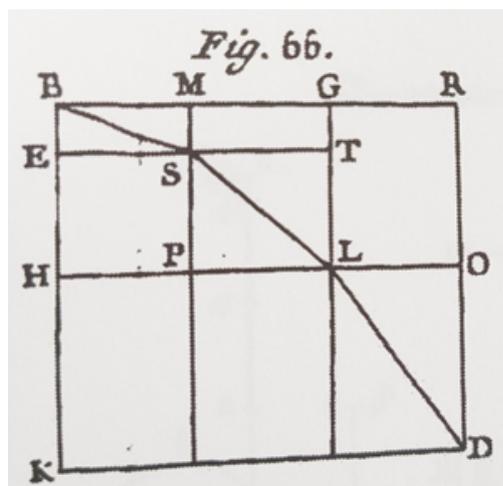


Figura 18: Regola del parallelogramma per moto di proiettile.

Come si può osservare nella *Fig. 66*, si considerano il segmento BM (spazio che la pietra avrebbe percorso se fosse stata soggetta solo alla “forza proiettile”) e BE (contributo della forza di gravità). Lungo il segmento BM il corpo si muoverebbe di Moto Rettilineo Uniforme, mentre lungo BE di Uniformemente Accelerato. Dopo il primo intervallo di tempo, quindi, il corpo si trova nel punto S . Nel secondo intervallo, il procedimento si ripete, ma questa volta $ST = BM$ e $SP = 3BE$, “secondo la progressione di Galilei” (§507), analizzata in precedenza per il MUA; il corpo si troverà quindi in L . Il tutto si ripete per il terzo intervallo, con $LO = ST = BM$ e con $HK = 5BE$; il corpo, alla fine, sarà nel punto D . L’autrice conclude ricordando nuovamente che questo ragionamento va ripetuto per traiettorie molto piccole, ottenendo una linea curva. E poi, “tutte queste diagonali infinitamente piccole, insieme unite, formeranno una curva, la quale riesce in una semiparabola” (§508).

La dimostrazione prosegue poi sempre per via geometrica, rievocando le proprietà matematiche della parabola: “Avendo voi studiato abbastanza le sezioni coniche, potete sapere che una delle proprietà della parabola è che le parti del suo asse prese fra la sua origine e le ordinate a quest’asse sono fra esse come i quadrati di queste ordinate” (§508). In termini moderni, si potrebbe riscrivere con la proporzionalità algebrica tipicamente associata all’equazione di una parabola, ovvero $y = x^2$.

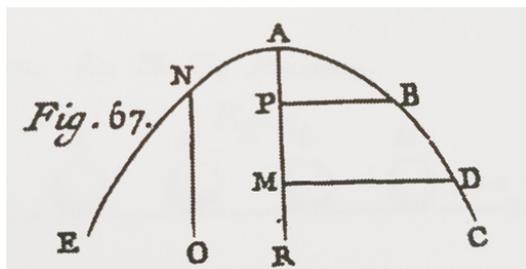


Figura 19: Rappresentazione del moto parabolico.

Riferendosi alla *Fig. 67*, allora, la riscrittura formale di ciò che du Châtelet spiega è del tipo: $\frac{AP}{AM} = \frac{BP^2}{DM^2}$. Rielaborando, si potrebbero mettere in relazione anche i singoli segmenti di ordinata e di ascissa (immaginando ad esempio il punto A come l'origine degli assi cartesiani x e y): $AP = BP^2$ e $AM = DM^2$.

A questo punto, l'autrice riscontra queste proprietà anche nella *Fig. 66*, affermando che:

$$BE = 1, BH = 4, BK = 9 \text{ ed } ES = 1, HL = 2, KD = 3.$$

Quindi, siccome $BE = ES^2$, $BH = HL^2$ e $BK = KD^2$, segue che BD è una semi-parabola, con asse BK . La conclusione è pertanto che la curva che rappresenta la traiettoria di un proiettile è “una parabola, poiché ella ne ha le proprietà” (§509). La scienziata osserva poi che, se si lancia un oggetto in direzione obliqua – ovvero formando un angolo con l'orizzonte – il moto sarà ancora parabolico (§510).

Da ultimo, du Châtelet si sofferma su un aspetto fondamentale di questa descrizione: la correlazione tra il fenomeno fisico e la trattazione matematica. Difatti, ella sostiene che “per ridurre gli effetti Fisici ai calcoli matematici, forza è sempre di supporre molte cose, e quando poi si vuol ripassare da' calcoli matematici agli effetti fisici, si trova non picciolo scapito d'esattezza e di precisione” (§514); quello che si mette in luce è allora il procedimento di astrazione e idealizzazione che si attua durante l'analisi matematica del fenomeno. Per esaminare adeguatamente la situazione, da un punto di vista fisico, è dunque necessario considerare le supposizioni fatte (e quindi le eventuali correzioni da apportare).

L'autrice ne cita tre, riconducibili a due approssimazioni diverse:

- La prima è quella di prendere la forza di gravità diretta verso il basso in ogni istante, vale a dire ritenere paralleli i segmenti MS , GL e RD della *Fig. 66*. A questo proposito, menziona l'esperimento del “Sig. Blondel” (§515). Secondo quanto riportato da du Châtelet, lanciando orizzontalmente una palla di cannone da un colle alto cento pertiche (circa 600 metri), con l'obiettivo di lanciarla ad una distanza di 2500 pertiche (circa 15 chilometri), quello che si ottiene è che “tirerà fin a 2499 pertiche, 5 piedi, 6 oncie $\frac{1}{2}$ contando

la mutazione cagionata dal difetto di parallelismo nelle linee rappresentanti l'azione della gravità" (§515). Prendendo la forza di gravità come parallela a sé stessa, per istanti successivi, allora, l'errore percentuale sarebbe circa dello 0.022% (convertendo in unità di misura moderne). Per l'autrice si tratta di una correzione trascurabile: "Si può senza errore riputarla affatto per nulla" (§515).

- La seconda e la terza sono entrambe riconducibili alla causa comune di non considerare l'attrito dell'aria; infatti, la seconda supposizione sarebbe quella per cui si prendono costanti gli spazi percorsi orizzontalmente per azione della "forza proiettile", mentre la terza si riferirebbe alla relazione di proporzionalità quadratica tra gli spazi verticali ed i tempi, sotto l'azione della forza di gravità. La risposta della scienziata a queste approssimazioni è quella di ritenerle trascurabili, poiché la parabola "è il fondamento dell'arte dell'Artiglieria; imperocché la resistenza dell'aria è quasi insensibile sopra d'un corpo pesante come la palla d'un cannone" (§517).

A dire il vero, per completezza, nel capitolo XIV la marchesa sottolinea quanto sia rilevante l'attrito dell'aria in certi contesti, specialmente nella caduta libera. Du Châtelet cita l'esperimento di J. T. Desaguliers (newtoniano nominato nel paragrafo 2.1.2), il quale calcolò il tempo di ritardo dovuto alla resistenza dell'aria, lasciando cadere oggetti dalla cupola della cattedrale di St. Paul a Londra, alla presenza di Newton, Halley e Derham (§329). Poi, l'autrice afferma che "l'aria ritarda la caduta di tutt'i corpi, e che la ritarda tanto più, quanto più hanno di superficie rispetto alla loro massa" (§332). L'intuizione qui nascosta – ovvero la dipendenza della forza d'attrito dell'aria dalla sezione del corpo in caduta – sarà dimostrata poi corretta dalla Legge di Stokes, formulata nel 1851 (mentre solo in parte si rivelerà plausibile il riferimento alla massa). In prima approssimazione, infatti, la forza di attrito viscoso che riceve un corpo in moto laminare attraverso un fluido vale:

$$F_v = -\frac{\eta}{\rho_f} \cdot S \cdot v$$

Con η viscosità del fluido, ρ_f densità del fluido, S superficie della sezione del corpo e v velocità del corpo relativa al fluido. La dipendenza dalla massa supposta da du Châtelet si può invece ritrovare (anche se non espressa allo stesso modo della scienziata) nella trattazione della velocità limite, quella che lei chiama "velocità completa" (§333): per ricavarla, infatti, serve uguagliare vettorialmente la forza di gravità alla somma della forza di attrito viscoso con la forza di Archimede: $\vec{F}_g = \vec{F}_v + \vec{F}_A$. Da questo si trova che per un corpo in caduta (preso sferico) la velocità limite – vale a dire la velocità che avrà nel momento in cui il moto passerà da Uniformemente Accelerato a Rettilineo Uniforme – è proporzionale a:

$$v_{lim} \sim \frac{g}{\eta} (\rho_s - \rho_f) \cdot r^2$$

In cui ρ_s è la densità del corpo, espressa dal rapporto tra massa e volume. Pertanto, mentre il riferimento all'area della sezione del corpo è accurato, quello alla massa sembrerebbe più difficile da giustificare.

Anche nel caso della velocità limite, l'autrice adduce degli esempi di realtà per motivarne la plausibilità: “I corpi leggeri che caggiono dall'alto della nostra atmosfera sopra la Terra, non vi caggiono d'un moto accelerato, come cadrebbero nel vuoto per la forza della gravità; ma che l'accelerazione ch'ella loro imprime, è presto compensata dalla resistenza dell'aria: se così non fosse, la più leggiera pioggia farebbe stragi infinite; e non solamente non feconderebbe la terra, ma distruggerebbe eziandio i fiori ed i frutti” (§337).

4.4 Newtonianismo

Per quanto riguarda i contenuti delle *Institutions* relativi al Newtonianismo, si possono distinguere due temi principali: l'esposizione delle leggi e delle scoperte di Newton – con connotazione maggiormente empirica – e la riflessione circa la natura dell'attrazione gravitazionale – dal sapore più teorico. Questi argomenti sono esposti in modo particolare nei capitoli XV e XVI dell'opera, ma si citeranno anche considerazioni illustrate in altre parti del libro.

4.4.1 Scoperte di Newton

L'intento di du Châtelet, circa le scoperte di Newton, è duplice: da un lato mostrare come la sua legge di gravitazione descriva il moto dei corpi celesti, dall'altro enfatizzare come essa si adatti anche al moto dei corpi sulla Terra. In questo procedimento, ella ripercorre in modo abbastanza evidente quanto contenuto nei *Principia* di Newton (cfr. 2.1.1), nei quali il fisico inglese reinterpreta le leggi di Keplero in chiave dinamica (*De Motu Corporum*), per poi discutere la gravitazione terrestre, nel parallelismo con il moto lunare (*De Systemate Mundi*). Anche nel caso di questa trattazione, tuttavia, la scienziata francese si concentra solo su alcune informazioni, che considera più rilevanti, tralasciando dimostrazioni complete ed esaustive (presenti invece nella sua opera successiva, interamente dedicata al Newtonianismo).

La prima questione cruciale per du Châtelet è quella delle leggi di Keplero: di queste ne descrive soltanto due (quelle che ora sono definite la seconda e la terza), riferendo in una nota a piè di pagina che il moto di rivoluzione dei pianeti è ellittico (§358). Quello a cui è interessata, invece, è il modo in cui si muovono i pianeti – con velocità areolare costante – e il tempo che impiegano a compiere una rivoluzione completa attorno al sole. Nonostante non si soffermi sulla forma

geometrica che descrive il moto dei pianeti, nel presentare la II Legge ella riporta un grafico chiaramente ellittico (in *Fig. 32*).

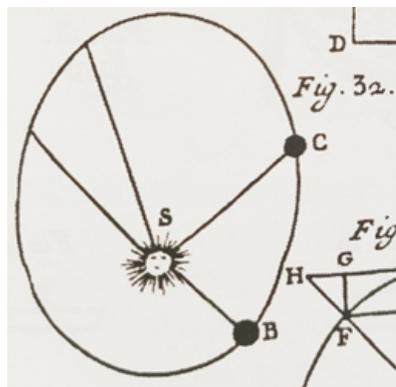
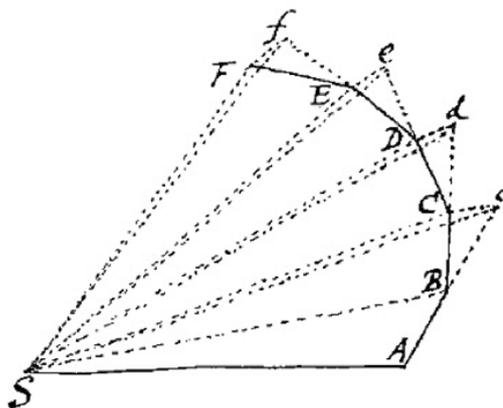


Figura 20: Illustrazione della II Legge di Keplero.

A questo proposito, l'autrice afferma che, preso un pianeta che si muove dal punto *B* al punto *C*, l'area del settore ellittico *SBC* (con *S* posizione del Sole) è proporzionale al tempo che il pianeta impiega per spostarsi tra i due punti (§346).

Per quanto riguarda invece la III Legge di Keplero, ella sostiene che “il tempo ch'un Pianeta impiega in fare il suo rivolgimento intorno al Sole, è sempre proporzionale alla radice quadrata del cubo della sua mezzana distanza dal Sole medesimo” (§347). In linguaggio algebrico: $t \propto \sqrt{a^3}$, con *a* pari alla lunghezza del semiasse maggiore dell'ellisse. Circa la III Legge, la scienziata non aggiunge altro, perché ricorda al figlio che “avete veduta la spiegazione di questa legge negli *Elementi* della Filosofia di Newton, che abbiamo insieme letti” (§347).

A questo punto, du Châtelet riferisce l'intento di Newton contenuto nei *Principia*: trovare una causa dinamica alle leggi cinematiche di Keplero. Per fare ciò, la marchesa afferma che egli si è servito “della più sublime Geometria” (§348), ovvero che le dimostrazioni nei *Principia* sono di stampo geometrico, come quelle riportate da lei in tutto il testo delle *Institutions* (nonostante entrambi conoscessero il calcolo infinitesimale). Quello che Newton ottiene dalla II Legge di Keplero è che un corpo si muove con velocità areolare costante se e solo se è attratto da una forza centrale, definita “forza centripeta” (§349). La dimostrazione presente nei *Principia* si basa su una rappresentazione geometrica simile a quella già analizzata nel paragrafo 4.3.1:

Figura 21: Spezzata per il moto composto (*Principia*).

L'idea di Newton è quella di descrivere la traiettoria di un corpo (ad esempio, un pianeta), con la composizione dei moti: dal punto A , un corpo proseguirebbe in MRU fino a c , se non fosse "richiamato" dall'attrazione di un corpo S (Sole), che ne causa lo spostamento fino al punto C . Allo stesso modo, da C non andrà fino a d , ma sarà deviato al punto D (e così via). Ottenuta quindi la spezzata $ABCDEF$, il fisico inglese dimostra che le aree dei triangoli SAB , SBC , SCD , SDE ed SEF sono uguali tra di loro, per la II Legge di Keplero (in versione discreta). I segmenti AB , BC , CD , DE ed EF possono essere intesi come infinitamente piccoli, trasformando la spezzata $ABCDEF$ in un arco di ellisse. Nel caso delle *Institutions*, tale dimostrazione non è riportata, ma solo riassunta brevemente a parole nelle sue conclusioni.

La scienziata riferisce poi che Newton, dalla III Legge di Keplero, ricava la dipendenza di questa forza centrale dal reciproco del quadrato della distanza (§349). Anche in questo caso, du Châtelet non riporta la dimostrazione.

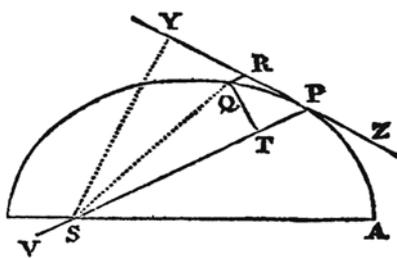


Figura 22: Moto di un pianeta attorno al Sole.

Differentemente da quanto dichiarato da du Châtelet, nei *Principia* la relazione tra la forza centrale e il reciproco del quadrato della distanza viene dimostrata sulla base della I e della II Legge di Keplero. Infatti, Newton parte dalla posizione

P di un pianeta in orbita attorno al Sole S . Il segmento PR sarebbe la sua traiettoria se proseguisse di MRU; RQ è invece la “caduta” gravitazionale verso il Sole, dovuta alla forza centrale F . Per tempi brevi, si approssima PR con PQ . Per la legge del MUA di Galilei, $RQ \propto t^2$, dunque – in termini moderni – l’accelerazione a subita dal pianeta sarebbe $a \propto \frac{RQ}{t^2}$; allora, per la seconda legge della Dinamica, $F \propto \frac{RQ}{t^2}$. Considerando ora il settore ellittico SPQ , che si può approssimare ad un triangolo, la sua area è proporzionale al tempo t – per la II Legge di Keplero – ed è pari a $\frac{1}{2}SP \cdot TQ$, in quanto triangolo.

Dunque, $F \propto \frac{RQ}{(SP \cdot TQ)^2}$. Dimostrando poi che $\frac{RQ}{TQ^2}$ tende ad un valore costante, nel limite infinitesimo, si ottiene il risultato finale: $F \propto \frac{1}{SP^2} = \frac{1}{r^2}$, essendo SP la distanza tra il Sole ed il pianeta.

Dopo il ragionamento concernente le Leggi di Keplero, du Châtelet spiega che non illustrerà “le scoperte Neutoniane circa il corso degli Astri, se non per farvi vedere come il Newton sia arrivato a conoscere che la stessa causa, la quale li dirige nel loro corso, opera la caduta de’ corpi verso la terra” (§351). L’intento è dunque quello di dimostrare che la Legge di Gravitazione sia effettivamente universale: non solo alla base del moto dei corpi celesti, ma anche come causa di quelli terrestri. Parte dalla considerazione relativa alle distanze: la Luna dista dalla Terra circa 60 raggi terrestri ($D_L = 60R_T$), mentre un corpo sulla Terra si può approssimare come distante un raggio terrestre dal centro del pianeta ($D_c = R_T$). Sulla base di questi assunti, l’autrice immagina il moto lunare come se fosse una continua “caduta” verso la Terra, a causa della forza centripeta; senza di essa, la Luna proseguirebbe in linea retta e si allontanerebbe dalla Terra (§357). In questo caso, la dimostrazione segue fedelmente l’analogo dei *Principia* ed assomiglia (nella forma) a quella appena osservata.

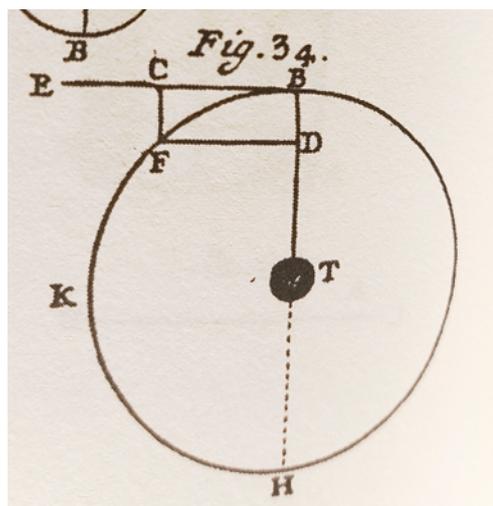


Figura 23: Moto composto della Luna attorno alla Terra.

Nella *Fig. 34*, BF è l'arco che descrive il moto della Luna in un minuto. Du Châtelet nota che, se non agisse la forza centripeta, la Luna proseguirebbe lungo il segmento BC con Moto Rettilineo Uniforme. Però, poiché la Terra “richiama” a sé la Luna per la forza centripeta, rappresentata dal segmento CF (uguale a BD), si ottiene un moto composto. Si considera quindi il parallelogramma $BDFC$, per descrivere tale composizione: l'interazione delle due forze fa sì che dopo un minuto la Luna si trovi in F . In questo modo, si approssima perciò l'arco BF ad una retta, equivalente alla diagonale di $BDFC$ (§357); la scienziata giustifica tale approssimazione specificando che un minuto si può intendere come un tempo piccolo, rispetto a quello dell'intera rivoluzione, per cui l'arco BF – non raffigurato in scala, per permettere di comprendere meglio il calcolo – si può prendere simile ad una retta.

Ora, l'obiettivo diventa quello di quantificare il valore del segmento BD (o CF). Du Châtelet si appella ad una proposizione dimostrata sia da Newton (*Principia*, Corollario 9, Proposizione 4) che da Huygens (*De vi centrifuga*, Proposizione 6): un corpo in moto circolare cadrebbe verso il centro del suo moto di rivoluzione – per effetto della sola forza centripeta – di una distanza pari al quadrato dell'arco che descrive nello stesso tempo, diviso per il diametro del cerchio (§358). Nei termini della *Fig. 34*:

$$BD = \frac{BF^2}{BH}$$

Per trovare BF , l'autrice parte dal tempo di durata della rivoluzione lunare, ovvero “27 giorni, 7 ore 43' siderali” (§358), equivalenti a 39 343 minuti; pertanto, in un minuto, l'arco percorso dalla Luna sarebbe di 187 961 piedi parigini (circa 61 000 km). Per calcolare BH , invece, la scienziata richiama la misura della circonferenza

terrestre da parte di Jean Picard (effettuata tra il 1669 e il 1670): “123 249 600 piedi parigini” (§358), vale a dire 40 036 km, molto vicino al valore attualmente stimato di 40 075 km. Dalla circonferenza terrestre, poiché la Luna dista circa 60 raggi terrestri, du Châtelet ottiene che il diametro BH dell’orbita lunare misura 2 353 893 840 piedi parigini (circa 765 000 km).

A partire da questi valori, du Châtelet ricava che BD – “caduta” della Luna verso la Terra per la forza centripeta – vale circa 15 piedi parigini (più o meno 4.87 metri). A questo punto, per dimostrare che la forza agente sulla Luna sia la stessa che fa cadere i corpi sulla Terra, la marchesa sostiene che un corpo sulla Terra dovrebbe percorrere 3600 volte più spazio di quello percorso dalla Luna in un minuto; 3600 è stato ottenuto elevando al quadrato 60, poiché $D_L = 60R_T$. Quindi, in un minuto, un corpo sulla Terra dovrebbe percorrere 54 000 piedi parigini (circa 17.5 km), equivalenti a 15 piedi in un secondo. Dunque, la scienziata rievoca quanto esposto nel capitolo XIV, ovvero che “il Sig. Huygens trovò che i corpi percorrono quaggiù 15 piedi Parigini in circa, nel primo secondo, quando discendono verso la terra per la sola forza di gravità” (§328). Così facendo, du Châtelet conclude la sua dimostrazione. Ciò che sta alla base è la semplice formula per la distanza di un corpo in caduta libera: $s = \frac{1}{2}gt^2$. Prendendo $t = 1$, si ottiene che $s = 4.9$ metri, molto vicino al valore stimato nel testo.

Si ritiene interessante che la scienziata ci tenga a precisare che Newton, “nella sua solitudine di allora” (§360), aveva a disposizione dei valori per la circonferenza terrestre che non erano corretti: per questo motivo, ottenendo dei risultati discordi, aveva dubitato che la forza di gravità fosse effettivamente la stessa, sia per la Luna che per i corpi sulla Terra.

Dopo aver dimostrato l’universalità della forza di gravità, nel capitolo XVI l’autrice adduce due ulteriori esempi applicativi: dapprima cita i calcoli di Newton circa il moto della cometa del 1680, descritto perfettamente dalla sua Legge (§388), e poi considera quello che attualmente è noto come il “problema dei tre corpi”, sottolineando come Terra, Sole e Luna si attraggano mutualmente (§388); infine, precisa che la Terra si muove più lentamente “quand’ella è nel segno de’ Pesci” (§388), siccome è più vicina a Marte e a Venere e quindi ne subisce maggiormente l’attrazione. Oltre a questo, nel capitolo XV du Châtelet aggiunge una riflessione in merito alla proporzionalità diretta che intercorre tra la forza di attrazione e la massa dei corpi: “i Pianeti principali, nel girare attorno del Sole, ed i Pianeti secundarj, nel girare attorno del loro Pianeta principale, seguono le stesse leggi che la Luna nella sua rivoluzione attorno alla terra. Dunque la forza che li ritiene nel lor orbe, opera sopra ciascuno di essi, in ragione diretta della quantità di materia propria, ch’eglino contengono” (§362). Rispetto alla formulazione della legge di attrazione gravitazionale, quindi, la scienziata discute in modo non troppo consequenziale le dipendenze di tale forza da altre grandezze. Il ragionamento esposto è sempre in termini di proporzionalità, non presentando una forma più concisa e

riassuntiva per descrivere tale forza.

Riguardo alla forza di gravità che subiscono i corpi sulla Terra, si evidenziano alcune puntualizzazioni presenti nell'opera: che decresce – anche se di poco – salendo in altezza (rispetto al livello del suolo) e che non ha lo stesso valore per tutte le latitudini terrestri. A questo proposito, du Châtelet adduce l'esempio di Jean Richer, che nel 1672 era in viaggio attraverso l'Oceano Atlantico per raggiungere l'Isola di Cayenne (nella Guyana Francese), al fine di effettuare delle misure che permettessero a Gian Domenico Cassini di calcolare la distanza tra la Terra e il Sole. Durante il tragitto in nave, Richer si accorse che il periodo delle oscillazioni del pendolo – usato per misurare il tempo e quindi per orientarsi – rallentava considerevolmente (§372). Non essendo cambiata la lunghezza del filo del pendolo, l'unica grandezza che poteva essere variata era proprio l'accelerazione gravitazionale terrestre. Come rimarca Dava Sobel nel libro *Longitudine*, tale problema fu al centro di una delle rivoluzioni tecniche più importanti e straordinarie della storia, ovvero quella degli orologi meccanici di John Harrison, capaci di ovviare al problema del diverso valore di g (Sobel, 1995).

Un'ultima considerazione rilevante, rispetto alle scoperte di Newton (anche se in questo caso sarebbe meglio parlare di previsioni), è quella relativa alla forma della Terra. Du Châtelet discute questo tema sia alla fine del capitolo XIV che alla fine del XV. Nella prima parte anticipa i risultati della seconda, rivelando che “la Terra in luogo d'essere una sfera perfetta, è uno sferoide schiacciato verso i poli, ed elevato verso l'Equatore, secondo le misure, onde poc'anzi hanno determinata la di lei figura i Sigg. de Maupertuis, Clairaut e gli altri Accademici, i quali si sono trasferiti a questo fine nelle Regioni polari” (§338). Nel capitolo XV, infatti, l'autrice rivela gli antefatti che hanno portato a tale spedizione (e ai conseguenti risultati): a fine Seicento, sia Newton che Huygens, pur partendo da differenti teorie della gravitazione, erano arrivati alla conclusione che la Terra fosse uno sferoide oblato (schiacciato ai poli); tuttavia, Cassini credeva che fosse uno sferoide prolato (schiacciato all'Equatore) (cfr. 2.1.4). Per via della notevole influenza dell'astronomo italo-francese, la comunità scientifica non aveva raggiunto un accordo unanime e quindi serviva una prova empirica che calcolasse la curvatura terrestre ai poli e all'Equatore. Come riferisce du Châtelet, l'Académie finanziò un viaggio in Lapponia – a cui parteciparono anche Maupertuis e Clairaut – e una in Perù (§381). L'autrice cita quindi gli esiti riportati da Maupertuis in *La figure de la Terre* (1738): “il grado che taglia il cerchio polare è più grande che il grado misurato da M. Picard tra Amiens e Parigi di 437 pertiche di Francia, senza contare l'aberrazione, e di 377 contandola, donde raccogliasi che la terra è uno sferoide schiacciato verso de' poli” (§383).

4.4.2 Attrazione gravitazionale

Circa la natura e l'utilizzo della legge di attrazione gravitazionale, il testo delle *Institutions* si riferisce principalmente ai newtoniani, piuttosto che a Newton. Du Châtelet si posiziona chiaramente in opposizione a diverse interpretazioni post-newtoniane (cioè, sostenute dei seguaci di Newton), pur riconoscendo al fisico inglese grande onore. A proposito dei newtoniani, la scienziata tratta diversamente i fisici inglesi – che vengono per lo più criticati – e quelli francesi, con notevole elogio di Maupertuis. Infatti, come si è visto nel capitolo 2, l'accoglienza e la rielaborazione del Newtonianismo era parecchio differente, tra le due nazioni.

Dei newtoniani inglesi, du Châtelet disapprova l'uso incondizionato della legge di gravitazione: al di là dei fenomeni astronomici, infatti, essi la adoperano pure per spiegare “effetti della luce, coesione, operazioni chimiche; e finalmente quasi tutti gli effetti naturali seguono da questa forza” (§388). Quella dell'attrazione sembrerebbe quindi una specie di “teoria del tutto”, capace di rendere comprensibile ogni fenomeno naturale. Ad esempio, riguardo alla coesione, la marchesa riferisce che i newtoniani si sono basati su una congettura di Newton, per poi estrapolarne una tesi ben più forte: egli aveva supposto che se due corpi provano un'attrazione maggiore quando sono messi a contatto – rispetto a quando sono posti ad una distanza finita – allora questa attrazione “scema in una ragione maggiore che quella del quadrato delle distanze” (§389); i newtoniani, allora, sostengono che la coesione sia descritta da una legge di gravitazione con dipendenza dal reciproco del cubo della distanza e che, in generale, a seconda del grado di attrazione delle singole parti di un corpo si possono spiegare la sua consistenza, la durezza, l'elasticità e così via.

Allo stesso modo, anche la rifrazione e la riflessione della luce si chiarirebbero sulla base di una proporzionalità con il reciproco del cubo della distanza: più è denso un mezzo e più il raggio verrà rifratto. Così pure la rifrazione della luce all'interno di un prisma: i colori si separano perché il vetro li attrae diversamente (§389). E anche le reazioni chimiche troverebbero un'interpretazione favorevole attraverso queste relazioni. Tuttavia, siccome le leggi ed i fenomeni da giustificare sono tanti ed estremamente diversi – oltre che complicati – i newtoniani si sono inventati numerose leggi ad hoc per ciascun esempio; quindi, poiché “s'esponevano alle risa ed a' rimproveri, si sono immaginati di spiegare tutti i Fenomeni con una sola e medesima attrazione, che opera come una quantità algebrica $\frac{2}{xx} + \frac{b}{x^3} + ec.$, x dinotando la distanza” (§390). In sostanza, la formula risolutiva proposta richiama lo stile delle serie di Taylor, introdotte nel 1715 da Brook Taylor, in *Methodus Incrementorum Directa et Inversa*. Come riporta du Châtelet, l'idea di questi newtoniani è quella di spiegare i moti astronomici – in cui i corpi sono a grandi distanze – tramite la nota proporzionalità con il reciproco del quadrato della distanza, mentre i fenomeni di coesione, quelli chimici e quelli ottici – spesso tra corpi interagen-

ti a distanze ravvicinate – con dipendenza dal reciproco della distanza elevata a potenze maggiori. Nel primo caso, quindi, le potenze maggiori sono trascurabili, mentre nel secondo lo sarebbero quelle di grado due (§391).

A differenza dei newtoniani inglesi, l'autrice esprime la sua stima nei confronti di Maupertuis, che è “fra tutti i Filosofi Francesi quegli che più ha inoltrate le sue ricerche intorno all'attrazione” (§392). Di lui elogia anche una delle dissertazioni presentate all'Académie, in cui elabora una possibile spiegazione del perché Dio abbia scelto che la Legge di attrazione presenti proprio la dipendenza dal reciproco del quadrato della distanza; confrontando molte formule ipotizzate nei decenni precedenti, Maupertuis arriva alla conclusione che solo quella newtoniana garantisce uniformità, riuscendo a descrivere al meglio (e con un'unica relazione) sia i fenomeni celesti che quelli terrestri (§392). Si sottolinea che in questo caso du Châtelet apprezza particolarmente la ricerca di una risposta al “perché” della formula, andando oltre alla semplice rappresentazione del fenomeno fisico; come si vedrà a breve, anche la stessa scienziata si spinge a cercare delle spiegazioni causali circa l'attrazione.

A questo proposito, un ulteriore aspetto che l'autrice critica ai newtoniani è quello di credere che l'attrazione sia una proprietà della materia, per la quale ogni corpo (e ogni elemento costituente i corpi) attrae ed è attratto dagli altri (§385, §388, §389, §396). Invocando il Principio di Ragione Sufficiente introdotto nei capitoli iniziali, ella nega la possibilità che l'attrazione risieda nei corpi. La sua dimostrazione si presenta così: preso un corpo A attratto dal corpo B , esso si muove verso il corpo B con velocità accelerate e il suo stato “è sicuramente diverso dal suo stato precedente, vale a dire, dallo stato di quiete, nel quale egli era avanti di trovarsi nella sfera d'attività del corpo B ” (§395). Quindi, un corpo inizialmente in quiete viene messo in movimento (con Moto Uniformemente Accelerato), quando subisce l'attrazione gravitazionale di un altro corpo. Poiché il corpo A ha subito una variazione di stato (da quiete a movimento), allora, per du Châtelet, è necessario trovare una ragione che spieghi tale variazione: questa potrebbe risiedere o dentro al corpo A , oppure al di fuori (dunque nello spazio che lo circonda). Alla prima possibilità, l'autrice risponde negativamente, siccome un corpo “non può muoversi da sé” (§395), dandosi da solo una direzione ed una velocità; alla seconda risponde sempre negativamente, dal momento che per i newtoniani lo spazio intermedio tra due corpi dovrebbe essere vuoto. Escludendo quindi che possa esistere una “materia sottile intermedia, o emanante dal corpo B verso il corpo A ” (§395), si conclude che non c'è una ragione sufficiente che giustifichi la variazione di stato del corpo A (il che è assurdo).

Pertanto, la scienziata considera l'attrazione un fenomeno, non una proprietà della materia, né tantomeno una causa (Hutton, 2004): i corpi non sarebbero la causa del movimento, ma i *recettori* (Iltis, 1977). Riguardo a questo, ella sembra porsi in accordo con Newton, che era interessato alla descrizione dei fatti fisici tramite

relazioni che fossero verificate ed empiriche (Reichenberger, 2021). Tuttavia, l'originalità di du Châtelet sta proprio nel desiderio di indagare la natura ontologica – e pure epistemologica – dell'attrazione gravitazionale. Proprio questa ricerca del “perché” viene criticata da Voltaire, che ritiene che siano questioni metafisiche poco interessanti e non pertinenti alla Fisica (Roe, 2018). Circa la trattazione di questa causa dell'attrazione, la marchesa dedica solo alcune righe, che però esprimono molto chiaramente l'intento teorico: è necessario trovare questa spiegazione in qualcosa di esterno ai corpi e tale causa dev'essere di natura meccanica; difatti, “la direzione e la velocità impresse dall'attrazione debbono trovare la loro ragione sufficiente in una causa esterna, in una materia percuotente il corpo, [...] quindi convien cercare una materia capace di produrre gli effetti che all'attrazione si attribuiscono” (§398). Così facendo, du Châtelet si contrappone alla teoria dell'azione a distanza newtoniana, optando per un'azione a contatto, molto più simile ai vortici cartesiani. Quale sia, poi, questa ipotetica “materia sottile intermedia” (§395) proposta dall'autrice non è chiaro: secondo Anne-Lise Rey, essa potrebbe essere l'etere, la quinta essenza aristotelica che fino all'interpretazione einsteniana dell'esperimento di Michelson e Morley si credeva potesse permeare la Terra (Rey, 2024).

La tesi della marchesa francese è piuttosto cauta: pur propugnando una causa meccanica per l'attrazione gravitazionale, non si sbilancia nel definire quale sia effettivamente tale causa, però si augura che la comunità scientifica continui ad impegnarsi nel suo studio (“in questa ricerca devono tutti i Filosofi occuparsi” - §399). Come ulteriore giustificazione alla sua prudenza, richiama l'esempio dell'elettricità, al tempo fenomeno sensazionale ed estremamente interessante anche per le persone non appartenenti ai circoli scientifici; proprio i fenomeni elettrici “fanno vedere quali effetti singolari possono essere prodotti col mezzo delle materie sottili, tuttoché la maniera ond'ellono sono adoperate per produrli sia inesplicabile” (§399). Per du Châtelet, pertanto, anche l'elettricità avrebbe una causa meccanica, ma essa sarebbe ancora più incomprensibile della gravitazione, siccome nel primo caso manca ancora una formula che descriva il moto dei corpi: “regna una grande uniformità ne' Fenomeni astronomici, laddove quelli dell'elettricità sono quasi all'infinito variati” (§399). Infatti, negli anni Quaranta del Settecento si erano raccolte numerose evidenze sperimentali circa gli effetti elettrici, ma mancava ancora una legge che le accomunasse: la Legge di Coulomb – eponimo del newtoniano Charles Augustin de Coulomb – venne formulata solo nel 1785.

4.4.3 **Émilie du Châtelet e Newtonianismo**

La posizione espressa da du Châtelet (nel testo esaminato) in merito al newtonianismo si può definire un argomento controverso, interpretato in molti modi differenti. Dalla letteratura di ricerca emergono voci che sostengono tesi complesse, a volte

anche diametralmente opposte. Una delle idee più comuni è quella che considera le *Institutions* un’opera che parte dalle teorie newtoniane per “completarle” con quelle leibniziane (Hutton, 2004; Iltis, 1977; Hagenruber, 2011; Janiak, 2021), spesso evidenziando l’originalità della marchesa nell’unire due sistemi solitamente contrapposti. Come si è già osservato nel paragrafo 4.2.2, questo si può riscontrare nelle riflessioni relative allo spazio e al tempo, per cui du Châtelet sembra conciliare le due visioni (Rey, 2024), pur rifiutando lo spazio vuoto ed esprimendosi con un linguaggio fortemente connotato dalla teoria di Leibniz. Per quanto riguarda l’attrazione gravitazionale, come si è visto pocanzi, la scienziata stima la teoria newtoniana per l’ottima descrizione del moto degli astri e dei corpi sulla Terra, ma si allontana in merito al programma scientifico da seguire; difatti, attorno alla questione relativa alla ricerca delle cause – e, più in generale, a cosa faccia parte della Filosofia Naturale, come si è visto nel paragrafo 4.2.1 in merito alle ipotesi – du Châtelet si trova in disaccordo con Newton e cerca di risolvere l’annoso problema ontologico della gravitazione (Janiak, 2021). Per gli autori sopraccitati, l’operato della scienziata francese porterebbe ad un completamente metafisico della Fisica di Newton fondato sulle idee leibniziane.

Nonostante la chiara stima nutrita verso il fisico inglese, però, le *Institutions* non sono radicate sul Newtonianismo: anche osservando il numero di capitoli che vengono dedicati ai vari argomenti, quelli sulle teorie newtoniane sono principalmente il XV e il XVI (quindi 2 su 21 capitoli totali), e pure in questi l’autrice è più interessata a smentire i seguaci dell’inglese, che ad approfondire quanto contenuto nei *Principia*, o in *Opticks*. Per di più, l’eventuale suggestione di una causa meccanica per l’attrazione viene solamente abbozzata, dimostrando che tale argomento non è al centro del suo trattato. Anche per quanto riguarda la riscrittura dinamica delle Leggi di Keplero, si è puntualizzato il modo sintetico con cui du Châtelet ha riferito i risultati dei *Principia*: nonostante fossero argomentazioni decisive, per sostenere la legge della gravitazione universale, ella ha fatto intendere che non si trattava di temi centrali per l’opera. Ad esempio, si è osservata la dedizione riservata alle dimostrazioni di ispirazione galileiana, evidentemente ritenute più importanti per l’autrice (cfr. 4.3).

A sostegno di questa interpretazione, Marius Stan scrive – in modo alquanto provocatorio – che non c’è nulla di newtoniano nel testo delle *Institutions* (Stan, 2023): sebbene sia un’affermazione esagerata (perché come si è visto sono presenti molti riferimenti a Newton), nasconde alcuni aspetti che si ritengono rilevanti. *In primis*, l’attrazione gravitazionale, per du Châtelet, non si manifesta come azione a distanza, ma per contatto; poi, secondo Stan, l’esposizione della terza legge della Dinamica non è di carattere newtoniano, come si è visto nel paragrafo 4.3.1; ancora, circa la struttura della materia, la scienziata francese rifiuta gli atomi rigidi come costituenti primitivi della realtà (mentre sono gli elementi prediletti dalla teoria newtoniana); infine, un’ultima critica di Stan si considera eccessiva: secon-

do lui le leggi del moto illustrate nelle *Institutions* non sarebbero newtoniane, ma galileiane; questo sia perché l'autrice si riferisce spesso al testo dei *Discorsi e dimostrazioni matematiche sopra due nuove Scienze* sia perché presenta la gravità terrestre come una forza laminare, invece che centrale. Eppure, come si è notato nel paragrafo 4.3.3, du Châtelet precisa che la gravità laminare è solamente un'approssimazione, utilizzata in quanto utile per i calcoli.

In risposta alla provocazione di Stan, oltre agli elementi già citati, è necessario sottolineare un aspetto estremamente newtoniano presente nelle *Institutions*: lo stile geometrico. È vero che in alcuni casi si potrebbe ricondurre a quello di Galilei (del quale riprende quasi fedelmente i passaggi logici), ma si è anche visto quanto si assomiglino le dimostrazioni interne ai *Principia* con quelle elaborate da du Châtelet. L'impostazione teorica, così come lo sviluppo argomentativo, sono della medesima matrice. Anche il costante riferimento a quantità infinitesime (presente in tutta la trattazione dei *Principia*) richiama lo stile newtoniano, evidenziando quanto la scienziata lo apprezzi e lo reputi efficace.

In conclusione, il contenuto delle *Institutions* presenta certamente dei rimandi al Newtonianismo (avendo analizzato la biografia dell'autrice nel paragrafo 3.2.1, si coglie quanto ciò fosse inevitabile), ma definire tale opera un trattato newtoniano pare poco adeguato. Piuttosto, si pensa che questo libro sia radicato sul sistema leibniziano, al quale dedica non solo i primi sei capitoli – focalizzati sulle idee maggiormente metafisiche – ma anche lo stile della narrazione successiva; e questo si può constatare sia nell'utilizzo di alcuni principi inizialmente esposti, che nell'approfondimento delle questioni legate alla struttura della materia, o anche nell'esposizione delle leggi della Dinamica. Lo stesso Voltaire, all'epoca, criticò du Châtelet per aver “tradito” Newton in favore di Leibniz (Hutton, 2022). In aggiunta, come si vedrà nel prossimo paragrafo, i concetti di forze morte e forze vive sono al centro dei capitoli XX e XXI, così come del carteggio con de Mairan. Il Newtonianismo rientra quindi nelle *Institutions* come una delle teorie che la scienziata considera di maggior successo, per certi aspetti al pari di quella galileiana. Il suo completo apprezzamento – e la conseguente adesione – sono cronologicamente successivi a quest'opera (cfr. 3.2.2): solo i *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* ne sono una chiara manifestazione.

4.5 *Vis viva* e carteggio con de Mairan

Per presentare in modo esaustivo il pensiero di Émilie du Châtelet in merito alla forza di un corpo in movimento, è stato necessario raccogliere informazioni ed indizi da diversi capitoli, oltre ad approfondire nel dettaglio gli ultimi due (XX e XXI). Pure in questa sezione, i concetti esposti sono stati riordinati (rispetto alla sequenza con cui sono elaborati nelle *Institutions*), al fine di fornire una narrazione sperabilmente lineare.

Come già anticipato nel paragrafo 4.2, per la scienziata le forze sarebbero il fondamento della realtà. Di seguito si illustrerà la sua idea circa la trasmissione e la manifestazione di queste forze, riprendendo anche alcuni ragionamenti relativi alla struttura della materia. Oltre ad una notevole gamma di esempi di urti tra corpi (citando esperimenti svolti da altri fisici del tempo), si esamineranno le argomentazioni di du Châtelet in merito ad alcune delle questioni più rilevanti per la disputa sulle forze vive – introdotte nel paragrafo 2.2. Da ultimo, si riassumeranno i contenuti del carteggio tra l’autrice e de Mairan, sottolineando i passaggi ritenuti di maggiore rilevanza storica e fisica.

4.5.1 Forze morte, forze vive e struttura dei corpi

Nel capitolo VII, dopo aver parlato delle monadi, la scienziata si riferisce al tema delle forze vive: “Quante verità sono state combattute secoli interi prima d’essere ammesse? Tale è stato, per esempio, il vero sistema del Mondo, e a giorni nostri le forze vive” (§136). Nel parallelismo con il sistema copernicano, l’autrice presenta il dibattito della *vis viva* assumendo già una posizione di parte; per lei, ad un certo punto, tutti concorderanno che la forza di un corpo in movimento si misura con il prodotto tra massa e velocità al quadrato, come sostengono i leibniziani. Tale convinzione viene elaborata e ripetuta numerose volte nell’arco di tutto il libro, sia con considerazioni teoriche che con riferimenti ad esperimenti pratici. In ogni caso, ella ribadisce quanto la controversia sulle forze vive sia cruciale per il suo tempo: “Le forze vive sono forse il solo punto sopra del quale tuttora si disputa” (§573).

Come anticipato nel paragrafo 4.2.3, per du Châtelet le monadi costituirebbero le forze primitive, mentre le forze legate al movimento dei corpi sarebbero quelle derivate: queste si dividono in passive (o morte, o prementi, o di inerzia) e attive (o *vis viva*). Tutto ciò è assolutamente in linea con il pensiero di Leibniz (Reichenberger, 2021). A differenza del tedesco, però, la marchesa aggiunge un’ulteriore distinzione, ovvero quella tra forze morte attive e forze morte passive: le prime sarebbero “quelle che hanno i corpi per tenere qualche potenza in equilibrio” (§529), mentre le seconde “quelle che un corpo senza moto riceve, quand’egli è sollecitato a muoversi, e resta tuttavia nella quiete” (§530). Queste definizioni richiamano le idee di moto nei casi rispettivamente di attrito dinamico e di attrito statico. Le forze morte – o prementi – sono infatti spesso relazionate ad una resistenza (od ostacolo), che può essere “vinto”, oppure no; costituisce ostacolo “ciò che distrugge la pressione” (§532). Anche qui, come nell’esposizione delle leggi della Dinamica, si nota l’idea sottostante di “lotta” tra forze e resistenze. Si osserva, poi, che le forze morte – o prementi – somigliano molto alle “forze impresse” di Newton, anche se il substrato teorico differisce (Bernstein, 1981).

Secondo l’autrice, la forza morta e la forza viva sono due modi di presentarsi della

forza motrice: la linea di confine si può ricondurre alla comparazione tra la forza premente e la resistenza da “vincere”: quando la forza è maggiore, allora la forza stessa si trasformerebbe da morta in viva (“la Forza morta si cangia in Forza viva” - §534). Tuttavia, in nome del Principio di Continuità e di quello di Ragione Sufficiente, nel capitolo XXI du Châtelet spiega che questo cambiamento (da morta a viva) dev’essere tale che il corpo non passi improvvisamente dalla quiete al moto, ma per “ombreggiamenti” (§557), acquistando successivamente tutti i gradi del moto. La velocità cresce quindi gradualmente, così come la forza viva. Proprio questa gradualità si può spiegare in termini infinitesimi: quella che si genera nel corpo è dunque “una forza viva infinitamente picciola, l’elemento della forza viva, il suo incominciamento” (§561).

A questo proposito, secondo la scienziata, la misura della forza morta e della quantità infinitesima di forza viva sarebbe lo stesso, ovvero “la massa del corpo moltiplicata per la velocità infinitamente picciola” (§561). A questa medesima quantità – massa per velocità – du Châtelet si riferisce nel capitolo XX con il nome di “potenza” (§539, §546, §547), mentre nel capitolo XI con quello di “quantità di moto” (§262). Sebbene sia confusa la trattazione relativa alla misura delle forze morte e degli infinitesimi di forze vive, quella che riguarda le forze vive è piuttosto lineare: “La forza de’ corpi che sono in un moto attuale e finito, è proporzionale al quadrato della loro velocità moltiplicato nella loro massa, e questa estimazione è divenuta uno de’ principj più fecondi nella meccanica” (§568). Riconoscendo questa scoperta a Leibniz – di cui cita l’opera *Brevis demonstratio* del 1686 – riprende anche una sua analogia per chiarire ulteriormente la differenza tra forze morte e forze vive: le prime starebbero alle seconde come un punto ad una linea, o come una linea ad una superficie (§566). Le forze vive sarebbero quindi dei valori finiti di forza ottenuti dalla somma di forze infinitesime, ognuna dovuta ad una pressione, o forza premente (§567).

Riguardo alle forze vive, poi, du Châtelet conclude l’opera delle *Institutions* ragionando sulla loro conservazione: secondo lei – così come per Leibniz – esse sarebbero sempre conservate nell’Universo, trasmettendosi di corpo in corpo ad ogni interazione (§586). Questo, a suo dire, avverrebbe solo con la misura leibniziana della forza motrice: “Facendo questa forza proporzionale al prodotto della massa per lo quadrato della velocità, si trova che quantunque il moto varii ad ogni istante nell’Universo, la stessa quantità di forza viva vi si conserva ognora” (§588). Al contrario, Cartesio – che era partito da un assunto simile – si è sbagliato, individuando una quantità sbagliata (mv , come si è visto nel paragrafo 2.2.1) (§588). Per sostenere la sua critica al filosofo francese, la scienziata cita i risultati degli esperimenti di Huygens e Wren (cfr. 2.2.1). Inoltre, l’autrice riporta anche il pensiero di Newton in merito, estratto dalla sezione finale di *Opticks*: secondo l’inglese “il moto dell’Universo va sempre scemando; e finalmente il nostro Sistema avrà bisogno un giorno d’essere dal suo Autore riformato” (§586). L’idea sottostante è quindi quella di

una grandezza fisica che non si conserva e, disperdendosi, dovrà essere in qualche modo “rifornita” dal creatore dell’Universo; altrimenti, si incorrerebbe nel rischio dell’estinzione della vita.

Alla base della convinzione che la *vis viva* si conservi si trova una concezione specifica circa l’interazione tra corpi: al pari di Cartesio e di Leibniz, pure du Châtelet è certa che durante gli urti la forza venga trasmessa da un oggetto all’altro (ciò in cui differiscono le idee cartesiane dalle leibniziane è proprio il modo in cui si deve misurare tale forza): la forza che un corpo perde, scontrandosi con un altro, viene ceduta *completamente* all’altro corpo (§259, §269). Ad esempio, in uno scontro tra un corpo in movimento ed uno in quiete, il secondo resiste al primo e “acquista in questa reazione la forza consumata dal corpo che agisce sopra di esso” (§260). Se il secondo corpo, poi, continua nel suo moto anche una volta che è distante dal primo, si deve alla sua forza di inerzia, che lo mantiene nello stato acquisito (§270). Come Leibniz, allora, pure per la marchesa si può misurare la forza motrice di un corpo “dalla grandezza degli ostacoli che il corpo in moto può sbaragliare impiegando tutta la sua forza” (§268). In sostanza, gli effetti sono sempre proporzionali alla causa (§570) (cfr. 2.2.1).

A questo punto risulta doveroso precisare un aspetto che du Châtelet sorvola quasi del tutto, trattandolo come un dettaglio poco rilevante: tutti i ragionamenti fin qui descritti per la conservazione delle forze vive riguardano esclusivamente gli urti *elastici* (anche adesso, difatti, si sa che l’energia cinetica si conserva unicamente in questo tipo di urti). L’autrice, invece, riserva solo poche righe – alla fine del libro – per dire che nel caso degli impatti anelastici non si conoscono precisamente le conseguenze. Ciononostante, “il certo si è che la forza non perisce” (§590) e che essa si ritroverebbe sempre negli “effetti da lei prodotti, se ognor potessimo tali effetti conoscere e vedere” (§590); dunque, la scienziata rivela di non sapere quali siano le leggi che regolano gli urti anelastici, però confida che anche per questi valga la conservazione della *vis viva*. Siccome era già noto, però, che tale conservazione non avveniva (almeno macroscopicamente), prova ad ipotizzare che essa sia “stata consumata nello scomporre o trasportare le parti de’ corpi, nel superare la loro coesione, nel rompere la loro testura, nel tendere forse alcune molle che sono tra le loro parti, o che so io?” (§590). Similmente a Leibniz, pertanto, per la scienziata la forza viva agirebbe a livello microscopico, alterando la struttura della materia, e per questo motivo, quindi, non sarebbe apparentemente visibile la sua conservazione ad occhio nudo.

Nel considerare quelli che attualmente sono definiti “urti elastici” ed “urti anelastici”, du Châtelet ragiona non sul modo in cui interagiscono i corpi, ma sulla loro specifica struttura: sono i corpi ad essere “elastici”, “molli” o “duri”, decretando se le interazioni siano conseguentemente “elastiche” o “anelastiche”. Nel capitolo XI l’autrice asserisce che: “I corpi che ricevono o che comunicano il moto possono essere o intieramente *duri*, cioè incapaci di compressione, o intieramente *molli*,

cioè incapaci di restituzione dopo la compressione delle loro parti, o finalmente con molla, o sia *elastici*, cioè capaci di ripigliare la loro primiera forma dopo la compressione” (§267). Ciò malgrado, nel capitolo I nega la possibilità che esistano corpi perfettamente “duri”, poiché violerebbero il Principio di Continuità; difatti, “i corpi duri passerebbono tutt’un tratto dalla quiete al moto e dal moto per un verso al moto per un verso contrario; così, tutti i corpi hanno un grado di elasticità che li rende atti a soddisfare questa legge di continuità” (§15). La trattazione relativa ai corpi “duri” è perciò ambigua e incoerente. Quella concernente i corpi “elastici” e “mollì” risulta invece più consistente e soprattutto più approfondita in buona parte dell’opera: come si nota già dai termini, così come dalla ripetizione della parola “compressione” nella citazione della sezione §267, du Châtelet crede che la composizione dei corpi possa essere descritta con l’analogia delle molle. Allora, quando si ha un impatto tra oggetti, le loro superfici si comprimono come delle molle, per poi recuperare (in certi casi) la loro estensione iniziale, o parte di essa. Questa rappresentazione dei corpi in termini di molle è chiaramente ispirata a Johann Bernoulli, del quale cita la Dissertazione sulle leggi degli urti (cfr. 2.2.2) in favore della *vis viva*: “Sarebbe inutile il riferirvi qui tutte le sperienze che provano questa verità; voi la vedrete un giorno nell’Opuscolo di M. Bernoulli, presentato dall’Accademia delle Scienze nel 1724” (§574). Al pari dello svizzero, anche du Châtelet si serve delle molle per elaborare un’argomentazione a sostegno delle forze vive; eppure – differentemente da lui – non considera solo l’urto tra corpi sferici, ma pure la caduta libera per azione della gravità. Difatti, ella descrive la forza di gravità come una molla infinita, che comprime tutti i corpi in ogni istante. Pertanto, quando un corpo è in caduta, sente la “spinta” della gravità, che ne aumenta la velocità (e quindi la forza motrice).

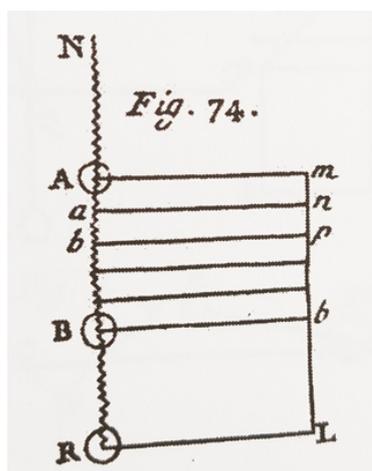


Figura 24: Moto di caduta libera per azione della gravità come molla infinita.

In *Fig. 74*, la gravità sarebbe quindi rappresentata dalla molla infinita NR . Secondo la scienziata, un corpo che cade dal punto A al punto B sperimenta ad ogni istante la pressione della gravità. La pressione nel punto A è raffigurata dal segmento Am , quella che sente nel punto a è il segmento an , e così via con bp pressione nel punto b e Bb pressione nel punto B . Secondo du Châtelet, allora, la forza viva del corpo – una volta arrivato in B – sarebbe uguale all’area del rettangolo $AmbB$, che si ottiene sommando le pressioni successive acquisite in tutti gli istanti tra A e B . Prendendo in considerazione un altro corpo, sceso fino al punto R , la sua forza sarebbe come il rettangolo $AmLR$. Dunque, $F_B : F_R = AmbB : AmLR$, con F_B forza del corpo nel punto B e F_R forza nel punto R . La conseguenza successiva, per l’autrice, è che $F_B : F_R = AB : AR$, siccome i rettangoli $AmbB$ e $AmLR$ hanno la base Am in comune. Da ciò si ricava che le forze vive, che “devono essere tra loro come il numero delle molle eguali e simili che si sono allentate e che hanno comunicate le loro forze ai corpi in moto” (§567), sono tra loro come gli spazi percorsi. Da ultimo, richiamando quanto dimostrato per il moto di caduta libera nel capitolo XIII, du Châtelet asserisce che le forze vive sono proporzionali al quadrato delle velocità. In termini moderni, poiché si è dedotta la proporzionalità tra forze vive e spazi percorsi, la relazione con il quadrato delle velocità si può ottenere dalla formula

$$s = \frac{(v_f^2 - v_0^2)}{2g}$$

4.5.2 Dentro la disputa: esperimenti e critiche

Dopo aver presentato la sua argomentazione a favore delle forze vive, la scienziata spiega quanto questa misurazione sia stata inizialmente vista con diffidenza: “Questa asserzione parve da bella prima come un’eresia fisica; e *donde mai*, si diceva, *questo quadrato può provenire?*” (§567); eppure, nonostante la tiepida accoglienza degli affezionati alla “vecchia opinione” (in merito alla forza motrice), secondo du Châtelet “tutte le sperienze hanno da poi confermata questa scoperta” (§568) e per di più “i Filosofi son d’accordo circa le sperienze che provano questa estimazione delle forze vive, e convengono che tutte le materie trasportate [...] sono sempre come il quadrato della loro velocità moltiplicato per la loro massa” (§568). Qualche pagina più avanti, però, si trova una riflessione contraddittoria, ovvero che “le forze vive sono forse il solo punto sopra del quale tuttora si disputa” (§573). Infatti, come si è anticipato nel paragrafo 2.2.2, all’epoca il dibattito sulla forza motrice era tutt’altro che risolto; dalle parole dell’autrice, che spesso dichiara la questione “chiusa”, si coglie chiaramente come anche il testo delle *Institutions* si collochi in quell’insieme di opere di parte, nelle quali i fisici credono (o vogliono far credere) che tutta la comunità scientifica sia d’accordo con la loro interpretazione (cfr. 2.2.3). A differenza della posizione relativa al Newtonianismo – sostanzialmente

equilibrata – nel caso delle forze vive si prende atto che pure du Châtelet tende ad un atteggiamento fanatico, estremamente condizionato dalle teorie leibniziane. Malgrado la ferma convinzione che la sua opinione sia condivisa da tutti gli scienziati, l'autrice non può esimersi dal presentare – e confutare – le tesi degli “Avversarij delle forze vive” (§569), ovvero i sostenitori della misura della forza motrice con la grandezza $m\vec{v}$. In questo modo, ella si inserisce pienamente nella controversia, citando numerosi esperimenti di fisici europei e sostenendo o criticando le loro conclusioni. Anche nelle argomentazioni riportate di seguito si noterà uno stile di esposizione prettamente verbale, geometrico e numerico (nel senso di aritmetico), non trovando formalizzazioni algebriche. Si cercherà di tradurre in un linguaggio moderno quanto esposto nel testo, per comprendere i risultati alla luce dell'attuale formulazione di problemi analoghi.

Una delle prime considerazioni elaborate da du Châtelet riguarda il calcolo del tempo, nella misurazione della forza motrice: secondo gli “Avversari”, questa è in stretta relazione con il tempo di interazione tra corpi (ad esempio per quanto tempo uno riceve la pressione di un altro). Difatti, secondo i sostenitori della quantità di moto, “corpi che con velocità doppie fanno effetti quadrupli, li fanno in un tempo doppio: dunque, concludono, la loro forza non è che doppia in tempo eguale, cioè in ragione della mera velocità e non del quadrato di essa” (§569). La risposta della marchesa si sviluppa su livelli differenti: anzitutto richiama la prima legge della Dinamica, usandola per affermare che un corpo prosegue con la sua forza intatta, fino a che non incontra un ostacolo; e tutto ciò indipendentemente dal tempo trascorso in moto. Di questo corpo, per di più, non si potrebbe conoscere la forza, fino a quando non interagisce con un altro oggetto (§570). Dunque, quello che conta è l'effetto provocato dall'urto (uguale alla causa, quindi alla forza iniziale) e questo – per du Châtelet – è indipendente dal tempo impiegato: “La forza distrutta è sempre eguale all'effetto ch'ella ha prodotto, qualunque sia il tempo nel quale ella lo ha prodotto” (§571). Ad esempio, se un corpo in caduta potesse salire ad un'altezza maggiore, con un tempo maggiore, “allora l'effetto sarebbe più grande che la sua causa, ed il moto perpetuo meccanico sarebbe possibile” (§570). Dunque, per l'autrice, si dovrebbe pensare solo a quante molle vengono compresse – al di là del tempo usato per comprimerle – poiché la forza iniziale sarebbe sufficiente a comprimerne sempre lo stesso numero. Per la marchesa, gli unici casi in cui si deve studiare il tempo sono quelli in cui ad un tempo maggiore corrispondono conseguenze maggiori: il Moto Rettilineo Uniforme (in cui lo spazio aumenta all'aumentare del tempo), oppure il Moto Uniformemente Accelerato (in cui aumenta la velocità all'aumentare del tempo). In conclusione, nelle riflessioni dell'autrice si riscontra una visione nettamente parziale, nella quale – oltre alle evidenti relazioni con il tempo per il MRU ed il MUA – fa riferimento solo agli spazi percorsi. Questo perché, secondo lei, l'unica misura della forza motrice è quella della *vis viva*, analogo moderno dell'energia cinetica; siccome questa si ot-

tiene integrando la forza nello spazio, le motivazioni della scienziata sono corrette (in riferimento allo spazio), ma incomplete allo stesso tempo, poiché non accetta la quantità di moto come altra misura plausibile.

Nel testo delle *Institutions*, una delle critiche più dirette è quella rivolta a Jean Jacques Dortous de Mairan, all'epoca Segretario dell'Académie. Tra tutti gli "Avversari" delle forze vive, du Châtelet sceglie proprio la Dissertazione del 1728 pubblicata dal suo connazionale. Il motivo è esplicito: "Essendo che quest'Opera a me sembra il più che di acuto e d'ingegnoso è stato mai detto contro le forze vive, fermerommi a ridurvene qui alla mente alcuni passi, e rifiutarli" (§574); perciò, de Mairan viene individuato come il migliore degli oppositori. Della sua opera, la scienziata cita alcuni estratti, indicandone il paragrafo con attenzione. La tesi che viene principalmente attaccata, con diverse sfumature, è quella relativa al moto di risalita di un corpo – contro l'azione della gravità – dopo essere caduto: per de Mairan, invece di calcolare la forza motrice sulla base degli ostacoli superati (e delle molle compresse), si dovrebbero esaminare gli ostacoli non superati (e le molle non compresse) (§574), come già anticipato nel paragrafo 2.2.2; questi spazi non percorsi sarebbero quindi un'ottima misura delle forze e sarebbero proporzionali alla velocità. Il suo ragionamento si sviluppa così: un corpo che cade da un'altezza 4 e che acquista 2 di velocità cadendo, nel primo secondo di risalita percorrerebbe uno spazio 4 con velocità 2, di moto uniforme (§574); tuttavia, siccome su di esso agisce la forza di gravità, non riuscirà a risalire all'altezza 4, ma solo a 3 (nel primo secondo), perdendo 1 di forza e 1 di velocità. Nel secondo successivo, in assenza di gravità salirebbe di 2 con moto uniforme, ma riesce solo a percorrere 1, perdendo di nuovo 1 di forza e 1 di velocità e restando in quiete. Pertanto, gli spazi non percorsi a causa dell'ostacolo-gravità sono pari a 2, uguali alla forza persa e ai gradi di velocità all'inizio del moto (nonché quelli persi nel risalire); infatti, "le sue forze erano dunque come le sue velocità" (§574).

In questa esposizione fortemente qualitativa, in cui i numeri servono solo a rendere un'idea più generale, ma sviluppandola attraverso esempi semplici, non si capisce su quale base egli determini le quantificazioni delle perdite di forza e di velocità, né tantomeno gli spazi percorsi. Eppure, la risposta di du Châtelet non si focalizza su queste lacune espositive, bensì sulla commistione tra moto uniforme e decelerato: per lei, de Mairan li ha uguagliati, per semplificare i conti. Invece, da quello che si è potuto ricostruire dal testo, sembra che il ragionamento del segretario dell'Académie fosse piuttosto simile a quello che la stessa scienziata ha utilizzato nei capitoli precedenti: partire da una descrizione in termini di moto uniforme, per semplicità, per poi complicarla se interagiscono delle forze su un corpo, rendendo il suo moto composto. A differenza delle dimostrazioni di du Châtelet per la gravitazione, però, de Mairan tratta questa tipologia di moto lungo un'unica direzione (non ottenendo, quindi, una traiettoria curva). L'altro disappunto espresso dal-

l'autrice delle *Institutions* è prevedibile e concerne le conclusioni del rivale: “le sue forze erano dunque come le sue velocità [...] ma ciò è falso del tutto” (§574). In aggiunta, esprime una critica ancora più forte nei confronti di de Mairan, dicendo che “egli ha detto tutto quello che si poteva dire in favore d’una causa debole: e però quanto più i suoi argomenti sono capaci di sedurre un Lettore disattento, tanto più mi sono creduta in dovere di mostrarvi che la dottrina delle forze vive non è da quelli punti indebolita né offesa” (§574).

Du Châtelet cita poi i risultati di un esperimento condotto da Jacob Hermann, già nominato come fisico praticante nell’ambiente patavino (cfr. 2.1.3, 4.3.1). In realtà, più che riferire gli esiti di un effettivo esperimento pratico, l’esposizione dell’autrice sembra riconducibile ad una forma di esperimento mentale, nel quale compaiono sempre quantità espresse da numeri interi; per di più, non si descrivono gli apparati sperimentali, né i procedimenti adottati. Quello che interessa alla scienziata è servirsi dei risultati ottenuti da Hermann, per avvalorare la tesi delle forze vive. Il problema analizzato si può inquadrare nell’attuale teoria degli urti unidimensionali e si può formalizzare – in linguaggio moderno – come segue: Condizioni iniziali, assumendo le masse in *kg* e le velocità in *m/s*:

$$\begin{cases} m_A = 1 \text{ kg} , v_{A,0} = 2 \text{ m/s} \\ m_B = 3 \text{ kg} , v_{B,0} = 0 \text{ m/s} \\ m_C = 1 \text{ kg} , v_{C,0} = 0 \text{ m/s} \end{cases}$$

Dove i simboli *A*, *B* e *C* a pedice indicano che le masse e le velocità sono riferite ai corpi *A*, *B* e *C*, mentre lo zero allude all’istante iniziale. Il corpo *A*, originariamente unico in moto, urta prima contro il corpo *B* e poi contro *C*.

Dopo il primo urto (pedice “1”):

$$\begin{cases} m_A = 1 \text{ kg} , v_{A,1} = 1 \text{ m/s} \\ m_B = 3 \text{ kg} , v_{B,1} = 1 \text{ m/s} \\ m_C = 1 \text{ kg} , v_{C,1} = 0 \text{ m/s} \end{cases}$$

Quindi, il corpo *A* ha trasmesso un grado di velocità al corpo *B*. Dopo il secondo urto (pedice “2”), invece:

$$\begin{cases} m_A = 1 \text{ kg} , v_{A,2} = 0 \text{ m/s} \\ m_B = 3 \text{ kg} , v_{B,2} = 1 \text{ m/s} \\ m_C = 1 \text{ kg} , v_{C,2} = 1 \text{ m/s} \end{cases}$$

Allora il corpo *A* rimane in quiete, dopo aver trasmesso al corpo *C* il grado di velocità che gli era rimasto (§577).

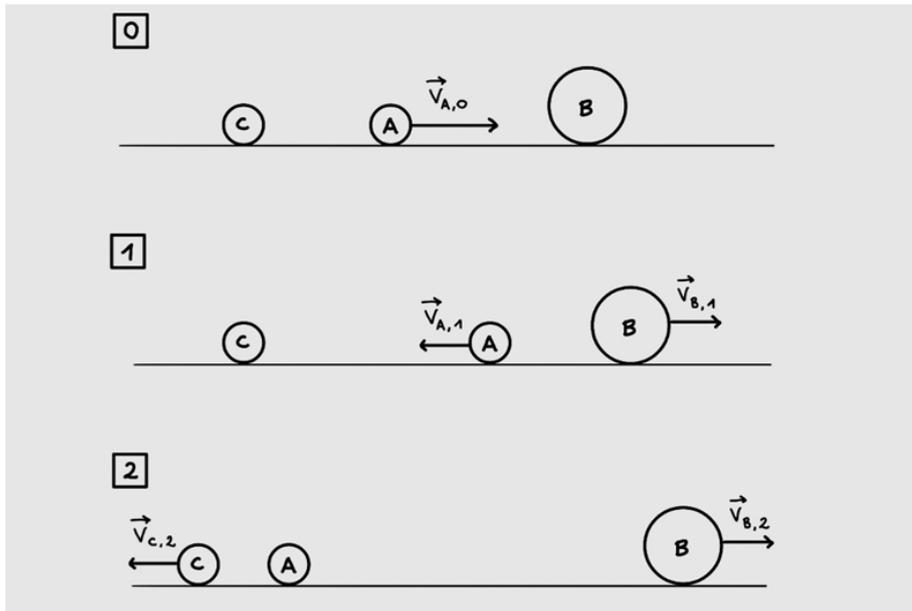


Figura 25: Rappresentazione degli urti consecutivi (realizzata dall'autore della tesi).

Secondo du Châtelet, la forza finale del corpo B sarà 3 – “lo che non negano ne pur gli avversarj delle forze vive” (§578) – e quella del corpo C sarà 1. Pertanto, il corpo A doveva avere inizialmente una forza pari a 4, per poter trasmettere 3 e 1 agli altri corpi: essendo la sua massa 1 e la sua velocità prima degli urti uguale a 2, segue che la forza motrice è proporzionale al quadrato della velocità. Traducendo quanto appena visto in termini di leggi di conservazione di quantità di moto \vec{p} e di energia cinetica K – per urti perfettamente elastici – si può notare che:

$$\begin{cases} \vec{p}_0 = 2 \text{ N} \cdot \text{s} , K_0 = 2 \text{ J} \\ \vec{p}_1 = 2 \text{ N} \cdot \text{s} , K_1 = 2 \text{ J} \\ \vec{p}_2 = 2 \text{ N} \cdot \text{s} , K_2 = 2 \text{ J} \end{cases}$$

Dove per l'energia cinetica K si è incluso il moderno fattore moltiplicativo $\frac{1}{2}$, che invece all'epoca non era usato per il calcolo della *vis viva*. Quello che si nota è che quindi i valori riportati rispettano entrambe le conservazioni (sia di quantità di moto che di energia cinetica).

A questo punto, l'autrice adopera l'esempio esaminato per sostenere ulteriormente la sua critica rivolta al caso gravitazionale di de Mairan, mostrando il parallelismo tra l'esperimento di Hermann e la risalita di un corpo. Infatti, ella dichiara che l'oggetto che nel primo secondo di ascesa perde un grado di velocità (a causa della gravità) è simile al corpo A che rallenta dopo aver urtato B ; allo stesso modo, nel secondo istante perde il grado di velocità rimasto, interagendo con la gravità,

come il corpo A che urta con C , “percorrendo uno spazio suttriplo del primo, non altrimenti che il corpo A perde il grado di velocità che gli resta percuotendo il corpo C , suttriplo del corpo B ” (§578). Allora, secondo lei, questi risultati sono anche legati alle masse dei corpi B e C (3 e 1) e agli spazi percorsi prima di urtarli (3 e 1). Si precisa che nel caso gravitazionale du Châtelet si serve dell’analogia circa il modulo delle quantità in gioco, ma trascura considerazioni legate al verso in cui si sviluppa il moto del corpo in salita (corrispettivo del corpo A): nell’esempio di Hermann, infatti, il corpo A si muove inizialmente in un verso (prima di urtare con B) e poi in quello opposto (prima di urtare con C). Nell’analogo gravitazionale, il corpo dovrebbe quindi ascendere (prima di urtare con B), per poi discendere (prima di urtare con C).

Oltre a questi problemi, riconducibili a urti unidimensionali, la scienziata accenna ad un caso bidimensionale: come si può osservare in *Fig. 76*, il corpo A impatta contro due corpi B (identici e ciascuno di massa doppia rispetto ad A), posti a 60° rispetto all’orizzontale.

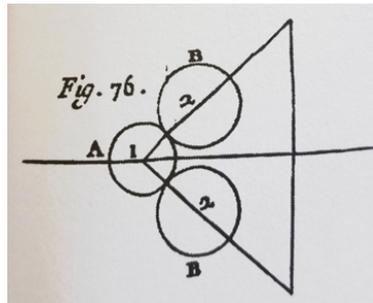


Figura 26: Caso di urto bidimensionale.

Le condizioni iniziali sono:

$$\begin{cases} m_A = 1 \text{ kg} , v_{A,0} = 2 \text{ m/s} \\ m_B = 2 \text{ kg} , v_{B,0} = 0 \text{ m/s} \\ m_B = 2 \text{ kg} , v_{C,0} = 0 \text{ m/s} \end{cases}$$

Mentre le finali (pedice “1”):

$$\begin{cases} m_A = 1 \text{ kg} , v_{A,1} = 0 \text{ m/s} \\ m_B = 2 \text{ kg} , v_{B,1} = 1 \text{ m/s} \\ m_B = 2 \text{ kg} , v_{C,1} = 1 \text{ m/s} \end{cases}$$

Tradotta in termini delle moderne leggi di conservazione di quantità di moto (scomposta lungo gli assi x e y) e di energia cinetica:

$$\begin{cases} \vec{p}_{0,x} = 2 N \cdot s, & \vec{p}_{0,y} = 0 N \cdot s, & K_0 = 2 J \\ \vec{p}_{1,x} = 2 N \cdot s, & \vec{p}_{1,y} = 0 N \cdot s, & K_1 = 2 J \end{cases}$$

Per cui pure in questo caso i valori numerici riportati sono coerenti con entrambe le conservazioni.

Un'altra disamina che si ritiene importante è quella che du Châtelet sviluppa a partire da un'ulteriore obiezione alle forze vive: è un dato di fatto sperimentale che, se si prendono due corpi – le cui velocità sono inversamente proporzionali alle loro masse – e si fanno urtare frontalmente, essi restano in quiete. Gli “Avversari” delle forze vive, a questo punto, sostengono che, se si prende la *vis viva* come misura della forza di movimento, questo risultato non sarebbe possibile, siccome il corpo con maggiore velocità dovrebbe spingere l'altro (e quindi non resterebbero in quiete). La scienziata risponde dicendo che “quando due corpi che non sono elastici s'incontrano con velocità le quali sono in ragione inversa delle loro masse, fanno l'un sopra l'altro il medesimo effetto” (§583); quindi, anche secondo lei dovrebbero restare in quiete. Tuttavia, aggiunge che quello che si ottiene per via delle forze vive sono “forze ineguali nell'affondamento delle loro parti” (§583), vale a dire che il corpo che aveva inizialmente maggiore velocità lascia un solco più profondo sulla superficie dell'altro. In questo caso, secondo l'autrice, le forze motrici dei due oggetti non sono uguali.

Per argomentare questa conclusione, ella adopera ancora l'analogia con le molle, come illustrato in *Fig. 80*.

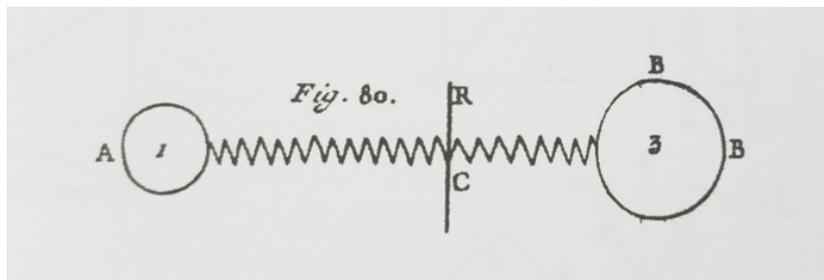


Figura 27: Urto anelastico tra due corpi spiegato con l'analogia delle molle.

Preso la molla *R*, essa allenta il moto dei corpi *A* (di massa 1) e *B* (di massa 3). Per du Châtelet, solo l'inerzia di ciascun corpo si oppone alla compressione della molla e l'inerzia è proporzionale alla massa; quindi “le velocità che la molla comunicherà a questi corpi, saranno in ragione inversa della loro massa” (§583). Tuttavia, le forze dei due corpi non sono uguali tra loro, ma stanno tra loro come le lunghezze *CA* e *CB*, ovvero come il numero di molle che sono state compresse da ciascuno dei due corpi.

Circa gli urti anelastici, la marchesa afferma che gli “Avversari” ritengono inaffidabili gli esperimenti che usano “l’affondar de’ corpi nelle materie molli” (§576), siccome in questi casi “si tramischiano sempre inevitabilmente certe estranee circostanze” (§576); anche secondo l’autrice, quindi, gli urti anelastici sarebbero meno attendibili di quelli elastici, poiché gli esiti sono più difficili da comprendere ed analizzare in modo inequivocabile. Ciononostante, riporta un esperimento condotto dal già citato Willem ‘s Gravesande (cfr. 2.2.2, 2.2.3): presa una sfera di argilla – tenuta ferma – se si fanno impattare contro essa una sfera A di bronzo (con massa 3 e velocità 1) e un’altra B sempre di bronzo (massa 1 e velocità 3), allora si ottiene che entrambi questi oggetti restano fermi, dopo aver impattato con la sfera d’argilla; tuttavia, la sfera B lascia uno sprofondamento maggiore sulla sfera di argilla. Allora, “nella percossa non consumasi se non la forza la quale è impiegata in sprofondare coteste parti” (§584).

Da ultimo, si ritiene interessante evidenziare un passaggio che mette in luce un aspetto pratico dello studio delle forze motrici dei corpi: le macchine per rompere muri o – più in generale – oggetti. La scienziata, infatti, riferisce che “gli Antichi aveano fatte delle macchine per rompere i muri, la massa delle quali era immensa” (§587), mentre le macchine settecentesche sono nettamente più agevoli ed efficaci e “una delle ragioni onde le nostre macchine sono a quelle degli Antichi da preferirsi, si è che crescendo la forza de’ corpi in ragione del quadrato della velocità e solo in ragione diretta della massa, questa fatta di crescimento da un effetto di gran lunga maggiore” (§587). Vale a dire che grazie alla teoria relativa alla *vis viva* è stato possibile capire quanto sia più utile sfruttare la velocità di un corpo, piuttosto che la sua massa, per amplificarne il potere distruttivo.

4.5.3 Carteggio con de Mairan

Come si è già osservato nei paragrafi precedenti, le argomentazioni presenti nelle *Institutions* sono tutt’altro che generali e non utilizzano il linguaggio moderno dell’algebra; per di più, non si basano su formule di conservazione, ma sembrano analizzare caso per caso. Si nota poi che nonostante alcuni riferimenti ad esperimenti (di Hermann e di ‘s Gravesande), non si pone troppa attenzione al carattere empirico dei procedimenti e dei risultati. L’esposizione di du Châtelet sembra quindi più simile a quella tipica degli esperimenti mentali; per questo motivo può apparire anche meno convincente. Ad amplificare i dubbi relativi a queste riflessioni, il carteggio con de Mairan si struttura attorno ad uno degli esempi numerici già osservati, vale a dire quello che descrive le conclusioni di Hermann. Attraverso la lettera del segretario dell’Académie prima e della risposta della marchesa poi, si possono intuire i motivi e le modalità per cui la controversia sulle forze vive è durata così a lungo e in modo così esasperato. Per di più, attraverso l’analisi

di questo carteggio si ha l'occasione di entrare nel vivo della realtà settecentesca della Repubblica delle Lettere, cogliendo lo stile con il quale la comunità scientifica dell'epoca discuteva i temi più importanti.

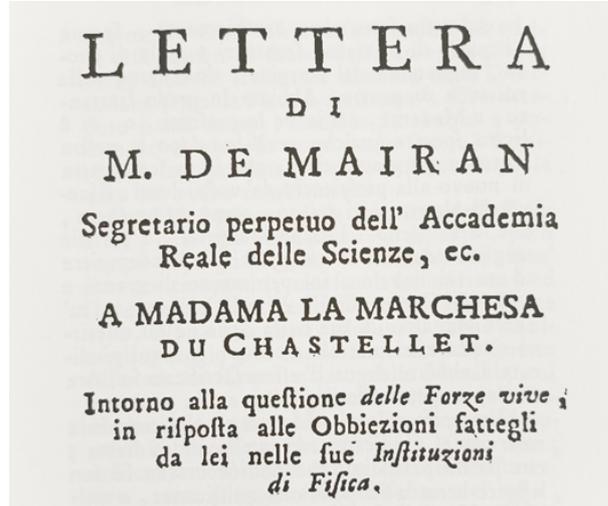


Figura 28: Frontespizio della lettera di de Mairan.

La lettera di de Mairan è stata pubblicata a Parigi, il 18 febbraio 1741. Come si riscontra dal titolo, essa è direttamente indirizzata alle riflessioni circa le forze vive contenute nel testo delle *Institutions*. Il tono utilizzato dal fisico francese è piuttosto critico, con una nota di sarcasmo. Addirittura, pare che de Mairan si sia lamentato con alcuni colleghi per il tempo che ha dovuto spendere per rispondere a du Châtelet, non tanto per la scrittura dei contenuti in sé (che gli avrebbero richiesto solo quattro mattine di lavoro), ma per i tempi di pubblicazione, che sono durati mesi (Zinsser, 2007). Fin dall'inizio della lettera, lo scienziato si rimette (apparentemente) al parere dei lettori, per determinare chi abbia ragione tra i due: "Madama, il pubblico sarà giudice se la vostra Critica sopra la mia Dissertazione abbia o no ragionevole fondamento".⁸¹ Egli prosegue spiegando che ha ristampato la propria dissertazione del 1728 (quella presa di mira da du Châtelet) in un formato più comodo da consultare, in modo che possa diffondersi più facilmente. Inoltre, egli confida di poter far cambiare opinione alla marchesa, attraverso la sua lettera.

A questo punto, prima di focalizzarsi sui contenuti fisici, de Mairan espone tre critiche principali alla marchesa: anzitutto, l'aver letto poco attentamente, "con un poco di fretta"⁸², la sua dissertazione; poi, di aver cambiato opinione rispetto

⁸¹Du Châtelet, E. (1743). *Instituzioni di Fisica di Madama la Marchesa du Chastellet Indiritte a suo Figliuolo. Traduzione dal Linguaggio Francese nel Toscano, accresciuta con la Dissertazione sopra le Forze Motrici di M. De Mairan*, p. 363.

⁸²Ibidem, p. 364.

al passato: secondo lui, al tempo della *Dissertation sur la nature et la propagation du feu* (1737), la fisica non aderiva alla teoria delle forze vive e quindi il segretario dell'Académie si chiede: "Che accaduto è mai da poi, onde io sia venuto a perdere un sì glorioso voto a mio favore?"⁸³ Relativamente a questo, si osserva un'aspra critica nei confronti della reverenza che du Châtelet nutre (ed esprime nelle *Institutions*) verso Leibniz: de Mairan la definisce implicitamente una seguace-discepola del tedesco, dicendo che ella ha "sacrificato su l'Ara che voi ergete al Leibnizio".⁸⁴ Da ultimo, lo scienziato biasima la collega per le presunte citazioni incluse nelle *Institutions*: ella sostiene di aver elaborato un estratto della Dissertazione del 1728, ma de Mairan non riconosce come proprie le parole che riporta.

Passando al contenuto scientifico, il fisico premette che le sue obiezioni non possono essere esaustive, perché altrimenti servirebbe un trattato ufficiale. La questione su cui si sofferma maggiormente è quella relativa ai risultati dell'esperimento di Jacob Hermann. Secondo de Mairan, l'errore di du Châtelet sta nell'interpretare la forza finale ottenuta (4) come il quadrato della velocità iniziale del corpo A (2), quando invece si tratterebbe semplicemente del suo doppio. Ad esempio, prendendo 3 come valore iniziale della velocità, si sarebbe notata l'ambiguità, trovando 6 come risultato (e non 9). Quello riportato dalla marchesa sarebbe pertanto "un esempio particolare, fortuito ed equivoco, che non prova una Teoria generale".⁸⁵ In aggiunta, de Mairan elabora un controesempio, ricalcolando i risultati dell'esperimento di Hermann sulla base di una velocità iniziale pari a 4: anche in questo caso, pare che la sua esposizione sia frutto di un esperimento mentale sostenuto da formule teoriche (e non di un'esperienza empirica).

Traducendo in linguaggio moderno, la sua argomentazione si presenta così, assumendo le masse in kg e le velocità in m/s :

$$\begin{cases} m_A = 1 \text{ kg} , v_{A,0} = 4 \text{ m/s} \\ m_B = 3 \text{ kg} , v_{B,0} = 0 \text{ m/s} \\ m_C = 1 \text{ kg} , v_{C,0} = 0 \text{ m/s} \end{cases}$$

Dopo il primo urto, tra A e B (pedice "1"):

$$\begin{cases} m_A = 1 \text{ kg} , v_{A,1} = 2 \text{ m/s} \\ m_B = 3 \text{ kg} , v_{B,1} = 2 \text{ m/s} \\ m_C = 1 \text{ kg} , v_{C,1} = 0 \text{ m/s} \end{cases}$$

⁸³Ibidem, p. 365.

⁸⁴Ibidem, p. 364.

⁸⁵Ibidem, p. 371.

Dopo il secondo urto, tra A e C (pedice “2”), invece:

$$\begin{cases} m_A = 1 \text{ kg} , v_{A,2} = 0 \text{ m/s} \\ m_B = 3 \text{ kg} , v_{B,2} = 2 \text{ m/s} \\ m_C = 1 \text{ kg} , v_{C,2} = 2 \text{ m/s} \end{cases}$$

De Mairan conclude affermando che: “Vi sarà dopo la percussione 8 di forza, invece di 4 che ne contavano avanti la percussione. Ma avvertite, Madama, che ne dovrebbe esser 16 secondo voi”.⁸⁶

Gli “8 di forza” a cui lo scienziato si riferisce si ottengono sommando i 6 del corpo B (3x2) e i 2 del corpo C (1x2). Nonostante questa descrizione iniziale, che sembrerebbe negare la conservazione della forza motrice come quantità di moto, il segretario dell’Académie si sofferma poi su una riflessione di natura vettoriale, dichiarando che “nella somma che si fa delle grandezze, alcune delle quali sono affette o segnate col segno *più* ed altre col segno *meno*”.⁸⁷ Quindi, pur non esplicitandolo del tutto, si può dedurre che per de Mairan l’impulso si conservi, essendo 4 all’inizio e 4 anche alla fine, se si sottrae il contributo di C (2) a quello di B (6), siccome questi due corpi si muovono in verso opposto. Per completezza, si precisa che il valore 16, che si sarebbe ricavato seguendo l’idea di du Châtelet circa la *vis viva* è comunque corretto, rispettando la conservazione dell’energia cinetica per gli urti elastici.

Oltre a questo esperimento, de Mairan critica anche quello etichettabile come urto bidimensionale presentato nel paragrafo precedente: per lui si tratterebbe di “un caso ancora più particolare e più fortuito”.⁸⁸ Tuttavia, per questa situazione non illustra un controesempio numerico. Un altro aspetto su cui il fisico si trova in disaccordo con l’autrice delle *Institutions* è la considerazione del tempo, come si poteva immaginare: per lui, la forza si deve misurare proprio sulla base del tempo di interazione tra corpi; anche per questa obiezione, però, non include argomentazioni più approfondite. Infine, egli dissente da du Châtelet sull’utilizzo degli urti con materie molli, come quelle descritte dall’esperimento di ‘s Gravesande: “i seguaci delle forze vive [...] hanno creduto di trovare nelle sperienze fatte col mezzo di trasportamenti di materia, o di affondamenti di corpi nell’argilla, o d’una serie di molle tese, più valida prova della loro opinione”.⁸⁹

Oltre ad ammonire la marchesa (e i lettori) circa la pratica di polarizzare i dibattiti scientifici attorno ad alcune figure famose – come Leibniz e Newton – de Mairan sottolinea l’importanza sostanziale della controversia sulle forze vive, screditando

⁸⁶Ibidem, p. 373.

⁸⁷Ibidem, p. 374.

⁸⁸Ibidem, p. 377.

⁸⁹Ibidem, p. 385.

chi crede che si tratti semplicemente di “una pura questione di nome”⁹⁰ (cfr. 2.2.3). Secondo lui, infatti, siccome i fisici di tutta Europa sono impegnati nel chiarimento di questa disputa, essa non si può considerare un problema di poco conto.

Un’ultima riflessione che si reputa rilevante riguarda uno dei criteri che per de Mairan può determinare quale teoria sia preferibile: la semplicità. Egli domanda a du Châtelet: “Per chi credete voi che sarebbe la presunzione favorevole in questa disputa? Per il partito che accumula, senza mai finirla, i casi più complicati, o per quello che procura di condur la questione a’ suoi minimi termini, che investiga la Natura in ciò che vi si può trovar di più semplice?”.⁹¹ Pur non dimostrando in che modo il suo “partito” studi la realtà più semplicemente, egli ritiene un valore fondamentale quello di non ricorrere a molti esempi particolari (o “fortuiti”) per supportare le proprie tesi.

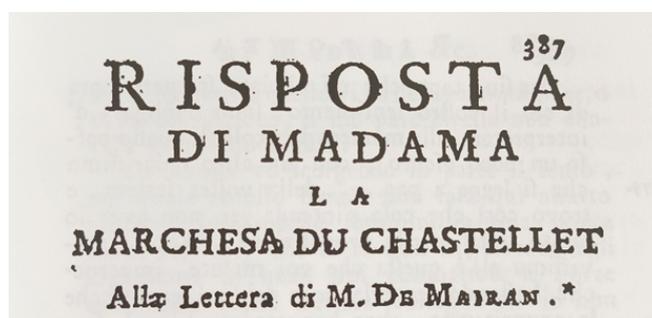


Figura 29: Frontespizio della risposta di du Châtelet.

La lettera di risposta di Émilie du Châtelet non si fece attendere a lungo, venendo pubblicata il 26 marzo 1741, a Bruxelles. Come preannunciato nel paragrafo 3.2.1, in quegli anni ella stava gestendo una pratica ereditaria in Belgio e, nonostante il poco tempo a disposizione per dedicarsi all’attività scientifica, si impegnò per ribattere dettagliatamente alle obiezioni di de Mairan. Decise di far stampare 500 copie della propria lettera, affinché fossero distribuite ai membri dell’Académie, della Repubblica delle Lettere e dei *salon* (Zinsser, 2007). Secondo il *Journal de Trevoux*, ella rispose “ragione per ragione, arguzia per arguzia e cortesia per cortesia”.⁹² A questa lettera, per di più, il segretario dell’Académie non replicò e secondo molti fu un segno di resa.

Lo stile sarcastico di de Mairan trova seguito anche nella lettera di du Châtelet, che critica quasi tutto quello che il collega ha scritto, ricorrendo spesso ad espressioni ironiche. Innanzitutto, ella afferma in diversi passaggi che rileggendo la sua opera non ritiene di dover cambiare posizione, anzi: “Il consiglio che vi piace di

⁹⁰Ibidem, p. 384.

⁹¹Ibidem, p. 382.

⁹²“Article LXVII”, *Mémoires de Trevoux*, pp. 1390-1391 (Agosto 1740). TAT.

darmi, che *legga e rilegga* la vostra Dissertazione, mi pare ancora chiarissimo, ma posso assicurarvi che quanto più io lo *leggo e rileggo*, maggiormente mi confermo nell'idea in cui sono".⁹³ E poi, circa la critica fatta da de Mairan di aver letto il suo testo di fretta e con scarsa attenzione, la scienziata scrive: "Vi dimanderei, per esempio, che cosa voi intendete per *leggere bene* un'Opera; affinché io possa in avvenire schivare il rimprovero che voi mi fate di non aver ben letta o nel suo titolo o nel testo la proposizione della vostra Dissertazione, da cui io mi son presa la libertà di discordare".⁹⁴ Riguardo invece alla diversa opinione che du Châtelet aveva nel 1737 rispetto alle forze vive, ella spiega di aver letto il trattato di Bernoulli solo dopo aver pubblicato la *Dissertation sur la nature et la propagation du feu* e quindi che grazie a quel testo ha colto la forza delle argomentazioni a favore della *vis viva*, cambiando posizione. Da ultimo, in merito all'accusa di aver citato scorrettamente la dissertazione di de Mairan, la scienziata ribatte spiegando che non le era possibile riportate intere pagine del trattato del segretario dell'Académie e che era pertanto necessario fare dei tagli per riferire i punti più importanti; nella lettera include anche un confronto dei testi delle *Institutions* e dell'opera originale di de Mairan, mostrando come esse si assomiglino. Ciononostante, ammette di aver tralasciato alcune parole che potevano essere utili a comprendere il pieno significato di quanto esposto dal collega.

Entrando nel dettaglio degli argomenti fisici, du Châtelet si sofferma principalmente sul controesempio riferito all'esperimento di Hermann: dapprima difende lo scienziato svizzero, chiedendo a de Mairan: "come pensar si può che un Geometra così autorevole e valente come l'è il Signor Herman *d'aver confuso il doppio d'una quantità col suo quadrato?*"⁹⁵; in seguito, dimostra al francese che l'esempio riportato nelle *Institutions* è tutt'altro che fortuito e particolare e lo fa ripartendo proprio dalle quantità numeriche usate da de Mairan nella sua lettera. Ella considera il corpo *B*, dopo l'urto con *A*: avendo massa pari a 3 e velocità acquistata di valore 2, dovrebbe avere una forza motrice pari a 12 e non a 6, come sostenuto dal segretario dell'Académie. Allo stesso modo, il corpo *C*, dopo aver impattato con *A*, ha forza uguale a 4 e non a 2. La critica principale che riserva a de Mairan riguarda l'impossibilità – per il corpo *A* – di trasmettere una forza pari a 6 (secondo lo scienziato) al corpo *B*, partendo da una forza uguale a 4. L'effetto sarebbe infatti maggiore della causa e costituirebbe un'assurdità logica, oltre che fisica. Per di più, il corpo *A* avrebbe conservato 2 di forza, dopo l'urto con *B*, che trasmette poi a *C*, "lo che accresce di nuovo l'imbarazzo".⁹⁶ A questo punto, du

⁹³Du Châtelet, E. (1743). *Instituzioni di Fisica di Madama la Marchesa du Chastellet Indiritte a suo Figliuolo. Traduzione dal Linguaggio Francese nel Toscano, accresciuta con la Dissertazione sopra le Forze Motrici di M. De Mairan*, p. 389.

⁹⁴Ibidem, p. 387.

⁹⁵Ibidem, p. 404.

⁹⁶Ibidem, p. 406.

Châtelet deride il collega per aver affermato che la forza del corpo C sia negativa e quella di B positiva, servendosi poi di regole algebriche. A suo parere, far tornare i conti “per mezzo d’una picciola lineetta”⁹⁷ è assurdo, tanto che scrive a de Mairan: “Non credo che vorreste farne l’esperienza, né trovarvi all’incontro d’un corpo, il quale ritornasse indietro affetto da questo segno *meno*, con 500 o 1000 di forza”.⁹⁸ L’errore della scienziata è quindi quello di non riuscire a comprendere il significato vettoriale delle grandezze fisiche (in questo caso della quantità di moto), studiandole solo come quantità scalari.

Il resto della lettera non presenta altre riflessioni fisiche approfondite, né argomentazioni, e du Châtelet si limita a contraddire il collega su ogni tema esposto nella missiva precedente. Per di più, in chiusura ribadisce di non aver cambiato idea dopo il messaggio di de Mairan: “Non ho riportato altro frutto da questa nuova lettura, che quello di convincermi sempre più che non la leggerò mai bene, quand’anche vi spendessi tutta la mia vita”.⁹⁹ L’unico aspetto su cui la scienziata concorda con l’avversario è l’importanza della disputa sulle forze vive, che anche lei crede non possano essere sminuite come “una mera quistione di nome”.¹⁰⁰

⁹⁷Ibidem, p. 406.

⁹⁸Ibidem, p. 406.

⁹⁹Ibidem, p. 414.

¹⁰⁰Ibidem, p. 416.

5 Rilettura moderna

Dopo aver esaminato a fondo il contenuto della fonte primaria delle *Institutions de Physique*, si procederà ora ad aggiornare sia la figura di du Châtelet che il contenuto della sua opera: nel primo caso si confronterà l'immagine che avevano di lei i suoi contemporanei con quella che invece è arrivata fino ai giorni nostri; nel secondo si metteranno in relazione alcuni argomenti trattati nel quarto capitolo con temi di ricerca in Didattica della Fisica e della Matematica, così come in Storia della Fisica.

5.1 Émilie du Châtelet tra passato e presente

Si ritiene significativo osservare innanzitutto l'accoglienza riservata dai contemporanei all'opera e alla sua autrice (anche negli anni successivi), per poi evidenziare come questa considerazione sia mutata nei secoli successivi, contribuendo a delineare un'immagine storiografica moderna diversa da quella coeva. Si cercherà inoltre di trovare le cause che hanno concorso a tale evoluzione (o meglio, involuzione).

5.1.1 Accoglienza dei coevi

Analizzando una vasta porzione della letteratura di ricerca in questo ambito, sono stati trovati pochi articoli che discutessero le reazioni dei contemporanei alla pubblicazione del testo delle *Institutions*. Gli storici moderni si sono focalizzati principalmente sulla biografia di du Châtelet, o sulla contestualizzazione delle sue opere, o ancora sul riassunto dei contenuti fondanti. Tuttavia, è stato possibile raccogliere brevi riferimenti a questo argomento: secondo Sarah Hutton, il trattato della fisica francese fu generalmente apprezzato in patria, con la recensione del *Journal de Trevoux* che nel maggio del 1741 lo elogiò in quanto divulgazione efficace delle teorie di Leibniz, allora poco conosciute in Francia; anche Voltaire ne lodò il contenuto e lo stile, pur criticando l'eccessivo – a suo parere – sostegno espresso nei confronti del tedesco (Hutton, 2004). Come già discusso nel dettaglio, la critica più aspra che fu rivolta alle *Institutions* venne proprio da de Mairan, che scrisse la lettera pubblica riassunta nel paragrafo 4.5.3; ciononostante, il fatto che il segretario dell'Académie si sia impegnato in questo tipo di risposta dimostra la rilevanza sia delle opinioni illustrate dalla marchesa, che della sua stessa figura (Zinsser, 2006).

L'opera fu poi gradita particolarmente sia in Italia che in Germania, come preannunciato nel paragrafo 4.1.1: le traduzioni nelle rispettive lingue ne attestano l'interesse e la diffusione. Nel caso specifico dell'Italia, è noto che sia Maria Gaetana Agnesi che Laura Bassi adoperavano il testo delle *Institutions* per svolgere attività di divulgazione e di insegnamento (Hutton, 2022; Zinsser, 2007). Per di

più, è accertato che anche Faustina Pignatelli abbia letto l'opera di du Châtelet, direttamente nella sua versione originale francese (siccome era fortemente interessata all'esposizione originale attorno al tema delle forze vive); sempre nell'ambito napoletano, il testo fu studiato dai fratelli De Martino. Pure il bolognese Francesco Maria Zanotti si interessò alle *Institutions* per le sue argomentazioni sulla *vis viva* e circa dieci anni dopo pubblicò *Della forza de' corpi che chiamano viva* (1752) (Hutton, 2022). In aggiunta, la recensione dell'opera di du Châtelet scritta nelle *Novelle letterarie pubblicate in Firenze* conferì alla francese il merito di aver riaperto la disputa sulle forze vive, dopo che de Mairan “sembrava aver terminata la questione, ma Madama la ha rinnovata in quest'ultimo capitolo”.¹⁰¹

Oltre ai contenuti delle *Institutions de Physique*, anche la figura della scienziata era decisamente apprezzata, come anticipato nel paragrafo 3.2.1. Si ricorda infatti la nomina a membro dell'Accademia delle Scienze di Bologna (nel 1746) (Rey, 2024) e di quella degli Arcadi a Roma (Hutton, 2022); inoltre, pure l'inclusione nella ristretta lista degli intellettuali elogiati nella *Pinacotheca Scriptorum* del tedesco Jacob Brucker comprova la fama della scienziata all'interno della Repubblica delle Lettere (Solleveld, 2022).

Un ulteriore aspetto che ne determinò la stima di molti colleghi (e non solo) fu la pubblicazione postuma dei *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*: attraverso questo trattato, ella venne riconosciuta come uno dei massimi esponenti europei circa le teorie newtoniane, oltre ad essere ammirata per le capacità divulgative (evidenti specialmente nel commentario) (Zinsser, 2007, 2001).

5.1.2 Immagine storiografica

Proprio attorno al tema dei suoi contributi newtoniani si sviluppa una delle ricerche storiografiche più interessanti: secondo gli articoli di Glenn Roe e di Koffi Maglo, le sue riflessioni sarebbero state cruciali per la scrittura di diversi articoli presenti nell'*Encyclopédie*, ma senza essere citate esplicitamente (Roe, 2018; Maglo, 2008). In questo modo, du Châtelet avrebbe ricevuto “il titolo riservato a molte altre donne del suo tempo: *anonimo*”¹⁰² (cfr. 3.1.2). Infatti, nei 17 volumi dell'*Encyclopédie* pubblicati tra il 1751 e il 1765 il nome della marchesa compare solo poche volte e mai per contributi ritenuti consistenti. Ad esempio, nell'articolo sul *Newtonianisme, ou Philosophie Newtonienne*, d'Alembert loda du Châtelet per l'opera di traduzione e divulgazione dei *Principia*, ma non riconosce originalità al suo lavoro (Roe, 2018).

Per quanto riguarda, poi, tutti gli articoli in cui il nome della scienziata non viene nemmeno riportato (pur essendo i contenuti chiaramente estrapolati dai suoi

¹⁰¹ *Novelle letterarie pubblicate in Firenze*. (1742). Vol. 3, 752.

¹⁰² Zinsser, J. P. (2006). *Émilie du Châtelet: Daring Genius of the Enlightenment*. New York: Penguin Books, p. 285. TAT.

testi), secondo Glenn Roe si deve ricordare che i testi dell'*Encyclopédie* avevano una complessa storia editoriale: oltre ad essere composti anche a più mani, da numerosi intellettuali, non erano strutturati come quelli attualmente contenuti nelle riviste scientifiche e non citavano direttamente ed esplicitamente tutti i riferimenti bibliografici; per di più, Diderot e d'Alembert modificavano ulteriormente quanto scritto dagli autori dell'articolo specifico, per dare una conformità maggiore con il resto dell'opera (Roe, 2018). In questo processo, si può già intuire perché si sia perso il riconoscimento a du Châtelet. Però, si possono indagare ancora più nel dettaglio le motivazioni che ne hanno oscurato il contributo: pare che la maggior parte degli articoli dell'*Encyclopédie* che usano i contenuti delle *Institutions* siano stati redatti da Samuel Formey (Carboncini, 1987). Egli fu segretario dell'Accademia delle Scienze di Berlino e autore di *La Belle Wolfienne*, opera divulgativa della filosofia di Wolff attraverso uno stile piuttosto simile a quello delle *Entretiens* di Fontenelle e del *Newtonianismo per le dame* di Algarotti. A rendere ancora più complessa la ricostruzione storiografica per determinare quanto Formey abbia preso da du Châtelet, secondo Glenn Roe gli stessi articoli del tedesco furono modificati in modo sostanziale da Diderot e d'Alembert. Quindi, per capire quale sia l'effettiva entità del contributo non riconosciuto alla scienziata francese, Roe si è servito di un metodo computazionale con allineamento di sequenza, confrontando i testi di alcuni articoli dell'*Encyclopédie* con quello delle *Institutions*. In questo modo, egli non ha solo cercato l'uso di parole uguali o simili, ma si è addentrato anche nel livello dell'analisi logica e sintattica. In seguito a questo incredibile lavoro di ricerca, ha trovato che almeno sei articoli dell'*Encyclopédie* erano quasi interamente ispirati all'opera di du Châtelet, senza però averla mai citata.

<p>a. Articles with mention of the <i>Institutions de physique</i>:</p> <p>Continuité, loi de: Formey & d'Alembert, t. IV, p. 116 ESPACE, subst. m. (Métaphys.): Formey, t. V, p. 949 HYPOTHESE, s. f. (Métaphysiq.): NA, t. VIII, p. 417 MOUVEMENT, s. m. (Méchan.): Formey & d'Alembert, t. X, p. 830 PESANTEUR, s. f. (Phys.): Formey, t. XII, p. 443 REPOS, s. m. (Physique.): Formey, t. XIV, p. 138 TEMS, s. m. (Métaphysique.): Formey, t. XVI, p. 112</p>
<p>b. Articles with no mention of the <i>Institutions de physique</i>:</p> <p>CONTINU, adj. (Physiq.): Formey & d'Alembert, t. IV, p. 115 CONTRADICTION, s. f. (Métaphys.): Formey, t. IV, p. 119 DIVISIBILITÉ, (Géom. & Phys.): Formey & d'Alembert, t. IV, p. 1074 PENDULE, s. m. (Méchanique.): Formey & d'Alembert, t. XII, p. 293 Suffisante raison, (Métaphysiq.): NA, t. XV, p. 634 VITESSE, s.f. (Méchan.): Formey, t. XVII, p. 359</p>

Figura 30: Tabella elaborata da Glenn Roe (Roe, 2018).

Come si può notare dalla tabella riportata – presa dall’articolo di Glenn Roe – gli articoli in questione sono tutti riferiti alle *Institutions* e trattano temi discussi nel capitolo 4. Da questi argomenti si può anche dedurre che du Châtelet era diventata una delle persone più esperte della filosofia di Leibniz e di Wolff; oltre a questi articoli, poi, secondo Roe pure altri redatti da Diderot e d’Alembert – mirati a criticare le tesi dei due pensatori tedeschi – erano basati sul libro della marchesa francese (Roe, 2018). Da questa ricerca storiografica si può quindi intravedere quanto la scienziata fosse considerata dai suoi contemporanei, tanto da essere percepita come una *philosophe* a tutti gli effetti e risultando una delle pochissime donne che contribuì (anche se indirettamente) alla stesura dell’*Encyclopédie* (Reichenberger, 2021).

Da queste riflessioni si possono iniziare a comprendere le cause che hanno portato la sua fama a diminuire con il tempo: non riconoscendole l’autorialità in diversi scritti, si iniziò a dimenticare chi fosse Émilie du Châtelet. Si tratta quindi di una forma di cancellazione della memoria, tanto subdola quanto efficace, purtroppo. La sua diventò un’altra voce femminile “mancante, se non mutata”.¹⁰³ Difatti, sebbene siano sopravvissute due delle sue opere originali, si è persa una percezione più ampia del suo contributo ed apprezzamento in ambito scientifico: l’*Encyclopédie* costituiva il compendio delle riflessioni dei migliori pensatori ed escludendola da buona parte dei riferimenti la si escludeva dalla cerchia degli intellettuali ritenuti più importanti. Pertanto, è molto probabile che nei secoli successivi non ci sia stato grande interesse ad approfondire i suoi trattati e le sue idee, riducendone ulteriormente la popolarità. Per di più, come si è anticipato nel paragrafo 1.3, la Storia della Fisica si è concentrata per anni solo sulle figure più famose e riconosciute; quindi, la sua è stata solo una delle ultime pagine rispolverate.

Secondo Judith Zinsser, un’ulteriore motivazione che può aver portato gli storici e gli scienziati a trascurare la figura di du Châtelet nel tempo è stato proprio il suo modo di porsi, a confine tra Fisica e Metafisica (Zinsser, 2007). La sua adesione alla “Filosofia Naturale” risultò un ostacolo per il suo apprezzamento, nelle decadi successive alla sua morte: già a partire dalla fine del XVIII secolo, infatti, la Fisica diventò estremamente più empirica e sperimentale, votata alla pratica e all’analisi matematica, ritenendo le riflessioni teoriche e metafisiche uno scarto del processo. Probabilmente, se fosse vissuta un secolo prima, le sue teorie sarebbero state studiate intensamente, perché all’epoca la Scienza aveva ancora dei contorni sfocati: come Leibniz e Cartesio, ad esempio – che ora vengono studiati nei programmi ministeriali di Filosofia – la voce di du Châtelet sarebbe stata autorevole e coerente con il sentire comune. Tuttavia, la delimitazione netta tra discipline che nacque tra fine Settecento ed inizio Ottocento portò il suo contributo verso una

¹⁰³Roe, G. (2018). A Sheep in Wolff’s Clothing: Émilie du Châtelet and the *Encyclopédie*. *Eighteenth-Century Studies*, 51(2), p. 181.

zona grigia del sapere.

Inoltre, la successiva perdita d'interesse per le sue opere è riconducibile, secondo Anne-Lise Rey, alla sua collocazione moderata nei confronti delle teorie di Leibniz e Newton: pur sostenendo entrambi, in modi diversi e con intensità differenti (nelle due opere principali), non si schierò mai come seguace ostinata e devota ad uno solo dei due pensatori. Proprio questa mentalità apartitica avrebbe concorso a farne dimenticare i contenuti, perché lo studio storiografico successivo si concentrò sulle rigide categorie di “newtoniano” e “leibniziano”, mentre secondo Rey si dovrebbe analizzare la figura di du Châtelet in termini di “leibnizo-newtonianismo” (Rey, 2024).

Da ultimo, si ritiene rilevante esaminare qualche aspetto storiografico moderno, nell'ambito della storiografia di genere. Anche la narrazione della vita e delle opere della marchesa francese è stata vittima di strumentalizzazioni e distorsioni (cfr. 3.1.5), specialmente negli ultimi decenni. Secondo Judith Zinsser – una delle più importanti biografe di du Châtelet – la principale difficoltà nella raccolta di informazioni relative alla vita della scienziata è l'eccessiva quantità di riferimenti alla *liason* con Voltaire: per molto tempo, quindi, l'importanza riservata alla fisica è stata direttamente subordinata alla sua relazione con un uomo famoso, e non al suo operato scientifico (Zinsser, 2007). Tale problema trova delle radici già al tempo in cui du Châtelet era in vita: ella scrisse infatti in una lettera a Federico II di Prussia “giudicami per i miei meriti o per la mancanza di essi, ma non guardarmi come l'appendice a questo grande generale, o a quello studioso rinomato. A questa stella che brilla alla corte di Francia, o a quel famoso autore. Io sono in mio diritto una persona completa, responsabile solo di me stessa, per tutto quello che sono, tutto quello che dico e tutto quello che faccio”.¹⁰⁴

Malgrado ciò, la storiografia recente si è concentrata – e lo fa tuttora – sulle sue relazioni e sulla sua vita, spesso focalizzandosi sulla sfera sentimentale. Ad esempio, Betty Mayfield mette in luce diversi titoli di biografie scritte negli ultimi decenni su du Châtelet: *Voltaire in Love* (1957), di Nancy Mitford, *Divine Mistress: The Life of Émilie du Châtelet, Voltaire's Mistress* (1971), di Samuel Edwards, *Passionate Minds: Émilie du Châtelet, Voltaire, and the Great Love Affair of the Enlightenment* (2006), di David Bodanis, e *Amazing Mistresses - A short eBook: Inspirational Stories* (2011), di Charles Margerison (Mayfield, 2013). Quella che emerge è dunque una narrazione falsata e soprattutto non attenta ai reali contributi scientifici. Anche Paola Cosmacini, autrice dell'ultima monografia pubblicata – *La ragazza con il compasso d'oro. La straordinaria vita della scienziata Émilie du Châtelet* (2023) – pur dedicando grande dedizione nell'approfondire la figura della marchesa, riserva buona parte del libro alla ricostruzione delle sue relazioni

¹⁰⁴Cit. in Iltis, C. (1977). Madame du Châtelet's Metaphysics and Mechanics. *Studies in History and Philosophy of Science*, 8, p. 29. TAT.

amoroze e delle sue esperienze biografiche. In tutto il testo, i riferimenti alle opere scientifiche sono ridotti e superficiali, confermando la tendenza storiografica a trascurare gli effettivi contenuti prodotti dalle scienziate.

5.2 Rilettura didattica delle *Institutions*

Si procederà ora ad una trasposizione didattica di quanto analizzato nel capitolo 4. Tale elaborazione si svilupperà in due direzioni: da un lato si approfondiranno alcune riflessioni fisicamente o matematicamente incorrette illustrate da du Châtelet, confrontandole con recenti studi didattici; dall'altro si discuteranno i vantaggi ed i limiti di un'inclusione della Storia della Fisica nella pratica d'insegnamento, con speciale riferimento alla figura della scienziate francese.

5.2.1 Confronto tra contenuti *Institutions* e ricerca in Didattica

Tra i numerosi argomenti affrontati nel quarto capitolo, alcuni mostrano certe rappresentazioni mentali non corrette da parte dell'autrice (e condivise dalla maggior parte dei migliori fisici dell'epoca). Questo offre l'opportunità per sviluppare un interessante confronto storico-didattico, al fine di sottolineare le somiglianze tra il pensiero settecentesco e quello di tanti studenti di oggi. I temi principali si possono riscontrare nei paragrafi 4.3 e 4.5: nel primo si trovano alcuni preconcetti circa il moderno concetto di forza, mentre nel secondo si individuano riflessioni ancora acerbe riguardo all'attuale distinzione tra quantità di moto ed energia cinetica, oltre a lacune di natura vettoriale e debolezze nella pratica dimostrativa.

Sono già state utilizzate espressioni come “rappresentazioni mentali”, o “preconcetti”, cercando di evitare il termine “errore”: questo si radica sulla convinzione didattica che le risposte degli studenti (e dei fisici del passato) non siano errate di per sé, ma frutto di idee che si instaurano sulle esperienze quotidiane, o sui cosiddetti “fossili terminologici”¹⁰⁵, ovvero parole di uso comune che sono eco di concezioni scientifiche ormai superate (ad esempio, parlare di *forza*, o *potenza*, o *energia* indistintamente, nel gergo popolare, quando le reali grandezze fisiche sottostanti sarebbero magari la quantità di moto, o varie forme di energia (Hestenes et al., 1992)). Secondo Casadio, Grimellini Tomasini e Pecori Balandi, le rappresentazioni mentali dei ragazzi sono fondate sulla “fenomenologia della vita quotidiana”.¹⁰⁶ Queste idee spontanee si consoliderebbero poi con il tempo, strutturandosi in “miniteorie”, che hanno applicabilità ridotta a certi ambiti o casi (Osborne, 1984). Tale frammentarietà della conoscenza fisica è stata riassunta da Andrea diSessa

¹⁰⁵Besson, U. (2015). *Didattica della Fisica*. Carocci Editore.

¹⁰⁶Casadio C., Grimellini Tomasini, N. & Pecori Balandi, B. (1991). Il concetto di forza. In N. Grimellini Tomasini & G. Segrè (Eds.), *Conoscenze scientifiche. Le rappresentazioni mentali degli studenti* (p. 140). Scandicci: La Nuova Italia Editrice.

con la teoria del *Knowledge in Pieces* (KiP), per la quale gli studenti avrebbero diverse convinzioni semi-strutturate, che spesso sono anche in contrasto tra loro – risultando incoerenti – e che vengono ripescate a seconda del problema (diSessa, 1988). Queste possono essere “attivate” da richieste specifiche, come ad esempio quella di focalizzarsi su un particolare punto della traiettoria di un oggetto, oppure una situazione peculiare: in questi casi, si possono osservare i cosiddetti *p-prims* (*phenomenological primitives*) degli alunni, vale a dire dei meccanismi spontanei di risoluzione o di approccio ad un problema (diSessa, 1993). Ebbene, l’obiettivo sarà ora quello di mostrare che pure la conoscenza di du Châtelet è riconducibile ad una *Knowledge in Pieces* e che anche lei adoperava rappresentazioni mentali radicate sull’esperienza e sull’intuizione.

Scendendo nel dettaglio, per quanto concerne le difficoltà relative alla forza, uno degli strumenti didattici più famosi per evidenziare i preconcetti degli studenti (e che sarà usato per rileggere quanto scritto dalla marchesa francese) è il test del *Force Concept Inventory* (FCI). Questo è stato elaborato nel 1992 e risulta ancora molto utile: attraverso una trentina di problemi dinamici (con risposte multiple), gli autori hanno reso possibile indagare quanto le conoscenze degli alunni si discostino dalla Fisica newtoniana. In particolare, questo test mette in luce che “le conoscenze di senso comune riguardo al moto e alla forza sono incompatibili con i concetti newtoniani”.¹⁰⁷ Tuttavia, si ritiene opportuno precisare che gli autori considerano “newtoniano” ciò che è il frutto di una lunga rielaborazione e correzione delle teorie meccaniche di Isaac Newton (cfr. 2.1): alcuni degli errori individuati dal FCI sono infatti contenuti pure nei *Principia*. Non a caso, nell’articolo che illustra il test gli autori affermano che: “Le alternative di senso comune ai concetti newtoniani sono solitamente etichettate come *misconcezioni*. Ciononostante, esse dovrebbero ricevere lo stesso rispetto che diamo ai concetti scientifici. Le più significative convinzioni di senso comune erano sostenute fermamente da alcuni dei più grandi intellettuali del passato, inclusi Galileo e lo stesso Newton.”¹⁰⁸ Tra le varie “miniteorie” descritte nel FCI, alcune sono individuabili anche nel testo delle *Institutions*: prima fra tutte, la formulazione della terza legge della Dinamica (§229), e l’idea che le forze siano coinvolte in una forma di “lotta” (*lutte*), nella quale si ha una vincitrice e una perdente (a meno che non siano di uguale intensità): “In ogni azione, il corpo che agisce, e quello contro’l quale agisce, lottano fra essi, e senza questa tal qual lotta, non può darsi azione” (§259) (cfr. 4.3.1). Questo viene descritto dagli autori del FCI come un “Principio di dominanza”, radicato sulla metafora del conflitto: nelle parole di du Châtelet questo si ritrova pure quando descrive la trasformazione da forza morta in forza viva, che avviene se la forza premente “sconfigge” la resistenza (§532, §534). Inoltre, immaginare il principio

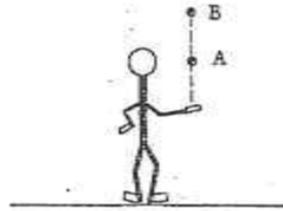
¹⁰⁷Hestenes, D., Wells, M. & Swackhamer, G. (1992). Force Concept Inventory. *Physics Teacher*, 30, p. 141. TAT.

¹⁰⁸Ibidem, p. 142. TAT.

di azione-reazione come una lotta porta a confondere l'interazione tra corpi con gli effetti successivi, credendo che a parità di forza le conseguenze siano le stesse: “forze eguali produrranno sempre, impiegandosi totalmente, eguali effetti” (§233). Questo, ad esempio, porta a pensare che una palla da bowling colpisca un birillo con una forza maggiore di quanto il birillo comunichi alla palla (Hestenes et al., 1992; Brown, 1989), quando invece la differenza risiede nelle masse (e quindi nelle accelerazioni). L'obiettivo didattico dovrebbe quindi essere quello di servirsi del terzo principio della Dinamica per *definire* il concetto di forza come *interazione* tra corpi, abbandonando la retorica dello scontro e della prospettiva del singolo corpo che agisce e subisce (Hellingman, 1989).

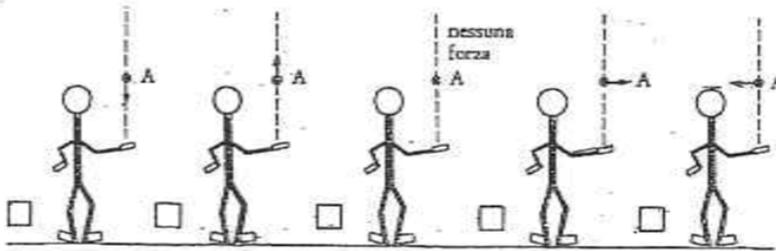
La “miniteoria” più presente nelle *Institutions* – nonché una delle più diffuse tra gli alunni – è quella legata al concetto di forza come “impetus”, o “capitale di forza” (Hestenes et al., 1992; Casadio et al., 1991). L'idea sottostante è che i corpi siano dei “contenitori di forza”, capaci di immagazzinarne una certa quantità e di muoversi proprio grazie a questa. Allora, si riconosce immediatamente l'analogia con la retorica adottata da du Châtelet, specialmente con il concetto di *vis viva* consumata dagli ostacoli, o trasmessa ad altri corpi negli urti: “Un corpo in moto non cesserebbe mai di muoversi, se qualche causa non fermasse il suo moto, consumando la sua forza” (§228), oppure “un corpo in moto che n'incontra un altro in quiete, gli comunica una parte della forza, e allora il corpo ch'è stato urtato continua a muoversi dopo l'urto, finché qualche ostacolo non consumi la sua forza” (§269), o ancora “se questo corpo venga ad incontrare degli altri corpi e li faccia muovere [...], posso stimare la sua forza per la quantità degli effetti ch'egli produsse consumandola” (§570).

Tale concezione si ritrova poi in uno degli esempi più emblematici, vale a dire la descrizione del moto di ascesa e discesa di un corpo (cfr. 4.3.3): secondo du Châtelet, in salita l'oggetto si muove sotto l'azione di due forze – quella di gravità e quella impressa dalla mano, o “forza proiettile” (§502) – mentre in discesa agirebbe esclusivamente la gravità. Salendo, quindi, il corpo consumerebbe la forza immagazzinata e “quando l'avrà perduta affatto, discenderà verso la terra” (§503). Questa descrizione si ritrova in numerosi studi didattici, che mettono in luce l'idea dei ragazzi che esista una “forza di spinta” diretta verso l'alto, che si consuma gradualmente a causa della gravità (Fuschini et al., 1984; Rossi, 1984; Watts & Zylbersztajn, 1981; Clement, 1982; diSessa, 1993).



Un sasso è lanciato in aria verso l'alto.
Esso si allontana dalla mano della persona, salendo passa per il punto A, arriva in alto fino a B e poi ritorna giù passando ancora per A.

Supponiamo che le frecce che compaiono nelle figure rappresentino la direzione della forza che agisce sul sasso.
Quale figura pensi che rappresenti meglio la forza che agisce sul sasso quando, salendo, passa per A?



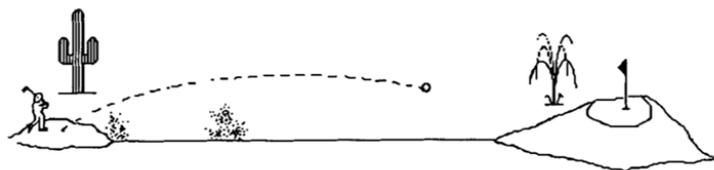
Spiegazione:

Figura 31: Esempio di situazione proposta da (Watts & Zylbersztajn, 1981) per il moto di ascesa.

Secondo i risultati riportati dagli autori, ben l'85% degli alunni ha scelto la seconda opzione, con la forza rivolta verso l'alto (Watts & Zylbersztajn, 1981). Similmente, anche lo studio condotto da John Clement ha ottenuto esiti di questo tipo, con il 79% dei ragazzi che parla di una "forza di spinta" diretta verso l'alto (Clement, 1982).

Generalizzando la situazione e parlando quindi del moto parabolico, du Châtelet mantiene la medesima descrizione – con la "forza proiettile" e quella di gravità agenti sul corpo – e trascurando l'attrito dell'aria. Il problema 22 del FCI affronta un caso analogo:

22. A golf ball driven down a fairway is observed to travel through the air with a trajectory (flight path) similar to that in the depiction below.



Which following force(s) is(are) acting on the golf ball during its entire flight?

1. the force of gravity
2. the force of the "hit"
3. the force of air resistance

- (A) 1 only
 (B) 1 and 2
 (C) 1, 2, and 3

- (D) 1 and 3
 (E) 2 and 3

Figura 32: Problema 22 del FCI.

I risultati raccolti dagli autori dimostrano che l'87% degli studenti ha scelto una tra le opzioni *B*, *C* ed *E*, indicando quindi la forza del "colpo" nel moto della palla da golf (Hestenes et al., 1992).

Ciò che sta alla base di queste rappresentazioni è probabilmente una parziale comprensione del concetto di impulso, o quantità di moto. Anche du Châtelet fatica a capire che la forza impressa interagisce con il corpo per un tempo brevissimo – fintanto che la mano e il sasso sono a contatto – e che in seguito il moto relativo al "colpo" è rettilineo uniforme.

Servendosi del moderno "Teorema dell'impulso", per il quale $\Delta\vec{p} = \int_{t_0}^{t_1} \vec{F} dt$, si può comprendere quale sia la fisica del "colpo", con un intervallo di interazione $\Delta t = t_1 - t_0$ dell'ordine dei millisecondi. Quello che si nota, sotto una lente più generale, è che l'intero dibattito sulle forze vive mette in luce due diversi modi di integrare la forza: o nello spazio (energia cinetica), o nel tempo (impulso). La difficoltà nel distinguere queste due grandezze, nella dinamica dei corpi, non appartiene solo a du Châtelet e ai suoi contemporanei, ma anche agli studenti di oggi: nonostante ora si conoscano le definizioni di queste quantità, così come i rispettivi teoremi di conservazione, le relazioni con lo spazio ed il tempo non sono così chiare ed esplicite. A mettere in luce questa complessità è stato soprattutto lo studio condotto da Ronald Dawson e Lillian McDermott: essi hanno proposto a degli alunni un problema con due dischi a ghiaccio secco (ovvero dischi che, grazie al ghiaccio secco contenuto al loro interno, possono scivolare con attrito ridotto sulle superfici), spinti da un getto d'aria costante ed uguale. I due dischi, uno di ottone e l'altro di alluminio, avevano masse diverse e quindi guadagnavano velocità differenti, scorrendo lungo il tavolo. La richiesta dei ricercatori era allora quella di confrontare l'impulso e l'energia cinetica dei due dischi, nel momento in cui superavano la stessa linea in fondo al tavolo (linea *c*) (Lawson & McDermott, 1987).

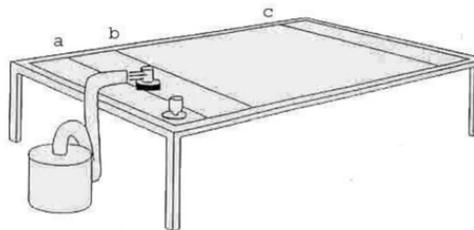


Figura 33: Setup dell'esperimento di Lawson e McDermott.

Quello che è emerso dal loro studio, così come da una recente replica svolta a Bologna da Olivia Levrini (Levrini, 2004), è che i ragazzi si focalizzano sulle masse e sulle velocità dei corpi, elaborando ragionamenti piuttosto simili a quelli osservati nella disputa sulle forze vive. Ad esempio, molti alunni hanno interpretato la “spinta” iniziale (uguale per entrambi) come la “forza di movimento” settecentesca e per alcuni questo corrispondeva ad avere uguale quantità di moto, mentre per gli altri significava che era l’energia cinetica (*vis viva*) ad essere la stessa; in altri casi, si credeva che l’energia cinetica del disco più leggero fosse maggiore, perché – andando più veloce – il contributo elevato al quadrato della velocità era considerato determinante; oppure, si pensava che la quantità di moto fosse la stessa, immaginando che esistesse una forma di “compensazione” tra massa e velocità, tale per cui le due quantità sarebbero state inversamente proporzionali tra loro. Solo alcuni ragazzi sono riusciti a ragionare correttamente sul tempo e sullo spazio: siccome la distanza percorsa era la stessa, allora lo era pure l’energia cinetica, e poiché il corpo più lento aveva impiegato più tempo ad arrivare alla linea *c*, allora la sua quantità di moto era maggiore, avendo ricevuto la “spinta” per un tempo più lungo (Levrini, 2004; Lawson & McDermott, 1987). Infine, per alcuni studenti non era possibile rispondere, dal momento che non si disponeva di sufficienti dati quantitativi su cui basare il ragionamento: ciò rievoca lo stile argomentativo tipico della controversia sulle forze vive, come osservato nel quarto capitolo, anche attraverso il carteggio con de Mairan.

Proprio riguardo a questo aspetto, nella pratica dimostrativa si può riscontrare un limite comune sia a du Châtelet che al collega: tutti gli esperimenti (e le rispettive conseguenze tratte) erano basati su determinati valori aritmetici – tanto da centrare il dibattito sugli specifici numeri riportati – senza fornire generalizzazioni algebriche. Si credeva che presentare un esempio numerico fosse sufficiente per dimostrare una tesi fisico-matematica. Questo si ritrova anche nelle metodologie attuate dai ragazzi di oggi, con studi condotti nell’ambito della Didattica della Matematica (Duval, 1991; Balacheff, 1988): nel caso dell’elaborazione di dimostrazioni, questa pratica di utilizzare alcuni esempi particolari – prendendoli per generali – viene definita da Nicolas Balacheff “empirismo naïf” (Balacheff, 1988) ed è estremamente diffusa a diversi livelli scolastici. Come si è notato poi nel

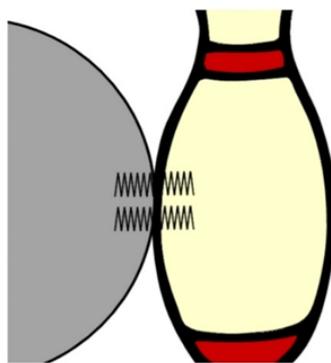
dettaglio del carteggio con de Mairan, questo tipo di strategia dimostrativa porta a limitare la discussione ad esempi e controesempi numerici, che non convincono nessuna delle parti.

5.2.2 Storia della Fisica nell'insegnamento

Le riflessioni relative all'inclusione della Storia della Fisica nell'insegnamento saranno sviluppate da un caso specifico – quello del testo delle *Institutions* – verso una progressiva generalizzazione. In questo modo si cercherà di mettere in luce la complessa interconnessione tra Storia e Didattica, tra evoluzione del pensiero della comunità scientifica e quello di ogni singolo studente.

Innanzitutto, l'opera esaminata nel quarto capitolo fornisce degli interessanti spunti per illustrare alcuni concetti, permettendo una rappresentazione più variegata degli argomenti. La prima potenzialità contenuta nelle spiegazioni di du Châtelet sta nell'analogia tra molle e superfici di oggetti che urtano: questa immagine – altamente evocativa, oltre che corretta (entro un certo grado di approssimazione) – risulta efficace anche nell'esposizione delle leggi della Dinamica. Ad esempio, secondo David Brown, “siccome tutta la materia è elastica in una certa misura, anche se solo microscopicamente, due oggetti qualsiasi che sono in contatto esercitano forze uguali tra di loro”.¹⁰⁹ Allora, questo può essere utile per illustrare la legge di azione e reazione: disegnando coppie di molle uguali si può rappresentare la stessa forza tra gli oggetti interagenti, facendo capire che la natura della forza stessa sta proprio nell'interazione (Brown, 1989; Hellingman, 1989).

Think about the collision in “super, super slo-mo.” For the few milliseconds that the bowling ball and pin are in contact, the forces are equal.



A close-up of the slightly springy surfaces of the bowling ball and pin as they make contact

Figura 34: Analogia molle-superfici contenuta in (Brown, 1989).

¹⁰⁹Brown, D. E. (1989). Students' concept of force: The importance of understanding Newton's third law. *Physics Education*, 24, p. 357.

Una volta stabiliti questi presupposti teorici, si può focalizzare l'attenzione sui differenti effetti dei corpi, in seguito all'urto (il birillo si muoverà molto più velocemente della palla da bowling). Dunque, riprendendo alcuni stralci – e, specialmente, alcune figure – delle *Institutions* si può presentare tale analogia durante le lezioni scolastiche, confrontandola anche con le illustrazioni moderne, come quella di Brown.

Poi, un altro aspetto peculiare e decisamente interessante delle *Institutions* sta nella pratica dimostrativa in termini geometrici: come si è visto nei paragrafi 4.3, 4.4 e 4.5, infatti, la maggior parte delle dimostrazioni (eccetto quelle numeriche analizzate pocanzi) sono costruite e sviluppate correttamente, basandosi sulla Geometria. Come evidenziato dalla ricerca di Lulu Healy e Celia Hoyles, gli alunni di oggi si trovano in grande difficoltà nel produrre dimostrazioni geometriche (a differenza di quelle algebriche), anche perché sono poco abituati a vederle e ad intendere la Matematica e la Fisica come materie geometriche (Healy & Hoyles, 2000). Studiando esempi storici come quello di du Châtelet, quindi, si possono mettere a confronto tipi diversi di dimostrazioni, magari analizzando lo stesso caso sotto due o più registri (geometrico e algebrico, verbale, aritmetico...). Questo risuona anche con la ricerca di Bruno D'Amore, il quale sostiene l'importanza di esporre gli argomenti sotto diversi insiemi semiotici (o rappresentazioni), aiutando gli studenti a manipolare le quantità all'interno dello stesso registro semiotico ("trattamento"), oppure a passare da un registro all'altro, notandone le differenze e le somiglianze ("conversione"). Così procedendo, si svilupperà nei ragazzi una comprensione più radicata e robusta, non limitata ad un'unica forma di rappresentazione (D'Amore, 2006). Per di più, le dimostrazioni osservate nei paragrafi 4.3 e 4.4 – specialmente quelle relative al moto parabolico e a quello dei pianeti – possono rafforzare l'apprendimento interdisciplinare tra Matematica e Fisica, superando i rigidi confini entro cui si muovono le lezioni scolastiche (Irzik & Nola, 2010).

Restando nell'ambito linguistico peculiare delle *Institutions*, si è notato più volte il carattere fortemente verbale e qualitativo adottato nella presentazione delle leggi fisiche. Tale metodologia sarebbe ideale pure in un contesto scolastico, per incoraggiare gli studenti a concentrarsi sulle proporzionalità tra grandezze e sulle relazioni tra esse; questo può essere d'aiuto anche nel combattere l'ansia comunicativa e di prestazione, che spesso porta i ragazzi a prediligere la memorizzazione all'apprendimento significativo, oltre a far perdere interesse verso le materie scientifiche (Williams, 2000).

Passando ad un livello più generale, contestualizzando quindi il lavoro di du Châtelet nel suo periodo storico e nelle relative controversie scientifiche analizzate nei capitoli 2 e 4, si può far emergere la potenzialità didattica della Storia nella formazione dei concetti dinamici. Fornendo agli alunni un quadro storico più ampio

e “grezzo”, si può far intravedere il lungo e tortuoso percorso che ha portato alla definizione delle grandezze attualmente riconosciute e studiate. Si può così mostrare il “dietro le quinte” della Fisica, rivelando che “la confusione è lo standard e gli errori sono normali”.¹¹⁰ Conoscere i protagonisti della disputa sulle forze vive, scoprire le loro domande, le argomentazioni e i tentativi: tutto questo permette ai ragazzi di scoprire che la Fisica è una realtà umana, costruita nel tempo e alla loro portata (Stanley, 2016).

Per gli studenti può rivelarsi rassicurante capire che le difficoltà che provano nella comprensione di concetti complessi (come forza, impulso ed energia cinetica) sono state condivise secoli fa dalle menti più illustri d’Europa. E attraverso un’analisi del processo evolutivo della comunità scientifica si può favorire l’apprendimento degli alunni, radicandolo sulle loro concezioni di partenza, in un’ottica socio-costruttivista (Piggott, 1934). Allo stesso modo, pure tutte le somiglianze tra le difficoltà di du Châtelet e quelle degli studenti illustrate nel paragrafo precedente possono diventare delle risorse in ambito didattico: studiando i testi della scienziata, o quelli di altri fisici del passato, si possono affrontare i nodi concettuali più complicati, guidando i ragazzi in un processo di cambiamento concettuale privo di giudizio e stress (Posner et al., 1982; Sherin, 2019).

Inoltre, si può stimolare una riflessione epistemologica decisamente interessante, mostrando come sia stato lungo il processo che a partire dal dibattito sulle forze vive ha portato alla legge della conservazione dell’energia, che al tempo di du Châtelet e colleghi era ancora un concetto troppo acerbo (Cardwell, 1967). Esso, infatti, si è sviluppato nel corso di decenni, a partire dalle prime intuizioni sulla *vis viva*, a quella di Bernoulli sull’energia potenziale (Pacey & Fisher, 1967), passando per i fenomeni chimici ed elettrici, per Lagrange e Carnot e soprattutto per Joule e l’equivalenza tra lavoro meccanico e calore, arrivando quindi ad Helmholtz e al principio di conservazione dell’energia meccanica in un sistema isolato (Whittaker, 1929). Pertanto, dai primi studi di Cartesio (1644) ad Helmholtz (1847) passarono due secoli, ricchi di contributi, domande ed errori.

In questo modo si può raggiungere il terzo livello con cui la Storia può entrare nella pratica didattica: raccontando non solo le vicende dei “grandi uomini di Scienza”, ma anche quelle delle donne che hanno contribuito, come Émilie du Châtelet, Laura Bassi e molte altre (cfr. 3.1.2). Difatti, solitamente nei libri di testo la Fisica è rappresentata come il prodotto di grandi uomini (che sembra che abbiano lavorato da soli), piuttosto che modellata dalla cultura e dall’operato di una comunità complessa (Scherr & Robertson, 2017). Proprio questa complessità potrebbe essere affrontata – in modo più o meno approfondito, a seconda del contesto scolastico specifico – dando voce alle donne nella Scienza, leggendo i loro

¹¹⁰Stanley, M. (2016). Why should physicists study history? *Physics Today*, 69 (7), p. 40.

testi e confrontandoli anche con quelli dei colleghi uomini più famosi (Yale, 2023). Questa modalità potrebbe avvicinare in particolar modo le ragazze alle materie scientifiche, che sono viste troppo spesso come appannaggio degli uomini: scoprire le storie ed i contributi diretti di alcune donne scienziate potrebbe far sentire la materia più inclusiva e stimolante (Pell, 2020). Questo si inserisce in un contesto più ampio di riflessione storiografica, come anticipato nel paragrafo 1.3: oltre alle figure femminili, la Storia della Fisica – e, di conseguenza, anche la Didattica – dovrebbero interessarsi alle voci perdute, sia per motivi etnici, di orientamento sessuale, politici o economici. Così facendo, il racconto nelle classi può davvero diventare più umano e più vero, vicino alla realtà dei ragazzi e delle ragazze e quindi efficace a livello comunicativo.

6 Conclusioni

In merito all'obiettivo concernente la storiografia di genere, si spera di aver contribuito – anche se solo parzialmente – a dare voce ad una delle tante figure di scienziate dimenticate. O meglio, ad aver riportato l'attenzione sull'effettivo contenuto scientifico prodotto da Émilie du Châtelet. Chiaramente, sarebbe auspicabile proseguire quanto iniziato con questa ricerca, analizzando anche il testo dei *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*: si potrebbe confrontare la traduzione con l'originale di Newton, evidenziando le modifiche apportate dalla francese nelle parole o nell'ordine di presentazione degli argomenti, e si potrebbe soprattutto esaminare il Commentario, studiando lo stile divulgativo sviluppato da du Châtelet. Oltre a questo, sarebbe interessante approfondire l'altro testo fisico scritto dalla marchesa, vale a dire la *Dissertation sur la nature et la propagation du feu*, soppesando le sue riflessioni riguardo ad un argomento diverso dalla Dinamica. Poi, si potrebbero riscoprire le opere di molte altre donne impegnate nella Fisica, come ad esempio quelle di Laura Bassi e delle scienziate citate nel paragrafo 3.1.2. Per la maggior parte di loro, nella letteratura di ricerca si trovano pochi articoli specializzati – nel contesto delle discipline scientifiche – mentre la quasi totalità appartiene alla sfera umanistica.

Sempre per quanto concerne la prospettiva storiografica, sarebbe importante indagare ulteriormente le motivazioni che hanno portato alla graduale scomparsa di queste figure dai libri di Storia, similmente a quanto si è cercato di fare nel paragrafo 5.1. Come si è potuto notare nel caso specifico di du Châtelet, una tale ricostruzione storiografica richiede uno sforzo notevole, a volte perché bisogna setacciare la mole di dati presente negli archivi, altre invece perché le fonti sono talmente poche che è necessario trovarne di nuove. Una delle prospettive più promettenti è sicuramente quella che intende impiegare metodi computazionali nell'analisi delle fonti primarie, come si è visto con la ricerca di Glenn Roe e l'*Encyclopédie*. A questo proposito, è stato anticipato che studi di questo tipo hanno solamente intaccato la superficie degli scavi storiografici: il lavoro in merito è potenzialmente vasto e trasversale. Al di là dei trattati ufficiali pubblicati, poi, un'attenzione particolare può essere rivolta anche alle numerose lettere private scritte all'interno della Repubblica delle Lettere (e non solo): per du Châtelet, nel caso di molte biografie recenti (come quelle di Judith Zinsser (2006), o di Paola Cosmacini (2023)), lo studio approfondito dei carteggi ha rivelato diverse sfumature sociali che hanno permesso di tratteggiare meglio la presenza della marchesa all'interno della comunità scientifica.

Al fine di comprendere al meglio i dettagli contenuti nelle fonti storiche primarie, si è ritenuto essenziale svolgere un lavoro di ricerca più ampio, esaminando le teorie scientifiche contemporanee all'autrice; entrando nel vivo dei dibattiti e dei toni utilizzati dagli altri fisici dell'epoca, è stato possibile cogliere i riferimenti,

le critiche e le implicite riverenze elaborate da du Châtelet. Senza un'opportuna preparazione, il rischio sarebbe stato o quello di mal interpretare le riflessioni della scienziata (e non si esclude di averlo fatto ugualmente, purtroppo), oppure di non notare citazioni e collegamenti che invece sono fondamentali e preziosi. Per questo motivo, attraverso il secondo capitolo si spera di aver fornito le informazioni necessarie e sufficienti ad apprezzare il modo di porsi della marchesa, unito anche al racconto della sua biografia (cfr. 3.2.1) e all'introduzione delle sue opere principali (cfr. 3.2.2).

Relativamente al quarto capitolo e all'analisi del contenuto delle *Institutions de Physique*, si è visto che quanto presentato nel testo non è strettamente originale – siccome non espone nuove scoperte fatte dall'autrice – ma, oltre ad essere l'intento dell'opera, si può definire una rielaborazione autentica e mirata delle teorie più rilevanti dell'epoca. Il trattato di du Châtelet dimostra quanto lei fosse aggiornata sugli esperimenti condotti dai colleghi, visto l'ampio numero di citazioni contenute nel testo. Allo stesso modo, è stata rimarcata la conoscenza dettagliata delle opere a cui si è maggiormente ispirata, come i *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* di Galilei, i *Principia* di Newton e *Monadologia* di Leibniz. Come scritto nel Preambolo delle *Institutions*, infatti, il lavoro di studio e rielaborazione degli argomenti è costato grande impegno e fatica alla scienziata (cfr. 4.1.2). Il modo in cui la marchesa adatta ed espone le tesi di Galilei, Newton, Leibniz e molti altri fisici è sicuramente peculiare, rendendo il trattato un compendio ponderato ed accessibile pure a lettori non necessariamente del settore. Come si è osservato più volte (specialmente nei paragrafi 4.3, 4.4 e 4.5), le spiegazioni di du Châtelet sono spesso semplificate, rispetto alle opere a cui si ispira, concentrandosi sui risultati più importanti e mettendo in luce il carattere divulgativo delle *Institutions*. A questo riguardo, si ricorda che nel Preambolo l'autrice aveva espresso il suo desiderio di rendere le dimostrazioni più essenziali, per dare sì l'idea generale dei procedimenti, ma senza perdersi in eccessivi tecnicismi (cfr. 4.1.2). Nonostante la notevole rielaborazione prodotta, però, in alcuni passaggi si riscontra una non completa comprensione di alcuni concetti, evidenziata dall'uso di parole (o espressioni) che rivelano ambiguità e confusione. Ad esempio, questo è stato osservato nel caso dei nomi attribuiti alla quantità mv , a volte definita “quantità di moto”, altre “potenza”, altre ancora “forza morta”; oppure, i riferimenti alla struttura della materia e ai suoi costituenti, con termini poco chiari e talvolta contraddittori (cfr. 4.2.3). Ciò si può probabilmente ricondurre all'istruzione ricevuta dall'autrice, che non è stata sistematica e strutturata, ma spesso si è sviluppata attorno alle figure di singoli precettori, o alla lettura autonoma di libri (cfr. 3.2.1). In ogni caso, è certamente encomiabile il lavoro svolto dalla scienziata per raggiungere il livello di padronanza riscontrabile nell'opera, così come è stato per le altre donne citate nel terzo capitolo. A questo proposito, si spera che la contestualizzazione socio-politica della condizione femminile nel Settecento non sia

sembrata un'esaltazione esagerata della figura di du Châtelet, siccome lei è riuscita a produrre opere scientifiche di spessore, superando diversi ostacoli. Tuttavia, va riconosciuto che quanto fatto dalla marchesa ha dei tratti di straordinarietà, perché i suoi risultati non sono tipici, né previsti dalla società in cui viveva. Pertanto, in nome di una storiografia più oggettiva possibile, sono stati sottolineati tutti i punti meno convincenti del testo, evitando di rendere lo studio della sua persona un'agiografia, come spesso capita negli ultimi anni (cfr. 3.1.5).

Riguardo alle teorie più rilevanti ed approfondite – ovvero le leggi del moto, il Newtonianismo e le forze vive – le riflessioni possono essere diverse. Circa le leggi della Dinamica, sono stati messi in luce numerosi punti di forza, come l'abilità nelle dimostrazioni geometriche, la semplificazione di quelle galileiane, gli esempi pratici, la narrazione degli esperimenti famosi e la considerazione delle approssimazioni; al contempo, sono stati sottolineati pure gli aspetti più deboli, come le rappresentazioni mentali relative alla forza e l'uso ricorrente del PRS, a volte in modo poco convincente. Le illustrazioni geometriche, adoperate in molteplici casi, sono risultate generalmente utili e ben fatte, accompagnando le argomentazioni verbali sviluppate nel testo. La difficile comprensione dei procedimenti, in certi casi, era dovuta al linguaggio settecentesco, che è risultato parecchio diverso dallo stile espositivo moderno e quindi è stato necessario tradurre i contenuti in modo che fossero più accessibili.

In merito al Newtonianismo, il discorso è più complesso e delicato, visto che inquadrare le *Institutions* a questo proposito risulta difficile (cfr. 4.4.3). In ogni caso, i riferimenti a Newton e alle sue scoperte enunciate nei *Principia* sono solitamente puntuali, anche se piuttosto concise e sintetiche. Come si è notato nel paragrafo 4.4, du Châtelet si sofferma poco sulle dimostrazioni elaborate da Newton – molto meno che su quelle galileiane – ricordando più volte al figlio che non sono intese come il fulcro di quest'opera. La rilettura dinamica delle leggi di Keplero è abbozzata e non troppo approfondita, però si può comunque cogliere l'intento newtoniano a riguardo. L'unica dimostrazione a cui l'autrice dedica una descrizione precisa e dettagliata è quella che mette in relazione l'attrazione gravitazionale Terra-Luna con quella che determina la gravità dei corpi sulla Terra. In questo caso, oltre ad una completa argomentazione geometrica, sono riportati pure numerosi valori numerici, rendendo tale esposizione un *unicum* all'interno delle *Institutions*. Proprio questa attenzione specifica evidenzia l'interesse principale che du Châtelet esprime nei confronti del Newtonianismo (in questo trattato): osservare e spiegare i fenomeni terrestri. Ciò trova eco negli ulteriori riferimenti concreti alle spedizioni in Perù e in Lapponia, così come il viaggio di Richer ed il differente valore di g a seconda della latitudine, problema cruciale nella navigazione.

Oltre a questo, una delle riflessioni più interessanti è senz'altro quella relativa alla causa dell'attrazione gravitazionale. Come anticipato nel paragrafo 4.2.1, secondo l'autrice la formulazione di ipotesi è fondamentale nella pratica scientifica:

specialmente per la gravitazione è necessario trovare una “ragione sufficiente” che ne spieghi i meccanismi e questo si può fare sulla base di un pregiudizio teorico. Nelle *Institutions* tale ragionamento viene solo accennato, ipotizzando una causa meccanica – nelle vesti di una “materia sottile intermedia” (§395) – e rilanciando ai colleghi la sfida di investigare ulteriormente questo mistero. Così facendo, du Châtelet chiarisce la propria posizione in merito all’interazione gravitazionale, che deve basarsi sui principi della Meccanica. Circa il Newtonianismo, poi, se si estende lo sguardo a quanto osservato dei *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* (cfr. 3.2.2), così come alla considerazione che i coevi avevano della scienziata, si può intuire che il maggior contributo newtoniano prodotto da du Châtelet è proprio il trattato pubblicato postumo nel 1759. Pertanto, al fine di capire la reale estensione del suo operato nel divulgare le teorie di Newton, sarebbe cruciale esaminare anche questa seconda opera.

In riferimento al contesto storico introdotto nel secondo capitolo, l’atteggiamento della marchesa è senz’altro singolare: a differenza della maggior parte degli scienziati del tempo – soprattutto in Francia e in Inghilterra – ella non si schiera in modo idolatrico dalla parte di uno dei grandi pensatori (tra Cartesio, Newton e Leibniz), né incoraggia comportamenti di stampo nazionalista; di tutti e tre elogia alcuni aspetti, come si è osservato nel quarto capitolo, pur prediligendo l’impostazione metafisica e dinamica del tedesco (la coesistenza di più prospettive è stata rimarcata specialmente nel paragrafo 4.2.2, circa la natura ontologica di spazio e tempo). Tutto ciò è ben chiarito nelle intenzioni incluse nel Preambolo: “La ricerca della verità è la sola cosa nella quale non dee prevalere l’amor della vostra Nazione.”¹¹¹ Dei newtoniani, ad esempio, critica l’esagerata condotta da seguaci, che li ha portati ad esasperare le teorie di Newton; proprio la loro fede incondizionata nella formula di attrazione gravitazionale ha fatto sì che essi non notassero i limiti della propria conoscenza scientifica. Al contrario, du Châtelet si esprime più volte in modo cauto, esplicitando che per diversi fenomeni non erano ancora conosciute, al tempo, le leggi fisiche.

Ciononostante, proprio riguardo agli atteggiamenti di fanatismo, la marchesa non si rende conto di esserne vittima; non tanto in relazione al Newtonianismo, quanto piuttosto al dibattito sulle forze vive. Come si è visto in modo estensivo nel paragrafo 4.5, infatti, ella supporta pienamente il pensiero di Leibniz e Bernoulli, non riuscendo a cogliere la validità della posizione degli “Avversari”. Pur citando esiti sperimentali che di per sé presentano già una descrizione valida della quantità di moto come misura della forza motrice (Hermann, ‘s Gravesande), la scienziata non vuole ammetterla come grandezza fisica. Per di più, la sua ostinazione la porta a commettere lo stesso errore di Leibniz, ovvero quello di credere che anche negli

¹¹¹Du Châtelet, E. (1743). *Instituzioni di Fisica di Madama la Marchesa du Chastellet Indiritte a suo Figliuolo*. Traduzione dal Linguaggio Francese nel Toscano, accresciuta con la *Dissertazione sopra le Forze Motrici di M. De Mairan*, p. 6.

urti anelastici la *vis viva* (archetipo dell'energia cinetica) sia conservata.

Inoltre, si è notato in più occasioni che le argomentazioni in favore della forza viva sono state riportate tramite alcuni esempi numerici, ritenuti sufficienti, dall'autrice, per convincere i lettori. Ciò malgrado, come si è precisato nel paragrafo 5.2.1, questa pratica dimostrativa è fragile e non a caso molto diversa da quella solitamente adottata nelle discipline fisico-matematiche moderne. A partire da questo metodo impiegato da du Châtelet, è stato poi possibile addentrarsi nel carteggio con de Mairan, osservando il modo di obiettare e contestare il pensiero scientifico tra fisici dell'epoca. Proprio questo scambio epistolare pubblico con il segretario dell'Académie ha inoltre messo in luce la rilevanza ricoperta dalla marchesa in merito alla controversia sulle forze vive: nel paragrafo 5.1.1 è stata riportata l'opinione di alcuni giornali del tempo, che hanno riconosciuto a du Châtelet il merito di aver riaperto il dibattito a riguardo, almeno in Francia. Nel complesso, il testo delle *Institutions* si colloca cronologicamente nella fase finale della disputa sulle forze vive (cfr. 2.2.3), risultando comunque importante e apprezzato soprattutto in Italia e in Germania (cfr. 5.2.1).

Come si è precisato in precedenza, l'opera non presenta delle tesi innovative, nemmeno riguardo alla *vis viva*, ma – al pari delle leggi del moto e del Newtonianismo – offre uno spaccato delle argomentazioni cardine del dibattito e permette ai lettori di comprendere lo stato della discussione (anche se tratteggiandolo in modo fazzioso). Questo aspetto si ritiene particolarmente affascinante in ottica didattica: fornendo una narrazione più completa e veritiera dello sviluppo dei concetti di forza, quantità di moto, energia cinetica e, più in generale, delle leggi di conservazione, si potrebbero appassionare maggiormente gli studenti alla materia e dar loro la possibilità di capire che la Fisica è stata costruita in tempi lunghi e attraverso dibattiti ed errori (cfr. 5.2.2).

Questa è solo una delle potenzialità che la Storia della Fisica mette a disposizione delle pratiche d'insegnamento: un altro punto di vista è quello legato alla correlazione tra le rappresentazioni mentali di du Châtelet (e di altri fisici del passato) e quelle degli studenti. Comparando quindi il processo di cambiamento concettuale della Fisica in quanto comunità storica con quello di ciascun ragazzo, si potrebbe far capire agli alunni che le difficoltà che sperimentano nella comprensione di alcuni concetti sono assolutamente naturali e comuni a molte altre persone – anche a quelle che, nella loro epoca, erano le più colte in ambito scientifico. Tutto ciò può contribuire a ridurre l'ansia e la frustrazione nell'apprendimento, oltre a rendere la Fisica più umana e meno “perfetta”, come spesso appare nei libri di testo; proprio la narrazione utilizzata nei manuali scolastici contribuisce a delineare un'idea falsata delle Scienze, illustrate “a tappe”, che quasi sempre coincidono con i successi principali – ovvero formule e scoperte rivelatesi poi corrette. Compatibilmente con il tempo a disposizione e con il livello di preparazione dei ragazzi, sarebbe opportuno includere alcuni *step* intermedi nel racconto della storia delle discipline

scientifiche.

Da ultimo, sempre a questo riguardo, si spera che questo lavoro di ricerca abbia mostrato quanto sia importante dare voce pure alle figure di scienziate che hanno fatto parte dell'evoluzione del pensiero. Pur con possibilità e risultati diversi e spesso limitati, esse sono riuscite a contribuire al progresso della Fisica e di altre discipline e meritano quindi di ricevere maggiore attenzione, focalizzandosi sui loro contributi scientifici effettivi, debitamente contestualizzati.

7 Bibliografia

Riferimenti bibliografici

- Balacheff, N. (1988). Aspects of proof in pupils' practice of school mathematics. In D. Pimm (Ed.), *Mathematics, teachers and children* (pp. 216-235). Londra: Hodder & Stoughton.
- Benson, M. S. (1935). *Women in Eighteenth-Century America*. New York: Columbia University Press.
- Bernardi, G. (2016). *The Unforgotten Sisters: Female Astronomers and Scientists before Caroline Herschel (Popular Astronomy)*. Springer.
- Bernstein, H. R. (1981). Passivity and Inertia in Leibniz's Dynamics. *Studia Leibnitiana*, 13(1), 97–113.
- Besterman, T. (1958). *Les lettres de la marquise Du Châtelet*, Vol. I. Ginevra: Institut et Musée Voltaire.
- Bodanis, D. (2006). *Passionate Minds: The Great Love Affair of the Enlightenment*. New York: Crown.
- Brown, D. E. (1989). Students' concept of force: The importance of understanding Newton's third law. *Physics Education*, 24, 353-387.
- Calinger, R. (1969). The Newtonian-Wolffian Controversy: 1740-1759. *Journal of the History of Ideas*, 30(3), 319–330.
- Calinger, R. (1979). Kant and Newtonian Science: The Pre-Critical Period. *Isis*, 70(3), 349–362.
- Carboncini, S. (1987). L'Encyclopédie et Christian Wolff. A propos de quelques articles anonymes. *Les Etudes Philosophiques*, 4, 489–504.
- Cardillo, P. (2010, aprile). Un po' di gossip: Marie-Anne Pierrette Paulze. Una donna e due geni per mariti. *La Chimica & l'Industria*, pp. 92-98.
- Cardwell, D. S. L. (1967). Some Factors in the Early Development of the Concepts of Power, Work and Energy. *The British Journal for the History of Science*, 3(3), 209–224.
- Casadio C., Grimellini Tomasini, N., & Pecori Balandi, B. (1991). Il concetto di forza. In N. Grimellini Tomasini & G. Segrè (Eds.), *Conoscenze scientifiche*.

- Le rappresentazioni mentali degli studenti* (pp. 139-183). Scandicci: La Nuova Italia Editrice.
- Casini, P. (1988). Newton's "Principia" and the Philosophers of the Enlightenment. *Notes and Records of the Royal Society of London*, 42(1), 35–52.
- Cavazza, M. (2002). The Institute of Science of Bologna and the Royal Society in the Eighteenth Century. *Notes and Records of the Royal Society of London*, 56(1), 3–25.
- Cavazza, M. (2006). Una donna nella repubblica degli scienziati, Laura Bassi e i suoi colleghi. In R. Simili (Ed.), *Scienza a due voci* (pp. 61-85). Firenze: L. S. Olschki.
- Cavazza, M. (2012). Il laboratorio di casa Bassi Veratti. In L. Cifarelli & R. Simili (Eds.), *Laura Bassi. Emblema e primato nella scienza del Settecento* (pp. 103-188). Bologna: Compositori.
- Cavazza, M. (2015). The Biographies of Laura Bassi. In P. Govoni & Z. A. Franceschi (Eds.), *Writing about Lives in Science: (Auto)Biography, Gender, and Genre* (pp. 67-86). Gottinga: V & R Unipress.
- Cessi, U. (1901). Una dottoressa rodigina del sec. XVIII. Nuove notizie e documenti, *Ateneo Veneto*, XXXIV.
- Clement, J. J. (1982). Students' preconceptions in introductory mechanics. *American Journal of Physics*, 50, 66-71.
- Clinton, K. B. (1975). Femme et Philosophe: Enlightenment Origins of Feminism. *Eighteenth-Century Studies*, 8(3), 283–299.
- Cohen, I. B. (1955). Isaac Newton. *Scientific American*, 193(6), 73–83.
- Cohen, I. B., & Pemberton, H. (1963). Pemberton's Translation of Newton's "Principia", with Notes on Motte's Translation. *Isis*, 54(3), 319–351.
- Cohen, I. B. (1987). The Newtonian Scientific Revolution and Its Intellectual Significance. *Bulletin of the American Academy of Arts and Sciences*, 41(3), 16–42.
- Cohen, I. B. (1987). Newton's Third Law and Universal Gravity. *Journal of the History of Ideas*, 48(4), 571–593.
- Cook, A. (1991). Edmond Halley and Newton's "Principia". *Notes and Records of the Royal Society of London*, 45(2), 129–138.

- Cosmacini, P. (2023). *La ragazza con il compasso d'oro. La straordinaria vita della scienziata Émilie du Châtelet*. Palermo: Sellerio.
- D'Amore B. (2006). Oggetti matematici, trasformazioni semiotiche e senso. In B. D'Amore & S. Sbaragli (Eds.), *Il convegno del ventennale*. Atti del Convegno Nazionale "Incontri con la Matematica" n. 20. Castel San Pietro Terme, 3-4-5 novembre 2006. Bologna: Pitagora. 15-22.
- Davies, E. B. (2009). Some Reflections on Newton's "Principia". *The British Journal for the History of Science*, 42(2), 211–224.
- De Gandt, F. (1995). *Force and geometry in Newton's "Principia"*. Princeton: Princeton University Press.
- diSessa, A. A. (1988). Knowledge in Pieces. In G. Forman & P. Pufall (Eds.), *Constructivism in the Computer age* (pp. 49-70). New Jersey: Lawrence Erlbaum Publishers.
- diSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10(2&3), 105-225.
- Dunlop, K. (2012). The mathematical form of measurement and the argument for Proposition I in Newton's "Principia". *Synthese*, 186(1), 191–229.
- Duval, R. (1991). Structure du raisonnement déductif et apprentissage de la démonstration. *Educational studies in mathematics*, 22(3), 233-261.
- Elena, A. (1991). "In lode della filosofessa di Bologna": An Introduction to Laura Bassi. *Isis*, 82(3), 510–518.
- Epstein, J. L. (1979). Voltaire's Myth of Newton. *Pacific Coast Philology*, 14, 27–33.
- Feingold, M., & Shank, J. B. (2010). The War on Newton [Review of "The Newton Wars and the Beginning of the Enlightenment"]. *Isis*, 101(1), 175–186.
- Fernie, J. D. (2007). Marginalia: The Inimitable Caroline. *American Scientist*, 95(6), 486–488.
- Findlen, P. (1993). Science as a Career in Enlightenment Italy: The Strategies of Laura Bassi. *Isis*, 84(3), 441–469.
- Fuschini, E., Grimellini Tomasini, N., & Pecori Balandi, B. (1984). Students' frameworks in mechanics: a study on freshmen. In *Atti del Convegno GIREP*. Utrecht.

- Galli, M. (1956). Sulle idee di Leibniz circa la legge di conservazione delle forze vive. *Bollettino dell'Unione Matematica Italiana*, Serie 3, Vol. 11, n.3, 445-456.
- Gardiner, L. (1984). Women in Science. In S. I. Spencer (Ed.), *French Women and the Age of Enlightenment* (pp. 181–194). Indiana University Press.
- Gelbart, N. R. (2016). Adjusting the Lens: Locating Early Modern Women of Science. *Early Modern Women*, 11(1), 116–127.
- Gelbart, N. R. (2021). Mathematician and Philosopher: The “Celebrated M.lle Ferrand” (1700–1752), in *Minerva’s French Sisters: Women of Science in Enlightenment France* (pp. 16-57). New Haven: Yale University Press.
- Goldberg, D. (1987). In Celebration: Newton’s “Principia”, 1687–1987. *The Mathematics Teacher*, 80(9), 711–714.
- Govoni, P. (2015). Crafting Scientific (Auto)Biographies. In P. Govoni & Z. A. Franceschi (Eds.), *Writing about Lives in Science: (Auto)Biography, Gender, and Genre* (pp. 8-30). Gottinga: V & R Unipress.
- Greenberg, J. L. (1986). Mathematical Physics in Eighteenth-Century France. *Isis*, 77(1), 59–78.
- Hagenbruber, R. (2011). Émilie du Châtelet Between Leibniz and Newton: The Transformation of Metaphysics. In R. Hagenbruger (Ed.), *Émilie du Châtelet Between Leibniz and Newton* (pp. 1-60). Londra: Springer.
- Hall, A. R. (1988). Newtonianism after 300 Years. *Notes and Records of the Royal Society of London*, 42(1), 5–9.
- Hankins, T. L. (1965). Eighteenth-Century Attempts to Resolve the "Vis viva" Controversy. *Isis*, 56(3), 281–297.
- Haraway, D. (1984). Class, Race, Sex, Scientific Objects of Knowledge: A Socialist-Feminist Perspective on the Social Construction of Productive Nature and Some Political Consequences. In V. Haas & C. Perrucci (Eds.), *Women in Scientific and Engineering Professions* (pp. 212-229). Ann Arbor: University of Michigan Press.
- Healy, L., & Hoyles, C. (2000). A study of proof conceptions in algebra. *Journal for research in mathematics education*, 31(4), 396-428.
- Hellingman, C. (1989). Do forces have twin brothers? *Physics Education*, 24, 36-40.

- Herschel, C. (1787). An Account of a New Comet. In a Letter from Miss Caroline Herschel to Charles Blagden, M. D. Sec. R. S. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 77, 1–3.
- Hestenes, D., Wells, M., & Swackhamer, G. (1992). Force Concept Inventory. *Physics Teacher*, 30, 141–158.
- Higgitt, R. (2019). ‘Greenwich near London’: the Royal Observatory and its London networks in the seventeenth and eighteenth centuries. *The British Journal for the History of Science*, 52(2(193)), 297–322.
- Honeyman, K., & Goodman, J. (1991). Women’s Work, Gender Conflict, and Labour Markets in Europe, 1500-1900. *The Economic History Review*, 44(4), 608–628.
- Hutton, S. (2004). Émilie du Châtelet’s “Institutions de physique” as a document in the history of French Newtonianism. *Studies in History and Philosophy of Science*, 35, 515-531.
- Hutton, S. (2022). Émilie du Châtelet and Italy. The Italian Translation of Her Institutions Physiques and the Issue of the Forces Vives. In R. E. Hagengruber (Ed.) *Époque Émilienne. Women in the History of Philosophy and Sciences* (pp. 311-326), Vol. 11. Cham: Springer.
- Iltis, C. (1971). Leibniz and the "Vis Viva" Controversy. *Isis*, 62(1), 21–35.
- Iltis, C. (1977). Madame du Châtelet’s Metaphysics and Mechanics. *Studies in History and Philosophy of Science*, 8, 29-48.
- Irzik, G., & Nola, R. (2010). A Family Resemblance Approach to the Nature of Science for Science Education. *Science & Education* 20(7), 591-607.
- Jacob, M. C. (1977). Newtonianism and the Origins of the Enlightenment: A Reassessment. *Eighteenth-Century Studies*, 11(1), 1–25.
- Janiak, A. (2021). Émilie du Châtelet’s Break from the French Newtonians. *Revue d’histoire Des Sciences*, 74(2), 265–296.
- Jeffares, N. (2024). La Tour, “M.lle Ferrand méditant sur Newton”. <http://www.pastellists.com>. Accesso il 27 febbraio 2025.
- Kawashima, K. (2004). “Birth of Ambition: Madame Du Châtelet’s Institutions de Physique.” *Historia Scientiarum, International Journal of the History of Science Society of Japan*, 2(14), 49–66.

- Keller, E. F. (1995). Gender and Science: Origin, History, and Politics. *Osiris*, 10, 26–38.
- Laudan, L. L. (1968). The "Vis viva" Controversy, a Post-Mortem. *Isis*, 59(2), 130–143.
- Lawson, R. A., & McDermott, L. C. (1987). Student understanding of the work-energy and impulse-momentum theorems. *American Journal of Physics*, 55(9), 811–817.
- Levrini, O. (2004). Osservazione e formalizzazione: Il ruolo dei problemi reali per entrare nel gioco della conoscenza in fisica. *La Fisica nella Scuola*, XXXVII, 3 suppl., 61–70.
- Lindner, U. (2009). Gendering Historiography, 7–9 November 2007, Hamburg. *History Workshop Journal*, 68, 310–314.
- Logan, G. B. (1994). The Desire to Contribute: An Eighteenth-Century Italian Woman of Science. *The American Historical Review*, 99(3), 785–812.
- Logan, G. B. (1998). *Italian women in science from the Renaissance to the Nineteenth Century*. PhD Ottawa.
- Lynn, M. R. (2002). The Fashion for Physics: Public Lecture Courses in Enlightenment France. *The Historian*, 64(2), 335–350.
- Maglo, K. (2008). Madame Du Châtelet, l'Encyclopédie et la philosophie des sciences. In U. Kölving & O. Courcelle (Eds.), *Émilie du Châtelet: éclairages et documents nouveaux* (pp. 255–266). Parigi: Ferney-Voltaire, Centre international d'étude du XVIIIe siècle.
- Mayfield, B. (2013). Women and Mathematics in the Time of Euler. *The College Mathematics Journal*, 44(2), 82–88.
- Mazzotti, M. (2004). Newton for Ladies: Gentility, Gender and Radical Culture. *The British Journal for the History of Science*, 37(2), 119–146.
- Mazzotti, M. (2008). Mme Du Châtelet académicienne de Bologne. In U. Kölving & O. Courcelle (Eds.), *Émilie Du Châtelet, éclairages et documents nouveaux* (pp. 121–126). Ferney: Publications du Centre international d'étude du XVIIIe siècle.
- Mazzotti, M. (2015). Rethinking Scientific Biography: The Enlightenment of Maria Gaetana Agnesi. In P. Govoni & Z. A. Franceschi (Eds.), *Writing about Lives in Science: (Auto)Biography, Gender, and Genre* (pp. 8–30). Gottinga: V & R Unipress.

- Mazzotti, M. (2019). Newton in Italy. In H. Pulte & S. Mandelbrote (Eds.), *The Reception of Newton in Europe* (pp. 159-178). Bloomsbury: Bloomsbury Publishing.
- Muurling, S. (2021). Women's Roles, Institutions, and Social Control. In S. Muurling (Ed.), *Everyday Crime, Criminal Justice and Gender in Early Modern Bologna* (pp. 25-43). Brill.
- Nature. (2021, 25 marzo). *Women must not be obscured in science's history*. Vol. 591, pp. 501-502.
- Naylor, R. H. (1974). Galileo and the Problem of Free Fall. *The British Journal for the History of Science*, 7(2), 105-134.
- Ogilvie, M., & Harvey, J. (2000). *Nicole-Reine Lapaute, Biographical Dictionary of Women in Science*. New York: Routledge.
- Osborne, J. (1984). Children's dynamics. *The Physics Teacher*, 22(8), 504-508.
- Pacey, A. J., & S. J. Fisher. (1967). Daniel Bernoulli and the "vis viva" of Compressed Air. *The British Journal for the History of Science*, 3(4), 388-392.
- Papineau, D. (1977). The "Vis viva" Controversy: Do Meanings Matter? *Studies in History and Philosophy of Science*, 8(2), 111-142.
- Pell, H. (2020). Idea Bank: Incorporating the Stories of Women, People of Color, and LGBTQ+ Scientists Into the Physics Classroom. *The Science Teacher*, 87(7), 26-27.
- Petrovich, V. C. (1999). Women and the Paris Academy of Sciences. *Eighteenth-Century Studies*, 32(3), 383-390.
- Pető, A. (2009). From Visibility to Analysis: Gender and History. In C. Salvaterra & B. Waaldijk (Eds.), *Paths to Gender. European Historical Perspectives on Women and Men* (pp. 1-9). Pisa: Uniplus.
- Piggott, H. E. (1934). Some Ideas on Energy and Momentum. *The Mathematical Gazette*, 18(230), 228-244.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W.A. (1982). Accommodation of a Scientific Conception Toward a Theory of Conceptual Change. *Science Education*, 66, 211-227.
- Pourciau, B. (2009). Proposition II (Book I) of Newton's "Principia". *Archive for History of Exact Sciences*, 63(2), 129-167.

- Reichenberger, A. (2021). Émilie Du Châtelet on Space and Time. *Revue d'histoire Des Sciences*, 74(2), 331–356.
- Reid, M., & Miles, H. (1748). An Essay on Quantity; Occasioned by Reading a Treatise, in Which Simple and Compound Ratio's are Applied to Virtue and Merit, by the Rev. Mr. Reid; Communicated in a Letter from the Rev. Henry Miles D.D. & F.R.S. to Martin Folkes Esq; Pr. R.S. *Philosophical Transactions (1683-1775)*, 45, 505–520.
- 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.
- Rey, A.-L. (2021). Présentation: L'épistémologie inventive d'Émilie Du Châtelet. *Revue d'histoire Des Sciences*, 74(2), 235–264.
- Rey, A.-L. (2024). Émilie du Châtelet's Institutions de Physique: a Leibnizian-Newtonian Synthesis? A methodological approach. *Journal of Physics: Conf. Ser.* 2877.
- Roe, G. (2018). A Sheep in Wolff's Clothing: Émilie du Châtelet and the Encyclopédie. *Eighteenth-Century Studies*, 51(2), 179–196.
- Rossi, C. (1984). *I concetti di forza ed energia nelle rappresentazioni mentali dei bambini*. Tesi di laurea presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna.
- Scerri, B. (2022). 'Instructing herself by fad or fancy': Depictions and Fictions of Connoisseuses and Femmes Savantes in Eighteenth-Century Paris. In B. Vanacker & L. van Deinsen (Eds.), *Portraits and Poses: Female Intellectual Authority, Agency and Authorship in Early Modern Europe* (pp. 185–212). Leuven University Press.
- Scherr, R. E., & Robertson, A. D. (2017). Unveiling Privilege to Broaden Participation. *Physics Teacher*, 55(7), 394-397.
- Schiebinger, L. (1987). Maria Winkelmann at the Berlin Academy: A Turning Point for Women in Science. *Isis*, 78(2), 174–200.
- Schiebinger, L. (1987). The History and Philosophy of Women in Science: A Review Essay. *Signs*, 12(2), 305–332.
- Schiebinger, L. (1988). Feminine Icons: The Face of Early Modern Science. *Critical Inquiry*, 14(4), 661–691.

- Settle, T. B. (1961). An Experiment in the History of Science. *Science*, 133(3445), 19–23.
- Sherin, B. (2019). *Where are we? Syntheses and Synergies in Science Education Research and Practice*. Plenary lecture, ESERA 2019 Conference, Bologna, 26-30 Agosto 2019.
- Simeoni, L. (1947). *Storia della Università di Bologna*. Bologna: Zanichelli, Vol. II.
- Simili, R. (2008). *In punta di penna. Donne di scienza e di cultura fra cosmopolitismo e intimità meridionale. La scienza nel mezzogiorno dopo l'Unità d'Italia*. Napoli: Rubettino.
- Sobel, D. (1995). *Longitudine. Come un genio solitario cambiò la storia della navigazione*. Rizzoli.
- Solleveld, F. (2022). The Republic of Letters Mapping the Republic of Letters: Jacob Brucker's Pinacotheca (1741–1755) and Its Antecedents. In K. Scholten, D. van Miert, & K. A. E. Enenkel (Eds.), *Memory and Identity in the Learned World: Community Formation in the Early Modern World of Learning and Science* (pp. 156–196). Brill.
- Stan, M. (2023). Newtonianism and the Physics of Du Châtelet's "Institutions de Physique". In A. M. Roos & G. Manning (Eds.), *Collected Wisdom of the Early Modern Scholar: Essays in Honor of Mordechai Feingold* (pp. 277–297). Springer.
- Stanley, M. (2016). Why should physicists study history? *Physics Today*, 69 (7), 38–44.
- Stewart, L. (1981). Samuel Clarke, Newtonianism, and the Factions of Post-Revolutionary England. *Journal of the History of Ideas*, 42(1), 53–72.
- Stewart, L. (1986). The Selling of Newton: Science and Technology in Early Eighteenth-Century England. *Journal of British Studies*, 25(2), 178–192.
- Terrall, M. (2004). "Vis viva" Revisited. *History of Science*, 42, 189–209.
- van Besouw, J. (2017). The wedge and the "vis viva" controversy: how concepts of force influenced the practice of early eighteenth-century mechanics. *Archive for History of Exact Sciences*, 71(2), 109–156.
- Vicentini, A. (2019). Popularizing and Translating Science in 18th-century Europe: Francesco Algarotti's Newtonianismo per le dame and its English-language Editions (1737-1772). *Riviste Online Sapienza*.

- Voltaire. (1965). *Mémoires pour server à la vie de M. de Voltaire, écrits par lui-même, suivis de Lettres à Frédéric II*, edito da J. Brenner. Parigi: Mercure de France.
- von Kulesa, R., & Gehrman, K. (2022). Between Defence and Affirmation: The Discursive Self-Representation of Eighteenth-Century Women Authors in France and Italy. In B. Vanacker & L. van Deinsen (Eds.), *Portraits and Poses: Female Intellectual Authority, Agency and Authorship in Early Modern Europe* (pp. 73–92). Leuven University Press.
- Watson, R. A. (1966). *The Downfall of Cartesianism, 1673-1712*. L'Aia: Martinus Nijhoff.
- Watts, D. M., & Zylbersztajn, A. (1981). A survey of some children's ideas about force. *Physics Education*, 16, 360-371.
- Wilson, C. (1993). Clairaut's calculation of the eighteenth-century return of Halley's comet. *Journal of Historical Astronomy*. 24(1), 1-15.
- Winterburn, E. (2015). Caroline Herschel: Agency And Self-Presentation. *Notes and Records of the Royal Society of London*, 69(1), 69–83.
- Whaley, L. (2022). Navigating Enlightenment Science: The Case of Marie Geneviève-Charlotte Darlus Thiroux D'Arconville and Gabrielle Émilie Le Tonnelier De Breteuil and the Republic of Letters. In C. G. Jones, A. E. Martin & A. Wolf (Eds.), *The Palgrave Handbook of Women and Science since 1660* (pp. 47-66). Palgrave Macmillan, Cham.
- Whittaker, E. T. (1929). What Is Energy? *The Mathematical Gazette*, 14(200), 401–406.
- Williams, K. (2000). Understanding, Communication Anxiety, and Gender in Physics: Taking the Fear Out of Physics Learning. *Journal of College Science Teaching*, 30(4), 232–237.
- Yale, E. (2023). Teaching women's work and thought in undergraduate history of science courses. *History Compass*, 21(9), e12780. <https://doi.org/10.1111/hic3.12780>
- Zinsser, J. P. (2001). Translating Newton's "Principia": The Marquise du Châtelet's Revisions and Additions for a French Audience. *Notes and Records of the Royal Society of London*, 55(2), 227–245.
- Zinsser, J. P. (2006). *La dame d'esprit: a Biography of the Marquise Du Châtelet*. New York and London: Viking/Penguin.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Zinsser, J. P. (2007). Mentors, the Marquise Du Châtelet and Historical Memory. *Notes and Records of the Royal Society of London*, 61(2), 89–108.

Zinsser, J. P. (2009). Feminist Biography: A Contradiction in Terms? *The Eighteenth Century*, 50(1), 43–50.

8 Ringraziamenti

Al prof. Bertozzi, per l'entusiasmo con cui ha accolto la mia proposta di ricerca e per la cura che ha dedicato al progetto, durante tutte le fasi di sviluppo. Perché mi ha aperto all'amore per la Storia della Fisica, che porterò con me in tutte le aule in cui entrerò.

A mamma e papà, perché con questa tesi si conclude un percorso iniziato con un grembiule e uno zaino più grande di me: in tutti questi anni siete stati al mio fianco, ascoltando, incoraggiando e gioendo. Grazie per avermi permesso di intraprendere questa strada e per essere stati la mia prima Casa, a cui posso sempre tornare.

A Marta, perché sei l'abbraccio, gli occhi cercati e poi trovati, quello che sento e non si vede. Perché sei Casa e Famiglia. Perché il tuo entusiasmo ed il tuo affetto mi permettono di intuire cosa sia la vera Gratitude. Perché sei tenacia e tenerezza. Perché "quando sto con te sono più lucido e produco di più" e questa tesi ne è la prova.

Alle sorelle, ai cognati e ai nipoti, perché siete boccata d'aria fresca, motivo di stupore e nuova energia. Perché mi mostrate quanto sia bello stare insieme, nelle diversità, e perché mi ricordate quanto sia preziosa la scoperta.

A Francesco, per la sincerità e le risate, la quotidianità e l'intesa. Perché ci sei sempre stato, nei massimi e nei minimi, aiutandomi a trovare un equilibrio.

Ad Alberto, per l'ascolto discreto che non mi hai mai fatto mancare, nonostante i chilometri di distanza. Per l'empatia e la profondità.

A Lorenz, per la vitalità che mi infondi e perché sei sempre stato uno slancio verso le novità. Per tutti i racconti e per la tua generosità.

A Lucia, per i pianti e le urla di gioia. Per i rimandi emotivi che mi danno la possibilità di gustare veramente i traguardi. Per la felicità con cui mi accogli.

A Teo, perché vedi che alla fine la stiamo davvero formando questa band? Per la tua dolcezza e per la complicità.

A Chiara e Dario, perché siete premura e prossimità. Perché mi date speranza per il futuro e mi permettete di cogliere la bellezza del presente.

A Tommy, Federico, Sara, Giovanni, Anna, Sandro, Fe, Daniela, Checco, Chiara, perché siete condivisione, allegria e ottima compagnia, per tutte le occasioni.

Alla Dark Bolo Gang, perché siete stati il primo vero respiro di Università. Per la passione che avete riacceso in me, per i confronti, i lavori di gruppo, gli esami preparati assieme e le occasioni di vivere nuove esperienze.