

Comprende



Maurizio Spurio

Meccanica Newtoniana

per un approccio propedeutico alla fisica moderna



Accedi all'ebook e ai contenuti digitali

Espandi le tue risorse
un libro che **non pesa**
e si **adatta** alle dimensioni
del **tuo lettore!**

▼
COLLEGATI AL SITO
EDISES.IT

▼
ACCEDI AL
MATERIALE DIDATTICO

▼
SEGUI LE
ISTRUZIONI

Utilizza il codice personale contenuto nel riquadro per registrarti al sito **edises.it** e attiva la tua **area riservata**. Potrai accedere alla **versione digitale** del testo e a ulteriore **materiale didattico**.

Scopri il tuo **codice personale** grattando delicatamente la superficie

Il volume NON può essere venduto, né restituito, se il codice personale risulta visibile.
L'accesso al **materiale didattico** sarà consentito per **18 mesi**.

Per attivare i **servizi riservati**, collegati al sito **edises.it** e segui queste semplici istruzioni

▼
Se sei registrato al sito

- clicca su *Accedi al materiale didattico*
- inserisci email e password
- inserisci le ultime 4 cifre del codice ISBN, riportato in basso a destra sul retro di copertina
- inserisci il tuo **codice personale** per essere reindirizzato automaticamente all'area riservata

▼
Se non sei già registrato al sito

- clicca su *Accedi al materiale didattico*
- registrati al sito **edises.it**
- attendi l'email di conferma per perfezionare la registrazione
- torna sul sito **edises.it** e segui la procedura già descritta per *utenti registrati*



Ulteriori materiali e strumenti didattici sono accessibili dalla propria **area riservata** secondo la procedura indicata nel frontespizio.

Dalla sezione **materiali e servizi** della tua area riservata potrai accedere a:

- **Ebook**: versione digitale del testo in formato epub, standard dinamico che organizza il flusso di testo in base al dispositivo sul quale viene visualizzato. Fruibile mediante l'applicazione gratuita Bookshelf, consente una visualizzazione ottimale su lettori e-reader, tablet, smartphone, iphone, desktop, Android, Apple e Kindle Fire.
- **Software di simulazione**: un vastissimo database di quesiti a risposta multipla per effettuare esercitazioni sull'**intero programma** o su **argomenti specifici**.

L'accesso ai contenuti digitali sarà consentito per **18 mesi**.

Maurizio Spurio

Meccanica Newtoniana

per un approccio propedeutico alla fisica
moderna



Maurizio Spurio
Meccanica Newtoniana

Copyright © 2023, EdiSES Edizioni S.r.l. – Napoli

9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

2027 2026 2025 2024 2023

Le cifre sulla destra indicano il numero e l'anno dell'ultima ristampa effettuata

A norma di legge è vietata la riproduzione, anche parziale, del presente volume o di parte di esso con qualsiasi mezzo.

L'Editore

L'Editore ha effettuato quanto in suo potere per richiedere il permesso di riproduzione del materiale di cui non è titolare del copyright e resta comunque a disposizione di tutti gli eventuali aventi diritto.

Stampato presso
PrintSprint S.r.l. – Napoli

per conto della
EdiSES Edizioni S.r.l. – Piazza Dante Alighieri, 89 – Napoli

www.edises.it
assistenza.edises.it

ISBN 978 88 3623 145 4

I curatori, l'editore e tutti coloro in qualche modo coinvolti nella preparazione o pubblicazione di quest'opera hanno posto il massimo impegno per garantire che le informazioni ivi contenute siano corrette, compatibilmente con le conoscenze disponibili al momento della stampa; essi, tuttavia, non possono essere ritenuti responsabili dei risultati dell'utilizzo di tali informazioni e restano a disposizione per integrare la citazione delle fonti, qualora incompleta o imprecisa.

Realizzare un libro è un'operazione complessa e, nonostante la cura e l'attenzione poste dagli autori e da tutti gli addetti coinvolti nella lavorazione dei testi, l'esperienza ci insegna che è praticamente impossibile pubblicare un volume privo di imprecisioni. Saremo grati ai lettori che vorranno inviarci le loro segnalazioni e/o suggerimenti migliorativi sulla piattaforma assistenza.edises.it

*Come ringraziamento al più grande didatta incontrato,
il prof. Attilio Forino.*

*Non ho delle pretese,
il merito l'è tutto
della scuola bolognese!
(G. Puccini: Gianni Schicchi, libretto di G. Forzano)*

Prefazione

Questo libro introduce i concetti e le applicazioni della meccanica classica nel formalismo Newtoniano pensando agli studenti di discipline scientifiche che proseguiranno i loro studi incontrando la fisica moderna.

La meccanica classica è la base di riferimento di ogni studio a livello universitario di discipline tecnico-scientifiche. Uno dei problemi che ho incontrato, quando ho iniziato a insegnare al corso di Meccanica per studenti del corso di laurea in Fisica, è la selezione di un libro di testo adeguato. Consultando i manuali esistenti, ho l'impressione che gli aspetti fondanti non siano sempre messi sufficientemente in evidenza. Questo ha come conseguenza che gli studenti universitari spesso si aspettano dal corso di Meccanica una ripetizione di quanto affrontato nelle scuole superiori, magari con un formalismo matematico più avanzato, e non la presentazione della teoria che è alle fondamenta anche della fisica moderna. In particolare, buona parte dei libri in commercio (sia quelli tradotti dall'inglese, sia quelli di autori italiani con edizioni rinnovate e ancora in stampa) pongono l'enfasi su applicazioni idealizzate su scala delle dimensioni umane. Una significativa frazione dei testi è occupata da esempi basati su argani, aste, piani inclinati,... e gli studenti spesso sono disorientati perché i concetti cardine sono annegati in un numero molto ampio di esempi artificiosi.

La dinamica Newtoniana non è solo uno strumento efficiente per la soluzione di problemi di fisica applicata e ingegneria, ma è una teoria affascinante ancorata alle domande di base poste sin dai tempi dei filosofi greci. Si pensi ai concetti di spazio, dello scorrere del tempo, di come effettuare misure e confrontarle con la realtà, di quali e cosa sono i principi fisici che regolano l'evoluzione dell'universo. Il mio scopo è stato quello di scrivere un testo di meccanica per incoraggiare gli studenti a pensare a questi aspetti fondamentali e per introdurre come, nella fisica moderna, verranno affrontati e talvolta risolti.

Esempi, applicazioni e il modo di ricavare un risultato da un problema sono aspetti estremamente importanti, sia per studenti delle scienze di base che per quelli indirizzati verso le discipline più tecniche. Tuttavia, ritengo che gli studenti dei corsi di laurea in Fisica, Matematica, Chimica e gli studenti di Ingegneria che affronteranno la fisica moderna potranno maggiormente avvantaggiarsi di un approccio in cui gli aspetti di meccanica classica vengano propedeuticamente tradotti in termini delle conoscenze attuali. Ad esempio, anche se all'epoca di Newton nulla si sapeva sulla struttura atomica della materia, è evidente che questa ha un ruolo decisivo sugli aspetti macroscopici coperti dalla Meccanica.

Quesiti, esempi ed esercizi tradizionali sono comunque importanti. Essi coesistono con esercizi più innovativi e sono inseriti alla fine di ogni capitolo. Nella versione a stampa, ogni quesito o esercizio riporta le soluzioni numeriche. La risoluzione argomentata è inserita in un sito web attraverso un link dinamico, in modo da invogliare lo studente a risolvere la prova individual-

mente prima di cercare la soluzione. Questa modalità non intralcia lo sviluppo sequenziale degli aspetti sostanziali riportati nel testo.

Il libro non ha lo stesso grado di difficoltà dal principio alla fine. Come la saga di Harry Potter inizia con lo stile di un libro per bambini quando il maghetto inizia la scuola di magia e finisce con i toni dark della tragedia della guerra civile dell'ultimo volume, qui i primi capitoli assumono che lo studente abbia le conoscenze di base delle scuole superiori, mentre i successivi recepiscono la crescita in corso e progressivamente utilizzano quanto acquisito nei paralleli corsi del semestre. Questo è vero anche per quesiti ed esercizi: negli ultimi capitoli, esercizi composti, dove è richiesto quanto introdotto in quelli precedenti, sono più frequenti.

La meccanica classica non è la teoria definitiva, sia nella versione Newtoniana qui riportata che nelle versioni Lagrangiana e Hamiltoniana che gli studenti incontreranno come passaggio intermedio prima della fisica moderna. La teoria ha avuto enorme successo (non solo per mandare l'uomo sulla Luna) ma anche crisi profonde che si sono evidenziate a partire dall'inizio del secolo scorso. Ho cercato di mettere il rilievo questi aspetti di successo e i limiti che porteranno agli sviluppi recenti. Il libro ovviamente non è un libro di storia della fisica, e non segue una rigorosa sequenza temporale di come le cose si sono susseguite da Galileo in poi. Non entro nelle diatribe e dispute (anche molto vivaci) sulle priorità delle scoperte. Tuttavia, ho talvolta riportato brevi cenni anagrafici dei principali protagonisti: sono solo utili per inquadrare i periodi storici in cui si sono svolti gli studi e recepire anche l'accelerazione avvenuta nelle scoperte scientifiche.

Un problema sentito è stato quello della scelta della notazione: con quale lettera indicare ciascuna delle grandezze fisiche introdotte. Alla fine, ho deciso di uniformare il testo allo standard ISO. Questo è l'acronimo di *International Organization for Standardization*, che indica la più importante organizzazione mondiale per la definizione di norme tecniche. In particolare, adotto lo standard ISO 80000 sulle grandezze e unità di misura https://it.wikipedia.org/wiki/ISO/IEC_80000. Alcune sezioni sono segnalati con il simbolo (*). Questo significa che la matematica coinvolta nel paragrafo è mediamente più complessa e l'argomento può essere affrontato in seconda lettura.

Il testo si basa sulle lezioni svolte al primo anno del corso di laurea in fisica dell'Università di Bologna, e bozze del testo hanno subito la revisione di molti studenti nonché di alcuni colleghi. Tuttavia imprecisioni, errori di battitura o errori più gravi possono sempre essere rimasti e sono grato a chiunque voglia segnalarceli. Per gli esercizi e quesiti, intendo ringraziare i colleghi che hanno contribuito con le esercitazioni del corso di Meccanica a elaborare, modificare, risolvere quelli qui proposti: il prof. L. Guiducci, il dr. Nicolò Masi, la dott.ssa Giulia Illuminati e il dr. Filippo Sala.

Maurizio Spurio, maurizio.spurio@unibo.it.
Bologna, Aprile 2023.

Indice

1	Grandezze fisiche e unità di misura	1
1.1	La Fisica e il metodo scientifico	1
1.2	Grandezze misurabili e il Sistema Internazionale	3
1.2.1	Misure di distanze	5
1.2.2	Misure di tempi	5
1.2.3	Misure di masse	6
1.3	Misure dirette e indirette	7
1.4	Spazio Euclideo	8
1.4.1	Spazio e tempo Newtoniano	9
1.5	Multipli e sottomultipli delle grandezze misurate	10
1.5.1	Dai pico ai tera	10
1.5.2	Le scale di distanze	11
1.5.3	Misure di masse fuori portata per le bilance	12
1.6	Sincronizzazione e disseminazione del tempo	12
1.7	Tempo cosmologico e misure	14
1.7.1	Misure di tempi senza fenomeni periodici	16
1.7.2	Datazione col radiocarbonio	18
1.8	Analisi Dimensionale	20
1.9	Quesiti ed esercizi	22
2	Grandezze vettoriali e operazioni coi vettori	27
2.1	Introduzione: scalari, vettori e tensori	27
2.2	Sistemi di riferimento cartesiani	28
2.2.1	Sistemi di riferimenti destrorsi e regola della mano destra	29
2.3	Rappresentazione dei vettori	30
2.3.1	Vettori in rappresentazione intrinseca	30
2.3.2	Vettori in rappresentazione cartesiana	30
2.3.3	Versori in sistemi di riferimento cartesiani	32
2.4	Operazioni sui vettori	33
2.4.1	Prodotto di uno scalare per un vettore	33

2.4.2	Somma e differenza di vettori	34
2.4.3	Prodotto scalare tra vettori	35
2.4.4	Prodotto vettoriale tra vettori.	37
2.5	Gli uguali non sono tutti uguali	39
2.6	Leggi e Principi, Fisica e Matematica	40
2.7	Quesiti	42
3	Cinematica della particella.....	45
3.1	Introduzione	45
3.2	Moto uniforme e moto uniformemente accelerato	46
3.3	Velocità e accelerazione	53
3.3.1	Legge oraria	54
3.3.2	Definizione di velocità.....	55
3.3.3	Definizione di accelerazione	55
3.3.4	Problema diretto della cinematica	56
3.3.5	Spostamento e percorso infinitesimo	56
3.3.6	Traiettoria e composizione dei moti	57
3.4	Il problema inverso della cinematica	58
3.5	Il moto circolare uniforme e non uniforme	59
3.5.1	Il moto circolare uniforme	60
3.5.2	La rappresentazione cartesiana	60
3.5.3	Moto circolare non uniforme	62
3.6	Coordinate polari piane	62
3.6.1	Moto circolare con versori co-moventi	62
3.6.2	Definizione di coordinate polari e cilindriche	63
3.7	Le coordinate intrinseche	65
3.8	Regole di Poisson per i versori mobili	66
3.9	Moto su traiettoria qualsiasi (*)	68
3.10	Quesiti ed esercizi	69
4	Le forze e la dinamica del punto materiale.....	73
4.1	Introduzione	73
4.2	La forza e la sua misura	75
4.2.1	Il peso e lo sforzo antropomorfico	75
4.2.2	Il dinamometro	76
4.2.3	Il peso come forza	77
4.3	La natura vettoriale della forza	79
4.4	Forze vincolari	81
4.5	Attrito di contatto tra solidi	82
4.6	La prima legge della dinamica	86
4.7	La seconda legge della Dinamica	87
4.8	Effetti cinematici di alcune forze.....	88
4.8.1	Il peso	88
4.8.2	Caduta con presenza di attrito viscoso	89
4.9	Oscillatori armonici	92

4.9.1	Il pendolo semplice	92
4.9.2	La forza elastica e l'oscillatore armonico	96
4.10	Cosa sappiamo oggi sulle forze	97
4.10.1	Interazioni fondamentali	97
4.10.2	Campi di forze	99
4.10.3	La freccia del tempo	100
4.11	Quesiti ed esercizi	101
5	Sistemi di riferimento in moto relativo	107
5.1	Principio di relatività Galileiana	107
5.2	Sistemi di riferimento inerziali	110
5.3	Sistemi di riferimento non inerziali	113
5.4	Esempi di forze fittizie in sistemi non inerziali	117
5.4.1	Dinamica in un mezzo accelerato	117
5.4.2	Dinamica in un mezzo ruotante	119
5.4.3	Accelerazione di trascinamento della Terra	120
5.5	Forza di Coriolis nell'esperimento di Guglielmini (*)	121
5.6	La forza di Coriolis per il moto dei fluidi terrestri	125
5.7	Principi di relatività generalizzati	126
5.8	Quesiti ed esercizi	127
6	Lavoro ed energia	131
6.1	Definizione di lavoro di una forza	131
6.1.1	Definizione di lavoro in rappresentazione intrinseca	131
6.1.2	Definizione di lavoro in coordinate cartesiane	132
6.1.3	Unità di misura del lavoro	133
6.2	Teorema delle forze vive (o dell'energia cinetica)	133
6.3	Esempi di calcolo del lavoro di una forza	135
6.3.1	Lavoro della forza peso	135
6.3.2	Lavoro della forza elastica	136
6.3.3	Lavoro della forza di attrito dinamico	136
6.3.4	Lavoro antropomorfico (il "lavoro" nel linguaggio comune)	138
6.4	Forze conservative e non conservative	139
6.5	Energia potenziale	141
6.6	Energia meccanica e conservazione dell'energia meccanica	142
6.6.1	Definizione di energia meccanica	142
6.6.2	Energia meccanica con forze non-conservative	143
6.7	Differenziali esatti ed energia potenziale	143
6.7.1	Forza come gradiente dell'energia potenziale	144
6.7.2	Altri operatori differenziali: divergenza, rotore e laplaciano (*)	145
6.7.3	Forze conservative: rotore nullo della forza	146
6.8	Le forze centrali sono conservative	147
6.9	Potenza	149

6.10	Verso il principio di conservazione dell'energia	150
6.11	Quesiti ed esercizi	151
7	Dinamica dei sistemi meccanici	157
7.1	Distribuzione di massa: sistemi discreti e continui	157
7.1.1	Sistemi di punti materiali	157
7.1.2	Sistemi continui	158
7.2	Gradi di libertà	160
7.3	Centro di massa	161
7.3.1	Il centro di massa di un sistema di punti	161
7.3.2	Il centro di massa di un corpo continuo	163
7.4	Momento della forza	165
7.5	Quantità di moto e momento angolare	168
7.5.1	Quantità di moto di un sistema	168
7.5.2	Momento angolare di un sistema	169
7.6	Principio di conservazione della quantità di moto	170
7.6.1	Prima equazione cardinale	171
7.7	Principio di conservazione del momento angolare	173
7.7.1	Seconda equazione cardinale	174
7.8	La terza legge della dinamica Newtoniana	174
7.8.1	Commento sulle leggi della Dinamica	175
7.9	Proprietà del sistema del centro di massa	176
7.9.1	Quantità di moto \mathbf{P}' nel sistema c.m.	177
7.9.2	Momento angolare intrinseco (spin) \mathbf{L}' nel sistema c.m. .	178
7.9.3	Relazione tra \mathbf{L}' e \mathbf{M}' nel sistema c.m.	178
7.9.4	Energia cinetica T' nel sistema c.m.	179
7.10	Condizioni di staticità per un corpo rigido	180
7.11	Quesiti ed esercizi	181
8	Urti e decadimenti	185
8.1	Introduzione	185
8.2	Forze impulsive	187
8.3	Urti elastico tra due corpi	189
8.3.1	Caso unidimensionale	190
8.3.2	Caso bidimensionale e forze vincolari	192
8.3.3	Riflettiamo sulla natura delle forze vincolari	193
8.4	Urti nel sistema del centro di massa	194
8.4.1	Caso unidimensionale nel sistema del centro di massa .	194
8.5	Urto al contrario: moto dei razzi	196
8.6	Urti, decadimenti e leggi di conservazione	199
8.6.1	Conservazione di energia e massa	200
8.6.2	Decadimento alfa (processo a due corpi) (*)	202
8.6.3	Decadimento beta (processo a tre corpi) (*)	204
8.7	Urti parzialmente elastici	207
8.8	Quesiti ed esercizi	209

9 Riflessioni sul calcolo vettoriale	213
9.1 Isotropia e omogeneità dell'Universo	213
9.2 Traslazione di sistemi di riferimento	215
9.3 Rotazioni di sistemi di riferimento	217
9.4 Riflessione di sistemi di riferimento	220
9.5 Non tutte le terne sono vettori	221
9.6 Vettori polari e assiali	222
9.6.1 Come si distinguono i vettori assiali	223
9.6.2 Grandezze scalari e pseudoscalari	225
9.6.3 Grandezze pseudoscalari nei fenomeni nucleari	227
10 La legge di gravitazione universale	229
10.1 Introduzione	229
10.2 Misure astronomiche pre-galileiane	230
10.2.1 Raggio della Terra	230
10.2.2 Distanza Terra-Luna	231
10.2.3 Distanza Terra-Sole	232
10.3 La mela e la Luna	233
10.4 La legge di gravitazione universale	234
10.4.1 La dipendenza dall'inverso del quadrato della distanza	236
10.5 Massa inerziale e massa gravitazionale	237
10.6 Energia potenziale gravitazionale	239
10.6.1 Energia potenziale della forza peso	241
10.6.2 Limiti classici della relatività e meccanica quantistica	241
10.7 Velocità di fuga da un corpo celeste di massa M	243
10.7.1 Orizzonte degli eventi	244
10.8 Misura di G: il pendolo di torsione	247
10.9 Coordinate sferiche (*)	249
10.9.1 Elementi di linea, superficie e volume	250
10.9.2 Energia potenziale gravitazionale: secondo metodo	253
10.10 Massa nel centro della sfera (*)	253
10.11 Quesiti	256
11 Moti dovuti a interazione gravitazionale	259
11.1 Introduzione	259
11.2 Le leggi empiriche di Keplero	262
11.3 Il sistema a due corpi	263
11.4 Momento angolare, I e II legge di Keplero	265
11.4.1 La prima legge di Keplero, orbite piane	266
11.4.2 La seconda legge di Keplero	267
11.5 La terza legge di Keplero	268
11.6 Energia meccanica del sistema a due corpi	269
11.6.1 Soluzioni per il potenziale efficace	270
11.7 La prima legge di Keplero, orbite ellittiche (*)	274
11.7.1 Le coniche	274

11.7.2	Integrale primo del moto	275
11.7.3	Eccentricità vs. energia e momento angolare	277
11.7.4	Soluzioni ellittiche: semiassi in funzione di E,L	278
11.7.5	Degenerazioni in fisica classica e quantistica	280
11.8	La terza legge di Keplero, rivista	280
11.8.1	Il buco nero nel centro della Galassia	281
11.9	Due stelle di neutroni	283
11.10	Trionfi e cadute della teoria Newtoniana	286
11.11	Indicazioni gravitazionali per la materia oscura	289
11.12	Quesiti ed esercizi	292
12	Dinamica dei corpi rigidi	297
12.1	Introduzione e richiami	297
12.2	Momento angolare e velocità angolare	298
12.2.1	Conservazione del momento angolare e velocità angolare	300
12.3	Applicazione terrestre della II equazione cardinale	302
12.4	Calcolo del momento d'inerzia	304
12.4.1	Momento d'inerzia di un cilindro e cilindro cavo	304
12.4.2	Momento d'inerzia di un'asta	305
12.4.3	Momento d'inerzia di un'asta su un disco	306
12.5	Teorema di Huygens-Steiner per i momenti d'inerzia	306
12.6	Baricentro	307
12.6.1	Pendolo fisico	309
12.6.2	Pendolo di torsione	311
12.7	Tensore d'inerzia (*)	311
12.8	Energia cinetica rotazionale	313
12.8.1	Corpo che rotola senza strisciare	314
12.8.2	Il moto della ruota	315
12.9	Il moto della trottola (*)	317
12.10	Esercizi riassuntivi	319
13	Riflessioni sull'energia	329
13.1	Lavoro per comporre un sistema discreto	329
13.2	Energia potenziale di un sistema sferico legato	332
13.2.1	Età del Sole	333
13.2.2	Conservazione dell'energia nel collasso gravitazionale stellare	336
13.3	Campo e potenziale gravitazionale	338
13.4	Integrale primo dalla conservazione dell'energia	340
13.4.1	Applicazione alla caduta di un grave	341
13.5	Moto in un campo di energia potenziale	342
13.5.1	Equilibrio stabile e instabile	343
13.5.2	Regioni del moto permesse e proibite	345
13.6	Ancora sul moto armonico (*)	346

13.6.1 Numeri complessi	346
13.6.2 Oscillatore armonico in campo complesso	348
13.6.3 Energia meccanica dell'oscillatore armonico	349
13.7 Oscillatore armonico smorzato (*)	349
13.7.1 Discussione su energia meccanica e sviluppi	354
13.8 Sviluppi e problemi della meccanica classica	355
13.8.1 Formalismo Lagrangiano e Hamiltoniano	355
13.8.2 Determinismo nella meccanica Newtoniana	356
13.9 Epilogo	357
13.10 Quesiti ed Esercizi	358
Appendice A. Bibliografia essenziale	363
Appendice B. Soluzione numeriche degli esercizi	365

1

Grandezze fisiche e unità di misura

1.1 La Fisica e il metodo scientifico

La parola **fisica** deriva dal greco antico e significa, letteralmente, **natura**. Inizialmente, dai tempi di Aristotele, la fisica indicava lo studio di tutte le leggi naturali. L'applicazione del termine, nel tempo, si è sempre più ristretta. Ancora all'epoca di Newton e Galileo, il termine univa tutte le discipline empiriche (talvolta con confusione nell'ambito di quelle che oggi chiameremmo *pseudo-scienze*, come l'alchimia). Nel corso del 1700, la parola *fisica* ha cominciato a delimitare lo studio della natura inorganica, da cui successivamente si è separata la *chimica*, che ha acquisito competenze specifiche.

Il punto di svolta che si è rivelato decisivo per separare la scienza da discipline pseudo-scientifiche è la procedura (sviluppata da Galileo e da altri autori successivi: Cartesio, Newton, ...) che ha portato alla definizione del **metodo scientifico**. Questo rappresenta lo strumento efficace per selezionare le ipotesi o le leggi: il metodo impone di sottoporre le idee alla prova dei fatti, ed eliminare quelle che risultano non funzionati.

Non esiste un protocollo unico che caratterizza il metodo scientifico. In genere, il processo si basa su una serie di passaggi. Il primo aspetto è cercare di caratterizzare il meglio possibile il soggetto di indagine. È opportuno cercare di rimuovere tutti quegli aspetti che possono presentare delle complicazioni (ad esempio, gli attriti), che potranno poi essere introdotti successivamente. Vi è poi la fase di raccolta delle informazioni con le osservazioni. In molti casi si tratta di osservazioni preesistenti, pubbliche, di attendibilità verificata¹.

In base a queste osservazioni, possiamo cercare di formulare una ipotesi esplicativa: un semplice modello, o una teoria matematica più strutturata.

¹ Oggi, ad esempio, non possiamo basarci su dati reperiti semplicemente in rete. I dati potrebbero essere genuini e corretti, ma potrebbero essere stati acquisiti con qualche forma di pregiudizio (*bias* in inglese) che potrebbe pregiudicare la correttezza delle conclusioni. Normalmente, dovrebbero essere usati solo dati che sono stati sottoposti a giudizio di *peer-review* (vedi oltre).

Nel caso di diversi possibili modelli alternativi, possiamo scegliere quello che ci appare più semplice, con un numero minore di ipotesi *ad hoc* per spiegare il fenomeno. Successivamente, dobbiamo cercare di dedurre le conseguenze del modello che abbiamo costruito, con eventualmente la progettazione di esperimenti che possano verificare o smentire l'ipotesi formulata. In particolare, dobbiamo prevedere quali osservazioni ed esperimenti potrebbero dimostrarla falsa (processo di falsificabilità). Presenterò un esempio particolarmente istruttivo in Sez. 9.6 nel caso delle proprietà di simmetria per riflessione speculare.

La successiva fase di esecuzione degli esperimenti e raccolta di dati in maniera riproducibile può avvenire su scale di tempi anche lunghi, e con gruppi sperimentali che lavorano in parallelo, in maniera cooperativa oppure competitiva. Ad esempio, partire da (circa) il 1980 diversi gruppi sperimentali nel mondo iniziarono a pensare di costruire uno strumento per la rivelazione di *onde gravitazionali*. Per due decenni, i gruppi furono in competizione tra di loro: ciascuno riusciva a migliorare sensibilmente qualche aspetto tecnico, ma sempre senza riuscire a compiere l'impresa. A un certo punto, decisero di mettere in comune le conoscenze acquisite, e la collaborazione tra diversi gruppi statunitensi ed europei ha portato alla rivelazione della prima onda gravitazionale il 14 settembre 2015 e all'apertura di una nuova branca dell'astrofisica.

La fase di analisi dei dati, in particolare le informazioni su come i dati acquisiti sono processati, deve comunque essere pubblica. Nel 2011, grande clamore fece la notizia che una misura da parte di un esperimento ai Laboratori del Gran Sasso della velocità dei neutrini (particelle elementari) mostrava che viaggiavano superando la velocità della luce. La fase di aperta discussione portò in pochi mesi a evidenziare un errore hardware in una connessione in fibra ottica dell'esperimento. Corretto l'errore, i neutrini tornavano a viaggiare a velocità non superiore a quella della luce.

La fase successiva di interpretazione dei dati ed elaborazione di una conclusione può servire a confermare (o confutare) il modello di partenza, oppure a meglio adattarlo in base alle osservazioni. Nelle diverse fasi, i risultati e i confronti dati/esperimento sono sempre pubblici, pubblicati su riviste che adottino la procedura di *peer – review*.

La peer-review è il procedimento di revisione paritaria degli articoli scientifici. Dopo che un autore (o un gruppo) sottopone il manoscritto dell'articolo a una rivista, un redattore (*editor*), competente della materia, invia l'articolo a 2 o 3 revisori (*referee*), esperti di fama del medesimo settore, che rimarranno sempre anonimi e sconosciuti all'autore (o per un certo periodo, normalmente di almeno 50 anni). I referee possono consigliare o sconsigliare la pubblicazione dell'articolo, oppure consigliare la pubblicazione soltanto dopo una revisione, oppure invitare gli autori a rispondere ad alcune obiezioni. Sulla base del parere dei revisori, l'editor decide se pubblicare o meno l'articolo o se attendere la successiva revisione. Questo protocollo è utile come possibile filtro contro errori di metodo e altri difetti volontari o involontari. Inoltre, evita l'inquinamento da parte di lavori non scientifici o pseudo-scientifici. Per

fare un esempio, io ricevo tra 10 e 20 richieste di valutazione di articoli per anno. Non di tutti gli argomenti mi sento sufficientemente esperto, e rifiuto per quelli la valutazione.

Tutto ciò che non adotta questo metodo è da classificarsi pseudo-scientifico. Occorre fare attenzione: le pseudo-scienze sono metodi o pratiche che affermano di essere scientifiche (o vogliono apparire scientifiche) ma che non rispettano in qualche aspetto fondamentale il metodo scientifico sopra esposto, principalmente contravvenendo ai requisiti di verificabilità. Mentre alcune pseudo-scienze sono in molti casi futili ma innocue (l'astrologia), altre sono potenzialmente molto pericolose in quanto sostituiscono, ad esempio, pratiche mediche certificate con acqua (omeopatia), oppure sostengono dannose le vaccinazioni che salvaguardano la vita propria e quella degli altri.

1.2 Grandezze misurabili e il Sistema Internazionale

Il campo di indagine della fisica è quello delle grandezze osservabili e misurabili. Ad esempio, anche se tutti sappiamo cosa sia, non possiamo quantificare una grandezza del tipo *quanto bene vogliamo alla mamma*. La quantità di amore verso la mamma, non essendo una grandezza misurabile, non rientra nell'ambito della fisica.

Sin dall'antichità ci si rese conto che per scambiare informazioni era necessario un qualche metodo per rendere oggettive e quantificabili grandezze quali la quantità di materia (la *massa*), i *tempi* e le misure di *distanze*. Legate alle distanze, vi sono grandezze derivate quali le misure di aree e volumi,

Sino all'epoca della rivoluzione Francese e dell'avvento di Napoleone, ciascuna nazione, città stato, ducato, frazione di comune faceva come voleva in quanto a misure di lunghezze e masse. Per esempio, a Bologna nella piazza dell'allora mercato (Fig. 1.1) sono collocate le unità di lunghezza da usare per il commercio. Il piede bolognese, lunghezza base del sistema metrico locale, corrispondente a circa 38 cm; la pertica, equivalente a 10 piedi; il braccio, lungo circa 64 cm; infine il doppio braccio. Accanto a queste figurano anche i modelli di un mattone e di una tegola di dimensioni standard. Se visitate Ferrara, all'ingresso del Castello Estense vi sono simili campioni, ovviamente di diversa lunghezza. Cercate nelle vostre città, confrontate col piede bolognese, e mettetevi nei panni dei poveri mercanti dell'epoca quando dovevano recarsi o fare scambi "all'estero".

Napoleone decise che gli standard francesi andavano bene per tutti². L'attuale Sistema Internazionale di unità di misura (in vigore dal 1961), abbreviato in SI, è la versione moderna del sistema metrico decimal elaborato da una commissione dei rivoluzionari francesi presieduta da Lagrange dal 1791.

Nel corso del tempo si sono aggiunte, oltre al metro, altre unità di misura di base, fino ad arrivare a sette grandezze (nel 1971). La Tab. 1.1 le elenca. Tutte

² Ovviamente, gli inglesi non furono d'accordo.

Figura 1.1. Nei pressi di Piazza Maggiore a Bologna, sul lato orientale del Palazzo Comunale e di fronte alla statua del Nettuno, sono collocati, dal 1547, i campioni delle unità di misura in uso nella città durante il Medioevo.



le altre unità di misura si ricavano da queste e sono quindi dette unità derivate. A ciascuna grandezza fondamentale viene assegnata una **dimensione fisica**, che viene indicata entro parentesi quadra: per le lunghezze, il simbolo è [L], ad esempio. Le dimensioni fisiche sono riportate nella seconda colonna. Il nome dell'unità di misura, e il simbolo adottato nell'ambito del SI, sono invece riportati nella terza e quarta colonna.

Grandezza base	Simbolo dimensionale	Nome unità di misura	Simbolo
Lunghezza	[L]	metro	m
Intervallo di tempo	[T]	secondo	s
Massa	[M]	chilogrammo	kg
Intensità di corrente	[I]	ampere	A
Temperatura	[Θ]	kelvin	K
Intensità luminosa	[J]	candela	cd
Quantità di sostanza	[N]	mole	mol

Tabella 1.1. Le sette grandezze fondamentali: nome, simbolo dimensionale, unità di misura utilizzata nel SI e abbreviazione. Tutte le altre grandezze che verranno introdotte saranno derivate da queste sette, con dimensioni opportune. Ad esempio, la velocità ha dimensioni di $[L T^{-1}]$.

Nell'ambito della meccanica classica, solo le prime tre grandezze sono necessarie: distanze, tempo e masse. Le altre grandezze che incontreremo (velocità, accelerazione, forza, energia, ...) si fondano sulle tre fondamentali che hanno dimensione [L], [T] e [M]. Le altre quattro grandezze fondamentali saranno introdotte nei corsi successivi. Tutte le grandezze che sono necessarie per gli studi di fisica sono dedotte a partire dalle sette fondamentali elencate in tabella.

Vi è una branchia della fisica che si occupa proprio di *metrologia*, ossia delle questioni inerenti alla misurazione delle grandezze fisiche, all'analisi e al calcolo dimensionale, alla scelta dei sistemi di unità di misura.³ Diversi infatti

³ L'Istituto nazionale di ricerca metrologica (INRiM) è il presidio in Italia di questa

sono stati i modi in cui, al variare degli anni, sono state definite le grandezze fondamentali. In tutti i casi, i requisiti che devono avere i campioni di misura sono quelli della **precisione**, della **accessibilità**, della **riproducibilità** e della **inalterabilità**.

Dal 20 maggio 2019 nel SI la definizione delle unità di misura associate alle sette grandezze fisiche fondamentali si ottiene a partire dal valore numerico fissato di 7 costanti fisiche. Maggiori informazioni sono reperibili sul sito del Bureau International des Poids et Mesures <https://www.bipm.org/en/home>. Per avere sotto controllo questa "versione finale", tuttavia, dovete prima studiare la fisica moderna per capire a quali grandezze corrispondono le sette costanti scelte. Ritengo invece utile una breve sintesi (parziale) del percorso storico che porta alla definizione dei campioni delle unità di misura fondamentali che useremo nel corso: metro, secondo, chilogrammo.

1.2.1 Misure di distanze

Il primo tentativo di unificare la misura della distanza avvenne nel 1795 da parte dell'Accademia delle Scienze Francese, che definì il *metro* come la frazione $1/(10 \times 10^6)$ della parte di meridiano terrestre (tra il Polo Nord e l'Equatore) che passa per Parigi. Nel 1799 fu costruito un prototipo utilizzando un regolo di platino. Un secondo campione più preciso venne costruito nel 1889, con una sbarra con sezione a "X" di platino-iridio mantenuto alla temperatura di 0 °C (per evitare la dilatazione termica), che permetteva una precisione di 0.2 μm . Ne vennero costruite 30 copie, poi diffuse in vari istituti nazionali di metrologia del mondo. Dopo l'avvento delle tecniche che utilizzano la fisica atomica, nel 1960 il metro è stato ridefinito come pari a 1650763.73 volte la lunghezza d'onda nel vuoto della luce rosso-arancione emessa dal ^{86}Kr , definizione che premetteva una precisione fino a 0.01 μm . Infine, prima dell'ultima ridefinizione del 2019, nel 1983 si era deciso di definire il metro come la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in $1/299792458$ di secondo.

1.2.2 Misure di tempi

Sin dall'antichità, si è pensato di misurare il tempo che passa in termini di un *fenomeno periodico*, ossia un fenomeno che ritorna uguale a se stesso dopo un definito intervallo di tempo. In un anno la Terra compie una rivoluzione completa attorno al Sole: è stato il fenomeno periodico più utilizzato per misurare il trascorrere del tempo. Il *secondo* fu definito nel 1832 come la frazione 1/86400 del giorno solare medio, con una media calcolata in un anno.

Dopo il 1950, con l'avvento della tecnica degli orologi atomici (e quindi, usando delle periodicità di tipo atomico), si osservarono tuttavia discrepanze rispetto alla periodicità terrestre. Nel 1967 il secondo fu ridefinito come multiplo del periodo di oscillazione (9192631770 oscillazioni) di una particolare frequenza della radiazione elettromagnetica emessa dagli atomi di ^{133}Cs .

disciplina.



Maurizio Spurio

Meccanica Newtoniana

per un approccio propedeutico alla fisica moderna

Accedi all'**ebook** e ai contenuti digitali ➤ Espandi le tue risorse ➤ con un libro che **non pesa** e si **adatta** alle dimensioni del tuo **lettore**



All'interno del volume il **codice personale** e le istruzioni per accedere alla versione **ebook** del testo e agli ulteriori servizi.
L'accesso alle risorse digitali è **gratuito** ma limitato a **18 mesi dalla attivazione del servizio**.

