

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI
BOLOGNA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Augusto Righi”
Corso di Laurea in Fisica

Unità di misura e costanti fondamentali:
evoluzione, ridefinizione e prospettive
future del Sistema Internazionale

Relatore:

Prof. Enrico Gianfranco
Campari

Presentata da:

Giacomo Quartieri

Anno Accademico 2024/2025

Sommario

La misura rappresenta il fondamento del metodo scientifico: senza unità condivise, la conoscenza non può essere confrontata né verificata. Tuttavia, fino a tempi recenti, molte unità fondamentali del Sistema Internazionale (SI) dipendevano ancora da campioni materiali, soggetti a degrado e non universalmente accessibili.

Questo elaborato analizza e ripercorre l'evoluzione concettuale e storica che ha condotto alla ridefinizione del SI, con particolare attenzione alla transizione del 2019, quando tutte le unità fondamentali sono state definitivamente ancorate a costanti fisiche universali. L'obiettivo è mostrare come tale cambiamento abbia trasformato il sistema delle misure da un insieme di convenzioni umane a un linguaggio fondato sulle leggi della natura. Il lavoro combina un'analisi storico-scientifica con un'esposizione teorica delle nuove definizioni, illustrando in particolare il ruolo della costante di Planck e della bilancia di Kibble nella ridefinizione del chilogrammo. Dallo studio emerge come il nuovo SI rappresenti un sistema stabile, coerente e concettualmente elegante, capace di garantire continuità con il passato e apertura verso le future evoluzioni della metrologia, si esplora infine la possibilità dell'impiego di definizioni basate su costanti adimensionali.

Indice

Sommario	1
Introduzione	4
1 Dal caos alla coerenza: nascita e sviluppo del Sistema Internazionale	5
1.1 Le unità di misura prima del SI	5
1.2 Le prime standardizzazioni: verso l'unità	5
1.3 La nascita del Sistema Internazionale (SI)	6
1.4 L'importanza della coerenza e universalità	7
1.5 Alcuni esempi storici significativi	8
Conclusione del capitolo	8
2 L'era delle costanti: la nuova definizione delle unità del SI	9
2.1 Perché ridefinire il Sistema Internazionale?	9
2.2 Le costanti fondamentali: i nuovi pilastri del SI	10
2.3 Il chilogrammo e la bilancia di Kibble	11
2.4 Il metro, il secondo e la luce	13
2.5 Altri esempi: la temperatura, la mole, la candela	13
2.6 Numeri "brutti" ma perfetti	14
Conclusione del capitolo	15
3 Il futuro del Sistema Internazionale: siamo arrivati al capolinea?	16
3.1 Ridefinizioni: un processo davvero concluso?	16
3.2 Orologi atomici di nuova generazione	16
3.3 Verso definizioni ancora più "naturali"?	17
3.4 Le sfide future della metrologia	19
3.5 Conclusione: un sistema aperto, non un dogma	20
Conclusioni	21

Bibliografia	23
Appendice	25

Introduzione

La misurazione è da sempre al centro dell'attività scientifica. Ogni esperimento, ogni modello teorico e ogni applicazione tecnologica si fondano sulla possibilità di attribuire un numero a una grandezza fisica. Senza unità di misura condivise e precise, la scienza non avrebbe potuto svilupparsi come disciplina universale e verificabile.

Lo scopo di questa tesi è analizzare il percorso scientifico e culturale che ha condotto dalle prime unità di misura, spesso arbitrarie e locali, fino all'attuale Sistema Internazionale (SI), con particolare attenzione alla svolta del 2019 che ha ridefinito le unità fondamentali ancorandole a costanti fisiche universali. Questa trasformazione non rappresenta unicamente un fatto tecnico, ma una conquista concettuale: un linguaggio di misura che non dipende più da oggetti materiali, ma dalle leggi stesse della natura.

Le unità di misura, infatti, non sono semplici convenzioni. Esse incarnano l'idea di universalità della scienza: permettono di confrontare esperimenti condotti in luoghi e tempi diversi, garantiscono tracciabilità e replicabilità, rendono possibile la cooperazione tra discipline e tra paesi. Parlare oggi di costanti fondamentali significa interrogarsi sul livello più profondo della metrologia e della natura stessa: come radicare le definizioni non più in campioni artificiali, ma in proprietà invarianti dell'universo.

La struttura della tesi rispecchia questo percorso. Nel **Capitolo 1** verrà presentata l'evoluzione storica delle unità di misura, dalla frammentazione premoderna alla creazione del Sistema Internazionale. Nel **Capitolo 2** si analizzerà nel dettaglio la rivoluzione del 2019, con la ridefinizione di chilogrammo, ampere, kelvin e mole tramite costanti fisiche. Infine, nel **Capitolo 3**, verranno esplorate le prospettive future della metrologia: dagli orologi atomici di nuova generazione alle possibili definizioni basate su costanti adimensionali, fino a scenari interplanetari.

In questo modo, la tesi intende offrire una panoramica completa, dal passato al presente fino al futuro, di un tema che non riguarda soltanto la fisica, ma il cuore stesso del metodo scientifico: la misura.

Capitolo 1

Dal caos alla coerenza: nascita e sviluppo del Sistema Internazionale

1.1 Le unità di misura prima del SI

La necessità di misurare è antica quanto la civiltà. Fin dagli albori, l'uomo ha cercato di quantificare il mondo che lo circonda: la lunghezza di un campo, il peso di un sacco di grano, il tempo tra due stagioni. Tuttavia, queste misure nascevano in modo spontaneo e profondamente locale, spesso legate a parti del corpo umano (come il cubito o il piede), a oggetti di uso comune, o a riferimenti naturali (la durata del giorno, il ciclo lunare).

Il risultato era una estrema varietà e incoerenza: il “piede” romano non aveva la stessa lunghezza del “piede” inglese, e la “libbra” variava da una città all'altra. Questa mancanza di standardizzazione non solo rendeva difficili i commerci e le comunicazioni scientifiche, ma ostacolava anche la nascita di una fisica più quantitativa e rigorosa.

Fu soprattutto nel contesto del commercio e della scienza moderna che sorse l'esigenza di unificare le misure. Le scoperte di Galileo, Newton e successivi scienziati richiesero un linguaggio numerico universale per poter essere davvero condiviso, testato e applicato.

1.2 Le prime standardizzazioni: verso l'unità

Il primo tentativo organico di istituire un sistema di misura coerente e fondato su principi razionali si colloca nel contesto della Rivoluzione francese. Nel 1791, l'*Académie des Sciences* elaborò un sistema basato sull'adozione di

unità derivate da grandezze fisiche naturali e costanti universali, in luogo di riferimenti arbitrari o locali.

In virtù di questi principi, il **metro** venne definito come la frazione di un diecimilionesimo della distanza tra il Polo Nord e l'Equatore, misurata lungo l'arco del meridiano passante per Parigi. Parallelamente, il **chilogrammo** fu invece associato alla massa di un decimetro cubo di acqua pura alla temperatura di 4 °C, corrispondente alla sua massima densità.

Per garantire la concretizzazione di tali definizioni, furono realizzati campioni fisici in platino, successivamente in lega platino-iridio, che divennero i riferimenti primari ufficiali. Nonostante il progresso concettuale rappresentato da questo approccio, la dipendenza da artefatti materiali comportava inevitabili limitazioni: basti pensare ad esempio alle variazioni dimensionali dovute a fenomeni di usura, alle alterazioni superficiali o ai cambiamenti ambientali, nonché il rischio di perdita o danneggiamento dei campioni nel tempo.

Durante il XIX secolo, numerosi Stati adottarono gradualmente questi standard metrici, ma una piena uniformità metrologica internazionale fu raggiunta soltanto in epoca successiva, con la creazione di organismi intergovernativi volti alla loro gestione e aggiornamento.

1.3 La nascita del Sistema Internazionale (SI)

Un passo decisivo verso l'unificazione metrologica avvenne nel 1875 con la firma della **Convenzione del Metro**, sottoscritta inizialmente da venti Stati. Questo trattato istituì una cooperazione internazionale duratura nel campo delle misure e portò alla fondazione del **Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)** con sede a Sèvres, presso Parigi. L'obiettivo era garantire la conservazione dei campioni internazionali e promuovere la comparabilità delle misure tra i vari paesi.

Il **Sistema Internazionale delle unità (SI)** fu formalmente adottato quasi un secolo più tardi, nel 1960, durante l'XI Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure (CGPM). Il SI introdusse un insieme coerente e universalmente condiviso di sette unità fondamentali, dalle quali derivano tutte le altre unità di misura.

Unità di base del SI.

Grandezza fisica	Unità SI	Simbolo
Lunghezza	metro	m
Massa	chilogrammo	kg
Tempo	secondo	s
Intensità di corrente elettrica	ampere	A
Temperatura termodinamica	kelvin	K
Quantità di sostanza	mole	mol
Intensità luminosa	candela	cd

Queste sette unità costituiscono il fondamento di tutto il sistema metrologico moderno. La scelta di un numero limitato di grandezze fondamentali assicura coerenza interna al sistema, facilita la derivazione di unità complesse e riduce la dipendenza da campioni fisici, sostituendoli con riferimenti universali e riproducibili. Questo principio di coerenza e tracciabilità è uno dei cardini della metrologia moderna. Molte di queste unità furono inizialmente definite in modo operativo, cioè attraverso fenomeni fisici o oggetti di riferimento: ad esempio, il **secondo** è stato ridefinito nel 1967 come l'intervallo di tempo corrispondente a 9 192 631 770 periodi della radiazione associata alla transizione tra due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio-133.

1.4 L'importanza della coerenza e universalità

L'introduzione del SI ha rappresentato un salto di qualità per l'intera scienza e tecnologia. Avere un sistema coerente, riproducibile, accessibile e condiviso ha permesso lo sviluppo della fisica moderna, dell'ingegneria, della chimica e di tutte le scienze applicate. Le unità SI sono oggi alla base di:

- esperimenti di laboratorio in tutto il mondo;
- strumenti di misura elettronici, meccanici, ottici;
- industrie ad alta precisione;
- calcoli teorici e simulazioni numeriche.

La coerenza del SI non è solo una questione di precisione: è una necessità epistemologica. Senza misure condivise e ben definite, non esiste confronto scientifico, né validazione sperimentale.

1.5 Alcuni esempi storici significativi

Vediamo ora alcuni esempi storici emblematici.

Il metro campione

Conservato al BIPM fino al 1960, era una barra di platino–iridio, considerata il riferimento assoluto per la lunghezza. Oggi sopravvive come oggetto storico.

Il chilogrammo campione (IPK)

Fino al 2019, la massa era definita tramite il *Cilindro Internazionale di Platino–Iridio* (IPK), ma con il tempo emersero problemi di instabilità: le copie internazionali variavano leggermente di massa nel tempo.

Il secondo e la rotazione terrestre

Il giorno solare medio fu usato a lungo per definire il secondo, ma si rivelò inadatto a causa delle irregolarità della rotazione terrestre. Da qui la transizione agli orologi atomici.

Conclusione del capitolo

Il Sistema Internazionale è nato da una lunga evoluzione, motivata dalla necessità di un linguaggio universale della misura. Tuttavia, sebbene già potente e ben strutturato, fino a pochi anni fa molte delle sue unità fondamentali dipendevano ancora da oggetti fisici o fenomeni contingenti.

Nel prossimo capitolo vedremo come, nel 2019, si sia verificata una trasformazione epocale: la sostituzione di questi riferimenti con costanti fondamentali della natura, aprendo la strada a un sistema di misura finalmente stabile, universale e “perfetto”.

Capitolo 2

L'era delle costanti: la nuova definizione delle unità del SI

«Se vogliamo ottenere campioni di lunghezza, tempo e massa, che siano assolutamente permanenti, li dobbiamo cercare non nella dimensione o nel moto o nella massa del nostro pianeta, ma nella lunghezza d'onda, nel periodo di vibrazione e nella massa assoluta di queste imperiture ed inalterabili e perfettamente simili molecole.»

— J.C. Maxwell, 1870

«... mediante le costanti universali abbiamo la possibilità di fissare unità di lunghezza, tempo, massa e temperatura, che mantengano necessariamente il loro significato per tutte le culture, persino quelle extra-terrestri e non umane.»

— M. Planck, 1899

2.1 Perché ridefinire il Sistema Internazionale?

Per oltre un secolo, molte unità fondamentali del SI sono state ancorate a oggetti fisici o a fenomeni contingenti. Sebbene questi riferimenti fossero utili operativamente, presentavano limiti sostanziali:

- **Deperibilità o instabilità:** ad esempio il chilogrammo campione tendeva a variare di massa nel tempo, perdendone piccole percentuali;
- **Riproducibilità limitata:** solo pochi istituti potevano accedere ai campioni ufficiali;
- **Non universalità:** un oggetto non è un concetto matematico, può cambiare, rompersi, essere copiato male.

La rivoluzione del 2019 ha quindi perseguito un obiettivo ambizioso: ancorare tutte le sette unità fondamentali del SI a costanti fisiche universali, immutabili e accessibili ovunque nell'universo, in linea di principio. Questa transizione ha reso il SI un sistema completamente derivato da leggi della natura, svincolato da artefatti materiali.

2.2 Le costanti fondamentali: i nuovi pilastri del SI

Le nuove definizioni si basano su sette costanti fisiche il cui valore è stato fissato per convenzione, con una precisione raggiunta grazie a decenni di esperimenti.

Costante	Simbolo	Valore esatto (definito)	Unità
Velocità della luce nel vuoto	c	299 792 458	m/s
Frequenza transizione Cs-133	$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	9 192 631 770	Hz (s^{-1})
Costante di Planck	h	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$	J·s
Carica elementare	e	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$	C
Costante di Boltzmann	k	$1.380\,649 \times 10^{-23}$	J/K
Numero di Avogadro	N_A	$6.022\,140\,76 \times 10^{23}$	mol $^{-1}$
Lumen efficacia fotopica	K_{cd}	683 (a 540 THz)	lm/W

A partire da queste costanti, sono state ridefinite tutte le unità SI, in particolare:

- Metro tramite c ;
- Secondo tramite $\Delta\nu_{\text{Cs}}$;
- Chilogrammo tramite h ;
- Ampere tramite e ;
- Kelvin tramite k ;
- Mole tramite N_A ;
- Candela tramite K_{cd} .

2.3 Il chilogrammo e la bilancia di Kibble

Per circa due secoli la definizione del chilogrammo è stata legata a un riferimento di natura materiale, piuttosto che a una costante universale. Risalendo al periodo successivo alla Rivoluzione francese, intorno al 1793, il chilogrammo era definito come la massa di un litro d'acqua distillata alla temperatura di 3.98°C e alla pressione atmosferica normale. Questa scelta non era casuale: a quella temperatura l'acqua raggiunge la sua massima densità, e dunque la misura risultava più stabile e riproducibile. L'idea di adottare l'acqua come riferimento per un sistema di unità universali non era tuttavia nuova: già nel 1668 il fisico e filosofo inglese John Wilkins aveva proposto un sistema basato su parametri naturali, anche se tale proposta non ebbe seguito fino alla vera e propria attuazione del sistema francese.

Questa definizione, pur innovativa, presentava un problema concettuale: la massa veniva legata a una misura che implicava già la nozione di massa stessa. Infatti, la pressione si definisce come forza per unità di superficie, e la forza è a sua volta definita come massa per accelerazione. Ne risultava una definizione circolare, in cui la massa veniva ricondotta ancora alla massa. Per superare questo limite, nel 1875 la Convenzione del Metro sancì la realizzazione di un campione materiale: il celebre **Grand Kilo**, un cilindro di platino-iridio (90% platino, 10% iridio) di 39 mm di altezza e 39 mm di diametro, definito convenzionalmente come pari a un chilogrammo. Copie identiche furono distribuite alle principali istituzioni scientifiche internazionali.

Rispetto alla definizione basata sull'acqua, il Grand Kilo risultava solo dello 0.0027% più massiccio di un litro d'acqua distillata, una differenza trascurabile dal punto di vista pratico. L'importanza di questo nuovo campione risiedeva piuttosto nella maggiore stabilità e nella formalizzazione internazionale della definizione. A dimostrazione dell'importanza concettuale e pratica di questa nuova definizione, il prototipo venne custodito con estrema cura presso l'Ufficio Internazionale dei Pesi e delle Misure a Sèvres, Francia, protetto da tre campane di vetro, in un ambiente controllato di temperatura, pressione e umidità, accessibile soltanto mediante l'utilizzo simultaneo di tre chiavi detenute da persone diverse.

Nonostante tali precauzioni, il campione non rimase inalterato. Confronti periodici hanno mostrato che, dalla sua realizzazione, il Grand Kilo ha perso circa 0.05 milligrammi. La perdita è attribuita a processi di evaporazione di atomi dalla superficie e a fenomeni di degrado naturale del materiale. Sebbene piccolissima, questa variazione rappresentava un problema: una grandezza fondamentale come il chilogrammo non può dipendere dal deterioramento di

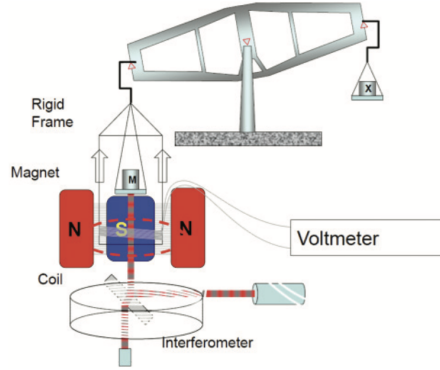


Figura 2.1: Schema di principio, Bilancia di Kibble

un oggetto fisico, le implicazioni, dovute di fatto alla propagazione degli errori, avrebbero contaminato tutte le misurazioni basate su di esso, dalla creazione di copie alla taratura di bilance.

Per questo motivo, a partire dal 2019 il Sistema Internazionale di unità ha abbandonato la dipendenza dal campione materiale in favore di una definizione che mantenesse una certa immutabilità e praticità nel tempo, ridefinendo il chilogrammo in termini della costante di Planck h . Questa scelta è stata resa operativa grazie alla **bilancia di Watt** (o bilancia di Kibble), uno strumento capace di collegare misure elettriche, basate su effetti quantistici riproducibili, con la grandezza di massa. La nuova definizione stabilisce che:

$$1 \text{ kg} = \frac{h}{6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}} \quad (2.1)$$

In termini fisici, la connessione tra la costante di Planck e la massa nasce proprio dal fatto che la bilancia di Kibble (Figura 2.1) consente di collegare una misura meccanica (in questo caso una forza peso) a una misura elettrica espressa tramite fenomeni quantistici. In questo strumento, il peso di una massa viene bilanciato dalla forza elettromagnetica generata da una corrente e da una tensione, grandezze che possono essere determinate con estrema precisione grazie all'effetto Josephson e all'effetto Hall quantistico. Entrambi questi effetti dipendono da costanti fondamentali, in particolare h (costante di Planck) ed e (carica elementare). Misurando pertanto la potenza elettrica equivalente al peso della massa, è possibile ricavare una relazione diretta tra la massa e h . Fissando quindi il valore numerico di h , si ottiene di conseguenza una definizione univoca e riproducibile del chilogrammo, basata unicamente su grandezze quantistiche invarianti, senza più ricorrere a campioni materiali.

In questo modo, l'unità di massa è ancorata a una costante universale della natura, stabile e indipendente dal tempo, garantendo coerenza e precisione senza più ricorrere a un oggetto materiale soggetto a degrado.

2.4 Il metro, il secondo e la luce

Il metro rappresenta la prima unità di base del Sistema Internazionale a essere ridefinita in termini di una costante fisica universale. Dal 1983, la sua definizione è ancorata al valore esatto della velocità della luce nel vuoto, c , fissata a:

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

In base a tale scelta, il metro è definito come la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo pari a $1/299\,792\,458$ di secondo.

La definizione del metro è quindi subordinata a quella del secondo, unità di misura del tempo. Dal 1967, il secondo è definito come:

$$1 \text{ s} = 9\,192\,631\,770 \quad (2.2)$$

dove con il numero a destra dell'equazione si indicano i periodi di oscillazione della radiazione emessa nella transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio-133.

Gli orologi atomici al cesio hanno permesso di raggiungere una precisione relativa dell'ordine di 10^{-16} , corrispondente a un errore di circa un secondo ogni decina di milioni di anni. Tuttavia, la ricerca metrologica prosegue verso standard temporali ancora più stabili: sistemi basati su orologi ottici impieganti isotopi come torio-229, stronzio-87 o itterbio-171 sfruttano transizioni atomiche o nucleari a frequenze più elevate, riducendo ulteriormente l'incertezza di misura. Tali sviluppi, come verrà approfondito nel Capitolo 3, potrebbero costituire il fondamento per una futura ridefinizione del secondo.

2.5 Altri esempi: la temperatura, la mole, la candela

Il kelvin e la costante di Boltzmann

Storicamente, l'unità di temperatura termodinamica, il kelvin (K), era definita a partire dal punto triplo dell'acqua. Tale definizione presentava limiti intrinseci, poiché dipendeva dalle proprietà di una sostanza reale e dalle condizioni sperimentali di purezza e pressione.

Dal 2019, il kelvin è invece definito fissando il valore esatto della costante di Boltzmann k_B :

$$k_B = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$$

In termini operativi, un kelvin corrisponde alla variazione di temperatura che determina un incremento di energia termica media per particella pari a $1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J}$. Questa scelta collega direttamente la scala di temperatura alla fisica microscopica, rendendola indipendente da qualunque sostanza di riferimento.

La mole e il numero di Avogadro

La mole (mol), unità di quantità di sostanza, era in passato legata alla massa di 12 g di carbonio-12. Dal 2019, è definita fissando il valore esatto del numero di Avogadro N_A :

$$N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

In tal modo, una mole contiene esattamente $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ entità elementari (atomi, molecole, ioni, ecc.). Questa ridefinizione elimina ogni dipendenza dalla massa molare di un isotopo specifico, garantendo coerenza universale nelle misurazioni chimiche e fisiche.

La candela

Infine, la candela (cd), unità di intensità luminosa, è definita in relazione alla radiazione emessa da una sorgente monocromatica di frequenza 540 THz (corrispondente alla luce verde) e con intensità radiante pari a $1683 \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$. Tale definizione implica la costante:

$$K_{cd} = 683 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$$

che converte potenza radiante in flusso luminoso percepito dall'occhio umano. La candela, pur essendo ancorata a parametri fisici rigorosi, rimane tra le unità di base quella più vicina alla percezione sensoriale diretta dell'uomo.

2.6 Numeri “brutti” ma perfetti

Una domanda che si può sollevare è la seguente: perché usare numeri così scomodi? Perché definire il chilogrammo tramite una costante minuscola come $6.62607015 \times 10^{-34}$?

La risposta è semplice: meglio un numero scomodo ma assoluto, che uno tondo ma instabile.

Il vantaggio delle nuove definizioni è che sono:

- **universali:** valide ovunque nell'universo;
- **riproducibili:** ovunque si disponga della tecnologia adatta;
- **immutabili:** legate alle leggi fondamentali della fisica;
- apparentemente astratte, ma profondamente pratiche per la scienza e la tecnologia.

Un ulteriore motivo, forse il più importante di tutti, per cui si è scelto di mantenere questi valori anche se “non eleganti” riguarda la compatibilità metrologica con le misurazioni precedenti. Nel processo di ridefinizione, infatti, uno degli obiettivi principali era garantire che il passaggio alle nuove unità non alterasse i risultati sperimentali già ottenuti né tantomeno rendesse obsoleti gli strumenti di misura esistenti. Se, ad esempio, si fosse deciso di assegnare alla costante di Planck un valore “tondo”, come ad esempio

$$h = 1.000\,000\,00 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

tutti gli strumenti tarati sul vecchio sistema avrebbero restituito valori di fatto incompatibili: le bilance, i calibratori e i riferimenti di massa avrebbero dovuto essere ricalibrati o sostituiti, generando quindi uno scarto sistematico globale. La scelta dei valori “brutti ma perfettamente coerenti” garantisce pertanto la continuità storica e operativa del Sistema Internazionale, assicurando che la ridefinizione del 2019 fosse, di fatto, invisibile nella pratica quotidiana ma rivoluzionaria nei principi fisici.

Conclusione del capitolo

Il 20 maggio 2019, giornata mondiale della metrologia, è entrata ufficialmente in vigore la nuova definizione delle unità fondamentali del SI. È stato un passo epocale che ha coronato decenni di ricerca e sperimentazione.

Il Sistema Internazionale oggi non si basa più su artefatti, ma su leggi fisiche: un sistema matematicamente elegante, teoricamente perfetto e aperto al futuro.

Nel prossimo capitolo ci chiederemo se è davvero definitivo o se il SI continuerà ad evolversi ancora.

Capitolo 3

Il futuro del Sistema Internazionale: siamo arrivati al capolinea?

3.1 Ridefinizioni: un processo davvero concluso?

Il 2019 è stato un punto di arrivo, ma anche un punto di partenza. La ridefinizione delle unità fondamentali del SI tramite costanti fisiche è stata una conquista scientifica e concettuale enorme. Ma possiamo davvero considerare questo l'ultimo passo?

Domande aperte restano:

- Le costanti sono davvero immutabili?
- La precisione raggiunta dagli strumenti odierni sarà sufficiente anche per la scienza del futuro?
- È possibile che nuove scoperte o teorie fisiche impongano modifiche concettuali alle attuali definizioni?

Per ora, le risposte sono negative: infatti la storia della fisica ci ha insegnato che nessuna definizione è eterna.

3.2 Orologi atomici di nuova generazione

Uno dei casi più emblematici è quello del secondo.

La definizione attuale si basa sulla frequenza della transizione iperfina dell'atomo di cesio-133, ma la metrologia moderna guarda oltre:

Tecnologie emergenti

- Orologi ottici a ioni di stronzio, itterbio, mercurio;
- Transizioni nucleari: ad esempio, quella dell'isotopo del torio-229, che presenta una transizione ultravioletta estremamente stabile (con instabilità dell'ordine di 10^{-19}).

Il futuro potrebbe vedere un nuovo secondo ancorato a una transizione nucleare, non più elettronica, con precisione di gran lunga superiore agli orologi al cesio.

Conseguenza possibile

- La ridefinizione futura del secondo come durata di una certa transizione nucleare;
- Implicazioni tecniche in GPS, telecomunicazioni, esperimenti gravitazionali.

3.3 Verso definizioni ancora più “naturali”?

Come abbiamo precedentemente analizzato, attualmente le unità del Sistema Internazionale sono definite a partire da un insieme di costanti fisiche dimensionali – come la velocità della luce c , la costante di Planck h , la costante di Boltzmann k_B o il numero di Avogadro N_A – alle quali è stato di fatto attribuito un valore numerico esatto per convenzione. Questa scelta rappresenta una svolta storica rispetto al passato, quando le unità erano ancorate a oggetti materiali (si pensi al campione del chilogrammo in platino-iridio affrontato nel capitolo precedente). Tuttavia, nonostante il progresso concettuale, tali definizioni restano legate a quantità dimensionali, il cui valore numerico dipende inevitabilmente dal sistema di unità adottato.

Su questo punto, l'articolo di Michael Duff, *How fundamental are fundamental constants?*, introduce una distinzione cruciale: quella tra costanti dimensionali e costanti adimensionali. Le prime – $c, h, G, k_B, \dots$ – non sono, in senso stretto, proprietà universali della natura, bensì semplici fattori di conversione tra grandezze diverse: ad esempio, c permette di passare da unità di tempo a unità di lunghezza, mentre h lega invece la frequenza all'energia. Il loro valore dipende dalla scelta delle unità: in un sistema dove

lunghezze e tempi sono misurati in anni-luce e anni, la velocità della luce risulta banalmente $c = 1$. Risulta dunque in questi termini improprio parlare di tali costanti come di grandezze “fondamentali”, se non a livello puramente pratico.

Le costanti adimensionali, al contrario, rappresentano numeri puri, indipendenti da qualunque sistema di misura. Esse sono universali nel senso più completo del termine, poiché assumono lo stesso valore per qualsiasi osservatore, indipendentemente dagli strumenti utilizzati. Un esempio emblematico è la costante di struttura fine:

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137}. \quad (3.1)$$

Il valore di α non cambia al variare delle unità scelte per $e, \hbar, c$: è un numero puro che descrive l'intensità dell'interazione elettromagnetica. Allo stesso modo, rapporti di masse elementari – come m_p/m_e , il rapporto tra la massa del protone e quella dell'elettrone – o i parametri di accoppiamento del Modello Standard, sono tutti esempi di costanti adimensionali. Anche la gravità può essere descritta in termini di una costante adimensionale, per esempio:

$$\alpha_G = \frac{Gm_p^2}{\hbar c}, \quad (3.2)$$

che quantifica l'intensità relativa della forza gravitazionale tra due protoni rispetto all'interazione elettromagnetica.

In questa ottica di analisi, queste quantità hanno un carattere davvero “fondamentale”: se una civiltà extraterrestre osservasse la natura, otterrebbe lo stesso α , lo stesso m_p/m_e , le stesse costanti di accoppiamento, pur non condividendo con noi né metri, né secondi, né chilogrammi. Inoltre, la loro eventuale variazione nel tempo o nello spazio sarebbe un fenomeno fisico reale e osservabile, non una conseguenza artificiosa della scelta delle unità avvenuta a priori. Come sottolinea Duff, chiedersi se c o G cambino nel tempo è privo di significato fisico, poiché tale variazione dipende unicamente dalle convenzioni adottate; mentre domandarsi invece se α o m_p/m_e varino è una questione legittima e universale.

Come introdotto all'inizio del capitolo, in questa prospettiva si apre allora un interrogativo affascinante: le ridefinizioni del 2018–2019 rappresentano un punto di arrivo, o solo una tappa intermedia verso un sistema ancora più astratto e universale, fondato esclusivamente su numeri puri? In linea di principio, una “metrologia cosmica” potrebbe basarsi proprio su costanti adimensionali: valori numerici che non richiedono alcun apparato convenzionale e che sarebbero pertanto condivisi da qualunque osservatore nell'universo.

Sarebbe il passo definitivo per liberare la misura dalle convenzioni umane, ancorandola a strutture matematiche e proprietà intrinseche della natura.

Resta però il problema pratico: al momento non disponiamo di metodi sperimentali che permettano di realizzare direttamente una definizione operativa basata su costanti adimensionali. Per esempio, non sappiamo costruire strumenti che traducano α o m_p/m_e in campioni di lunghezza o di massa con la stessa immediatezza con cui oggi la bilancia di Kibble traduce la costante di Planck in chilogrammi. In altre parole, queste costanti sono “più fondamentali” sul piano concettuale, ma non ancora “utilizzabili” sul piano metrologico.

Quindi è probabile che le ridefinizioni attuali non siano l’ultima parola. Esse hanno certamente sancito il passaggio dalle unità materiali alle costanti dimensionali fissate per convenzione, ma in futuro potrebbero aprire la strada a definizioni basate su costanti adimensionali, ancora più universali. In questo senso, la rivoluzione del 2018–2019 non va considerata come un processo concluso, bensì come una tappa di un cammino più ampio, verso una scienza della misura sempre meno antropocentrica e sempre più cosmica.

3.4 Le sfide future della metrologia

La scienza della misura non si ferma con la ridefinizione delle unità: al contrario, nuove sfide attendono i ricercatori.

Alcuni scenari futuri:

- **Portare la metrologia nello spazio:** ad esempio, orologi ottici per verificare la relatività generale con maggiore accuratezza;
- **Nuove costanti ancora da scoprire:** se emergessero nuove interazioni fisiche fondamentali, potrebbero ridefinire le basi delle misure;
- **Metrologia quantistica:** impiegare fenomeni quantistici (entanglement, effetto Josephson, effetto Hall quantistico) per definire unità in modo sempre più preciso;
- **Standard portatili:** dispositivi miniaturizzati per avere riferimenti assoluti di massa, tempo o temperatura in situ, sul campo o in orbita.

3.5 Conclusione: un sistema aperto, non un dogma

Il SI del 2019 è un capolavoro di eleganza teorica e applicabilità pratica. Ma il suo punto di forza è anche la sua umiltà: non pretende di essere eterno, ma è aperto al cambiamento, se necessario.

È un sistema vivo, dinamico, che cresce con la scienza.

Nel passato, abbiamo costruito le unità con le mani; nel presente, le definiamo con le costanti; nel futuro, potremmo arrivare a definire le misure con le leggi dell'universo stesso, senza più intermediari.

Conclusioni

«Nessuna misura è misurata; ogni definizione lascia spazio all'indefinito.»
Potrebbe sembrare un paradosso, ma celebra la natura dinamica e in continua evoluzione della metrologia. Questa tesi ha affrontato il tema delle unità di misura suddividendolo in tre tappe fondamentali: storia, rivoluzione del 2019 e prospettive future.

Nel **Capitolo 1** abbiamo compreso l'importanza storica delle unità di misura, dall'uso empirico fino alla creazione del Sistema Internazionale. La definizione attraverso oggetti e fenomeni naturali ha reso possibile la scienza moderna, ma era ancora soggetta a limiti di stabilità e riproducibilità.

Nel **Capitolo 2** abbiamo visto la rivoluzione del 2019: la ridefinizione del chilogrammo, ampere, kelvin e mole tramite costanti fisiche fondamentali – Planck, Boltzmann, Avogadro e carica elementare – consentendo un sistema SI totalmente ancorato alle leggi della natura. Questo cambiamento non ha alterato il valore delle unità, ma ha garantito a lungo termine precisione, universalità e stabilità.

Nel **Capitolo 3** abbiamo esplorato il futuro: orologi ottici avanzati per ridefinire il secondo, un SI digitale e universale, applicazioni spaziali e persino l'ipotesi di sistemi basati su costanti adimensionali o multipli planckiani. La strada è aperta, e la metrologia continua a evolversi.

Punti chiave emersi

- **Continuità ed equilibrio:** il SI si è modernizzato senza interrompere il legame con pratiche consolidate.
- **Apertura al cambiamento:** rimanendo un sistema flessibile e adattabile, pronto per future transizioni (es. ridefinizione del secondo).
- **Impatto trasversale:** dai laboratori di ricerca più avanzati all'educazione scientifica, il sistema di misura è fondamentale per la scienza, la tecnologia e la società.

Le nuove definizioni non rappresentano unicamente un progresso teorico, ma producono effetti tangibili nelle tecnologie quotidiane e nei principali settori della ricerca. Dalla sincronizzazione atomica dei sistemi GPS fino alla calibrazione dei sensori dei satelliti e dei dispositivi medici, in questi termini il miglioramento della precisione del Sistema Internazionale si riflette direttamente sull'attendibilità di strumenti e infrastrutture globali. Non ne sono esenti i campi della fisica quantistica, delle nanotecnologie e dell'informatica. La metrologia in questo modo concepita, basata quindi sulle costanti fondamentali, consente misurazioni più stabili, comparabili e quanto più possibile universali. La ridefinizione del 2019 non ha quindi solo perfezionato il linguaggio della misura, ma ha rafforzato il legame tra conoscenza scientifica e progresso tecnologico, proiettando il Sistema Internazionale nel cuore stesso della società contemporanea.

Chiusura

Il Sistema Internazionale non è un monumento statico, ma un organismo vivo che cresce con la scienza. La sua ridefinizione del 2019 ha consolidato un nuovo fondamento basato sulla natura, ma soprattutto ha aperto strade nuove: verso precisioni mai viste, tecnologie ancora da inventare, e domande sul significato stesso di "unità". La metrologia è una scienza che misura, ma anche una filosofia che evolve.

Bibliografia

- [1] Quinn, T. J. (2014). *From artefacts to atoms: The BIPM and the search for ultimate measurement standards*. Oxford University Press.
- [2] Becker, P. (2018). "The 2019 redefinition of the SI base units: Principles, historical context, and impact." *Metrologia*, 55(2), 142–153. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa99fa>
- [3] Fletcher, N., & Milton, M. J. T. (2019). "The 2019 revision of the SI – the result of three decades of progress in metrology." *Measurement Science and Technology*, 30(7), 070201. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab17a7>
- [4] Duff, M. J. (2003). "How fundamental are fundamental constants?" *Contemporary Physics*, 44(1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/0010751031000073286>
- [5] Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). (2019). *The International System of Units (SI)*, 9th edition. Recuperato da <https://www.bipm.org>
- [6] National Institute of Standards and Technology (NIST). (2019). *The SI Redefinition*. Recuperato da <https://www.nist.gov/si-redefinition>
- [7] National Physical Laboratory (NPL). (2023). *SI Units and Current Research*. Recuperato da <https://www.npl.co.uk>
- [8] Wikipedia contributors. (2023). *2019 redefinition of the SI base units*. In Wikipedia. Recuperato da https://en.wikipedia.org/wiki/2019_redefinition_of_the_SI_base_units (visionato Agosto 2025)
- [9] Veritasium. (2019). *Why the kilogram is changing forever*. [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=ZMByI4s-D-Y> (visionato Agosto 2025)

- [10] Veritasium. *Vari video sulla metrologia e costanti fisiche*. YouTube channel.
- [11] BIPM. (2018). *Resolution 1 of the 26th CGPM: On the revision of the International System of Units (SI)*. Recuperato da <https://www.bipm.org/en/CGPM/db/26/1/>
- [12] Mohr, P. J., Taylor, B. N., & Newell, D. B. (2016). "CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014." *Reviews of Modern Physics*, 88(3), 035009. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.88.035009>
- [13] Balsamo, A. (2019). *Il nuovo SI: cambia tutto perché nulla cambi – 2^a parte. Probing*, 26.

Appendice

Viene riportata di seguito una tabella riassuntiva delle nuove definizioni ufficiali del SI, in vigore dal 20 maggio 2019

Tabella 1: Definizioni ufficiali delle unità di base del SI (dal 20 maggio 2019).

Unità	Definizione 2019
Secondo (s)	È definito prendendo per la frequenza della transizione iper-fina dello stato fondamentale dell'atomo di cesio-133 ($\Delta\nu_{\text{Cs}}$) il valore numerico prefissato di 9 192 631 770 quando espressa in hertz ($\text{Hz} = \text{s}^{-1}$).
Metro (m)	È definito prendendo per la velocità della luce nel vuoto c il valore numerico prefissato di 299 792 458 quando espressa in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, dove il secondo è definito tramite $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
Chilogrammo (kg)	È definito prendendo per la costante di Planck h il valore numerico prefissato di $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ quando espressa in joule secondo ($\text{J}\cdot\text{s} = \text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), dove metro e secondo sono definiti tramite c e $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
Ampere (A)	È definito prendendo per la carica elementare e il valore numerico prefissato di $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ quando espressa in coulomb ($\text{C} = \text{A}\cdot\text{s}$), dove il secondo è definito tramite $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
Kelvin (K)	È definito prendendo per la costante di Boltzmann k_B il valore numerico prefissato di $1.380\,649 \times 10^{-23}$ quando espressa in joule per kelvin ($\text{J}\cdot\text{K}^{-1} = \text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$), dove chilogrammo, metro e secondo sono definiti tramite h , c e $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
Mole (mol)	Una mole contiene esattamente $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ entità elementari. Questo numero è il valore numerico prefissato della costante di Avogadro N_A quando espressa in mol^{-1} , ed è chiamato <i>numero di Avogadro</i> .
Candela (cd)	È definita prendendo per l'efficacia luminosa della radiazione monocromatica di frequenza 540×10^{12} Hz, K_{cd} , il valore numerico prefissato di 683 quando espressa in lumen per watt ($\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$), che equivale a $\text{cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{W}^{-1}$.