

Capitolo P02 grandezze fisiche

Contenuti delle sezioni

- a. grandezze, misure, unità di misura p. 3
- b. evoluzione del Sistema Internazionale p. 10
- c. norme del Sistema Internazionale p. 12
- d. grandezze derivate del Sistema Internazionale p. 17
- e. unità accettate dal Sistema Internazionale p. 19
- f. altri sistemi di misura p. 21

21 pagine

P020.01 Vengono qui studiati come oggetti primari per lo sviluppo della fisica le **grandezze fisiche**, entità da esprimere mediate coppie della forma $\langle \text{misura}, \text{unità di misura} \rangle$, dove “misura” consiste in un numero reale calcolabile e “unità di misura” è una grandezza che viene definita da precise regole sperimentali e che si consente di ridefinire in relazione alla adozione di strumenti e metodi sperimentali in possibile continuo miglioramento.

Nella pratica le misure si riducono a numeri razionali o a prodotti di numeri razionali per costanti matematiche (come π) o fisiche (come quelle che incontriamo seguito); inoltre le misure andrebbero accompagnate da indicazioni sulla loro incertezza.

Per maggiore semplicità formale e per procedere speditamente in genere si assume che le misure siano rappresentate da numeri reali.

Le unità di misura sul piano formale sono elementi di un particolare monoide che chiamiamo **monoide delle unità di misura**, termine che abbreviamo UoMnd.

Le leggi della fisica sono relazioni, preferibilmente equazioni, riguardanti grandezze fisiche.

Per procedere con consequenzialità, e con un certo rispetto degli sviluppi storici, in una fase iniziale viene prestata attenzione solo alle grandezze trattate dalla meccanica classica e su di esse viene introdotta la distinzione tra le grandezze fondamentali e le derivate, grandezze che le leggi trovate dicono essere esprimibili mediante le precedenti.

P020.02 Il capitolo riguarda principalmente l'introduzione del Sistema Internazionale delle unità di misura, in breve **S.I.**, accennando alla sua evoluzione storica, al suo ruolo internazionale di sostegno della uniformità delle misurazioni e definendo i suoi 7 generi di grandezze fondamentali, le corrispondenti unità di misura e le espressioni delle stesse mediante nomi e simboli che devono seguire regole molto precise.

Vengono anche precisate le modalità di organizzazione decimale delle unità di misura attraverso la definizione di prefissi moltiplicativi unificati per nomi e simboli delle unità stesse; si aggiungono tuttavia

delle deroghe riguardanti soprattutto le grandezze collegate a misurazioni di angoli e di fenomeni periodici.

La formulazione più recente di **S.I.** assume come riferimenti principali 7 costanti fisiche dichiarate fondamentali, grandezze che la fisica attuale considera di portata universale e che sono conosciute con grande precisione e alta attendibilità.

Negli anni più recenti si è deciso di far dipendere dalle suaccennate costanti fisiche 7 unità di misura che si assumono come fondamentali.

A partire da queste si possono definire tutte le grandezze derivate che aggiungendosi alle fondamentali costituiscono l'insieme delle grandezze che qui denotiamo con **GSI** e che costituisce la struttura portante dell'intero **S.I.**

Si tratta dell'insieme delle settuple costituite dalle potenze razionali delle unità di misura fondamentali, insieme costituente il monoide $UoMnd$ insieme di settuple che si può considerare un monoide isomorfo a $\mathbb{Q}^{\times 7}$; ogni unità di misura accolta da **S.I.** corrisponde a una settpla di **GSI**.

Il capitolo si chiude con la presentazione delle unità di misura che non fanno parte di **S.I.**, ma sono accettate da questo sistema in quanto sono utilizzate molto ampiamente per il fatto di far parte delle tradizioni metrologiche di molte popolazioni e per essere comunemente adoperate in importanti settori della odierna merceologia e anche in alcune attuali tecnologie avanzate.

Il Sistema Internazionale si preoccupa di mantenere ben chiaro il collegamento tra queste unità di misura alle proprie attraverso fattori di conguaglio definiti ufficialmente e accuratamente aggiornati in occasione di aggiornamenti nel suo interno o da parte di influenti organismi incaricati della normazione metrologica in settori specialistici.

P02 a. grandezze, misure, unità di misura [1]

P02a.01 La fisica oggi ha raggiunto un elevato livello di incisività, di profondità e di articolazione, ma si ritiene conveniente introdurla prendendo in considerazione un primo complesso circoscritto di nozioni sulle quali si possa facilmente esemplificare, rinviando definizioni più complete, più precise e più generali.

Nella prima fase introduttiva limitiamo i fenomeni da esaminare, cioè da osservare e spiegare mediante leggi, ai fenomeni della cosiddetta meccanica classica.

Con questo termine intendiamo il corpo di conoscenze consistente primariamente nelle leggi della meccanica classica delineate da Newton sulle basi gettate da scienziati rinascimentali come Galileo, Cartesio e Huygens e ispirata da quanto in Europa si era potuto recuperare della cultura scientifica greco-ellenistica (Archimede, Euclide, Ctesibio, Erofilo, ...) attraverso il mondo medioevale islamico. Purtroppo questo sviluppo si è potuto avvalere solo di apporti molto ridotti da alcune grandi scuole del passato (India, Cina, civiltà Maya).

La fisica classica si è sviluppata a partire dalla metà del secolo XVI, ha ottenuto grandi successi (Copernico, Keplero, Galileo, Huygens, Newton, ...); questi sono stati valorizzati e stimolati dalla crescita della rivoluzione industriale, e non ha dovuto ricorrere a ripensamenti radicali fino alla fine del 1800.

I primi fenomeni dei quali si è occupata, i fenomeni dell'equilibrio e del moto di oggetti piuttosto semplici (corpi puntiformi, corpi rigidi) hanno richiesto di introdurre grandezze fisiche come lunghezze (e distanze), aree, volumi, intervalli di tempo (o durate), velocità, masse e forze (in particolare gravitazionali).

Si tratta di entità da definire come risultati di misurazioni, cioè di osservazioni finalizzate a risultati esprimibili quantitativamente.

Le leggi fisiche acquisite hanno condotto a distinguere tra **grandezze fondamentali**, inizialmente durate, lunghezze e masse, e grandezze che si era scoperto potessero essere espresse come prodotti e divisioni di grandezze fondamentali e quindi chiamate **grandezze derivate**.

Un primo esempio di grandezza derivata è la velocità media da attribuire a un corpo di piccole dimensioni in moto tra due successivi istanti (e tra due posizioni) ed esprimibile come quoziente tra la lunghezza percorsa e l'intervallo di tempo impiegato a percorrerla.

P02a.02 Le grandezze fisiche che vengono misurate vengono assegnate a diversi **generi di grandezze**.

Come primo passo si attribuiscono allo stesso genere due grandezze se si possono osservare con le stesse tecniche.

Ad esempio nella meccanica classica si assumono come generi fondamentali le durate misurabili con orologi sincronizzabili, le lunghezze misurabili con il confronto con le lunghezze di oggetti di riferimento predefiniti (regoli) e le masse misurabili con bilance che le confrontano con oggetti di riferimento con i quali possono raggiungere condizioni di equilibrio.

Per ogni genere di grandezza è opportuno adottare una unità di misura basilare alla quale è possibile (anche se spesso non agevole) riferire ogni grandezza omogenea.

Inoltre per ogni grandezza di un genere non fondamentale è opportuno adottare come unità di misura il prodotto di potenze razionali (spesso intere) positive o negative delle unità di misura delle grandezze fondamentali mediante le quali la grandezza può essere espressa.

Ad esempio come unità di misura basilare delle velocità si assume il metro al secondo.

P02a.03 Il modo di organizzare la gestione dei dati sperimentali che stiamo presentando offre molti vantaggi e viene praticato ampiamente in gran parte delle situazioni di interesse pratico.

Ogni genere di grandezza viene identificato con un simbolo della forma $[x]$, dove x (quasi sempre) sta per una lettera inglese o una lettera greca, distinguendo tra maiuscole o minuscole.

Vediamo alcuni esempi di generi di grandezze primarie e derivate nella meccanica con i relativi identificatori.

durata [T]

lunghezze [L]

massa [M]

velocità = distanza divisa per il tempo impiegato, identificato da $[v]$

accelerazione = distanza divisa il quadrato del tempo impiegato $[a]$

area = lunghezza al quadrato, $[A]$

volume = lunghezza al cubo, $[V]$

densità = massa divisa per il volume occupato, $[d]$

forza = massa per accelerazione $[F]$

lavoro ed energia = forza per distanza $[E]$

potenza = energia divisa per la durata $[W]$

P02a.04 Per tutti i diversi generi delle grandezze vanno definiti con la massima accuratezza i metodi di misurazione.

Come annunciato per ciascun genere di grandezza fondamentale si definisce una grandezza di riferimento chiamata **unità di misura**; a tale grandezza si cerca di riferire ogni altra grandezza omogenea in quanto sua proporzionale.

Ad esempio: unità per le durate il secondo (o minuto secondo), per le lunghezze il metro oppure il suo multiplo il chilometro, per la massa il grammo oppure il suo multiplo chilogrammo, oppure il suo sottomultiplo milligrammo.

Tutte le grandezze di un genere si precisano come multipli o sottomultipli di una unità di misura.

Ogni grandezza si presenta con una espressione della forma

$$\text{misura} \cdot \text{unità di misura}$$

.

P02a.05 La tendenza della fisica a tenere il più possibile comprensivo l'insieme dei fenomeni da studiare quantitativamente richiede di trattare grandezze dei vari generi estremamente diversificate e quindi con misure molto diverse, dalle molto piccole alle molto grandi.

A questo proposito si parla di misure di ordini di grandezza molto diversi, dove due grandezze si dicono differire per 1, 2, ..., n ordini di grandezza se le loro misure differiscono per un fattore, risp., vicino a 10, vicino a $100 = 10^2$, ... , vicino a 10^n .

Vediamo alcuni esempi.

Vengono studiati intervalli di tempo che vanno dai miliardesimi di miliardesimi di secondo per eventi riguardanti particelle elementari, ai secondi per movimenti di oggetti comunemente osservabili a durate fino a più miliardi di anni per eventi di interesse astronomico. La vita dell'universo viene stimata in $13.8 \cdot 10^9$ anni, ossia in circa 450 milioni di miliardi di secondi.

Sono esaminate distanze intorno ai picometri, cioè ai 10^{-12} metri per i diametri delle particelle elementari, intorno al metro per i mobili delle nostre abitazioni e distanze interstellari di più di 10 miliardi di anni luce, cioè sui 10^{15} metri.

Vengono prese in considerazioni masse che vanno dai 10^{-15} grammi per le particelle elementari fino ai 10^{13} grammi per le masse delle stelle.

P02a.06 Questa diversificazione delle misure di gran parte delle grandezze di interesse per le ricerche dei fisici e per gli utilizzatori della fisica induce a distinguere diversi settori di indagine per il complesso dei fenomeni analizzati; questa distinzione si rende necessaria anche per gli strumenti da usare per misurare le diverse grandezze.

Questa diversificazione rende opportuno utilizzare diverse unità di misura; in parole povere per grandezze piccole convengono unità di misura piccole, per grandezze elevate convengono unità di misura grandi.

Ad esempio per le dimensioni di suppellettili o di mobili conviene il metro, per le distanze tra città il chilometro; per le masse di piccoli oggetti il grammo, per le masse delle persone e per di i pesi di molti prodotti alimentari il chilogrammo.

Così facendo per ciascuno dei diversi settori di indagine si viene a privilegiare un proprio sistema di unità di misura.

Per queste ragioni nel passato sono stati utilizzati diversi sistemi di unità di misura; in particolare per la meccanica classica sono stati utilizzati sia il sistema “MKS” che il sistema noto come “cgs”, il primo basato di metro, kilogrammo e secondo, il secondo utilizzante centimetro, grammo e secondo.

Più in generale evidentemente si possono usare per le grandezze di ogni genere unità diverse che siano facilmente rapportabili tra di loro.

I rapporti più semplici da gestire sono i multipli di 10 e questo ha fatto prevalere l'utilizzo di scale di unità di misura che presentano rapporti dati da potenze di 10, ossia di scale decimali.

Come vedremo più avanti queste diverse unità di misura hanno nomi che si distinguono per avere prefissi diversi.

P02a.07 Eccezione ben nota si hanno per le durate e per gli angoli: come multipli del secondo si usano i minuti primi, 60 volte maggiori e le ore, 60 volte maggiori dei precedenti.

Per le durate e gli angoli vengono quindi usate scale di unità in buona parte sessagesimali.

Inoltre nella pratica si usano poi il giorno di 24 ore e l'anno di circa 365.25 giorni [Anno (wi), Year (we)], mentre come sottomultipli dell'angolo giro si usano i gradi e i loro sottomultipli sessagesimali.

Nella pratica si hanno anche sistemi di unità di misura condizionati dalla tradizione e sua volta influenzata da esigenze che si sono manifestate nei diversi settori applicativi, presentando differenze che si sono imposte in diversi periodi storici.

In effetti le esigenze della pratica vanno spesso contro la uniformità delle misurazioni; questa invece per lo studio della fisica dovrebbe essere garantita al massimo livello.

P02a.08 Per tenere sotto controllo grandezze omogenee, ma con valori molto diversi si comincia con l'attribuire allo stesso genere le grandezze che si possono misurare con due metodi diversi ma che consentono di effettuare misurazioni coerenti (cioè con risultati sostanzialmente coincidenti) in un intervallo di grandezze significativo nel quale sono entrambe praticabili con efficacia.

L'ampliamento delle scale delle grandezze misurabili coerentemente si porta avanti chiedendo che l'omogeneità per ogni genere di grandezza sia una proprietà transitiva.

Ad esempio per le lunghezze si hanno i seguenti atteggiamenti:
distanze interstellari ottenibili con valutazioni radioastronomiche;
distanze tra pianeti e satelliti ricavabili con tecniche radiometriche;
distanze tra punti di interesse geologico fornite da misure con strumenti ottici e interferometrici;
distanze millimetriche ottenute con strumenti della meccanica fine come i calibri;
distanze micrometriche da misurare con microscopi ottici;
distanze interparticellari o nanometriche da misurare con microscopi elettronici.

P02a.09 L'importanza dei rapporti tra le misure è strettamente collegata alla possibilità di formare conoscenze umane che possano essere il più possibile utili a larghe comunità umane.

Consideriamo un singolo individuo o un gruppo di persone con riconosciuti forti interessi comuni che si trova a meditare sui problemi che deve affrontare e sulle scelte che deve effettuare e che, constatata la varietà, la gravità e la complessità dei problemi stessi, è portato a convincersi che per progredire deve sviluppare conoscenze sul mondo nel quale si trova il più possibili accurate, approfondite, utili a risolvere i problemi più impellenti, ma anche adattabili al mutare delle circostanze.

Lo sviluppo delle conoscenze alle quali si aspira quindi richiede l'azione e la comprensione di comunità tendenzialmente estese in grado di condividere gli strumenti e i risultati del conoscere e in grado di portare avanti azioni conseguenti rivolte sia ad affrontare problemi, sia a procedere nelle conoscenze ulteriori.

Questo modo di procedere, lo si sa, non si svolge senza difficoltà: si devono affrontare ripensamenti, adattamenti, aspetti problematici nuovi e non previsti. Si possono rendere necessarie scelte da effettuare in condizioni di incertezza che riguardano sia la valutazione di quello che si è appreso (spesso sotto le necessità), sia le convenienze delle varie prospettate finalità successive.

Le diverse valutazioni delle prospettive dipendono soprattutto dai conflitti che possono sorgere all'interno delle comunità a causa dei contrasti che possono sempre emergere tra le singole persone, come in generale tra i diversi organismi viventi per le molteplici esigenze che li muovono (metabolismo, spazio di movimento, riproduzione, autogratificazione, possesso, ...).

Nel procedere della formazione delle conoscenze e delle azioni conseguenti si impongono quindi dei compromessi riguardanti le scelte che possono rendersi necessarie, dalle più minute ed episodiche a quelle di vasta portata e strategiche.

Si devono effettuare parecchi confronti; alla base dei vari confronti vi è la necessità di mettere in relazione grandezze fisiche confrontabili, ossia omogenee.

In particolare si trova lo studio dei rapporti tra le lunghezze, tema affrontato dai fondatori della geometria in quanto base delle discipline fisico-matematiche classiche; a questo proposito vanno ricordati soprattutto le figure di Talete, Eudosso e Archimede.

A questo punto va tenuto presente che dal termine latino ratio, rapporto, discendono i termini "razionalità" e "ragione".

La razionalità la concepiamo come caratteristica fondamentale della fisica e di tutte le discipline che tendono ad essere il più possibile accurate, obiettive, versatili, quantitative e strutturate e generali.

Queste discipline sono caratterizzate dalla adozione del cosiddetto metodo scientifico.

P02a.10 Il **metodo scientifico** si è sviluppato nei secoli, attraverso una grande varietà di contributi impegnativi, con una progressione di risultati marcatamente positivi; una relazione a questo proposito si trova in T95a.

In molte fasi dello sviluppo delle discipline scientifiche, in conseguenza di ampliamenti della casistica dei problemi, della disponibilità di strumenti e di svolte delle prospettive sono stati necessari ripensamenti anche drastici e rinnovamenti anche di carattere rivoluzionario.

In particolare nella fisico cambiamenti notevoli si sono verificati tra il 1900 e il 1930 con lo sviluppo delle teorie relativistiche, atomistiche e quantistiche e dopo il 1950 con la crescita dell'astrofisica e della cosmologia quantitativa e con la attenzione dedicata a "teorie del tutto" aventi l'obiettivo della massima comprensione.

Si sono quindi assunti atteggiamenti complessivi diversi e a questo proposito si parla anche di diversi paradigmi che prevalgono in periodi successivi.

Questo implica che molti sviluppi scientifici conviene siano visti anche secondo attente prospettive storico-evoluzionistiche.

La constatazione dei grandi cambiamenti nello svilupparsi delle vicende scientifiche ha imposto come caratteristica essenziale del metodo scientifico l'accettazione della falsificazione delle teorie.

Anzi il carattere falsificabile di una teoria con Popper viene considerato determinante perchè essa possa qualificarsi scientifica.

P02a.11 Lo scenario nel quale si inquadrano le attività della fisica presuppone un mondo reale dotato di una esistenza propria che viene esaminato da osservatori che possono essere sia persone dotate di strumenti, sia dispositivi in grado di operare in buona autonomia, sia organizzazioni formate da persone, da apparecchiature e da metodologie.

Queste organizzazioni negli ultimi decenni hanno raggiunto alti gradi di articolazione e complessità e conseguentemente hanno richiesto cospicui impieghi di risorse materiali, finanziarie, umane e di strutturazione multidisciplinare.

Una conseguenza di rilievo sta nell'intrecciarsi delle attività conoscitive e delle imprese costruttive, ossia delle finalità scientifiche (un tempo si sarebbero chiamate puramente scientifiche) e degli obiettivi tecnologici.

Molte realizzazioni tecnologiche si basano su visioni scientifiche chiare e innovative; molti avanzamenti scientifici sono resi pensabili e realizzabili dalla concreta disponibilità di strumenti molto più prestanti dei precedenti (per precisione e/o velocità e/o riproducibilità su grandi numeri).

Inoltre in molti passi in avanti scientifici e tecnologici serve l'intervento di metodi statistici sofisticati sopra grandi quantità di dati, spesso raccolti con osservazioni di ampio spettro spaziotemporale.

P02a.12 A ciascuno dei soggetti (persone, macchine e organismi) che eseguono delle misurazioni si viene ad assegnare il ruolo dell'**osservatore**.

Ogni osservatore va riconosciuto come immerso nel mondo reale e quindi in grado di effettuare osservazioni su eventi concreti con limiti che vengono ad essere condizionati dalla porzione di mondo reale che lo circonda.

Ad un osservatore e alle apparecchiature che egli utilizza per le misurazioni si fa corrispondere sul piano matematico un cosiddetto **sistema di riferimento**.

Ha quindi grande rilevanza il problema di collegare i risultati ottenuti dai diversi osservatori.

Questi collegamenti, come vedremo, si concretizzano in trasformazioni che devono rispettare le misurazioni ottenute dei due osservatori corrispondenti a due sistemi di riferimento. e in particolare i risultati della osservazione di ciascuno degli osservatori sull'altro osservatore.

P02a.13 Nell'esame di molti fenomeni fisici si fanno intervenire i cosiddetti corpi puntiformi; più realisticamente si tratta di corpi con estensioni molto inferiori delle altre distanze e lunghezze in gioco

che vengono schematizzati supponendo che abbiano la loro massa concentrata in un solo punto che costituisce il loro centro di massa.

Nell'ambito di molte osservazioni vengono presi in considerazione eventi istantanei; più realisticamente si tratta di processi aventi una durata molto inferiore a quella degli altri processi che li precedono, seguono o li accompagnano e fanno parte del fenomeno complessivo che viene esaminata dalla osservazione e che vengono semplificati assegnando loro una durata nulla.

Le due idealizzazioni corpo puntiforme ed evento istantaneo sono rese opportune per semplificare le argomentazioni sui fenomeni da osservare e trattare quantitativamente e la loro giustificazione (oppure la loro falsificazione) deve essere giudicata a posteriori in relazione alla finalità dello studio in corso.

Le due idealizzazioni spesso vengono combinate e in particolare spesso vengono prese in considerazione traiettorie assegnate da un osservatore a corpi puntiformi e costituite da funzioni $\mathbf{r}(t)$ del genere $[\mathbb{R} \mapsto \mathbb{R}^3]$, con la tacita ipotesi che l'osservatore possa determinare le posizioni del corpo nei successivi istanti t con una precisione illimitata. Questo va giustificato o falsificato in relazione al fatto che le approssimazioni degli strumenti per la misura delle posizioni e dei tempi siano soddisfacenti in relazione alle finalità dei singoli specifici studi.

Nelle valutazioni di queste semplificazioni e di molte altre simili e anche ben più elaborate spesso si ricorre all'auspicio che gli strumenti per le osservazioni con il progredire delle conoscenze e delle tecniche possano essere migliorate quanto può bastare alle finalità degli studi che si decide di portare avanti.

P02a.14 Naturalmente si riconosce che ogni misurazione reale è affetta da errori. nella fisica classica si è ipotizzato (più o meno esplicitamente) che non vi siano limiti alla possibilità di rendere ogni misurazione precisa quanto serve, ovvero alla possibilità di procedere a individuare e a impiegare sempre nuove risorse sperimentali che consentano di raggiungere la precisione che può essere richiesta dai possibili utilizzi delle misure ottenibili.

Nella fisica classica quindi si suppone che si possono considerare misurazioni ideali prive di errori espresse da numeri reali, sulla base dell'ipotesi della possibilità di ottenere misure con imprecisioni illimitatamente ridotte.

Questo porta la fisica a trattare traiettorie di sistemi di corpi puntiformi rappresentabili da traiettorie in spazi cartesiani multidimensionali sui reali e quindi a servirsi dei risultati della teoria delle equazioni differenziali.

Questi sviluppi giungono a trattare i vincoli ai quali sono sottoposti i corpi puntiformi con la richiesta che essi si muovano su opportune superfici o ipersuperfici continue.

Un importante passo ulteriore in questa direzione giunge a trattare corpi continui caratterizzati da densità esprimibili con funzioni continue attraverso schematizzazioni che collegano volumi di dimensioni ridotte a corpi puntiformi collocati nei rispettivi centri di massa.

P02a.15 Chiamiamo **evento** ogni accadimento che si possa riferire a una precisa posizione dello spazio e a un preciso istante e quindi che possa rappresentarsi con una coppia di misure in linea di principio prive di imprecisioni $\langle t, \mathbf{x} \rangle \in \mathbb{R} \times \mathbb{V}_3$.

Un tipico evento associato a tale coppia è costituito dal fatto che si osserva un corpo puntiforme che all'istante t viene a trovarsi nella posizione \mathbf{x} .

Altra ipotesi fondamentale della fisica classica è la possibilità di riferire ogni evento ad un tempo assoluto, identico per tutti gli osservatori.

Questa ipotesi, tacitamente accettata da tutti prima dell'inizio del '900, a ben vedere risultava giustificata solo dalla considerazione intuitiva che gli orologi di due osservatori possano essere sincronizzati mediante segnali luminosi con una precisione superiore a quella con la quale si potevano ottenere gran parte delle altre misurazioni concernenti osservazioni sperimentali.

Quindi si concordava sulla possibilità di stabilire la simultaneità dei fenomeni oggetti di osservazioni empiriche.

P02 b. evoluzione del Sistema Internazionale

P02b.01 Il Sistema Internazionale di unità di misure, in sigla **S.I.** e noto ufficialmente come *Système international d'unités*, è il più diffuso e autorevole sistema di regole che riguarda le misurazioni di di grandezze fisiche ponendosi lo scopo di coprire tutti i generi di grandezze di rilievo per gli studi e per le produzioni e per ciascun genere di grandezze di coprire tutti gli ordini di grandezza che presentano interesse.

Per esprimere le grandezze di un dato genere il sistema **S.I.** consente di utilizzare unità di riferimento diverse e per tutte queste si preoccupa di precisare i necessari fattori di conguaglio, ossia i fattori che collegano le rispettive unità di misura.

È preferibile che questi rapporti siano costituiti da potenze di 10, a causa della ampia diffusione delle notazioni decimali e dei loro vantaggi computazionali.

Deroghe a questa preferenza sono consentite nei casi nei quali si intendono rispettare abitudini storicamente consolidate di intere popolazioni.

Si segnala che altri sistemi di misura ampiamente usati e prevalenti in taluni settori tecnologici e merceologici sono il Sistema imperiale britannico e il Sistema consuetudinario statunitense.

P02b.02 Il Sistema Internazionale si è costituito ed evoluto con un lungo percorso nel quale si è sempre data importanza alle definizioni logicamente chiare e alla razionalità degli obiettivi tesi soprattutto a sostenere la uniformità delle misurazioni.

Il primo sistema è stato definito nel 1889 in Francia ad opera della Conférence générale des poids et mesures (CGPM) presieduta da Lagrange e il cui scopo era la unificazione delle misure riguardanti i commerci più comuni nelle terre francesi al fine di renderli più chiari e razionalmente comprensibili.

La citata conferenza ha proposto come unità di misura delle lunghezze il metro e come unità per le masse il kilogrammo e il fattore 10 per i corrispondenti multipli e sottomultipli. Il metro è stato definito come la quarantamilionesima parte della lunghezza della circonferenza polare terrestre e si è stabilito che il kilogrammo fosse la misura della massa di un litro di acqua in condizioni standard di temperatura e pressione.

Negli anni successivi questo sistema si è arricchito di altre unità meccaniche e si è diffuso progressivamente ma lentamente per le resistenze dovute alle abitudini della tradizione. In particolare si è assegnato al secondo il ruolo di unità di tempo definendolo come frazione $1/86400$ della durata del giorno.

P02b.03 Intorno alla metà del secolo XIX l'adozione del sistema metrico decimale era sufficientemente diffusa, soprattutto in Europa, ma insufficientemente normata.

Negli anni 1860 Maxwell e Lord Kelvin, hanno proposto il sistema cgs basato su centimetro, grammo e secondo assunte come unità di base e su altre unità definite come unità derivate; conseguentemente si sono definite le unità di forza, di energia, di pressione, di viscosità ed alcune altre.

Nel 1875 si è giunti a una iniziativa istituzionale volta a favorire la cooperazione internazionale per la metrologia concretizzata nella conferenza "Convention du Mètre" tenuta a Parigi, che ha portato al Trattato del Metro, sottoscritto da 17 nazioni e alla costituzione di un organismo permanente che è stato in grado di operare fino ad oggi per lo sviluppo di norme metrologiche condivise.

Questo organismo si basa sulla costituzione del Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), struttura internazionale con sede a Sèvres, presso Parigi, sulla autorità della Conférence général des

poids et mesures (CGPM) formata dai delegati dei governi contraenti e sul Comité international des poids et mesures (CIPM), organo di supervisione composto da eminenti metrologhi di diversi paesi.

P02b.04 Lo sviluppo dell'elettromagnetismo nella seconda metà del secolo XIX ha richiesto la introduzione delle unità di misura utilizzate per le corrispondenti attività.

Per questo il fisico Giovanni Giorgi nel 1901 ha proposto l'adozione di una unità per i fenomeni elettrici da scegliere tra ohm per la resistenza elettrica, ampere per l'intensità di corrente e volt per la tensione elettrica. L'ohm è stato inserito tra le unità nel 1935, e l'ampere è diventato unità di base nel 1946.

Varie aggiunte di unità derivate e vari ritocchi sono stati adottati in relazione alla crescente consapevolezza delle imprecisioni delle definizioni a carattere empirico, alle crescenti esigenze di precisione da parte delle attività produttive e degli avanzamenti scientifici e tecnici. In realtà molte iniziative di miglioramento sono state fortemente ostacolate e ritardate da guerre e da vari contrasti tra gli stati.

Per il metro si è rinunciato alla circonferenza polare per la difficoltà della sua valutazione e si è adottato come suo prototipo una barra metallica a sezione rettangolare simile a quelle usate per misurare le pezze di tessuti.

Come prototipo per il metro dal 1889 al 1960 è stata preferita una barra in lega platino-iridio con sezione a X, meno deformabile del precedente prototipo del quale si era potuta osservare la tendenza a flettersi.

Nel 1960 si è deciso di ridefinire il metro in termini di lunghezze d'onda della radiazione emessa dagli atomi di kripton 86; ora per metro si intende la lunghezza del percorso nel vuoto dalla suddetta radiazione nell'intervallo di tempo la cui ampiezza è $1/299792458$ di secondo.

P02b.05 Nel 1960 si è giunti anche alla definizione ufficiale del Sistema Internazionale e della sua sigla **S.I.**.

Nel 1954 sono stati aggiunti come generi di grandezze di base la “temperatura assoluta” con la corrispondente unità di misura kelvin e la “intensità luminosa” avente come unità di misura la candela.

Nel 1971 si è aggiunto il genere di grandezza di base la “quantità di sostanza” con l'unità “mole” derivata dal numero di Avogadro definito come numero di molecole di un qualsiasi determinato genere che si trovano in un numero di grammi della sostanza pari al suo peso molecolare; a questo numero si è dato il ruolo di costante universale.

Nel 2018 si è deciso che tutte le 7 unità fondamentali fossero definite a partire dai valori assegnati alle 7 grandezze che attualmente sono considerate le “costanti fisiche universali”.

Attualmente **S.I.** è sostenuto da 55 stati membri del CGPM e da altri 34 stati associati; esso viene riconosciuto ovunque come sistema dotato di validità internazionale, ossia come riferimento metrologico valido per tutti gli scambi internazionali.

P02 c. norme del Sistema Internazionale

P02c.01 Le assunzioni che costituiscono il nucleo del **S.I.** attuale, sono presentate sinteticamente e in un ordine logico nei punti che seguono.

(1) Si scelgono **7 generi di grandezze fisiche fondamentali** collegabili alle 7 costanti fisiche che sono indicate dalle attuali teorie fisiche come aventi portata universale e che vengono considerate **costanti fisiche fondamentali**.

(2) A partire dalle 7 costanti fondamentali, si stabiliscono i loro valori da assumere come valori di riferimento esatti, cioè come valori presupposti esenti da errore.

(3) Per i 7 generi di grandezze fisiche fondamentali si stabiliscono i nomi e i simboli delle corrispondenti unità di misura da chiamare anche **unità di base** e si precisano le loro derivazioni dalle 7 costanti fisiche fondamentali.

(4) Si introducono i generi di grandezze derivate definendo ciascuna delle corrispondenti unità di misura come prodotto di potenze intere delle unità di misura di base. Anche di queste unità, che sono chiamate **unità derivate**, si stabiliscono nomi e simboli.

Queste assunzioni intendono fornire un carattere unitario generalmente riconoscibile e condivisibile dalla totalità delle attività di misurazione.

P02c.02 Come si è detto i generi delle grandezze fisiche fondamentali sono scelti sulla base di leggi fisiche fondamentali, leggi considerate di alta attendibilità, che svolgono ruoli centrali nel complesso delle conoscenze fisiche presenti in numerose leggi fisiche; questa frequente presenza di ciascuna delle grandezze fondamentali fornisce maggiori possibilità di determinare il suo valore.

Una attività importante degli organismi internazionali che sostengono **S.I.** consiste nell'aggiornamento dei valori considerati più attendibili delle costanti fisiche universali.

Per le unità di misura per i generi delle grandezze fondamentali, vengono definiti nomi, simboli e modalità di rappresentazione.

A partire dal suddetto complesso fondamentale si definisce quella che chiamiamo **struttura GSI** e si introducono tutti gli altri generi di grandezze derivate, ciascuna associata a un elemento di **GSI** che viene a costituire l'unità di misura del genere di grandezza in causa.

Oltre alle unità di misura per i vari generi di grandezze sono utilizzabili i loro multipli e sottomultipli di 10, e per talune i multipli di $1024 = 2^{10}$ attribuendo loro nomi e simboli che si servono di prefissi moltiplicativi definiti da una precisa **tavola di multipli e sottomultipli**.

P02c.03 I generi delle grandezze fondamentali assunti dal sistema **S.I.** accompagnati dai loro cosiddetti simboli dimensionali sono i seguenti.

Intervallo di tempo	[T]
Lunghezza	[L]
Massa	[M]
Intensità di corrente	[I]
Temperatura	[Θ]
Intensità luminosa	[J]
Quantità di sostanza	[N]

Le costanti fondamentali del sistema **S.I.** sono le seguenti

Frequenza della transizione iperfina del Cesio 133	Δ_{Cs}
Velocità della luce nel vuoto	c
Costante di Planck	h
Carica elettrica elementare	e
Costante di Boltzmann	k
Efficienza luminosa standard	Kcd
Numero di Avogadro	N_A

L'efficienza luminosa standard riguarda la radiazione monocromatica con frequenza di $540 \cdot 10^{12}$ Hz.

P02c.04 Tutte le unità delle altre grandezze fisiche sono considerate esprimibili come prodotti di potenze razionali delle 7 grandezze fondamentali. Tutte le altre costanti fisiche sono dichiarate riducibili a combinazioni razionali delle costanti fondamentali e di alcune costanti matematiche (ad esempio π). La definizione del nucleo logico del Sistema Internazionale è ottenibile da questa semplice tabella dimensionale che fornisce la relazione dimensionale fra le costanti e le grandezze di base:

Δ_{Cs}	$[T]^{-1}$
c	$[L] \cdot [T]^{-1}$
h	$[M] \cdot [L]^2 \cdot [T]^{-1}$
e	$[I] \cdot [T]$
k	$[M] \cdot [L]^2 \cdot [T]^{-2} \cdot [\Theta]^{-1}$
Kcd	$[J] \cdot [T]^3 \cdot [M]^{-1} \cdot [L]^{-2}$
N_A	$[N]^{-1}$

Invertendo le espressioni in questa tabella si ricavano le definizioni delle grandezze fondamentali come prodotti di potenze a esponente intero delle costanti fondamentali, e successivamente si possono cominciare a scegliere le unità di misura base per i valori delle costanti fisiche e per le grandezze dei generi fondamentali.

P02c.05 Vediamo ora le regole precise che sono state fissate per la scrittura dei simboli delle unità di misura e delle costanti fisiche.

A questo proposito occorre segnalare che queste regole facevano riferimento ad attività tipografiche meno versatili di quelle consentite dalla attuale tipografia elettronica.

Inoltre per la lingua italiana si sono imposti atteggiamenti puristici che sono in contrasto con la attuale tendenza alla contaminazione indotta dalla intensa crescita del flusso delle comunicazioni transnazionali.

I simboli (senza prefisso moltiplicativo) devono essere indicati con l'iniziale minuscola, con l'eccezione di quelli in cui l'unità di misura è eponima, ossia deriva dal nome di uno scienziato, e di quelli che iniziano con un prefisso moltiplicativo maiuscolo.

Per esempio il simbolo dell'unità di misura della pressione, dedicato a Blaise Pascal, è Pa; invece l'unità di misura corrispondente viene scritta per esteso e in minuscolo: pascal.

Il secondo è s e non sec, il grammo g e non gr, il metro m e non mt. L'unica eccezione è per il litro il cui simbolo può essere sia l che L.

I simboli dei prefissi e delle unità di misura **S.I.** i possono considerare entità matematiche e quindi, a differenza delle usuali abbreviazioni, questi simboli non devono essere seguiti dal punto (per il metro: m e non m.).

Un prefisso è parte integrante dell'unità si stabilisce che sia premesso al simbolo dell'unità senza spazi (per es. k in km, M in MPa, G in GHz, μ in μg per il microgrammo).

P02c.06 Le unità di misura devono comparire dopo il valore numerico (per esempio si scrive 20 cm e non cm 20) con uno spazio tra il numero e il simbolo: 2,21 kg, $7,3 \cdot 10^2 \text{ m}^2$.

Nelle unità di misura composte (per esempio il newton metro: N m) i simboli delle unità devono essere separati da uno spazio o da un cosiddetto punto mediano, ossia da un punto a mezza altezza (·).

In caso di divisione tra unità di misura, si può usare il carattere /, o la barra orizzontale o un esponente negativo: per esempio si possono usare le scritture equivalenti J/kg , J kg^{-1} o $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Non è ammesso l'uso di altri caratteri, come il trattino: per esempio si può scrivere N m o N · m, ma non N-m.

Non sono permesse combinazioni di prefissi (per es. $\text{m}\mu\text{m}$ va scritto come nm).

Una unità con prefisso costituisce un'espressione simbolica singola: (per esempio km^2 è equivalente a $(\text{km})\text{m}^2$).

Qualora necessario, gruppi di unità di misura possono essere messi tra parentesi: J/K mol equivale a $\text{J/K} \cdot \text{mol}$ o a $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ o a $\text{J} (\text{K} \cdot \text{mol})^{-1}$.

Per i simboli è opportuno evitare il corsivo e il grassetto allo scopo di differenziarli dalle variabili matematiche e fisiche (per esempio usare m per la massa e l per la lunghezza).

Occorre anche ricordare che, nonostante il sistema **S.I.** ammetta l'uso del plurale per i nomi delle unità di misura (joules, watts, ...), le regole linguistiche italiane stabiliscono, con riferimento ai termini stranieri entrati nel vocabolario italiano, che una volta che ne sono diventati parte, vanno accettati come elementi congelati nella loro essenza irriducibile alle strutture morfologiche di base del sistema flessivo nominale dell'italiano. Quindi non si ammette la scrittura di jouli o watti (come si farebbe invece con litri e metri), ma nemmeno di joules e watts, perché si chiede che l'italiano non ammetta la formazione del plurale dei sostantivi tramite l'aggiunta di una delle desinenze "s", "es" o "ies".

Viene regolata anche la scrittura delle cifre decimali.

Per raggruppare le cifre della parte intera di un valore a tre a tre partendo da destra bisogna utilizzare lo spazio.

Due esempi sono 1 000 000 e 342 142 ; altre convenzioni decidono di scrivere 1,000,000 e 342,142 . Per contro nel 2003 il CGPM ha consentito che nei testi in inglese si usasse come separatore il punto.

P02c.07 Alle unità **S.I.** si aggiungono solitamente dei prefissi decimali per cambiare la scala di misurazione e rendere così i valori numerici né troppo grandi, né troppo piccoli. Per fare questo è utile passare attraverso la notazione scientifica. Ad esempio, la radiazione elettromagnetica nel campo del visibile ha lunghezze d'onda pari circa a 0,0000005 m che, più comodamente, è possibile scrivere in notazione scientifica come $5,0 \times 10^{-7} \text{ m}$, quindi introducendo il prefisso **S.I.** "nano-" e il suo simbolo m, semplicemente come 500 nm.

Si noti, ad evitare ambiguità, l'importanza di distinguere correttamente i simboli maiuscoli e minuscoli.

Non è permesso utilizzare più prefissi in cascata: ad esempio non si può scrivere $10000 \text{ m} = 10 \text{ km} = 1 \text{ dakm}$ (un deka chilometro)

Il prefisso miria per 10000 non viene ammesso in quanto pochissimo usato.

P02c.08 Presentiamo le scritture da utilizzare per i prefissi moltiplicativi del Sistema Internazionale.

10^n	Prefisso	simbolo	Nome	Equivalente decimale
10^{30}	quetta	Q	ennealione	1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000
10^{27}	ronna	R	octilione	1 000 000 000 000 000 000 000 000 000
10^{24}	yotta	Y	eptilione	1 000 000 000 000 000 000 000 000
10^{21}	zetta	Z	esalione	1 000 000 000 000 000 000 000
10^{18}	exa	E	quintilione	1 000 000 000 000 000 000
10^{15}	peta	P	quadrilione	1 000 000 000 000 000
10^{12}	tera	T	trilione	1 000 000 000 000
10^9	giga	G	miliardo o bilione	1 000 000 000
10^6	mega	M	milione	1 000 000
10^3	chilo	k	mille	1 000
10^2	hecto	h	cento	100
10^1	deka	da	dieci0	10
1	[uno]	[1]		
10^{-1}	deci	d	decimo	0,1
10^{-2}	centi	c	ccntesimo	0,01
10^{-3}	milli	m	millesimo	0,001
10^{-6}	micro	μ	milionesimo	0,000 001
10^{-9}	nano	n	miliardesimo	0,000 000 001
10^{-12}	pico	p	trilionesimo	0,000 000 000 001
10^{-15}	femto	f	quadrilionesimo	0,000 000 000 000 001
10^{-18}	atto	a	quintilionesimo	0,000 000 000 000 000 001
10^{-21}	zepto	z	esalionesimo	0,000 000 000 000 000 000 001
10^{-24}	yocto	y	eptalionesimo	0,000 000 000 000 000 000 000 001
10^{-27}	ronto	r	octilionesimo	0,000 000 000 000 000 000 000 000 001
10^{-30}	quecto	q	ennealionesimo	0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 001

Va segnalato che per i nomi vengono usate anche varianti come bilione invece di miliardo, trilione invece di bilione, quadrilione invece di biliardo, e così' via; inoltre per i sottomultipli si usano anche bilionesimo invece di miliardesimo, trilionesimo invece di bilionesimo e così' via.

P02c.09 Nel 1998 il S.I. ha introdotto i prefissi per multipli binari per evitare che i prefissi standard, relativi a multipli decimali, vengano usati per i multipli binari, che di regola andrebbero usati ad esempio per indicare i multipli binari dei byte; è comunque ancora usata la convenzione secondo la quale, quando l'unità di misura è il byte o quelle da essa derivata, per kilobyte si intende 1 024 byte e non 1 000 byte, anche se si tratta in realtà di una imprecisione non trascurabile.

I prefissi per i multipli binari hanno lo scopo di rappresentare potenze di 2 e non potenze di 10. Il simbolo è quello standard con l'aggiunta di "i".

Cosimentre 1 kB equivale a 1000 B, 1 kiB equivale a 1024 B.

Un hard-disk da 2 TB ha capacità pari a 2000000000000 B o di 1,819 tebibyte, un computer con memoria da 4 gibibyte ha una capacità di 4294967296 B ovvero di circa 4,295 GB .

P02c.10 Le scelte dei nomi e dei simboli per le unità di misura delle grandezze di base sono raccolte nella tabella che segue.

Intervallo di tempo	secondo	s
Lunghezza	metro	m
Massa	chilogrammo	kg
Intensità di corrente	ampere	A
Temperatura assoluta	kelvin	K
Intensità luminosa	candela	cd
Quantità di sostanza	mole	mol

P02c.11 Sostituendo le unità alle grandezze base nella tabella dimensionale, ne risulta l'espressione delle costanti nelle unità appena definite.

Definizione	Simbolo	Valore	Unità base SI
Frequenza di transizione iperfina del Cesio 133	Δ_{Cs}	9 192 631 770	s^{-1}
Velocità della luce nel vuoto	c	299 792 458	$m \cdot s^{-1}$
Costante di Planck	h	$6,62607015 \times 10^{-34}$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$
Carica elementare	e	$1,602176634 \times 10^{-19}$	$A \cdot s$
Costante di Boltzmann	kB	$1,380649 \times 10^{-23}$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
Efficienza luminosa standard	Kcd	683	$cd \cdot sr \cdot s^3 \cdot kg^{-1} \cdot m^{-2}$
Costante di Avogadro	NA	$6,02214076 \times 10^{23}$	mol^{-1}

Invertendo questa relazione tra le costanti fisiche fondamentali e le unità di misura si ricavano le unità di misura base in funzione delle costanti.

P02 d. grandezze derivate del Sistema Internazionale

P02d.01 Il Sistema Internazionale assume che il complesso delle teorie fisiche su cui si fonda consenta di ricavare tutte le grandezze osservabili e misurabili fisiche possano essere ricavate dalle sette grandezze fondamentali.

In secondo luogo, Le unità di misura che il Sistema Internazionale ha scelto per le grandezze derivate è stato proposto in modo da rendere il più possibile intuitivo il calcolo dei valori numerici: questo è stato possibile studiando la matematizzazione sistematica dell'analisi dimensionale.

Definendo le unità derivate come semplici prodotti di potenze razionali (solitamente intere) di unità base, è possibile calcolare i valori delle grandezze derivate eliminando i fattori di conversione tipici dei sistemi tecnici e variabili da un sistema tecnico all'altro.

Le grandezze fisiche derivate si possono così ottenere dalla combinazione per moltiplicazione o divisione delle grandezze fisiche fondamentali con la semplice sostituzione dei fattori di conversione.

A molte grandezze derivate sono assegnati nomi specifici; ad esempio la grandezza derivata "joule/secondo" si può chiamare anche "watt".

Verificando la relazione tra i generi di grandezze fisiche derivate e i generi delle grandezze fisiche fondamentali, non solo si vede la relazione esistente tra due grandezze fisiche ma, attraverso l'analisi dimensionale, si può verificare la correttezza dei calcoli e delle equazioni di una legge fisica.

P02d.02 Nella tabella che segue adottiamo le seguenti abbreviazioni.

- (a) = simbolo del genere di una grandezza;
- (b) = nome della corrispondente unità **S.I.**;
- (c) = simbolo della corrispondente unità **S.I.**;
- (d) = equivalenza in termini di unità di base.

Grandezza fisica	(a)	(b)	(c)	(d)
frequenza	f, ν	hertz	Hz	s^{-1}
forza	F	newton	N	$kg \cdot m \cdot s^{-2}$
pressione	p	pascal	Pa	$N \cdot m^{-2}; kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
energia, lavoro, calore, entalpia	E, W/L, Q, H	joule	J	$N \cdot m = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
potenza	P	watt	W	$J \cdot s^{-1} = kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$
viscosità dinamica	μ, η	poiseuille	Pl	$Pa \cdot s = m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
carica elettrica	q	coulomb	C	$A \cdot s$
potenziale elettrico, tensione elettrica	V, fem	volt	V	$J \cdot C^{-1} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
forza elettromotrice, resistenza elettrica	R	ohm	Ω	$V \cdot A^{-1} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
conduttanza elettrica	G	siemens	S	$A \cdot V^{-1} = s^3 \cdot A^2 \cdot m^{-2} \cdot kg^{-1}$
capacità elettrica	C	farad	F	$C \cdot V^{-1}; s^4 \cdot A^2 \cdot m^{-2} \cdot kg^{-1}$
densità di flusso magnetico	B	tesla	T	$V \cdot s \cdot m^{-2}; kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
flusso magnetico	$\Phi(B)$	weber	Wb	$V \cdot s; m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
induttanza	L	henry	H	$V \cdot s \cdot A^{-1}; m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
temperatura	T	grado Celsius	$^{\circ}C$	K

angolo piano	$\alpha, \phi, e \times e$	radiante	rad	$1; m \cdot m^{-1}$
angolo solido	Ω	steradiane	sr	$1; m^2 \cdot m^{-2}$
flusso luminoso	$\Phi(I)$	lumen	lm	$cd \cdot sr$
illuminamento	El	lux	lx	$cd \cdot sr \cdot m^{-2}$
potere diottrico	Do	diottria	D	m^{-1}
attività di un radionuclide	AR	becquerel	Bq	s^{-1}
dose assorbita	D	gray	Gy	$J \cdot kg^{-1}; m^2 \cdot s^{-2}$
dose equivalente, dose efficace	H, EH	sievert	Sv	$J \cdot kg^{-1}; m^2 \cdot s^{-2}$
attività catalitica		katal	kat	$mol \cdot s^{-1}$
area	A	metro quadro	m^2	
volume	V	metro cubo	m^3	
velocità	v	metro al secondo	m/s	$m \cdot s^{-1}$
accelerazione	a	m/s^2	$m \cdot s^{-2}$	
velocità angolare	ω	$rad \cdot s^{-1}$	s^{-1}	
accelerazione angolare	α, ω	$rad \cdot s^{-2}$	s^{-2}	
densità	ρ, d	kg al metro cubo	kgm^{-3}	$kg \cdot m^{-3}$
molarità SI	M			$mol \cdot dm^{-3}$
volume molare	Vm			$m^3 \cdot mol^{-1}$

P02 e. unità accettate dal del Sistema Internazionale

P02e.01 Le unità di misura sottoelencate vengono accettate dal **S.I.** per essere usate insieme a quelle ufficiali, in quanto il loro uso è tutt’oggi molto diffuso in tutta la popolazione, sia per scopi scientifico tecnologici che per finalità pratiche.

Il loro uso è tollerato per permettere agli studiosi di far capire le loro ricerche a un pubblico molto ampio, comprendente soprattutto operatori non esperti dei problemi della metrologia.

Questa categoria contiene soprattutto unità riguardanti durate e angoli, entità collegate strettamente ai moti di rotazione e rivoluzione della Terra e ai quadranti circolari di gran parte degli orologi.

Anche i simboli $^{\circ}$, $'$ e $''$ / “ andrebbero tenuti distanziati dal valore numerico: per esempio, “2 $^{\circ}$ C” è la forma corretta, mentre è errata la scrittura “25 $^{\circ}$ C”.

Nome	Simbolo	Equivalenza in termini di unità base
minuto	min	1 min = 60 s
ora	h	1 h = 60 min = 3600 s
giorno	d	1 giorno = 24 h = 1440 min = 86400 s
litro	l, L	1 L = 1 dm ³ = 1 × 10 ⁻³ m ³
grado d’arco	$^{\circ}$	1 $^{\circ}$ = (π /180) rad = 0,01745329 rad
minuto primo d’arco	$'$	1 $'$ = (1/60) $'$ = (π /10 800) rad
minuto secondo d’arco	$''$	1 $''$ = (1/3600) $'$ = (π /648 000) rad
ettaro	ha	1 ha = 1 hm ² = 1 × 10 ⁴ m ²
tonnellata	t	1 t = 1 Mg = 1 × 10 ³ kg = 1 × 10 ⁶ g

P02e.02 Alcune unità di misura di origine empirica nel passato venivano accettate da **S.I.** per ragioni pratiche.

Fino al 2019 accadeva che le corrispondenti collegate alle teorie fisiche generali proposte da **S.I.** dipendono da relazioni fisiche che includono costanti che non erano conosciute con precisione sufficiente: quindi si è tollerato l’uso di queste unità non coerenti con **S.I.** per la loro maggiore precisione.

In seguito al conseguimento di una maggiore precisione per le costanti fisiche fondamentali, i valori delle grandezze dettate dai principi di **S.I.** sono risultati sufficientemente precisi.

Per completezza li presentiamo nella tabella che segue pubblicata da **S.I.** nel 2016.

Nome	Simbolo	Conguaglio con le unità fondamentali S.I.
elettronvolt	eV	1 eV = 1,602176634 × 10 ⁻¹⁹ J
unità di massa atomica	amu	1 amu = 1 Da = 1,66053906660(50) × 10 ⁻²⁷ kg
unità astronomica	au	1 au = 149 597 87 700 m

P02e.03 Attualmente sono accettate da **S.I.** varie altre unità ampiamente usate in rilevanti attività pratiche, soprattutto negli ambienti commerciali, medici, legali e nella navigazione.

A rigore queste unità dovrebbero essere definite in relazione alle unità **S.I.** in ogni documento in cui vengono usate.

Il loro uso comunque non viene deprecato, ma viene scoraggiato.

Nome	Simbolo	Conguaglio con le unità fondamentali S.I.
angstrom	Å	$1 \text{ Å} = 0,1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$
miglio nautico	nm	1 miglio nautico = 1852 m
nodo	kn	1 nodo = 1 miglio nautico all'ora = $(1852/3600) \text{ m/s}$
barn	b	$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$
bar	bar	$1 \text{ bar} = 0,1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa} = 1000 \text{ hPa} = 10^5 \text{ Pa}$
millimetro di mercurio	mmHg	$1 \text{ mmHg} = 133,322 \text{ Pa}$
neper	Np	Np = e qualsiasi unità fondamentale del S.I.
bel	B	$1 \text{ B} = (\ln 10)/2 \text{ Np} = 10$ qualsiasi unità fondamentale del S.I.

P02 f. altri sistemi di misura

P02f.01 Nelle attività pratiche attuali rimane comunque ampio l'utilizzo di unità di misura tradizionali, spesso limitato ad ambiti nazionali e/o professionali.

In particolare rimane molto esteso l'utilizzo di due sistemi, il Sistema imperiale britannico, Imperial system of units [Imperial units (we)] e il Sistema consuetudinario statunitense US customary measurement systems (we) (USC).

Anche se il Regno Unito ha adottato ufficialmente S.I. nel 1965 e gli Stati Uniti hanno accolto il sistema metrico decimale nel 1983, i due sistemi di misura sono ancora ampiamente utilizzati e rimangono importanti a causa della grande rilevanza innovativa, produttiva e commerciale di UK ed USA e della influenza che esercitano su estesi settori industriali e commerciali in gran parte del mondo.

Vanno segnalati anche i vari sistemi utilizzati in settori particolari in quanto rendono agevoli gli studi all'interno delle tematiche che approfondiscono (Oceanografia, terremoti, Clinical Information System, metrologia forense, metrologia quantistica, ...).

I fattori di conversione tra le unità ufficiali e accettate da S.I. e quelle dei suddetti sistemi di misura di Regno Unito e Stati Uniti, come quelle di vari altri sistemi di rilevante importanza industriale, commerciale e di settori di ricerca, sono peraltro accuratamente definiti e aggiornati.

A questo proposito rinviamo a System of units of measurement (we) ,
<https://web.archive.org/web/20080316180643/http://www.unc.edu/~rowlett/units/index.html>,
https://web.archive.org/web/20061126120208/http://ts.nist.gov/WeightsAndMeasures/Publications/upload/h4402_appenc.pdf
 e a List of conversion factors (we) .

P02f.02 Presentiamo anche alcune delle unità di misura dei sistemi Imperial units e USC e dei loro equivalenti nel Sistema Internazionale.

twip	twip	1/20 p = 1/1440 in	17.6388888 μm
mil	mil	1/1000 in	25.4 μm
point	p	1/72 in	127/360 mm = 352.778 μm
pica	P	12 p	127/30 mm = 4.233 mm
inch	in = 1 "	6 P	25.4 mm
foot	ft = 1 '	12 in	0.3048 m
yard	yd	3 ft	0.9144 m
rod	rd	16.5ft	5.02920 m
furlong	fur	660 ft	201.168 m
mile	mi	5280 ft = 1760 yd	1.609344 km
league	le	3 mi = 15840 ft	4.828032 km
fathom	ftm	2.02667 yd	1852m
cable		100 ftm	185.2 m
nautical mile	nmi	1852 m	

L'esposizione in <https://www.mi.imati.cnr.it/alberto/> e https://arm.mi.imati.cnr.it/Matexp/matexp_main.php