

Capitolo P10: grandezze fisiche

Contenuti delle sezioni

- a. obiettivi generali della fisica p. 3
- b. grandezze, misure, unità di misura [1] p. 5
- c. incertezze nelle misure p. 10
- d. evoluzione del Sistema Internazionale p. 14
- e. norme del Sistema Internazionale p. 20
- f. grandezze derivate nel Sistema Internazionale p. 21
- g. unità accettate dal Sistema Internazionale p. 23
- h. altri sistemi di misura p. 25

25 pagine

P10:0.01 Queste pagine contengono i discorsi introduttivi al tomo dedicato alla teorie fisico matematiche.

Si inizia con una concisa presentazione degli obiettivi della fisica parlando delle osservazioni effettuate dagli osservatori sul mondo che li circonda, delle leggi che i fisici si propongono di precisare e delle entità che la fisica matematica si propone di trattare formalmente in relazione ai risultati delle osservazioni.

Vengono quindi definiti come oggetti primari per lo studio della fisica le grandezze fisiche, entità da esprimere mediante coppie della forma \langle misura , unità di misura \rangle , dove misura consiste in un numero reale calcolabile (in pratica spesso è un numero razionale), e unità di misura è un oggetto fissato da convenzioni attribuibili a un monoide numerabile.

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.

Vengono poi introdotte le questioni riguardanti le incertezze con le quali vengono effettuate le misurazioni sperimentali e con cui vengono determinate le misure delle grandezze.

Queste considerazioni sono condotte con riferimenti molto elementari alla statistica e portano alle valutazioni delle incertezze attraverso il valore medio e lo scarto quadratico medio; viene inoltre segnalata l'opportunità di servirsi della propagazione degli errori fra le grandezze collegate.

Si procede poi alla introduzione del Sistema Internazionale delle unità di misura, in breve **S.I.**, accennando alla sua evoluzione storica, al suo ruolo internazionale volto al sostegno della uniformità delle misure e definendo i suoi 7 generi di grandezze fondamentali, alle corrispondenti unità di misura e alla formulazione delle stesse mediante nomi e simboli standardizzati.

Vengono inoltre precisate le modalità di organizzazione decimale delle unità di misura attraverso la precisazione di prefissi moltiplicativi unificati per nomi e simboli delle unità stesse; inoltre sono segnalate le loro eccezioni principali.

La formulazione più recente di **S.I.** fa riferimento a 7 costanti fisiche fondamentali, grandezze che le teorie fisiche considerano di portata universale e che si ritengono note con grande precisione e robustamente attendibili. Si è quindi deciso di far dipendere le 7 unità di misura fondamentali dalle suaccennate costanti fisiche.

Vengono poi definite tutte le grandezze derivate che sono accolte da **S.I.**, grandezze che costituiscono la struttura delle grandezze di **S.I.**, che denotiamo con **GSI**.

Si tratta dell'insieme delle settuple costituite dalle potenze intere delle unità di base e che come monoide risulta isomorfo a $\mathbb{Z}^{\times 7}$; ogni unità di misura utilizzata da **S.I.** corrisponde a una settupla di **GSI**.

Il capitolo si chiude con la presentazione delle unità di misura accettate da **S.I.**, unità utilizzate anche molto ampiamente in quanto discendenti dalle tradizioni metrologiche di molte popolazioni e utilizzate in importanti settori merceologici e delle tecnologie avanzate.

Di queste unità non **S.I.** il sistema Internazionale sostiene la possibilità di collegarle alle proprie unità rendendole convertibili con precisione nelle proprie unità stabilendo ufficialmente i corrispondenti fattori di conguaglio.

P10:a. obiettivi generali della fisica

P10:a.01 La fisica è la disciplina che studia le caratteristiche giudicate fondamentali dei fenomeni naturali, cioè degli oggetti e dei processi che possono essere osservati o con i nostri sensi o, più accuratamente, mediante opportuni strumenti e adeguati procedimenti, da più osservatori che operano in condizioni confrontabili.

I risultati delle osservazioni devono essere giudicati condivisibili dalla comunità dei fisici, gli studiosi della fisica; si chiede anche che siano condivisibili le indicazioni operative desumibili dai suddetti risultati, indicazioni che intendono contribuire allo studio di tutti gli aspetti di un “mondo fisico” o “universo” nel quale siamo immersi.

La fisica si può dunque chiamare la disciplina che studia le entità osservabili.

Il programma della fisica presuppone che i fisici siano in grado di effettuare osservazioni dei fenomeni dell’universo stabilendo con esso collegamenti affidabili e siano in grado di valutare le caratteristiche di questi fenomeni in termini qualitativi nelle fasi iniziali, e successivamente in termini quantitativi con una accuratezza che dovrebbe progressivamente migliorare o consolidarsi.

Le valutazioni quantitative ricercate dai fisici si rivolgono primariamente alle entità che vengono chiamate **grandezze fisiche**, entità che nella fisica svolgono un ruolo centrale e che devono essere definite, insieme alle modalità per osservarle, con la massima precisione.

P10:a.02 La fisica nella sua lunga storia ha ottenuto notevoli successi e da tempo si presenta come una disciplina che non pone limiti alla gamma dei fenomeni che intende spiegare.

Per questo essa si è servita di una grande varietà di strumenti e di procedimenti ed ha interagito con molte tecnologie e con molte altre discipline.

Essa inoltre si è resa ben consapevole delle difficoltà che deve superare per raggiungere i suoi obiettivi, difficoltà che son riconducibili al fatto che gli osservatori e i loro strumenti sono immersi nell’ambiente che devono esaminare, fatto che li condiziona e li limita. Constatata la molteplicità degli aspetti e la complessità del reale, è evidente che La conoscenza del mondo fisico non può che svilupparsi per gradi.

Un’altra necessità della fisica è quella di servirsi sistematicamente di modelli formali per gli scenari del reale con la consapevolezza che essi si possono rivelare insufficienti e riduttivi; quindi ogni modello può risultare necessario migliorarlo o anche sostituirlo con un altro che in genere sarà più elaborato.

I modelli formali, pur con i loro condizionamenti, consentano di sviluppare formalismi che hanno la possibilità di essere arricchiti con i procedimenti della logica e della matematica e che costituiscono il quadro entro il quale sviluppare sistematicamente algoritmi e metodi computazionali con i quali effettuare previsioni e estrapolazioni su eventi simili a quelli osservati e scelte operative riguardanti strumenti e procedimenti richiesti dai campi applicativi.

Gli algoritmi e i metodi computazionali evidentemente devono essere massimamente efficaci e accurati. Questa esigenza negli ultimi decenni ha potuto essere validamente sostenuta dai sistemi digitali elettronici hardware e software sviluppati dall’informatica e dalla ingegneria dei computers in un rilevante crescendo di efficienza, sicurezza e versatilità.

P10:a.03 L’indagine sulle caratteristiche quantitative da attribuire alle grandezze fisiche ha potuto contare su strumenti di misura che sono andati crescendo con gli sviluppi dei sistemi computazionali e con lo studio dei materiali (nanotecnologie, microscopi elettronici, laser, ...).

Questo ha consentito di effettuare attività sperimentali molto più elaborati di quelli eseguibili nei laboratori del periodo predigitale.

Tutte le osservazioni si vogliono realizzabili concretamente mediante apparecchi e procedimenti che devono essere definiti con precisione, evitando ogni ambiguità. Questi sono requisiti indispensabili perché le osservazioni possano essere riprodotte con risultati coerenti o anche perfezionate da ogni altro osservatore che operi in condizioni simili e confrontabili.

P10:a.04 I fisici si propongono di stabilire delle leggi di portata chiaramente delimitata ma tendenzialmente estesa che esprimono le relazioni che intercorrono fra gli oggetti e i processi osservabili, con un buon accordo tra i risultati ottenuti con le estrapolazioni e le previsioni consentite dalle leggi e i risultati delle osservazioni effettuabili effettuate su fenomeni correlabili.

Questa prospettiva delle leggi ottenibili dalle osservazioni viene condivisa con modalità armonizzabili da tutte le discipline che si possono considerare scientifiche, ad esempio dalla chimica, dalla biologia e dalla geologia. e dalle discipline che fanno in modo da essere considerate scientifiche, come l'economia e la sociologia.

Questo atteggiamento si inquadra nella tendenza degli umani e anche degli altri organismi viventi di dotarsi di strumenti conoscitivi che aiutino nelle scelte e nelle decisioni che devono effettuare quando si trovano ad affrontare i loro molteplici problemi.

P10:a.05 La fisica si è sviluppata nel corso di molti secoli ampliando sempre di più la gamma dei fenomeni studiati, la dotazione degli strumenti e dei procedimenti per la conduzione delle osservazioni e il complesso delle interazioni con tutte le discipline che adottano metodi quantitativi e procedono con comportamenti di razionalità.

Il cammino della fisica ha visto una serie di successi che hanno portato in particolare ad allargamenti e ad approfondimenti delle conoscenze giudicate attendibili, condivise, in grado di stimolare progressi nelle discipline e nelle applicazioni che della fisica si servono significativamente.

Non vanno però taciuti i periodi di decadenza delle discipline scientifiche e le situazioni conflittuali innescate nella società come conseguenza delle strade aperte dalla fisica, ad esempio dalle scoperte della fisica del nucleo atomico e dalle molteplici applicazioni belliche.

P10:b. grandezze, misure, unità di misura [1]

P10:b.01 La fisica oggi ha raggiunto un elevato livello di portata, profondità e articolazione e per introdurla si ritiene conveniente iniziare prendendo in considerazione un primo complesso di nozioni sulle quali si possa facilmente esemplificare, rinviando definizioni più generali, più complete e più precise.

Al primo livello limitiamo i fenomeni da esaminare, cioè da osservare e spiegare mediante leggi, ai fenomeni della cosiddetta fisica classica.

Con questo termine intendiamo il corpo di conoscenze consistente primariamente nella cosiddetta meccanica classica fondato da Newton sulle basi gettate soprattutto da Galileo e ispirato da quanto in Europa si era potuto recuperare della cultura scientifica greco-ellenistica (Archimede, Euclide, Ctesibio, Erofilo, ...) attraverso il mondo medioevale islamico, purtroppo con pochi apporti di 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, ...) in particolare con la crescita della rivoluzione industriale, e non ha dovuto ricorrere a ripensamenti rivoluzionari 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 (pesi).

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

Le leggi fisiche acquisite hanno condotto a distinguere fra **grandezze fondamentali**, come durate, lunghezze e masse, e grandezze che si è scoperto possono 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 in moto tra due successivi istanti (e posizioni) ed esprimibile come quoziente tra la lunghezza percorsa e l'intervallo di tempo impiegato a percorrerla.

P10:b.02 Le grandezze fisiche che vengono misurate vengono assegnate a diversi **generi di grandezze**.

Come primo passo due grandezze si attribuiscono allo stesso genere sse 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 raggiungono situazioni 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 intere (positive, nulle o negative) delle unità di misura delle grandezze fondamentali con la grandezza può essere espressa.

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

P10:b.03 Il modo di organizzare la gestione dei dati sperimentali che stiamo presenta molti vantaggi e viene praticato preferenzialmente, con poche eccezioni.

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 derivati nella meccanica con i relativi identificatori.

durata $[T]$

lunghezze $[L]$

massa $[M]$

velocità = distanza diviso 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 diviso volume $[d]$

forza = massa per accelerazione $[F]$

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

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

P10:b.04 Per i vari generi di grandezza vanno definiti con la massima accuratezza i metodi di misurazione.

Per ciascun genere di grandezza fondamentale si definisce una grandezza di riferimento chiamata **unità di misura**, grandezza alla quale si cerca di riferire ogni altra in quanto sua proporzionale.

Ad esempio 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.

Tutte le grandezze di un genere si determinano come proporzionali ad una unica unità di misura.

Ogni grandezza si presenta con una espressione della forma

$$\text{misura} \cdot \text{unit\`{a} di misura.}$$

P10:b.05 La tendenza della fisica a tenere il più possibile esteso 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 casalinghi a durate fino a più miliardi di anni per eventi astronomici; la vita dell'universo viene stimata in $13.8 \cdot 10^9$ anni, ossia in oltre 400 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 di 10^{15} metri.

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

P10:b.06 Questa diversificazione delle misure di gran parte delle grandezze di interesse per i fisici e per gli utilizzatori della fisica induce a distinguere diversi settori di indagine per il complesso dei fenomeni

analizzati; questa distinzione si rende opportuna 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 conviene una unità di misura piccola, per grandezze grandi unità di misura grandi. Ad esempio per le dimensioni di piccoli oggetti o mobili conviene il metro, per le distanze fra città il chilometro; per le masse di piccoli oggetti il grammo, per le masse delle persone e di contenitori di molti prodotti alimentari il chilogrammo.

Così facendo per ciascuno dei diversi settori di indagine si viene ad imporre 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”.

In questi due sistemi per la misura delle lunghezze si usano, risp., il metro e il suo sottomultiplo centimetro, mentre per la misura delle masse si usano, risp., il kilogrammo e il grammo, un millesimo del precedente.

Più in generale si possono usare per le grandezze di tutti i generi unità diverse che siano 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.

P10:b.07 Eccezione ben nota si ha 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 viene quindi usata una scala di unità in parte sessagesimale.

Inoltre nella pratica si usa poi il giorno di 24 ore e l'anno di circa 365.25 giorni [Anno (wi), Year (we)].

Nella pratica si hanno anche sistemi di unità di misura condizionati dalla tradizione e sua volta influenzata da esigenze che si manifestano 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 che per la disciplina fisica dovrebbe essere completamente garantita.

P10:b.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 misurare un intervallo di grandezze nel quale sono entrambe efficaci e coerenti, cioè danno risultati sostanzialmente coincidenti.

Si conclude l'ampliamento dei generi delle grandezze chiedendo che la loro omogeneità sia una proprietà transitiva.

Ad esempio per le lunghezze si hanno i seguenti atteggiamenti:

distanze interstellari ottenibili con valutazioni radioastronomiche;

distanze fra pianeti e satelliti ricavabili con tecniche radiometriche;

distanze fra punti di interesse geologico fornite da misure con strumenti ottici;

distanze millimetriche ottenute con strumenti della meccanica fine come i calibri;

distanze micrometriche da misurare con microscopi ottici;

distanze interparticellari da osservare con microscopi elettronici.

P10:b.09 Dall'importanza dei rapporti fra le misure discende un elemento di razionalità della fisica che sta alla base del cosiddetto metodo scientifico.

Alla base sta lo studio dei rapporti fra le lunghezze studiato dai matematici greci nell'ambito della geometria, da loro considerata come studio fisico-matematico; a questo proposito vanno ricordati soprattutto Eudosso e Archimede.

Va inoltre tenuto presente che dal termine latino ratio, rapporto, discendono i termini "razionalità" e "ragione".

P10:b.10 Il metodo scientifico si è sviluppato nei secoli, come segnalato attraverso vari contributi in T95a.

Qui ci limitiamo a ricordare anche la richiesta di obiettività, l'esigenza dell'accuratezza, i vantaggi della versatilità e la tendenza alla generalità.

Il progredire degli studi con l'allargamento della casistica fenomenologica a partire dal XVIII secolo ha portato a ripensamenti anche drastici; in particolare questo si è verificato tra il 1900 e il 1930 con lo sviluppo delle teorie relativistiche e quantistiche e dopo il 1950 con la crescita dell'astrofisica e della cosmologia quantitativa e con la attenzione dedicata alle "teorie del tutto".

Si possono quindi avere diversi atteggiamenti complessivi e a questo proposito si parla anche di diversi paradigmi.

In effetti gli studi scientifici conviene siano visti anche secondo prospettive storico-evoluzionistiche.

Caratteristica essenziale del metodo scientifico consiste nell'accettazione della falsificazione delle teorie. Anzi il carattere falsificabile di una teoria con Popper viene considerato determinante perchè essa possa dirsi scientifica.

P10:b.11 Lo scenario che definisce 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 e da sistemi di dispositivi anche molto complessi.

A ciascuno dei soggetti 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 del mondo reale ma 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**.

Si pone quindi 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.

P10:b.12 I fenomeni istantanei sono idealizzazioni di processi aventi durata molto inferiore a quella degli altri processi in gioco.

Si osserva che la nozione di fenomeni istantanei, basate su ben definite idealizzazioni, è molto simile alla nozione di corpi puntiformi.

Si suppone inoltre che le posizioni x e gli istanti t ottenuti da un osservatore possano essere misurati con una precisione illimitata, ritenendo che le approssimazioni degli strumenti utilizzabili possano essere ridotte quanto si vuole.

Naturalmente si riconosce che ogni misurazione reale è affetta da errori; nella fisica classica però si ipotizza che non vi siano limiti alla possibilità di rendere ogni misurazione precisa quanto si vuole, ovvero alla possibilità di individuare e di impiegare risorse sperimentali atte a consentire di raggiungere la precisione che richiede ogni possibile utilizzo delle misurazioni stesse.

P10:b.13 Nella fisica classica quindi si suppone che si possono considerare misurazioni ideali prive di errori espresse da numeri reali.

Le stesse nozioni di corpo puntiforme e di fenomeno istantaneo sono coerenti con l'ipotesi di illimitata possibilità di precisazione delle misure.

I corpi puntiformi si possono rappresentare mediante punti dello spazio euclideo tridimensionale reale E_3 . Le posizioni di questi corpi misurate da un osservatore sono rappresentate da vettori del sottostante spazio vettoriale V_3 dotato del prodotto interno $\langle \cdot | \cdot \rangle$; una distanza tra corpi puntiformi si esprime mediante la norma del vettore che porta da un punto all'altro.

P10:b.14 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 del tutto precise $\langle t, \mathbf{x} \rangle \in \mathbb{R} \times V_3$.

Un evento associato a tale coppia potrebbe essere costituito da un corpo puntiforme che all'istante t si osserva 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 una osservazione sperimentale.

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

P10:c. incertezze delle misure

P10:c.01 Le misurazioni delle grandezze fisiche sono processi spesso elaborati e sempre delicati in quanto riguardano vari elementi (osservatore, strumenti di misura, campioni esaminati) tra i quali si possono avere influenze reciproche complesse e poco controllabili.

Occorre anche preoccuparsi della uniformità delle misurazioni che devono essere ripetute in tempi successivi e su campioni diversi.

Per assicurare la bontà delle osservazioni occorre tenere sotto controllo l'osservatore che conduce la misurazione e che potrebbe assumere atteggiamenti scarsamente attenti verso strumenti e campioni e poco precisi nella esecuzione delle manovre che gli sono richieste (escludendo la possibilità di comportamenti poco obiettivi degli osservatori dovuti a interessi personali nei confronti dei risultati).

Possono essere utilizzati strumenti di scarsa precisione o poco stabili nel tempo; gli strumenti possono essere male utilizzati dall'osservatore; nel caso di misurazioni su più campioni può capitare che venga fatta una scelta della collezione dei campioni poco rappresentativa della popolazione complessiva alla quale si intende attribuire la misurazione.

Occorre quindi preoccuparsi di quelli che sono chiamati **errori della misurazione** e **errori osservazionali**. Per errore di una misurazione si intende la differenza fra il valore misurato e il suo cosiddetto "valore vero", grandezza fisica ipotizzata che un osservatore ideale assegnerebbe all'oggetto o al processo sottoposto alla misurazione.

I problemi accennati vengono studiati sistematicamente dalla disciplina chiamata **metrologia**, attività che vede impegnati anche importanti enti incaricati di indagini e di regolamentazioni e aventi composizioni e responsabilità internazionali.

In metrologia un errore di misurazione non deve essere solo deprecato; infatti la variabilità dei risultati deve essere considerata come elemento presente in ogni processo di misurazione e gli errori devono essere contenuti ma non si può pensare di poterli totalmente eliminare.

P10:c.02 Tra gli errori di misurazione si distinguono gli errori casuali e gli errori sistematici.

Gli errori casuali sono errori che portano a singoli valori misurati che idealmente si dicono differire dai valori veri, e che concretamente differiscono dai valori che si possono ricavare da misurazioni ripetute. Tendenzialmente gli errori casuali vanno imputati maggiormente all'osservatore (disattenzioni, errori di parallasse, ...).

Gli errori sistematici non possono essere attribuiti a una variabilità casuale, ma si dev'imputare a una inaccuratezza da ricercare nell'intero processo della misurazione. Tuttavia tendenzialmente gli errori sistematici vanno imputati maggiormente a difetti degli strumenti (per imprecisione, per degrado, per inadeguatezza, ...).

Gli errori sistematici sono da considerare fornitori di sequenze di differenze di valori aventi media nonnull; quindi il loro effetto non può essere ridotto con la ripetizione delle misurazioni come accade agli errori casuali.

Gli errori sistematici vengono considerati come distorsioni statistiche.

P10:c.03 Una delle attività principali della metrologia consiste nello studio sistematico degli strumenti di misura.

Una prima distinzione prevede due grandi categorie: quella degli strumenti analogici e quella degli strumenti digitali.

Su uno strumento analogico l'osservatore legge il valore di ogni misurazione sopra una scala graduata; tipici esempi sono gli orologi con quadranti dotati di lancette, i metri usati da sarti, falegnami e muratori e i termometri tradizionali a colonnina di mercurio.

Con uno strumento digitale il valore di ogni misurazione viene fornito da un display. Sono analogici molti strumenti di costruzione più recente in uso da addetti ai lavori .

Ogni strumento è caratterizzato da una portata, data dal valore massimo che esso è in grado di riconoscere. Il metro dei sarti ha una portata di 150 cm, una bilancia da cucina ha una portata intorno ai 10 kilogrammi.

Ogni strumento è caratterizzato da una sensibilità concernente la minima differenza che esso è in grado di riconoscere. La sensibilità dei cronometri si aggira sul decimo di secondo, mentre gli orologi atomici hanno una sensibilità di miliardesimi di secondo.

Ogni strumento è caratterizzato da una prontezza, grandezza che esprime il tempo che esso richiede per ottenere il risultato di una misurazione oppure per segnalare una variazione della grandezza che esso sta monitorando, ossia che sta misurando nel corso di intervall di tempo ben riconosciuti.

P10:c.04 È essenziale che le misurazioni e le misure siano accurate e precise, soprattutto per le misurazioni ripetute su più campioni.

Una misurazione di una grandezza viene giudicata tanto più accurata quanto più il valor medio delle singole misure eseguite si può considerare vicino a quello che si può pensare come valore più attendibile delle grandezza.

Evidentemente l'accuratezza di una misurazione viene condizionata dagli errori sistematici.

Una misurazione di una grandezza viene giudicata tanto più precisa quanto più i valori delle singole misure si avvicinano al valor medio.

La precisione di una misurazione è influenzata dagli errori casuali.

Per quanti riguarda l'accuratezza e la precisione delle misurazioni è utile segnalare quattro situazioni che esemplifichiamo con i risultati di misurazioni volte a valutare la abilità di contendenti in una gara di tiro con l'arco.

Un arciere accurato e preciso effettua tiri che si concentrano intorno al centro del bersaglio.

Un contendente accurato ma poco preciso ottiene risultati che complessivamente si distribuiscono in modo equilibrato intorno al centro del bersaglio, ma sono poco concentrate, ossia denunciano rilevanti incertezze.

Un concorrente preciso ma non accurato ottiene risultati poco sparpagliati, ma concentrati su un punto del bersaglio lontano dal centro.

I segni dei tiri di un concorrente poco accurato e poco preciso si presentano in un'area sparpagliata del bersaglio con un valor medio delle posizioni lontano dal centro del bersaglio.

//input pP10c04

P10:c.05 Le incertezze nelle misurazioni e gli errori delle misure sono oggetti di indagini statistiche piuttosto complesse sulle quali qui non insistiamo, limitandoci a segnalare gli atteggiamenti che si assumono con motivazioni che pretendono solo di essere ragionevoli.

Consideriamo una misurazione multipla di una grandezza che ha ottenuto la lista di n valori $\mathbf{x} := \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$.

Il numero n delle singole prove lo supponiamo sufficientemente grande e quindi presentiamo come valore più attendibile la media di questi valori

$$\bar{x} := \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} .$$

Come valutazione dell'incertezza assumiamo lo **scarto quadratico medio** dellalista dei valori, ossia la grandezza definita come

$$\sigma(\mathbf{x}) := \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \cdots + (x_n - \bar{x})^2}{n}} .$$

Questa valutazione viene giustificata in ambito statistico con complesse motivazioni sulla cosiddetta distribuzione gaussiana degli errori casuali.

Qui ci limitiamo a segnalare che $\sigma(\mathbf{x})$ tiene conto degli scarti dalla media di tutti i valori, sia quelli per difetto che quelli per eccesso, e pesa in misura più marcata gli scarti maggiori.

Va anche segnalato che la ampia utilizzazione dello scarto quadratico medio si è dimostata molto efficace e attendibile per tutte le misurazioni con prove ripetute che sono state eseguite con accuratezza.

La stima della misura va quindi presentata con la scrittura

$$x = \bar{x} \pm \sigma(\mathbf{x}) ,$$

P10:c.06 La precedente espressione si può interpretare come l'affermazione che la popolazione dei campioni che costituiscono il genere di grandezza che si esamina si distribuisce uniformemente nell'intervallo di valori reali $[\bar{x} - \sigma , \bar{x} + \sigma]$.

Una indicazione collegata alla precedente è quella del cosiddetto **errore relativo** definito come

$$\Delta_{rel}(\mathbf{x}) := \frac{\bar{x}}{\sigma} .$$

Questa indicazione spesso è espressa in forma percentuale e può essere molto significativa; essa dovrebbe sempre accompagnare \bar{x} e σ dichiarando quest'ultimo valore come errore assoluto della misurazione.

Un altro tipo di rappresentazione della stima di una misura si limita a indicare le cifre decimali significative di tale stima. Si tratta di una stima spesso povera di informazioni e purtroppo spesso non viene chiarito che si tratta di una stima che si limita alle cifre significative.

P10:c.07 Nella scrittura delle grandezze fisiche della forma $\langle \text{misura} , \text{unità} \rangle$ la seconda componente viene chiamata anche **dimensione della grandezza** e chiaramente costituisce una qualificazione molto significativa.

Nella fisica e nelle sue applicazioni si incontrano misure di molteplici grandezze che riguardano molte diverse dimensioni di grandezze, termine che qui abbreviamo con **dimensioni-m**,

Spesso è importante garantirsi della correttezza delle attribuzioni delle dimensioni-m a un complesso di misure: questo si ottiene con al cosiddetta **analisi dimensionale-m**.

Un tipico problema sulle dimensioni-m si incontra quando si sono ottenute due grandezze non fondamentali ottenute attraverso misure indirette effettuate su oggetti o processi facili da misurare e quando queste grandezze si devono confrontare per decidere se sono molto vicine, ad esempio entro i margini delle loro incertezze, oppure se una grandezza è decisamente superiore all'altra.

In questi casi è opportuno un controllo preliminare che assicuri che si tratta di due grandezze omogenee, ossia attribuite lla stessa dimensione-m. Questo si ottiene esprimendo le due dimensioni-m come prodotto di potenze delle dimensioni di base.

P10:c.08 L'incertezza di una misura indiretta in genere viene ottenuta a partire dalle incertezze delle misure utilizzate per determinarla, cioè delle misure delle grandezze delle quali viene considerata dipendente.

Questo tipo di derivazione risulta ben chiaro per una misura di lunghezza di un oggetto (asta, strada da percorrere, ...) ottenuta sommando le misure delle lunghezze di due porzioni che compongono l'oggetto.

Questo tipo di derivazione è molto chiaro anche per la misura del volume di un corpo rigido con la forma di un parallelepipedo retto (mattoni, scatola, container, ...); un tale volume si determina in genere come prodotto di tre misure di lunghezza.

Queste derivazioni vengono studiate in statistica con il cosiddetto studio della "propagazione degli errori".

La valutazione delle incertezze delle misure indirette in gran parte dei casi si ottiene con le seguenti regole.

L'errore assoluto di una somma di due o più misure è la somma degli errori assoluti delle misure addende.

L'errore assoluto di una somma di due o più misure è la somma degli errori assoluti delle misure addende.

L'errore assoluto di una differenza tra due misure è la somma degli errori assoluti delle due misure operande.

L'errore relativo di un prodotto di due o più misure è la somma degli errori relative delle misure che costituiscono i fattori.

L'errore relativo di un quoziente tra due misure è la somma degli errori relative delle due misure operande.

P10:d. evoluzione del Sistema Internazionale

P10:d.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 che si occupa di grandezze fisiche ponendosi lo scopo di coprire tutti i generi di grandezze di rilievo e per ciascun genere di coprire tutti gli ordini di grandezza che presentano interesse.

Per misurare 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 dei vantaggi che presentano le notazioni decimali.

Deroghe a queste linee sono dovute ad 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.

P10:d.02 Il Sistema Internazionale si è costituito 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 al fine di renderli più chiari e razionali. Questa 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, e come kilogrammo la massa di un litro di acqua.

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

P10:d.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 William Thomson, poi Lord Kelvin, hanno proposto il sistema cgs basato su centimetro, grammo e secondo assunte come unità di base e su altre unità ben distinte come unità derivate (unità di forza, energia, pressione, viscosità, ...).

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

Questa struttura si basa sulla costituzione del Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), organismo 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.

P10:d.04 Lo sviluppo dell'elettromagnetismo nella seconda metà del secolo XIX ha richiesto la introduzione di unità di misura 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 fra 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 agli 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 stoffe. 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 delle radiazioni emesse dagli atomi di kripton 86; ora per metro si intende la lunghezza del percorso nel vuoto dalla suddetta radiazione nell'intervallo di tempo della frazione di $1/299792458$ di secondo.

P10:d.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” definita attraverso il numero di Avogadro adottato come costante universale.

Nel 2018 si è giunti alla definizione di tutte le unità fondamentali a partire dai valori assegnati a quelle 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.

P10:e. norme del Sistema Internazionale

P10:e.01 Le assunzioni che costituiscono il nucleo del **S.I.**, sono presentate sinteticamente e in ordine logico nei punti che seguono.

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

(2) Definite le 7 costanti fondamentali, si stabiliscono i loro valori da assumere come valori di riferimento esatti, cioè come 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 alla totalità delle attività di misurazione.

P10:e.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 varie e numerose leggi che danno più possibilità di ottenere i rispettivi valori.

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 in parte di 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**.

P10:e.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	K_{cd}
Numero di Avogadro	N_A

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

P10:e.04 Tutte le altre grandezze fisiche sono considerate riducibili a combinazioni delle grandezze fondamentali. Tutte le altre costantifisiche sono dichiarate riducibili a combinazioni razionali delle costanti fondamentali.

La definizione del nucleo logico del Sistema Internazionale è 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	$[M] \cdot [L]^2 \cdot [T]^{-2} \cdot [\Theta]^{-1}$
K_{cd}	$[J] \cdot [T]^3 \cdot [M]^{-1} \cdot [L]^{-2}$
N_A	$[N]^{-1}$

Invertendo 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.

P10:e.05 Vediamo ora le regole precise che sono state fissate per la crittura dei simboli.

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 dal crescente 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 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.** sono entità matematiche perciò, a differenza delle abbreviazioni, questi simboli non devono essere seguiti dal punto (per il metro: m e non m.).

Un prefisso è parte integrante dell'unità e (prevedibilmente) va premesso al simbolo dell'unità senza spazi (per es. k in km, M in MPa, G in GHz, μ in μg).

Le unità di misura devono stare 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 fra 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 J · 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. mμm va scritto come nm).

Una unità con prefisso costituisce un'espressione simbolica singola: (per esempio km² è equivalente a (km)m²).

Qualora necessario, gruppi di unità di misura possono essere messi tra parentesi: J/K mol equivale a J/K · mol o a J · K⁻¹ · mol⁻¹ o a J (K · mol)⁻¹.

Per i simboli è opportuno evitare il corsivo e il grassetto allo scopo di differenziarli dalle variabili matematiche e fisiche (per esempio 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 della desinenza -s o -es.

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 o 342 142 (in altri sistemi si scrive 1,000,000 o ad esempio 24,51).

Per contro nel 2003 il CGPM concesse di usare il punto nei testi in inglese.

P10:e.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 x 10⁻⁷ m, quindi introducendo il prefisso **S.I.** "nano-", 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 m = 10 km = 1 dakm (un deka chilometro).

P10:e.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	ronnaa	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	1 000 000 000
10^6	mega	M	milione	1 000 000
10^3	chilo	k	mille7	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 bilionesimo invece di miliardesimo, trilionesimo invece di bilionesimo e così' via.

P10:e.08 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 cui, quando l'unità di misura è il byte o quelle da essa derivata, per kilo si intenda 1 024 e non 1 000, anche se si tratta in realtà di una imprecisione spesso 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".

Cosìmentre 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 terabyte, un computer con memoria da 4 gibibyte ha una capacità di 4294967296 B ovvero di circa 4,295 GB .

P10:e.09 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	metr	m
Massa	chilogrammo	kg
Intensità di corrente	ampere	A
Temperatura assoluta	kelvin	K
Intensità luminosa	candela	cd
Quantità di sostanza	mole	mol

P10:e.10 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	ν_{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	k_B	$1,380649 \times 10^{-23}$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
Efficienza luminosa standard	K_{cd}	683	$cd \cdot sr \cdot s^3 \cdot kg^{-1} \cdot m^{-2}$
Costante di Avogadro	N_A	$6,02214076 \times 10^{23}$	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.

P10:f. grandezze derivate del Sistema Internazionale

P10:f.01 L'insieme delle teorie fisiche su cui si fonda il Sistema Internazionale permette di dedurre tutte le grandezze fisiche a partire dalle sette grandezze fondamentali.

In secondo luogo, le unità di misura che il Sistema Internazionale ha scelto per queste 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 (solitamente a esponente intero) 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 senza fattori numerici di conversione.

Molte di esse hanno nomi particolari (ad esempio la grandezza derivata “joule/secondo” è chiamata 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 sui calcoli e/o sulle equazioni di una legge fisica.

P10:f.02 Nella tabella che segue adottiamo le seguenti abbreviazioni.

(a) = Simboli del genere della grandezza

(b) = Nome dell'unità **S.I.**

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

P10:g. unità accettate dal del Sistema Internazionale

P10:g.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 scopi pratici.

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

Questa categoria contiene soprattutto unità riguardanti durate e angoli, entità collegate strutturalmente dai moti di rotazione e rivoluzione della Terra e dai quadranti circolari 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 $^{\circ}$ = (1/60) $^{\circ}$ = (p/10 800) rad
minuto secondo	$^{\circ\circ}$	1 $^{\circ\circ}$ = (1/60)' = (p/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

P10:g.02 Alcune unità di misura nel passato venivano accettate da **S.I.** perché risultavano più precise di quelle sistematiche.

Fino al 2019 queste unità sono accettate perché quelle previste da **S.I.** sono ricavate mediante relazioni fisiche che includono costanti che non erano conosciute con precisione sufficiente. Quindi si è tollerato l’uso di unità non ufficiali per la loro maggiore precisione.

In seguito alla definizione delle unità base tramite costanti fisiche, i valori di queste grandezze sono stati sufficientemente precisati.

Per completezza le 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

P10:g.03

Attualmente sono accettate anche altre unità non **S.I.**.

Queste unità sono ampiamente usate in ambiti commerciali, medici, legali e nella navigazione. Esse dovrebbero essere definite in relazione alle unità **S.I.** in ogni documento in cui vengono usate. Il loro uso è però 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	$1 \text{ miglio nautico} = 1852 \text{ m}$
nodo	kn	$1 \text{ nodo} = 1 \text{ miglio nautico all'ora} = (1852/3600) \text{ m/s}$
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.

P10:h. altri sistemi di misura

P10:h.01 Nel mondo attuale rimane comunque ampio l'utilizzo di unità di misura tradizionali più o meno limitato ad ambiti nazionali.

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 dei due Paesi e della loro influenza che esercitano su estesi settori industriali in tutto il 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 fra le unità richieste 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 e commerciale, sono peraltro accuratamente definiti e mantenuti.

A questo proposito rinviamo a **System of units of measurement** (we) , a

<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...>

e a **List of conversion factors** (we) .

P10:h.02 Presentiamo 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	

Testi dell'esposizione in <http://www.mi.imati.cnr.it/alberto/> e in <http://arm.mi.imati.cnr.it/Matexp/>