

Esercizi e problemi risolti

per il laboratorio di Fisica

Luca Baldini

2026-09-29

Indice

Prefazione	3
Licenza	4
Tu sei libero di:	4
Alle seguenti condizioni:	4
Note:	5
1 Problemi a la Fermi	6
1.1 Una vita di respiri	6
1.2 Il cielo in una stanza	7
1.3 Il cielo tutto intero	8
1.4 Vita da clown	10
1.5 Massa della terra	11
1.6 Massa degli oceani	12
1.7 Ricaricare lo smartphone	13
Appendici	14
A Cronologia delle versioni	14

Prefazione

Versione 0.0.0 ([cronologia](#))

Licenza

Tutto il materiale dell'opera è distribuito con licenza *Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0)*.



© 2026 Luca Baldini

Tu sei libero di:

Condividere — riprodurre, distribuire, comunicare al pubblico, esporre in pubblico, rappresentare, eseguire e recitare questo materiale con qualsiasi mezzo e formato per qualsiasi fine, anche commerciale.

Modificare — remixare, trasformare il materiale e basarti su di esso per le tue opere per qualsiasi fine, anche commerciale.

Il licenziante non può revocare questi diritti fintanto che tu rispetti i termini della licenza.

Alle seguenti condizioni:

Attribuzione — Devi riconoscere una menzione di paternità adeguata, fornire un link alla licenza e indicare se sono state effettuate delle modifiche. Puoi fare ciò in qualsiasi maniera ragionevole possibile, ma non con modalità tali da suggerire che il licenziante avalli te o il tuo utilizzo del materiale.

StessaLicenza — Se remixi, trasformi il materiale o ti basi su di esso, devi distribuire i tuoi contributi con la stessa licenza del materiale originario.

Divieto di restrizioni aggiuntive — Non puoi applicare termini legali o misure tecnologiche che impongano ad altri soggetti dei vincoli giuridici su quanto la licenza consente loro di fare.

Note:

Non sei tenuto a rispettare i termini della licenza per quelle componenti del materiale che siano in pubblico dominio o nei casi in cui il tuo utilizzo sia consentito da una eccezione o limitazione prevista dalla legge.

Non sono fornite garanzie. La licenza può non conferirti tutte le autorizzazioni necessarie per l'utilizzo che ti prefiggi. Ad esempio, diritti di terzi come i diritti all'immagine, alla riservatezza e i diritti morali potrebbero restringere gli usi che ti prefiggi sul materiale.

1 Problemi a la Fermi

Enrico Fermi era noto, tra le varie cose, per la sua innata capacità di stimare rapidamente qualsiasi cosa entro un ordine di grandezza, sulla base di ragionamenti semplici, e senza bisogno di niente altro che carta e penna. Gli aneddoti in questo senso, apocrifi o meno, non si contano—egli stesso dice che, durante il test *Trinity* (che segna l’inizio dell’era nucleare), riuscì a stimare entro un fattore 2 la potenza dell’esplosione lasciando cadere dei pezzettini di carta al passaggio dell’onda d’urto, e misurandone lo spostamento orizzontale.

Negli anni, l’espressione *problema a la Fermi* è entrata ampiamente nel linguaggio comune per indicare un problema che richiede una stima rapida (e non necessariamente molto precisa) di una grandezza fisica, sulla base di ragionamenti il più semplici possibile. Un esempio classico è quello della stima del numero di accordatori di pianoforte nella città di Chicago, che troverete trattato diffusamente in un numero sterminato di risorse facilmente reperibili.

In questo capitolo troverete una piccola selezione di problemi alla Fermi con cui potete cimentarvi. Nessuno di questi richiede conoscenze di Fisica particolarmente avanzate, e lo scopo principale è quello di esercitare la capacità di fare ipotesi ragionevoli sulle grandezze necessarie. Sforzatevi di risolverli senza fare ricerche dedicate, e senza utilizzare niente altro che carta e penna—anche la capacità di moltiplicare e dividere numeri senza usare la calcolatrice (sfruttando le potenze di dieci ove necessario) è un’abilità utile da coltivare.

E, soprattutto, ricordate: se arrivate ad una stima entro un fattore 2–3 dalla risposta corretta, avete raggiunto il vostro obiettivo!

1.1 Una vita di respiri

Si stimi il numero di respiri che un essere umano compie durante la sua vita. (Suggerimento: ascoltate per un attimo il vostro respiro e provate a stimarne la frequenza senza l’ausilio di un cronometro. Il resto sono semplici moltiplicazioni.)

i Soluzione

Vi siete ritagliati un momento per stimare la frequenza f del vostro respiro? Nel mio caso, da seduto alla scrivania, è circa uno ogni 3 s, ovverosia

$$f \approx 0.3 \text{ Hz.}$$

(Chiaramente il numero sarebbe diverso se l'avessi misurato dopo una corsa prolungata, ma ricordatevi che qui siamo interessati ad un ordine di grandezza.)

L'unica altra cosa che dobbiamo stimare è la durata media T della vita di un essere umano, misurata in secondi. Se assumiamo che sia di 80 anni, dobbiamo semplicemente moltiplicare: 60 secondi in un minuto, 60 minuti in un'ora, 24 ore in un giorno, 365 giorni in un anno

$$T \approx 60 \times 60 \times 24 \times 365 \times 80 \approx 2.5 \times 10^9 \text{ s.}$$

(Prendete il tempo necessario per scrivere tutto su un foglio di carta, usando le potenze di 10, e stimare il numero, anche entro un fattore 2, facendo le moltiplicazioni a mente.)

Il numero totale di respiri N che un essere umano compie durante la vita è dunque dell'ordine di

$$N = fT \approx 10^9,$$

i.e., un miliardo. Notate che siamo stati *generosi* nella divisione—quello che abbiamo fatto corrisponde a dire sostanzialmente che $\frac{2.5}{3} = 1$. D'altra parte le nostre stime iniziali di f e della vita media sono così crude che non avrebbe senso scrivere il risultato con più di una cifra significativa.

```
f = 0.3 # Hz
T = 60 * 60 * 24 * 365 * 80 # s

N = f * T

print(f"Risposta: {N:.1e}")
```

Risposta: 7.6e+08

1.2 Il cielo in una stanza

Si stimi la massa totale dell'aria presente in una stanza di dimensioni tipiche. (Prima di svolgere l'esercizio, provate a rispondere in un secondo con il numero che vi pare più ragionevole, senza fare calcoli; scrivete il numero su un pezzo di carta e confrontatelo con la stima ottenuta svolgendo l'esercizio. Avete sbagliato per eccesso o per difetto?)

Soluzione

La prima cosa che ci serve è una stima ragionevole della densità atmosferica al livello del mare. *Spoiler alert:* la densità tipica di un gas in condizioni standard di temperatura e pressione (0°C, 1 atm) è dell'ordine di $10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$, o 1 kg m^{-3} . (Entro un ordine di grandezza; per essere precisi, la densità dell'aria secca in condizioni standard è di 1.292

kg m⁻³, ma in questo caso una o due cifre significative sono più che sufficienti.)

Se non vi ricordate (o non avete mai sentito) questo numero, ci possiamo arrivare richiamando alla memoria i rudimenti di chimica studiati alle scuole superiori: *1 mole di gas ideale occupa un volume di circa 22.4 litri a temperatura e pressione standard*. Se assumiamo che l'aria sia composta principalmente da azoto molecolare N₂ (in realtà si ha circa l'80% di N₂ e il 20% di O₂, oltre a tracce di altri gas), la massa di una mole di aria è circa 28 g (il doppio della massa molare dell'azoto atomico il cui isotopo più comune ha numero di massa 14). Questi due numeri bastano per una stima della densità dell'aria

$$\rho_{\text{aria}} \approx \frac{28 \text{ g}}{22.4 \times 10^3 \text{ cm}^3} \approx 1.25 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

(Dovete ricordare che 1 litro equivale a 1 dm³ = 1000 cm³.) Non male—siamo entro il 5% dal valore tabulato, e la discrepanza è dovuta principalmente all'aver trascurato il contributo dell'ossigeno molecolare. Ma la nostra stima iniziale di 10⁻³ g cm⁻³ era più che adeguata.

Se consideriamo una stanza di dimensioni tipiche, diciamo 5 m × 4 m × 3 m, ovverosia con un volume di 60 m³, la massa totale dell'aria presente nella stanza è

$$M = \rho_{\text{aria}} V \approx 75 \text{ kg}.$$

Più o meno la massa di una persona adulta. Sorpresi?

```
rho = 1.25 # kg m^-3
V = 5. * 4. * 3 # m^3

M = rho * V

print(f"Risposta: {M:.1f} kg")
```

Risposta: 75.0 kg

1.3 Il cielo tutto intero

Si stimi la massa dell'atmosfera terrestre nel suo complesso.

i Soluzione

Abbiamo già stimato la densità dell'aria al livello del mare, e potremmo essere tentati di dire che tutto ciò che ci occorre è il volume totale dell'atmosfera che, se sapessimo

l'altezza h_{atm} di quest'ultima, potremmo stimare come

$$V_{\text{atm}} \approx 4\pi R_{\oplus}^2 h_{\text{atm}}.$$

dove $R_{\oplus}$ è il raggio della terra ($R_{\oplus} \approx 6400$ km).

(Formalmente dovremmo calcolare il volume della calotta sferica di spessore h che ricopre la superficie della terra, ma siccome $h \ll R_{\oplus}$, non sbagliamo di molto se prendiamo il prodotto della superficie terrestre per l'altezza dell'atmosfera; chi non fosse convinto può cimentarsi con l'esercizio ??.)

Ora: un pianeta con un'atmosfera uniforme che termina bruscamente ad un'altezza h_{atm} fissata sarebbe governato da leggi fisiche molto diverse da quelle che regolano il mondo in cui viviamo, ma con un po' di fantasia possiamo pensare di definire un'altezza *efficace* h_{eff} che possiamo usare per fare un modellino giocattolo di atmosfera uniforme approssimativamente equivalente all'atmosfera reale. Il problema è: come possiamo stimare h_{eff} ?

Cerchiamo di farci aiutare dal senso comune. Arrivare in vetta alle montagne più alte della terra (i.e., a 9000 m) è estremamente difficile senza l'ausilio di ossigeno; e la quota di crociera degli aerei di linea è di circa 10 km, perché più in alto l'aria è troppo rarefatta. Entrambi questi fatti sembrano indicare che a 10 km di altezza la densità dell'atmosfera sia molto più piccola rispetto a quella al livello del mare. (Se siete curiosi di sapere quanto, la risposta è circa $\frac{1}{3}$.) Allora possiamo provare a prendere come altezza efficace la metà di questo valore, i.e., $h_{\text{eff}} = 5$ km. Così facendo si ha

$$M_{\text{atm}} \approx 4\pi R_{\oplus}^2 \rho_{\text{aria}} h_{\text{eff}} \approx 3 \times 10^{18} \text{ kg}.$$

Questo valore è entro un fattore 2 dal valore di [riferimento](#) $M_{\text{atm}} \approx 5.1480 \times 10^{18} \text{ kg}$.

Se andiamo per un attimo avanti al prossimo capitolo e risolviamo l'esercizio ??, possiamo fornire una stima più corretta sulla base di un modello fisicamente più realistico—quello di un'atmosfera isoterma, in cui il profilo della densità atmosferica decresce esponenzialmente con l'altezza

$$\rho(h) = \rho_{\text{aria}} e^{-h/h_0},$$

con un'altezza scala $h_0 \approx 8$ km. Questa espressione si può integrare analiticamente per ottenere la massa totale dell'atmosfera

$$M_{\text{atm}} \approx 4\pi R_{\oplus}^2 \int_0^{\infty} \rho(h) dh = 4\pi R_{\oplus}^2 \rho_{\text{aria}} \int_0^{\infty} e^{-h/h_0} dh = 4\pi R_{\oplus}^2 \rho_{\text{aria}} h_0 \approx 5.1 \times 10^{18} \text{ kg}.$$

(Notate che, formalmente, la superficie su cui integriamo dipende da h , ma nell'approssimazione $h \ll R_{\oplus}$ possiamo, esattamente come prima, trascurare questa dipendenza.)

Curiosamente questa espressione è identica a quella ottenuta in precedenza, con la sola differenza che l'altezza efficace h_{eff} è stata sostituita dall'altezza scala h_0 . In altre parole potremmo dire che questo modello, fisicamente fondato, ci ha permesso di stimare un

valore più realistico per l'altezza efficace dell'atmosfera terrestre, che coincide con l'altezza scala h_0 del modello isoterma. Il valore ottenuto per la massa totale cercata è adesso entro qualche % dal valore di riferimento.

È interessante notare che possiamo stimare la quantità cercata anche per una via completamente diversa. La pressione atmosferica al livello del mare non è altro che la forza peso $M_{\text{atm}}g$ esercitata sulla superficie terrestre dall'atmosfera, divisa per l'area della superficie terrestre

$$P_{\text{atm}} = \frac{M_{\text{atm}}g}{4\pi R_{\oplus}^2} \quad \text{ovvero} \quad M_{\text{atm}} = \frac{4\pi R_{\oplus}^2 P_{\text{atm}}}{g} \approx 5.2 \times 10^{18} \text{ kg}.$$

(Quando fate i calcoli dovete ricordare che la pressione atmosferica nel sistema internazionale è 101325 Pa, o $\approx 10^5$ Pa.) Questo ci permette di stimare la massa totale dell'atmosfera senza fare alcuna ipotesi sul suo profilo altimetrico, con una notevole economia concettuale. D'altra parte la parte iniziale di questa soluzione ci ha insegnato un certo numero di cose sulla struttura dell'atmosfera terrestre, che sono interessanti in sé.

```
import numpy as np

rho = 1.25 # kg m^-3
R = 6400000. # m
h_eff = 5000. # km
h_0 = 8000. # km
P_atm = 101325. # Pa
g = 9.81 # m s^-2

M1 = 4. * np.pi * R**2. * h_eff * rho
M2 = 4. * np.pi * R**2. * h_0 * rho
M3 = 4. * np.pi * R**2. * P_atm / g

print(f"Prima stima: {M1:.1e} kg")
print(f"Seconda stima: {M2:.1e} kg")
print(f"Terza stima: {M3:.1e} kg")

Prima stima: 3.2e+18 kg
Seconda stima: 5.1e+18 kg
Terza stima: 5.3e+18 kg
```

1.4 Vita da clown

Si stimi il numero di palloncini di elio che sarebbero necessari per sollevare una persona.

i Soluzione

Il cuore della soluzione è il principio di Archimede, che in questo particolare contesto possiamo enunciare come: serve un volume di elio tale che la massa d'aria contenuta in quel volume meno la massa dell'elio stesso sia maggiore maggiore o uguale della massa m della persona da sollevare

$$(\rho_{\text{aria}} - \rho_{\text{He}})V \geq m \quad \text{ovvero} \quad V \geq \frac{m}{\rho_{\text{aria}} - \rho_{\text{He}}}.$$

(Abbiamo trascurato la massa del palloncino; ci torniamo tra un attimo.)

La densità dell'aria l'abbiamo già stimata in precedenza, e vale circa $\rho_{\text{aria}} \approx 1.25 \text{ kg m}^{-3}$. La densità dell'elio è si può stimare in base al rapporto dei numeri di massa delle molecole/atomi di aria (che modellizziamo come azoto molecolare N_2) ed elio

$$\rho_{\text{He}} \approx \frac{4}{28} \rho_{\text{aria}} \approx 0.18 \text{ kg m}^{-3},$$

per cui la differenza di densità è $\rho_{\text{aria}} - \rho_{\text{He}} \approx 1.07 \text{ kg m}^{-3}$. Se lo scriviamo con una sola cifra significativa, abbiamo un bel numero facile da ricordare, ovverosia: *ci serve 1 m³ di elio per ogni kg di massa che vogliamo sollevare*. Se la persona in questione pesa 70 kg, il volume di elio necessario è 70 m³. (Pensateci un attimo: si tratta dell'equivalente di un cubo di più di 4 m di spigolo, più del volume della stanza che abbiamo considerato nell'esercizio Sezione 1.2.)

In quanti palloncini di elio si traduce questo volume? Se pensiamo a dei tipici palloncini da festa, con un raggio $r = 15 \text{ cm}$, il volume V_p di un singolo palloncino è

$$V_p = \frac{4}{3} \pi r^3 \approx 0.014 \text{ m}^3,$$

per cui il numero di palloncini necessari è circa 5000.

Possiamo anche frastare la cosa da un punto di vista leggermente differente: un palloncino da festa riempito di elio può sollevare circa 14 g di massa. Questo, come abbiamo detto, trascurando la massa del palloncino stesso, che è dell'ordine di qualche grammo, ovverosia il 20–30% della portanza stimata. Questo vuol dire che in pratica la massa del palloncino è un contributo non trascurabile, e che la nostra stima di 5000 è, con ogni probabilità, ottimistica. (Tra l'altro abbiamo anche trascurato la massa del filo che presumibilmente useremmo per legare i palloncini alla persona, ma ci siamo capiti: l'ordine di grandezza è giusto ed è tempo di andare oltre.)

1.5 Massa della terra

Si stimi la massa del pianeta terra.

i Soluzione

In prima approssimazione possiamo modellizzare la terra come una sfera di raggio $R \approx 6400$ km. Stimare la densità media sulla base dei principi primi non è banale, perché richiederebbe un modello dettagliato della struttura interna del pianeta, ma se siamo interessati semplicemente ad un ordine di grandezza è sufficiente ricordare che la densità dei materiali solidi più comuni è dell'ordine di qualche g cm^{-3} (2.7 g cm^{-3} per l'alluminio e 11.3 g cm^{-3} per il piombo, tanto per fare due esempi).

Prenderemo come valore di riferimento $\langle \rho \rangle \approx 5 \text{ g cm}^{-3}$, o $5 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$, col che la massa cercata si può stimare come

$$M = \frac{4}{3}\pi R^3 \langle \rho \rangle \approx 5.5 \times 10^{24} \text{ kg}.$$

Possiamo fornire una stima indipendente della massa della terra utilizzando la legge di gravitazione universale per esprimere l'accelerazione gravitazionale g sulla superficie terrestre

$$F = mg = G \frac{Mm}{R_{\oplus}^2} \quad \text{ovvero} \quad M = \frac{gR_{\oplus}^2}{G} \approx 6 \times 10^{24} \text{ kg}. \quad (1.1)$$

(In questo caso dobbiamo ricordare che l'accelerazione gravitazionale al livello del suolo è $g \approx 9.81 \text{ m s}^{-2}$, e che la costante di gravitazione universale vale $G \approx 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$.)

Per completezza, il pacchetto Python [astropy.constants](#) fornisce il valore $M_{\oplus} = 5.97216787 \times 10^{24} \text{ kg}$, i.e., entrambe le nostre stime sono accurate a meglio del 10%.

1.6 Massa degli oceani

Si stimi la massa totale di acqua presente sul pianeta terra.

i Soluzione

Si tratta di un problema interessante, che non è difficile da risolvere, una volta che abbiamo ipotesi ragionevoli per le grandezze in gioco.

L'acqua è presente sulla terra in una varietà di forme diverse: gli oceani, i ghiacciai, i laghi ed i fiumi, le falde acquifere sotterranee, l'umidità del suolo, il vapore acqueo nell'atmosfera, oltre ovviamente all'acqua presente nei tessuti viventi. Faremo l'ipotesi di lavoro che la maggior parte dell'acqua sia contenuta negli oceani, e che le altre componenti siano sottodominanti. A questo livello non abbiamo stime precise che ci possano confortare, ma una rapida occhiata ad un mappamondo ci può confortare nella nostra scelta.

Modellizzeremo la terra come una sfera perfetta di raggio $R_{\oplus} = 6400$ km, e assumeremo che gli oceani coprano una frazione $\mathcal{F} \approx \frac{2}{3}$ della superficie terrestre (anche se non vi ricordiate questo numero dalla geografia che avete studiato alle scuole medie, date una seconda occhiata al mappamondo e non dimenticate che stiamo cercando un ordine di grandezza, per cui qualsiasi cosa tra $\frac{1}{2}$ e 1 va altrettanto bene).

L'altro ingrediente fondamentale di cui abbiamo bisogno è la profondità media $\langle h \rangle$ degli oceani, e qui ci viene in aiuto un'altra nozione diffusa di cultura generale: il punto più profondo della crosta terrestre è un abisso nella fossa delle Marianne, che raggiunge circa 11 km di profondità. All'ordine zero possiamo allora dividere per due questo numero e assumere che la profondità media degli oceani sia

$$\langle h \rangle \approx 5 \text{ km.}$$

Per stimare il volume totale V d'acqua presente negli oceani, formalmente dovremmo calcolare il volume della calotta sferica di spessore $\langle h \rangle$ che ricopre la superficie della terra, ma siccome $\langle h \rangle \ll R_{\oplus}$, non sbagliamo di molto se, più semplicemente, calcoliamo il prodotto della superficie terrestre per la profondità media

$$V \approx 4\pi R^2 \langle h \rangle \mathcal{F}.$$

(Se siete incerti su questo, cimentatevi con l'esercizio ??.)

A questo punto non ci resta che moltiplicare per la densità dell'acqua

$$\rho \approx 1 \text{ g/cm}^3 = 10^3 \text{ kg/m}^3$$

per ottenere la massa totale d'acqua cercata

$$M = \rho V \approx 4\pi R^2 \langle h \rangle \mathcal{F} \rho \approx 10^{21} \text{ kg.}$$

Lo USGS (U. S. geological survey) mantiene una [pagina web](#) in cui trovate una risposta articolata a questa domanda. La massa totale di acqua negli oceani è dell'ordine di 1.3×10^{21} kg, e costituisce circa il 96.5% dell'acqua totale sulla terra.

1.7 Ricaricare lo smartphone

Si stimi il numero totale di elettroni che passano fisicamente attraverso il cavo USB durante la ricarica completa di uno *smartphone*. (Qual è il destino ultimo di questi elettroni?)

i Soluzione

A Cronologia delle versioni