Appendix C: Solutions to additional exercises

Esercizio supplementare A.1

a. Cercate cosa sia un Joule in unità SI. Che cosa significa? Confrontatelo con le unità di misura della velocità (*m/s*) e dell'accelerazione (m/s^2).

1 J = 1 kgm2/s2, è l'energia necessaria per accelerare una massa di 1 kg su una distanza di 1 m con un'accelerazione di 1 m/s2. Si noti che il lavoro (che è l'energia trasferita a o da un oggetto tramite l'applicazione di una forza lungo uno spostamento) è Forza · distanza, che ha unità: N · m o kgm/s2 · m. Quindi 1 Joule può anche essere interpretato come l'energia risultante dall'applicazione costante di una forza lungo una certa distanza. Confrontando l'unità di energia con la velocità e l'accelerazione, vediamo che la variazione della velocità nel tempo è un'accelerazione e che l'accelerazione moltiplicata per una massa è una forza.

b. [Quale delle seguenti risposte rappresenta circa 1 Joule di energia?

D, tutto quanto sopra.

c. Quanto pensate che sia il consumo totale di energia nel mondo? Cercate il consumo energetico totale del mondo in Joule e confrontatelo con la vostra stima. La vostra stima era corretta?

Il consumo totale di energia (primaria) del mondo nel 2021 è stato stimato in 595,15 exajoule, ovvero 595,15 × 10^{18} Joule; fonte: BP statistical review of world energy 2022 (p.8)

Esercizio supplementare A.2

a. Dove avete trovato i dati? Come fate a sapere se i dati che avete trovato sono affidabili? Spiegate perché vi fidate di queste informazioni.

-

b. Quali unità di misura sono utilizzate nei dati?

-

c. Confrontate le unità di misura di Joule (J), chilowattora (kWh) e tonnellate equivalenti di petrolio (tep). A quanti Joule corrisponde un kWh? A quanti Joule corrisponde un tep? A quanti Joule corrisponde un Mtep?

1 kWh = 3 600 000 Joule; 1 tep = 41,868 × 10^9 Joule (o 41,868 GJ); 1 Mtep = 41,868 × 10^{15} Joule o 41,868 PJ.

d. Cosa significa energia primaria?

Energia nella forma in cui viene contabilizzata per prima in un bilancio energetico statistico, prima di qualsiasi trasformazione in forme secondarie o terziarie di energia. Ad esempio, il carbone può essere convertito in gas sintetico, che può essere convertito in elettricità; in questo esempio, il carbone è energia primaria, il gas sintetico è energia secondaria e l'elettricità è energia terziaria (fonte: U.S. Energy Information Administration, https://www.eia.gov/tools/glossary/index.php?id=Primary%20energy).

L'energia primaria è una forma di energia che si trova in natura e che non è stata sottoposta ad alcun processo di conversione da parte dell'uomo. Si tratta cioè dell'energia che si trova in natura in elementi come i combustibili grezzi che non sono stati modificati o alterati dall'uomo. Ne sono un esempio il carbone, il gas naturale, l'uranio naturale. Questi possono essere convertiti in energia secondaria trasformandoli in vettori energetici più utilizzabili, come la benzina che deriva dal petrolio. Se la benzina viene utilizzata per creare elettricità, l'elettricità è energia terziaria. L'energia primaria è spesso utilizzata per calcolare la fornitura totale di energia primaria (TPES) di un Paese, una misura comune per confrontare i Paesi in base alle loro risorse energetiche.

e. Nella maggior parte dei Paesi, i cosiddetti **combustibili fossili** dominano l'approvvigionamento energetico. Confrontando Paesi e percentuali diverse, qual è il contributo delle fonti rinnovabili come l'energia solare ed eolica?

Dipende dal Paese. In quasi tutti i Paesi, i combustibili fossili dominano ancora il mix energetico.

f. Gran parte del mix energetico proviene da fonti sostenibili? E le fonti rinnovabili?

Ciò dipende dalle fonti utilizzate e dal fatto che siano considerate sostenibili: i biocarburanti potrebbero essere considerati sostenibili, così come la fissione nucleare, a seconda del punto di vista e delle normative vigenti. Quindi la sostenibilità spesso include le fonti rinnovabili e altre fonti come la fissione o i biocarburanti. Quindi la parte di fonti sostenibili è spesso considerata maggiore di quella rinnovabile. Alcuni Paesi utilizzano molta energia nucleare e quindi hanno emissioni di CO_2 *inferiori rispetto a Paesi che utilizzano una quota maggiore di energia solare ed eolica, ma che fanno ancora molto affidamento sui combustibili fossili. La società determina ciò che è accettabile e ciò che è considerato veramente sostenibile.*

Esercizio supplementare A.3

***Nota**: poiché questo esercizio ha come obiettivo principale quello di ottenere delle stime di ordine di grandezza per l'utilizzo di energia, le risposte fornite di seguito non sono esatte. Poiché esistono molte fonti diverse (a volte persino contraddittorie) per i valori energetici su larga scala, a causa della difficoltà di misurare l'energia a tale livello, si potrebbero trovare risultati molto diversi. Finché la logica è corretta nel giungere a una risposta, questa sarà comunque valida anche se un numero errato viene scambiato con un valore corretto.*
Quindi, prestate attenzione al ragionamento piuttosto che ai numeri esatti.

a. Fate una stima dell'energia utilizzata in Joule da una famiglia, una città, un Paese e il mondo.

Utilizzando i dati di: ODYSSEE-MURE, Our World in Data e University of Ontario; Il consumo medio di energia per abitazione (cioè casa/famiglia) varia a seconda del Paese europeo (vedi anche: https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-by-sector/households/average-energy-consumption-dwelling.html). In media, nel 2019 in Europa sono stati utilizzati 1,3 tep/abitazione, ovvero 1,3 tep/abitazione × 41,868 GJ/tep = 54,4 GJ/abitazione. Quindi, in media, si stima che una famiglia consumi 54,4 GJ/anno in Europa.

Poiché le città variano per dimensioni e consumi a seconda del Paese, è difficile trovare il consumo di una città in Europa. Tuttavia, prendendo la media calcolata per una famiglia, possiamo prendere una città, cercare il numero di famiglie e ottenere una stima approssimativa. Prendendo come esempio Berlino, una città con (secondo Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Demographics_of_Berlin) quasi 2 milioni di famiglie, otteniamo: 54,4 GJ/anno × 2 000 000 = 54,4 × 1015 Joule, poco più di 1 Mtep. Se confrontiamo questo dato con un valore fornito online di 263,2 PJ = 263,2 × 1015 Joule (fonte: https://www.cleanenergywire.org/factsheets/energy-use-city-berlin), questa stima si aggira su un fattore 5. Considerando che la Germania nel 2021 aveva un consumo energetico di circa 286 Mtep (secondo: https://www.enerdata.net/estore/energy-market/germany) e che Berlino è una delle più grandi città tedesche e che ci sono circa 2000 città in Germania, la stima sembra essere ragionevole.

Infine, il consumo energetico del mondo intero è stimato in 580 milioni di terajoule. Vale a dire 580 milioni di trilioni di joule o circa 13865 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio (Mtep).

b. Fate una stima dell'energia totale utilizzata nell'industria e dell'energia totale utilizzata dagli individui su questo pianeta.

Utilizzando i dati di: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-10/assessment (si noti che l'ultima versione non contiene più dati per settore, quindi utilizziamo una versione archiviata), dove l'energia è suddivisa in 5 settori, ovvero: trasporti, industria, famiglie, servizi commerciali e pubblici e altro, possiamo vedere quale parte del consumo totale di energia è dovuta ai diversi settori. Poiché le famiglie e l'industria sono presenti, possiamo confrontarle facilmente. Prendendo i dati del 2017, otteniamo i seguenti numeri per l'Europa:

- *Servizi commerciali e pubblici: 154 Mtep*
- *Famiglie: 288 Mtep*
- *Industria: 261 Mtep*
- *Trasporto: 326,9 Mtep*
- *Altro: 30,1 Mtep*

Il che fa un totale di 1060 Mtep nel 2017 per l'Europa (nota: questo è il consumo finale di energia, non l'energia primaria: 1060 Mtep sembrano pochi rispetto ai 286 Mtep che abbiamo trovato nella domanda precedente per la sola Germania, questo dimostra ancora una volta quanta variazione ci sia nei numeri e non è sempre chiaro da dove provenga questa variazione, potrebbe essere dovuta a differenze come l'energia finale rispetto all'energia primaria, ecc.) Tuttavia, se consideriamo l'energia utilizzata dagli individui principalmente come consumo domestico (trascurando il trasporto, poiché la maggior parte dei trasporti è per uso commerciale/industriale) otteniamo 288/1060 × 100 = 27%. Se facciamo lo stesso per l'industria, otteniamo: 261/1060 x 100 = 25%. Si noti che questo dipende molto dalla definizione di uso individuale di energia e di uso industriale di energia e se la vostra definizione varia da quella della vostra fonte, i numeri diranno cose molto diverse.

c. Quali fonti ha utilizzato?

Tutte le fonti utilizzate sono riportate all'interno delle risposte fornite.

d. Corrisponde alle risposte date?

All'interno delle risposte, se possibile, sono state fornite verifiche della validità delle argomentazioni, ad esempio confrontando il consumo di Berlino con il valore calcolato in base al consumo medio per abitazione e al numero trovato online. Dato che qui lavoriamo con stime approssimative, le risposte che non si discostano di più di un fattore 10 l'una dall'altra possono essere considerate molto ragionevoli. Se le risposte variano con fattori molto più grandi, o i dati non corrispondono a causa di definizioni errate o potrebbe esserci un errore o una svista nel calcolo.

e. Cosa notate?

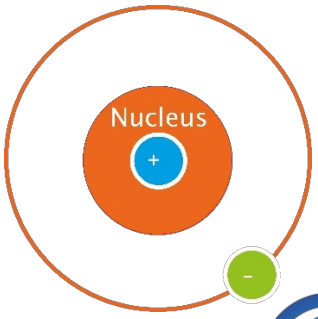
Dall'esercizio emerge chiaramente che è molto difficile ottenere numeri precisi per l'energia su scala mondiale o addirittura su un paese o una città. I problemi sorgono a causa della natura media del calcolo: alcune case consumano molto più di altre e alcune città sono più grandi o consumano più di altre. Tracciare il consumo a tutti i livelli (quindi per tutti i diversi tipi di combustibili/fonti) è molto difficile e diventa tanto più difficile quanto più si allarga lo sguardo. È possibile che alcuni Paesi rilevino i propri consumi energetici in modo diverso, che utilizzino calcoli diversi o eccezioni. Di conseguenza, ci saranno sempre molti numeri diversi utilizzati nelle relazioni o nel giornalismo, alcuni dei quali potrebbero essere molto veritieri mentre altri potrebbero essere meno accurati. Utilizzare fonti affidabili è la cosa migliore, ma a volte è difficile se si cercano dati molto specifici. Data la grande quantità di dati che si possono trovare online, può essere molto difficile sapere di quali dati fidarsi. In caso di incertezza, cercate di trovare dati provenienti da istituti affidabili, come i governi nazionali o le organizzazioni europee.

Esercizio supplementare A.4

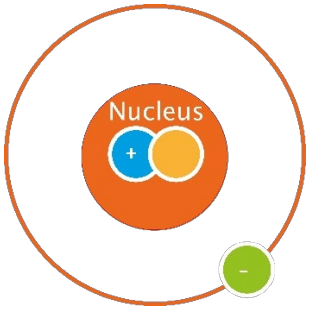
a. Quale tipo di atomo è mostrato nella figura 4 della lettura per studenti? Cercate per cosa viene utilizzato questo isotopo.

Berillio. Il berillio è utilizzato in molti settori diversi, ad esempio nei tubi a raggi X, dove viene utilizzato come finestra per le radiazioni, ma anche per la sua leggerezza in molti componenti strutturali, ad esempio nelle applicazioni aerospaziali. È anche un materiale molto importante per le applicazioni nucleari! Viene utilizzato come riflettore di neutroni nelle applicazioni di fissione nucleare ed è un materiale importante per i futuri reattori a fusione come materiale per parti della prima parete.

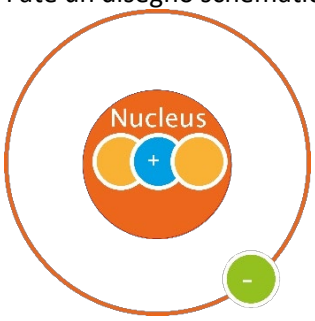
b. Fate un disegno schematico simile alla figura 4 di un atomo di idrogeno.



c. Fate un disegno schematico simile alla figura 4 di un atomo di deuterio.



d. Fate un disegno schematico simile alla figura 4 di un atomo di trizio.



Esercizio supplementare A.5

Bilancia energetica: confrontare l'energia di una barretta di Mars con le seguenti fonti energetiche: benzina, carbone, fissione e fusione. Suggerimento: trovare prima i fattori tra Calorie, Kcal e Joule.

Caloria e kcal sono spesso usate in modo intercambiabile, ma non sono la stessa cosa! 1 kcal = 4184 Joule. Una barretta di mars pesa 51 grammi e ha un contenuto energetico di 450 kcal/100 g secondo la confezione. Da ciò possiamo calcolare che il contenuto energetico di una barretta di mars è: 450 kcal/100 g x 51 grammi/mars = 229,5 kcal/mars. Quindi 230 kcal per barretta. kCal è: è un'unità di energia. Quindi può essere convertita in Joule o in Wattora (1000 Wh = 1 kWh). Se convertiamo una kCal in Wh o Joule, otteniamo: 1 kCal = 1,162222 Wh = 4184 Joule.

Calcolando il contenuto energetico di una barretta di Mars in diverse unità di misura si ottiene: 230 kcal/mars = 962 320 Joule/mars = 267,31106 Wh/mars. Se calcoliamo la densità energetica di un mars, vogliamo conoscere i Joule/kg: (962 320 Joule/mars) / (51 x 10-3 kg/mars) = 18,87 MJ/kg. Ora confronteremo questo valore con il contenuto energetico della benzina, del carbone, della fissione e della fusione, prendendo l'uranio come materiale di fissione e D-T come materiale di fusione. Cercando le densità energetiche su Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density#List_of_material_energy_densities) troviamo:

- *Benzina: 46.4 MJ/kg*
- *Carbone: 26-33 MJ/kg*
- *Uranio: 83 620 000 MJ/kg*
- *Fusione deuterio-trizio: 337 387 388 MJ/kg*
- *Barretta di Mars: 18.87 MJ/kg*

Come si può notare, una barretta di Mars contiene una certa quantità di energia. Tuttavia, poiché non possiamo semplicemente rilasciare questa energia da una barretta di Mars, essa non è ovviamente una fonte di energia valida. Il corpo umano utilizza molti processi chimici per recuperare l'energia, mentre la benzina o il carbone possono essere semplicemente bruciati per rilasciare l'energia. L'uranio e il D-T hanno densità energetiche molto più elevate rispetto a quelle del Mars o dei combustibili fossili, poiché nelle reazioni nucleari c'è molta più energia rispetto alle reazioni chimiche. La fusione ha una densità energetica superiore alla fissione (anche se va notato che l'uranio è molto pesante, quindi un kg di uranio non è molto combustibile, mentre in un reattore a fusione ci sono solo un paio di grammi di combustibile).

Esercizio supplementare A.6

a. Trovare il significato di "fusione" e "fissione" nel dizionario oxford e descriverne la differenza. tra fusione e fissione a livello di atomo.

fusione *sostantivo anche* **fusione nucleare***)*
(*fisica*) l'atto o il processo di combinazione dei nuclei (= parti centrali) degli atomi per formare un nucleo più pesante, con rilascio di energia.

fissione *sostantivo (anche* **fissione nucleare***)*
(*fisica*) l'atto o il processo di scissione del nucleo (= parte centrale) di un atomo, quando viene rilasciata una grande quantità di energia.

La differenza sta nella combinazione di due nuclei in uno più pesante rispetto all'atto di scindere un nucleo (pesante) in due parti più piccole. Per questo motivo anche i nomi hanno un senso: fusione è mettere insieme, fissione è dividere.

b. Cercate di descrivere in termini di energia di legame perché i nuclei più pesanti sono più instabili.

I nuclei sono composti da protoni e neutroni, ma la massa di un nucleo è sempre inferiore alla somma delle singole masse dei protoni e dei neutroni. La differenza è una misura dell'energia di legame nucleare che tiene insieme il nucleo. L'energia di legame può essere calcolata dall'equazione $E = mc^2$, che per l'energia di legame nucleare diventa: energia di legame nucleare = Δmc^2 , dove Δm rappresenta la differenza di massa (o difetto di massa) e c^2 è la velocità della luce nel vuoto, al quadrato (fonte: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/nucbin.html).

In sostanza, nel nucleo agiscono due forze: la repulsione elettrica tra particelle con cariche simili (forza elettromagnetica), che fa sì che i protoni si respingano l'un l'altro, ma anche la forza nucleare forte o forza nucleare che, come suggerisce il nome, è molto forte. La forza elettromagnetica si indebolisce man mano che le particelle si allontanano, ma anche a distanze notevoli i protoni sentono un'altra particella e si respingono. La forza nucleare forte funziona solo a distanze molto piccole: quando i protoni o i neutroni sono molto vicini tra loro, c'è una forza attrattiva molto forte che li avvicina. Poiché la forza nucleare forte è molto più forte della forza elettrica (a distanze molto piccole!) i nuclei possono esistere. Inoltre, due protoni si respingono l'un l'altro, ma se aggiungiamo un neutrone tra loro (quindi protone-neutrone-protone) la repulsione sarà un po' minore. La forza forte tra protoni e neutroni è la stessa di protoni e protoni o di neutroni e neutroni, ma i neutroni lasciano un po' più di spazio tra i protoni, cioè si può dire che agiscono come una sorta di "colla". Di conseguenza, quando i nuclei diventano più pesanti, abbiamo più protoni e abbiamo bisogno di più neutroni, poiché la forza nucleare si indebolisce rapidamente su distanze maggiori (vedi anche:

https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron%E2%80%93proton_ratio).

(nota: i protoni e i neutroni sono chiamati nucleoni, quindi un nucleo è fatto di nucleoni)
L'energia di legame netta di un nucleo è data dall'attrazione nucleare meno l'energia di disturbo della forza elettrica. Man mano che i nuclei diventano più pesanti, la loro energia di legame netta per nucleone cresce sempre più lentamente fino a raggiungere il suo picco nel ferro. Quando si aggiungono nucleoni, l'energia di legame nucleare totale aumenta sempre (poiché ogni nucleone attrae gli altri), ma aumenta anche l'energia di disturbo totale delle forze elettriche. Quando si arriva a elementi più pesanti del ferro, le forze elettriche iniziano a superare quelle nucleari. Di conseguenza, gli elementi più pesanti diventano più instabili (fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_binding_energy).

c. Dal grafico: quale sarebbe il punto di passaggio dalla fusione alla fissione? Potete spiegare perché?

Il punto di cambiamento sarebbe il massimo del grafico, ovvero il ferro-56. Quando gli elementi più leggeri si fondono fino al ferro-56 viene rilasciata energia, mentre quando gli elementi più pesanti si dividono in quelli più leggeri viene rilasciata energia.

d. Sulla base di questo grafico, quale materiale vi aspettate che sia presente in grandi quantità nelle stelle molto vecchie?

Ferro! Nel nucleo di una stella avviene la fusione, a partire dai protoni/idrogeno e alla fine il processo continuerà con elementi più pesanti se gli elementi leggeri sono tutti fusi in elementi più pesanti. Dopo il ferro, il processo non può continuare e il ferro è una molecola molto stabile. Di conseguenza, il ferro si accumula nel nucleo di stelle molto vecchie.

Esercizio supplementare A.7

a. Calcolare l'energia liberata attraverso il difetto di massa, con la formula di Einstein, per una reazione di fusione D-T.

Questi calcoli possono essere effettuati convertendo prima la massa da u a kg, poi utilizzando $E=mc^2$ per ottenere l'energia in Joule del difetto di massa e quindi convertendo tale energia da Joule a MeV. Tuttavia, è anche possibile sfruttare il fatto che la massa è talvolta già indicata in unità di energia nella fisica nucleare, il che rende il calcolo un po' più semplice.

Analizziamo innanzitutto la reazione D-T: $D + T \longrightarrow \alpha + n$ + energia (17,6 MeV). Il peso dei singoli componenti è indicato in unità di massa atomica (u) e possiamo anche indicare la massa di una particella in unità di energia se usiamo: MeV/c^2 , che è un modo per riscrivere $E=mc^2$, in modo che $m = E/c^2$. Possiamo quindi esprimere la massa di una particella anche attraverso la sua energia utilizzando la formula di Einstein (spesso la parte $/c^2$ non è nemmeno scritta nell'unità). Poiché questa è un'unità comunemente usata in fisica nucleare, abbiamo un facile fattore di conversione: 1 u = 931,49410242 MeV/c^2 (fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Dalton_(unità)).

Esaminiamo i singoli componenti della reazione:
La massa di un atomo di deuterio è 2,01410177785 u, ma da questa dobbiamo sottrarre la massa dell'elettrone, poiché la reazione avviene solo tra i nuclei: (2,01410177785 u - 0,000548579909 u) ×

931,49410242 MeV/c^2 = 1875,61 MeV. Se facciamo lo stesso per il trizio, otteniamo:
(3,01604928 u - 0,000548579909 u) × 931,49410242 MeV/c^2 = 2808,92 MeV.

Se eseguiamo questo calcolo per tutti i componenti della reazione, otteniamo:

Prima	
Deuterio-nucleo	*1875,61 MeV*
Trizio-nucleo	*2808,92 MeV*
Energia totale prima della reazione:	*4684,53 MeV*
Dopo	
Particella alfa	*3727,38 MeV*
Neutro	*939,57 MeV*
Energia totale dopo la reazione:	*4666,95 MeV*
Energia rilasciata nella reazione	*4684,53 - 4666,95 = 17,6 MeV*

E quindi vediamo che nella reazione vengono rilasciati 17,6 MeV.

b. Calcolare l'energia rilasciata attraverso il difetto di massa, con la formula di Einstein, per un'unità nucleare.
reazione di fissione dell'uranio-235.

Per l'uranio 235 è un po' più difficile, perché può decadere in molti prodotti di reazione diversi. A seconda dei prodotti di reazione, l'energia rilasciata può variare, anche se in media il rendimento è di 215 MeV. Prendiamo la reazione di decadimento naturale dell'U-235:

U-235 → Th-231 + α

Un nucleo di uranio 235 decade quindi spontaneamente in un nucleo di torio 231 e in una particella alfa. Si noti che ora dobbiamo sottrarre non 1 ma 92 elettroni per ottenere la massa del nucleo invece della massa atomica! Quindi U-235 massa atomica = 235,0439299 u, e quindi:
235,0439299 u - (92 × 0,000548579909 u) = 234,993460548 u,
234,993460548 u × 931,49410242 MeV/c^2 = 218895,022608 MeV.

Lo stesso calcolo per il torio dà: 231,03630 u - (90 × 0,000548579909 u) = 230,986927808 u,
230,986927808 u × 931,49410242 MeV/c^2 = 215162,960989 MeV.

Prima	
Nucleo di uranio	*218895,02 MeV*
Energia totale prima della reazione:	*218895,02 MeV*
Dopo	
Particella alfa	*3727,38 MeV*
Nucleo di torio-231	*215162,96 MeV*
Energia totale dopo la reazione:	*218890,34 MeV*
Energia rilasciata nella reazione	*218895,02 - 218890,34 = 4,68 MeV*

Esercizio supplementare A.8
Se si confrontano la temperatura al centro del sole, la temperatura alla superficie del sole e la densità del sole con la temperatura e la densità in un reattore a fusione sulla Terra, allora perché la temperatura necessaria in un reattore a fusione sulla Terra è molto più alta?

Affinché la fusione avvenga, sono importanti tre fattori: la giusta densità delle particelle, la giusta temperatura delle particelle e un buon confinamento delle particelle. La combinazione di densità e

temperatura deve essere giusta, in modo che le particelle abbiano in media le migliori possibilità di fondersi. Il tempo di confinamento è importante perché vogliamo che la fusione avvenga in modo continuo. Nel Sole, il confinamento è eccellente nel nucleo grazie alla gravità. Questo confinamento è molto migliore di quello che possiamo creare sulla Terra con i magneti. Allo stesso tempo, la densità media del Sole non è molto elevata: circa 1,4 g/cm^3 , mentre la Terra ha una densità media di circa 5,5 g/cm^3 . Tuttavia, nel nucleo del Sole la densità è molto più alta: si stima che sia di circa 160 g/cm^3 . Quindi la densità nel Sole è piuttosto alta, molto più alta di quella dei nostri reattori a fusione (che hanno un paio di grammi di combustibile e ITER, ad esempio, avrà un volume di 830 m^3). Quindi, in base alla densità e al confinamento, il Sole batte facilmente la Terra.

Tuttavia, la temperatura del nucleo del Sole è di circa 15 milioni di gradi Celsius, mentre la superficie è di soli 6000 gradi Celsius. In base a ciò, è facile capire che sulla superficie del Sole non avviene alcuna fusione, perché la temperatura è troppo bassa e anche la densità è bassa. Nel nucleo, la combinazione di alta densità, alta temperatura e buon confinamento offre un'ottima possibilità di reazioni di fusione. Quindi, se vogliamo creare la fusione sulla Terra, dobbiamo aumentare la temperatura ancora di più rispetto al Sole, per compensare la nostra densità e il nostro confinamento "peggiori" (ricordate: usiamo l'idrogeno gassoso, la cui densità è di 0,0899 g/cm^3 a temperatura ambiente, molto inferiore a quella del Sole; ricordate anche che il riscaldamento di un gas porta anche all'espansione! Iniettiamo pochissimo gas, poi lo riscaldiamo e il plasma riempirà l'intero volume del nostro reattore). Quindi, per avere una buona probabilità che la fusione avvenga nei nostri reattori, abbiamo un optimum diverso, che si calcola si trovi a circa 150 milioni di gradi Celsius, circa 10 volte superiore a quello del nucleo del Sole.

Esercizio supplementare A.9

Un esempio ben noto di applicazione reale dei plasmi è il televisore al plasma o lo schermo al plasma. Come si fa

Questi oggetti "plasma" si riferiscono a un plasma fisico come descritto nel capitolo 3? Cercate di scoprire, utilizzando Internet, come funzionano i televisori al plasma e qual è la differenza tra un plasma fisico e i televisori al plasma o gli schermi al plasma.

Le informazioni sul funzionamento di un televisore al plasma possono essere reperite online, ad esempio qui: https://www.explainthatstuff.com/plasmatv.html. *Un televisore al plasma è costituito da una griglia di pixel rossi, verdi e blu, proprio come gli schermi LCD. Ma in un televisore al plasma, ogni cella del pixel è riempita con un gas che può essere ionizzato in un plasma da due elettrodi ad alta tensione. Il gas inizia quindi a emettere luce ultravioletta (che non è visibile!). Poiché il pixel è rivestito di una sostanza che assorbe la luce ultravioletta e poi emette luce di un certo colore (rosso, verde o blu), il pixel si illumina quando si imposta un'alta tensione sugli elettrodi della cella del pixel.*

In sostanza, la differenza tra un plasma a fusione e il plasma all'interno di un televisore al plasma sono le condizioni del plasma. Nel televisore non avviene alcuna fusione, c'è solo un'alta tensione che porta alla ionizzazione e all'emissione di luce, che viene poi trasformata nel giusto colore dei pixel. Si noti che sono possibili molti tipi diversi di plasma, a basse temperature, basse densità, alte temperature, alte densità, ecc.

Esercizio supplementare A.10

a. Di solito i plasmi possono essere osservati come incandescenti. Ma perché i plasmi brillano? Spiega.

Quando qualcosa si illumina, emette luce. Gli atomi hanno diversi livelli energetici che possono essere occupati dai loro elettroni. Quando un elettrone viene eccitato a un livello energetico più alto, l'atomo si trasforma in un livello eccitato. L'elettrone può quindi ricadere a un livello inferiore, in cui l'energia viene rilasciata come fotone: la luce. Il colore della luce dipende dall'energia e quindi dalla differenza tra il livello energetico eccitato e il livello in cui l'elettrone ricade. A seconda del modo in cui un atomo viene eccitato, l'elettrone può passare a livelli diversi e ricadere in livelli diversi, dando luogo a uno spettro di colori che può essere eccitato da un determinato elemento (si veda ad esempio lo spettro di emissione dell'idrogeno: https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_spectral_series). I livelli energetici di un determinato elemento sono sempre gli stessi, quindi gli atomi di idrogeno hanno sempre gli stessi livelli energetici e quindi emetteranno sempre gli stessi colori di luce. Allo stesso tempo, questi livelli energetici dettano anche quali salti l'elettrone può fare verso l'alto: se si illumina l'idrogeno con un laser (luce di una specifica lunghezza d'onda, cioè fotoni con la stessa energia) e il laser è sintonizzato su un salto nei livelli energetici, allora si può eccitare di proposito una certa transizione in un atomo.
L'eccitazione degli elettroni a livelli più alti può avvenire anche se una particella veloce si scontra con un atomo e gli trasferisce parte della sua energia. Se la particella è sufficientemente veloce, può persino ionizzare l'atomo, il che significa che un elettrone non viene solo eccitato, ma anche espulso completamente dall'atomo, creando uno ione e un elettrone libero.

Per ottenere un plasma, è necessario ionizzare le particelle. Quindi, quando abbiamo un plasma, ci sono sempre particelle che possono creare ioni ed elettroni liberi, ma non tutte le collisioni porteranno alla ionizzazione. Alcune particelle sono un po' più lente e si limitano a eccitare gli atomi. Dopo questa eccitazione dovuta alle collisioni, l'atomo può emettere luce per liberarsi dell'energia e l'elettrone torna a uno stato inferiore. Questo avviene continuamente in un plasma ed è da qui che proviene il bagliore tipico di un plasma.

b. Quando un plasma è completamente ionizzato, sarà ancora incandescente? Spiegate la vostra risposta.

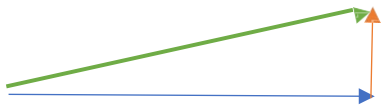
Se riscaldiamo un plasma in modo tale che tutte le particelle siano completamente ionizzate, questa eccitazione non può più avvenire. Quindi in un plasma di fusione, dove il nucleo del plasma è completamente ionizzato, non ci sarà luce!
Ma vicino alla parete, dove le particelle ionizzate si scontrano con le pareti metalliche e si ricombinano in atomi, ci sono alcuni atomi che vengono eccitati anziché ionizzati. Questi emettono luce, il che spiega perché in un reattore a fusione c'è luce (visibile) solo vicino al fondo del reattore, dove il plasma di solito colpisce la parete.

Esercizio supplementare A.11

Vediamo come un campo magnetico toroidale, insieme a un campo magnetico poloidale, si combina in un campo magnetico elicoidale. Seguire i seguenti passaggi:

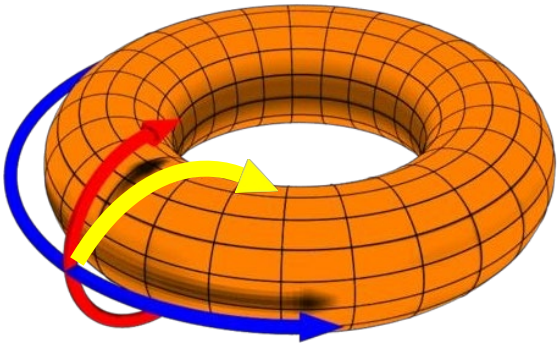
a. Disegnare una freccia (o un vettore) in una direzione casuale.
b. Disegnare un'altra freccia (o vettore) partendo dalla fine della prima, in una direzione diversa.
c. Disegnate una terza freccia che parte dal punto iniziale della prima freccia e termina nel punto finale della seconda freccia.

freccia (blu) + freccia (arancione) = freccia (verde). Ora la terza freccia è il risultato dell'addizione (vettoriale) delle prime due frecce.



Se ora facciamo la stessa cosa per una freccia (o vettore) poloidale e una freccia (o vettore) toroidale, qual è il risultato?

Quando facciamo questo per una freccia poloidale e una freccia toroidale, otteniamo: freccia toroidale (blu) e freccia poloidale (rossa). La sovrapposizione porta a una linea di campo elicoidale (gialla).



This material has been created and distributed by FuseNet for educational purposes. This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium, funded by the European Union via the Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No 101052200 — EUROfusion). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.