

## 40 – IL COMUNE SENSO DELL'ENERGIA

### *Citazioni*

[A] «La Scienza definisce l'energia come attitudine a compiere un lavoro.»

*(Testo di Chimica per le medie superiori)*

[B] «In generale si intende per energia l'attitudine di un corpo (un uomo, una macchina, ecc.) a compiere lavoro, perciò la misura dell'energia di un corpo costituisce anche una misura del lavoro che tale corpo è in grado di compiere.»

*(Testo di Fisica per il liceo scientifico)*

[C] «L'energia di un corpo è la misura del lavoro che il corpo può compiere in virtù del particolare stato in cui si trova.»

*(Testo universitario per Ingegneria e Fisica)*

[D] «Abbiamo interpretato l'energia cinetica di un corpo come la sua capacità a compiere lavoro per effetto del movimento.»

*(Testo universitario americano)*

[E] «Un corpo possiede energia quando è in grado di compiere lavoro [...]. Un corpo in movimento è in grado di compiere lavoro per effetto della velocità posseduta. Quando la velocità si annulla, il corpo perde la capacità di compiere lavoro.»

*(Testo di Fisica per il liceo scientifico)*

### *Commento*

Quello di definire l'energia di un corpo come la sua «capacità di compiere lavoro», o la sua «attitudine all'esecuzione di lavoro», è un malvezzo estremamente diffuso: così diffuso da potersi quasi considerare una costante universale, una delle grandi costanti della Fisica.

È sicuramente una definizione piacevole, anche perché trova riscontro nel significato (peraltro un po' vago) che ai vocaboli energia e lavoro si dà nel linguaggio di ogni giorno: secondo il quale, chi ha molta energia può compiere molto lavoro. Sennonché, in Fisica i termini energia e lavoro hanno un significato tutto particolare, che va preso per quello che è. Secondo il linguaggio corrente il lavoro si ricollega all'idea di fatica, e questa all'idea di sforzo e insieme all'idea di tempo (durata dello sforzo), mentre secondo la terminologia della Fisica il lavoro si ricollega all'idea di forza e all'idea di *spostamento nella direzione della forza*: senza del quale spostamento, per grande che sia la forza il lavoro è zero. Così, secondo la terminologia della Fisica, il lavoro di chi tiene sollevato sopra la testa per un quarto d'ora un bilanciere da 50 kg è zero, perché la forza muscolare è applicata a un corpo che non si muove. Ed è zero anche il lavoro di chi trasporta per 2 km una valigia da 15 kg, perché la valigia si sposta in direzione orizzontale mentre la forza muscolare agisce in direzione verticale: cosicché lo spostamento nella direzione della forza, che è quello che conta ai fini del lavoro, è zero. Qualche Autore ritiene che questo sia il momento di porsi gravi interrogativi sul piano morale (si veda al cap.36).

La verità è che, per come il lavoro e l'energia vengono definiti, *tra energia di un corpo e lavoro da esso compiuto non esiste in Fisica alcuna correlazione di carattere generale*. Mi limito, per ora, a parlare di energia cinetica. Come tutti sanno (e come si deduce immediatamente dal teorema dell'energia cinetica), l'energia cinetica di un punto materiale  $K$  avente velocità  $v$  rappresenta il lavoro che *le forze applicate a  $K$*  hanno dovuto compiere per portarne la velocità da zero a  $v$ . O anche, a meno del segno, il lavoro che *le forze applicate a  $K$*  dovranno compiere per azzerarne la velocità. E che relazione intercorre tra lavoro delle forze applicate a  $K$  e lavoro delle forze esercitate da  $K$ ? *In generale nessuna, assolutamente nessuna*. È questo il punto!

Esempio. Un blocco A, portatore di una carica elettrica positiva, viene lanciato lungo un piano orizzontale, in assenza d'aria e di attrito, verso un blocco B che non ha possibilità di movimento, a sua volta carico di segno più. Dato che ognuno dei due blocchi esercita sull'altro una forza repulsiva, dal momento del lancio in poi A procede verso B perdendo via via velocità: se la sua velocità iniziale non è troppo grande, si arresta prima di arrivare a contatto con B per poi ripartire immediatamente dopo in direzione opposta. Durante la fase di rallentamento, A perde tutta la sua energia cinetica: quanto lavoro ha compiuto? Zero, visto che B, al quale è applicata la forza proveniente da A, non si è mosso. Viceversa B, pur essendo completamente privo di energia cinetica, ha compiuto un lavoro resistente esattamente uguale all'energia cinetica persa da A. E, dato che nulla vieta di ripetere l'esperienza all'infinito, la conclusione è che *da un corpo privo di energia cinetica ci si può aspettare un lavoro comunque grande*. E allora? Allora siamo all'evidenza: l'energia cinetica di un corpo non rappresenta affatto la sua attitudine all'esecuzione di lavoro. Al cap. 43 il discorso verrà esteso all'energia potenziale. E alla bella favola che l'energia di un corpo sia il lavoro che esso può compiere, qualcuno forse non crederà più<sup>[1]</sup>.

---

<sup>1</sup> A sostegno della tesi secondo cui l'energia di un corpo è il lavoro che il corpo può compiere, viene a volte portato il primo principio della termodinamica nella forma tipica  $q = L + \Delta U$ , a norma della quale il lavoro  $L$  compiuto in condizioni adiabatiche ( $q = 0$ ) viene pagato con una equivalente diminuzione dell'energia  $U$  del sistema considerato. A parte l'ipotesi restrittiva della mancanza di scambi termici, faccio notare che il lavoro  $L$  della formula non è *tutto* il lavoro compiuto dal sistema, ma solo il cosiddetto 'lavoro termodinamico': il lavoro che viene compiuto dal sistema su corpi che si trovano a contatto del sistema, quindi in circostanze tali per cui il lavoro compiuto *dal* sistema è necessariamente uguale, a parte il segno, a quello compiuto *sul* sistema. Per di più, l'energia  $U$  della formula non include *tutta* l'energia potenziale del sistema, ma solo quella legata alle interazioni interne.

## 43 – CHI È CHE COMPIE IL LAVORO

### Citazioni

[A] L'energia potenziale di un corpo è il lavoro che il corpo può compiere grazie alla sua posizione (*Autori vari*).

[B] L'energia potenziale è il lavoro che dobbiamo compiere contro le forze del campo per spostare un corpo fino alla posizione di riferimento (*Autori vari*).

[C] L'energia potenziale è il lavoro che le forze conservative debbono compiere per spostare un corpo fino alla posizione di riferimento (*Autori vari*).

### Commento

Che il testo sia pessimo, o mediocre, o anche discreto, o magari buono, poco importa: quando c'è di mezzo l'energia in genere, e l'energia potenziale in particolare, capita comunque di sentirne di tutti i colori. E io credo che su nessun altro argomento di base gli studenti abbiano idee altrettanto precarie.

Nelle tre proposizioni iniziali ho sintetizzato le tre linee di pensiero che, relativamente all'energia potenziale, vanno per la maggiore.

La definizione [A], largamente adottata, ripropone l'idea di energia di un corpo come «lavoro che il corpo può compiere»: l'energia potenziale, in particolare, sarebbe il lavoro che un corpo può compiere «grazie alla sua posizione». Obietterei quanto segue: definire l'energia potenziale di un corpo K in funzione della sua posizione (e in funzione naturalmente di una prefissata posizione di riferimento) significa definire l'energia potenziale di K in funzione dei suoi spostamenti (dalla posizione attuale a quella di riferimento): e ciò che,

nel caso di forze conservative, può essere messo in relazione biunivoca con gli spostamenti di K non è il lavoro compiuto da K (cioè *dalle forze che K esercita su altri corpi*), ma quello compiuto *dalle forze che a K sono applicate* (se qualcuno non coglie bene la differenza, rileggi il cap.40). Si noti tra l'altro che, se veramente l'energia potenziale  $U$  di K fosse il lavoro che K può compiere, le variazioni di  $U$  sarebbero legate non al lavoro compiuto dalle forze a cui K è sottoposto, ma al lavoro compiuto da K, in generale diverso: e il risultato sarebbe terribile, perché quand'anche tutte le forze applicate a K fossero conservative, l'energia di K (somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale) *non si conserverebbe*. La definizione [B] non definisce niente. Che ne sappiamo se lo spostamento del corpo richiede un nostro lavoro? Dobbiamo forse compiere lavoro per ottenere che un sasso si sposti dalla nostra mano al terreno? E ammesso anche che sia necessario un nostro lavoro, lo spostamento fino alla posizione di riferimento può verificarsi sotto l'azione di una forza comunque grande: e dunque il lavoro da noi compiuto per spostare il sasso da un punto ad un altro può assumere qualsiasi valore.

Per dare al lettore un'idea di come, in questo campo, la confusione regni sovrana, gli propongo la lettura del seguente brano (tratto da un testo di Fisica per il liceo scientifico): «Il lavoro compiuto per sollevare il corpo nel campo di gravità terrestre, lavoro di tipo resistente, è uguale e opposto alla variazione di energia potenziale. In altri termini, quando solleviamo un corpo [...] essendo  $L < 0$ , risulta  $\Delta U > 0$ , cioè esso aumenta la propria energia potenziale». Visto? Per l'Autore, se solleviamo un sasso compiamo un lavoro resistente! Evidentemente non riesce a distinguere il lavoro compiuto da noi dal lavoro compiuto dalla forza peso.

Definizione [C]. È di gran lunga la migliore delle tre. Tuttavia, perché, di grazia, quel dannatissimo «devono compiere per spostare» che gli studenti non riusciranno mai più a scollarsi di dosso? Tale terminologia implica, *in modo del tutto arbitrario*, che lo spostamento del corpo fino al riferimento sia l'effetto delle forze conservative. E quando il lavoro è negativo? Se, per esempio, dobbiamo definire l'energia potenziale gravitazionale di un ascensore, fermo al piano terreno (posizione attuale), rispetto al 5° piano (posizione di riferimento), cosa diremo? Che è il lavoro che la forza peso «deve compiere per sollevare» l'ascensore fino al 5° piano?

A me pare che una buona definizione, semplice e rigorosa al tempo stesso, possa essere questa: l'energia potenziale di un corpo K è *il lavoro eventuale delle forze conservative*. E precisamente, è il lavoro che le forze conservative applicate a K compirebbero qualora, per una qualsivoglia ragione, K cambiasse posizione, portandosi nella posizione di riferimento. Tutto qui.

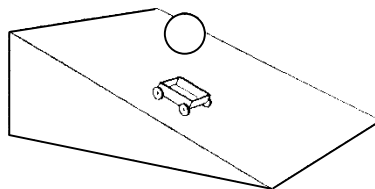
## 57 – PRIMA ARRIVA IL CARRELLO

### *Citazioni*

[A] «Attrito radente e attrito volvente. Sono i due tipi di attrito che nascono nello scivolamento di una superficie solida su un'altra (attrito radente) e nel rotolamento di una superficie solida su un'altra (attrito volvente): per esempio, il rotolamento di una boccia o di una ruota incontra attrito volvente, mentre lo scivolamento di un blocco di legno su un piano incontra attrito radente.» (*Testo di Fisica per i licei scientifici*)

[B] «L'attrito è una forza che si oppone al moto di un corpo e si esercita quando il corpo striscia (attrito radente) o quando rotola (attrito volvente) su un altro corpo.» (*Testo americano adattato per le scuole italiane*)

[C] «Una situazione analoga è quella in cui una sfera e un carrello di massa uguale scendono lungo un piano inclinato senza attrito. I due corpi, inizialmente fermi alla sommità del piano inclinato, partono contemporaneamente [...]. Ma il carrello scende più velocemente della sfera. Il perché risulta chiaro se si considera che le piccole ruote del carrello acquistano molto meno energia cinetica di rotazione della sfera. Quindi, l'energia potenziale gravitazionale perduta si trasforma principalmente in energia cinetica di traslazione nel caso del carrello, mentre una buona parte di essa si trasforma in energia cinetica di rotazione nel caso della sfera.» (Stesso testo della [B])



[D] «Naturalmente, se il piano inclinato non è privo di attrito, una parte dell'energia potenziale gravitazionale va spesa in lavoro contro le forze di attrito.» (Stesso testo della [B])

### Commento

Sarebbe interessante sapere se i tanti errori contenuti nelle frasi del testo americano «adattato per le scuole italiane» siano il risultato dell'adattamento, o provengano invece direttamente da oltre oceano. Non voglio credere alla prima ipotesi, sarebbe troppo offensiva per la nostra scuola. Credo alla seconda, e faccio osservare all'editore che per fare incetta di strafalcioni non occorre andare così lontano.

Vengo direttamente alla [C], che riprende e porta per così dire a perfezione quanto la [A] e la [B] preannunciano: in caso di rotolamento, niente attrito radente. Mi piacerebbe chiedere all'Autore come giustifica allora il fatto che la sfera o le ruote del carrello si mettano a rotolare lungo il piano inclinato: chi è stato? L'attrito volvente, che *contrasta* il moto di rotolamento e quindi non lo può produrre? Il peso, che ha momento zero rispetto ad ogni asse passante dal baricentro?<sup>[1]</sup> La verità è che ci può essere rotolamento solo se c'è una forza di attrito radente – diretta lungo il piano verso l'alto – che contrasta lo scivolamento della sfera. E ci può essere 'puro rotolamento' (rotolamento senza strisciamento, cioè velocità zero del punto della sfera a contatto del piano) solo se di attrito radente ce n'è abbastanza.

Si noti poi che nel caso di puro rotolamento (quello che, in mancanza di avviso contrario, dobbiamo supporre sia il moto della sfera e delle rotelline) *non c'è alcun lavoro* da parte della forza d'attrito: c'è la forza, ma non c'è lo spostamento del punto su cui la forza agisce. Perciò, contrariamente a quanto nella [D] viene dato per ovvio, se fosse solo per l'attrito radente nessuna parte dell'energia potenziale gravitazionale andrebbe «spesa in lavoro contro le forze di attrito».

Ma veniamo alla parte difficile del discorso: il carrello arriva prima, dice l'Autore, e ci assicura che «il perché risulta chiaro». Ecco la spiegazione: «le piccole ruote del carrello acquistano molto meno energia cinetica di rotazione della sfera». Come mai ne acquistino di meno, e come mai a una minor energia cinetica di rotazione debba automaticamente corrispondere una maggiore velocità di traslazione non sembra in verità così lampante: in ogni

---

<sup>1</sup> Pro memoria: l'equazione «momento delle forze uguale a momento d'inerzia moltiplicato accelerazione angolare» vale solo se riferita ad assi di rotazione fissi o mobili con direzione costante, oppure se riferita – sotto le stesse condizioni – a un asse passante dal CM e parallelo all'asse di rotazione. Applicarla, nel nostro caso, alla retta orizzontale passante per il punto di contatto tra sfera e piano e parallela al piano, significherebbe assumere arbitrariamente che tale retta sia asse di istantanea rotazione, e cioè che il moto della sfera sia un moto di puro rotolamento.

caso, il lettore si sentirà legittimato a credere che tutto dipende dalla piccolezza delle ruote, per cui, se solo la sfera del disegno non fosse stata così grossa, sarebbe magari stata lei ad acquisire un'energia cinetica di rotazione minore e ad arrivare prima.

Come stanno, in realtà, le cose? È vero che una sfera pesante acquisisce, a parità di spostamento verso il basso, un'energia cinetica di rotazione (oltre che di traslazione) più grande rispetto a una sfera leggera: ma ciò non impedisce che le sfere (omogenee) che partono assieme, pesanti o leggere o grandi o piccole che siano, arrivino *tutte assieme* – se partono assieme – al traguardo. Analogamente arrivano tutti assieme, con un leggero ritardo rispetto alle sfere, i cilindri omogenei che partono dalla stessa posizione nello stesso istante. *Il raggio non conta, la massa non conta*: conta solo il fatto di essere sfere omogenee piuttosto che cilindri omogenei, o sfere vuote piuttosto che cilindri vuoti o qualsiasi altra cosa in grado di rotolare.

Per l'accelerazione di una sfera omogenea in moto di puro rotolamento lungo un piano inclinato si trova infatti facilmente<sup>[2]</sup>

$$[1] \quad a = (5/7)g \sin\varphi = 0,714 g \sin\varphi$$

dove  $\varphi$  è l'angolo tra piano inclinato e piano orizzontale. Per un cilindro omogeneo il risultato è invece<sup>[3]</sup>

$$[2] \quad a = (2/3)g \sin\varphi = 0,667 g \sin\varphi$$

un valore leggermente più piccolo (e quindi un tempo di percorrenza dell'intero percorso un po' più grande<sup>[4]</sup>).

E per il carrello? Per il carrello la faccenda è un po' più complicata, l'accelerazione dipende dal rapporto tra la massa di ciò che rotola (le ruote, che schematizziamo come cilindri omogenei) e la massa di ciò che trasla (tutto il resto del carrello). Detta infatti  $m$  la massa di una ruota e  $M$  la massa del carrello privo di ruote, si trova<sup>[5]</sup> che l'accelerazione del carrello è

$$[3] \quad a = \frac{M + 4m}{M + 6m} g \sin\varphi.$$

Se dunque la massa che rotola ( $4m$ ) fosse trascurabile rispetto alla massa che trasla, l'accelerazione sarebbe  $g \sin\varphi$ , come quella di un blocco che scivola in assenza di attrito: l'accelerazione del carrello sarebbe in tal caso di ben il 40% superiore a quella di una sfera omogenea. Man mano però che il rapporto tra massa che rotola e massa che trasla diventa

<sup>2</sup> L'energia cinetica di una sfera omogenea di massa  $M$  e raggio  $R$ , in modo di puro rotolamento con velocità di traslazione  $v$  e quindi velocità di rotazione  $\omega = v/R$ , è  $EC = (1/2)Mv^2 + (1/2)[(2/5)MR^2]\omega^2 = 0,7 Mv^2$  [dove  $(2/5)MR^2$  è il momento d'inerzia della sfera rispetto a un asse baricentrale]. Dopo che ha percorso un tratto di lunghezza  $L$  l'energia cinetica della sfera (inizialmente ferma) è anche data da  $MgL \sin\varphi$  (lavoro della forza peso, l'unica, tra le forze applicate alla sfera, che compie lavoro). Uguagliando le due espressioni di  $EC$  si ottiene  $v^2 = (10/7)(g \sin\varphi)L$ . Dato che nel moto uniformemente vario (velocità funzione lineare del tempo, accelerazione scalare costante) la relazione tra velocità, accelerazione e distanza  $L$  percorsa con partenza da fermo è  $v^2 = 2aL$ , si deduce per confronto che il moto di traslazione della sfera è uniformemente vario con accelerazione  $(5/7)g \sin\varphi$ .

<sup>3</sup> Come alla nota precedente, tenuto conto che il momento d'inerzia del cilindro rispetto al suo asse ha valore  $MR^2/2$  e quindi l'energia cinetica è  $(3/4)Mv^2$ .

<sup>4</sup> Nel moto uniformemente vario con velocità iniziale zero, la relazione tra distanza percorsa ( $L$ ) e tempo impiegato ( $T$ ) è  $L = (a/2)T^2$ . Il tempo di percorrenza è proporzionale alla radice quadrata della distanza percorsa.

<sup>5</sup> L'accelerazione del carrello si calcola come alle note 2 e 3, tenuto conto che, detta  $M$  la massa che trasla e  $m$  la massa di una ruota, il lavoro della forza peso è  $(M + 4m)gL \sin\varphi$ , e che l'energia cinetica del carrello è  $(1/2)Mv^2 + 4(3/4)mv^2$ .

più grande, l'accelerazione del carrello diminuisce: per  $m = M$  (massa di una ruota uguale a massa che trasla) l'accelerazione del carrello sarebbe  $(5/7)g \sin \varphi$ , identica a quella di una sfera omogenea; per  $m > M$  l'accelerazione del carrello sarebbe addirittura inferiore a quella della sfera, e tenderebbe a  $(2/3)g \sin \varphi$  – l'accelerazione di un cilindro omogeneo – quando la massa  $M$  diventasse trascurabile rispetto alla massa  $m$ .

La figura proposta dall'Autore americano mostra che il carrello si avvia alla vittoria, e siccome le figure hanno una grande efficacia didattica è probabile che l'idea del carrello che arriva primo si imprima indelebilmente nella mente dello studente. Ma la vittoria dei carrelli non è sempre così sicura: nella gara contro una sfera omogenea, un carrello costituito da quattro rotelle d'acciaio tenute assieme da un leggero telaio d'alluminio verrebbe inesorabilmente battuto.

Si potrebbe ancora osservare che la proposizione [B] («L'attrito è una forza che si oppone al moto di un corpo») rischia di essere, nei riguardi dell'attrito, un po' semplicistica e ingenerosa, tenuto conto che è solo grazie all'attrito che ci possiamo spostare da un punto all'altro, vuoi a piedi, vuoi in automobile o in bicicletta o in qualsiasi altro modo: ma se ne è già parlato<sup>6</sup>. Vorrei solo porre all'Autore americano una domanda: per quale ragione al mondo, all'inizio della [C], si è premurato di specificare che il carrello e la sfera hanno la stessa massa? *Il carrello arriva primo solo se la massa è uguale?*

## 66 – L'INVENZIONE DELL'EQUILIBRIO PERPETUO

### Citazioni

[A] «[...] l'equilibrio termodinamico implica tre diversi tipi di equilibrio contemporanei: (1) equilibrio meccanico: perché il volume  $V$  del fluido non vari, vi deve essere equilibrio tra la forza esercitata dal pistone sul fluido e la forza esercitata dal fluido sul pistone. Come sappiamo dalla Meccanica, se questo equilibrio di forze viene a mancare, il pistone si mette in moto». (*Testo di Fisica per il liceo scientifico*)

[B] «Un sistema si dice in equilibrio termodinamico quando soddisfa contemporaneamente alle seguenti condizioni:

a) equilibrio meccanico: le forze esercitate dal sistema sull'esterno sono equilibrate da forze uguali ed opposte esercitate dall'esterno sul sistema.»

(*Testo universitario per Ingegneria e Fisica*)

[C] «Se la trasformazione non è reversibile, non è detto a priori che la forza esercitata dal pistone sul fluido uguagli quella esercitata dal fluido sul pistone, in quanto ciò avviene solo se la trasformazione attraversa una successione di stati di equilibrio termodinamico.»

(*Stesso testo della [B]*)

### Commento

Che cosa rappresenta tutto questo? Da un lato, la negazione del principio di azione e reazione. Dall'altro, lo sconvolgimento della statica del corpo rigido. Nell'insieme, un cataclisma.

A norma del principio di azione e reazione, la forza del pistone sul gas non può che essere identica, in valore, alla forza del gas sul pistone: *equilibrio o non equilibrio*. È vero che in presenza di effetti relativistici il principio di azione e reazione non funziona (cfr. cap. 95): ma nel caso di interazione a contatto, come questa, di effetti relativistici non è il caso di parlare.

---

<sup>6</sup> Al capitolo 50.

Quanto all'equilibrio del pistone, non si vede in che modo possa dipendere dalla forza che il pistone esercita sul gas: in che modo cioè *le forze che agiscono su un corpo A* (il pistone) *possano essere equilibrate da forze che agiscono su un corpo B* (il gas). Quand'anche, a dispetto della legge di azione e reazione, le due forze – quella del pistone sul gas e quella del gas sul pistone – risultassero diverse, il pistone potrebbe nondimeno restare in equilibrio alla condizione (necessaria, non sufficiente) che fosse zero la somma delle forze ad esso applicate: le forze che agiscono *sul pistone* verso l'alto devono essere equilibrate dalle forze che agiscono *sul pistone* verso il basso. Viceversa, se davvero l'equilibrio del pistone dipendesse dall'uguaglianza tra forza del pistone sul gas e forza del gas sul pistone, essendo il valore delle due forze sempre, obbligatoriamente identico, il pistone sarebbe *sempre e comunque in equilibrio*. Talché si potrebbe anche dire che i brani citati rappresentano l'invenzione dell'equilibrio perpetuo.

Considerazione conclusiva. Questo non è un errore qualsiasi, un errore come gli altri novantanove della raccolta: questo è «l'errore» per eccellenza. Un errore come questo, su argomento di così fondamentale importanza, su argomento di così elementare semplicità, su testi di tale prestigio, non è nemmeno più un errore: è un capolavoro.

## 90 – IL CARATTERE DEL CORSO

### *Citazioni*

[A] «Nello stesso anno (1932) in cui vennero scoperti i neutroni, vennero pure individuate altre particelle facenti parte dell'atomo e precisamente: il positrone, il mesone e il neutrino; recentemente si è parlato di un'altra particella: l'antiprotone. Non interessando per la loro piccolissima massa e soprattutto per la loro, almeno fino ad ora, non accertata influenza sulle normali reazioni chimiche, oggetto del nostro studio, se ne tralascia la illustrazione.»

*(Testo di Chimica per i licei)*

[B] «Come già detto, in seguito ad approfonditi studi sono state scoperte altre particelle facenti parte del nucleo atomico e precisamente: il positrone, il neutrino, il mesone, l'antiprotone ed altri. Dato il carattere del nostro corso non è il caso di approfondire la trattazione al loro riguardo.»

*(Stesso testo)*

### *Commento*

Cominciamo dalle date (citazione [A]). Il positrone è stato effettivamente osservato per la prima volta nel 1932; ma il mesone  $\mu$  (muone) è stato scoperto nel '37, il mesone  $\pi$  (pione) con carica positiva o negativa nel '48, il mesone  $\pi$  senza carica nel '50, gli altri mesoni in epoca successiva; il neutrino nel '56, l'antiprotone pure nel '56. E già che ci siamo, il testo citato è del 1987: *trentun anni* dopo la scoperta dell'antiprotone, l'Autore dice «recentemente si è parlato». E, da come lo dice, non sembra ancora convinto.

Secondo. Chi fosse curioso di vedere come sono fatte queste particelle farà bene a non cercarle all'interno dell'atomo (citazione [A]) o del nucleo atomico (citazione [B]). Perderebbe il suo tempo.

Terzo. Che l'interesse di una particella sia commisurato alla sua massa (citazione [A]), è un'affermazione ardita. Ad ogni modo, non sempre la «piccolissima massa» di tali particelle è così piccola: il neutrino ha probabilmente massa zero (e quindi interesse zero, nominarlo è già troppo), ma il positrone ha la stessa massa dell'elettrone, il mesone  $\mu$  ha massa 207 volte più grande di quella dell'elettrone, il mesone  $\pi$  ha massa 270 volte più grande, il me-

sone  $k$  ha massa 976 volte più grande. E l'antiprotone, neanche a dirlo, ha la stessa massa del protone (e dovrebbe essere altrettanto interessante).

Quarto. Relativamente alla «almeno fino ad ora non accertata influenza sulle normali reazioni chimiche» di tali particelle, credo proprio che il Nostro possa dormire sonni tranquilli: dove ogni influenza è da escludere, non sarà facile, in futuro, accertarne qualcuna.

Quinto. L'Autore dichiara: «dato il carattere del nostro corso non è il caso di approfondire la trattazione» dell'argomento. Beh, su questo non si può non essere d'accordo: dato il carattere, non è il caso.

## 91 – MA NEL NUCLEO VI SONO I NEUTRONI

### *Citazioni*

[A] «Se noi tentassimo di formare un nucleo atomico con soli protoni, questi, essendo dotati di cariche dello stesso segno (positivo), si respingerebbero e quindi il nucleo sarebbe instabile. Ma nel nucleo vi sono anche i neutroni, che non hanno una carica elettrica; i neutroni si dispongono tra i protoni, agendo quasi da isolante e rendendo stabile il nucleo dell'atomo.» (*Testo di Chimica per il liceo scientifico*)

[B] «Quanti più protoni vi sono in un nucleo, tanti più neutroni occorreranno, ma, naturalmente, la presenza di troppi neutroni rende il nucleo instabile.» (*Stesso testo*)

### *Commento*

Chiedere ai neutroni di garantire la stabilità del nucleo atomico «agendo quasi da isolante» significa pretendere l'impossibile. Intendiamoci, i neutroni la loro parte la fanno: interponendosi tra i protoni, li allontanano l'uno dall'altro e rendono la forza elettrostatica di repulsione sensibilmente più debole: indicativamente, se tra due protoni viene interposto un neutrone la forza repulsiva tra i due diminuisce di quattro volte. Non è male: ma per tenere insieme il nucleo, ci vuol altro.

Ci vuole la cosiddetta *interazione forte*: la forza attrattiva tra le particelle costitutive del nucleo atomico, la «colla nucleare». Per distanze dell'ordine dei  $10^{-15}$  m, l'attrazione nucleare tra due protoni<sup>[1]</sup> è circa 100 volte più forte della repulsione elettrostatica: ma, col crescere della distanza, la prima va molto rapidamente a zero mentre la seconda diminuisce molto più gradualmente. Perciò, finché i protoni sono pochi e quindi tutti molto vicini, l'attrazione nucleare ha facilmente ragione della repulsione elettrostatica. Quando però i protoni sono molti, un protone periferico viene respinto da tutti gli altri protoni, mentre viene attratto solo dai pochi protoni o neutroni contigui: via via che il numero di protoni aumenta, la situazione chiaramente diventa, dal punto di vista della stabilità, sempre più critica. E non per colpa esclusiva dei neutroni, come nella [B] si insinua<sup>[2]</sup>.

Di fatto, l'interazione forte riesce a tenere insieme stabilmente al massimo 83 protoni, in ciò coadiuvata da uno stuolo di ben 126 neutroni: è il nucleo del bismuto. Nuclei con un numero più elevato di protoni esistono in natura e si possono anche produrre, ma sono tutti più o meno instabili<sup>[3]</sup>. Senza nulla voler togliere ai meriti dei neutroni, se non fosse per l'interazione forte esisterebbe nell'universo un unico tipo di atomo: un protone più un elettrone. E tutto sarebbe idrogeno.

---

<sup>1</sup> Uguale, a pari distanza, all'attrazione tra due neutroni, o tra un protone e un neutrone.

<sup>2</sup> L'instabilità nucleare è anche dovuta al principio di esclusione: tanto per i protoni quanto per i neutroni, solo alcuni livelli energetici sono disponibili, e uno stesso livello non può essere occupato che da due protoni o due neutroni (di *spin* opposto). Man mano che il numero di protoni o di neutroni au-



menta, aumenta la relativa energia. Se l'energia raggiunge il valore di separazione, il nucleo è instabile.

<sup>3</sup> Il tempo di dimezzamento (intervallo di tempo  $T$  durante il quale la probabilità di decadimento di un nucleo è  $\frac{1}{2}$ , cosicché la metà dei nuclei inizialmente presenti in un determinato campione subirà il decadimento entro un tempo  $T$ ) può avere valori estremamente elevati: nel caso dell'uranio 238, ad esempio, vale  $4,5 \times 10^9$  anni.

## 96 – OTTO E MEZZO

### *Citazioni*

[A] «Quando noi vediamo il Sole apparire all'orizzonte in realtà esso vi si trovava già da otto minuti e mezzo; quando esso tramonta all'occidente noi lo vediamo per ben otto minuti e mezzo ancora, mentre effettivamente è già scomparso dietro l'orizzonte! sembra strano ed è un po' inverosimile, lo so. Eppure è così. Difatti la luce impiega otto minuti e mezzo per arrivare dal Sole sulla Terra.»

(P. Karlson, *La Fisica di Karlson*, Hoepli 1937)

[B] «Osservando un orologio da lontano, mediante la televisione, ad esempio, dobbiamo sempre ricordare che ciò che vediamo all'istante è realmente avvenuto anteriormente, così come guardando il calar del Sole vediamo l'evento otto minuti dopo che si è prodotto.»

(A. Einstein e L. Infeld, *L'evoluzione della Fisica*, Boringhieri 1980)

### *Commento*

Per una volta, credo sia doveroso dire tutto: anche i nomi degli Autori delle frasi incriminate. Passi, in effetti, per Karlson (il cui libro ha peraltro goduto in passato di grande credito, ancora oggi qualcuno lo addita come un modello didattico), ma Infeld e soprattutto Einstein sono nomi talmente grossi, talmente al di sopra di ogni sospetto che il caso si propone come clamoroso: possibile che abbiano sbagliato?

La questione è stata affrontata diversi anni fa, su una rivista di fantascienza<sup>[7]</sup>, in un articolo intitolato *Un errore di Einstein?* a firma P. Ambrosini. La tesi è questa: Karlson e Einstein-Infeld avrebbero ragione «se fosse il Sole a girare attorno alla Terra, e se l'occultamento del Sole avvenisse alla distanza del Sole stesso (ossia a 150 milioni di km dalla Terra)». Nell'interessante articolo vengono anche riportate, allo scopo di dimostrarne l'inconsistenza, alcune argomentazioni di sostenitori della tesi contraria (quella di Karlson e di Einstein-Infeld). Per esempio, il «direttore di una notissima rivista tecnica e autore di libri di matematica superiore» scrive: «Che la Terra giri attorno al Sole o viceversa, il fatto non ha importanza agli effetti del quesito: ciò che conta è la distanza fra i due corpi [...]. Credo dunque che Karlson ed Einstein abbiano ragione».

Al che Ambrosini replica: «Che la Terra giri attorno al Sole o viceversa, *ha importanza* agli effetti del quesito [...]. Se si muovesse il Sole noi vedremmo la sua posizione di otto minuti prima, dato invece che si muove la Terra noi vediamo il Sole nella sua reale posizione. Lei ha affermato: "Se il Sole che era sotto l'orizzonte [...] fora a un dato istante il nostro orizzonte, è proprio come se si accendesse una luce a 150 milioni di km e la sua luce, per percorrere quella distanza, impiega circa otto minuti". Se la distanza di 150 milioni di km si riferisse all'orizzonte, allora sì. Ma logicamente Lei si riferisce al Sole, e allora no, altrimenti io dovrei vedere il Sole col ritardo di otto minuti anche quando apro la finestra.

---

<sup>7</sup> *Nova Sf*, n. 4 del gennaio 1968.

L'orizzonte e la finestra si trovano a distanze (in tempi-luce) impercettibili ai nostri sensi. L'orizzonte (supposto a 30 km) si trova a 100 microsecondi-luce di distanza.»

Chi ha ragione? Ha ragione Ambrosini, che però riesce ad avere nello stesso tempo anche torto. Ha ragione quando dice che il Sole tramonta nel momento in cui lo vediamo tramontare, e non otto minuti prima. Ha torto quando fa dipendere questo dal fatto che è la Terra che gira attorno al Sole: qui ha ragione il direttore della rivista tecnica, agli effetti del quesito la cosa non ha importanza. Per quale motivo? In linea generale, il movimento del Sole rispetto alla superficie terrestre è dovuto sia alla rotazione della Terra attorno al Sole (moto di rivoluzione) che alla rotazione della Terra su sé stessa. Tuttavia, il moto diurno del Sole rispetto all'osservatore terrestre è dovuto quasi esclusivamente al moto di rotazione: *all'alba e al tramonto di ogni giorno tutto in pratica va, dal punto di vista dell'osservatore terrestre, come se il moto della Terra attorno al Sole non esistesse.*

Dov'è allora realmente il Sole quando noi, al tramonto, lo vediamo toccare la linea dell'orizzonte? Esattamente (o quasi) dove lo vediamo, come se la velocità della luce fosse infinita. La differenza sta in questo: se la velocità della luce fosse infinita, gli ultimi raggi del sole al tramonto verrebbero emessi nell'istante stesso in cui noi li riceviamo, e cioè proprio quando il Sole è all'orizzonte; dato invece che la velocità della luce è  $c$ , i raggi che noi osserviamo mentre il Sole tramonta sono stati emessi otto minuti prima, quando ancora il Sole non toccava l'orizzonte (fig. 1/a e 1/b).

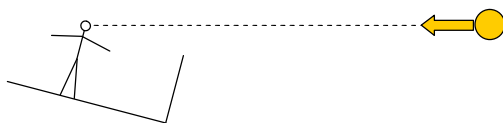


Fig. 1/a – Mancano otto minuti al tramonto, in questo istante partono dal Sole – che è ancora al di sopra dell'orizzonte – gli ultimi raggi che potranno essere osservati.

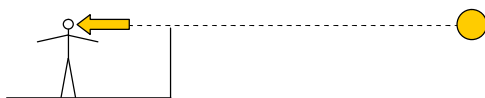


Fig. 1/b – Sono passati otto minuti, i raggi che il Sole ha emesso otto minuti fa sono giunti all'osservatore. Il Sole adesso tocca la linea dell'orizzonte.

Dunque è vero: dire che, quando vediamo il Sole al tramonto, il Sole è già tramontato da otto minuti, equivale a dire che, se chiudiamo le imposte, continuiamo a ricevere luce per altri otto minuti. E anche, per analogia, che se si mette a piovere e apriamo l'ombrello, noi continueremo a ricevere pioggia per almeno un paio di minuti, il tempo impiegato dalle gocce d'acqua a spostarsi dalle nubi fino a noi...

Ma torniamo all'inquietante domanda iniziale: *è mai possibile che, su questo modesto problemino, scienziati del calibro di un Einstein e di un Infeld si siano sbagliati?*

Risposta: non se ne parla. Nell'edizione originale dell'*Evoluzione della Fisica* (Simon and Schuster, New York 1938), firmata dal solo Einstein, troviamo scritto: «Dobbiamo sempre ricordare che quello che noi vediamo adesso è in realtà avvenuto in precedenza, proprio

come riceviamo la luce del Sole otto minuti dopo che è stata emessa»<sup>[8]</sup>. Nessun accenno, come si vede, alla faccenda del Sole al tramonto! Nell'edizione inglese del 1966, curata da Infeld (Einstein era morto da undici anni), nulla è cambiato nel testo rispetto alla versione originale<sup>[9]</sup>. Dunque, *né Einstein, né Infeld si sono mai sognati di affermare quanto risulta dalla traduzione italiana*: l'idea della visione del Sole che si prolunga di otto minuti e passa dopo il tramonto è, per così dire, un abbellimento postumo, un parto grazioso della libera fantasia del traduttore – o, più precisamente, della traduttrice. Suggestionata da Karlson? Chissà.

## 98 – UN BELL'APPROSSIMARE

### Citazione

«Einstein mostrò che la massa di un corpo doveva ritenersi variabile con la velocità secondo l'equazione

$$(22) \quad m = m_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2} \quad [..].$$

A mezzo dell'analisi infinitesimale si può dimostrare che la (22) può assumere la forma approssimata

$$(23) \quad m \sim m_0 + \frac{1}{2} m_0 v^2 / c^2.$$

Dalla (23), moltiplicando ambo i membri per  $c^2$ , si ottiene

$$(25) \quad E = m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2.$$

La (25) mostra che l'energia totale di un corpo in moto con velocità  $v$  è uguale alla somma dell'energia a riposo e dell'energia cinetica nella forma classica. Come la (23), anche la (25) è una formula approssimata.»

*(Testo di Fisica per il liceo scientifico)*

### Commento

In realtà, il concetto di massa relativistica, e cioè di massa che cresce con la velocità, nato con Einstein ma in seguito sottoposto a critica già dallo stesso Einstein, sta scomparendo. Si ritiene più corretto considerare la massa come invariante, e spostare sulla quantità di moto  $\vec{p}$  la tendenza a infinito per  $v$  tendente a  $c$  attraverso la definizione  $\vec{p} = \gamma m \vec{v}$ , dove

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}.$$

Conseguentemente, per una particella libera di massa  $m$  l'energia di quiete è  $E_0 = mc^2$ , l'energia totale a velocità  $v$  è  $E = \gamma mc^2$ , l'energia cinetica (energia totale meno energia di quiete) è  $EC = (\gamma - 1) mc^2$ .

Ma sorvoliamo su tutto questo, e torniamo alle formule proposte dall'Autore. Relativamente alle quali il commento non può che essere questo: va bene l'approssimazione, ma qui  $c$  è qualcosa che non funziona. Prendiamo ad esempio la (23): che cosa ci dice? Ci dice che, se

<sup>8</sup> «We have always to remember that what we see now really happened earlier, just as we receive light from the sun eight minutes after it was emitted.»

<sup>9</sup> Nella prefazione alla nuova edizione, Infeld precisa di non avere voluto cambiare neanche una parola del testo originale di Einstein. Infeld si limita in effetti a puntualizzare nella prefazione alcuni aggiornamenti di Fisica avvenuti negli anni tra la prima e seconda edizione, quali l'osservazione della precessione del perielio anche per altri pianeti oltre a Mercurio, la produzione di elementi transuranici, l'osservazione della diffrazione di un singolo elettrone, ecc.

la velocità tende a  $c$ , la massa tende pressappoco a  $1,5 m_0$ ... Che è un bell'approssimare, se si considera che, quando la velocità tende a  $c$ , la massa, in base alla (22), dovrebbe tendere a infinito.

In effetti, manca del tutto nel discorso (sia nelle prima edizione del testo, sia nelle successive, l'ultima delle quali recentissima) una piccola precisazione: che «a mezzo dell'analisi infinitesimale si può dimostrare» ecc. ecc. *solo ed esclusivamente a velocità non relativistiche*, cioè solo quando il rapporto  $v/c$  è molto inferiore a 1. In tale ambito le formule della meccanica relativistica si riducono notoriamente (con sollievo di tutti) a quelle della meccanica classica. La (22), ad esempio, diventa  $m = m_0$ , il che libera la massa da qualsiasi possibile influsso della velocità. E la formula relativistica per l'energia cinetica,  $EC = (\gamma - 1)mc^2$ , diventa  $EC = \frac{1}{2}mv^2$ , recuperando un aspetto decisamente più familiare.

E alle velocità relativistiche? Alle velocità relativistiche, formule come la (23) e la (25) forniscono risultati che, con tutta la buona volontà, non è possibile definire approssimati: sono disastrosamente errati.