



Rendiconti  
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL  
*Memorie e Rendiconti di Chimica, Fisica,  
Matematica e Scienze Naturali*  
140° (2022), Vol. III, fasc. 1, pp. 15-27  
ISSN 0392-4130 • ISBN 978-88-98075-51-5

## La scienza e il problema energetico

VINCENZO BALZANI – MARGHERITA VENTURI

Dipartimento di Chimica “Giacomo Ciamician” dell’Università di Bologna, 40126 Bologna  
E.mail: vincenzo.balzani@unibo.it    margherita.venturi@unibo.it

**Abstract** – Leaving aside the covid-19 pandemic, which we hope will be defeated in a few years, we are facing a complex crisis which is both environmental and social. We need to change the industrial model as well as the current lifestyle to reduce waste and pollution and, most important, to stop climate change. We also need to reduce the growing inequalities between nations and within each nation. To achieve these objectives, we must create a new economic model based on ethical foundations, aimed at promoting ecological as well as social sustainability. Strategies for a solution demand an integrated approach to protecting nature and combating poverty by the implementation of three transitions: from fossil fuels to renewable energies, from a linear to a circular economy, and from consumerism to sobriety.

Sadly, not many seem to be aware of the challenge we face. The first thing to do, therefore, is to inform and educate people to build a solid cultural foundation, or rather to implement a courageous cultural revolution, to use the words of Pope Francis.

We cannot continue to build walls and borders, because we all must live together on spaceship Earth from which no one can leave. We must protect our planet because it must also serve the next generations. There is so much to be done to improve this world. Many decisions must be made at a political level, but each of us is required to play our part.

**Keywords:** Anthropocene; Fossil fuels; Nuclear energy; Renewable energies; Transition from fossil fuels to renewable energies; Linear economy vs circular economy

### 1. L’astronave Terra

Una famosa fotografia della NASA, scattata dalla sonda Cassini-Huygens il 15 settembre 2006 a una distanza di 1,5 miliardi di chilometri, mostra la Terra come un punto blu-pallido nel buio cosmico (Fig. 1). Non c’è evidenza che la Terra si trovi in una posizione privilegiata nell’Universo; non ci sono segni che facciano pensare a una nostra particolare importanza, nulla che ci induca a credere di poter ricevere aiuto da altri, nessuna indicazione di luoghi in cui eventualmente poter emigrare. Quando si guarda la Terra da lontano, ci si rende conto della nostra condizione: siamo passeggeri di un’astronave che viaggia nell’infinità dell’universo. Su questa astronave siamo in tanti, circa otto miliardi, e così diversi: bianchi, neri, gialli, ricchi e poveri, buoni e cattivi; nessuno se ne può andare, se non morendo, nessuno può arrivare da fuori: bisogna nascer-

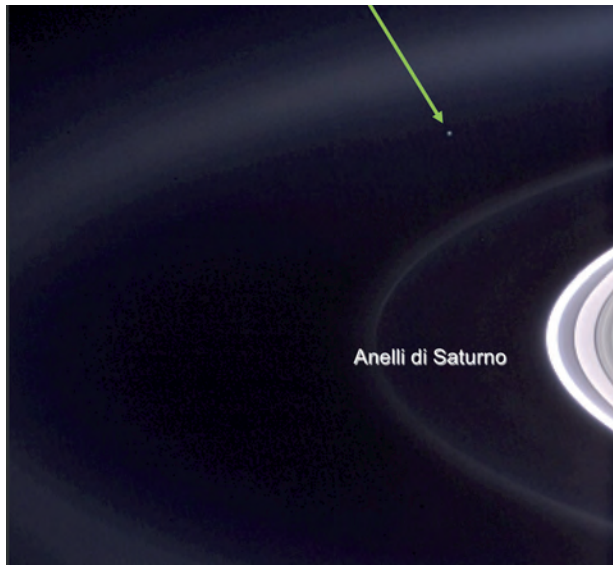


Fig. 1. Come mostra la fotografia scattata il 15 settembre 2006 dalla sonda spaziale Cassini, la Terra è un puntino nell'immensità dell'Universo.

ci dentro. La Terra, dunque, è un'astronave; ma è un'astronave del tutto speciale: non potrà mai atterrare da nessuna parte, non potrà mai attraccare a nessun porto per far rifornimento o scaricare rifiuti. Se qualcosa non funziona o si rompe dovremo ripararla noi passeggeri, senza neppure scendere. Viaggiamo da soli nell'Universo e possiamo fare affidamento soltanto sull'energia proveniente dal Sole e sulle risorse disponibili nella nostra astronave [4, 6]. L'immagine della Terra ripresa dalla Sonda Cassini dovrebbe essere mostrata e commentata in tutte le scuole e, ancor più, nei corsi universitari che aprono alla carriera politica.

Dal punto di vista ecologico, il pianeta Terra, includendo l'energia che le arriva dal Sole, è un ecosistema autosufficiente, costituito dall'insieme degli organismi viventi e materia non vivente che interagiscono fra loro in un equilibrio dinamico. La società umana è parte di questo ecosistema globale; il suo sviluppo all'interno dell'ecosistema, da un lato, è condizionato dall'ecosistema stesso ma, dall'altro, può modificarlo. Quando si parla di sostenibilità ecologica e sociale ci si riferisce proprio al mantenimento dell'equilibrio dinamico: le attività dell'uomo sulla Terra dovrebbero tener conto del fatto che lo sviluppo della società non può compromettere l'autosufficienza dell'ecosistema globale di cui è parte integrante.

Se fino a qualche secolo fa questa condizione è stata sostanzialmente verificata, da circa metà del secolo scorso la grande disponibilità di energia fornita dai combu-

stibili fossili e il progresso della scienza e della tecnologia hanno reso possibile un forte sviluppo dell'attività dell'uomo, tanto da indurre gli scienziati a considerare che sia iniziata una nuova epoca per il pianeta Terra, denominata Antropocene (*epoca dell'uomo*) [10]. L'uomo, inebriato dalle sue capacità, ha cominciato ad agire indipendentemente dall'ecosistema Terra di cui fa parte e a considerare il pianeta come un mero fornitore di beni e servizi. Come sottolinea Hannah Arendt [2]: *L'uomo del XX secolo si è emancipato dalla natura; la natura gli è diventata estranea*. Nella società umana ha così preso il sopravvento l'economia, quell'insieme di attività, istituzioni e strumenti il cui scopo è meramente quello di regolare e soddisfare tutti i bisogni attraverso lo sfruttamento di beni naturali, che non sono più visti come valori intrinseci che garantiscono la sostenibilità dell'ecosistema, bensì come oggetti il cui prezzo è fissato dal mercato. Questa attitudine e il conseguente modo di operare hanno provocato una forte degradazione del pianeta, tanto da mettere a repentaglio lo sviluppo della stessa società umana [14]. Si tratta di una situazione drammatica sottolineata da Papa Francesco nell'enciclica *Laudato si'* [12]: *Il ritmo di consumo, di spreco e di alterazione dell'ambiente ha superato le capacità del pianeta*.

Il degrado del pianeta e l'uso indiscriminato delle risorse hanno anche determinato profonde disuguaglianze sociali, come ben evidenziato nell'Enciclica papale appena citata [12]: *Non ci sono due crisi separate, una ambientale e un'altra sociale, bensì una sola e complessa crisi socio-ambientale. Le direttrici per la soluzione richiedono un approccio integrale per combattere la povertà, per restituire la dignità agli esclusi e nello stesso tempo per prendersi cura della natura*.

Tutto ciò ci dice che dobbiamo salvare il pianeta se vogliamo salvare noi stessi [7].

## 2. L'Antropocene

La Terra ha dimensioni *finite* [4, 6] e, pertanto, le risorse che ci mette a disposizione il pianeta sono limitate così come è limitato anche lo spazio in cui collocare i rifiuti. Si tratta di una realtà innegabile sotto gli occhi di tutti, eppure, spesso, ci fa comodo ignorarla; alcuni economisti, poi, sembrano addirittura non conoscerla.

Dalla metà del secolo scorso, con la crescente disponibilità di energia fornita dai combustibili fossili e il contemporaneo sviluppo della scienza e della tecnologia, l'attività dell'uomo è aumentata in modo enorme: sono state costruite innumerevoli città, strade, ferrovie, aeroporti, mezzi di trasporto e di comunicazione, industrie

capaci di produrre dispositivi e macchine di ogni genere (compresi armamenti sempre più sofisticati), si è meccanizzata l'agricoltura aumentando la produzione di cibo, è migliorato il tenore di vita in molti paesi. Partendo da queste considerazioni, nel 2002, in un articolo su *Nature* [10], Paul Crutzen, premio Nobel per la Chimica nel 1995, suggerì di chiamare Antropocene l'epoca attuale, perché è fortemente caratterizzata dalle attività dell'uomo. La grande accelerazione dell'attività umana ha avuto importanti conseguenze sullo stato del pianeta: il consumo, al limite di un loro esaurimento, di alcune risorse naturali (in prospettiva, anche dei combustibili fossili), la produzione di molti tipi e di grandi quantità di nuovi materiali (ad es., materie plastiche), la diffusione su scala globale di sostanze inquinanti (ad es., polveri sottili e sostanze radioattive), i cambiamenti climatici causati dalle emissioni di gas serra, la diminuzione della biodiversità con l'alterazione dei rapporti fra le specie. L'uomo ha anche esteso la sua azione fuori dal pianeta lanciando innumerevoli satelliti artificiali, collocando in orbita attorno alla Terra stazioni spaziali abitate, mettendo piede sulla Luna e inviando sonde per esplorare altri pianeti e lontani corpi celesti. Con energia, scienza e tecnologia l'uomo è diventato progressivamente più forte della Natura; usando la metafora dell'Astronave, possiamo dire che l'uomo negli ultimi decenni è entrato nella cabina di comando: non può modificarne la rotta, ma ha cambiato e può ulteriormente cambiare le regole e il meccanismo di funzionamento dell'astronave. Se vuole, può addirittura distruggerla. Alcuni cambiamenti causati dall'attività umana dureranno per millenni, altri potrebbero essere addirittura irreversibili.

Nel 1980, le materie prime estratte dalla Terra ammontavano a 40 miliardi di tonnellate; nel 2021 sono salite a circa 100 miliardi di tonnellate, pari a 40 kg per persona al giorno. C'è poi da aggiungere che, a mano a mano che i depositi più ricchi si vanno esaurendo, si ricercano risorse più difficili da estrarre (ad es., il petrolio da sabbie bituminose) con un forte impatto ambientale [8, 9]. Ci si può chiedere giustamente: rimarrà qualcosa per le future generazioni?

Le dimensioni finite del pianeta hanno conseguenze anche per quanto riguarda la collocazione dei rifiuti, che si producono ogni volta che si usano risorse; non possiamo sbarazzarcene collocandoli in un inesistente *non luogo*. I rifiuti finiscono inesorabilmente sottoterra, sulla superficie della terra, sulla superficie o sul fondo dei mari e nell'atmosfera; in ogni caso, con conseguenze poco piacevoli, come dimostra l'enorme *isola* (grande come l'Europa) che si è formata nell'Oceano Pacifico dall'ac-

cumulo di rifiuti plastici. La quantità di CO<sub>2</sub> riversata in atmosfera supera i 30 miliardi di tonnellate all'anno e, come sappiamo, causa un aumento dell'effetto serra e i conseguenti cambiamenti climatici. Il particolato fine generato dai motori a combustione ha causato nel 2020 più di 200.000 morti premature in Europa, 40.000 delle quali in Italia. Ci sono poi le scorie delle centrali nucleari, pericolose per decine di migliaia di anni, che nessuno sa dove collocare.

Dovremmo renderci conto che l'attività dell'uomo sul pianeta deve confrontarsi da un lato con limiti materiali e, dall'altro, con la necessità di non superare determinati confini, oltre i quali la biosfera non sarebbe più in grado di sostenere la vita. Aver chiamato la nostra epoca con il nome Antropocene è utile per diffondere più facilmente il messaggio della responsabilità che grava sulle nostre spalle. La nostra, infatti, è la prima generazione che si rende conto della nuova situazione e dei pericoli che essa comporta ed è, quindi, anche la prima generazione ad avere la responsabilità di prendere i provvedimenti necessari affinché l'astronave Terra possa fornire una decorosa ospitalità ai suoi sempre più numerosi passeggeri e alle future generazioni.

Alla Conferenza COP21, tenutasi nel dicembre 2015 a Parigi, 195 nazioni hanno concordemente riconosciuto che il cambiamento climatico, causato dall'uso dei combustibili fossili, è il problema più preoccupante per l'umanità e nella già citata Enciclica Papa Francesco ha ammonito [12]: *Lo stile di vita attuale, essendo insostenibile, può sfociare solamente in catastrofi.*

Purtroppo, in questi ultimi 7 anni non si sono fatti sostanziali progressi e alla COP27 tenutasi a Sharm El-Sheikh, in Egitto, il segretario dell'ONU Gutierrez ha pronunciato un discorso molto duro: *Il tempo stringe, le emissioni di gas a effetto serra continuano ad aumentare, la temperatura globale continua a salire e il nostro pianeta si sta avvicinando rapidamente a dei punti di non ritorno (tipping point) che renderanno la catastrofe climatica irreversibile. L'umanità è di fronte ad una scelta: cooperare o morire.*

L'Antropocene è caratterizzato anche da forti disuguaglianze. Lo sviluppo economico ha migliorato il livello di vita dei cittadini di molti paesi, dove però un gran numero di persone vive ancora ben sotto il livello di povertà, mentre in altri paesi è in corso una crescita economica tumultuosa che lascia indietro gran parte della popolazione; in altri poi, lo sviluppo economico non è ancora iniziato. L'attuale modello di sviluppo, che si può riassumere con la parola *consumismo*, non solo trasforma le risorse in rifiuti con grande velocità, ma ha anche la drammatica conseguenza di aumentare le disugua-

glianze: crea ricchi che non sanno come utilizzare il superfluo e poveri che non hanno il necessario per vivere. All'insostenibilità ecologica si affianca quindi l'insostenibilità sociale. Sia dove è già avvenuto, sia dove attualmente si manifesta, lo sviluppo economico ha generato e continua a generare una molteplicità di problemi che minacciano di lasciare alle prossime generazioni un pianeta fortemente impoverito, molto inquinato e soggetto a cambiamenti climatici, e una società affetta da crescenti disuguaglianze. Parecchi scienziati oggi sottolineano che il tumultuoso agire dell'uomo, accompagnato dal rapido progresso della scienza in direzioni sbagliate, ha reso il mondo molto fragile. Con riferimento all'attuale crisi energetico-climatica, qualche scienziato afferma che il mondo è sull'orlo del baratro.

### 3. L'energia

L'energia è un'entità onnipresente nella nostra vita, ma è un concetto solo in apparenza intuitivo, cosa che vale per altri concetti importanti come quelli di tempo e di spazio. Il concetto di energia è così complesso e, allo stesso tempo, così sfuggente che per millenni gli studiosi ne hanno dato definizioni molto vaghe. Richard Feynman, uno dei fisici moderni più grandi, ha addirittura scritto [11]: *It is important to realize that in physics today, we have no knowledge what energy is.*

L'energia è tutto quello che permette di fare qualcosa o di generare un cambiamento: senza energia non si può fare nulla. L'energia si manifesta in forme diverse interconvertibili e, nel trasformarsi, la sua quantità si conserva, mentre la sua qualità degrada. L'energia è il vero potere che governa il mondo ed è causa di guerre che, allo stesso tempo, alimenta. L'energia è un qualcosa di natura universale che non si può *ridurre* a nulla di più elementare.

Il termine energia è stato coniato dalla lingua greca unendo la preposizione «en» (in) al sostantivo «ergon» (lavoro, opera, azione). Si può, quindi, definire il concetto di energia partendo da quello di lavoro, che è semplice e intuitivo: è un lavoro, ad esempio, sollevare un oggetto pesante dal pavimento e metterlo su uno scaffale. Per fare un lavoro, pertanto, ci vuole energia, che nell'esempio sopra riportato può essere fornita da una persona, ma anche da un sollevatore meccanico. L'energia può allora essere definita come la capacità di un corpo o di un sistema a compiere un lavoro e la misura di questo lavoro è la misura dell'energia che esso richiede.

Le più importanti forme di energia (energie primarie) sono l'energia termica, l'energia luminosa, l'energia elettrica, l'energia nucleare, l'energia chimica, l'energia eoli-

ca, l'energia idroelettrica e l'energia gravitazionale; fra queste quelle più comunemente usate dall'uomo (energie di uso finale) sono l'energia termica, l'energia elettrica e l'energia meccanica. Nel seguito, verranno trattate soltanto le fonti di energia che hanno maggiore rilevanza per lo scopo di questo contributo.

#### 3.1 I combustibili fossili

I combustibili fossili (carbone, petrolio e gas) quando vengono utilizzati (bruciati) forniscono energia termica (calore) che si può usare come tale o convertire, con bassa efficienza, in altre forme di energia, per esempio energia meccanica o elettrica.

Fino alla metà del secolo scorso si pensava che i combustibili fossili fossero la soluzione ideale per soddisfare i bisogni energetici dell'umanità e, ancora oggi, circa l'80% dell'energia è ottenuta dai combustibili fossili: ogni *secondo*, al mondo si consumano circa 250 tonnellate di carbone, 160.000 litri di petrolio e 100.000 metri cubi di gas, riversando nell'atmosfera, sempre ogni secondo, circa 1.000 tonnellate di CO<sub>2</sub>.

I fattori che hanno spinto al massiccio uso di combustibili fossili sono principalmente tre: abbondanza (seppure geograficamente distribuita in modo non uniforme), possibilità di trasportarli e conservarli fino al momento dell'uso ed elevata densità energetica [4, 6]. I combustibili fossili, però, sono una fonte di energia non rinnovabile, fatalmente destinata a esaurirsi, cosa che si sta chiaramente evidenziando in questi ultimi anni. Inoltre, da alcune decine di anni, ci siamo accorti che l'uso dei combustibili fossili causa problemi molto gravi su scala globale.

Anzitutto, bruciando producono sostanze inquinanti, dannose per la salute dell'uomo. Petrolio, gas naturale e carbone sono sempre mescolati a quantità più o meno rilevanti di altre sostanze (composti solforati, metalli, composti aromatici) che soltanto in parte vengono separate dal combustibile prima del suo uso. Sostanze inquinanti (in particolare, ossidi di azoto NO<sub>x</sub>) si formano anche quando i combustibili fossili bruciano ad alta temperatura usando l'aria come comburente.

Cosa ancor più preoccupante, la grande quantità di CO<sub>2</sub> immessa nell'atmosfera avvolge il globo terrestre come un mantello che permette ai raggi solari di raggiungere il suolo, ma impedisce al calore così generato di disperdersi. L'accumulo di questo gas attorno alla Terra provoca, quindi, un *aumento dell'effetto serra*, responsabile del cambiamento climatico e di tutte le conseguenze che esso comporta: riduzione dei ghiacciai, innalzamento del livello dei mari, avanzamento della sicci-

tà in molte regioni del mondo, eventi meteorologici estremi e altri fenomeni, causando danni (chiamati esternalità) che ricadono sulla collettività molto più che sugli utilizzatori. Il costo reale dell'energia ottenuta dai combustibili fossili è, quindi, decisamente più alto di quello che viene fatto pagare al consumatore. La proposta di ENI e di altre compagnie petrolifere di catturare (solo parzialmente!) e stoccare la quantità di CO<sub>2</sub> prodotta dall'uso dei combustibili fossili (tecnologia CCS) è un alibi per continuare a estrarre combustibili fossili, compromettendo così il percorso di decarbonizzazione e lasciando alle prossime generazioni l'onere di sorvegliare e controllare questi depositi di CO<sub>2</sub> che potrebbero venir danneggiati da eventi sismici.

Nel 1988 sotto l'egida dell'ONU è stato costituito un gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico (IPCC) per valutare, su una base globale, obiettiva, aperta e trasparente, le informazioni scientifiche, tecniche e socioeconomiche rilevanti per comprendere i rischi del cambiamento climatico, i potenziali impatti e le opzioni di adattamento e mitigazione. Negli anni seguenti si è giunti alla ratifica, da parte di molti paesi, della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici e, con cadenza annuale, si sono svolte conferenze (COP, Conference of the parties) per esaminare l'evolvere del fenomeno e adottare provvedimenti.

Nella già menzionata COP21 di Parigi, le 195 nazioni presenti si sono impegnate ad agire per mantenere l'innalzamento della temperatura sotto 2 °C e – se possibile – sotto 1,5 °C rispetto ai livelli preindustriali. Sempre nel 2015 Papa Francesco, nella più volte citata Enciclica *Laudato si'*, scritta con la consulenza di molti scienziati, ha affermato [12]: *I combustibili fossili devono essere sostituiti senza indugio, ma la politica e l'industria rispondono con lentezza, lontane dall'essere all'altezza delle sfide.*

Dall'inizio della rivoluzione industriale ad oggi la concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera è aumentata da 275 a oltre 400 ppm (parti per milione) e si prevede che, se non saranno presi provvedimenti opportuni, potrà superare 550 ppm alla fine di questo secolo, con conseguenze che potrebbero essere disastrose. Secondo IPCC, una tale concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera causerebbe un aumento medio globale della temperatura di circa 3 °C, molto più del limite di 2 °C, che era già considerato molto pericoloso.

In questi ultimi 7 anni, però, non si sono fatti grandi progressi e alla COP27 il segretario dell'ONU Gutierrez ha ammonito: *Siamo su un'autostrada diretti verso l'inferno climatico con il piede sull'acceleratore; stiamo lottando per la nostra vita e stiamo perdendo.* Ha inoltre lanciato

un appello affinché nasca uno storico Patto tra economie sviluppate ed economie emergenti: *Un Patto di Solidarietà Climatica, perché ormai si sa cosa bisogna fare e ci sono anche gli strumenti finanziari e tecnologici per farlo; è tempo che le nazioni si uniscano per agire.*

### 3.2 Le energie rinnovabili

Le energie rinnovabili sono quelle fornite, direttamente o indirettamente dal Sole (energia fotovoltaica, eolica, idroelettrica, Fig. 2) e, seppure molto meno importanti, quelle fornite dalla Terra (biomasse, energia geotermica) e dai movimenti (maree, onde) e dal gradiente termico dei mari. Per varie ragioni, nella discussione che segue ci occuperemo solo di quelle fornite dal Sole che possiamo considerare non solo rinnovabili, ma anche inesauribili perché il Sole continuerà a generarle per miliardi di anni.

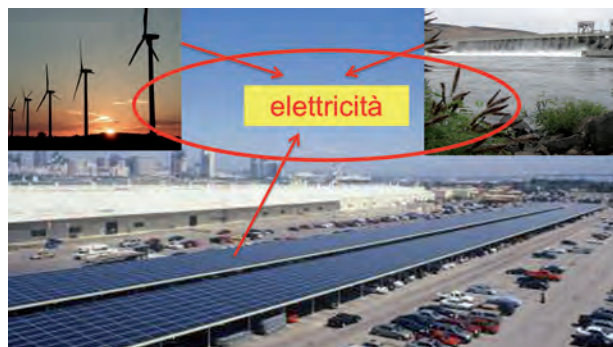


Fig. 2. Le tre più importanti fonti di energia rinnovabile, fotovoltaico, eolico e idroelettrico, forniscono energia elettrica *pulita* e più utile del calore che si ottiene dai combustibili fossili.

È emozionante pensare che queste fonti energetiche sono quelle di cui parla San Francesco nel Cantico delle Creature: *frate Sole* che, oltre al calore, ci fornisce luce che i pannelli fotovoltaici convertono in elettricità; *frate Vento* che, attraverso il movimento meccanico delle pale eoliche, genera anch'esso elettricità; *sor'Acqua* che si può accumulare con dighe per poi farla cadere in apposite condotte per produrre ancora una volta elettricità; *sora nostra madre Terra* che, oltre a fornirci calore (geotermia), ha nel suo seno gli elementi chimici che permettono di costruire i congegni e i dispositivi (pannelli fotovoltaici, pale eoliche, dighe, motori elettrici, batterie, ecc.) necessari per convertire le energie rinnovabili nelle forme di energia che utilizziamo ogni giorno: calore, elettricità e combustibili.

Le energie rinnovabili nel loro insieme soddisfano sostanzialmente i requisiti richiesti per una fonte energeti-

ca ideale. Sono, infatti, ben distribuite e, alcune, anche molto abbondanti: il Sole, ad esempio, in un'ora manda sulla Terra una quantità di energia pari a quella che l'umanità consuma in un anno. Per utilizzare le energie rinnovabili è, però, necessario convertirle in energie di uso finale mediante dispositivi, congegni o apparati (pannelli fotovoltaici, pale eoliche, bacini e dighe) che dobbiamo costruire con le risorse materiali ottenibili dalla Terra. Poiché, come abbiamo visto, la Terra ha dimensioni finite e, quindi, risorse limitate, le energie rinnovabili, che in teoria abbiamo a disposizione, vengono solo in parte sfruttate.

Il vantaggio delle energie rinnovabili è che forniscono elettricità, una forma di energia molto più utile del calore, mentre un loro difetto è che sono intermittenti, difetto a cui si può ovviare convertendo l'energia elettrica in energia chimica (accumulatori, idrogeno) o idroelettrica (pompaggi) o utilizzando altri metodi [1, 5].

L'uso delle energie rinnovabili è in forte espansione, ma ad oggi è ancora limitato: l'idroelettrico fornisce il 4% dell'energia primaria e tutte le altre assieme circa il 3%. Il loro contributo, però, non è affatto trascurabile per quanto riguarda la produzione di elettricità, dove le energie rinnovabili forniscono il 28% del totale (in Italia, circa il 40%).

Per ragioni di spazio, riportiamo solo alcuni dati e qualche considerazione sullo sviluppo recente delle energie rinnovabili.

### 3.2.1 L'energia idroelettrica

L'energia ottenuta dalla caduta dell'acqua è la più nota, usata e collaudata forma di energia rinnovabile. Si stima che nei paesi sviluppati circa il 70% del potenziale sfruttabile per grandi impianti sia già operativo, mentre ampie possibilità di crescita sono ancora presenti in Asia e Africa.

Nuove prospettive, sia per i paesi sviluppati che per le zone rurali del terzo mondo, riguardano l'idroelettrico basato su piccoli impianti che possono sfruttare flussi idrici ridotti, ma costanti.

La potenza idroelettrica installata, che era di 715 GW nel 2004, ha raggiunto 1.200 GW nel 2021, però la scarsità di pioggia e neve negli ultimi anni, causata dal cambiamento climatico, ha ridotto il contributo dell'idroelettrico in alcuni paesi, fra cui l'Italia.

### 3.2.2 L'energia eolica

Gli impianti eolici comportano un uso ridotto del territorio, si possono installare anche in mare, richiedono

una manutenzione minima, restituiscono in pochi mesi l'energia utilizzata per costruirli e si possono costruire e smantellare in tempi brevi con riciclo quasi totale dei materiali usati. Poiché il vento è intermittente su base giornaliera e stagionale, la capacità annuale effettiva di un impianto eolico si aggira attorno al 30%.

La produzione di questo tipo di energia, mediante eolico offshore e micro-eolico, cresce ad un ritmo annuo superiore al 20%, e contribuisce già alla produzione di elettricità con percentuali molto alte sia in paesi piccoli, come la Danimarca (44%), che nelle grandi potenze industriali, come la Germania (20%).

In totale, la potenza installata è passata da 48 GW del 2004 a 845 GW nel 2021, producendo energia pari a quella ottenibile con 150 centrali nucleari da 1.000 MW.

### 3.2.3 L'energia fotovoltaica

Il fotovoltaico è in fortissima espansione tanto è vero che la potenza installata, che nel 2004 era di 2,6 GW, è salita a ben 942 GW nel 2021 e continuerà ad aumentare esponenzialmente nei prossimi anni. La produzione di energia elettrica fotovoltaica necessita di ampi spazi di raccolta, ma non così estesi come si potrebbe pensare. Nel caso dell'Italia sarebbe sufficiente utilizzare lo 0,8% del territorio, un'estensione poco più grande dell'area che occupano, comprese le zone di pertinenza, i 700.000 capannoni già presenti sul territorio, che sono luoghi ideali per mettere pannelli fotovoltaici. Occorre poi considerare che altri posti adatti per collocare i pannelli fotovoltaici sono i tetti degli edifici pubblici (Fig. 3), i laghi e anche il mare.

Recentemente va sviluppandosi l'agrivoltaico che consiste nel posizionare su un terreno coltivabile pannelli fotovoltaici inclinati, a opportuna distanza e a un'altezza dal suolo di un paio di metri (Fig. 4); in questo modo si ottengono con buona resa sia i prodotti agricoli che energia elettrica, un risultato di enorme valore: cibo ed energia, le risorse più importanti per la vita, dallo stesso campo illuminato dal Sole.

In Italia, che gode di un'ottima insolazione, nel 2021 il fotovoltaico ha coperto il 10% dei consumi elettrici e ha ormai raggiunto e superato la *grid parity* (cioè la competitività economica) con le centrali elettriche a carbone e anche con le turbine a gas a ciclo combinato, che sono quelle usate per produrre elettricità nelle ore di più alto consumo.

Il fotovoltaico è una tecnologia ormai collaudata: i pannelli hanno una durata di 25-30 anni e in 2-3 anni generano l'energia spesa per produrli. In futuro le celle fo-



Fig. 3. Il tetto della stazione di Shanghai è coperto da pannelli fotovoltaici che forniscono elettricità ai treni.



Fig. 4. Posizionando su un campo coltivabile i pannelli fotovoltaici con appropriata inclinazione e distanza e a un'altezza di un paio di metri dal suolo si ottengono con buona efficienza cibo ed energia.

tovoltaiche saranno sempre più sottili e, sfruttando nuovi materiali, sarà possibile produrre, con tecnologie simili a quelle oggi usate per la stampa, pannelli flessibili, più facili da installare.

Forse non tutti sanno che l'efficienza di conversione dell'energia solare in energia elettrica da parte di un pannello fotovoltaico (circa il 20%) è più di 100 volte maggiore di quella con cui il processo fotosintetico naturale converte l'energia solare in energia chimica.

### 3.3 L'energia nucleare

Verso la metà del secolo scorso, ancor prima dello sviluppo delle energie rinnovabili, si è riusciti ad ottenere energia elettrica dall'energia di fissione nucleare, facendo nascere la speranza di fornire a tutto il mondo energia elettrica abbondante e a basso prezzo. Dopo una crescita durata una ventina d'anni, però, verso l'inizio degli anni '90 del secolo scorso lo sviluppo del nucleare si è arrestato e attualmente esso fornisce il 10% dell'energia elettrica mondiale, che a sua volta rappresenta circa il 20% del consumo di energia finale.

Oggi le centrali nucleari non sono economicamente convenienti in un regime di libero mercato, per cui si costruiscono solo nei paesi dove lo Stato si fa direttamente carico dei costi e dei rischi d'impresa e dove c'è un forte collegamento con il nucleare militare.

I risultati del referendum di giugno 2011 hanno decretato la definitiva rinuncia dell'Italia a sviluppare l'energia nucleare.

Recentemente in sede europea il nucleare è stato considerato fondamentale per combattere il cambiamento climatico in quanto non genera CO<sub>2</sub>. In realtà la quantità di CO<sub>2</sub> emessa dal nucleare dovrebbe essere calcolata tenendo conto di tutte le fasi del ciclo di vita degli impianti – dall'estrazione dell'uranio fino alla dismissione delle centrali – senza tralasciare le emissioni legate al trasporto e allo stoccaggio delle scorie radioattive.

Inoltre, per valutare la sostenibilità ecologica, economica e sociale dell'energia nucleare non ci si può basare solo sulla quantità di CO<sub>2</sub> emessa; è, infatti, necessario considerarne tutte le criticità, che possiamo così riassumere: 1) le centrali nucleari producono scorie radioattive pericolose per decine di migliaia di anni, la collocazione delle quali è un problema non risolto e forse irrisolvibile; 2) il combustibile nucleare, l'uranio, è una risorsa, oltre che non rinnovabile, limitata e quindi contesa; 3) la dismissione di una centrale nucleare a fine vita è un problema di difficile soluzione sia dal punto di vista tecnico che economico, tanto che lo si lascia in eredità

alle prossime generazioni; 4) un incidente nucleare grave non è delimitabile nello spazio e nel tempo e, pertanto, coinvolge direttamente o indirettamente milioni di persone; 5) gli incidenti di Chernobyl e Fukushima hanno dimostrato che un grave incidente nucleare può accadere anche in paesi tecnologicamente avanzati; 6) il nucleare civile è connesso alle applicazioni militari e può essere obiettivo o fonte di attività terroristiche; 7) il timore di incidenti o di contaminazioni con sostanze radioattive rendono difficile il reperimento di siti in cui costruire le centrali; 8) l'esperienza dimostra che la costruzione di una centrale nucleare richiede più di 20 anni e il costo finale supera di molte volte quello inizialmente previsto.

Il nucleare, quindi, lascia pesanti fardelli sulle spalle delle prossime generazioni e genera anche complicati problemi politici e sociali difficili da risolvere. In conclusione, il nucleare è una tecnologia molto costosa, pericolosa, complessa da gestire e socialmente non accettabile.

Si deve, poi, aggiungere che il nucleare da fusione, di cui spesso si parla senza molta cognizione di causa, se mai verrà realizzato porrà problemi sociali e politici ancor più complicati di quello da fissione.

### 4. La transizione energetica dai combustibili fossili alle energie rinnovabili

La transizione dai combustibili fossili alle energie rinnovabili è inevitabile e anche urgente se vogliamo custodire il pianeta e noi stessi che lo abitiamo. È una transizione che richiede tempo perché è complessa dal punto di vista tecnico, economico, politico e anche culturale.

Nella sua forma concentrata offerta dai combustibili fossili, l'energia è stata ed è ancora la base del potere industriale, militare e politico. L'uso dei combustibili fossili, però, ha causato la nascita e il perpetrarsi di disuguaglianze all'interno di ciascuna Nazione e fra le Nazioni, nonché l'instaurarsi di equilibri internazionali molto complessi, basati sulla potenza economica e militare, che neppure l'avvento dell'energia nucleare a metà del secolo scorso ha sostanzialmente modificato. Tali equilibri, per quanto consolidati, verranno inevitabilmente sconvolti passando dai combustibili fossili alle energie rinnovabili. Si tratta, infatti, di sostituire fonti energetiche concentrate, localizzate in pochi paesi, pericolose, inquinanti, causa di controversie economiche e commerciali, esposte ad attentati e particolarmente adatte ad alimentare le guerre, con fonti energetiche diffuse su tutta la Terra, non inquinanti e non pericolose. Infine, ma non ultimo elemento come importanza, bisogna ricordare che, mentre più di un miliardo di persone oggi non dispone di elettricità,



nei paesi sviluppati l'abbondanza di energia ha forgiato la società consumistica dello spreco e dell'usa e getta, che non sarà facile modificare.

La transizione energetica, quindi, ancor più che un complesso problema tecnico, implica una vera rivoluzione culturale [9] perché riguarda il modo di vivere e di affrontare il futuro, interessa tutti i livelli organizzativi della società e ha profondi effetti economici e politici. La transizione che stiamo affrontando è, pertanto, una grande sfida che ci porterà a vivere in un mondo più giusto, più equo e più pacifico.

La transizione energetica comporta anche grandi cambiamenti nel modo di produrre, trasportare e utilizzare l'energia. Le forme di energia comunemente usate (energie di uso finale) sono calore, elettricità ed energia meccanica (trasporti). Attualmente, come energia primaria usiamo essenzialmente i combustibili fossili, con i quali generiamo calore (assieme a CO<sub>2</sub> e inquinamento, con le conseguenze già discusse) che si può usare direttamente, ad esempio per il riscaldamento degli edifici, oppure si può convertire, con bassa efficienza, in energia meccanica o elettrica. Le energie primarie rinnovabili del Sole, del vento e dell'acqua, con le quali dobbiamo sostituire i combustibili fossili, non solo non producono CO<sub>2</sub> e non causano inquinamento, ma hanno un'ulteriore importante caratteristica: generano energia elettrica e non calore. L'energia elettrica è particolarmente pregiata perché può essere convertita con alta efficienza in altre forme di energia come luce, calore ed energia meccanica (Fig. 5). Quindi, l'economia basata sulle fonti rinnovabili ha un'efficienza energetica molto maggiore dell'economia basata sui combustibili fossili.

Le energie rinnovabili hanno anche altri vantaggi rispetto a quelle fossili. I combustibili fossili sono pre-

sentiti allo stato grezzo, sotto la crosta terrestre e solo in certe regioni del mondo. Quindi vanno estratti scavando miniere o pozzi, poi devono essere raffinati e infine trasportati nei luoghi d'uso, operazioni tutte pericolose e spesso causa di incidenti. Invece, l'energia primaria per produrre elettricità con il fotovoltaico, l'eolico e l'idroelettrico *piove dal cielo*, non va trasportata né raffinata, dobbiamo solo raccoglierla, convertirla in elettricità, operazioni che non presentano pericoli (a parte l'idroelettrico), e distribuirla tramite fili, senza eccessivi problemi.

Le energie rinnovabili, però, rispetto ai combustibili fossili hanno lo svantaggio di essere intermittenti, difetto che si ripercuote sull'elettricità che esse generano. Per ovviare a questo inconveniente bisogna ricorrere, come già accennato, a sistemi di accumulo.

Gli scienziati hanno dimostrato che la transizione dai combustibili fossili alle energie rinnovabili si può fare e che, oltre a eliminare inquinamento e frenare il cambiamento climatico, è anche vantaggiosa perché crea molti nuovi posti di lavoro [13]. Stime concordanti di molti economisti, fra i quali il premio Nobel Stiglitz, valutano infatti che le energie rinnovabili, a parità di capitale investito, creano tre volte più occupati delle fonti fossili, per cui investire nelle energie rinnovabili è utile anche per rilanciare l'economia.

Un gruppo dell'Università di Stanford [13] ha condotto una dettagliata indagine sui benefici che la transizione porterà in vari paesi e, per quanto riguarda l'Italia, lo studio afferma che l'energia necessaria si può ricavare essenzialmente da fotovoltaico, eolico e idroelettrico, con un piccolo contributo di geotermico. Ha anche valutato che, per la costruzione degli impianti necessari, si occuperà non più dello 0,26% del territorio, che si cre-

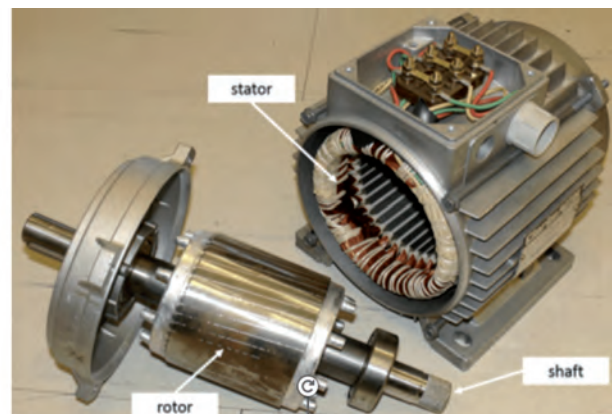
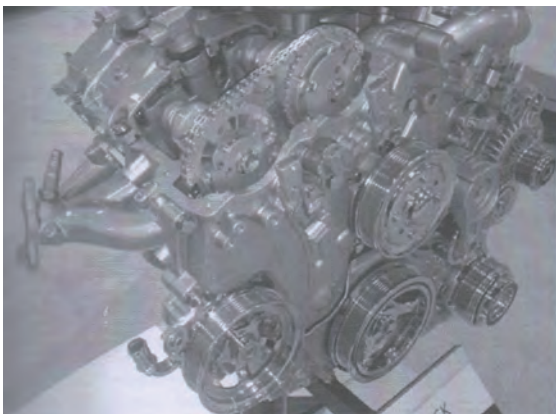


Fig. 5. La complessità del motore termico confrontata con la semplicità del motore elettrico.

ranno 138.000 posti di lavoro per la loro costruzione e altri 140.000 per il loro funzionamento.

Oggi siamo in una strana situazione: il futuro, cioè le energie rinnovabili, è già presente, ma il passato, cioè i combustibili fossili, non vuole tramontare. Questa transizione energetica è, infatti, fortemente ostacolata dalle lobby dei combustibili fossili (in Italia, da ENI e SNAM) secondo le quali le energie rinnovabili non sarebbero ancora mature. Per smentire questa falsità basta considerare quanto già detto e, cioè, che la fotosintesi naturale converte l'energia solare in energia chimica con un'efficienza energetica dello 0,2%, mentre il fotovoltaico converte l'energia solare in energia elettrica con un'efficienza di circa il 20% e, quindi, 100 volte maggiore!

L'Unione Europea ha lanciato un piano ben finanziato, il *Green Deal europeo*, più propriamente chiamato *Next Generation EU* perché è finalizzato al bene delle prossime generazioni.<sup>1</sup> La strategia del piano è articolata in modo da azzerare le emissioni climalteranti entro il 2050, ridurre l'inquinamento, proteggere il pianeta e far sì che la transizione energetica sia socialmente giusta e inclusiva. L'Italia non deve perdere tale occasione che, fra l'altro, può fare emergere le grandi potenzialità della sua industria manifatturiera, perché fotovoltaico, eolico, sistemi di accumulo dell'energia elettrica e tutto quello che concerne le energie rinnovabili riguardano proprio questo tipo di industria, nella quale siamo maestri.

## 5. Dall'economia lineare all'economia circolare

Per raggiungere la sostenibilità ecologica e sociale è necessaria un'altra transizione: quella dall'*economia lineare* (Fig. 6), caratterizzata dall'usa e getta, all'*economia circolare* [6, 7, 9] (Fig. 7). L'usa e getta è una pratica insostenibile: da una parte causa l'esaurimento delle risorse e, dall'altra, genera l'accumulo di quantità enormi di rifiuti, spesso dannosi. Questo tipo di sviluppo economico ci sta portando sull'orlo del baratro ecologico e, indirettamente, è l'origine delle crescenti, insostenibili disuguaglianze sociali. Papa Francesco ha lanciato un appello accorato [12]: *Ciò che sta accadendo ci pone di fronte all'urgenza di procedere in una coraggiosa rivoluzione culturale*. Uno dei punti cardine di questa rivoluzione culturale è proprio il passaggio dall'economia lineare all'economia circolare, nella quale le risorse vengono usate in quantità il più possibile limitate (risparmio) e in modo intelligente (efficienza) per fabbricare oggetti pro-

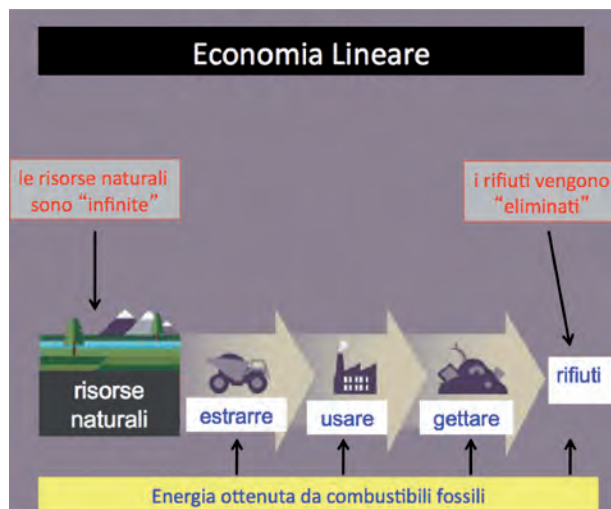


Fig. 6. L'economia lineare è basata sul falso presupposto che le risorse siano infinite, che non ci siano problemi per la collocazione dei rifiuti e che si possa continuare ad usare l'energia fornita dai combustibili fossili.

grammati non solo per essere usati, ma anche per essere riparati, riusati, raccolti e riciclati in modo da fornire nuove risorse [6, 7, 9]. Una differenza fondamentale fra l'economia lineare e l'economia circolare riguarda l'energia: l'economia lineare è alimentata dai combustibili fossili, mentre l'economia circolare deve utilizzare l'energia solare e le altre fonti di energia (eolica, idrica) ad essa collegate che sono rinnovabili (e inesauribili), ben distribuite e non nocive all'ambiente e all'uomo. Ecco, quindi, che la seconda transizione, quella dall'economia lineare all'economia circolare, non può realizzarsi

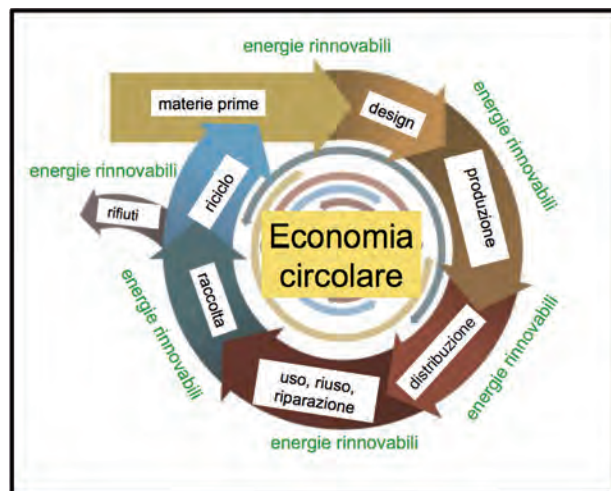


Fig. 7. L'economia circolare, partendo dalla constatazione che le risorse sono limitate, è basata su alcune parole chiave come risparmio, riutilizzo, riciclo e uso di fonti energetiche rinnovabili.

<sup>1</sup> [https://ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe\\_it](https://ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe_it)

completamente se non si porta a termine la transizione dai combustibili fossili alle energie rinnovabili.

Le energie primarie del Sole, del vento e dell'acqua sono molto abbondanti, ma per trasformarle in energie di uso finale è necessario costruire congegni e strutture materiali (pannelli fotovoltaici, pale eoliche, dighe, ecc.) usando le risorse che ci fornisce la Terra: un centinaio di elementi chimici e i loro composti. Come è noto, alcuni elementi sono molto abbondanti (idrogeno, carbonio, ossigeno), altri sono presenti in minor quantità e altri ancora sono relativamente scarsi.

Quindi, anche se le energie primarie rinnovabili sono molto abbondanti e ben distribuite, l'energia rinnovabile che possiamo realmente utilizzare è condizionata dalla limitata disponibilità e dalla non uniforme distribuzione delle necessarie risorse materiali (Fig. 8). Alla scarsità di materiali si può ovviare, in parte, con il riciclo (economia circolare), ma è molto probabile che con le energie rinnovabili non sarà possibile produrre tutta l'energia che vorremmo avere (spesso, per poi sprecarla).

## 6. Dal consumismo alla sobrietà

Nel tentativo di risolvere, o almeno attenuare i problemi della relativa scarsità di risorse materiali e delle crescenti disuguaglianze, possiamo porci una domanda: quanta energia è realmente necessaria per una persona? Molte ricerche rivelano, infatti, che nei paesi ricchi gran

parte dell'energia viene sprecata e che il benessere delle persone non è direttamente proporzionale all'energia che consumano [3, 6, 9]. Ad esempio, ogni cittadino americano impiega mediamente l'equivalente di 12.000 watt di potenza, il doppio di un cittadino europeo (6000 watt), ma il benessere negli Stati Uniti non è maggiore di quello nei paesi europei.

Ci si può, allora, domandare se e come sia possibile ridurre il consumo di energia quando si è abituati a sprecarla. Chi studia questo problema indica due strategie [7]: la prima è *agire sulle cose*, cioè aumentare l'efficienza energetica di tutte le apparecchiature che usiamo: automobili, caldaie, lampadine, ecc. L'esperienza dimostra, tuttavia, che l'aumento dell'efficienza spesso non porta a una riduzione del consumo di energia per diversi motivi, fra cui il cosiddetto *effetto rimbalzo*. Può accadere, infatti, che un aumento dell'efficienza energetica incoraggi un maggiore utilizzo dei servizi energetici; ad es., quando una persona sostituisce una vecchia auto con una nuova meno inquinante, a volte è così orgogliosa di aver acquistato un'auto più ecologica che finisce per usarla maggiormente.

La seconda strategia dice, invece, che, se si vuole realmente consumare meno energia per contribuire alla sostenibilità ecologica e sociale, bisogna *agire sulle persone*, prima che sulle cose. Occorre partire dal concetto di *sufficienza*, convincendo, sollecitando e, in casi estremi, anche obbligando le persone, con leggi e sanzioni, a ri-

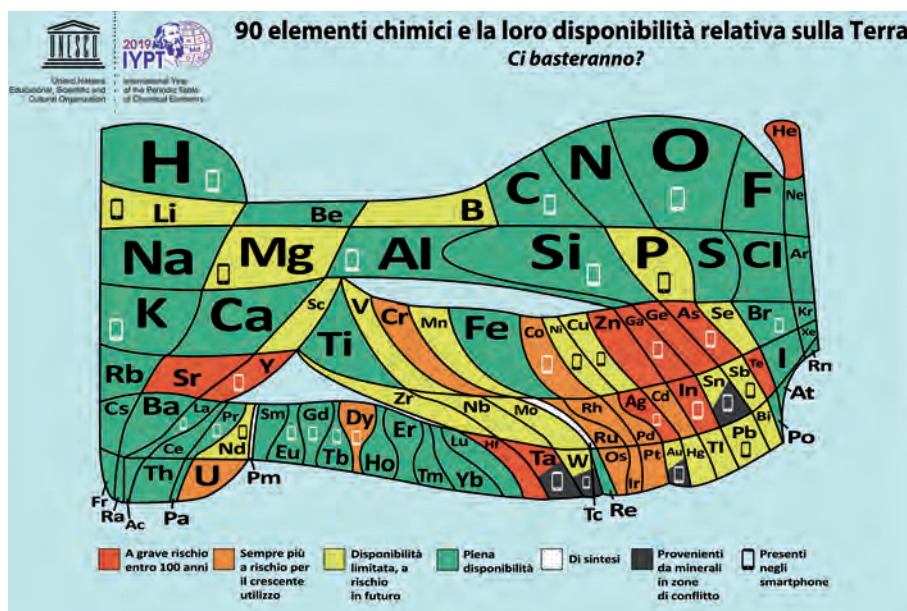


Fig. 8. Una versione moderna della Tavola Periodica che rappresenta schematicamente l'abbondanza relativa sul nostro pianeta dei novanta elementi naturali.

durre l'uso non necessario dei servizi energetici. Per risparmiare realmente energia non basta *fare con meno*, bisogna *fare meno*: meno viaggi, meno luce, meno riscaldamento, minor velocità e così via. Se poi l'apparecchiatura che si usa è più efficiente, si avrà un risparmio ancora maggiore: è il *fare meno* (sufficienza) *con meno* (efficienza). Ovviamente, questi concetti possono essere applicati all'uso di qualsiasi risorsa, perché tutte le risorse della Terra sono, più o meno, limitate.

Quindi, occorre attuare una terza transizione per raggiungere la sostenibilità ecologica e sociale, quella dal consumismo alla sufficienza, o, meglio, alla *sobrietà* che è una virtù quasi dimenticata, è la qualità essenziale di ogni tipo di relazione: con le risorse, con i rifiuti, con gli altri e con se stessi. Senza adottare stili di vita ispirati alla sobrietà precipiteremo nel collasso ecologico e sociale perché, come dice anche Papa Francesco [12]: *Le previsioni catastrofiche ormai non si possono più guardare con disprezzo e ironia. Potremmo lasciare alle prossime generazioni troppe macerie, deserti, sporcizia.*

## 7. Conclusioni

Siamo in un periodo difficile della storia. Dopo aver goduto per più di un secolo dell'energia dei combustibili fossili, abbondante e a basso prezzo, abbiamo capito che il suo uso causa la degradazione del pianeta e che, quindi, dobbiamo smettere di utilizzarla. Dopo esserci tanto esaltati per il *progresso*, ci stiamo accorgendo che l'attuale modello di sviluppo basato sul consumismo è insostenibile per il nostro pianeta. Lo è anche dal punto di vista sociale perché promuove la competizione, induce a non curarsi degli altri, a perdere l'idea di bene comune e ad allargare sempre più la forbice della disuguaglianza dalla quale derivano disagio, malessere, migrazioni, rivoluzioni e guerre.

La situazione in cui ci troviamo è ben espressa da una frase di un grande filosofo, Hans Jonas [14]: *È lo smisurato potere che ci siamo dati, su noi stessi e sull'ambiente, sono le immani dimensioni causali di questo potere ad impedirci di sapere che cosa stiamo facendo e di scegliere in quale direzione vogliamo inoltrarci.* È una frase che riassume il passato, stabilisce il compito che ci assegna il presente e ricorda che siamo gli artefici del nostro futuro.

Purtroppo, non sembra che molti siano consapevoli della sfida che abbiamo di fronte. La prima cosa da fare, quindi, è informare ed educare le persone per costruire una solida base culturale, o meglio per attuare una coraggiosa rivoluzione culturale, per usare le parole di Papa Francesco.

Non possiamo continuare a costruire muri e confini, perché dobbiamo vivere tutti assieme sull'astronave Terra dalla quale nessuno se ne può andare. Non possiamo abbandonare i comandi, uscire dalla cabina di pilotaggio e lasciare il nostro pianeta al suo destino. Dobbiamo custodirlo, perché deve servire anche alle prossime generazioni. Bisogna porre fine a comportamenti irresponsabili per quanto riguarda il consumo di risorse e la produzione di rifiuti; dobbiamo adoperarci affinché vengano realizzate idee e attuate strategie politiche capaci di proiettarci verso un mondo sostenibile.

Non si tratta di un impossibile ritorno al passato, né di rinnegare scoperte e invenzioni; si tratta, anzi, di ampliare le nostre conoscenze e di utilizzare nel modo migliore le grandi capacità che ci vengono fornite dalla scienza e dalla tecnologia. Bisogna farlo rispettando i limiti planetari di cui oggi abbiamo piena consapevolezza, imparando a riciclare le risorse della Terra e a usare sempre di più e sempre meglio l'energia solare, la risorsa fondamentale che abbiamo *riscoverto* negli ultimi anni.

Se sfrutteremo con cura i beni comuni, cioè le limitate risorse del nostro pianeta e l'abbondante e inesauribile flusso di energia che ci viene dal Sole, se svilupperemo con intelligenza le conoscenze scientifiche e le innovazioni tecnologiche e, soprattutto, se riusciremo a far emergere le nostre preziosissime fonti di energia spirituale – saggezza, creatività, responsabilità, collaborazione, amicizia, sobrietà e solidarietà – riusciremo a raggiungere gli obiettivi di sostenibilità ambientale, economica e sociale.

C'è tanto da fare per migliorare questo mondo. Molte decisioni devono essere prese a livello politico, ma ciascuno di noi è tenuto a fare la sua parte. Come ha detto William James, filosofo della seconda metà del 1800, [6]: *Agisci sempre come se le tue azioni facessero la differenza. La fanno.*

## RIFERIMENTI

- [1] ABBOTTO Alessandro, *Idrogeno. Tutti i colori dell'energia*, Edizioni Dedalo, 2021.
- [2] ARENDT Hannah, *The Origins of Totalitarianism*, Schocken Books, 1951.
- [3] ARMAROLI Nicola, Vincenzo BALZANI, *Energy for a Sustainable World – From the Oil Age to a Sun-Powered Future*, Wiley-VCH, 2011.
- [4] ARMAROLI Nicola, Vincenzo BALZANI, *Energia per l'astronave Terra*, Terza Edizione, Zanichelli, 2017.
- [5] ARMAROLI Nicola, *Emergenza energia. Non abbiamo più tempo*, Edizioni Dedalo, 2020.

- 
- [6] BALZANI Vincenzo, Margherita VENTURI, *Energia, risorse, ambiente*, Zanichelli, 2014.
- [7] BALZANI Vincenzo, *Salvare il pianeta per salvare noi stessi*, Lu::ce edizioni, 2020.
- [8] BARDI Ugo, *Extracted: How the Quest for Mineral Wealth is Plundering the Planet*, Chelsea Green, White River Junction, Vermont (USA), 2014.
- [9] BUTERA Federico M., *Affrontare la complessità*, Edizioni Ambiente, 2021.
- [10] CRUTZEN Paul, *Nature*, 2002, 415, 23.
- [11] FEYNMAN Richard P., volume I, lecture 4, «Conservation of Energy»; section 4-1, «What is energy?»; p. 4-2 *The Feynman Lectures on Physics*, 1964.
- [12] FRANCESCO, *Laudato si'*, Lettera enciclica sulla cura della casa comune, Paoline Editoriale Libri, 2015.
- [13] JACOBSON Mark Z., *100% Clean, Renewable, Energy and Storage for Everything*, Cambridge University Press, 2021.
- [14] JONAS Hans, *Il principio di responsabilità. Un'etica per la civiltà tecnologica*, Einaudi, 2002.