



Consiglio Nazionale delle Ricerche

# TRANSIZIONE ENERGETICA: DOVE SIAMO, DOVE DOBBIAMO ANDARE?

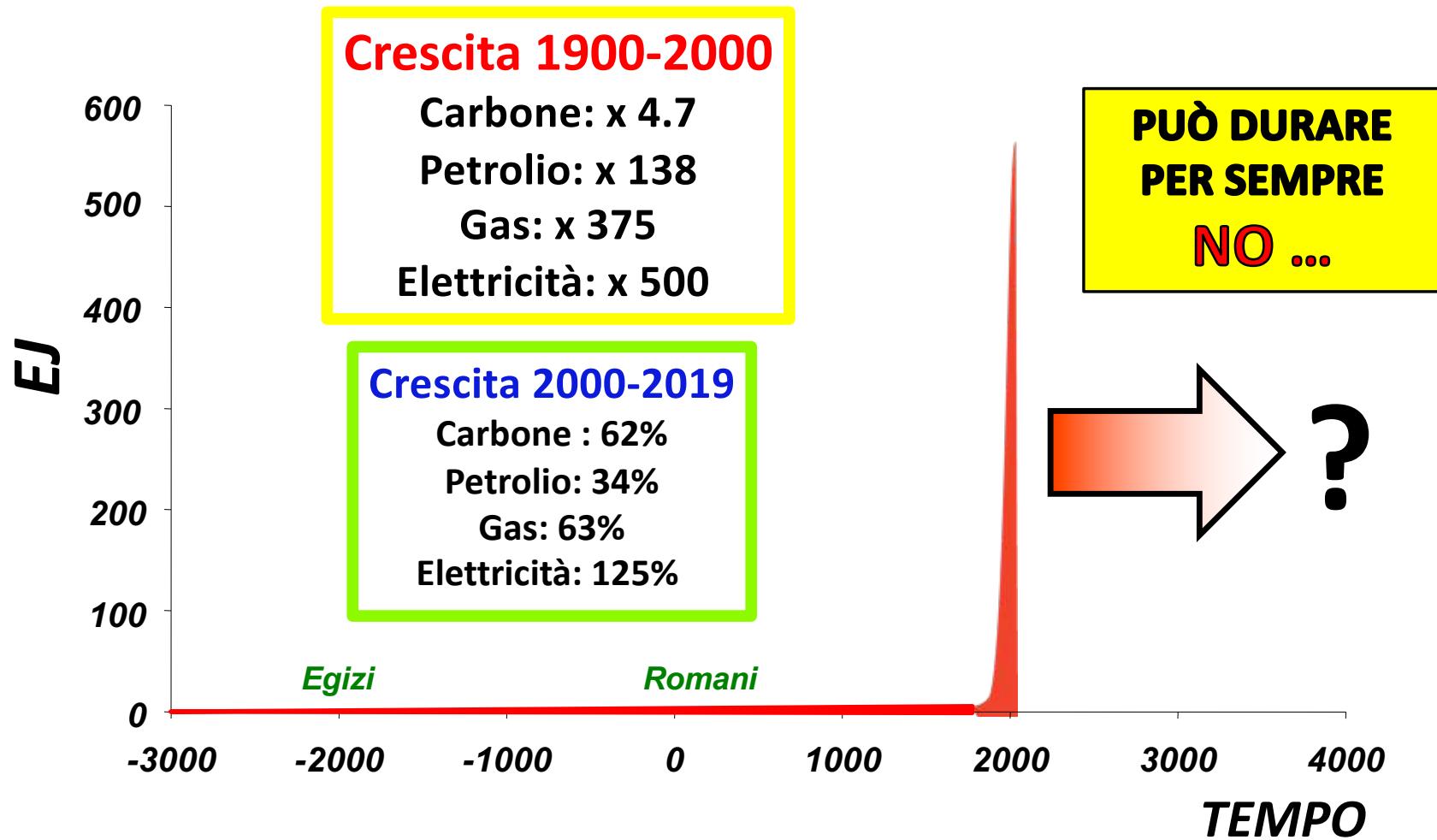
Nicola Armaroli

*nicola.armaroli@cnr.it* — [www.isof.cnr.it/armaroli-nicola](http://www.isof.cnr.it/armaroli-nicola)



*Energie rinnovabili tra fabbisogno, transizione energetica e competitività industriale*  
21 Aprile 2022

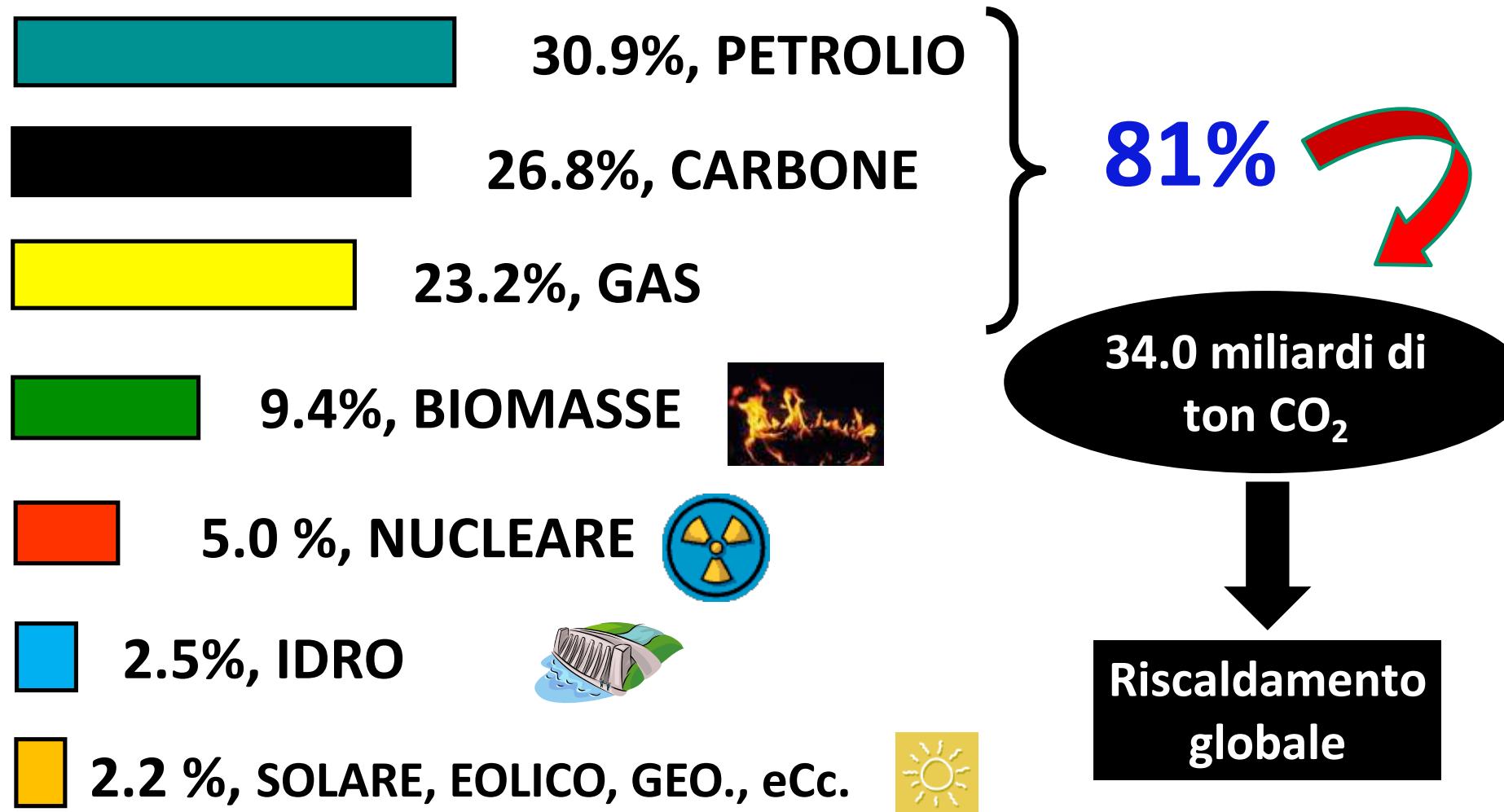
# DOVE SIAMO, PROSPETTIVA STORICA



# **ENERGIA OGGI**

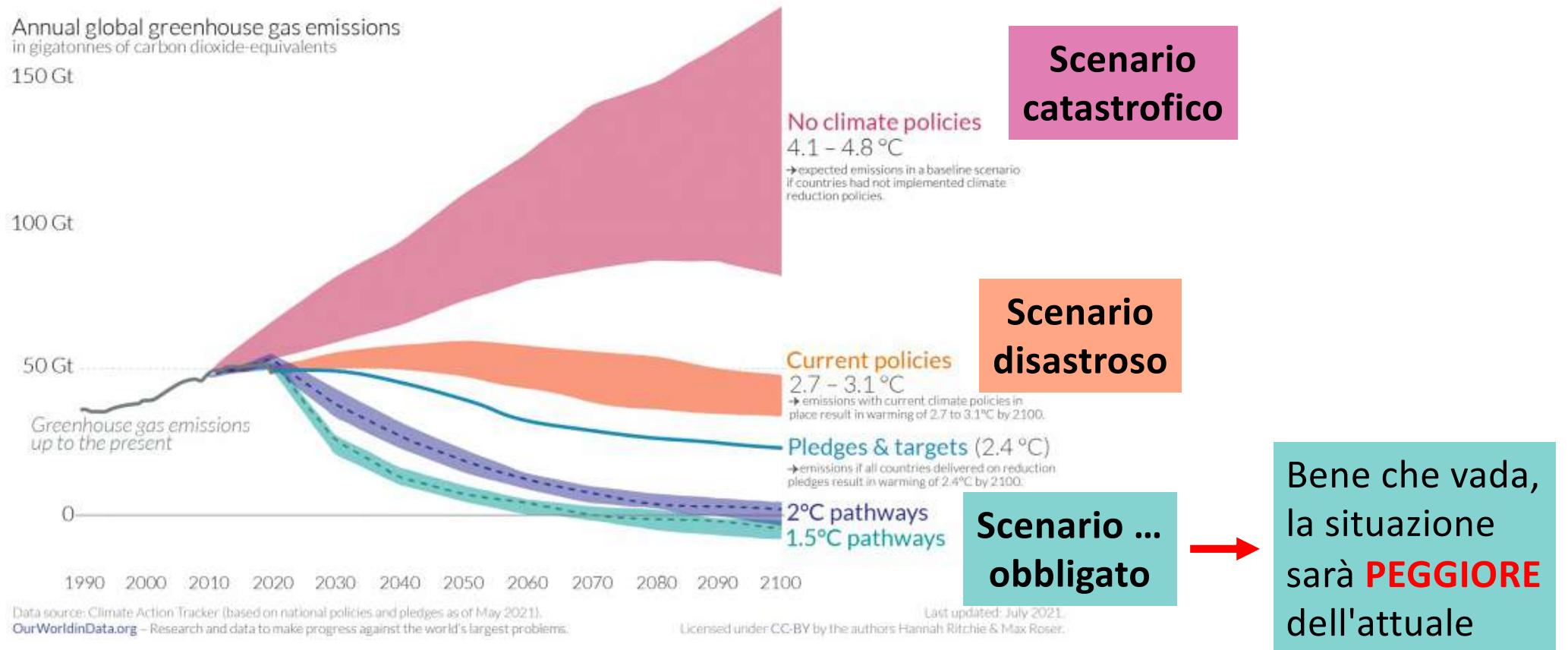
**2022**

# **CONSUMO MONDIALE DI ENERGIA PRIMARIA**



# EMISSIONI SERRA E SCENARI DI RISCALDAMENTO GLOBALE

Oggi: ca. + 1.1 ° C per il riscaldamento antropogenico

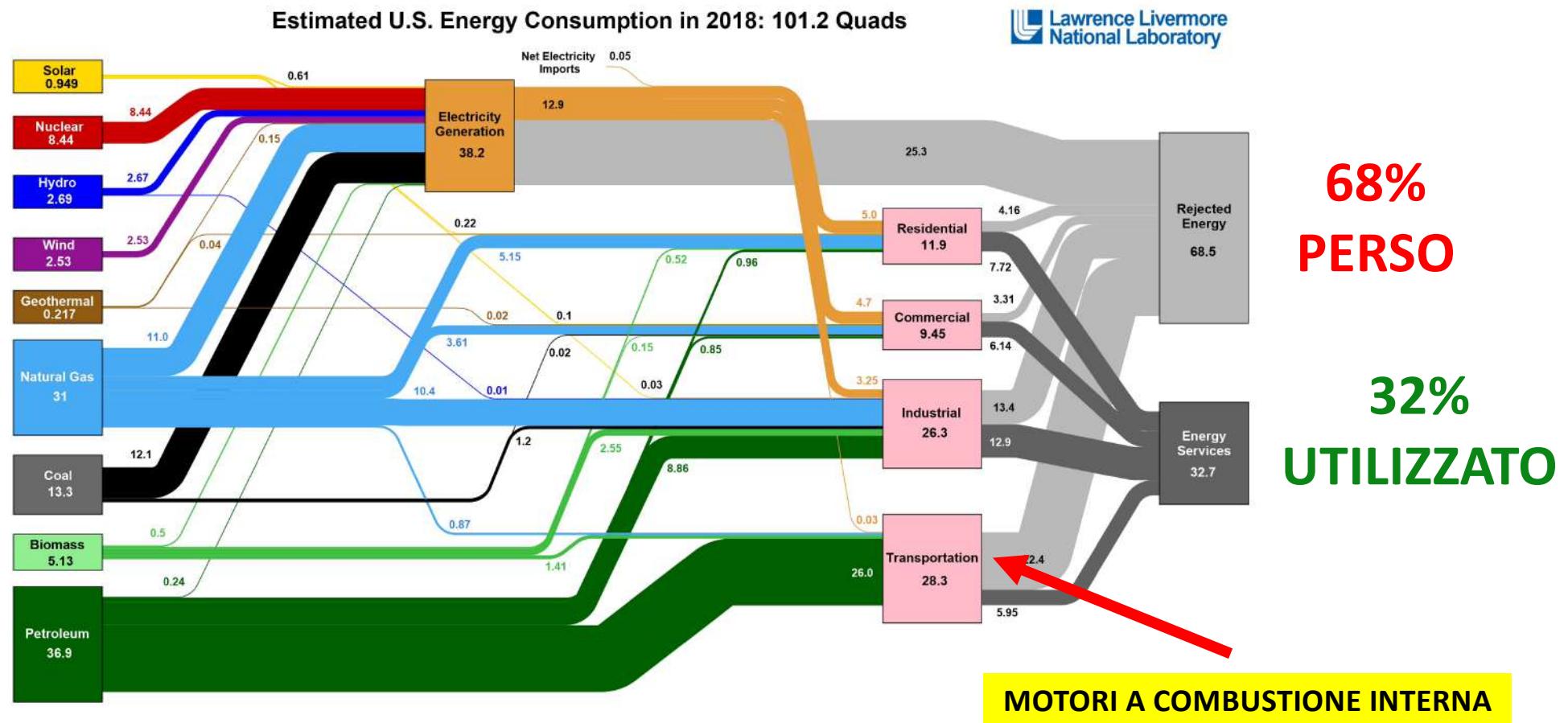


# **UN SISTEMA ENERGETICO INEFFICIENTE**



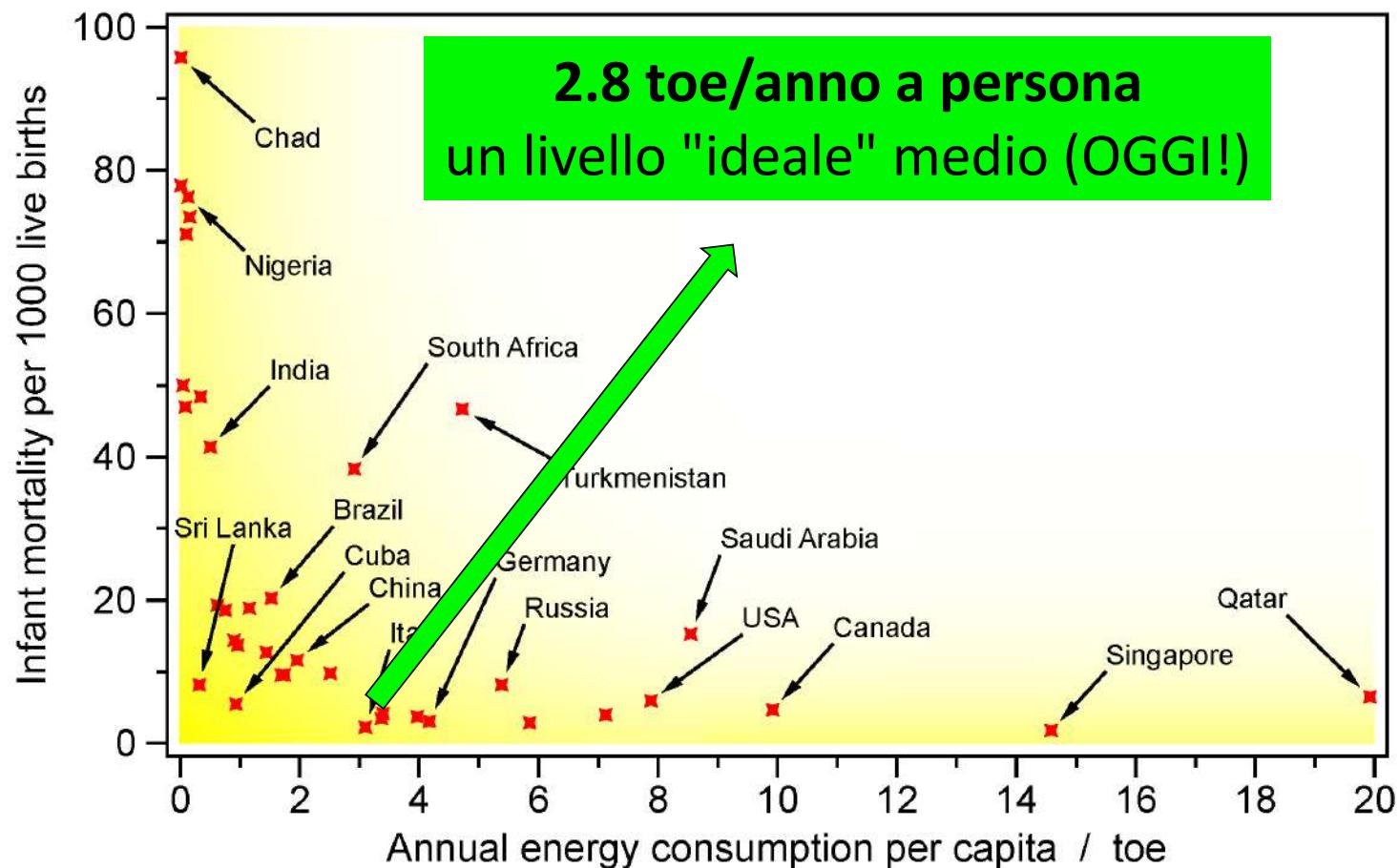
# IL SISTEMA ENERGETICO ATTUALE (CASO USA)

F  
O  
N  
T  
I



# L'INEFFICIENZA SI PUÒ STIMARE

**CONSUMO DI  
ENERGIA PRIMARIA E  
QUALITÀ DELLA VITA:  
MORTALITÀ  
INFANTILE**

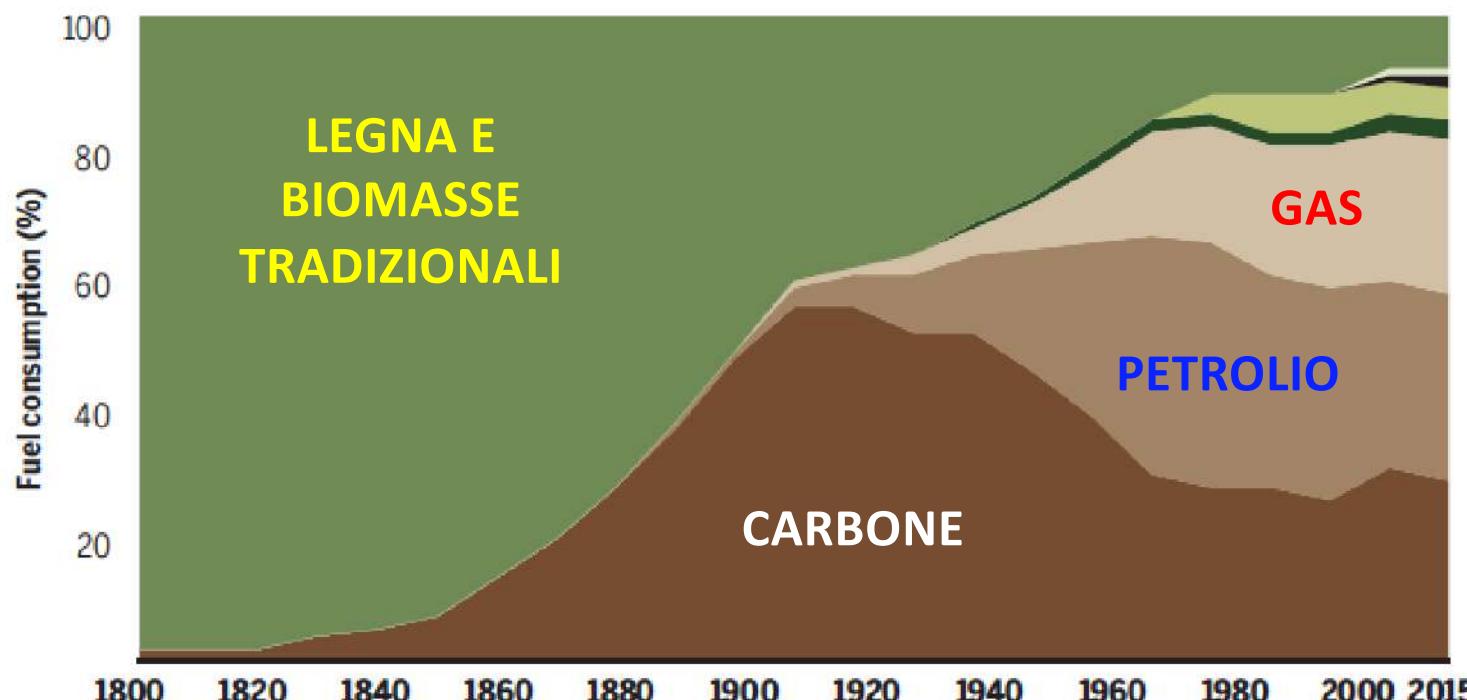


# LA TRANSIZIONE ENERGETICA



# SIAMO IN TRANSIZIONE ENERGETICA DA OLTRE DUE SECOLI ...

Wind and solar electricity   Hydroelectricity   Traditional biofuels   Nuclear electricity   Modern biofuels  
Coal   Crude oil   Natural gas



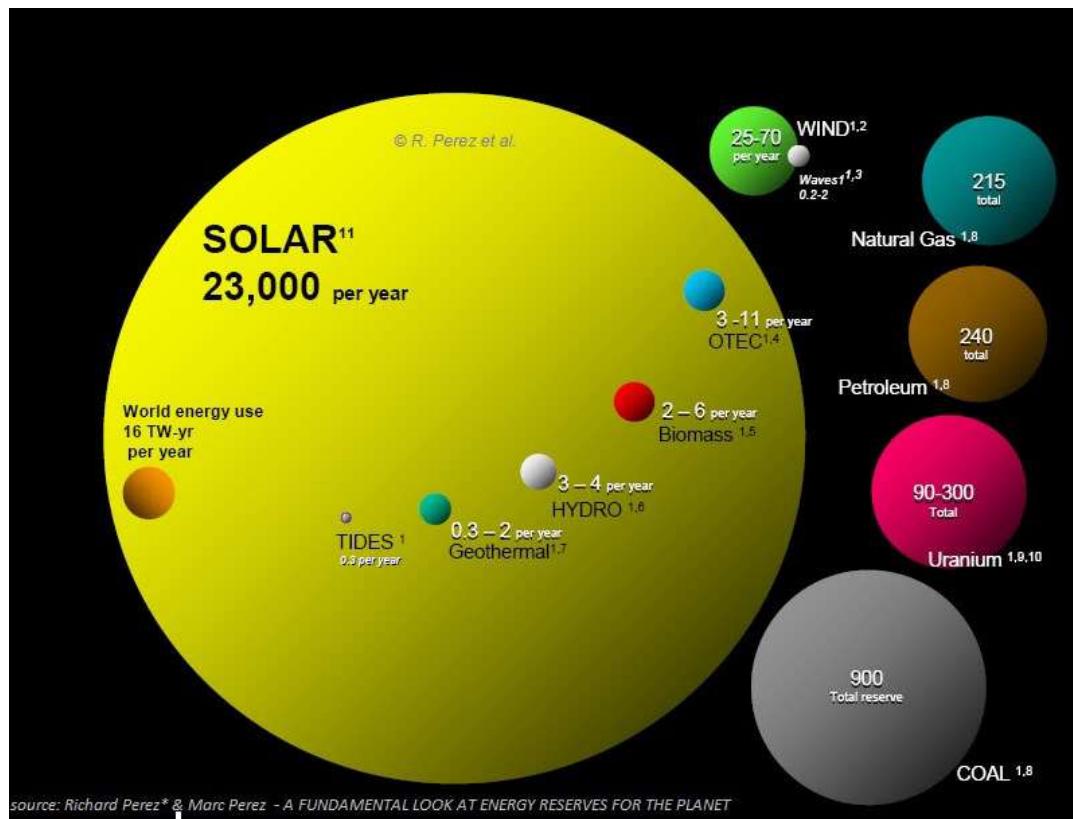
*Nihil sub sole novum*  
Qoelet, 1,9

**Abbiamo 30 anni**  
per la transizione  
non 100 ...

**Siamo 8 miliardi**  
di abitanti  
non 2 miliardi ...

Science 2018, 359, 1320

# BUONA NOTIZIA: LA TERRA È INONDATA E STIPATA DI FLUSSI E STOCK ENERGETICI

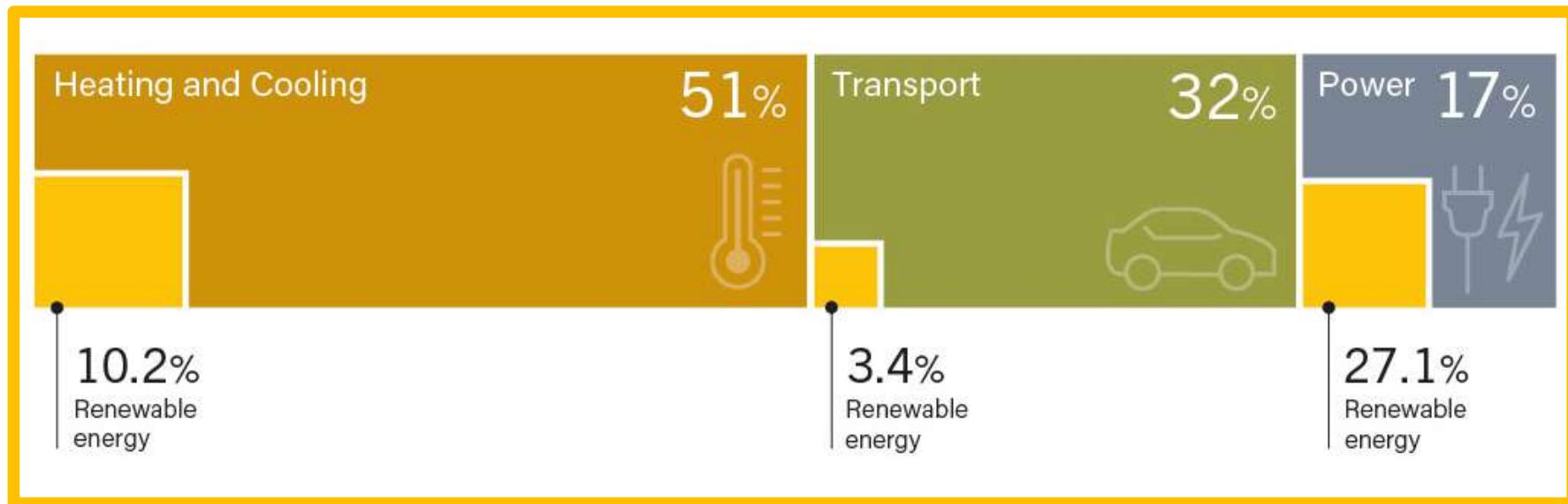


La maggior parte sono di origine solare  
diretta e indiretta

**ATTENZIONE**  
Questo messaggio  
**NON** passa

# CATTIVA NOTIZIA: SIAMO MOLTO INDIETRO

I tre settori negli usi finali

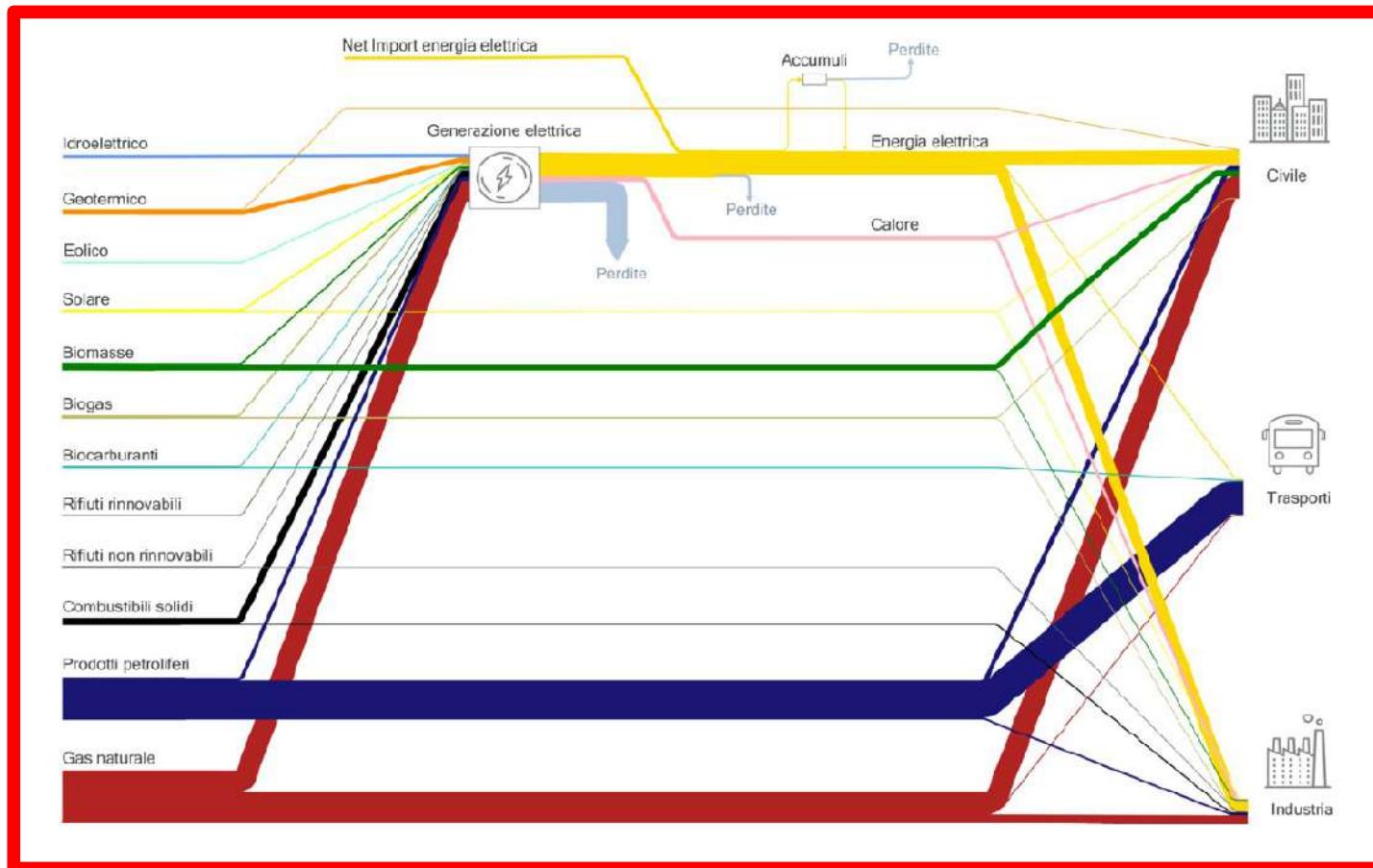


REN 21, Global Status Report, 2021

# E L'ITALIA DOV'È?

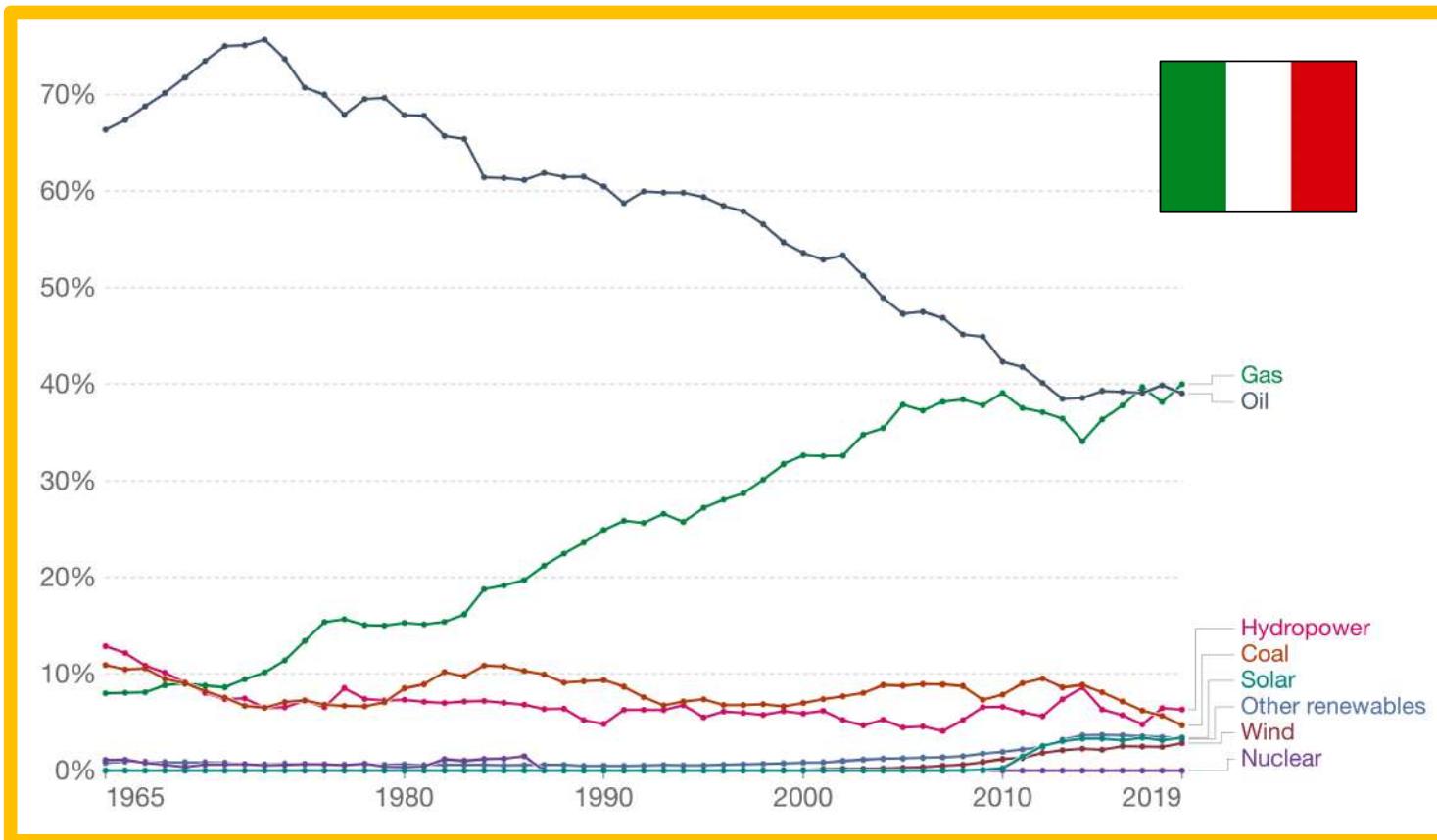


# DOVE SIAMO: BILANCIO ENERGETICO ITALIA



Governo italiano, 2021

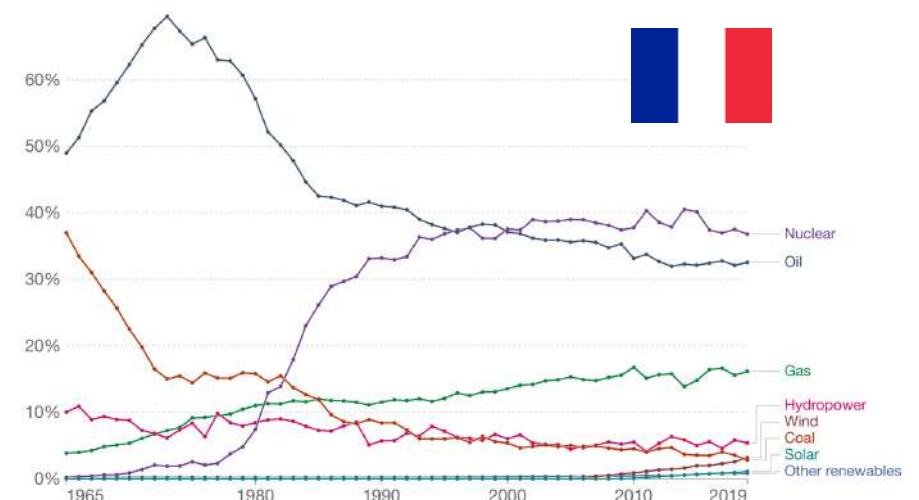
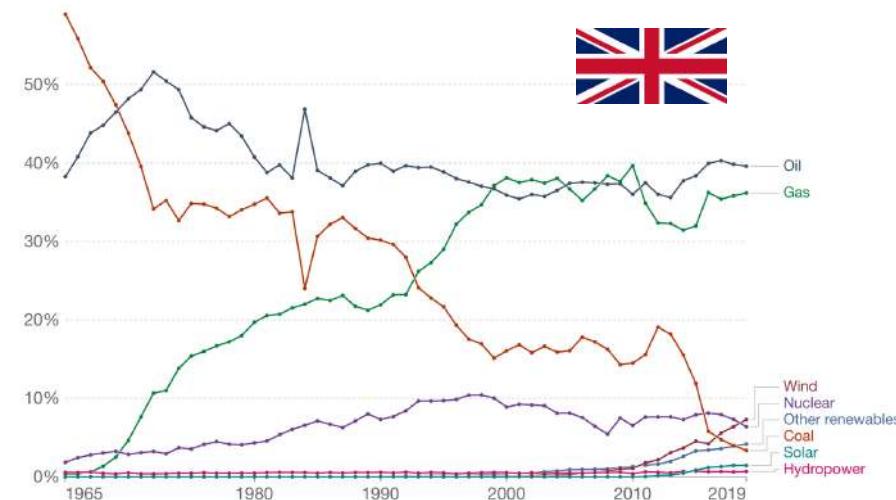
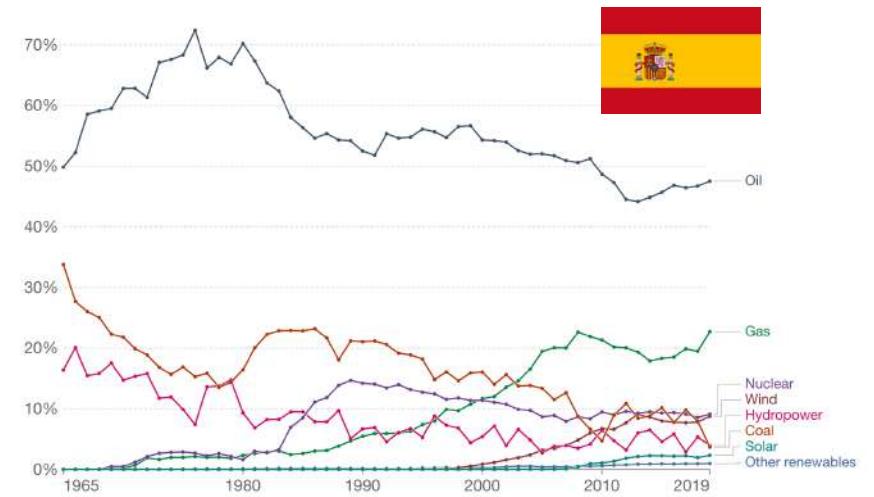
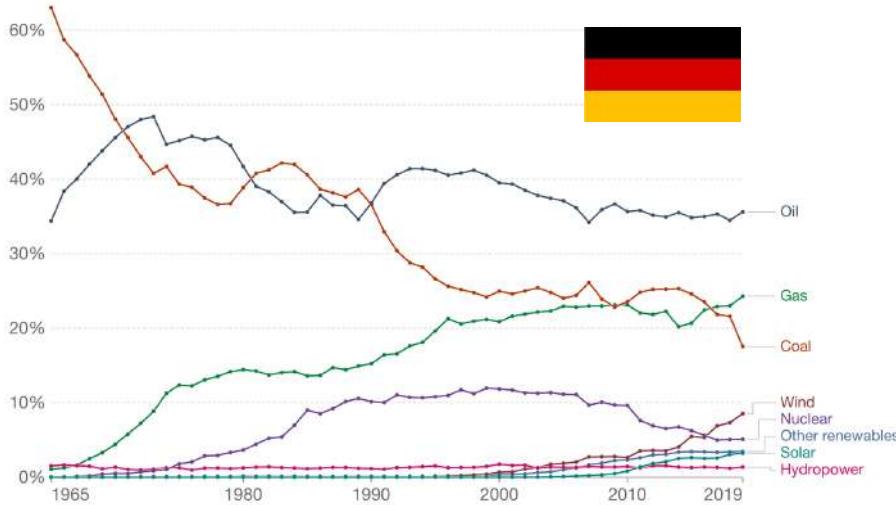
# CONSUMO DI ENERGIA PRIMARIA, PER FONTE



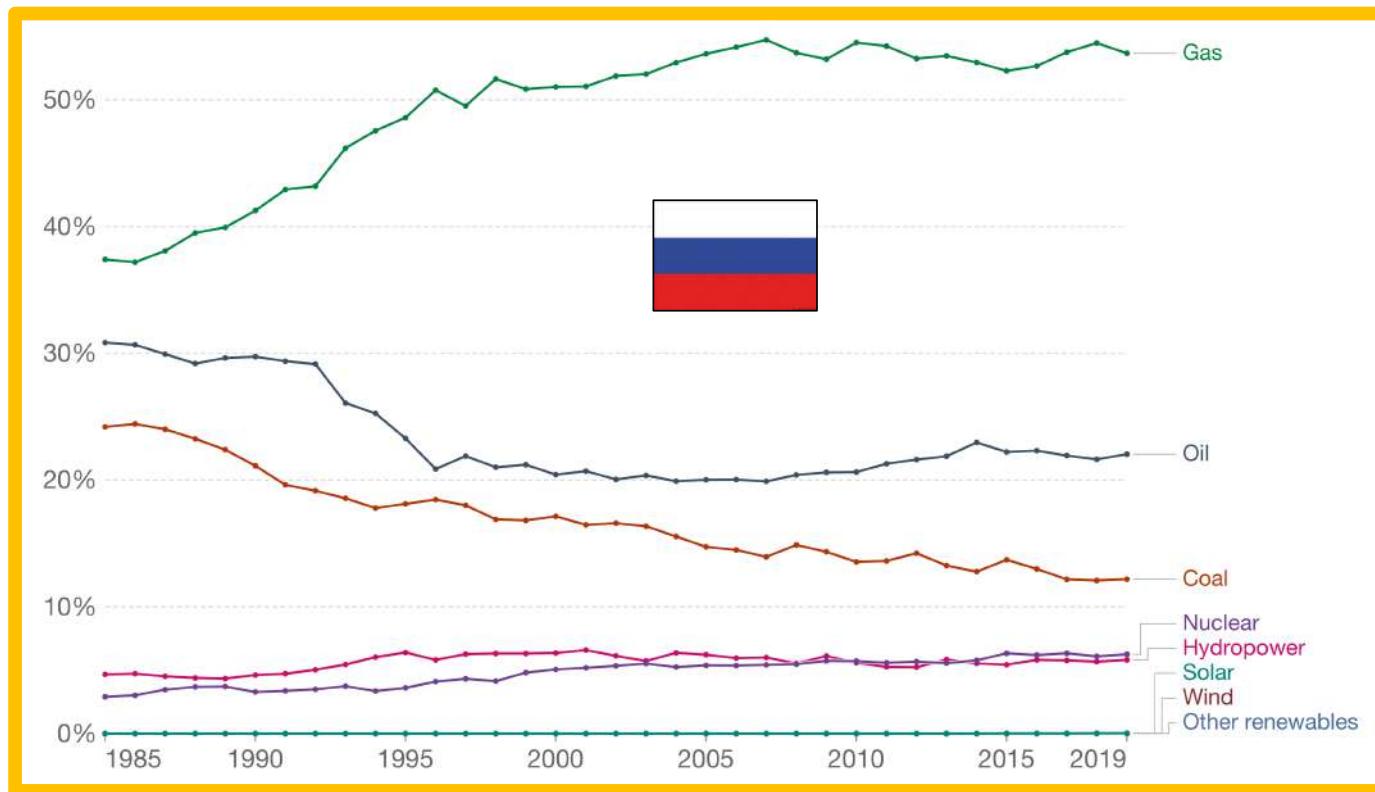
GAS: 40%  
Media EU: 25%

ourworldindata.org 2022

# CONFRONTO CON ALTRI PAESI EUROPEI



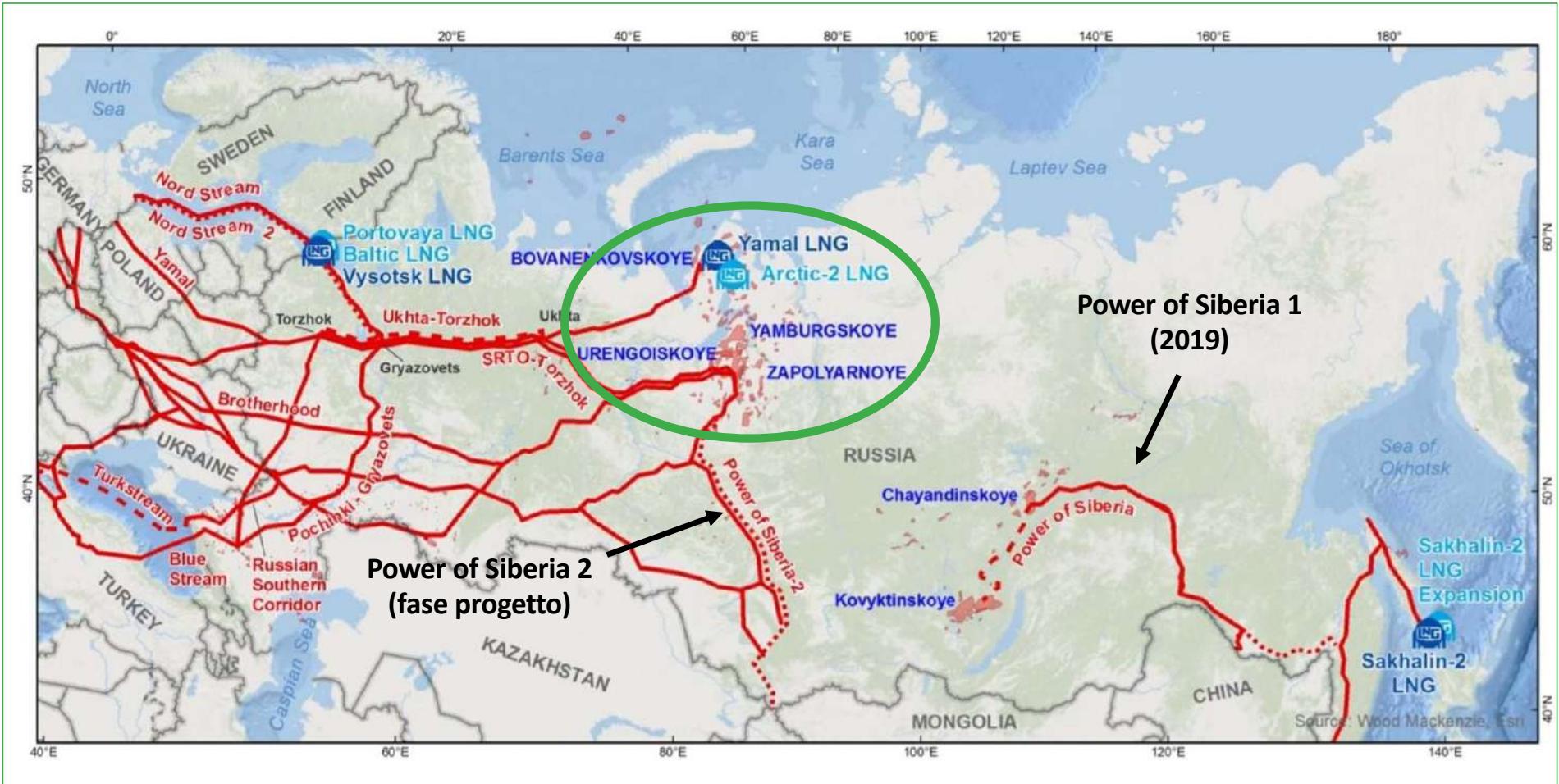
# SOLO LA RUSSIA CI BATTE ...



RISERVE STIMATE  
38 triliuni di m<sup>3</sup>  
(58 anni alla prod. attuale)

ourworldindata.org 2022

# CINA: UN CLIENTE ALTERNATIVO?



Nicola Armaroli, CNR – Federmanager, 21 Aprile 2022

# OILEXIT



# LA TRANSIZIONE DAL PETROLIO

Coincide con la transizione in **un solo** settore: trasporti

**OGGI:** Elettrificazione ovunque possibile  
*Automobili, motocicli, TPL, ferrovie*

**DOMANI:** Idrogeno e combustibili sintetici  
*Treni, navi, aerei*

## REQUISITO COMUNE

enorme aumento produzione elettrica rinnovabile

# TRASPORTO LEGGERO: GAME OVER



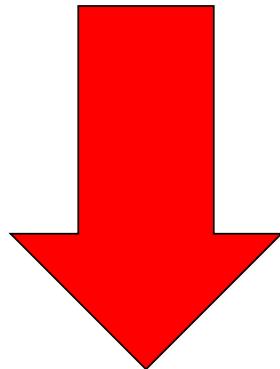
Rete elettrica:  
**OVUNQUE**

Stazione di ricarica:  
**A CASA PROPRIA**

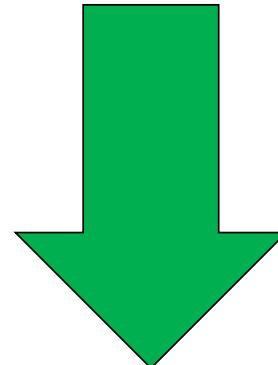
Costo per l'utente:  
**IMBATTIBILE**

# AUTO: STIMA ITALIA 2030/35

35% di battery e (BEV) e plug-in hydrid (PHEV)



+ 30 TWh  
elettricità



- 140 TWh  
petrolio



# I DILEMMI DEL TRASPORTO PESANTE



Nicola Armaroli, CNR – Federmanager, 21 Aprile 2022

# TRASPORTO MERCI VIA MARE: DUE CONTI



NAVE CARGO da 220,000 tonnellate  
Viaggio Cina-Europa: 30/40 giorni

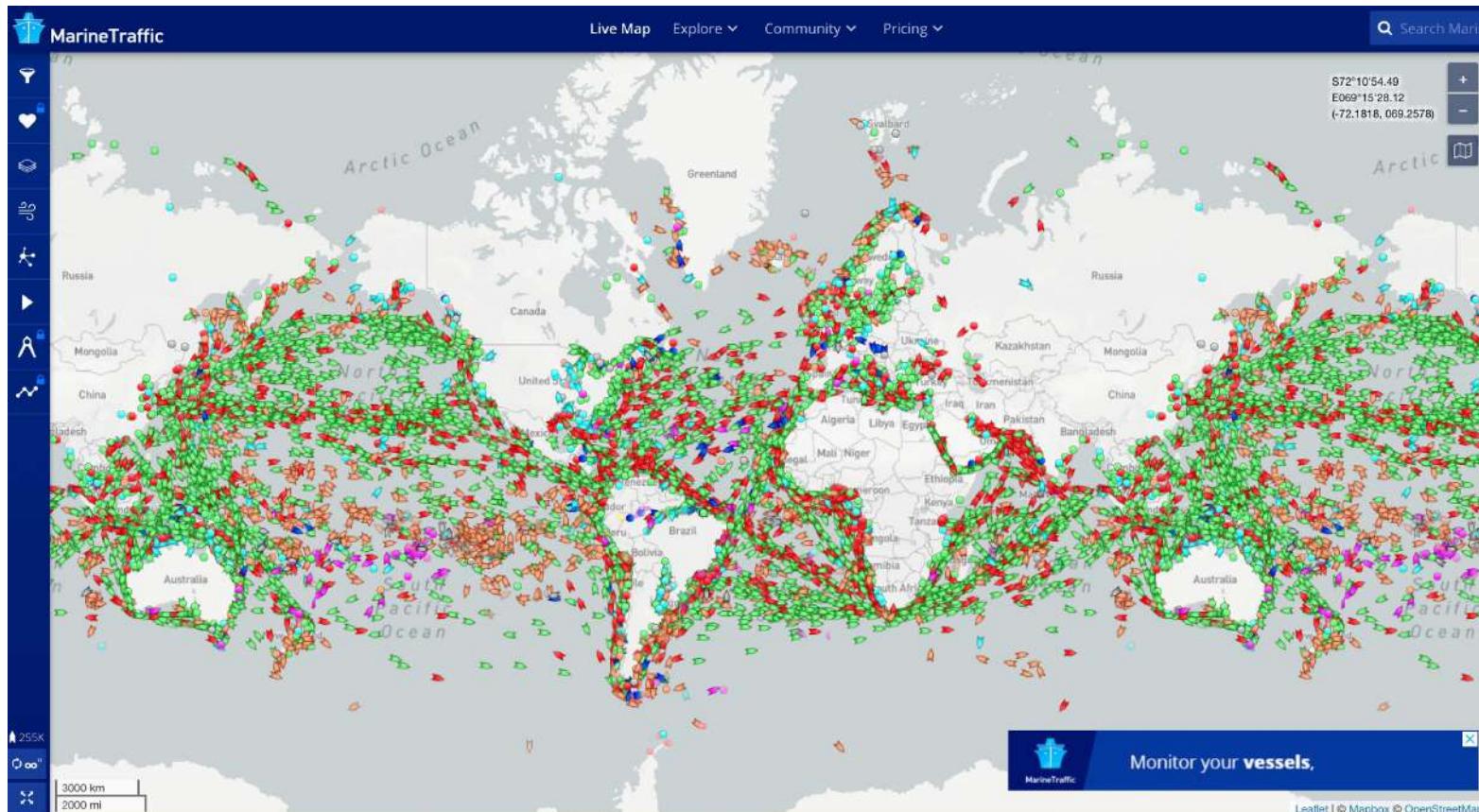


1 viaggio  
9000 ton di gasolio pesante  
 ca. 3000 ton H<sub>2</sub> (LIQUIDO!)  
 H<sub>2</sub> Verde  
150 GWh elettricità

Più grande elettrolizzatore al mondo (**10 MW**) alimentato  
da un impianto fotovoltaico (**20 MW, 18 ettari**)

Un impianto così  
deve lavorare 3 ANNI per  
produrre H<sub>2</sub> PER UN PIENO  
di un megacargo

# TRAFFICO NAVALE GLOBALE: ABBIAMO UN PROBLEMA



[www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com)

Nicola Armaroli, CNR – Federmanager, 21 Aprile 2022



NAVI CONTAINER A IDROGENO  
**OPPURE**  
RIPENSARE LA  
(DE)LOCALIZZAZIONE DELLA  
PRODUZIONE INDUSTRIALE?

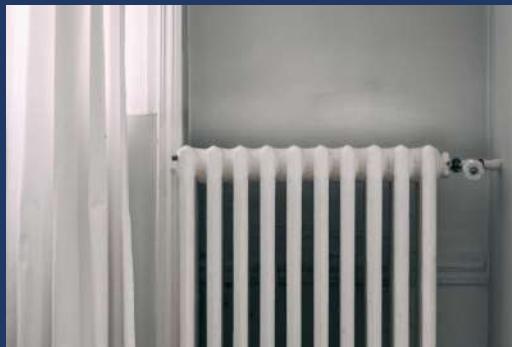


Nicola Armaroli, CNR – Federmanager, 21 Aprile 2022

The graphic features a teal background with diagonal white and light blue stripes. In the top right corner, the Mims logo is displayed with the text "Mims Ministero delle infrastrutture e della mobilità sostenibili". Below the logo, the event details are listed: "Presentazione online del I Rapporto STEMI Decarbonizzare i trasporti Evidenze scientifiche e proposte di policy 22 aprile • ore 10.30". A small button at the bottom right says "Clicca qui per seguire l'evento". The main text block asks, "Come saranno i trasporti del futuro? Quali saranno le soluzioni tecnologiche più promettenti per ridurre le emissioni climaalteranti, più innovative e convenienti per le diverse modalità di trasporto? In che modo il nostro Paese riuscirà a ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> del 55% entro il 2030 in linea con gli obiettivi europei?". It also mentions that the report "elaborato dalla Struttura per la Transizione Ecologica della Mobilità e delle Infrastrutture (STEMI), gruppo di esperti istituito dal Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili". The program section lists several sessions with speakers and topics, such as "Introduzione" by Enrico Giovannini, "Il contesto: l'impatto dei trasporti sulla crisi ambientale e gli obiettivi climatici al 2030 e al 2050" by Andrea Tilche, and "La mobilità urbana del futuro" by Nicola Armaroli.

# GASEXIT

**PIÙ DIFFICILE: i settori coinvolti sono ALMENO TRE**



**Residenziale**



**Industria**



**Prod. elettrica**

# IN ITALIA ABBIAMO UN PROBLEMA IN PIÙ



Non emette solo vapor d'acqua nella combustione, ma anche  $\text{NO}_x$  (quindi ozono) e PM ultrafini

È un gas serra decine di volte più potente della  $\text{CO}_2$ , e si perde in atmosfera ...

# **PROVENIENZA E UTILIZZI DEL GAS**



**CONSUMO TOTALE 2021, 76 Gm<sup>3</sup> (fonte: MISE)**

Russia: 29

## Algeria e Libia: 25

Azerbaijan: 7

**Italia: 3**

**GNL: 10**

# Export: 1.5

## UTILIZZI PER SETTORE IN Gm<sup>3</sup> (fonte: ARERA)

## Elettricità : 30

## Residenziale: 20

## Industriale: 10

## Commerciale: 3

Altri: 2

# **TRANSIZIONE GAS, ITALIA**

## **AZIONI IMMEDIATE**

- Risparmio e comportamento individuale, -7/8 Gm<sup>3</sup>

## **MEDIO TERMINE (2-4 anni)**

- 60 GW di rinnovabili autorizzate (con adeguam. rete), - 15 Gm<sup>3</sup>
  - Piano straordinario solare termico e PdC, -5 Gm<sup>3</sup>
    - Piano straordinario Biometano, 3 Gm<sup>3</sup>

## **LUNGO TERMINE (10-20 ANNI)**

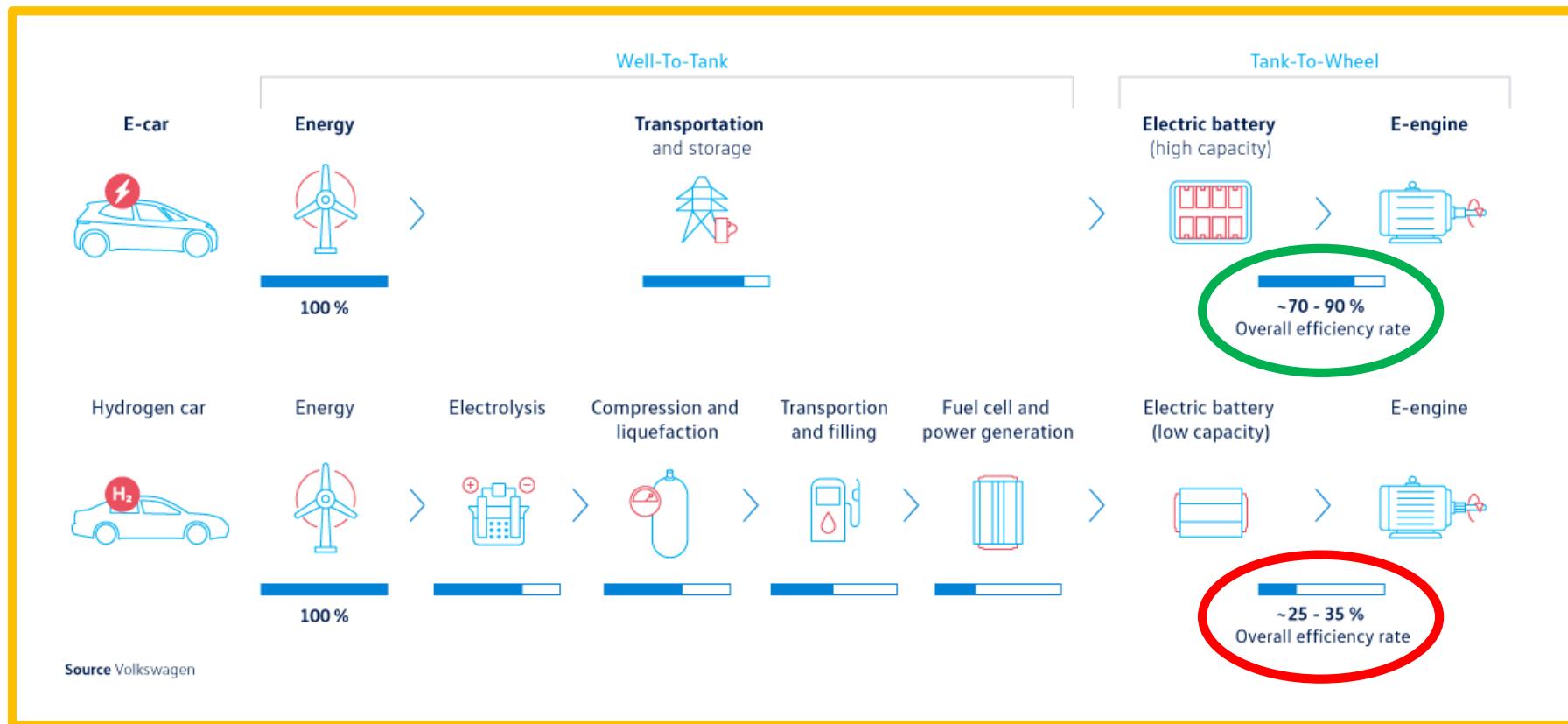
- Decarbonizzazione completa riscaldamento
- Decarbonizzazione completa sistema elettrico
  - Idrogeno

# E L'IDROGENO? PREGI E DIFETTI

H<sub>2</sub>

- Opzione importante per accumulare eccessi di prod. el. rinnovabile (**accumulo stagionale!**)
- Questo sarà possibile in modo massiccio solo **dopo il 2030/35**
- Più facilmente **infiammabile** ed **esplosivo** del metano
- Da maneggiare a **350/700 bar** o – **252 C** (costo energetico)
- Comprimere H<sub>2</sub> costa **3 volte più energia** che comprimere CH<sub>4</sub>
- Richiede **rete dedicata di trasporto** (tubi, valvole, compressori, ...)
- Mescolare H<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> significa «**diluire**» **il metano** (poco sensato)
- E' **improbabile** che esisteranno **reti estese di trasporto** (costi ...)

# AUTO A IDROGENO vs. AUTO A BATTERIA



CREDIT: Volkswagen

# E IL NUCLEARE, IN ITALIA?

5



## Le chiacchiere sul nucleare

Nicola Armaroli

Da anni ho deciso di non partecipare più a dibattiti sul nucleare, che diventano immancabilmente una sterile contrapposizione fra filoserie. Potrei scrivere dieci editoriali sui motivi economici, tecnici ed etici per cui il nucleare è finito su un binario morto. Ma lasciamo perdere gli argomenti pro e contro, e andiamo al punto: perché il dibattito sul nucleare in Italia è totalmente inutile?

Un reattore nucleare non si accende e spegne come un phon. Per questo motivo si presta a coprire il canico di base (*baseline*) di un sistema elettrico, cioè la domanda di potenza sotto la quale non si scende mai. Il *baseline* italiano è circa 25 GW, quindi occorrerebbe installare almeno 20 GW di centrali a fissione. Acccontentiamoci della metà: 10 GW, cioè dieci centrali nucleari standard da 1 GW. Occorrebbe localizzare dieci siti idonei, in un Paese a elevato rischio sismico e in dissesto idrogeologico, dove da anni non si riesce a localizzare un solo sito per lo stoccaggio dei rifiuti nucleari. Ammettiamo pure di individuare questi dieci siti in un trippudio popolare, in rigorosa ottemperanza a un punto cardine della transizione ecologica in corso: la sostenibilità sociale. A questo punto dovremmo trovare aziende disposte a investire almeno 100 miliardi di euro (una centrale da un 1 GW costa almeno 10 miliardi). Non so voi, ma io già mi vedo la fila dei volonterosi con 100 miliardi da investire sul nucleare in Italia.

Passiamo oltre: quanto tempo occorrebbero? In uno slancio di ottimismo supponiamo di metterci dieci anni. Nonostante si tratti di ipotesi totalmente irrealistica, sarebbe comunque troppo, perché fra dieci anni dovremo già aver decarbonizzato, anno dopo anno, il sistema elettrico, secondo gli obiettivi UE. In conclusione, persino nelle ipotesi più minimali e irrealistiche (10 GW, 100 miliardi, 10 anni) parlare di nucleare equivale a parlare di nulla. Figuriamoci in quelle realistiche.

Se allarghiamo lo sguardo al mondo intero, la situazione non migliora. Afinché il nucleare possa giocare un ruolo rilevante nella produzione elettrica mondiale, bisognerebbe costruire almeno 3000 centrali da 1000 MW, cioè due alla settimana da qui al 2050, cominciando domattina. Negli anni d'oro (1960-1980) si è arrivati al massimo a costruire occasionalmente trenta all'anno. E comunque, a questi potetici ritmi, non avremmo uranio a sufficienza. Ovvvero lo avremmo solo nella mente di chi vagheggia da decenni l'estrazione di uranio dall'acqua di mare, ma temo non abbia mai fatto due conti sulle ciclopiche量ita di acqua che si dovrebbero processare.

So che a questo punto sorge l'obiezione: non si faranno centrali da 1 GW, ma piccole centrali da 0,3 GW di nuova generazione e ultrasicure! Di nuovo, stiamo parlando del nulla. Innanzitutto queste centrali "piccole" sono utilizzate da decenni nel settore militare e non hanno niente di nuovo. L'uso di design e combustibili alternativi per la produzione elettrica civile è ancora un tema da "libro dei sogni" tecnico e autorizzatorio, cioè l'ennesimo argomento impalpabile.

In conclusione, il nucleare può essere un divertente argomento di discussione tra amici, nei forum o al bar. Ma è e resterà sempre un argomento totalmente irrilevante per le prospettive concrete di transizione energetica da qui al 2050. È per questo che ho deciso, da anni, di lasciar perdere.

Davvero non mi capacito del fatto che si debbano inseguire idee irrealizzabili quando le soluzioni per decarbonizzare il sistema elettrico non solo esistono già, ma sono veloci da installare, sicure, affidabili ed economicamente imbattibili.

Se stessi abbontan a Sapere, è inutile che vi ripeta di cosa si tratta. Non so che dire: convincete altri a farlo. Anche nei Ministeri.

Intanto, datevi questo numero speciale sull'astrofisica curato da Patrizia Caraveo, magari pensando che le stelle sono un bellissimo esempio di fusione termonucleare, anche se per noi inarrivabile.

Sapere, ottobre 2021

EDITORIALE

- Dove sono i **siti** (nel 2022, non nel 1960)?
- Dove sono gli **investitori**?
- Dov'è il **tempo** (carbon neutral al 2050!)?
- Maggiore **indipendenza** (fonte e tecnologie)?

*"It was not clear what to do. ...  
There was no protocol in case of war."*

Tecnico centrale di Chernobyl  
*The Washington Post, 19 Marzo 2022*

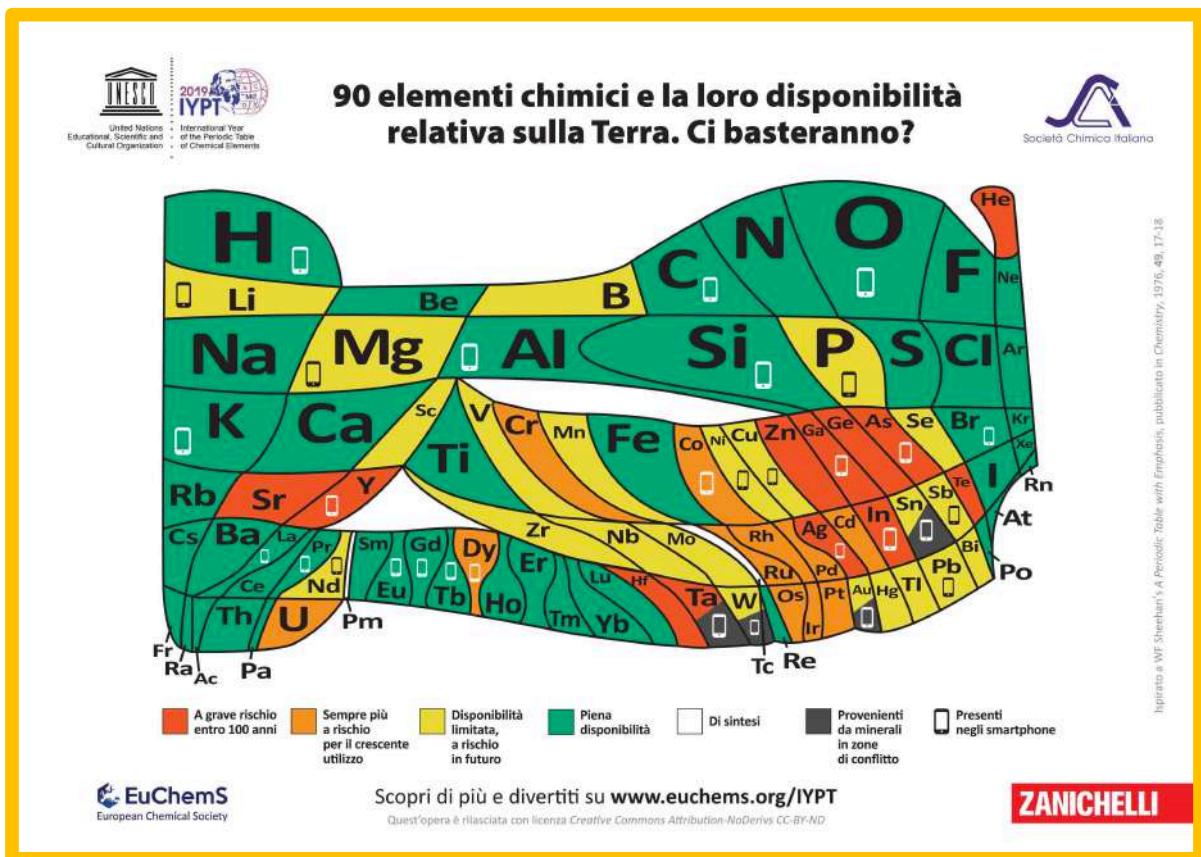
SAPERE, Editoriale, Ottobre , 2021

Nicola Armaroli, CNR – Federmanager, 21 Aprile 2022

# I COLLI DI BOTTIGLIA DELLA TRANSIZIONE ENERGETICA



# 1 - IL COLLODI BOTTIGLIA MATERIALE

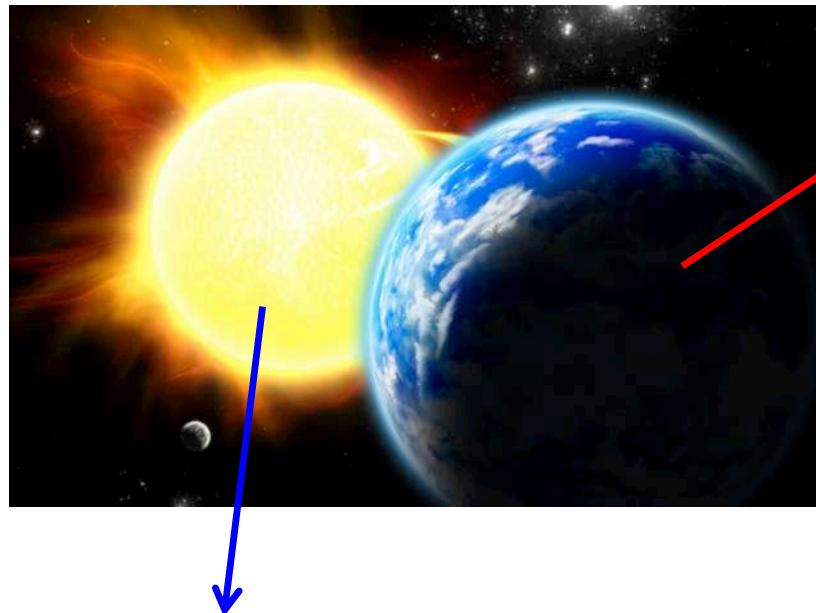


La tavola periodica  
dell'abbondanza relativa  
degli elementi:  
Com'è fatta la Terra e come  
la stiamo usando

 EuChemS  
European Chemical Society

[www.euchems.eu](http://www.euchems.eu)

# LE RINNOVABILI RICHIEDONO RISORSE MINERALI

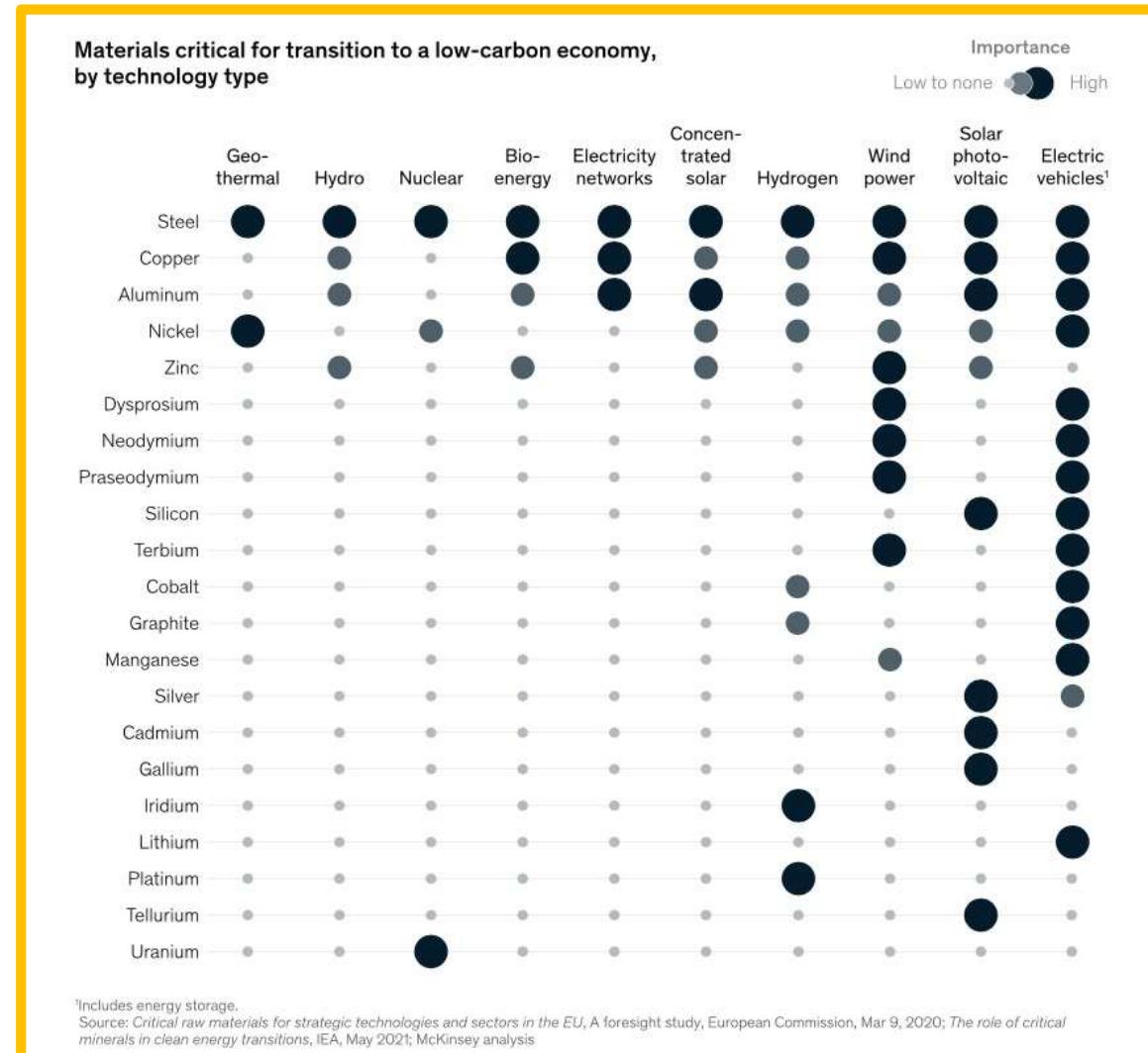


LUCE: un input extraterrestre sovrabbondante

Per fare **convertitori** e **accumulatori** di flussi rinnovabili servono risorse minerali (terrestri)



# MATERIALI CRITICI PER LA TRANSIZIONE ENERGETICA



# IL SISTEMA FOSSILE HA UNA MAGGIORE INTENSITÀ MATERIALE

- Per fare 1 megawatt (MW) di **pannelli fotovoltaici** (FV) al silicio occorrono **200 ton di materiali**. 1 MW di FV produce in 30 anni **40 000 MWh** di elettricità
- Occorrono **14 000 ton di carbone** per produrre la stessa quantità di elettricità, **oltre 70 volte di più**

5



**Transizione: ce la faremo?**  
Nicola Armaroli

Per quasi vent'anni ho raccontato che i combustibili fossili ci stavano portando al disastro e occorreva cambiare rotta. All'inizio l'interesse sull'argomento risultava lo zero; al massimo si invitavano in centri culturali o scuole dove gli organizzatori erano considerati un po' naïf. In alcune occasioni ricordo di aver parlato a non più di cinque o sei persone, facendo sotto sotto un diluvio di domande. Come me, lo ricordo, i colleghi fricchettini stoppati che per anni si sono presi lo scherzo di certi *opinion maker*, quelli che, loro sì, la sapevano lunga. Non posso dimenticare un pesante attacco sul *Corriere della Sera* a Luca Mercalli dopo che mi aveva intervistato in una trasmissione su RAI 3. Era disdicevole che i catastrofisti della domenica avessero un palcoscenico di quel tipo, pagato con soldi pubblici.

Negli ultimi anni, però, l'attenzione è cresciuta, lentamente ma costantemente, e infine è arrivato il 2021, l'anno del Big Bang. Oggi autorevoli leader mondiali ripetono in continuazione: «Non abbiamo più tempo! Benvenuti nel mondo reale, un mondo "ribaltato" in cui i fricchettini di un tempo sono sorti assegni, governi, agenzie internazionali, aziende, fondazioni, ONG, associazioni di categoria, partiti, sindacati, TV, radio, giornali, social, singoli cittadini, tutti li cercano. Le domande sono sempre le stesse. Come uscire dai fossili? Basteranno le rinnovabili? L'auto elettrica è una buona idea? E l'idrogeno? E il nucleare? Bene, su questo abbiamo già detto e scritto tutto, e lo si trova facilmente. La domanda importante, però, quella che pochi fanno, è un'altra: ce la faremo, prima che la catastrofe climatica ci travolga?

La preoccupazione dominante è che non ci siano abbastanza materiali sulla Terra per fare la transizione energetica: litio, nichel, argento, terre rare... Calma, la civiltà rinnovabile consumerà molti meno materiali di quella fossile. Un esempio per fare un megawatt (MW) di pannelli fotovoltaici (FV) al silicio occorrono 200 tonnellate di materiali, e un MW di FV produce in trent'anni 40 000 MWh di elettricità. Occorrono 14 000 tonnellate di carbone per produrre la stessa quantità di elettricità, oltre 70 volte di più. Inoltre i dispositivi rinnovabile è riciclabile, a differenza di quel che accade con i fossili, dispersi in atmosfera come CO<sub>2</sub>. Conclusioni analoghe si ottengono paragonando altre tecnologie fossili e rinnovabili. Il problema che mi tiene sveglio la notte, molto più della disponibilità materiale, è un altro. Quale! L'Italia deve aggiungere 70 GW di rinnovabili elettriche da oggi al 2030. Tutti i Paesi dovrebbero fare storti simili. Supponendo che ogni nazione (ce ne sono 200!) installi mediamente 20 GW di FV (mi tengo basso), entro un decennio occorrono 4000 GW, cioè nel periodo 2020-2030 dobbiamo produrre 6 volte più pannelli che nel 2010-2020. Analoghe stime si possono fare per il litio, la cui produzione dovrebbe aumentare di circa 20 volte. Aumentare vengono insieme in pochi anni la produzione di materiali e dispositivi per la conversione e l'accumulo di rinnovabili è una sfida paesaggia: occorre fare indagini geologiche, ottenere i permessi, estrarre i minerali, raffinarli, costruire enormi stabilimenti per la fabbricazione. Per fare tutto questo occorre una merce che non si compra al mercato: il tempo.

A suonare la sveglia della transizione è stata una catastrofe che sinora ha causato oltre cinque milioni di morti. Purtroppo è andata esattamente come temevamo in quelle serate fra pochi anni: l'umanità si è svegliata solo quando è stata messa alle strette. Peccato aver perso tempo a ghignare sui rompicapi menegrami mentre la catastrofe avanzava. Avete 20-25 anni a disposizione anziché 10 avrebbe fatto un'enorme differenza. Ora sarà durissima, ma non abbiamo scelta. Bisogna provarci, correndo come forsennati. Ce la faremo?

Sapere, dicembre 2021

EDITORIALE

# CI SONO DIFFERENZE SOSTANZIALI, UN ESEMPIO

## AUTO TERMICHE

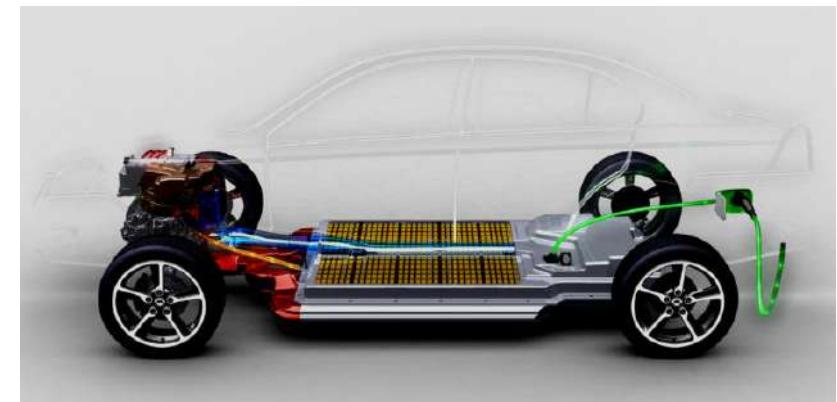


Un solo prodotto  
Rifiuto disperso in atmosfera

ECONOMIA LINEARE



## AUTO A BATTERIA



Diversi prodotti  
Nessuna dispersione



ECONOMIA  
CIRCOLARE

## 2 – IL RITORNO ENERGETICO



$E_{in}$

ENERGY  
INVESTMENT



$E_{out}$

ENERGY  
OUTPUT



$$\text{EROI} = E_{out}/E_{in}$$

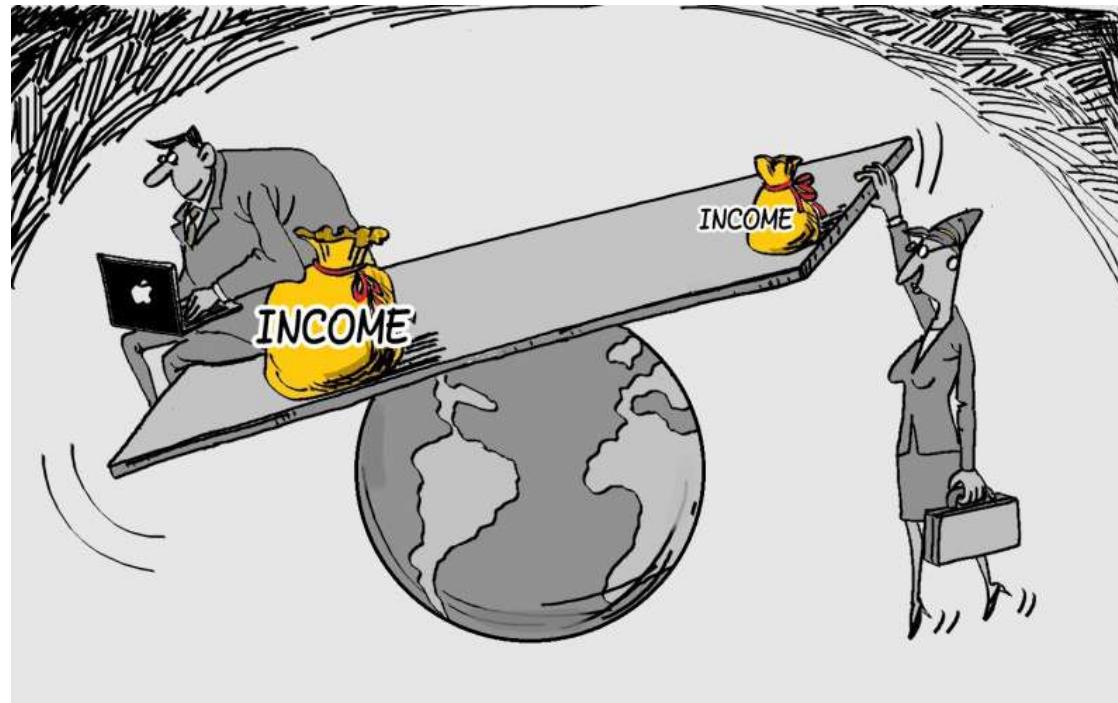
EROI deve essere più di 5, possibilmente più di 10

## **3 – IL NUMERO CRESCENTE DEI CONSUMATORI**



**Nel 2000-2020 abbiamo aggiunto 1,7 miliardi alla popolazione mondiale  
EQUIVALENTE A PIÙ DI UNA CINA**

# **4 – LE DISUGUAGLIANZE (IN UN MONDO GLOBALIZZATO E INTERCONNESSO...)**



# **COSA FAREMMO CON 260 VOLTE MENO ENERGIA?**



Nicola Armaroli, CNR – Federmanager, 21 Aprile 2022

# DUE DILEMMI PER UNA GIUSTA TRANSIZIONE



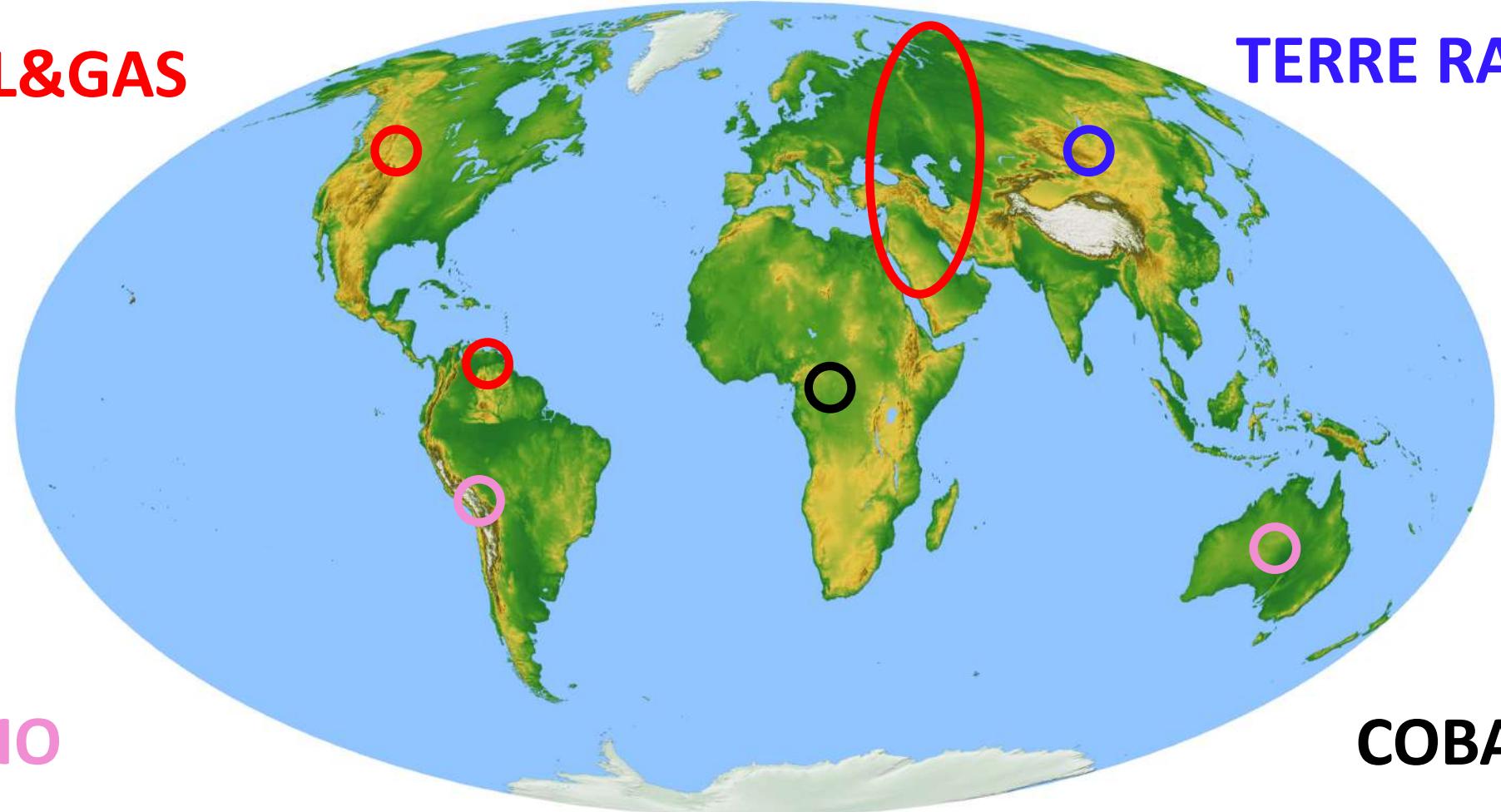
# LE RISORSE SONO LOCALIZZATE ...

OIL&GAS

TERRE RARE

LITIO

COBALTO



# **... I DANNI SONO SPESSO DELOCALIZZATI**



**... e colpiscono principalmente i più vulnerabili e meno colpevoli**

# E L'EUROPA ...?

Possediamo solo lo **0.4, 0.8, 6.0 %** delle riserve provate di **petrolio, gas e carbone\***

Non abbiamo significative risorse di **minerali critici**

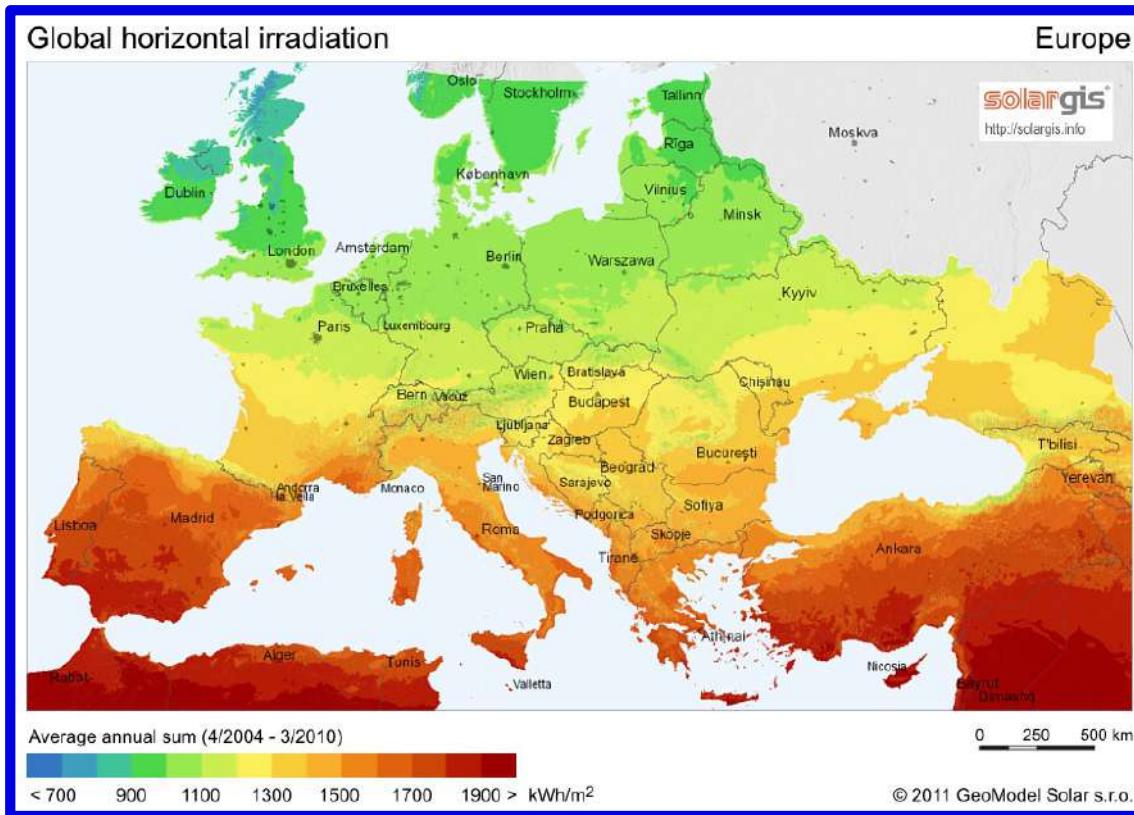


## IL GRANDE PARADOSSO EUROPEO

Godiamo della migliore qualità della vita al mondo  
MA la nostra invidiabile prosperità è basata su  
**energia e risorse provenienti**  
**DA ALTRI CONTINENTI**

\*BP Statistical Review of World Energy, **2021**

# L'UNICA RISORSA ENERGETICA ABBONDANTE IN EU: RADIAZIONE SOLARE



Energia solare media  
sul suolo europeo  
 $5.5 \cdot 10^{15}$  kWh/anno

Consumo energetico primario  
 $1.8 \cdot 10^{13}$  kWh/year\*



0.3% dell'input solare

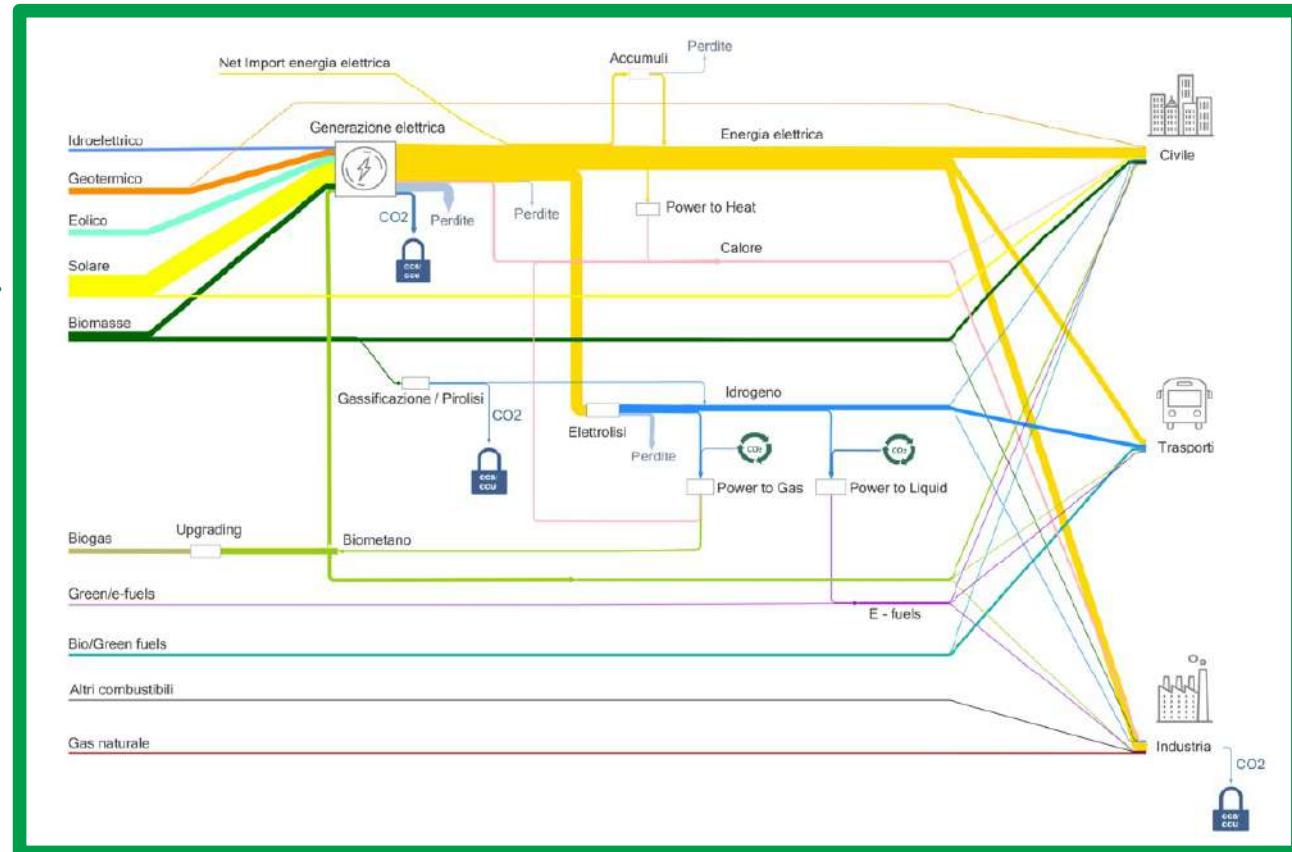
\*Eurostat, 2022

# L'OBBIETTIVO DELL'ITALIA



# BILANCIO ENERGETICO ITALIA, 2050

Non è più  
l'obiettivo  
dei sognatori

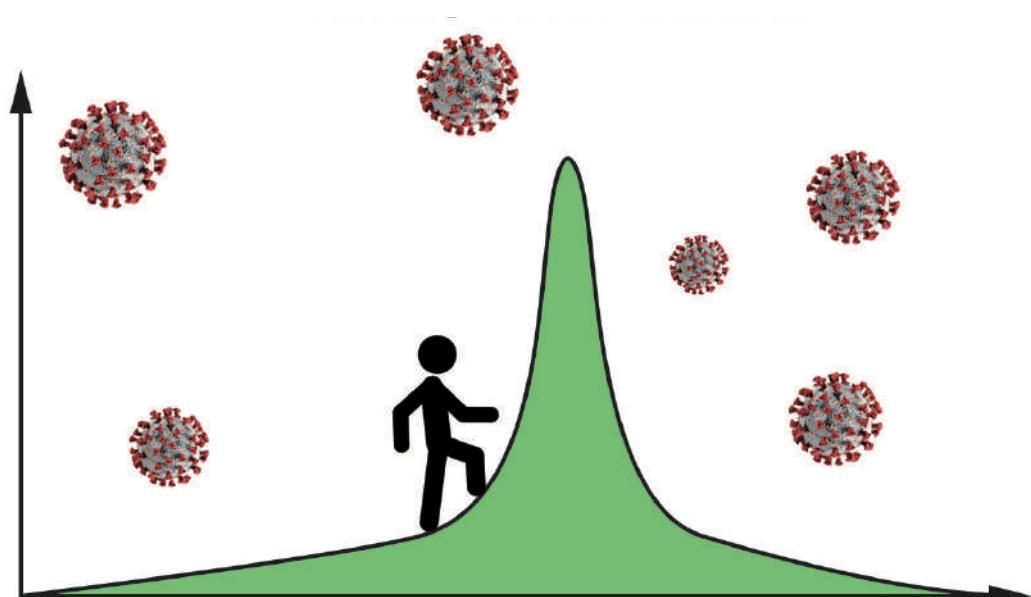


Governo italiano, 2021

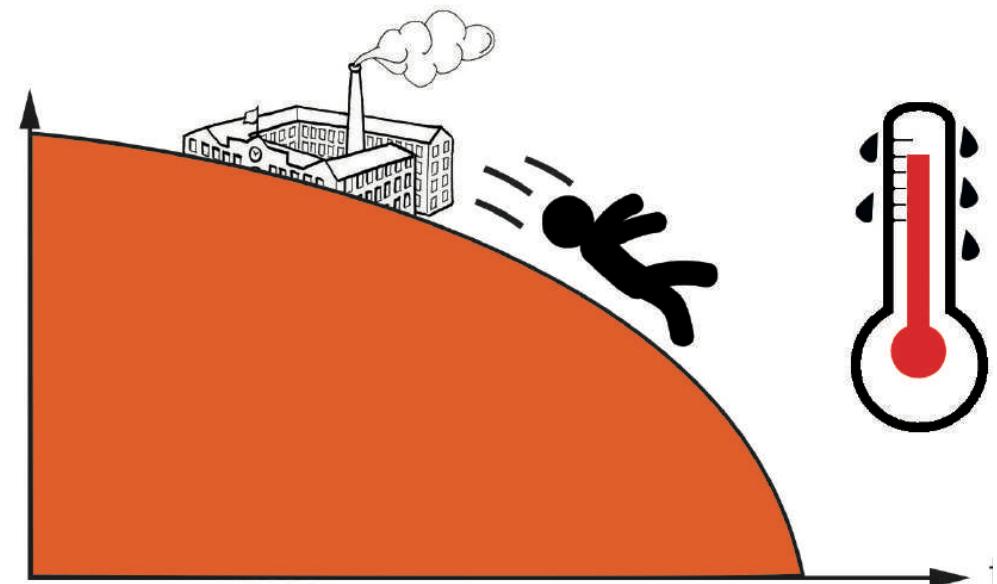
# **UNA CONSIDERAZIONE FINALE**

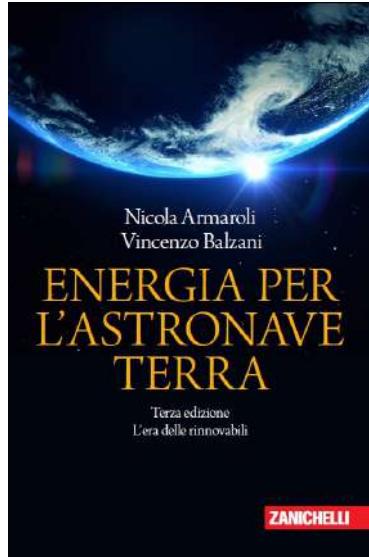
# **CRISI PANDEMIA vs. CRISI CLIMA-ENERGIA**

**PICCO**



**BARATRO**





[www.isof.cnr.it/armaroli-nicola](http://www.isof.cnr.it/armaroli-nicola)

[www.saperescienza.it](http://www.saperescienza.it)

*Il nostro compito non è prevedere il futuro,  
ma renderlo possibile*

Antoine de Saint Exupéry