

IL CAMBIAMENTO DEL CLIMA, LA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI DI CO₂ E LA SOSTITUZIONE DI ENERGIA DA FONTI FOSSILI CON ENERGIA DA FONTI RINNOVABILI

Nicola Armaroli

Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-ISOF), Bologna



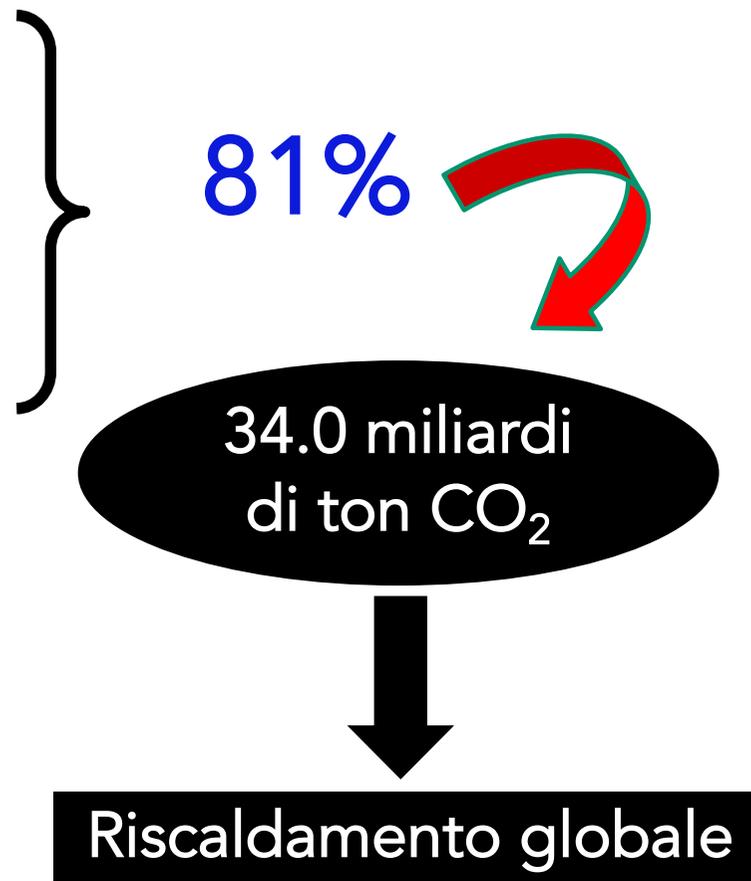
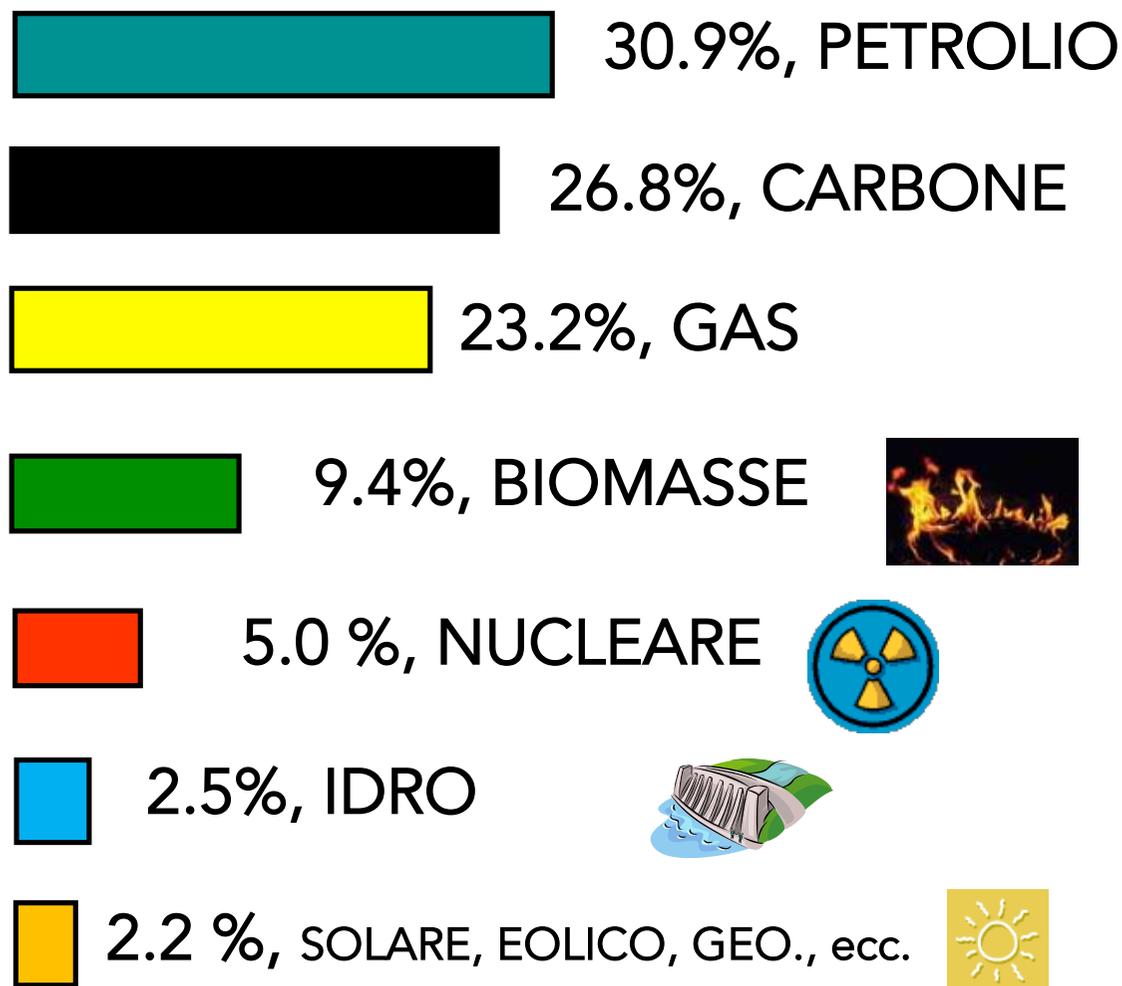
**ASSOCIAZIONE
NUOVA CIVILTÀ
DELLE MACCHINE**

Liceo Fulcieri Paulucci di Calboli, Forlì
17 Aprile 2023

PERCHE' E' NECESSARIO TRASFORMARE L'ATTUALE SISTEMA ENERGETICO?



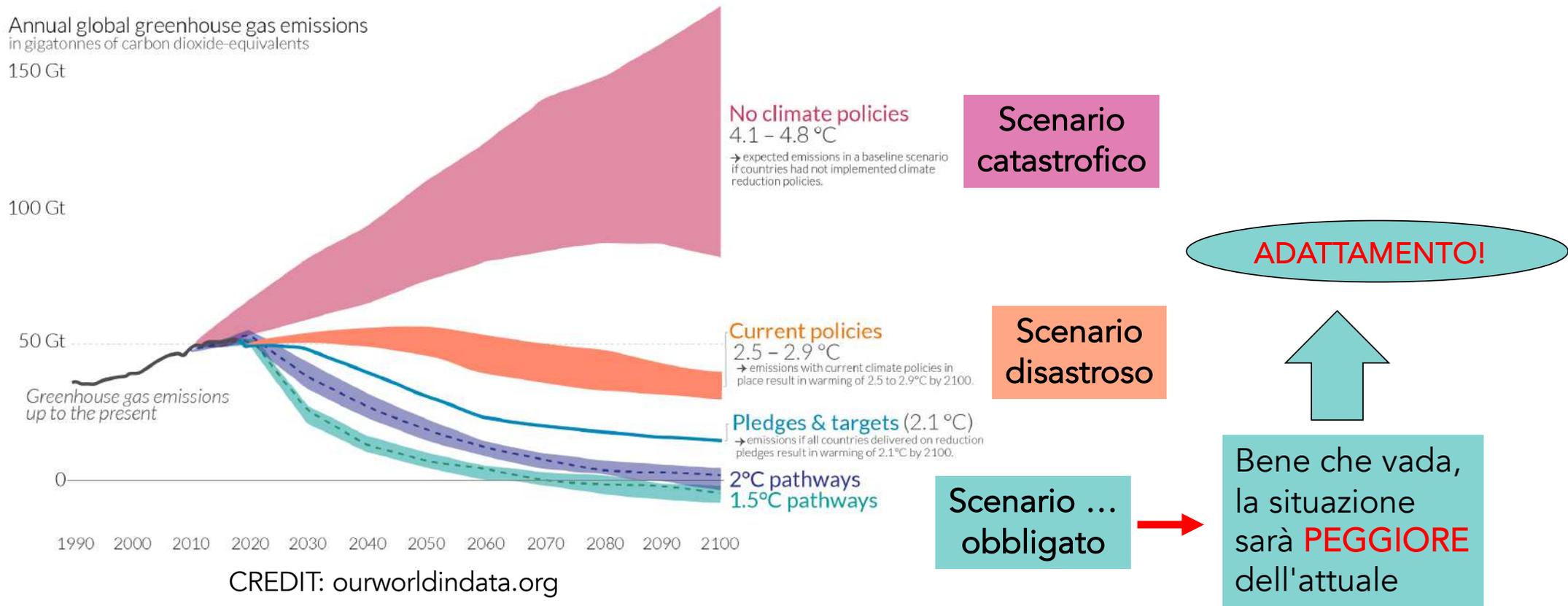
CONSUMO MONDIALE DI ENERGIA PRIMARIA



IEA, 2021

EMISSIONI SERRA E SCENARI DI RISCALDAMENTO GLOBALE

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



IL NOCCIOLO DEL PROBLEMA: BRUCIAMO TROPPO

IERI



OGGI, LA NOSTRA CIVILTÀ MODERNA(?)



Muoverci



Scaldarci



Produrre
elettricità

LA VIA PRINCIPALE: ELETRIFICAZIONE

Energy & Environmental Science

Cite this: *Energy Environ. Sci.*, 2011, **4**, 3193

www.rsc.org/ees

Towards an electricity-powered world

Nicola Armaroli^{*a} and Vincenzo Balzani^{*b}

Received 2nd March 2011, Accepted 21st April 2011

DOI: 10.1039/c1ee01249e

- I motori elettrici sono molto più **EFFICIENTI** dei motori a combustione
- Abbiamo già le **TECNOLOGIE** sul mercato e sono altamente **COMPETITIVE**

UNA TRASFORMAZIONE COMPLESSA CON MOLTI «PALETTI»



IL PRINCIPALE LIMITE: IL TEMPO

- Il tempo a disposizione per **evitare il disastro climatico** è **MOLTO** limitato
- Il tempo necessario per **uscire** dalle tecnologie esistenti è **TROPPO** lungo (es. stop vendita auto endotermiche nel 2035...)
- Il tempo richiesto per **utilizzare le nuove tecnologie** sarà comunque **MOLTO** lungo

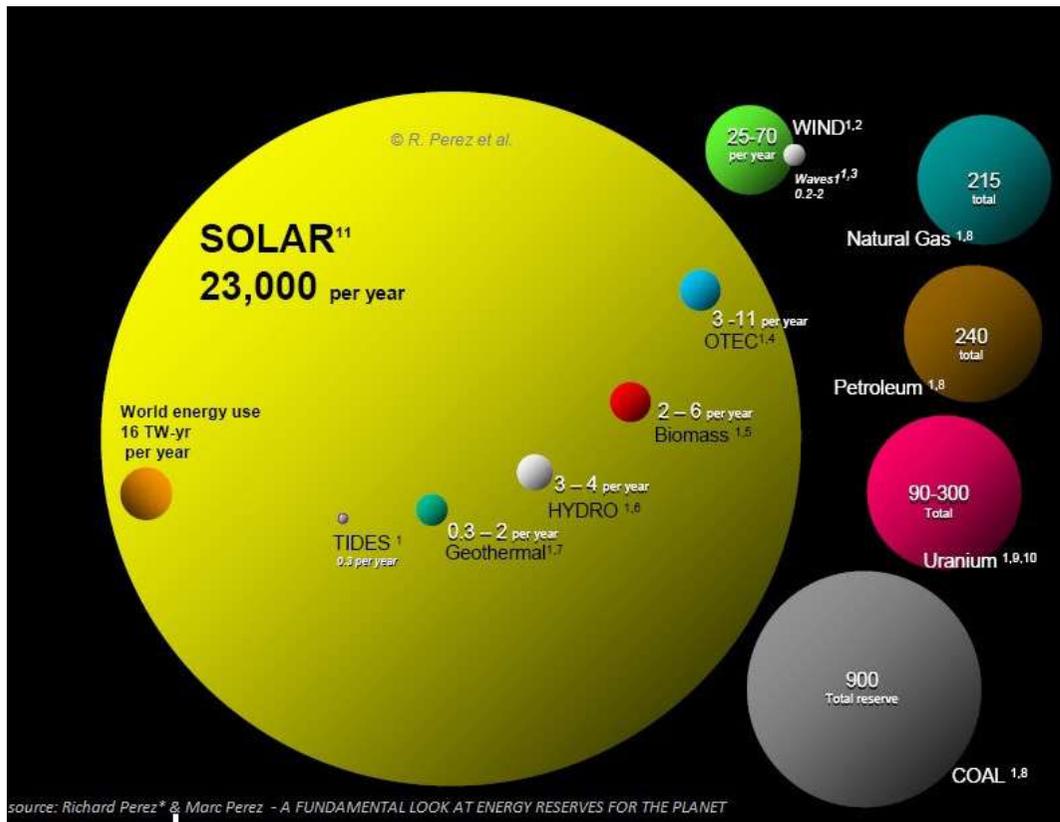
68 anni per passare dall'**INVENZIONE** delle celle fotovoltaiche a silicio alla produzione globale di **1 TW** (1954 → 2022)

LIMITI CHE NON POSSIAMO NEGOZIARE

- **Le leggi della Chimica e della Fisica**
(es. densità energetica H₂, proprietà chimico-fisiche di CO₂, oil, ...)
- **La disponibilità di risorse**
(sul pianeta Terra le risorse sono abbondanti, ma non illimitate)

Le risorse meno sfruttate sinora
per la transizione energetica sono
- IL SOLE
- L'INGEGNO UMANO

INVENTARIO ENERGETICO DELLA TERRA: IL DOMINIO DEI FLUSSI RINNOVABILI



La maggior parte sono
di origine solare
diretta e indiretta

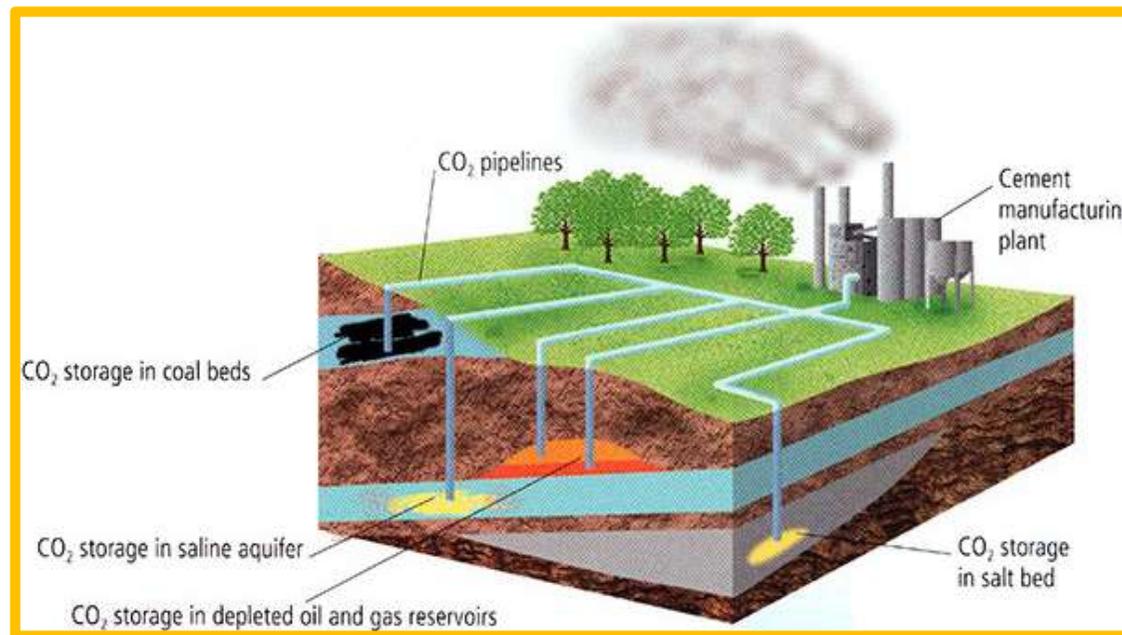
PROBLEMA
Questo messaggio
NON passa

CHE FUTURO PER I COMBUSTIBILI FOSSILI?



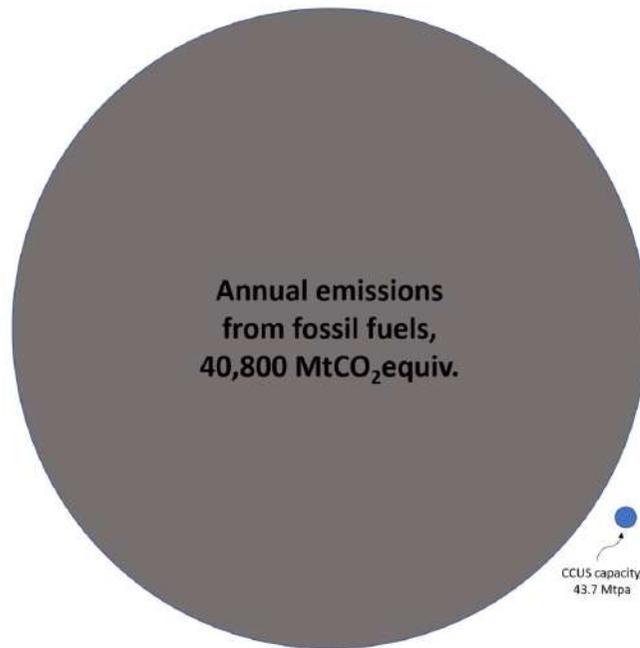
MENTRE CONTINUIAMO A »BRUCIARE» CATTURIAMO E/O SEQUESTRIAMO CO₂

Cattura e sequestro del carbonio (CCS)
in grandi emettitori "puntuali"



CCS: I LIMITI (SPESSO IGNORATI)

CCS esiste da oltre 30 anni
Questo è il risultato



carbontracker.org

COSTO ENERGETICO:
3GJ/ton (el.)

30-60% dell'elettricità generata dalle centrali a gas o a carbone dovrebbe essere utilizzata per stoccare CO₂

HA SENSO?

UN BAGNO DI REALTÀ ...

Mercato globale dei
combustibili fossili

15 Gton/a

140 anni

Fantastiche materie prime: versatili,
elevato contenuto energetico

Emissioni
CO₂ correlate

36 Gton/a

Quanto tempo servirà?

Una molecola
gassosa, inerte e
essenzialmente inutile

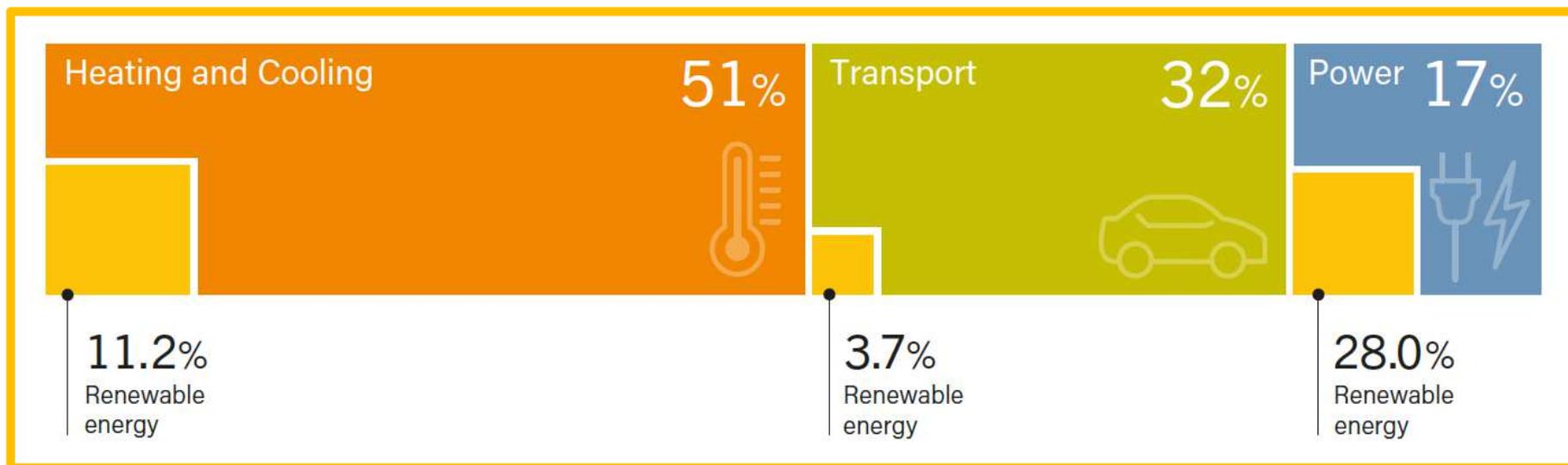
PERCHE' LE RINNOVABILI?



PERCHE' DOBBIAMO PASSARE ALLE ENERGIE RINNOVABILI?

- Mitigare l'impatto su **clima, ambiente, salute**
- **Sicurezza energetica**: ridurre la dipendenza da altri paesi / aree geografiche (e relativi conflitti)
- **Affidabilità**: I problemi di intermittenza si possono affrontare (stoccaggio, reti)
- **Costi**: l'opzione più economica al momento

UTILIZZO DI FONTI RINNOVABILI: A CHE PUNTO SIAMO NEL MONDO?



REN 21, Global Status Report, 2022

TECNOLOGIE ELETTRICHE RINNOVABILI: IN CHE DIREZIONE ANDIAMO?



Water



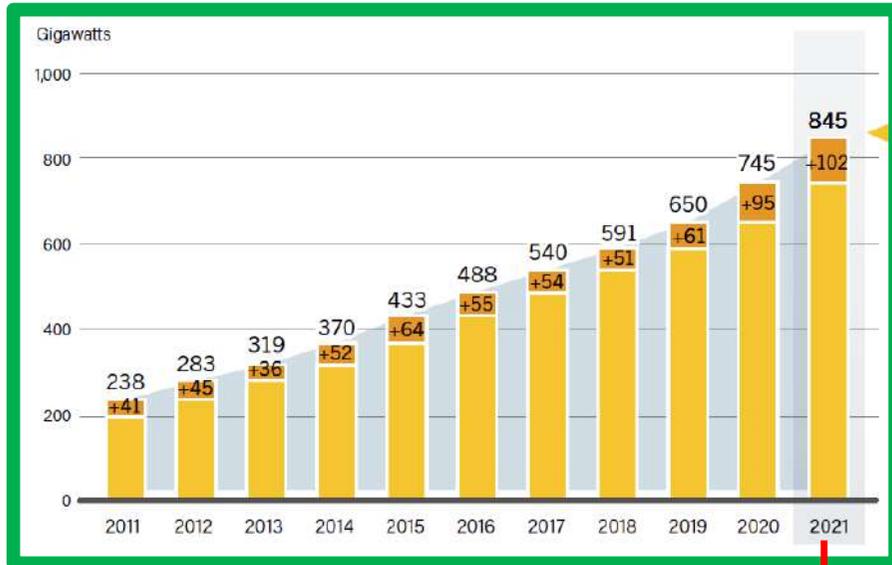
Wind



Solar

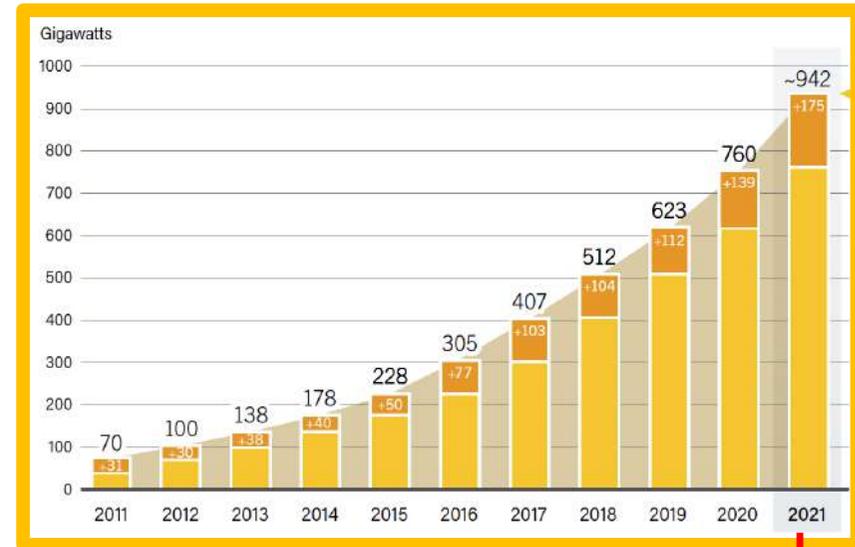
TREND EOLICO E FOTOVOLTAICO

EOLICO, 2011-2021



845 GW

FOTOVOLTAICO, 2011-2021



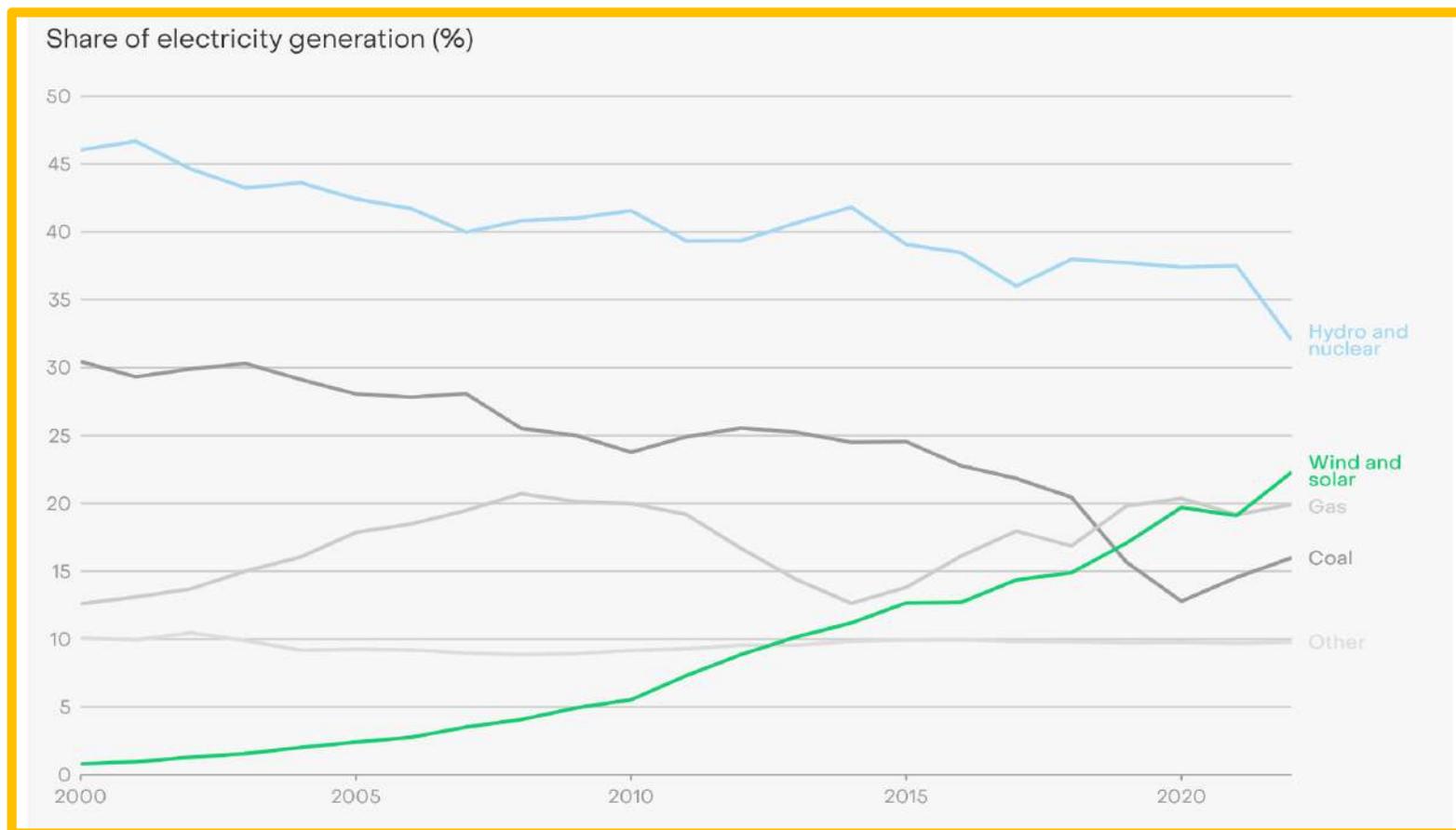
REN 21, Global Status Report, 2022

942 GW

VENTO + FOTOVOLTAICO 2021 (MONDO)

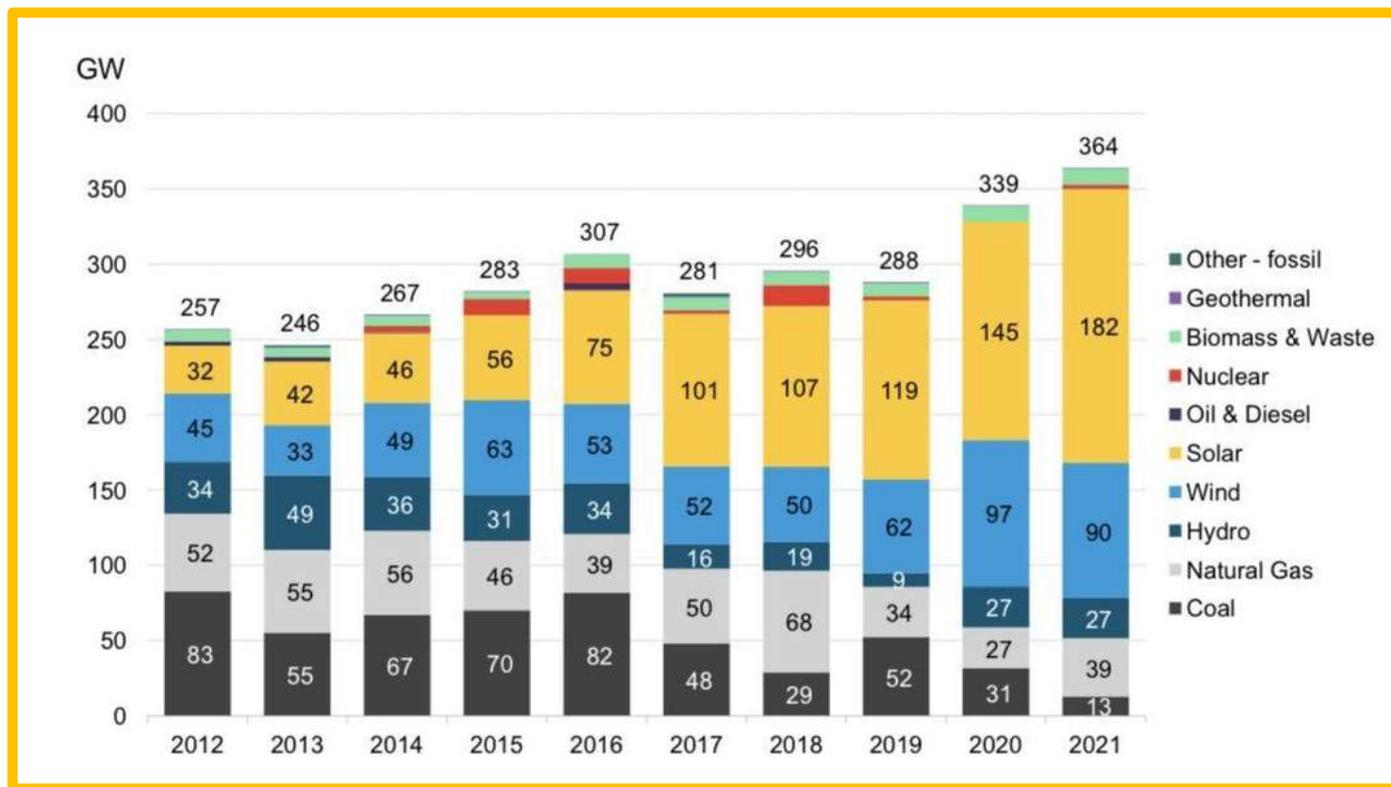
HANNO PRODOTTO L'EQUIVALENTE DI 535 CENTRALI NUCLEARI O A CARBONE DA 1 GW

EUROPA: NEL 2022 LA PRODUZIONE DI EOLICO E SOLARE SUPERA IL GAS!



EMBER, 2023

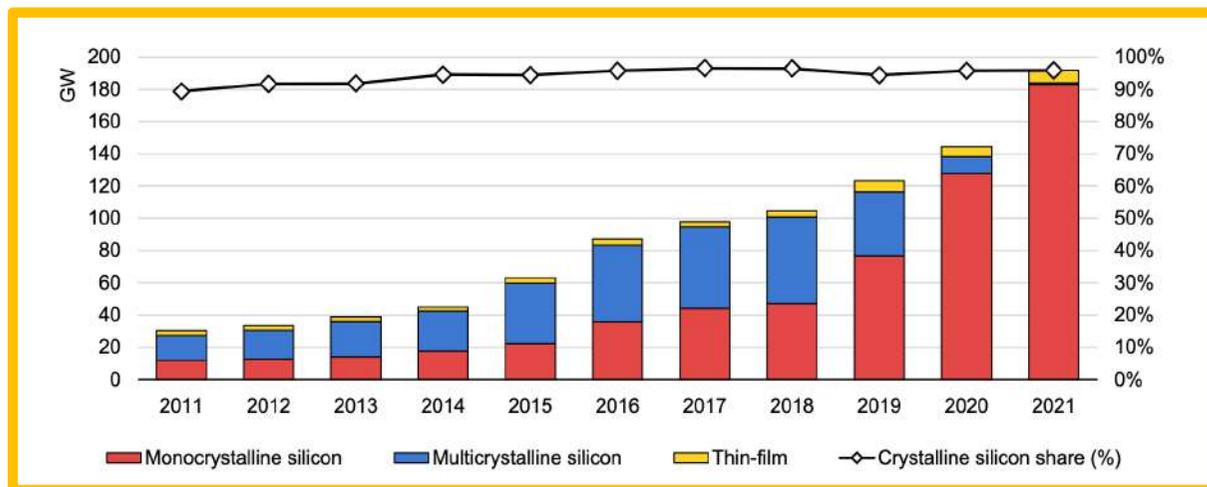
NUOVE CAPACITA' DI GENERAZIONE, 2011-2021 (MONDO)



Bloomberg NEF
Nov. 2022

EOLICO E FOTOVOLTAICO: PROSPETTIVE?

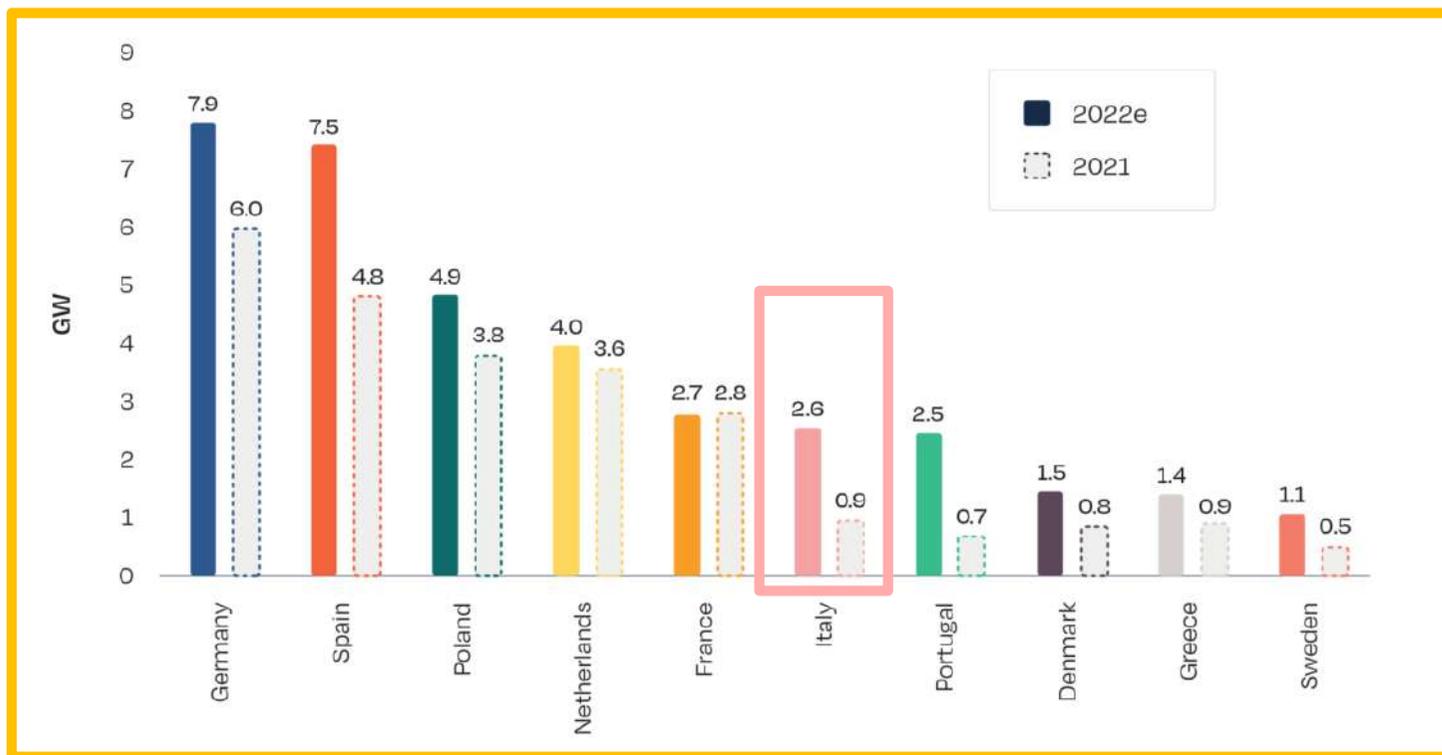
- **EOLICO** – non sono previste grandi innovazioni tecnologiche MA occorre migliorarne l'efficienza e ottimizzarne il riciclo (pale!)
- **FOTOVOLTAICO** – Saranno possibili innovazioni tecnologiche ma solo nel LUNGO TERMINE. I pannelli C-Si domineranno ancora il mercato a lungo, con la possibilità di ulteriori miglioramenti nell'efficienza



Quota di mercato dei materiali fotovoltaici

PEROVSKITI o altri materiali
difficilmente raggiungeranno il mercato
In tempi brevi (se mai lo faranno)

PRODUZIONE DA FOTOVOLTAICO NEI PAESI EU 2021-2022



2022
41.7 GW
(+47%)

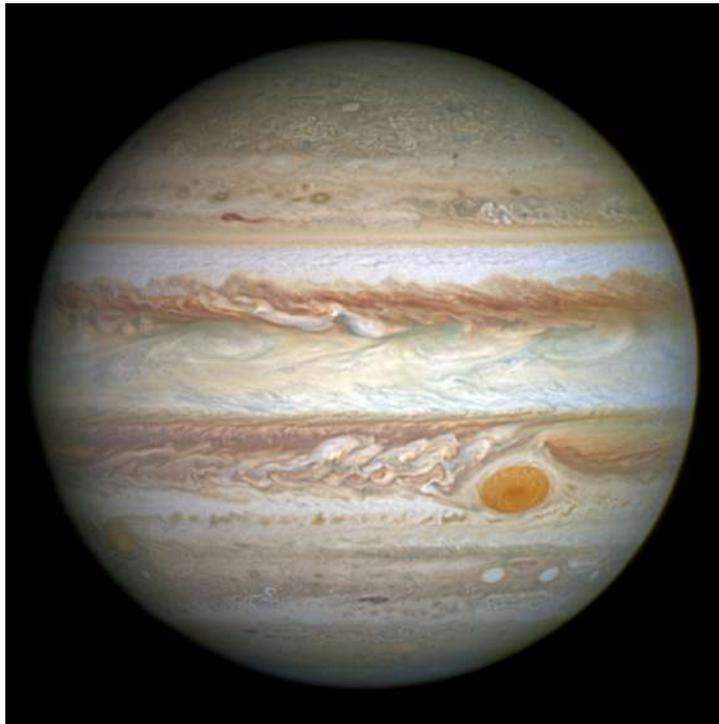
ITALIA
A questo ritmo, ci vorranno 20 anni per raggiungere 70 GW (obiettivo 2030)

L'OPZIONE. IDROGENO

UN'OPPORTUNITÀ MA ... GUARDIAMOCI DENTRO!



L'IDROGENO MOLECOLARE (H₂) NON ESISTE SULLA TERRA: COME LO PRODUCIAMO?



GIOVE



TERRA

Credit: NASA

I LIMITI DELL'IDROGENO

- E' l'elemento più leggero dell'Universo: **NON è un dettaglio**, varie conseguenze
- Per ridurre i volumi, va utilizzato a **pressioni e temperature MOLTO alte**
- Se prodotto da gas (CH_4) o carbone genera **enormi quantità di CO_2**
- Se prodotto da acqua (H_2O), serve **molta elettricità**, $1\text{kg H}_2 \rightarrow 55\text{ kWh}$
- Se prodotto da acqua (H_2O), serve **molta acqua**, $1\text{kg H}_2 \rightarrow 9\text{L di acqua}$
- E' altamente **reattivo** (i.e., infiammabile ed esplosivo)
- Attualmente utilizzato nell'**industria chimica**, non per la produzione di energia
- E' tipicamente **prodotto e utilizzato in situ**
PARADOSSO: enorme produzione, ma piccolo mercato

IDROGENO, IL PUNTO CRITICO: LA DENSITA' ENERGETICA

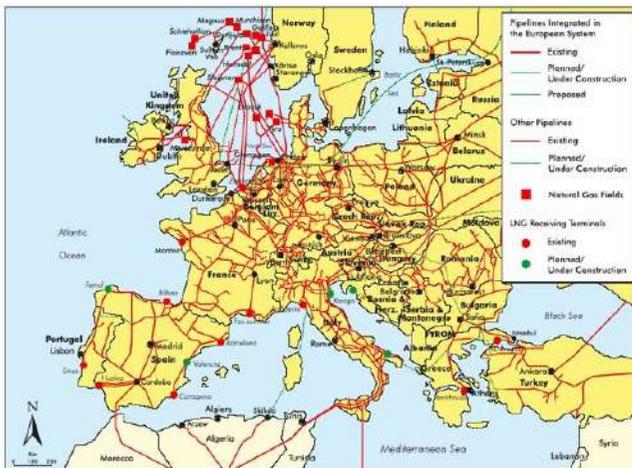
DENSITÀ IN VOLUME (MJ/L)	
Idrogeno*	0.010
Metano*	0.038
Benzina	34
Gasolio	39
Carbone	38

Per ottenere l'energia prodotta da **1 m³** di gas naturale, servono **3.8 m³** di idrogeno!

* 1 bar, 25 C

COME TRASPORTEREMO L'IDROGENO?

EU gas transmission network



GLOBALMENTE, linee di trasmissione
H₂: 5000 km
Natural Gas: > 3000000 km

Occorre cambiare/adattare



CONDOTTE



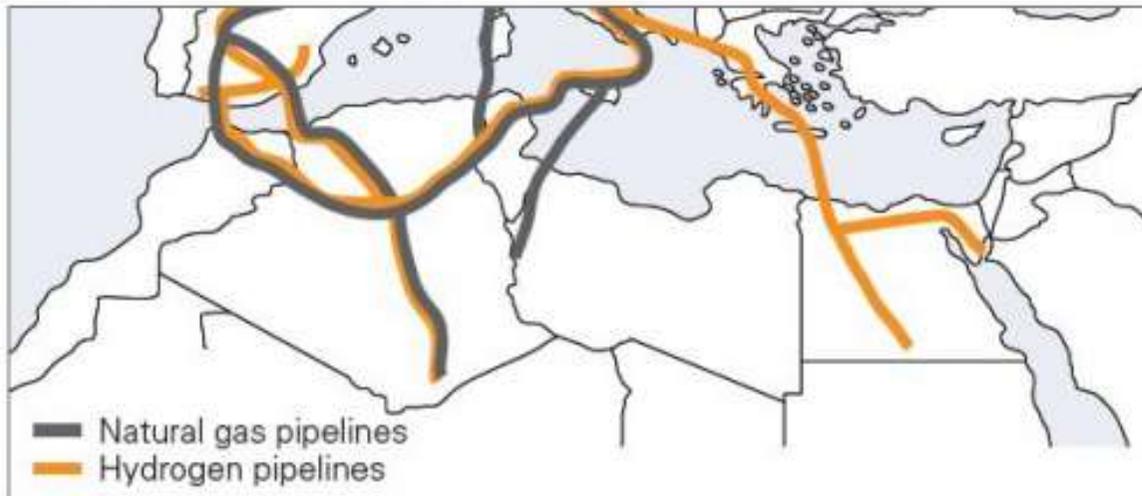
VALVOLE



COMPRESSORI

MASSICCI INVESTIMENTI

POTREMO PRODURLO IN AFRICA ED IMPORTARLO?



VANTAGGI

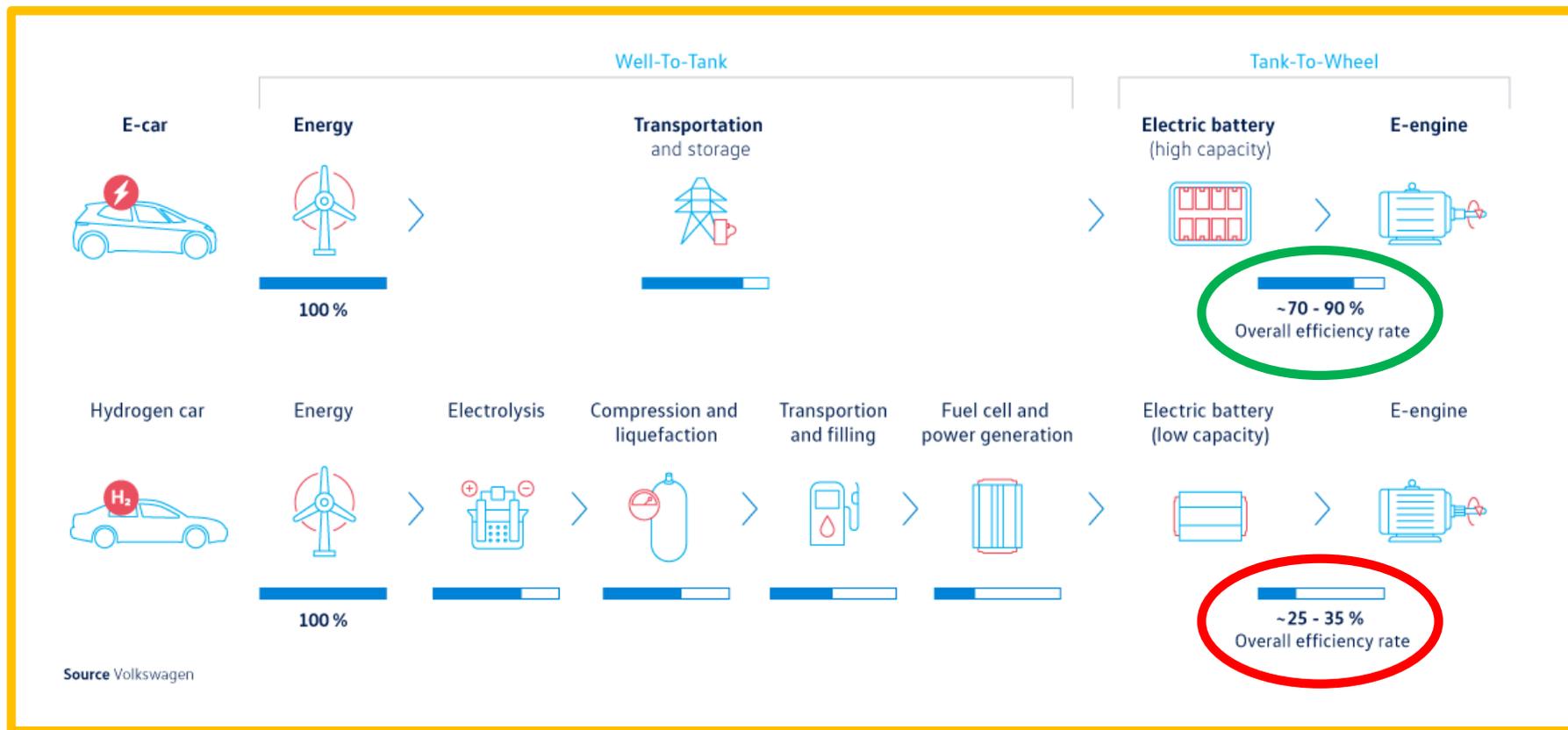
- Elettricità rinnovabile a basso costo
- Dare una prospettiva di stabilità sociale, nel tempo, a Paesi poveri di altre risorse

SVANTAGGI

- Perpetuare la dipendenza energetica
- Incertezze geopolitiche (DESERTEC ...)

E l'acqua dolce nel deserto?
Sono disponibili risorse acquifere fossili, ma ...

USEREMO L'IDROGENO PER ALIMENTARE LE AUTO?

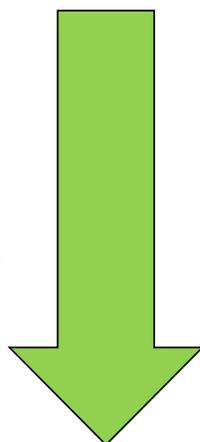


CREDIT: Volkswagen

USEREMO L'IDROGENO PER RISCALDARE LE CASE?

100 unità di elettricità rinnovabile

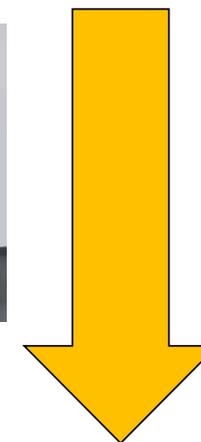
H₂ verde
e
combustione



60



Pompa
di calore



300-500

LA TRASFORMAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI



2020: settore residenziale, 27,4% del consumo finale di energia o il 18,7% del consumo interno lordo di energia nell'UE

Eurostat, 2023

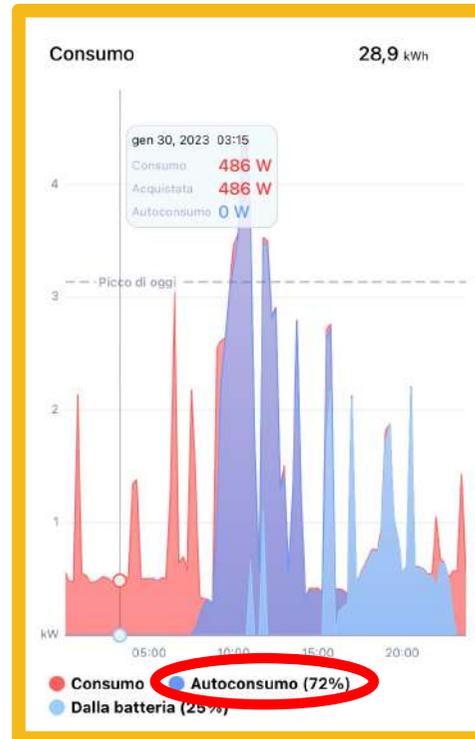
UN ESEMPIO PRATICO: LA MIA CASA NO-GAS, CLASSE A4



Batteria



Pompa di calore Geot.



30 Gennaio 2023
T Notte : - 2 C

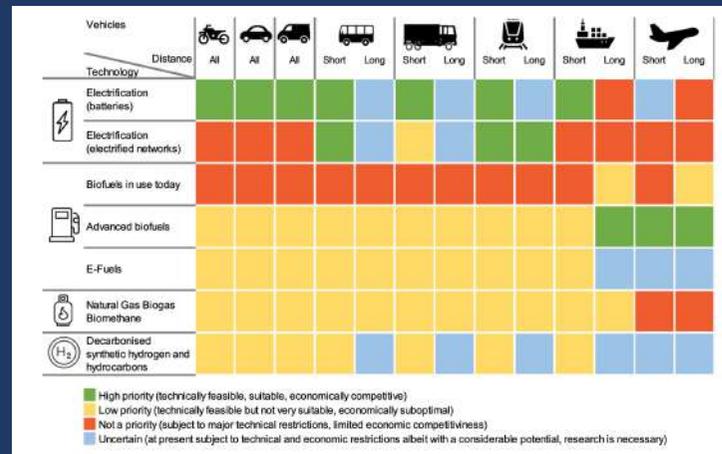
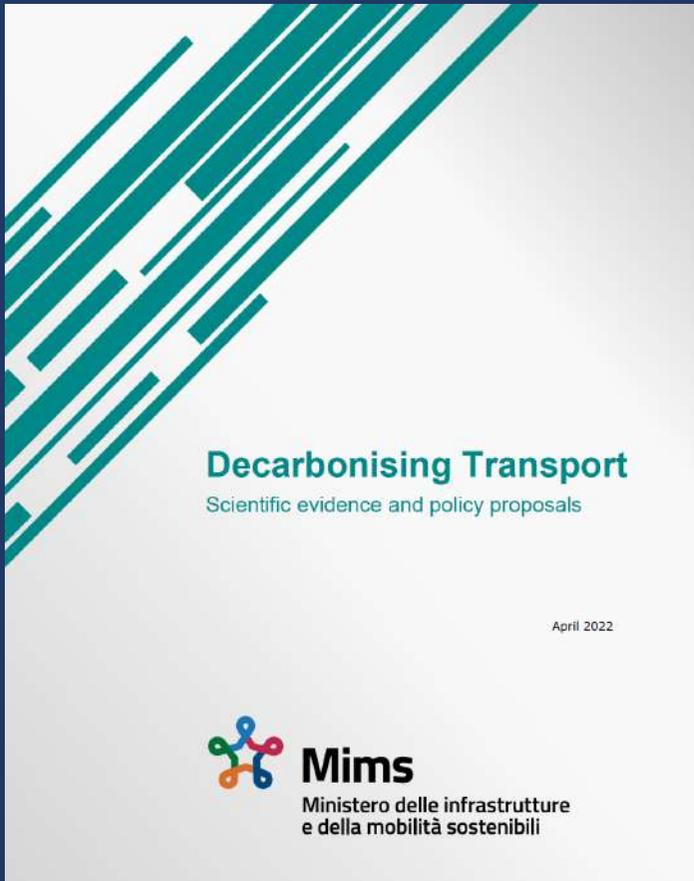
Cons. Energetico TOTALE
29 kWh

RISCALDAMENTO 13 kWh
(eq. a 1,2 SMC GAS)

CASA VECCHIA (gas, classe D)
10 SMC GAS al giorno

Un fattore 8X!

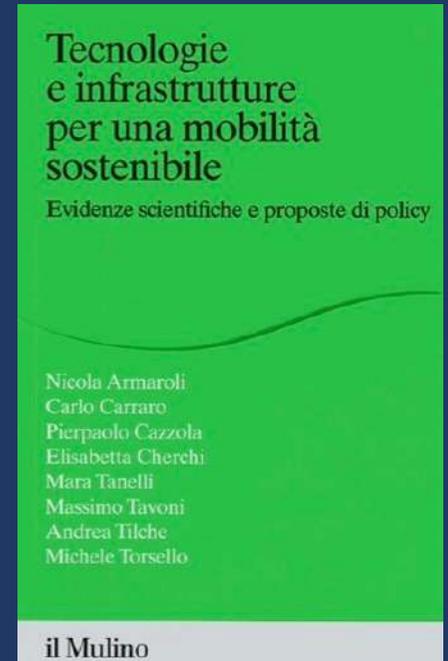
TRASFORMAZIONE ENERGETICA NEI TRASPORTI



<https://www.mit.gov.it/comunicazione/news/decarboni-sing-transport-scientific-evidence-and-policy-proposals>

N. Armaroli, C. Carraro, P. Cazzola, E. Cherchi, M. Tanelli, M. Tavoni, A. Tilche, M. Torsello
Nat. Italy, 2022, doi: 10.1038/d43978-022-00098-x

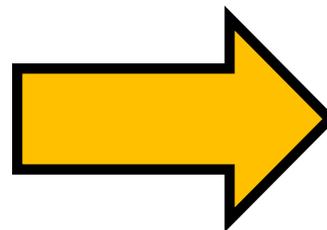
N. Armaroli, C. Carraro, P. Cazzola, E. Cherchi, M. Tanelli, M. Tavoni, A. Tilche, M. Torsello
 Tecnologie e infrastrutture per una mobilità sostenibile
Il Mulino, 2022, IN LIBRERIA



PERCHE' LE AUTO A BATTERIA?



51 kWh
equivale a
5,7 litri
di benzina



Auto analoga endotermica
(da Via Michelin)

30-45 litri
di benzina
(5-7 X)

QUESTA È LA RAGIONE

LA DIFFERENZA SOSTANZIALE

AUTO TERMICHE

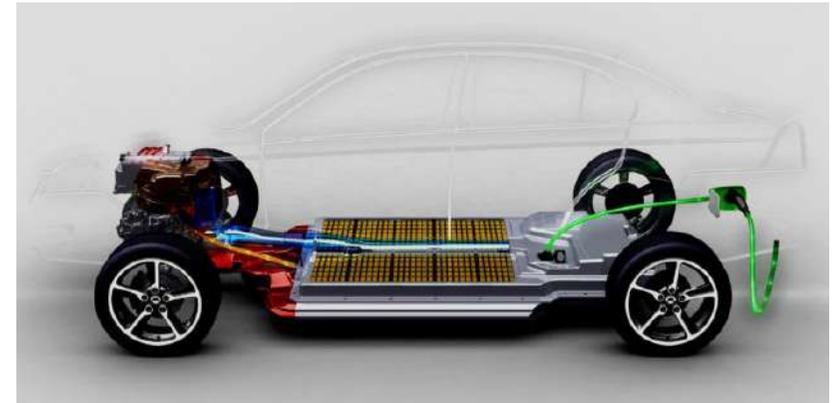


Un solo prodotto
Rifiuto disperso in atmosfera

ECONOMIA LINEARE



AUTO A BATTERIA



Diversi prodotti
Nessuna dispersione



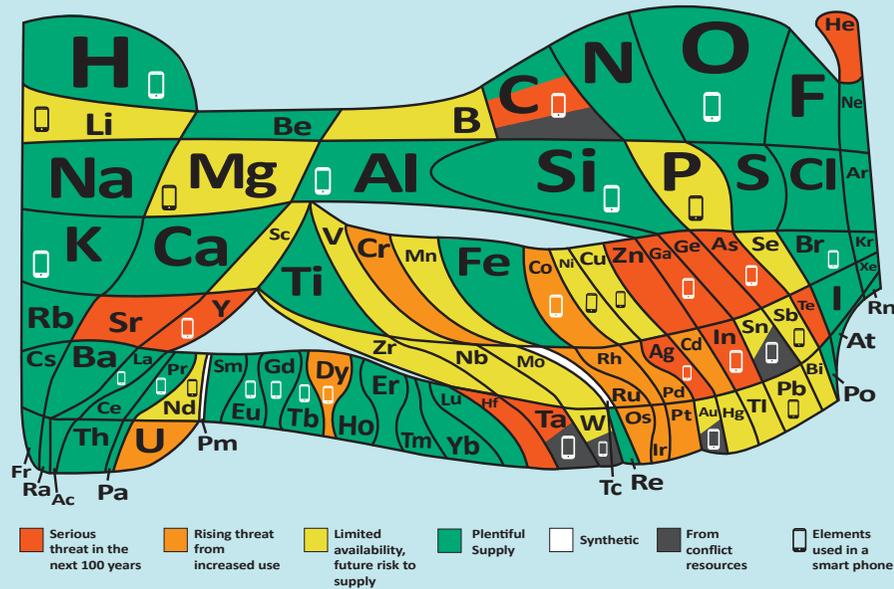
ECONOMIA CIRCOLARE

I (NUMEROSI) COLLI DI BOTTIGLIA DELLA TRANSIZIONE ENERGETICA



LE MATERIE PRIME

The 90 natural elements that make up everything
How much is there? Is that enough? Is it sustainable?



Inspired by WF Sheehan's A Periodic Table with Emphasis, published in Chemistry, 1976, 49, 17-18

Read more and play the video game <http://bit.ly/euchems-pt>

edition 2 (2021)



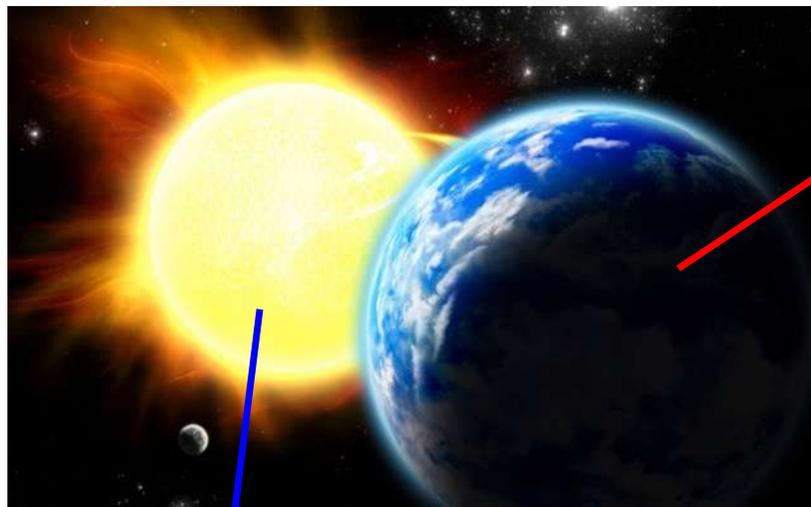
This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NoDerivs CC-BY-ND

EuChemS
European Chemical Society

La tavola periodica EuChemS.
Com'è fatta la Terra e come la
stiamo usando

www.euchems.eu

LE RINNOVABILI RICHIEDONO RISORSE MINERALI



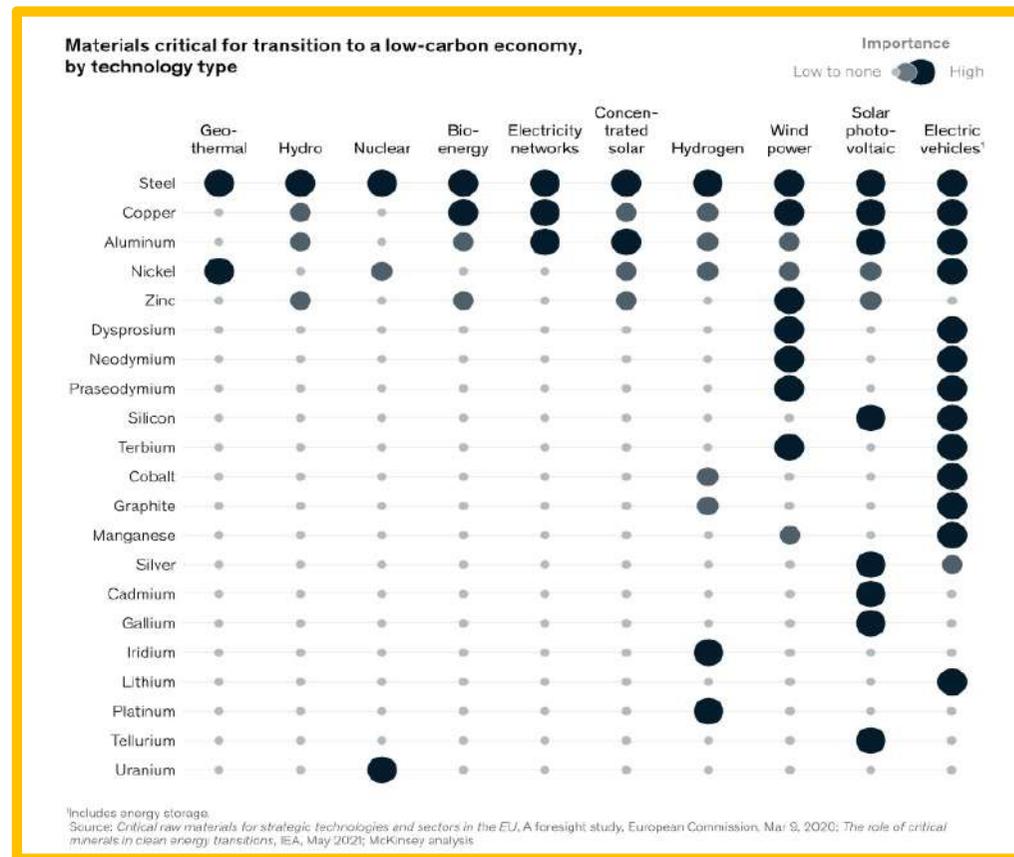
LUCE: un input extraterrestre sovrabbondante

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



LOW CARBON ECONOMY: QUALI METALLI SERVONO?

"CACCIÀ GROSSA"
NELLA TAVOLA
PERIODICA



CREDIT: McKinsey, 2022

INTENSITA' MATERIALE vs. COMPLESSITA' MATERIALE



1 MW di pannelli FV al silicio
richiede circa
200 ton di materiali
In 30 anni produce
40 000 MWh di elettricità

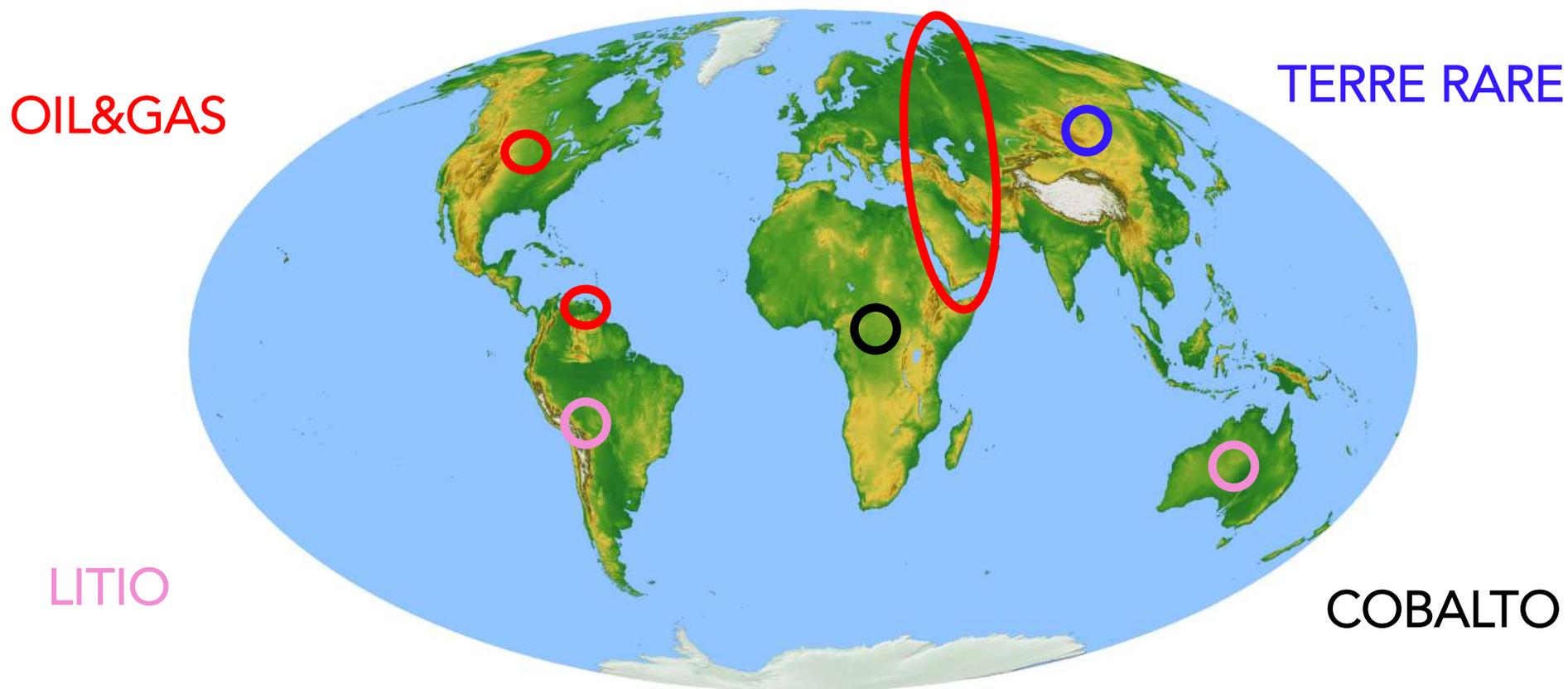
**MENO MATERIALE
PIÙ COMPLESSITÀ**



Occorrono **14 000 ton di carbone** per produrre la stessa
quantità di elettricità,
oltre 70 volte di più

**PIÙ MATERIALE
MENO COMPLESSITÀ**

RISORSE ENERGETICHE E MINERALI SONO LOCALIZZATI



NON CI SONO ALTERNATIVE A UNA TRANSIZIONE COLLABORATIVA

LE "DIMENSIONI" DEL PROCESSO DI TRANSIZIONE ENERGETICA



8 MILIARDI di persone
195 nazioni
in transizione energetica ...

QUANTO LITIO SERVE?



AUTO VENDUTE NEL MONDO
75 MILIONI/ANNO



PROD. LITIO
90 kton

L'ATTUALE PRODUZIONE
DI LITIO POTREBBE
COPRIRE CIRCA IL **12%**
DELLE VENDITE
ANNUALI MONDIALI
DI AUTO,
SE TUTTE A BATTERIA

F. Monti, A. Barbieri, N. Armaroli
Substantia 2019, 3(2), 75-89

2021

ABBIAMO LITIO A SUFFICIENZA?



Dalla miniera
(es. Australia)



Dalle saline
(es. Sudamerica)

Risorse stimate 2013: 23 Mton

Risorse stimate 2023: 98 Mton

Attualmente sfruttabili (Riserve): 26 Mton



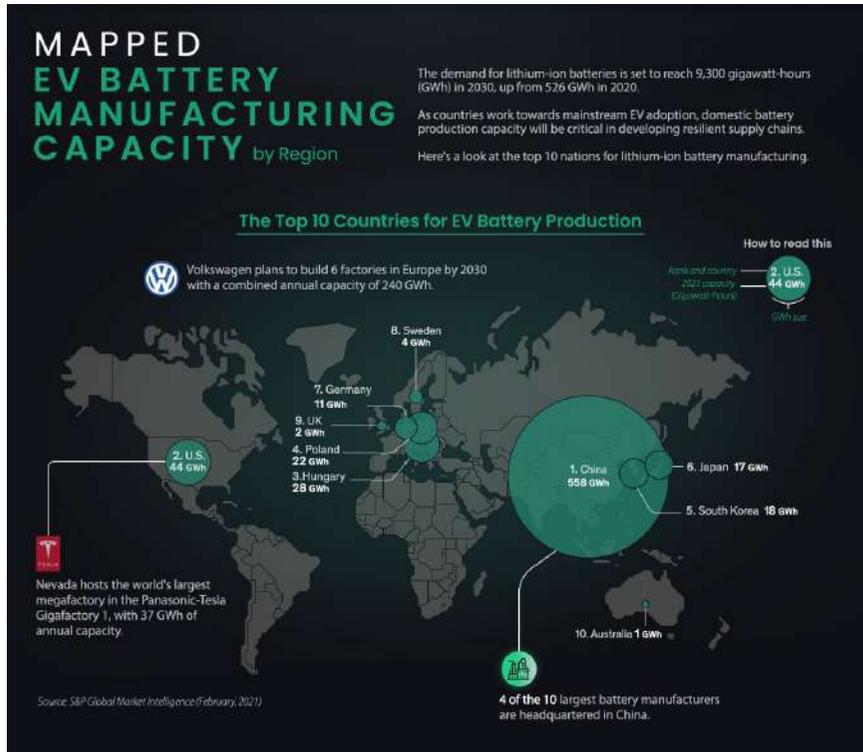
8 kg/auto

Auto a batteria fabbricabili:
3,2 miliardi (oggi 1,4)

FATTIBILE? COME?
Dipende da tanti fattori ...

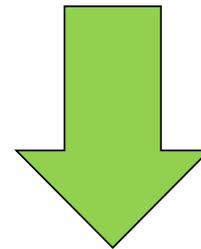
FONTE: US Geological Survey

PRODUZIONE GLOBALE DI BATTERIE AL LITIO



CREDIT: www.visualcapitalist.com

Capacità
Fine 2021
706 GWh



30 milioni di batterie
Come nella mia casa
15 milioni di batterie
come nella mia auto

PROSPETTIVE

- Aumentare estrazione Li
- Oltre Li (Sodio)
- Espandere capacità globale

Obiettivo Tesla
3 TWh nel 2030

OLTRE LE BATTERIE

- Revamping idroelettrico
- Nuove tecnologie (CO₂, gravimetrico, ...?)

IL COLLO DI BOTTIGLIA DELL'EUROPA

Possediamo solo lo **0.4, 0.8** delle riserve provate di **petrolio** e **gas**.

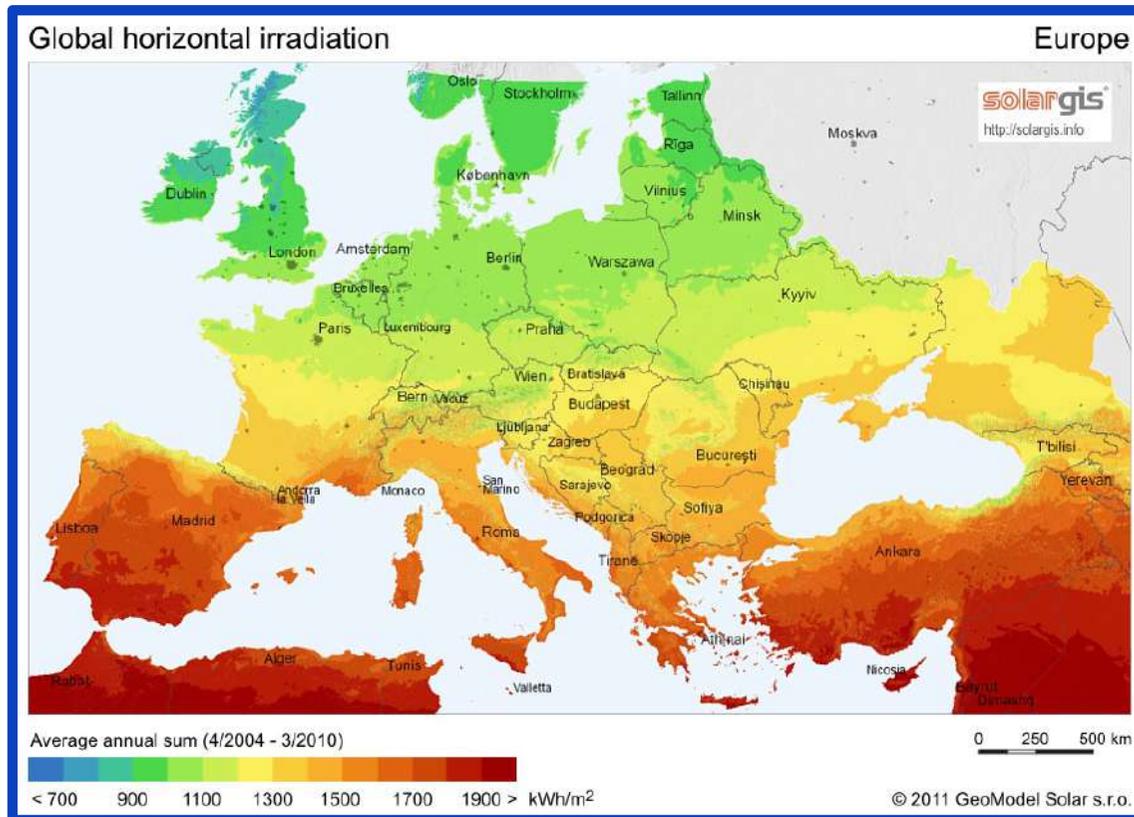
Non abbiamo grandi riserve di **minerali critici**



IL PARADOSSO EUROPEO

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

L'UNICA RISORSA ENERGETICA ABBONDANTE IN EUROPA: 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

LA PIU' GRANDE TRASFORMAZIONE NELLA STORIA DELL'UMANITÀ

LIMITI

Tempo Pervasività dell'energia fossile Complessità del sistema Terra Disuguaglianze
Risorse naturali Scalabilità delle nuove tecnologie Necessità di cooperare

LE TRE STRADE MAESTRE

Energia solare

Efficienza

Elettrificazione

OCCORRE REALISTI RISPETTO ALLA SOLUZIONI "FACILI"

CCS & DAC

Combustibili sintetici

Idrogeno

Fusione

UN'ETA' D'ORO PER SCIENZA E TECNOLOGIA

QUALI FONTI E TECNOLOGIE PER LA TRANSIZIONE?



Le soluzioni al 90% esistono già e sono **SEMPLICI**



Il resto sono ricerca scientifica e tempi lunghi (che non abbiamo...)



LA TRASFORMAZIONE PIU' DIFFICILE? USCIRE DALLA NOSTRA "COMFORT ZONE"



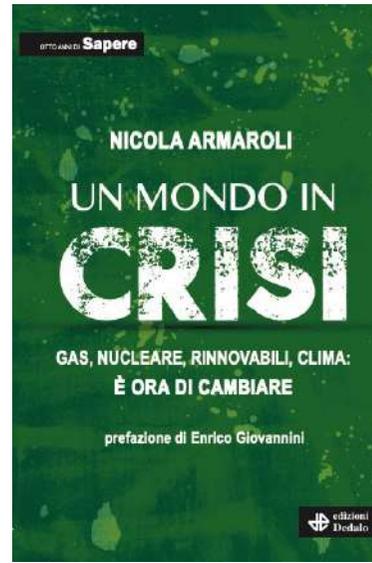
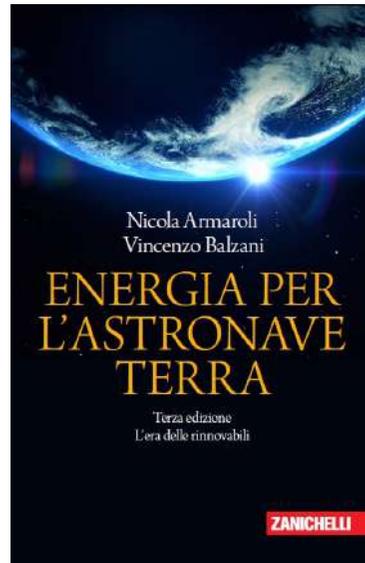
Bruciare gas per riscaldare casa?

Sprecare enormi quantità di petrolio per muoverci?

Per sempre bisogno di grandi centrali?

Auto personale per tutti?

Non posso fare nulla: non tocca a me!



<https://www.isof.cnr.it/armaroli-web-media/>

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

Antoine de Saint Exupéry