# Le prospettive energetiche del pianeta e le energie rinnovabili

Alessandro Romeo

Laboratory for Applied Physics
Dipartimento di Informatica



#### Indice

Situazione energetica globale

Fonti Tradizionali: criticità

Energie Rinnovabili

Fotovoltaico.

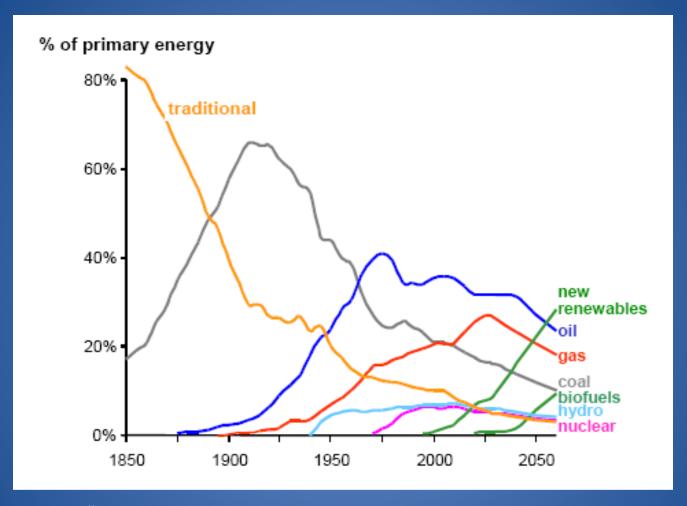


#### Punti chiave

- Aumento del consumo di energia
- Efficienza di conversione
- Diminuzione dei combustibili fossili
- Inquinamento
- Elettrificazione, industrializzazione, modernizzazione dei paesi del 3º mondo
- Sostenibilità



#### Evoluzioni delle sorgenti energetiche

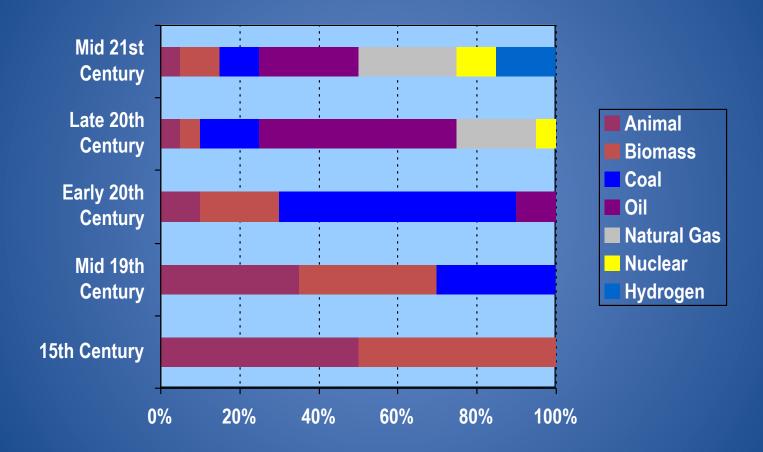


Ged Davis, "Evolving sources or revolutionary technology – exploring alternative energy paths to 2050,"

Shell International, Oil & Money Conference, London (2001).



#### Evoluzioni delle sorgenti energetiche





# Sorgenti energetiche

#### Non rinnovabili

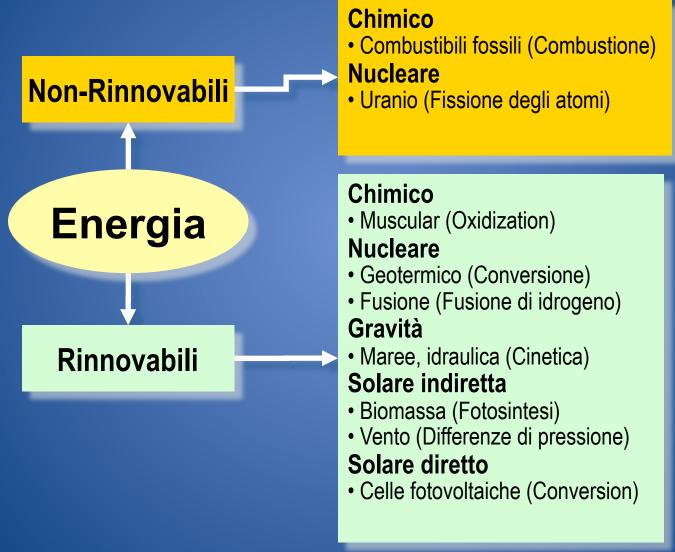
- Carbone
- Petrolio
- Gas naurale
- Nucleare

#### <u>Rinnovabili</u>

- Vento
- Solare
- Idroelettrico
- Geotermico
- Biomassa
- Idrogeno
- Altre Tecnologie

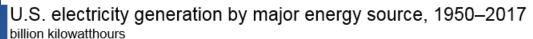


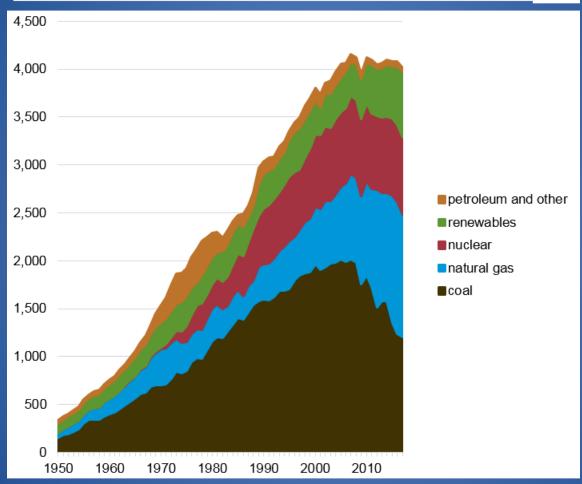
# Sorgenti di energia





#### Generazione di Elettricità in USA





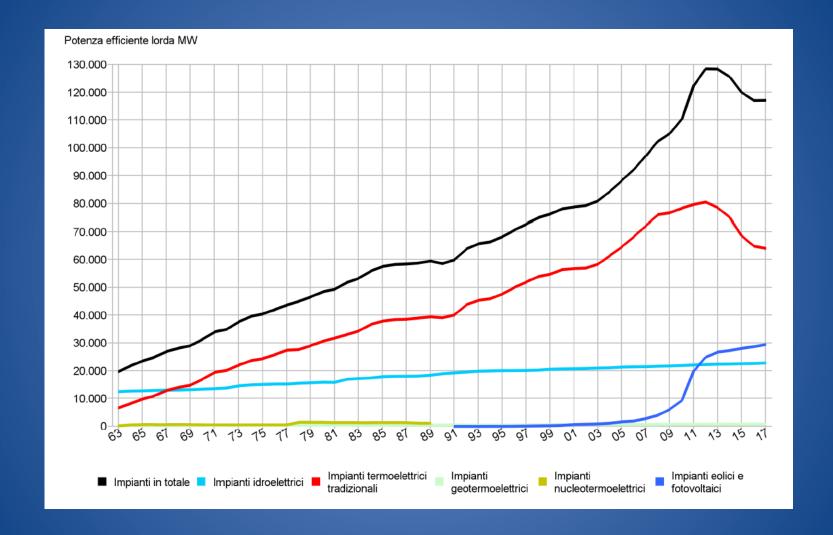
Note: Electricity generation from utility-scale facilities.

Source: U.S. Energy Information Administration, *Monthly Energy Review*, Table 7.2a, March 2018, preliminary data for 2017





#### Generazione di Elettricità in Italia



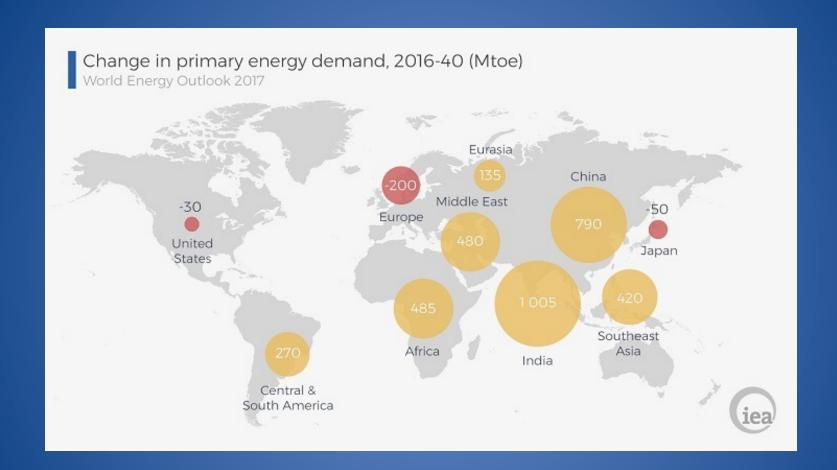


## Consumo di petrolio

1973 and 2016 shares of world oil consumption 1973 2016 Non-energy use Non-energy use 11.8% Industry Industry 16.6% 7.8% 19.9% Aviation Other<sup>1</sup> Other<sup>1</sup> 7.8% 10.2% Aviation 5.4% Residential 5.4% Road Navigation Road 30.8% 6.7% 49.3% **Navigation** 6.8% Rail 1.7%\_ Rail 0.7%

**Source: International Energy Agency** 

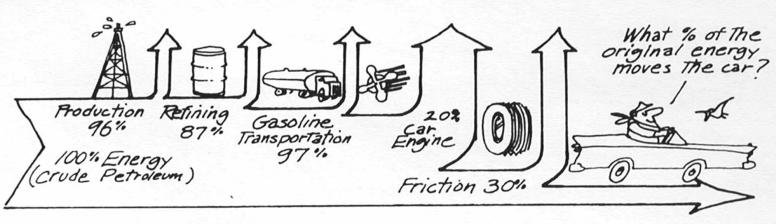






#### Efficienza di conversione bassa

Energy Efficiency of Each Step from Crude Petroleum to Running a Car



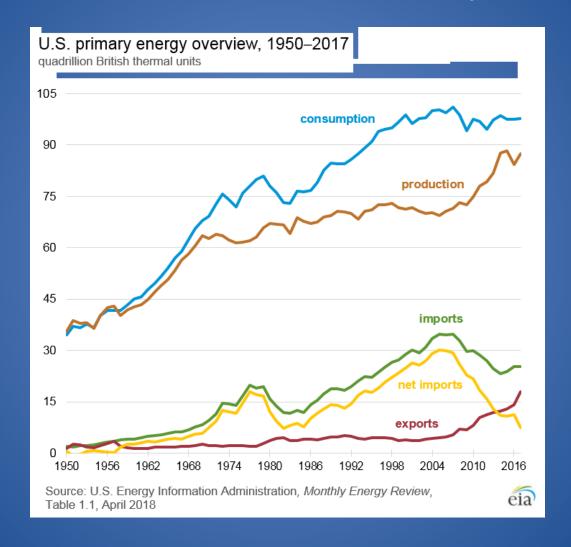
Efficiency of Petroleum Use

 $0.96 \times 0.87 \times 0.2 \times 0.3 = 5\%$ 

Source: National Energy Foundation "Energy, Technology and Society"

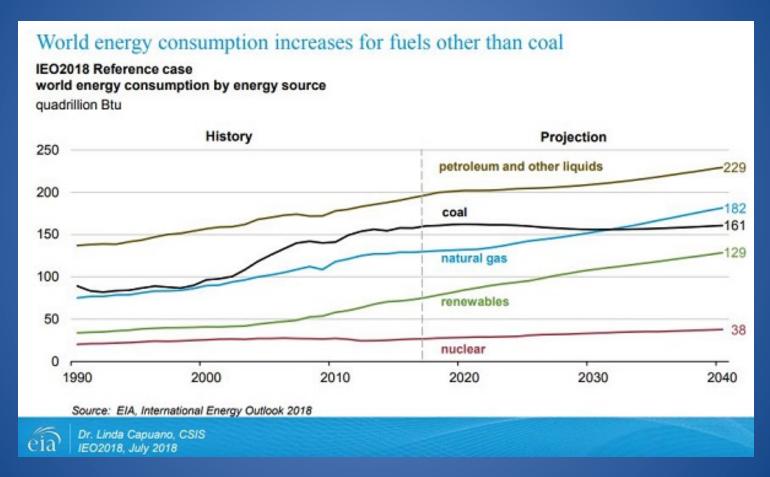


#### Energia in U.S.A.: consumo e produzione





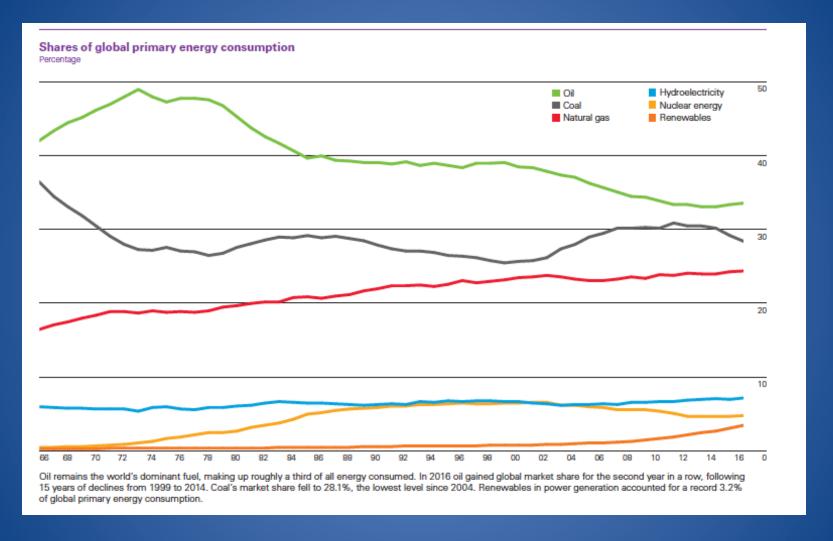
# Consumo mondiale per fonte energetica, 1990-ora e previsioni.





BTU: rappresenta la quantità di calore per innalzare di 1 °F la temperatura di una libbra d'acqua

#### Cambiamento nei mix energetici





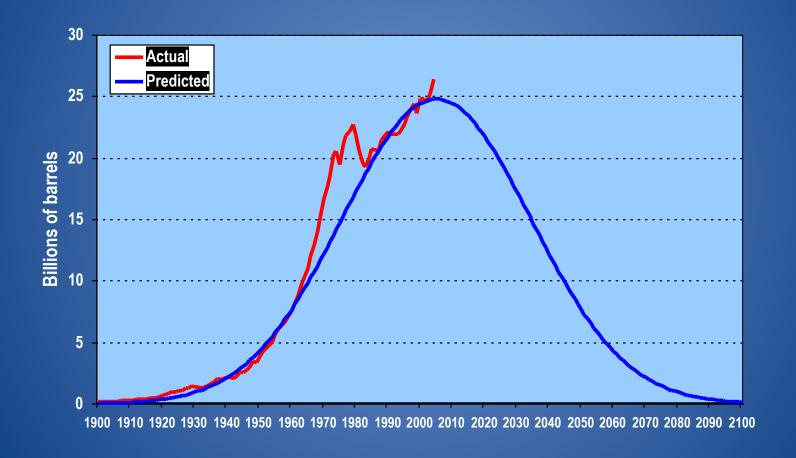


#### Picco di Hubbert

- Geologo che predisse nel 1950s che la produzione di petrolio negli stati uniti avrebbe raggiunto il picco negli anni 70:
  - La produzione di petrolio in USA raggiunse il picco nel 1973.
- Assunzione di risorsa energetica finita nel tempo.
- La produzione parte da zero.
- La produzione cresce fino ad un picco che non puo' essere superato.
- Una volta che il picco viene superato la produzione si riduce fino a che la risorsa finisce.

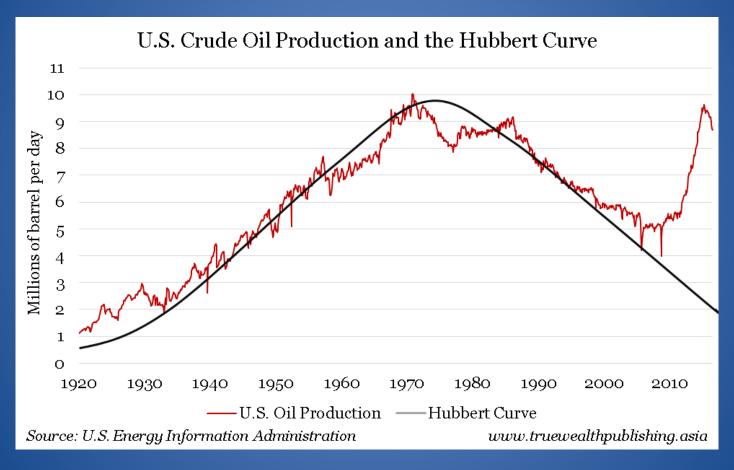


# Produzione mondiale annuale (1900-2004) e risorse stimate (1900-2100) di qualche anno fa





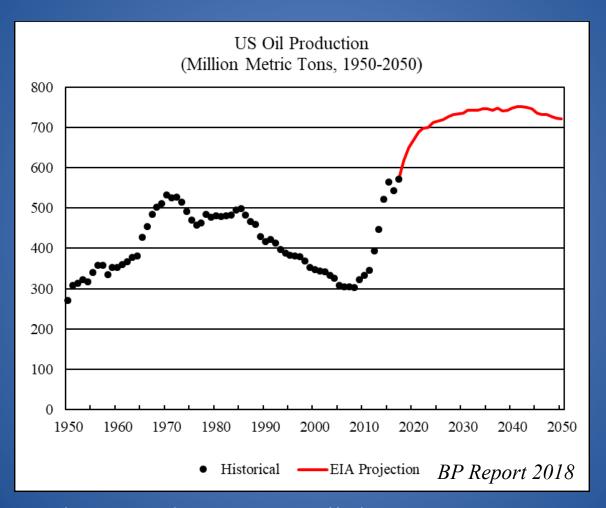
# Picco di Hubbert: qualcosa è andato storto





Tecnologia: fracking

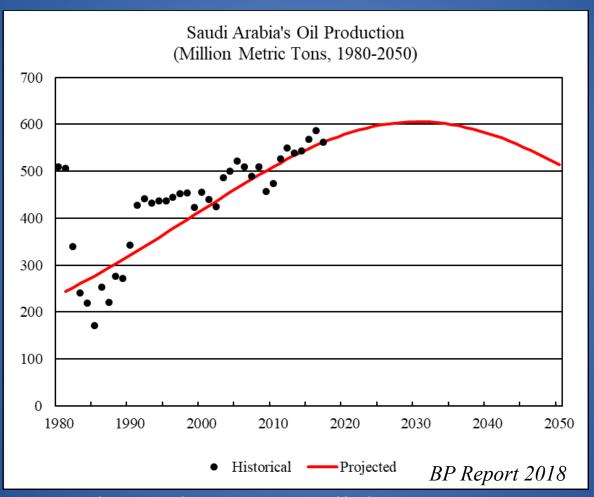
#### Picco di Hubbert: in ogni caso







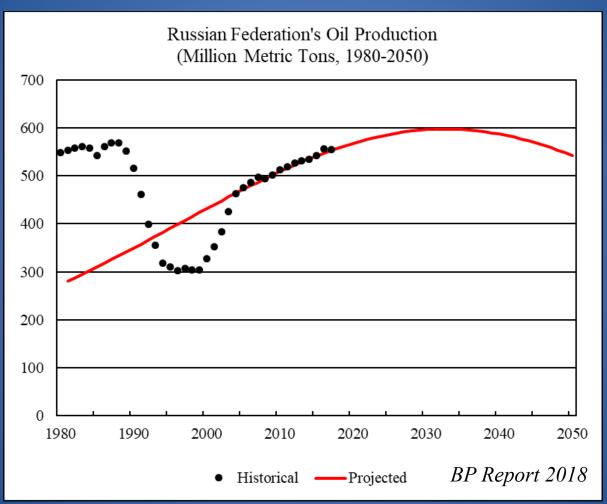
#### Picco di Hubbert: in ogni caso







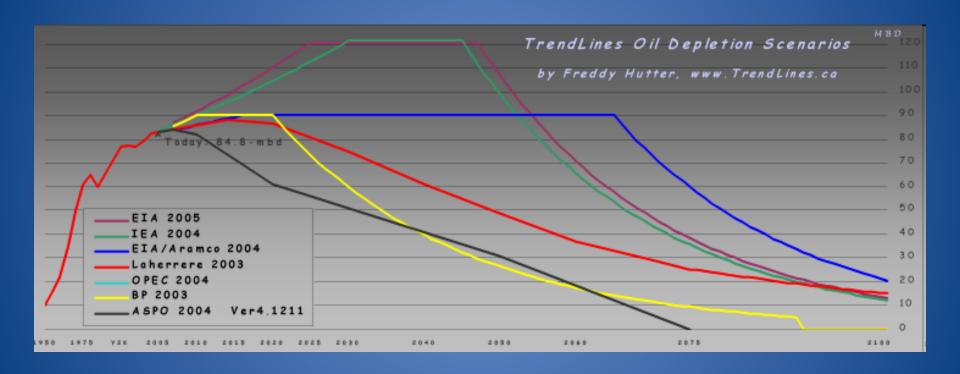
#### Picco di Hubbert: in ogni caso





Terzo produttore mondiale

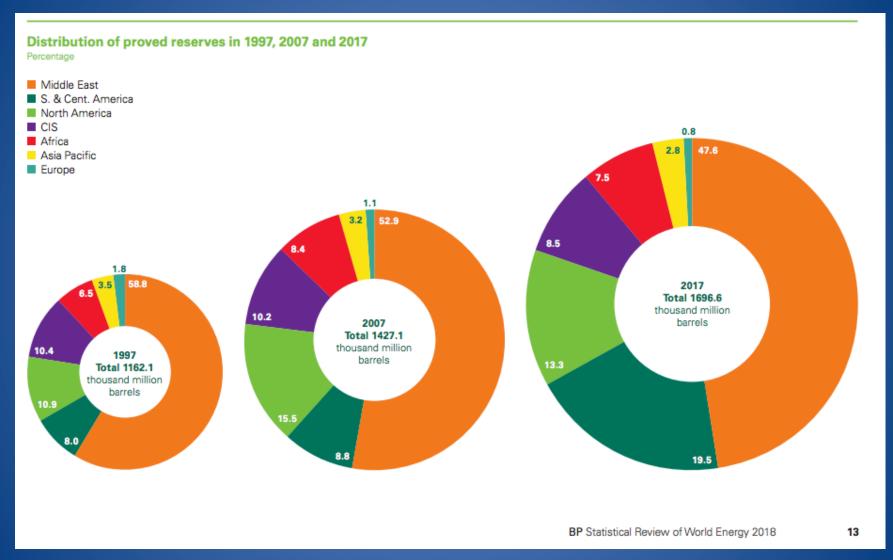
# Picco di Hubbert e proiezioni



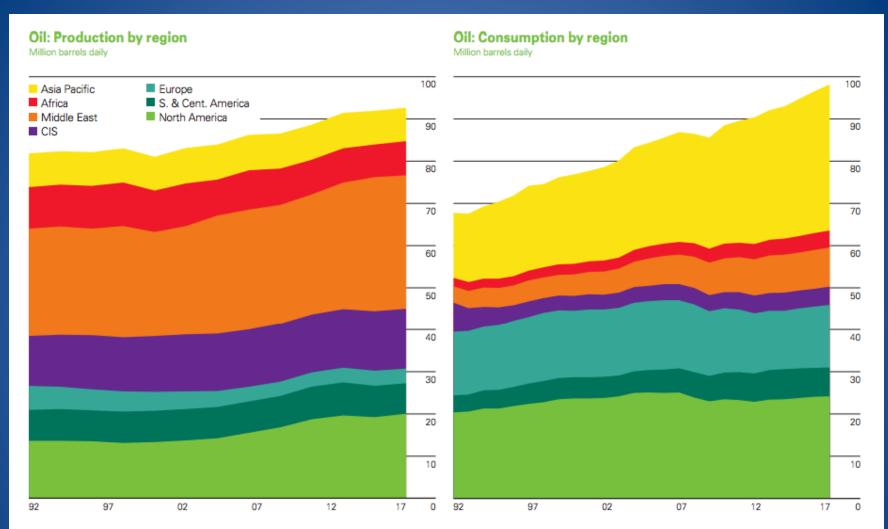
Qualunque siano le proiezioni il petrolio comunque finirà



# Riserve di petrolio



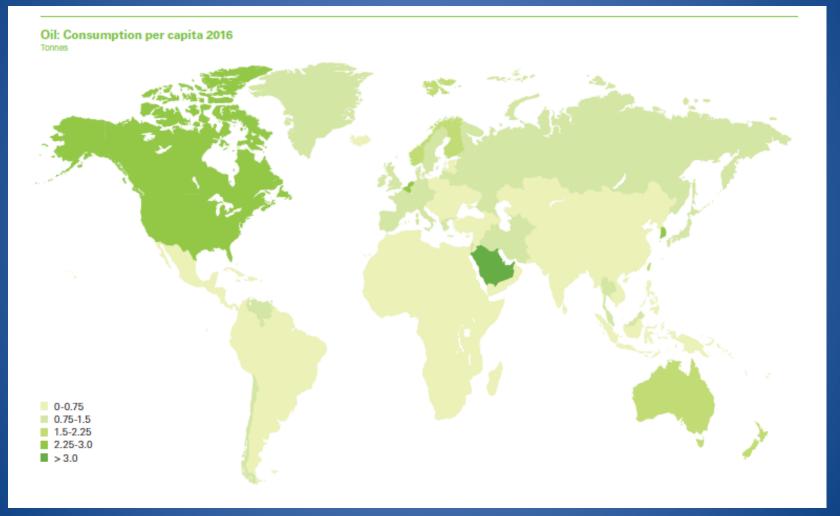




World oil production rose by only 0.6 million b/d in 2017, below average for the second consecutive year. Production fell in the Middle East (-250,000 b/d) and South & Central America (-240,000 Kb/d) but this was outweighed by growth from North America (820,000 b/d) and Africa (390,000 b/d). Global oil consumption growth averaged 1.7 million b/d, above its 10-year average of 1.1 million b/d for the third consecutive year. China (500,000 b/d) and the US (190,000 b/d) were the single largest contributors to growth.

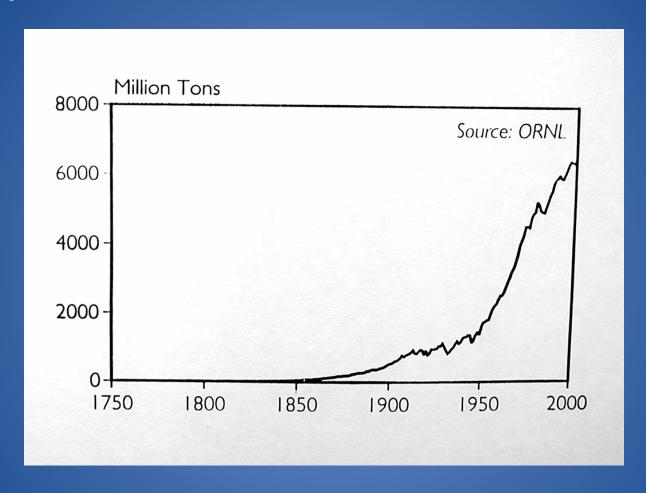


# Consumo di Petrolio pro capite





#### Inquinamento da combustibili fossili

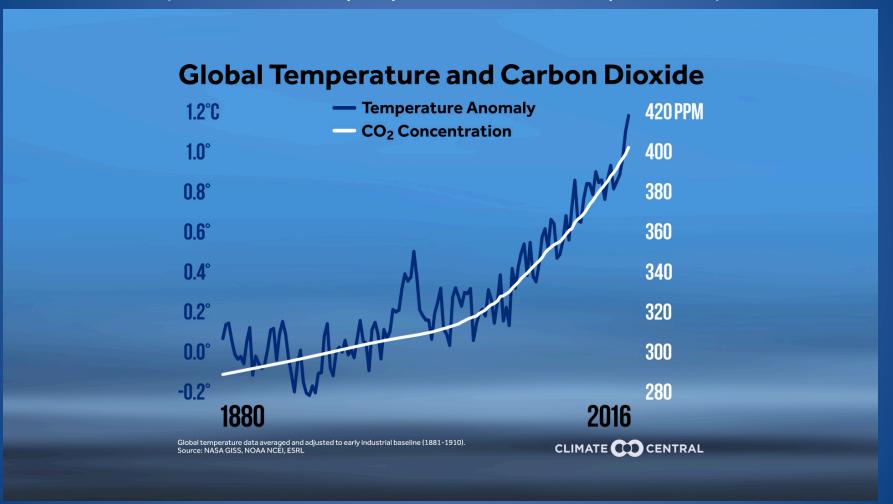


Emissioni di CO<sub>2</sub> da combustibili fossili da 1750 al 2000



# "Inquinamento"

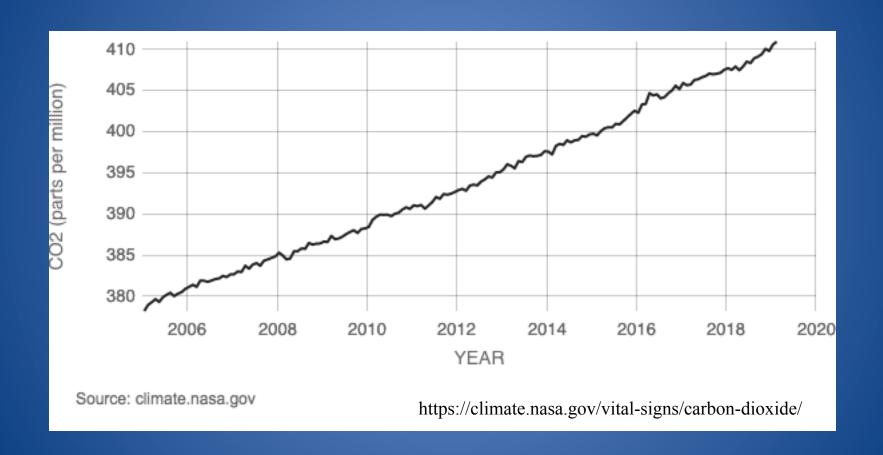
(la CO2 non è propriamente un inquinante)





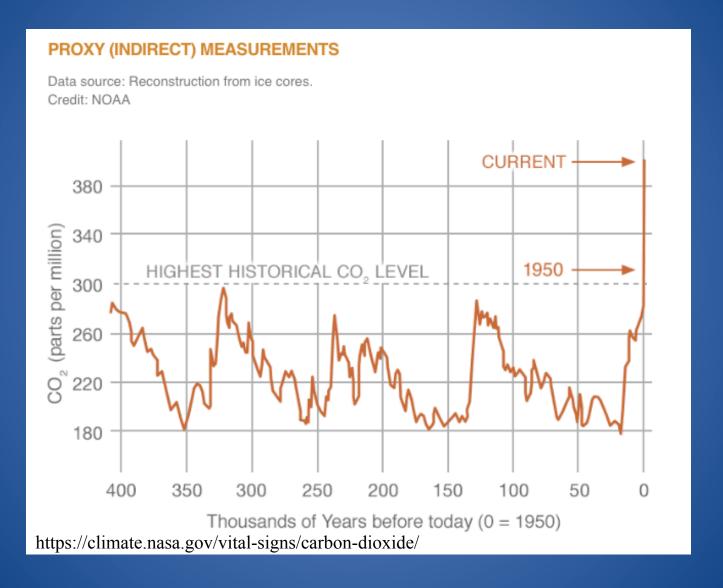
Andamento della CO<sub>2</sub> vs temperatura

# La crescita della CO<sub>2</sub>



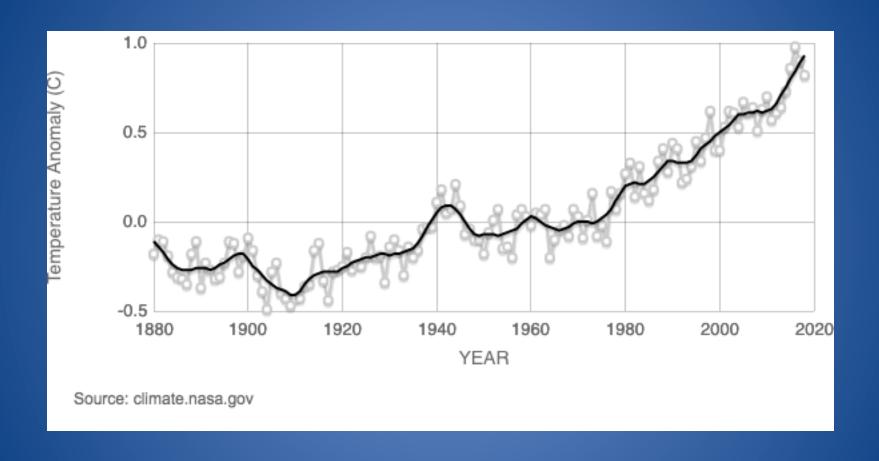


# La crescita della CO<sub>2</sub>



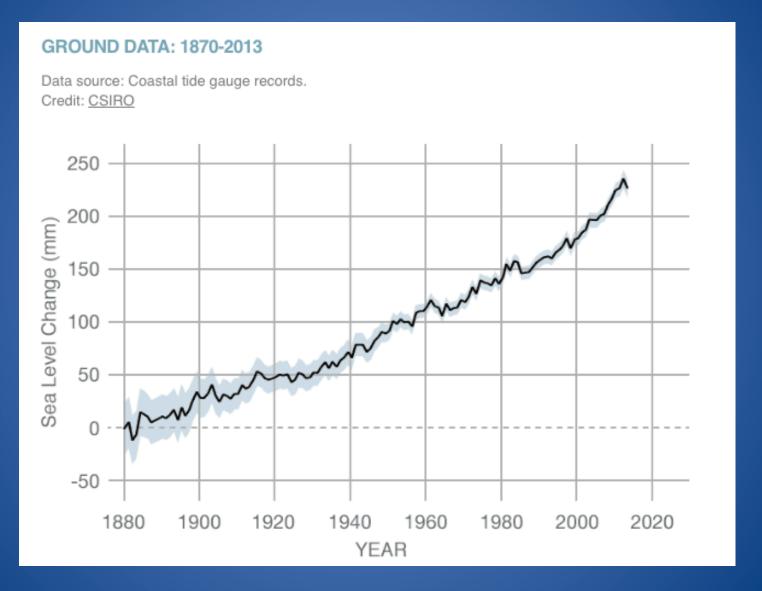


# La crescita della temperatura



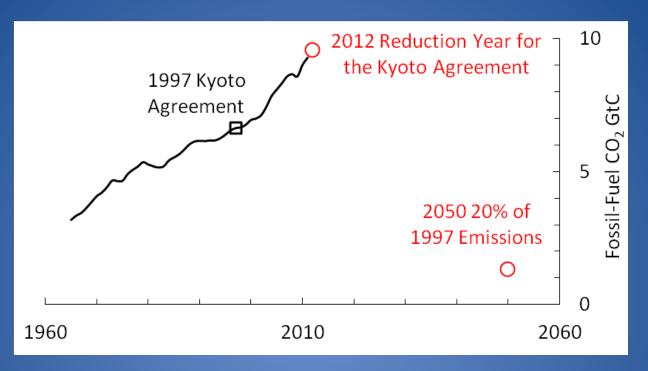


#### La crescita del livello dei mari





#### The Kyoto Agreement



- World fossil-fuel carbon-dioxide emissions from the BP Statistical Review
   the 2012 point is an extrapolation from 2010 and 2011
- For an 80% reduction by 2050
  - Imagine the collapse of the Soviet Union, repeated four times, for the entire world, voluntarily
  - On a personal basis, visualize going back to life in 1881



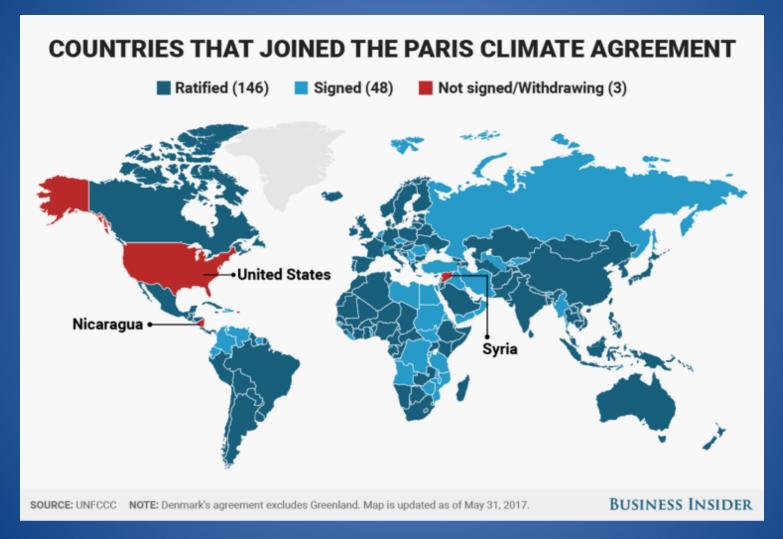
## Accordo di Parigi

Il 12 dicembre 2015 i 196 paesi partecipanti hanno concordato al termine della conferenza e all'unanimità un patto globale, chiamato Accordo di Parigi, per ridurre le emissioni come parte del metodo per la riduzione dei gas serra. Nel documento di 12 pagine i membri hanno concordato di ridurre la loro produzione di diossido di carbonio "il più presto possibile" e di fare del loro meglio per mantenere il riscaldamento globale "ben al di sotto di 2 °C" in più rispetto ai livelli pre-industriali. Il ministro degli Esteri francese Laurent Fabius ha detto questo piano "ambizioso ed equilibrato" è stato una "svolta storica" per l'obiettivo di ridurre il riscaldamento globale.

L'accordo non diventerà vincolante per gli Stati membri fino a quando almeno 55 paesi che producono oltre il 55% dei gas serra non avranno ratificato l'accordo. Ogni paese che ratifica l'accordo sarà tenuto a fissare un obiettivo di riduzione delle emissioni, ma il quantitativo sarà volontario. Ci sarà un meccanismo per forzare un paese ad impostare un obiettivo entro una data specifica, ma nessuna applicazione se l'obiettivo fissato non è soddisfatto: ci sarà solo un sistema "name and shame" ovvero una lista di paesi inadempienti, con l'obiettivo di incoraggiarli ad attuare il piano sul clima.



### Accordo di Parigi





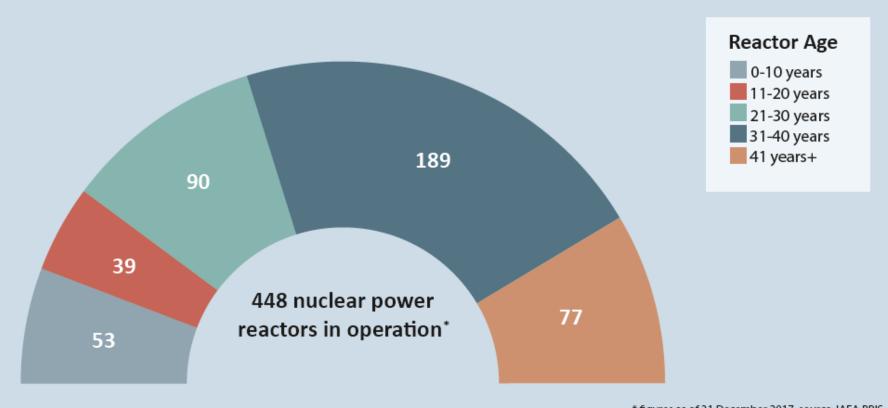
#### Energia nucleare

- Impianti nucleari
  - 448 impianti nucleari operanti (civili) nel mondo.
  - Pochissimi impianti nel prossimo futuro :
  - 30 paesi generano elettricità dal nucleare :
    - Circa il 17% di tutta l'elettricità del mondo. e.
  - Stati Uniti:
    - 100 impianti nucleari; circa il 20% dell'elettricità.
    - Le licenze durano circa 40 anni .
    - Molti impianti in USA andranno in estensione di licenza nel 2006.
    - Nessun nuovo reattore dal 1979 (Three Mile Island incidente).
  - Cina:
    - Pianifica di avere 2 nuovi reattori l'anno fino al 2020.



## Energia nucleare

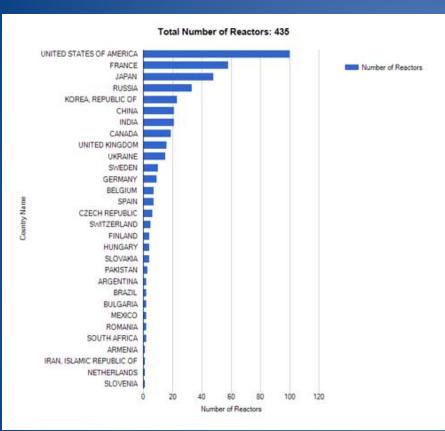
Age of World Nuclear Fleet
Age Distribution of Operating Reactors

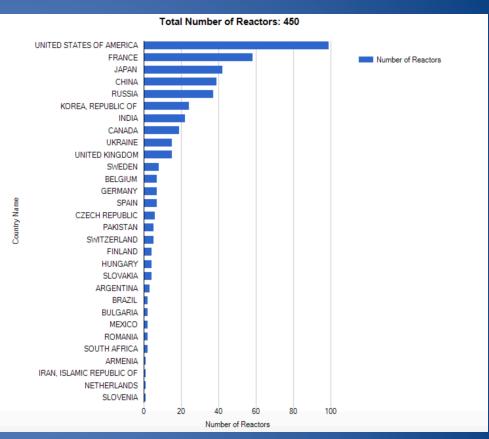




# Energia nucleare

2014 2017





Number of reactors in operation, worldwide, (IAEA 2017)



#### Residui da energia nucleare.

#### – Residui di basso livello :

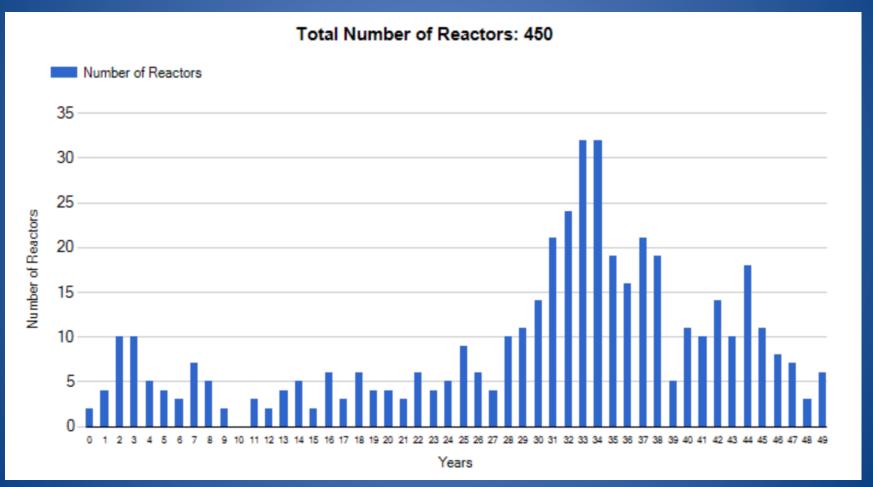
- Materiali usati per maneggiare le parti altamente radioattive dei reattori.
- Tubi dell' acqua e tute.
- Perdono la loro radioattività dopo 10-50 anni.

#### – Residui di alto livello:

- Uranio, plutonio, e altri elementi radioattivi prodotti durante la fissione.
- Le scorie nucleari dimezzano la loro radioattività in circa 10,000-20,000 anni.
- I siti di magazzinamento delle scorie devono essere geologicamente stabili.

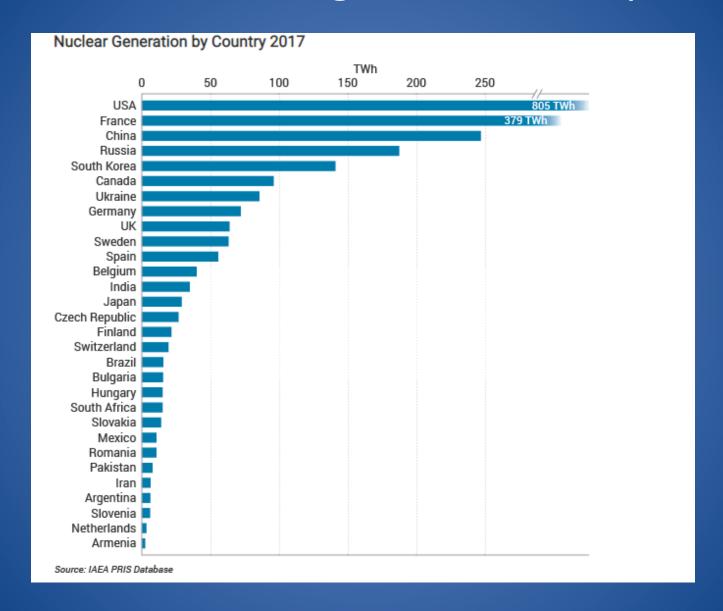


# Reattori per età



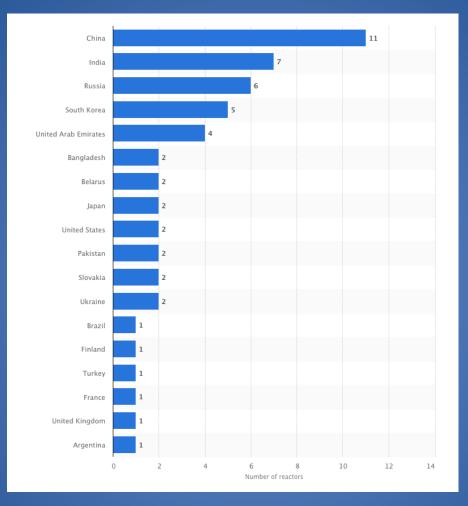


### Produttori di energia nucleare Top10





#### Unità nucleari in costruzione a Febbraio 2019



Sources: International Atomic Energy Agency PRIS

database; project sponsors

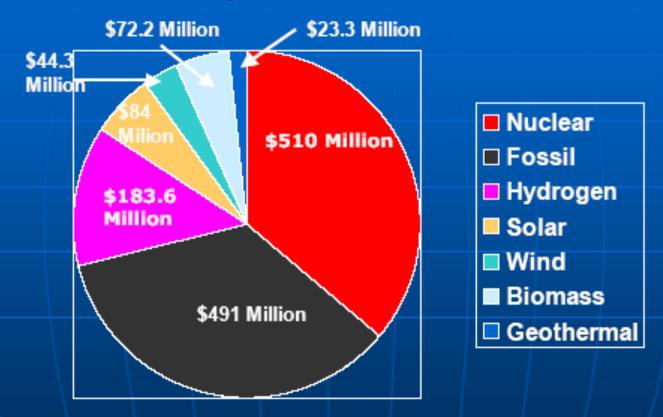
Updated: 1/14



#### **Pro Nucleare** Contro Nucleare •Riduzione della Incidenti o sabotaggi dipendenza dai combustibili •Immagazzinamento delle fossili scorie •Aumentata sicurezza •Alti costi di costruzione e sull'energia smantellamento •Benefici ambientali

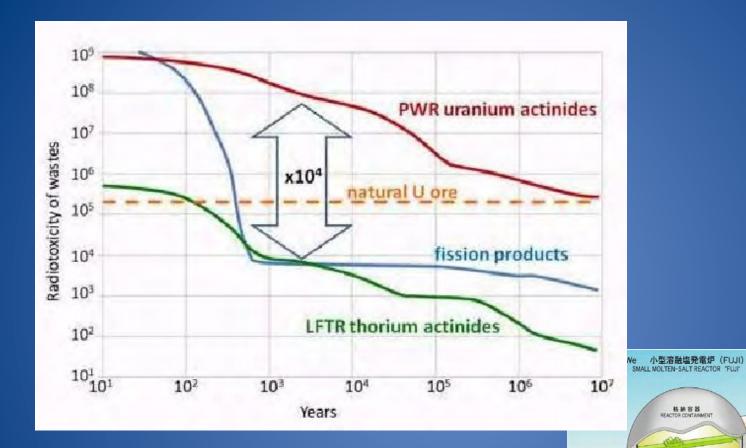


## Nuclear Energy gets the single largest R&D subsidy as a fuel source.



As an outcrop of the nuclear weapons program, between 1948 and 1998, 59% of R&D funding (\$66 billion in constant 1999 dollars) went to nuclear power. During that time, 23% went to fossil energy (\$26 billion), 11% to renewable energy (\$12 billion), and 7% to energy efficiency (\$8 billion). Source: Sustainable Energy Coalition.

#### Decadimento nucleare



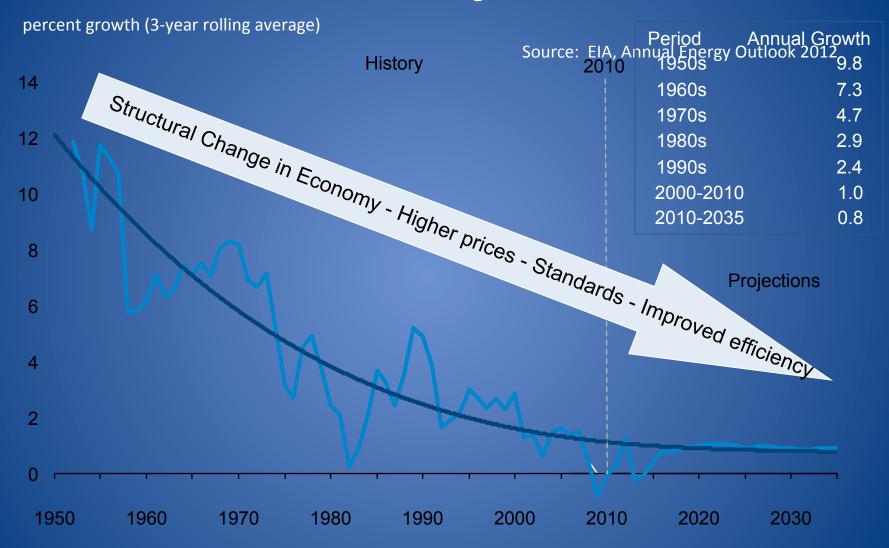


高温室 炉本体-REACTOR VESSEL 野内容様の907は主要を 接りは無料電 (about 90 volume % of reactor vessel is occupied by graphite i 緊急ドレインタンク EMERGENCY DRAIN-TANK 格納容器 REACTOR CONTAINMENT

水蒸気タービン発電機

水蒸気発生器 (STEAM GENERATOR 2次冷却材塩系

# While total electricity generation grows by 21% over the projection, the annual rate of growth slows

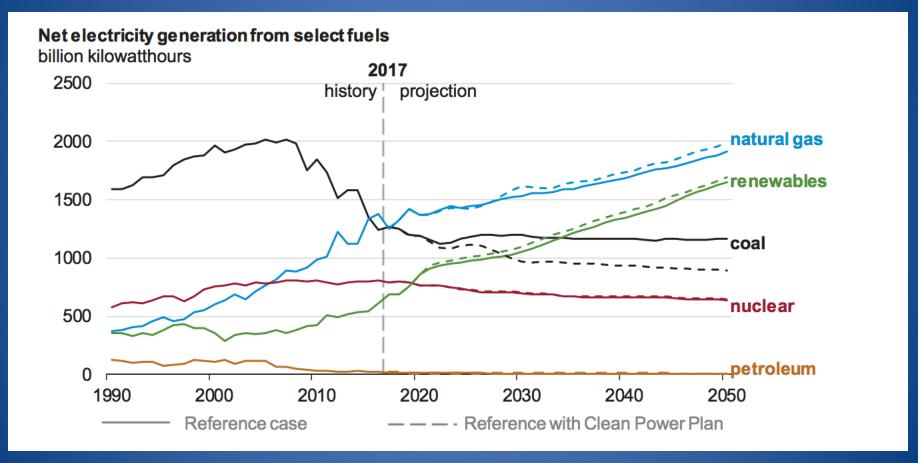




# Electricity mix gradually shifts to lower-carbon options, led by growth in renewables and natural gas

electricity net generation trillion kilowatthours per year

Source: EIA, Annual Energy Outlook 2017



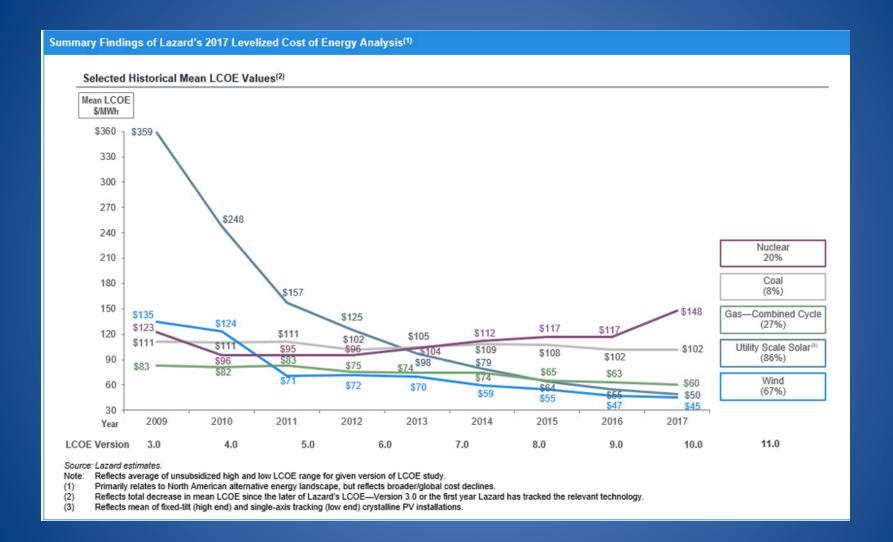


# Energia Rinnovabile

Ogni mezz' ora più energia solare raggiunge la terra di quanto sia rilasciata globalmente in un anno da combustibili fossili.



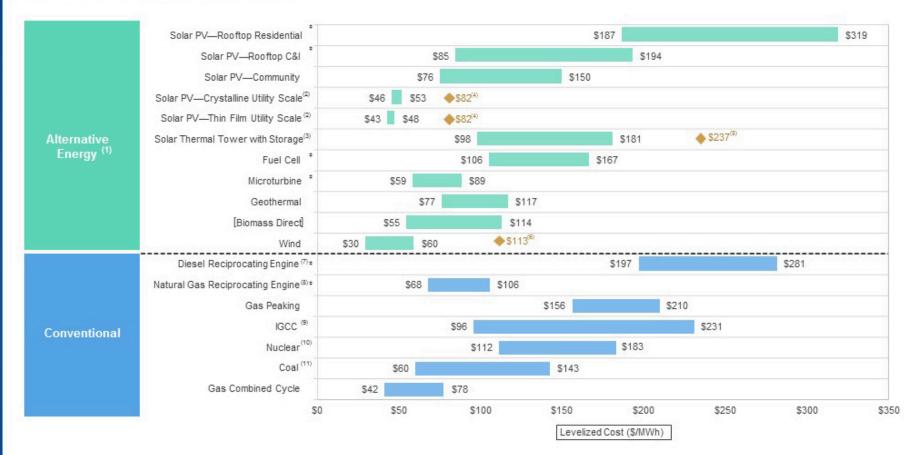
## Costo delle energie rinnovabili





# Costo delle energie rinnovabili

Unsubsidized Levelized Cost of Energy Comparison



Denotes distributed generation technology.



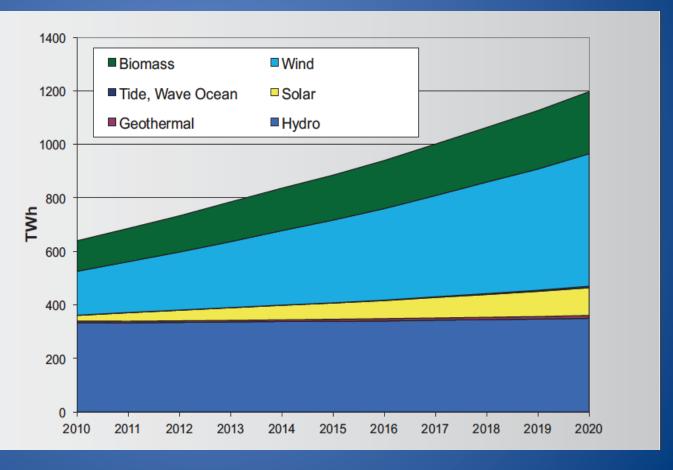
# LCOE: levelized cost of electricity

Il costo dell'elettricità generato da diverse fonti misura il costo della generazione di elettricità includendo l'ammortizzazione del capitale finanziario iniziale, il ritorno sull'investimento, come anche il costo operativo, del combustibile, e della indispensabile manutenzione. Il prezzo viene normalmente misurato in unità monetarie locali divise per unità di misura di lavoro dell'elettricità prodotta, ad esempio centesimi-per-kilowattora per piccoli numeri, oppure dollari-per-megawattora per le quantità maggiori.



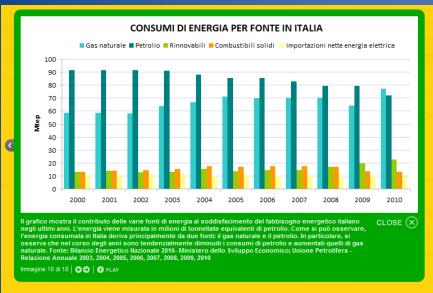
# Piani per la produzione di energia rinnovabile in EU

Fig. 11:
Planned European Union
electricity production according to
the National Renewable Energy
Action Plans



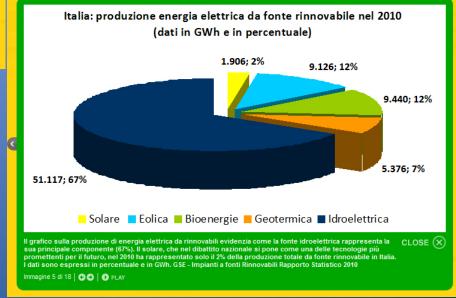


# Energie Rinnovabili in Italia nel recente passato



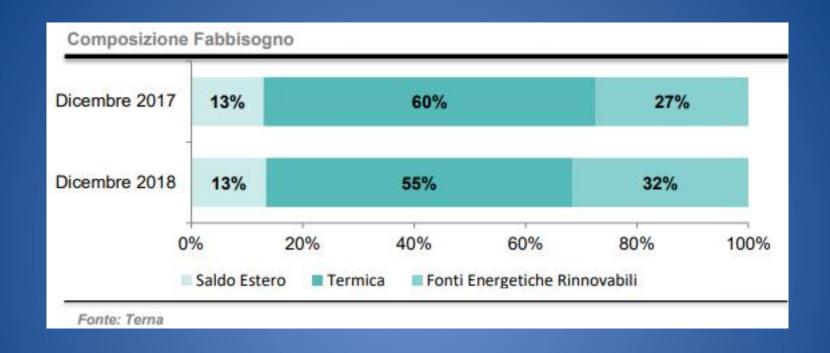
- Fino a qualche anno fa le energie rinnovabili coprivano circa il 20%
- La rinnovabile più sviluppata era l'idroelettrica, all'ultimo posto fotovoltaico

Petrolio e carbone coprivano
 il 65% del fabbisogno nazionale





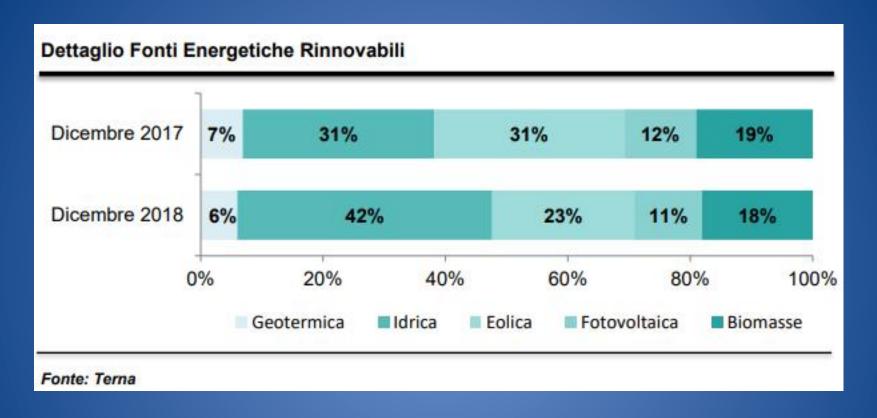
# Energia in Italia oggi



Produzione industriale energetica a dicembre 2018



# Energie Rinnovabili in Italia oggi



Produzione energetica RINNOVABILE a dicembre 2018



# Bilancio energetico in Italia oggi

200			gent .				
H	and	OIL	-n	orc	112		
~11	SHILL	310	See S. E.	015	9164		

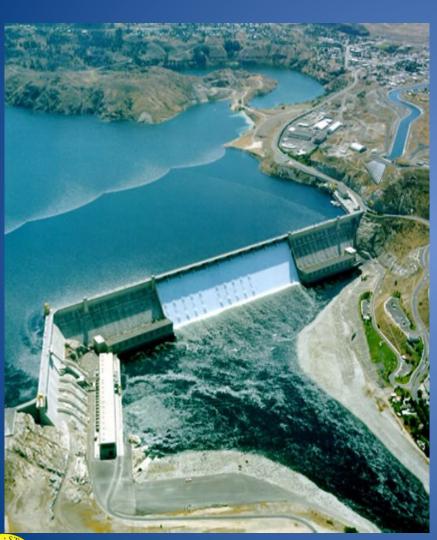
[GWh]	Dicembre 2018	Dicembre 2017	%18/17	Gen-Dic 18	Gen-Dic 17	%18/17
Idrica	3.576	2.282	56,7%	49.275	37.557	31,2%
Termica	16.315	17.966	-9,2%	185.046	200.305	-7,6%
di cui Biomasse	1.486	1.509	-1,5%	17.683	17.818	-0,8%
Geotermica	494	500	-1,2%	5.708	5.821	-1,9%
Eolica	1.910	2.257	-15,4%	17.318	17.565	-1,4%
Fotovoltaica	911	861	5,8%	22.887	24.017	-4,7%
Totale produzione netta	23.206	23.866	-2,8%	280.234	285.265	-1,8%
Importazione	3.967	3.662	8,3%	47.179	42.895	10,0%
Esportazione	410	310	32,3%	3.270	5.134	-36,3%
Saldo estero	3.557	3.352	6,1%	43.909	37.761	16,3%
Pompaggi	232	293	-20,8%	2.233	2.478	-9,9%
Richiesta di Energia elettrica (1)	26.531	26.925	-1,5%	321.910	320.548	0,4%
(1) Richiesta di Energia Elettrica = Produz	ione + Saldo Estero	– Consumo Pomp	aggio			

) Richiesta di Energia Elettrica = Produzione + Saldo Estero – Consumo Pompaggio.

Fonte: Terna



## Idroelettrico



- Pro
  - Grande produzione
    - Contro
  - Impatto sul territorio
    - Costi elevati impianti
    - Dipendenza da fattori climatici e territoriali



# **Eolico**

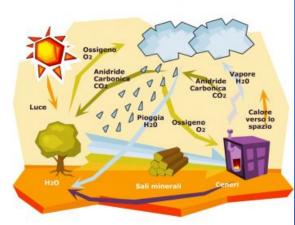


- Pro
- Bassi costi
- Facilità d'impianto
  - Contro
- Produzione Media
  - Dipendenza da fattori climatici territoriali



# BioMasse e BioGas





- Pro
- Recupero rifiuti
- Biodegradabilità
  - Ciclo anidride carbonica
    - Contro
    - Grandi aree
    - Fertilizzanti
- Dipendenza climatica e territoriale



# Fotovoltaico



- Pro
  - Diffusione capillare
    - Auto produzione
  - Nessuna emissione
- Contro
  - Bassa produzione
    - Costi medio-alti

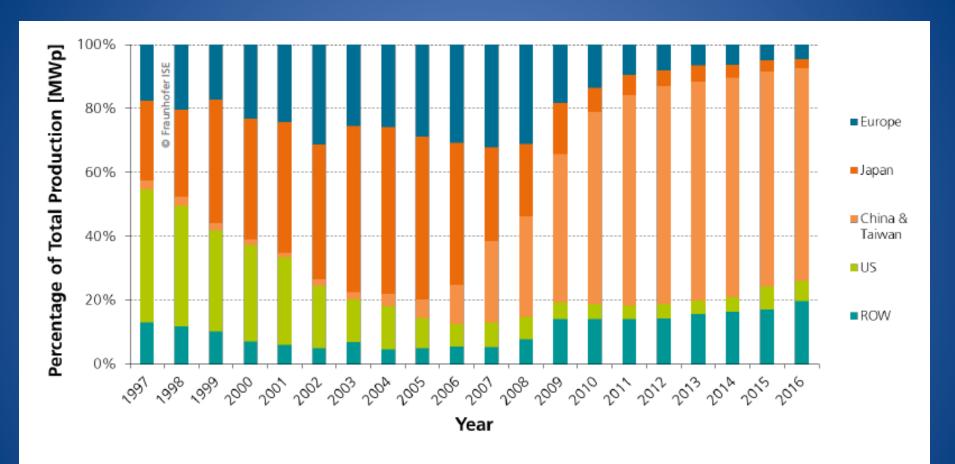


## Installazioni di fotovoltaico

Top Ranked Markets by Cumulative Historical and Forecasted Demand, 2001-2022E Rest of World United States India Germany Mexico Australia United Kingdom Canada | Brazil | South Korea Thailand Chile III Morocco IIII South Africa Philippines | Turkey | Jordan IIII UAE III 0 50,000 100,000 150,000 200,000 250,000 300,000 350,000 Cumulative Installed and Forecasted Demand (MWdc) ■ 2001-2016 ■ 2017E ■ 2018E ■ 2019E ■ 2020E ■ 2021E ■ 2022E



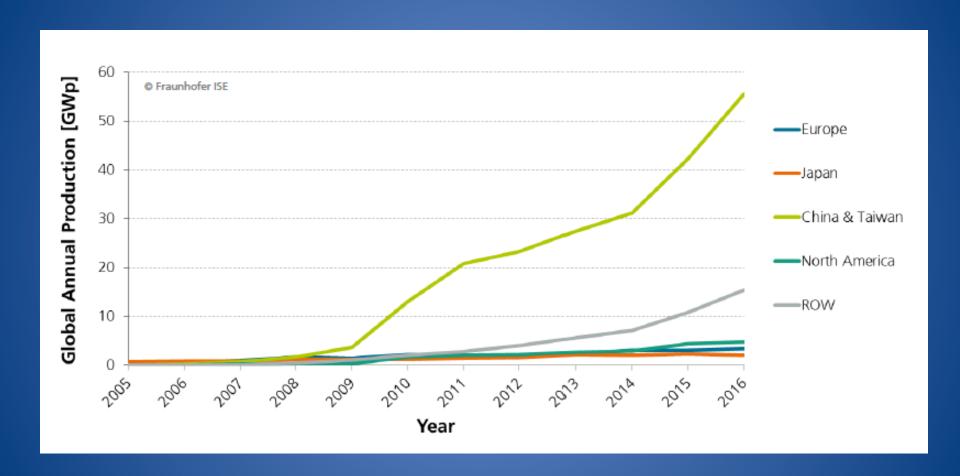
## Produzione di moduli



Data: Up to 2009: Navigant Consulting; since 2010: IHS. Graph: PSE 2017

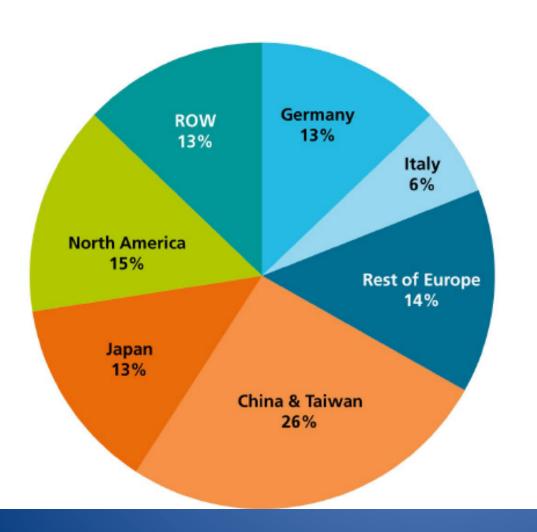


## Produzione di moduli





# Installazioni per regione



The total cumulative installations amounted to 320 GWp at the end 2016.

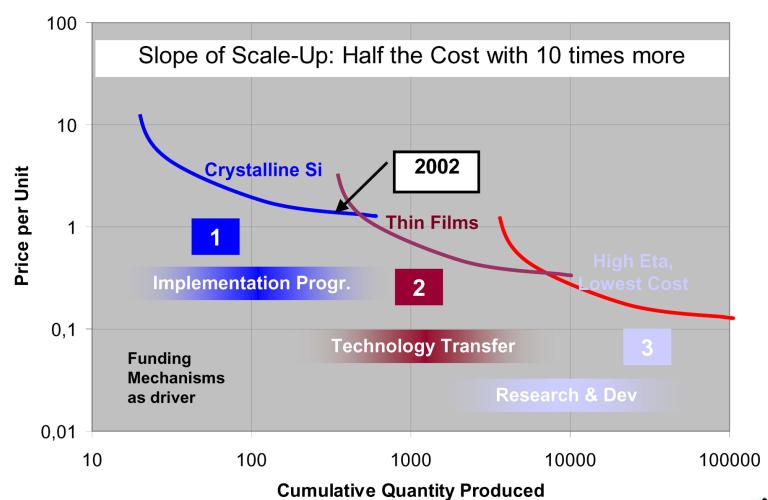
All percentages are related to total global installations, including off-grid systems.

Data: IHS. Graph: PSE 2017





#### **Learning Curves of Technology**

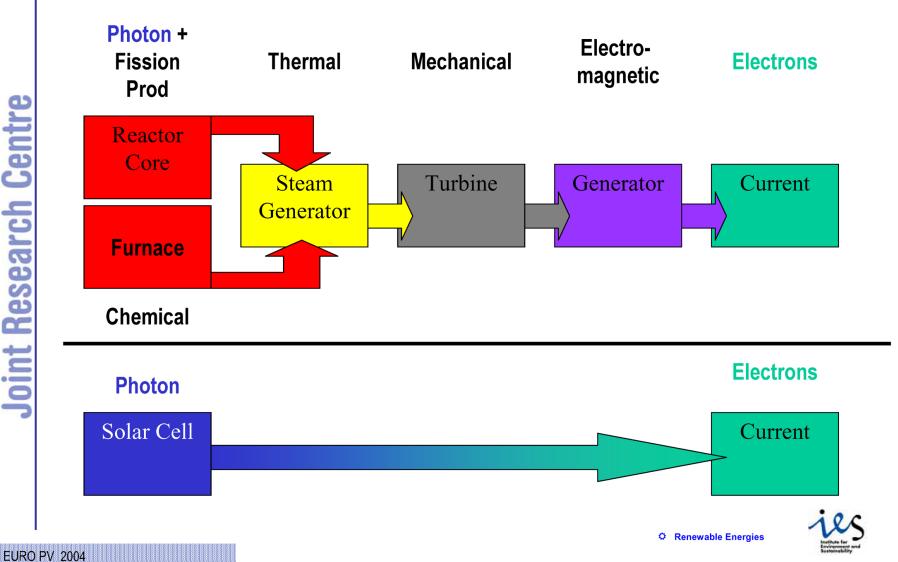


Renewable Energies



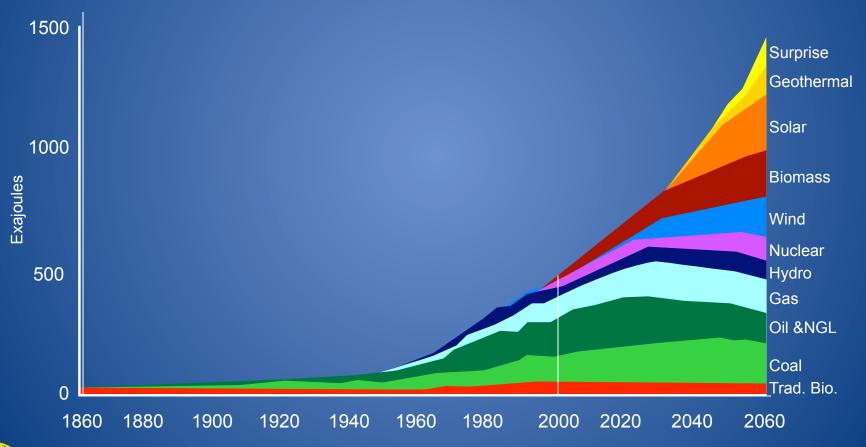


#### Why Solar Cells



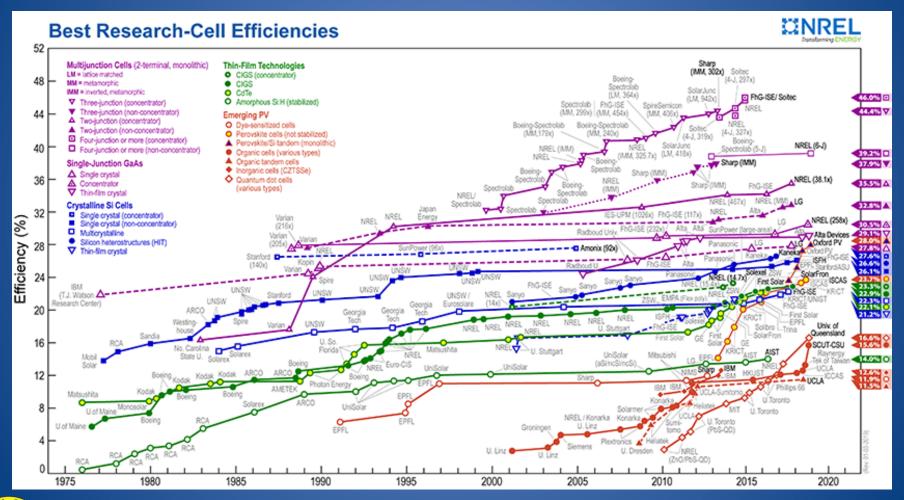


## Shell Sustained Growth Scenario





# La curva di apprendimento e l'efficienza







#### Silicon Wafer Based Solar Cells

> 85 % of today's production: Single-crystalline (Cz-Pulling) Multicrystalline (Casting)

record cell efficiencies: 21 - 24%

average module efficiencies: 13 - 17%

70% of feedstock from un-usable electronic-grade material

- Energy-balance (~ 2 4 years energy payback)
- Limited supply, if no solar-grade manufacturing

Renewable Energies



EURO PV 2004







#### **Common Issues for Thin Film Solar Cells**

Substrate

glass, prize, quality,...

TCO's

optics, conductivity, stability, costs

Encapsulation

Materials, reliability, stability, accelerated ageing

Test Equipment sunsim, QE, OBIC

Life Cycle Engineering

LCA, EoL-Logistics, Energy-Payback

TFSM (Si, CdTe, CIS)

Manufacturing Equipment

laminator, patterning, conductors, sputtering

Recycling

glass, Te, In, frames, ...

System Technology

Inverter, Storage, ...

Standards, Certification, Approval, Legal Aspects

**Building Integration** 

**Market Penetration** 

Cost, Acceptance, Competition

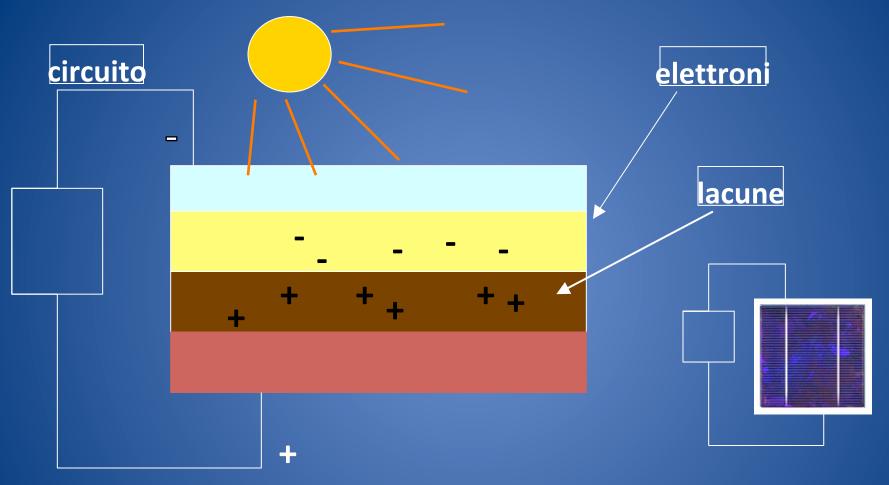
Renewable Energies







#### Come funziona una cella solare?

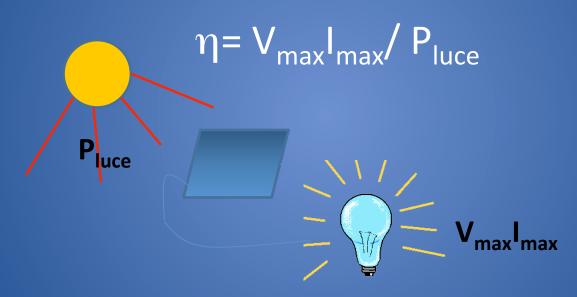


Il sole libera elettroni e cariche positive (lacune) che si muovono per una differenza di potenziale interna



## Efficienza (η)

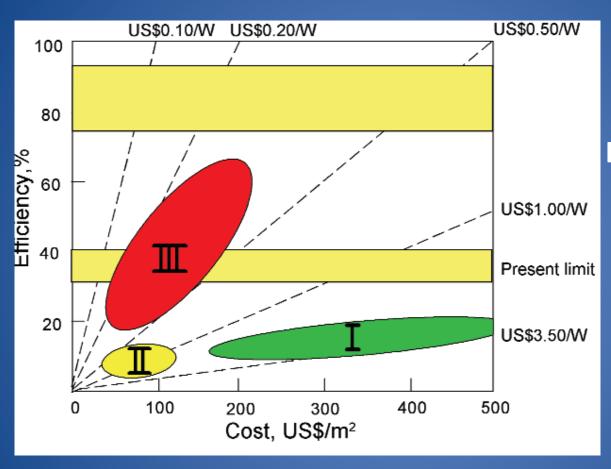
L' efficienza di una cella è data dal rapporto tra la potenza della cella e la potenza della luce incidente :



Una efficienza del 10% significa quindi che solo il 10% della potenza della luce solare viene convertita in potenza elettrica



## Rapporto efficienza /costo



I: Silicio cristallino
II: Film sottili
III: ?

Il costo al Watt dipende da quanto è basso il rapporto tra l'efficienza ed il costo



## Le tre generazioni di fotovoltaico a confronto

1ª generazione: celle "convenzionali": Silicio monocristallino e policristallino Buona efficienza, alti costi, ridotta scalabilita industriale Vendite commerciali dagli anni 70'

Efficienza discreta, bassi costi di produzione, alta scalabilita' industriale

Vendite commerciali dalla metà degli anni 80'

3ª generazione:

celle organiche

Efficienza discreta, bassi costi di produzione, alta scalabilità, bassa stabilità

•celle plastiche

Bassa efficienza, bassi costi di produzione, alta scalabilità, bassa stabilità

Quantum wells

Altissima efficienza, alti costi di produzione.

# Sviluppo temporale delle diverse tecnologie

Mercato attuale e/o previsto delle diverse tecnologie (inizio-fine)

Tecnologia PV	Generazione PV	Tempo previsto dall'entrata nel mercato al declino
Silicio Cristallino	1	1970 - 2020
Silicio Amorfo	2	1983 - 2025
Silicio a film sottile	2	2001 - 2050
CdTe	2	1995 - 2050
CIS/CIGS	2	2000 - 2050
DSC	3	2003 - 2055
DSC – ibrido	3+	2015 - 2100
Organico – ibrido	3+	2015 - 2100
Biologico	4	2030 - 2100+



#### Fotovoltaico di prima e seconda generazione

#### Generazioni della tecnologia delle celle solari

#### Prima generazione:

Silicio cristallino
 Vendite commerciali dagli anni 70'

#### Seconda generazione

- Semiconduttori a film sottile, silicio e non-silicio. Vendite commerciali dalla metà degli anni 80'



#### Terza e quarta generazione di fotovoltaico

Terza generazione PV:

- Celle solari plastiche (PV organico)
- Celle alle perovskiti
- Celle a nano-tecnologia
- Celle solari a giunzioni multiple.

Quarta generazione di celle solari dalla biologia.





# What's on the Horizon?

First Generation: Single and polycrystalline wafer cells

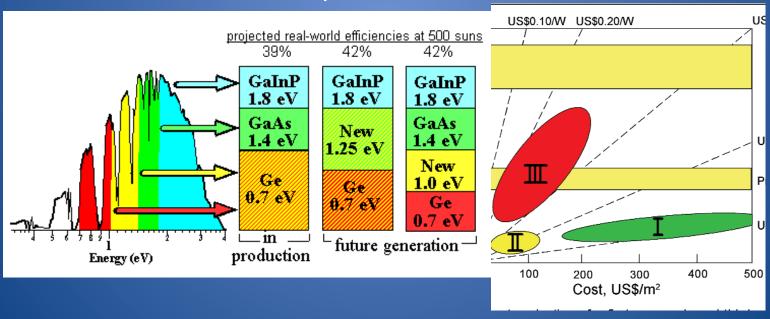
Second Generation: Thin film cells

Third Generation: Thin film cell efficiency is increased by using

multiple layers in tandem and matching the

band gaps of each layer to a different region of

the solar spectrum.





#### Il futuro della prima generazione

- Efficienze di conversione stabilizzate a 17-24 % (con efficienza dei moduli installati di 12-22%)
- Aumenti in efficienza tendono ad andare di pari passo con il costo dell'aumento di complessità
- Miglioramenti nel rapporto efficienza/costo possono essere ottenuti con la riduzione dei costi di produzione.



#### Il futuro della seconda generazione

#### Celle solari a film sottili

- •Costi di produzione minori attraverso metodi di deposizione in continua (in linea).
- •Efficienze nell'ordine di 13-18% sul modulo, del 16-23 % su cella in laboratorio.
- Problemi di percezione per il CdTe



#### Terza generazione

#### Celle organiche

•Le prime celle solari organiche- DSC (Dye solar cell).

Sistema di Fotosintesi artificiale Artificial da Prof Michael

Graetzel in Svizzera.

•Primo prodotto DSC disponibile sul mercato è il STI DSC Solar Façade Panel

•Efficienze delle DSC sopra il 10% per celle in laboratorio, con moduli di circa metà del valore.



#### Il futuro della terza generazione

- •Utilizzo di molecole organiche o polimeriche come materiale fotovoltaico attivo.
- •Risultati recenti riportano efficienze del 6-7% per composti basati su polimeri PPV.
- •Molecole di ftalocianine come film di 100 nanometri su substrato plastico e ricoperto da un film conduttore trasparente.





### **Next Generation: Approaches for 86%**

- Multiple Bandgap in stacks
- Multiple transfers
- Exploitation of Recombination with impurity doping:
  - "Quantum-Wells", Intermediate Band-gaps
- Graded Bandgap: For each Photon it'sown Band-gap
- Polymer / Fullerenes

Or: Wavelength-conversion before PVconversion (TPV)? Renewable Energies





### Integrazione nei palazzi

Prezzo	Competitivo con prodotti convenzionali di rivestimento
Performance ottimizzata	A diversi condizioni di luce
Forma	Estetica
Elementi di bilancio del sistema	Installazione, frame, inverter.



#### Building integrated



Silicon Façade System at the University of Melbourne, Australia



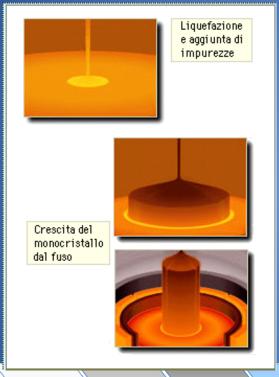
DSC Façade System at the CSIRO Energy Centre Newcastle, Australia

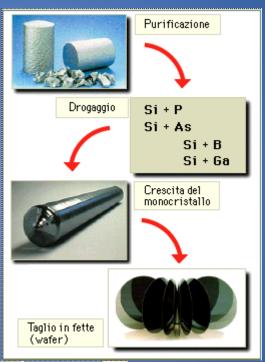




# Celle e moduli a base di silicio mono(poli)cristallino

Tecnologia matura, uguale a quella per la produzione di circuiti integrati per l'elettronica







Assenza di ossigeno e alte temperature, assemblaggio delle celle in serie sul modulo: alti costi di produzione



# Realizzazione dei moduli fotovoltaici al silicio mono(poli)cristallino

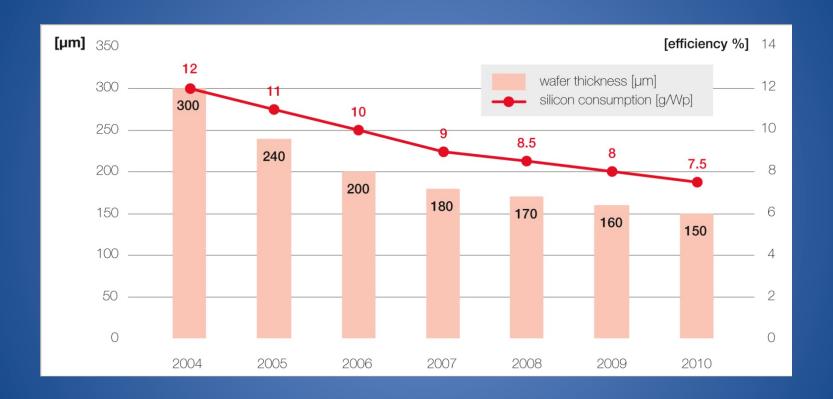




Assemblaggio delle celle nel modulo



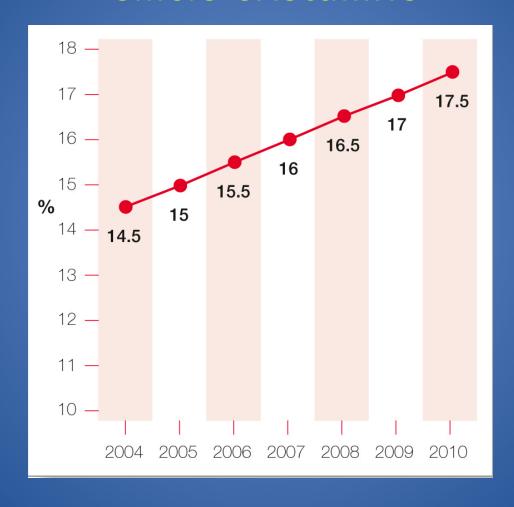
# Spessore del wafer e quantità di silicio



La riduzione della quantità di silicio riduce i costi.



# Aumento dell' efficienza media delle celle a silicio cristallino





#### Celle solari a film sottile

Sono celle a base di materiali altamente assorbitori della luce e quindi hanno bisogno di spessori minimi (<10 micron) ✓ vantaggi:

- minima quantità di materiale necessario
  - varietà di metodi di processo
    - alta scalabilià industriale
      - moduli leggeri
    - basso costo di produzione
  - possibilità di moduli flessibili
    - Nuove applicazioni:
      - 1. Flessibile
      - 2. Bifacciale
  - 3. Tandem (maggiore efficienza)



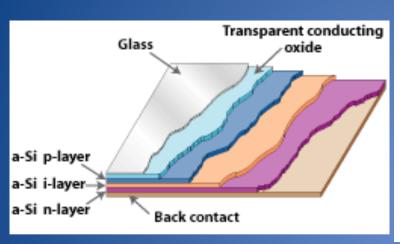
#### Celle solari a film sottile

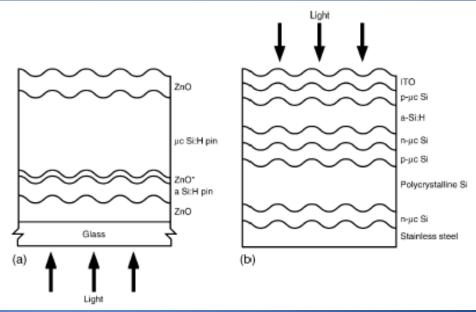
Tecnologie in competizione:

- a-Si (RWE, InterSolar, USSC, Kaneka, ...)
  - Silicio a film sottile CSG (laboratori)
  - <u>CdTe</u> efficienza massima ~18.7%
     (Antec Solar, First Solar, SSE: Arendi)
- CIS (CuInGaSe<sub>2</sub>) efficienza massima ~20.4%
   (Würth Solar, Shell Solar,..)



#### Silicio amorfo & micromorfo



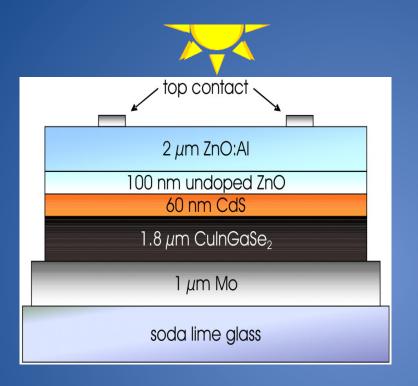


Il silicio amorfo ha il vantaggio che può essere depositato su substrati flessibili. Tuttavia i moduli a singola giunzione, a causa di un fenomeno di degrado iniziale, hanno un' efficienza intorno al 5%.

Il Silicio Amorfo a multigiunzione e micromorfo, anche se può arrivare a efficienze stabili intorno all' 11%, è composto da diversi strati



# CuGaInSe<sub>2</sub>/CdS: CIGS



Record di efficienza ~ 20.8% su piccole aree

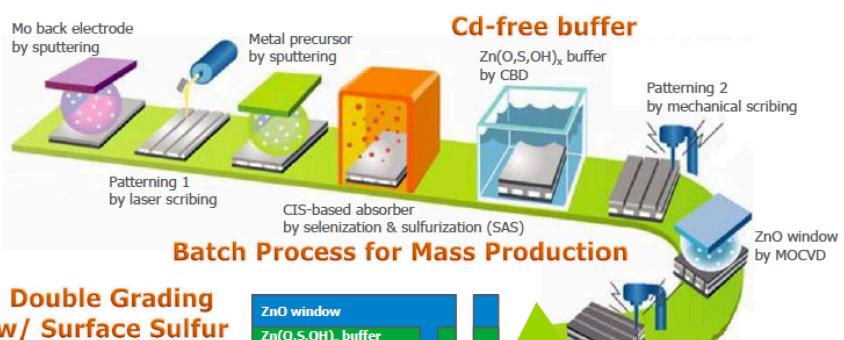
#### Punti di forza:

Dispositivi ad alta efficienza e stabili nel tempo Punti da sviluppare:

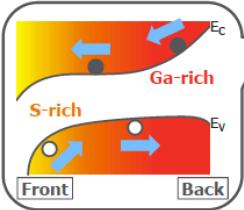
Tecniche semplici, riproducibili, facilmente scalabili



#### Solar Frontier's CIGS technology







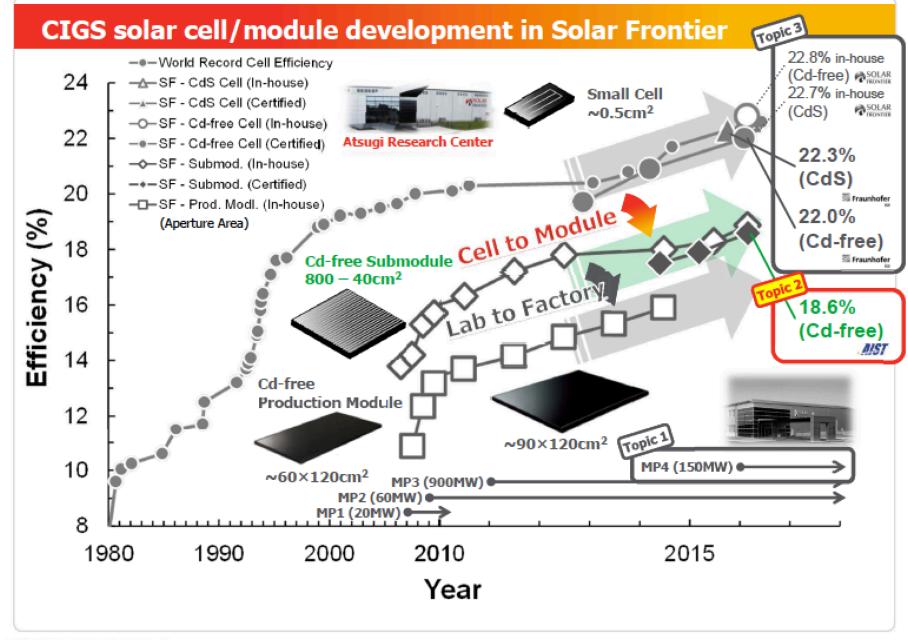
Zn(O,S,OH), buffer S-rich front grading CIS-based absorber Ga-rich back grading Mo back electrode P2 P3 Glass substrate P1

**Device Structure** 

Patterning 3 by mechanical scribing

**Fabrication Process** 

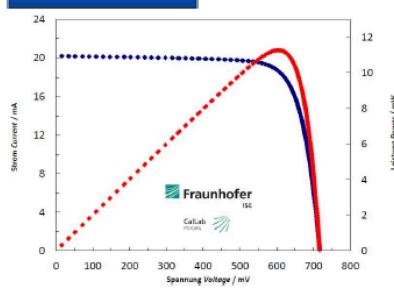




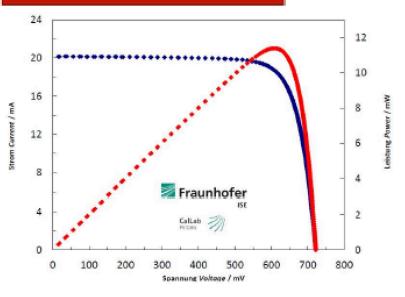


#### **Certified record efficiencies**

#### 22.0% Cd-free



#### 22.3% with CdS buffer



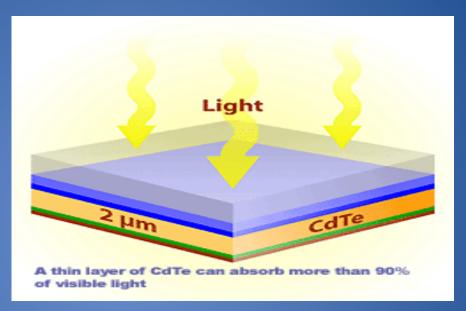
	1st buffer	2 <sup>nd</sup> buffer	η (%)	V <sub>oc</sub> (mV)	J <sub>sc</sub> (mA cm <sup>-2</sup> )	FF (%)
Prev. Cd-free	Zn(O,S,OH)	ZnO	20.9	685.8	39.9	76.5
New CdS	CdS	ZnO	22.3	(721.9)	39.4	78.2
New Cd-free	Zn(O,S,OH)	(Zn,Mg)O	22.0	717.0	39.4	77.9

R. Kamada et al., 43rd IEEE PVSC (2016)



## La cella CdTe/CdS

Record di efficienza ~ 20,4%

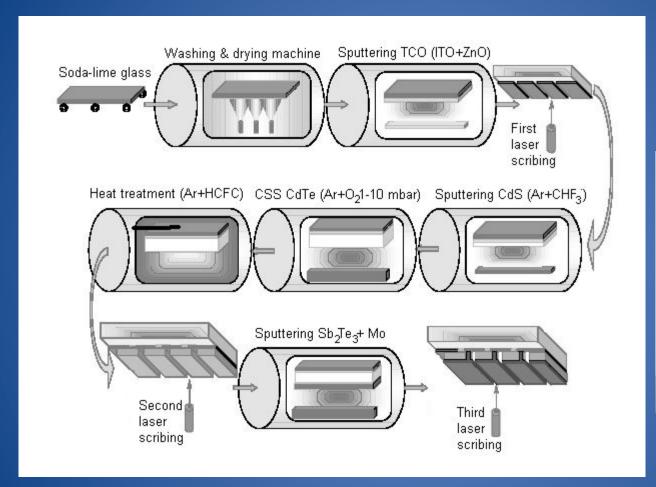


#### Punti di forza:

- ✓ Tecniche semplici, riproducibili, facilmente scalabili
  - ✓ Dispositivi ad alta efficienza e stabili nel tempo



## La cella CdTe/CdS



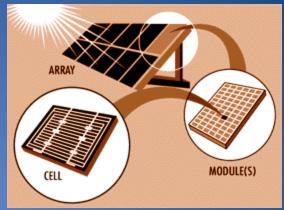


http://www.solar-sse.comhttp://www.arendi.eu



## Dalla cella al modulo

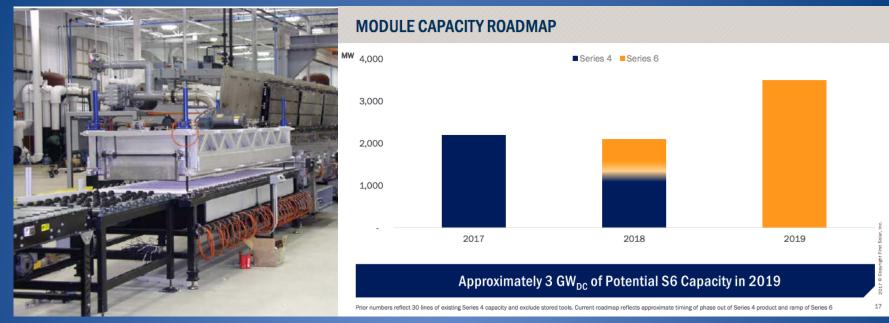




	Efficienza tipica del modulo [%]	Massima efficienza del modulo [%]	Record di efficienza in laboratorio [%]
Silicio Monocristallino	12-15	22,7	24,7
Silicio Policristallino	11-14	15,3	19,8
Silicio Amorfo	5-7		12,7
CdTe	8-10	10,5	16,5
CIGS	8-10	12,1	20



## First Solar: produzione CdTe



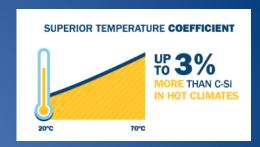
www.firstsolar.com

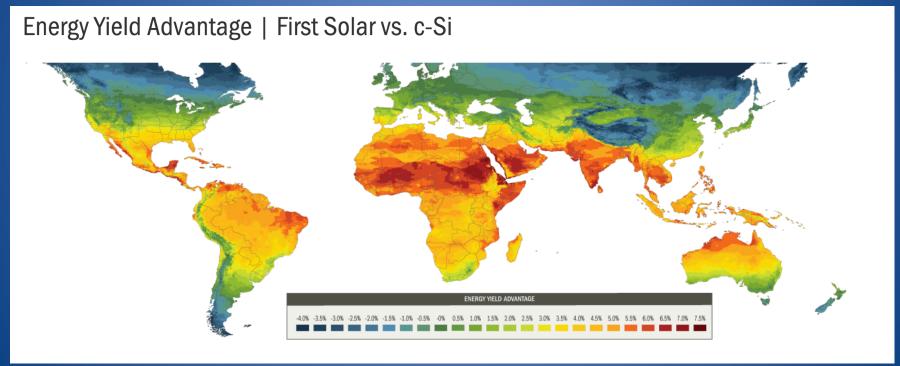
Oltre 2,8 GW/anno nel 2017: un impianto in USA, 4 impianti in Malesia

Il CdTe permette di crescere molto velocemente



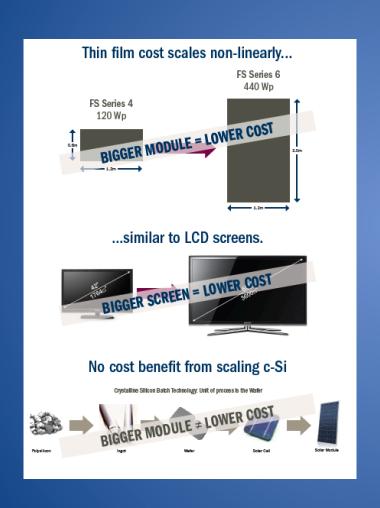
# First Solar: coefficiente di temperatura

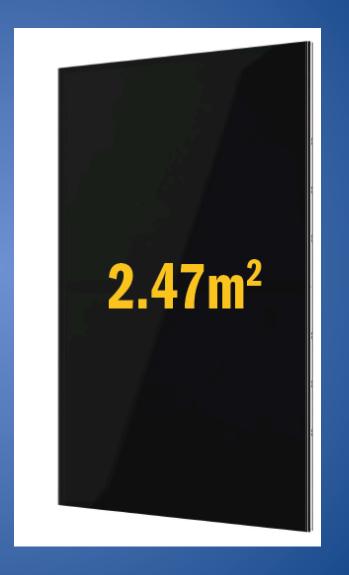






# First Solar: moduli più grandi per riduzione costi







#### 

Alta potenza specifica (potenza/peso)

Da vetro ⇒ substrati leggeri e flessibili

10'000 volte più leggeri su polimero (53 - 60 g/m2) rispetto a moduli a film sottile convenzionali

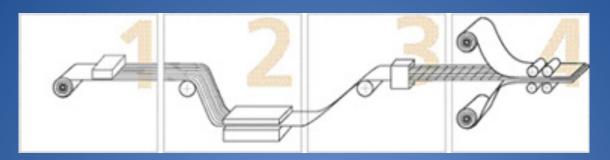
<u>Applicazioni a terra</u>: integrazione in palazzi (tetti, facciate, ecc.) elettronica di consumo (smart cards, cellulari, etc.)

<u>Applicazioni spaziali</u>: stabilita', alta potenza specifica (kW/Kg), flessibilita'

Fabbricazione roll to roll: alta scalabilita', abbattimento dei costi



#### Celle solari flessibili



**Produzione Roll-to-Roll** 



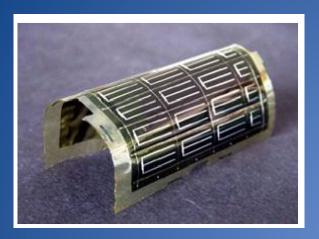




Flexcell: Silicio amorfo

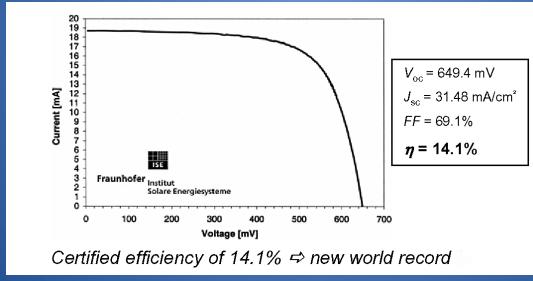


# CuInGaSe<sub>2</sub>/CdS su polimero flessibile



Country	Efficiency (%)	
USA	10 -12	
EU	8 -11	
Japan -		
New record from ETHZ: >14%		

Comparison of cell efficiencies on polyimide



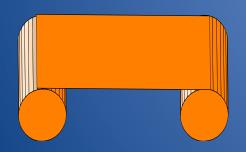


# Celle solari di CdTe sviluppate su polimeri





Peso totale: ~ 60 g/m<sup>2</sup>



Produzione "Roll to roll": ulteriore abbattimento dei costi

11.4% efficienza record per celle CdTe flessibili



# Moduli flessibili: CIGS





### Moduli flessibili: CIGS







A **Hanergy** Company



#### Moduli flessibili: silicio cristallino







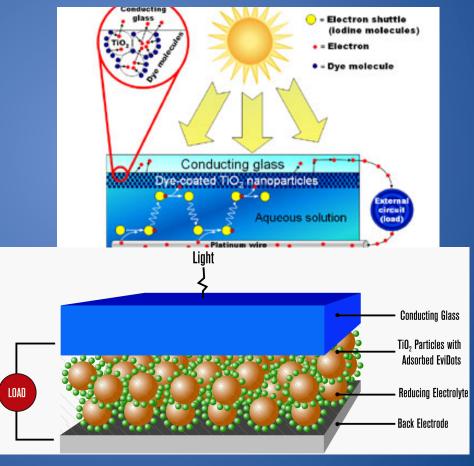
Silicio: Non così flessibili



# Celle organiche (DSC: Dye sensitized solar cells)

Efficienze delle DSC sopra il 10% per celle in laboratorio, con moduli di circa metà del valore.







# Pro e contro : celle Graetzel o "a colorante"

#### Pro

- Bassi costi di produzione
  - Semplicità
- Possibilità di realizzare celle flessibili

#### **Contro**

- Bassa efficienza sul modulo
  - Affidabilità e stabilità



# Celle polimeriche

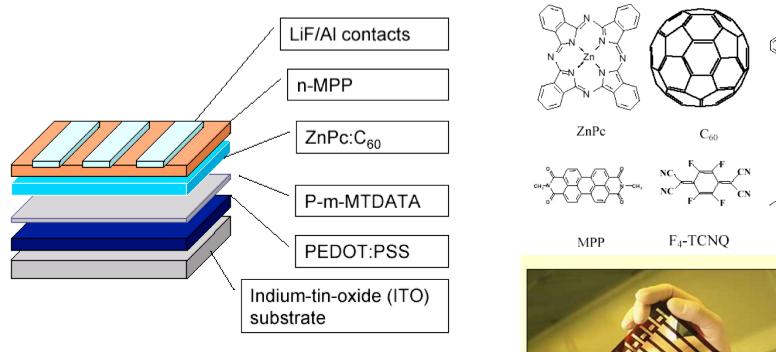


Fig. 1: Schematic diagram of the device configuration and molecular structu

5 % efficiency printed organic solar cell www.siemens.com



m-MTDATA

Rhoda B

## Pro e contro : Celle polimeriche

Materiali totalmente plastici a base di carbonio (organici)

Pro

Bassi costi di produzione Celle flessibili

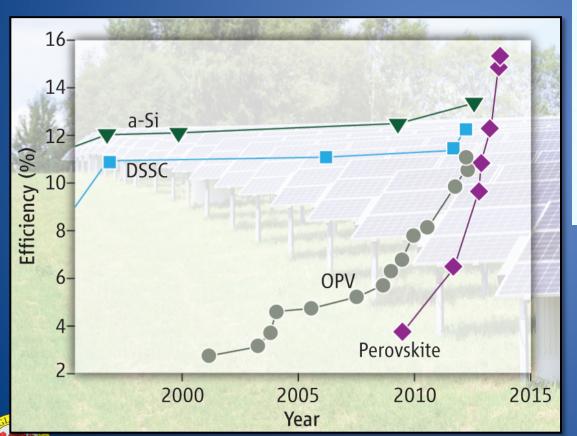
Contro

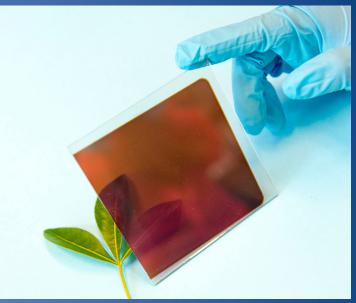
Bassa efficienza Stabilità dubbia



#### Emergence of Perovskite Solar Cells

- Efficiency jump in photovoltaics research
- From 3.8 % in 2009 to 15.9 % in 2014





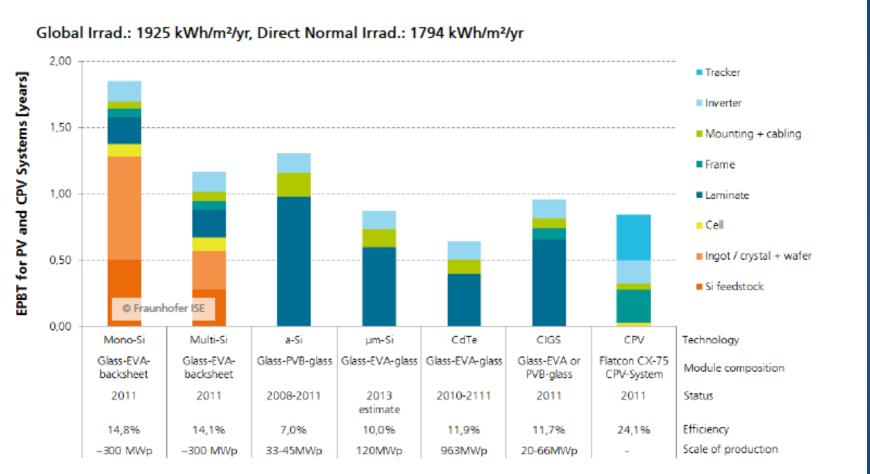
15% perovskite solar cell made in University of Oxford

### Superiorities of Perovskite Solar Cells

- 1. High efficiency; with an efficiency of 15.9% after only several years work.
- 2. Facile low temperature solution-based fabrication method;
- 3. High absorption coefficient.
- 4. Higher stability in air.
- 5. High diffusion length, high charge-carrier mobilities.
  - it means that the light-generated electrons and holes can move large enough distances to be extracted as current, instead of losing their energy as heat within the cell
- 6. very high values of open-circuit voltages  $(V_{\rm OC})$  typically obtained.



# Energy pay back time a Catania



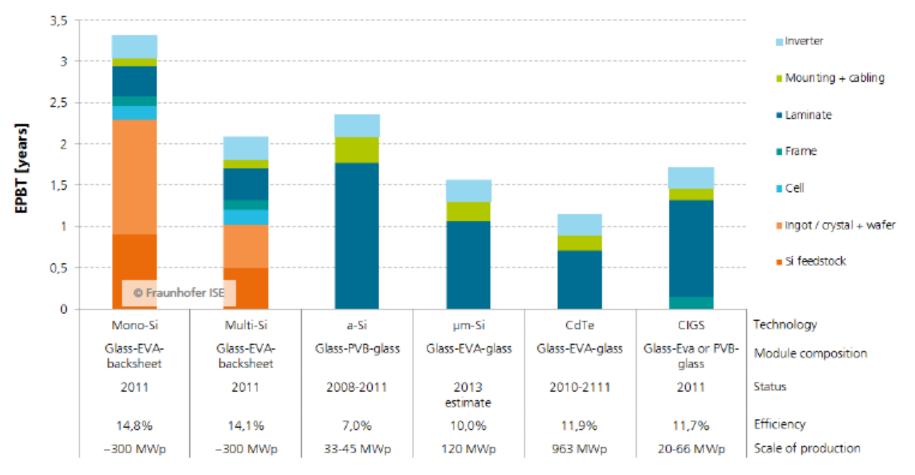
Data: M.J. de Wild-Scholten 2013; CPV data: "Environmental Sustainability of Concentrator PV Systems: Preliminary LCA Results of the Apollon Project" 5th World Conference on PV Energy Conversion. Valencia, Spain, 6-10 September 2010. Graph: PSE 2014



#### CdTe has the lowest pay back time!

# Energy pay back time in Germania

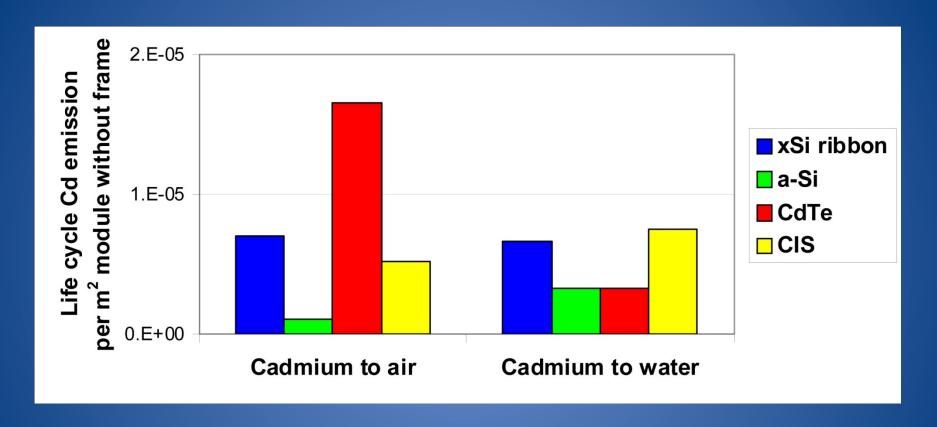
#### Global Irrad.: 1000 kWh/m²/yr



Data: M.J. de Wild-Scholten 2013. Graph: PSE 2014



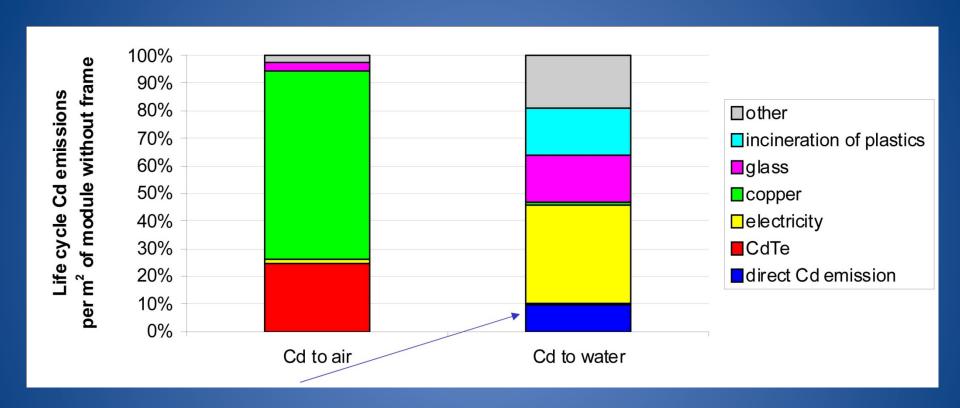
## Cadmium Life Cycle Assessment in production



Cadmium emissions are in any photovoltaic technology



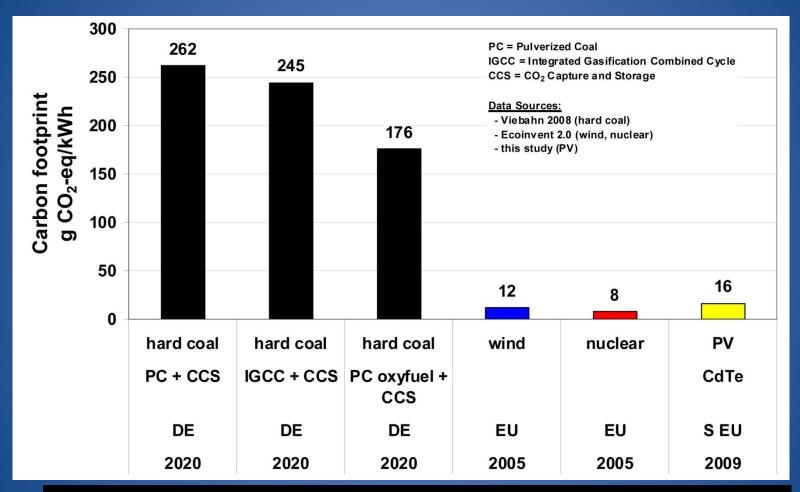
# Cadmium Life Cycle Assessment



Direct Cd emissions have a very small contribution in life cycle



# Greenhouse gas emissions



De Wild-Scholten, 1st International Conference on PV Module Recycling, Berlin, 26 January 2010

