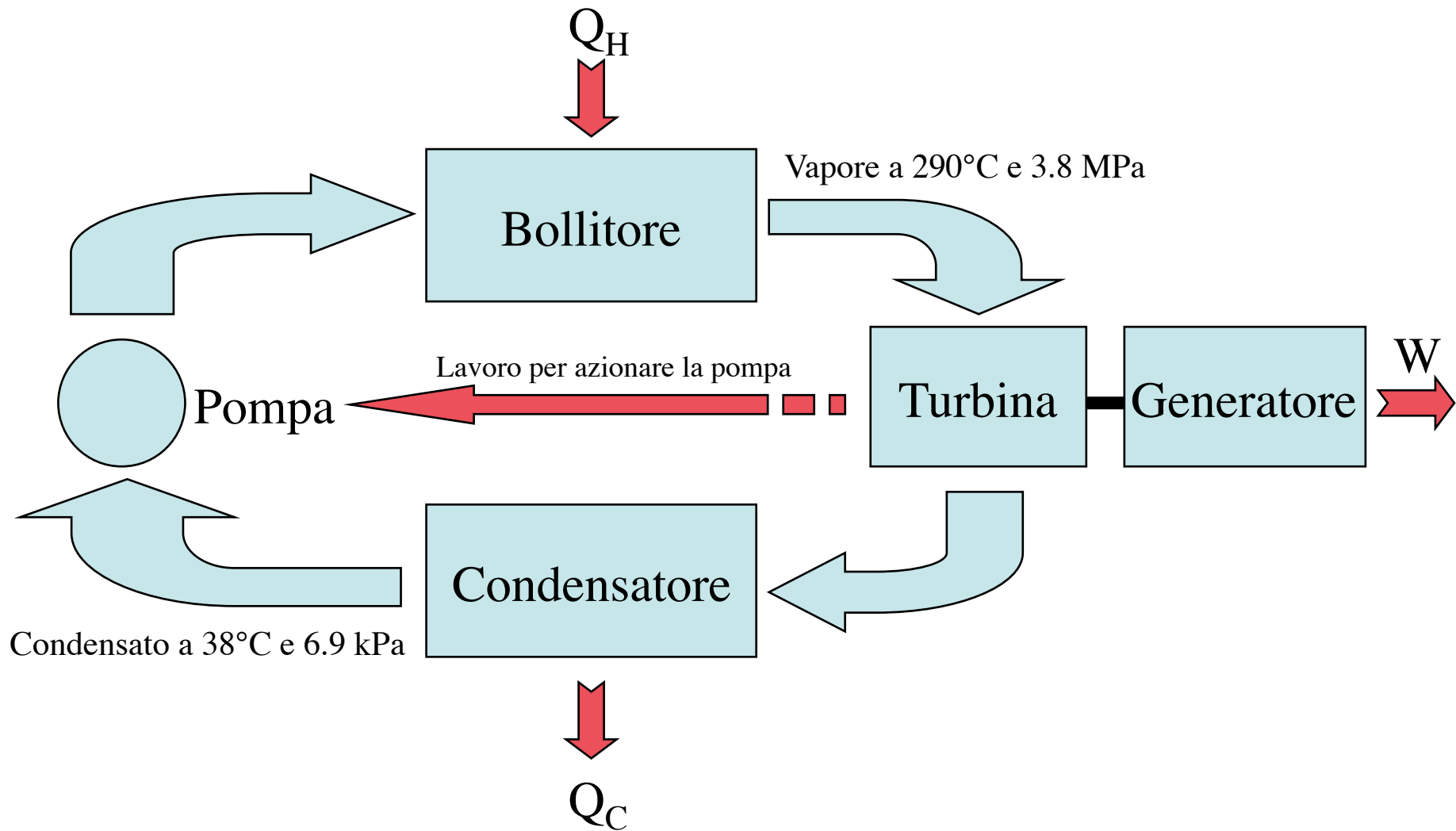


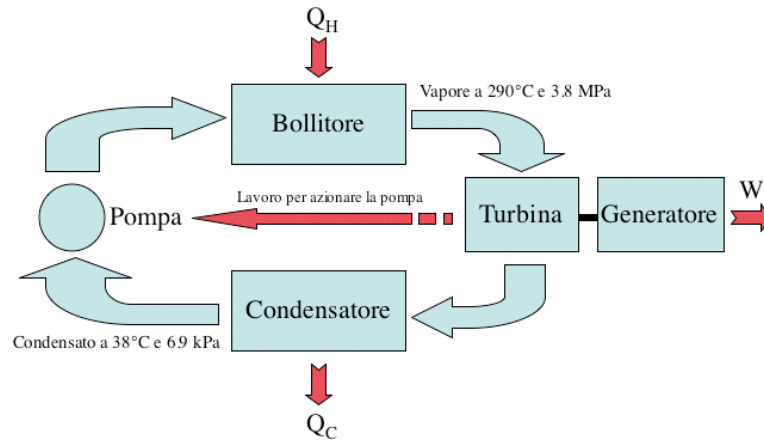
Termodinamica delle centrali termoelettriche

Edoardo Milotti

CdS Fisica A. A. 2007-8



Q_H viene ceduto da una sorgente termica ad alta temperatura
(combustione di combustibili fossili, reazione di fusione nucleare, etc. ...)



Esempio: valori tipici per un impianto termonucleare da 0.75 GW

$$T_H \approx 290 \text{ }^\circ\text{C} (\approx 563 \text{ K})$$

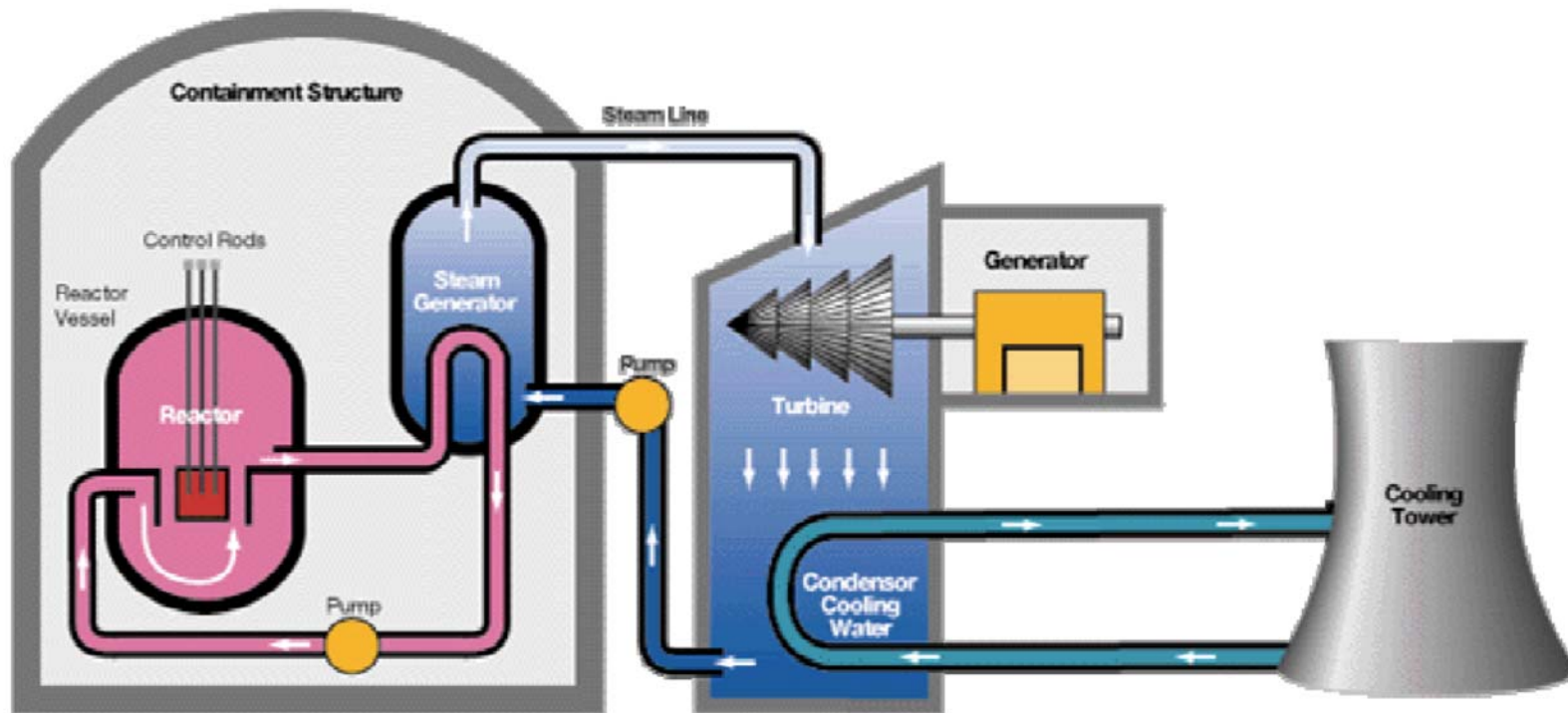
$$P \approx 3.8 \text{ MPa}$$

$$T_C \approx 38 \text{ }^\circ\text{C} (\approx 311 \text{ K})$$

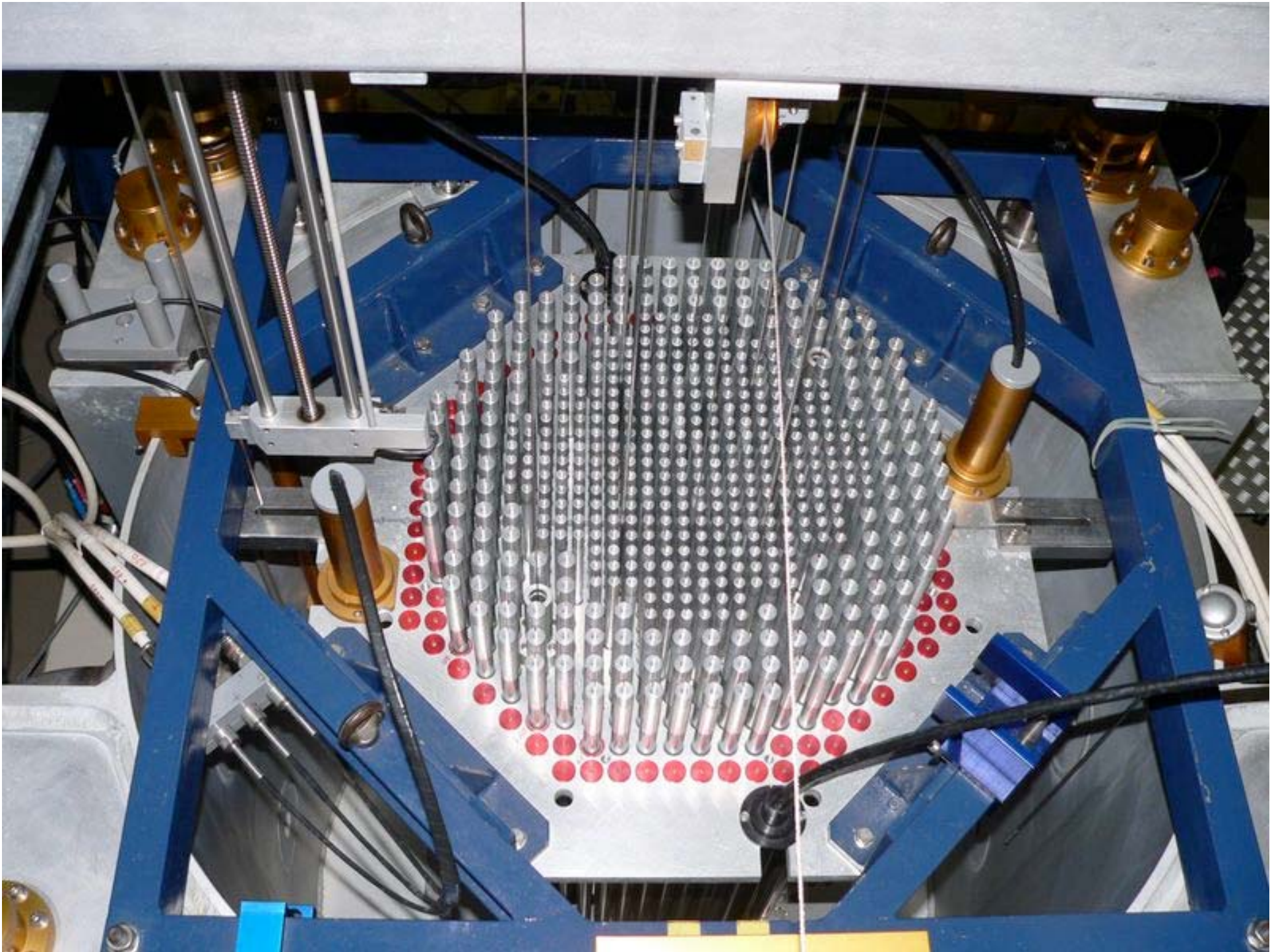
$$P \approx 6.9 \text{ kPa}$$

Efficienza del ciclo di Carnot ideale:

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{311\text{K}}{563\text{K}} \approx 0.448$$



Schema di reattore nucleare con acqua a pressione
(PWR = Pressurized Water Reactor)



Stima realistica dell'efficienza: 30%

Quindi la potenza totale assorbita dalla sorgente ad alta temperatura è

potenza elettrica prodotta

potenza totale assorbita

$$\frac{750 \text{ MW}}{0.3} = 2.5 \text{ GW}$$

e dunque 1.75 GW vengono scaricati nella sorgente a bassa temperatura (ambiente) sotto forma di calore

Stima della velocità di evaporazione dell'acqua

Entalpia di evaporazione dell'acqua

T (°C)	$\Delta_{\text{vap}}\mathbf{H}$ (kJ/mol)	T (°C)	$\Delta_{\text{vap}}\mathbf{H}$ (kJ/mol)
0	45.054	200	34.962
25	43.990	220	33.468
40	43.350	240	31.809
60	42.482	260	29.930
80	41.585	280	27.795
100	40.657	300	25.300
120	39.684	320	22.297
140	38.643	340	18.502
160	37.518	360	12.966
180	36.304	374	2.066

quindi:

$$dm/dt \approx 2.5 \text{ GW}/25 \text{ kJ/mole} = 10^5 \text{ mole/s} = 1.8 \cdot 10^3 \text{ kg/s}$$

$$\approx 110 \text{ t/min}$$

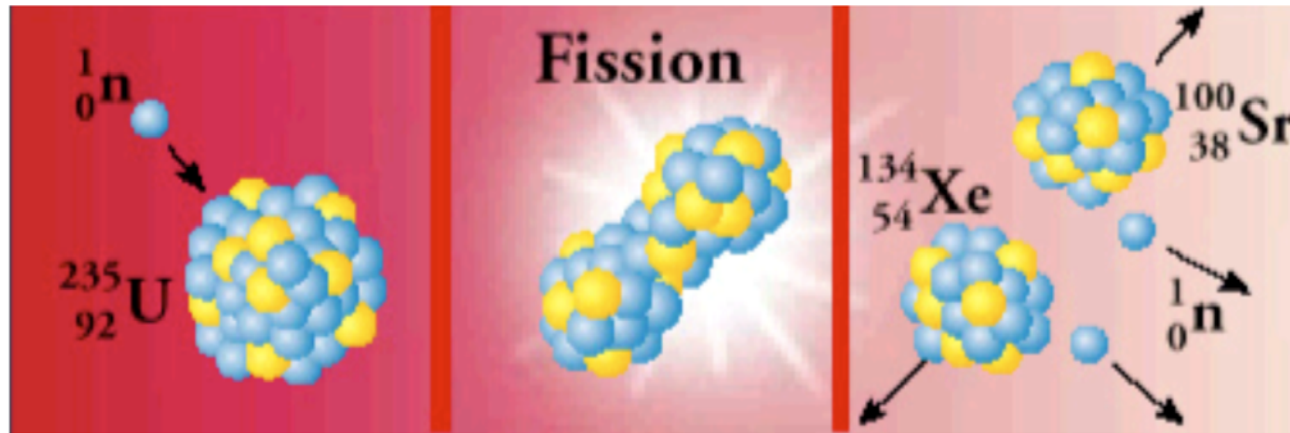
Potenza assorbita dalla sorgente ad alta temperatura: 2.5 GW

Quindi energia assorbita in un anno $\approx 2.5 \text{ GW} \cdot 3.14 \cdot 10^7 \text{ s} \approx$
 $\approx 7.9 \cdot 10^{16} \text{ J}$

D'altra parte da $E = mc^2$

$$m = \frac{E}{c^2} \approx \frac{7.9 \cdot 10^{16} \text{ J}}{9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}} \approx 0.9 \text{ kg}$$

Questa è la diminuzione annuale di massa, ma non la massa del combustibile nucleare utilizzato!!!



1 eV $\approx 1.6 \cdot 10^{-19}$ J, quindi

200 MeV $\approx 3.2 \cdot 10^{-11}$ J

Quindi 2.5 GW $\Rightarrow 8 \cdot 10^{19}$ reazioni al secondo $\approx 1.3 \cdot 10^{-4}$ mole/s

Massa di una mole di uranio ≈ 235 g, quindi

2.5 GW $\Rightarrow 3 \cdot 10^{-5}$ kg/s ≈ 960 kg/anno

D'altra parte il materiale fissile ^{235}U è solo il 3-4% del totale, quindi la massa totale di uranio è (densità dell'uranio $\approx 19 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$,)

$960 \text{ kg/anno} / 0.035 \approx 27 \text{ t/anno} \Rightarrow 1.5 \text{ m}^3$

(consumo: $36 \text{ t/anno} \cdot \text{GW}$)

Attualmente

439 reattori nucleari in operazione con una capacità installata netta di 372 GW

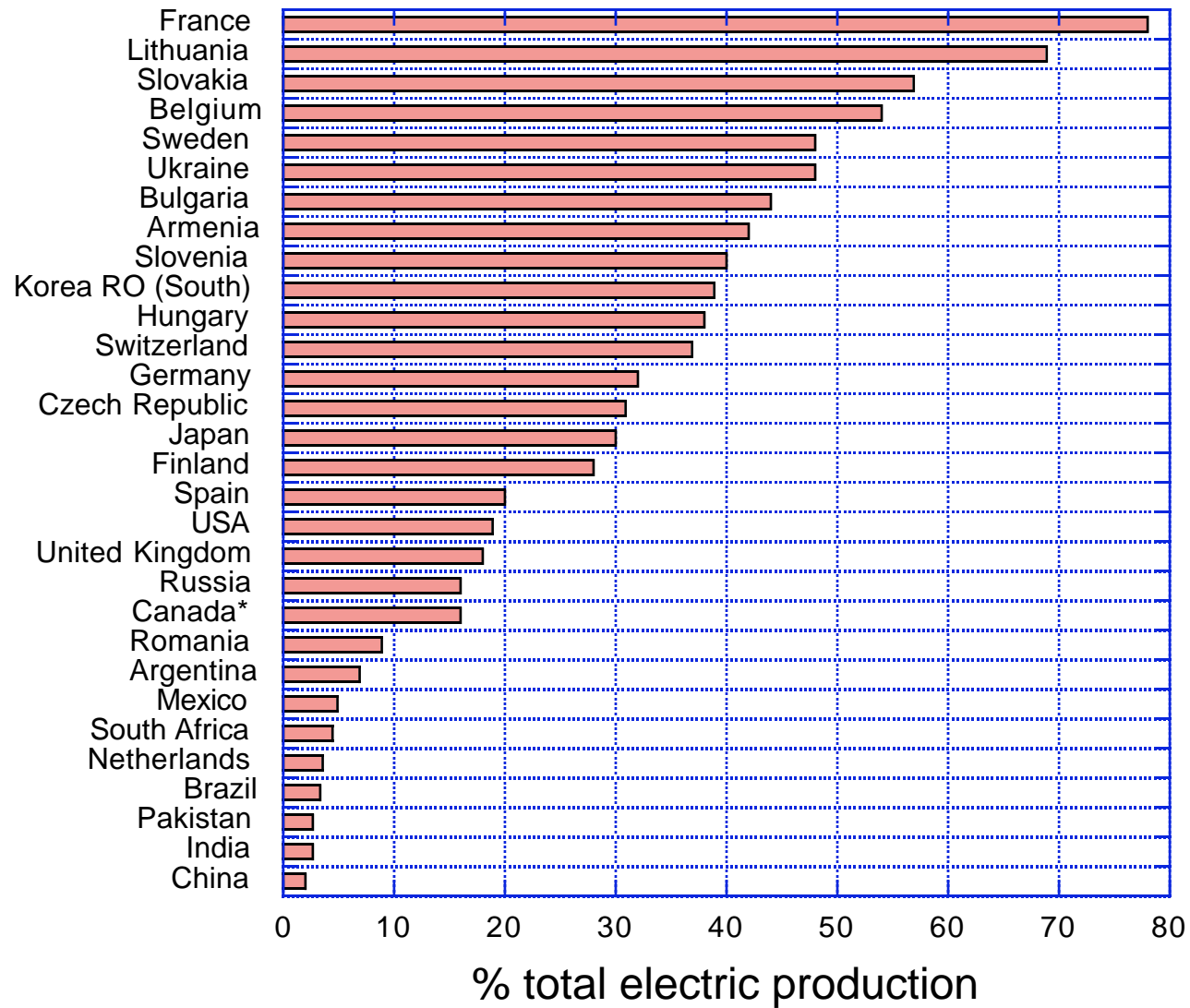
93 reattori nucleari in fase di costruzione o di progetto

218 reattori nucleari proposti

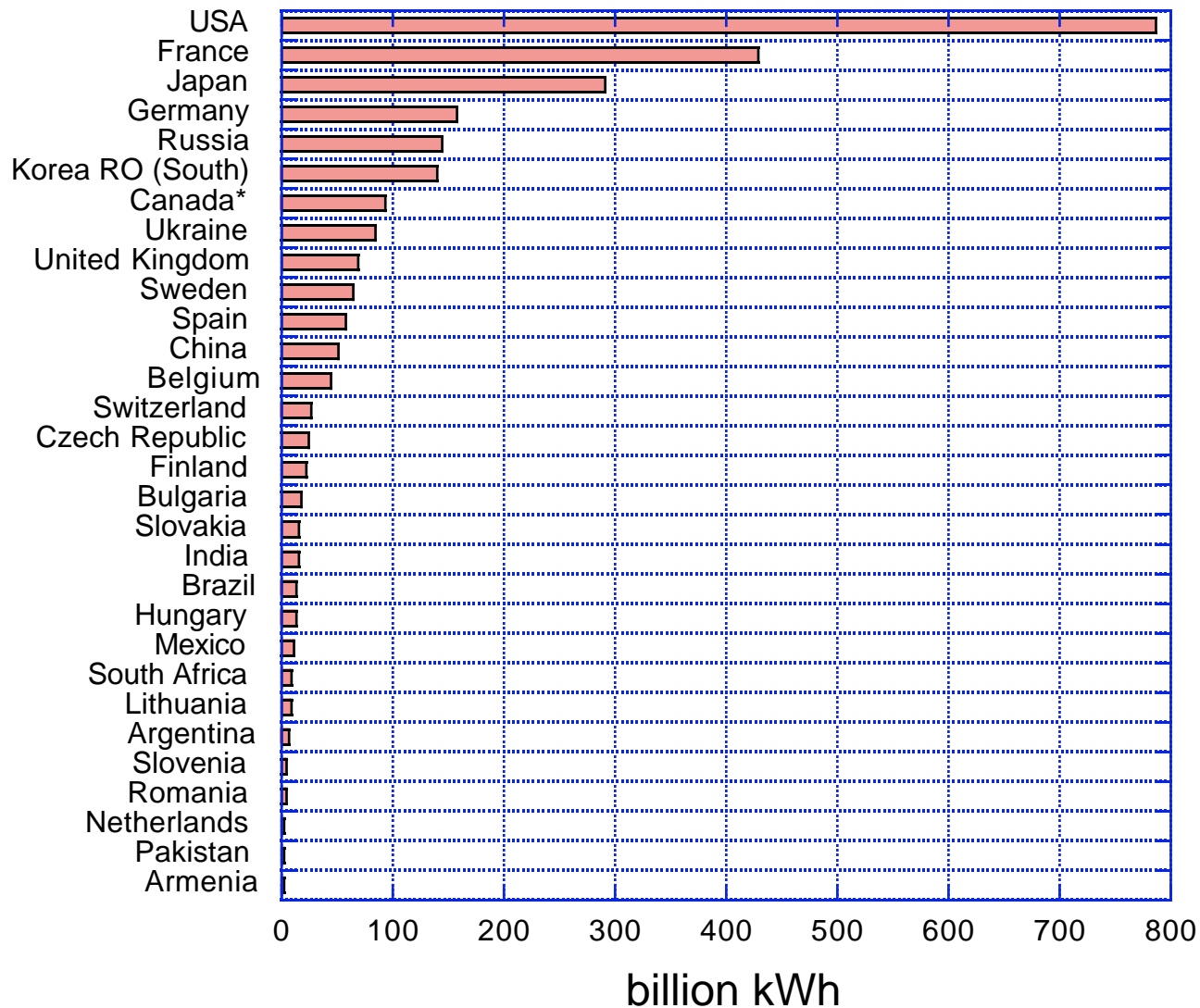
consumo totale (stimato) $\approx 1.3 \cdot 10^4 \text{ t/anno}$ di uranio arricchito, quindi circa $5 \cdot 10^4 \text{ t/anno}$ di minerale di uranio

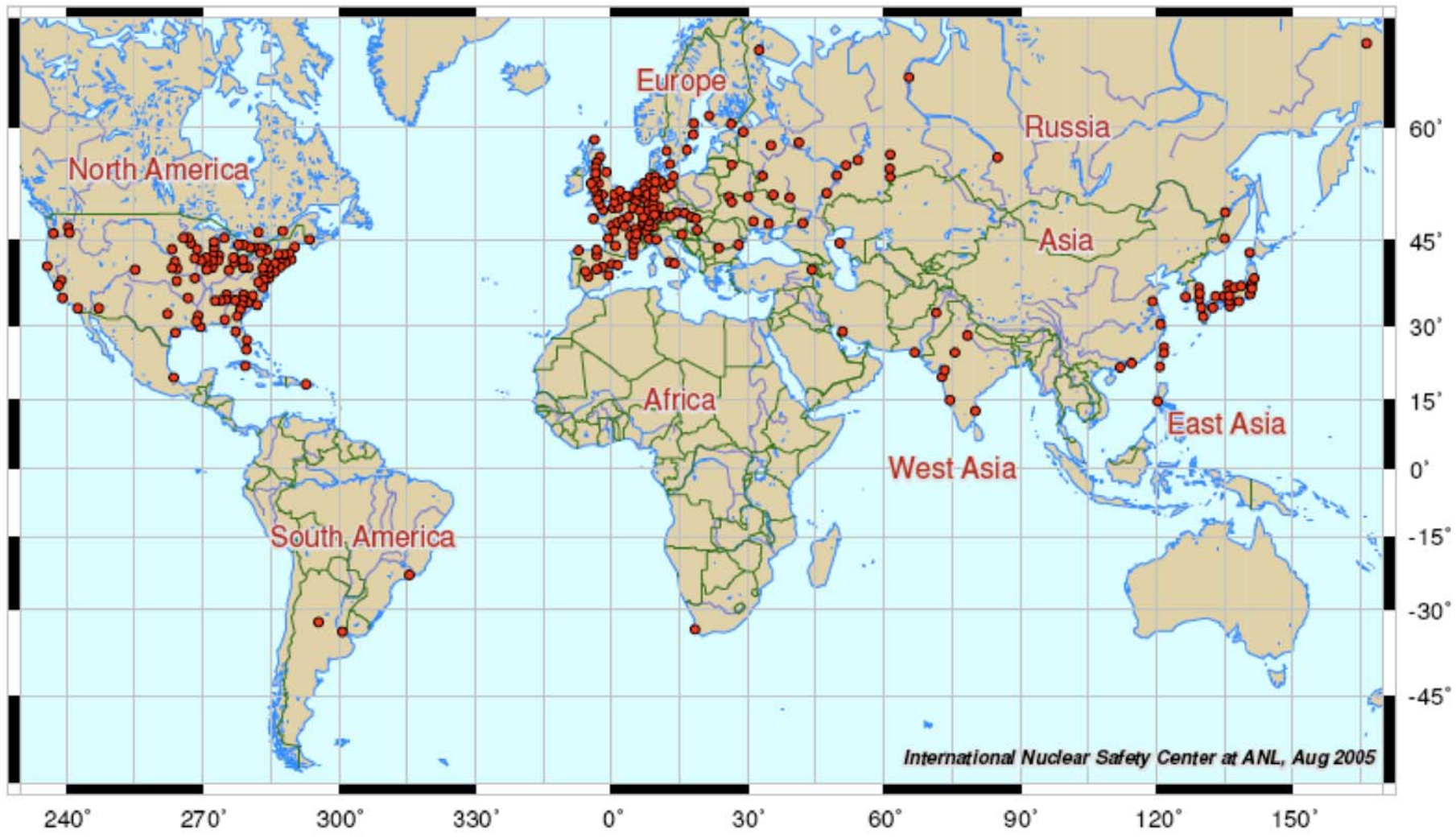
riserve attuali $\approx 2 \cdot 10^6 \text{ t} \Rightarrow 40 \text{ anni}$

Produzione di energia elettrica da reattori nucleari (% del totale per paese)
Dati World Nuclear Association al 23/5/2008



Produzione di energia elettrica da reattori nucleari (totale per paese)
Dati World Nuclear Association al 23/5/2008





International Nuclear Safety Center at ANL, Aug 2005



0.75 GW \Rightarrow 2.5 GW termici \Rightarrow $\sim 7.9 \cdot 10^{16}$ J/anno

Se la centrale è a gas e brucia metano (GNL), allora si deve partire dall'entalpia di combustione del metano (CH_4 , peso molecolare ≈ 16 g/mole) che vale circa 890 kJ/mol = $8.9 \cdot 10^5$ J/mol = $5.6 \cdot 10^7$ J/kg a pressione atmosferica standard.

Quindi la massa di metano da bruciare per ottenere $7.9 \cdot 10^{16}$ J è

$$m \approx \frac{7.9 \cdot 10^{16} \text{ J}}{5.6 \cdot 10^7 \text{ J/kg}} \approx 1.4 \cdot 10^9 \text{ kg}$$
$$\approx \frac{7.9 \cdot 10^{16} \text{ J}}{8.9 \cdot 10^5 \text{ J/mole}} \approx 8.9 \cdot 10^{10} \text{ mole}$$

Supponiamo che il metano venga trasportato in bombole alla pressione di circa 100 atmosfere e a temperatura ambiente: in queste condizioni la densità del metano vale circa 5 mol/litro, e quindi la massa di metano che abbiamo calcolato sopra corrisponde a circa $1.8 \cdot 10^{10}$ litri = $1.8 \cdot 10^7$ m³.

Se ipotizziamo che il trasporto avvenga con navi con uno spazio di carico utile di $100 \cdot 20 \cdot 10 \text{ m}^3 = 2 \cdot 10^4 \text{ m}^3$, si vede che ci vogliono circa 1000 navi all'anno per alimentare una centrale come quella che stiamo considerando.

Il trasporto criogenico è più conveniente dal punto di vista del trasporto, perché la densità del metano liquido a pressione atmosferica alla temperatura di trasporto ($\approx 110 \text{ K}$) vale circa 27 mol/litro, e quindi bastano meno di 200 navi come quelle sopra.

Gli impianti vengono classificati in base ai miliardi di m^3 all'anno di metano rigassificato.

$1 \text{ m}^3 \Rightarrow 44 \text{ mole}$

quindi 1 miliardo di $\text{m}^3/\text{anno} \approx 44 \cdot 10^9 \text{ mole/anno}$

$\Rightarrow 3.9 \cdot 10^{16} \text{ J/anno} = 1.2 \text{ GW}$

Quindi – ipotizzando la stessa efficienza termodinamica – un impianto termonucleare come quello descritto può venire sostituito da un impianto termoelettrico che brucia circa 2 miliardi di m^3 di gas naturale all'anno.

Il rigassificatore di Panigaglia vicino a La Spezia (unico impianto italiano attualmente in funzione), da 2 miliardi di metri cubi l'anno.



Impianti di rigassificazione attualmente in fase di progetto (maggio 2008)

Impianti già autorizzati



Regione	Ubicazione	Tipologia impianto	Capacità di rigassificazione nominale annuale (GSmc/a)	Società proponente	Autorizzazione MSE alla realizzazione e all'esercizio
Veneto	Rovigo	offshore	8	GNL Adriatico Srl	Autorizzato
Puglia	Brindisi	onshore	8	Brindisi LNG Spa	Autorizzazione sospesa
Toscana	Livorno	offshore su nave	3,75	OLT Offshore LNG Toscana Spa	Autorizzato
Toscana	Rosignano (LI)	onshore	8	Edison Spa	Non emessa
Liguria	Panigaglia	onshore	12,92 (potenziamento)	Gnl Italia Spa	Non emessa
Puglia	Taranto	onshore	8	Gas Natural Internacional	Non emessa
Calabria	Gioia Tauro (RC)	onshore	12	LNG MedGas Terminal	Non emessa
Sicilia	Porto Empedocle (AG)	onshore	8	Nuove Energie Srl	Non emessa
Sicilia	Melilli (SR)	onshore	I fase: 8 II fase: 12	Ionio Gas Srl	Non emessa
Friuli	Zaule (TS)	onshore	8	Gas Natural Internacional	Non emessa
Friuli	Trieste	offshore	8	Terminal Alpi Adriatico Srl	Non emessa
Emilia Romagna	Ravenna	offshore	8	Atlas Ing.	Non emessa
Lazio	Civitavecchia	onshore	12	Compagnia del Gas di Civitavecchia Srl	Non emessa
Marche	Senigallia / Ancona	offshore	I fase: 5 II fase: 10	Gaz de France	Non emessa

Fonte: Ministero dello sviluppo economico (aggiornamento al 31 gennaio 2008) e comunicazioni degli operatori

Il problema del calore ceduto all'ambiente

Abbiamo già osservato che un impianto termoelettrico come quello considerato scarica nella riserva termica a bassa temperatura circa 1.75 GW di calore, e spesso la riserva termica a bassa temperatura è un fiume.

Ma non basta un fiume piccolo, perché la quantità di calore prodotto è enorme. L'aumento di temperatura è dato dalla formula

$$\Delta T = \frac{1}{C} \left(\frac{P}{F} \right)$$

P = 750 MW

Fiume	Portata in regime di magra (m³/s)	ΔT (K)	Portata media (m³/s)	ΔT (K)	Portata massima (m³/s)	ΔT (K)
<i>Danubio</i>	1.000	0.42	6.400	0.07	16.000	0.03
<i>Reno</i>	500	0.83	2.200	0.19	10.000	0.04
<i>Rodano</i>	600	0.70	1.700	0.25	11.000	0.04
<i>Senna</i>	30	14.	350	1.2	2.400	0.17
<i>Po</i>	420	1.0	1.470	0.28	12.000	0.03
<i>Ticino</i>	54	7.7	350	1.2	5000	0.08

Bilancio dell'energia elettrica in Italia (anno 2004 - valori provvisori)

	Bilancio		Variazioni	
	2004	2003	GWh	%
Produzione lorda	300.370	293.865	6.505	2,2%
Servizi ausiliari	13.723	13.682	41	0,3%
Produzione netta	286.647	280.183	6.464	2,3%
Ricevuta da fornitori esteri	46.426	51.486	-5.060	-9,8%
Ceduta a clienti esteri	791	518	273	52,7%
Destinata ai pompaggi	10.308	10.492	-184	-1,8%
Richiesta totale Italia	321.974	320.659	1.315	0,4%
Totale consumi	301.400	299.789	1.611	0,5%
Perdite <i>in % della richiesta</i>	20.574 (6,4%)	20.870 (6,5%)	-296	-1,4%
Richiesta totale Italia	321.974	320.659	1.315	0,4%

Dai dati in tabella si calcola facilmente che la richiesta media di potenza elettrica nel 2004 è stata di circa 89.44 GW, e questo corrisponde a 120 impianti termoelettrici come quello che abbiamo appena analizzato.

Anche le cosiddette “energie alternative” hanno problemi ambientali ...







U.S. Department of Energy

Energy Efficiency and Renewable Energy

Bringing you a prosperous future where energy
is clean, abundant, reliable, and affordable



20% Wind Energy by 2030

Increasing Wind Energy's Contribution to
U.S. Electricity Supply

Prepublication Version

May 2008

L'economia dell'energia

Unità in uso comune:

1 kWh	=	$3.6 \cdot 10^6$ J	
1 t carbone	≈	$3.0 \cdot 10^{10}$ J	≈ 8300 kWh
1 kg petrolio	≈	$4.4 \cdot 10^7$ J	≈ 12 kWh
1 m ³ gas naturale	≈	$3.9 \cdot 10^7$ J	≈ 11 kWh
1 barile di petrolio (= 158.9873 litri, ≈ 135 kg dens. rel. ≈ 0.85)	≈	$5.9 \cdot 10^9$ J	≈ 1650 kWh
1 tonnellate equivalenti di petrolio (tep)	≈	$4.4 \cdot 10^{10}$ J	≈ 12000 kWh
1 BTU (British Thermal Unit)	≈	1057 J	

Consumi mondiali in fonti primarie (milioni di tep)

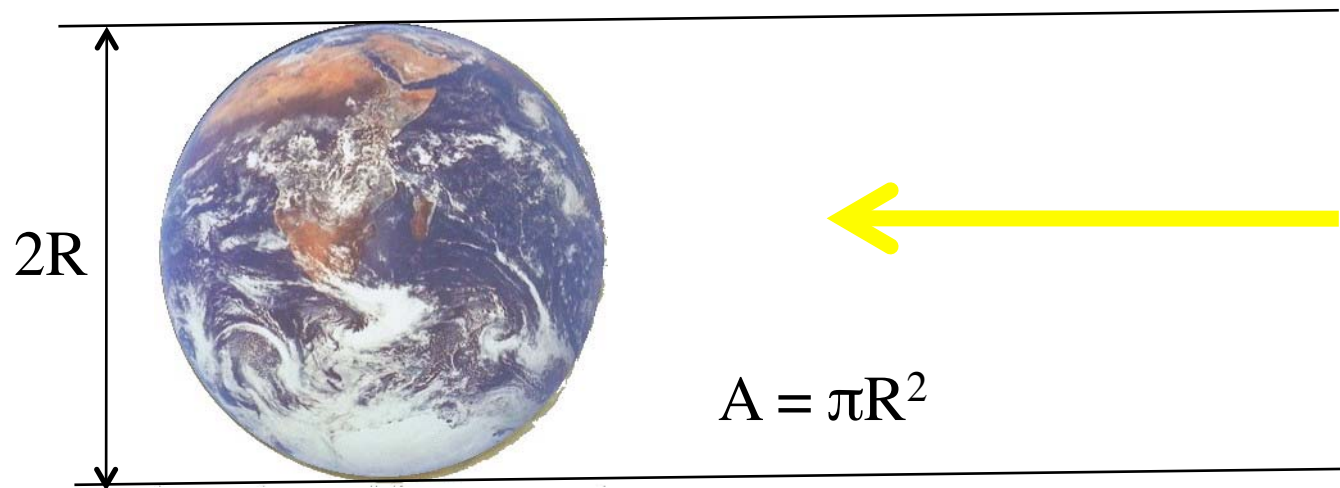
	1995	2000	2003	2004
Gas naturale	1.816	2.086	2.243	2.303
Carbone	2.232	2.320	2.578	2.731
Petrolio	3.356	3.660	3.798	3.922
Energia elettrica	856	946	957	999
Biomasse	1.020	1.094	1.138	1.155
Calore da geotermia	3	3	3	3
Calore da solare	2	4	4	4
TOTALE	9.285	10.113	10.722	11.118

Fonte: ENEA, Rapporto Energia – Ambiente 2005

La tabella ci dice che il consumo totale di energia da fonti primarie in tutto il mondo nel 2004 è stato di $11118 \cdot 10^6 \text{ tep} \approx 4.9 \cdot 10^{20} \text{ J}$

questo corrisponde ad un consumo medio di
 $\sim 15600 \text{ GW} \approx 1.6 \cdot 10^{13} \text{ W}$.

Ma $1.6 \cdot 10^{13} \text{ W}$ è tanto o è poco? Per capirlo possiamo confrontarlo con l'energia che arriva sulla Terra dal Sole: la cosiddetta *costante solare* è l'irradianza media della radiazione solare al di fuori dell'atmosfera, e vale 1366 W/m^2



La potenza totale intercettata dalla Terra è $1.75 \cdot 10^{17} \text{ W}$, più di 10000 volte il consumo medio totale da fonti primarie.

Consumo energetico medio pro-capite per macroregioni (tep/anno)

	1960	1970	1990	Previsioni 2020
America settentrionale	5,75	7,78	7,82	7,16
America Latina	0,74	0,91	1,329	1,95
Europa occidentale	1,78	2,63	3,22	3,53
Europa centrale e orientale	1,66	2,60	2,91	2,87
Paesi ex URSS	2,06	3,01	5,01	4,45
Medio Oriente e Nord Africa	0,30	0,47	1,17	1,59
Africa sub-sahariana	0,43	0,51	0,53	0,58
Pacifico (1)	0,49	0,62	1,02	1,43
- di cui PEP (2)	0,45	0,41	0,76	1,22
Asia Meridionale	0,22	0,27	0,39	0,52
MONDO	1,09	1,42	1,66	1,65

Tutte le cifre sono arrotondate

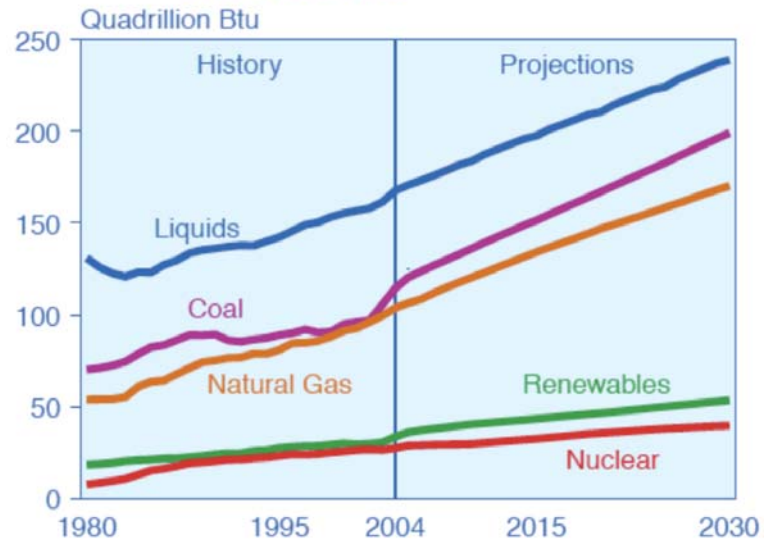
(1) Dati comprensivi dei Paesi ad economia pianificata

(2) PEP = Paesi ad economia pianificata

Fonte: World Energy Council

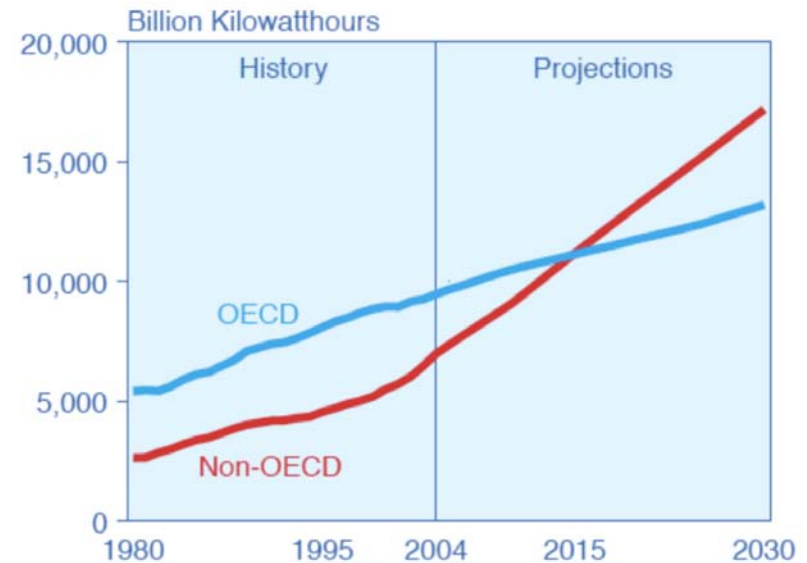
Andamento dei consumi energetici

Figure 11. World Marketed Energy Use by Fuel Type, 1980-2030



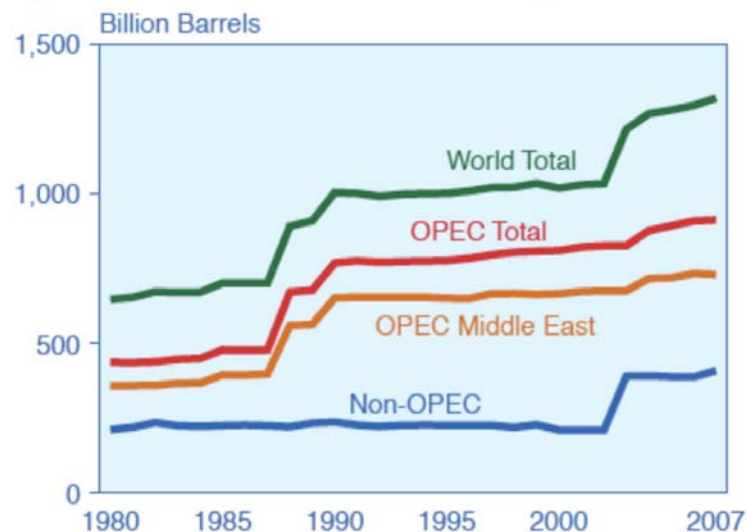
Sources: **History:** Energy Information Administration (EIA), *International Energy Annual 2004* (May-July 2006), web site www.eia.doe.gov/iea. **Projections:** EIA, System for the Analysis of Global Energy Markets (2007).

Figure 13. World Electric Power Generation by Region, 1980-2030



Sources: **History:** Energy Information Administration (EIA), *International Energy Annual 2004* (May-July 2006), web site www.eia.doe.gov/iea. **Projections:** EIA, System for the Analysis of Global Energy Markets (2007).

Figure 38. World Crude Oil Reserves, 1980-2007



Note: Reserves include crude oil (including lease condensates) and natural gas plant liquids.

Sources: **1980-1993:** "Worldwide Oil and Gas at a Glance," *International Petroleum Encyclopedia* (Tulsa, OK: PennWell Publishing, various issues). **1994-2007:** *Oil & Gas Journal* (various issues).

Table 3. World Oil Reserves by Country as of January 1, 2007
(Billion Barrels)

Country	Oil Reserves
Saudi Arabia	262.3
Canada	179.2
Iran	136.3
Iraq	115.0
Kuwait	101.5
United Arab Emirates	97.8
Venezuela	80.0
Russia	60.0
Libya	41.5
Nigeria	36.2
Kazakhstan	30.0
United States	21.8
China	16.0
Qatar	15.2
Mexico	12.4
Algeria	12.3
Brazil	11.8
Angola	8.0
Norway	7.8
Azerbaijan	7.0
Rest of World	65.5
World Total	1,317.4

"Worldwide Look at Reserves and Production," *Oil & Gas Journal*, Vol. 104, No. 47 (December 18, 2006), pp. 24-25.

Le riserve attualmente note di petrolio corrispondono a

$\approx 1.2 \cdot 10^{12}$ barili di petrolio

$\approx (5.9 \cdot 10^9 \text{ J}) \cdot (1.2 \cdot 10^{12}) \approx 7 \cdot 10^{21} \text{ J}$

Poiché adesso i consumi di petrolio equivalgono a circa il 35% del totale dei consumi energetici, e quindi a circa $1.7 \cdot 10^{20} \text{ J}$ all'anno, si vede che le riserve ora note saranno esaurite entro circa 40 anni, se il consumo di petrolio resta costante.

SIMULATION REPORT AND SUMMARY OF FINDINGS • On June 23, 2005, a group of nine former White House cabinet and senior national security officials convened to participate in a simulated working group of a White House cabinet. Their task: to advise an American president as the nation grapples with an oil crisis over a seven-month period. As they enter the room, they are unaware of the circumstances or nature of the oil crisis.



OIL SHOCKWAVE
NATIONAL POLICY REC...

PROJECTED GASOLINE \$5.74 COST AT THE PUMP [MID-SIZE SUV] \$131.56

Terrorist attack on the Port of Valdez reduces global supply.
(approximately 900,000 b/d)

Terrorist attack on Haradh Facility reduces global supply.
(approximately 200,000 b/d)

Unrest in Nigeria reduces production.
(approximately 600,000 b/d)

SECRETARY OF INTERIOR

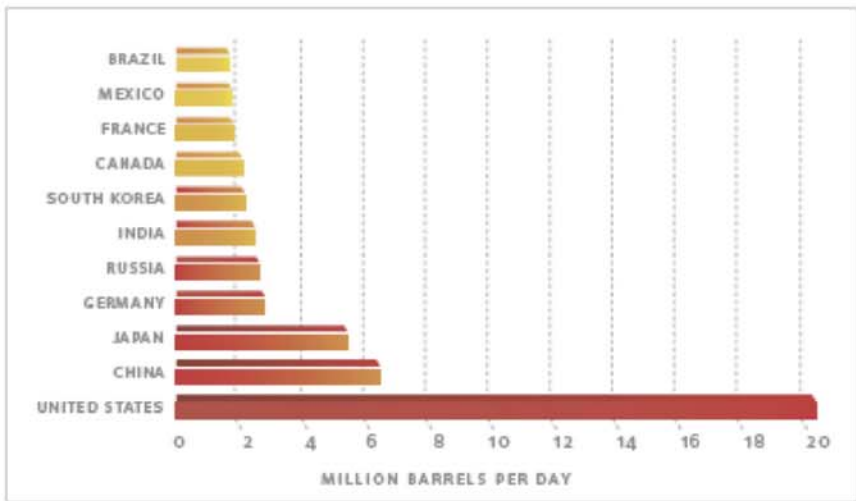
OIL SHOCKWAVE
OIL CRISIS EXECUTIVE SIMULATION

Securing America's Future Energy

OIL SHOCKWAVE
OIL CRISIS EXECUTIVE SIMULATION

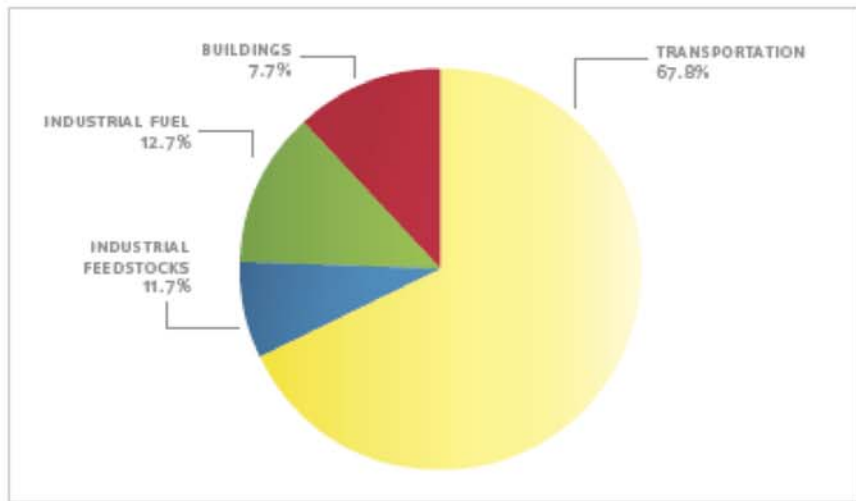
GLOBAL CONSUMPTION

TOP WORLD OIL CONSUMERS · 2004¹



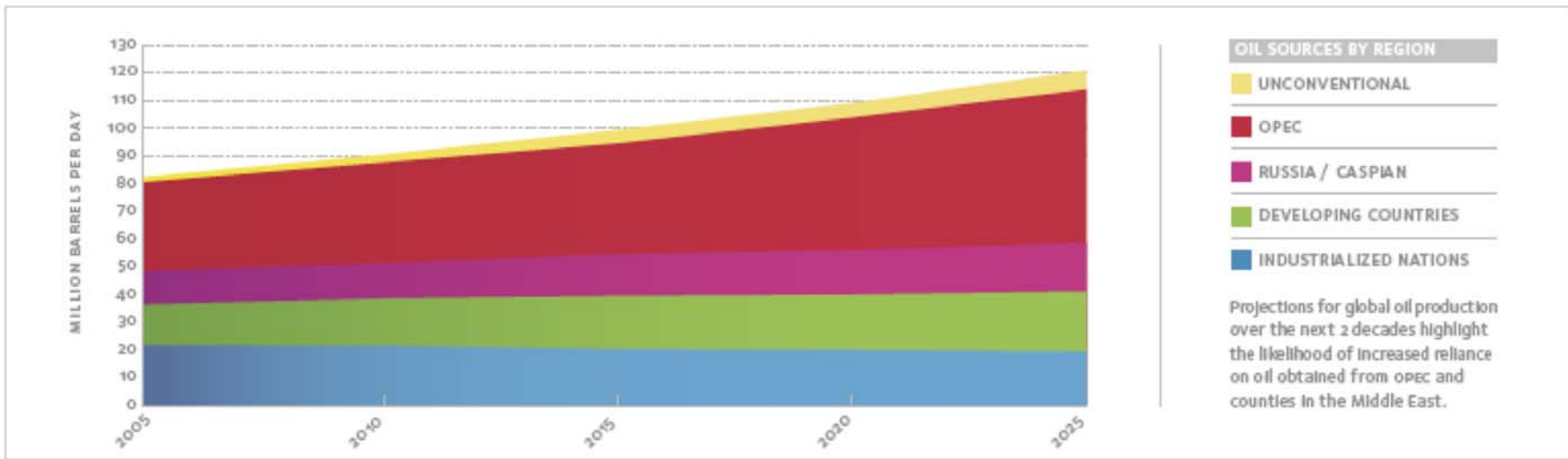
OIL USAGE IN THE U.S.

END-USE OF OIL IN THE UNITED STATES · 2000²



WORLD OIL PRODUCTION FORECAST

PROJECTING PRODUCERS OF WORLD OIL FROM 2005-2025³

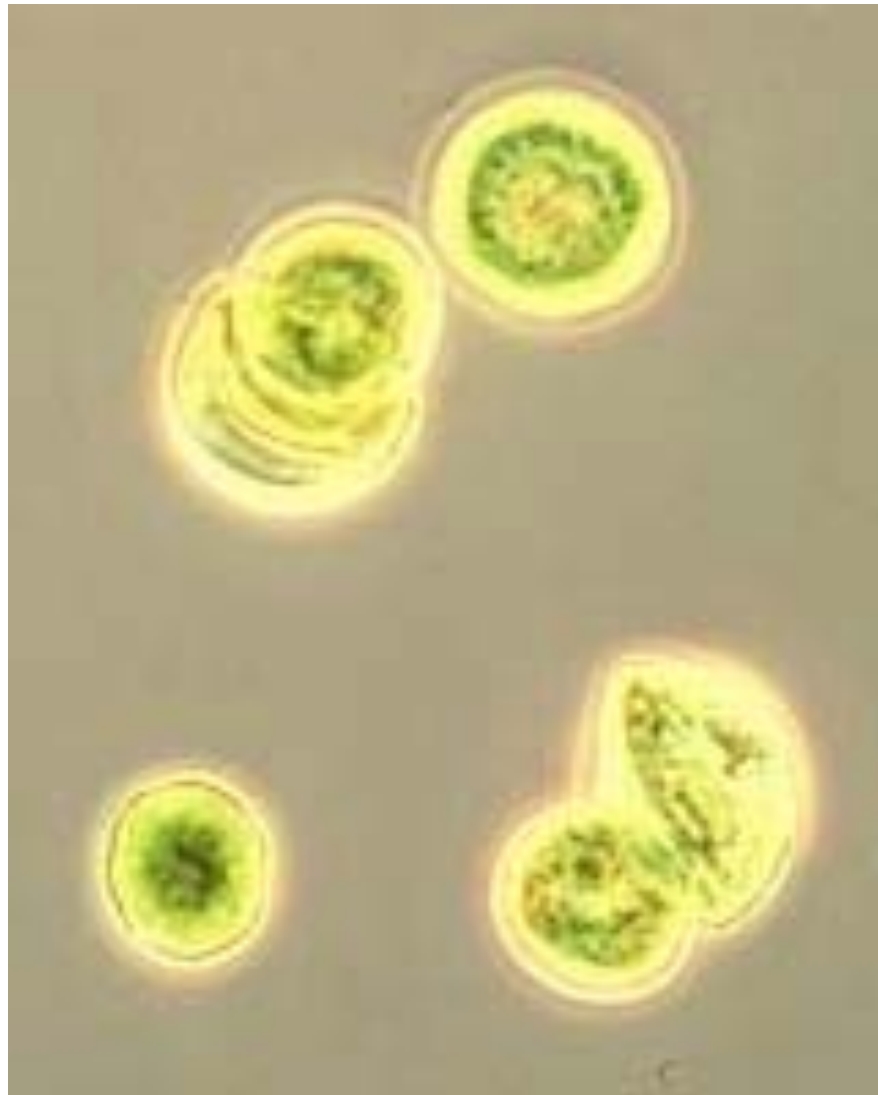


Stima del totale delle riserve di carbonio esistenti

L'atmosfera terrestre primordiale era priva di ossigeno, che si trovava tutto in forma chimicamente legata a minerali della crosta terrestre.

Ci sono parecchie evidenze di questo fatto: l'esistenza di tracce di metalli non ossidati nella crosta terrestre indica che questi minerali si sono formati in assenza di ossigeno. Inoltre i microorganismi del regno Archaea – discendenti di forme di vita molto antiche – hanno un metabolismo che non richiede la presenza di ossigeno.

L'ossigeno atmosferico è stato prodotto dall'attività fotosintetica di batteri e piante, e dalla quantità totale di ossigeno libero possiamo quindi stimare la quantità totale delle riserve di combustibili fossili.



Cianobatteri (Prochloron)

La Terra e i suoi vicini

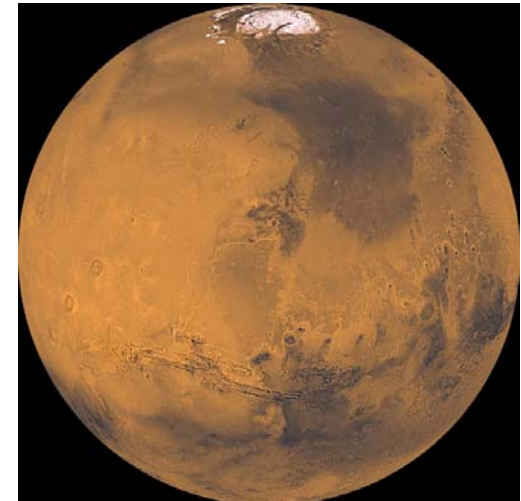
Venere



Terra

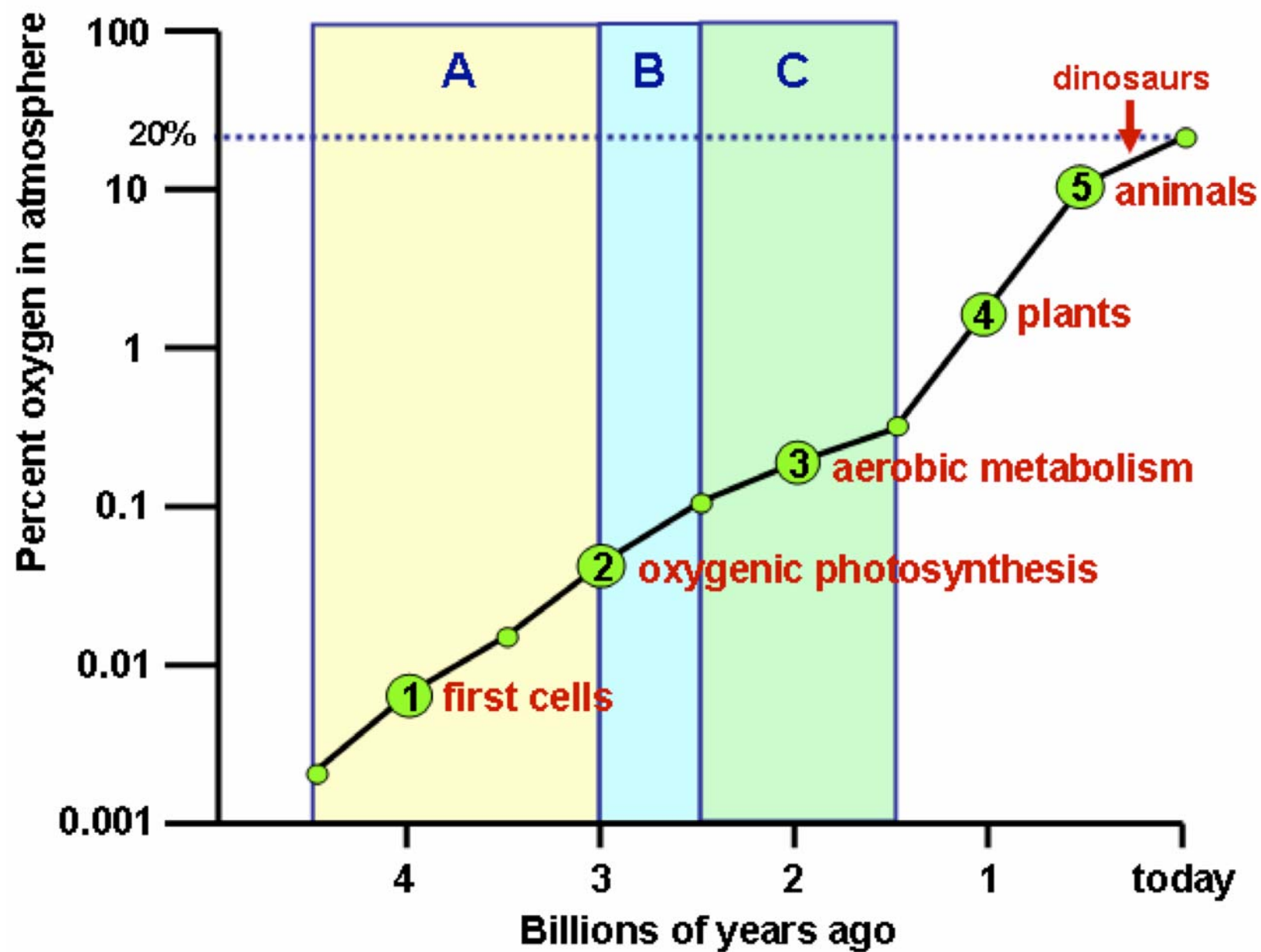


Marte

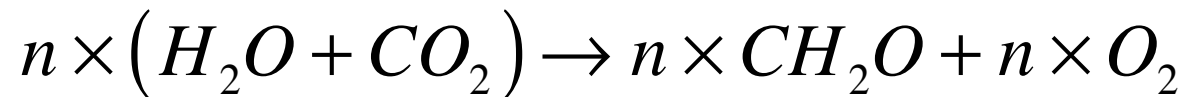


	T= 730 K	T= 290 K	T= 220 K
CO₂	0.96	4×10^{-4}	0.95
N₂	3.4×10^{-2}	0.78	2.7×10^{-2}
O₂	6.9×10^{-5}	0.21	1.3×10^{-3}
H₂O	3×10^{-3}	1×10^{-2}	3×10^{-4}

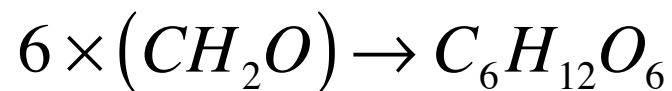
[Composizione atmosferica in mol/mol]



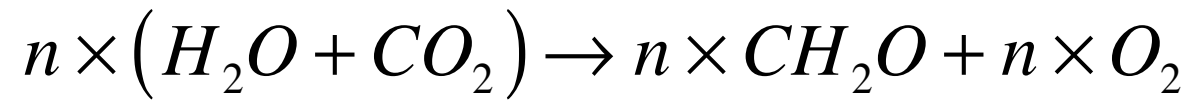
La fotosintesi è un processo complesso che è costituito grossolanamente da un primo passo ad alta efficienza in cui l'acqua viene scomposta in protoni e ossigeno, e da una serie di passi ad efficienza molto più ridotta in cui i protoni vengono combinati con l'anidride carbonica per formare carboidrati



In questo modo si formano ad esempio il glucosio e tutti i suoi isomeri chimici:



l'efficienza globale del processo è circa 1%



Ad una mole di carbonio corrisponde una mole di ossigeno molecolare, quindi vale la seguente relazione tra le masse totali

$$M_c = \frac{12}{32} M_{O_2}$$

- la pressione atmosferica standard vale circa 10^5 N/m^2 , e quindi ad una massa totale di circa 10^4 kg/m^2 (qui prendiamo l'acc. di gravità al suolo $\approx 10 \text{ m/s}^2$).
- l'ossigeno molecolare corrisponde al 20% circa in volume dell'atmosfera standard: se trascuriamo la differenza tra percentuale in volume e massa, troviamo allora che ci sono 2000 kg/m^2 di ossigeno
- poichè la superficie terrestre ha un'area di circa $5 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$ la massa totale di ossigeno è 10^{18} kg , e la massa totale di carbonio immagazzinato è $\approx 4 \cdot 10^{17} \text{ kg} = 4 \cdot 10^{14} \text{ tonnellate}$.

La massa totale di carbonio immagazzinato è $\approx 4 \cdot 10^{17}$ kg =
 $4 \cdot 10^{14}$ tonnellate

Finora sono state trovate circa 10^{12} tonnellate di carbone
equivalente, e quindi una frazione molto piccola del totale

Si deve però notare che la reazione di combustione inverte
la reazione di fotosintesi e non si potrebbe bruciare tutta la
riserva esistente di carbone equivalente, perché questo
processo esaurirebbe tutto l'ossigeno dell'atmosfera!

Altre semplici considerazioni

La potenza che arriva su una superficie di 1 m^2 e che è normale alla direzione della radiazione solare è circa 1.2 kW sulla superficie terrestre.

Supponiamo di poter trascurare gli effetti dell'angolo di incidenza dovuto al movimento apparente del Sole e che l'efficienza della fotosintesi sia circa 1% , allora in media le piante immagazzinano $\sim 500 \text{ kJ/m}^2$ al giorno sotto forma di carboidrati.

In realtà questo valore va probabilmente aumentato di un fattore circa 10 a causa del fatto che la superficie del fogliame è frastagliata, quindi $\sim 5000 \text{ kJ/m}^2$ al giorno.

La potenza media necessaria ad un essere umano è circa 100 W, quindi
~ 8640 kJ al giorno.

Quindi per il metabolismo di un solo essere umano ci vogliono almeno un paio di metri quadrati di terreno coltivato, supponendo che TUTTI i carboidrati prodotti possano essere utilizzati, cosa che in realtà non è vera, ma che comunque ci dà una stima di ordine di grandezza.

Un litro di benzina ha un potere calorifico di circa 32000 kJ/l, e il consumo di un moderno motore a benzina è approssimativamente 7 km/l, quindi un'auto a benzina consuma mediamente circa 4000-5000 kJ/km, vale a dire l'output giornaliero di 1 m² di vegetazione.

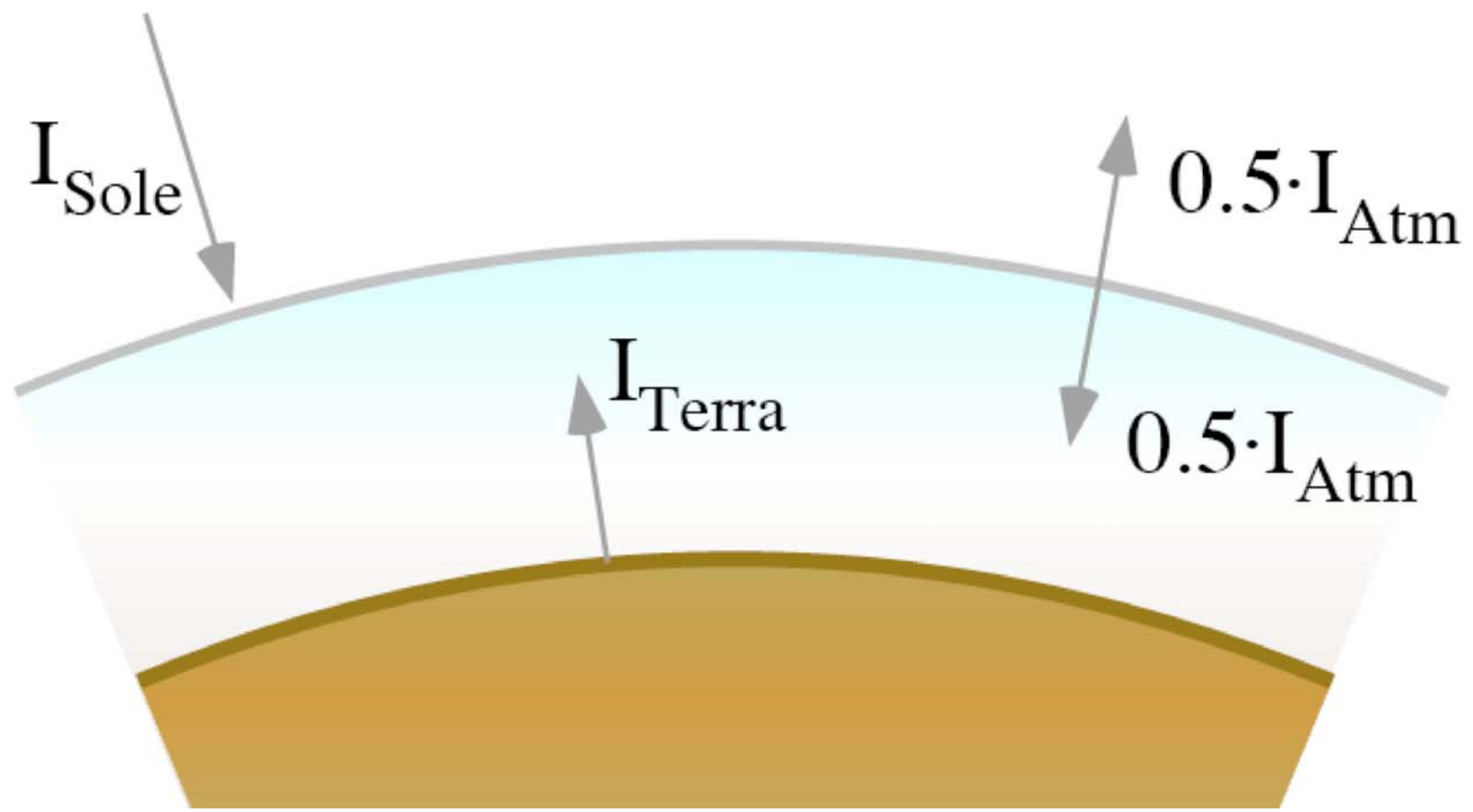
L'effetto serra

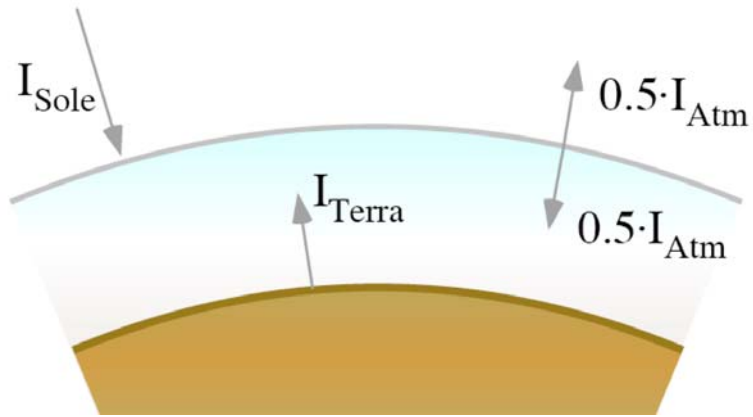
Equilibrio termico di una Terra senza atmosfera
($I_{Sole} \approx 1.3 \text{ kW/m}^2$)

$$W = \pi R^2 a I_{Sole} - 4\pi R^2 a \sigma T_P^4$$

$$I_{Sole} - 4\sigma T_P^4 = 0$$

$$T_P = \left(\frac{I_{Sole}}{4\sigma} \right)^{1/4} \approx 270 \text{ K}$$





$$I_{Terra} = I_{Sole} + \frac{1}{2} I_{Atm}$$

$$I_{Sole} = \frac{1}{2} I_{Atm}$$

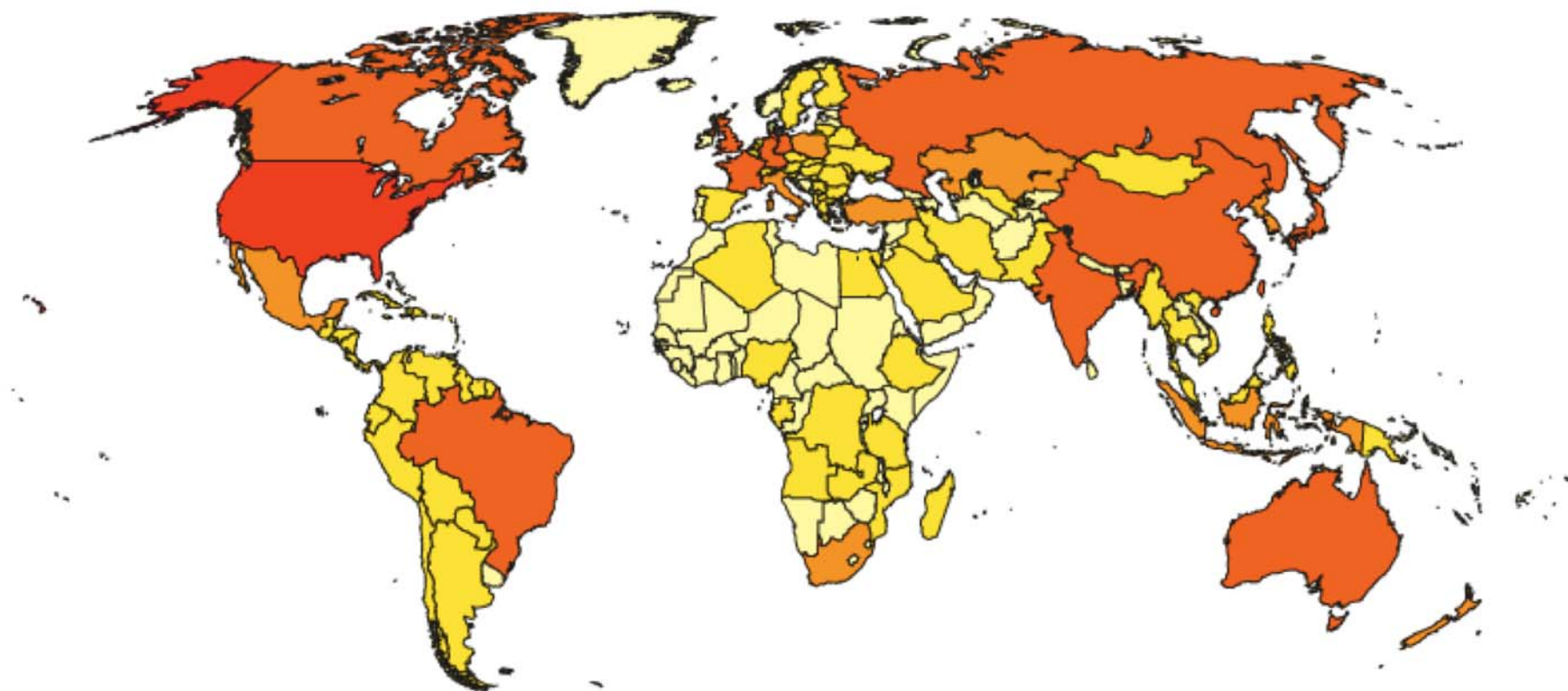
→ $I_{Terra} = I_{Atm} = 2I_{Sole}$

→ $2I_{Sole} - 4\sigma T_P'^4 = 0$

$$T_P' = \left(\frac{2I_{Sole}}{4\sigma} \right)^{1/4} \approx 327K \approx 54^\circ C$$



Executive Summary. Scientific Expert Group Report on Climate Change and Sustainable Development.
Prepared for the 15th Session of the Commission on Sustainable Development.



* CO₂ emissions from fossil fuel combustion and cement production, including land use change (Mt C per year from 1950 - 2003)



Figure ES.1. The annual emissions of CO₂ by country, averaged over the period 1950 to 2003, in millions of tonnes of carbon per year (MtC/year).

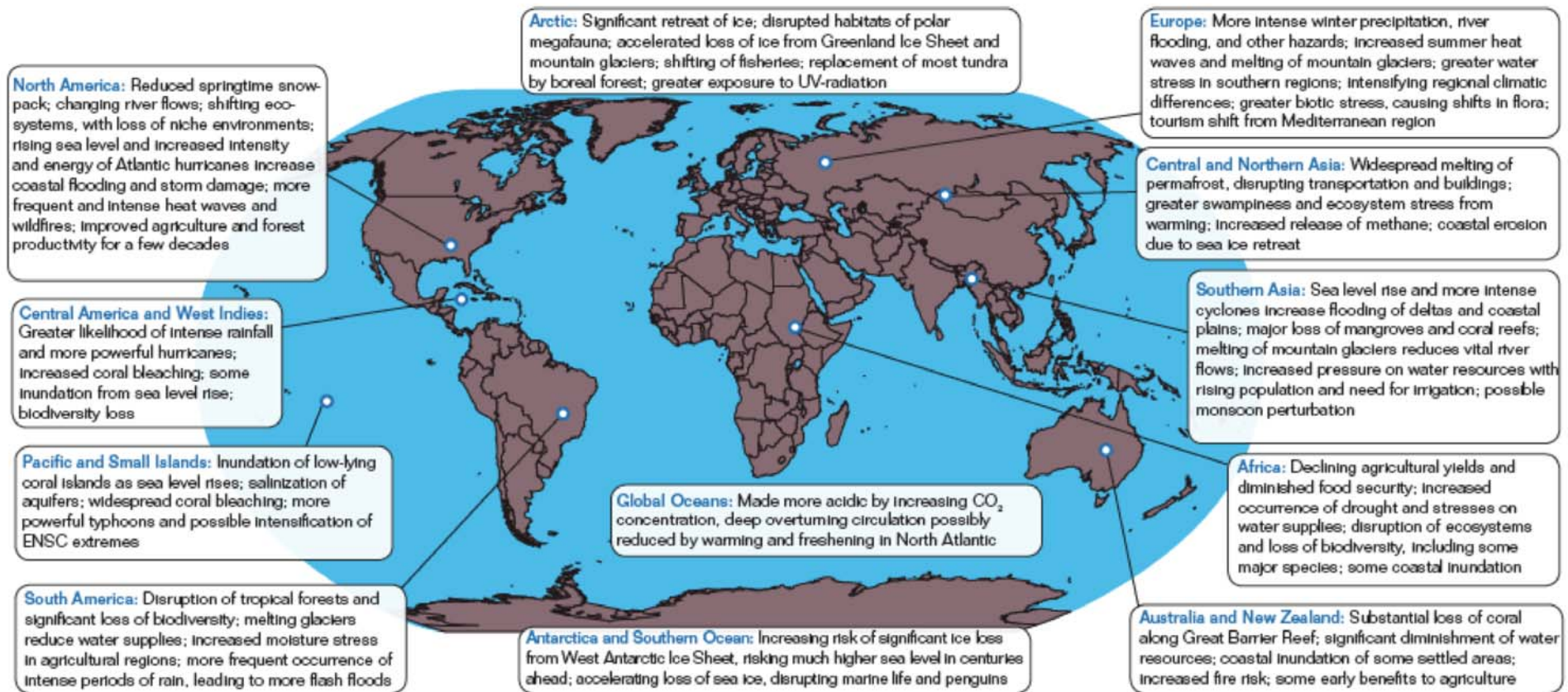


Figure ES.2. Significant impacts of climate change that will likely occur across the globe in the 21st century.

Box ES.1. UN Millennium Development Goals

The eight Millennium Development Goals (MDGs) – which range from halving extreme poverty to halting the spread of HIV/AIDS and providing universal primary education, all by the target date of 2015 – form a blueprint agreed to by all the world's countries and all the world's leading development institutions. The MDGs were adopted by heads of state meeting at the United Nations headquarters in September 2000. The goals are to:

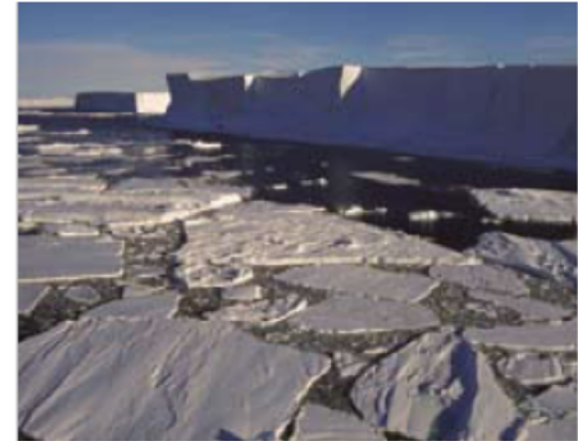
- 1. Eradicate extreme poverty and hunger**
- 2. Achieve universal primary education**
- 3. Promote gender equality and empower women**
- 4. Reduce child mortality**
- 5. Improve maternal health**
- 6. Combat HIV/AIDS, malaria and other diseases**
- 7. Ensure environmental sustainability**
- 8. Develop a global partnership for development**

See <http://www.un.org/millenniumgoals/index.html>.

The Time for Collective Action is Now

Governments, corporations, and individuals must act now to forge a new path to a sustainable future with a stable climate and a robust environment. There are many opportunities for taking effective early action at little or no cost. Many of these opportunities also have other environmental or societal benefits. Even if some of the subsequent steps required are more difficult and expensive, their costs are virtually certain to be smaller than the costs of the climate-change damages these measures would avert.

Two starkly different futures diverge from this time forward. Society's current path leads to increasingly serious climate-change impacts, including potentially catastrophic changes in climate that will compromise efforts to achieve development objectives where there is poverty and will threaten standards of living where there is affluence. The other path leads to a transformation in the way society generates and uses energy as well as to improvements in management of the world's soils and forests. This path will reduce dangerous emissions, create economic opportunity, help to reduce global poverty, reduce degradation of and carbon emissions from ecosystems, and contribute to the sustainability of productive economies capable of meeting the needs of the world's growing population.



Humanity must act collectively and urgently to change course through leadership at all levels of society. There is no more time for delay.



The Nobel Peace Prize 2007

"for their efforts to build up and disseminate greater knowledge about man-made climate change, and to lay the foundations for the measures that are needed to counteract such change"

IPCC

INTERGOVERNMENTAL
PANEL ON
CLIMATE CHANGE



**Intergovernmental Panel
on Climate Change
(IPCC)**

① 1/2 of the prize

Geneva, Switzerland

Founded in 1988



Photo: Ken Opprann

**Albert Arnold (Al) Gore
Jr.**

① 1/2 of the prize

USA

b. 1948

La conversione dell'energia solare

Quanto può essere efficiente la conversione dell'energia solare?

Un ipotetico motore che lavora tra le temperature

$T_A = 300 \text{ K}$ e $T_S = 6000 \text{ K}$

ha un'efficienza

$$\eta = 1 - \frac{T_A}{T_S} \approx 95\%$$

Ma che succede con la radiazione di corpo nero solare?
(derivazione euristica)

$$u = \frac{4}{c} \sigma T_s^4$$

densità di energia per unità
di tempo

$$ds = \frac{du}{T_s} = \frac{4}{c} \cdot 4 \sigma T_s^3 dT$$

variazione di entropia per
unità di volume per unità di
tempo

quindi $\Delta s = \frac{4}{c} \cdot \frac{4}{3} \sigma T_s^3$

energia libera di Helmholtz (energia disponibile per il lavoro) per unità di tempo

$$W = \left(A\sigma T_S^4 \right) - T_A \left(\frac{4}{3} A\sigma T_S^3 \right)$$

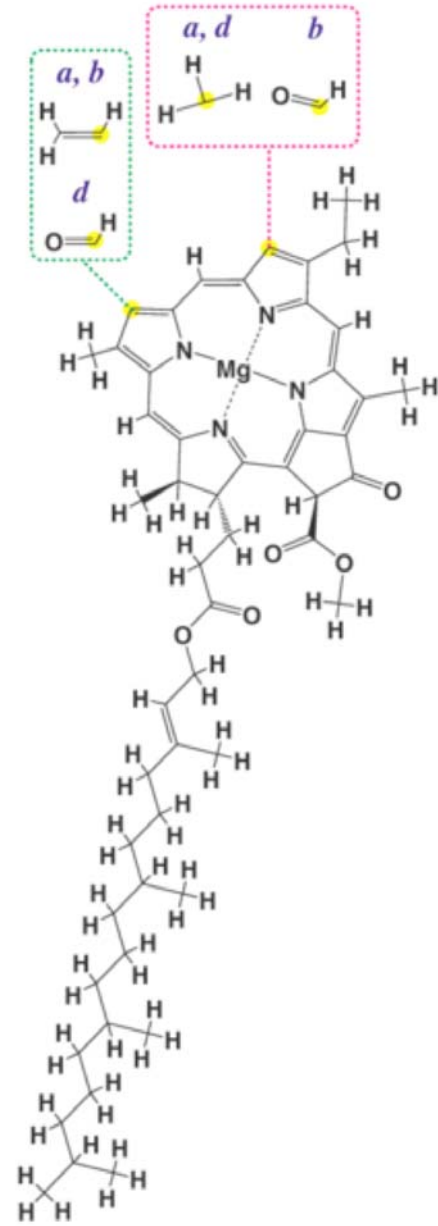
quindi l'efficienza è

$$\eta = \frac{W}{A\sigma T_S^4} = 1 - \frac{4}{3} \frac{T_A}{T_S} \approx 93.3\%$$

Photovoltaic conversion efficiencies

	Laboratory best*	Thermodynamic limit
Single junction		31%
Silicon (crystalline)	25%	
Silicon (nanocrystalline)	10%	
Gallium arsenide	25%	
Dye sensitized	10%	
Organic	3%	
Multijunction	32%	66%
Concentrated sunlight (single junction)	28%	41%
Carrier multiplication		42%

*As verified by the National Renewable Energy Laboratory. Organic cell efficiencies of up to 5% have been reported in the literature.



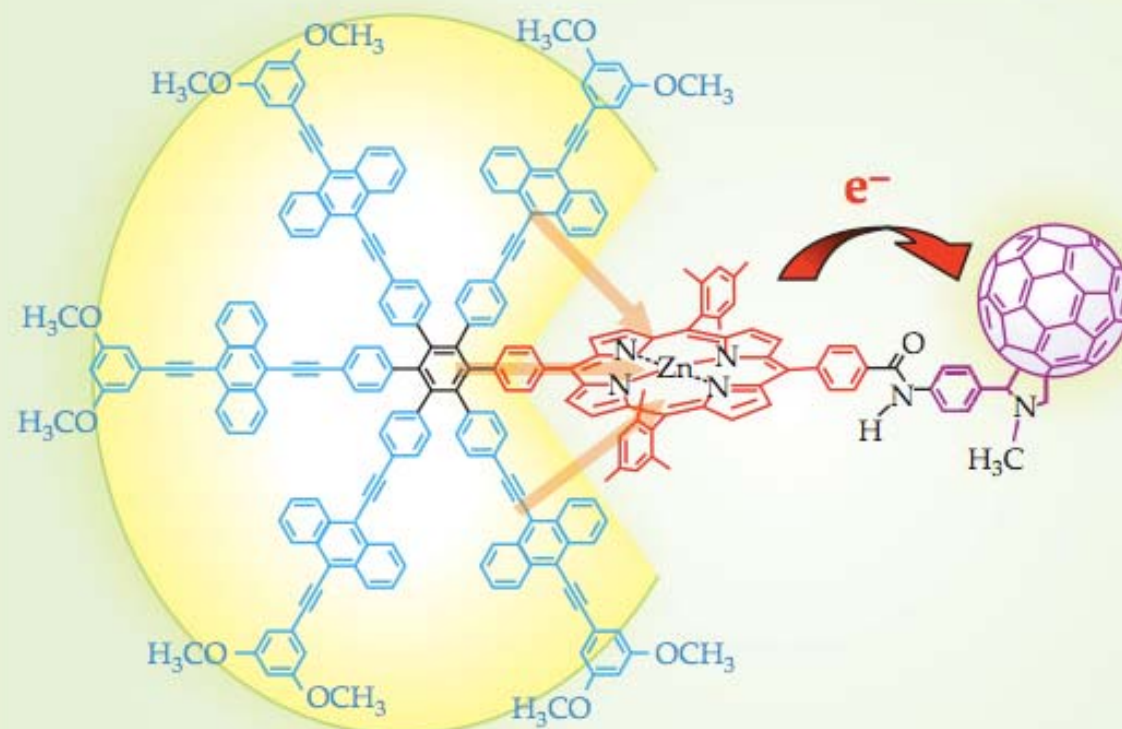


Figure 4. An artificial antenna–reaction-center complex that mimics the early stages of photosynthesis. The central hexaphenylbenzene core provides structure and rigidity for the surrounding wheel of five bis(phenylethynyl)anthracene antennas that gather light at 430–475 nanometers. The energy is transferred to a porphyrin complex in 1–10 picoseconds (orange arrows), where it excites an electron that is transferred to the fullerene acceptor in 80 ps; the resulting charge-separated state has a lifetime of 15 nanoseconds. Complexes such as the one shown provide the first steps in artificial photosynthesis. They have the potential to drive further chemical reactions, such as the oxidation of water to produce H_2 or the reduction of CO_2 to CH_4 , alcohol, or other fuel. (Adapted from ref. 16.)



"It looks like Fred has gone solar."