

ΗΜΕΡΙΔΑ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑ
Αίθουσα Λευκοθέα, Hilton Park, Λευκωσία
Σάββατο, 13 Δεκεμβρίου 2008

Πυρηνική Ενέργεια και Πυρηνική Ασφάλεια

Νέες Προοπτικές

Γιώργος Γιαδικιάρου

Ομότ. καθ. Πυρηνικής Τεχνολογίας Πολ. Ζυρίχης

Αντικείμενο και προειδοποιήσεις

- Ενέργεια και πυρηνική ενέργεια: Τεράστια θέματα. Θα αναφερθώ μόνο σε μερικά σημεία
 - κυρίως σε **ηλεκτρική** ενέργεια
- Εάν έχετε τοποθετηθεί **δογματικά** εναντίον της πυρηνικής ενέργειας θα απογοητευθείτε
- Διακοπές και ερωτήσεις ενθαρρύνονται

Που βρισκόμαστε σήμερα

πληθυσμός - ανάπτυξη - ενέργεια - περιβάλλον
Αειφορία (sustainability)

I Πληθυσμός και ανάπτυξη

πριν 2000 χρόνια



10 εκατομμύρια

Source: J. Rich, WNA



1800



1 δισ



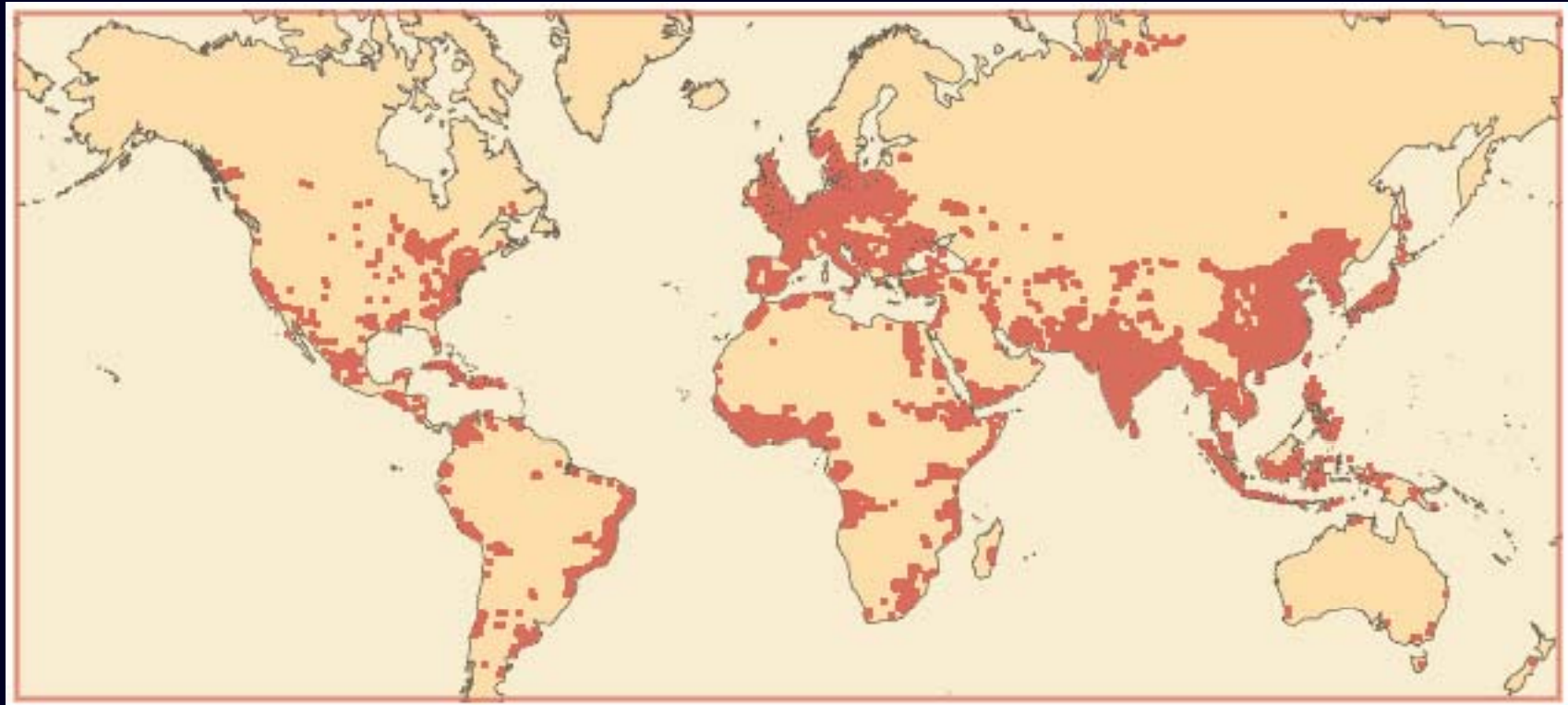
1927



2 δισ



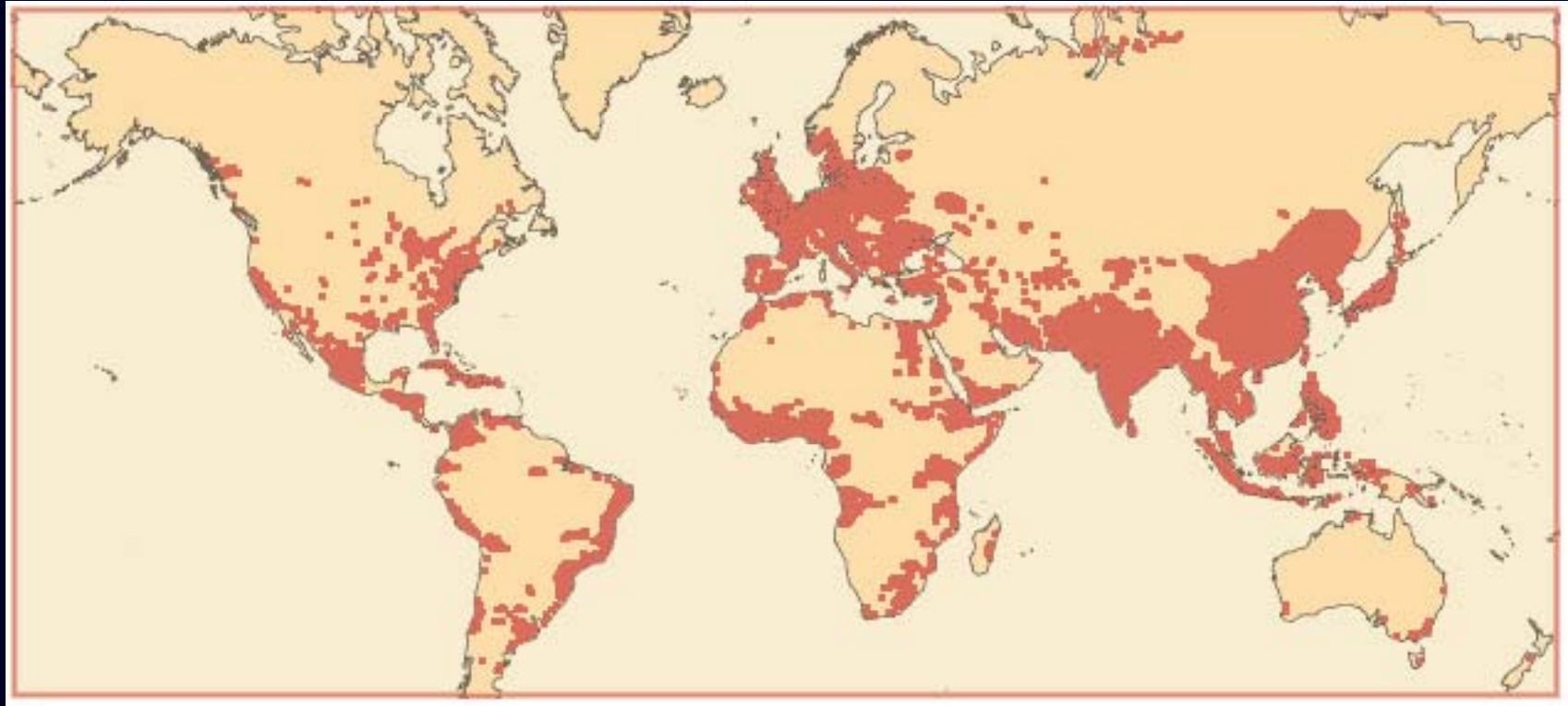
1960



3 δισ



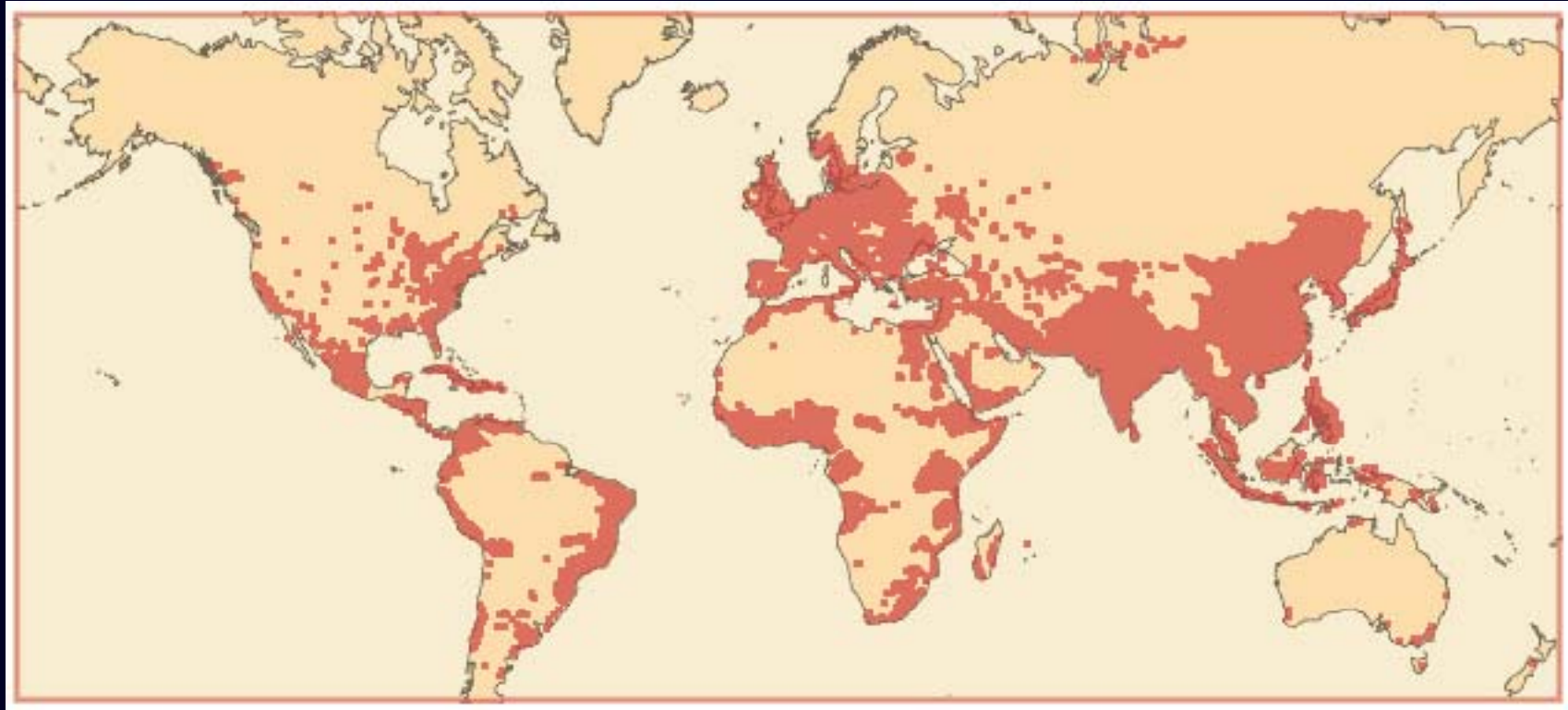
1974



4 δισ



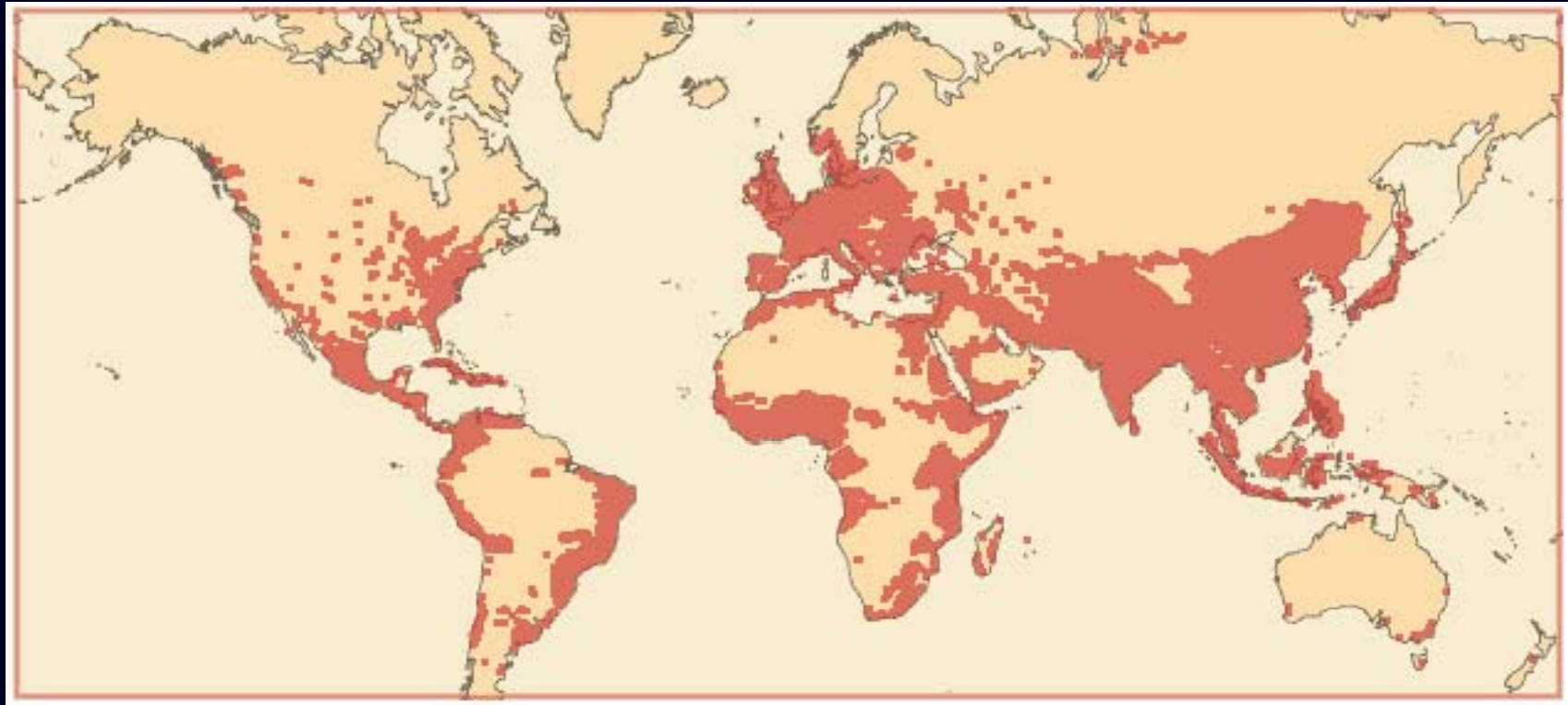
1987



5 δισ



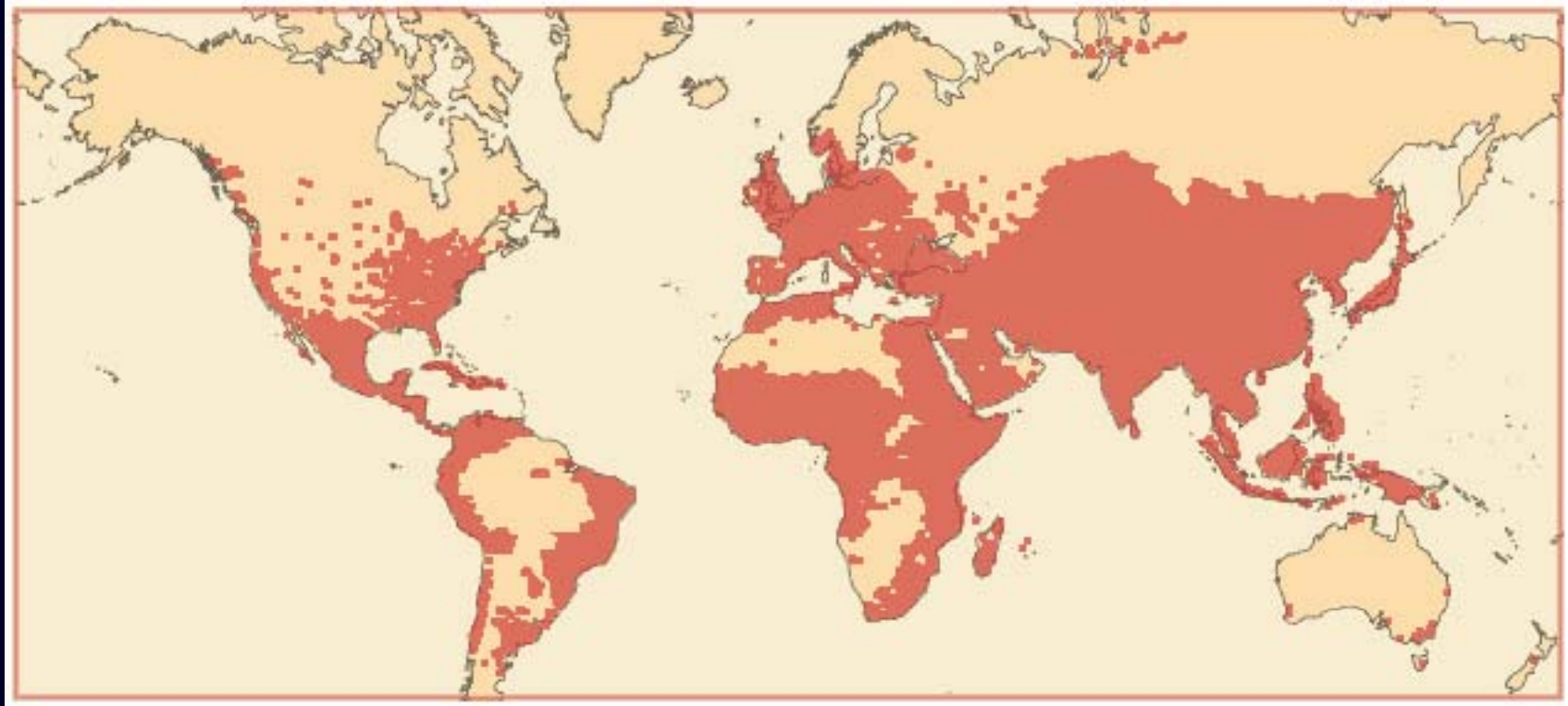
1999



Σίγ 9



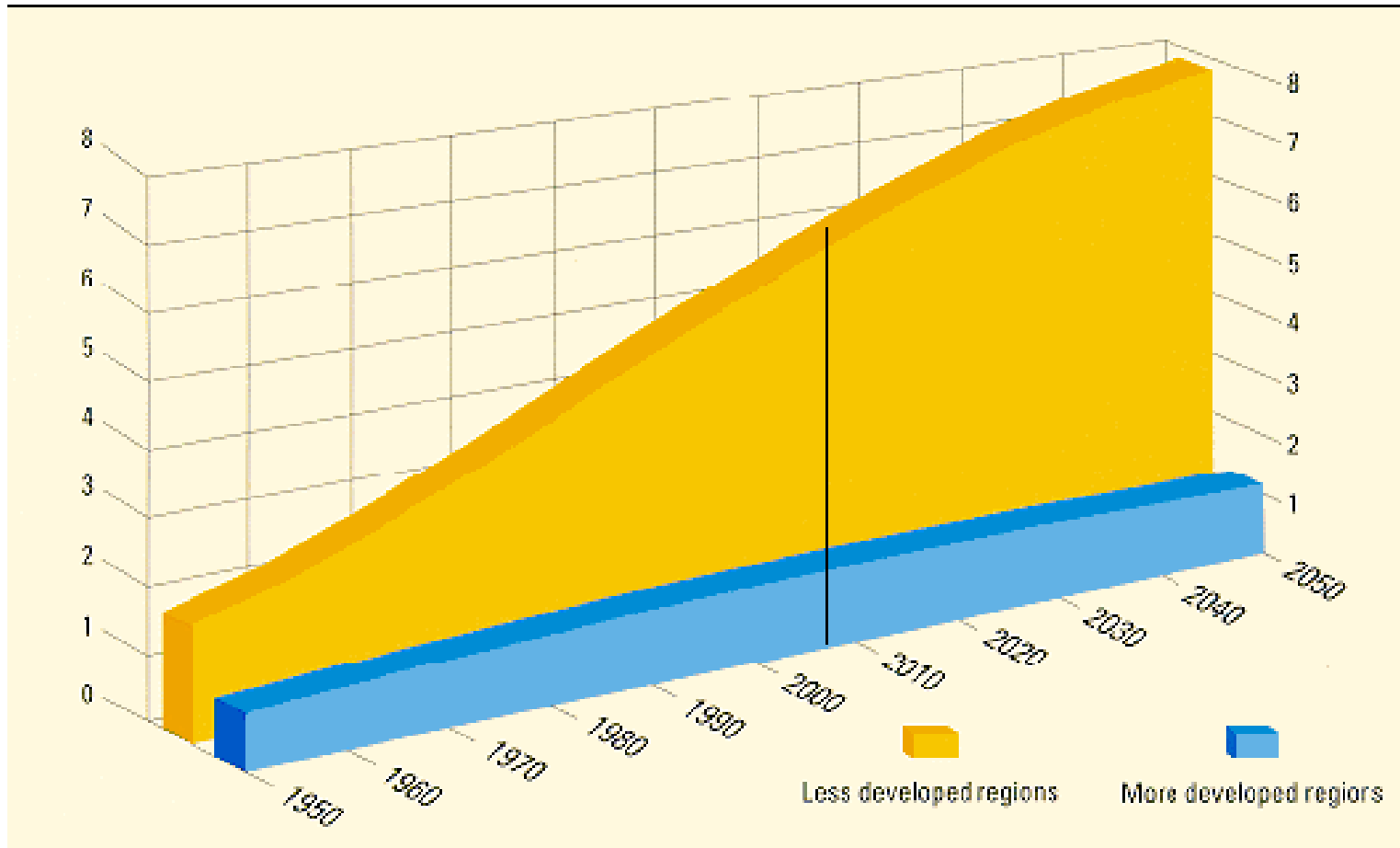
2050



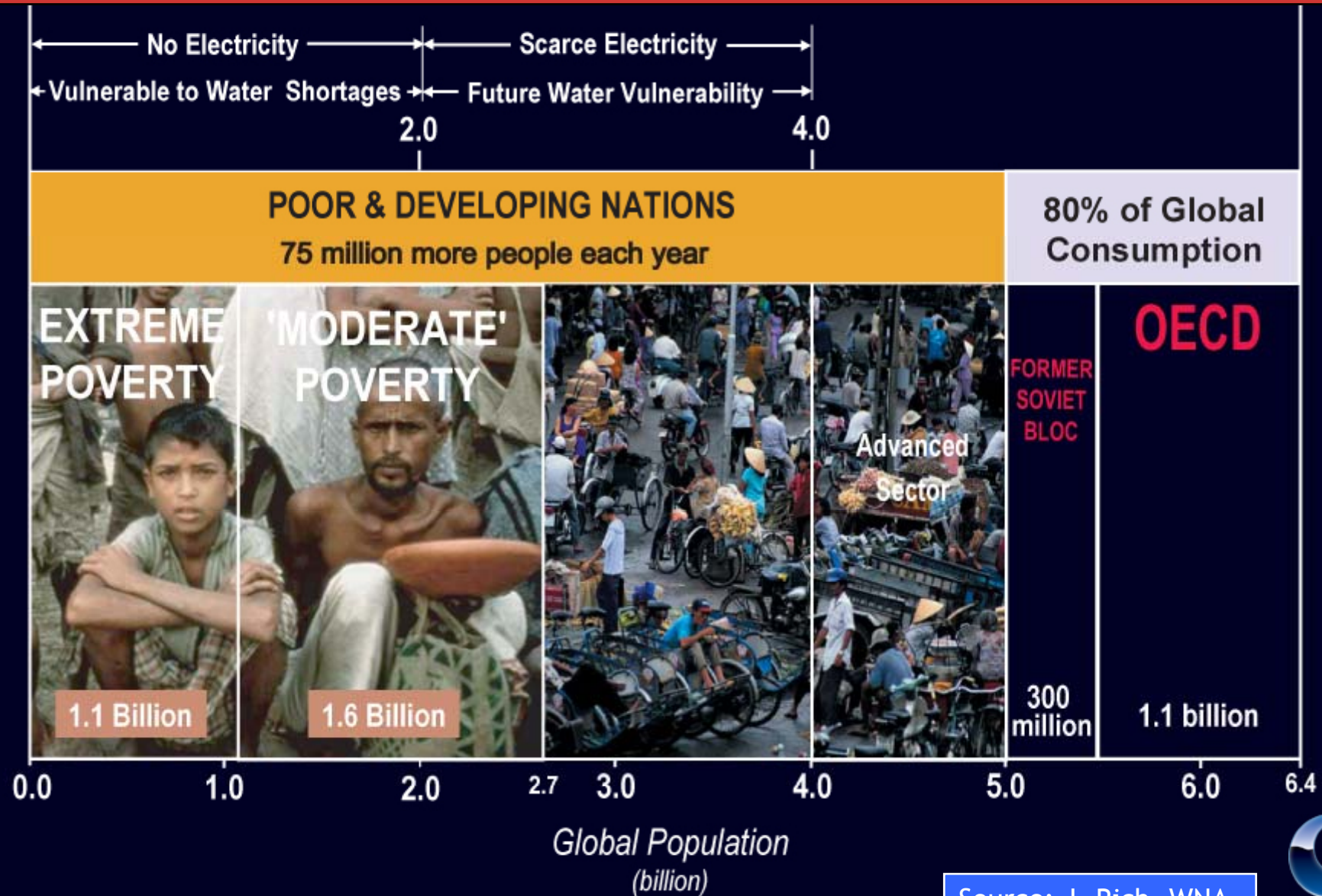
Şişir 9



Αύξηση του πληθυσμού: ασυμμετρία Ανεπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες



Μεγάλες αντιθέσεις: φτώχεια - ευημερία - κατανάλωση ενέργειας



Source: J. Rich, WNA

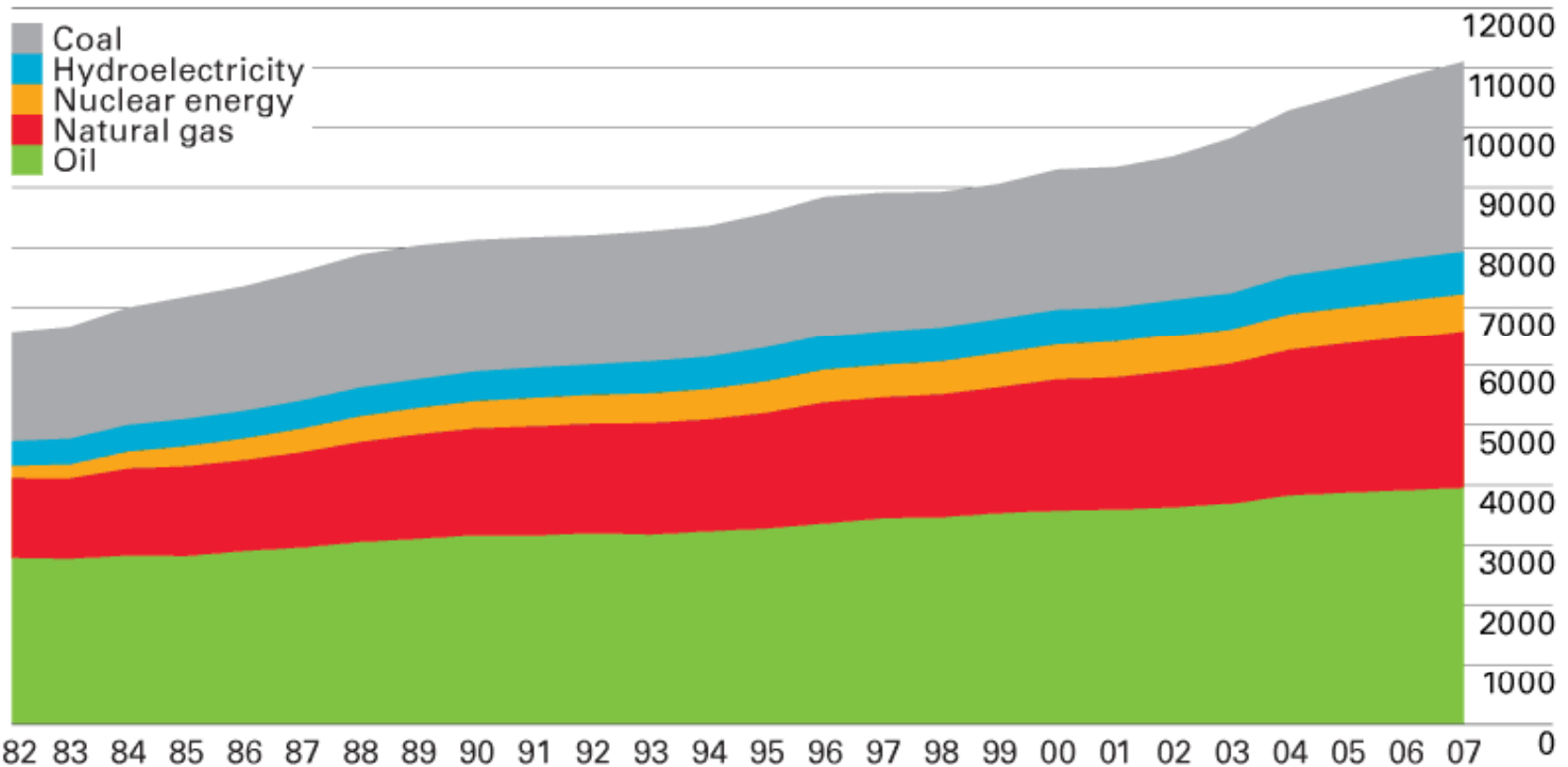


II Ενέργεια (ειδικότερα το πετρέλαιο)

Η παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας αυξάνεται συνεχώς

Source: BP Statistical review of world energy 2008

World consumption
Million tonnes oil equivalent

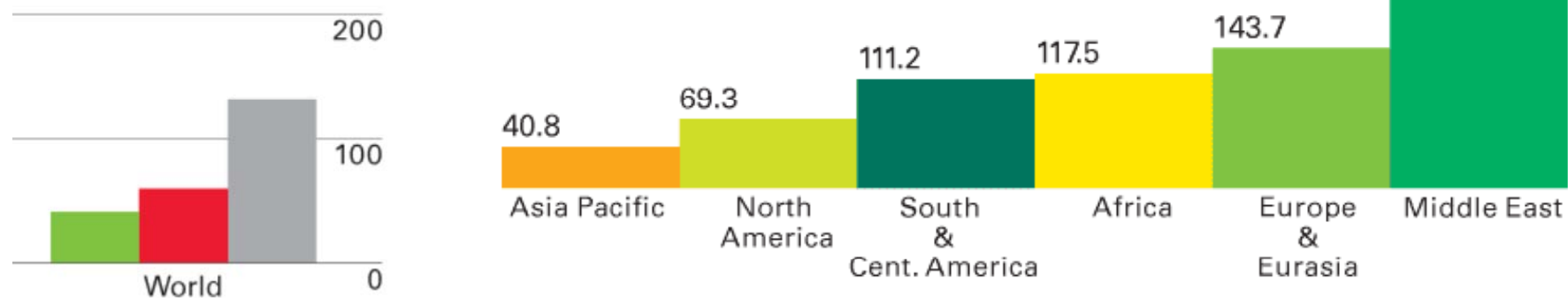


World primary energy consumption slowed in 2007, but growth of 2.4% was still above the 10-year average. Coal remained the fastest-growing fuel, but oil consumption grew slowly. Oil is still the world's leading fuel, but has lost global market share for six consecutive years, while coal has gained market share for six years.

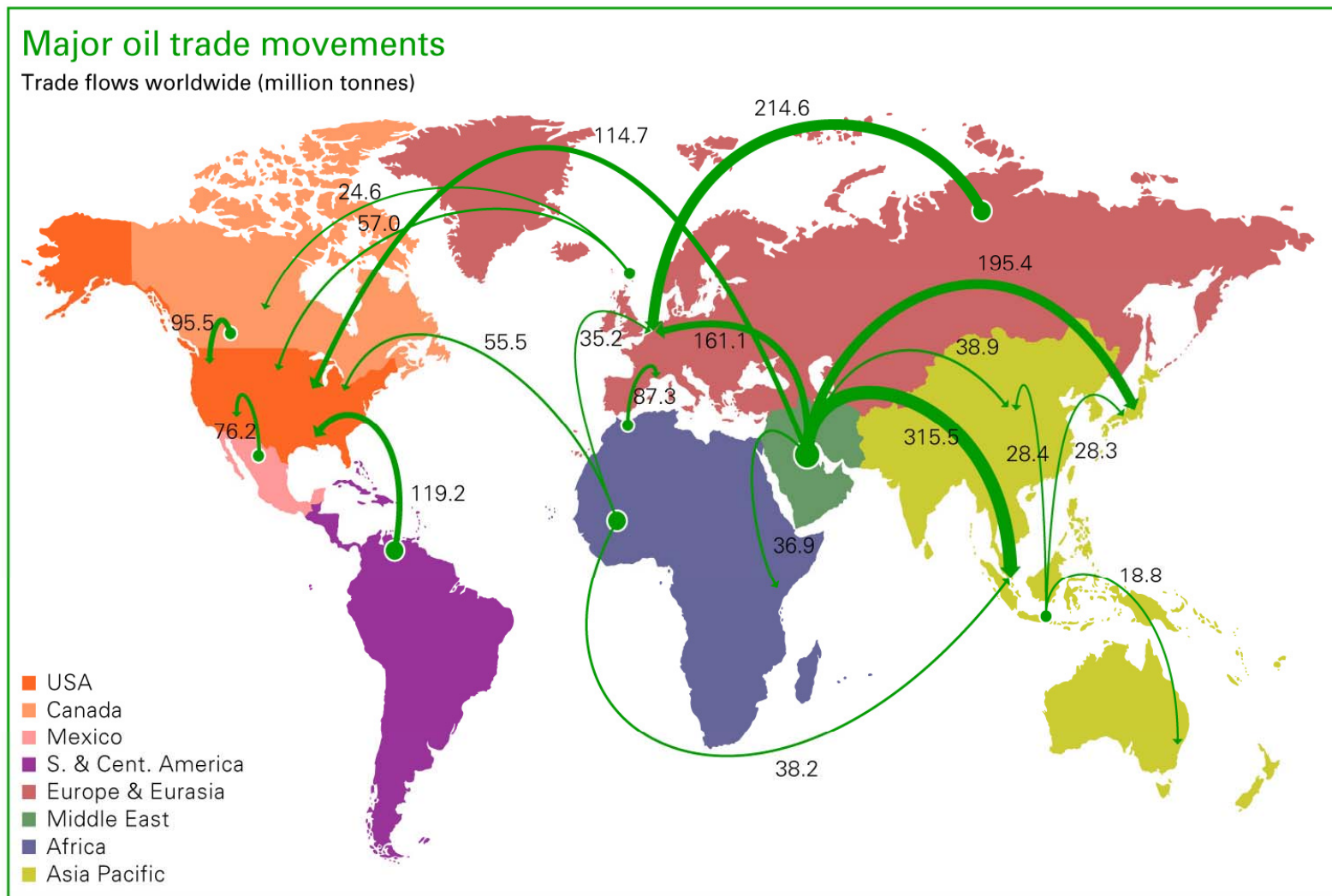
Αποθέματα πετρελαίου στο τέλος 2007

Source: BP Statistical review of world energy 2008

Proved reserves at end 2007
Thousand million barrels

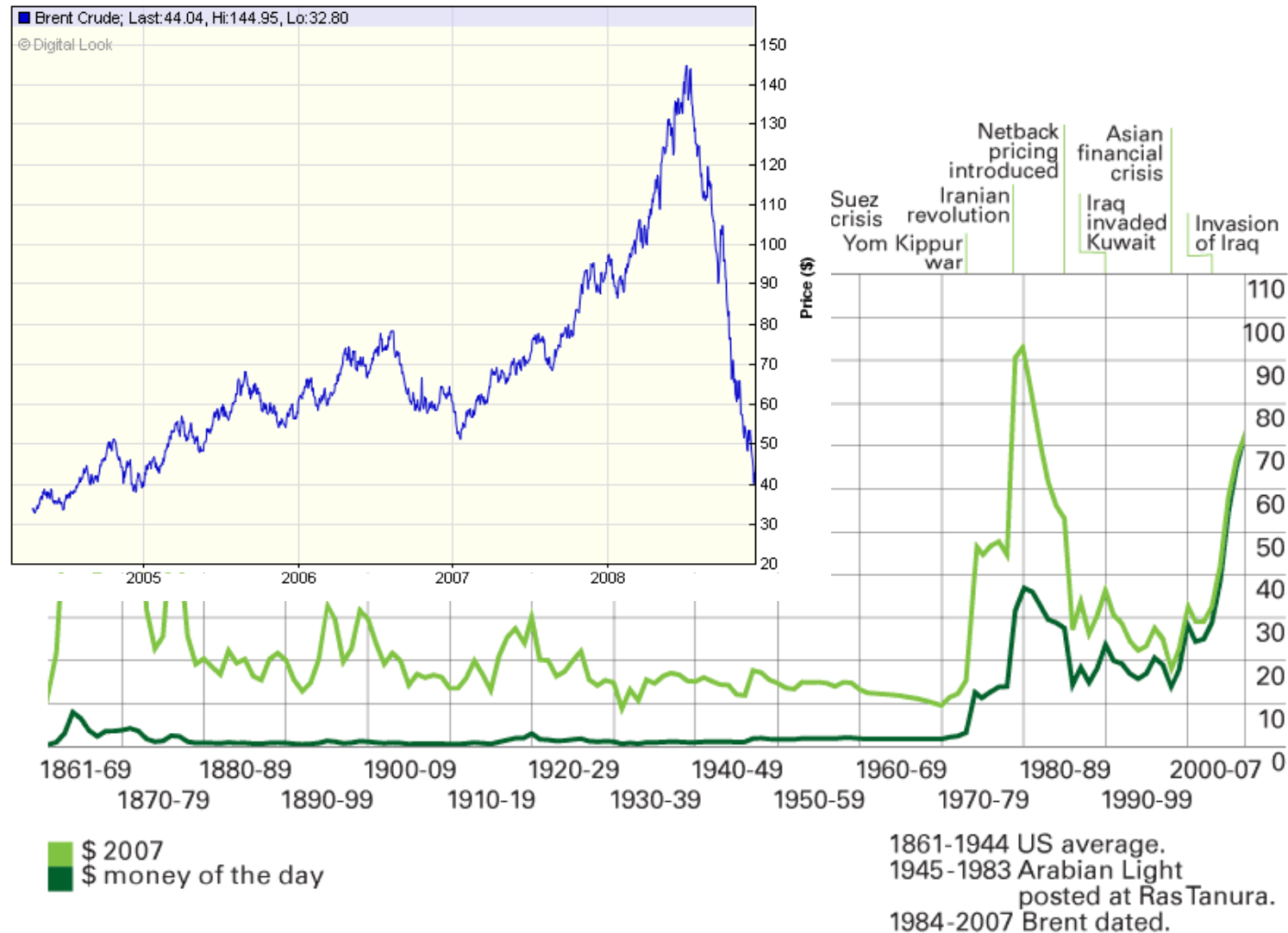


Η κατανάλωση και ροή του πετρελαίου: γεωπολιτικά και οικολογικά προβλήματα



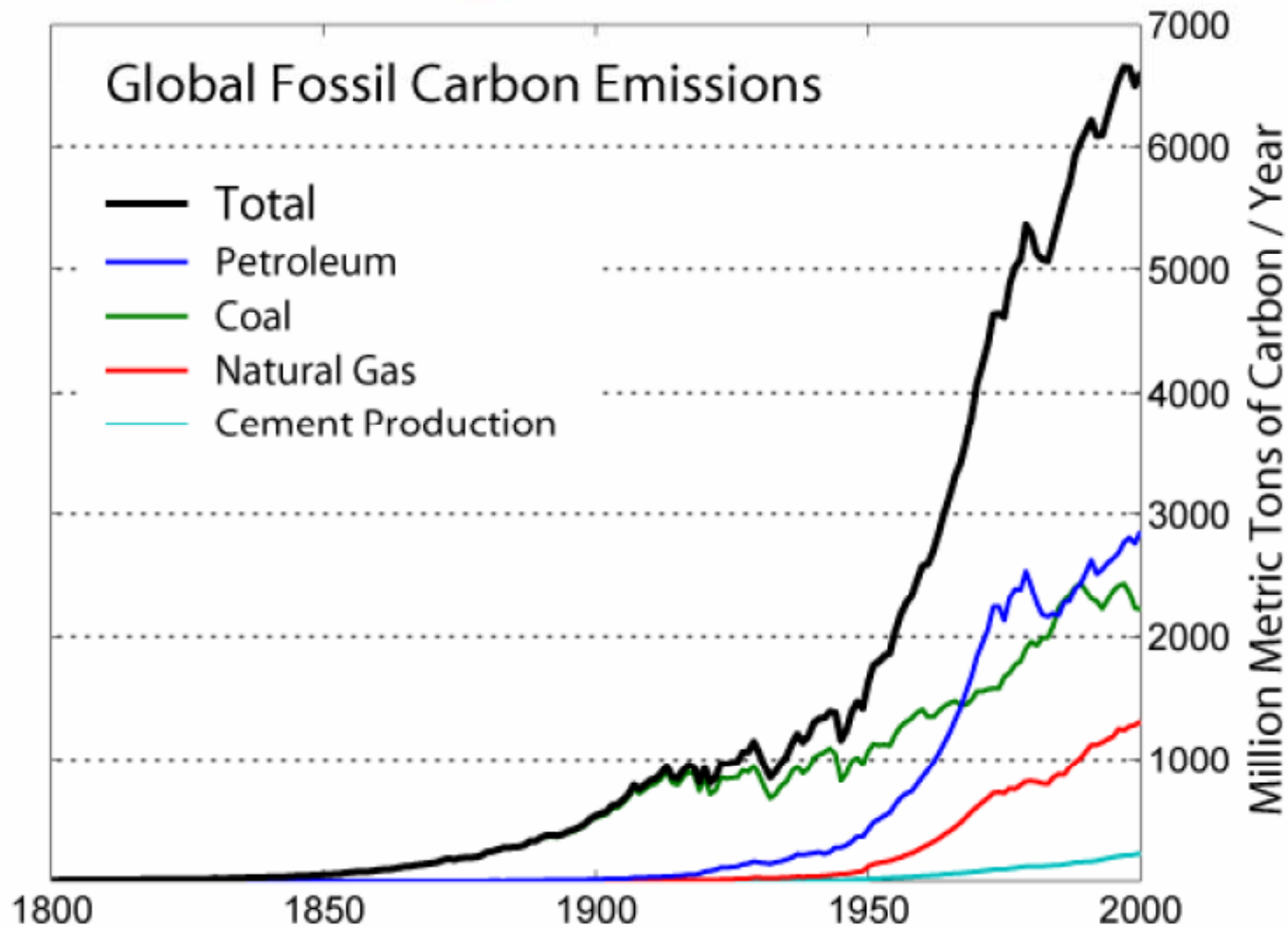
BP statistical review of world energy 2003

Η τιμή του αργού πετρελαίου: παράγων αστάθειας



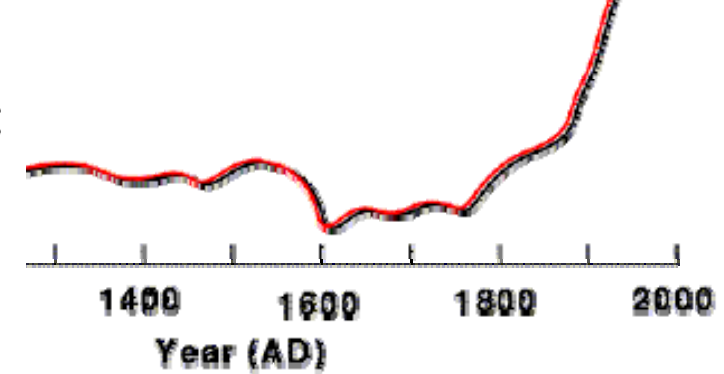
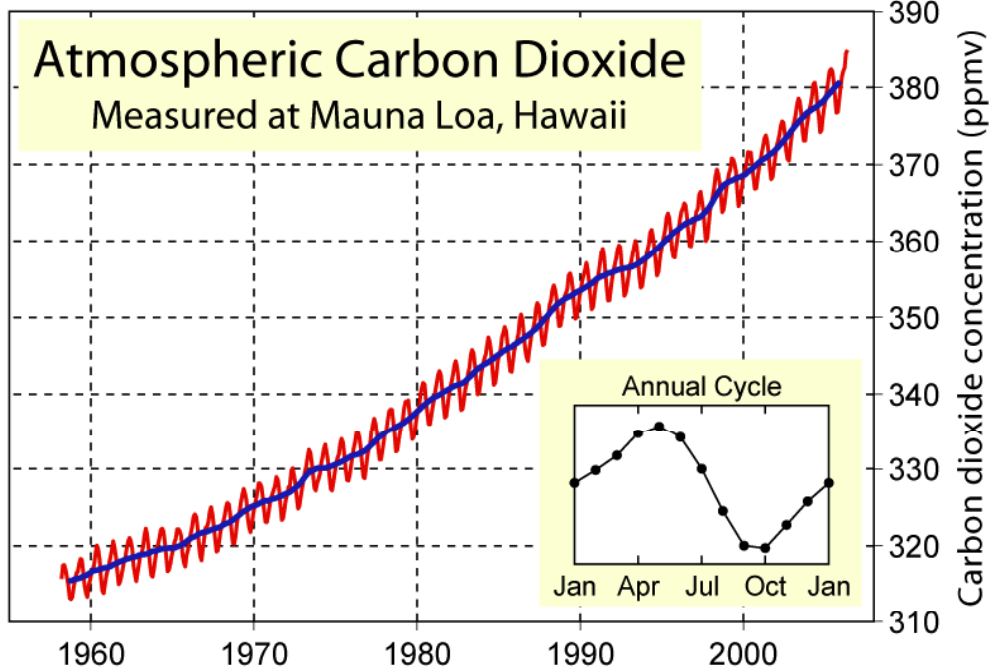
III Περιβάλλον

900 τόνοι CO₂ το δευτερόλεπτο το μεγαλύτερο μέρος από καύση ορυκτών καύσιμων



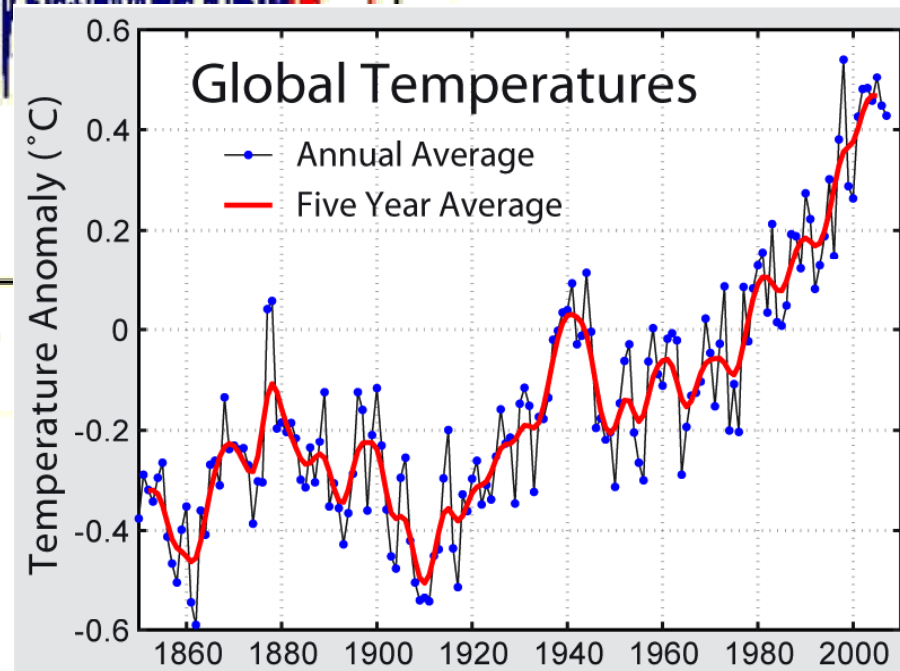
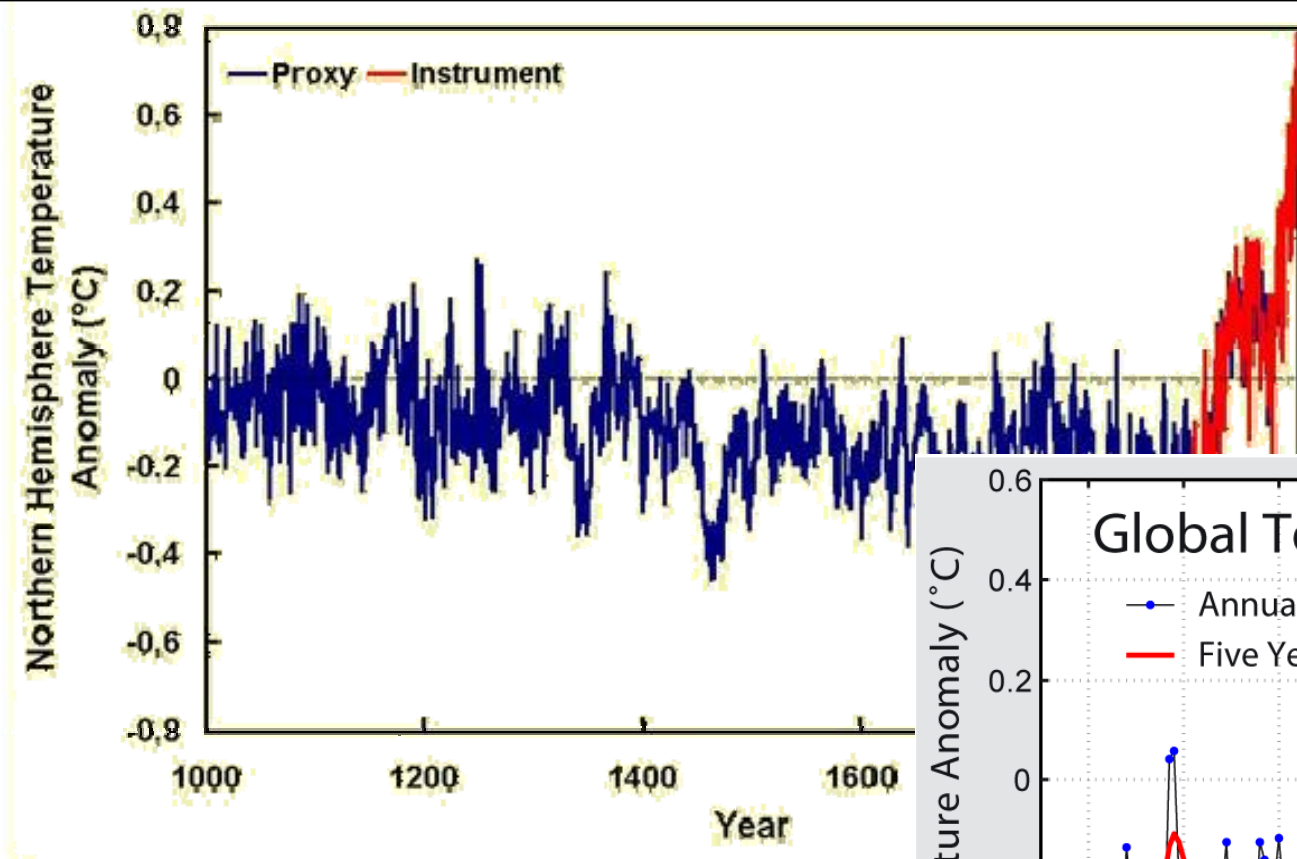
Source: Marland et al 2003

Συγκέντρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα



$$\frac{380 - 280}{280} > 36\%$$

Global warming - Το φαινόμενο του θερμοκηπίου



Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

- Σχεδόν γενική αποδοχή ότι **πράγματι** η γη θα θερμανθεί κατά μερικούς βαθμούς
- Τα αποτελέσματα **αβέβαια** αλλά πιθανότατα **καταστροφικά**: κυρίως ανύψωση της στάθμης των ωκεανών από τήξη των πάγων
- Μπορούμε να περιμένουμε;
Αρχίζουμε να πιστεύουμε πως όχι

Προσωρινά συμπεράσματα

- Ο **πληθυσμός** αυξάνεται με ασύμμετρο ρυθμό (Βοράς - Νότος)
- Τα **αποθέματα** ορυκτών καυσίμων είναι αναγκαστικά πεπερασμένα + φαινόμενο του θερμοκηπίου
- Η αύξηση κατανάλωσης στις **αναπτυσσόμενες χώρες** είναι "αναπόφευκτη"
- Αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας **χωρίς σημαντικές δομικές αλλαγές**: πολύ δυσμενείς περιβαλλοντολογικές, κοινωνικές, πολιτικές συνέπειες (φαινόμενο του θερμοκηπίου, κλπ.)
- Πρώτη θετική αντίδραση: Πρωτόκολλο του Κυότο

Το Πρωτόκολλο του Κυότο και μετά

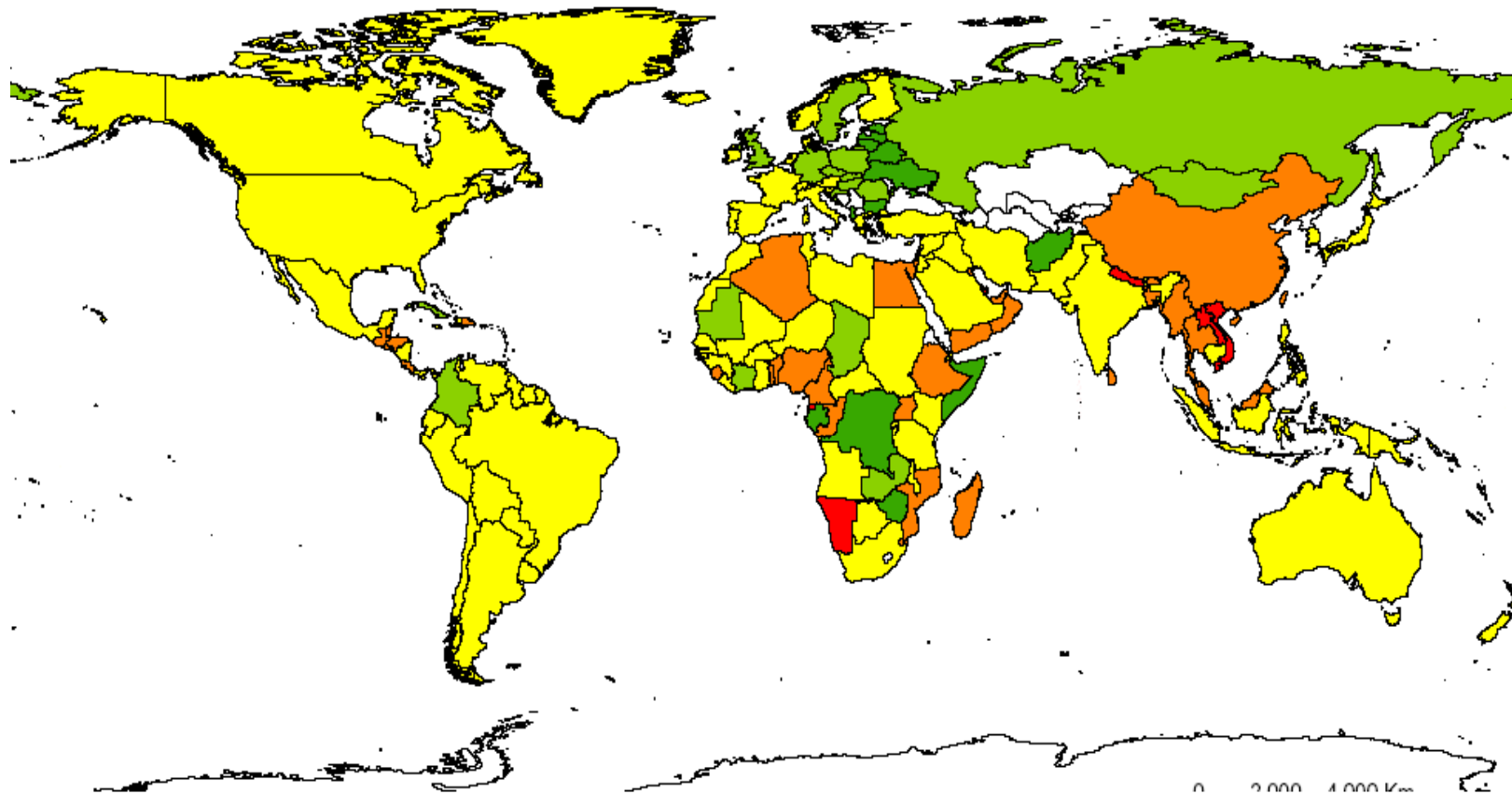
Θέτει δεσμευτικούς στόχους για 37 βιομηχανικές χώρες (+ΕΚ) για μείωση των εκπομπών αερίων του φαινομένου θερμοκηπίου.

- κατά μέσο όρο **5 %** έναντι στα επίπεδα του **1990** κατά την πενταετή περίοδο 2008-2012
- ένας πολύ **δειλός στόχος** πού ήδη **δεν επιτυγχάνεται**

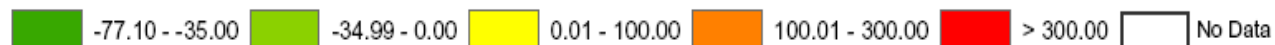
Μετά το Κυότο

- Για να επιτευχθεί ο στόχος της σταθεροποίησης των συγκεντρώσεων του CO₂ στα **550 ppm** (< **2°C**) απαιτείται υποδιπλασιασμός των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε παγκόσμιο επίπεδο μέχρι το 2050
- Ευρωπαϊκός στόχος: «**20-20-20**» : μείωση μέχρι το 2020 των εκπομπών κατά **20 %** (και **20%** από ανανεώσιμες)

Η πραγματικότητα Εκπομπές CO₂ - εξέλιξη 1990-2004 (%)



Change of CO₂ Emissions (1990 -- 2004)* (%) * Change of CO₂ Emissions for Somalia is 1990 -- 1995.

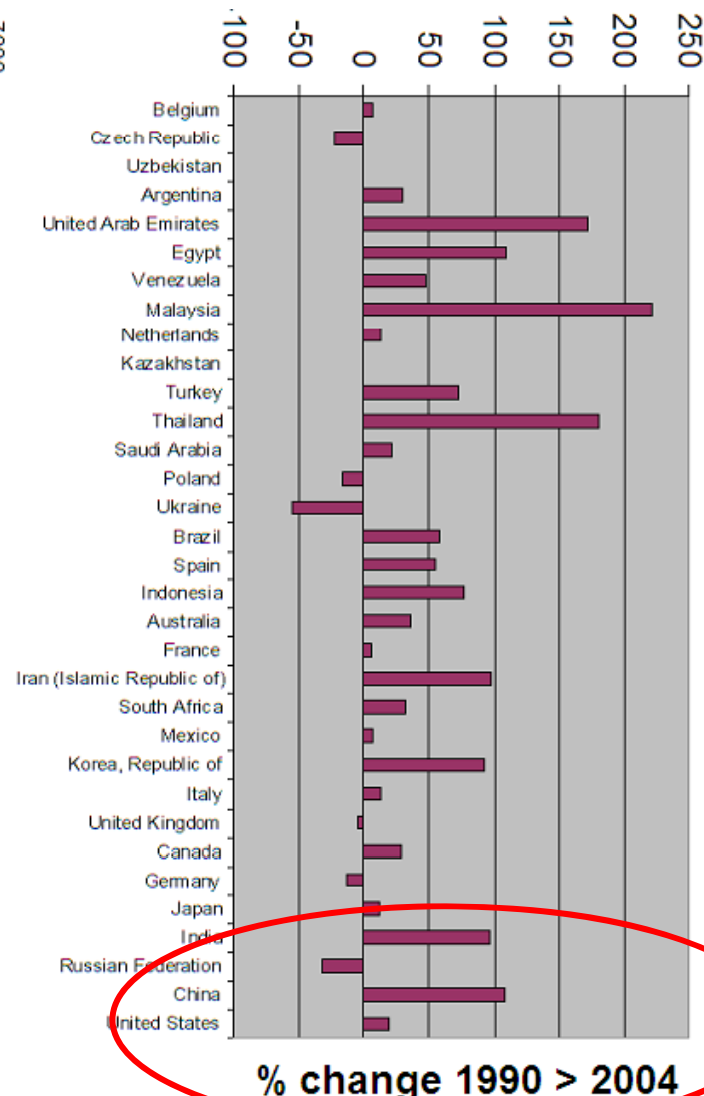
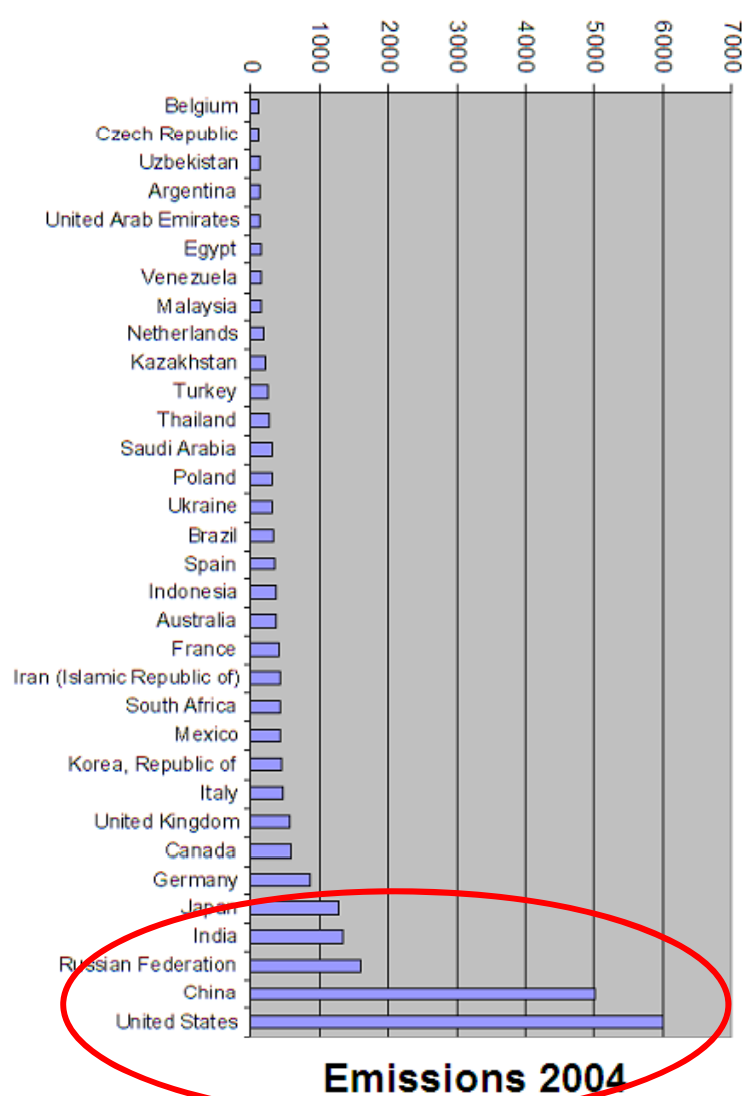


Data Source: MDG Database
Last Update: September 2007

Map Source: UNGIWG
<http://unstats.un.org/unsd/environment/qindicators.htm>



Εκπομπές CO2 και εξέλιξη 1990-2004 (%) (οι πιο σημαντικές χώρες)



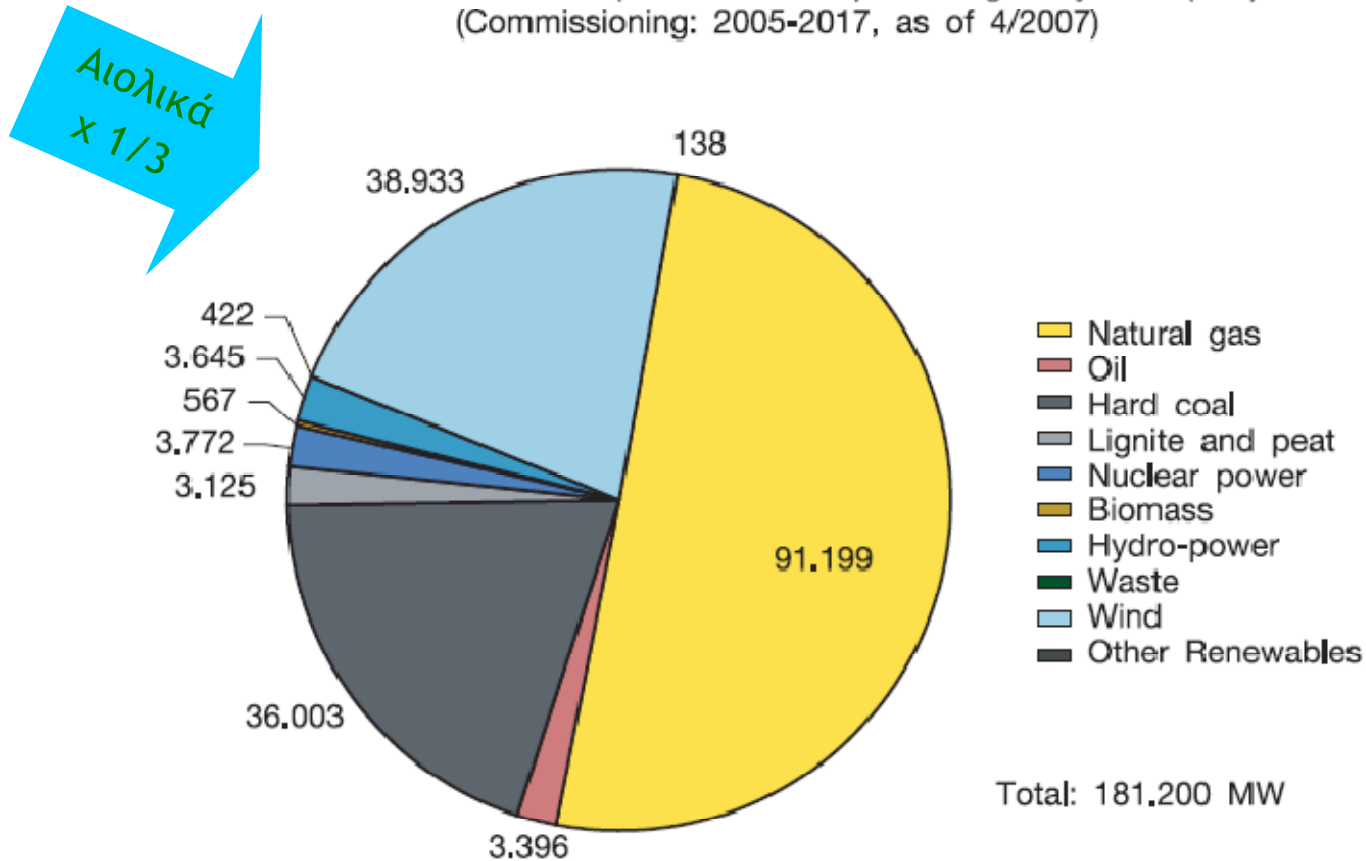
Το Πρωτόκολλο του Κυότο και μετά

Μετά το Κυότο

- Για να επιτευχθεί ο στόχος της σταθεροποίησης των συγκεντρώσεων του CO₂ στα 550 ppm (< 2°C) απαιτείται υποδιπλασιασμός των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε παγκόσμιο επίπεδο μέχρι το 2050
- Ευρωπαϊκός στόχος: «**20-20-20**» : μείωση μέχρι το 2020 των εκπομπών κατά 20 % (και 20% από ανανεώσιμες)

Σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής υπό κατασκευή ή μελέτη στην περίοδο 2005-2017 στην Ευρώπη των 25

New Power Plant Capacities in Europe Arranged by Fuel (MW)
(Commissioning: 2005-2017, as of 4/2007)



VGB Annual Report 1st July 2006 to 30th June 2007. Essen, Germany

Ποιές πηγές ενέργειας για το μέλλον ;

Οι προσφερόμενες λύσεις

- **Εξοικονόμηση/βελτιστοποίηση:**
η καλύτερη λύση - αλλά... κοινωνικές αντιδράσεις/αδράνεια στην εφαρμογή
αναπόσπαστο κομμάτι κάθε ενεργειακής πολιτικής
τα περισσότερα σοβαρά σενάρια προβλέπουν *αύξηση* της κατανάλωσης *ηλεκτρικής* ενέργειας
- **Ανανεώσιμες ενέργειες**
το **κύριο ερώτημα**: μπορούν *πράγματι* να καλύψουν τις μελλοντικές ανάγκες ;
- Ορυκτά καύσιμα και **απομόνωση, αποθήκευση του CO₂** (sequestration): ενεργοβόρα, ακριβή, **αβέβαιη, αδόκιμη τεχνολογία**
- **Πυρηνική** ενέργεια:
εμφανίζεται σαν η (μια) **αναπόφευκτη λύση**

Γιατί το τεράστιο θεωρητικό δυναμικό των ανανεώσιμων (ηλιακών) πηγών δεν πραγματοποιείται στην πράξη;

Είναι θέμα «εντροπίας»

Τα ορυκτά και τα πυρηνικά καύσιμα:
τεράστια ενεργειακή πυκνότητα

Όλες οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας
είναι διάσπαρτες και διακοπτόμενες

	Ενεργειακή πυκνότητα MJ/kg
Πετρέλαιο	42
Άνθρακας	28 (1)
Φυσικό U (σχάση μόνο του U-235)	574×10^3 (20'000)
Φυσικό U (σχάση 100% σε αναπαραγωγικό αντιδραστήρα	82×10^6 (3'000'000)

Φωτοβολταϊκά (CH) -- θερμο-
ηλιακά (έρημος):
 $3-10-15 \text{ W/m}^2$

στο έδαφος

Βιομάζα (οινόπνευμα από τεύτλα,
ξύλο, μπαμπού):
 $0.5 - 1.5 \text{ W/m}^2$

Άνεμος: 3 W/m^2 στο έδαφος

Ο νόμος: $3^{1 \pm 1.5} \text{ W/m}^2$

Συνεχής ισχύ ανά μονάδα
επιφανείας στο έδαφος

Horns Rev (DK), 160 MW_p , 68 MW_{ave} , 270 M€, $3.4 \text{ W}_{ave}/\text{m}^2$



Optimistic view: future based on renewable energies only

Πολλοί προβλέπουν ένα λαμπρό ηλιακό μέλλον χωρίς να είναι καλά πληροφορημένοι...

Ένα παράδειγμα:

“everything will be solar in 30 years”

Ralph Nader (1978)

Συγγραφέας του *Unsafe at any speed*, 1965

Επίσης υποψήφιος για την Προεδρία ΗΠΑ σε πολλές εκλογές

Πυρηνική ενέργεια / ηλεκτροπαραγωγή: διαμετρικά αντίθετες τοποθετήσεις

Η προ-πυρηνική άποψη

Humankind cannot conceivably achieve a global clean-energy revolution without a huge expansion of nuclear power:

- to generate **electricity**
- to produce **hydrogen** and battery power for tomorrow's vehicles
- to **desalinate seawater** in response to the world's rapidly emerging fresh-water crisis

John Rich, World Nuclear Association, 2006

Η άλλη άποψη: επικίνδυνη, ακριβή, κατάλοιπα, διασπορά,...

- Το μεγαλύτερο και **άλυτο πρόβλημα** της πυρηνικής ενέργειας είναι η συσσώρευση των πυρηνικών **αποβλήτων** των αντιδραστήρων. Αλυσιδωτοί οι κίνδυνοι από τη χρήση πυρηνικής ενέργειας. Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες έχουν πια ξεπεραστεί. ... Μύθος ότι οι πυρηνικοί αντιδραστήρες δεν συμβάλλουν στο **φαινόμενο του θερμοκηπίου**. Του **ΘΑΝΑΣΗ Κ. ΓΕΡΑΝΙΟΥ**, *ΕΛΕΥΘΕΡΟΤΥΠΙΑ* - 22/03/2008
- **Επικίνδυνη, δαπανηρή, αλλά και αναποτελεσματική**, όσον αφορά το στόχο, που δεν είναι άλλος από τη μείωση κατά το ήμισυ των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μέχρι το 2050, είναι η **πυρηνική ενέργεια**, σύμφωνα με την Αλεξάνδρα Μεσαρέ, διευθύντρια του τμήματος εκστρατειών της **Greenpeace**. *ΕΛΕΥΘΕΡΟΤΥΠΙΑ* - 22/03/2008
- We want to start an energy policy for the future. We want to make a seamless policy. Renewable energy sources, more energy efficiency, saving energy and **phasing out nuclear energy** are elements of a responsible and sustainable energy policy. (J. Trittin, German Federal Minister for the Environment, 2002)
Merkel: Nuclear phase-out is wrong. 10 June 2008. German Chancellor Angela Merkel has described her country's decision to close its nuclear plants as "absolutely wrong." ... her coalition partners still support ending nuclear generation.

Η πυρηνική "αναγέννηση"

... χρειαζόταν ορισμένα "σημάδια"

- Πολύ σημαντική αύξηση της ζήτησης ενέργειας (Ασία)
- Οι τιμές του πετρελαίου και του φυσικού αερίου που απογειώνονται
- Πολιτική αστάθεια (Μέση Ανατολή)
- Σημάδια του φαινομένου του θερμοκηπίου
- Μια ορισμένη "προσγείωση" σχετικά με τις εναλλακτικές/ανανεώσιμες μορφές ενέργειας (;;;)
- 20 χρόνια χωρίς πυρηνικά ατυχήματα

- Η πυρηνική ενέργεια (ξανα)εμφανίζεται σαν η (μια) αναπόφευκτη λύση

Τα επίμαχα σημεία

Πυρηνική ενέργεια: τα αρνητικά σημεία

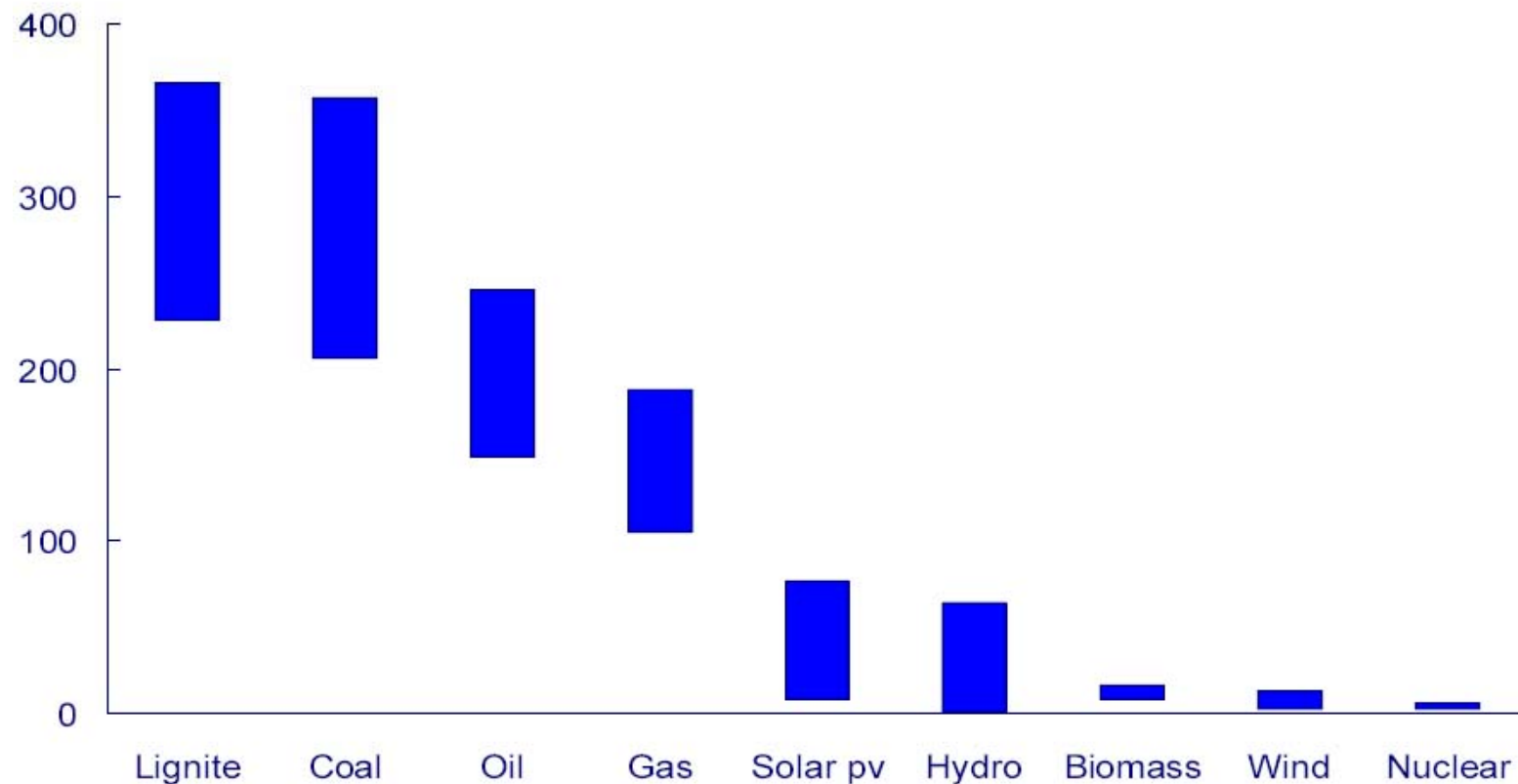
Πραγματικά:

- διαφυγή ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης
- σοβαρά ατυχήματα με μικρή πιθανότητα: ρύπανση μεγάλης έκτασης
- διάθεση των καταλοίπων
- διασπορά πυρηνικών όπλων
- πεπερασμένα (αλλά σημαντικά) αποθέματα ουρανίου (δίχως αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες)

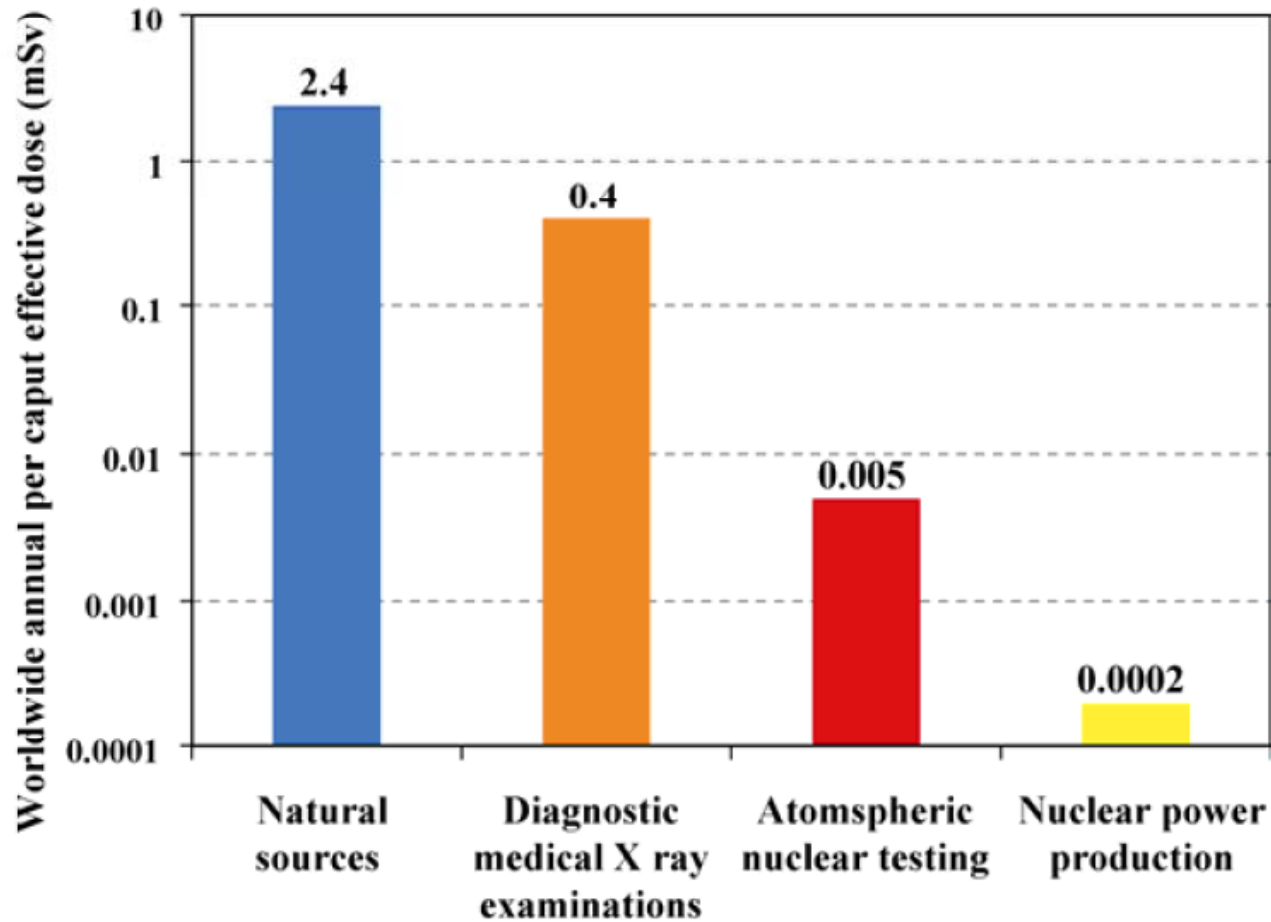
Όπως τα δαισθάνεται το κοινό (perceived):

- η παραγωγή πυρηνικής ενέργειας είναι **επικίνδυνη** για ένα μέρος του κοινού και για ορισμένους πολιτικούς (που επωφελούνται όμως από τα προϊόν: το ηλεκτρικό ρεύμα)
- ατυχήματα, καταστροφές
- το "πρόβλημα" με τα πυρηνικά κατάλοιπα
“υποθήκη για τις επόμενες γενιές”
- συγκεντρωτική τεχνολογία

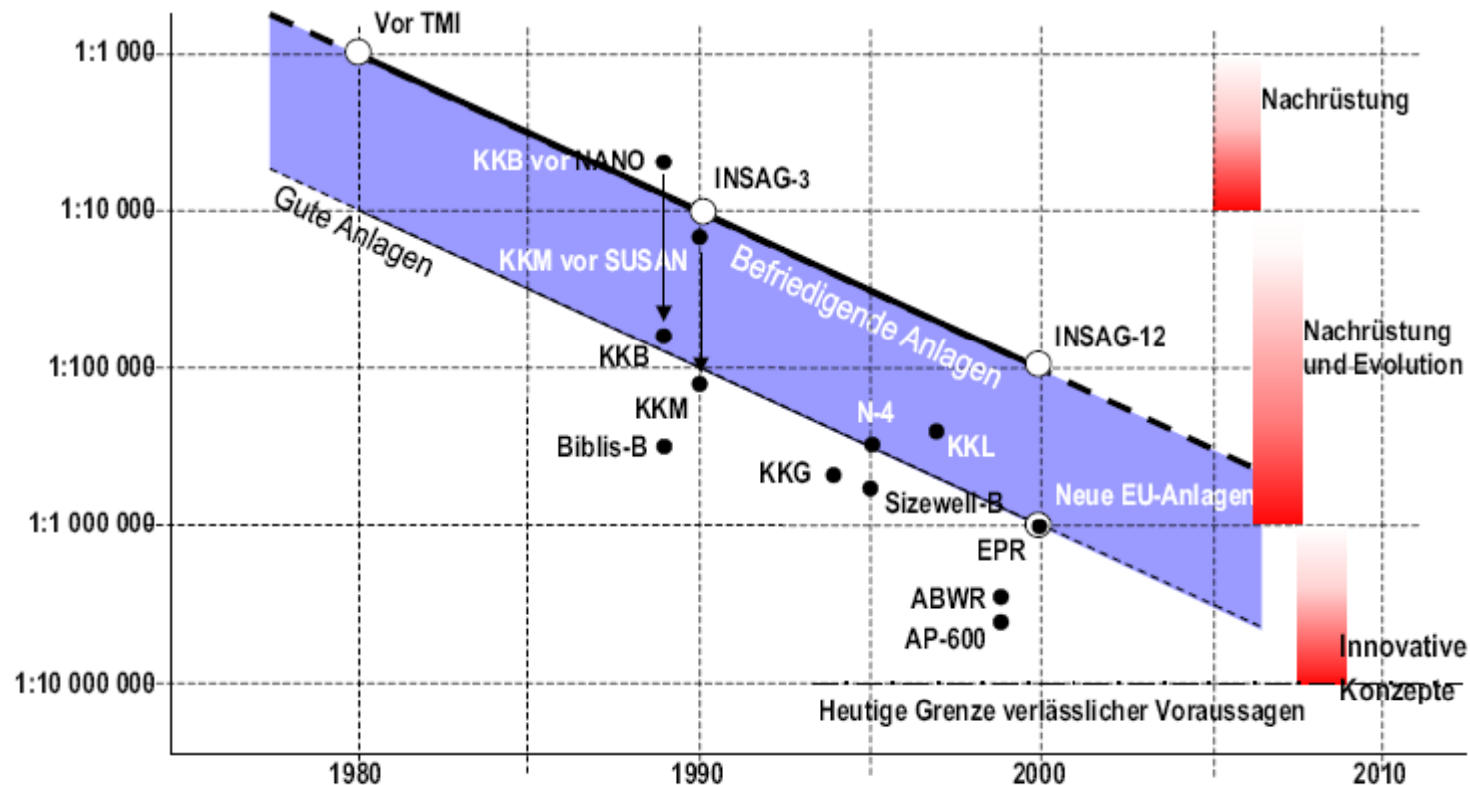
Περιβάλλον: Ισοδύναμα εκπομπών CO₂ των πηγών ηλεκτροπαραγωγής [gC/kWh]



Περιβάλλον/υγεία: Δόσεις από κανονική λειτουργία (UNSCEAR -2000)



Ασφάλεια: Χρονική εξέλιξη της πιθανότητας τήξης πυρήνα

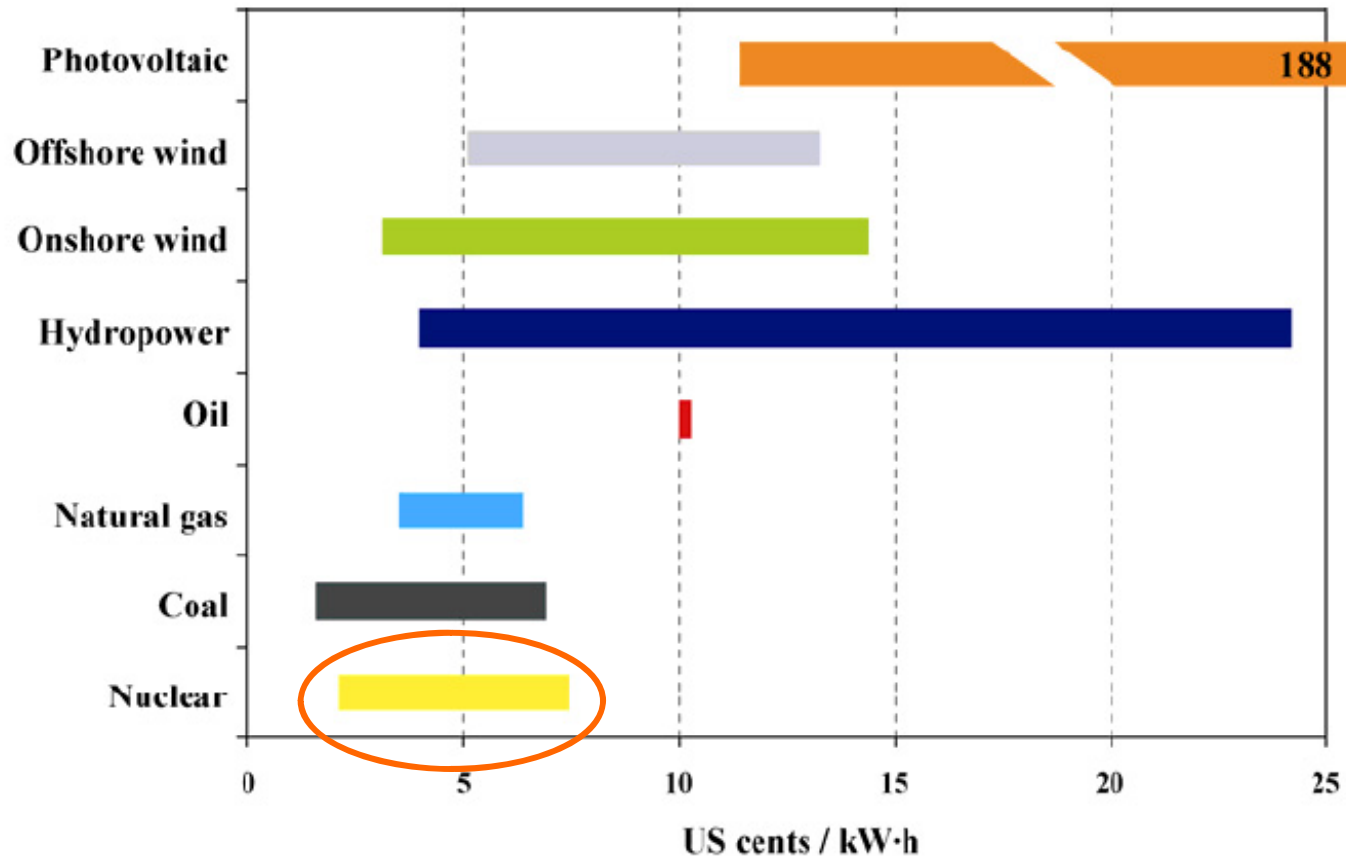


Η ασφάλεια των πυρηνικών εγκαταστάσεων βελτιώνεται όσο η τεχνολογία ωριμάζει, η εμπειρία από την εκμετάλλευση των εγκαταστάσεων ενσωματώνεται στους κανόνες ασφάλειας και νέα συστήματα και τεχνικές εφαρμόζονται.

Μη διασπορά πυρηνικών όπλων

- ο συσχετισμός μεταξύ πυρηνικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και κατασκευής πυρηνικών όπλων είναι ασθενής
- κανένα κράτος μέχρι σήμερα δεν έχει ακολουθήσει αυτό το δρόμο (αποκλειστικά) για υλοποίηση πυρηνικού οπλοστασίου
- ειδικοί μικροί « ερευνητικοί» αντιδραστήρες προσφέρονται καλύτερα και κατασκευάζονται/κρύβονται πολύ πιο εύκολα
- ο ΔΟΑΕ εφαρμόζει μέτρα μη διασποράς και ελέγχους

Οικονομική ανταγωνιστικότητα (κόστος της kWh)



IAEA, Nuclear Power and Sustainable Development, 2006

Η "αναπόφευκτη" άμεση και μεσοπρόθεσμη λύση

- Για να μειωθούν τα ατμοσφαιρικά επίπεδα του CO₂ κλπ:
- Ανυπαρξία άλλης πλήρους λύσης
 - η εξοικονόμηση ενέργειας - η καλύτερη λύση - σκοντάφτει σε κοινωνικά και πολιτικά εμπόδια
 - η εισαγωγή των **ανανεώσιμων** πηγών είναι βραδεία και ακριβή
 - **Carbon sequestration** είναι μια μακρινή, αβέβαιη, ακριβή και προσωρινή λύση
 - **η σύντηξη** δεν θα είναι έτοιμη πριν πολλά χρόνια - όταν / εάν πραγματοποιηθεί θα είναι μια πολύπλοκη τεχνολογία
 - **οι αναπτυσσόμενες χώρες** δεν είναι διατεθειμένες να κάνουν ενεργειακές θυσίες

Πυρηνική ενέργεια και αειφορία

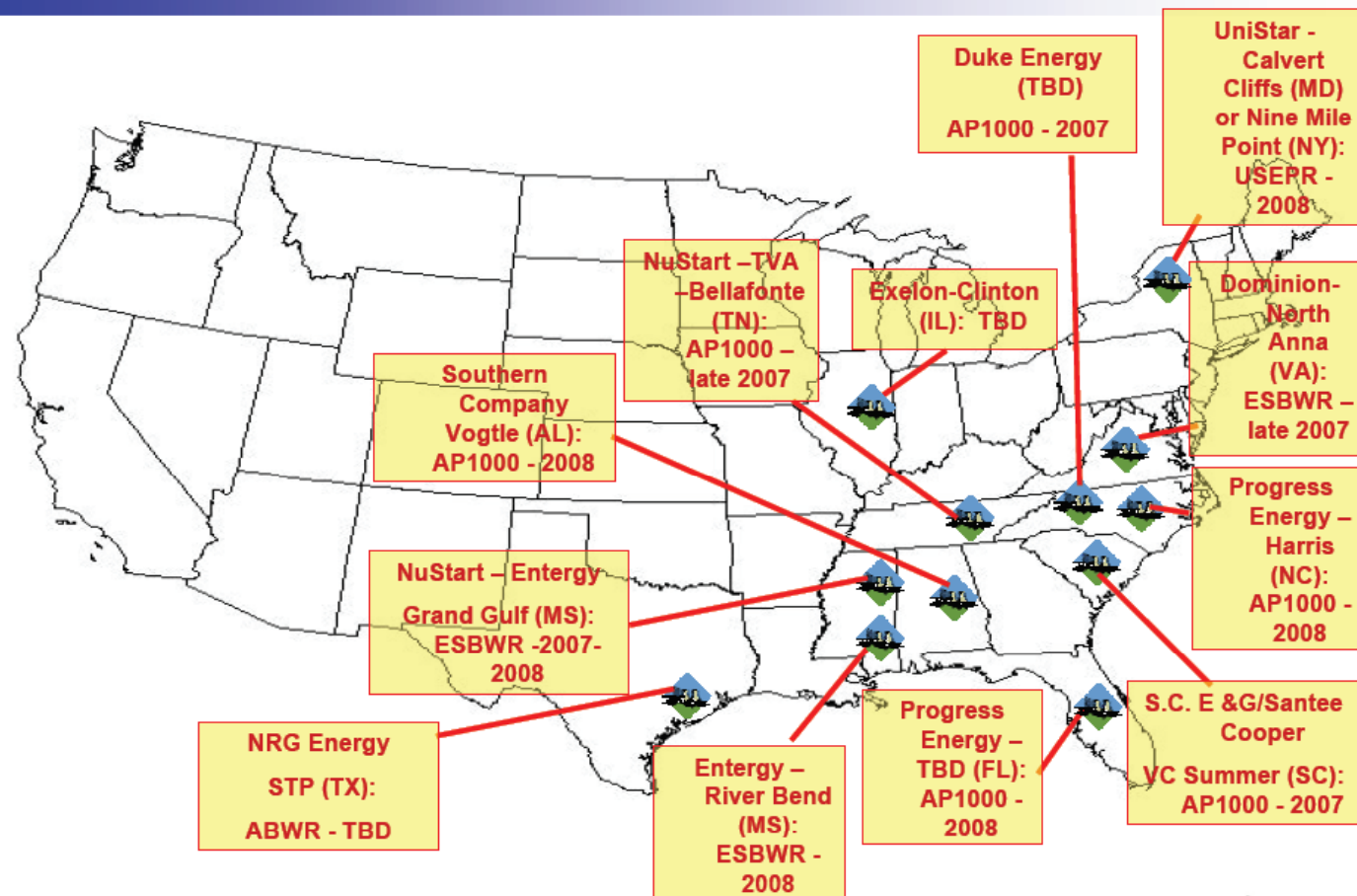
Η έννοια της αειφορίας είναι *σχετική* !

- **Καύσιμο:** χωρίς αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες: “περιορισμένα κοιτάσματα”
- Με αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες: πολύ σημαντικά αποθέματα (ουράνιο, θόριο)
- **Κόστος της κιλοβατώρας:** εξαρτάται πολύ λίγο από την τιμή του καυσίμου (φυσικού ουρανίου)
- **Κόστος του κύκλου του πυρηνικού καυσίμου ("Life cycle") και οι περιβαλλοντολογικές επιβαρύνσεις έχουν ήδη ενσωματωθεί στο κόστος της κιλοβατώρας** (αποθεματικά κεφάλαια για επανεπεξεργασία και τελική διάθεση καταλοίπων και αποξήλωση των εγκαταστάσεων)
- **Περιβάλλον/υγεία:** σε κανονική λειτουργία: οι εκλύσεις ελέγχονται η και παραμένουν αμελητέες
- **Ασφάλεια:** έλεγχος των κινδύνων (τουλάχιστο στη Δύση) μέχρι σήμερα. Υπάρχει **"παραμένον ρίσκο"** (residual risk - πολύ μικρή πιθανότητα/ μεγάλες συνέπειες) αλλά και οι άλλες εφικτές εναλλακτικές λύσεις συνεπάγονται κινδύνους

Το « άμεσο» μέλλον της πυρηνικής ενέργειας

Εξελίξεις στις ΗΠΑ

U.S. New Nuclear Plant Announcements



Πρόσφατες εξελίξεις στον πυρηνικό τομέα

- **Μ. Βρετανία:** μετά από εκτεταμένες μελέτες προωθεί ένα πρόγραμμα ηλεκτροπαραγωγής που δεν θα επιβαρύνει την ατμόσφαιρα με CO₂ και στο οποίο είναι σημαντική η συμβολή της πυρηνικής ενέργειας
- Δύο νέες πολύ μεγάλες μονάδες προστίθενται στο ήδη εκτεταμένο **Γαλλικό δίκτυο**, αλλά και στη **Βουλγαρία**
- **Τουρκία;**
- **Ρωσία:** υπό κατασκευή 4800 MWe και προγραμματίζονται άλλα 12,000 MWe που θα έχουν αναγερθεί μέχρι το 2016, και ακόμα 16,000 - 22,000 MWe για το 2020.
- Μεγάλες ασιατικές χώρες (**Κίνα, Ινδία, Ιαπωνία, Κορέα** κτλ. που διαθέτουν ήδη ισχυρά και αναπτυσσόμενα πυρηνικά προγράμματα) προστίθενται νέες μονάδες.
- **ΗΠΑ:** στο τέλος Αυγούστου 2008 είχαν παραγγελθεί τέσσερις νέες μονάδες, ενώ είκοσι περίπου βρίσκονται υπό μελέτη. ... **Κρίση/νέα προεδρία...**
- **Οικονομική κρίση:** η Ν. Αφρική ακυρώνει το μεγαλεπήβολο πρόγραμμα

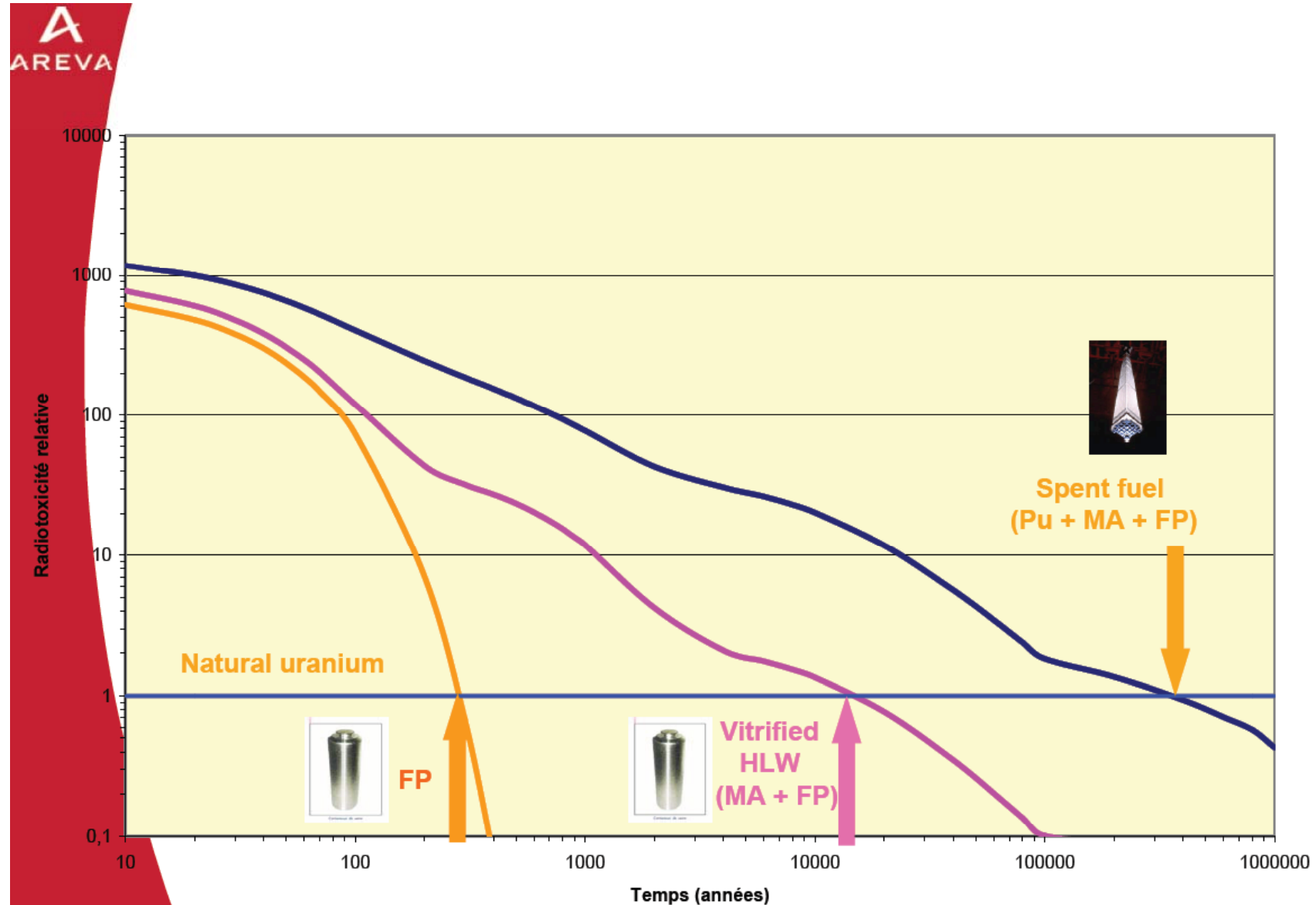
Και τα πυρηνικά κατάλοιπα ;

Οι προτεινόμενες **τεχνικά εφικτές** λύσεις βρίσκουν
πολιτικά ή κοινωνικά εμπόδια
και
η «έλλειψη λύσης» έχει γίνει όπλο των
αντιπυρηνικών

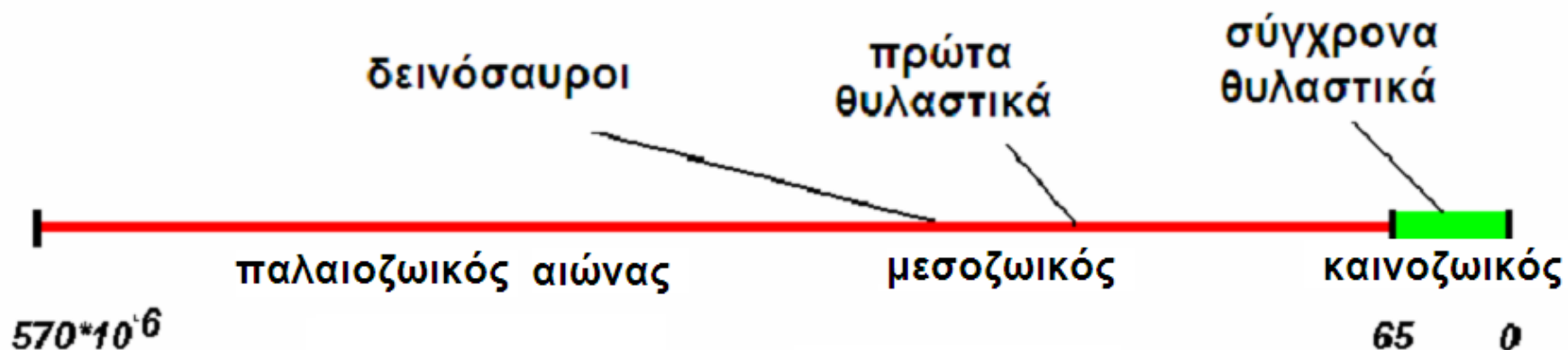
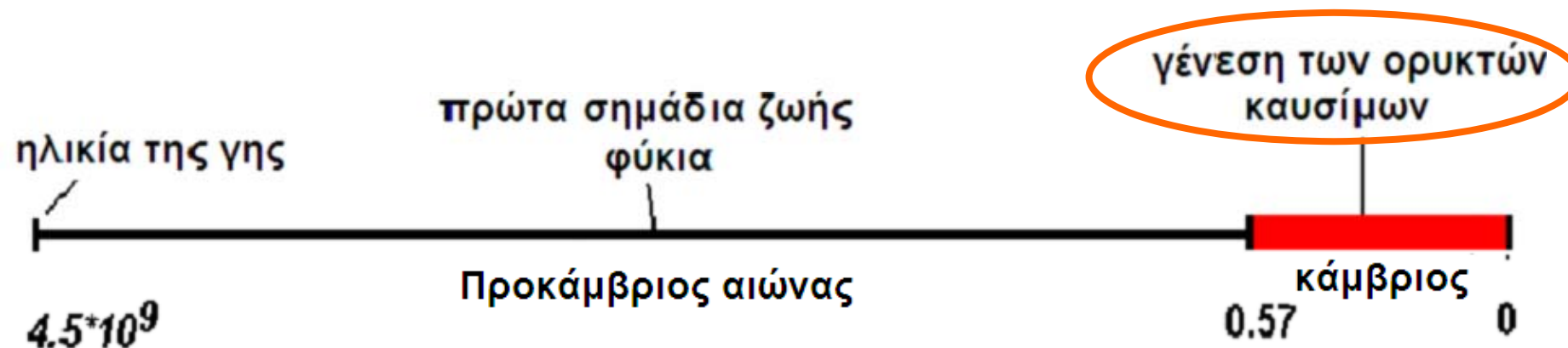
Εφικτή η διαχείριση των πυρηνικών καταλοίπων

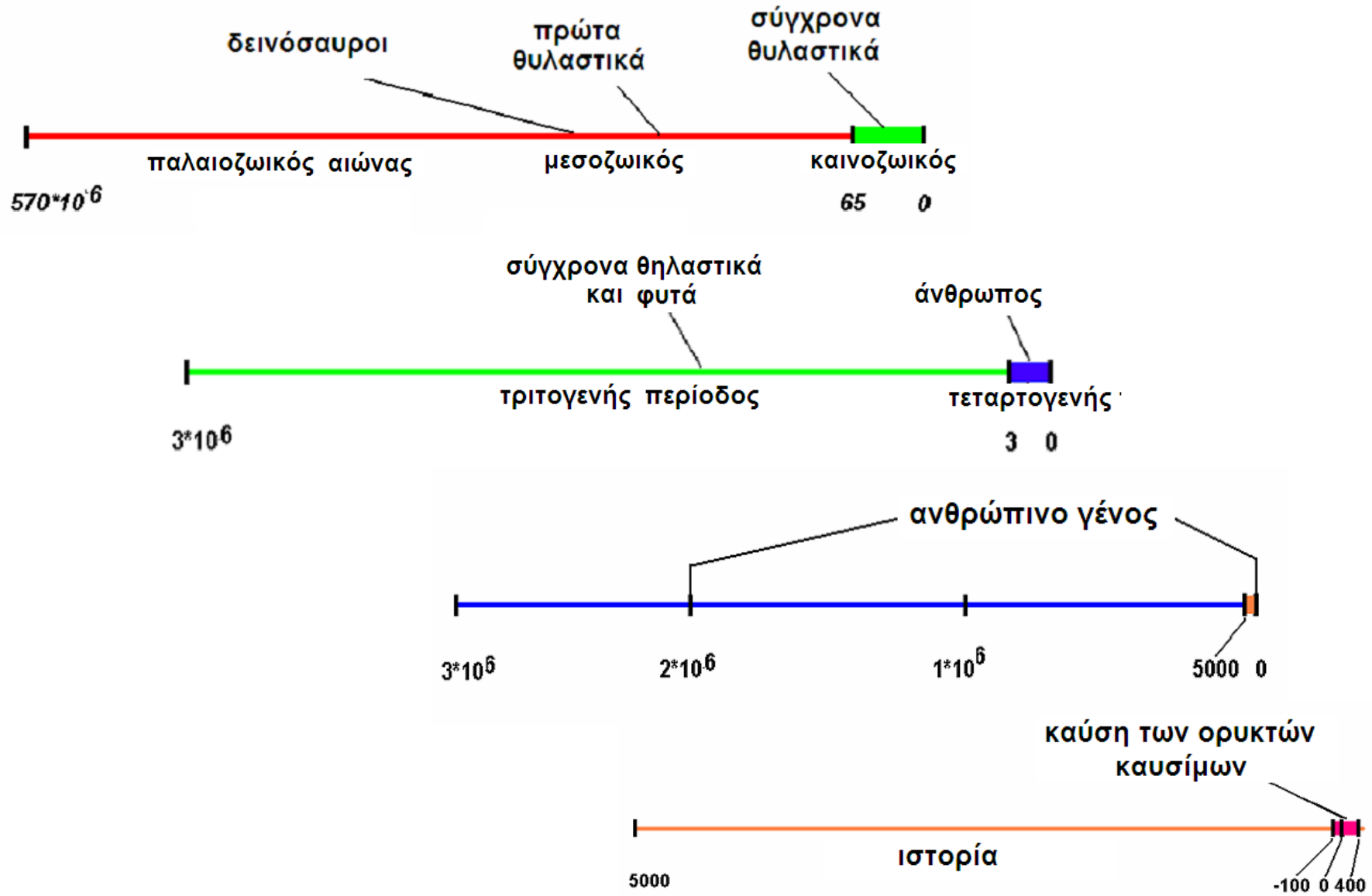
- Πάλι, θέμα «εντροπίας»
- Το πυρηνικό καύσιμο και τα κατάλοιπα είναι παρά πολύ συμπυκνωμένα
- Υαλοποιημένα κατάλοιπα (borosilicate glass): 1-2 σβώλοι το χρόνο ανά κεφαλή αν ολόκληρη η ηλεκτροπαραγωγή προέρχεται από πυρηνικούς αντιδραστήρες
- Σε αντίθεση, το CO₂ σαν «κατάλοιπο» είναι «απελπιστικά» διακεχυμένο. Η συλλογή και απομάκρυνσή του από την ατμόσφαιρα (sequestration), χρειάζονται σημαντικές προσπάθειες, τεχνολογία, ενέργεια και κόστος

Αλλά επίσης: Partitioning and transmutation: πολύ σημαντική μείωση της τοξικότητας



Χρονική κλίμακα: ο πλανήτης (γεωλογία) και ο πολιτισμός μας (yr)





Τα ορυκτά καύσιμα αντιπροσωπεύουν ηλιακή ενέργεια που συσσωρεύτηκε 600 εκατομμύρια χρόνια. Τα καίμε σε 500...

