



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

**ΑΝΟΙΚΤΑ** ακαδημαϊκά  
μαθήματα **ΠΠ**

ΤΙΤΛΟΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ: ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ - ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ  
ΕΝΟΤΗΤΑ: **3. ΣΤΟΙΒΑΔΑ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ – ΤΡΥΠΑ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ**

ΟΝΟΜΑ ΚΑΘΗΓΗΤΗ: ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΦΩΤΙΑΔΗ

ΤΜΗΜΑ: Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων

ΑΓΡΙΝΙΟ

# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΦΩΤΙΑΔΗ

Επίκουρη Καθηγήτρια

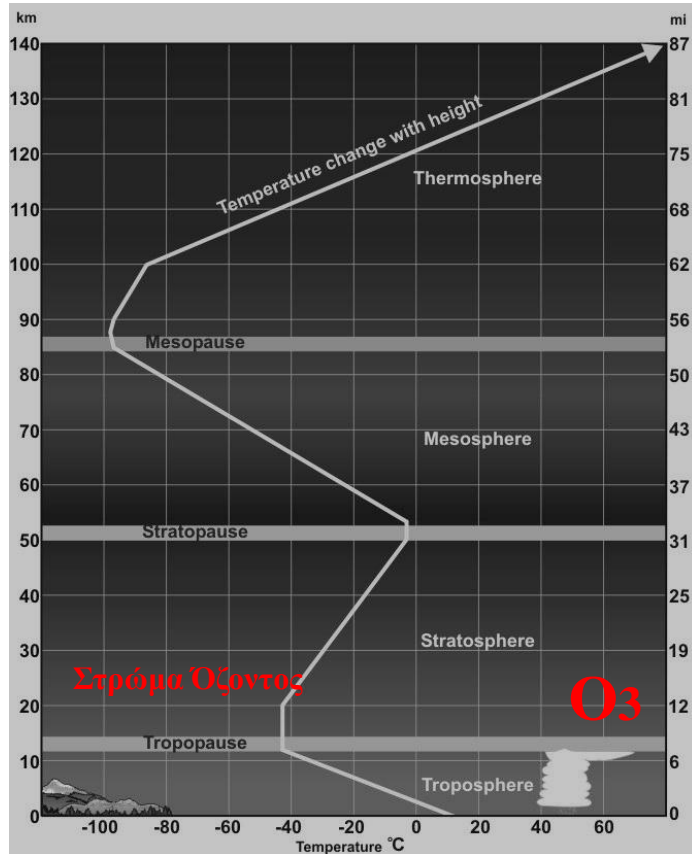
του Τμήματος Διαχείρισης

Περιβάλλοντος & Φυσικών Πόρων

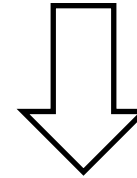
 2641074156

 [afotiadi@upatras.gr](mailto:afotiadi@upatras.gr)

# Η κατακόρυφη δομή της ατμόσφαιρας



■ Ενώ στην τροπόσφαιρα η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας μειώνεται με το ύψος, στην στρατόσφαιρα αυξάνει

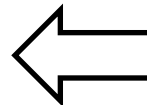


■ Η αύξηση της θερμοκρασία με το ύψος στην περιοχή της στρατόσφαιρας οφείλεται στην παρουσία του στρώματος του όζοντος (**O<sub>3</sub>**)

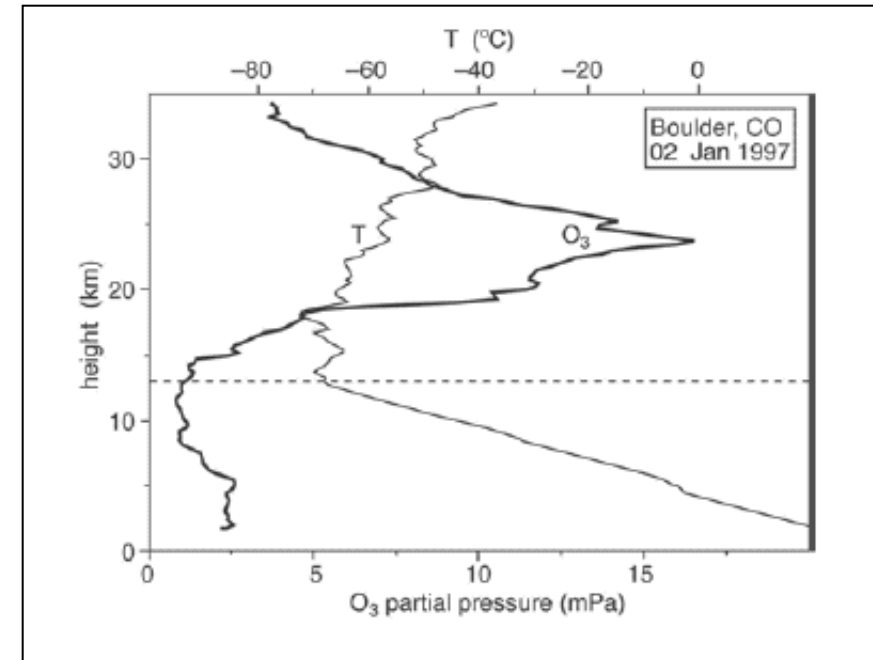
■ Λόγω της ιδιότητας του να απορροφά την **υπεριώδη ακτινοβολία (UV)**

Πηγή: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmprofile.jpg>

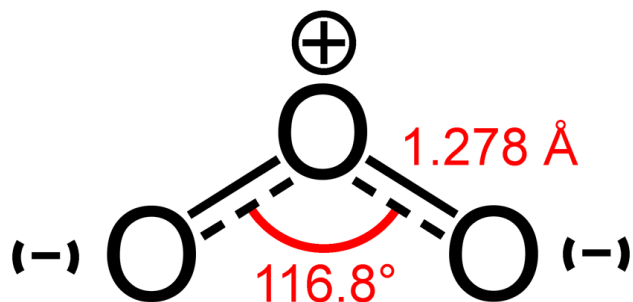
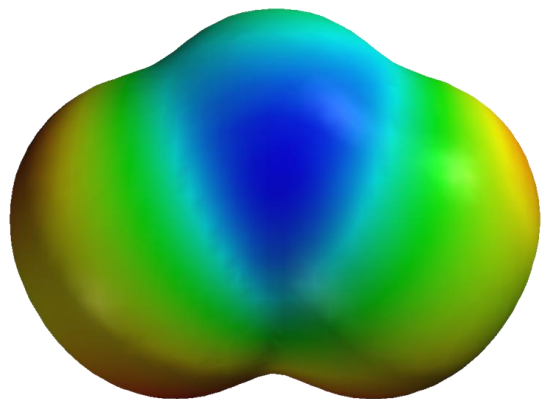
Το στρώμα του στρατοσφαιρικού όζοντος (**O<sub>3</sub>**)



Πηγή: figure 3.2 in the book: John Marshall, R. Alan Plumb, Atmosphere, Ocean and Climate Dynamics: An Introductory Text, 2007, Elsevier Academic Press, 2007, ISBN: 978-0-12-558691-7



# Το όζον (O<sub>3</sub>)



Πηγή:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone#/media/File:Ozone-elpot-3D-vdW.png>

Πηγή:

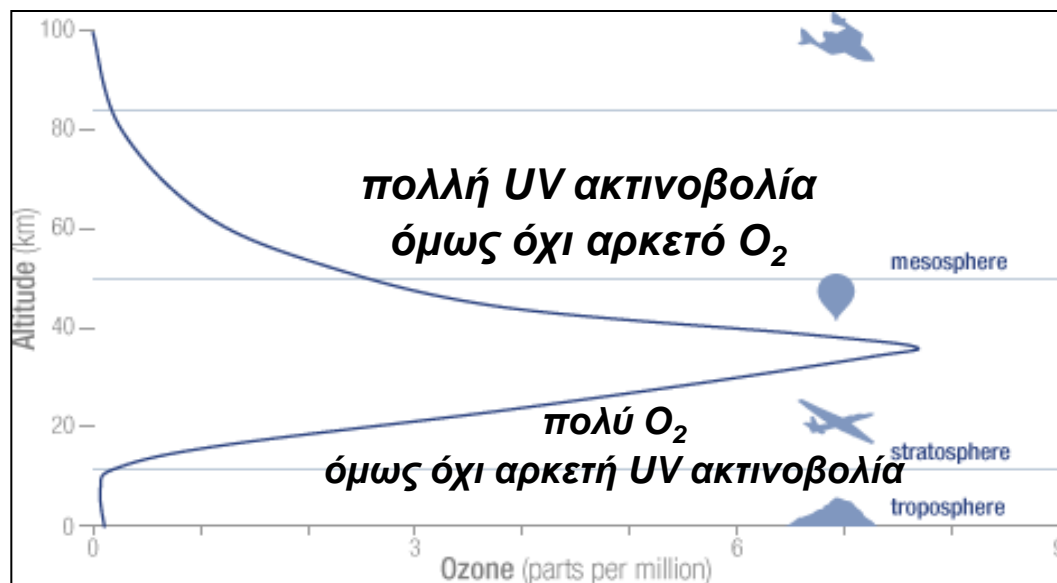
<https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone>

- Το όζον (O<sub>3</sub>) είναι ένα τριατομικό μόριο που αποτελείται από 3 άτομα οξυγόνου => αποτελεί μία αλλοτροπική μορφή οξυγόνου & είναι λιγότερο σταθερό από το O<sub>2</sub>
- Η ύπαρξη του O<sub>3</sub> προτάθηκε πρώτη φορά το 1840 από τον Schonbein. Ο χημικός τύπος του O<sub>3</sub> καθορίστηκε από τον Soret το 1865. Φασματοσκοπικές μελέτες στα τέλη του 19ου αιώνα έδειξαν ότι το O<sub>3</sub> υπάρχει σε υψηλότερες συγκεντρώσεις στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας.
- Το O<sub>3</sub> είναι αέριο, με χαρακτηριστική οσμή & κυανό χρώμα. Το μόριο του είναι λιγότερο σταθερό από το διατομικό μόριο του O<sub>2</sub>. Είναι εξαιρετικά δραστικό χημικά
- Το O<sub>3</sub> δεν εκπέμπεται από πηγές στην ατμόσφαιρα αλλά παράγεται μέσα σε αυτή από φωτοχημικές αντιδράσεις

# Το όζον (O<sub>3</sub>)

## Κατακόρυφο προφίλ του O<sub>3</sub>

- Το **90%** του O<sub>3</sub> βρίσκεται στην στρατόσφαιρα σε υψόμετρο από 20 μέχρι 50 Km ενώ, το **10%** βρίσκεται στην τροπόσφαιρα



} περιοχή μέγιστης πυκνότητας O<sub>3</sub>  
ικανή ποσότητα O<sub>2</sub> & UV

Πηγή: <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/ozone.html>

- Το O<sub>3</sub> εμφανίζει αυτό το προφίλ δηλαδή μέγιστο σε ένα συγκεκριμένο ύψος γιατί σε αυτό το στρώμα υπάρχει **επάρκεια** και του O<sub>2</sub> και της **υπεριώδους ακτινοβολίας (UV)**
- Το μέγιστο στο κατακόρυφο προφίλ του O<sub>3</sub> εμφανίζεται περίπου στη μέση στρατόσφαιρα

# Το όζον (O<sub>3</sub>)

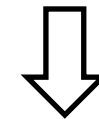
## Πηγή:

[http://klimat.czn.uj.edu.pl/enid/-\\_Stratosphaere/Arbeitsmaterial\\_1nr.html](http://klimat.czn.uj.edu.pl/enid/-_Stratosphaere/Arbeitsmaterial_1nr.html)

## Κατακόρυφο προφίλ του O<sub>3</sub>

- Το μέγιστο της αναλογίας μίγματος του O<sub>3</sub> βρίσκεται σε μικρότερο ύψος σε σχέση με το μέγιστο της πυκνότητας (συγκέντρωσης)
- Αυτό οφείλεται στην εξάρτηση από την πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, η οποία μειώνεται εκθετικά με το ύψος

$$\rho_{O_3} = \rho_d \times r_{O_3}$$



$\rho_{O_3}$  = πυκνότητα όζοντος

$\rho_d$  = πυκνότητα ατμοσφαιρικού αέρα

$r_{O_3}$  = αναλογία μίγματος όζοντος

- Το **μέγιστο** του O<sub>3</sub> εκφρασμένο ως αναλογία μίγματος είναι περίπου **8 – 10 ppm** & παρατηρείται ~ **35 Km**



# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Μονάδες μέτρησης

## Πηγή:

<http://users.sch.gr/xtsamis/OkosmosMas/Ozon.htm>

- Η μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιείται για να εκφράσει την πυκνότητα (συγκέντρωση) του O<sub>3</sub> σε μια στήλη (κολώνα) ατμοσφαιρικού αέρα είναι: **μονάδες Dobson (DU)**

- Συγκέντρωση στήλης O<sub>3</sub>:

**1 DU = 0.01 mm πάχος σε STP**

**STP** = κανονικές συνθήκες πίεσης (1 atm) & θερμοκρασίας (0°C ή 273°K)

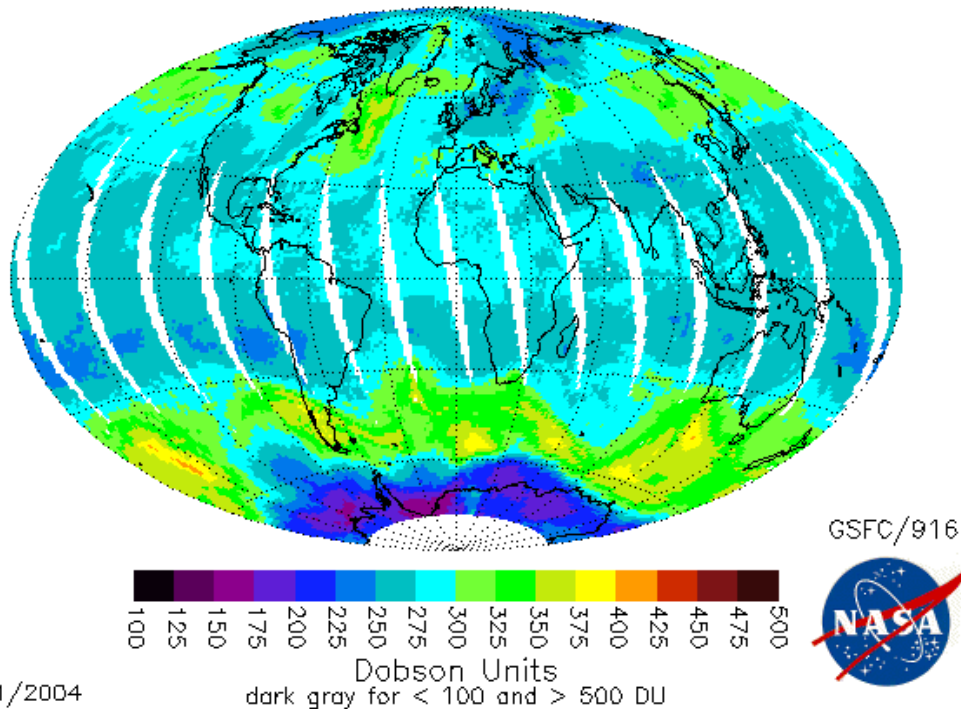
Όταν όλο το O<sub>3</sub> πάνω από τη συγκεκριμένη περιοχή (Labrador, Καναδάς) φέρεται σε κανονικές συνθήκες πίεσης (1 atm) & θερμοκρασίας (0°C)

τότε σχηματίζεται ένα λεπτό στρώμα πάχους 3 mm που αντιστοιχεί σε **300 DU**

# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Χωρική κατανομή

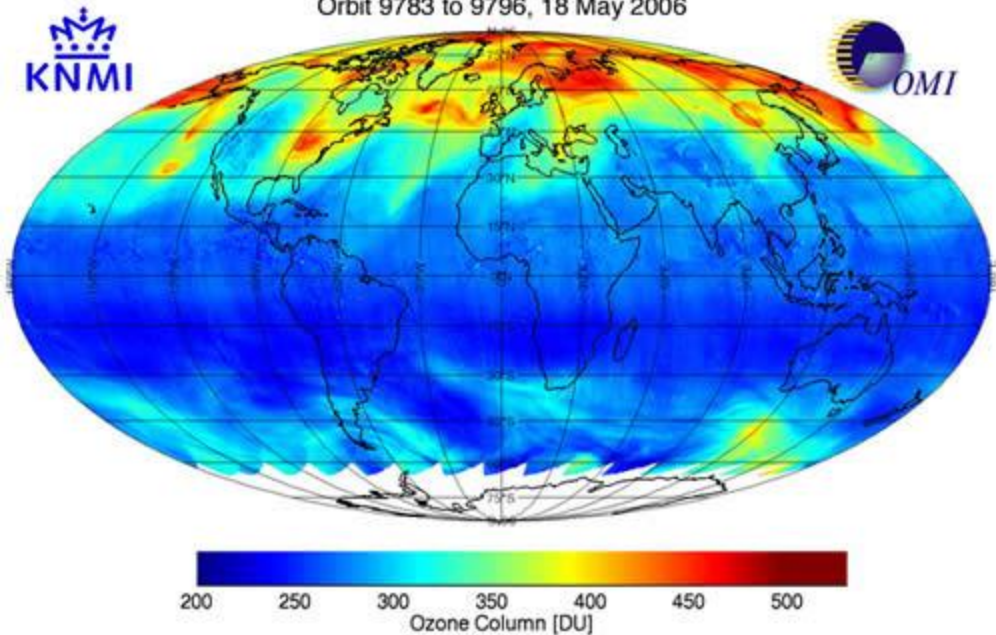
- Από το 1978 η NASA πραγματοποιεί δορυφορικές μετρήσεις O<sub>3</sub> σε ημερήσια βάση (πάχος στήλης σε DU) μέσω του οργάνου Total Mapping Ozone Spectrometer (TOMS) το οποίο λειτούργησε & λειτουργεί στις πλατφόρμες διαφόρων δορυφόρων

EP/TOMS Total Ozone Sep 6, 2004



Πηγή:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Total\\_Ozone\\_Mapping\\_Spectrometer#/media/File:Toms-2004-09-06-FULLDAY\\_GLOB.PNG](https://en.wikipedia.org/wiki/Total_Ozone_Mapping_Spectrometer#/media/File:Toms-2004-09-06-FULLDAY_GLOB.PNG)

OMI OMDOAO3 Total Ozone Column  
Orbit 9783 to 9796, 18 May 2006

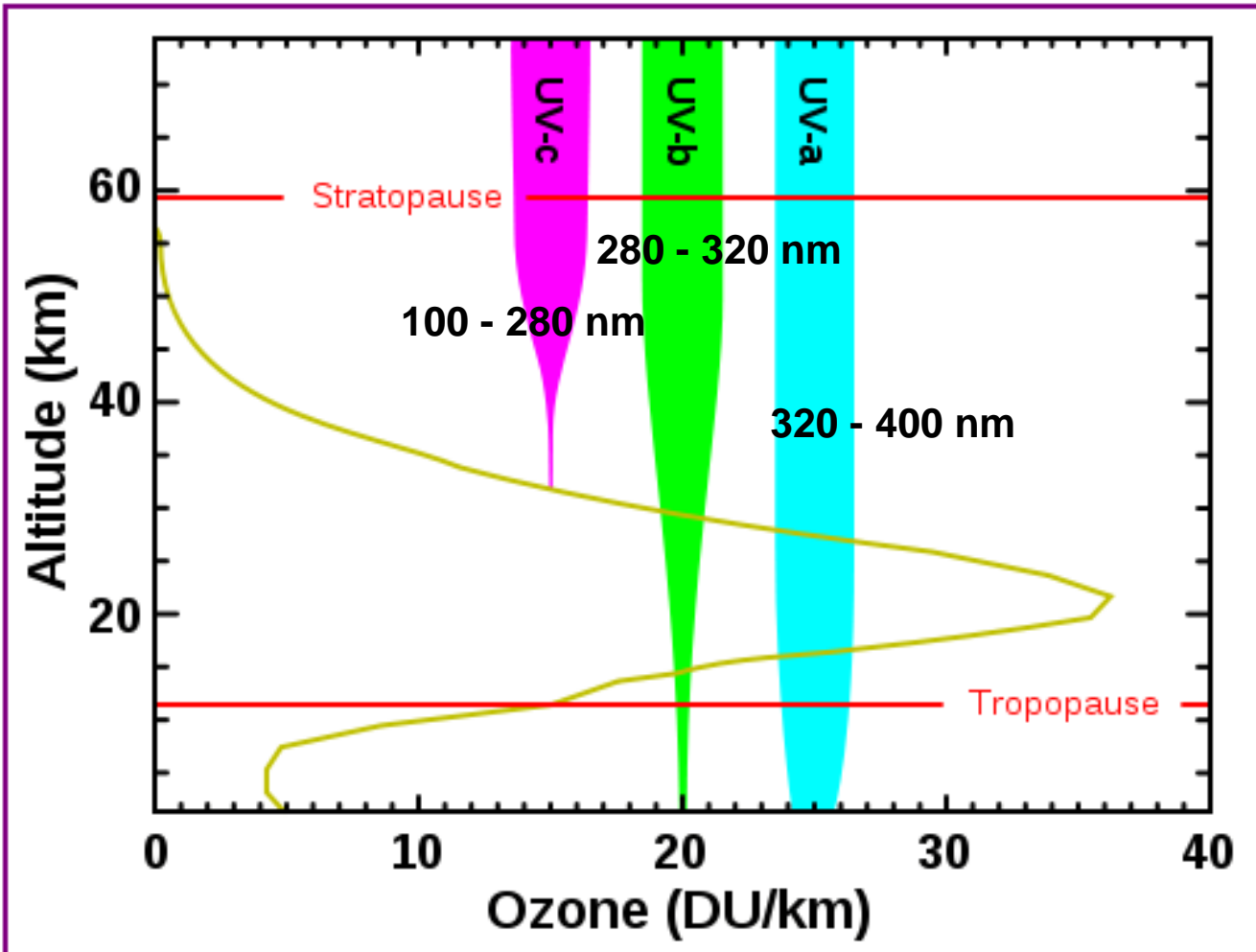


Πηγή: [http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI/omdoao3e\\_v003.shtml](http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI/omdoao3e_v003.shtml)

- 1978 – 1993: δορυφόρος **Nimbus-7**
- 1991 – 1994: δορυφόρος **Meteor-3**
- 1996 – 2005: δορυφόρος **Earth Probe**
- 2004 – σήμερα: δορυφόρος **OMI (Ozone Monitoring Instrument)**

# Το όζον (O<sub>3</sub>)

Διείσδυση της υπεριώδους ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα



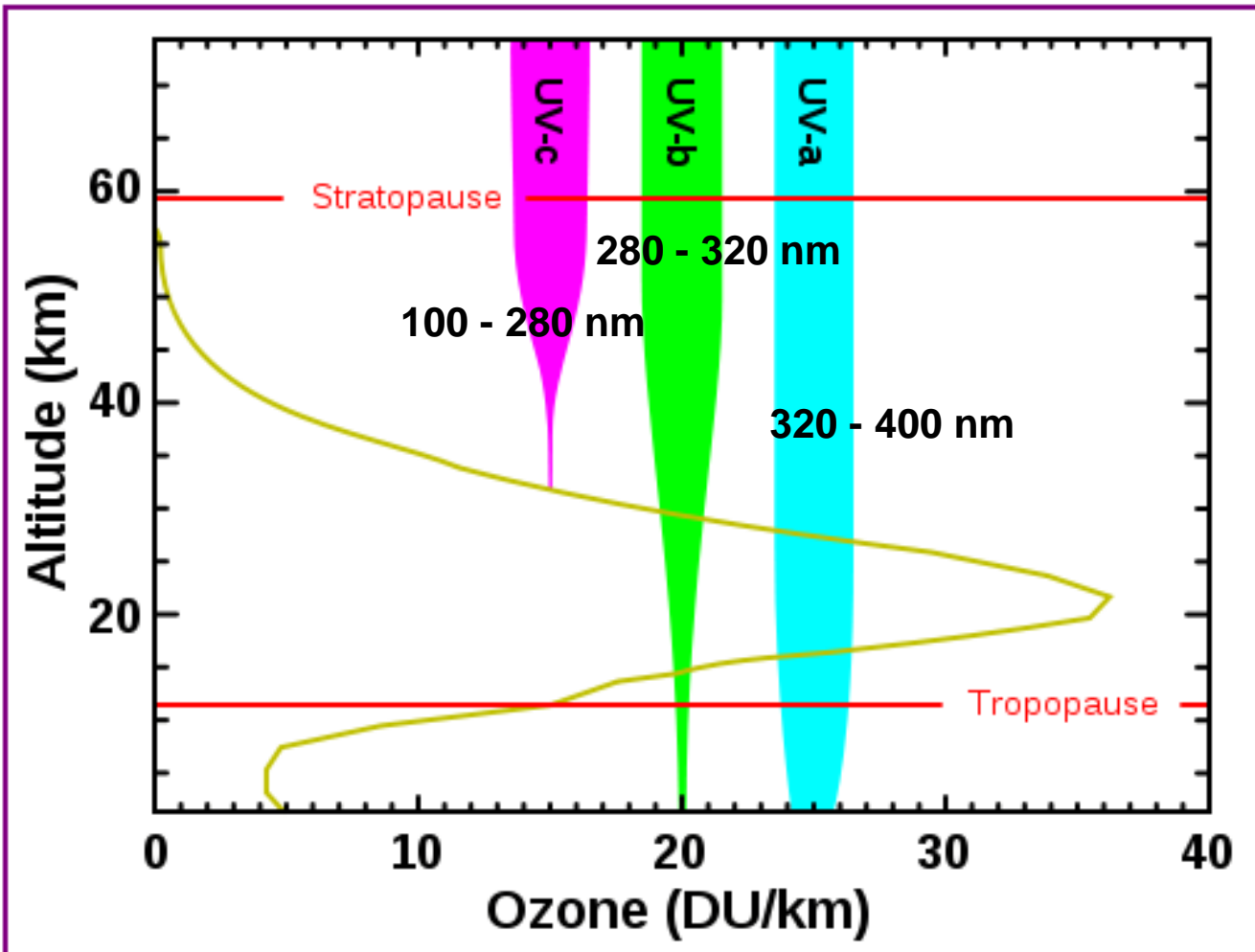
Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone\\_layer#/media/File:Ozone\\_altitude\\_UV\\_graph.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone_layer#/media/File:Ozone_altitude_UV_graph.svg)

Στην εικόνα παρουσιάζεται η ποσότητα της υπεριώδους ακτινοβολίας (UV-A, UV-B και UV-C) συναρτήσεως του ύψους. Το πλάτος της κάθε κολόνας δείχνει το ποσό της ενέργειας συναρτήσεως του ύψους

- Η ακτινοβολία **UV-C** (100 – 280 nm) που είναι περισσότερο επιβλαβής για όλους τους οργανισμούς απορροφάται ολοκληρωτικά από το O<sub>3</sub> στη στρατόσφαιρα
- Η ακτινοβολία **UV-B** (280 – 320 nm) που είναι επίσης επιβλαβής (επηρεάζει το δέρμα προκαλώντας εγκαύματα, ακόμη και καρκίνο) απορροφάται σημαντικά από το O<sub>3</sub> στη στρατόσφαιρα καθώς,
- Το **6%** της **UV-B** ακτινοβολίας φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους
- Η ένταση της **UV-B** ακτινοβολίας στην κορυφή της ατμόσφαιρας είναι **350** εκατομμύρια φορές ισχυρότερη σε σχέση με την επιφάνεια
- Σαν εμπειρικό κανόνα μπορούμε να αναφέρουμε: μείωση του O<sub>3</sub> κατά **1%**, θα προκαλέσει **2%** αύξηση της **UV-B**

# Το όζον (O<sub>3</sub>)

Διείσδυση της υπεριώδους ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα



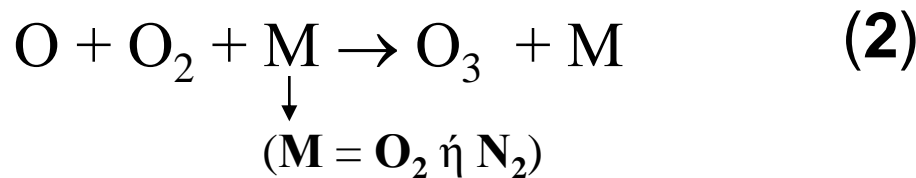
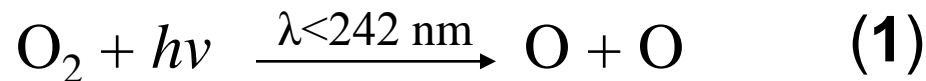
Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone\\_layer#/media/File:Ozone\\_altitude\\_UV\\_graph.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone_layer#/media/File:Ozone_altitude_UV_graph.svg)

- Η ακτινοβολία **UV-A** (280 – 320 nm) απορροφάται πολύ λιγότερο από το **O<sub>3</sub>** στη στρατόσφαιρα, με αποτέλεσμα το **94%** της **UV-A** να φτάνει στην επιφάνεια
- Η ισχυρότερη ζώνη απορρόφησης του **O<sub>3</sub>** είναι αυτή μεταξύ **200** και **300 nm** (και ειδικότερα απορροφά ισχυρά στα **290 nm**), η οποία καλείται **ζώνη Hartley**
- Ασθενής απορρόφηση της **UV** από το **O<sub>3</sub>** σημειώνεται στην **ζώνη Hugging** (300 – 360 nm)

Στην εικόνα παρουσιάζεται η ποσότητα της υπεριώδους ακτινοβολίας (UV-A, UV-B και UV-C) συναρτήσει του ύψους. Το πλάτος της κάθε κολόνας δείχνει το ποσό της ενέργειας συναρτήσει του ύψους

# Το όζον (O<sub>3</sub>): Κύκλος O<sub>2</sub> – O<sub>3</sub>

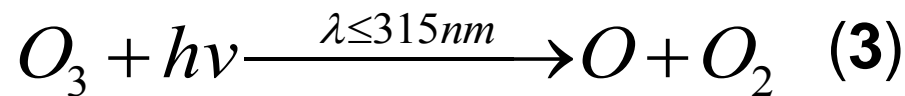
## Παραγωγή του O<sub>3</sub>



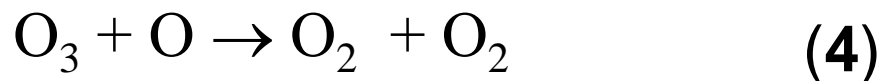
είναι η μόνο αντίδραση που παράγει O<sub>3</sub> στην ατμόσφαιρα (στρατόσφαιρα & τροπόσφαιρα)

## Καταστροφή του O<sub>3</sub>

- Το O<sub>3</sub> απορροφά ισχυρά UV ακτινοβολία (240 ≥ λ ≤ 320 nm) και διασπάζεται σε O<sub>2</sub> & O

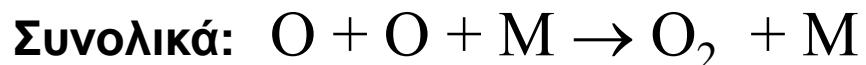


- Η εναλλακτικά αντιδρά με ατομικό οξυγόνο και δημιουργεί O<sub>2</sub>



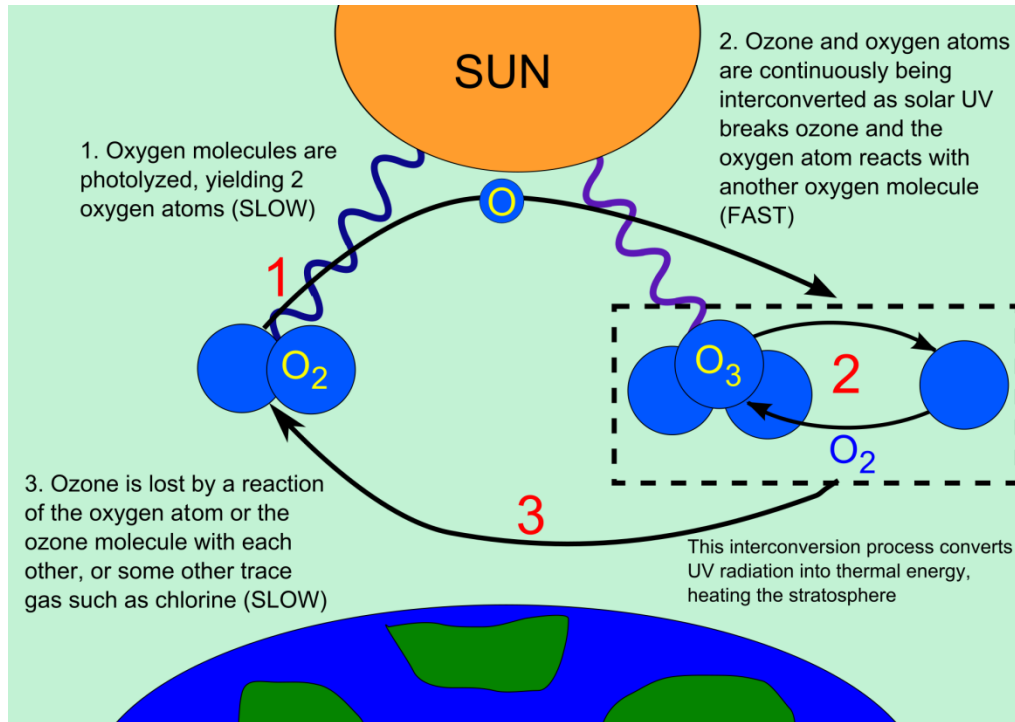
γρήγορος κύκλος  
ταχείες αντιδράσεις

Αντιδράσεις κύκλου Chapman  
Παραγωγής – καταστροφής O<sub>3</sub>

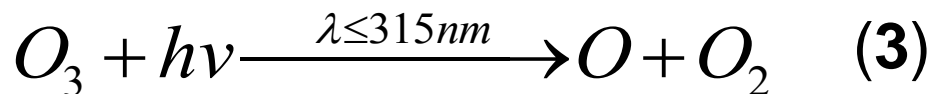
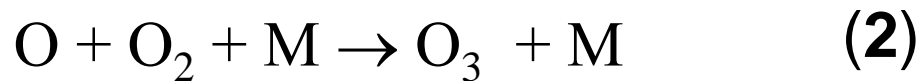


# Το όζον (O<sub>3</sub>): Κύκλος O<sub>2</sub> – O<sub>3</sub>

## Κύκλος Charman: παραγωγή-καταστροφή του O<sub>3</sub>

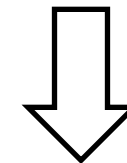


Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone\\_layer#/media/File:Ozone\\_cycle.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone_layer#/media/File:Ozone_cycle.svg)



■ Οι αντιδράσεις (1) & (4) δηλαδή της φωτόλυσης του O<sub>2</sub> & της καταστροφής του O<sub>3</sub> είναι πολύ αργές

■ Αντίθετα, οι αντιδράσεις (2) & (3) είναι πολύ γρήγορες και στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της πραγματοποίησης των (1) & (4), οι αντιδράσεις (2) & (3) έχουν πραγματοποιηθεί πολλές φορές



αποκαθίσταται ένα είδος ισορροπίας μεταξύ της (2) & (3): **steady-state conditions**



# Το όζον (O<sub>3</sub>): Κύκλος O<sub>2</sub> – O<sub>3</sub>

## Κύκλος Charman: παραγωγή-καταστροφή του O<sub>3</sub>

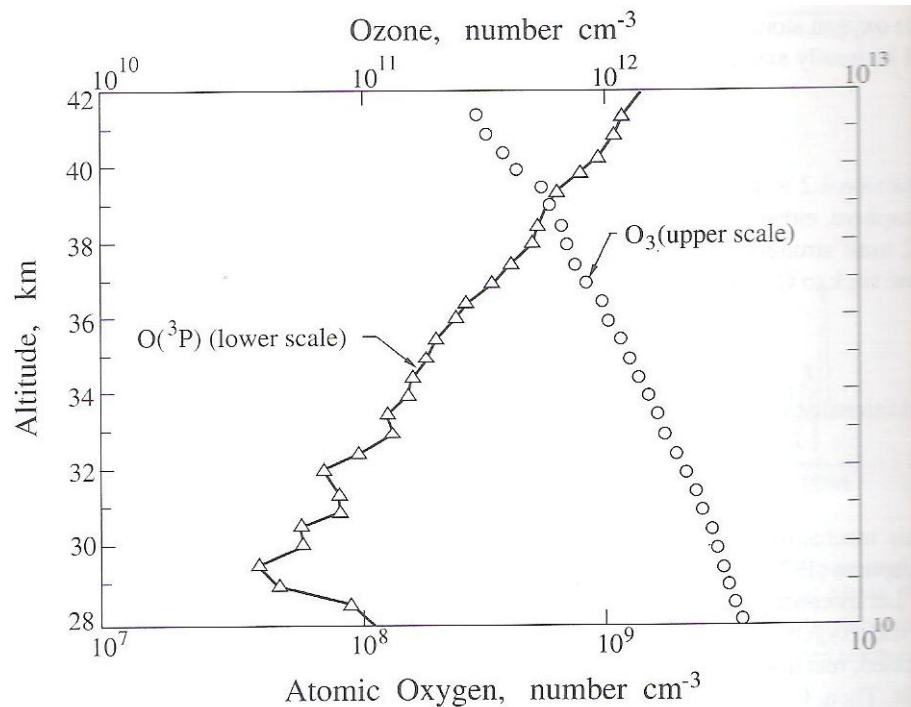


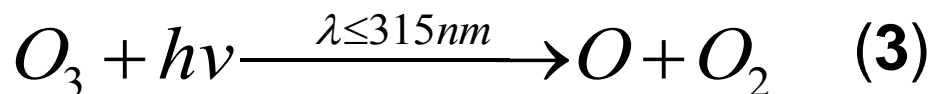
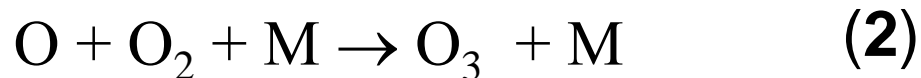
FIGURE 4.2 Concentrations of atomic oxygen and ozone measured simultaneously as a function of altitude on December 2, 1977 at Palestine, Texas (32° N). Solar zenith angle  $\theta_0 = 50^\circ$  (World Meteorological Organization, 1981). Note different scales for the concentrations of the two species

Πηγή: figure 4.2 in John H. Seinfeld and Spyros N. Pandis, Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change, 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley and Sons, 1998

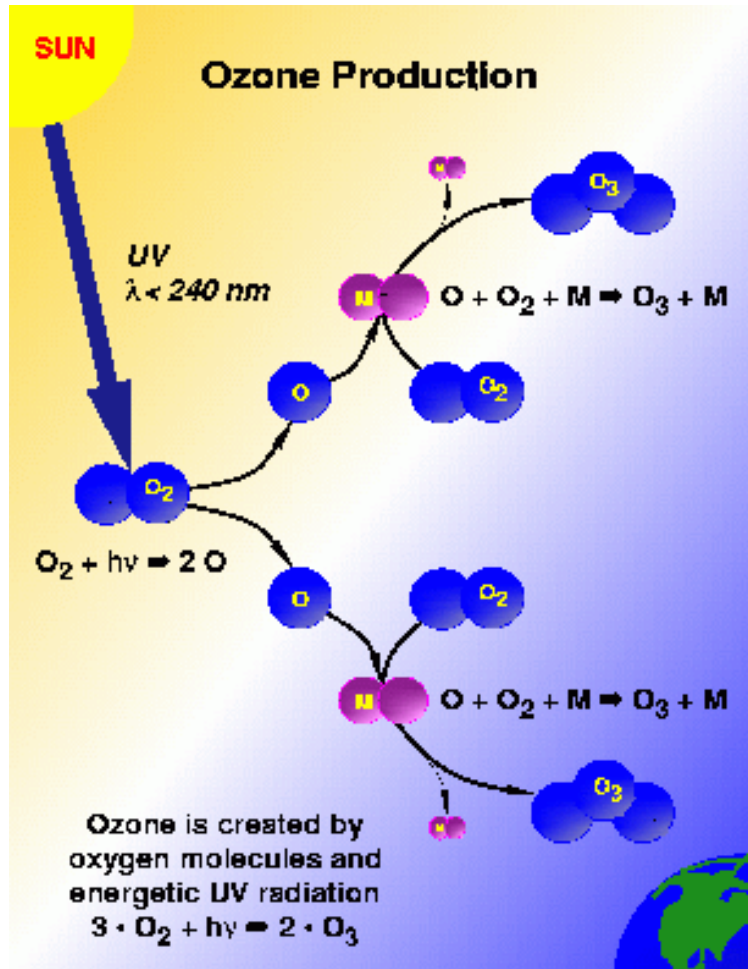
- Επειδή η συγκέντρωση του **M** μειώνεται με το ύψος:

- Σε μεγάλα ύψη κυριαρχεί το **O**, ενώ

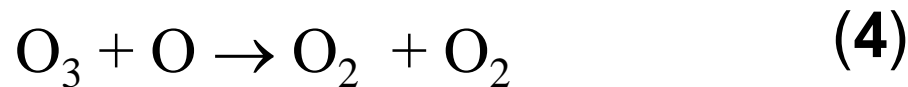
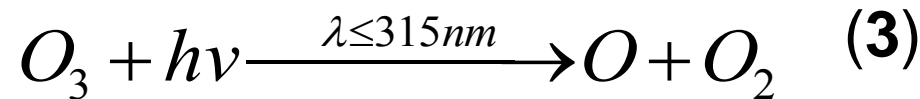
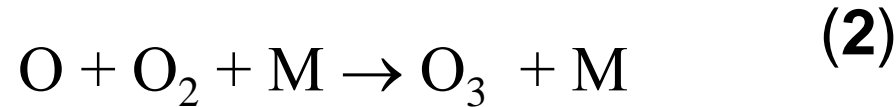
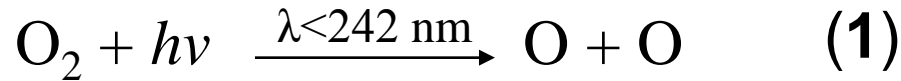
- Σε μικρότερα ύψη (< 50 Km) κυριαρχεί το **O<sub>3</sub>**



# Το όζον (O<sub>3</sub>): Κύκλος O<sub>2</sub> – O<sub>3</sub>



Πηγή: <http://cloud1.arc.nasa.gov/solve/overview/solve.pr.html/>

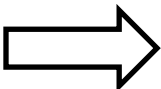


- Ο ρυθμός παραγωγής του O<sub>3</sub> εξαρτάται από τον ρυθμό δημιουργίας του O & επομένως =>

=> από τον ρυθμό φωτόλυσης του O<sub>2</sub>



- Ο ρυθμός φωτόλυσης του O<sub>2</sub> μεταβάλλεται σημαντικά με το ύψος



\* Τη νύχτα οι αντιδράσεις 1 & 3 δεν πραγματοποιούνται. Πραγματοποιούνται όμως οι 2 & 4. Το ποσό του O που υπάρχει μειώνεται δραστικά πολύ γρήγορα, αποκαθίσταται ένα είδος ισορροπίας μεταξύ των 2 & 4 => το O<sub>3</sub> να μην παρουσιάζει κάποια ημερήσια μεταβολή



# Το όζον (O<sub>3</sub>): Κύκλος O<sub>2</sub> – O<sub>3</sub>

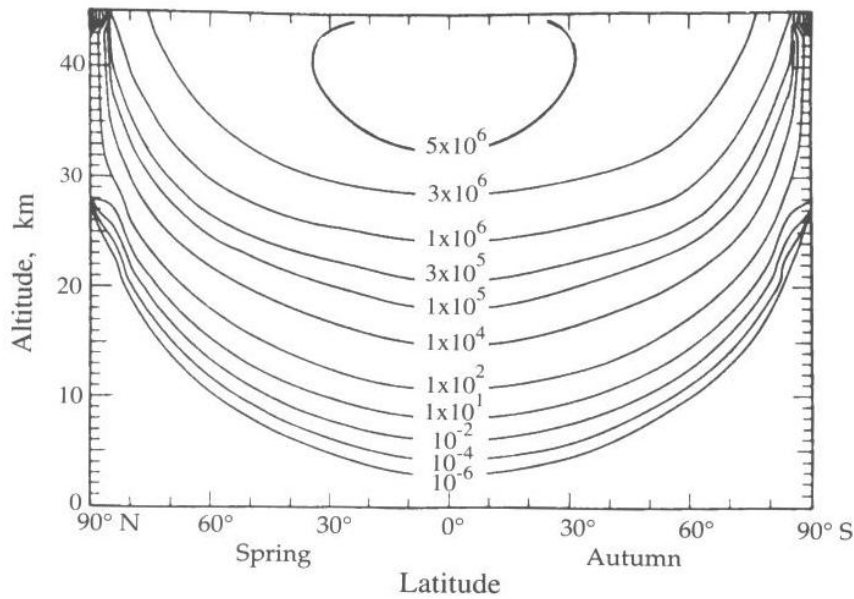
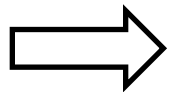


FIGURE 4.3 Zonally averaged rate of ozone formation (molecules cm<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>) from the photolysis of O<sub>2</sub> (Johnston, 1975).

Πηγή: figure 4.3 in John H. Seinfeld and Spyros N. Pandis, Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change, 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley and Sons, 1998

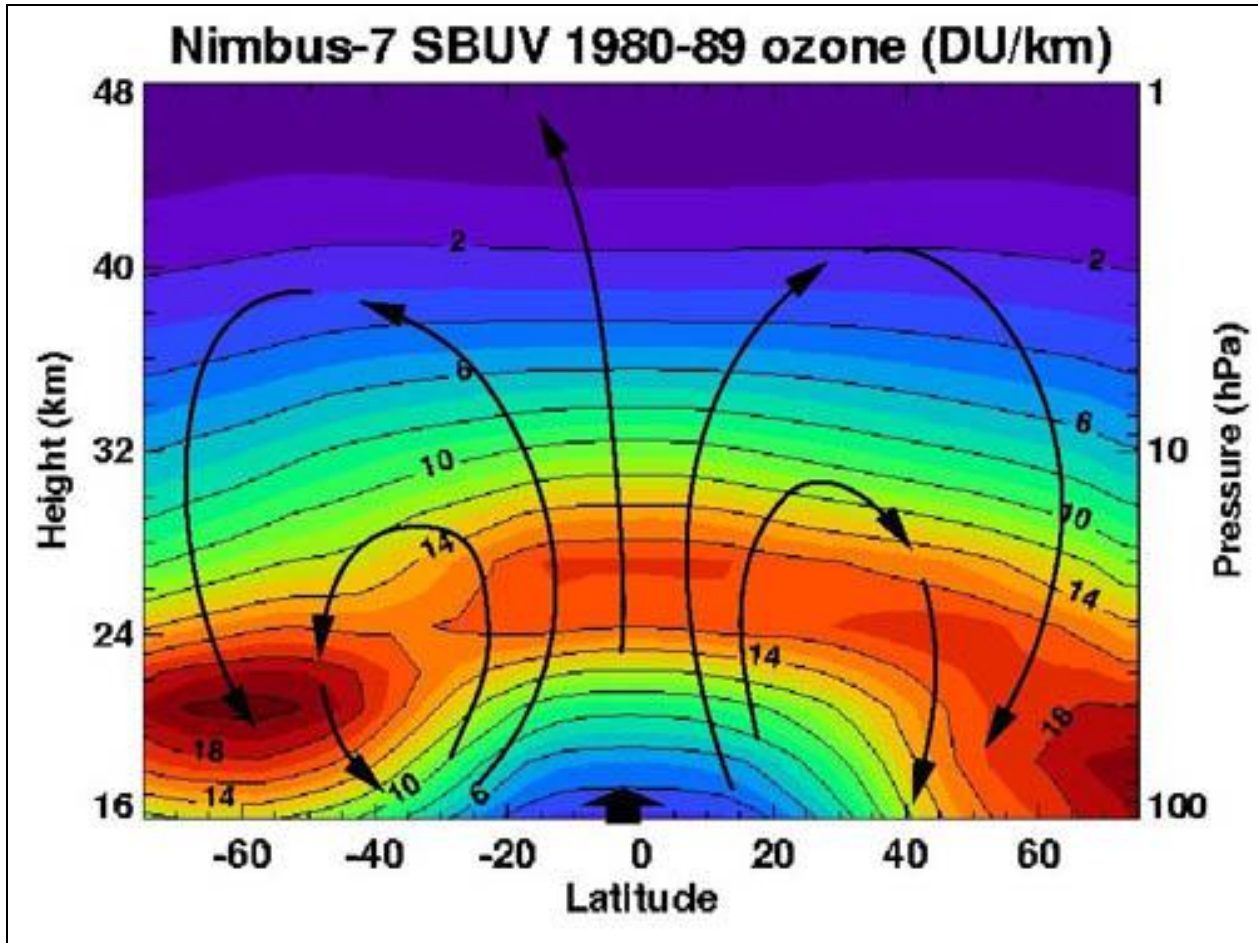
- Ο ρυθμός φωτόλυσης του O<sub>2</sub> και επομένως και ο ρυθμός παραγωγής του O<sub>3</sub> λόγω της εξάρτησης του από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και το ύψος του ηλίου θα
- είναι μέγιστος πάνω από τον Ισημερινό και
- θα αυξάνει με το ύψος εμφανίζοντας μέγιστο ~40 Km



- έτσι θα περίμενε κάποιος να ισχύει το ίδιο και για την συγκέντρωση του O<sub>3</sub> καθώς επίσης ότι
- αυτή θα είναι μέγιστη κατά το θέρος & ελάχιστη τον χειμώνα

Όμως δεν ισχύει αυτό και παρατηρείται ...

# Το όζον (O<sub>3</sub>)



## Χωρική κατανομή του O<sub>3</sub>

- Η μέγιστη συγκέντρωση του O<sub>3</sub> εμφανίζεται πάνω από τα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, ενώ είναι μικρότερη πάνω από τις τροπικές περιοχές ! και γενικά
- το πάχος της στοιβάδας αυξάνει όσο μετακινούμαστε από τον ισημερινό προς τους πόλους
- Ακόμη και στην περιοχή του Ισημερινού το μέγιστο της συγκέντρωσης του O<sub>3</sub> παρατηρείται στα 25 Km δηλαδή δεν ταυτίζεται με το μέγιστο της παραγωγής του (40 Km)

Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone#/media/File:Nimbus\\_ozone\\_Brewer-Dobson\\_circulation.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone#/media/File:Nimbus_ozone_Brewer-Dobson_circulation.jpg)

- Επίσης παρατηρείται «κάμψη» της στοιβάδας του O<sub>3</sub> (μείωση του ύψος εμφάνισης μεγίστου) στα εξωτροπικά γεωγραφικά πλάτη λόγω της μεταβολής του ύψους της τροπόπαυσης

# Το όζον (O<sub>3</sub>)

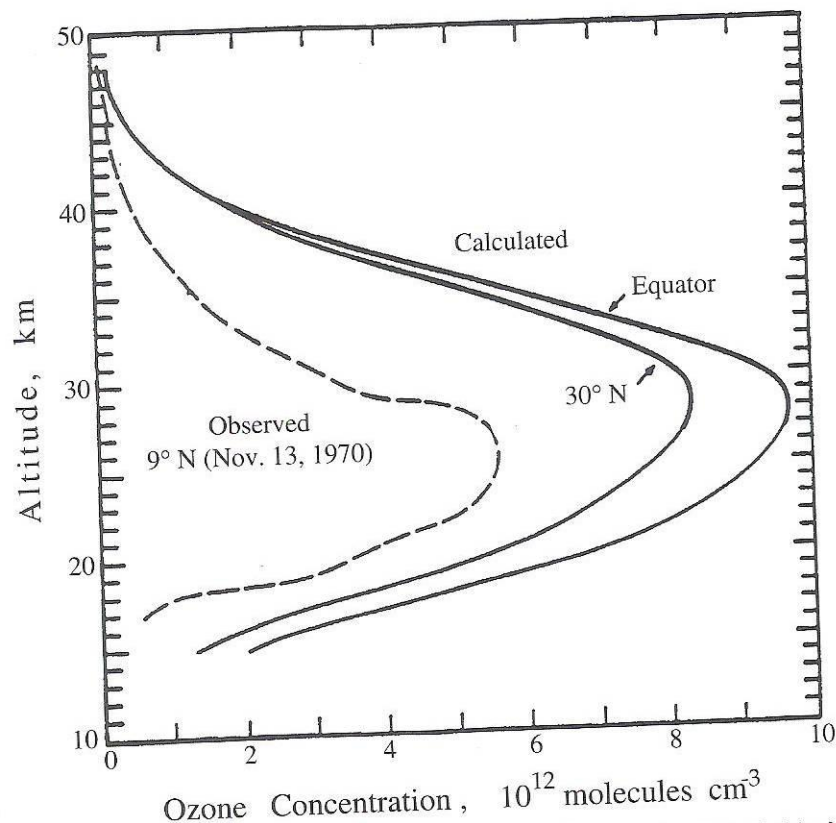


FIGURE 4.6 Comparison of stratospheric ozone concentrations as a function of altitude as predicted by the Chapman mechanism and as observed over Panama (9° N) on November 13, 1970.

Πηγή: figure 4.6 in John H. Seinfeld and Spyros N. Pandis, Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change, 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley and Sons, 1998

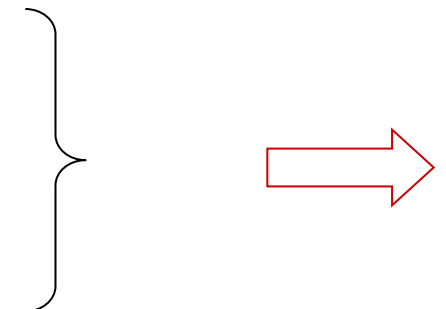
## Κατακόρυφο προφίλ του O<sub>3</sub>

■ Το μέγιστο στο κατακόρυφο προφίλ του O<sub>3</sub> δεν βρίσκεται στο ίδιο ύψος στα διάφορα γεωγραφικά πλάτη

✓ Βρίσκεται σε **μεγαλύτερο ύψος** πάνω από τον **Ισημερινό & τις τροπικές περιοχές**

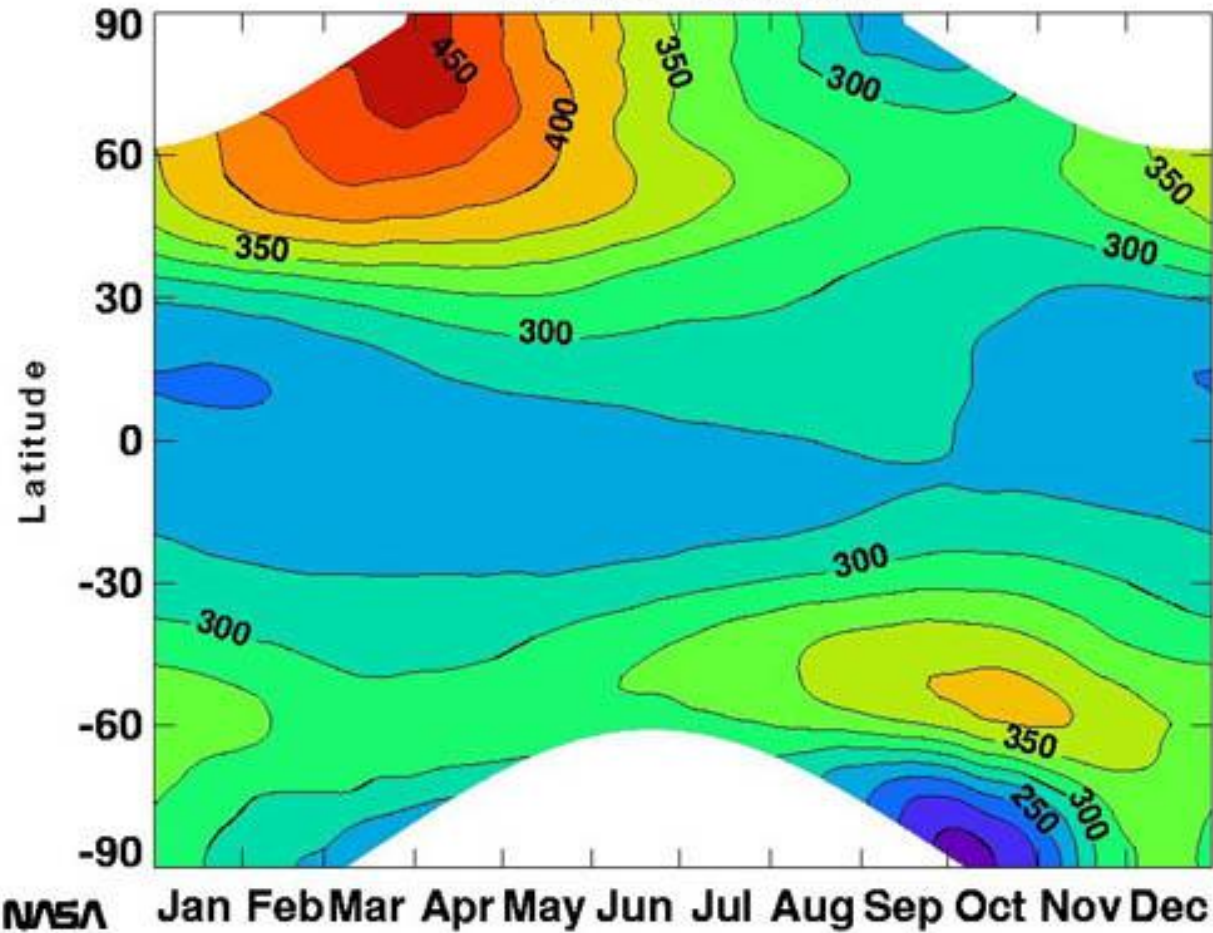
✓ Ενώ, το **μικρότερο ύψος** που παρατηρείται είναι τα **μεγάλα γεωγραφικά πλάτη**

■ Το **εύρος του μεγίστου** δείχνει ότι το μέγιστο του στρατοσφαιρικού O<sub>3</sub> δεν είναι το ίδιο παντού στον πλανήτη αλλά φαίνεται να είναι **μεγαλύτερο** πάνω από τα **μεγάλα γεωγραφικά πλάτη**



# Το όζον (O<sub>3</sub>)

TOMS 1979-92



## Χωρική & Χρονική κατανομή του O<sub>3</sub>

- Χρονικά, το **μέγιστο** της **συγκέντρωσης** του O<sub>3</sub> σημειώνεται την **τοπική άνοιξη** & όχι το **θέρος**
- Αντίστοιχα, το **ελάχιστο** σημειώνεται κατά το τοπικό **Φθινόπωρο** και όχι τον χειμώνα

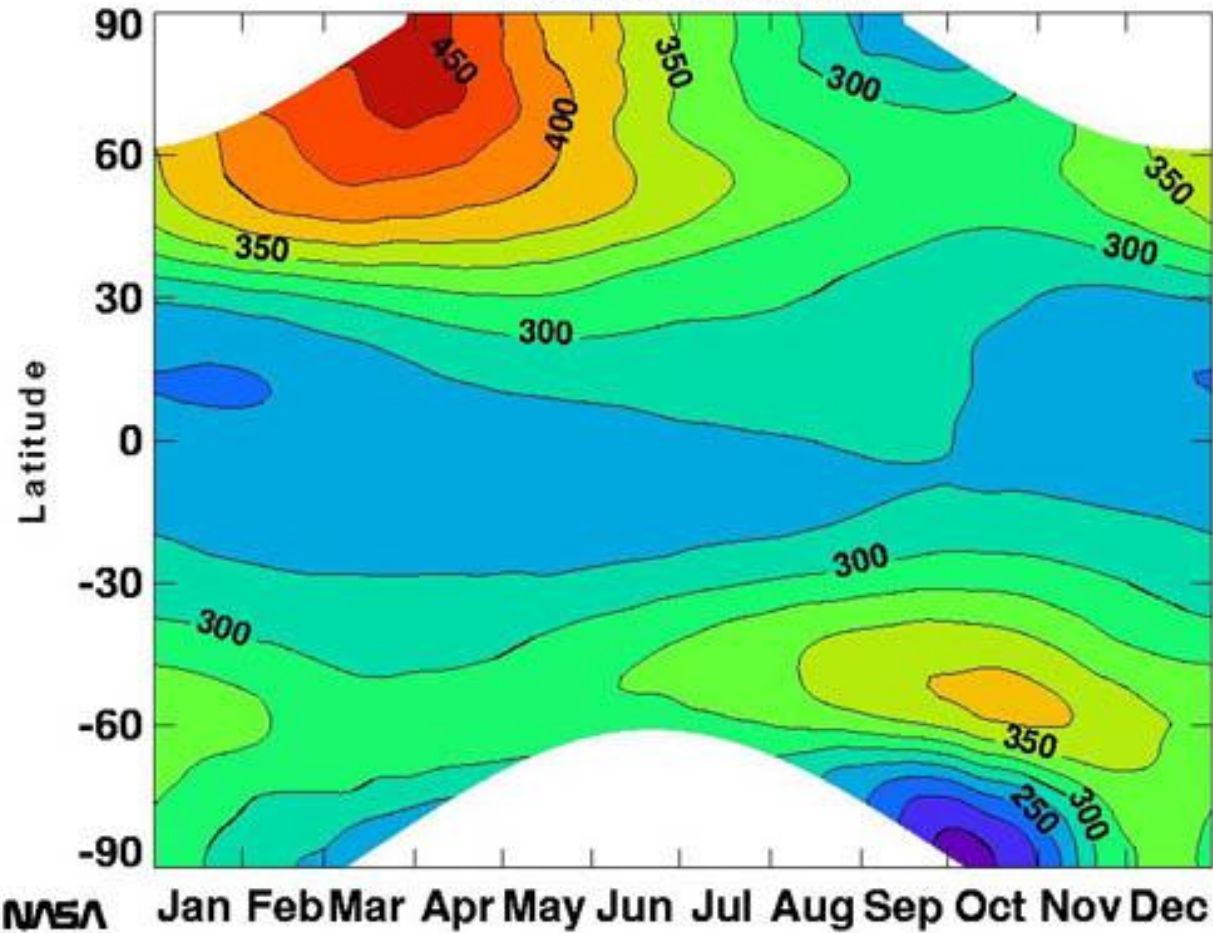
Πηγή: NASA

- Να σημειωθεί επίσης, η ασυμμετρία μεταξύ βορείου & νοτίου ημισφαιρίου. Το μέγιστο της συγκέντρωσης του O<sub>3</sub> φαίνεται να είναι μεγαλύτερο στο Βόρειο Ημισφαίριο



# Το όζον (O<sub>3</sub>)

TOMS 1979-92



Πηγή: NASA

## Χωρική & Χρονική κατανομή του O<sub>3</sub>

- Αυτή η παρατηρούμενη συμπεριφορά σε ότι αφορά την χωρική & χρονική μεταβολή του O<sub>3</sub> υποδηλώνει **μεταφορά ποσοτήτων O<sub>3</sub> από τα μικρά γεωγραφικά πλάτη προς τα μεγάλα** όπου παρατηρούνται οι μεγάλες συγκεντρώσεις του
- Αυτή η μεταφορά θα πρέπει να γίνεται μέσω της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας η οποία προβλέπει οριζόντια μετακίνηση αερίων μαζών από τον Ισημερινό προς τα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη

- Η οριζόντια **μεταφορά αερίων μαζών** από τον **Ισημερινό** προς τους **πόλους** υπολογίζεται από χαρακτηρίζεται από μια κλίμακα χρόνου περίπου **3 – 4 μηνών** ➡

Πρέπει να υπολογίσουμε τον **χρόνο ζωής** του O<sub>3</sub> για να εξετάσουμε αν επαρκεί ώστε να εξηγείται η μεταφορά του από τον ισημερινό προς τις περιοχές που εμφανίζει μέγιστο η συγκέντρωσή του (μεγάλα γεωγραφικά πλάτη)

# Το όζον (O<sub>3</sub>)

## Ο χρόνος ζωής του O<sub>3</sub>

### Πηγή:

[http://www.atmosp.physics.utoronto.ca/SPARC/SPARC2000\\_new/PosterSess4/Piacentini/HTML/profilesandsolarUVB.htm](http://www.atmosp.physics.utoronto.ca/SPARC/SPARC2000_new/PosterSess4/Piacentini/HTML/profilesandsolarUVB.htm)

- Ο χρόνος ζωής του O<sub>3</sub> εξαρτάται από την συγκέντρωση του & τον ρυθμό παραγωγής του δηλαδή τον ρυθμό φωτόλυσης του O<sub>2</sub>
- Όμως, τόσο η συγκέντρωση του O<sub>3</sub> όσο και ο ρυθμός παραγωγής του μεταβάλλεται με το ύψος



- Ο χρόνος ζωής του O<sub>3</sub> μεταβάλλεται με το ύψος π.χ.
  - 15 Km: είναι ~ 3 χρόνια
  - Κάτω από τα 25 Km: είναι της τάξης των ετών
  - Κάτω από τα 30 Km: είναι της τάξης των εβδομάδων
  - 35 Km: είναι της τάξης της 1 ημέρας

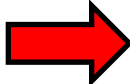


- Στα μικρά γεωγραφικά πλάτη για ύψη κάτω από τα 20 Km ο χρόνο ζωής του O<sub>3</sub> επαρκεί για να μεταφερθεί από αυτή την περιοχή προς τα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη
- Στην κατώτερη στρατόσφαιρα (~20 Km) οι συγκεντρώσεις του O<sub>3</sub> καθορίζονται από δυναμικές διεργασίες μεγάλης κλίμακας (μεταφορικές κινήσεις)
- Στην ανώτερη στρατόσφαιρα κυριαρχούν οι φωτοχημικές διεργασίες και βρίσκεται σε φωτοχημική ισορροπία

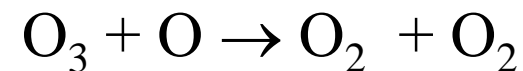
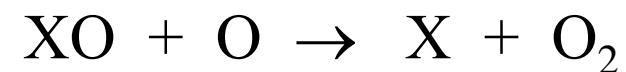
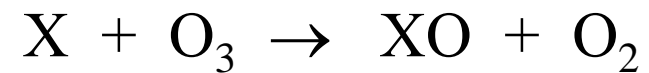
# Το όζον (O<sub>3</sub>)

**Πηγή:**

<http://www.ems.psu.edu/~brune/m465/m465f027.jpg>

- παρότι μέχρι το 1964 πίστευαν ότι ο μηχανισμός του Chapman εξηγεί επαρκώς την παραγωγή & καταστροφή του O<sub>3</sub>, το κατακόρυφο προφίλ του που μετρήθηκε διαφέρει σημαντικά από το θεωρητικό που υπολογίζεται από τον κύκλο του Chapman 

**Επιπλέον του κύκλου Chapman, υπάρχουν και άλλοι μηχανισμοί καταστροφής του O<sub>3</sub>, οι οποίοι έχουν την μορφή του καταλυτικού κύκλου:**



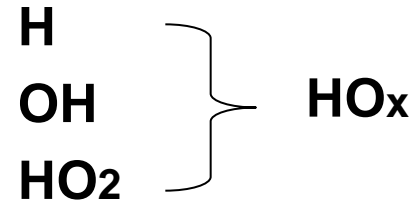
**Όπου:**

**X = H, OH,  
NO, Cl, Br**

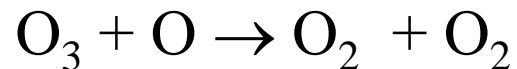
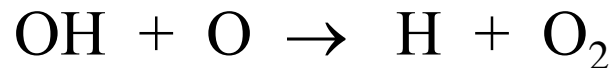
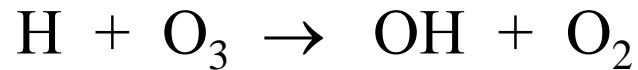
# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Καταστροφή του O<sub>3</sub>

## Καταλυτικός κύκλος καταστροφής του O<sub>3</sub> από ελεύθερες ρίζες HO<sub>x</sub>

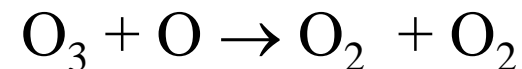
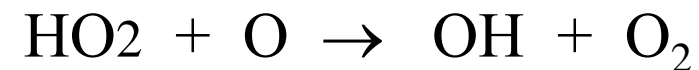
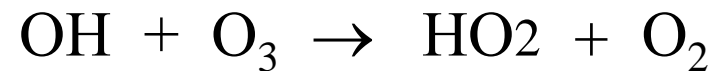
■ Οι ελεύθερες ρίζες που συμμετέχουν στους καταλυτικούς κύκλους καταστροφής του O<sub>3</sub> και συμβολίζονται ως HO<sub>x</sub> είναι:



### ■ 1<sup>ος</sup> καταλυτικός κύκλος HO<sub>x</sub>



### ■ 2<sup>ος</sup> καταλυτικός κύκλος HO<sub>x</sub>

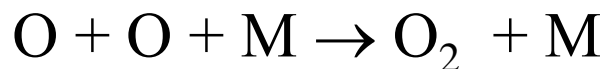
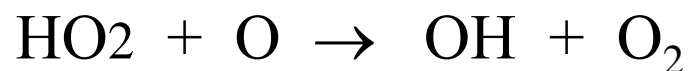
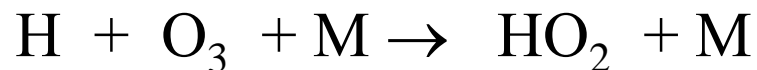
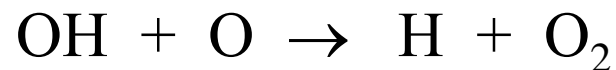




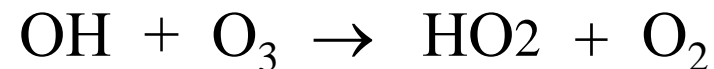
# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Καταστροφή του O<sub>3</sub>

## Καταλυτικός κύκλος καταστροφής του O<sub>3</sub> από ελεύθερες ρίζες HO<sub>x</sub>

### ■ 3<sup>ος</sup> καταλυτικός κύκλος HO<sub>x</sub>



### ■ 2<sup>ος</sup> καταλυτικός κύκλος HO<sub>x</sub>

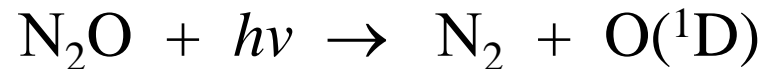


- Η κύρια πηγή των ελευθέρων ριζών είναι οι υδρατμοί (H<sub>2</sub>O)  $\left\{ \begin{array}{l} \text{O}(^1\text{D}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{OH} \\ \text{O}(^1\text{D}) + \text{CH}_4 \rightarrow \text{OH} + \text{CH}_3 \end{array} \right.$
- Στη στρατόσφαιρα όμως περιέχεται μικρή ποσότητα υδρατμών (μόλις 5 – 6 ppm) και αυτό γιατί εξ' αιτίας των χαμηλών θερμοκρασιών που επικρατούν στην τροπόπαυση το νερό εκεί παγώνει με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η μεταφορά του στη στρατόσφαιρα
- Η μισή ποσότητα H<sub>2</sub>O που υπάρχει στη στρατόσφαιρα προέρχεται από την οξείδωση του CH<sub>4</sub>

# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Καταστροφή του O<sub>3</sub>

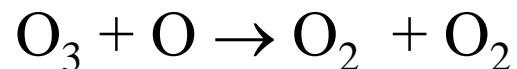
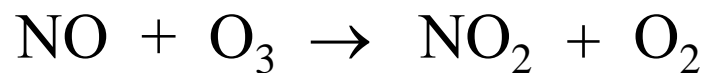
## Καταλυτικός κύκλος καταστροφής του O<sub>3</sub> από τα οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>)

- Η κύρια πηγή των NO<sub>x</sub> (= NO + NO<sub>2</sub>) στη στρατόσφαιρα είναι η φωτόλυση του N<sub>2</sub>O
- Περίπου το 90% του N<sub>2</sub>O στη στρατόσφαιρα καταστρέφεται από φωτόλυση

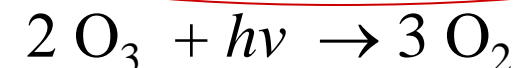
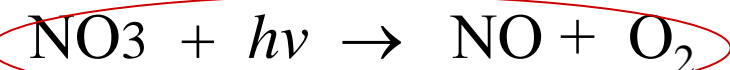
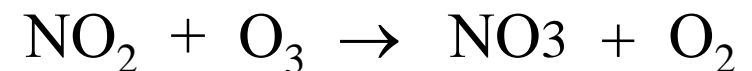
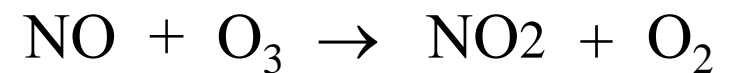


- Το υπόλοιπο 10% αντιδρά με το O(<sup>1</sup>D) με δύο τρόπους (το περισσότερο ακολουθεί την πρώτη διαδικασία: O(<sup>1</sup>D) + N<sub>2</sub>O → 2NO το περισσότερο (58%) ακολουθεί την πρώτη διαδικασία  
→ N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>)

### ■ 1<sup>ος</sup> καταλυτικός κύκλος NO<sub>x</sub>



### ■ 2<sup>ος</sup> καταλυτικός κύκλος HO<sub>x</sub>



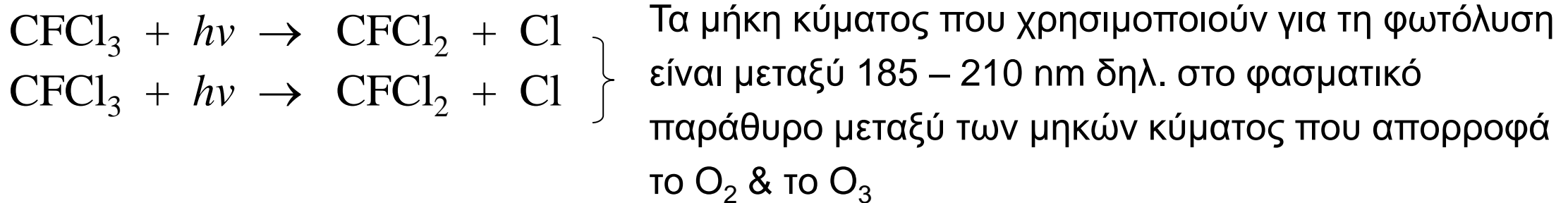
Η φωτόλυση του NO<sub>3</sub> είναι ταχύτατη (0,2 s<sup>-1</sup>)

# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Καταστροφή του O<sub>3</sub>

## Καταλυτικός κύκλος καταστροφής του O<sub>3</sub> από τα οξειδία τα CFCs (ClO<sub>x</sub>)

■ Το 1975 οι Molina & Rowland (Molina and Rowland 1974; Rowland and Molina 1975) (Nobel Χημείας) διαπίστωσαν ότι οι χλωροφθοράνθρακες (**CFCs**) οι οποίοι είναι αποκλειστικά ανθρωπογενή προϊόντα δεν καταστρέφονται με κάποιον τρόπο στη στρατόσφαιρα και έτσι λόγω του μεγάλου χρόνου ζωή τους μεταφέρονται στην στρατόσφαιρα όπου φωτολύονται και απελευθερώνουν άτομα χλωρίου (**Cl**)

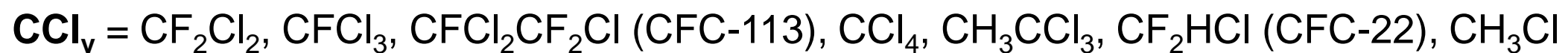
■ Π.χ. η φωτόλυση των **CFCl<sub>3</sub> (CFC-11)** και **CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> (CFC-12)**



■ Μέγιστο της φωτοδιάσπασης του **CFCl<sub>3</sub>** εμφανίζεται στα **23 Km**

■ Μέγιστο της φωτοδιάσπασης του **CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>** εμφανίζεται στα **25-35 Km**

■ Οργανικές ενώσεις που απελευθερώνουν **Cl** στη στρατόσφαιρα είναι:



■ Οι ανόργανες ενώσεις που απελευθερώνουν **Cl** στη στρατόσφαιρα είναι:



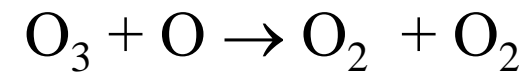
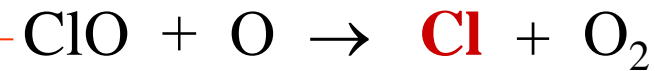
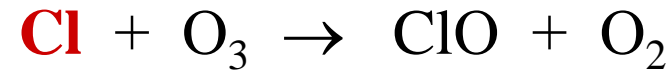
# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Καταστροφή του O<sub>3</sub>

## Καταλυτικός κύκλος καταστροφής του O<sub>3</sub> από τα οξειδία τα CFCs (ClO<sub>x</sub>)

Πηγή:

[https://www.ucar.edu/learn/1\\_6\\_1.htm](https://www.ucar.edu/learn/1_6_1.htm)

### ■ 1<sup>ος</sup> καταλυτικός κύκλος ClO<sub>x</sub>



Χρόνος αντίδρασης:

→ 1 sec

→ 1 min

- Εξίσου καταστροφικό για το O<sub>3</sub>, με το Cl είναι και το Br

- Ο παραπάνω καταλυτικός κύκλος εκτελείται ~10<sup>5</sup> φορές πριν το άτομο του Cl συμμετάσχει σε άλλη ένωση & τερματιστεί ο κύκλος

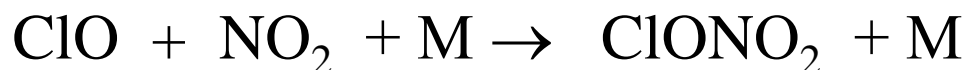
1 άτομο Cl μπορεί να καταστρέψει 100.000 μόρια O<sub>3</sub> πριν απομακρυνθεί

- Κύριες πηγές των CFCs, τα οποία είναι ανθρωπογενή προϊόντα είναι:
  - ✓ Ψυκτικά (ψυγεία, κλιματιστικά, ...)
  - ✓ Προωθητικά σε σπρέι
  - ✓ Σε διαλύτες & προϊόντα καθαρισμού

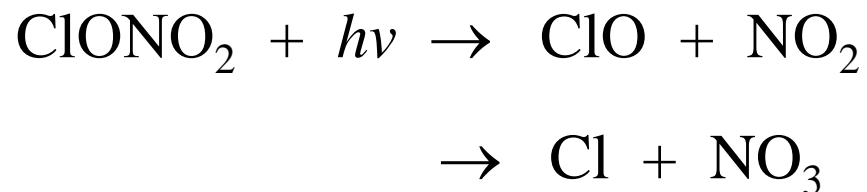
# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Καταστροφή του O<sub>3</sub>

## Καταλυτικοί κύκλοι καταστροφής του O<sub>3</sub>

- Συμβαίνει και συνδυασμός των παραπάνω καταλυτικών κύκλων
- Οι κύκλοι αυτοί θα συνεχίζονταν για πάντα. Στην πραγματικότητα όμως οι ενεργές ενώσεις (**OH**, **NO<sub>2</sub>**, **Cl** και **ClO**) συμμετέχουν και σε άλλες αντιδράσεις με αποτέλεσμα να μην είναι διαθέσιμες να δράσουν ως καταλύτες στους διάφορους κύκλους
- Έτσι, σημαντικό ρόλο παίζουν οι διάφορες **ενώσεις-’αποθήκες’** οι οποίες κρατούν δεσμευμένα τα άτομα/μόρια που προκαλούν την καταστροφή του O<sub>3</sub>
- Π.χ. τέτοιες ενώσεις είναι οι: **HCl** & **ClONO<sub>2</sub>** που ‘αποθηκεύουν’ το **99%** του ενεργού **Cl**
- Η ένωση **ClONO<sub>2</sub>** σχηματίζεται ως εξής:



- Η ένωση **ClONO<sub>2</sub>** όμως φωτολύεται και δίνει ενεργό **Cl**:

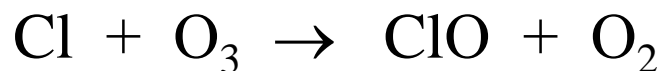
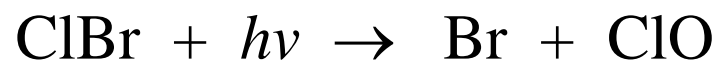
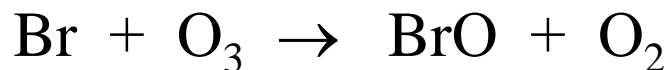
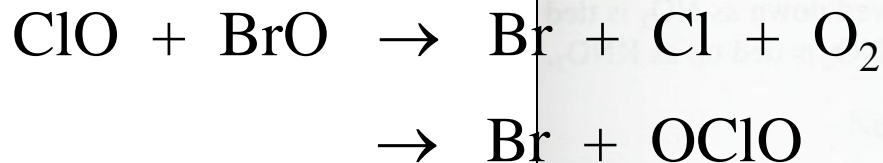
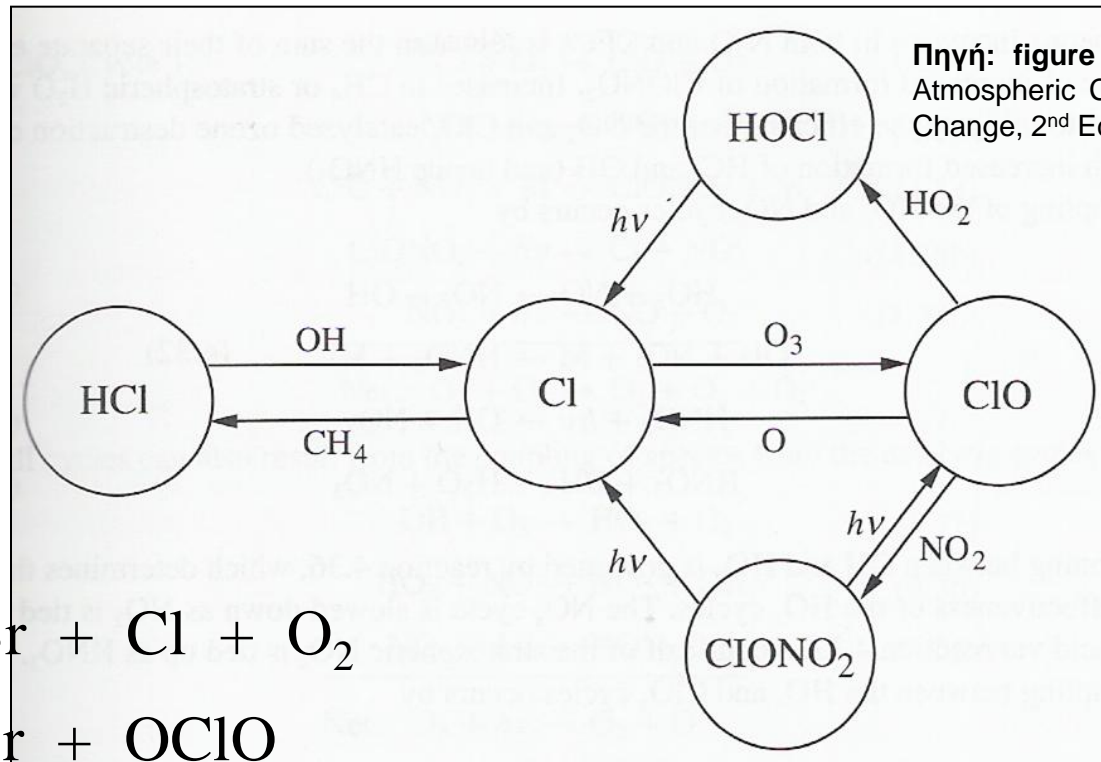


# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Καταστροφή του O<sub>3</sub>

## Καταλυτικός κύκλος καταστροφής του O<sub>3</sub>

■ Συμβαίνει και **συνδυασμός** των παραπάνω καταλυτικών κύκλων όπως π.χ.

- OHx / ClOx
- NOx / ClOx
- BrOx / ClOx

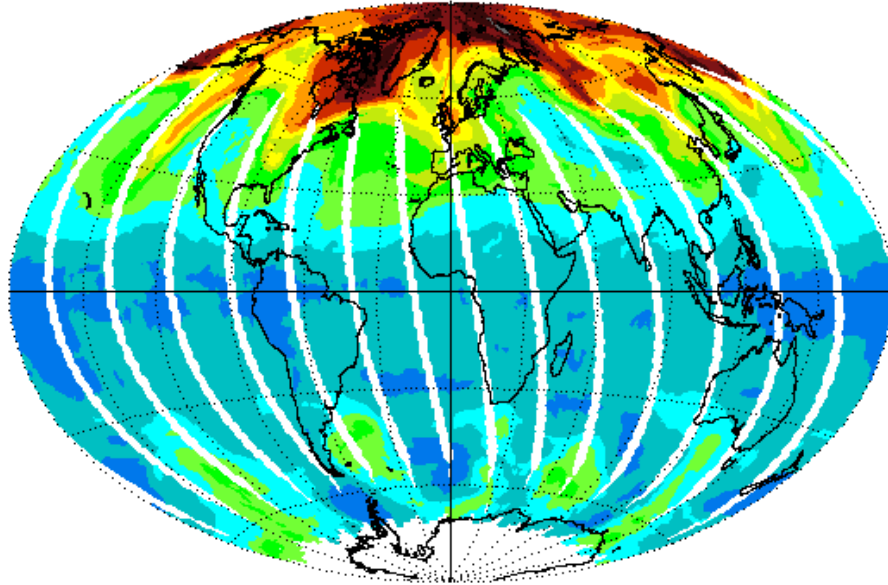


**Πηγή:**

[http://www.ccpo.odu.edu/SEES/ozone/class/Chap\\_5/5\\_Js/5-18.jpg](http://www.ccpo.odu.edu/SEES/ozone/class/Chap_5/5_Js/5-18.jpg)

# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Κατανομή του O<sub>3</sub>

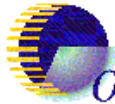
OMI Total Ozone Apr 22, 2012



- Γενικά, τα επίπεδα του O<sub>3</sub> > 200 DU

Τα επίπεδα του O<sub>3</sub> δεν υπερβαίνουν τα 500 DU δηλ. (0.5 cm) !

NIVR-FMI-NASA-KNMI

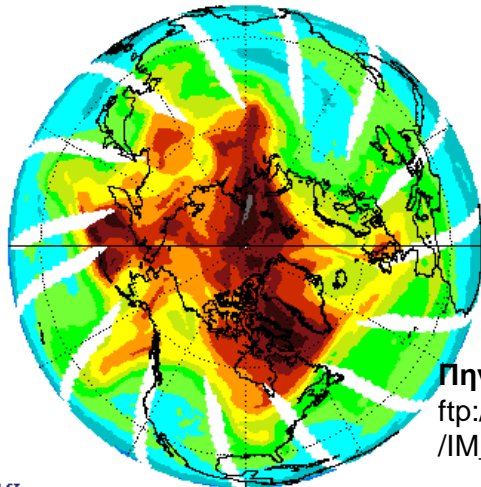


GSFC



Πηγή: [ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2012/IM\\_ozgbl\\_omi\\_20120422.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2012/IM_ozgbl_omi_20120422.png)

OMI Total Ozone for Apr 22, 2012



Πηγή:  
[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2012/IM\\_oznpl\\_omi\\_20120422.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2012/IM_oznpl_omi_20120422.png)

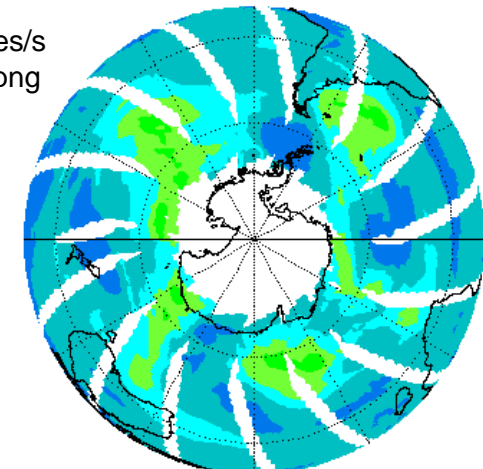
NIVR-FMI-NASA-KNMI



GSFC



OMI Total Ozone for Apr 22, 2012



Πηγή:  
[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/spole/Y2012/IM\\_ozspl\\_omi\\_20120422.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/spole/Y2012/IM_ozspl_omi_20120422.png)

NIVR-FMI-NASA-KNMI



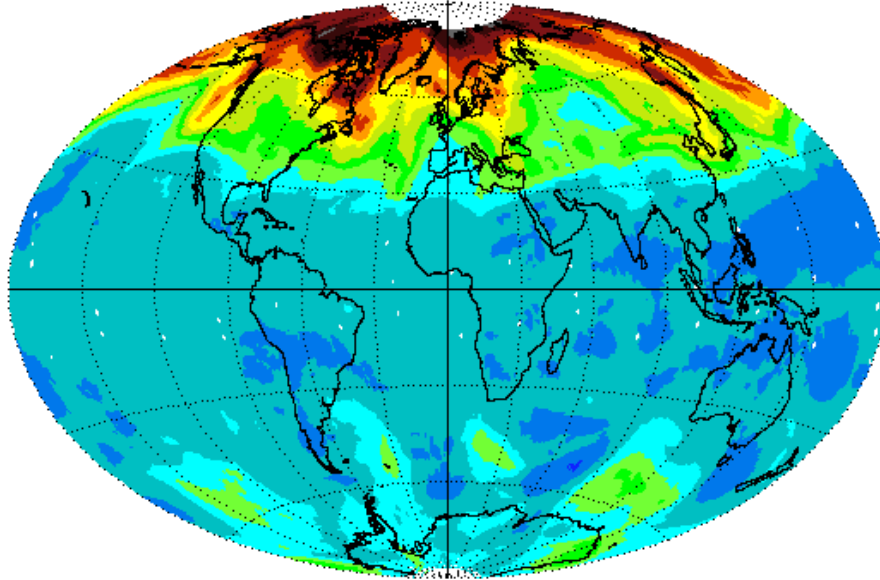
GSFC





# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Κατανομή του O<sub>3</sub>

OMI Total Ozone Mar 14, 2008



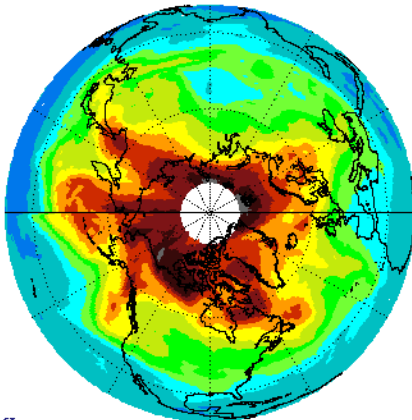
Μάρτιος 2008

- Γενικά, τα επίπεδα του O<sub>3</sub> > 200 DU



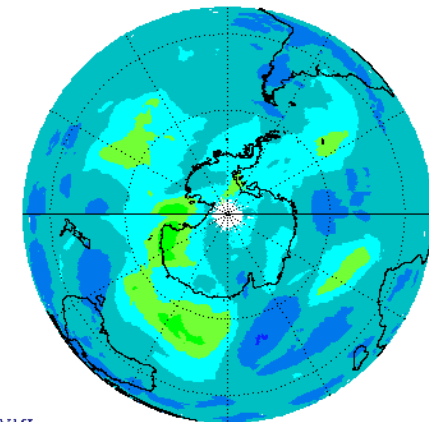
Πηγή: [ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2008/IM\\_ozgbl\\_omi\\_20080314.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2008/IM_ozgbl_omi_20080314.png)

OMI Total Ozone for Mar 14, 2008



Πηγή:  
[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2008/IM\\_oznpl\\_omi\\_20080314.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2008/IM_oznpl_omi_20080314.png)

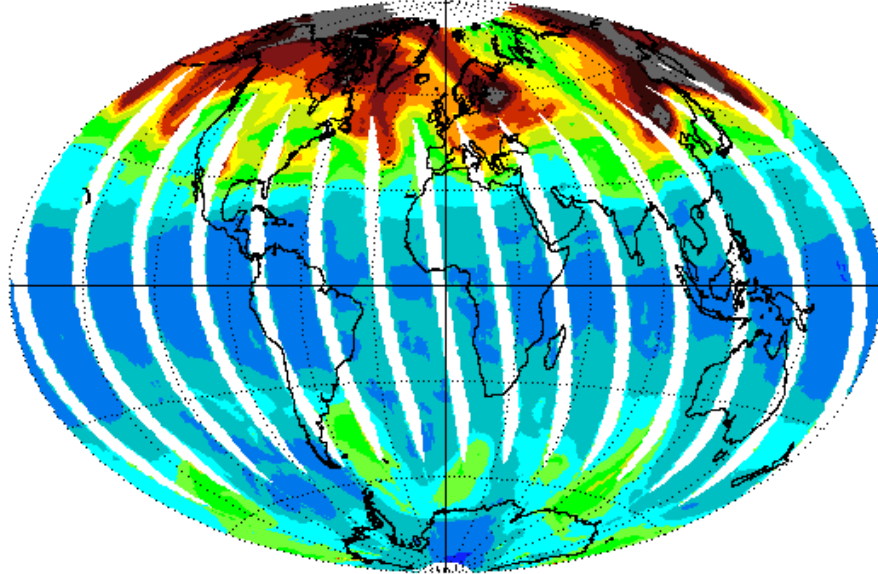
OMI Total Ozone for Mar 14, 2008





# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Κατανομή του O<sub>3</sub>

OMI Total Ozone Mar 15, 2010



Μάρτιος 2010

- Γενικά, τα επίπεδα του O<sub>3</sub> > 200 DU

NIVR-FMI-NASA-KNMI



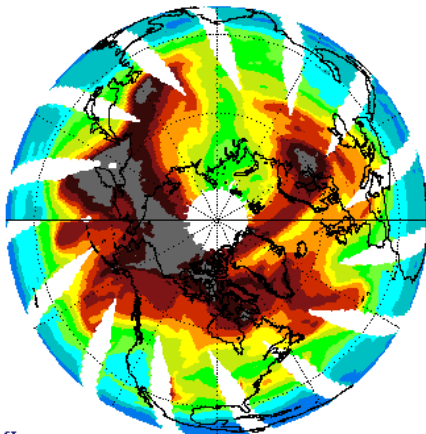
GSFC



Πηγή: [ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2010/IM\\_ozgbl\\_omi\\_20100315.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2010/IM_ozgbl_omi_20100315.png)

OMI Total Ozone for Mar 15, 2010

OMI Total Ozone for Mar 15, 2010



Πηγή:

[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/pole/Y2010/IM\\_ozspl\\_omi\\_20100315.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/pole/Y2010/IM_ozspl_omi_20100315.png)

Πηγή:

[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2010/IM\\_oznpl\\_omi\\_20100315.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2010/IM_oznpl_omi_20100315.png)

NIVR-FMI-NASA-KNMI



GSFC



NIVR-FMI-NASA-KNMI

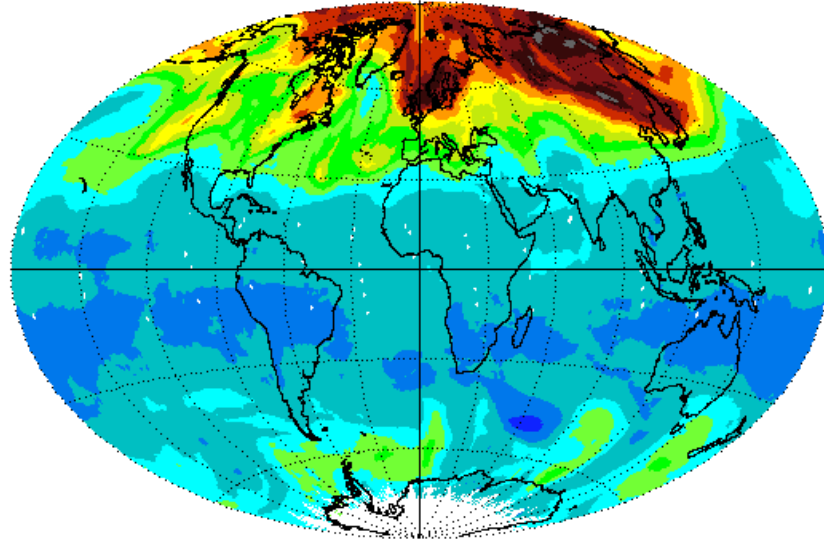


GSFC



# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Κατανομή του O<sub>3</sub>

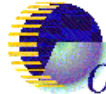
OMI Total Ozone Apr 8, 2006



Απρίλιος 2006

- Γενικά, τα επίπεδα του O<sub>3</sub> > 200 DU

NIVR-FMI-NASA-KNMI



OMI

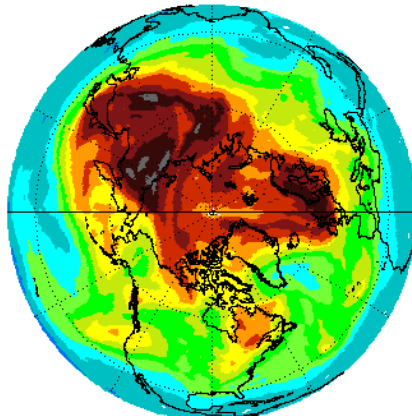


GSFC



Πηγή: [ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2006/IM\\_ozgbl\\_omi\\_20060408.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2006/IM_ozgbl_omi_20060408.png)

OMI Total Ozone for Apr 8, 2006



Πηγή:  
[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2006/IM\\_oznpl\\_omi\\_20060408.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2006/IM_oznpl_omi_20060408.png)

NIVR-FMI-NASA-KNMI



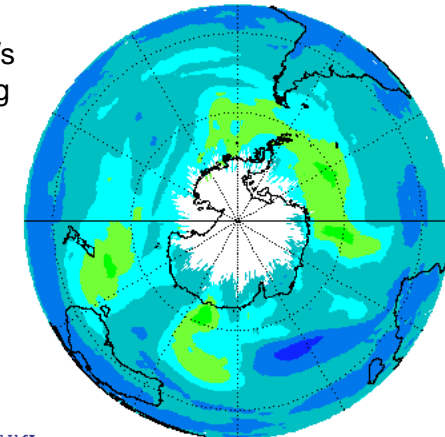
OMI



GSFC



OMI Total Ozone for Apr 8, 2006



Πηγή:  
[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/spole/Y2006/IM\\_ozspl\\_omi\\_20060408.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/spole/Y2006/IM_ozspl_omi_20060408.png)

NIVR-FMI-NASA-KNMI



OMI

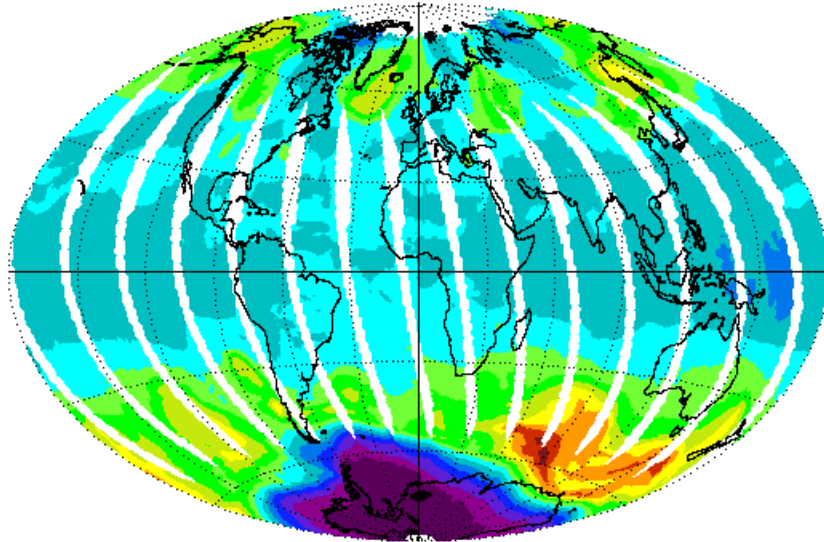


GSFC



# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Κατανομή του O<sub>3</sub>

OMI Total Ozone Oct 2, 2014



NIVR-FMI-NASA-KNMI

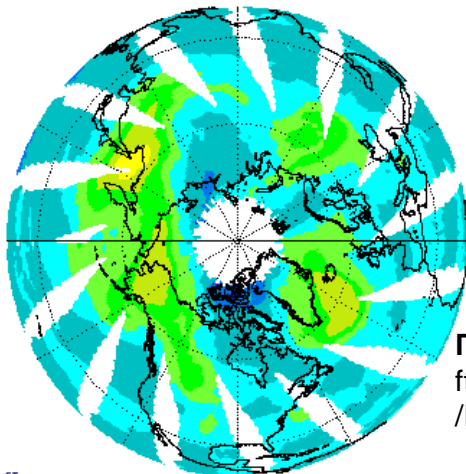


Οκτώβριος 2014

- Γενικά, τα επίπεδα του O<sub>3</sub> > 200 DU

Πηγή: [ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2014/IM\\_ozgbl\\_omi\\_20141002.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2014/IM_ozgbl_omi_20141002.png)

OMI Total Ozone for Oct 2, 2014

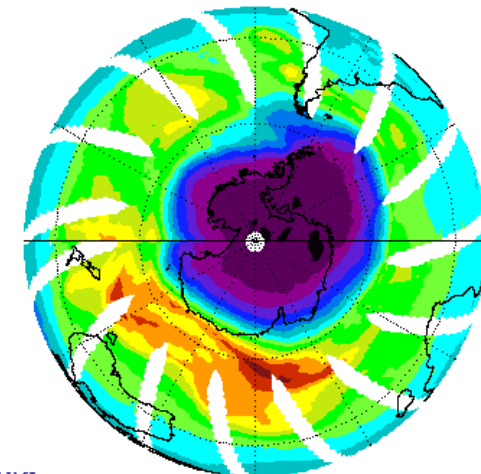


Πηγή:  
[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2014/IM\\_oznpl\\_omi\\_20141002.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2014/IM_oznpl_omi_20141002.png)

NIVR-FMI-NASA-KNMI



OMI Total Ozone for Oct 2, 2014



NIVR-FMI-NASA-KNMI



## Το όζον ( $O_3$ ) – Η τρύπα του $O_3$

- Το 1985 η ομάδα του Βρετανού επιστήμονα J. Farman σόκαρε την διεθνή επιστημονική κοινότητα καθώς ανέφερε, βάσει μετρήσεων εδάφους, **μαζική ετήσια μείωση του στρατοσφαιρικού  $O_3$**  πάνω από την **Ανταρκτική** κατά τη διάρκεια της **πολικής άνοιξης (Σεπτέμβριο – Οκτώβριο)**
- Η μείωση αυτή δεν μπορούσε να εξηγηθεί από την γνωστή στρατοσφαιρική χημεία του Cl
- Η μείωση αυτή στη συνέχεια επιβεβαιώθηκε και από δορυφορικές παρατηρήσεις (TOMS)

Η μείωση του στρατοσφαιρικού  $O_3$  ήταν σημαντική: από **500 DU** στα μέσα της δεκαετίας του '70 σε **~ 100 DU**

- Μετρήσεις του κατακόρυφου προφίλ του  $O_3$  έδειξαν ότι η μείωση εντοπίζεται σε ύψη μεταξύ **12 και 24 Km**
- Με βάση την καταλυτική χημεία των αλογόνων ClOx **θα περίμενε κάποιος να σημειωθεί μείωση του  $O_3$  στα μεσαία & μικρά γεωγραφικά πλάτη** και σε ύψη **35 με 45 Km**

# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Η τρύπα του O<sub>3</sub>

## Τι γνωρίζουμε:

- Στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη πλησίον της Ανταρκτικής & της Αρκτικής σημειώνονται οι υψηλότερες συγκεντρώσεις του O<sub>3</sub> κατά το μεγαλύτερο μέρος του έτους. Το O<sub>3</sub> μεταφέρεται εκεί από τις τροπικές περιοχές μέσω της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας
- Στη στρατόσφαιρα της Ανταρκτικής υπάρχει έλλειμμα σε ατομικό οξυγόνο (O) αφού λόγω χαμηλού ύψους ηλίου η ένταση της UV είναι περιορισμένη
- Κατά τη διάρκεια του πολικού χειμώνα στην Ανταρκτική, ο αέρας ψύχεται σημαντικά, κατέρχεται, δημιουργείται μια Δυτική κυκλοφορία & αναπτύσσεται ο **πολικός στρόβιλος (polar vortex)** το κέντρο του οποίου είναι εξαιρετικά σταθερό
- Κατά τη διάρκεια του πολικού χειμώνα μέχρι τις αρχές της τοπικής άνοιξης, ο πολικός στρόβιλος είναι εξαιρετικά σταθερός και εμποδίζει την ανάμιξη των αερίων μαζών του με άλλες από μικρότερα γεωγραφικά πλάτη
- Επίσης, ο πολικός στρόβιλος παγιδεύει στο εσωτερικό του για αρκετούς μήνες του έτους, σημαντικές ποσότητες O<sub>3</sub> που έχει μεταφερθεί στην Ανταρκτική

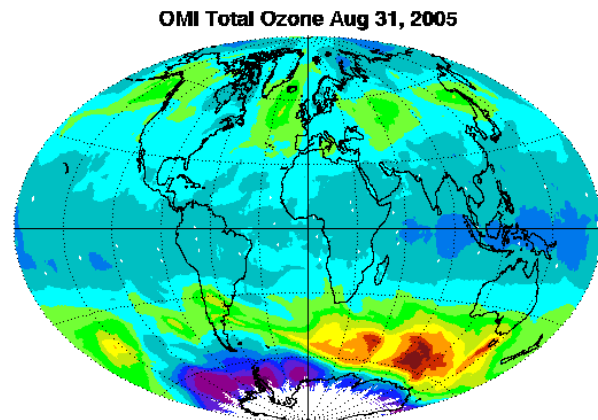


# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Η τρύπα του O<sub>3</sub>

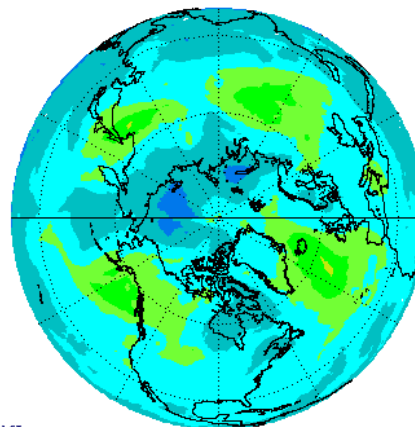
## Τι γνωρίζουμε:

- Την τοπική άνοιξη, τέλη Αυγούστου-αρχές Σεπτέμβρη, με την έναρξη της πολική μέρας, η παρουσία του ηλιακού φωτός προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας και επομένως εξασθένιση του πολικού στρόβιλου, ο οποίος μπορεί και να διαλυθεί εντελώς τον Νοέμβριο
- Το O<sub>3</sub> που είναι 'παγιδευμένο' στον πολικό στρόβιλο αρχίζει να μειώνεται με την έναρξη της πολικής μέρας (τέλη Αυγούστου-αρχές Σεπτεμβρίου), σταθεροποιείται στις **ελάχιστες τιμές** του τον **Οκτώβριο** και αρχίζει να αυξάνει από τον **Νοέμβριο**

## ΑΡΧΕΣ ΑΝΟΙΞΗΣ ΝΟΤΙΟΥ ΗΜΙΣΦΑΙΡΙΟΥ



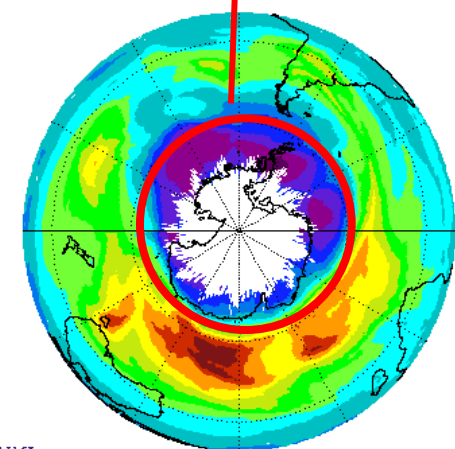
OMI Total Ozone for Aug 31, 2005



## ΤΡΥΠΑ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ

Επίπεδα του O<sub>3</sub> < 200 DU !

OMI Total Ozone for Aug 31, 2005

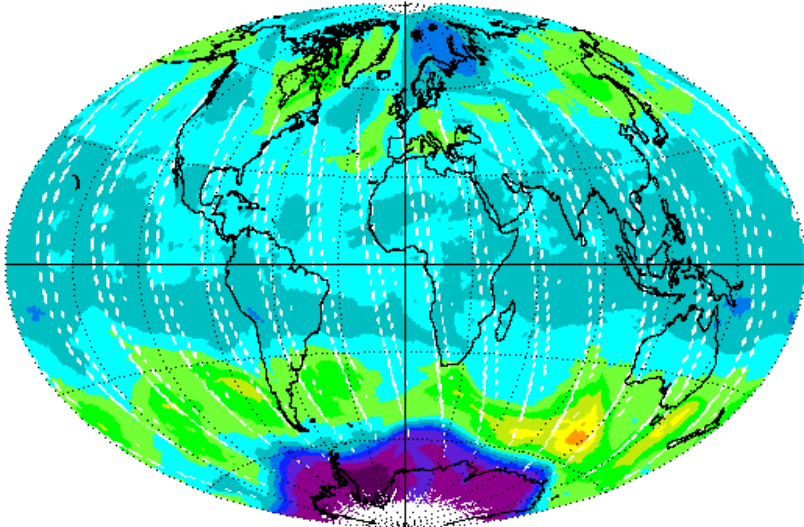


# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Κατανομή του O<sub>3</sub>

Σεπτέμβριος 2008

Επίπεδα του O<sub>3</sub> < 200 DU !  
(μέχρι 150 DU)

OMI Total Ozone Sep 16, 2008



NIVR-FMI-NASA-KNMI

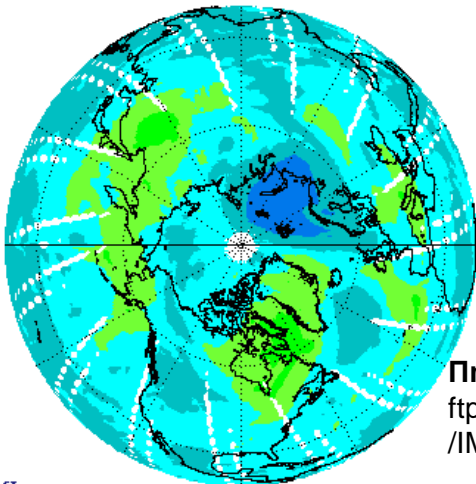


GSFC



Πηγή: [ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2008/IM\\_ozgbl\\_omi\\_20080916.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2008/IM_ozgbl_omi_20080916.png)

OMI Total Ozone for Sep 16, 2008



Πηγή:

[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2008/IM\\_oznpl\\_omi\\_20080916.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2008/IM_oznpl_omi_20080916.png)

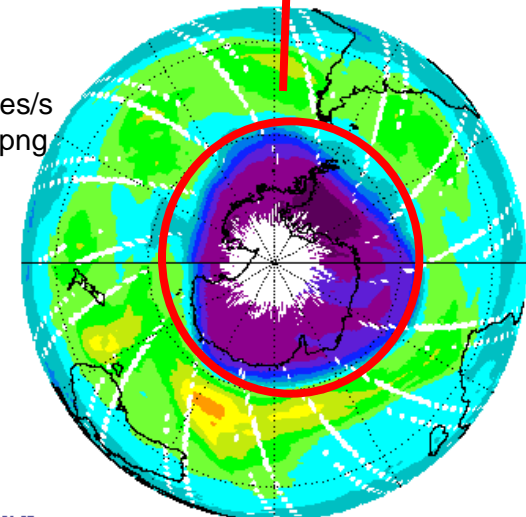
NIVR-FMI-NASA-KNMI



GSFC



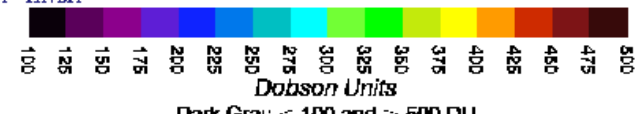
OMI Total Ozone for Sep 16, 2008



Πηγή:

[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/pole/Y2008/IM\\_ozspl\\_omi\\_20080916.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/pole/Y2008/IM_ozspl_omi_20080916.png)

NIVR-FMI-NASA-KNMI



GSFC

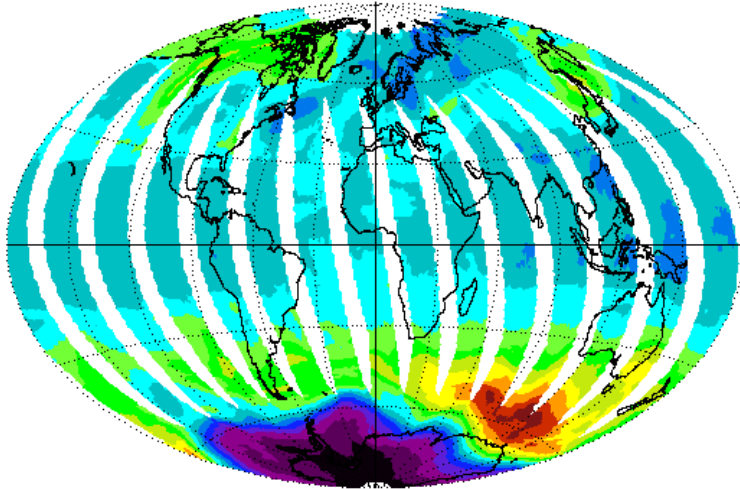


# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Κατανομή του O<sub>3</sub>

Οκτώβριος 2011

Επίπεδα του O<sub>3</sub> < 200 DU !  
(μέχρι 150 DU)

OMI Total Ozone Oct 2, 2011



NIVR-FMI-NASA-KNMI



OMI



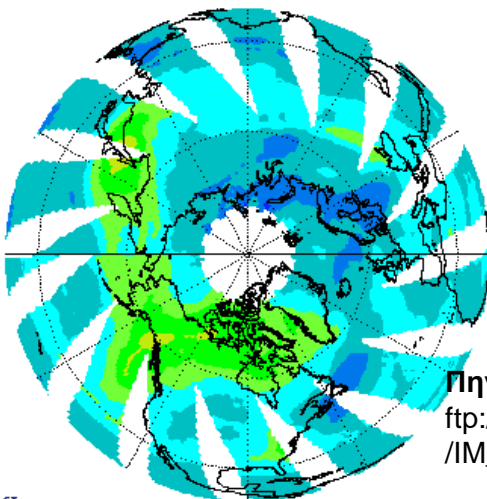
Dark Gray < 100 and > 500 DU

GSFC



Πηγή: [ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2011/IM\\_ozgbl\\_omi\\_20111002.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2011/IM_ozgbl_omi_20111002.png)

OMI Total Ozone for Oct 2, 2011



Πηγή:

[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2011/IM\\_oznpl\\_omi\\_20111002.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2011/IM_oznpl_omi_20111002.png)

NIVR-FMI-NASA-KNMI



OMI

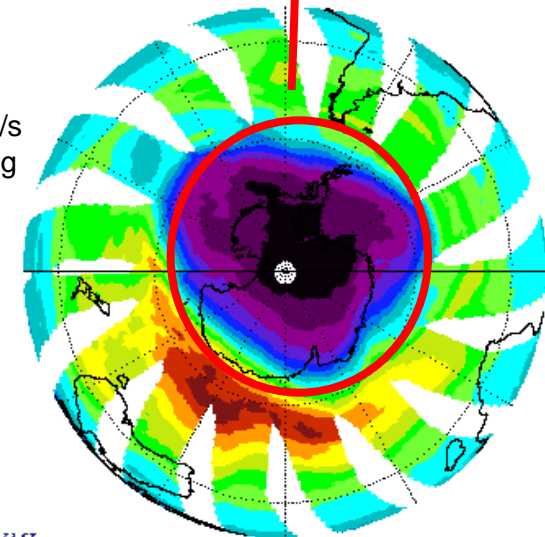


Dark Gray < 100 and > 500 DU

GSFC



OMI Total Ozone for Oct 2, 2011



Πηγή:

[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/pole/Y2011/IM\\_ozspl\\_omi\\_20111002.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/pole/Y2011/IM_ozspl_omi_20111002.png)

NIVR-FMI-NASA-KNMI



OMI



Dark Gray < 100 and > 500 DU

GSFC



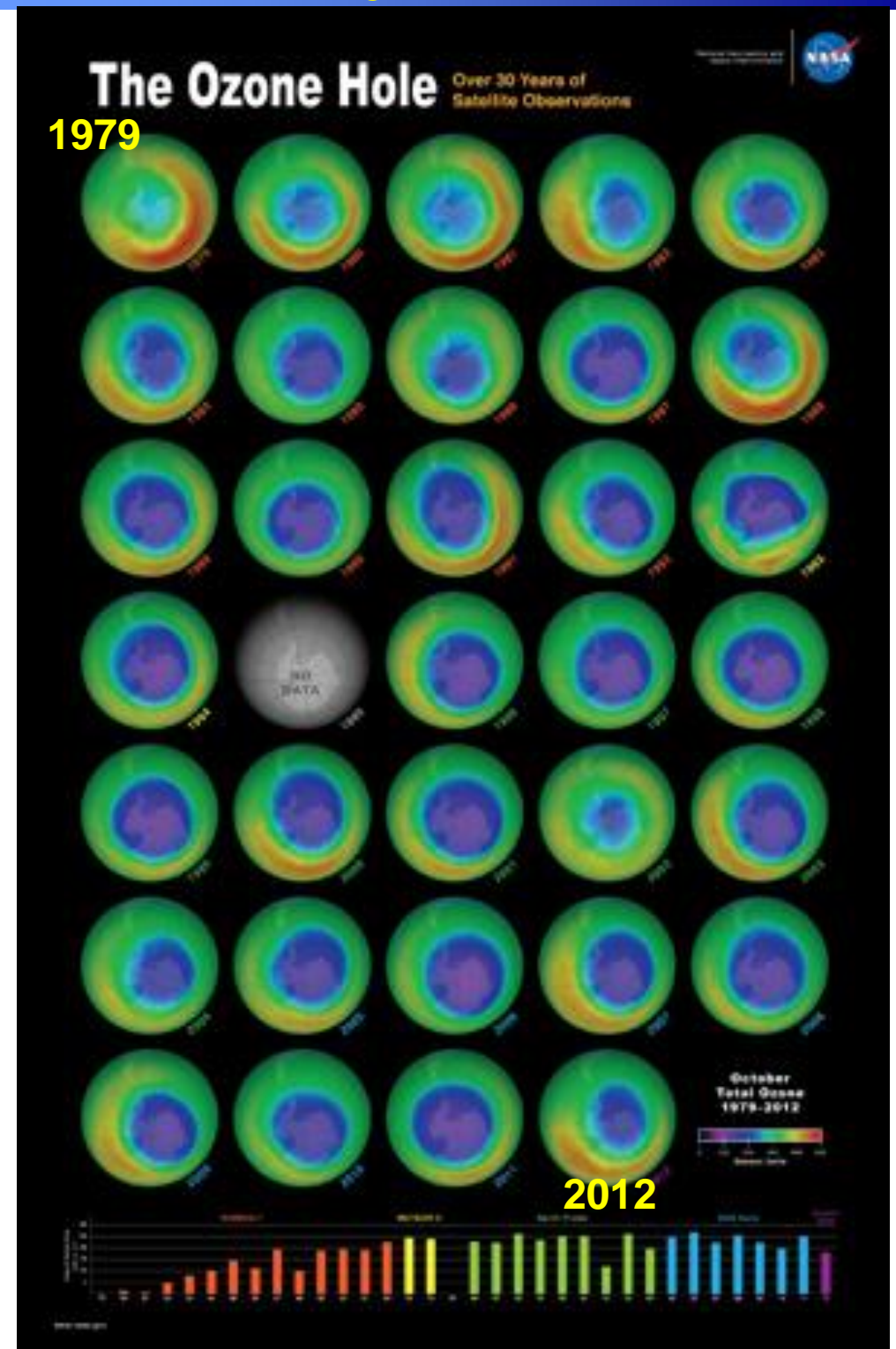
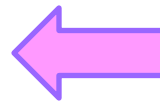


# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Η τρύπα του O<sub>3</sub>

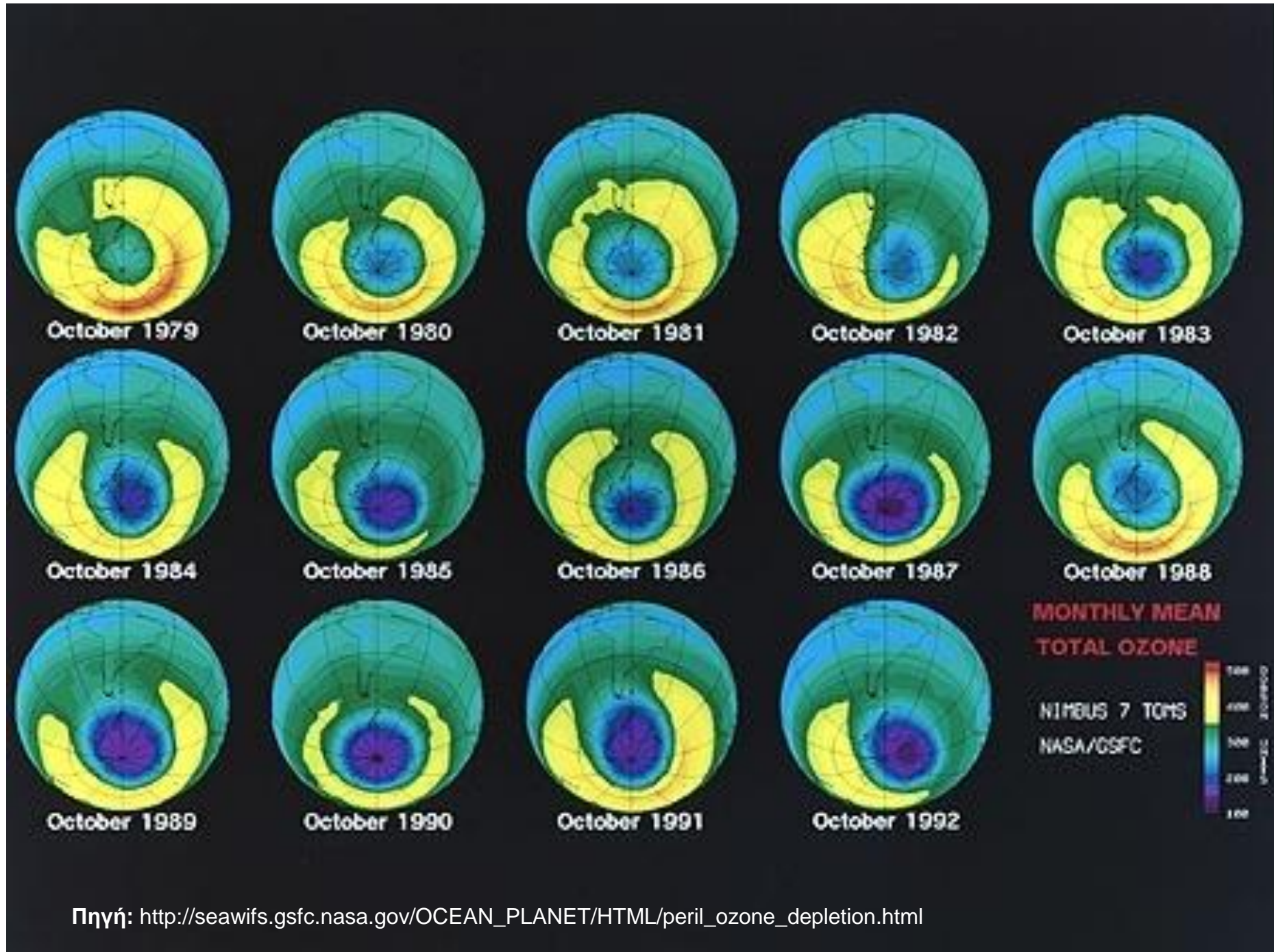
## Τι γνωρίζουμε:

■ Η παρατηρούμενη, χωρίς προηγούμενο, σημαντική μείωση του O<sub>3</sub> κυρίως πάνω από την Ανταρκτική συνέχισε να παρατηρείται και τα επόμενα χρόνια και μάλιστα πολλές φορές τα επίπεδα του επιδεινώνονταν σημαντικά

Η τρύπα του όζοντος του (O<sub>3</sub>) από το **1979** έως το **2012**



# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Η τρύπα του O<sub>3</sub>



Πηγή: [http://seawifs.gsfc.nasa.gov/OCEAN\\_PLANET/HTML/peril\\_ozone\\_depletion.html](http://seawifs.gsfc.nasa.gov/OCEAN_PLANET/HTML/peril_ozone_depletion.html)

# Το όζον ( $O_3$ ) – Η τρύπα του $O_3$

## Τι γνωρίζουμε:

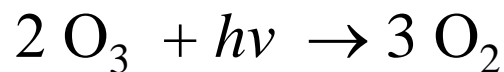
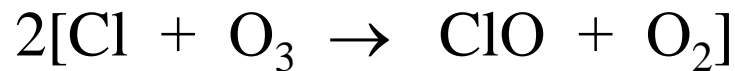
- Αρχικά, για την εξήγηση του φαινομένου προτάθηκαν θεωρίες σχετικές με τον κύκλο της ηλιακής δραστηριότητας ή με μεταβολές της Δυναμικής της Ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας. Όμως, οι παρατηρήσεις δεν επιβεβαίωσαν αυτές τις θεωρίες
  - Από την άλλη πλευρά, προτάθηκαν θεωρίες βασισμένες στους καταλυτικούς κύκλους αέριας φάσης που περιγράφηκαν πριν όμως ...
  - Στην πολική στρατόσφαιρα, λόγω του χαμηλού ύψους ηλίου (περιορισμένη ένταση της ακτινοβολίας) η **φωτοδιάσπαση του  $O_2$**  είναι **περιορισμένη** με αποτέλεσμα να υπάρχει πολύ λίγο διαθέσιμη ατομικό οξυγόνο ( $O$ )  $\Rightarrow$
- $\Rightarrow$  οι καταλυτικοί κύκλοι που απαιτούν την παρουσία  $O$  δεν είναι ικανοί να προκαλέσουν μαζική καταστροφή του  $O_3$
- Οι **CFCs** που θα μπορούσαν να προκαλέσουν σημαντική καταστροφή του  $O_3$ , στη στρατόσφαιρα πάνω από την Ανταρκτική εμφανίζουν τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε ύψος 40 Km, ενώ η τρύπα του  $O_3$  εντοπίζεται στην περιοχή 12 με 24 Km
  - Εξάλλου, οι υπάρχουσες συγκεντρώσεις των **CFCs** στα 40 Km μπορούσαν να προκαλέσουν μείωση του  $O_3$  της τάξης του 5 – 10 %  $\Rightarrow$  πολύ λιγότερη από την παρατηρούμενη ....

$\Rightarrow$  τι προκαλεί την τρύπα του  $O_3$  στην Ανταρκτική ???



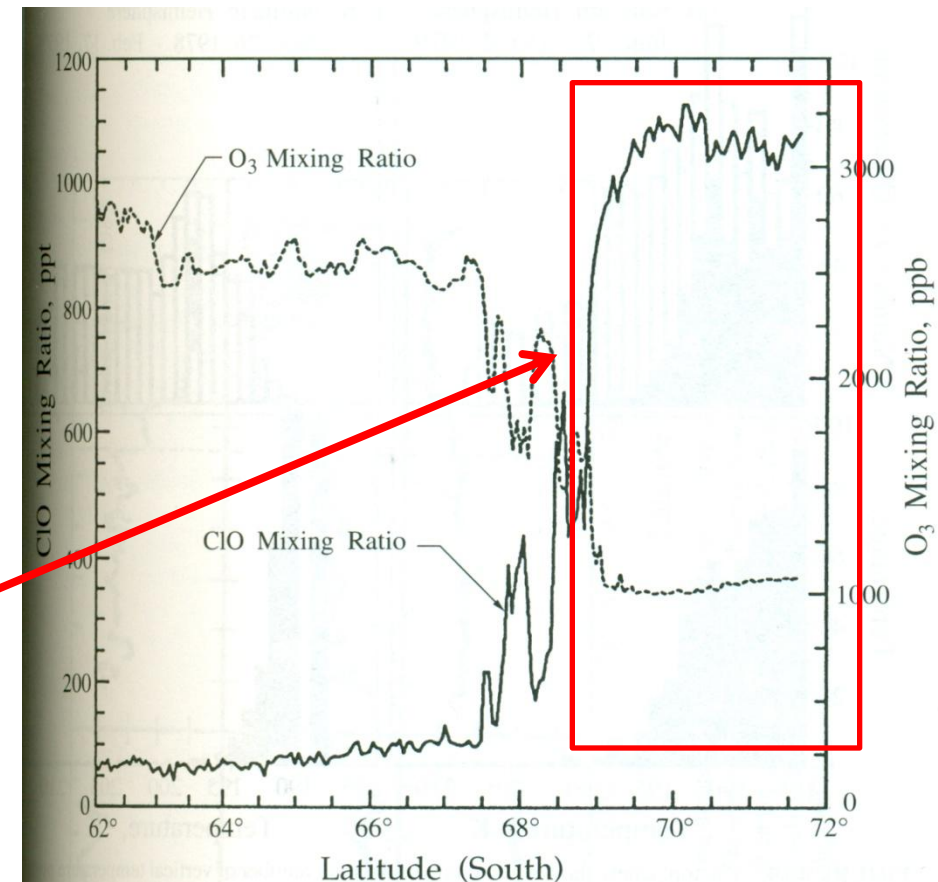
# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Η τρύπα του O<sub>3</sub>

- Οι Molina and Molina (1987) πρότειναν έναν επιπλέον μηχανισμό καταστροφής O<sub>3</sub>



αυτή η αντίδραση μπορεί να πραγματοποιηθεί αν επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες & αρκετά μεγάλα μόρια M

- Αν υπάρχουν διαθέσιμες σημαντικές συγκεντρώσεις του ClO τότε ο παραπάνω κύκλος μπορεί να προκαλέσει σημαντική καταστροφή του O<sub>3</sub>. Μόνο που η χημεία αέριας φάσης δεν είναι ικανή από μόνη της να παράξει σημαντικές ποσότητες ClO **απαιτείται και ετερογενής χημεία**



# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Η τρύπα του O<sub>3</sub>

## Ο ρόλος των πολικών νεφών (Polar Stratospheric Clouds) **PSCs**

Πηγή:  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/77/Polar\\_stratospheric\\_cloud\\_type\\_2.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/77/Polar_stratospheric_cloud_type_2.jpg)



Πηγή: <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=622>

- Η στρατόσφαιρα είναι γενικώς ξηρή & επομένως δεν έχει νέφη
- Κατά τη διάρκεια της πολικής νύχτας όμως, οι θερμοκρασίες μειώνονται δραματικά (φτάνουν τους 183 K ή -90°C) σε ύψη **10-25 Km** με αποτέλεσμα οι υδρατμοί να συμπυκνώνονται και να σχηματίζονται τα στρατοσφαιρικά πολικά νέφη (**PSCs**) ή μαργαρώδη νέφη τα οποία αποτελούνται κυρίως από παγοκρυστάλλους
- Η στρατόσφαιρα περιέχει επίσης αερολύματα σε ύψη 12 με 30 Km, φυσικής κυρίως προέλευσης
- Έτσι τα **PSCs** αποτελούνται κυρίως από:
  - ✓ Τα τύπου Ia: **κρυστάλλους τρι-ένυδρου νιτρικού οξέως (HNO<sub>3</sub> • 3 H<sub>2</sub>O)** συμβολίζεται **NAT**
  - ✓ Τα τύπου Ib: **κρυστάλλους HNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O**, που με την περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας απορροφά επιπλέον HNO<sub>3</sub> & H<sub>2</sub>O (σε T < 195 K) και δίνει **NAT**
  - ✓ Τα τύπου II: **παγοκρυστάλλους H<sub>2</sub>O**

# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Η τρύπα του O<sub>3</sub>

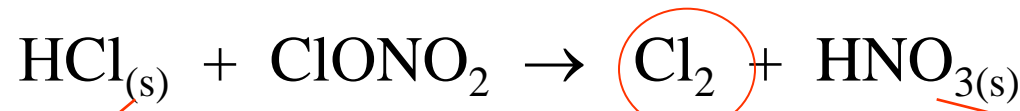
## Ο ρόλος των πολικών νεφών (Polar Stratospheric Clouds) **PSCs**



Πηγή:  
<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=622>

- Η χημεία αέριας φάσης με τους καταλυτικούς κύκλους που παρουσιάστηκαν προηγούμενα δεν μπορεί να εξηγήσει την μαζική καταστροφή του O<sub>3</sub> γιατί η απελευθέρωση Cl από τις ενώσεις-δεξαμενές του (HCl & ClONO<sub>2</sub>) είναι σχετικά αργή
- Οι παγοκρύσταλλοι των PSCs προσφέρουν τις κατάλληλες επιφάνειες για να πραγματοποιηθεί η ετερογενής χημεία που επιταχύνει την απελευθέρωση Cl
- Η διαδικασία έχει ως εξής:

- **Βήμα 1:** οι παγοκρύσταλλοι των PSCs απορροφούν το αέριο HCl
- **Βήμα 2:** πραγματοποιείται η ετερογενής αντίδραση του αερίου ClONO<sub>2</sub> με τον παγοκρύσταλλο



(s): δηλώνει ότι αυτή η ένωση βρίσκεται στην επιφάνεια του παγοκρυστάλλου

απελευθερώνεται ως αέριο και φωτολύεται ταχύτατα σε Cl όταν υπάρχει φως

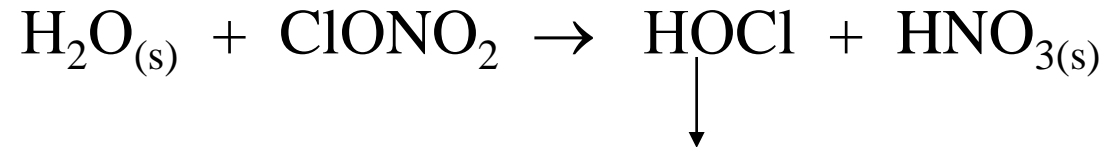
παραμένει δεσμευμένο στην επιφάνεια του παγοκρυστάλλου ευνοώντας περαιτέρω την καταστροφή του O<sub>3</sub> αφού αφαιρεί NO<sub>x</sub> από το σύστημα που θα αντιδρούσε με ClO δίνοντας ClONO<sub>2</sub> που λειτουργεί ως αποθήκη ενεργού Cl

# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Η τρύπα του O<sub>3</sub>

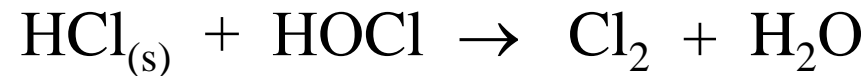
## Ο ρόλος των πολικών νεφών (Polar Stratospheric Clouds) **PSCs**



- Επίσης η παρακάτω αντίδραση στην αέρια φάση είναι πολύ αργή ενώ στην ετερογενή χημεία πραγματοποιούνται γρήγορα:



είτε φωτολύεται ταχύτατα και παράγει Cl ή συμμετέχει στην παρακάτω ετερογενή αντίδραση παράγοντας Cl<sub>2</sub>



- Μια άλλη ετερογενής αντίδραση που πραγματοποιείται και μετατρέπει το HCl σε ενεργό Cl είναι η εξής:



απελευθερώνεται ως  
αέριο και φωτολύεται  
ταχύτατα σε Cl όταν  
υπάρχει φως





# Το όζον ( $O_3$ ) – Η τρύπα του $O_3$

## Ο ρόλος των πολικών νεφών (Polar Stratospheric Clouds) PSCs



▪ Συνοψίζοντας:

Η μαζική καταστροφή του  $O_3$  απαιτεί:

**1/ πολύ χαμηλές θερμοκρασίες** για τον σχηματισμό των πολικών νεφών (PSCs) οι παγοκρύσταλλοι των οποίων παρέχουν τις απαραίτητες επιφάνειες για την πραγματοποίηση των ετερογενών αντιδράσεων οι οποίες παράγουν τις αέριες ενώσεις  **$Cl_2$ ,  $ClNO_2$  &  $HOCl$**

**2/ παρουσία ηλιακού φωτός**

με την έναρξη της πολικής μέρας, οι αέριες ενώσεις που σχηματίστηκαν από τις ετερογενείς αντιδράσεις φωτολύονται απελευθερώνοντας ενεργό  $Cl$  που μέσω των καταλυτικών κύκλων καταστρέφει το  $O_3$

**3/ επιπλέον η μαζική καταστροφή του  $O_3$  απαιτεί οι συγκεντρώσεις του  $HNO_3$  να είναι μικρές**

Αυτό επιτυγχάνεται με τα PSCs τα οποία δεσμεύουν το  $HNO_3$  στους παγοκρυστάλλους

Το  $HNO_3$  αφαιρεί  $NO_x$  από το σύστημα, το οποίο διαφορετικά θα αντιδρούσε με  $ClO$  δίνοντας  $ClONO_2$

▪ Επειδή η θέρμανση της στρατόσφαιρας οφείλεται κυρίως στην απορρόφηση της ακτινοβολίας από το ίδιο το  $O_3$ , η μαζική καταστροφή του καθυστερεί τη θέρμανση της με αποτέλεσμα επέκταση της παρουσίας της τρύπας και αργεί η αποκατάσταση της

# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Η τρύπα του O<sub>3</sub>

## Γιατί στην Ανταρκτική και όχι στην Αρκτική

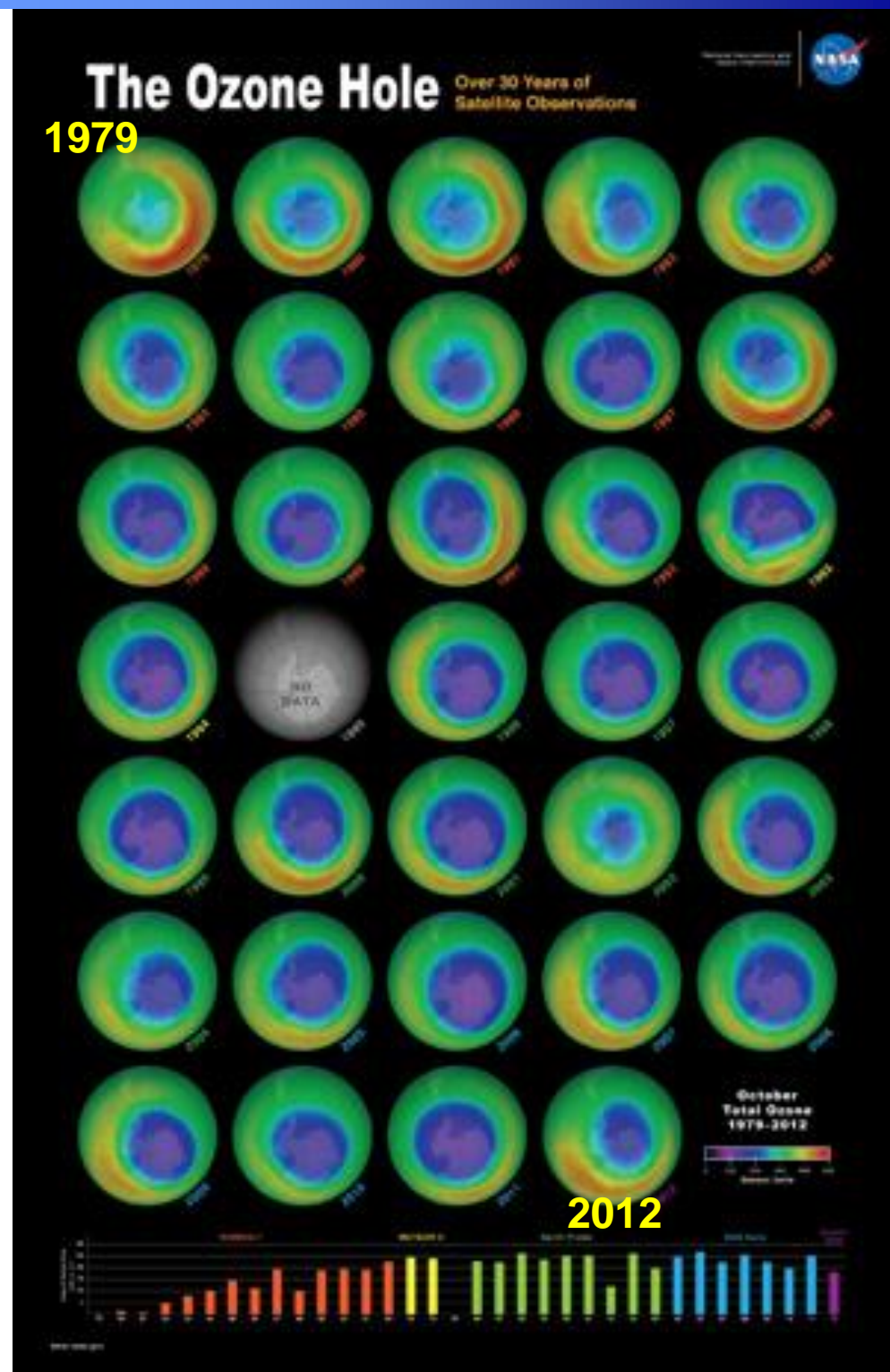
- Παρότι και στην Αρκτική παρατηρείται μείωση του στρατοσφαιρικού O<sub>3</sub> στις αρχές της άνοιξης (Μάρτιος), η μείωση αυτή δεν είναι σημαντική όπως η τρύπα του O<sub>3</sub> στη Ανταρκτική\Αυτό συμβαίνει γιατί:
  - Στην **Αρκτική** οι θερμοκρασίες **δεν μειώνονται** τόσο πολύ όσο στην **Ανταρκτική**. Η **Αρκτική** είναι γενικώς **10 βαθμούς θερμότερη** από την **Ανταρκτική** →
    - σχηματισμό λιγότερων PSCs & σχηματίζονται δε, λιγότερο συχνά
    - διαλύονται μερικές εβδομάδες νωρίτερα σε σχέση με αυτά της Ανταρκτικής
  - Ο **πολικός στρόβιλος** της **Αρκτικής** είναι **λιγότερος σταθερός** από αυτόν της **Ανταρκτικής**
    - ✓ Γιατί η Ανταρκτική έχει μεγαλύτερης έκτασης ξηρά, η οποία ψύχεται περισσότερο σε σχέση με τον θαλάσσιο πάγο που έχει η Αρκτική, ο οποίος ψύχεται λιγότερο
    - ✓ Ο πολικός στρόβιλος της Ανταρκτικής αναμιγνύεται πολύ λιγότερο με αέριες μάζες από μικρότερα γεωγραφικά πλάτη γιατί είναι καλύτερα απομονωμένος. Σ' αυτό βοηθάει η ομοιογενής κατανομή γύρω ωκεάνιων εκτάσεων γύρω από την Ανταρκτική. Αυτή η απομόνωση προκαλεί τις εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες
  - Η μεταφορά O<sub>3</sub> από τις τροπικές περιοχές προς τον Βόρειο πόλο τον χειμώνα είναι ισχυρότερη σε σχέση με την μεταφορά προς το νότιο ημισφαίριο
    - Όλοι αυτοί οι παράγοντες προκαλούν μεγαλύτερα επίπεδα O<sub>3</sub> στην Αρκτική

## Το όζον (O<sub>3</sub>) – Η τρύπα του O<sub>3</sub>

### Γιατί στην Ανταρκτική και όχι στην Αρκτική

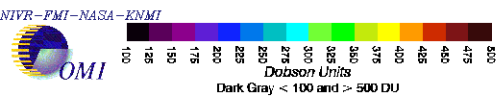
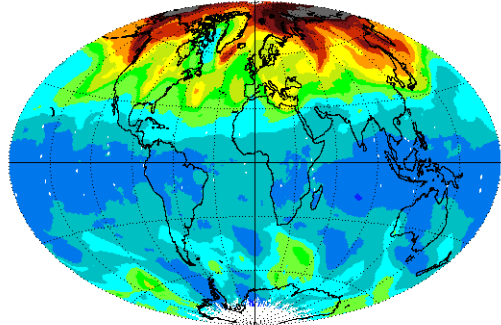
- Παρότι και στην Αρκτική τον Φεβρουάριο παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις **ClO** (ισοδύναμες με αυτές που παρατηρούνται τον Σεπτέμβριο στην Ανταρκτική) που είναι απαραίτητες για την μαζική καταστροφή του **O<sub>3</sub>** δεν ενεργοποιείται κάτι τέτοιο
- Αυτό συμβαίνει γιατί τα PSCs διαλύονται νωρίτερα στην Αρκτική με αποτέλεσμα να μην πληρείται η συνθήκη της **απονίτρωσης** δηλ. της δέσμευσης του HNO<sub>3</sub> από τα PSCs, το οποίο κρατάει δεσμευμένο τα NO<sub>x</sub>, τα οποία αντιδρούν με το ClO σχηματίζοντας **ClONO<sub>2</sub>** και **μειώνοντας έτσι τα επίπεδα του ClO**
- Αξίζει να σημειωθεί ότι τον **Μάρτιο** του **1995** οπότε καταγράφηκαν οι **ψυχρότερες θερμοκρασίες** από ποτέ στην **Αρκτική**, **καταγράφηκε** εκεί **μείωση του O<sub>3</sub> κατά 50%**



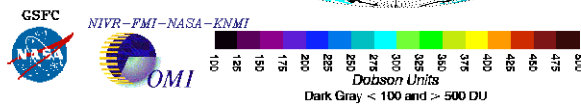
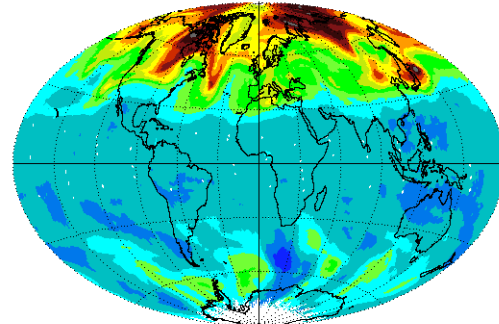


# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Η τρύπα του O<sub>3</sub>

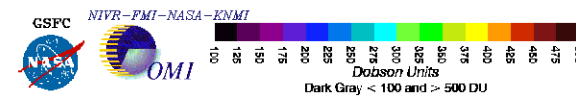
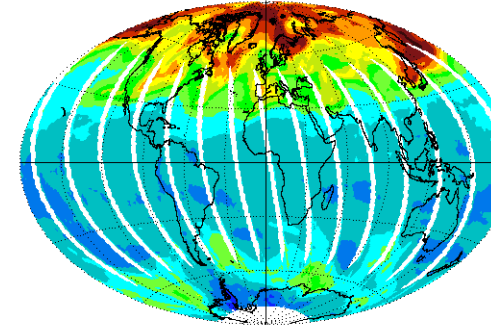
OMI Total Ozone Apr 1, 2005



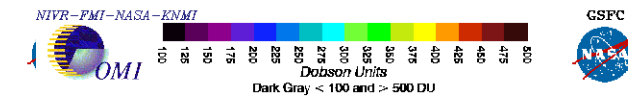
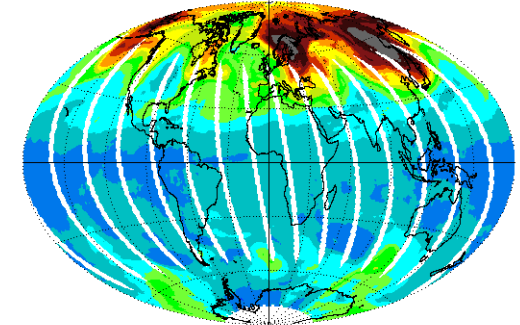
OMI Total Ozone Apr 1, 2008



OMI Total Ozone Apr 1, 2009



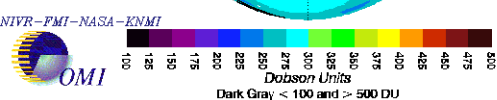
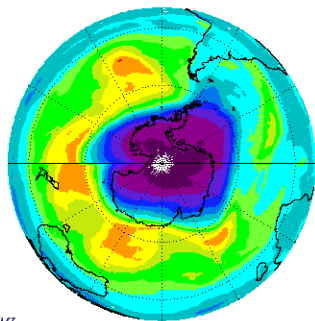
OMI Total Ozone Apr 1, 2012



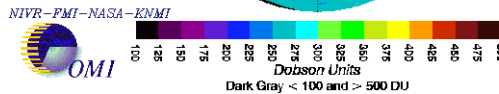
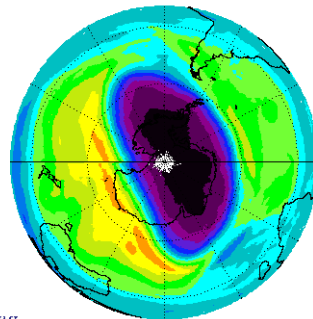
## εποχικές και διαχρονικές μεταβολές της συγκέντρωσης του όζοντος

Παρατηρούνται μεταβολές των επιπέδων του O<sub>3</sub> & της έκτασης της τρύπας από έτος σε έτος

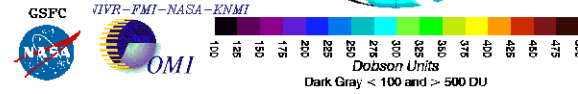
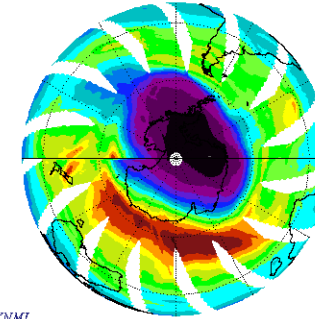
OMI Total Ozone for Oct 1, 2004



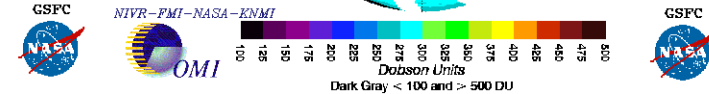
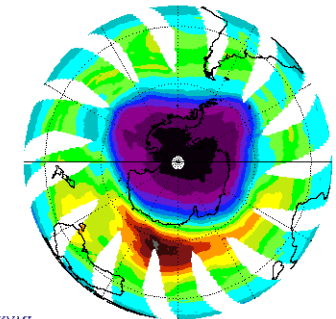
OMI Total Ozone for Oct 1, 2006



OMI Total Ozone for Oct 1, 2009



OMI Total Ozone for Oct 1, 2011





## Το όζον (O<sub>3</sub>) – Η τρύπα του O<sub>3</sub>

**Πηγή:**

[https://andyrussell.files.wordpress.com/2011/04/ozone\\_nasa.png](https://andyrussell.files.wordpress.com/2011/04/ozone_nasa.png)

**Πηγή:**

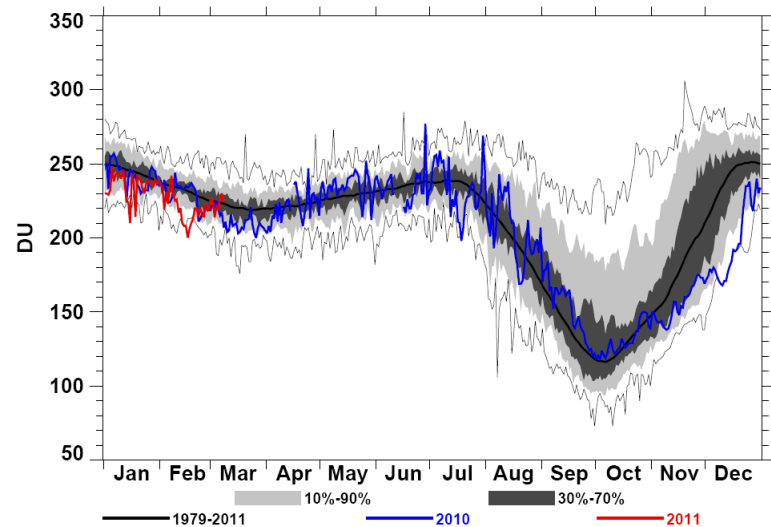
[http://www.medicalecology.org/atmosphere/a\\_app\\_strat.htm](http://www.medicalecology.org/atmosphere/a_app_strat.htm)

Κατά την τοπική άνοιξη του Νοτίου Ημισφαιρίου παρατηρείται το μέγιστο της τρύπας του O<sub>3</sub> (ελάχιστο της συγκέντρωσης του) & το μέγιστο της έκτασης της τρύπας του O<sub>3</sub>

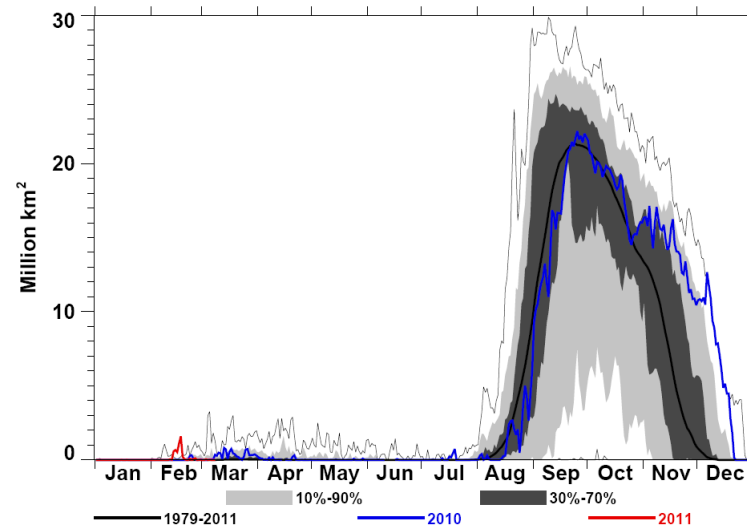
# Το όζον ( $O_3$ ) – Η τρύπα του $O_3$

- Η τρύπα του  $O_3$  προσδιορίζεται από το σύνολο των δορυφορικών μετρήσεων και ορίζεται ως εκείνη η περιοχή όπου η συγκέντρωση του  $O_3$  είναι **< 220 DU**
- Η περιοχή αυτή εντοπίζεται στις **40° Νότια**
- Τιμές **< 220 DU** αντιπροσωπεύουν απώλειες του  $O_3$  στην περιοχή της Ανταρκτικής, λόγω ανθρωπογενούς δραστηριότητας

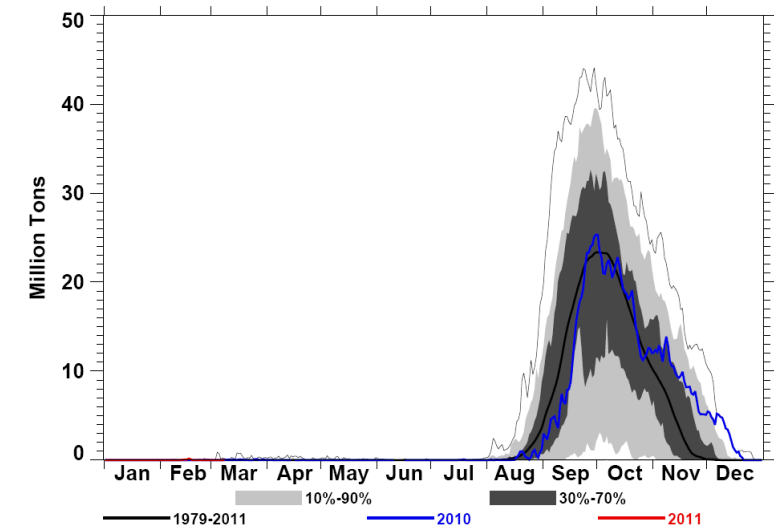
SH Minimum Ozone



Ozone Hole Area



Ozone Mass Deficit



Πηγή:

[http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/figures/ozone/toms\\_mins\\_2011.pdf](http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/figures/ozone/toms_mins_2011.pdf)

Πηγή:

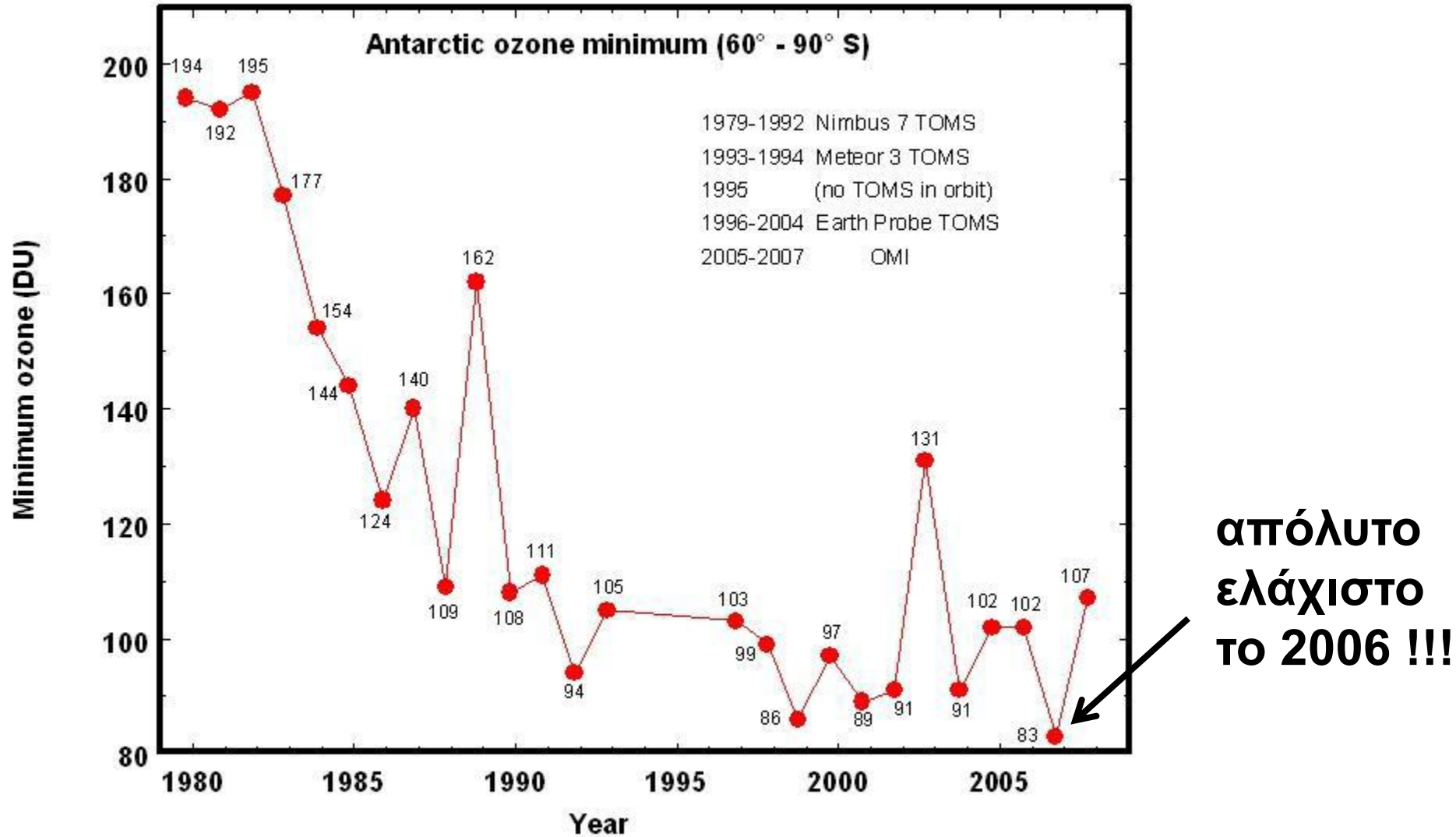
[http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/figures/ozone/toms\\_areas\\_2011.pdf](http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/figures/ozone/toms_areas_2011.pdf)

Πηγή:

[http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/figures/ozone/toms\\_omds\\_2011.pdf](http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/figures/ozone/toms_omds_2011.pdf)

Κατά την τοπική άνοιξη του Νοτίου Ημισφαιρίου παρατηρείται το μέγιστο της τρύπας του  $O_3$  (ελάχιστο της συγκέντρωσης του) & το μέγιστο της έκτασης της τρύπας του  $O_3$

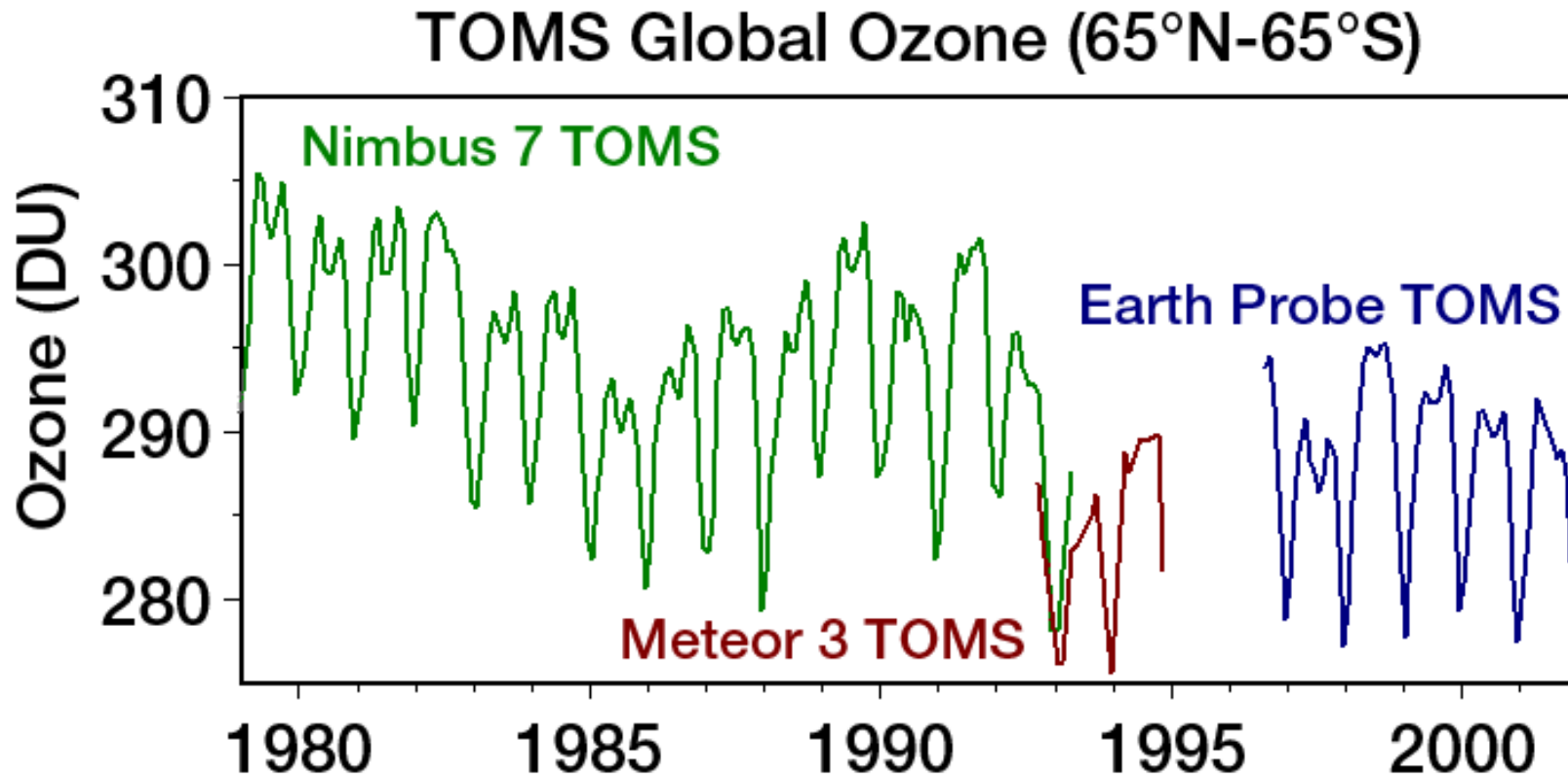
# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Η τρύπα του O<sub>3</sub>



Πηγή: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Min\\_ozone.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Min_ozone.jpg)

Διαχρονική μεταβολή της ελάχιστης συγκέντρωσης  
όζοντος στην Ανταρκτική, ανά έτος

# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Η τρύπα του O<sub>3</sub>

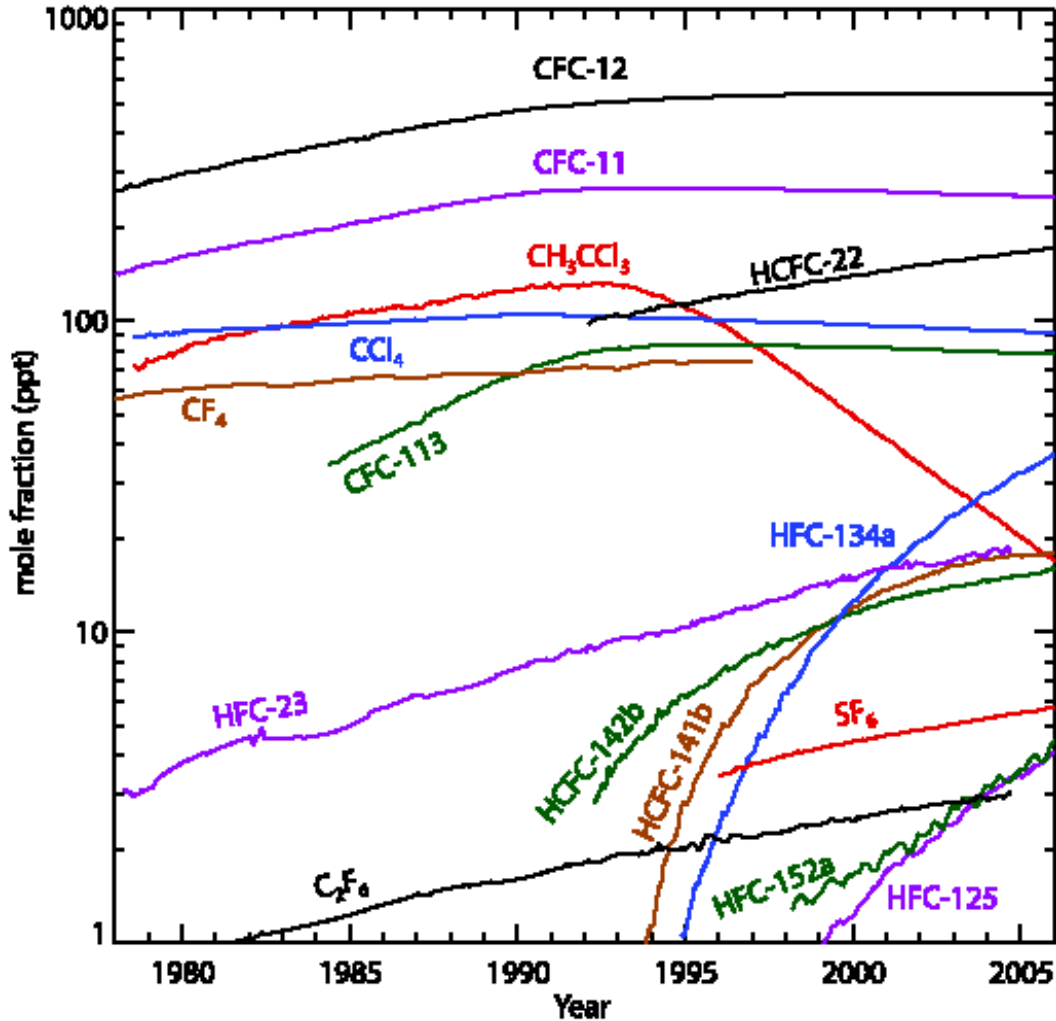


παρά τη λήψη μέτρων  
(π.χ. πρωτόκολλο  
*Montreal*) για τον  
περιορισμό των  
ενώσεων που  
προκαλούν την  
καταστροφή του O<sub>3</sub>

Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone\\_depletion#/media/File:TOMS\\_Global\\_Ozone\\_65N-65S.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone_depletion#/media/File:TOMS_Global_Ozone_65N-65S.png)

**Διαχρονική μεταβολή της συγκέντρωσης του όζοντος  
(μέσες μηνιαίες πλανητικές τιμές)**

# Το όζον (O<sub>3</sub>) – Η τρύπα του O<sub>3</sub>



- Πράγματι, μετά το πρωτόκολλο του Montreal παρατηρήθηκε μείωση των συγκεντρώσεων των CFCs
- Παρόλα αυτά οι συγκέντρωση του στρατοσφαιρικού O<sub>3</sub> δεν έχει αποκατασταθεί



πρέπει να αναζητηθούν τα αίτια

Πηγή: figure 2.6 in chapter 2 (Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing) in IPCC 2013

# Αναφορές

- **John H. Seinfeld and Spyros N. Pandis, Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change, 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley and Sons, 1998, ISBN-10: 0471178160**
- **IPCC, 2013:** Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland, 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.



## Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την **1<sup>η</sup>** έκδοση.

## Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Αγγελική Φωτιάδη, 2015.

Αγγελική Φωτιάδη. «Φυσική Περιβάλλοντος». Έκδοση: 1.0. Αγρίνιο 2015.

Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:

[https://eclass.upatras.gr/modules/document/document.php?course=ENV\\_127](https://eclass.upatras.gr/modules/document/document.php?course=ENV_127)

## Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά Δημιουργού, Απαγόρευση Εμπορικής Χρήσης και Όχι Παράγωγα Έργα. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».

**« Το υλικό της παρουσίασης προέρχεται από τις πανεπιστημιακές παραδόσεις της καθηγήτριας Α. Φωτιάδη».**



**Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:**

**Διαφάνεια 5:** <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmprofile.jpg>

figure 3.2 in the book: John Marshall, R. Alan Plumb, Atmosphere, Ocean and Climate Dynamics: An Introductory Text, 2007, Elsevier Academic Press, 2007, ISBN: 978-0-12-558691-7

**Διαφάνεια 6:** <https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone#/media/File:Ozone-elpot-3D-vdW.png>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone>

**Διαφάνεια 7:** <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/ozone.html>

**Διαφάνεια 10:** [https://en.wikipedia.org/wiki/Total\\_Ozone\\_Mapping\\_Spectrometer#/media/File:Toms-2004-09-06-FULLDAY\\_GLOB.PNG](https://en.wikipedia.org/wiki/Total_Ozone_Mapping_Spectrometer#/media/File:Toms-2004-09-06-FULLDAY_GLOB.PNG)

[http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI/omdoao3e\\_v003.shtml](http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI/omdoao3e_v003.shtml)

**Διαφάνεια 11-12:** [https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone\\_layer#/media/File:Ozone\\_altitude\\_UV\\_graph.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone_layer#/media/File:Ozone_altitude_UV_graph.svg)

**Διαφάνεια 14:** [https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone\\_layer#/media/File:Ozone\\_cycle.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone_layer#/media/File:Ozone_cycle.svg)

**Διαφάνεια 15:** John H. Seinfeld and Spyros N. Pandis, Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change, 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley and Sons, 1998

**Διαφάνεια 16:** <http://cloud1.arc.nasa.gov/solve/overview/solve.pr.html> /

**Διαφάνεια 17:** John H. Seinfeld and Spyros N. Pandis, Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change, 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley and Sons, 1998

**Διαφάνεια 18:** [https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone#/media/File:Nimbus\\_ozone\\_Brewer-Dobson\\_circulation.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone#/media/File:Nimbus_ozone_Brewer-Dobson_circulation.jpg)

**Διαφάνεια 19:** John H. Seinfeld and Spyros N. Pandis, Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change, 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley and Sons, 1998

**Διαφάνεια 20 - 21:** NASA

**Διαφάνεια 30: figure 4.10 in** John H. Seinfeld and Spyros N. Pandis, Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change, 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley and Sons, 1998

**Διαφάνεια 31:** [ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2012/IM\\_ozgbl\\_omi\\_20120422.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2012/IM_ozgbl_omi_20120422.png)



[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/spole/Y2012/IM\\_ozspl\\_omi\\_20120422.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/spole/Y2012/IM_ozspl_omi_20120422.png)

[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2012/IM\\_oznpl\\_omi\\_20120422.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2012/IM_oznpl_omi_20120422.png)

**Διαφάνεια 32:** [ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2008/IM\\_ozgbl\\_omi\\_20080314.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2008/IM_ozgbl_omi_20080314.png)

[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/spole/Y2008/IM\\_ozspl\\_omi\\_20080314.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/spole/Y2008/IM_ozspl_omi_20080314.png)

[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2008/IM\\_oznpl\\_omi\\_20080314.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2008/IM_oznpl_omi_20080314.png)

**Διαφάνεια 33:** [ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2010/IM\\_ozgbl\\_omi\\_20100315.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2010/IM_ozgbl_omi_20100315.png)

[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/spole/Y2010/IM\\_ozspl\\_omi\\_20100315.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/spole/Y2010/IM_ozspl_omi_20100315.png)

[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2010/IM\\_oznpl\\_omi\\_20100315.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2010/IM_oznpl_omi_20100315.png)

**Διαφάνεια 34:** [ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2006/IM\\_ozgbl\\_omi\\_20060408.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2006/IM_ozgbl_omi_20060408.png)

[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/spole/Y2006/IM\\_ozspl\\_omi\\_20060408.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/spole/Y2006/IM_ozspl_omi_20060408.png)

[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2006/IM\\_oznpl\\_omi\\_20060408.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2006/IM_oznpl_omi_20060408.png)

**Διαφάνεια 35:** [ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2014/IM\\_ozgbl\\_omi\\_20141002.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2014/IM_ozgbl_omi_20141002.png)

[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/spole/Y2014/IM\\_ozspl\\_omi\\_20141002.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/spole/Y2014/IM_ozspl_omi_20141002.png)

[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2014/IM\\_oznpl\\_omi\\_20141002.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2014/IM_oznpl_omi_20141002.png)

**Διαφάνεια 38:** <https://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/data/ozone/>

**Διαφάνεια 39:** [ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2008/IM\\_ozgbl\\_omi\\_20080916.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2008/IM_ozgbl_omi_20080916.png)

[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/spole/Y2011/IM\\_ozspl\\_omi\\_20111002.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/spole/Y2011/IM_ozspl_omi_20111002.png)

[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2008/IM\\_oznpl\\_omi\\_20080916.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2008/IM_oznpl_omi_20080916.png)

**Διαφάνεια 40:** [ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2011/IM\\_ozgbl\\_omi\\_20111002.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/global/Y2011/IM_ozgbl_omi_20111002.png)

[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/spole/Y2011/IM\\_ozspl\\_omi\\_20111002.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/spole/Y2011/IM_ozspl_omi_20111002.png)

[ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2011/IM\\_oznpl\\_omi\\_20111002.png](ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/npole/Y2011/IM_oznpl_omi_20111002.png)

**Διαφάνεια 41:** [http://aura.gsfc.nasa.gov/ozoneholeposter/24x37\\_OZONEposter\\_front-s.jpg](http://aura.gsfc.nasa.gov/ozoneholeposter/24x37_OZONEposter_front-s.jpg)

**Διαφάνεια 42:** [http://seawifs.gsfc.nasa.gov/OCEAN\\_PLANET/HTML/peril\\_ozone\\_depletion.html](http://seawifs.gsfc.nasa.gov/OCEAN_PLANET/HTML/peril_ozone_depletion.html)

**Διαφάνεια 44: figure 4.19 in** John H. Seinfeld and Spyros N. Pandis, Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change, 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley and Sons, 1998

**Διαφάνεια 45:**

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/77/Polar\\_stratospheric\\_cloud\\_type\\_2.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/77/Polar_stratospheric_cloud_type_2.jpg)

**Διαφάνεια 45 – 47, 49:** <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=622>

**Διαφάνεια 48: figure 4.17 in** John H. Seinfeld and Spyros N. Pandis, Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change, 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley and Sons, 1998

**Διαφάνεια 52:** [http://aura.gsfc.nasa.gov/ozoneholeposter/24x37\\_OZONEposter\\_front-s.jpg](http://aura.gsfc.nasa.gov/ozoneholeposter/24x37_OZONEposter_front-s.jpg)

**Διαφάνεια 53:** <https://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/data/ozone/>

**Διαφάνεια 55:** [http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/figures/ozone/toms\\_mins\\_2011.pdf](http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/figures/ozone/toms_mins_2011.pdf)

[http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/figures/ozone/toms\\_areas\\_2011.pdf](http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/figures/ozone/toms_areas_2011.pdf)

[http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/figures/ozone/toms\\_omds\\_2011.pdf](http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/figures/ozone/toms_omds_2011.pdf)



**Διαφάνεια 56:** [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Min\\_ozone.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Min_ozone.jpg)

**Διαφάνεια 57:** [https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone\\_depletion#/media/File:TOMS\\_Global\\_Ozone\\_65N-65S.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone_depletion#/media/File:TOMS_Global_Ozone_65N-65S.png)

**Διαφάνεια 58: Πηγή: figure 2.6 in** chapter 2 (Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing) in IPCC 2013