



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΠΜΣ ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ-ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***«Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ,
ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ»***

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ. ΘΕΟΔΩΡΟΥ

Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Π.Χίνης

ΑΘΗΝΑ 2013

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	ΣΕΛΙΔΑ	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1	
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2	
ABSTRACT	4	
1^ο Κεφάλαιο	ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΚΑΙ ΟΖΟΝ	
1.1	Η Ατμόσφαιρα, σύσταση, δομή	6
1.2	Διάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας στην Ατμόσφαιρα	10
1.3	Ατμοσφαιρικό Οζόν, ο ρόλος του στην Ατμόσφαιρα, μονάδες	16
1.4	Η τρύπα του όζοντος, τα αίτια δημιουργίας, ιστορικά δεδομένα	25
1.5	Βιβλιογραφία 1 ^{ου} Κεφαλαίου	28
2^ο Κεφάλαιο	ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΟΠΛΑ	
2.1	Ιστορική Αναδρομή	29
2.2	Πυρηνικές αντιδράσεις σχάσεως	32
2.3	Πυρηνικές αντιδράσεις συντηξης	38
2.4	Πυρηνικά όπλα σχάσης και σύντηξης	41
2.5	Πυρηνικές Δοκιμές και εντοπισμός τους	45
2.6	Βιβλιογραφία 2 ^{ου} Κεφαλαίου	49-50
3^ο Κεφάλαιο	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΕΚΡΗΞΕΩΝ ΣΤΟ ΟΖΟΝ	
3.1	Εκρηξη πυρηνικού όπλου στην Ατμόσφαιρα, χρονική εξέλιξη, επιπτώσεις	51
3.2	Επισκόπηση των κυριωτέρων ερευνών σχετικά με την επίδραση των πυρηνικών εκρήξεων στο όζον της στρατόσφαιρας	60
3.3	Συγκεντρωτική ανασκόπηση	95
3.4	Βιβλιογραφία 3 ^{ου} κεφαλαίου	98
4^ο Κεφάλαιο	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	
4.1	Παραδοχές	99
4.2	Υπολογισμοί	102
4.3	Παρουσίαση προγράμματος NOx Calculator	106
4.4	Αποτελέσματα	108
4.5	Συμπεράσματα	113
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	115	

Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών (ΔΠΜΣ) «**Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές**», το οποίο συνδιοργανώνουν οι σχολές **ΣΕΜΦΕ** (Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Εφαρμογών) και **Μηχανολόγων-Μηχανικών** (τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας) του **Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.)** και το **ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος** .

Το θέμα της Εργασίας είναι «**Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ, ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ**» και έγινε υπό την επίβλεψη του κ. **Ε. Χίνη**, καθηγητή του τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον **Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας** για την ανάθεση της παρούσας εργασίας και τον καθηγητή κ. **Ε.Χίνη**, που μου έδωσε την ευκαιρία και τις κατευθύνσεις, να εκπονησω την παρούσα εργασία, καθώς και την υποστηριξη και καθοδήγηση του σε ολη τη διάρκεια εκπόνησης της.

Ιδιαίτερα καταλυτική ήταν η συμβολή των καθηγητών Πυρηνικής Τεχνολογίας κ.κ. **Ε.Χίνη** και **Μ.Ανανγνωστακη**, διότι παρακολουθώντας με ενδιαφέρον τα μαθηματά τους κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών, με ώθησαν να ακολουθησω την κατεύθυνση της «**πυρηνικής τεχνολογίας**», η οποία με είχε συναρπάσει και από τα προπτυχιακά μου χρόνια στο τμήμα των Μηχανολόγων-Μηχανικών.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους που με έχουν βοηθήσει (πολλές φορές χωρίς να το γνωρίζουν) στην επιλογή μου να παρακολουθησω αυτό το καταπληκτικό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών.

Θα ξεκινήσω με την καθηγήτρια Φυσικής του ΣΕΜΦΕ κυρία **Α.Κώνστα**, στην οποία είχα εκπονήσει την διπλωματική μου εργασία όταν ήμουν προπτυχιακός φοιτητής και που με στηριξε ουσιαστικά στην απόφασή μου να παρακολουθησω αυτό το μεταπτυχιακό πρόγραμμα και τον καθηγητή Φυσικής του ΣΕΜΦΕ κ. **Ε.Γαζη**, που παρακολουθώντας τις πολύ όμορφες εκλαικευμένες ομιλίες του, με παρότρυνε να ασχοληθώ με τη σύγχρονη φυσική, και στηριξε την προσπάθειά μου.

Τους φίλους και συναδέλφους **Σ. Σωτηρίου** και **Μ. Κατσίπη** για τις ατέλειωτες επικοινωνητικές συζητήσεις μας στη φυσική και στην τεχνολογία, καθώς και την ηθική τους βοήθεια και υποστηριξη για την παρούσα εργασία.

Τελος οφείλω να ζητήσω συγνώμη από την συζυγό μου **Φαιη**, την κόρη μου **Εβίτα** και τον σκύλο μου **Ody**, που τους στέρησα τόσο χρόνο με την ενασχόληση μου για αυτό το Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα.

Αθηνά, Ιούλιος 2013

Νικόλαος Γ. Θεοδωρου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η επίδραση των Πυρηνικών Δοκιμών στο Οζόν της Στρατόσφαιρας, είχε εντοπιστεί από τις αρχές της δεκαετίας του '70, όταν έγιναν και οι πρώτες έρευνες για την επίδραση στο όζον των οξειδίων του Αζώτου NO και NO₂ (για συντομία τα ονομάζουμε NOx) που παράγονται από υπερηχητικά αεροσκάφη (SST). Λογω των μεγάλων ποσοτήτων NOx που παράγονται από μια πυρηνική δοκιμή, καθώς και του ότι πολλά από αυτά καταλήγουν στη στρατόσφαιρα, οι πρώτοι ερευνητές ξεκίνησαν από τις αρχές του '70, μελέτες για την πιθανή επίδραση τους στο στρατοσφαιρικό όζον.

Λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου, μόνο μετά την ανάπτυξη ισχυρών Υπολογιστικών συστημάτων και κατάλληλων υπολογιστικών μοντέλων μπόρεσαν να γίνουν καλύτερες εκτιμήσεις προς τα τέλη του '70 και αρχές του '80.

Σήμερα θεωρείται αδιαμφισβήτητο γεγονός ότι οι πυρηνικές δοκιμές επηρεάζουν αρνητικά το στρατοσφαιρικό όζον, όμως δεν είναι δυνατόν να υπολογιστεί με ακρίβεια η ποσοτική επίδραση σ' αυτό. Αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητα και την πληθώρα των παραγόντων που εμπλέκονται στην κατάλυση του όζοντος από τα NOx και η πρόβλεψη έχει μεγάλη αβεβαιότητα και περιθώρια σφάλματος.

Ιδιαίτερα για τις μεγάλες δοκιμές που έγιναν στις αρχές του '60 οι ερευνητές συγκλίνουν ότι το όζον υπέστη μείωση 1%-6%.

Δομή της εργασίας:

Στο **1^ο κεφάλαιο** παρουσιάζονται ορισμένα στοιχεία από τη φυσική και τη χημεία της Ατμόσφαιρας. Παρουσιάζεται η δομή της Ατμόσφαιρας, η διάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας και οι τρόποι απορόφησης της, το Οζόν και ο ρόλος του στην ατμόσφαιρα καθώς οι τρόποι συνθεσης και αποδόμησής του από φυσικά και ανθρωπογενή αίτια. Τέλος γίνεται αναφορά στην «τρύπα» του όζοντος και στα αίτια δημιουργίας της.

Το **2^ο κεφάλαιο** είναι αφιερωμένο στην πυρηνική φυσική και τεχνολογία. Γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή, περιγράφεται η πυρηνική σχάση και η πυρηνική σύντηξη. Αναφέρονται τα όπλα σχάσης και σύντηξης (πυρηνικές κεφαλές) και τέλος οι πυρηνικές δοκιμές και οι μέθοδοι εντοπισμού τους.

Στο **3^ο κεφάλαιο** αναλύουμε τη χρονική εξέλιξη μιας έκρηξης πυρηνικού όπλου στην ατμόσφαιρα και τις επιπτώσεις της. Στη συνέχεια γίνεται μια επισκόπηση των κυριωτέρων ερευνών που έγιναν από τις αρχές της 10ετίας του '70 μέχρι σήμερα. Αναλύονται τα κυριώτερα σημεία τους, περιγράφονται οι μέθοδοι υπολογισμού και τα συμπεράσματά τους.

Η βιβλιογραφική έρευνα έγινε για 12 δημοσιευμένες μελέτες:

1. Harold Johnston, «The Effect of Supersonic Transport Planes on the stratospheric Ozone Shield», *Envtl. Aff. L. Rev.* 736 (1972)
2. Foley & Ruderman, «Stratospheric NO Production from Past Nuclear Explosions» *Journal of Geophysical Research*, July 20, 1973
3. H. Johnston, G. Whiten, J. Birks, «Effects of Nuclear Explosions on Stratospheric Nitric Oxide & Ozone», *Journal of Geophysical Research*, September 20, 1973
4. Goldsmith, Tuck, Foot, Simmons, Newson, «Nitrogen oxides, Nuclear weapon testing, Concorde and Stratospheric Ozone», *Nature Vol.244*, August 31, 1973

5. Forest Gilmore, «the production of Nitrogen Oxides by Low-altitude Nuclear Explosions», *Journal of Geophysical Research*, November 20, 1975.
6. Ernst Bauer, Forest Gilmore, «Effect of Atmospheric Nuclear Explosions on Total Ozone», *Reviews of Geophysics and Space Physics*, August 1975.
7. A. D. Christie, «Atmospheric Ozone Depletion by Nuclear Weapons Testing» *Journal of Geophysical Research*, May 20, 1976.
8. Harold Johnston, «Expected Short-term Local Effect of Nuclear Bombs on Stratospheric Ozone», *Journal of Geophysical Research*, July 20, 1977.
9. J. Chang, W. Duewer, D. Wuebbles, «The Atmospheric Nuclear Tests, of the 1950's and 1960's a Possible Test of Ozone Depletion Theories», *Journal of Geophysical Research*, April 20, 1979.
10. G. Reinsel, «Analysis of the Total Ozone Data for the Detection of Recent Trends and the effect of Nuclear Testing During the 1960's», *Geophysical Research Letters*, Vol.8, No.12, pages 1227-1230, December 1981.
11. National Research Council «The Effects on the Atmosphere of a Major Nuclear Exchange» Committee on the Atmospheric Effects of Nuclear Explosions, NATIONAL ACADEMY PRESS Washington, D.C. 1985.
12. M. Mills, O. Toon, R. Turco, D. Kinnison, and R. Garcia «Massive global ozone loss predicted following regional nuclear conflict», *PNAS* April 8, 2008, vol. 105 no. 14

Στο **4^ο κεφάλαιο** επιχειρούμε κάποιους βασικούς υπολογισμούς των παραγομένων ρύπων NO_x που φτάνουν μετά από μια πυρηνική δοκιμή στη στρατόσφαιρα. Οι ρύποι αυτοί στη συνέχεια είναι υπεύθυνοι για την καταλυτική καταστροφή του στρατοσφαιρικού όζοντος. Οι υπολογισμοί αυτοί έχουν γίνει με ένα πρόγραμμα που γράψαμε σε VisualBasic με το όνομα "NO_x Calculator".

Τέλος έχουμε συγκεντρώσει σε ένα **παράρτημα** όλες τις μέχρι σήμερα καταγεγραμμένες πυρηνικές δοκιμές καθώς και τα σημαντικότερα πεδία δοκιμών των χωρών που διαθέτουν πυρηνικό οπλοστάσιο.

ABSTRACT

From the early 70's scientists realised the consequences of Nuclear tests causing the depletion of the Ozone Layer. Especially when the first results in research began on the effect of NO and NO₂ (known as NO_x) produced by Supersonic Aircrafts (SST).

Because of the huge amounts of produced NO_x by a nuclear explosion the scientists started as early as 70's different researches of the possible effects on the Stratospheric Ozone.

As this is a complicated phenomenon, only after the creation of powerful computers and advanced calculation models did scientists manage to achieve better estimations of this phenomenon at the end of 70's and the early 80's.

Today, without a doubt, nuclear tests are known to have negative effects on the stratospheric ozone, but it is not possible to have a precise quantitative estimation of this. This is because of the complexity and the variety of factors that are involved on the ozone catalysis by NO_x and such prediction has considerable uncertainties and possibilities of false results especially concerning the "major tests" period of the early 60's during which almost all scientists agreed that a decrease of 1%-6% of ozone layer had occurred.

Structure of the presentation

In the **1st part**, we will present some basic features of atmospheric physics and chemistry. The atmospheric structure, the solar radiation, the role of the ozone and how it is produced and its depletion by natural and man made substances. Finally, we will present the reasons of the "ozone hole" phenomenon.

The **2nd part** is dedicated to nuclear physics and nuclear technology. After a brief historical review, we will describe the nuclear fusion and fission. This is followed by a brief outline of various nuclear weapons and lastly the nuclear tests and the detection methods.

In the **3rd part** we will describe the time line of an atmospheric nuclear explosion and then we will do analytical overview on the most important papers that have published from the 70's up until now: we will describe the most important points, their calculations methods, their results and their conclusions.

This review includes 12 published papers:

1. *Harold Johnston, «The Effect of Supersonic Transport Planes on the stratospheric Ozone Shield», Env'tl. Aff. L. Rev. 736 (1972)*
2. *Foley & Ruderman, «Stratospheric NO Production from Past Nuclear Explosions» Journal of Geophysical Research, July 20,1973*
3. *H. Johnston, G. Whiten, J. Birks, «Effects of Nuclear Explosions on Stratospheric Nitric Oxide & Ozone», Journal of Geophysical Research, September 20,1973*
4. *Goldsmith, Tuck, Foot, Simmons, Newson, «Nitrogen oxides, Nuclear weapon testing, Concorde and Stratospheric Ozone», Nature Vol.244, August 31, 1973*
5. *Forest Gilmore, «the production of Nitrogen Oxides by Low-altitude Nuclear Explosions», Journal of Geophysical Research, November 20, 1975.*

6. Ernst Bauer, Forest Gilmore, «Effect of Atmospheric Nuclear Explosions on Total Ozone», *Reviews of Geophysics and Space Physics*, August 1975.
7. A. D. Christie, «Atmospheric Ozone Depletion by Nuclear Weapons Testing» *Journal of Geophysical Research*, May 20, 1976.
8. Harold Johnston, «Expected Short-term Local Effect of Nuclear Bombs on Stratospheric Ozone», *Journal of Geophysical Research*, July 20, 1977.
9. J. Chang, W. Duewer, D. Wuebbles, «The Atmospheric Nuclear Tests, of the 1950's and 1960's a Possible Test of Ozone Depletion Theories», *Journal of Geophysical Research*, April 20, 1979.
10. G. Reinsel, «Analysis of the Total Ozone Data for the Detection of Recent Trends and the effect of Nuclear Testing During the 1960's», *Geophysical Research Letters*, Vol.8, No.12, pages 1227-1230, December 1981.
11. National Research Council «The Effects on the Atmosphere of a Major Nuclear Exchange» Committee on the Atmospheric Effects of Nuclear Explosions, NATIONAL ACADEMY PRESS Washington, D.C. 1985.
12. M. Mills, O. Toon, R. Turco, D. Kinnison, and R. Garcia «Massive global ozone loss predicted following regional nuclear conflict», *PNAS* April 8, 2008, vol. 105 no. 14

In the **4th part** we will attempt some calculations of the NO_x produced by a nuclear explosion and the quantities which finally reach on the stratosphere and are responsible for the ozone depletion. These calculations are made by the use of computer software we have created, under the name “NO_x Calculator”.

In the **appendix** we have collected all the known data of nuclear tests and the most known test-fields of all nuclear countries, from the beginning of nuclear era (1945) until today (2013)

1ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

1.1 Η ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Αναφορές:

{1, Unit 1}, {2, Κεφάλαιο 1}

Η γήινη ατμόσφαιρα, όπως πιστεύεται σήμερα, δημιουργήθηκε πριν από περίπου 4.6 δισεκατομμύρια χρόνια, με αρχική σύνθεση το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το άζωτο (N₂), τους υδρατμούς (H₂O) και το υδρογόνο (H₂). Ύστερα από μακροχρόνιες διεργασίες μεταξύ της ξηράς, των ωκεανών και των αερίων της ατμόσφαιρας, η σύσταση της γήινης ατμόσφαιρας σταθεροποιήθηκε όπως πιστεύεται, πριν από περίπου 400 εκατομμύρια χρόνια.

Η σύσταση της ατμόσφαιρας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του κλίματος και στις διάφορες φυσικο-χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σ' αυτήν. Έτσι, η επιβάρυνση του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος με πολυάριθμους ανθρωπογενείς ρύπους παίζει πλέον ενεργό ρόλο στην Παγκόσμια Κλιματική Αλλαγή.

1.1.1 Σύσταση της ατμόσφαιρας

Η γήινη ατμόσφαιρα αποτελείται από ένα μίγμα αερίων ή καλύτερα από ένα μίγμα ξηρού αέρα και υδρατμών. Ο ξηρός ατμοσφαιρικός αέρας με τη σειρά του αποτελείται από διάφορα αέρια, εκ των οποίων τα τρία πρώτα (αντιπροσωπεύουν το 99.97% της σύστασης της ατμόσφαιρας) παρουσιάζουν σταθερή αναλογία ανάμιξης στην ατμόσφαιρα. Οι υδρατμοί αποτελούν το τέταρτο πιο συνηθισμένο αέριο της ατμόσφαιρας που βρίσκεται στα χαμηλότερα στρώματά της, με μεταβλητή συγκέντρωση. Τα κυριότερα αέρια από τα οποία αποτελείται ο ξηρός ατμοσφαιρικός αέρας παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1

Η **ογκομετρική σύνθεση (OΣ)** του αέρα ορίζεται από τη σχέση:

$$O\Sigma = 100 \nu / V$$

όπου, V είναι ο όγκος του ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα και ν ο όγκος που καταλαμβάνει το κάθε αέριο συστατικό σε ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας με τον ξηρό ατμοσφαιρικό αέρα.

Πίνακας 1.1 : Σύθεση ατμοσφαιρικού αέρα.

<i>Αέριο</i>	<i>Ογκομετρική Σύθεση</i>
Άζωτο (N ₂)	78.09
Οξυγόνο (O ₂)	20.95
Αργόν (Ar)	0.93
Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	~0.03
Νέον (Ne)	1.8x10 ⁻³
Ήλιον (He)	5.24x10 ⁻⁴
Κρυπτόν (Kr)	1.0x10 ⁻⁴
Υδρογόνο (H ₂)	5.0x10 ⁻⁵
Ξένο (Xe)	8.0x10 ⁻⁶
Όζον (O₃)	1.0x10⁻⁶
Ραδόνιο (Rn)	6.0x10 ⁻¹⁸

Αξίζει να σημειωθεί ότι:

- 1) η O.Σ. του διοξειδίου του άνθρακα είναι μεταβλητή και εξαρτάται από την ύπαρξη κυρίως βιομηχανικών εκπομπών CO₂,
- 2) το ατμοσφαιρικό όζον παρουσιάζει μέγιστη συγκέντρωση στη στρατόσφαιρα (κυρίως στα 25-30 χλμ. ύψος), όπως θα παρουσιασθεί αναλυτικότερα παρακάτω

1.1.2 Δομή της γήινης ατμόσφαιρας

Αναφορές:

{3, Κεφάλαιο 10.3.4}, {2, Κεφάλαιο 1}, {1, Unit 1}, {4}, {10}

Η γήινη ατμόσφαιρα συνήθως χωρίζεται σε τρία τμήματα: το κατώτερο, το μέσο και το ανώτερο. Ο χωρισμός αυτός γίνεται με βάση τις διάφορες στρωματώσεις της κατακόρυφης κατανομής της μέσης θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας, η οποία παριστάνεται στο Σχήματα 1.1 και 1.2

Τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας είναι:

α) Η Τροπόσφαιρα

Εκτείνεται από το έδαφος έως την τροπόπαυση η οποία ευρίσκεται σε ύψος 10-18 χλμ. ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή του χρόνου (πχ. 6-8 χλμ. ύψος στους Πόλους, 12 χλμ. στα μέσα γεωγραφικά πλάτη και ~18 χλμ. ύψος στον Ισημερινό).

Η τροπόσφαιρα περιέχει περίπου το 85-90 % της μάζας της ατμόσφαιρας και χαρακτηρίζεται από:

- τη μείωση της θερμοκρασίας με την αύξηση του ύψους [τυπική τιμή θερμοβαθμίδας (lapse rate) = -9.7 K / km για τον ξηρό αέρα],
- δυναμική αστάθεια (τροβώδης ατμόσφαιρα)
- την έντονη κατακόρυφη ανάμιξη των αερίων μαζών της με παράλληλη διανταλλαγή ενέργειας, λόγω κατακόρυφης μεταφοράς ή αλλοιώς συναγωγής (convection)

Η τροπόσφαιρα που έλαβε το όνομά της από τις λέξεις *τρόπος* και *σφαίρα*, από τον διάσημο Βρετανό Μετεωρολόγο Sir Napier Shaw, περιλαμβάνει το *Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα* (ΑΟΣ), που εκτείνεται από το έδαφος έως ένα ύψος 1-2 χλμ. και την ελεύθερη τροπόσφαιρα εκτεινόμενη από την κορυφή του ΑΟΣ έως την τροπόπαυση.

Σημείωση: Η τροπόπαυση, σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Μετεωρολογίας (WMO) ορίζεται σαν το χαμηλότερο επίπεδο της ατμόσφαιρας στον οποίο ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας με το ύψος μειώνεται σε τιμές μικρότερες των 2 K/km και επιπλέον, ο μέσος όρος του ρυθμού μείωσης της θερμοκρασίας με το ύψος, μεταξύ του χαμηλότερου επιπέδου της ατμόσφαιρας και οποιουδήποτε ανώτερου επιπέδου (εντός εύρους το πολύ 2 χλμ.) δεν υπερβαίνει τα 2 K/km .

β) Η Στρατόσφαιρα

Εκτείνεται από την τροπόπαυση έως τη στρατόπαυση (~ 45-55 χλμ. ύψος). Η στρατόσφαιρα χαρακτηρίζεται από:

- την αύξηση της θερμοκρασίας με την αύξηση του ύψους, που ισχύει όμως για ύψη $> 20 \text{ χλμ.}$ (λόγω έντονης απορρόφησης της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας από το στρώμα του όζοντος μεταξύ 200 και 300 nm),
- την σχεδόν τέλεια απουσία υδρατμών,
- την ελάχιστη κατακόρυφη ανάμιξη των αερίων μαζών της.

Η στρατόσφαιρα, που ανακαλύφθηκε από τον Γάλλο μετεωρολόγο Léon Philippe Teisserenc de Bort, παρουσιάζει μια περιοχή (~ 11-20 χλμ. στα μέσα γεωγραφικά πλάτη), όπου η θερμοκρασία παραμένει σταθερή με το ύψος. Η στρατόσφαιρα περιέχει περίπου το 90% του ατμοσφαιρικού όζοντος. Ο τυπικός χρόνος παραμονής μιας αέριας μάζας που έχει προέλθει από την τροπόσφαιρα είναι της τάξης των 1-3 χρόνων.

γ) Η Μεσόσφαιρα

Εκτείνεται από την στρατόπαυση έως τη μεσόπαυση (~ 80-90 χλμ. ύψος) και χαρακτηρίζεται από:

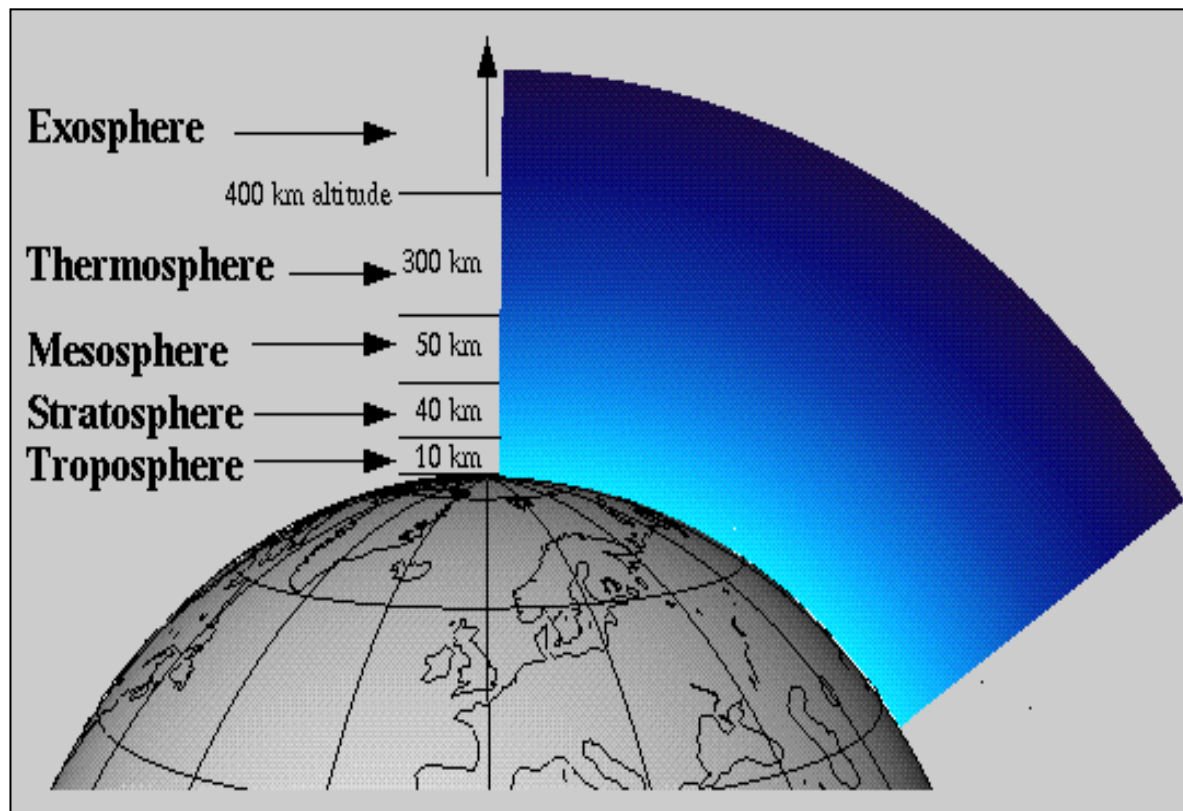
- τη μείωση της θερμοκρασίας με την αύξηση του ύψους, έως τη χαμηλότερη τιμή της γήινης θερμοκρασίας (~ - 88oC),
- την έντονη κατακόρυφη ανάμιξη των αερίων μαζών της.

δ) Η Θερμόσφαιρα

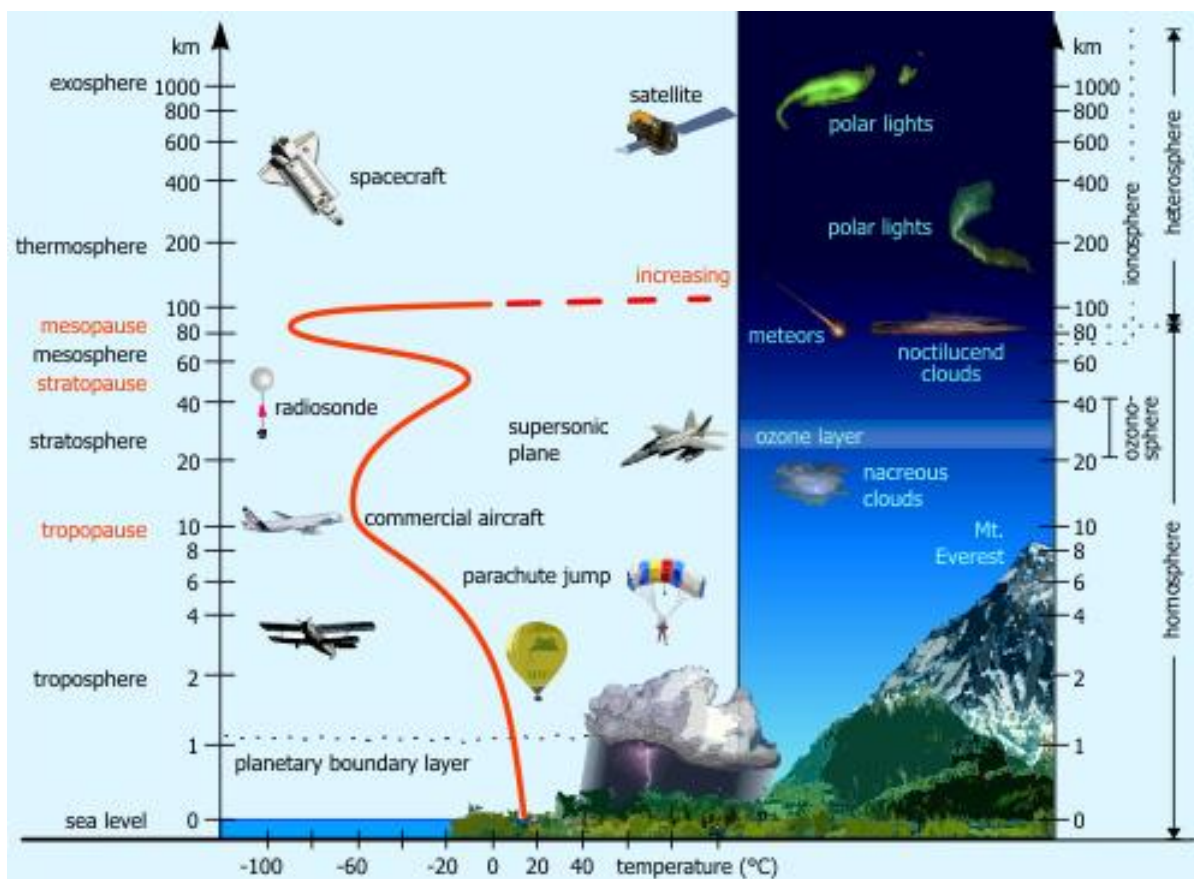
Εκτείνεται από την μεσόπαυση έως τα 110 χλμ. ύψος περίπου και χαρακτηρίζεται γενικά από:

- την αύξηση της θερμοκρασίας με την αύξηση του ύψους, λόγω της απορρόφησης της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας από το οξυγόνο και το άζωτο. Η θερμοκρασία της θερμόσφαιρας εξαρτάται άμεσα από την ηλιακή δραστηριότητα.
- την ελάχιστη κατακόρυφη ανάμιξη των αερίων μαζών της.

Μεταξύ της μεσόσφαιρας και της θερμόσφαιρας ευρίσκεται η *ιονόσφαιρα*, στην οποία παρατηρείται μερικός *ιονισμός* των ατμοσφαιρικών συστατικών από την ηλιακή ή την σωματιδιακή ακτινοβολία. Η ιονόσφαιρα εκτείνεται από τα 80 έως τα 300 χλμ. περίπου.



Σχῆμα 1.1 : Τα στρώματα της Ατμόσφαιρας



Σχῆμα 1.2: Η δομή της γήινης ατμόσφαιρας

1.2. ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Αναφορές:

{2, Κεφάλαιο 1},{1, Unit 2},{4}

1.2.1 Αλληλεπίδραση ηλιακής ακτινοβολίας και αερίων της ατμόσφαιρας

Η ηλιακή ακτινοβολία αλληλεπιδρά με τα μόρια και τα άτομα της ατμόσφαιρας. Έτσι όταν ένα αέριο της ατμόσφαιρας (σε μοριακή μορφή) απορροφήσει ένα φωτόνιο από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (νόμος διατήρησης της ορμής και της ενέργειας), τούτο μεταβαίνει από μια βασική σε μια διηγευμένη κατάσταση. Έτσι, το μόριο αποθηκεύει εσωτερικά ενέργεια με τρεις τρόπους:

- 1) ηλεκτρονική ενέργεια (E_{el}), που σχετίζεται με την κατανομή των ηλεκτρονίων στις επιτρεπόμενες στάθμες ενέργειας του μορίου,
- 2) περιστροφική ενέργεια (E_{rot}), που αντιστοιχεί σε περιστροφή του μορίου γύρω από το κέντρο μάζας του, και
- 3) ταλαντωτική ενέργεια (E_{vib}) που οφείλεται στην ταλάντωση των ατόμων που συγκροτούν το μόριο.

Έτσι, εάν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία έχει αρκετά μικρό μήκος κύματος (πχ. υπεριώδης ή ορατή) η διηγευμένη κατάσταση στην οποία θα βρεθεί το μόριο, αντιστοιχεί σε μια μετάβαση ενός τροχιακού ηλεκτρονίου σε ένα υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο, ανάλογα με τη συχνότητα ν της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας, σύμφωνα με τη σχέση $\Delta E = h\nu$, όπου ΔE η ενεργειακή διαφορά μεταξύ της αρχικής και της τελικής ενεργειακής κατάστασης και h η σταθερά του Planck. Αντίστοιχες οπτικές μεταβάσεις έχουμε μεταξύ ενεργειακών σταθμών περιστροφής και ταλάντωσης ενός μορίου, κάτι που συμβαίνει για απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας με μήκος κύματος στην περιοχή του υπερόθρου ($\lambda > \sim 0.78 \mu\text{m}$).

Το αντίστοιχο μήκος κύματος λ δίνεται από τη σχέση του Bohr:

$$\lambda = c / \nu = hc / \Delta E$$

όπου, c είναι η ταχύτητα του φωτός.

Δεδομένου ότι ο χρόνος ζωής της διηγευμένης κατάστασης του μοριακού αερίου είναι περιορισμένος, το μόριο σύντομα θα επιστρέψει στην αρχική του ενεργειακή κατάσταση.

Υπάρχουν λοιπόν δύο μηχανισμοί αποδιέγερσης του μορίου:

1) Το ηλεκτρόνιο μεταπίπτει πίσω στη βασική του ενεργειακή κατάσταση εκπέμποντας ένα φωτόνιο που έχει ακριβώς την ίδια ενέργεια και συχνότητα με αυτήν του αρχικού προσπίπτοντος φωτονίου. Το φωτόνιο όμως αυτό εκπέμπεται σε μια τυχαία διεύθυνση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ακτινοβολητική μετάπτωση (*radiative decay*).

2) Σε σχετικά υψηλές πιέσεις ($\sim 1 \text{ atm}$) τα μόρια της ατμόσφαιρας συνεχώς αλληλεπιδρούν μέσω συγκρούσεων. Έτσι, υπάρχει η πιθανότητα η ενέργεια ΔE που εκπέμπεται κατά την αποδιέγερση του μορίου να μετατραπεί σε άλλες μορφές ενέργειας (πχ. κινητική ενέργεια - > θερμότητα). Στην περίπτωση αυτή έχουμε τοπική αύξηση της θερμοκρασίας και λέμε ότι το φωτόνιο έχει απορροφηθεί. Η μετατροπή αυτή της ενέργειας σε θερμότητα ονομάζεται θερμοποίηση (*thermalization*).

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάδοσή της στην ατμόσφαιρα εξασθενεί. Η εξασθένιση αυτή οφείλεται σε :

- φαινόμενα σκέδασης (Μηχανισμός 1) και
- απορρόφησης (Μηχανισμός 2).

Η σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας οφείλεται τόσο στην ύπαρξη των αιωρούμενων σωματιδίων (aerosols) (φαινόμενο σκέδασης Mie), όσο και των μορίων της ατμόσφαιρας (φαινόμενο σκέδασης Rayleigh). Και στις δύο περιπτώσεις το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που επανεκπέμπεται παραμένει σταθερό (ελαστική σκέδαση).

Επίσης υπάρχει η *μη-ελαστική σκέδαση* Raman που οφείλεται στα μόρια της ατμόσφαιρας (πχ. N₂, O₂, O₃, H₂O κλπ.).

Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας οφείλεται επίσης στα αιωρούμενα σωματίδια (απορρόφηση στην περιοχή του υπεριώδους, κυρίως από τα αιωρούμενα σωματίδια που περιέχουν πυρίτιο), αλλά κυρίως στα μόρια της ατμόσφαιρας. Στην τελευταία περίπτωση η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τα μόρια της ατμόσφαιρας μπορεί να οδηγήσει σε *φωτοδιάσπαση* του μορίου (έναρξη φωτοχημικών αντιδράσεων) ή σε *φωτοϊονισμό* (απόσπαση των ηλεκτρονίων της εξωτερικής στιβάδας των ατόμων). Τούτο συμβαίνει κυρίως στην υπεριώδη (UV) ηλιακή ακτινοβολία η οποία απορροφάται στα υψηλά ατμοσφαιρικά στρώματα. Τα μεγαλύτερα μήκη κύματος διεισδύουν βαθύτερα στην ατμόσφαιρα, μέχρι όπου να απορροφηθούν και αυτά από τα διάφορα ατμοσφαιρικά αέρια. Όσο πλησιάζουμε στην επιφάνεια της γης τόσο αυξάνεται η πυκνότητα της ατμόσφαιρας και παράλληλα αυξάνεται και η απορρόφηση της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας.

1.2.2 Μοριακή απορρόφηση

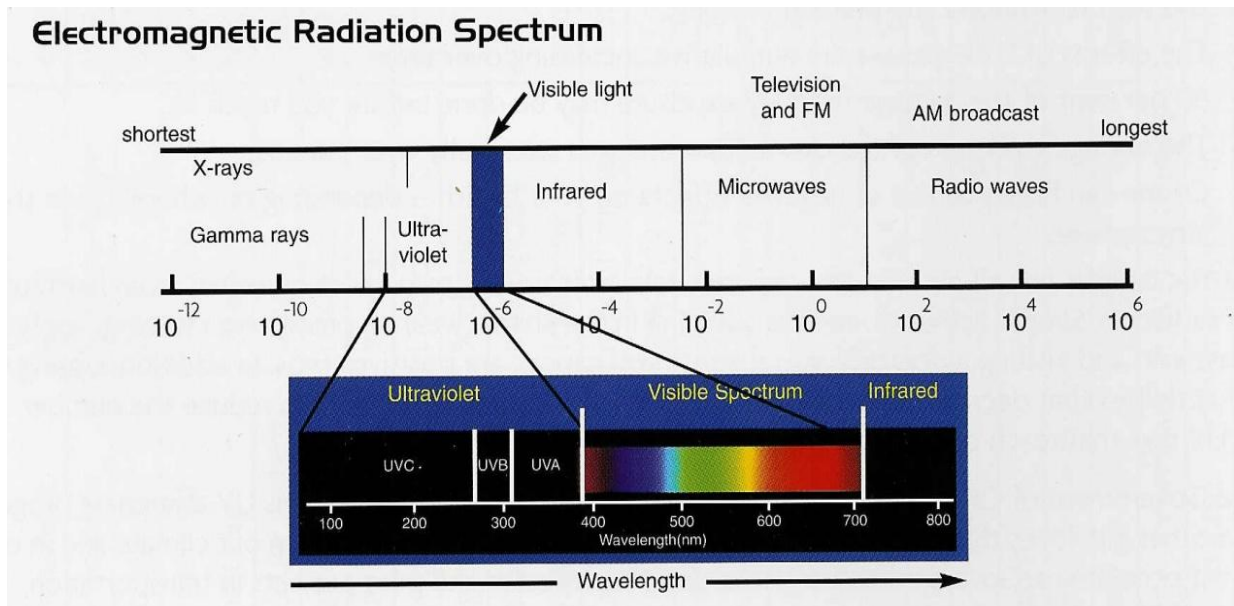
Η απορρόφηση οπτικής ακτινοβολίας από τα μόρια της ατμόσφαιρας σχετίζεται κυρίως με τις μεταπτώσεις (οπτικές μεταβάσεις) μεταξύ των επιτρεπόμενων κβαντισμένων ενεργειακών επιπέδων των μορίων. Όπως προαναφέρθηκε, τα ενεργειακά αυτά επίπεδα συσχετίζονται με *ηλεκτρονικές, ταλαντωτικές και περιστροφικές* μεταπτώσεις, ή σε *συνδυασμό ταλαντωτικών-περιστροφικών* μεταπτώσεων. Έτσι, η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στο έδαφος προκαλείται από τα διάφορα αέρια της ατμόσφαιρας και ειδικότερα από τους υδρατμούς (H₂O), το οξυγόνο (O₂), το όζον (O₃), το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το μεθάνιο (CH₄), το πρωτοξείδιο του αζώτου (N₂O), κλπ., όπως παριστάνεται στο Σχήμα 1.4.b.

Τα παραπάνω αέρια παίζουν επομένως κυρίαρχο ρόλο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Στο Σχήμα 1.4.c παριστάνεται η απορροφητικότητα της γήινης ατμόσφαιρας σε ύψος 11 χλμ., ενώ στο Σχήμα 1.4.d παρουσιάζεται η συνολική απορροφητικότητα της ατμόσφαιρας που οφείλεται αντίστοιχα στα CH₄, N₂O, O₂, O₃, CO₂ και H₂O.

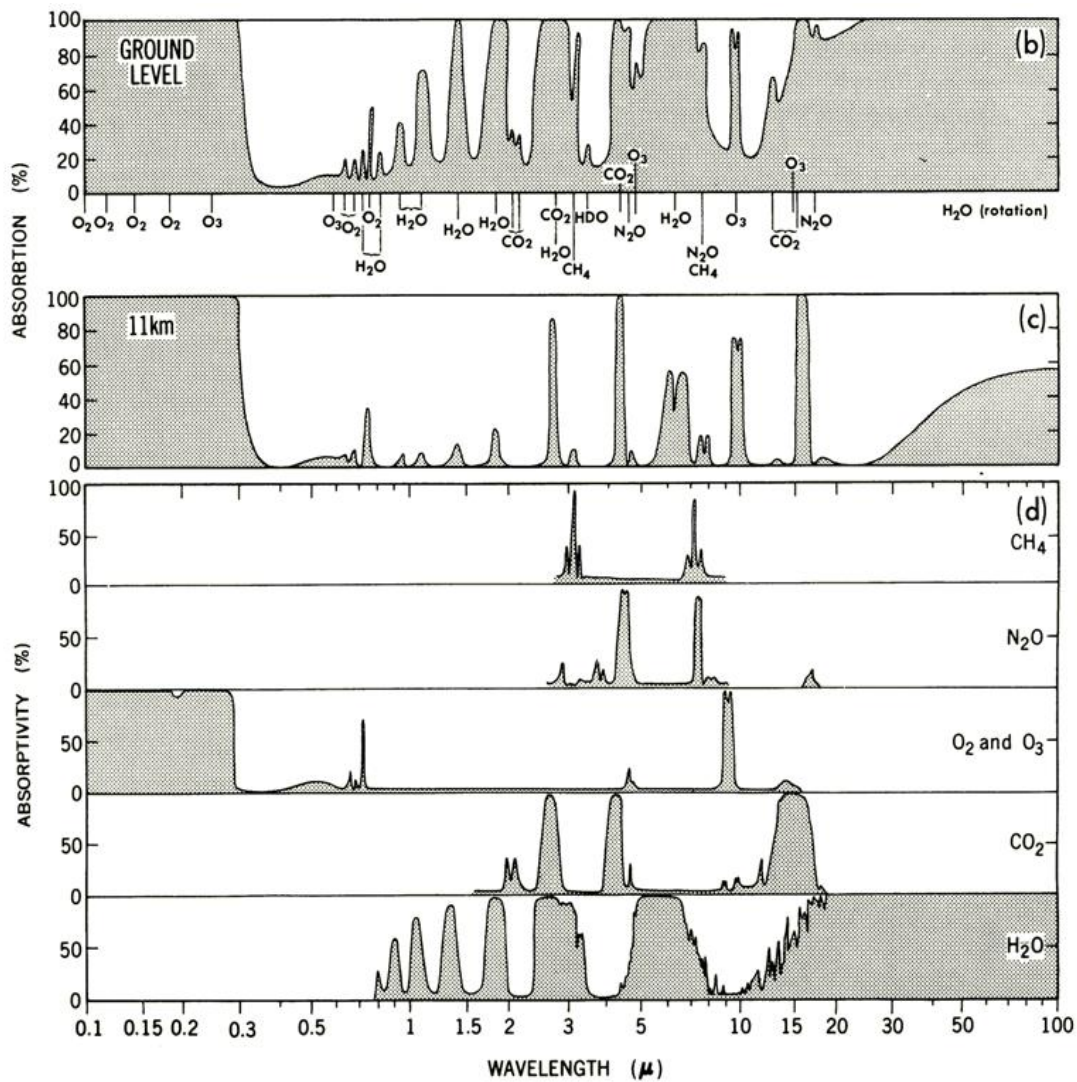
Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι τα αέρια CO, CH₄, N₂O, O₃, CO₂ και H₂O απορροφούν έντονα στο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος, ενώ μεταξύ 8-12 μm, παρατηρούμε την ύπαρξη του λεγόμενου *ατμοσφαιρικού παράθυρου στο θερμικό υπέρυθρο*, εντός του οποίου η απορροφητικότητα της ατμόσφαιρας είναι χαμηλή (εκτός από τη ζώνη απορρόφησης του όζοντος στα 9.6 μm). Οι υδρατμοί απορροφούν στο μακρινό υπεριώδες ($\lambda < 186$ nm) (ηλεκτρονικές μεταπτώσεις), στο υπέρυθρο στα 6.3 μm (ταλαντωτικές μεταπτώσεις στη ζώνη ν₂), στα 2.6-3.3 μm (ταλαντωτικές μεταπτώσεις) και σε $\lambda > 16$ μm (περιστροφικές μεταπτώσεις). Το CO₂ απορροφά έντονα στο υπέρυθρο στα 15 μm (ταλαντωτικές μεταπτώσεις στη ζώνη ν₂) και στα 4.3 μm (ταλαντωτικές μεταπτώσεις στη ζώνη ν₃). Το O₃ απορροφά κυρίως στο υπεριώδες (ηλεκτρονικές μεταπτώσεις) σε συνεχές φάσμα (continuum) από 200-310 nm (ζώνες Hartley) και στα 310-350 nm (ζώνες Huggins), αλλά και στο ορατό 400-850 nm (Chappuis), όπως φαίνεται στο (Σχήμα 1.5.α) Διαθέτει επίσης τρεις ζώνες απορρόφησης (λόγω ταλαντωτικών-περιστροφικών μεταπτώσεων) στο υπέρυθρο 9.1 μm (ν₁), 14.1 μm (ν₂) και 9.6 μm (ν₃), οι οποίες είναι ασθενέστερες από αυτές του υπεριώδους. Το N₂O απορροφά κυρίως στο υπέρυθρο (4.5 μm, 7.8 μm και 17 μm).

Τέλος, το O₂ απορροφά έντονα στο υπεριώδες (Σχήμα 1.5.β) λόγω φωτο-ιονισμού και φωτοδιάσπασης. Ειδικότερα, η ισχυρή απορρόφηση για $\lambda < 100$ nm οφείλεται στον φωτοιονισμό, μεταξύ 100-130 nm παρατηρούνται διάκριτες ζώνες απορρόφησης αγνώστου προέλευσης, μεταξύ 130-175 nm παρατηρείται το συνεχές φάσμα (*Schumann-Runge continuum*) λόγω φωτο-διάσπασης [O₂-> O(3P) + O(1D), όπου ένα άτομο οξυγόνου παραμένει στη βασική κατάσταση 'triplet-P', και το άλλο άτομο μεταβαίνει στη διηγευμένη κατάσταση 'singlet-D']. Οι ζώνες Schumann-Runge από 175-200 nm σχετίζονται με ηλεκτρονικές μεταβάσεις, πάνω στις οποίες υπερτίθενται και ταλαντωτικές μεταβάσεις. Το συνεχές φάσμα του *Herzberg* (200-260 nm) είναι πολύ σημαντικό, ειδικότερα στα 242 nm, για το σχηματισμό του στρατοσφαιρικού όζοντος. Τέλος, το NO₂ απορροφά κυρίως στην περιοχή του ορατού (Σχήμα 1.5.γ).

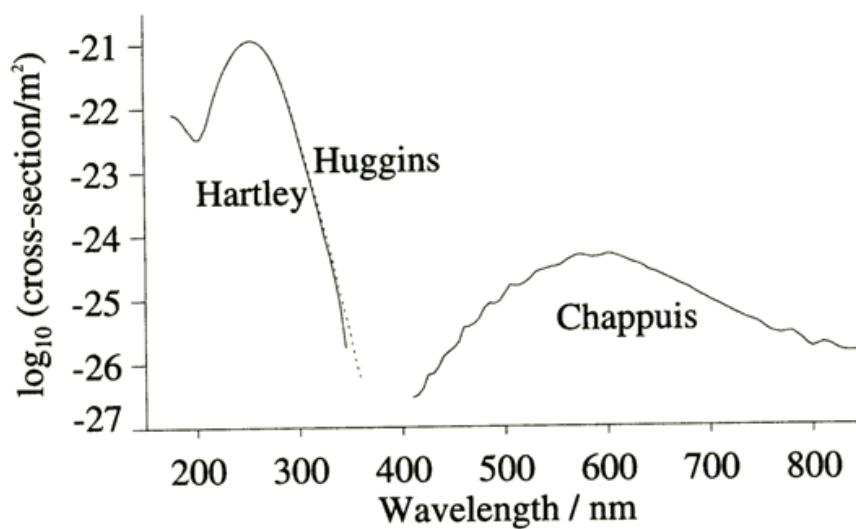


Spectrum	Wavelength nm
Infrared	> 780
Visible Radiation	400-780
Ultraviolet	< 400
UVA	320-400
UVB	280-320
UVC	200-280

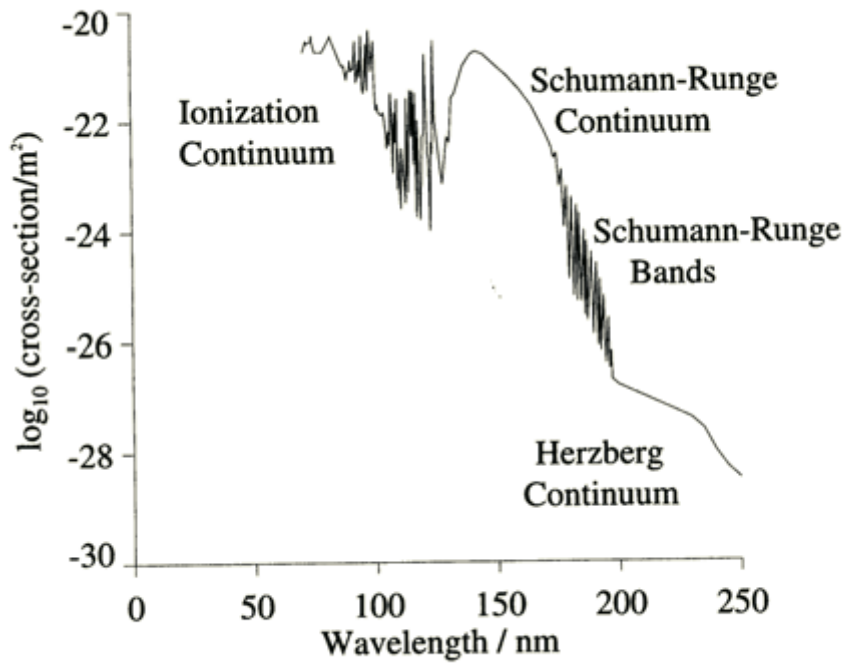
Σχηματα 1.3α, 1.3β : Συχνότητες και μηκη κύματος διαφορων ακτινοβολιών



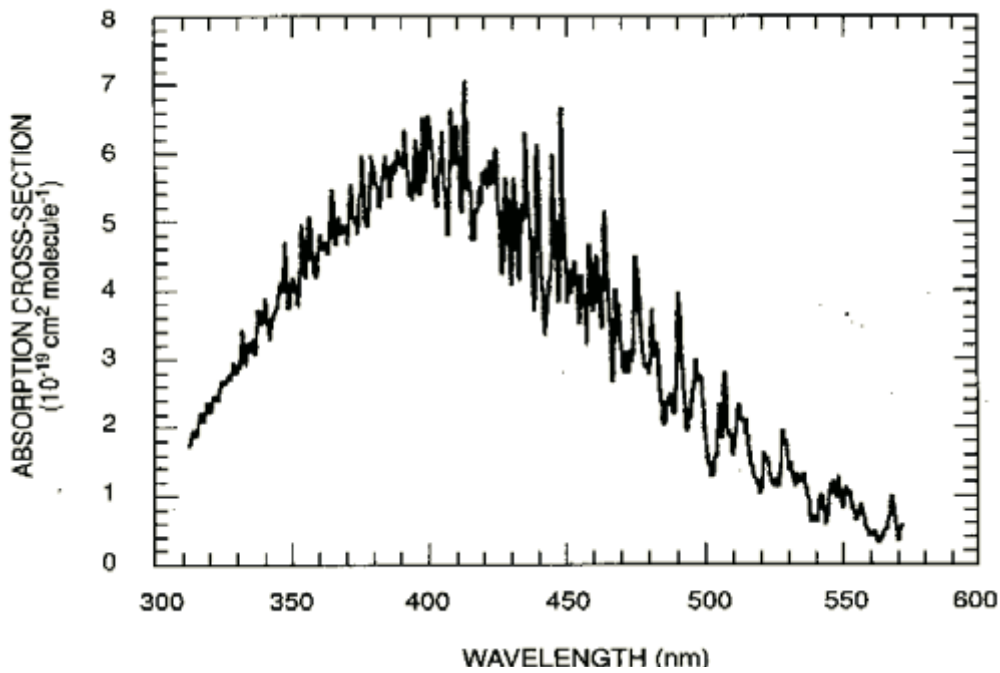
Σχήμα 1.4. Απορροφητικότητα της ατμόσφαιρας (%) για τα κυριότερα ατμοσφαιρικά αέρια, (b) από το έδαφος έως την κορυφή της ατμόσφαιρας, (c) από τα 11 χλμ. και άνω και (d) για επιλεγμένα αέρια σε όλη την ατμόσφαιρα, σε συνάρτηση με το μήκος κύματος



Σχήμα 1.5.α. Ενεργός διατομή απορρόφησης του όζοντος σαν συνάρτηση του μήκους κύματος.



Σχήμα 1.5.β. Ενεργός διατομή απορρόφησης του οξυγόνου σαν συνάρτηση του μήκους κύματος.



Σχήμα 1.5.γ. Ενεργός διατομή απορρόφησης του διοξειδίου του αζώτου σαν συνάρτηση του μήκους κύματος

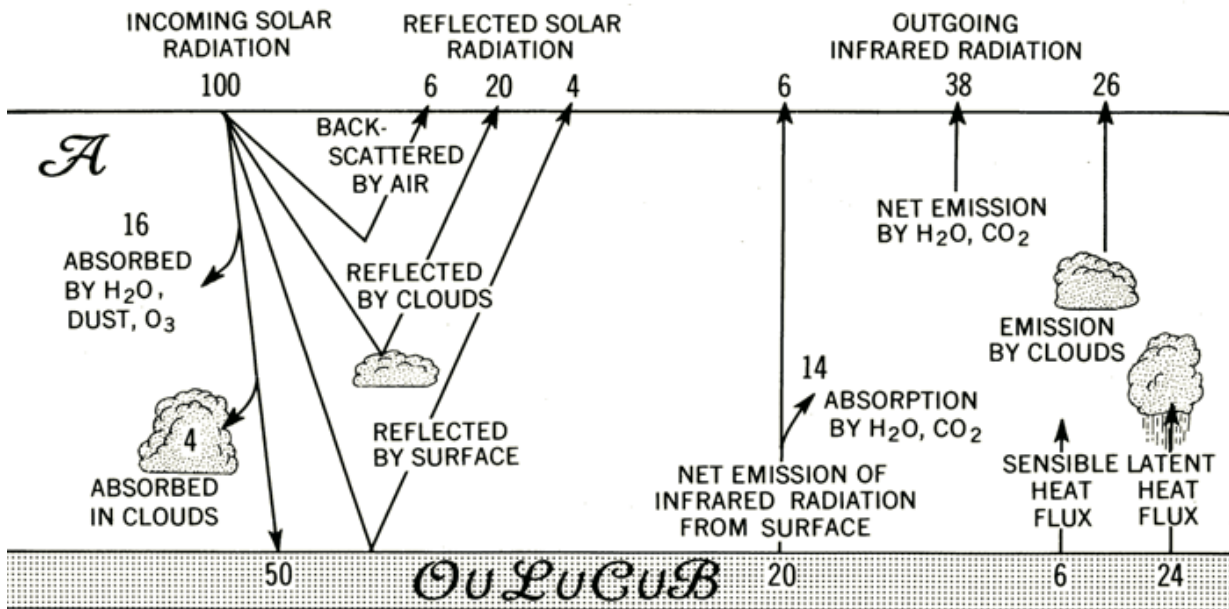
1.2.3 Ενεργειακό ισοζύγιο της γης

Αναφορές:

{2, Κεφάλαιο 2}

Στο Σχήμα 1.6 (αριστερό τμήμα) παριστάνεται το ενεργειακό ισοζύγιο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης, για 100 μονάδες ενέργειας ηλιακή ακτινοβολίας. Στο σχήμα αυτό παρατηρούμε ότι τα σύννεφα και τα αιωρούμενα σωματίδια παίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην επανασκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας στο διάστημα (περίπου 20 και 6%, αντίστοιχα). Περίπου 20% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από τα σύννεφα και ατμόσφαιρα (όζον, υδρατμοί) με αποτέλεσμα, περίπου 50% της ηλιακής ακτινοβολίας να φθάνει τελικά στην επιφάνεια της γης (είτε κατ' ευθείαν, είτε μέσω σκέδασης) και να απορροφάται από αυτήν.

Από αυτές τις 50 μονάδες ενέργειας που φθάνουν στην επιφάνεια της γης και απορροφούνται από αυτήν (Σχήμα 1.6, δεξιό τμήμα) παρατηρούμε ότι ένα πολύ σημαντικό ποσοστό της (20 μονάδες ενέργειας) εκπέμπεται σαν υπέρυθη ακτινοβολία προς το διάστημα (14 μονάδες ενέργειας απορροφούνται από την ατμόσφαιρα-από το H₂O και CO₂ και 6 μονάδες ενέργειας φθάνουν ανεπηρρέαστες έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα). Το υπόλοιπο ποσοστό (30 μονάδες ενέργειας), μεταφέρεται προς την ατμόσφαιρα δια αγωγής (6 μονάδες ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας, δηλ. με τη βοήθεια των ανοδικών ρευμάτων του αέρα) και το υπόλοιπο με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας (24 μονάδες ενέργειας), δηλ. μέσω της εξάτμισης του νερού. Καταλήγουμε επομένως στο συμπέρασμα ότι η γη επανεκπέμπει προς το διάστημα περίπου το 30% της συνολικής ενέργειας που δέχεται από τον ήλιο.



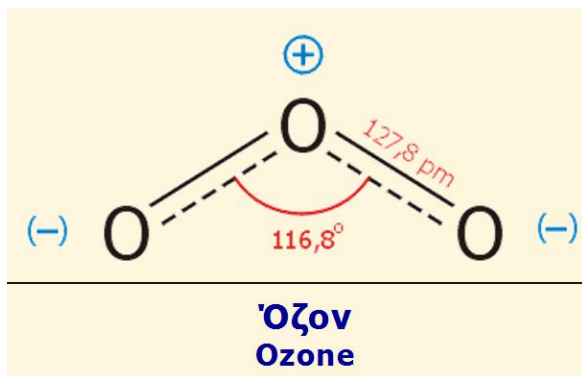
Σχήμα 1.6: Σχηματικό διάγραμμα του ενεργειακού ισοζυγίου της γης, θεωρώντας 100 μονάδες ενέργειας στην κορυφή της ατμόσφαιρας.

1.3 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΟΖΟΝ – ΥΠΕΡΙΩΔΗΣ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Αναφορές:

{3, Κεφάλαιο 10.3.3}, {2, Κεφάλαιο 3}, {6}, {7}

Το όζον ανακαλύφθηκε από τον Schonbein το 1839, ο οποίος και του έδωσε την ονομασία αυτή από την ελληνική λέξη «όζειν».



Το όζον είναι αέριο ανοικτού κυανού χρώματος, το οποίο γίνεται αισθητό μόνο σε μεγάλες συγκεντρώσεις του και μεγάλη οπτική διαδρομή. Η οσμή του είναι χαρακτηριστική δριμεία που θυμίζει την οσμή του λευκού φωσφόρου και του χλωρίου. Η σύντομη εισπνοή O₃ σε μεγάλες σχετικά συγκεντρώσεις (π.χ. από οικιακό οζονιστήρα) αφήνει την αίσθηση της οσμής του για αρκετή ώρα μετά την εισπνοή και στη συνέχεια μπορεί να απευαισθητοποιήσει την όσφρηση. Η οσμή του O₃ στα όρια που γίνεται αισθητή μπορεί να θεωρηθεί έως και ευχάριστη, αφού δίνει την αίσθηση φρέσκου και καθαρού αέρα.

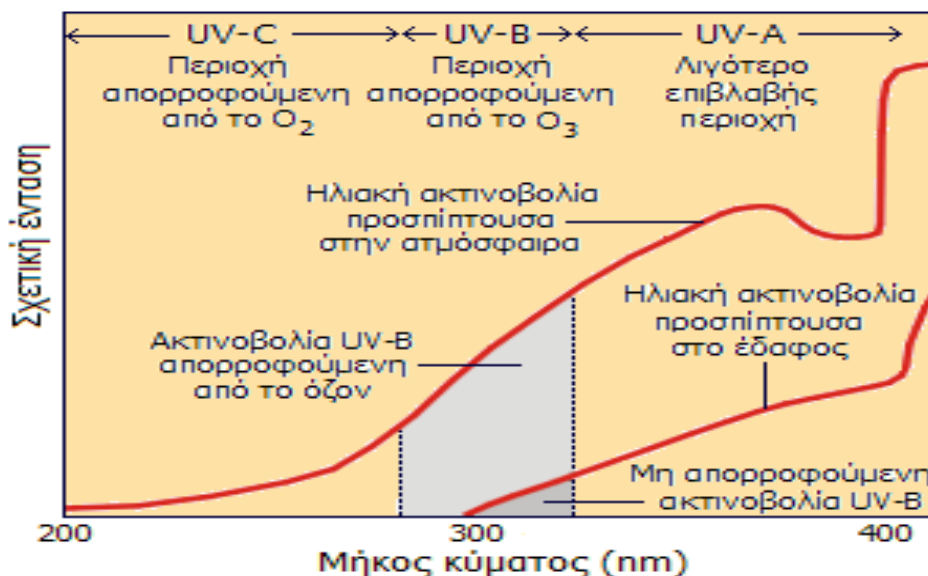
Το όζον υγροποιείται στους -111,9 °C παρέχοντας ένα έντονα κυανό υγρό. Επειδή το οξυγόνο υγροποιείται σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία (-183,0 °C), το υγρό όζον μπορεί να ληφθεί σε σχετικά καθαρή κατάσταση. Στερεοποιείται στους -192,5 °C παρέχοντας ένα μελανοϊώδες στερεό. Τόσο το υγρό όσο και το στερεό όζον είναι εξαιρετικώς ασταθή και διασπώνται εκρηκτικά προς αέριο οξυγόνο. Τα πειράματα με αυτά τα υλικά θεωρούνται από τα πιο επικίνδυνα της Χημείας. Το μόριο του όζοντος έχει μη γραμμική διάταξη και τα 3 άτομα οξυγόνου σχηματίζουν γωνία 116,8° με μήκος δεσμών -O-O- 127,8 pm (1 pm = 10⁻¹² m). Η

ηλεκτρονιακή του διαμόρφωση είναι δύο δομές σε συντονισμό μεταξύ τους με αντιμετάθεση απλού και διπλού δεσμού, όπως φαίνεται παραπλεύρως. Το όζον είναι διαμαγνητική ένωση και λόγω της κατανομής των φορτίων εμφανίζει διπολική ροπή (0,5337 D).

Όπως προαναφέρθηκε, το ατμοσφαιρικό όζον απορροφά έντονα την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία στη φασματική περιοχή από 180 έως περίπου 310 nm.

Ειδικότερα, το όζον απορροφά εντονότατα την Γ-υπεριώδη UV-C (180-280 nm) και την Β-υπεριώδη UV-B (280-320 nm) ηλιακή ακτινοβολία. Η λιγότερη βλαβερή Α-υπεριώδης ακτινοβολία UV-A (320-400 nm) απορροφάται λιγότερο έντονα από το όζον και φθάνει έτσι στην επιφάνεια της γης.

Στο σχημα που ακολουθεί δείχνεται και το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή του υπεριώδους, που προσπίπτει στην ατμόσφαιρα και εκείνου που προσπίπτει στο έδαφος μετά την απορρόφηση τμημάτων της ακτινοβολίας από το οξυγόνο και το όζον.

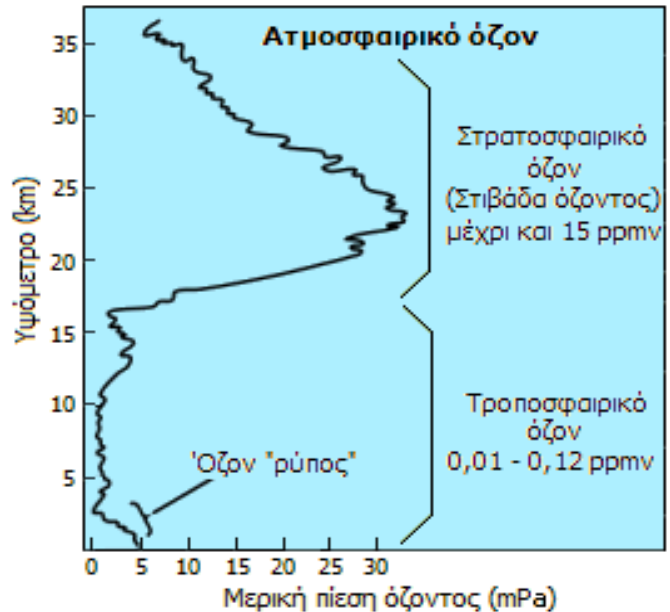


Επομένως, το όζον παίζει σημαντικό ρόλο στην διατήρηση της έμβιας ζωής στον πλανήτη μας, καθόσον απορροφά αποτελεσματικά την επικίνδυνη υπεριώδη ακτινοβολία. Επίσης, το όζον απορροφά και στη φασματική περιοχή των 9.1 και 9.6 μm , περιοχή εκπομπής της γήινης ακτινοβολίας, επομένως και το όζον παίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της θερμικής ισορροπίας του πλανήτη μας (σύστημα γη-ατμόσφαιρα) στα πλαίσια του φαινομένου του θερμοκηπίου. Το όζον επίσης παίζει σημαντικότερο ρόλο στη φωτοχημεία της τροπόσφαιρας, καθ'όσον είναι η βασική πηγή των OH^- (μέσω της φωτοδιάσπασης του όζοντος σε $\text{O}(1\text{D})$ και αντίδραση του $\text{O}(1\text{D})$ με τους υδρατμούς) τα οποία και καθορίζουν τη διάρκεια ζωής πολλών ρύπων στην ατμόσφαιρα. Η διαταραχή επομένως της κατακόρυφης κατανομής του όζοντος τόσο στην τροπόσφαιρα, όσο και στην στρατόσφαιρα, έχει σημαντικότερες συνέπειες στην βιόσφαιρα και στην ατμόσφαιρα, και κατ'επέκταση στη Παγκόσμια Κλιματική Αλλαγή, αλλά και στην φωτοχημεία της ατμόσφαιρας.

1.3.1 Το όζον στην ατμόσφαιρα της Γης: Το "καλό" και το "κακό" όζον

Το όζον στην ατμόσφαιρα εμφανίζεται με δύο πρόσωπα: εμφανίζεται ως καλό όζον, που δημιουργείται φυσικά και βρίσκεται στην στρατόσφαιρα (17-50 km) και στα ανώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας (> 2 km) και ως κακό όζον, το όζον-"ρύπος", που βρίσκεται σε χαμηλά ύψη στην τροπόσφαιρα (0-2 km). Το τελευταίο είναι κυρίως ανθρωπογενούς προέλευσης και θεωρείται ένας από τους κυριότερους ατμοσφαιρικούς ρύπους των αστικών περιοχών, που ωστόσο μεταφέρεται συχνά και σε μεγάλες αποστάσεις από τις πόλεις.

Εκτιμάται ότι το 90% του ατμοσφαιρικού όζοντος βρίσκεται στην στρατόσφαιρα και το 10% στην τροπόσφαιρα. Μια τυπική κατανομή της συγκέντρωσης του όζοντος (ως μερική πίεση) ως συνάρτηση του ύψους δείχνεται στο παραπλεύρως διάγραμμα.



Στρατοσφαιρικό όζον

Το "καλό" όζον: Το όζον στην στρατόσφαιρα έχει σημαντικό προστατευτικό ρόλο. Το όζον συχνά αναφέρεται ως στρώμα ή στιβάδα όζοντος. Όμως θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο όρος αυτός είναι κάπως "παρεξηγημένος", γιατί πουθενά δεν υπάρχει μια στιβάδα καθαρού όζοντος. Στην πραγματικότητα πρόκειται για μια διάχυτη περιοχή της ατμόσφαιρας όπου κυριαρχούν τα κανονικά συστατικά της ατμόσφαιρας και το όζον βρίσκεται σε εξαιρετικά χαμηλή συγκέντρωση (0,1 - 1,1 ppmv), αλλά οπωσδήποτε σε πολύ μεγαλύτερη από εκείνη της τροπόσφαιρας.

Η εξαιρετικά αραιή στιβάδα όζοντος, αλλά "πάχους" πολλών χιλιομέτρων, δρα σαν φίλτρο που απορροφά την υπεριώδη ακτινοβολία (UV) του ήλιου και προστατεύει τους ζωντανούς οργανισμούς από οξειδωτικές βλάβες στα βιομόρια και τον άνθρωπο από την αύξηση των περιπτώσεων καρκίνου του δέρματος.

Το στρατοσφαιρικό όζον εκτείνεται κυρίως, από τα 15 έως περίπου τα 34-40 χλμ. πάνω από τη ΜΣΘ. Η συγκέντρωση της κατακόρυφης κατανομής του στην στρατόσφαιρα παρουσιάζει ένα τοπικό μέγιστο περίπου γύρω στα 20 με 26 χλμ., ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή του χρόνου. Επίσης, το όζον ευρίσκεται σε μικρότερες συγκεντρώσεις στην περιοχή από 40 έως 50 χλμ., όπως επιβεβαιώθηκε από δορυφορικές μετρήσεις και μετρήσεις τηλεπισκόπησης lidar (WMO, 2003). Το πάχος του στρώματος του όζοντος είναι μεταβλητό και εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος, τις μετεωρολογικές συνθήκες και παρουσιάζει εποχιακή διακύμανση.

1.3.2 Μονάδες μέτρησης του όζοντος της ατμοσφαιράς

Αναφορές:

{1, Unit 2},{2, Κεφάλαιο 3},{6},{5, Dobson Unit},{10}

Ενδεικτικά, αναφέρουμε ότι εάν συμπιέσουμε μόνο το όζον, που ευρίσκεται σε μια στήλη αέρα, κάτω στο έδαφος σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, τότε τούτο το στρώμα θα είχε πάχος μόλις 3-5 mm. Εδώ λοιπόν ορίζουμε και τη μονάδα μέτρησης του ολικού όζοντος που είναι η μονάδα *Dobson Unit (D.U.)*.

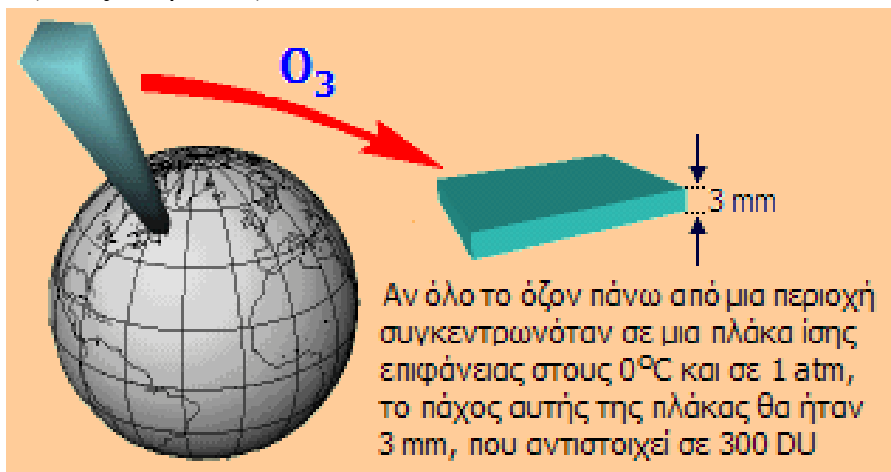
Το όζον της ατμόσφαιρας σε μια περιοχή της Γης μετρείται σε μονάδες Dobson (Dobson Units, DU), που αποδίδουν το πάχος (σε 0,01 mm) στρώματος καθαρού όζοντος το οποίο θα περιείχε όλο το όζον μιας στήλης επεκτεινόμενης από την επιφάνεια της Γης έως το κενό του διαστήματος ή (με άλλα λόγια) θα είχε το ίδιο αποτέλεσμα ως προς την απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας.

Κατά μέσο όρο το όζον πάνω από τη Γη είναι 300 DU, δηλαδή αν όλο το όζον συγκεντρωνόταν σε μια στιβάδα καθαρού όζοντος στην επιφάνεια της γης, αυτή θα είχε "πάχος" μόλις $300 \times 0,01 = 3,0$ mm (στους 0°C και 1 atm). 1 μονάδα Dobson αντιστοιχεί προς $2,69 \times 10^{16}$ μόρια O_3 / cm^2 ή $0,447$ mmol O_3 / m^2 .

Ουσιαστικά οι μονάδες Dobson αποδίδουν τη μέση πυκνότητα του όζοντος πάνω από μια περιοχή της Γης. Ως όριο για χαρακτηρισμό μιας περιοχής της ατμόσφαιρας ως "τρύπα όζοντος" έχουν συμβατικά τεθεί οι 220 μονάδες Dobson.

Ο Gordon Miller Bourne Dobson (1889-1976) υπήρξε ένας Βρετανός φυσικός και μετεωρολόγος που εκτέλεσε σημαντικές έρευνες πάνω στο ατμοσφαιρικό όζον και υπήρξε εφευρέτης του φασματοφωτομέτρου όζοντος Dobson (γνωστού και ως Dobsonmeter). Το φασματοφωτόμετρο αυτό μπορεί από την επιφάνεια της Γης να μετρήσει με ακρίβεια την πυκνότητα του ατμοσφαιρικού όζοντος. Η λειτουργία του βασίζεται σε μέτρηση της υπεριώδους ακτινοβολίας του Ηλίου σε 2 έως 6 διαφορετικά μήκη κύματος από τα 305 έως τα 345 nm. Με μέτρηση σε δύο διαφορετικά μήκη κύματος μπορεί να υπολογιστεί η μέση συγκέντρωση της υπεράνω του φασματοφωτομέτρου αέριας στήλης σε όζον. Στα 305 nm το όζον απορροφά ισχυρά, ενώ στα 325 nm η απορρόφηση είναι μικρή, ο λόγος των εντάσεων του φωτός στα δύο αυτά μήκη κύματος αποτελεί μέτρο της μέσης συγκέντρωσης του όζοντος από τα ανώτερα σημεία της ατμόσφαιρας έως το φασματοφωτόμετρο. Βραδυνές μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν με πηγή φωτός τη Σελήνη ή διάφορους αστέρες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι σήμερα μικρός αριθμός φασματοφωτομέτρων όζοντος Dobson βρίσκονται σε λειτουργία. Η κατάσταση του ατμοσφαιρικού όζοντος σε ολόκληρο τον πλανήτη μελετήθηκε (1976-1994) με τον δορυφόρο Nimbus-7 εξοπλισμένο με το σύστημα **TOMS** (Total Ozone Mapping Spectrometer) και συνεχίζεται με το **OMI** (Ozone Monitoring Instrument) στον δορυφόρο Aura (εκτόξευση: 2004).



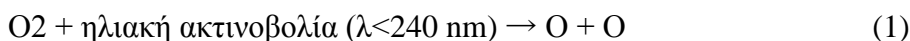
1.3.3 Δημιουργία & Καταστροφή του Οζοντος

Αναφορές:

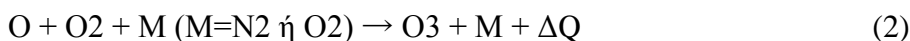
{2, Κεφάλαιο 3}, {1, Unit 2}, {6}, {7}, {8}, {9}, {12, Chapter 8}

Το οξυγόνο (O₂) της ατμόσφαιρας είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής διεργασίας των φυτών, που διήρκεσε εκατομμύρια χρόνια και τελικά έφθασε να αποτελεί το 20% των αερίων της ατμόσφαιρας. Ο σχηματισμός του όζοντος στα ανώτερα στρώματα της ατμοσφαιράς είναι αποτέλεσμα της επίδρασης της υπεριώδους ακτινοβολίας πάνω στα μόρια οξυγόνου. Παράλληλα με τη φυσική παραγωγή του όζοντος πραγματοποιείται και η φυσική καταστροφή του, η οποία καταλύεται από ιχνοποσότητες ουσιών που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα από φυσικές διαδικασίες (π.χ. OH· από το ύδωρ της ατμόσφαιρας, Cl· από εκρήξεις ηφαιστείων, NO· ως προϊόν διάσπασης του N₂O, το οποίο προέρχεται από βακτηριακές δράσεις στο έδαφος). Ο σχηματισμός και η καταστροφή του όζοντος βρίσκονταν σε μια λεπτή αλλά αδιατάρακτη δυναμική ισορροπία για εκατομμύρια χρόνια, που εξασφάλιζε και συντηρούσε μια σταθερή περιεκτικότητα όζοντος στην στρατόσφαιρα. Τη λεπτή αυτή ισορροπία ήρθε τελικά ο άνθρωπος για να τη διαταράξει.

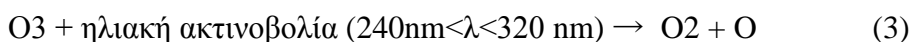
Το στρώμα του στρατοσφαιρικού όζοντος πιστεύεται ότι δημιουργήθηκε πριν από περίπου 3 δισεκατομμύρια χρόνια, μέσω διαδικασίας φωτοσύνθεσης, με βάση το οξυγόνο της ατμόσφαιρας το οποίο φωτολύεται από την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία με μήκος κύματος $\lambda < 240 \text{ nm}$ (το O₂ απορροφά την ακτινοβολία με $\lambda < 240 \text{ nm}$). Τούτο οδηγεί στη δημιουργία ατόμων οξυγόνου σύμφωνα με την αντίδραση:



Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι στο τοπικό μεσημέρι έχουμε καταστροφή περίπου 10 εκατ. μορίων O₂ ανά δευτερόλεπτο, σε ύψος 45 χλμ. και σε μοναδιαίο ατμοσφαιρικό όγκο 1 cm³. Η διαδικασία αυτή θα κατέστρεφε μακροχρόνια το οξυγόνο της ατμόσφαιρας, αλλά έχουμε διατήρηση του ισοζυγίου του οξυγόνου, διότι τούτο παραγόμενο στην επιφάνεια της γης από την βιόσφαιρα (χλωρίδα και πανίδα) διαχέεται, εντός δεκαετίας, κατακόρυφα προς τα επάνω. Ακολουθώντας, τα άτομα του οξυγόνου επανασυνδέονται με μόρια οξυγόνου και παράγουν μόρια όζοντος μέσω της εξώθερμης αντίδρασης:



Τα μόρια του όζοντος ακολούθως απορροφούν την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία με $\lambda < 320 \text{ nm}$, και καταστρέφονται, οπότε έχουμε:



Επομένως, έχουμε διατήρηση (ισοζύγιο) στην παρουσία ατομικού οξυγόνου και όζοντος στην περιοχή από 20-80 χλμ. ύψος. Η εκπομπή ποσοτήτων θερμότητας (αντίδραση 2) λοιπόν είναι υπεύθυνη για την θέρμανση της στρατόσφαιρας, όπως προαναφέρθηκε.

Επιπλέον, το ατομικό οξυγόνο που παράγεται από την αντίδραση (3) αντιδρά με το O₃ οδηγώντας στην καταστροφή του:

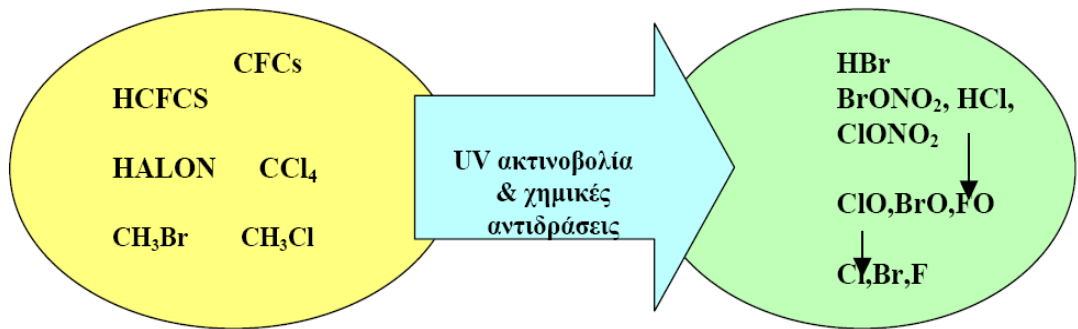


Επιπλέον των αντιδράσεων (1 έως και 4) υπάρχουν και άλλοι μηχανισμοί που ευθύνονται για την καταλυτική καταστροφή του όζοντος στη στρατόσφαιρα, παίζουν επομένως σημαντικό ρόλο στο ισοζύγιο του στρατοσφαιρικού όζοντος, όπως ανακαλύφθηκε από τους μετέπειτα Νομπελίστες Crutzen, Molina και Rowand στις αρχές της δεκαετίας του '70.

Τα αέρια αυτά, που παίζουν το ρόλο καταλύτη, είναι σε ατομική μορφή: Cl, Br, F, και το I, προερχόμενα από την φωτοδιάσπαση των BrO, ClO, FO, IO αντίστοιχα, τα οποία με τη σειρά τους προέρχονται από τη φωτοδιάσπαση στη στρατόσφαιρα των αερίων CFC-11 (CCl₃F), CFC-12 (CCl₂F₂), HCl, ClONO₂, Halons (Halon-1211, δηλ. CBrClF₂), βρωμιούχο μεθύλιο (CH₃Br), τετραχλωράνθρακας (CCl₄), κλπ. (Σχήμα που ακολουθεί). Η αντίστοιχη αντίδραση με X= Cl, Br, F, ή I είναι:



Οπότε και οι αντιδράσεις (5α,5β) παρουσιάζουν το ίδιο ισοζύγιο όπως και η (4).



Αλογονούχες ενώσεις

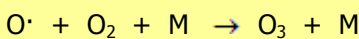
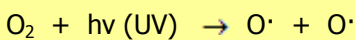
Χημική Μετατροπή

Αλογονούχα χημικά ενεργά αέρια

Σχήμα 3.1. Μετατροπή των αλογονούχων ενώσεων στη στρατόσφαιρα σε αλογονούχα χημικά ενεργά αέρια.

Παρακάτω δίνονται οι τυπικές φυσικές αντιδράσεις σχηματισμού και καταστροφής του όζοντος (γνωστές και ως αντιδράσεις Chapman). Στις τελευταίες με έντονα κόκκινα στοιχεία αναγράφονται τα σωματίδια που δρουν καταλυτικά.

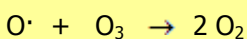
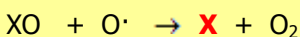
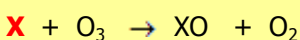
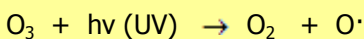
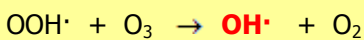
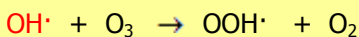
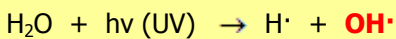
Φυσικός σχηματισμός στρατοσφαιρικού O₃:



Η ακτινοβολία UV με $\lambda < 242$ nm διασπά το μοριακό οξυγόνο σε ρίζες ατομικού οξυγόνου

Το ατομικό οξυγόνο αντιδρά με το μοριακό οξυγόνο παρέχοντας όζον. Τυχασία μόρια της ατμόσφαιρας (M), όπως τα N₂ και O₂, είναι απαραίτητα για την απορρόφηση της πλεονάζουσας ενέργειας

Φυσική καταστροφή του στρατοσφαιρικού O₃:



Σχηματισμός ριζών OH·

Αντίδρασή τους με το όζον με σχηματισμό των ριζών OOH·

Αντίδρασή τους με το όζον με επανασηματισμό OH·

Το όζον διασπάται απορροφώντας την υπεριώδη ακτινοβολία

Ρίζες (X = H, OH·, NO·, Cl·) οδηγούν σε μια καταλυτική καταστροφή του όζοντος

Επανασχηματισμός της ρίζας X

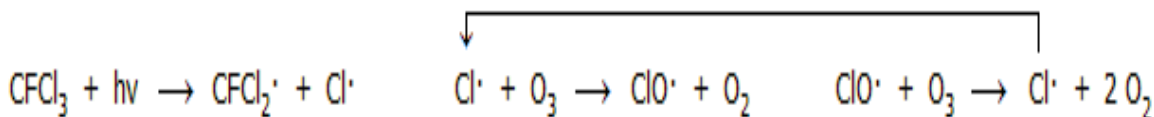
1.3.4 Καταστροφείς του "καλού" (στρατοσφαιρικού) όζοντος

Το 1974 οι Molina και Rowland με το ιστορικό πλέον άρθρο τους στο περιοδικό Nature διατυπώνουν την μέχρι τότε μη πειραματική πρόβλεψη, ότι το στρατοσφαιρικό όζον καταστρέφεται από τους χλωροφθοράνθρακες (chlorofluorocarbons, CFC), γνωστοί και με την εμπορική ονομασία Freon, που χρησιμοποιούνταν σε ψυκτικά μηχανήματα και ως προωθητικά αέρια σε σπρέϋ.

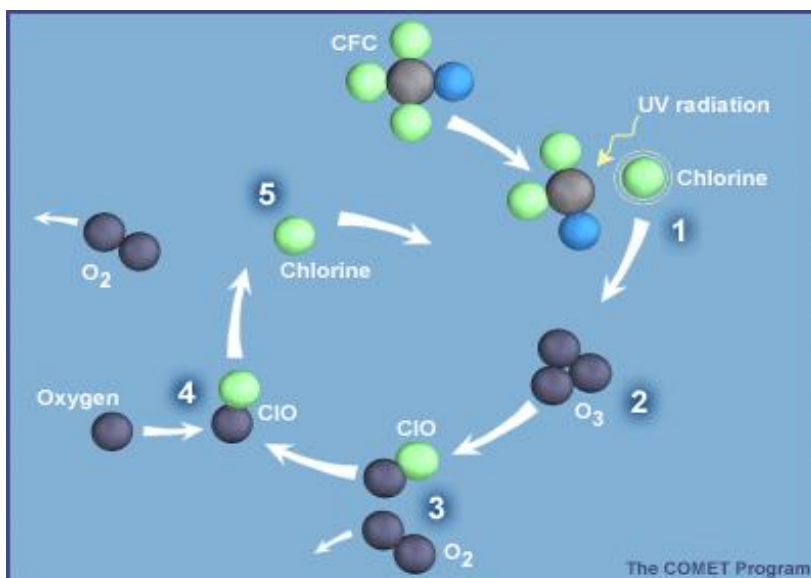
Οι CFC άρχισαν να χρησιμοποιούνται από το 1928 σε ψυγεία, κλιματιστικά μηχανήματα, ως προωθητικά αέρια διαφόρων ειδών σπρέϋ, ως διαλύτες και καθαριστικά μέσα ηλεκτρονικών μικροκυκλωμάτων. Οι αντίστοιχες βρωμιούχες ενώσεις, οι βρωμοφθοράνθρακες, με την εμπορική ονομασία Halon, χρησιμοποιήθηκαν σε γομώσεις πυροσβεστήρων ως εξαιρετικά πυροσβεστικά μέσα. Ιδιαίτερα διαδεδομένα υπήρξαν τα Φρεόν CFC13, (CFC-11, σ.ζ. 24°C) και CF2Cl2 (CFC-12, σ.ζ. 28°C), C2F3Cl3 (CFC-113), C2F4Cl2 (CFC-114) που χρησιμοποιούνταν ως ψυκτικά υγρά. Η χημική τους αδράνεια, η σταθερότητά τους και η εύκολη εξάτμιση και επανασυμπύκνωσή τους τα καθιστούσε ιδανικά ως ψυκτικά υγρά. Σήμερα, εξαιτίας τους αποτελεί πρόβλημα η ανεξέλεγκτη αποσυναρμολόγηση και ανακύκλωση παλαιών ψυγείων και κλιματιστικών συσκευών.

Το 1991 υπολογίστηκε ότι 600.000 τόνοι CFC εκπέμπονταν στην ατμόσφαιρα κάθε χρόνο και με αυξητικές τάσεις. Με την πάροδο του χρόνου και λόγω της σταθερότητάς τους ανέρχονταν με αέριους στροβίλους και ρεύματα στην στρατόσφαιρα, παρ' όλο που οι ενώσεις αυτές είναι ειδικώς βαρύτερες από τον αέρα. Το ότι είναι πρακτικά αδιάλυτες στο νερό, δεν βοηθούσε στην απαλλαγή της ατμόσφαιρας από την παρουσία τους μέσω της βροχής.

Στο ανώτερο τμήμα της στρατόσφαιρας επικρατούν ισχυρότατες υπεριώδεις ακτινοβολίες, των οποίων η ενέργεια είναι ικανή να διασπάσει το δεσμό άνθρακα-χλωρίου. Από τη στιγμή που θα σχηματιστεί μια ρίζα χλωρίου, αυτή δρα καταλυτικά και εμπλέκεται σε ένα κύκλο καταστροφής μορίων όζοντος, που στην πιο απλή μορφή τους μπορούν να περιγραφούν από την παρακάτω αλληλουχία:



Έχει εκτιμηθεί ότι μία ρίζα χλωρίου με συνεχείς αντιδράσεις μπορεί να καταστρέψει 100.000 μόρια όζοντος, μέχρις ότου απομακρυνθεί ως HCl ή νιτρικό χλώριο (ClONO2). Οι αντίστοιχες ρίζες βρωμίου είναι ακόμη καταστρεπτικότερες. Όλες οι πτητικές χλωριούχες και βρωμιούχες οργανικές ενώσεις χλωρίου και βρωμίου συμβάλλουν στην καταστροφή του στρατοσφαιρικού όζοντος.



1.3.5 Άλλοι "καταστροφείς" του στρατοσφαιρικού όζοντος:

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι πέραν των καταστρεπτικών για το όζον κύκλων των χλωρο- και βρωμο-φθορανθράκων, ουσιών που είναι καθαρά ανθρωπογενούς προέλευσης, υφίστανται και άλλοι καταστρεπτικοί κύκλοι, όπως αυτός όπου καταλυτικά δρα το οξείδιο του αζώτου (NO). Το NO είναι φυσικό συστατικό της ατμόσφαιρας σε ίχνη, αλλά τεράστιες ποσότητες NO είναι ανθρωπογενούς προέλευσης με κύρια πηγή τα αεροσκάφη και τις πυρηνικές εκρηξεις-δοκιμές. Η καταλυτική καταστρεπτική δράση του NO περιγράφεται από την παρακάτω αλληλουχία:

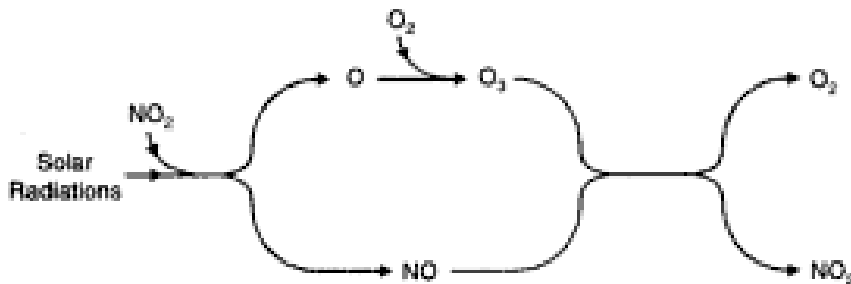
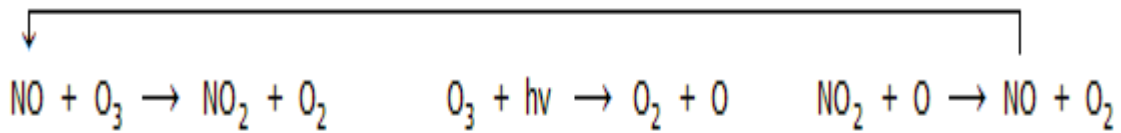


Fig. 8.1A. Chemical reactions concerning formation and breakdown of ozone in atmosphere.

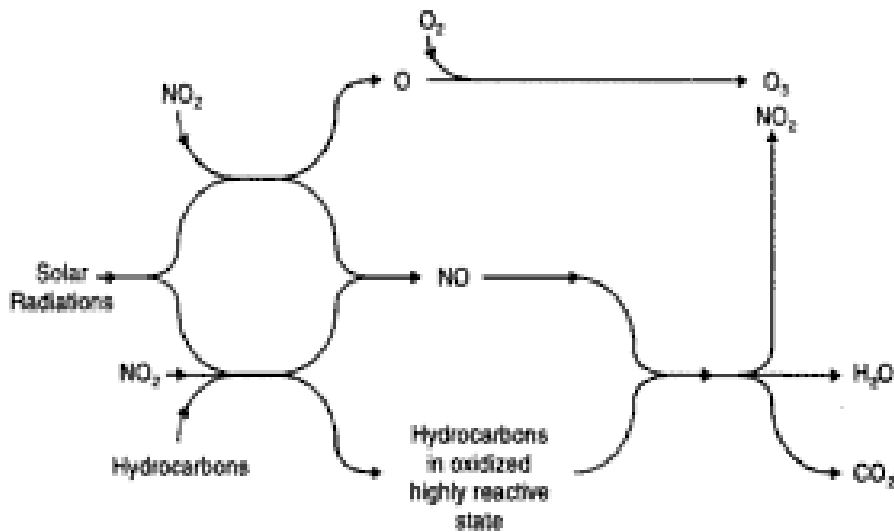
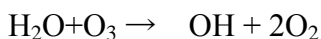
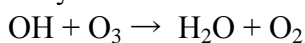


Fig. 8.1B. Chemical reactions leading to accumulation of ozone and nitrogen dioxide in the atmosphere.

Τέλος ιόντα υδροξυλίου OH τα οποία παράγονται από φωτοδιάσπαση των μορίων νερού στη στρατόσφαιρα, αντιδρούν με τα μόρια του όζοντος διασπώντας τα σύμφωνα με τις ακόλουθες αντιδράσεις:



Συνοψίζοντας οι σημαντικότερες αιτίες καταστροφής του όζοντος είναι:

- Χλωροφθοράνθρακες (CFC's) από ψυκτικά και προωθητικά αέρια.
- Οξείδια του αζώτου (NOx) που μπορεί να είναι οργανικά, είτε να προέρχονται από τον άνθρωπο JET (αέρια των υπερηχητικών αεροπλάνων) ή Πυρηνικές εκρηξεις όπως θα μελετήσουμε εκτενώς στη συνέχεια
- Ιόντα υδροξυλίου που μπορεί να είναι φυσικής προέλευσης ή να οφείλονται στα αέρια των υπερηχητικών αεροπλάνων.

1.4 Η "τρύπα όζοντος" της Ανταρκτικής

Αναφορές:

{2, Κεφάλαιο 1}, {1, Unit 2}, {5}, {6}, {8}, {10}, {11}

Η εντονότερη καταστροφή του όζοντος συμβαίνει τους μήνες Οκτώβριο-Νοέμβριο στην Ανταρκτική. Η οπή του όζοντος στην Ανταρκτική ήταν η πρώτη που διαπιστώθηκε επιστημονικά (με δορυφορικές παρατηρήσεις).

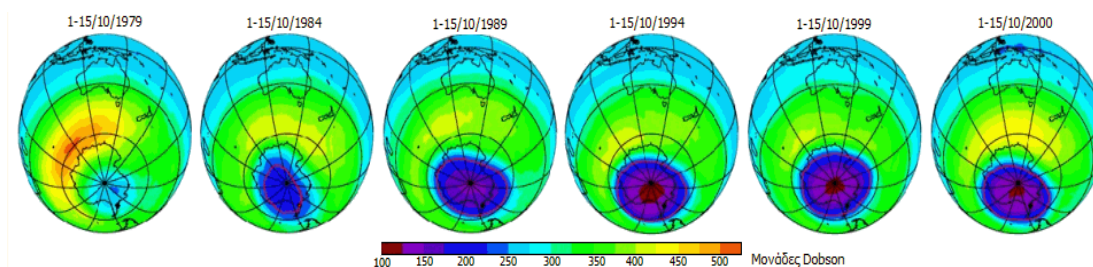
Συχνά τίθεται το ερώτημα: "Γιατί στην Ανταρκτική και όχι στην 'Αρκτική";".

Το ότι η Ανταρκτική είναι η κύρια περιοχή, όπου το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται με ιδιαίτερη ένταση, είναι αποτέλεσμα πολλών συγκυριών.

Στην Ανταρκτική επικρατούν θερμοκρασίες -80°C και οι πολικοί στρόβιλοι παρεμποδίζουν την ανταλλαγή αέρα με τα μεσαία γεωγραφικά πλάτη. Στις συνθήκες αυτές σχηματίζονται υπερκατεψυγμένοι παγοκρύσταλλοι στα στρατοσφαιρικά σύννεφα, που εγκλωβίζουν υδρατμούς οξειδία αζώτου και χλωροφθοράνθρακες. Στο σχηματισμό "υπερκατεψυγμένων" πολικών νεφών συμβάλλουν τα υψηλά όρη της Ανταρκτικής, κάτι που δεν υπάρχει στην Αρκτική.

Οι επιφάνειες των παγοκρυστάλλων στην άνοιξη (Οκτώβριος στο νότιο ημισφαίριο) αρχίζουν να τήκονται και αποδείχθηκε ότι καταλύουν τη διάσπαση των πτητικών ενώσεων χλωρίου και βρωμίου με τη βοήθεια της υπεριώδους ακτινοβολίας, παρέχοντας τις αντίστοιχες "καταστρεπτικές" ρίζες χλωρίου και βρωμίου. Έτσι, ενισχύεται ο ρυθμός διάσπασης του όζοντος με τις αλυσιδωτές αντιδράσεις, που περιγράφηκαν προηγουμένως. Μετά το τέλος της άνοιξης ο πολικός στρόβιλος καταρρέει και άφθονες ποσότητες αέρα μεταφέρονται από άλλες περιοχές αναπληρώνοντας το όζον που χάθηκε με τις αντιδράσεις σχηματισμού του.

Τυπικές δορυφορικές μετρήσεις του στρατοσφαιρικού όζοντος της περιοχής της Ανταρκτικής δείχνονται παρακάτω.



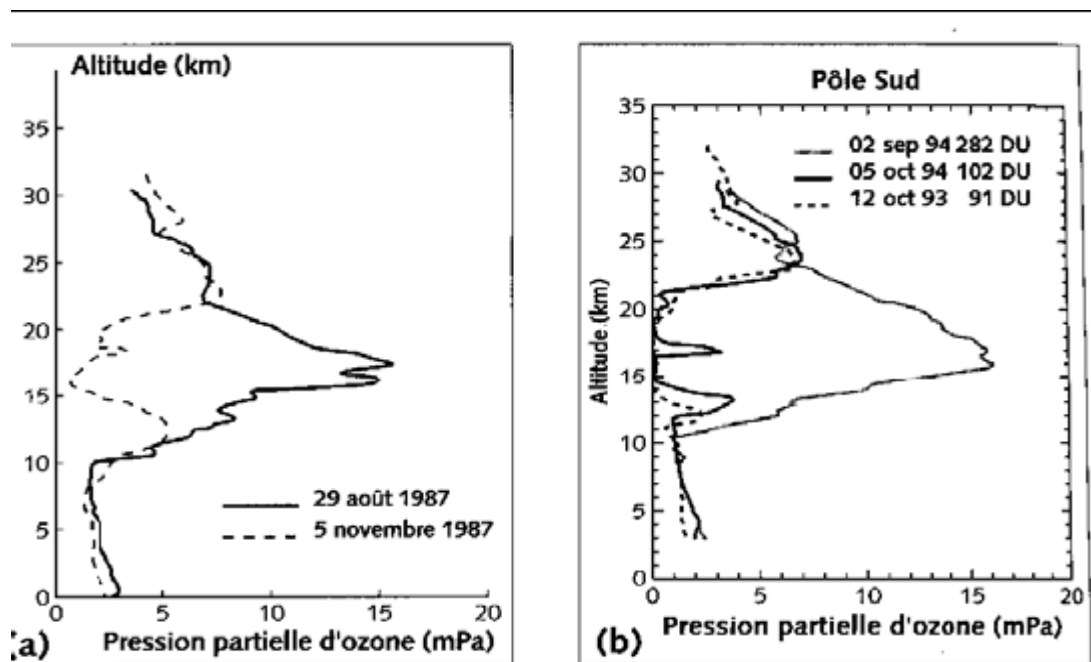
Την περίοδο 1979-1991 οι απώλειες όζοντος υπολογίσθηκαν σε 3-5% στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη και 6-8% στα υψηλότερα και μηδενικές στον ισημερινό. Την περίοδο 1993-95 υπήρχαν σαφείς ενδείξεις για αυξημένες απώλειες όζοντος στο νότιο ημισφαίριο .

Το 1985 πραγματοποιήθηκε μεγάλο συνέδριο για να ληφθούν αποφάσεις σε σχέση με τους χλωροφθοράνθρακες, Convention for the Protection of the Ozone Layer (Vienna, 1985). Το 1987, με το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ (Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer) υπογράφηκε η διεθνής συμφωνία για την απαγόρευση των CFC, βρωμανθράκων και πολλών πολυχλωριωμένων ενώσεων και προτάθηκε μακροπρόθεσμο πρόγραμμα δράσης για την προστασία του στρατοσφαιρικού όζοντος.

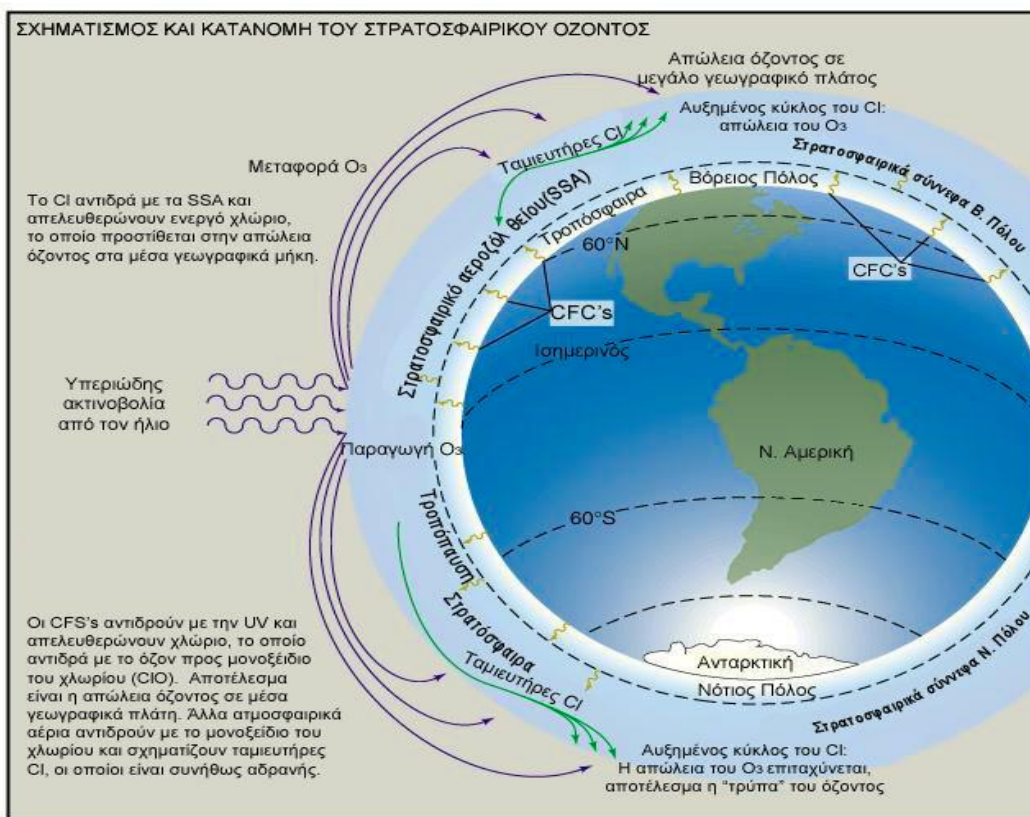
Από το 1982 παρατηρείται στη στρατόσφαιρα μείωση του όζοντος, αρχικά στο Ν. και Β. Πόλο και μετέπειτα και στα μέσα γεωγραφικά πλάτη. Σήμερα, η περιοχή του Ν. Πόλου που καλύπτεται από την τρύπα του όζοντος είναι της τάξης των 25.000.000 km², δηλ. Διπλάσια από την ήπειρο της Ανταρκτικής. Η μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος (γνωστή και σαν 'τρύπα του όζοντος') οφείλεται, όπως προείπαμε, στις καταλυτικές αντιδράσεις (5α,5β) κατά τις οποίες φωτοδιασπώνται χλωριούχες, βρωμιούχες και φθοριούχες ενώσεις (χρησιμοποιούμενες στη χημική βιομηχανία και στα κλιματιστικά μηχανήματα) σε συνθήκες πολύ χαμηλών θερμοκρασιών (-80 έως -90°C) και με

την παρουσία πολικών στρατοσφαιρικών νεφών (*Polar Stratospheric Clouds: PSCs*), οδηγούν στην απότομη καταλυτική καταστροφή του όζοντος. Τα PSCs δημιουργούνται όταν η θερμοκρασία του αέρα στους Πόλους πέσει κάτω από $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ και είναι αυτά που επηρεάζουν τη συγκέντρωση των αερίων που περιέχουν χλωριούχες και βρωμιούχες ενώσεις (πχ. η μετατροπή των ClONO_2 και HCl σε ClO γίνεται επάνω στην επιφάνεια των PSCs τα οποία εγκλωβίζουν υδρατμούς και ενώσεις του αζώτου, πχ. HNO_3). Όταν οι παγοκρύσταλλοι των PSCs αυξάνουν σε βάρος, καταπίπτουν και αφαιρούν έτσι από την κατώτερη ατμόσφαιρα ενώσεις του αζώτου (φαινόμενο της απαζωτοποίησης: *denitrification*) και υδρατμούς (φαινόμενο αφυδάτωσης: *dehydration*), αφήνοντας έτσι ελεύθερο το πεδίο στις δραστικές ενώσεις του χλωρίου (ClO), οι οποίες διαφορετικά θα ήταν ακίνδυνες για το O_3 (πχ. θα σχηματιζόταν το σταθερό μόριο ClONO_2). Αξίζει, να σημειωθεί ότι ο χρόνος ζωής των αερίων που καταστρέφουν καταλυτικά το O_3 κυμαίνεται από μερικά χρόνια (HCFCs) σε 100 χρόνια (CFC-12), επομένως, το πρόβλημα της καταστροφής του στρατοσφαιρικού όζοντος (εμφάνιση λοιπόν της «τρύπας του όζοντος») θα ταλανίζει την ανθρωπότητα για τουλάχιστον μερικές δεκάδες χρόνια ακόμα.

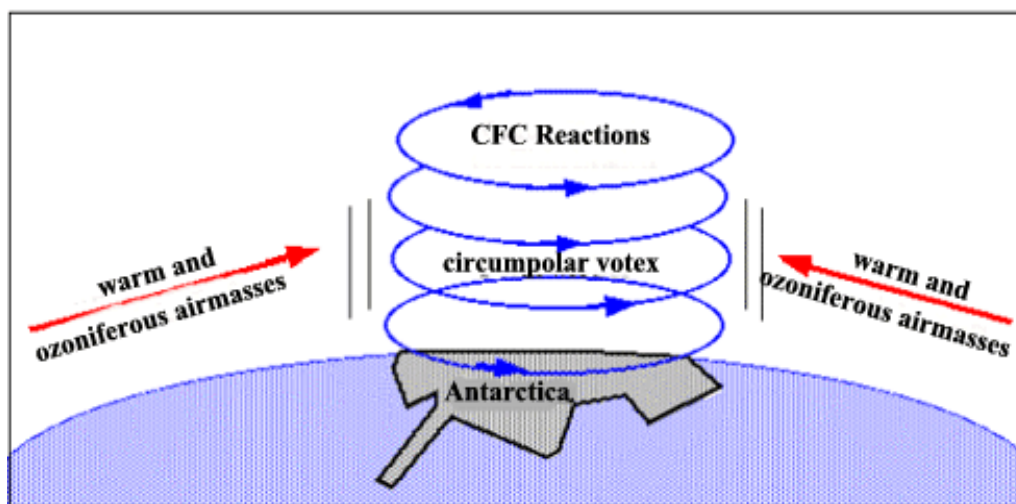
Στο Σχήμα 1.7 παρουσιάζεται η κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης του όζοντος στο Halley Bay στην Ανταρκτική (N. Πόλος) μεταξύ 0-35 χλμ. τον Αύγουστο και τον Οκτώβριο του 1994 (La Meteorologie, 1996). Είναι φανερή η σχεδόν ολοκληρωτική καταστροφή του όζοντος τον Οκτώβριο του 1994. Σήμερα, οι ελάχιστες τιμές του ολικού όζοντος είναι της τάξης των 100 D.U., αντί για τις φυσιολογικές τιμές των 300 D.U., για την περίοδο της πολικής άνοιξης. Υπολογίζεται ότι στην Ανταρκτική κάθε άνοιξη η μάζα του O_3 που καταστρέφεται είναι περίπου 80 Mtons.



Σχήμα 1.7. Κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης του όζοντος στο Halley Bay στην Ανταρκτική(N. Πόλος) μεταξύ 0-35 χλμ. τον Αύγουστο και τον Νοέμβριο του 1987, Σεπτέμβριο 1994, Οκτώβριο 1993 και 1994



Σχημα 1.8 Σχηματισμός και καταστροφή του στρατοσφαιρικού όζοντος



Σχημα 1.9 Στοβιλισμοι αεριων μαζών πάνω από την Ανταρκτική

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. ESPERE (Climate Encyclopaedia), www.espere.net
2. Φυσική της Ατμόσφαιρας, Α.Παπαγιάννης, σημειώσεις μαθηματος «Περιβάλλον & Ανάπτυξη» σχολής ΣΕΜΦΕ
3. Ανοργάνη & Γενική χημεία, Εβη Μάνεση-Ζούπα, τομος 4^{ος} «Τα αντιπροσωπευτικά στοιχεία και οι ενώσεις τους», Εκδόσεις ΕΑΠ για την ενότητα ΦΥΕ-12
4. Environmental Science Published for Everybody Round the Earth Educational Network on Climate, author: Dr. Elmar Uherek - Max Planck Institute for Chemistry, Mainz, Germany.
<http://www.atmosphere.mpg.de/>
5. National Aeronautics and Space Administration (NASA), Ozone Hole Watch, <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>
6. University of Athens, Department of Chemistry, «Οζόν Η χημική ένωση του μηνά» [Ιούλιος 2009],
http://www.chem.uoa.gr/chemicals/chem_ozone.htm
7. Wikipedia: "Ozone layer",
http://en.wikipedia.org/wiki/Ozone_layer
8. NASA (educational resources): "Stratospheric Ozone depletion",
<http://www.nas.nasa.gov/About/Education/Ozone/>
9. U.S. Environmental Agency: "Class I Ozone-depleting Substances",
<http://www.epa.gov/ozone/science/ods/classone.html>
10. The Ozone hole, www.theozonehole.com
11. New Scientist, January 2009 “Why mountains are bad for the ozone layer”
12. Environmental Pollution, S.M.Shafi, Atlantic Publishers 2005, chapter 8

2ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

2.1 Σύντομη ιστορία των πυρηνικών όπλων.

Αναφορές:

{3, Κεφάλαιο 13}, {6, Κεφάλαιο 45}, {7, Κεφάλαιο 2}
{9, Κεφάλαιο 11}, {14, timeline }, {17, chapter 1}

Το 1898 ο Rutherford βρήκε ότι το ουράνιο εξέπεμπε δύο διαφορετικά σωματίδια τα οποία ονόμασε α και β. Πέντε χρόνια αργότερα έκανε την παρατήρηση ότι η δύναμη που προκαλούσε αυτή την εκπομπή δεν μπορούσε να είναι ούτε η βαρύτητα (38 τάξεις μεγέθους μικρότερη) ούτε ο Ηλεκτρομαγνητισμός που προκαλεί τις χημικές αντιδράσεις και επειδή η καινούρια αυτή δύναμη εξέλυε ενέργεια περίπου ένα εκατομμύριο φορές περισσότερη από τις κανονικές χημικές αντιδράσεις την ονόμασε “ισχυρή” δύναμη.

Τελικά ο δεύτερος παγκόσμιος πόλεμος έδωσε το έναυσμα στην κυβέρνηση των ΗΠΑ να εγκρίνουν τα απαιτούμενα κονδύλια και την χρησιμοποίηση του ανθρώπινου δυναμικού που χρειάστηκαν για να επιτευχθεί η αξιοποίηση της ενέργειας του πυρήνα.

Επιπλέον, ένας αριθμός ανακαλύψεων συμπλήρωσε την εικόνα της δομής της ύλης η οποία οδήγησε τους Φυσικούς και τους Μηχανικούς που συγκεντρώθηκαν στο Los Alamos στις αρχές του 1942 να εφεύρουν τον τρόπο να απελευθερώσουν την ενέργεια που έκρυβε ο πυρήνας.

Το 1911 ο Rutherford ανακάλυψε ότι η ύλη αποτελείται από άτομα που έχουν έναν πυρήνα (η λέξη που χρησιμοποίησε) ο οποίος αποτελείται από σωματίδια που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με την ισχυρή δύναμη, μερικά εκ των οποίων είναι θετικά φορτισμένα και περιβάλλονται από αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια που συγκρατούνται πλησίον του πυρήνα από ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις.

Ο ρυθμός των πυρηνικών ανακαλύψεων επιταχύνθηκε μετά το 1930. Αυτό το χρόνο δύο Γερμανοί Φυσικοί, οι W.Bothe και H.Becker παρατήρησαν ότι όταν το Βηρύλλιο βομβαρδιστεί με σωματίδια α εκπέμπει ένα σωματίδιο χωρίς φορτίο. Ένα χρόνο αργότερα η Irene Curie και ο σύζυγός της Frederick Joliot παρατήρησαν ότι αυτό το ουδέτερο σωματίδιο μπορούσε να εκβάλλει πρωτόνια από την παραφίνη. Αλλά έμελλε στον James Chadwick να δείξει το 1932 ότι αυτό το σωματίδιο είχε περίπου τη μάζα του πρωτονίου και αλληλεπιδρούσε μαζί του μέσω της ισχυρής δύναμης. Είχε εντοπίσει το νετρόνιο.

Η εικόνα του πυρήνα ήταν πια πλήρης. Αποτελείται από πρωτόνια και ένα αριθμό νετρονίων. Όλα αυτά τα σωματίδια αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με την ισχυρή (πυρηνική) δύναμη η οποία, μέσα στην εμβέλειά της ($2-3 \times 10^{-13} \text{ cm}$) είναι ελκτική και περίπου 10^3 φορές ισχυρότερη από την ηλεκτρομαγνητική δύναμη, συνεπώς υπερνικάει την άπωση Coulomb μεταξύ των πρωτονίων μέσα στον πυρήνα.

Ένα ακόμα πιο σημαντικό στοιχείο για την εξερεύνηση των πυρηνικών ιδιοτήτων ήταν ότι το νετρόνιο, αφού είναι ουδέτερο και ίσου βάρους με το πρωτόνιο, μπορούσε να διαπεράσει το νέφος των ατομικών ηλεκτρονίων και να διεισδύσει στον πυρήνα ανεμπόδιστο από ηλεκτρικές δυνάμεις. Είναι συνεπώς το τέλειο σωματίδιο με το οποίο οι Φυσικοί μπόρεσαν να μελετήσουν τις ιδιότητες του πυρήνα και τελικά να τον διασπάσουν.

Αυτό ακριβώς έκαναν δύο Γερμανοί Φυσικοί, οι Hahn και Strassmann στα τέλη του 1938, βομβάρδισαν Ουράνιο με νετρόνια και ανακάλυψαν ότι μερικοί από τους πυρήνες Ουρανίου είχαν σχασθεί σε πυρήνες Βαρίου και Κρυπτού, έχοντας ο καθένας περίπου τη μισή μάζα του πυρήνα Ουρανίου. Το 1938 η Lise Meitner και ο ανιψιός της Otto Frisch υπολόγισαν ότι το άθροισμα των μαζών των θυγατρικών πυρήνων που προέκυπταν από τη σχάση αυτή ήταν μικρότερο από τη μάζα του μητρικού πυρήνα ουρανίου, συνάγοντας έτσι ότι τουλάχιστον κάποιο μέρος αυτής της μάζας που έλειπε πρέπει να έχει εκλυθεί ως ενέργεια σύμφωνα με την πρόβλεψη του Einstein ότι $E=mc^2$. Ακόμη, ανακαλύφθηκε ότι το άθροισμα των νετρονίων του Βαρίου και του Κρυπτού ήταν μικρότερο από τον αριθμό των νετρονίων στο μητρικό πυρήνα Ουρανίου.

Άρα λοιπόν η σχάση που προκλήθηκε από τον βομβαρδισμό του Ουρανίου με νετρόνια οδηγούσε όχι μόνο στην έκλυση ενέργειας αλλά και στην εκπομπή επιπλέον νετρονίων. Ο Leo Szilard διατύπωσε τη θεωρία ότι, με δεδομένη κατάλληλη ενέργεια, αυτά τα πρόσθετα νετρόνια θα μπορούσαν να σχάζουν επιπλέον πυρήνες ουρανίου που με τη σειρά τους θα εξέπεμπαν επιπλέον νετρόνια κι έτσι θα δημιουργηθεί μία αλυσιδωτή αντίδραση η οποία θα ελευθέρωνε το τεράστιο ποσό ενέργειας που περιέχεται στους βαρείς πυρήνες.

Μέχρι το Μάρτιο του 1939 οι Szilard και Enrico Fermi δουλεύοντας και οι δύο στο πανεπιστήμιο Columbia αλλά ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο, είχαν πιστοποιήσει ότι τουλάχιστον μερικά από τα νετρόνια που εκπέμπονται από τη σχάση των πυρήνων Ουρανίου ήταν αρκετά ενεργητικά για να σχάσουν νέους πυρήνες Ουρανίου. Έτσι, μια αυτοσυντηρούμενη αλυσιδωτή αντίδραση σε μία μάζα Ουρανίου κατά τη διάρκεια της οποίας δύο ή περισσότερα νετρόνια θα παράγονταν σε κάθε σχάση και έχοντας αρκετή ενέργεια και ταχύτητα ώστε να διασπάσουν νέους πυρήνες Ουρανίου σε μικρό χρονικό διάστημα θα απελευθέρωναν έτσι ένα ολοένα αυξανόμενο ποσό ενέργειας, τόσο γρήγορα ώστε να προκληθεί μία βίαιη έκρηξη.

Το αν μια τέτοια αλυσιδωτή αντίδραση μπορεί να συντηρηθεί εξαρτάται από τη μοίρα των νετρονίων που γεννώνται από τη σχάση των πυρήνων του Ουρανίου. Ένα νετρόνιο μπορεί είτε να διαφύγει από τη μάζα του ουρανίου χωρίς αλληλεπίδραση, ή να συλληφθεί από έναν πυρήνα χωρίς να προκαλέσει σχάση ή να σκεδαστεί ελαστικά ή ανελαστικά ή τέλος να σχάσει ένα πυρήνα δημιουργώντας δύο ή περισσότερα νέα νετρόνια και εκλύοντας μερική ενέργεια. Η σχετική πιθανότητα αυτών των αντιδράσεων καθορίζει την εφικτότητα της αλυσιδωτής αντίδρασης.

Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης των νετρονίων με τους πυρήνες μπορεί να περιγραφεί ποσοτικά με την έννοια της “ενεργού διατομής”, η οποία είναι ένα μέτρο της πιθανότητας να συμβεί μια δεδομένη αντίδραση μεταξύ ενός νετρονίου δεδομένης ενέργειας και ενός πυρήνα. Η ενεργός διατομή είναι συνάρτηση της ενέργειας του νετρονίου-βλήματος καθώς και της εσωτερικής δομής του πυρήνα-στόχου. Η ενεργός διατομή μπορεί να οριστεί ως:

Αριθμός γεγονότων ορισμένου τύπου ανά μονάδα χρόνου και ανά πυρήνα

$\sigma =$

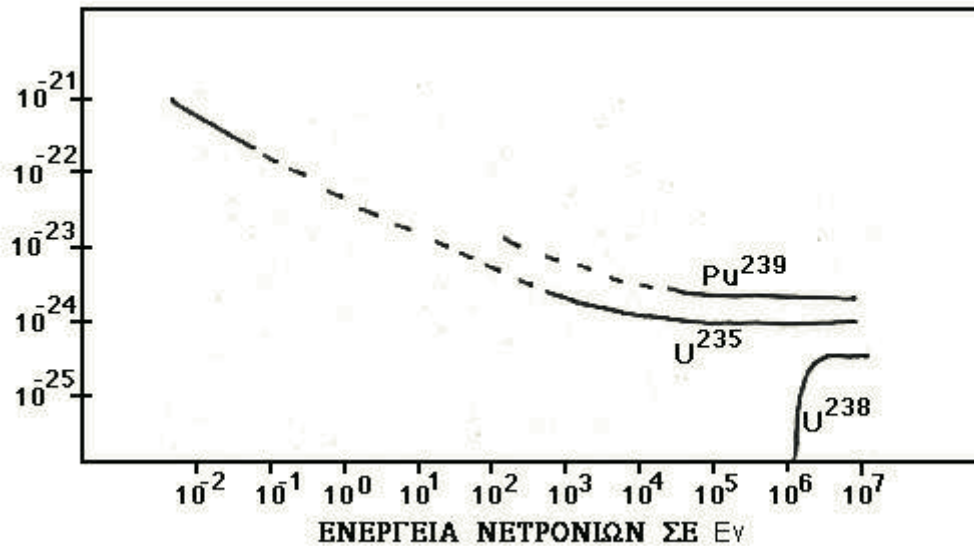
Αριθμός προσπιπτόντων σωματιδίων ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας

Με δεδομένες τις ενεργές διατομές της σύλληψης, σκέδασης, σχάσης ή απλής διαφυγής νετρονίων από ένα πυρήνα, υπάρχει μια ποσότητα μάζας αρκετά μεγάλη ώστε να συντηρήσει μία αλυσιδωτή αντίδραση. Αυτή η ποσότητα ονομάζεται “κρίσιμη μάζα”. Οποιαδήποτε μικρότερη ποσότητα δεν θα εκραγεί. Οποιαδήποτε μεγαλύτερη ποσότητα μπορεί να εκραγεί αυθόρμητα.

Ας θεωρήσουμε μία σφαίρα Ουρανίου ακτίνας r . Καθώς ο όγκος της μεταβάλλεται ανάλογα του r^3 ενώ η επιφάνειά της ανάλογα με το r^2 , για κάποιο r (πάντα σε συνάρτηση με την πυκνότητα του υλικού και τις ενεργές του διατομές σύλληψης, σκέδασης και σχάσης νετρονίου) θα έχουμε περισσότερα νετρόνια που προκαλούν σχάση από αυτά που διαφεύγουν από τη σφαίρα. Αυτή θα είναι η ακτίνα μιας σφαίρας Ουρανίου κρίσιμης μάζας r_c .

Στις αρχές του 1939 ο Δανός Φυσικός Niels Bohr κατά τη διάρκεια της επίσκεψής του στο πανεπιστήμιο Princeton, ανακοίνωσε ότι η ενεργός διατομή σχάσης του σπάνιου ισοτόπου του Ουρανίου, Ουρανίου U_{235} από νετρόνια οποιασδήποτε ενέργειας, ήταν πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ενεργό διατομή του άφθονου ισοτόπου U_{238} . (Στο Σχ. 2.1 φαίνεται ότι πράγματι το U_{238} δεν σχάται από νετρόνια χαμηλής ενέργειας.)

Το καλοκαίρι αυτού του χρόνου ο Otto Frisch, που ήταν πια στην Αγγλία, και ένας Γερμανός πρόσφυγας Φυσικός, ο Rudolph Peierls, υπολόγισαν ότι μία μάζα U_{235} μεγέθους πορτοκαλιού και βάρους μερικών κιλών, αποτελεί την κρίσιμη μάζα που μπορεί να συντηρήσει μία ταχεία αλυσιδωτή αντίδραση.



Σχ. 2.1. Η ενεργός διατομή ως συνάρτηση της ενέργειας των νετρονίων.

Η χρήση βραδέων νετρονίων για τη σχάση του U^{235} ήταν ενεργητικώς πιθανή, αλλά η αλυσιδωτή αντίδραση μέσα σε μια σφαίρα U^{235} θα χρειαζόταν μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου για να ολοκληρωθεί. Έως τότε όμως το Ουράνιο θα είχε αρχίσει να εξατμίζεται από την ενέργεια που εκλύουν οι σχάσεις και να διασκορπίζεται καταλήγοντας έτσι σε μη εκρηκτικό αποτέλεσμα. Τα ταχέα νετρόνια όμως, με ταχύτητες ενός δεκάτου της ταχύτητας του φωτός, θα επέτρεπαν ένα μεγάλο κλάσμα του U^{235} μιας κρίσιμης μάζας να σχασθεί πριν η μάζα του Ουρανίου διασκορπιστεί. Μέχρι τις αρχές του 1940 οι Frisch και Peierls είχαν περιγράψει ένα σωστό σχεδιάγραμμα ενός πυρηνικού όπλου βασισμένο σε αυτή τη θεωρητική παρατήρηση.

2.2 Μελέτη της Πυρηνικής σπάσης

2.2.1 Η καμπύλη της ενέργειας σύνδεσης

Αναφορές:

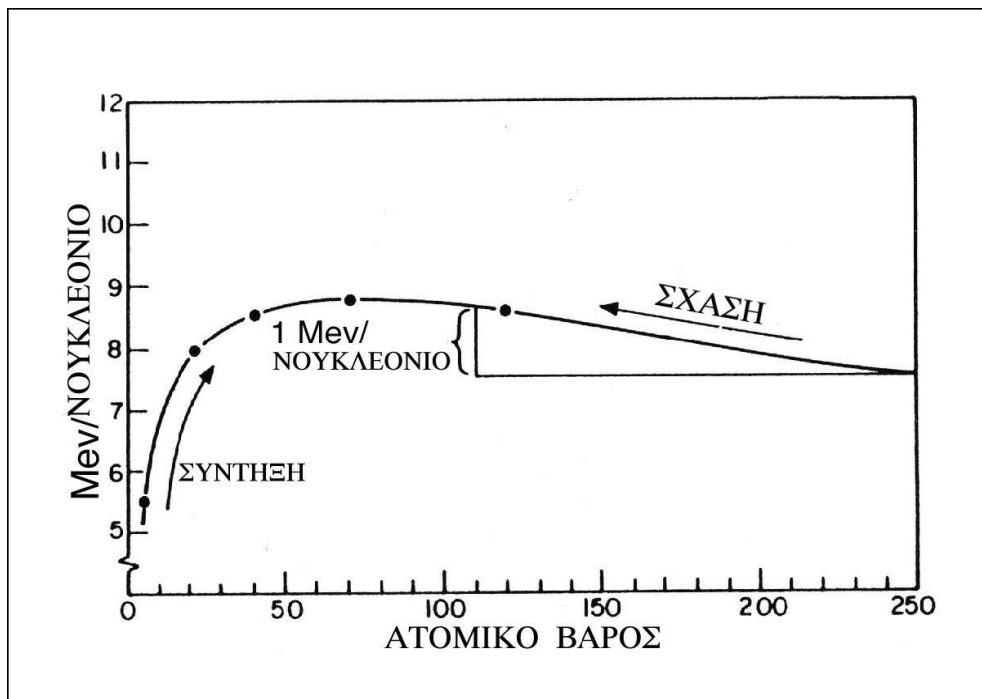
{1, Κεφάλαιο 1}, {3, Κεφάλαιο 13}, {6, Κεφάλαιο 45},
{7, Κεφάλαιο 2}, {8, Κεφάλαιο 45}, {9, Κεφάλαιο 13}

Το 1927 ο Βρετανός Φυσικός W.R.Aston δημοσίευσε ακριβείς μετρήσεις ατομικών βαρών που έδειχναν ότι το βάρος του πυρήνα είναι μικρότερο από το άθροισμα των βαρών των πρωτονίων και των νετρονίων που τον αποτελούν:

$$M_{\text{nucleus}} = ZM_{\text{proton}} + (A-Z)M_{\text{neutron}} - \delta M$$

όπου Z είναι ο αριθμός των πρωτονίων του πυρήνα (Ατομικός αριθμός), A είναι το ατομικό βάρος (το άθροισμα νετρονίων και πρωτονίων του πυρήνα-Μαζικός αριθμός) και δM το “έλλειμμα μάζας”.

Έγινε αμέσως αντιληπτό ότι το έλλειμμα μάζας είχε μετατραπεί στην ενέργεια E_{binding} που απαιτείται για τη δέσμευση των νουκλεονίων (πρωτονίων, νετρονίων) μέσα στον πυρήνα. Συνεπώς σύμφωνα με τη γνωστή σχέση του Einstein: $E_{\text{binding}} = (\delta M)c^2$. Αν διαιρέσουμε την ποσότητα E_{binding} με τον αριθμό A , το ατομικό βάρος του πυρήνα θα έχουμε $f = E_{\text{binding}} / A$ την ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο. Όπως δείχνει το σχ. 2.2, η f μεταβάλλεται αργά με το A . Αυτό δείχνει ότι η εμβέλεια της πυρηνικής δύναμης είναι πολύ περιορισμένη. Η f γίνεται μέγιστη για πυρήνες μεταξύ $A=20$ και $A=140$ αλλά ελαττώνεται καθώς το A αυξάνει. Η ενέργεια ανά νουκλεόνιο (f) είναι περίπου το ποσό της ενέργειας που πρέπει να βάλει κάποιος σε ένα πυρήνα για να καταφέρει να αφαιρέσει ένα μοναδικό νουκλεόνιο από αυτόν. Μέσα στον πυρήνα η άπωση των πρωτονίων είναι πολύ μικρότερη από την ελκτική πυρηνική δύναμη που συγκρατεί τον πυρήνα.



Σχ. 2.2. Η μεταβολή της ενέργειας σύνδεσης ανά νουκλεόνιο ως συνάρτηση του ατομικού βάρους του πυρήνα.

Όμως επειδή η άπωση Coulomb αυξάνεται με το τετράγωνο του Z , γίνεται ισχυρή για μεγάλους αριθμούς A και αφού η ηλεκτροστατική άπωση αντιτάσσεται στη συνδεδετική δράση της πυρηνικής δύναμης η ολική ενέργεια σύνδεσης μειώνεται για μεγάλα A . Τα νουκλεόνια μέσα σε ένα πυρήνα Ουρανίου με $A=238$ (ή Πλουτωνίου με $A=239$) έχουν χαλαρότερη σύνδεση, από ότι έχουν σε ένα πυρήνα σιδήρου με $A=56$, συνεπώς τα νουκλεόνια μέσα σε ένα πυρήνα Ουρανίου ή Πλουτωνίου έχουν περισσότερη ελευθερία να κινούνται απ'ότι όταν είναι μέσα σε μικρότερους πυρήνες.

Καθώς χρειάζεται περισσότερη ενέργεια για να αφαιρέσουμε ένα νουκλεόνιο από έναν ισχυρά συνδεδεμένο πυρήνα παρά από ένα πυρήνα με μεγάλο A συνάγεται ότι τα νουκλεόνια είναι πιο σφιχτά συνδεδεμένα το ένα με το άλλο μέσα σε μικρούς πυρήνες άρα έχουν λιγότερη κινητική ενέργεια. Συνεπώς όταν ένας βαρύς πυρήνας όπως του Ουρανίου (ή του Πλουτωνίου) διασπάται σε δύο μικρότερους και έτσι πιο ισχυρά συνδεδεμένους πυρήνες, κάθε νουκλεόνιο του Ουρανίου (ή Πλουτωνίου) χάνει περίπου 1 MeV ενέργειας (δες σχ. 2.2). Έτσι η ολική ενέργεια που απελευθερώνεται από έναν πυρήνα Πλουτωνίου ($A=239$) που διασπάται σε δύο θραύσματα με $Z=50$ και $Z=44$ αντίστοιχα, θα είναι $239 \times (8,5-7,6)=216MeV$ (δες σχ. 2.2 για την πηγή των αριθμών στην παρένθεση).

Αυτή είναι η ενέργεια που εκλύεται από τη σχάση κάθε πυρήνα Πλουτωνίου και είναι πραγματικά πολύ μικρή ($9 \times 10^{-12} \text{ calories}$), αλλά μόνο ένα γραμμάριο Πλουτωνίου περιέχει $2,5 \cdot 10^{21}$ πυρήνες και αν ο καθένας τους διασπαστεί, τότε αυτό το γραμμάριο του σχάσιμου υλικού θα ελευθερώσει $22,5 \times 10^9 \text{ calories}$.

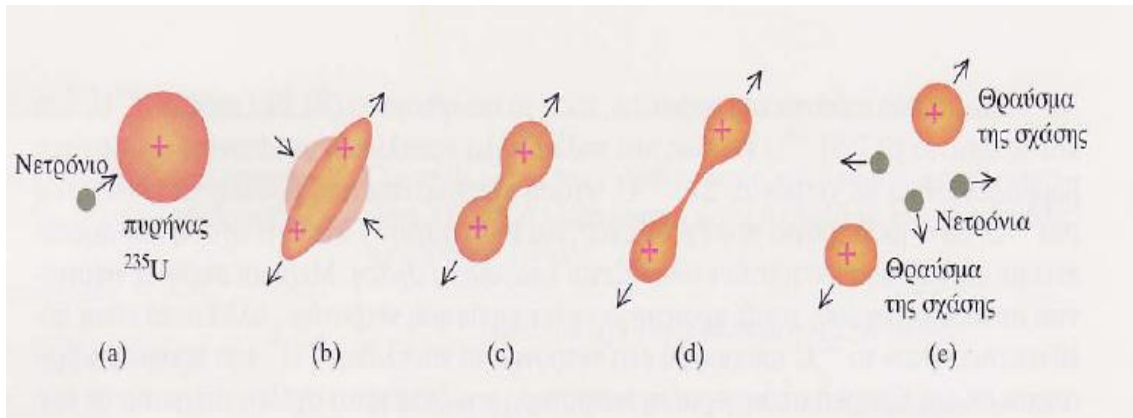
Για να κάνουμε μία σύγκριση, ένα γραμμάριο χημικού εκρηκτικού, όπως η TNT, εκλύει 10^3 calories . Συνεπώς, θεωρητικά, γραμμάριο προς γραμμάριο τα πυρηνικά εκρηκτικά εκλύουν πάνω από ένα εκατομμύριο φορές περισσότερη ενέργεια από τα χημικά εκρηκτικά.

2.2.2 Η σχάση ενός πυρήνα U_{235}

Αναφορές:

{1, Κεφάλαιο 3}, {3, Κεφάλαιο 14}, {5, Κεφάλαιο 10},
 {4, Κεφάλαιο 9}, {8, Κεφάλαιο 45}, {9, Κεφάλαιο 13}

Για το φαινόμενο της σχάσης που μελετούμε είναι δόκιμο να θεωρήσουμε τον πυρήνα ως μια σταγόνα υγρού. Αντί της γνωστής επιφανειακής τάσης που συγκρατεί τις σταγόνες, μπορούμε να σκεφτούμε ότι τον ίδιο ρόλο παίζει η ελκτική πυρηνική δύναμη που δίνει στον πυρήνα μια σφαιρική μορφή με ακτίνα μερικών 10^{-12} cm (σχ. 2.3 a). Όταν ένα νετρόνιο προσκρούει σε έναν πυρήνα τον θέτει σε ταλαντωτική κίνηση. Χρειάζονται περίπου 6 MeV για να τεθεί ο πυρήνας σε ταλαντωτική κίνηση που τελικά θα τον διασπάσει.



Σχήμα 2.3: οι φάσεις της σχάσης

Η απορρόφηση ενός νετρονίου παρέχει 5,5 MeV στον πυρήνα ανεξάρτητα από την κινητική ενέργεια του νετρονίου.

Στην περίπτωση του U_{235} όταν ένα νετρόνιο διεισδύει στον πυρήνα και συλληφθεί απ' αυτόν, τότε αυτός αναδιατάσσεται εσωτερικά γεγονός που εκλύει περίπου 2 MeV. Τη στιγμή αυτή ο πυρήνας έχει ένα πλεόνασμα 7,5 MeV (σχ. 2.3 b) και τώρα αρχίζει να ταλαντώνεται πιο βίαια.

Καθώς επιμηκύνεται, μερικά από τα νουκλεόνια βγαίνουν από την ακτίνα δράσης της πυρηνικής δύναμης των υπολοίπων και συνεπώς οι ηλεκτροστατικές απωστικές δυνάμεις αρχίζουν να κυριαρχούν (σχ. 2.3 c) και απομακρύνουν ακόμη περισσότερο τα άκρα του πυρήνα, ενώ οι πυρηνικές δυνάμεις τείνουν να κρατήσουν το κάθε άκρο σταθερά συνδεδεμένο. Μέσα σε 10^{-20} sec από τη διείσδυση του νετρονίου στον πυρήνα, αυτός έχει διασπαστεί σε δύο τμήματα (σχ. 2.3 d).

Όμως τώρα οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις, τις οποίες ανταγωνίζονταν οι πυρηνικές, υπερτερούν. Ας υποθέσουμε ότι ο πυρήνας έχει διασπαστεί σε δύο θραύσματα με $Z=50$ και $Z=42$. Τότε όταν αυτά έχουν απομακρυνθεί σε απόσταση $d=15 \cdot 10^{-13}$ cm (10^{-20} sec μετά τη σχάση) η ενέργεια Coulomb θα είναι :

$$\frac{Z_1 Z_2 e^2}{d} = \frac{50 \cdot 40 e^2}{15 \cdot 10^{-13}} \approx 200 eV$$

όπου e το φορτίο του ηλεκτρονίου.

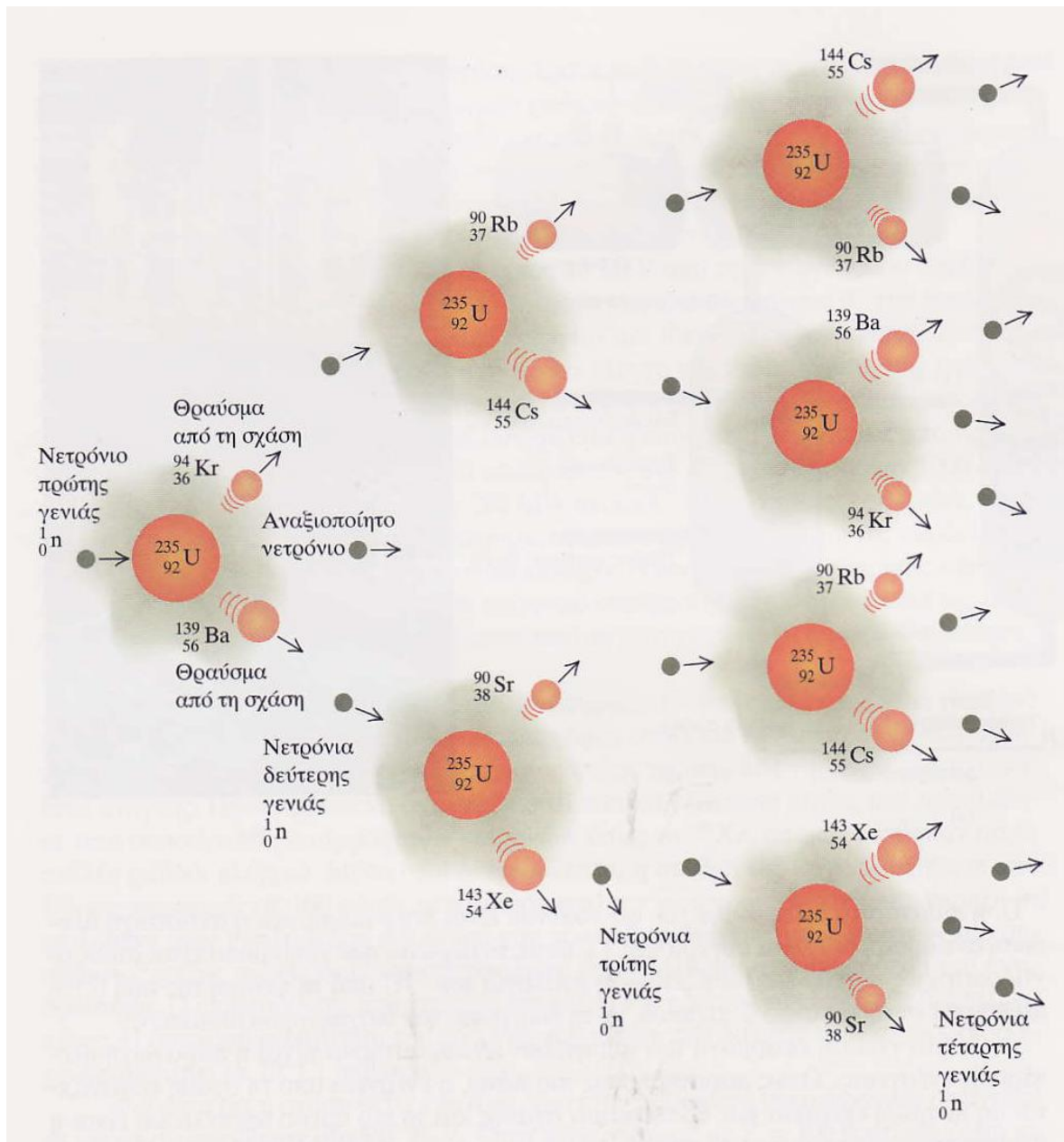
Άρα από τα 216 MeV που εκλύονται στη σχάση, περίπου 200 MeV μετατρέπονται σε κινητική ενέργεια των δύο θραυσμάτων της σχάσης. Η ταχύτητά τους κατά τη διάσπαση είναι περίπου 10^9 cm / sec, περίπου ένα δέκατο της ταχύτητας του φωτός. Αλλά αυτά τα θραύσματα έχουν πάρα πολλά νετρόνια και έτσι σε 10^{-18} sec από την έναρξη της σχάσης το καθένα εκπέμπει ένα ή περισσότερα νετρόνια τα οποία κινούνται κατά τη διεύθυνση της τροχιάς των θραυσμάτων αν και τα νετρόνια εκπέμπονται ισότροπα από κάθε θραύσμα (σχ. 2.3 e).

Αυτά τα νετρόνια έχουν μία Maxwellian κατανομή ενεργειών με μέγιστο στα 2 MeV. Έτσι κάθε νετρόνιο αφαιρεί περίπου 10 MeV από τα θραύσματα (περίπου 8 MeV ενέργεια διαχωρισμού και 2 MeV κινητική ενέργεια). Τα δύο θραύσματα μπορεί να είναι ακόμα σε διεγερμένη κατάσταση, κι όταν δε μπορούν να αποδιεγερθούν με εκπομπή νετρονίων, τότε αρχίζουν και εκπέμπουν ακτίνες γάμα σε χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από 10^{-15} sec από τη δημιουργία τους.

Τελικά, σε χρόνους χαρακτηριστικούς της ασθενούς δύναμης που προκαλεί τη β-διάσπαση, δηλαδή μετά από περίπου 10^{-5} sec, τα θραύσματα αρχίζουν να εκπέμπουν ακτίνες βήτα (ηλεκτρόνια) και νεutrίνο καθώς κάποια από τα διεγερμένα νετρόνια μετατρέπονται σε πρωτόνια.

2.2.3 Η αλυσιδωτή αντίδραση

Ο μηχανισμός αλυσιδωτής αντίδρασης λαμβάνει χώρα σε μια συλλογή πυρήνων ο οποίος μπορεί να ελευθερώσει ένα μεγάλο ποσό ενέργειας σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα προκαλώντας έτσι μια πυρηνική έκρηξη. Το σχ. 2.4 δείχνει την αρχή της αλυσιδωτής αντίδρασης.



Σχ. 2.4 αρχή της αλυσιδωτής αντίδρασης.

Αυτό που συντηρεί την αλυσίδα είναι το γεγονός ότι για κάθε νετρόνιο που συγκρούεται με έναν πυρήνα, απορροφάται απ' αυτόν και τον διασπά, παράγονται δύο ή περισσότερα νετρόνια. Αυτό, καθ' όσον γνωρίζουμε, είναι ένα τυχαίο γεγονός. Εάν κάθε νετρόνιο που απορροφάται προξενούσε τη δημιουργία μόνο ενός καινούριου νετρονίου θα χρειαζόταν 10^{13} sec, περίπου ένα εκατομμύριο χρόνια για να διασπαστεί ένα γραμμομόριο U^{238} ή Pu^{239} πυρήνων ($6 \cdot 10^{23}$ πυρήνες). Η κατάσταση είναι τελείως διαφορετική όταν εκπέμπονται δύο τουλάχιστο νετρόνια σε κάθε σχάση, διότι μετά από n διπλασιασμούς ο αριθμός των νετρονίων που θα παραχθούν θα είναι 2^n . Ας θεωρήσουμε μια κρίσιμη μάζα Pu^{239} , περίπου 10.000 gr.

Ο αριθμός των πυρήνων της μάζας αυτής θα είναι $(10.000/240) \cdot 6 \cdot 10^{23} = 2,5 \cdot 10^{25}$ πυρήνες.

Ο αριθμός λοιπόν των νετρονίων που απαιτούνται για τη σχάση όλων των πυρήνων Pu^{239} θα υπολογιστεί ως εξής: $2^n = 2,5 \cdot 10^{25}$. Λογαριθμίζοντας, θα έχουμε $n = 84$.

Άρα μετά από 84 διπλασιασμούς θα υπάρχουν αρκετά νετρόνια για να σχάσουν όλους τους πυρήνες στα 10 Kgr μάζας Pu^{239} .

Κάθε διπλασιασμός χρειάζεται χρόνο τ για να ολοκληρωθεί, όπου τ είναι ο χρόνος που χρειάζεται ένα νετρόνιο για να σχάσει έναν πυρήνα Pu^{239} συν το χρόνο που χρειάζεται το παραχθέν νετρόνιο για να συναντήσει τον επόμενο πυρήνα. Η διαδικασία της σχάσης χρειάζεται περίπου 10^{-22} sec.

Κατά μέσο όρο, η "μέση ελεύθερη διαδρομή" αυτών των νετρονίων, δηλαδή η απόσταση που ταξιδεύουν πριν συγκρουστούν με έναν άλλο πυρήνα είναι περίπου 3cm. Τα ταχέα νετρόνια κινούνται περίπου με το ένα δέκατο της ταχύτητας του φωτός.

$$\text{Άρα } \tau = \frac{3 \text{ cm}}{3 \cdot 10^9 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}} = 10^{-9} \text{ sec}$$

Δηλαδή ο χρόνος τ είναι περίπου ένα nanosecond. Συνεπώς 84 διπλασιασμοί θα ολοκληρωθούν σε 84 nanoseconds, πολύ λιγότερο από ένα εκατομμυριοστό του δευτερολέπτου. Η ενέργεια που θα εκλυόταν εάν όλοι οι πυρήνες των 10Kgr του Pu^{239} σχάζονταν θα είναι:

Αφού κάθε πυρήνας εκλύει περίπου 220MeV το σύνολο θα ήταν

$$\left(\frac{10.000 \text{ gr}}{240 \text{ gr}} \right) \times 6 \cdot 10^{23} \times 220 \text{ MeV} = 5,5 \cdot 10^{27} \text{ MeV}$$

ή αλλιώς $2 \cdot 10^{14}$ calories και καθώς ένα γραμμάριο TNT εκλύει 10^3 cal η τέλεια σχάση των 10Kgr Pu^{239} θα ελευθέρωνε ενέργεια ίση με αυτή που ελευθερώνεται από $2 \cdot 10^5$ τόνους TNT.

Είναι αξιοπρόσεχτο ότι μετά από 74 διπλασιασμούς, ο αριθμός των νετρονίων που θα έχουν παραχθεί θα είναι $2^{74} = 1,9 \cdot 10^{22}$ δηλαδή χίλιες φορές λιγότερα από τον αριθμό των νετρονίων 10 διπλασιασμούς αργότερα. Όμως ακόμη και αυτός ο αριθμός των νετρονίων θα μπορούσε να διασπάσει ίσο αριθμό πυρήνων Pu^{239} και να ελευθερώσει περίπου 10^{11} cal, αρκετή ενέργεια δηλαδή για να εξατμίσει την υπόλοιπη μάζα Pu^{239} που δεν είχε σχασθεί.

Κάτω από ιδανικές συνθήκες, η αλυσιδωτή αντίδραση θα συνεχίζονταν μέχρι όλο το σχάσιμο υλικό να εξαντληθεί, δηλαδή μέχρι να σχαστούν όλοι οι $2,5 \cdot 10^{25}$ πυρήνες των 10Kgr Pu^{239} . Στην πραγματικότητα όμως η εξατμιζόμενη μάζα του Pu^{239} διαστέλλεται αυξάνοντας έτσι την επιφάνειά της έτσι ώστε η πιθανότητά διαφυγής ενός νετρονίου από το λιγότερο πυκνό υλικό βρίσκοντας διέξοδο από την επιφάνεια της άσχαστης μάζας του Pu^{239} , αυξάνεται. Σε κάποια στιγμή η διαστολή του υλικού θα αυξήσει τόσο την πιθανότητα διαφυγής νετρονίων από το άσχαστο υλικό, ώστε η αλυσιδωτή αντίσταση να μη μπορεί να συντηρηθεί και μοιραία η έκλυση της ενέργειας να σταματήσει. Άρα η ολική ενεργειακή απόδοση των 10 Kgr Pu^{239} θα εξαρτηθεί από τον αριθμό των διπλασιασμών που η αλυσιδωτή αντίδραση μπορεί να πραγματοποιήσει πριν το πυρηνικό υλικό διασκορπιστεί.

Ασφαλώς, κατά τη διάρκεια της αλυσιδωτής αντίδρασης κάποια νετρόνια δε συναντούν κάποιο πυρήνα Pu^{239} για να τον σχάσουν. Ειδικότερα, κάποια διαφεύγουν, ακόμη και πριν η διαστολή του υλικού λάβει χώρα και κάποια παίρνουν μέρος σε πυρηνικές αντιδράσεις διαφορετικές από τη

σχάση. Αυτό ουσιαστικά αυξάνει το χρόνο διπλασιασμού κάθε διαδοχικής γενιάς νετρονίων σε μερικά nanoseconds (δισεκατομμυριοστά του δευτερολέπτου) κατά μέσο όρο.

Στην ιδανική περίπτωση όπου όλοι οι πυρήνες των 10Kgr Pu^{239} έχουν σχασθεί, η ολική ενέργεια που εκλύεται είναι $5,5 \cdot 10^{27}\text{MeV}$. Στο τέλος της διαδικασίας της σχάσης όλη αυτή η ενέργεια περιέχεται σε έναν όγκο περίπου $10.000/15 = 660\text{ cm}^3$ τον αρχικό δηλαδή όγκο της σφαίρας Pu^{239} αφού η πυκνότητα του Pu^{239} είναι $\rho = 15\text{gr/cm}^3$. Άρα η πυκνότητα ενέργειας (ε) της σφαίρας του σχασμένου υλικού πριν τη διαστολή είναι $\varepsilon = 8,8 \cdot 10^{21}\text{ergs}/660\text{cm}^3$ ή αλλιώς $\varepsilon = 1,3 \cdot 10^{19}\text{ erg/cm}^3$. Αυτή η ενέργεια μοιράζεται ανάμεσα στο σχασμένο υλικό και το πεδίο ακτινοβολίας σύμφωνα με τη σχέση:

$$\varepsilon = C_V T + C_R T^4$$

όπου $C_V = 6,2 \cdot 10^7$ και $C_R = 7,6 \cdot 10^{-15}$

$$\text{ή } 1,3 \cdot 10^{19} = 6,2 \cdot 10^7 T + 7,6 \cdot 10^{-15} T^4 .$$

Για τόσο μεγάλες πυκνότητες ενέργειας ο όρος της ακτινοβολίας κυριαρχεί.

Συνεπώς: $14,3 \cdot 10^{19} \approx 7,6 \cdot 10^{-15} T^4$. Άρα $T \approx 10^8\text{ K}$.

Αφού η μάζα του Pu^{239} δεν έχει ακόμα διασταλεί, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η αύξηση της πίεσης θα είναι ανάλογη της αύξησης της T σύμφωνα με το νόμο των ιδανικών αερίων. Συνεπώς μπορούμε να συμπεράνουμε ότι στο τέλος της αλυσιδωτής αντίδρασης τα θραύσματα της σχάσης των 10 Kgr Pu^{239} θα έχουν μία πίεση 100 εκατομμυρίων ατμοσφαιρών και θα είναι σε μία θερμοκρασία 100 εκατομμυρίων βαθμών.

2.3 Μελέτη της πυρηνικής σύντηξης

Αναφορές:

{3, Κεφάλαιο 14}, {5, Κεφάλαιο 10}, {4, Κεφάλαιο 10},
 {6, Κεφάλαιο 46}, {8, Κεφάλαιο 45}, {9, Κεφάλαιο 13}

2.3.1 Η καμπύλη ενέργειας σύνδεσης για μικρά A

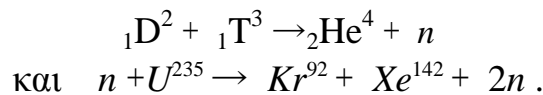
Ενώ η ελάττωση της ενέργειας σύνδεσης ανά νουκλεόνιο για μεγάλους αριθμούς A (δες σχ.2.2) οφείλεται στην ηλεκτροστατική άπωση των πρωτονίων στον πυρήνα, η απότομη ελάττωση του $f = E_{binding} / A$ για μικρά A είναι ένα επιφανειακό φαινόμενο. Τα νουκλεόνια της επιφάνειας είναι λιγότερο ισχυρά συνδεδεμένα από τα αντίστοιχα του εσωτερικού ενός μεγάλου πυρήνα. Για πολύ μικρούς πυρήνες το κλάσμα των νουκλεονίων της επιφάνειας είναι μεγάλο και συνεπώς η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο είναι μικρή. Αυτό γίνεται φανερό στον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 2.1 Ενέργεια σύνδεσης ανα νουκλεόνιο

Στοιχείο	Ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο
${}_1\text{D}^2$	1,1 MeV
${}_1\text{T}^3$	2,8 MeV
${}_2\text{He}^4$	7,0 MeV

Συνεπάγεται λοιπόν ότι η σύντηξη ελαφρών πυρήνων σε βαρύτερους θα εκλύει ενέργεια ακριβώς όπως η σχάση. Η μεγάλη κλίση της καμπύλης της ενέργειας σύνδεσης για μικρά A συνεπάγεται ότι η ανά νουκλεόνιο έκλυση ενέργειας στη σύντηξη θα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της σχάσης.

Πραγματικά ας θεωρήσουμε τις αντιδράσεις:



Στη διαδικασία της σύντηξης οι ολικές ενέργειες σύνδεσης των στοιχείων που συμμετέχουν θα είναι:

$${}_1\text{D}^2 + {}_1\text{T}^3 \rightarrow {}_2\text{He}^4 + n$$

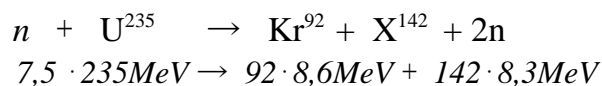
$$2 \cdot 1,1 \text{ MeV} + 3 \cdot 2,8 \text{ MeV} \rightarrow 4 \cdot 7,0 \text{ MeV} + n$$

Η διαφορά είναι $\Delta E = E_{\text{τελ}} - E_{\text{αρχ}} = 28 \text{ MeV} - 10,8 \text{ MeV} = 17 \text{ MeV}$

Άρα η ενέργεια που εκλύεται ανά νουκλεόνιο $= 17/5 = 3,4 \text{ MeV}$.

Από τα 17 MeV που εκλύονται, τα 14 MeV αποδίδονται στο ελαφρότερο νετρόνιο και η υπόλοιπη ενέργεια στον πυρήνα του Ηλίου.

Στη διαδικασία σχάσης, οι αντίστοιχες ενέργειες είναι:



Η διαφορά είναι $\Delta E = 207 \text{ MeV}$

Η ενέργεια που εκλύεται ανά νουκλεόνιο: $207/236 = 0,87 \text{ MeV}$.

Άρα η ενέργεια που εκλύεται ανά μονάδα μάζας στη σύντηξη είναι περίπου τετραπλάσια από την αντίστοιχη της σχάσης, ένα σαφές πλεονέκτημα στην περίπτωση οπλικών εφαρμογών.

Βασικά, υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί ελαφρών πυρήνων οι οποίοι όταν συντηχθούν εκλύουν ενέργεια. Όλοι όμως οι πυρήνες είναι θετικά φορτισμένοι και αφού για να συντηχθούν πρέπει να έλθουν σε απόσταση 2 ή 3 fermis (1 fermi = 10^{-13} cm ή 1 femtometer = 10^{-15} m) που είναι η ακτίνα δράσης των ισχυρών πυρηνικών δυνάμεων θα πρέπει παράλληλα να υπερνικήσουν το φράγμα

Coulomb της άπωσης μεταξύ δύο ομοίων φορτίων. Η ενέργεια που χρειάζεται για να υπερνικηθεί αυτή η κλασσική ηλεκτροστατική άπωση είναι:

$$E = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R}$$

όπου Z_1, Z_2 είναι τα φορτία των δύο πυρήνων, e το φορτίο του ηλεκτρονίου και R η απόσταση κατά την οποία η ισχυρότερη ελκτική πυρηνική δύναμη ξεπερνάει την άπωση Coulomb και οδηγεί στη σύντηξη.

2.3.2 Υπερνικώντας το φράγμα Coulomb

Φαίνεται αμέσως ότι ενώ οι πυρήνες με το μικρότερο Z θα απαιτούν τη λιγότερη ενέργεια για να συντηχθούν, θα πρέπει να έχουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ατομικό βάρος έτσι ώστε η σύντηξη να εκλύσει περισσότερη ενέργεια. Αυτό το γεγονός οδηγεί στην επιλογή των βαρέων ισotόπων του Υδρογόνου, Δευτερίου και Τριτίου ως οι πλέον κατάλληλοι πυρήνες για την έκλυση ενέργειας μέσω σύντηξης. Καθώς σ' αυτή την περίπτωση $Z_1=Z_2=1$, η ενέργεια που απαιτείται για να συντηχθούν θα είναι:

$$E_{DT} = \frac{(4,8 \times 10^{-10})^2}{5 \times 10^{-13}} = 4,6 \times 10^{-7} \text{ ergs} \sim 0,3 \text{ MeV}$$

Βέβαια, αυτό το αμιγώς κλασσικό φαινόμενο πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να συνυπολογιστεί το κβαντομηχανικό φαινόμενο "σήραγγος": Οι πυρήνες D και T μπορούν να συντηχθούν σε ενέργειες μικρότερες από $0,3 \text{ MeV}$ που απαιτούνται από το φράγμα Coulomb, αλλά όμως με μικρότερη πιθανότητα.

Για ενέργειες κάτω από το φράγμα Coulomb, η ενεργός διατομή της σύντηξης ελαφρών πυρήνων μπορεί να δοθεί προσεγγιστικά από:

$$\sigma(E_f) = \frac{C}{E_f} \exp\left(\frac{-27,4 M^{\frac{1}{2}} Z_1 Z_2 e^2}{h E_f^{\frac{1}{2}}}\right)$$

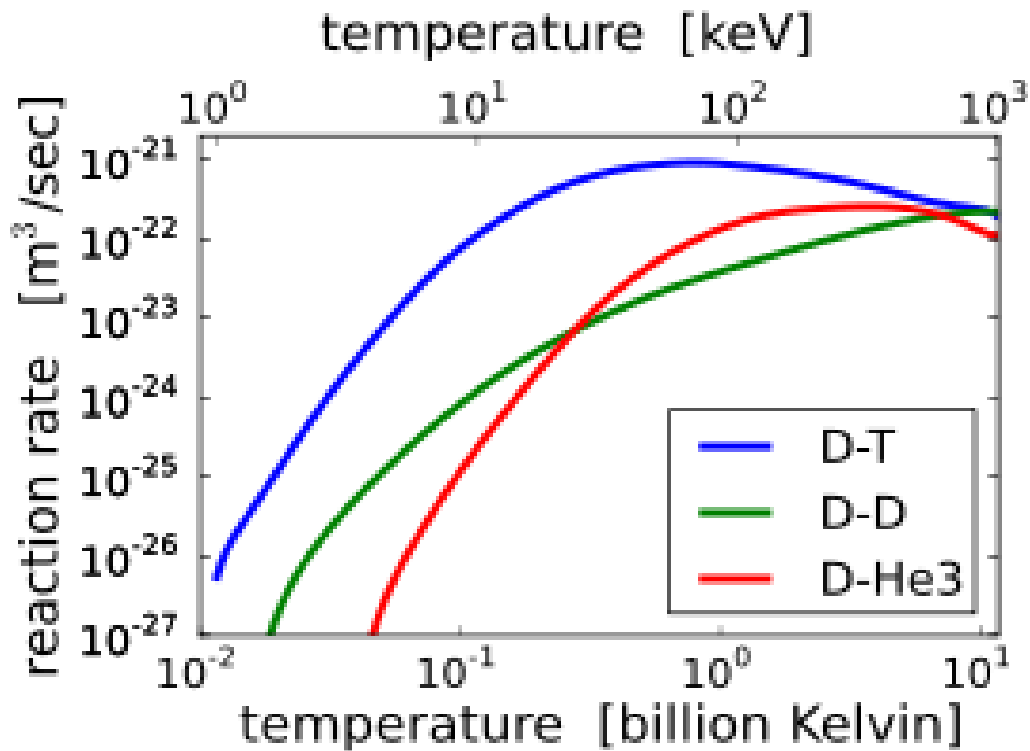
Άρα λοιπόν στην περίπτωση της ενεργού διατομής D, T :

$$\sigma_{DT}(E_f) = \frac{C}{E_f} \exp\left(\frac{-22 e^2}{h E_f^{\frac{1}{2}}}\right)$$

όπου C μία σταθερά, E_f σχετική ενέργεια των πυρήνων, M η ανηγμένη μάζα $M = M_1 M_2 / (M_1 + M_2)$ και h η σταθερά του Planck, $h \approx 6,6 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec}$.

Η σχέση αυτή υποδεικνύει ότι η ενεργός διατομή αυξάνεται απότομα ως συνάρτηση της E_f και για μια δεδομένη E_f η ενεργός διατομή ελαττώνεται με την αύξηση των ατομικών αριθμών των αντιδρώντων πυρήνων.

Για να χρησιμοποιηθεί η σύντηξη των D και T σε ένα όπλο, η ενέργεια της σύντηξης πρέπει να εκλυθεί ταχύτατα, συνεπώς η ενεργός διατομή για την αντίδραση D και T πρέπει να είναι μεγάλη. Αυτό υποδηλώνει ότι η E_f θα πρέπει να είναι περίπου ίση με την E_{DT} , δηλαδή στην περιοχή των 100 KeV (δες σχ. 2.5).



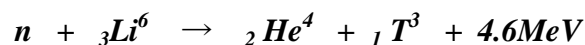
Σχ. 2.5 Η ενεργός διατομή των αντιδρασεων συντηξης

Συνηθίζεται στις αντιδράσεις σύντηξης να εκφράζουμε την κινητική ενέργεια των αντιδρώντων σωματιδίων σε μονάδες θερμοκρασίας. Αφού η σταθερά Boltzmann είναι: $1.4 \cdot 10^{-16} \text{ erg/}^\circ\text{K}$ και ένα KeV είναι $1.6 \cdot 10^7 \text{ ergs}$ συνεπάγεται ότι $1\text{KeV} = 1.16 \cdot 10^7$ βαθμούς Kelvin.

Βλέπουμε λοιπόν ότι οι πυρήνες D και T θα έπρεπε να έχουν θερμοκρασίες περίπου 10^9K για να συντηθούν ταχύτατα και να αποδώσουν ενέργεια εκρηκτικά. Τέτοιες θερμοκρασίες συναντάμε στο εσωτερικό των αστέρων όπως ο ήλιος και κατά την έκρηξη των όπλων σχάσης τα οποία όπως είδαμε δημιουργούν θερμοκρασίες της τάξης των 10^8 βαθμών και πάνω. Αυτό το γεγονός υπέδειξε στους σχεδιαστές όπλων ότι μια αντίδραση σύντηξης μπορεί τουλάχιστον να πυροδοτηθεί από μία έκρηξη σχάσης εάν το σχάσιμο υλικό και το καύσιμο υλικό της σύντηξης, δηλαδή D και T, είναι κατάλληλα διατεταγμένα στο χώρο.

Μία άμεση δυσκολία στο σχεδιασμό ενός όπλου σύντηξης (θερμοπυρηνικού) είναι ότι τα υλικά D και T είναι αέρια υπό κανονικές συνθήκες. Καθώς όμως, χρειαζόμαστε ποσότητες αυτών της τάξης του Kgr για τη δημιουργία μιας βόμβας σύντηξης, μια λύση θα ήταν η υγροποίηση τους και η αποθήκευσή τους σε ψυκτικά δοχεία. Αλλά ακόμη και αυτή η προσέγγιση καταλήγει σε βόμβα που είναι δύσχερηστα ογκώδης.

Υπάρχει όμως λύση που βρίσκεται στις ιδιότητες του Λιθίου-6 (Li^6), ενός ισοτόπου του στοιχείου Λίθιο. Όταν το Li^6 βομβαρδίζεται με αργά νετρόνια διασπάται σε ένα άτομο Ηλίου και ένα άτομο Τριτίου:



Από τα 4,6MeV τα 2,7MeV αποδίδονται στο ${}_1\text{T}^3$ και τα 2MeV στο ${}_2\text{He}^4$.

Εάν το Λίθιο τοποθετηθεί στο όπλο με τη μορφή Li_6D , το Τρίτιο που σχηματίζεται από τη διάσπαση του πυρήνα έχει πολύ μεγάλη πιθανότητα να αλληλεπιδράσει με το Δευτέριο και να συντηχθεί με αυτό, καθώς έχει αρκετή ενέργεια να υπερνικήσει το φράγμα Coulomb.

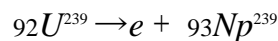
2.4 Μελέτη των πυρηνικών κεφαλών

Αναφορές:

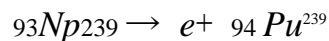
{12},{13},{14},{15}

2.4.1 Η βόμβα σχάσης

Βασισμένο στις γνώσεις της πυρηνικής σχάσης των προηγούμενων δεκαετιών, το έργο των επιστημόνων που συγκεντρώθηκαν στο Los Alamos το 1942 ήταν σχετικά απλό: Να βρουν τρόπο να συναθροίσουν ταχύτατα μία κρίσιμη μάζα U_{235} ή Pu_{239} και να τη βομβαρδίσουν με νετρόνια την κατάλληλη στιγμή. Η αλυσιδωτή αντίδραση θα έκανε τα υπόλοιπα. Για να καθορίσουν την κρίσιμη μάζα, οι επιστήμονες έπρεπε να μετρήσουν με ακρίβεια τις ενεργές διατομές των διαφόρων αντιδράσεων που υφίστανται τα νετρόνια με τους πυρήνες U_{235} και Pu_{239} . Όμως κανένα από αυτά τα υλικά δεν είναι διαθέσιμα στη φύση. Το Pu_{239} πρέπει να παραχθεί σε πυρηνικούς αντιδραστήρες με τον βομβαρδισμό πυρήνων U_{238} με νετρόνια. Το παραγόμενο ${}_{92}U_{239}$ ταχύτατα μετατρέπεται σε Ποσειδώνιο εκπέμποντας ένα ηλεκτρόνιο.



Κατόπιν, το Ποσειδώνιο μετατρέπεται σε Πλουτώνιο με την εκπομπή ενός ή περισσότερων ηλεκτρονίων



ενώ στον αντιδραστήρα, το Pu_{239} τείνει να απορροφά νετρόνια και να μετατρέπεται σε ισότοπα ${}_{94}Pu^{240}$ και ${}_{94}Pu^{241}$. Αυτά τα τρία ισότοπα είναι χημικώς διαχωρίσιμα από το U^{238} και τα άλλα νουκλίδια-υποπροϊόντα της σχάσης που παράγονται σε έναν αντιδραστήρα. Αυτά όμως τα ίδια είναι χημικώς αδιαφοροποίητα και συνεπώς δεν μπορούν να διαχωριστούν χημικά. Τα τελικά προϊόντα της διαδικασίας διαχωρισμού είναι λοιπόν ένα μίγμα των τριών ισωτόπων: ${}_{94}Pu^{239}$, ${}_{94}Pu^{240}$, ${}_{94}Pu^{241}$.

Αφού τα ισότοπα έχουν τις ίδιες χημικές ιδιότητες η αναγκαία διαδικασία απομόνωσης του ${}_{92}U_{235}$ από το άφθονο ${}_{92}U^{238}$ βασίζεται στο γεγονός ότι το ${}_{92}U^{235}$ είναι λίγο ελαφρότερο από ${}_{92}U_{238}$ (κατά $3/238=1.2\%$). Τόσο η παραγωγή ${}_{94}Pu^{239}$ όσο και ο διαχωρισμός του ${}_{92}U_{235}$ από το ${}_{92}U^{238}$ σε ποσότητες πολλών Kgr απαιτούν εγκαταστάσεις τεράστιου βιομηχανικού μεγέθους και ειδικά στην περίπτωση του Ουρανίου μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας. Ο δεύτερος παγκόσμιος πόλεμος ώθησε την Αμερικανική κυβέρνηση να προβεί στις μεγάλες επενδύσεις που χρειάζονται για την παραγωγή του ${}_{94}Pu^{239}$ και του καθαρού ${}_{92}U^{235}$. Κατ'αυτήν την έννοια τα πυρηνικά όπλα είναι ένα άμεσο υποπροϊόν αυτού του πολέμου.

Η διαδικασία η οποία προκαλεί μία πυρηνική έκρηξη σε βόμβα Ουρανίου ${}_{92}U_{235}$ είναι σχετικά απλή: Δύο υποκρίσιμες μάζες καθαρού ${}_{92}U^{235}$, που στο σύνολό τους όμως αποτελούν περισσότερο από μια κρίσιμη μάζα όταν ενωθούν, ωθούνται ταχύτατα από μία χημική έκρηξη και συγκρούονται μέσα σε ένα ισχυρό κύλινδρο, για παράδειγμα μία θαλάμη κανονιού. Στην κατάλληλη χρονική στιγμή, η υπερκρίσιμη μάζα ${}_{92}U^{235}$ βομβαρδίζεται με νετρόνια από μια πηγή, τα οποία πυροδοτούν την αλυσιδωτή αντίδραση. Η μηχανική ισχύς του κυλίνδρου καθυστερεί τη διασκόρπιση του πυρηνικού υλικού αυξάνοντας έτσι την απόδοση της συσκευής.

Η βόμβα της Hiroshima κατασκευάστηκε με αυτό τον τρόπο. Η απόδοσή της ήταν ισοδύναμη με 14 Ktons TNT ή $14 \cdot 10^{12} \text{ calories}$ ($5,8 \cdot 10^{13} \text{ joules}$). Τα πρώτα πυρηνικά όπλα ήταν περίπου κατά 20% αποδοτικά δηλαδή μόνο το ένα πέμπτο των πυρήνων ${}_{92}U^{235}$ του υλικού σχάζονταν.

Η ίδια διαδικασία δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση βομβών Πλουτωνίου. Οι πυρήνες ${}_{94}Pu^{240}$, οι οποίοι είναι αναμεμιγμένοι με πυρήνες ${}_{94}Pu^{239}$, υφίστανται συχνές αυθόρμητες σχάσεις με την εκπομπή νετρονίων. Συνεπώς στο χρόνο (milliseconds) που απαιτείται για να ενωθούν τα υποκρίσιμα τμήματα Πλουτωνίου μέσα στη θαλάμη του κανονιού, αδέσποτα νετρόνια

της αυθόρμητης σχάσης του ${}^{94}\text{Pu}^{240}$ μπορούσαν να προκαλέσουν αρκετές σχάσεις και να ελευθερώσουν έτσι αρκετή ενέργεια ώστε να ανατινάξουν τη συσκευή και να σταματήσουν την αλυσιδωτή αντίδραση πριν την έκλυση ικανών ποσοτήτων ενέργειας από αυτή.

Μία επιτυχής εναλλακτική προσέγγιση είναι να δημιουργηθεί μία σφαίρα Πλουτωνίου, η οποία σε κανονική πυκνότητα δεν αποτελεί κρίσιμη μάζα του υλικού, και κατόπιν να αυξηθεί η πυκνότητά του ραγδαία, με μια ταχύτατη συμπίεση. Όταν η μέση ελεύθερη διαδρομή (λ) ενός νετρονίου μέσα στη σφαίρα Πλουτωνίου είναι ίση ή μεγαλύτερη με την ακτίνα της σφαίρας r , η σφαίρα είναι υποκρίσιμη δηλαδή η πιθανότητα ενός νετρονίου να σχάσει έναν πυρήνα Πλουτωνίου είναι μικρότερη από την πιθανότητα του να διαφύγει τελικά από το χώρο της σφαίρας. Η μέση ελεύθερη διαδρομή των νετρονίων στην ύλη είναι αντιστρόφως ανάλογη της πυκνότητας του υλικού. Εάν με μία απότομη συμπίεση ο όγκος της σφαίρας γίνει ο μισός, αυτό θα διπλασιάσει την πυκνότητά της και έτσι η μέση ελεύθερη διαδρομή των νετρονίων στη συμπιεσμένη σφαίρα θα γίνει $\lambda_c = 0,5 \lambda$ ενώ η ακτίνα της συμπιεσμένης σφαίρας r_c θα γίνει $r_c = 0,8 r$. Άρα $r_c = 1,6 \lambda_c$. Η r_c τώρα είναι πολύ μεγαλύτερη του λ_c και έτσι η συμπιεσμένη σφαίρα γίνεται υπερκρίσιμη. Οι Χημικοί και οι Μηχανικοί του Los Alamos δημιούργησαν εκρηκτικούς φακούς με τους οποίους περιέβαλαν τη σφαίρα Πλουτωνίου έτσι ώστε τα εκρηκτικά ωστικά κύματα να καθίστανται συγκλίνοντα τη στιγμή που ταυτόχρονα φτάνουν στην επιφάνεια της σφαίρας Πλουτωνίου. Κατ'αυτόν τον τρόπο εξασκούν πιέσεις εκατομμυρίων κιλών ανά τετραγωνικό εκατοστό της επιφάνειας της σφαίρας, ελαττώνοντας έτσι τον όγκο της και καθιστώντας την υπερκρίσιμη.

Για να αυξήσουν την απόδοση των βομβών σχάσης, οι σχεδιαστές όπλων εισήγαγαν μικρά ποσά D και T στο κέντρο της μάζας Πλουτωνίου.

Ποσότητα 8-10 gr Τριτίου αρκούν για να αυξήσουν την απόδοση της διαδικασίας σχάσης. Αυτή η βελτιωμένη βόμβα σχάσης αποτελείται από διάφορα διαδοχικά στρώματα υλικών. Το ${}^{92}\text{U}^{235}$ και το ${}^{94}\text{Pu}^{239}$ είναι τα ενεργά υλικά που σχώνται και παράγουν την απαιτούμενη ενέργεια. Σε κανονικές πυκνότητες (το Πλουτώνιο έχει πυκνότητα $15,9\text{gr/cm}^3$ ενώ το εμπλουτισμένο Ουράνιο-235 (98%) έχει $18,9\text{gr/cm}^3$). Το Πλουτώνιο και το Ουράνιο που περιέχονται στην βασική διάταξη του όπλου δεν αποτελούν κρίσιμη μάζα και συνεπώς δεν εκρήγνυνται. Όταν όμως συμπιεστούν καθίστανται κρίσιμες και υφίστανται μία αλυσιδωτή αντίδραση. Η συμπίεση επιτυγχάνεται με την ακόλουθη διαδικασία: Οι πυροκροτητές στην επιφάνεια ολόκληρης της σφαίρας πυροδοτούν το επιδερμικό στρώμα των εκρηκτικών φακών. Η έκρηξή τους δημιουργεί ένα συγκλίνον σφαιρικό κύμα πίεσης που κάνει το λεπτό κέλυφος του Αλουμινίου να προσκρούει βίαια ταυτόχρονα και συμμετρικά πάνω στο εσωτερικό εκρηκτικό στρώμα και έτσι το πυροδοτεί. Το πιεστικό κύμα που δημιουργείται από αυτό το δεύτερο στρώμα εκρηκτικών σπρώχνει το κέλυφος Βηρυλλίου-Ουρανίου 238 πάνω στη σφαίρα Πλουτωνίου- Ουρανίου πάλι συμμετρικά, συμπιέζοντάς την σε πυκνότητες πολύ υψηλότερες από τις κανονικές και καθιστώντας την έτσι υπερκρίσιμη.

Η υψηλότερη πίεση που δημιουργείται από όλη τη διαδικασία έκρηξης υπερθερμαίνει το μίγμα D και T στο κέντρο της σχάσιμης σφαίρας του Πλουτωνίου, προκαλώντας τη σύντηξή τους και συνεπώς την εκπομπή ενός μεγάλου αριθμού νετρονίων που ενισχύουν τη σχάση του ${}^{94}\text{Pu}^{239}$ και ${}^{92}\text{U}^{235}$ της βόμβας. Το κέλυφος Βηρυλλίου και Ουρανίου U^{238} συμβάλλουν στη συγκράτηση του συστήματος για όσο το δυνατόν περισσότερο χρόνο και αντανακλούν μερικά από τα εκπεμπόμενα κατά τη σχάση νετρόνια πίσω στον πυρήνα της διάταξης αυξάνοντας έτσι την απόδοση της όλης διαδικασίας. Ο συνδυασμός των κελυφών U^{238} και Βηρυλλίου καθώς και τα πρόσθετα νετρόνια που παράγονται από την αντίδραση των D και T συνεισφέρουν στη διάσπαση μεγάλου ποσοστού πυρήνων Πλουτωνίου και Ουρανίου, ώστε ένα μοντέρνο όπλο ενισχυμένης σχάσης μπορεί να έχει απόδοση σχάσης μέχρι και 80%.

2.4.2 Η βόμβα σύντηξης

Η βόμβα σύντηξης αποτελείται από ένα πυρηνικό εκρηκτικό ενισχυμένης σχάσης, σχεδιασμένο έτσι ώστε να εκλύει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειάς του με τη μορφή ακτίνων-X, και έναν κύλινδρο Li_6D που περιβάλλεται από ένα μανδύα ενός υλικού με μεγάλο ειδικό βάρος (πχ Χρυσό ή Ουράνιο U_{238}). Ένα λεπτό βύσμα Pu_{239} διατρέχει το κέντρο του Li_6D κυλίνδρου. Όλη η διάταξη βρίσκεται σε ένα δοχείο με ενισχυμένα τοιχώματα Ουρανίου U_{238} .

Όταν πυροδοτηθεί η εκρηκτική διάταξη σχάσης αποτελεί έντονη πηγή ακτίνων-X οι οποίες ανακλώνται από καθρέπτες ειδικής δομής και μορφής και απορροφώνται από τον μανδύα που περιβάλλει το Li_6D εξατμίζοντας τμήμα της επιφάνειάς του και δημιουργώντας έτσι ένα καυτό υλικό σε κατάσταση πλάσματος.

Η ανάκρουση που δημιουργεί η εξάτμιση του μανδύα συμπιέζει βίαια τον κύλινδρο Li_6D που δέχεται “ώσεις” της τάξης των εκατοντάδων χιλιάδων τόνων ανά cm^2sec προκαλώντας έτσι αύξηση της θερμοκρασίας του Li_6D σε εκατομμύρια βαθμούς.

Τα νετρόνια από τη σχάση της “βασικής διάταξης”, όπως συχνά ονομάζεται η συσκευή σχάσης, περνούν από ένα κανάλι στην προστατευτική ασπίδα της “δευτερεύουσας διάταξης”, δηλαδή του κυλίνδρου Li_6D , και ξεκινούν τη σχάση του “βύσματος” Pu_{239} . Τα νετρόνια χαμηλής ενέργειας (1-2MeV) που εκπέμπονται από αυτή τη σχάση διασπών το Li_6 παράγοντας Τρίτιο με ενέργεια 2,7 MeV μέσα στον ήδη συμπιεσμένο κύλινδρο Li_6D . Το Τρίτιο συντήκεται αμέσως με το D δημιουργώντας νετρόνια 14 MeV και πυρήνες $^2\text{He}_4$ των 3.5MeV που προστίθενται στους πυρήνες $^2\text{He}_4$ των 2MeV που δημιουργούνται από τη διάσπαση του Li_6 . Οι πυρήνες $^2\text{He}_4$ κατανέμουν την ενέργειά τους μέσα στη μάζα του Li_6D συντηρώντας έτσι την υψηλή της θερμοκρασία.

Στη μάζα αυτή οι πυρήνες του Δευτερίου αντιδρούν με κάποια από τα νετρόνια των 14MeV τροποποιώντας τις ενέργειές τους έτσι ώστε τα νετρόνια να μπορούν να διασπών, με μεγαλύτερη απόδοση, πρόσθετους πυρήνες Li_6 σε Τρίτιο και Ήλιο.

Όλοι αυτοί οι μηχανισμοί συνεισφέρουν και την ενέργεια και τα νετρόνια που καθιστούν την αντίδραση σύντηξης αυτοσυντηρούμενη μέχρι η πίεση που δημιουργείται να διαλύσει το όπλο. Τα συμπαγή τοιχώματα $^{92}\text{U}^{238}$ επιβραδύνουν τη διάλυση και αποτελούν επίσης μία πρόσθετη πηγή εκρηκτικής ενέργειας: Ενώ το $^{92}\text{U}^{238}$ δεν σχάται από τα περισσότερα νετρόνια που παράγονται από την αλυσιδωτή αντίδραση του Ουρανίου ή του Πλουτωνίου, σχάται με ευκολία από τα νετρόνια που παράγονται από την αντίδραση σύντηξης. Έτσι τα νετρόνια που δημιουργούνται από τη σύντηξη D και T, σχάζουν τους πυρήνες $^{92}\text{U}^{238}$ ελευθερώνοντας περίπου 220MeV/σχάση.

Η χρήση του $^{92}\text{U}^{238}$ είναι ένας φτηνός τρόπος για να αυξηθεί η ενεργειακή απόδοση ενός όπλου σχάσης-σύντηξης-σχάσης. Συνήθως, περίπου μισή από την εκρηκτική ενέργεια ενός τέτοιου όπλου προέρχεται από τη σχάση του $^{92}\text{U}^{238}$ που περικλείει την «βασική» και «δευτερεύουσα» διάταξη του όπλου.

Ας πάρουμε για παράδειγμα τις παραμέτρους ενός πυρηνικού όπλου, ισοδύναμου ενός μεγατόνου TNT (1MT) το οποίο αντλεί τη μισή του εκρηκτική ενέργεια από την αντίδραση σύντηξης D και T και την άλλη μισή από τη σχάση του περιβλήματος $^{92}\text{U}^{238}$. Ενέργεια 500 KT ισοδύναμου TNT ισούται με $5 \cdot 10^{14}$ calories ή $1,3 \cdot 10^{28}$ MeV. Καθώς η αντίδραση σύντηξης D και T εκλύει 17 MeV ενέργεια, απαιτούνται $7,5 \cdot 10^{26}$ συντήξεις για να παραχθεί αυτή η ποσότητα ενέργειας αλλά παράλληλα θα δημιουργηθεί ένα ίσος αριθμός νετρονίων 14 MeV. Αυτός ο αριθμός των συντήξεων απαιτεί $1,2 \cdot 10^3$ γραμμομόρια Δευτερίου και Τριτίου ή περίπου 2 Kgr D και 4 Kgr T. Και οι δύο ποσότητες μπορούν να παραχθούν από 8,4Kgr του Li_6D .

Για να παραχθούν 500 KT ενέργεια, δηλαδή $1,3 \cdot 10^{28}$ MeV από τη σχάση των πυρήνων $^{92}\text{U}^{238}$, όταν ο καθένας αποδίδει ενέργεια περίπου 220 MeV, απαιτούνται περίπου $6 \cdot 10^{25}$ σχάσεις καθώς επίσης και ένας τουλάχιστον ίσος αριθμός νετρονίων 14 MeV. Αλλά αυτός ο αριθμός είναι μικρότερος από το ένα δέκατο του αριθμού των νετρονίων που παράγει η διαδικασία της σύντηξης όταν εκλύει την ίδια ποσότητα ενέργειας. Άρα η αντίδραση σύντηξης παράγει αρκετά νετρόνια τόσο για τη σχάση του μανδύα $^{92}\text{U}^{238}$ (περίπου 60Kgr) όσο και για τη σχάση των πυρήνων Li_6 , αφού μερικά απ' αυτά έχουν χάσει προηγουμένως μέρος από την ενέργειά τους σε συγκρούσεις με πυρήνες D.

Η ακτινοβολία των ακτίνων-Χ που εκπέμπεται από τη «βασική διάταξη» ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός στο χώρο ανάμεσα στη βασική και τη «δευτερεύουσα διάταξη» απ'όπου έχει αφαιρεθεί ο αέρας για να αποφευχθεί η αλλοίωση της ακτινοβολίας-Χ λόγω σκέδασης με τα ατομικά ηλεκτρόνια του αέρα.

Τα νετρόνια της «βασικής διάταξης» ταξιδεύουν με το ένα δέκατο περίπου της ταχύτητας του φωτός, έτσι μέχρι να αρχίσει η σχάση του βύσματος $^{94}\text{Pu}^{239}$ ο κύλινδρος Li_6D έχει ήδη συμπιεστεί. Τα πυρηνικά θραύσματα της «βασικής» διάταξης ταξιδεύουν με μικρότερες ταχύτητες έτσι ώστε μέχρι να φτάσουν στη «δευτερεύουσα» η διαδικασία της σύντηξης έχει ήδη ξεκινήσει. Τελικά, μερικά microseconds μέσα στη διαδοχή σχάση-σύντηξη-σχάση η συσκευή διαλύεται και οι πυρηνικές αντιδράσεις σταματούν.

Μια παραλλαγή αυτού του όπλου σχάσης-σύντηξης-σχάσης, στην οποία το περίβλημα $^{92}\text{U}^{238}$ παραλείπεται, παράγει έντονη ακτινοβολία νετρονίων υψηλής ενέργειας, αφού στην περίπτωση αυτή τα νετρόνια των 14MeV διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα, ενώ παράλληλα παράγονται λιγότερο ραδιενεργά θραύσματα σχάσης επειδή οι μόνες διαδικασίες σχάσης που λαμβάνουν χώρα είναι αυτές του Πλουτωνίου της «βασικής διάταξης» και του βύσματος. Αυτό το όπλο είναι γνωστό ως “βόμβα νετρονίου”, ή “καθαρή βόμβα”, για προφανείς λόγους.

2.5 Οι πυρηνικές δοκιμές και ο εντοπισμός τους

Αναφορές:

{16},{18, Verification Regime},{wikipedia},{19}

Οι πυρηνικές δοκιμές απεδείχθησαν απαραίτητες από την αρχή της πυρηνικής εποχής. Αν και η βόμβα που κατέστρεψε τη Χιροσίμα ήταν αρκετά απλή ώστε η λειτουργία της να μπορούσε να προβλεφθεί, στην περίπτωση της βόμβας ενδόρηξης, που κατέστρεψε το Ναγκαασάκι, οι δοκιμές ήταν απαραίτητες. Στην περίπτωση αυτή δεν ήταν ούτε καν γνωστό αν η αρχή της ενδόρηξης θα δούλευε σίγουρα και για πόσο χρόνο το πυρηνικό υλικό θα υφίστατο σχάση πριν να σκορπιστεί από την εκρηκτική πίεση της εκλυόμενης ενέργειας. Η απόδοση ενός πυρηνικού όπλου εξαρτάται ευαίσθητα, από τη διάρκεια συγκράτησης της μάζας Pu^{239} που υφίσταται αλυσιδωτή αντίδραση. Η πρώτη πυρηνική έκρηξη στις 16 Ιουλίου 1945 ήταν μια δοκιμή ενός τέτοιου είδους (ενδόρηξης Pu^{239}). Καθώς πιο ανεπτυγμένα συστήματα βομβών ενδόρηξης αναπτύχθηκαν, θεωρήθηκε συνετό να δοκιμαστεί η εφικτότητά τους, η λειτουργία τους και η πραγματική απόδοσή τους.

Επίσης η στρατιωτική και πολιτική εξουσία ήθελαν να δοκιμάσουν τις προβλέψεις τους για τα αποτελέσματα των πυρηνικών εκρήξεων σε πολιτικές και στρατιωτικές εγκαταστάσεις. Έγιναν λοιπόν σειρές τέτοιων δοκιμών, στον αέρα, στο έδαφος και κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας για να ικανοποιηθεί η ανάγκη για τέτοιες πληροφορίες. Νέες μορφές πιο αποδοτικών και ελαφρότερων ενισχυμένων όπλων σχάσης ακολούθησαν, οι οποίες χρειάστηκαν πρόσθετες δοκιμές. Τελικά τα θερμοπυρηνικά όπλα του τύπου σχάσης-σύντηξης-σχάσης ήταν τόσο καινούρια και πολύπλοκα που η εξέλιξη και η βελτίωσή τους απαιτούσε ένα μεγάλο αριθμό, πολλές φορές μεγάλης απόδοσης (10-15 MT), πυρηνικών δοκιμών.

Μέχρι το 1963, όταν οι πυρηνικές δοκιμές στην ατμόσφαιρα, στο Διάστημα και κάτω από τη θάλασσα απαγορεύτηκαν με τη συμφωνία μερικής απαγόρευσης των δοκιμών (partial test ban treaty), από τις έως τότε γνωστές πυρηνικές δυνάμεις, οι ΗΠΑ είχαν διεξάγει 106 ατμοσφαιρικές δοκιμές στον Ειρηνικό (Johnston, Eniwetock, Bikini, Christmas Islands) και άλλες 100 στη Νεβάδα (National Test Site). Στις δοκιμές αυτές χρησιμοποιήθηκε υψηλή τεχνολογία για να μελετηθούν οι διεργασίες και τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την έκρηξη ενός πυρηνικού όπλου και τα προκύπτοντα μακροσκοπικά αποτελέσματα. Η παραγωγή βαλλιστικών πυραύλων ικανών να μεταφέρουν πυρηνικά όπλα σε διηπειρωτικές αποστάσεις, δημιούργησαν την ανάγκη νέας σειράς δοκιμών, υπόγειων μετά το 1963, για να αναπτύξουν μικρά και ελαφρά πυρηνικά όπλα. Αυτή η τάση εντάθηκε με τον ερχομό της τεχνολογίας MIRV (Multiple Independently Targetable Re-entry Vehicles) που επέβαλε το συνδυασμό του μικρού βάρους και της μεγάλης εκρηκτικής απόδοσης. Συνολικά, οι ΗΠΑ διεξήγαγαν (ανακοίνωσαν) 815 υπόγειες δοκιμές μέχρι το moratorium δοκιμών το 1993.

2.5.1 Μέθοδοι εντοπισμού των ατμοσφαιρικών δοκιμών

Εξ αιτίας του πυρηνικού ανταγωνισμού μεταξύ των ΗΠΑ και της Σοβιετικής Ένωσης μετά την πρώτη σοβιετική βόμβα σχάσης το 1949, δημιουργήθηκε η ανάγκη ανίχνευσης των πυρηνικών δοκιμών που διεξάγονται από τον αντίπαλο. Μετά τη νέα συμφωνία μερικής απαγόρευσης δοκιμών κατωφλίου (threshold test ban treaty) το 1976, η οποία περιόριζε την απόδοση των επιτρεπτών δοκιμών σε λιγότερο από 150 KT, παρουσιάστηκε η ανάγκη υπολογισμού της απόδοσης υπόγειων δοκιμών για να πιστοποιηθεί η συμμόρφωση των συμβαλλόμενων χωρών μελών με τους όρους της συμφωνίας. Ως αποτέλεσμα, δημιουργήθηκαν τεχνικές εντοπισμού πυρηνικών εκρήξεων από αποστάσεις πολλών χιλιάδων χιλιομέτρων και αργότερα επιτεύχθηκε και ο σχετικά ακριβής υπολογισμός της απόδοσής τους.

Περίπου μισή από την ενέργεια που εκλύεται κατά την πυρηνική έκρηξη στην ατμόσφαιρα παράγει ένα ωστικό κύμα πίεσης μέσα σε μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου. Αυτό το ωστικό κύμα φθίνει με την απόσταση και καταλήγει σε ένα απλό ακουστικό κύμα με υπερπίεση:

$$Pa=C \frac{Y^{\frac{1}{3}}}{R}$$

όπου C μία σταθερά κατά μέσο όρο μεταξύ 2 και 7 ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και την εποχή του έτους. Y είναι η απόδοση σε KT και R η απόσταση από το σημείο της έκρηξης σε χιλιάδες Km.

Συνεπώς η έκρηξη ενός πυρηνικού όπλου ισχύος 1 MT μπορεί να «ακουστεί» σε αποστάσεις 10.000 Km μακριά.

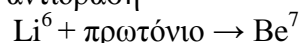
Όμως, ακόμα και μικρότερης ισχύος αλλά εγγύτερες χημικές εκρήξεις, ή ηφαιστειακές και μετεωριτικές εκρήξεις μπορούν να παράγουν ακουστικά σήματα όμοια μ'αυτά που προέρχονται από μακρινές πυρηνικές εκρήξεις. Συνεπώς ο ακουστικός εντοπισμός πυρηνικών γεγονότων από υποηχητικά κύματα είναι ακόμη και στην καλύτερη περίπτωση αναξιόπιστος.

Μια ενδο-ατμοσφαιρική ή εξω-ατμοσφαιρική πυρηνική έκρηξη παράγει έναν ηλεκτρομαγνητικό παλμό που μπορεί να εντοπιστεί σε μεγάλες αποστάσεις με αξιοπιστία. Το ηλεκτρικό πεδίο ενός τέτοιου παλμού είναι περίπου:

$$E \approx \frac{10^3}{R} \left(\frac{V}{M} \right)$$

όπου R σε Km και έχει ένα περιεχόμενο συχνοτήτων 10-100 KHz σε μεγάλες αποστάσεις. Όμως ένας απλός κεραυνός (περίπου 2000/sec συμβαίνουν ανά τον κόσμο) παράγει σήματα παρόμοια με έναν ηλεκτρομαγνητικό παλμό μιας μακρινής πυρηνικής έκρηξης. Άρα και αυτή η μέθοδος είναι αναποτελεσματική για τον εντοπισμό πυρηνικών εκρήξεων λόγω του φυσικού θορύβου υποβάθρου.

Όμως μια ατμοσφαιρική πυρηνική έκρηξη είναι μια μοναδική πηγή αερομεταφερόμενων ραδιενεργών καταλοίπων που παράγονται από τη σχάση των πυρήνων. Μία έκρηξη μικρής απόδοσης, περίπου 20 KT, θα δημιουργήσει πάνω από 10^{24} θραύσματα σχάσης. Η ραδιοχημική ανάλυση της ατμόσφαιρας μπορεί να ταυτοποιήσει ακόμα και λιγότερα από 10^7 θραύσματα. Συνεπώς είναι δυνατόν, συλλέγοντας δείγματα αέρα με αεροσκάφη που πετούν σε μεγάλο ύψος, μερικές ώρες μετά από μια πυρηνική έκρηξη, να γίνει εντοπισμός αυτής. Μια προσεκτική ανάλυση αυτών των δειγμάτων μπορεί να αποκαλύψει λεπτομέρειες των σχάσιμων υλικών, τη θερμοκρασία που παρήχθη από την έκρηξη και άλλα χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, το πρώτο σοβιετικό όπλο σύντηξης αναγνωρίστηκε από την έντονη παρουσία πυρήνων Be^7 στην ανώτερη ατμόσφαιρα που παράγονται από την αντίδραση



προδίδοντας έτσι την παρουσία Li^6 , που είναι παρόν μόνο σε θερμοπυρηνικά όπλα.

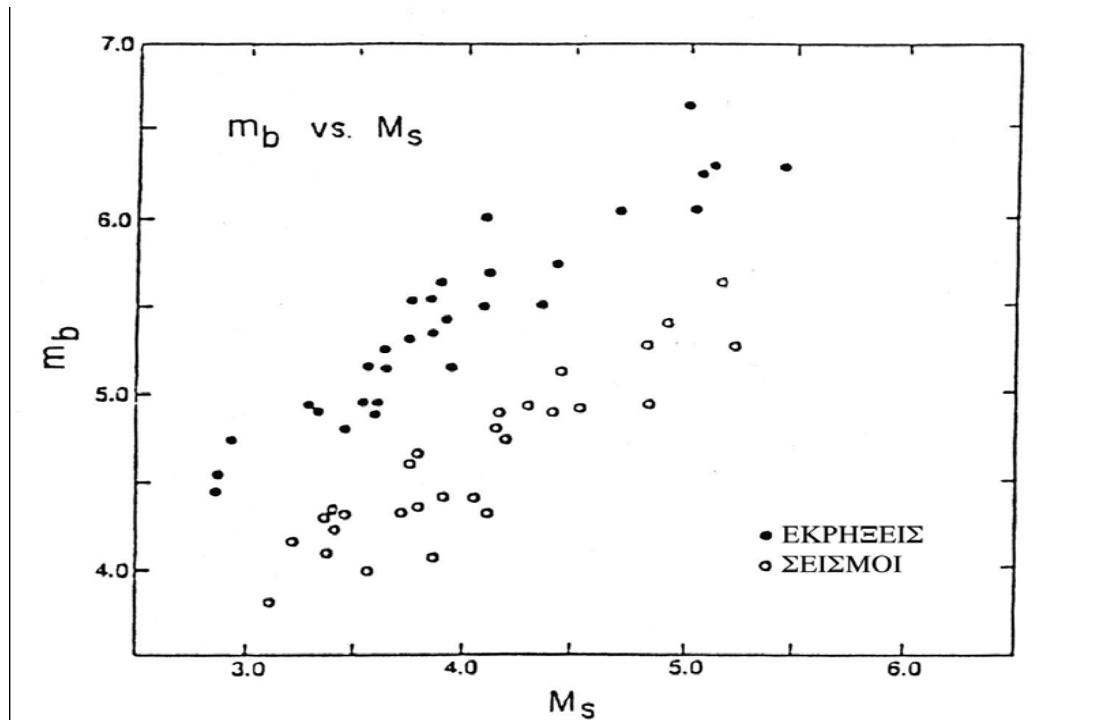
2.5.2 Εντοπισμός υπόγειων πυρηνικών δοκιμών

Σε μια απολύτως περιορισμένη υπόγεια πυρηνική δοκιμή η εκλυόμενη ενέργεια λιώνει και εξατμίζει τα πετρώματα και το έδαφος που περιβάλλουν το σημείο της έκρηξης δημιουργώντας μια μεγάλη υπόγεια κοιλότητα. Η πίεση μέσα στην κοιλότητα φτάνει σε εκατομμύρια ατμόσφαιρες και οι ατμοί διαστέλλονται ταχύτατα. Το γεγονός αυτό δημιουργεί ένα ωστικό κύμα που κινείται μέσα στα πετρώματα με υπερηχητική ταχύτητα συνθλίβοντάς τα μέχρι μιας ακτίνας που ονομάζεται “ελαστική ακτίνα” πέραν της οποίας το διάμηκες κύμα που παράγεται από την έκρηξη διαδίδεται γραμμικά (εάν το βάθος της έκρηξης είναι μεγαλύτερο από $100 Y^{1/3}$ μέτρα, όπου Y η απόδοση σε KT). Το τμήμα του διαμήκους κύματος (P-κύματος) που κινείται προς τα πάνω, δηλαδή προς την επιφάνεια του εδάφους, αντανακλάται από το σύνορο αέρος-εδάφους προς τα κάτω αντί να το διαπεράσει, προκαλώντας έτσι την κατάρρευση συντεθλιμμένων και υαλοποιημένων πετρωμάτων της οροφής της κοιλότητας. Επειδή η έκρηξη προκαλεί συμπίεση περισσότερο, παρά διάτμηση δημιουργεί μεγάλα επιφανειακά S-κύματα (γνωστά και ως κύματα

Rayleigh) τα οποία κινούνται όπως τα κύματα του ωκεανού στην επιφάνεια της γης για μεγάλες αποστάσεις από το σημείο της έκρηξης απομακρυνόμενα συμμετρικά από αυτό.

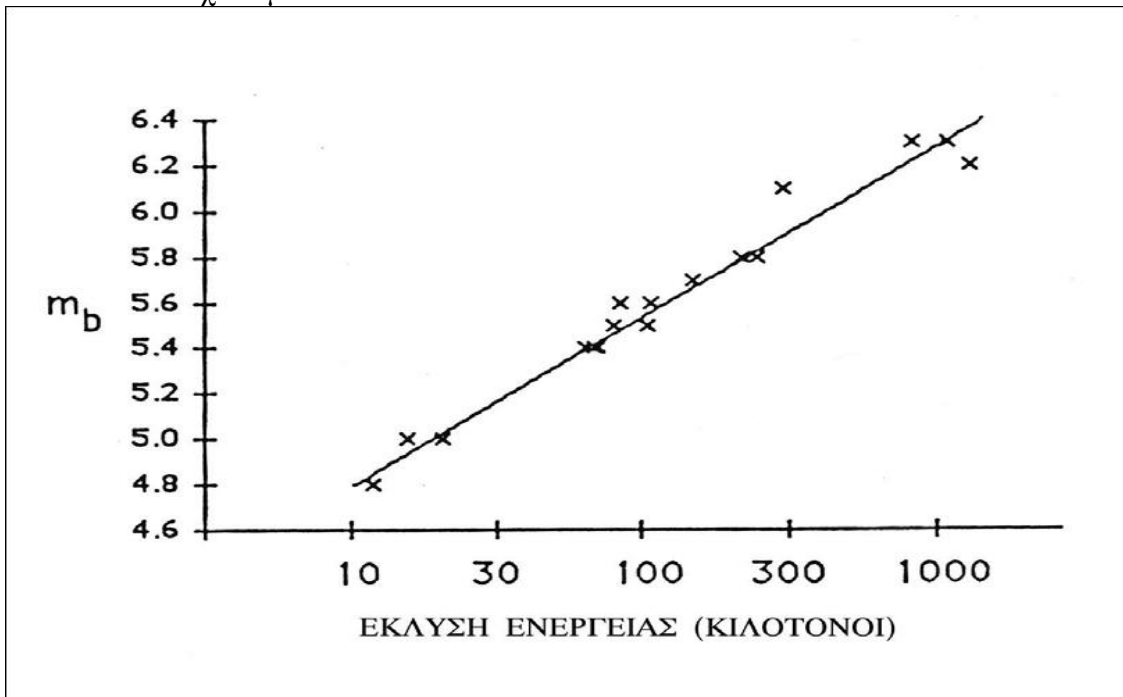
Ο εντοπισμός των σεισμικών κυμάτων, είτε από υπόγειες δοκιμές είτε από σεισμούς, πρέπει να επιτευχθεί παρά την παρουσία ενός πεδίου θορύβου που παράγεται τόσο από φυσικά όσο και από ανθρωπογενή φαινόμενα. Η ωκεάνιος παλίρροια, ο παφλασμός τεράστιων κυμάτων, η κίνηση μεγάλων δέντρων εξ αιτίας ισχυρών ανέμων, ο θόρυβος της οδικής κίνησης, οι γεωτρήσεις και αντλήσεις πετρελαίου, οι εκρήξεις στα ορυχεία, είναι δραστηριότητες που παράγουν δονήσεις ικανές να καλύψουν απομακρυσμένες πυρηνικές δοκιμές. Για να φιλτράρουν αυτό το θόρυβο, οι επιστήμονες χρησιμοποιούν μια μεγάλη σειρά σειсмоγράφων σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους και συνδεδεμένους με κεντρικό υπολογιστή, που λαμβάνει, ενισχύει κατάλληλα και αθροίζει τα επιμέρους σήματα που παράγουν οι συσκευές αυτές έτσι ώστε να αποσβaineται ο θόρυβος και να ενισχύεται το σήμα ενός μακρινού πυρηνικού γεγονότος. Με αυτή την τεχνική είναι δυνατό να εντοπιστεί ένα σήμα με πλάτος χωρικού κύματος $m_b \approx 2,5$ που προέρχεται από πυρηνική έκρηξη, περίπου 1500 Km μακριά. Για σύγκριση, μια έκρηξη ισχύος 1 KT παράγει ένα σήμα με $m_b \approx 4,0$ στην ίδια απόσταση. Επειδή τόσο τα διαμήκη P-κύματα (γνωστά και ως χωρικά κύματα διότι ταξιδεύουν μέσα στο σώμα της Γης) όσο και τα επιφανειακά (Rayleigh) S-κύματα ταξιδεύουν μεγάλες αποστάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό υπόγειων πυρηνικών δοκιμών. Αν και τα P και S κύματα των πυρηνικών δοκιμών δεν είναι μονοσήμαντα αφού οι σεισμοί παράγουν επίσης τέτοιου είδους κύματα, τα χαρακτηριστικά αυτών που προέρχονται από δοκιμές βοηθούν στη διάγνωση της υπόγειας πυρηνικής δοκιμής από τους φυσικούς σεισμούς.

Η διαφορά μεταξύ των κυμάτων που παράγονται από υπόγειες πυρηνικές δοκιμές και των σειμών έγκειται στον τρόπο που κάθε πηγή εκλύει ενέργεια. Η έκρηξη συμβαίνει σε ένα σημείο και προκαλεί ταχύτατα σφαιρικά συμμετρική συμπίεση. Ο σεισμός προκαλεί διάτμηση ανάμεσα σε δύο γεωλογικές πλάκες που έχουν μεγάλες διαστάσεις. Άρα τα μήκη κύματος των σημάτων των εκρήξεων είναι μικρά και η διάδοσή τους είναι ανεξάρτητη του αζιμουθίου. Αντίθετα, ένας σεισμός λόγω της έκτασης της πηγής παράγει σήματα με μεγάλα μήκη κύματος και με μια κατανομή γωνιακή κατανομή αζιμουθίων που καθορίζεται από τον προσανατολισμό της ολισθαίνουσας κίνησης των πλακών που προκάλεσε το σεισμό. Ένα πρόσθετο φαινόμενο που διαφοροποιεί τα δύο φαινόμενα είναι ότι οι εκρήξεις είναι ρηχές ενώ οι σεισμοί συνήθως συμβαίνουν βαθύτερα από 15 Km. Αλλά η σημαντικότερη διαφορά είναι ότι οι σεισμοί παράγουν μεγάλα S-κύματα Rayleigh και μικρά διαμήκη P-κύματα ενώ οι εκρήξεις προκαλούν το αντίθετο. Άρα μια γραφική παράσταση των σχετικών μεγεθών m_s των S-κυμάτων και m_b των P-κυμάτων ενός γεγονότος μπορεί να καταδείξει εάν αυτό είναι σεισμός ή έκρηξη ανάλογα με την παρατηρούμενη σχέση των σημείων m_s και m_b (δες σχ. 2.6).



Σχ. 2.6 Η κατανομή των S και P κυμάτων

Επίσης, εκτός από τον εντοπισμό μιας πιθανής υπόγειας έκρηξης και της διαφοροποίησης του σήματός της από τα αντίστοιχα των σεισμών, υπάρχει η ανάγκη να υπολογιστεί και η απόδοση του πυρηνικού όπλου για τους λόγους που προαναφέρθηκαν. Αυτό προϋποθέτει την βαθμονόμηση της τιμής του πλάτους m_b των σεισμομέτρων για υπόγειες πυρηνικές εκρήξεις δεδομένης απόδοσης. Αυτή είναι μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία που ενέχει αρκετή αβεβαιότητα που προκαλείται από παράγοντες όπως το είδος του πετρώματος στο σημείο της έκρηξης, την κατάσταση του εξωτερικού μανδύα της γης δια μέσου του οποίου ταξιδεύει το P-κύμα καθώς επίσης και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής των σειсмоγράφων. Το (σχ. 2.7) είναι ένα παράδειγμα αυτών των συσχετισμών.



Σχ 2.7.. Το πλάτος χωρικού κύματος ως συνάρτηση της ενέργειας της έκρηξης.

Πυρηνική Φυσική – Πυρηνική Τεχνολογία

1. Πυρηνική Τεχνολογία, Μ.Γ. Αγγελόπουλου, εκδοση ΕΜΠ
2. Διαλέξεις-Παρουσιάσεις κ. Ε. Χινη, για το μάθημα «Ραδιοπεριβαλλοντική Ανάλυση» του ΔΠΜΣ «Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»
3. Σύγχρονη Φυσική Serway et Al. Εκδοσεις ΠΕΚ 2007, κεφ. 13, 14.
4. Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική Cottingham-Greenwood, εκδοσεις ΤΥΠΩΘΗΤΩ 1995, κεφ.8, 9, 10
5. Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική Π.Α.Ασημακόπουλου, εκδοση Πανεπιστημίου Ιωαννίνων 2002, κεφ. 1, 2, 8, 9, 10
6. Physics for scientists & Engineers, Serway 3rd edition 1990, κεφ. 45, 46
7. Η φυσική Σήμερα, Ε.Οικονομου, εκδοσεις ΠΕΚ 1995, Τομος 2 κεφ. 2
8. Πανεπιστημιακή Φυσική, Hugh D. Young, Εκδόσεις Παπαζηση 1994, Τομος 2ος, κεφ. 45
9. Σύγχρονη Φυσική, Arthur Beiser, Εκδόσεις ΤΥΠΩΘΗΤΩ 2002, τόμος 2^{ος}, κεφ. 11, 12, 13
10. Εννοιες της Φυσικής, Paul G. Hewitt, Εκδόσεις Π.Ε.Κ 1997, τομος 2^{ος}, κεφ. 31, 32
11. Ατομική & Πυρηνική Φυσική, Σ.Περιστερακης 1969

Πυρηνικά Οπλα, Πυρηνικές Δοκιμές

12. Nuclear Weapon Archive, <http://nuclearweaponarchive.org/>
13. Trinity Atomic Website, <http://www.abomb1.com>
14. Atomic Archive website, <http://www.atomicarchive.com/>
15. «Αθηνά», Ελληνικό κέντρο Ελέγχου όπλων,
<http://ekeo.gr/wp-content/uploads/reports/liolios/crudenukes.pdf>
«Σχέδια πρωτόγονων πυρηνικών όπλων», Θ.Λιόλιος.
16. Arsenal, understanding weapons in the nuclear age, author K.Tsipis,
Simon and Schuster, 1983
17. Atomic Energy for Military Purposes, by Henry DeWolf Smyth, 1945
18. Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO),
<http://www.ctbto.org/>
19. Seismic Verification of Nuclear Testing Treaties, May 1988,
U.S. Congress, Office of Technology Assessment,
20. The Verification of a Comprehensive Nuclear Test Ban,
by Lynn R Sykes & Jack F Evernden, Scientific American, October 1989

3ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

3.1 Μελέτη των ενδοατμοσφαιρικών Πυρηνικών εκρήξεων

Αναφορές:

{1a},{1b},{1c}

3.1.1 Η πύρινη σφαίρα

Η ενεργειακή απόδοση των πυρηνικών όπλων μπορεί να είναι από ένα κλάσμα ενός ΚΤ έως πολλούς ΜΤ, αλλά οι μάζες των αντίστοιχων εκρηκτικών συσκευών διαφέρουν λίγο μεταξύ τους ίσως όχι παραπάνω από δέκα φορές. Συνεπώς η πυκνότητα ενέργειας των θραυσμάτων της βόμβας αμέσως μετά την έκρηξη (υποπροϊόντα σχάσης, πυρήνες ${}^2\text{He}^4$ κλπ.) ποικίλουν ευρέως και βέβαια το ίδιο συμβαίνει με τον επιμερισμό της εκρηκτικής απόδοσης μεταξύ της ακτινοβολίας και των υλικών θραυσμάτων.

Αφού τα υποπροϊόντα της έκρηξης είναι πλήρως ιονισμένα, τότε μεταξύ αυτών και του πεδίου της ακτινοβολίας, αποκαθίσταται θερμοδυναμική ισορροπία μέσα σε nanoseconds από το τέλος των πυρηνικών αντιδράσεων. Για μικρές ενεργειακές πυκνότητες το μεγαλύτερο μέρος της εκλυόμενης ενέργειας είναι σε μορφή κινητικής ενέργειας των θραυσμάτων (πυρηνικών) της βόμβας, ενώ για μεγάλες ενεργειακές πυκνότητες η περισσότερη ενέργεια εκλύεται με τη μορφή ακτινοβολίας ($E_{\text{rad}} \approx 10\%$ για έκρηξη 1ΚΤ, $E_{\text{rad}} \approx 95\%$ για έκρηξη απόδοσης 100ΚΤ). Συνεπώς η αρχική πυκνότητα ενέργειας και οι ιδιότητες της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εξαρτώνται αποκλειστικά και μόνο από το ποσό της ενέργειας που εκλύεται και μόνο σε δευτερεύοντα βαθμό από την κατασκευή και το υλικό του όπλου. Η μορφή με την οποία η ενέργεια εισέρχεται στο περιβάλλον εξαρτάται από την πυκνότητα του μέσου. Στο Διάστημα κανένα ποσοστό της ακτινοβολίας δε μετατρέπεται σε ωστικό κύμα. Στην ατμόσφαιρα το μισό της θερμικής ακτινοβολίας (ακτίνες-Χ, ορατά και υπέρυθρα μήκη κύματος) τελικά μετατρέπεται σε ένα ωστικό κύμα υπερπίεσης. Σε μια υπόγεια έκρηξη σχεδόν όλη η ενέργεια τελικά συνιστά ένα ωστικό κύμα που διαδίδεται στο περιβάλλον έδαφος. Επειδή η γεωμετρία της έκρηξης στην ατμόσφαιρα είναι η ίδια ανεξάρτητα από την απόδοση, οι δυναμικές συντεταγμένες του γεγονότος μεταβάλλονται ανάλογα με την απόδοσή της.

Για παράδειγμα μια δεδομένη μέγιστη υπερπίεση P που προκαλείται από μία πυρηνική έκρηξη θα συμβεί σε μια απόσταση R_i από το σημείο της έκρηξης ενός όπλου απόδοσης Y_i έτσι ώστε:

$$\frac{R_1}{Y_1^{\frac{1}{3}}} = \frac{R_2}{Y_2^{\frac{1}{3}}} = \dots = \frac{R_n}{Y_n^{\frac{1}{3}}}$$

σε κάποιο χρόνο

$$\frac{T_1}{Y_1^{\frac{1}{3}}} = \frac{T_2}{Y_2^{\frac{1}{3}}} = \dots = \frac{T_n}{Y_n^{\frac{1}{3}}}$$

Άρα λοιπόν εάν η υπερπίεση P είναι γνωστή για δεδομένο Y και R , τότε αυτή μπορεί να υπολογιστεί για κάθε απόσταση και απόδοση.

Τα φυσικά φαινόμενα που παρατηρούνται σαν αποτέλεσμα της βίαιης έκλυσης ενέργειας από μια πυρηνική έκρηξη είναι διαφορετικά από τα αποτελέσματα έκλυσης ίδιου ποσού ενέργειας από έκρηξη χημικών εκρηκτικών. Η διαφορά έγκειται κυρίως στις μεγάλες θερμοκρασίες που δημιουργούνται (εκατομμύρια βαθμοί) κατά τις πυρηνικές εκρήξεις έναντι των θερμοκρασιών στις οποίες καίγονται τα χημικά εκρηκτικά (3000°C). Σ' αυτές τις θερμοκρασίες η ακτινοβόλουμένη ενέργεια φεύγει από το σημείο της έκρηξης με τη μορφή ορατού φωτός και υπέρυθρης ακτινοβολίας (θερμότητα), ενώ στις θερμοκρασίες που δημιουργούνται από την πυρηνική έκρηξη η ακτινοβολία εκπέμπεται με τη μορφή ακτίνων- γ και ακτίνων- X . Αμέσως μετά την έκρηξη, μόνο

νετρόνια, ακτίνες- γ και νεutrίνο διαφεύγουν από την υπερθερμασμένη μάζα των θραυσμάτων. Πολλές ακτίνες- γ απορροφώνται και πάλι από τα θραύσματα προκαλώντας επιπρόσθετη έκλυση νετρονίων. Πολλά από τα αρχικά νετρόνια μπορεί να υποστούν μερικές ανελαστικές σκεδάσεις η και εντέλει να συλληφθούν από τα προϊόντα της σχάσης.

Στο τέλος της διαδικασίας της έκρηξης, τα θραύσματα της σχάσης και τα άτομα του περιβλήματος του όπλου είναι σχεδόν όλα τελείως ιονισμένα.

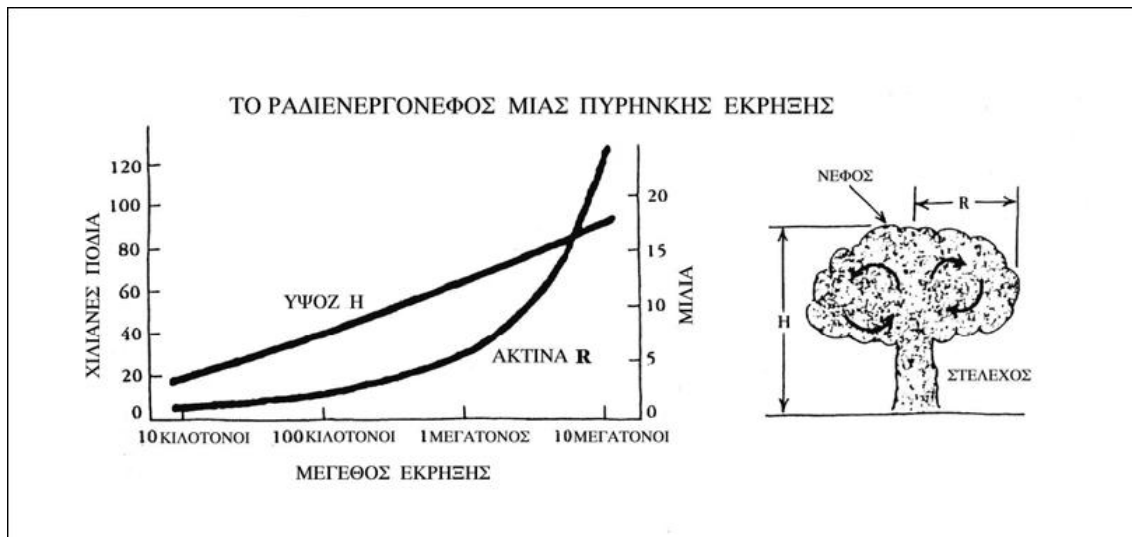
Χωρίς ηλεκτρόνια, δεν μπορούν να απορροφήσουν φωτόνια, αφού η απορρόφηση συνεπάγεται την αλληλεπίδραση ενός φωτονίου με ένα ηλεκτρόνιο συνδεδεμένο με το άτομο. Έτσι τα εξατμισμένα υλικά του όπλου γίνονται διαφανή στα φωτόνια, τα οποία διαφεύγουν στον περιβάλλοντα αέρα. Η μέση απόσταση την οποία διανύει μία ακτίνα-X στον αέρα πριν απορροφηθεί (δηλαδή η μέση ελεύθερη διαδρομή) δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda \approx \frac{E^3}{\xi} (cm)$$

όπου η ενέργεια δίνεται σε KeV. Άρα για τις ακτίνες-X που δημιουργούνται από την πυρηνική έκρηξη η μέση ελεύθερη διαδρομή κυμαίνεται από λίγα εκατοστά μέχρι μερικές δεκάδες εκατοστά. Καθώς οι ακτίνες X απορροφώνται από το στρώμα αέρος που περιβάλλει άμεσα το σημείο της έκρηξης, ιονίζουν τα άτομα του αέρα, καθιστώντας το στρώμα αυτό διαφανές σε πρόσθετες ακτίνες-X που προέρχονται από τα εξατμισμένα θραύσματα του όπλου. Αυτές οι νέες ακτίνες-X απορροφώνται και θερμαίνουν το επόμενο στρώμα αέρος ιονίζοντάς το.

Κατ'αυτόν τον τρόπο η σφαίρα του υπέρθερμου αέρα γύρω από το σημείο της έκρηξης διαστέλλεται υπερηχητικά. Στα πρώτα χιλιοστά του δευτερολέπτου μετά την έκρηξη ενός όπλου ενός Μεγατόνου η πύρινη αυτή σφαίρα είναι ακόμα θερμοκρασίας μερικών εκατοντάδων χιλιάδων βαθμών αλλά έχει διασταλεί μόνο σε ακτίνα 100 μέτρων. Καθώς η ενέργεια διαφεύγει από το εσωτερικό της πύρινης σφαίρας η θερμοκρασία της πέφτει και καθώς ακτινοβολεί σαν ένα μέλαν σώμα, έχουμε πτώση και της θερμοκρασίας της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Συνεπώς τα μήκη κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας αυξάνονται, τα φωτόνια διαφεύγουν ευκολότερα και ο ρυθμός διαστολής της πύρινης σφαίρας ελαττώνεται μέχρι να πέσει στην ταχύτητα του ήχου. Στο σημείο αυτό η ακτινοβολία αύξηση της ακτίνας πύρινης σφαίρας σταματάει.

Στο τέλος της ακτινοβόλου διαστολής, η διαστελλόμενη μάζα των πυρηνικών θραυσμάτων προφταίνει την επιφάνεια της ακτινοβόλου πύρινης σφαίρας, συγκρούεται μ'αυτήν και έτσι αυξάνει τη θερμοκρασία και την πυκνότητά της. Ο πυκνότερος αέρας τώρα απορροφάει ακτινοβολία με μεγαλύτερη απόδοση καθώς το ωστικό κύμα διαστέλλει την ακτίνα της πύρινης σφαίρας (ωστική ανάπτυξη) και συνεπώς η πύρινη σφαίρα γίνεται αδιαφανής στα φωτόνια στο εσωτερικό της. Αυτή η αύξηση της αδιαφάνειας της πύρινης σφαίρας προκαλεί το μοναδικό χαρακτηριστικό της “διπλής λάμψης” της πυρηνικής έκρηξης στην ατμόσφαιρα-ένα αλάθητο σημάδι ότι μία πυρηνική έκρηξη έλαβε χώρα στην ατμόσφαιρα. Καθώς όλο και περισσότερη ενέργεια ακτινοβολείται στο περιβάλλον, η πύρινη σφαίρα παύει να αυξάνεται και το ωστικό κύμα διαφεύγει από την σφαίρα και αρχίζει να απομακρύνεται από αυτήν και να διαδίδεται ανεξάρτητα στον περιβάλλοντα αέρα. Κατά τη στιγμή της “διαφυγής” αυτής η πύρινη σφαίρα ενός όπλου 1MT είναι 800m σε διάμετρο και συνεχίζει να αυξάνεται αργά για μερικά λεπτά καθώς ανέρχεται στην ατμόσφαιρα (δες σχ. 3.1).



Σχ. 3.1 Η εξέλιξη του ραδιενεργού νέφους

Κατά μέσο όρο, το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας σε μία πυρηνική έκρηξη (περίπου 80%) αρχικά εκλύεται ως ακτινοβολία. Ένα μικρό ποσοστό (περίπου 5%) εκλύεται ως κινητική ενέργεια των θραυσμάτων της βόμβας και με μορφή άμεσης πυρηνικής ακτινοβολίας (ακτίνες-γ, νετρόνια). Το υπόλοιπο της ενέργειας παραμένει αποθηκευμένο στα διεγερμένα θραύσματα της σχάσης τα οποία κατά διαφορετικούς χρόνους στο μέλλον εκλύουν ενέργεια στο περιβάλλον με τη μορφή σωματιδίων (νετρόνια, ηλεκτρόνια) ή ακτίνων-γ.

Σ' αυτά οφείλεται η καθυστερημένη πυρηνική ακτινοβολία που προκαλείται από τα προϊόντα της σχάσης που διασπέρνονται στο περιβάλλον.

3.1.2 Θερμική ακτινοβολία

Ένα ποσοστό της ενέργειας μιας πυρηνικής έκρηξης εκπέμπεται με τη μορφή ακτίνων-X. Σε μια ατμοσφαιρική έκρηξη οι μαλακές (χαμηλής ενέργειας) ακτίνες-X απορροφώνται ταχύτατα από την περιβάλλουσα ατμόσφαιρα η οποία θερμαίνεται ταχύτατα και σχηματίζει την πύρινη σφαίρα η οποία με τη σειρά της καθώς ψύχεται εκπέμπει θερμική ακτινοβολία, κυρίως φωτόνια στο ορατό και το υπέρυθρο τμήμα του φάσματος.

Η ανάπτυξη της πύρινης σφαίρας περιλαμβάνει δύο παλμούς θερμικής ακτινοβολίας: Έναν άμεσο που περιέχει λιγότερο από το 1% της ολικής θερμικής ακτινοβολίας και έναν δεύτερο που μεγιστοποιείται περίπου ένα δευτερόλεπτο μετά την έκρηξη και διαρκεί, στην περίπτωση έκρηξης 1 MT, περίπου 10 δευτερόλεπτα. Αυτή η διάρκεια κλιμακώνεται και είναι ανάλογη με την 0,33 δύναμη της εκλύομενης ενέργειας. Τελικά περίπου το 1/3 της ενέργειας που εκλύεται από μια πυρηνική έκρηξη εκπέμπεται ως θερμική ενέργεια.

Το ποσό της θερμικής ακτινοβολίας μίας εναέριας έκρηξης απόδοσης Y MT σε απόσταση R (Km) είναι:

$$Q = 1.8 \cdot 10^3 \frac{Y}{R^2} t \text{ (cal/cm}^2\text{)}$$

όπου t είναι ο συντελεστής διάδοσης που εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες. Όταν η ορατότητα είναι 15 Km, το t είναι ίσο με περίπου 0,9 σε απόσταση 300 m από την έκρηξη και περίπου 0,8 σε απόσταση ενός χιλιομέτρου.

Ο αντίστοιχος τύπος για επιφανειακή έκρηξη είναι:

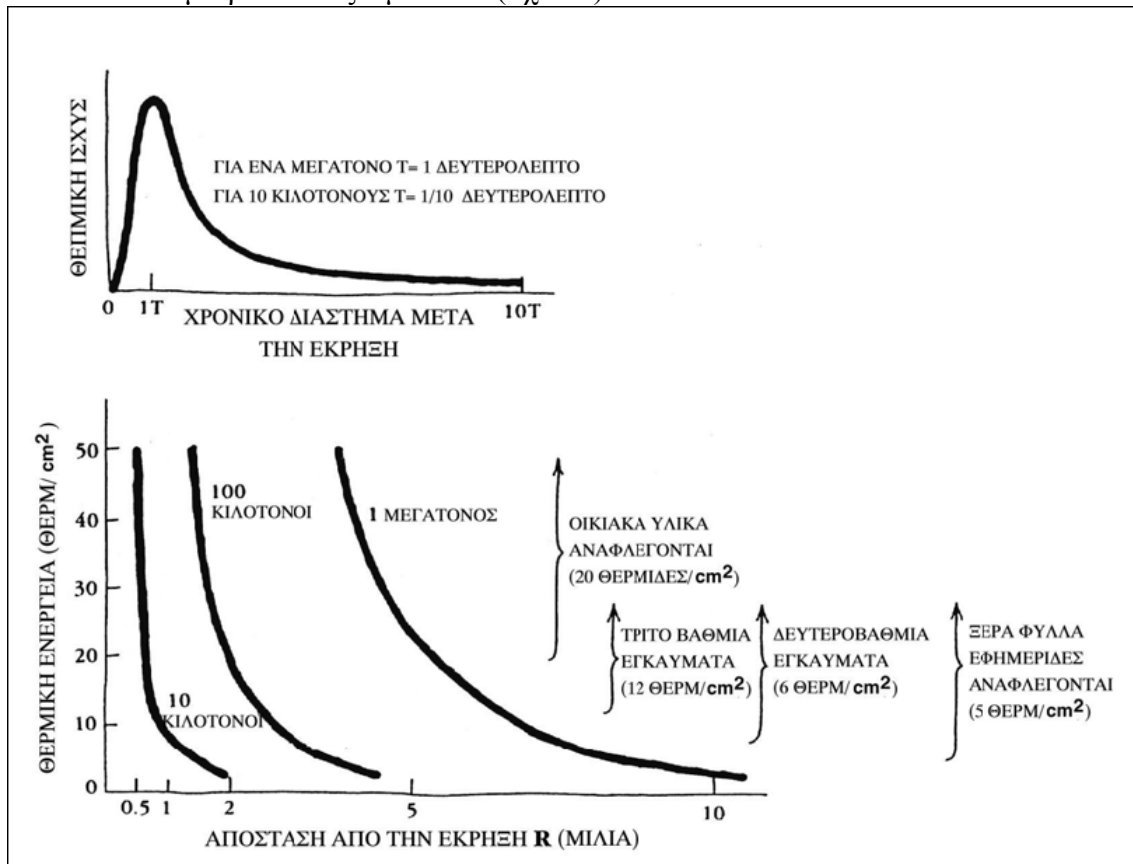
$$Q = 1.15 \cdot 10^3 \frac{Y}{R^2} t \text{ (cal/cm}^2\text{)}$$

Η θερμική ακτινοβολία, ένα από τα πιο καταστροφικά αποτελέσματα μιας πυρηνικής έκρηξης, αποτελείται από φωτόνια της υπέρυθρης, ορατής και υπεριώδους περιοχής του φάσματος. Τα αποτελέσματα της θερμικής ακτινοβολίας πάνω σε ζωντανούς οργανισμούς εξαρτώνται από τρεις ιδιότητες της πηγής της ακτινοβολίας: Την ένταση της (δηλαδή των αριθμό των θερμικών

φωτονίων που εκπέμπει η πηγή ανά δευτερόλεπτο), τη θερμοκρασία (δηλαδή πόσο ενεργητικά είναι τα φωτόνια) και τη διάρκεια εκπομπής της ακτινοβολίας από την πηγή. Ένα μεγάλο πυρηνικό όπλο δημιουργεί θερμική ακτινοβολία μεγαλύτερης έντασης από ένα μικρότερο. Επίσης μία μεγάλη πύρινη σφαίρα παραμένει θερμή μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Άρα, αν και τα κύματα της ακτινοβολίας ενός μεγάλου πυρηνικού όπλου μπορούν να έχουν την ίδια συχνότητα (δηλαδή θα μεταφέρουν την ίδια ενέργεια με τα αντίστοιχα ενός μικρότερου) η θερμική καταστροφή θα είναι εντονότερη στη περίπτωση μεγαλύτερης έκρηξης εξ αιτίας της αυξημένης έντασης και του μεγαλύτερου χρόνου έκθεσης.

Η θερμική ακτινοβολία είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της αποστάσεως από το σημείο της έκρηξης και ανάλογη της ενέργειας που εκλύεται κατά την πυρηνική έκρηξη. Όμως, το ποσό της θερμικής ακτινοβολίας που δέχεται ένα σημείο εξαρτάται και από άλλους παράγοντες: την υγρασία και τη σκόνη του αέρα που μεσολαβεί καθώς και την ανακλαστικότητα του εν λόγω αντικειμένου για δεδομένο μήκος κύματος. Μόνο το κλάσμα της θερμικής ακτινοβολίας που απορροφάται προκαλεί βλάβες.

Το κλάσμα που απορροφάται αυξάνει τη θερμοκρασία του υλικού και προκαλεί εγκαύματα και αναφλέξεις. Για παράδειγμα, 12 Km μακριά από την επιφανειακή έκρηξη ενός πυρηνικού όπλου ισχύος 1 MT σε μια μέρα χωρίς ομίχλη, η ένταση της θερμικής ακτινοβολίας θα είναι περίπου 6 cal/cm² και το δέρμα ενός ανθρώπου που εκτίθεται σ' αυτή την ακτινοβολία θα πάθει εγκαύματα Β' βαθμού. Στην ίδια απόσταση, χαρτιά, ξερά φύλλα και ξύλα θα αναφλεγούν αυθόρμητα. Ομοίως, άτομα που βρίσκονται 10 Km μακριά θα πάθουν εγκαύματα Γ' βαθμού όταν εκτεθούν σε ακτινοβολία της τάξης 10 cal/cm². Υλικά οικοδομών όπως πρεσσαριστό ξύλο ή κόντρα πλακέ θα αναφλεγούν και αυτά αυθόρμητα σε αποστάσεις 7 Km από το σημείο της έκρηξης. Πιο κοντά από 7 Km ισχυρότερα υλικά θα αρχίσουν να λιώνουν και όλα τα αντικείμενα σε απόσταση μερικών εκατοντάδων μέτρων θα εξατμιστούν (σχ. 3.2).



Σχ. 3.2 Οι επιπτώσεις της Θερμικής Ακτινοβολίας

Σε μια αστική περιοχή κάθε εύφλεκτο υλικό σε ακτίνα 10 Km από το σημείο της έκρηξης στην οποία αναφερόμαστε θα αναφλεγεί και θα συνεχίσει να καίγεται. Σε πολλές περιπτώσεις το μαζικό

ολοκαύτωμα (γνωστό και ως πύρινη θύελλα) ενισχυμένο από εύφλεκτα υλικά όπως καύσιμα κατεστραμμένων δεξαμενών και σπασμένους αγωγούς γκαζιού θα συνεχίσει να καίει για πολύ καιρό. Οι πύρινες θύελλες είναι ένα αυτοσυντηρούμενο και εξαιρετικά καταστροφικό είδος εκτεταμένης πυρκαγιάς και μπορεί να συμβεί σε πόλεις που περιέχουν αρκετά εύφλεκτα υλικά. Πύρινες θύελλες επίσης μπορεί να δημιουργηθούν από μία μαζική χρήση εμπρηστικών βομβών, όπως στην επίθεση των συμμάχων στη Δρέσδη στο δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο.

Συνεπώς οι ιδιότητες των πύρινων θυελλών είναι αρκετά γνωστές. Τα καυτά αέρια της πύρινης θύελλας ανέρχονται ταχύτατα προκαλώντας τη βίαιη είσοδο στο χώρο της φωτιάς του αέρα που περιβάλλει την καιγόμενη περιοχή με ταχύτητες 160 Km/h ή μεγαλύτερες, τροφοδοτώντας έτσι την πύρινη θύελλα με το απαραίτητο Οξυγόνο. Οι θερμοκρασίες στο χώρο της πύρινης θύελλας ανέρχονται σε 2000 έως 3000 °C. Παράλληλα το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται από την καύση, καθώς είναι βαρύτερο από τον αέρα συγκεντρώνεται σε χαμηλά σημεία όπως υπόγεια, καταφύγια και σε τούνελ του υπόγειου σιδηρόδρομου προκαλώντας ασφυξία στους πάντες. Οι θερμοκρασίες στα μέρη αυτά θα φτάσουν σε εκατοντάδες βαθμούς και έτσι οι άνθρωποι που θα καταφύγουν εκεί θα «αποξηρανθούν» αφού δεν θα υπάρχει καν οξυγόνο να συντηρήσει την καύση τους. Κατά συνέπεια, όταν ένα πυρηνικό όπλο που πέφτει σε μία πόλη προκαλεί μία πύρινη θύελλα, αναμένεται ότι κανένα από τα ζωντανά όντα μέσα σ' αυτή δε θα επιβιώσει.

Ακόμη και όταν δεν δημιουργείται η πύρινη θύελλα, η θερμική ακτινοβολία μιας πυρηνικής έκρηξης προκαλεί μεγαλύτερη άμεση καταστροφή σε μεγαλύτερη απόσταση από κάθε άλλη μορφή καταστροφικού αποτελέσματος. Αυτό οφείλεται στο ότι συγκρινόμενη με τα άλλα άμεσα αποτελέσματα (ωστικό κύμα, άμεση πυρηνική ακτινοβολία) η ένταση της θερμικής ακτινοβολίας αποσβήνεται βραδύτερα, καθώς αυξάνει η απόσταση από την πηγή. Ένα παράδειγμα είναι το έγκραμα του αμφιβληστροειδούς που είναι μία μόνιμη βλάβη στο μάτι, ένα άμεσο παθολογικό αποτέλεσμα, αν και όχι απαραίτητα θανατηφόρο που έχει μεγαλύτερη εμβέλεια από κάθε άλλη βλάβη. (Ένας πρόσθετος λόγος για τον οποίο το έγκραμα του αμφιβληστροειδούς συμβαίνει τόσο μακριά από το σημείο έκρηξης είναι ότι το μάτι εστιάζει το φως που λαμβάνει, ακυρώνοντας κάθε μορφή απόσβεσης που έχει συμβεί με την απόσταση).

Έτσι, ένα πυρηνικό όπλο ισχύος 1MT εκρηγνύμενο σε ένα ύψος 3000 m θα προκαλέσει μόνιμη βλάβη στο απροστάτευτο μάτι που κοιτάει στην πύρινη σφαίρα σε απόσταση 50Km την ημέρα και σε διπλάσια απόσταση τη νύχτα. Εάν το ίδιο όπλο εκραγεί σε ύψος 15000m οι αντίστοιχες αποστάσεις είναι 70 και 140 Km αντίστοιχα.

Η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από μια πυρηνική έκρηξη έχει άμεσα και απώτερα αποτελέσματα. Ένα σημαντικό τέτοιο αποτέλεσμα είναι η μείωση του Οζοντος στη Στρατόσφαιρα.

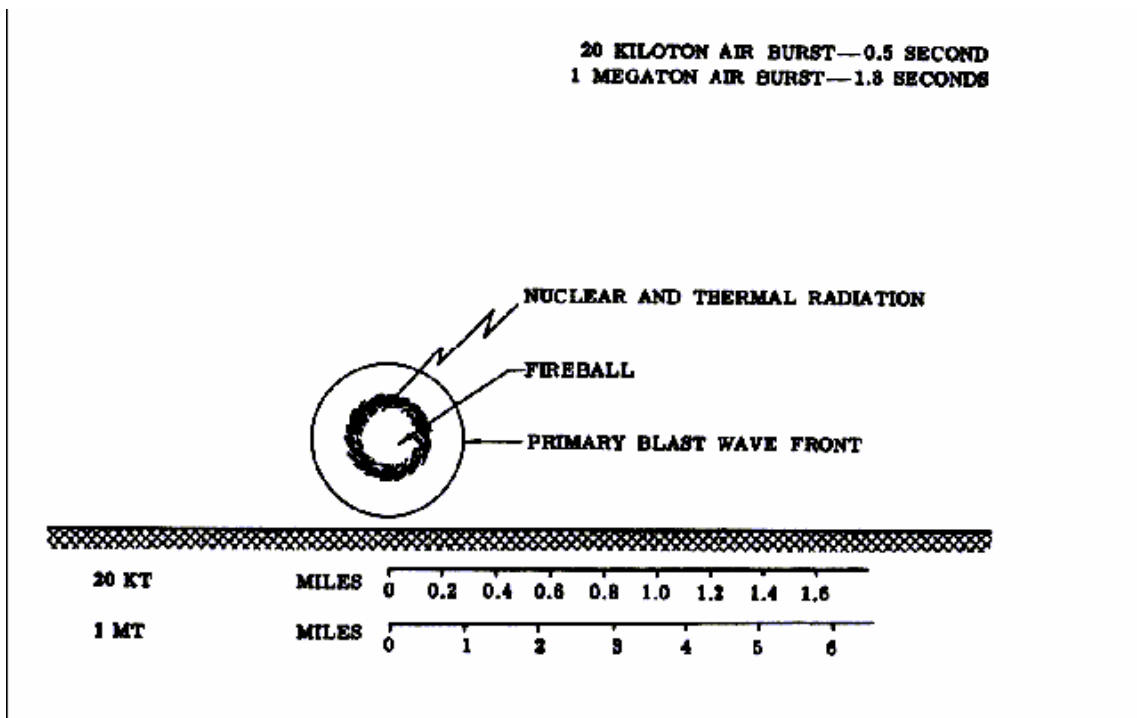
Όταν εκρήγνυται ένα πυρηνικό όπλο θερμαίνει μία μεγάλη ποσότητα αέρος. Για κάθε τόνο TNT απόδοσης προκαλείται θέρμανση ενός τόνου αέρα σε θερμοκρασία πάνω από 2000 0C. Έτσι μια πυρηνική έκρηξη ισχύος 1 MT θα θερμάνει στη θερμοκρασία αυτή ένα εκατομμύριο τόνους αέρα και παράλληλα θα μετατρέψει το 1% του θερμασμένου αέρα σε νιτρικά οξείδια. Δημιουργούνται έτσι περίπου 10.000 τόνοι (10^{32} μόρια) νιτρικών οξειδίων. Επειδή όμως τα νιτρικά οξείδια αντιδρούν εύκολα με το όζον και το καταστρέφουν, πολλαπλές πυρηνικές εκρήξεις μπορούν να δημιουργήσουν αρκετά νιτρικά οξείδια για να καταστρέψουν τελείως το όζον στη στρατόσφαιρα. Τότε ένα μεγάλο τμήμα της υπερϊώδους ακτινοβολίας του ηλίου θα έφτανε στην επιφάνεια της Γης προκαλώντας εκτεταμένη τύφλωση σε όλα τα είδη των ημερόβιων ζώων.

Ακόμα και εάν το στρώμα του όζοντος πιθανώς ανέκαμπτε, θα χρειαζόταν 5-10 χρόνια για να επανέλθει στην αρχική του ποσότητα, στο μεσοδιάστημα όμως τα ζώα των πληγμένων περιοχών θα τυφλώνονταν και θα πέθαιναν.

Υπάρχουν μερικά άγνωστα φαινόμενα σχετικά με τη μείωση του στρώματος του Οζοντος. Αρχικά δεν είναι ξεκάθαρο πώς το μέγεθος της πυρηνικής έκρηξης επηρεάζει το βαθμό ελάττωσης του Οζοντος. Τα νιτρικά οξείδια για να φθείρουν το στρώμα του Οζοντος πρέπει να ανέλθουν σε ύψη 20-30 Km. Το νέφος της έκρηξης πυρηνικού όπλου 1 MT φτάνουν σε αυτά τα ύψη, αλλά τα αντίστοιχα μικρότερων πυρηνικών εκρήξεων δε φτάνουν σ' αυτά τα ύψη. Άρα μπορεί να μην επιδράσουν σοβαρά στο στρώμα του Οζοντος.

3.1.3 Χρονολογική εξέλιξη εναέριας πυρηνικής έκρηξης

Αμέσως μετά από την εναέρια έκρηξη ενός πυρηνικού όπλου στην ατμόσφαιρα, μια εξαιρετικά θερμή και φωτεινή σφαίρα αρχίζει να σχηματίζεται. Η θερμοκρασία αυτή στα πρώτα κλάσματα του δευτερολέπτου ξεπερνάει τα δέκα εκατομμύρια βαθμούς Κελσίου. Τέτοιες θερμοκρασίες συναντώνται στο εσωτερικό του ήλιου. Η πύρινη σφαίρα (όπως και ο ήλιος) εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (ακτίνες-γ, ακτίνες-X, ραδιοκύματα κλπ). Το τεράστιο ποσό της ακτινοβολίας αυτής προκαλεί πυρκαγιές σε τεράστιες αποστάσεις, ενώ εξατμίζει ότι βρίσκεται στη γειτονιά της έκρηξης. Η ενέργεια της έκρηξης πηγάζει από τις πυρηνικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα και οι οποίες οδηγούν στην εκπομπή ακτίνων γ, νετρονίων, ηλεκτρονίων, νετρίνο, καθώς και προϊόντα σχάσης που με τη σειρά τους είναι και αυτά ραδιενεργά. Αμέσως μετά την έκρηξη έχουμε τη δημιουργία ενός καταστροφικού ωστικού κύματος που απομακρύνεται με σφαιρική συμμετρία από το σημείο μηδέν και υπερηχητικές ταχύτητες.



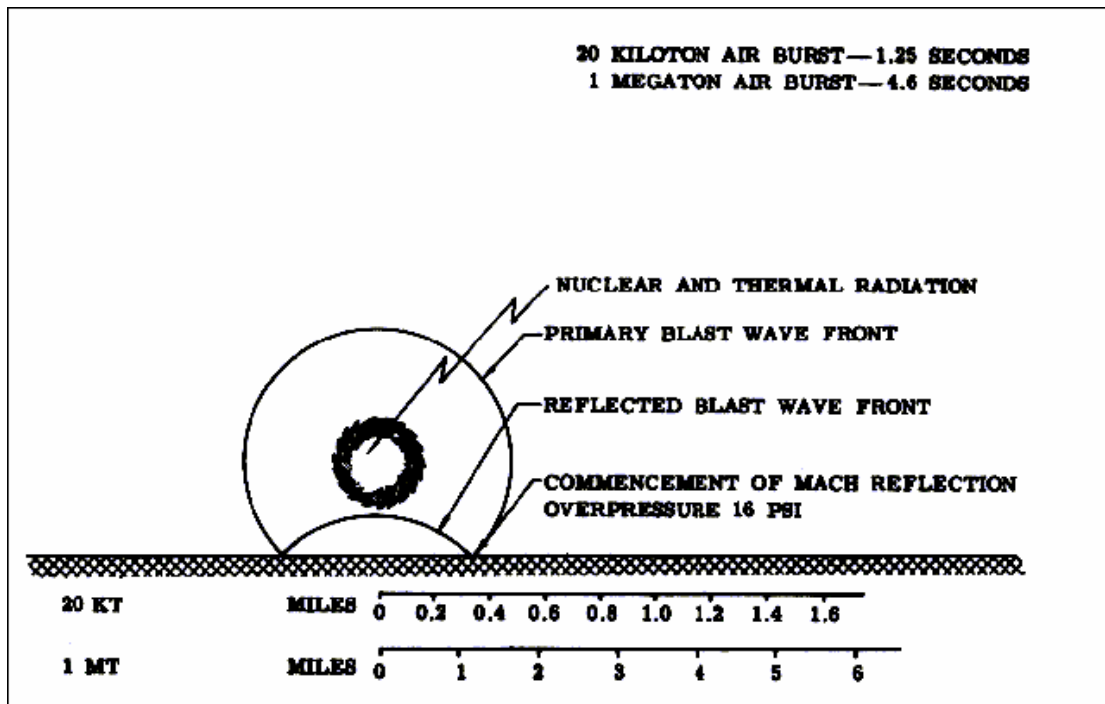
Εναέρια έκρηξη: Πρώτο στιγμιότυπο.

Όπως φαίνεται στο πρώτο στιγμιότυπο, για πυρηνικό όπλο ισχύος 20 KT μέσα σε 0,5 sec η πύρινη σφαίρα έχει διάμετρο 1.460 ft (445 m) ενώ η μέγιστη διάμετρος που μπορεί να αναπτύξει είναι 1.550 ft (472m). Αντίστοιχα για πυρηνικό όπλο 1MT μέσα σε 1,8 sec η διάμετρος της πύρινης σφαίρας θα είναι 6.300 ft (1.921m) με μέγιστη δυνατή 7.200 ft (2.196 m). Ασφαλώς στους χρόνους του στιγμιότυπου το ωστικό κύμα είναι πολύ πιο μπροστά από την πύρινη σφαίρα, τουλάχιστον 244 m για πυρηνικό όπλο 20 KT και περίπου 1.600 m για έκρηξη 1MT.

Τα συμπεράσματα από τις προηγούμενες παρατηρήσεις είναι ότι κατά την έκρηξη όπλου 20 KT (1MT), για να χαρακτηριστεί αυτή εναέρια, θα πρέπει να γίνει σε ύψος τουλάχιστον 236 m (1.100m) έτσι ώστε η πύρινη σφαίρα να μην αγγίξει το έδαφος.

Στο δεύτερο στιγμιότυπο της επιφανειακής έκρηξης παρατηρούμε ότι σε 1,25 sec (4,6 sec) για μία έκρηξη 20 KT (1MT) το ωστικό κύμα έχει φτάσει σε απόσταση 0,5 miles/804 m (1,7 miles/2.7 km).

Καθώς το αρχικό ωστικό κύμα χτυπάει το έδαφος ένα δεύτερο ωστικό κύμα δημιουργείται δια της ανακλάσεως. Σε ορισμένη απόσταση από το σημείο μηδέν (που εξαρτάται από το σημείο μηδέν και την απόδοση του πυρηνικού όπλου). Τα δύο ωστικά κύματα συμβάλλουν για να δημιουργήσουν ένα ενισχυμένο μέτωπο που λέγεται μέτωπο Mach .

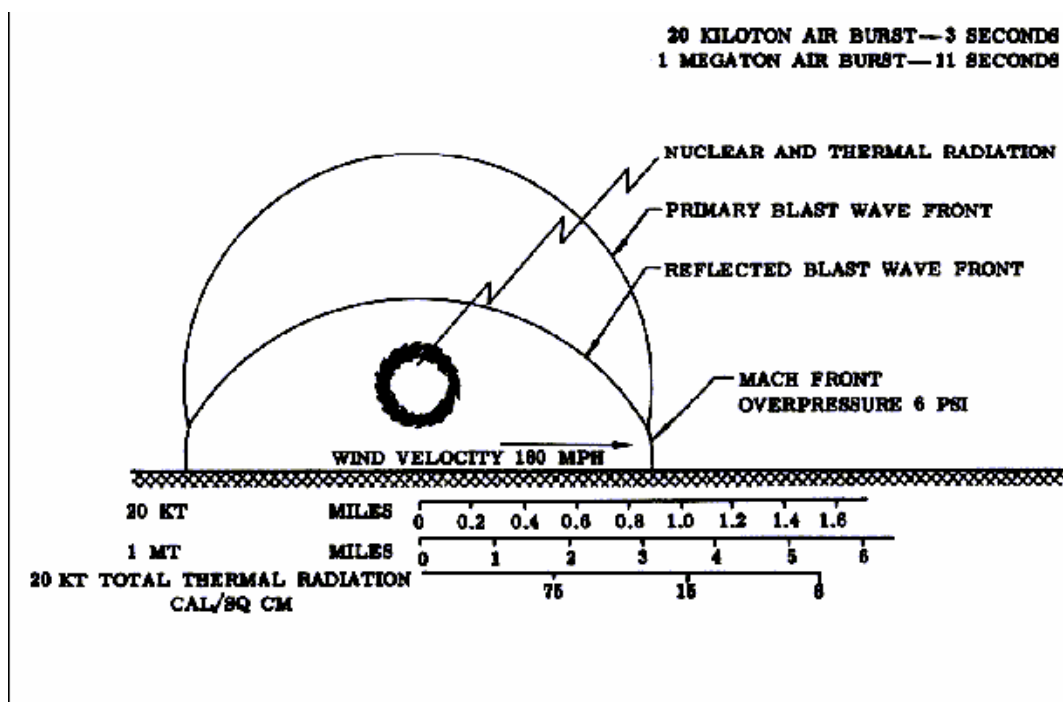


Εναέρια έκρηξη: Δεύτερο στιγμιότυπο.

Ειδικότερα στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ένας τέτοιος συνδυασμός.

Ισχύς όπλου	Ύψος έκρηξης	Χρόνος	Απόσταση από το ΣΜ
20 KT	536m	1,25 sec	0,35 miles (563m)
1 MT	1982m	4,65 sec	1,3 miles (2091m)

Η υπερπίεση στην επιφάνεια της γης στο σημείο έναρξης σχηματισμού του μετώπου Mach (δεύτερο στιγμιότυπο) είναι 16 psi (υπερπίεση 3 psi γκρεμίζει λεπτό τσιμεντένιο τοίχο). Η πύρινη σφαίρα συνεχίζει να εκπέμπει θερμική και πυρηνική ακτινοβολία σε τεράστιες ποσότητες.

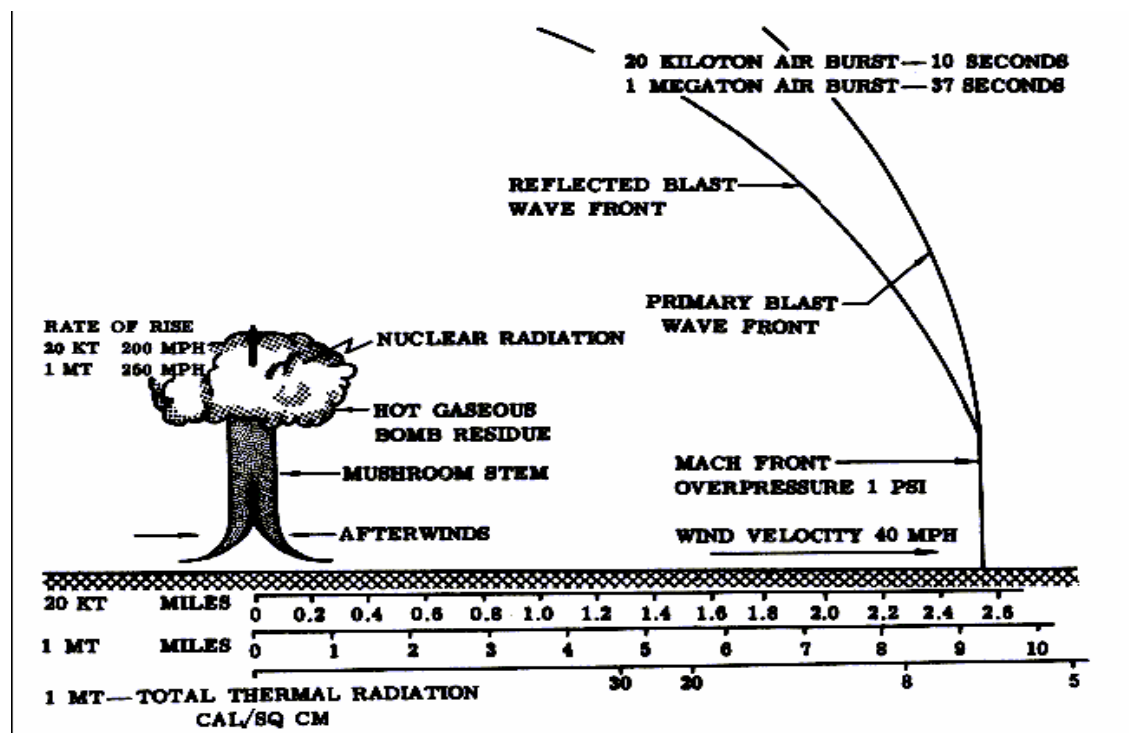


Εναέρια έκρηξη: Τρίτο στιγμιότυπο.

Στο τρίτο στιγμιότυπο παρατηρούμε ότι σε 3 sec (11 sec) για ένα πυρηνικό όπλο 20 KT (1MT) το ωστικό κύμα έχει πια μετατραπεί σε μέτωπο Mach και έχει φτάσει σε απόσταση 0,9 miles (1.444m) για 20 KT και 3,2 miles (5148 m) για 1 MT. Ο άνεμος πίσω από το μέτωπο Mach κινείται με ταχύτητα 180 mph (290 km/h) ενώ στους χρόνους του στιγμιότυπου η υπερπίεση θα είναι 6 psi, ικανή να θρυμματίσει ακόμη και χαλύβδινες κατασκευές. Το ύψος του μετώπου έχει επίσης σημασία, αφού μας δίνει την αίσθηση της επιφάνειας που μπορεί να καταστραφεί. Ειδικότερα στους χρόνους του σχήματος το πυρηνικό όπλο 20 KT θα δώσει ύψος 185 ft (57m) ενώ το όπλο 1MT 680 ft (207m).

Παρατηρούμε ότι η θερμική ακτινοβολία συνεχίζει να παίζει σημαντικό ρόλο για όπλο 1 MT, ενώ για 20 KT σε απόσταση 1,5 miles θα έχω 8 cal/cm², αρκετή για να αναφλέξει χαρτιά και ξερά φύλλα.

Αντίστοιχα σε απόσταση 0,5 miles (805m), για 20 KT, θα έχω ανάφλεξη τσιμεντένιων κτιρίων, πάντα στο δεδομένο χρόνο. Αξίζει να τονίσουμε ότι η διάρκεια εκπομπής δεν είναι γραμμική ως προς την ισχύ του Πυρηνικού οπλου, αλλά αυξάνεται με αυτήν.



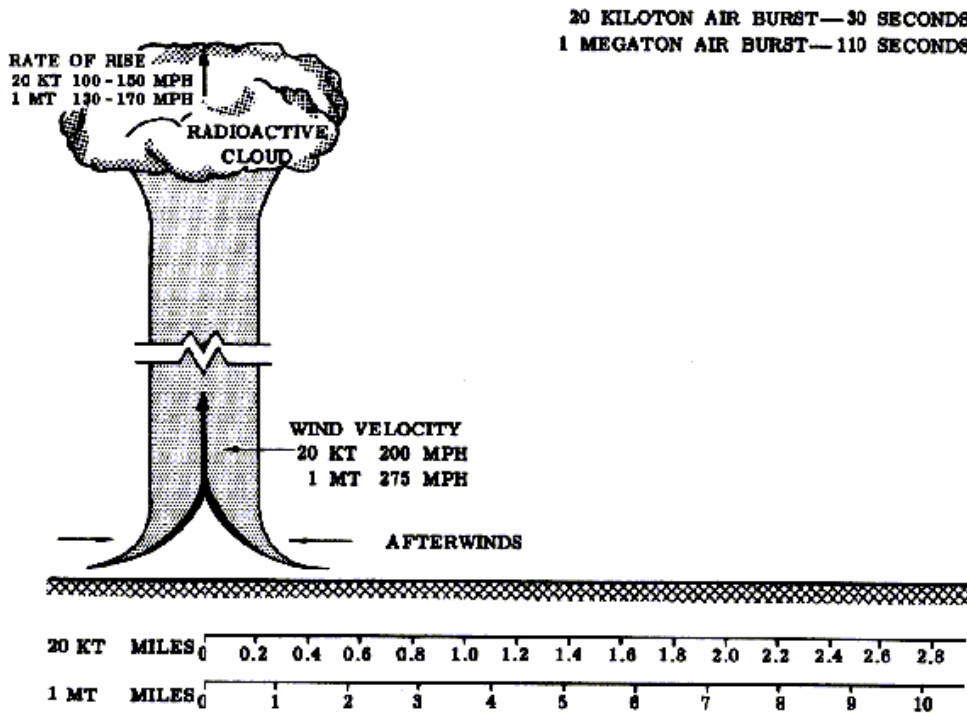
Εναέρια έκρηξη: Τέταρτο στιγμιότυπο.

Μετά την παρέλευση 10 sec (37 sec) για ένα όπλο 20 KT (1MT) το μέτωπο Mach έχει φτάσει σε απόσταση 4 Km (15 Km) από το σημείο μηδέν όταν το ύψος της έκρηξης είναι 536 m (1982 m).

Η υπερπίεση του μετώπου είναι και στις δύο περιπτώσεις περίπου 1 psi ενώ η ταχύτητα του ανέμου είναι γύρω στα 64 Km/h. Η δεδομένη υπερπίεση θα προκαλέσει καταστροφές σε ελαφρές κατασκευές όπως κεραμίδια, ξύλινους φράχτες, πόρτες και παράθυρα κλπ. Για παράδειγμα τα τζάμια σπάνε σε υπερπίεση 0,5 psi. Η θερμική ακτινοβολία για όπλο 20 KT είναι πια αμελητέα, ενώ μόνο σε ακτίνες μερικών μιλίων θα προκληθούν πυρκαγιές από όπλο 1 MT. Στους δεδομένους χρόνους όμως έχει ήδη αρχίσει η δημιουργία του πυρηνικού μανιταριού, αφού με τις τεράστιες θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν (10⁶ οC) η πύρινη σφαίρα αρχίζει να ανέρχεται συμπαρασύροντας όλα τα υλικά που εξάτμιζε. Η ταχύτητα ανόδου είναι 320 Km/h και 400 Km/h για Πυρηνικό όπλο 20 KT και 1MT αντίστοιχα.

Το κενό αέρος που δημιούργησε το ωστικό κύμα τώρα αναπληρώνεται από ανέμους που σπεύδουν από τη γύρω περιοχή με ταχύτητες ανάλογες της ταχύτητας ανόδου. Ο μίσχος του μανιταριού είναι ουσιαστικά φαινόμενο ανάλογο με αυτό της καμινάδας, όπου έχουμε κεντρομόλο ανοδική πορεία θερμών ανέμων. Ο όγκος των εξατμισμένων υλικών (χώμα, πέτρες, ξύλα) είναι της τάξης των εκατομμυρίων τόνων και είναι πια ραδιενεργός, αφού ακτινοβολήθηκε από τα νετρόνια της

έκρηξης. Παράλληλα με την άνοδο των υλικών αυτών, τα βαρύτερα τμήματα αρχίζουν να πέφτουν στη γύρω περιοχή, αποτελώντας την αρχή της ραδιενεργού διασποράς.



Εναέρια έκρηξη: Πέμπτο στιγμιότυπο.

Τα πύρινα υπολείμματα του πυρηνικού όπλου συνεχίζουν την ανοδική τους πορεία με ταχύτητες 240 Km/h (273 Km/h) σε χρόνο 30 sec (110 sec) και για ισχύ 20 KT (1 MT). Παράλληλα, καθώς το υλικό της πύρινης σφαίρας συναντάει ψυχρά αέρια στρώματα, διαστέλλεται και το υψηλότερο τμήμα της αποκτάει το χαρακτηριστικό σχήμα του μανιταριού με το μίσχο να αποτελείται από τους υστερανέμους του φαινομένου της καμινάδας. Τα υλικά του νέφους συμπυκνώνονται σε ραδιενεργά σωματίδια, τα οποία θα αποτελέσουν τη ραδιενεργό διασπορά.

Οι υστεράνεμοι κινούνται με ταχύτητες 320 Km/h και συνεχίζουν να τροφοδοτούν το νέφος με υλικά από τη γειτονιά της έκρηξης. Οι άνεμοι αυτοί είναι υπεύθυνοι για την αρνητική φάση του ωστικό κύμα που συμπαρασύρει τα πάντα στο πέρασμά του προς την περιοχή της έκρηξης.

Στους χρόνους του στιγμιότυπου για έκρηξη 20 KT (1 MT) το νέφος θα έχει φτάσει σε ύψος 2.400m (11.200 m) ενώ αντίστοιχα τα μέγιστα ύψη που θα φτάσουν τα νέφη σε 10 min θα είναι 11.200 m (22.400 m).

Ειδικά λοιπόν για όπλο 1MT το νέφος θα μπει στη στρατόσφαιρα όπου με άνεση θα κινηθεί σε αποστάσεις χιλιάδων χιλιομέτρων και ενδεχομένως τμήμα του θα φτάσει στο αντίθετο ημισφαίριο και θα αρχίσει να πέφτει εκεί με τη μορφή ραδιενεργού διασποράς (rainfall). Δηλαδή για όπλο ισχύος της τάξεως των MT η τοπική ραδιενεργός διασπορά από το νέφος είναι αμελητέα. Όμως η ίδια η έκρηξη θα ακτινοβολήσει με νετρόνια τη γύρω περιοχή καθιστώντας τη ραδιενεργή.

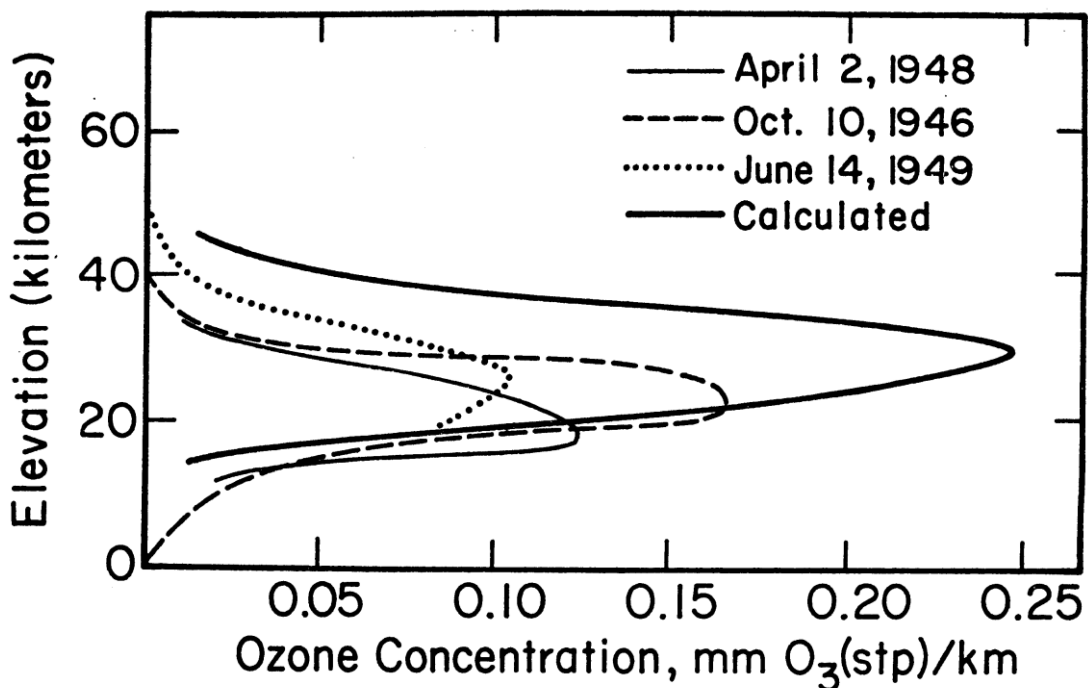
Τα υλικά ενός χαμηλού νέφους θα αρχίσουν να διασκορπίζονται από τον άνεμο και θα αποτελέσουν τη ραδιενεργό διασπορά της γύρω περιοχής, η οποία θα έχει μια ελλειψοειδή μορφή. Αναμένεται να υπάρξει πρώιμη (τοπική) ραδιενεργός διασπορά μόνο όπου το HOB είναι μικρότερο από 180 m (915 m) για όπλο ισχύος 20 Kt (1 MT). Στους χρόνους του σχήματος ελάχιστη ραδιενεργός διασπορά φτάνει στο έδαφος από το ραδιενεργό νέφος. Αυτό οφείλεται τόσο στη μεγάλη απόσταση από το έδαφος, όσο και στην ελάττωση της ενεργότητας των προϊόντων της σχάσης λόγω ραδιενεργού διάσπασης.

3.2 Επισκόπηση των σημαντικότερων μελετών σχετικά με την επίδραση των Πυρηνικών Δοκιμών στο Στρατοσφαιρικό Οζόν.

Το 1970 ο Curtzen δημοσίευσε ένα άρθρο με το οποίο παρουσίαζε ενδείξεις ότι τα οξειδία του αζώτου NO_x θα μπορούσαν να επηρεάζουν την φυσική συγκέντρωση του όζοντος στην ατμόσφαιρα. Σε εργαστηριακές έρευνες είχε διαπιστωθεί ότι τα οξειδία NO και NO₂ μετατρέπουν το όζον σε μοριακό οξυγόνο (O₂) και ατομικό οξυγόνο (O).

Οι αρχικές έρευνες είχαν επικεντρωθεί στα οξειδία του αζώτου που εκλυονταν από τα υπερηχητικά αεροπλάνα αλλά πολύ σύντομα ξεκίνησαν και οι πρώτες έρευνες για την επίδραση των πυρηνικών εκρήξεων στην ατμόσφαιρα, οι οποίες λόγω των υψηλών θερμοκρασιών δημιουργούν μεγάλες ποσότητες NO_x.

Οι πρώτες ενδείξεις είχαν προέλθει από την ασυμφωνία των θεωρητικών προβλέψεων και υπολογισμών που βασιζόταν στις αντιδράσεις Charman, με τις πειραματικές μετρήσεις και παρατηρήσεις όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί {1, fig.4}



Αυτή η απόκλιση μεταξύ υπολογισμών και παρατηρήσεων, οδήγησε στα παρακάτω αίτια που δικαιολογούσαν τις διαφορές αυτές λόγω καταστροφής του όζοντος:

- Φαινόμενα στροβιλισμών που διαχέουν το όζον προς την τροπόσφαιρα όπου έρχεται σε επαφή με σταγονίδια νερού και σκόνη.
- Οι αλλαγές των εποχών όπου κυρίως στους πόλους ο στρατοσφαιρικός αέρας που συγκεντρώνεται το χειμώνα αρχίζει την άνοιξη να αναμιγνύεται με τον αέρα της τροπόσφαιρας
- Χημικές αντιδράσεις διάσπασης του όζοντος σε οξυγόνο που οφείλονται στη ηλιακή ακτινοβολία
- Καταλυτικές αντιδράσεις καταστροφής από H, OH και νερό
- Καταλυτικές αντιδράσεις που οφείλονται σε NO_x.

Ο Curtzen και ο Johnston ήταν οι πρώτοι που έρευνησαν εκτενώς την κατάλυση του όζοντος λόγω των NO_x που υπήρχαν στην ατμόσφαιρα καθώς και αυτών που παράγονταν από ανθρώπινη δραστηριότητα. Ο Johnston υπολόγισε ότι μια συγκέντρωση NO_x τάξεως 1-10 ppb (parts per

billion) είναι αρκετή για να έρθουν σε συμφωνία οι παρατηρούμενες μετρήσεις με τη φωτοχημική θεωρία {4}.

Η πρώτη πλήρης μελέτη για την επίδραση των πυρηνικών δοκιμών στο στρώμα του όζοντος έγινε από τους Foley & Ruderman το 1973 {2}.

Κατ'αρχήν είναι σημαντικό να γνωρίζουμε ποιές είναι οι φυσικές συγκεντρώσεις NOx στην ατμόσφαιρα ώστε να μπορούν να υπολογιστούν σωστά οι επιδράσεις των προστιθέμενων τεχνητά παρογομένων ποσοτήτων.

Στον πίνακα που ακολουθεί έχουν συγκεντρωθεί στοιχεία για την φυσική συγκεντρωση οξειδίων του αζωτού στην ατμόσφαιρα. Από {1, table-2} εμφανίζονται οι πρώτες εκτιμήσεις της στρατοσφαιρικής μέσης συγκέντρωσης του φυσικού NOx σε μονάδες ppb (parts per billion) 10^{-9} mole και {2, table-1} τα συνολικά μόρια NO στην στρατόσφαιρα (15-50 km)

Αναφορά	NOx σε ppb	Μόρια NOx (10^{34})
Nicolet (1965)	3	2
Crutzen (1970)	12	7
Park & London (1971)	5	3
Johnston (1971)	2,3 – 6,6	4

Στον πιο κάτω πίνακα {1, table-5} παρουσιάζονται συγκεντρωμένες όλες οι αντιδράσεις καταλυτικής καταστροφής του όζοντος από NOx.

THE CATALYTIC (C), “DO-NOTHING” (D), AND OTHER OZONE DESTROYING (E) CYCLES

$\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$	(6)
$\text{NO}_2 + \text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{O}_2$	(7)
<hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/>	
net: $\text{O} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2$	(C)
 $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$	(6)
$\text{NO}_2 + \text{UV (300–400 nm)} \rightarrow \text{NO} + \text{O}$	(8)
$\text{O} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{O}_3 + \text{M}$	(2)
<hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/>	
net: no chemical reaction	(D)
$\text{UV (300–400 nm)} \rightarrow \text{heat}$	
 $\text{NO}_2 + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_3 + \text{O}_2$	(9)
$\text{NO}_3 + \text{VISIBLE LIGHT} \rightarrow \text{NO} + \text{O}_2$	(10)
$\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$	(6)
<hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/>	
net: $2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{O}_2$	(E)

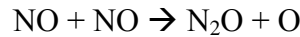
Οποιαδήποτε διαδικασία θερμάνει τον ατμοσφαιρικό αέρα πάνω από 2.000 ~ 2.300 K παράγει σημαντικές ποσότητες NOx. Τέτοιες διαδικασίες θέρμανσης μπορεί να προέρχονται από τις μηχανές των αεροσκαφών Jet, καθώς και από πυρηνικές εκρήξεις στην ατμόσφαιρα.

3.2.1 Σχηματισμός NOx από πυρηνικές εκρηξεις

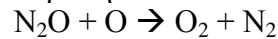
Οι πυρηνικές εκρηξεις μπορούν να παράγουν στην ατμόσφαιρα τεράστιες ποσότητες οξειδίων του αζώτου με τρεις τρόπους.

1. Οι πυρηνικές εκρηξεις στην τροπόσφαιρα εκλυουν τεράστιες ποσότητες θερμού αέρα. Η πύρινη σφαίρα καθώς ανέρχεται ψύχεται. Σε θερμοκρασίες κοντά στους 2.000 K το NO το οποίο ήταν σε θερμοδυναμική ισορροπία με άλλα συστατικά της ατμόσφαιρας ξεκινάει αντιδράσεις καταστροφής του:

Η κύρια αντίδραση:



Ακολουθείται από την ταχύτερη αντίδραση



Η πύρινη σφαίρα διαπερνά την τροπόσφαιρα και καταλήγει στην στρατόσφαιρα όταν η αρχική έκρηξη έχει ισχύ $> 1 \text{ MT}$.

Αυτή είναι και η κυριότερη πηγή NOx στην στρατόσφαιρα από τις πυρηνικές εκρηξεις.

2. Τα ραδιενεργά θραυσματά της σχάσης, καθώς αποσυντίθενται στην στρατόσφαιρα ενεργοποιούν ένα μηχανισμό παραγωγής στρατοσφαιρικού NOx, όταν ο λόγος

$$[\text{NO}]/[\text{O}_2] < 20\text{-}50 \text{ ppb}$$

3. σε εκρηξεις πολύ μεγάλου ύψους $> 100 \text{ km}$ δεν δημιουργείται πύρινη σφαίρα, όμως δημιουργούνται ακτίνες X που απορροφούνται από τη στρατόσφαιρα σε ύψος 80-90 Km και παράγουν NOx στο ιονισμένο αυτό θερμό στρώμα. Βέβαια οι ποσότητες που παράγονται από αυτή τη διαδικασία είναι αμελητέες σε σχέση με τις ποσότητες της 1^{ης} διαδικασίας.

3.2.2 Μελέτη εκρήξεων χαμηλού υψους

- Το 1/3 της απελευθερούμενης ενέργειας ακτινοβολείται άμεσα (σε λίγα δευτερόλεπτα) και απομακρύνεται
- Το 1/3 δημιουργεί το φωστικό κύμα.
- Το 1/3 θερμαίνει τον αέρα και δημιουργεί την πύρινη σφαίρα.

Η ολική θερμική ενέργεια που παραμένει στον αέρα είναι

$$E_{\text{HA}} \sim 1/3 \times 4 \times 10^{22} Y_{\text{MT}} \text{ (erg)} = 1/3 \times 10^{12} Y_{\text{MT}} \text{ (kcal)}$$

Όπου Y_{MT} είναι η ισχύς της έκρηξης σε MT.

Στη συνέχεια παραθέτονται διάφορες εκτιμήσεις των ποσοτήτων NO που παράγονται καθώς ανέρχεται στην ατμόσφαιρα η πύρινη σφαίρα για διάφορα μοντέλα ψύξης.

- Καθώς η ανερχόμενη πύρινη σφαίρα αναμιγνύεται με τον περιβάλλοντα αέρα, με τη χρήση της αρχής διατήρησης της ενέργειας μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό μορίων NO καθώς ο αέρας έχει ψυχθεί στους 2000 K. Η ολική ενέργεια N μορίων θα είναι

$$E_{\text{HA}} = NkT_f/\gamma - 1 \quad \text{με } \gamma = 1,35$$

Η συνολική ενέργεια είναι αυτή της αρχικής έκρηξης συν ένα μικρότερο ποσό που συνεισφέρει ο περιβάλλον αέρας θερμοκρασίας 270 K.

Από τις δύο προηγούμενες σχέσεις μπορούμε να βρούμε τον αριθμό N των μορίων NO

$$N_{NO} \sim 1,5 \times 10^{32} Y_{MT}$$

- Η πυκνότητα και κατανομή θερμοκρασίας 2,6 sec μετά από μια έκρηξη 1 MT φαίνεται στο παρακάτω σχήμα {2, fig.1}

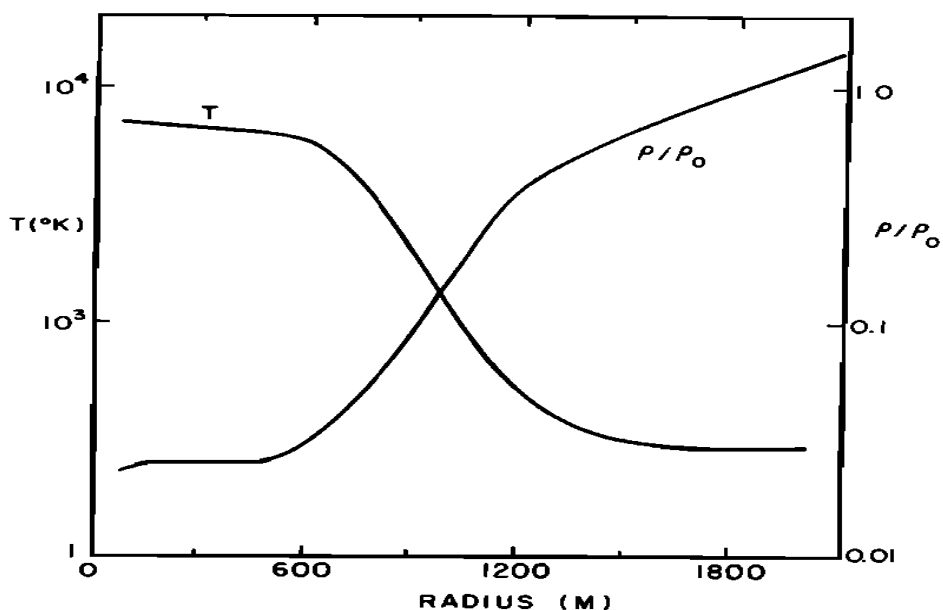


Fig. 1. Fireball density ρ and temperature T 2.6 sec after a 1-MT surface burst as a function of distance from the initial explosion center [Brode, 1968]. The ambient atmosphere density $\rho_0 = 1.3 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$.

Ο κεντρικός πυρηνάς των 6.000K εκτείνεται σε μια ακτίνα 600m, ενώ στα 900m έχει πέσει στους 2.000K. Αν αυτός ο αέρας που βρίσκεται εντός των 900m, ανερχομενος ψυχθεί χωρίς να αναμιχθεί με άλλο ψυχρότερο αέρα, τότε θα παραχθούν 3×10^{31} μόρια NO και συνεπώς:

$$N_{NO} \sim 0.3 \times 10^{32} Y_{MT}$$

Αυτή η τιμή είναι και το κατώτερο όριο για θεωρητικούς υπολογισμούς

- Αν η αρχική θερμική ενέργεια που περιέχεται στην ακτίνα των 900m αναμιχθεί με τον περιβάλλοντα ψυχρό αέρα μέχρι να φτάσει τους 2.000K τότε

$$N_{NO} \sim 0.8 \times 10^{32} Y_{MT}$$

- Αν ολόκληρη η πυρίνη σφαίρα εντός ακτίνας 1.100m στα 2,6sec αναμιχθεί κατά την άνοδο της και η μέση θερμοκρασία φτάσει τους 2.000K τότε

$$N_{NO} \sim 1,2 \times 10^{32} Y_{MT}$$

- Οι Zeldovich & Raizen εκτιμησαν ότι 2×10^4 τόνοι TNT παράγουν 100 τόνους NO, πριν η πυρίνη σφαίρα ανέλθει και αναμιχθεί με επιπλέον αέρα και αυξηθεί η ποσότητα NO. Η αρχική ποσότητα μορίων NO είναι $N_{NO} \sim 9 \times 10^{31} Y_{MT}$
Αν συμπεριληφθεί και η ποσότητα του αναμεμιγμένου κατά την άνοδο αέρα τότε καταλήγουμε σε μια τιμή:

$$N_{NO} \sim 1 \times 10^{32} Y_{MT}$$

3.2.3 Εναπόθεση ΝΟ στη στρατόσφαιρα

Μετά από μια χαμηλού ύψους εναέρια έκρηξη, το καυτο νέφος φτάνει σε ύψος ανάλογα του μεγέθους (ισχύος) της έκρηξης, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί {2, fig.3}, όπου έχει συμπεριληφθεί και η συγκέντρωση όζοντος της στρατόσφαιρας στον ισημερινό.

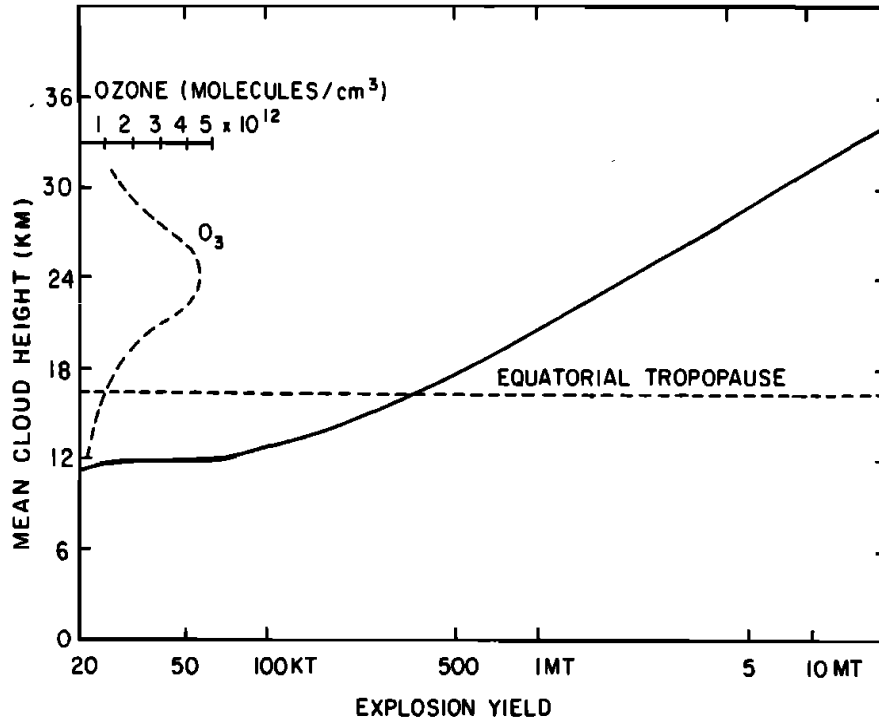


Fig. 3. Mean height reached by stabilized cloud as a function of the explosion yield [Glasstone, 1962]. These data are presumed to be based on tests near the equator with a 17 km tropopause. Also indicated is a typical equatorial ozone profile.

Φαίνεται ότι από μια έκρηξη $> 1\text{MT}$ φτάνουν τα θερμά αέρια στο ύψος της στρατόσφαιρας και του στρώματος του οζοντος.

Μια φαινομενολογική προσέγγιση για το κατώτερο και ανώτερο υψος του θερμού νέφους δίνεται από τους τύπους:

$$H_t \sim 22(Y_{MT})^{0.2} \text{ km} \quad \text{ανώ τμήμα νέφους}$$

$$H_b \sim 13(Y_{MT})^{0.2} \text{ km} \quad \text{κάτω τμήμα νέφους}$$

Κοντά στους πόλους η τροπόπαυση βρίσκεται σε πολύ χαμηλότερο ύψος απ'ότι στον ισημερινό (7,5 km έναντι 17 km) οπότε από μια έκρηξη ακόμη και 0,1MT θα φτάσουν τα αέρια στην ζώνη του όζοντος.

Θα παρουσιάσουμε ενδεικτικά μερικές πυρηνικές δοκιμές όπως αναφέρονται στους πιο κάτω πίνακες {2, tab.3 και tab.5} για να πάρουμε μια αρχική εικόνα των ποσοτήτων NO_x που φτάνουν στην στρατόσφαιρα. Στις μεγάλες δοκιμές που έγιναν κατά την περίοδο 1961-1962 συνολικής ισχύος 340 MT μερικές εκ των οποίων ήταν ιδιαίτερα μεγάλες (μία 58MT και αρκετές 20-30 MT) υπολογίζεται ότι έφτασαν στη στρατόσφαιρα περίπου 3×10^{34} μόρια NO.

TABLE 3. Estimated Stratospheric NO Injection from High-Yield Nuclear Explosions

Interval	Total Explosion Yield, MT	Molecules NO
1945 to 1951	...	...
1952 to 1954	60	0.6×10^{33}
1955 to 1956	28	0.3×10^{33}
1957 to 1958	85	0.8×10^{33}
1959 to 1960	...	...
1961 to 1962	340	3×10^{34}
1962 to 1970	...	...

TABLE 5. Principal USSR and U.S. Nuclear Tests in 1961 to 1962

Tests	Yield
<i>Principal USSR Atmospheric Tests*</i>	
<i>1961</i>	
Oct. 23	25 MT + several MT
Oct. 31	58 MT + several MT
Sept. 14; Oct. 4, 20	several MT
Total	120 MT
<i>1962</i>	
Aug. 5	30 MT
Sept. 25	<30 MT + several MT
Dec. 24	~20 MT
Aug. 20, 25, 27; Sept. 15, 18, 19, 21; Oct. 22	several MT
Total	180 MT
<i>Principal U.S. Atmospheric Tests 1962</i>	
May 2; June 10, 30, July 11	low MT
June 27†	MT range
Oct. 18§	low MT
Oct. 30§	MT range
July 9§	1.4 MT at 400 km
Total	37 MT

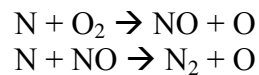
* Novaya Zemlya.

† Christmas Island.

§ Johnston Island.

3.2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν τις ποσότητες NO

Τα ελεύθερα άτομα αζώτου (N) στον αέρα καταναλώνονται σύμφωνα με τις αντιδράσεις



Ανάλογα με τη σχετική συγκέντρωση NO - O₂ και τη θερμοκρασία, τα ελεύθερα άτομα του αζώτου μπορεί να αυξησουν ή να μειωσουν τις ποσότητες του NO (στις χαμηλές θερμοκρασίες υπερσχύει η πρώτη αντίδραση με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συγκέντρωση σε NO)

Επίσης από τις εκρήξεις μεγάλης ισχύος, κυρίως σύντηξης, παράγονται ιονισμένα σωματίδια τα οποία με τη σειρά τους ιονίζουν άτομα O⁺ και N⁺ με αποτέλεσμα να δημιουργούνται επιπλέον μόρια NO. {2, tab.4}

Κάτι ανάλογο συμβαίνει και σε εκρήξεις πολύ μεγάλου ύψους όπου πάλι παράγονται φορτισμένα σωματίδια.

TABLE 4. Species Produced in Air by a Fast Ionizing Particle [Ory and Gilmore, 1971]

Species	Number per Ion Pair
N	0.5
O	0.3
N ₂ ⁺	0.75
O ₂ ⁺	0.19
N ⁺	0.04
O ⁺	0.02

3.2.5 Θερμοδυναμική των εκρήξεων

Αρχικά στο σημείο της έκρηξης αναπτύσσονται θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 10^5 K λόγω της εκπομπής ακτινοβολίας X, ο αέρας θερμαίνεται και αποκτά απότομα κινητική ενέργεια δημιουργώντας ωστικά κύματα. Η πύρινη σφαίρα που δημιουργείται έχει θερμοκρασία 6.000 K και περιέχει το 1/3 της αρχικής ενέργειας της έκρηξης.

Η ενέργεια μια πυρηνικής έκρηξης είναι:

$$E_{tot} = 10^{12} \times Y_{MT} \text{ (kcal)}$$

Αν το 1/3 αυτής πηγαίνει στο σχηματισμό του θερμού αέρα των 6.000K η παραγόμενη ποσότητα του θερμού αέρα υπολογίζεται από την ενέργεια διά την ολική ενθαλπία του αέρα (84.2Kcal/mole).

Πίνακας που ακολουθεί {3 table-1}

$$n(\text{air}, 6.000\text{K}) = (10^{12} Y_{MT} / 3 \times 84.2) \text{ moles}$$

$$N(\text{air}, 6.000\text{K}) = 2.38 \times 10^{32} Y_{MT} \text{ μόρια.}$$

Καθώς ο αέρας ψύχεται με αδιαβατική εκτόνωση, εκπομπή ακτινοβολίας και ανάμιξη με τον περιβάλλοντα αέρα, αναμένεται να δημιουργηθεί κατά την ψύξη στους 2.000K ποσότητα μορίων NOx ως κλάσμα 0.008 των συνολικών μορίων. Έτσι η ελάχιστη παραγόμενη ποσότητα οξειδίων του αζώτου είναι:

$$N_{NO}(\text{min}) = 0.008 \times 2.38 \times 10^{32} \times Y_{MT} = 0.19 \times 10^{32} \times Y_{MT} \text{ μόρια}$$

TABLE 1. Thermodynamic Properties of Air between 298° and 6000°K

	298°K	2000°K	3000°K	4000°K	5000°K	6000°K
<i>Relative Composition*</i>						
N ₂	0.78	0.78	0.76	0.75	0.75	0.735
O ₂	0.21	0.21	0.165	0.038	0.0036	4 x 10 ⁻⁴
NO	...	0.008	0.044	0.052	0.026	0.014
Ar	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
O	...	3 x 10 ⁻⁴	0.046	0.29	0.39	0.41
N	...	...	...	0.002	0.028	0.075
<i>H_T⁰ - H₂₉₈⁰, kcal mole⁻¹</i>						
N ₂	0	13.42	22.16	31.08	40.12	49.24
O ₂	0	14.15	23.45	33.20	43.26	53.48
NO	0	13.84	22.72	31.77	40.92	50.19
Ar	0	8.45	13.43	18.38	23.34	28.30
O	0	8.45	13.52	18.57	23.72	28.98
N	0	8.45	13.44	18.53	23.92	29.79
<i>Δ_fH₂₉₈⁰ + H_T⁰ - H₂₉₈⁰, kcal mole⁻¹</i>						
NO	21.45	35.29	44.17	53.22	62.37	71.64
O	58.98	67.52	72.50	77.55	82.70	87.96
N	112.6	121.0	126.0	131.1	136.5	142.3
<i>Total Standard Enthalpy of Air, kcal mole⁻¹</i>						
	0	13.8	26.1	50.3	68.2	84.2
<i>Heat Capacities, † cal mole⁻¹ deg⁻¹</i>						
C _p (N ₂)	6.96	8.601	8.86			
C _p (O ₂)	7.02	9.029	9.55			
γ(N ₂)	1.40	1.300	1.30			
γ(O ₂)	1.40	1.282	1.27			

Enthalpy functions refer to the quantity of material in 1 mole of air at 298°K.

*Approximately 1-atm total pressure.

†γ = C_p / (C_p - R).

3.2.6 Χημική κινητική

Κατα την άνοδο της πύρινης σφαίρας ο αέρας που αναμιγνύεται θερμαίνεται και στη συνέχεια αρχίζει να ψύχεται. Οι ποσότητες NO που θα παραχθούν εξαρτώνται από τρόπο ψύξης (χρονική εξέλιξη). Αν ο εξωτερικός αέρας δεν φτάσει τους 2.000K δεν θα παραχθούν NOx, αντιθέτως αν όλη η ποσότητα του αέρα υπερβεί τους 2.000K, για λίγα δέκατα του δευτρολέπτου, τότε θα παραχθεί η μέγιστη ποσότητα NOx.

Η διαφορά ενθαλπίας του αέρα $H_T^0 - H_{298}^0$ συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας διασπασης για το σχηματισμό ατόμων O και N είναι 84.2 στους 6.000K και 13.8 στους 2.000K {3, table-1} Ο λόγος είναι (6:1) δηλαδή απαιτούνται 5 moles αέρα στους 298K να αναμιχθούν με 1 mole αέρα στους 6.000K ώστε να παραχθούν 6 moles αέρα των 2.000K.

Η πύρινη σφαίρα πρέπει να φτασει σε σημαντικό ύψος πριν ψυχθεί στους 2.000K. Υπάρχει επίσης κάποια μικρή αλλά σημαντική συνεισφορά της αδιαβατικής εκτόνωσης στη διαδικασία ψύξης, και στο έργο ανόδου του αέρα μέσα στο βαρυτικό πεδίο της γής. Όλοι αυτοί οι όροι συνεισφέρουν περίπου 15% στην ψύξη της πύρινης σφαίρας.

Η μέγιστη ποσότητα παραγωγής NO είναι

$$N_{NO(max)} = 0.19(84.2/13.8)(0.85) \times 10^{32} \times Y_{MT} = 0.99 \times 10^{32} \times Y_{MT}$$

Για να μετρηθούν οι επιδράσεις στη μείωση του όζοντος απαιτούνται μακροχρόνιες μετρήσεις 10 τουλάχιστον ετών ώστε με σιγουριά 95% να εντοπιστεί μια μείωση της τάξεως του 5% στο όζον.

Η προσέγγιση για 20KT έκρηξη TNT και γραμμική επέκταση για μελέτη πυρηνικών εκρηξεων κλίμακας MT, δεν είναι απόλυτα σωστή γιατί τα φωσικά κύματα δεν είναι γραμμικά φαινόμενα και συνεπώς δεν μπορεί να γίνουν απλοί υπολογισμοί με συντελεστές κλίμακας.

Υπολογισμοί των ποσοτήτων των NO που φτάνουν στη στρατόσφαιρα δεν είναι εύκολο να γίνουν γιατί συνεισφέρουν πολλοί παράγοντες που αυξάνουν είτε μειώνουν τις ποσότητες αυτές:

Η αρχική πύρινη σφαίρα μειώνεται κατά ένα συντελεστή 6 κατά την ψύξη στους 2.000K και στη συνέχεια κατά συντελεστή 1.700 κατά την άνοδο της στη στρατόσφαιρα. Το συννεφο ανερχόμενο παρασύρει από την τροπόσφαιρα υγρασία. Τα οξείδια του αζώτου είναι διαλυτά στο νερό με αποτέλεσμα να απομακρύνονται. Οι φασματοσκοπικές μετρήσεις για τις παρατηρούμενες ποσότητες NOx δίνουν ένα συντελεστή 8.000 φορές μικρότερο από τους θεωρητικούς υπολογισμούς των Foley-Ruderman.

Καταλήγουμε λοιπόν στο ότι μια μεγάλης ισχύος έκρηξη παράγει

$$N_{NO} = (1/6 \sim 1) \times 10^{32} \times Y_{MT}$$

Κατα την περίοδο 1952 –1962, από τους 513 MT πυρηνικών εκρηξεων, η συνολική ποσότητα παραγόμενων NOx εκτιμάται σε

$$N_{NO} = (0.8 \sim 5.1) \times 10^{34} \text{ μόρια.}$$

3.2.7 Βραχυπρόθεσμα αποτελέσματα

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις των Foley-Ruderman για το ύψος και τις διαστάσεις ενός νέφους παραγόμενου από πυρηνική έκρηξη, σε γεωγραφικό πλάτος (45°), παίρνουμε τα διαγράμματα για 30 λεπτά μετά την έκρηξη και για εκρήξεις 0,5- 5.0- και 50- MT. {3, fig-1}

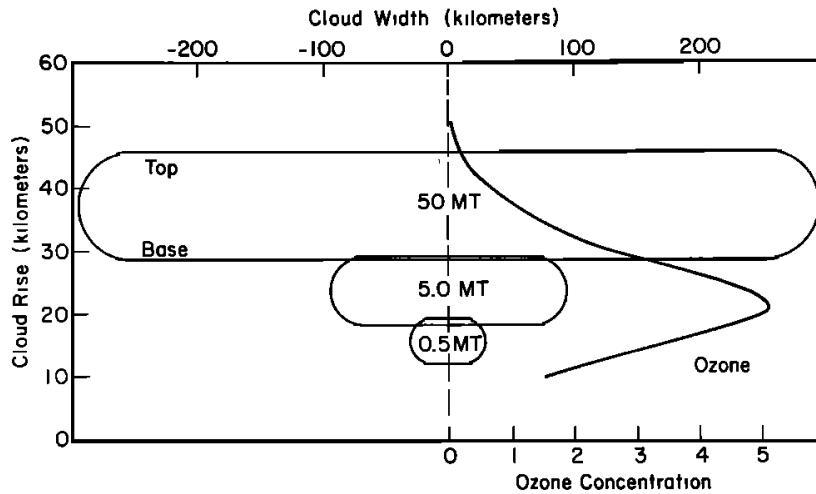


Fig. 1. Elevation and dimension of nuclear bomb clouds 30 min after detonation according to formulas by Foley and Ruderman. A standard ozone profile at 45° latitude is shown.

Η επικάλυψη με τη ζώνη του όζοντος φαίνεται πως εξαρτάται από την ισχύ της έκρηξης. Πιο παραστατικά στο σχήμα που ακολουθεί {3, fig-2} φαίνεται ότι:

- 0.2 MT το νέφος παραμένει στην τροπόσφαιρα,
- 1 MT φτάνει στην στρατόσφαιρα αλλά όχι στην περιοχή μέγιστης συγκεντρωσης όζοντος
- 10 MT καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της ζώνης όζοντος
- 58 MT πηγαίνει ψηλότερα από την ζώνη όζοντος

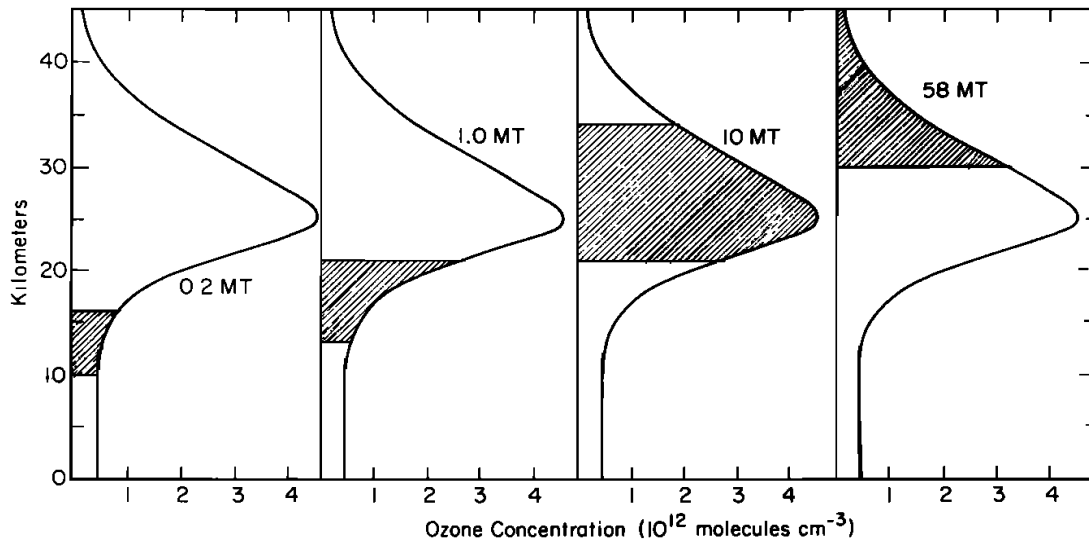


Fig. 2. Overlap of standard tropical ozone profile with bomb clouds 20 min after detonation.

Αρα μια βόμβα 10 MT που το νέφος της καλύπτει το 65% της ζώνης όζοντος μπορεί λόγω του καταλυτικού κύκλου NO-O₃ να μειώσει 30-50% την ποσότητα όζοντος στην περιοχή του νέφους κατα τις πρώτες 10 μέρες. Μικρότερα αποτελέσματα έχουν οι μικρότερες και οι μεγαλύτερες εκρήξεις.

Κατα την ψύξη της πύρινης σφαίρας εκπέμπεται ακτινοβολία μεταξύ 185-242 nm η οποία διασπά τα μόρια οξυγόνου και σχηματίζει όζον στην περιοχή της έκρηξης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παράγονται ποσότητες όζοντος που παραποιούν τα δεδομένα των μετρήσεων κάτω από το νέφος μιας έκρηξης κατά τις πρώτες μέρες σχηματισμού τους.

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς του Johnston et Al, η ποσότητα όζοντος που μπορεί να παραχθεί με τον τρόπο αυτό είναι:

$$N_{\text{Ozone}} = 3 \times 10^{31} \times Y_{\text{MT}}$$

Περίπου δηλαδή το 1/3 των παραγομένων μορίων NO (σύμφωνα με τη μέγιστη εκτίμηση)

Η ποσότητα αυτή βέβαια συγκρινόμενη με την συνολική ποσότητα όζοντος είναι αμεληταία. Όμως τοπικά στην περιοχή του νέφους αποτελεί το 40% της στηλης όζοντος 30 λεπτά μετά την έκρηξη.

Συνεπώς η ποσότητα του παραγόμενου όζοντος είναι συγκρίσιμη με την ποσότητα όζοντος που καταστρέφεται από τα NO που παράγει η έκρηξη.

Τα μεγαλύτερα σοβιετικά Test έγιναν κυρίως το χειμώνα σε βόρεια πλάτη και δεν υπήρχε αρκετό ηλιακό φως να ενισχύσει τις φωτοχημικές αντιδράσεις που καταστρέφουν το όζον.

Το όζον στις πολικές περιοχές προέρχεται από μεταφορά από θερμότερες ζώνες όπου σχηματίζεται φωτοχημικά. Συνεπώς οι μειώσεις όζοντος από τις προαναφερόμενες δοκιμές καθυστερούν καθώς πρέπει τα παραγόμενα NO να μεταφερθούν σε θερμότερες περιοχές και να επιδράσουν στο όζον που υπάρχει εκεί.

Ένα νέφος πυρηνικής έκρηξης μετά από 30 λεπτά έχει μέγεθος 10^{-4} της επιφάνειας της γης. Συνεπώς η πιθανότητα να παρατηρηθεί από επίγειο σταθμό η μείωση του όζοντος αμέσως μετά την έκρηξη είναι πολύ μικρή. Επιπλέον η ποσότητα του όζοντος που παράγεται και περιβάλλει το νέφος επηρεάζει τις μετρήσεις.

Αρα πρέπει να κοιτάξουμε για μακροχρόνιες επιδράσεις στο σύνολο της γηινης ατμοσφαιρας κι όχι σε τοπικά βραχυπρόθεσμα αποτελέσματα.

3.2.8 Αποτελέσματα σε βάθος χρόνου

Αν την παραγόμενη ποσότητα NOx που προκύπτει από την εξίσωση

$$N_{\text{NO}} = (1/6 \sim 1) \times 10^{32} \times Y_{\text{MT}}$$

την πολλαπλασιάσουμε με τη συνολική ισχύ των εκρήξεων που έγιναν από το 1952-1962 βρισκουμε τις ποσότητες NOx που έχουν εκλυθεί στην στρατόσφαιρα. Όμως εκτός από τη συνολική ποσότητα, πολύ σημαντική είναι η κατανομή των NOx στη στρατόσφαιρα.

Ο Johnston [1] έχει δείξει ότι αν στο φυσικό υπόβαθρο NOx που είναι είναι περίπου 8.6×10^{34} μόρια, και προστεθούν επιπλέον 4.4×10^{34} μόρια τεχνητώς παραγομενων NOx τότε το όζον θα μειωθεί από 3~50% αναλογως της κατανομής του πρόσθετου παραγόμενου NOx.

Συνεπώς εφόσον η μείωση εξαρτάται από την κατανομή NOx, είναι σημαντικό στη μελέτη των εκρήξεων να λαμβάνουμε υπ' όψιν μας όχι μόνο την ισχύ αλλά και την γεωγραφική κατανομή τους.

Ένας σημαντικός παράγοντας είναι το ύψος που φτάνουν τα αέρια στη στρατόσφαιρα. Στον ισημερινό η μέση συγκέντρωση ατόμων οξυγόνου είναι 10^4 στα 10 km, 10^5 στα 15km, 10^6 στα 20 και 10^8 στα 35km, αρα η καταλυτική επίδραση των οξειδίων του αζώτου είναι 10 φορές πιο γρηγορη στα 20km απ'ότι στα 15 km. Αρα η κατανομή καθ'ύψος είναι ένα σημαντικό μέρος του προβλήματος.

Ένα άλλο σημαντικό κομμάτι είναι γεωγραφική κατανομή των εκρήξεων. Πανω από το 90% των δοκιμών της περιόδου '61-61 έγιναν στις 75°N (βόρεια) και τα ¾ αυτών έγιναν Σεπτέμβριο μέχρι Δεκέμβριο, δηλαδή στην αρχή του χειμώνα. Η κατάλυση του όζοντος είναι φωτοχημικό φαινόμενο το οποίο αδρανεύει κατά την νύχτα του αρκτικού χειμώνα. Αρα αναδुकνεύεται η

σημαντικότητα της γεωγραφικής κατανομής αλλά και της εποχιακής κατανομής των εκρήξεων στην επίδραση της καταστροφής του όζοντος.

Κατα την περίοδο '61-62 δεν είχαν μελετησει την κατανομή NO στην στρατόσφαιρα. Είχαν γίνει όμως μετρήσεις για ^{90}Sr , ^{14}C και άλλα ραδιενεργα κατάλοιπα των πυρηνικών εκρήξεων. Από την κατανομή λοιπόν των ραδιενεργών καταλοίπων μπορούμε να έχουμε και την κατανομή NOx στη στρατόσφαιρα καθώς όλα αυτά κινούνται μαζί στο ραδιενεργό νέφος.

Σε μια έκρηξη βόμβας σχάσεως έχει μετρηθεί η κατανομή του παραγόμενου ^{90}Sr , {3, fig.3}. Σε κανονικές συνθήκες υπάρχει μια σχέση 1-1 μεταξύ παραγόμενου ^{90}Sr dpm/1000 SCF και μόρια NOx (moles).

Αυτο προκύπτει διότι από 10 MT έκρηξης σχάσης παράγονται 1Mc (3.7×10^{16} ραδιενεργές διασπάσεις/sec) από ^{90}Sr .

$$1 \text{ Mc } ^{90}\text{Sr} \leftarrow 10 Y_{\text{MT}} \leftarrow 33 Y_{\text{MT}} \rightarrow (1/6 \sim 1) \times 33 \times 10^{32} N_{\text{NO}}$$

αρα θέτοντας τις αριθμητικές τιμές θα πάρουμε:

$$500 \text{ dpm/1000 SCF} = (1/6 \sim 1) \text{ ppb NO}$$

όπου ppb είναι parts per billion (10^9) κατ'όγκον

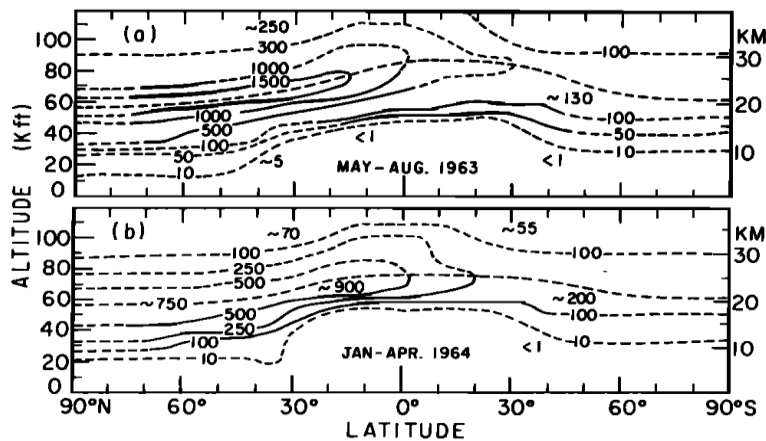


Fig. 3. Stratospheric distribution of strontium-90 based on the Atomic Energy Commission sampling program: (a) May-August 1963; (b) January-April 1964. Contour lines are in units of observed decompositions per minute per thousand standard cubic feet of air.

Στο σχήμα {3, fig.4} φαίνονται οι ποσότητες NOx που παρήχθησαν από πυρηνικές εκρήξεις για γεωγραφικά πλάτη 0, 30 και 60° N (βόρεια) όπου μπορούμε να δουμε πως πολύ μεγάλες ποσότητες NOx βρίσκονται σε χαμηλά υψη και στις πολικές περιοχές, δύο παράγοντες που ελαχιστοποιούν την καταλυτική επίδραση των οξειδίων του αζώτου στη στρατόσφαιρα.

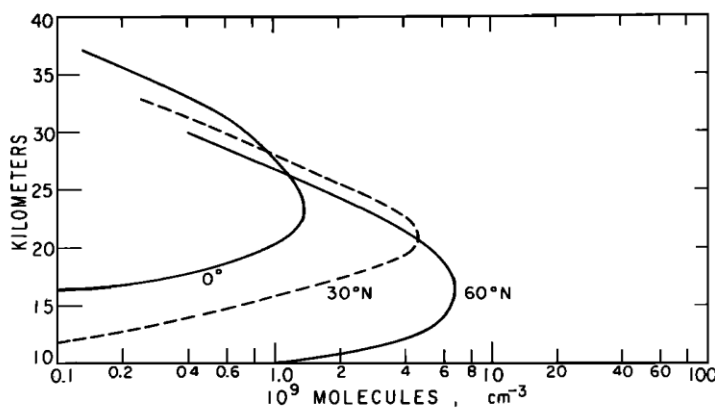


Fig. 4. Maximum bomb-produced NO_x (NO + NO₂ + HNO₂) for May-August 1963 at three latitudes as deduced from Figure 3 with the relation $500 \text{ dpm/1000 SCF} = (1/6-1) \text{ ppb NO}_x$. The contour lines are based on the upper limit.

Στο σχήμα {3, fig.6} γίνεται σύγκριση των ποσοτήτων του φυσικού υποβαθρου NOx και των παραγόμενων ποσοτήτων που παρήχθησαν από εκρηξεις την περίοδο Μαιο-Αυγουστο 1963 (μέγιστες και ελάχιστες), για τις ελάχιστες εκτιμώμενες ποσότητες παραγόμενων NOx ($1/6 \times 10^{32} \times Y_{MT}$) υπολογίζεται μείωση 1.2% της στήλης όζοντος, ενώ από τις μέγιστες ($1 \times 10^{32} \times Y_{MT}$) η μείωση είναι περίπου 6.3%.

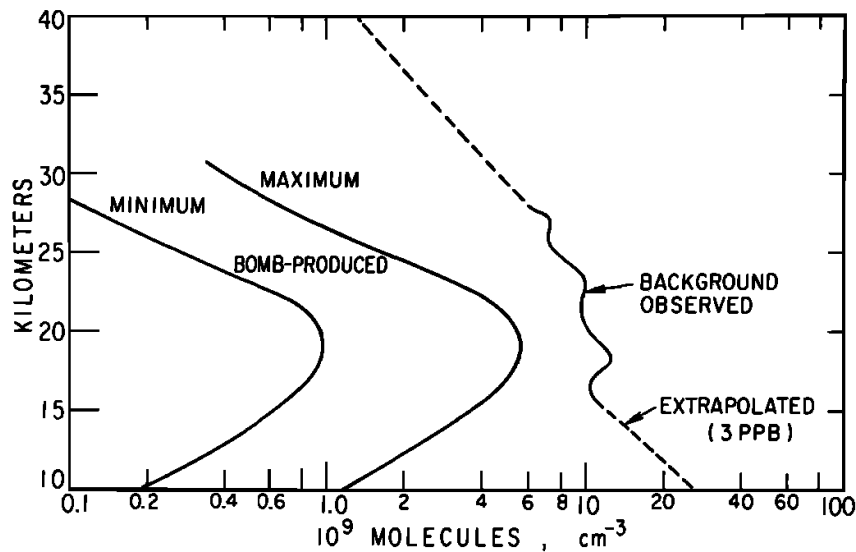


Fig. 6. Comparison of natural (Figure 5) and bomb-produced NO_x at 45°N for May-August 1963 as deduced from Figure 3 with the following relations: for minimum NO_x, 1 ppb corresponds to 3000 dpm/1000 SCF of ⁹⁰Sr; for maximum NO_x, 1 ppb corresponds to 500 dpm/1000 SCF of ⁹⁰Sr. The 'observed background' is the sum of HNO₃ for November (Figure 5) and the central point in the error bar for NO + NO₂ by Ackerman and Muller (Figure 5).

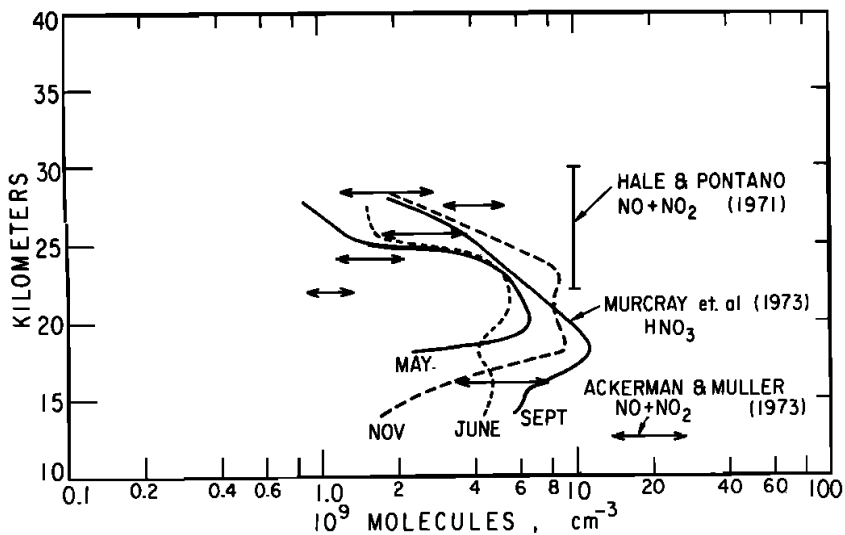


Fig. 5. Observed values of natural NO_x in the stratosphere. Vertical bar represents NO and NO₂ measured as easily ionized species; horizontal bars represent NO₂ at sunset, equal to total NO + NO₂, infrared absorption spectrum from balloons; continuous curves represent HNO₃, infrared observation from balloons.

Από την εξέταση λοιπόν των παρατηρούμενων ποσοτήτων ⁹⁰Sr και λόγω της γραμμικής σχέσης με τις ποσότητες NOx, βρήκαμε ότι η μείωση του όζοντος για την περίοδο 1961-62 που παρήχθησαν 3×10^{34} μόρια NOx, είναι το πολύ 6% στην περιοχή του βορείου ημισφαιρίου. Οι συνολικές εκπομπές ⁹⁰Sr και ¹⁴C στη στρατόσφαιρα για την περίοδο 1950-1970 φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί {3, fig.8} όπου αποτυπώνονται και οι πυρηνικές δοκιμές της συγκεκριμένης περιόδου. Φαίνεται λοιπόν ότι τα ραδιενεργά στοιχεία στη στρατόσφαιρα ήταν ασυνήθιστα υψηλά

κατα την περίοδο 1954-1961. Κατά τα έτη 1959-1961 που υπήρξε συμφωνία παύσης των πυρηνικών δοκιμών υπήρξε μια μικρή μείωση των ποσοτήτων ^{90}Sr και ^{14}C . Κατα τα έτη 1961-1962 που έγιναν οι μεγάλες δοκιμές προκάλεσαν αύξηση του ^{14}C σε τιμή κατα 3 φορές μεγαλύτερη από το μέγιστο του 1959 και 5 φορές από το ελάχιστο του 1961. Οι τιμές του ^{14}C επανήλθαν σε επίπεδα τιμών του 1961 μετά το 1970. Αντίστοιχα κυμάνθηκαν οι τιμές του ^{90}Sr .

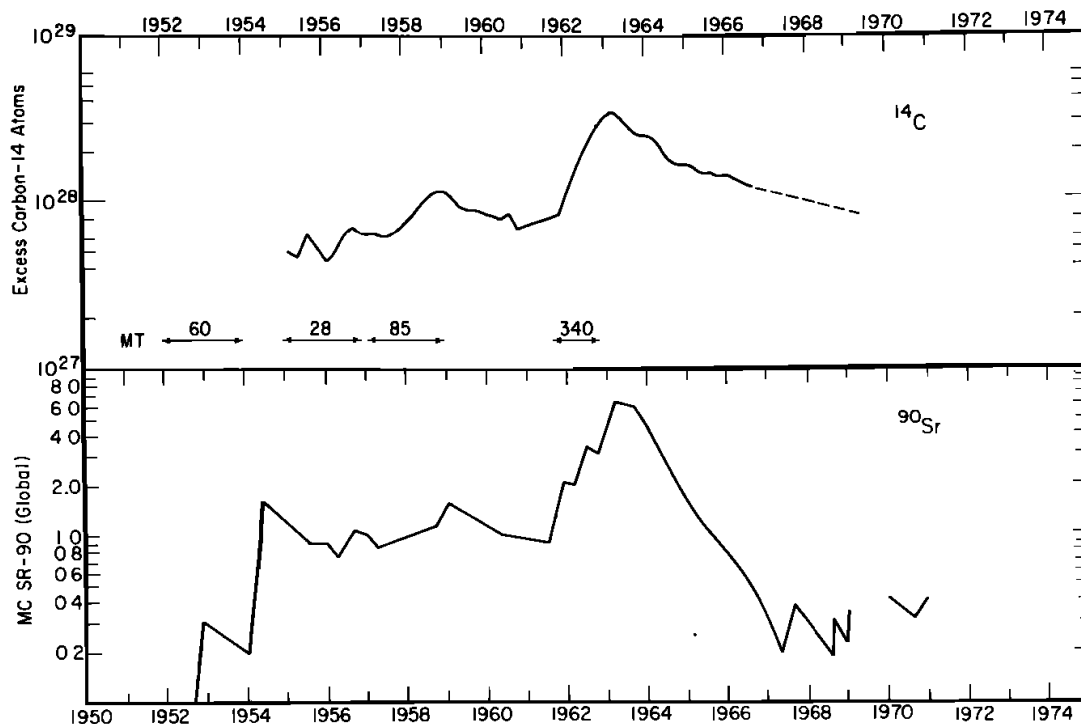


Fig. 8. The variation with time of total stratospheric inventory of ^{90}Sr and ^{14}C , with periods and yields (in megatons) of nuclear explosives.

Η μακροπρόθεσμη συμπεριφορά της αύξησης NO_x από πυρηνικές βόμβες όπως συνάγεται από το προηγούμενο σχήμα έχει μια ακανόνιστη αργή αύξηση από το 1952-1963 και μια κανονική αργή μείωση από το 1963-1970. Η αργή μείωση του ^{14}C από το 1963-1970 δείχνει ότι η παραχθείσα ποσότητα τεχνητών NO_x από τις εκρήξεις των ετών 1952-1962 χρειάστηκε περίπου 10 χρόνια να εξαφανιστεί.

3.2.9 Ωστικό κύμα

Για να υπολογιστούν οι παραγόμενες ποσότητες NO_x είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την ιστορία (πίεσης-θερμοκρασίας) του αέρα μέσα από τον οποίο διέρχεται το ωστικό κύμα. Ο Goldsmith {4} χρησιμοποίησε τη μαθηματική περιγραφή σφαιρικών μετώπων από ωστικά κύματα για να υπολογίσει την ιστορία (πίεσης-θερμοκρασίας) για 7 σφαιρικές επιφάνειες που εγκλείουν συγκεκριμένες μάζες αέρα γύρω από το κέντρο της έκρηξης. Οι υπολογισμοί έγιναν για 1, 10 και 60 MT και τα αποτελέσματα εμφανίζονται στο σχήμα {4, fig.1}

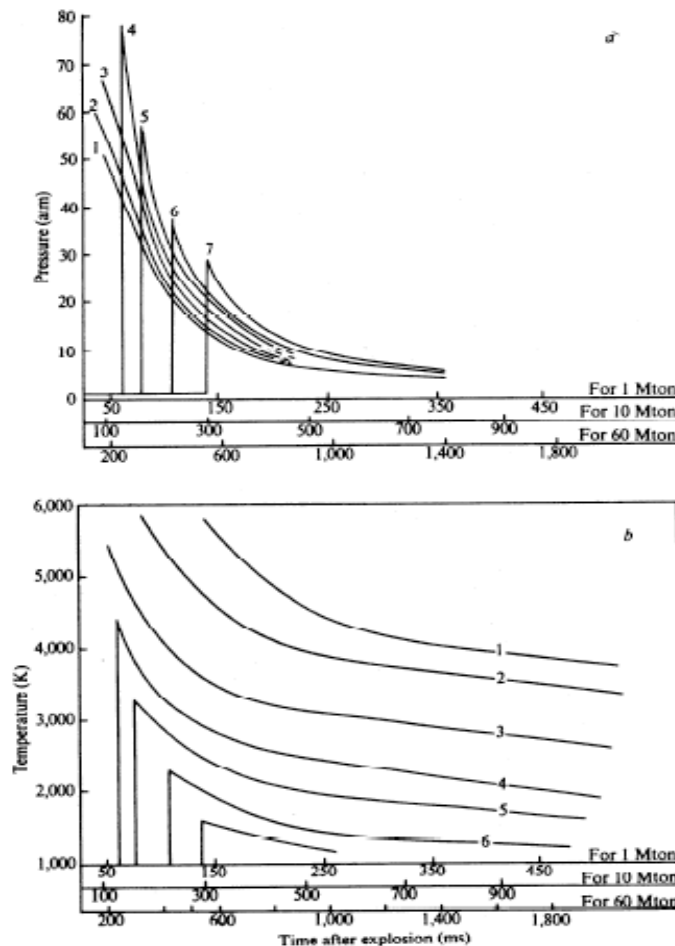


Fig. 1 Pressure (a) and temperature (b) histories for seven shells due to the shock wave around 1, 10 and 60 Mton explosions. Masses in units of 10^{12} g per shell are

Shell No	1 Mton	10 Mton	60 Mton
1	0.115	1.15	6.9
2	0.115	1.15	6.9
3	0.103	1.03	6.2
4	0.075	0.75	4.5
5	0.145	1.45	8.7
6	0.273	2.73	16.4
7	0.283	2.83	17.0

Αυτή η θεωρητική προσέγγιση δεν δίνει σωστά αποτελέσματα για τα δύο πρώτα εσωτερικά κελύφη, καθώς επίσης μειώνεται η ακρίβειά της όταν στο εξωτερικό κέλυφος η πίεση είναι λιγότερο από το 10πλάσιο της ατμοσφαιρικής.

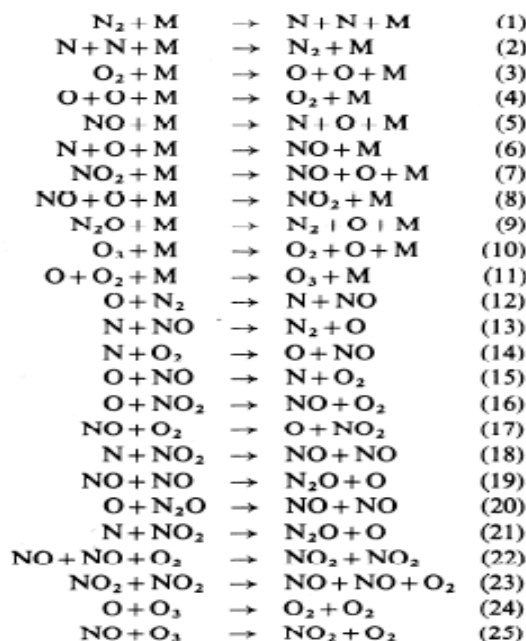
Οι παραδοχές των υπολογισμών είναι ότι το σφαιρικό κύμα διαδίδεται σε ομογενή ατμόσφαιρα με 290K, πίεση 1Bar και σταθερά $\gamma=1.4$.

3.2.10 Χημική κινητική του θερμού αέρα.

Η παραγωγή NO σε εργαστηριακές συνθήκες με αέρα, σε απότομα-εκρηκτικά αυξανόμενη πίεση και θερμοκρασία, έχει γίνει με χρήση σωλήνων θερμοσυμπίεσης, σε θερμοκρασίες μεταξύ 2.000K και 6.000K. Στα πειράματα αυτά παρήχθησαν νιτρικά οξείδια με λόγο moles $[NO]/[M] \sim 0.1$

Βεβαία σε μια πυρηνική έκρηξη λόγω των ακραίων συνθηκών θερμοκρασίας και πίεσης, ο καλύτερος τρόπος για να την προσεγγίσουμε είναι να ξεκινήσουμε από τη χημική κινητική των βασικών αντιδράσεων και να οδηγηθούμε σε ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τη μεταβολή με το χρόνο, της συγκέντρωσης των διαφόρων μορίων ή ατόμων που περιέχουν.

Οι χημικές αντιδράσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή NOx είναι οι ακόλουθες



Οι αριθμητικές ολοκληρώσεις έγιναν με τη χρήση συντελεστών που συγκεντρώνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Reaction	A	N	E	Reference
1	3.73×10^{21}	-1.6	224,900	11
2	2.25×10^{21}	-1.6	0	11
3	4.79×10^{18}	-1.0	118,700	13
4	2.38×10^{17}	-1.0	340	13
5	2.27×10^{17}	-0.5	148,830	14
6	6.45×10^{16}	-0.5	0	14, 12
7	1.54×10^{16}	0	65,000	14
8	1.47×10^{15}	0	-1,870	14
9	1.30×10^{15}	0	58,000	15
10	3.89×10^{14}	0	22,720	13
11	6.46×10^{12}	0	-2,100	13
12	1.36×10^{14}	0	75,400	14
13	3.10×10^{13}	0	334	14
14	6.43×10^9	+1.0	6,250	14
15	1.55×10^9	+1.0	38,640	14
16	1.00×10^{13}	0	600	14
17	1.00×10^{12}	0	45,500	14
18	3.60×10^{12}	0	0	14, 16
19	9.40×10^{11}	0	66,000	14
20	2.50×10^{13}	0	26,900	14
21	1.20×10^{12}	0	0	14, 16
22	2.43×10^9	0	-1,046	14
23	4.00×10^{12}	0	26,900	14
24	1.20×10^{13}	0	4,790	13
25	5.72×10^{11}	0	2,460	34

$k = AT^n \exp(-E/1.987T)$.
 k is in $(\text{cm}^3 \text{mol}^{-1})^n \text{s}^{-1}$ units; E is in calorie mol^{-1} . ($n=1$ for a two-body process and $n=2$ for a three-body process).

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε η σχέση

$$Y_{n+1}(i) = (Y_n(i) + P(i)\Delta t) / (1 + Q(i)\Delta t)$$

Όπου $Y_{n+1}(i)$ είναι η συγκέντρωση του i -οστού συστατικού κατά το $(n+1)$ βήμα χρόνου και $P(i)$, $Q(i)$ είναι συναρτήσεις των συντελεστών και συγκεντρώσεων των υπολοίπων συστατικών και καθορίζονται από τη γενική χημική κινητική διαφορική εξίσωση:

$$dY(i)/dt = P(i) - Q(i)Y(i)^m \quad \text{με } m=1 \text{ ή } 2$$

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται στο σχήμα {4, fig.2} καθώς επίσης στον πίνακα {4, tab.2} στον οποίο παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των οξειδίων του αζώτου για κάθε ομόκεντρο κέλυφος, μαζί με τη συνολική μάζα αέρα του κελύφους, για εκρήξεις 1, 10 και 60 ΜΤ.

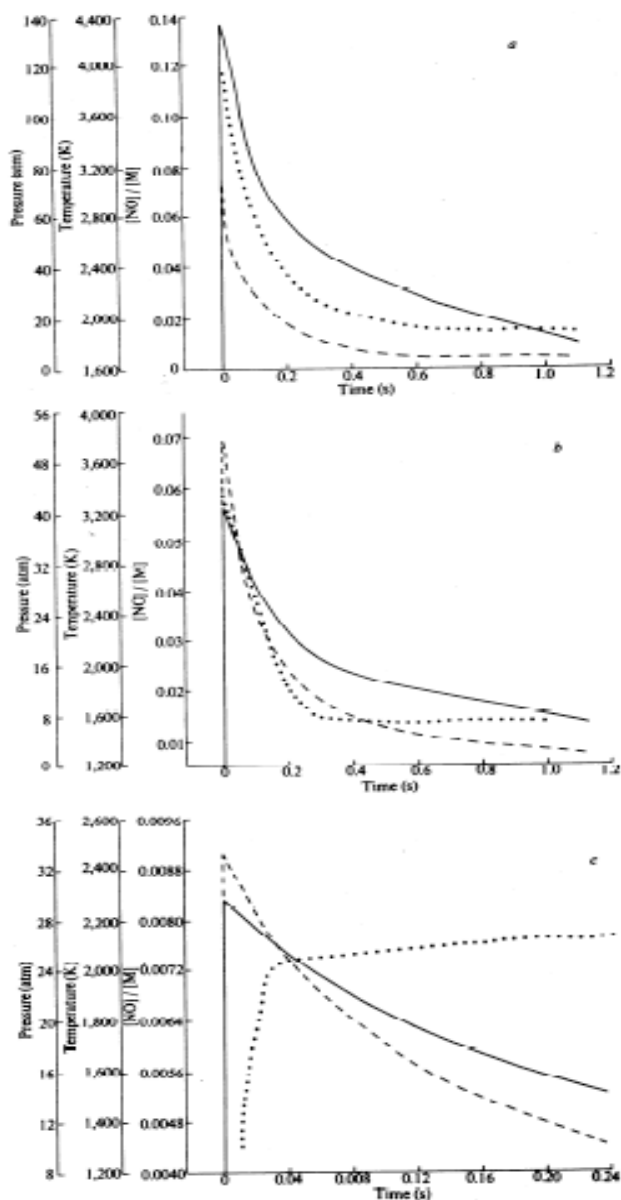


Fig. 2 Nitric oxide concentrations as a function of time for a 10 Mton explosion. a, Shell (4), shock starts 155 ms after ignition; b, shell (5), shock starts 197 ms after ignition; c, shell (6), shock starts 273 ms after ignition. The pressure and temperature histories are also plotted. —, Temperature; ---, pressure; ···, [NO]/[M].

Table 2 Calculated NO Production

Explosion strength (Mton)	Shell No.	Air mass in shell (10^{12} g)	[NO]/[M]	[NO] (10^{10} g)	[NO] (10^{32} molecules)
1	4	0.075	0.017	0.13	0.26
	5	0.145	0.016	0.23	0.46
	6	0.270	0.005	0.13	0.26
	Total			0.49	0.98
10	4	0.75	0.015	1.2	2.4
	5	1.45	0.014	2.1	4.2
	6	2.70	0.008	2.1	4.2
	Total			5.4	10.8
60	4	4.5	0.015	6.8	13.6
	5	8.7	0.013	11.1	22.2
	6	16.4	0.011	17.6	35.2
	Total			35.5	71.0

Φαίνεται ότι οι ποσότητες NO για 1, 10 και 60 MT είναι αντίστοιχα 0.49, 5.4 και 35.5×10^{10} g.

Η σχέση τους είναι γραμμική μεταξύ 1 και 10 MT με 5×10^9 g παραγόμενων NO ανά MT. Αυτή η γραμμικότητα δεν ισχύει για τους 60MT γιατί στο εξωτερικό κέλυφος (6) παράγονται σημαντικές ποσότητες NO με αργό ρυθμό που εξαρτάται από το χρόνο παραμονής του αέρα σε υψηλές θερμοκρασίες παρά από το ρυθμό ψύξης του. Υπενθυμίζουμε ότι 60MT ήταν η μεγαλύτερη πυρηνική έκρηξη η οποία έγινε ποτέ και ήταν ρωσική δοκιμή κατά το 1962.

Η υπολογιζόμενη ποσότητα 5×10^9 g παραγόμενων NO ανά MT είναι συμβατή με τα αποτελέσματα διαφόρων προηγούμενων ερευνών.

Ο F. Gilmore δημοσίευσε το 1975 μια μελέτη [5] στην οποία ανακεφαλαιώνει τις προϋπάρχουσες έρευνες σχετικά με τις παραγομενες ποσότητες NO από πυρηνικές εκρήξεις.

Οι Zeldovich & Raizer [1967] έλαβαν υπ' όψιν τους μόνο το NO που παραγεται από το ωστικό κύμα και βρήκαν ότι από έκρηξη 20KT παράγονται 50Kt NO ή 0.5×10^{32} μόρια/MT

Οι Foley & Ruderman [1972] λαμβάνοντας υπ' όψιν τους την διαθέσιμη ενεργεια από την πύρινη σφαίρα η οποία θερμαίνει τον συμπαρασυρόμενο αέρα, βρήκαν ένα άνω όριο (υποθέτοντας επαρκή ανάμιξη με αέρα) 1.5×10^{32} μόρια/MT και ένα κατώτερο όριο (χωρίς ανάμιξη) 0.3×10^{32} μόρια/MT.

Οι Johnston et Al. [1973] προτείνουν το άνω όριο ως 1×10^{32} μόρια/MT και το κατώτερο όριο περίπου 0.17×10^{32} μόρια/MT.

Οι Goldsmith et Al. έκαναν λεπτομερείς χημικούς υπολογισμούς και κατέληξαν ότι τα NO που παράγονται από το ωστικό κύμα είναι 1×10^{32} μόρια/MT.

Όταν το σφαιρικό ωστικό κύμα σχηματιστεί, κινείται προς τα έξω μέχρι η θερμοκρασία του να πέσει στους 20.000K, όταν όλος ο διαταραγμένος αέρας είναι πάνω από 20.000K και έχουν σχηματιστεί αμελητέες ποσότητες NOx. Όσο περνάει ο χρόνος αυτός ο αέρας ψύχεται με αδιαβατική εκτόνωση και εκπομπή ακτινοβολίας, καθώς ωστικό μέτωπο επεκτείνεται προς τα έξω θερμαίνοντας επιπλέον αέρα. Αν ο αέρας παραμείνει σε χημική ισορροπία καθώς ψύχεται, τότε η συγκέντρωση NO αρχικά αυξάνεται καθώς άτομα N και O συνενώνονται και στη συνέχεια μειώνεται κάτω από 1% λόγω μετατροπής του NO στα σταθερότερα N₂ και O₂. Σε θερμοκρασίες στο επίπεδο της θάλασσας οι ρυθμοί επανασύνδεσης των ατόμων είναι γρήγοροι, όμως σε χαμηλές θερμοκρασίες οι ρυθμοί μετατροπής NO μειώνονται σημαντικά. Στο σχήμα {5 fig.1} φαίνονται οι χαρακτηριστικές σταθερές του χρόνου για τη αντίδραση διασπασής NO με τον εαυτό του ή με μορια O.

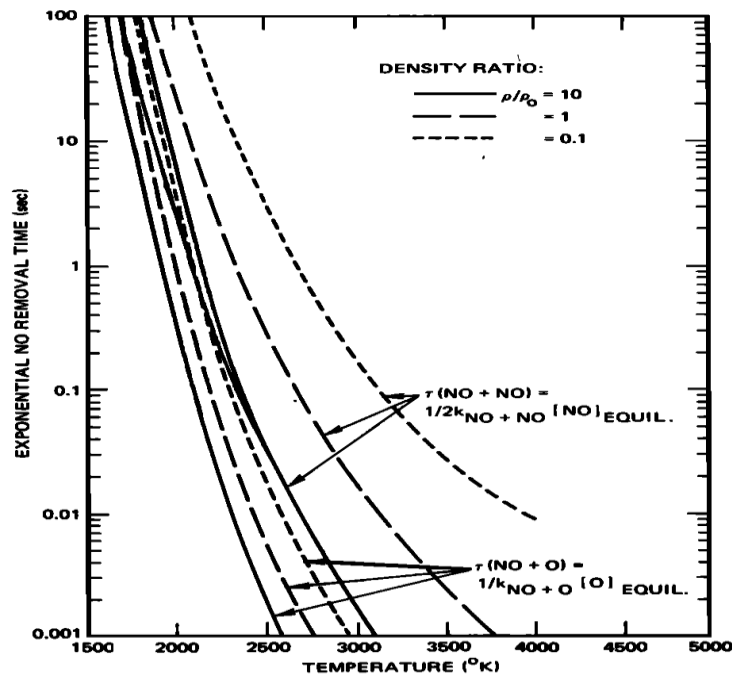


Fig. 1. Characteristic time for removal of NO by reaction in cooling air.

Για χρόνους ψύξης απο msec μέχρι sec, η συγκέντρωση του NO «παγώνει» σε θερμοκρασίες από 1.700K μέχρι 2.500K, που αντιστοιχεί σε συγκεντρώσεις μεταξύ 0.3 ~ 2%.

Μια πιο ακριβής τιμή μπορεί να προκύψει απο την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης:

$$df/dt=(f_{eq}-f)/\tau$$

όπου (f) είναι τα moles του NO, (f_{eq}) είναι τιμή ισοροπίας και (τ) ο εκθετικός χρόνος διάσπασης του NO, όπως δίνεται στο προηγούμενο σχήμα. Αυτή η εξίσωση έχει επιλυθεί με αριθμητική ολοκλήρωση για εξι αρχικές θερμοκρασίες μεταξύ 2.600K και 2.100K χρησιμοποιώντας ένα ρυθμό ψύξης τυπικό για έκρηξη 1 MT και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα {5, tab1}

TABLE 1. Shock Parameters and NO Formation in a 1-Mt Surface Burst (Hemispherical Fireball)

$T_s, \text{ }^\circ\text{K}$	Final NO, mol %	$\Delta p_s, \text{ atm}$	$R_s, \text{ m}$	Air Mass Inside $R_s,$ 10^{11} g
2600	1.5	64	483	3.05
2500	1.45	61	490	3.2
2400	1.4	58	498	3.35
2300	1.0	54	510	3.6
2200	0.4	51	520	3.8

Υποθέτοντας ότι όλος ο αέρας μέσα στην πύρινη σφαίρα των 2.600K έχει 1.5% NO, ο προηγούμενος πίνακας δίνει 1.1×10^{32} μορια/MT, τιμή που είναι περιπου 2πλάσια των Zeldovich & Raizer. Η διαφορά αυτή δικαιολογείται γιατί χρησιμοποίησαν μικρότερο ποσοστο NO (1%) και μικρότερη ακτίνα (100m για 20KT από την οποία εκτιμούν με γραμμική επέκταση για 1MT σε 464m). Οι Goldsmith et Al. υπολόγισαν $(1.0 \sim 1.2) \times 10^{32}$ μορια/MT που είναι εντελώς συμπτωματικά σε καλή συμφωνία με τους πιο πάνω υπολογισμούς. Αυτοί παραλείπουν την παραγωγή NO στους 3 πρώτους εσωτερικούς φλοιούς λόγω αβεβαιότητας μεταφορά ακτινοβολίας, αλλά υπερεκτιμούν την ακτίνα χρησιμοποιώντας λύση για ένα ωστικό κύμα για αέριο με $\gamma=1.4$

Σε όλους τους ανωτέρω υπολογισμούς δεν ελήφθη υπ'όψιν ότι ο αέρας κοντά στο κέντρο της πύρινης σφαίρας παραμένει σε θερμοκρασία $>2.300\text{K}$ για αρκετά δευτερόλεπτα κι έτσι λοιπόν περιέχει περισσότερο από 1.5% NO. Παρ'όλα αυτά όταν αρχίσει να ψύχεται κάτω από τους 2.000K, θα καταλήξει με λιγότερο από 1.5% NO.

Οι υπολογισμοί του Brode(1968) έγιναν για επιφανειακή έκρηξη 1MT που εκτείνεται για 2.6 sec μέχρι να φτάσει σε πίεση περιβάλλοντος και μετά αρχίζει να ψυχεται λόγω ακτινοβολίας, ανάμιξης με ψυχρό αέρα και επέκταση του μετώπου καθώς ανέρχεται και πεφτει η πίεση μεχρι να εξισωθεί με την πίεση του περιβάλλοντος. Η ψύξη λόγω ακτινοβολίας είναι δυσκολο να υπολογιστεί γιατί υπάρχει και αυτοαπορόφηση των υπερυθρων κυμάτων από τα NO και H₂O. Η ψύξη λόγω ανάμιξης, επίσης είναι δυσκολο να υπολογιστεί λόγω αβεβαιοτητων στην ταχύτητα ανάμιξης ψυχρου και θερμου αέρα.

Συνεπώς μπορούμε να υπολογίσουμε μονο τα μεγιστα και ελάχιστα όρια του παραγόμενου NO.

Για να υπολογίσουμε το μέγιστο όριο, αγνοούμε τον εξωτερικό αέρα που συμπαρασύρεται από τον θερμο εσωτερικό αέρα που ήταν συμπιεσμένος στους 2.400K και εκτονώνεται καθώς ψύχεται κάτω από τους 2.000K. Έτσι παράγονται 0.8×10^{32} NO μορια/MT. Αν επιπλέον επιτρέψουμε στον θερμό αέρα να αναμιχθεί με αδιατάρακτο ψυχρό αέρα, θα παραχθούν επιπλέον ποσότητες NO. Χρησιμοποιώντας το άνω όριο για ρυθμούς ψύξης της τάξεως των 400K/sec, η διαφορική εξίσωση που είδαμε νωρίτερα, με έναν επιλέον όρο για τη μείωση λόγω αραίωσης, έχει λυθεί

προσεγγιστικά. Οι τελική συγκέντρωση NO βρέθηκε στα 1.1% ανεξαρτήτως της θερμοκρασίας εκκίνησης πάνω από τους 2.400K.

Τα αποτελέσματα του Brode(1968) δείχνουν ότι η μάζα και η ενθαλπία των τμημάτων της πύρινης σφαίρας που παραμένουν πάνω από τους 2.000K, μετά την εξάπλωση της πύρινης σφαίρας σε τελική πίεση περιβάλλοντος, είναι περίπου 1×10^{11} g και 1.7×10^{14} cal αντιστοίχως. Αν ο αέρας ψυχόμενος στους 2.000K αναμιχθεί με κρύο αέρα τότε η συνολική μάζα NO γίνεται 3.1×10^{11} g.

Αν πολλαπλασιάσουμε με 1.1%NO παίρνουμε 0.7×10^{32} μόρια επιπροσθετα από την ποσοτητα που είχαμε υπολογίσει πριν, και καταλήγουμε στο άνω όριο των **1.5×10^{32} μοριων/Mt.**

Για να βρούμε τώρα το ελάχιστο όριο του παραγόμενου NO υποθέτουμε ότι η ψύξη γίνεται με πολύ αργούς ρυθμούς κι έτσι το NO ψυχεται στη χαμηλότερη δυνατη θερμοκρασία και συγκέντρωση. Επίσης υποθέτουμε ότι ο αερας που βρισκόταν πάνω από τους 2.300K έχει συμπαρασυρθεί και αναμιχθεί ελάχιστα με τον εξωτερικό αέρα.

Αυτη η κατασταση συμβαίνει αν η ψυξη λόγω ακτινοβολίας γίνει με γρήγορο ρυθμο και η ανάμιξη συμβαίνει ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια της πύρινης σφαίρας.

Κάτω από αυτές τις συνθήκες η ολική μάζα του αερα στον οποίο σχηματίζεται το NO, βρισκεται εντος της περιοχής που έχει θερμοκρασία 2.300K και είναι 3.6×10^{11} g/Mt. Μια μικρότερη εκτίμηση του ρυθμού ψύξης μπορεί να θεωρηθεί, λόγω της αδιαβατικής εκτόνωσης καθώς ανέρχεται η πύρινη σφαίρα, και λαμβάνοντας την ελάχιστη ταχύτητα ανόδου. Μετά την αρχική επιτάχυνση προς τα πάνω, η ταχύτητα της πύρινης σφαίρας μειώνεται και καταλήγει για έκρηξη 1MT σε 50m/s. Αυτό δίνει έναν ρυθμό αδιαβατικού ρυθμού ψύξης των 3K/sec. Με αυτό το ρυθμό η διαφορική εξίσωση απώλειας NO που είδαμε νωρίτερα θα δώσει 0.5% NO. Πολλαπλασιαζοντας με την μάζα αέρα, βρίσκουμε το κατώτερο όριο για την παραγόμενη ποσότητα NO, **0.4×10^{32} μορια/Mt.**

Για να ολοκληρώσουμε την ανάλυση αναφέρουμε ότι η ακτινοβολία που παράγεται από την πυρηνική έκρηξη έχει αμεληταία επίδραση στην παραγωγή NO. Τα νετρόνια και οι ακτινες β και γ, διαμέσου βομβαρδισμού με ηλεκτρονια του N_2 και σχηματισμου N_2^+ παράγουν περίπου 0.2 άτομα αζώτου ανά Mt. Όμως τα μισά από αυτά τα άτομα είναι σε κατάσταση αποδιέγερσης και τείνουν να καταστρέφουν το NO ενώ τα άλλα μισά είναι διεγερμένα και τείνουν να σχηματίζουν NO, κι έτσι το συνολικό αποτέλεσμα καθιστάται σχεδόν αμεληταίο.

Όπως έχουμε δει σε θερμοκρασίες πάνω από 2.000K ένα ποσοστό 1~2% του αέρα μετατρέπεται σε NO.

Στο σχήμα {6, fig.1} φαίνεται η συνθεση ισορροπίας του θερμου αέρα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας για πίεση 0,1 atm. Καθως ο αέρας ψύχεται κάτω από τους 2.000K οι αντιδράσεις που αποσυνθέτουν το Οζον γίνονται πολύ αργές κι έτσι η συγκέντρωση του NO σταθεροποιείται στο 1% περίπου. Αυτη η θερμοανση και ψύξη του αέρα αποτελεί την βασική αιτία σχηματισμου NO από τις πυρηνικές εκρήξεις.

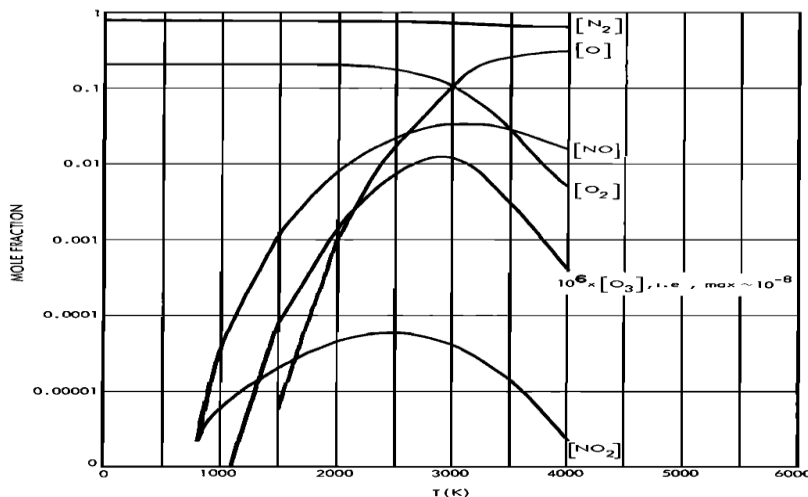


Fig. 1. Equilibrium composition of high-temperature air ($p = 0.1$ atm; CO_2 , H_2O , and their decomposition products are omitted).

Τα αποτελέσματα των παραγόμενων ποσοτήτων από διάφορους ερευνητές συγκεντρώνονται στον πίνακα {6, tab.1}, Όλοι οι ερευνητές συμφωνούν ότι η παραγωγή είναι μεταξύ 1.000 και 10.000 tn NO ανά Mt έκρηξης.

TABLE 1. Calculated NO Production by Low-Altitude Nuclear Explosions

NO Produced per Mt of Yield		Calculation Includes		Reference
Molecules	kt	Shock	Late Fireball	
0.5×10^{22}	3	X		<i>Zeldovich and Raizer</i> [1967]
0.3-2	1.5-10		X	<i>Foley and Ruderman</i> [1972]
0.17-1	1-5		X	<i>Johnston et al.</i> [1973]
0.3-1.5	1.5-8		X	<i>Foley and Ruderman</i> [1973]
1-2.5	5-12		X	G. A. Simons and G. Caledonia (private communication, 1973)
1	5	X		<i>Goldsmith et al.</i> [1973]
0.4-1.5	2-8	X	X	<i>Gilmore</i> [1975]

The following are the principal mechanisms for NO production [Gilmore, 1975]. (1) Shock heating and subsequent quick cooling of air: 3.5 kt NO/Mt yield. (2) Fireball heating of air and slower cooling by radiation, expansion, and mixing in of cold air: -1.5 to +4 kt NO/Mt yield. (3) Bombardment of air by ionizing radiation (betas, gammas, neutrons): <0.5 kt NO/Mt yield (this mechanism is less important than the others).

G. A. Simons and G. Caledonia (private communication, 1973) also considered the effects of entrainment and detrainment and concluded that only one sixth to one third of the total NO production or $(0.1-0.3) \times 10^{22}$ molecules/Mt was deposited between 10- and 25-km altitude.

Οι βασικοί μηχανισμοί είναι τρεις:

- Απότομη (εκρηκτική) θέρμανση και γρήγορη ψύξη του αέρα. Αυτή η διαδικασία παράγει 3.5 kt NO/Mt έκρηξης.
- Θέρμανση του αέρα από την πυρίνη σφαίρα και αργός ρυθμός ψύξης λόγω ακτινοβολίας, εξάπλωσης του σφαιρικού μετώπου και ανάμιξη με κρύο αέρα. Αυτή η διαδικασία παράγει 1.5-4 kt NO/Mt έκρηξης.
- Βομβαρδισμός του αέρα από την ιονίζουσα ακτινοβολία (β , γ και νετρόνια) η διαδικασία αυτή παράγει <0.5Kt NO/Mt έκρηξης, αυτός είναι και ο λιγότερο σημαντικός μηχανισμός σε σχέση με τους δύο προηγούμενους.

Στον πίνακα {6, tab.2} συγκεντρώνονται στοιχεία για τις δοκιμές που έγιναν από Σοβιετική ένωση, ΗΠΑ, Γαλλία και Κίνα, από το 1961 και μετά.

TABLE 2. Atmospheric Thermonuclear Tests Since 1961

Date	Yield, Mt	Reference
<i>USSR (Novaya Zemlya; 72°-77°N, 52°-58°E)</i>		
Sept. 14-Oct. 31, 1961	120, total (25, 58 Mt, etc.)	<i>Foley and Ruderman</i> [1973, Table 5]
Aug. 5-Dec. 24, 1962	180, total (20, 30 Mt, etc.)	<i>Foley and Ruderman</i> [1973, Table 5]
<i>U.S.A. (Christmas Island; 1.5°N, 157°W and Johnston Island, 16.5°N, 169°W)</i>		
May 2-Oct. 31, 1962	37, total ('Mt range')	<i>Foley and Ruderman</i> [1973, Table 5]
<i>France (Mururoa; 22°S, 139°W)</i>		
May 30, 1970	1, total	<i>Telegadas</i> [1974, Table 8]
July 3-4, 1970	2, total	<i>Telegadas</i> [1974, Table 8]
Aug. 14, 1971	2, total	<i>Telegadas</i> [1974, Table 8]
<i>China (Lop Nor; 40°N, 90°E)</i>		
June 17, 1967	3, total	<i>Zander and Araskog</i> [1973]
Dec. 27, 1968	3, total	<i>Zander and Araskog</i> [1973]
Sept. 29, 1969	3, total	<i>Zander and Araskog</i> [1973]
Oct. 14, 1970	3, total	<i>Telegadas</i> [1974, Table 8]
June 27, 1973	2-3, total	K. Telegadas (private communication, November 1974)

Επειδή όπως είδαμε η επίδραση στο όζον εξαρτάται από το ύψος που φτάνει η πύρινη σφαίρα, στο σχήμα {6, fig.2} παρουσιάζονται τα ύψη που φτάνουν τα παραγόμενα NO.

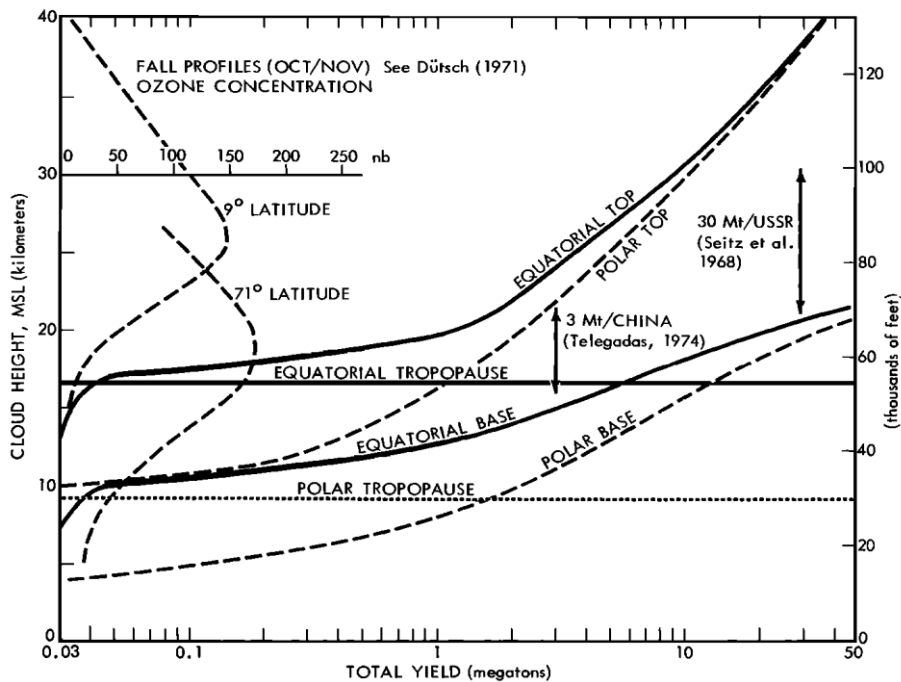


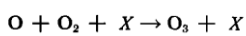
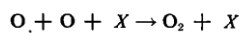
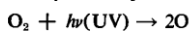
Fig. 2. Fireball rise height as a function of yield [from Peterson, 1970] compared with the ambient ozone profile [from Dütsch, 1971] for both equatorial and polar conditions. For the nuclear cloud an 'equatorial' refers to 0°–30° latitude; 'polar' refers to 30°–90°. Peterson's polar estimates of cloud rise appear to be too high, as judged by radioisotopic measurements of Soviet tests: see, in particular, the results of Seitz et al. [1968] for a 30-Mt test. The results of Telegadas [1974] for Chinese mid-latitude 3-Mt tests are also shown.

Το ερώτημα που είχε τεθεί αρχικά από τους Foley & Ruderman ήταν:

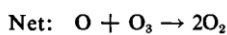
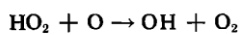
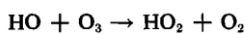
Αφού οι ποσότητες παραγομένων NO από τις εκρήξεις είναι σημαντικές και μπορούμε να τις υπολογίσουμε, πόσο μεγάλη είναι η αναμενόμενη επίδραση τους στο Οζον και μια τέτοια είδους επίδραση έχει παρατηρηθεί ?

Οι μηχανισμοί καταστροφής όζοντος έχουν ήδη μελετηθεί αναλυτικά και συνοψίζονται στους εξής:

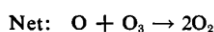
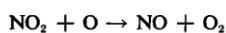
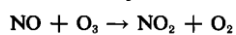
- Αντιδράσεις Charman για το οξυγόνο



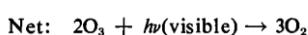
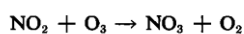
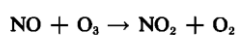
- Κυκλος του νερού



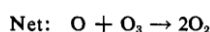
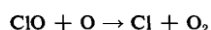
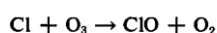
- 1^{ος} κύκλος του NOx



- 2^{ος} κύκλος του NOx



- Κύκλος του ClOx



Τα αριθμητικά ποσά για τους μηχανισμούς αυτούς συγκεντρώνονται στον πίνακα {6, tab.3}.

TABLE 3. Global Ozone Balance for Formation and Destruction of Ozone by Various Mechanisms [Johnston, 1974]

Mechanism	Relative Ozone Rate, %
Formation, O ₂ + sun	+100
Transport to troposphere	-1
Destruction by O and O ₃	-18
Destruction by water reactions	-11
Destruction by NO _x catalysts	-50 to -70
Destruction by ClO _x , MO _x ,* or other	-20 to 0

* M denotes metal.

Οι επιδράσεις των πυρηνικών δοκιμών της περιόδου 1961-1962 στο ατμοσφαιρικό όζον, έχουν εκτιμηθεί από τους Foley & Ruderman [1972, 1973], Johnston et Al.[1973] και Chang & Duwer [1973]. Η παραγωγή των οξειδίων του αζώτου είναι της τάξεως των 10³² μορίων ή 5.000tn ανά Mt {6, tab.2}. Την περίοδο 1961-62 εξεράγησαν περίπου 300MT κυρίως κατα τις σοβιετικές δοκιμές το φθινόπωρο του '61 και του '62. Πολλές από αυτές τις βόμβες ήταν πολύ μεγάλης ισχύος και οι πύρινες σφαίρες τους έφτασαν σε ύψη πάνω από τα 20 Km {6, fig.2}, και η μέση παραμονή των ρυπων στην ατμόσφαιρα ήταν 1-5 χρόνια [Reiter & Bauer 1975]. Έτσι η ατμοσφαιρική επιβάρυνση λόγω των δοκιμών έφτασε σε ποσότητες NOx συγκρίσιμες με αυτές που υπήρχαν στο φυσικό περιβάλλον που είναι περίπου 2x10³⁴ μόρια.

Συγκρίνοντας τις ποσότητες NOx που εκλύθηκαν στην ατμόσφαιρα με αυτές του φυσικού περιβάλλοντος οι Foley & Ruderman [1972,1973] προτείαν ότι η συνολική μείωση του όζοντος θα μπορούσε να ξεπερνά το 10%. Το πρώτο μοντέλο υπολογισμών για τις δοκιμές της περιόδου 1961-62 έγινε από τους Johnston et Al[1973]. Αυτοί χρησιμοποίησαν μια παραγομενη ποσότητα 1x10³² NO και υπέθεσαν ότι έχει κατανομή όμοια με τα ραδιενεργα κατάλοιπα. Από παρατηρήσεις κατανομής του στροντιου-90 το καλοκαίρι του 1963 κατέληξαν στην κατανομή οξειδίων του αζώτου και υπολόγισαν την μείωση του όζοντος από 3.5% έως 6.3% ως συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους στο βόρειο ημισφαίριο. Η μέση μείωση ήταν 5% για το βόρειο ημισφαίριο και 1% για το νότιο.

Μια λεπτομερέστερη μέθοδος υπολογισμού έγινε από τους Chang & Duwer [1973]. Αυτοί υπέθεσαν μια παραγωγή NO 0.5x10³² μόρια/Mt και υπολόγισαν τα αποτελέσματα των πυρηνικών εκρηξεων από το 1957 μέχρι το 1962, λαμβάνοντας υπόψιν στους υπολογισμούς τους και τις οριζόντιες μετακινήσεις των παραγόμενων NOx, σε ένα μονοδιάστατο χρονοεξαρτημένο μοντέλο για το βόρειο ημισφαίριο. Έτσι προέβλεψαν μια μείωση του όζοντος στο βόρειο ημισφαίριο 4% για το 1963 που μειώθηκε στο 2% τα τέλη του 1965. Χρησιμοποίησαν τους τύπους που είχαν προταθεί από τους Foley & Ruderman χωρίς να κάνουν τις διορθώσεις που σχετιζόταν με το διαφορετικό υψος που βρίσκεται η τροπόπαυση στον ισημερινό και στους πόλους, με αποτέλεσμα να έχουν υπερεκτιμημένες τιμές για την καταστροφή του όζοντος.

Η μείωση του όζοντος είναι αρκετά μικρότερη γιατί οι δοκιμές έγιναν σε γεωγραφικά πλάτη (>70⁰ N) και κατα τη διάρκεια της πολικής νύχτας όπου τα φωτοχημικά φαινόμενα αδρανούν. Σχετικά λοιπόν μικρές ποσότητες NOX κατέληξαν στην ζώνη όζοντος της πολικής τροπόσφαιρας.

3.2.11 Η Γαλλική Πυρηνική Δοκιμή

Μια σημαντική ανάλυση έγινε από τον A. Christie {7}, ο οποίος εξέτασε την πυρηνική δοκιμή 2MT που έγινε την 4 Ιουλίου 1970, από τη Γαλλία στην τροπική ζώνη. Λόγω της ισχύος της (2MT) όπως έχουμε ήδη αναφέρει, σχεδόν όλη η ποσότητα των παραγόμενων NOx έφτασε στην στρατόσφαιρα. Την περίοδο εκείνη ο δορυφόρος Nimbus-4 βρισκόταν πάνω από την περιοχή και έκανε μετρήσεις για μερικές ημέρες. Με τη μελέτη αυτή καθώς και με την μελέτη και τους υπολογισμούς του H. Johnston {8}, αναλυθηκαν οι άμεσες επιδράσεις μιας πυρηνικής έκρηξης στο στρώμα του όζοντος της περιοχής.

Παρατηρήθηκε λοιπόν μια μικρή μείωση του όζοντος στην περιοχή, μικρότερη όμως των θεωρητικών προβλέψεων κατά τις πρώτες 10 ημέρες μετά την έκρηξη. Σύμφωνα με τους ανωτέρω ερευνητές υπάρχει μια μεγάλη αβεβαιότητα στις άμεσες μετρήσεις, γιατί κατά την έκρηξη εκτός από NOx παράγονται και ποσότητες όζοντος (από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία) οι οποίες μπορεί ακόμη και να αυξησουν τις μετρούμενες τιμές αρχικά (40% αύξηση τοπικά κατα την 1^η ημέρα που μειώνεται σε 2% κατά την 8^η μέρα) και για να εξουδετερωθούν αντιδρώντας με τα παραγόμενα NO, απαιτείται διάστημα περίπου 2 μηνών.

Θα υπάρξει λοιπόν πολύ λίγη καταστροφή του O₃ κατα τις 10 πρώτες μέρες.

Αρα λοιπόν οι επιδράσεις στο στρατοσφαιρικό όζον απαιτούν μακροχρόνια παρακολούθηση και δεν επαρκούν οι τοπικές μετρήσεις 10 ημερών που έδωσε ο Nimbus-4.

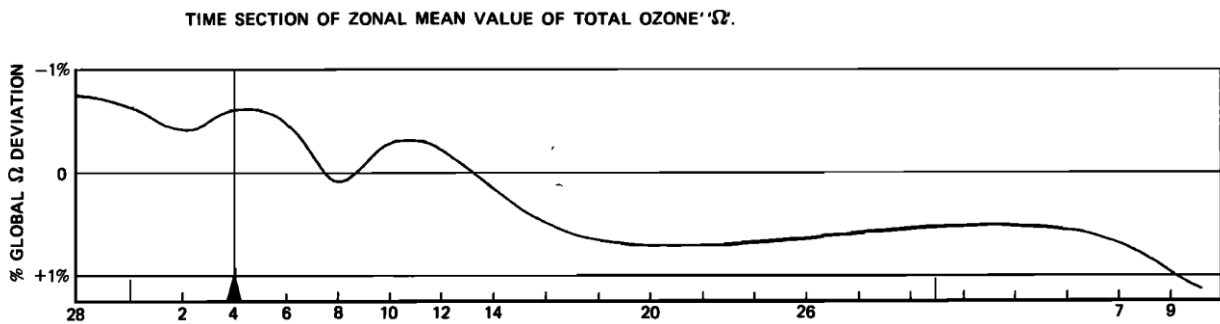


Fig. 2. Time series of the percentage deviation in the global average value of total ozone (60°N-60°S) throughout July and early August 1970. The date of the bomb detonation is indicated by the line at July 4.

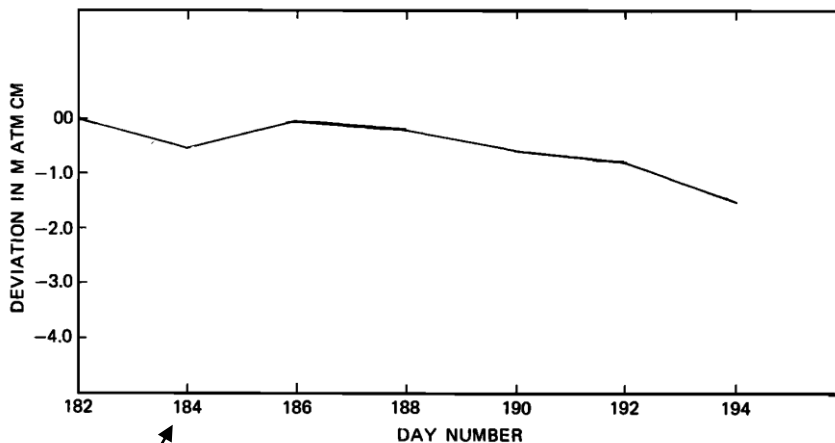


Fig. 4. The line represents the change in the net deviation from background zonal mean values for the belt 5°-30°S over the 10-day period after bomb burst.

4^η Ιουλίου

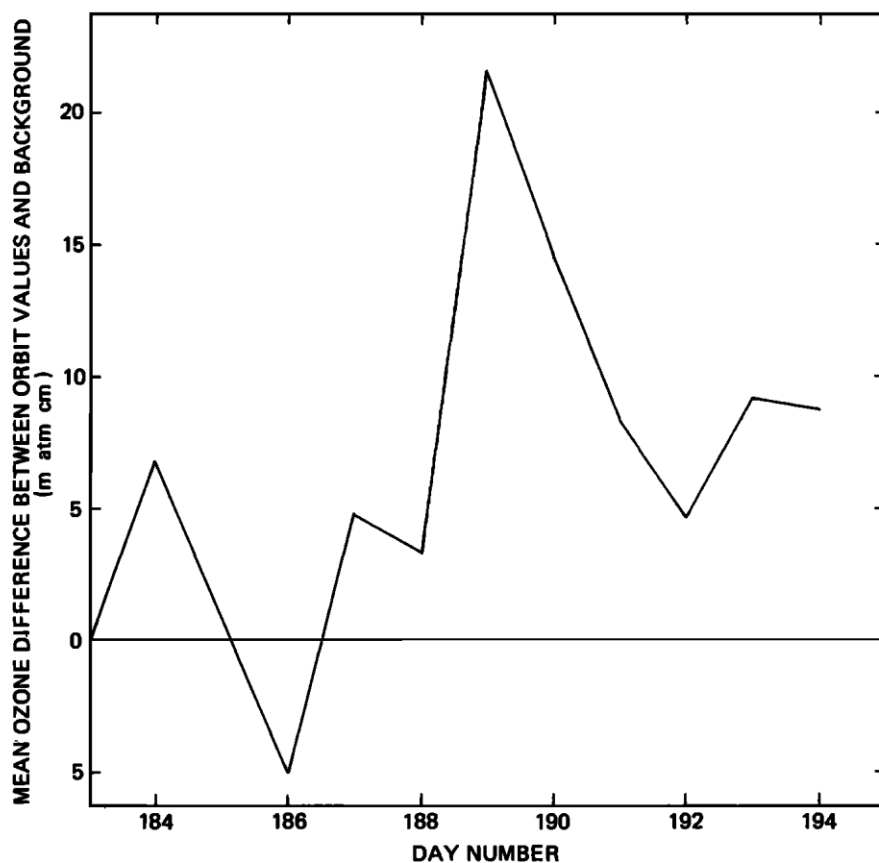


Fig. 5. The line represents the daily mean difference between the ozone values in the dispersion tubes intersected by satellite orbits and the corresponding zonal mean values over a 10-day period following bomb detonation.

TABLE 2a. Cloud Volumes Deduced From *Christie* [1976], Concentrations of Bomb-Produced NO_x , and Quantities of Natural Ozone Contained in Bomb Cloud

	Day				
	0	2	4	6	8
$V, 10^{21} \text{ cm}^3$ (equation (35))	0.58	1.6	4.3	8.1	10
$[\Delta\text{NO}_x]_B, 10^{10} \text{ cm}^{-3}$					
Max. (3×10^{32})*	51	18	6.9	3.8	2.9
Min. (0.8×10^{32})	14	4.8	1.8	1.0	0.7
$\text{O}_3, 10^{32}$ (natural, in V)	8.8	24	65	123	152

- $[\Delta\text{NO}_x]_B$ είναι η μέση συγκέντρωση των παραγόμενων NO_x
- O_3 είναι η ποσότητα μορίων όζοντος που βρίσκονται εντός του νέφους της βόμβας.

TABLE 2b. Percent Increase in Ozone in Bomb Cloud as a Result of Initial Ozone Injection as a Function of Range of Input Parameters

f_B	$(\Delta\text{NO}_x)_B, 10^{92}$ (Equation (29))	$(\Delta\text{O}_3)_B^0, 10^{92}$ (Equation (32))	$(\Delta\text{O}_3)_B, 10^{92}$ (Equation (34))	Percent O ₃ Increase in Bomb Cloud From O ₃ Injection				
				Day 0	Day 2	Day 4	Day 6	Day 8
1	3.0	5	7.2	82	30	11	5.9	4.8
1	0.8	5	5.6	64	23	9	4.5	3.7
1	3.0	0.5	2.5	29	10	4	2.1	1.7
1	0.8	0.5	1.1	12	4	1.7	0.9	0.7
0	3.0	5	4.2	48	17	7	3.4	2.8
0	0.8	5	4.8	54	20	7	3.9	3.2
0	3.0	0.5	-0.27	-3	-1	-0.4	-0.2	-0.2
0	0.8	0.5	0.29	3	1	0.4	0.2	0.2
0.5	1.9	2.7	3.2	36	13	5	2.6	2.1

Ο πίνακας {7, tab.2b} Δείχνει για τις πρώτες 8 μέρες τα ανώτερα και κατώτερα όρια για την ποσότητα του όζοντος που εκλύεται από την έκρηξη.

Το ένα ακραίο σενάριο προβλέπει την 1^η μέρα αύξηση 82% λόγω του παραγόμενου όζοντος, το οποίο μειώνεται σε 5% την 8^η μέρα ως αποτέλεσμα της διάχυσης του νέφους και της ανάμιξης του με στρατοσφαιρικό αέρα.

Το αντίθετο ακραίο σενάριο προβλέπει μείωση 3% την 1^η μέρα και καταλήγει σε 0,2% την 8^η μέρα.

Για τις μέσες τιμές (τελευταία γραμμή) έχουμε μείωση 36% την 1^η μέρα και καταλήγει σε 2% την 8^η μέρα.

TABLE 3. (a) Bomb-Produced NO_x Concentrations, (b) Relaxation Time (1/e) for Bomb-Produced NO_x to Destroy Ambient Ozone, and (c) Relaxation Time for Generation of HO Radicals by Sunlight to Convert Bomb-Produced NO_x to HNO₃

	Day					NO _x , 10 ⁹² molecules
	0	2	4	6	8	
<i>Part a</i>						
[NO _x] _B /10 ¹⁰ cm ⁻³	51	18	6.9	3.8	2.9	3.0
	14	4.8	1.8	1.0	0.7	0.8
<i>Part b, Number of Days</i>						
16 km	68	392	1570	3360	4640	3.0
	576	2510	8010	15200	22000	0.8
18 km	16	92	350	738	1010	3.0
	133	557	1720	3250	4730	0.8
20 km	4	23	85	174	236	3.0
	33	132	400	747	1080	0.8
<i>Part c, Number of Days</i>						
16 km	4.8(4)	1.7(4)	6500	3580	2730	3.0
	1.3(4)	4510	1690	942	718	0.8
18 km	2.4(4)	8330	3190	1760	1340	3.0
	6480	2220	832	463	353	0.8
20 km	1.3(4)	4610	1770	973	743	3.0
	3600	1230	462	256	196	0.8

Notation used in part c is, e.g., 4.8(4) = 4.8 × 10⁴. The values of 3.0 and 0.8 × 10⁹² for NO_x represent the maximum and minimum values, respectively.

3.2.12 Νεότερα εξελιγμένα υπολογιστικά μοντέλα

Οι I. Chang, W. Duewer και D. Wuebbles, Δημοσίευσαν το 1979 μια μελέτη {9}, παρουσιάζοντας ένα σύγχρονο μοντέλο υπολογισμών για τη στρατόσφαιρα και την καταστροφή του όζοντος από τις πυρηνικές εκρήξεις. Στον πίνακα {9, tab.1} έχουν συγκεντρωθεί όλες οι προηγούμενες έρευνες σχετικά με την παραγωγή NO_x από πυρηνικές εκρήξεις.

TABLE 1. Estimates of NO Yield per Megaton

	10 ³² Molecules/Mt
<i>Zeldovich and Raizur</i> [1967]	0.5
<i>Foley and Ruderman</i> [1972]	0.3–1.5
<i>Johnston et al.</i> [1973]	0.17–1.0
<i>Chang and Duewer</i> [1973]	0.5
<i>Goldsmith et al.</i> [1973]	1.0
<i>Gilmore</i> [1975]	0.4–1.5 (0.9)
<i>COMESA</i> [1975] (<i>Goldsmith et al.</i>)	0.6–1.1 (0.84)
<i>CMOESA</i> [1975] after allowance for disentrainment	0.5–0.9 (0.67)
This work	0.67

Στον πίνακα {9, tab.2} συγκεντρώνονται όλες οι δοκιμές που έγιναν μέχρι το 1970.

TABLE 2. Approximate Total Yield of High-Yield Atmospheric Nuclear Tests by Year

	<i>COMESA</i> [1975]	<i>Foley and Ruderman</i> [1973]	<i>Johnston et al.</i> [1976]	<i>Seitz et al.</i> [1968]	This* Work
Pre-1956	61.6	62	...	...	...
1956	26.0	26	...	...	20
1957	13.5	85	...	...	16
1958	61.9	0	...	...	58
1959	0	0	...	...	0
1960	0	0	...	...	0
1961	120.6	340	99.7	97	119
1962	213.5	...	204	206	216
1963	...	...	...	...	...
1964	...	...	...	...	...
1965	...	...	...	...	...
1966	1.4	...	...	...	...
1967	3.5	...	...	...	...
1968	7.6	...	...	...	...
1969	3.0	...	...	...	...
1970	6.1	...	...	...	...
Total 1961–1962	334	340	304	303	335
Total 1956–1962	435	451	...	...	429

High yield: ≥ 1 megaton TNT equivalent (4.2×10^{15} J).

*These yield figures were estimated by taking the unclassified qualitative yield descriptions and assigning them quantitative values consistent with other available data in the open literature.

Σχετικά με το ύψος που φτάνει το νέφος της έκρηξης λαμβάνονται υπ' όψιν οι σχέσεις των Folley-Ruderman [1972, 1973]

$$CT = 21.64 \times Y^{0.2} \text{ (km)} \quad \text{Ανώτερο σημείο του νέφους}$$

$$CB = 13.14 \times Y^{0.2} \text{ (km)} \quad \text{Κατώτερο σημείο του νέφους}$$

Επίσης απο τις μετρήσεις των Seitz et Al [1968] που έγιναν με την αξιοποίηση των ραδιενεργών καταλοίπων ^{14}C και ^{90}Sr , έγινε το σχήμα {9, fig.1} που δείχνει το ανώτερο και κατώτερο υψος που φτάνει η πύρινη σφαίρα αναλόγως της ισχύος της έκρηξης.

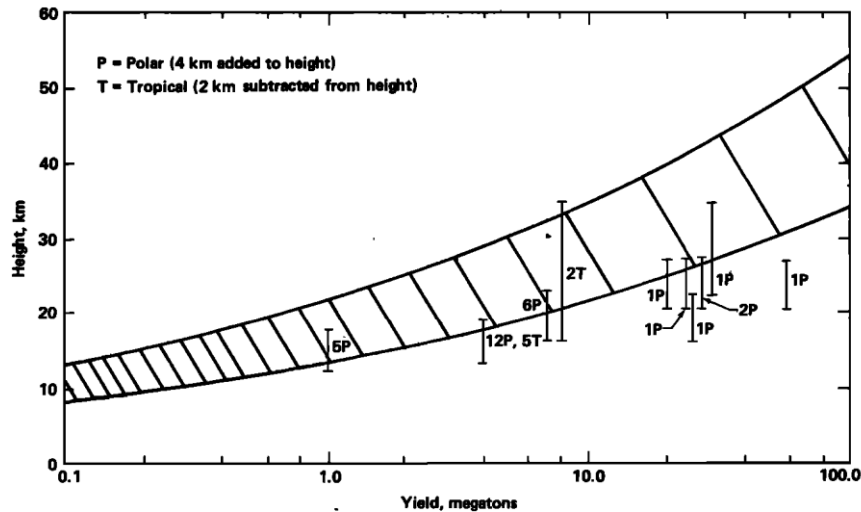


Fig. 1. Cloud top and cloud base versus yield for the treatments used. The curves defining the shaded area give the cloud top and cloud base according to the parameterization of Folley and Ruderman [1972]. The vertical bars extend from cloud base to cloud top for the data cited by Seitz et al. [1968] after adjustment to height above a variable tropopause as discussed in the text. The number of tests of a particular yield at high latitudes (indicated with a P) and at low latitudes (indicated with a T) is also given in the figure.

Για δοκιμές κοντά στους πόλους προστίθενται 4 km ενώ για δοκιμές στην τροπική ζώνη αφαιρούνται 2 km. Στο ίδιο σχήμα αποτυπώνονται οι δοκιμές που έγιναν σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη (P) και σε μικρά (T).

Για τα μέσα Γεωγραφικά πλάτη ισχύουν με καλή ακρίβεια οι σχέσεις των Folley-Ruderman. Στο σχήμα {9, fig.2} και στον πίνακα {9, tab.3} παρουσιάζονται οι μειώσεις του όζοντος σύμφωνα με τους υπολογισμούς των προηγούμενων ερευνητών σε σχέση με τους υπολογισμούς που έγιναν με τη χρήση νεωτέρων μοντέλων.

TABLE 3. Effects Calculated for Various Model Inputs

Chem-istry	K_z	Stabilization Parameterization	Other Variations	$\Delta O_{3_{max}}$	$\langle \Delta O_{3_{1963}} \rangle$	$\langle \Delta O_{3_{1964}} \rangle$
1973	Chang [1974]	Foley and Ruderman	$0.5 \times 10^{+31}$ NO/Mt (Bates and Hayes [1967] N_2O , NO multiple scattering)	-5.0	-4.0	-3.3
1973	Chang [1974]	Foley and Ruderman	$0.5 \times 10^{+31}$ NO)Mt	-4.8	-3.8	-3.1
1973	Hunten [1075]	Foley and Ruderman	$0.5 \times 10^{+31}$ NO/Mt	-5.3	-4.5	-3.9
1974	Chang [1974]	Foley and Ruderman		-8.2	-7.1	-6.2
1976	Chang [1976]	Foley and Ruderman	diurnal averaging	-6.8	-4.5	-2.7
1976	Chang [1976]	Seitz et al.	diurnal averaging	-5.1	-4.3	-2.6
1976	Chang [1976]	Foley and Ruderman	no diurnal averaging	-6.1	-4.2	-2.6
1976	Hunten [1975]	Foley and Ruderman	no diurnal averaging	-5.0	-3.9	-2.8
1976	Chang [1976]	Seitz et al.	no diurnal averaging	-4.3	-3.8	-2.5
1977	Chang [1976]	Foley and Ruderman	diurnal averaging	-4.2	-3.0	-1.4
1977	Chang [1976]	Seitz et al.	diurnal averaging	-1.9	-1.5	-0.8
1977	Hunten [1975]	Seitz et al.	diurnal averaging	-1.8	-1.4	-0.7

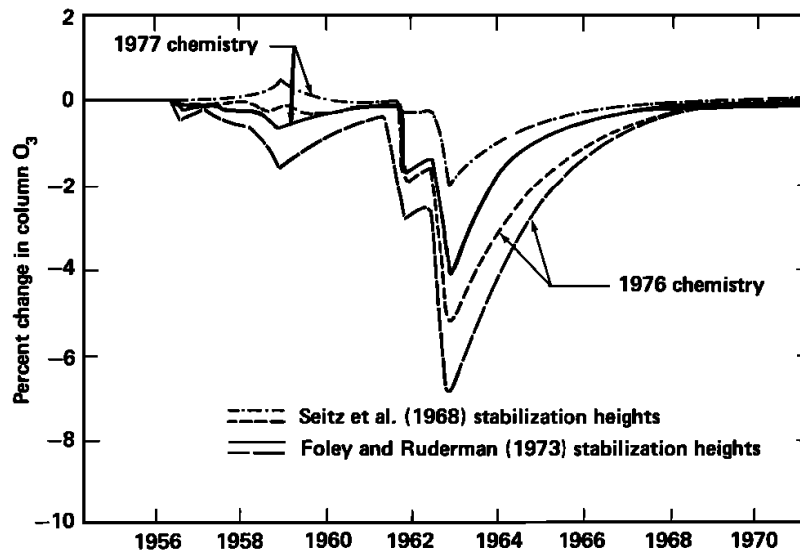


Fig. 2. Calculated change in O_3 versus date showing the effect of the treatment of cloud stabilization height. Dash-dot line, *Seitz et al.* [1968] stabilization height, 1977 chemistry. Short-dashed line, *Seitz et al.* [1968] stabilization height, 1976 chemistry. Solid line, *Foley and Ruderman* [1972] stabilization height, 1977 chemistry. Long-dashed line, *Foley and Ruderman* [1972] stabilization height, 1976 chemistry. All calculations used the *Chang* [1976] K_z and diurnal averaging.

Όπως φαίνεται στο σχήμα {9, fig.3} τα αποτελέσματα των υπολογισμών διαφέρουν πολύ μεταξύ τους αναλόγως των μοντέλων χημικών αντιδράσεων που έχει χρησιμοποιηθεί.

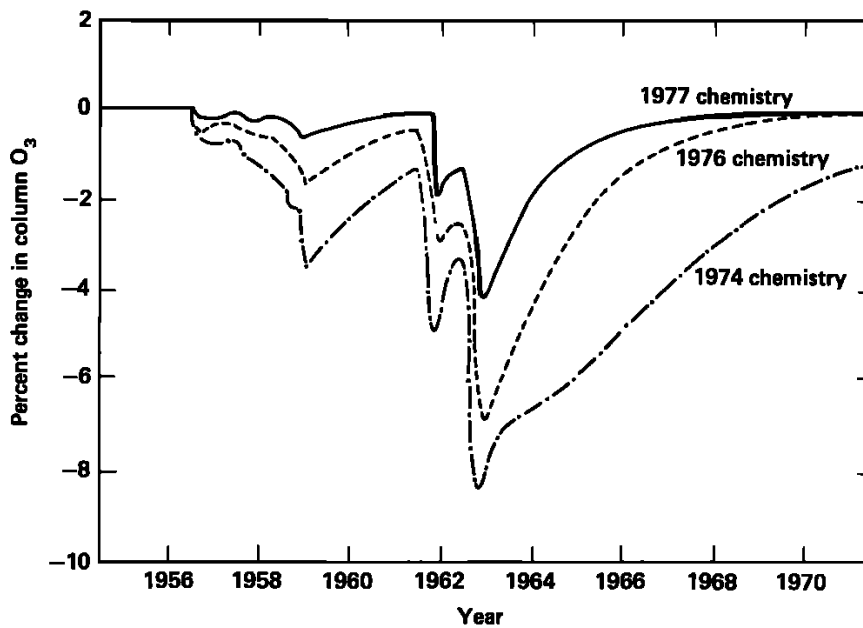


Fig. 3. Calculated change in O_3 versus date showing the effect of the choice of chemistry. Solid line, 1977 chemistry, *Chang* [1976] K_z . Dashed line, 1976 chemistry, *Chang* [1976] K_z . Dash-dot line, 1974 chemistry, *Chang* [1974] K_z . All calculations used the *Foley and Ruderman* stabilization parameterization.

Σημαντική είναι επίσης η επίδραση και άλλων παραγόντων οι οποίοι σε παλαιότερα μοντέλα δεν είχαν ληφθεί υπ' όψιν. Τέτοιοι παράγοντες είναι:

- Η διαδικασία απόπλυσης των ραδιενεργών καταλοίπων και λοιπών σωματιδίων (rainout). Ενώ στα αρχικά μοντέλα του 1973 δεν είχε ληφθεί υπ' όψιν, σε όλα τα μεταγενέστερα

χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές $2.31 \times 10^{-6}/s$ για τα HNO_3 , HCl και ClO και $1.16 \times 10^{-6}/s$ για NO_2 .

- Επίσης σημαντικές είναι οι συνοριακές συνθήκες στην επιφάνεια του νέφους για τις συγκεντρώσεις των NO_x και ClO_x . Στις τελευταίες μοντελοποιήσεις ο ρυθμός ανάμιξης των NO_x στην τροπόσφαιρα, σχετίζεται με τον συντελεστή K_z οριζόντιας μεταφοράς που θα αναλύσουμε στην συνέχεια.
- Στους νεότερους υπολογισμούς λαμβάνονται υπ'όψιν οι ρυθμοί φωτοδιάσπασης, η ημερήσια διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και τα φαινόμενα πολλαπλής σκέδασης.
- Λαμβάνεται υπ'όψιν και ο ρυθμός οριζόντιας μετατόπισης-διάχυσης του νέφους που προσδιορίζεται από το συντελεστή K_z , σχήμα {9, fig.4}. Ο K_z δεν φαίνεται να επηρεάζει τόσο τις τελικές ποσότητες που φτάνουν στη στρατόσφαιρα οι οποίες εξαρτώνται όπως έχουμε δει από την ισχύ της έκρηξης. Ο K_z όμως επηρεάζει το χρόνο ανάκτησης που απαιτείται ώστε να απομακρυνθούν οι πρόσθετες ποσότητες NO_x που παρήχθησαν και να επανέλθει η στρατόσφαιρα.
- Τελος θα εξετάσουμε και την επίδραση που έχουν τα διαφορετικά μοντέλα χημικής ανάλυσης.

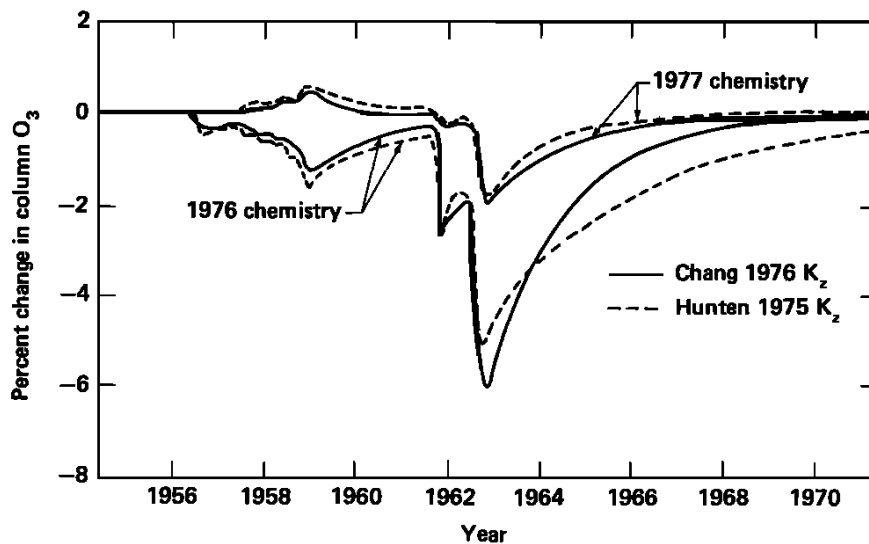
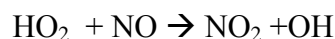


Fig. 4. Calculated O_3 change versus date showing the effect of choice of K_z . Dashed line, *Hunten* [1975] K_z . Solid line, *Chang* [1976] K_z . Upper curves use the 1977 chemistry and diurnal averaging. Lower curves use the 1976 chemistry without diurnal averaging.

Τα πρώτα μοντέλα ξεκίνησαν στις αρχές του 1973. Μεταξύ του 1973 και 1974 προστέθηκαν αντιδράσεις με ενώσεις HO_x γεγονός που μείωσε την ευαισθησία των μοντέλων σε διαταραχές των NO_x . Επίσης η προσθήκη, αντιδράσεων ατόμων N με O_3 , αύξησε τη ευαισθησία του μοντέλου όταν προστίθενται NO_x σε μεγάλα ύψη περίπου 50 km.

Ακόμη η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας συμπεριλήφθηκε με τη χρήση συντελεστών φωτόλυσης.

Μετά το 1976 στα μοντέλα συμπεριελήφθησαν οι επιδράσεις των ClO_x καθώς και μερικές HO_x αντιδράσεις. Επίσης τροποποιήθηκαν μερικοί συντελεστές πχ. στους ρυθμούς αντιδρασεων



έγινε αύξηση κατά συντελεστή 40, με αποτέλεσμα να γίνει εντονότερη η επίδραση μεταξύ NO_x με HO_x . Στο σχήμα {9, fig.4} φαίνονται συγκριτικά τα αποτελέσματα από τις διαφορετικές χημικές μοντελοποιήσεις που έγιναν κατά τα έτη 1975, 1976 και 1977.

Το μονοδιάστατο μοντέλο του 1977 υπολογίζει καταστροφή του όζοντος, συμβατή με τις τιμές που μετρήθηκαν κατά τις πυρηνικές δοκιμές του 1960. Οι υπολογισμοί δείχνουν ότι σύμφωνα με τη μονοδιάστατη ανάλυση οι επιδράσεις των πυρηνικών δοκιμών στο όζον, εξαρτώνται κυρίως

από το ύψος που καταλήγει το νέφος και λιγότερο από το συντελεστή K_z της οριζόντιας μετατόπισης.

Οι σημαντικότερες βελτιώσεις στα χημικά μοντέλα υπολογισμών και αυτές που επηρεάζουν περισσότερο την ευαισθησία του μοντέλου, σχετίζονται με τις αντιδράσεις με HO_x και NO_x , διότι η δευτερεύουσα χημεία τους έχει πολύ ισχυρή επίδραση και ευαισθησία στην παραγωγή των NO_x . Θα πρέπει όμως για να υπάρξει πιο ολοκληρωμένη εικόνα να γίνει επίλυση με μοντέλα περισσότερων διαστάσεων.

Οι επιδράσεις που έχουν παρατηρηθεί στη μείωση του όζοντος μετρούνται περίπου στο 4%. Συνεπώς ένα υπολογιστικό μοντέλο πρέπει να δίνει αποτελέσματα συμβατά με τις παρατηρούμενες τιμές.

Μια πιο σύγχρονη έρευνα έγινε από τον G.Reinsel το 1981 [10]. Ο Reinsel έχοντας στη διάθεσή του όλες τις προγενέστερες μελέτες, επιβεβαίωσε κατ' αρχήν ότι οι πυρηνικές δοκιμές που έγιναν κατά τα τέλη της δεκαετίας του '50 και αρχές του '60 προκάλεσαν αδιαμφισβήτητη καταστροφή στο όζον της στρατόσφαιρας και οι διαφορές όλων των ερευνών έχουν να κάνουν με το μέγεθος της καταστροφής που μερικοί το υπολογίζουν κατα μέγιστο σε 4~5% ενώ κάποιοι άλλοι σε πολύ λιγότερο από 1%, δες σχήμα {10, fig.1}.

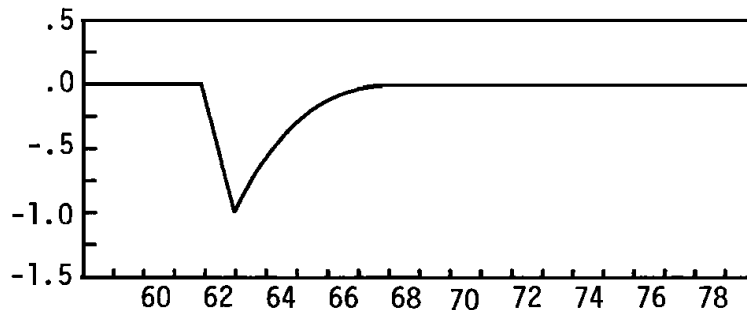


Fig. 1. Approximate Form of Predicted Ozone Change Due to Nuclear Testing Effects.

Ο Reinsel εξέτασε δεδομένα από σταθμούς Dobson και δημιούργησε ένα στατιστικό μοντέλο στη διάρκεια του χρόνου. Συνυπολόγισε στην καταστροφή του όζοντος και την επίδραση των CFC's η οποία είναι σημαντική. Επίσης έλαβε υπ' όψιν του και την ετήσια διακύμανση του όζοντος χρησιμοποιώντας για μια περιοχή της γης την σχέση:

$$y(t) = \mu + s(t) + \delta z(t) + \omega x(t) + N(t) \quad (1)$$

όπου:

- μ = η ολική μέση τιμή
- $s(t)$ = η εποχιακή διακύμανση του όζοντος
- $z(t)$ = η τιμή που προκύπτει από το σχήμα 1
- $\delta z(t)$ = η επίδραση στο όζον από τις πυρηνικές δοκιμές με (δ) να αναπαριστά την μέγιστη τιμή μείωσης όζοντος στη συγκεκριμένη περιοχή της γής
- $\omega x(t)$ = η γραμμική μεταβολή του όζοντος λόγω των CFC's που ξεκινά από το 1970
- $x(t) = 0$ για $t \leq T_0$ και $x(t) = (t - T_0)/12$ για $t > T_0$
- T_0 = Δεκέμβριος 1969
- $N(t)$ = είναι ο θόρυβος των μετρητικών συσκευών που μπορεί να συσχετιστεί με τις προγενέστερες χρονικά στιγμές από τη σχέση:

$$N(t) = \Phi_1 N(t-1) + \dots + \Phi_p N(t-p) + a(t) \quad (2)$$

Όπου $a(t)$ είναι συνάρτηση από τυχαίες μεταβλητές με μέση τιμή 0 και πιθανό να μεταβάλλεται για διαφορους μηνες μέσα στο έτος .

Το μοντέλο που χρησιμοποιεί τις σχέσεις (1) , (2) εφαρμοσθηκε για τα δεδομένα από 46 σταθμούς Dobson και για την περίοδο 1958 ~ 1979. Ωστόσο τα δεδομένα αυτά μπορούν να μας δώσουν χρήσιμες πληροφορίες μόνο για ένα από τα δύο αίτια καταστροφής του όζοντος (πυρηνικά ή CFC's) διότι δεν λειτούργησαν όλοι οι σταθμοί την ίδια περίοδο.

Τα δεδομένα αυτά έχουν συγκεντρωθεί και παρουσιάζονται γραφικά στα σχήματα {10, fig-2 και fig-3}.

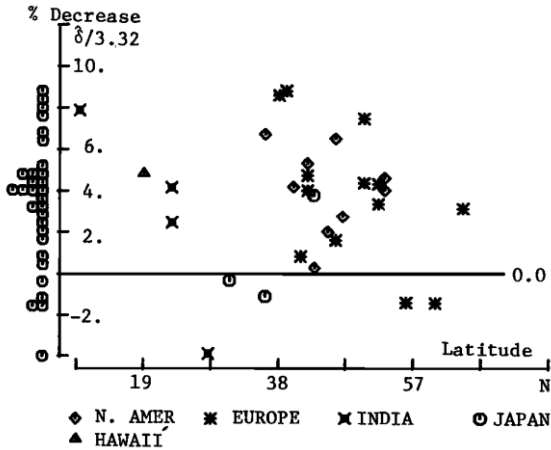


Fig. 2. Estimates of Maximum Nuclear Effect.

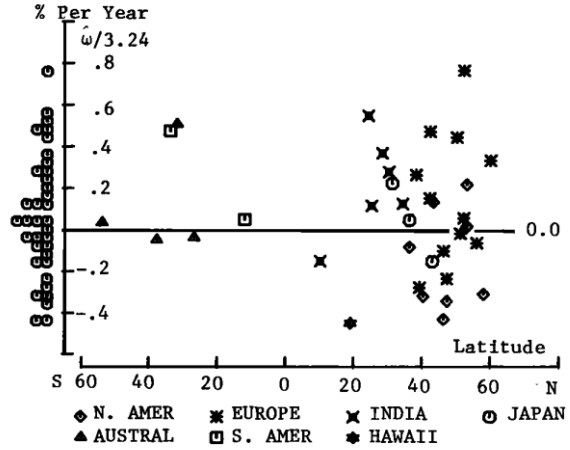


Fig. 3. Estimates of Rate of Change Since 1970.

Η έρευνα του Reinsel καταλήγει ότι η συνολική επίδραση στο όζον για την περίοδο 1970-1979 λόγω των πυρηνικών δοκιμών, για το Βόρειο ημισφαίριο εκτιμάται σε (3.258 +/- 1.570)%. Συνεπώς μπορούμε να δεχτούμε μια επίδραση 2~4.5% η οποία είναι συμβατή με τα δεδομένα των μετρήσεων.

Πρέπει όμως να είμαστε επιφυλάκτικοί γιατί στις αρχές του '60 υπήρχαν λίγα μετρητικά δεδομένα και επίσης δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι το όζον μπορεί να επηρεάζεται κι από άλλους παράγοντες όπως ο ηλιακός κύκλος.

TABLE 2. Region Estimates of Nuclear Effect

Region	Number of Stations	Standard Deviation	Average % Decrease
North America	9	2.108	4.036
Europe	13	3.313	3.705
India	4	4.910	2.633
Japan	3	2.651	.767
Hawaii	1	-	4.831

TABLE 3. Regional Estimates of Trend in 1970's

Region	Number of Stations	Standard Deviation	Average % Change/year
North America	8	.244	-.141
Europe	12	.315	.148
India	6	.242	.212
Japan	3	.188	.038
Australia	4	.266	.111
South America	2	.301	.260
Hawaii	1	-	-.451

3.2.13 Σενάρια πολέμου

Κλείνοντας την επισκόπηση των κυριωτέρων μελετών για για την επίδραση των πυρηνικών εκρήξεων στο οζόν της στρατοσφαιρας αξίζει να αναφερθούμε στην δημοσίευση της επιτροπής για τις επιδράσεις των πυρηνικών δοκιμών στην ατμόσφαιρα [11].

Η μελέτη που έγινε εξετάζει ένα σενάριο παγκοσμίου πολέμου μεταξύ ΗΠΑ και της τότε Σοβιετικής Ενωσης, με χρήση πυρηνικών όπλων με τις εξής παραδοχές:

- Θα χρησιμοποιηθεί περίπου το 50% του πυρηνικού οπλοστασίου ήτοι 6.500Mt
- Από αυτά οι 1.500 Mt θα εκραγούν στο έδαφος.
- Οι 5.000 Mt θα εκραγούν στην ατμόσφαιρα σε διάφορα ύψη ώστε να μεγιστοποιούνται οι καταστροφές (στρατηγικοί στόχοι, οικονομικά και πολιτικά κέντρα κλπ).
- Όλες οι εκρήξεις θα γίνουν στο Βόρειο ημισφαίριο μεταξύ 30⁰N και 70⁰N.

Η σκόνη που θα φτάσει μέχρι τη Στρατόσφαιρα λόγω των επιφανειακών εκρήξεων των 1.500 Mt υπολογίζεται σε 15 Teragram=15x10⁶ tn. Η σκόνη αυτή θα παραμείνει στη στρατόσφαιρα για πάνω από 1 χρόνο.

Τα οξειδία του αζώτου NO και NO₂ (που με η γενικευμένη τους ονομασία είναι NO_x) που εκτιμάται ότι θα παραχθούν κατά την πολεμική αυτή σύραξη παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα [11 tab. 6.1].

TABLE 6.1 Recent Estimates of Maximal Ozone Depletion Resulting from a Nuclear War

Scenario	Yield (Mt)	NO (10 ³² molecules)		Maximum Ozone Depletion (percent)	Note
		Below 12 km	Above 12 km		
Baseline	6,500	2,665	3,835	17	a
Excursion	8,500	2,665	5,835	43	b
Chang Case A	10,600	560	6,540	51	c
Chang Case B	5,300	280	3,270	32	d
Chang Case C	5,670	0	3,800	42	e
Chang Case D	4,930	560	2,740	16	f
Chang Case E	6,720	180	4,340	39	g
Chang Case F	3,890	390	2,220	20	h
<u>Ambio</u>	5,740	4,510	1,230	~0	i
<u>Ambio</u> Excursion	10,000	1,375	8,625	65 (45°N)	j
Turco et al. (1983)	10,000	1,200	8,400	50	k

^a No weapons larger than 1.5 Mt. See Chapter 3 for details.

^b Baseline scenario plus 100 weapons of 20-Mt yield.

^c All strategic weapons in the United States and USSR arsenals successfully detonated.

^d Half of the weapons of each type in the strategic arsenals of the United States and USSR.

^e All weapons with individual yields greater than 0.8 Mt in the strategic arsenals of the United States and USSR.

^f all weapons with individual yields less than or equal to 0.8 Mt in the strategic arsenals of the United States and USSR.

^g all weapons in the Soviet strategic arsenal.

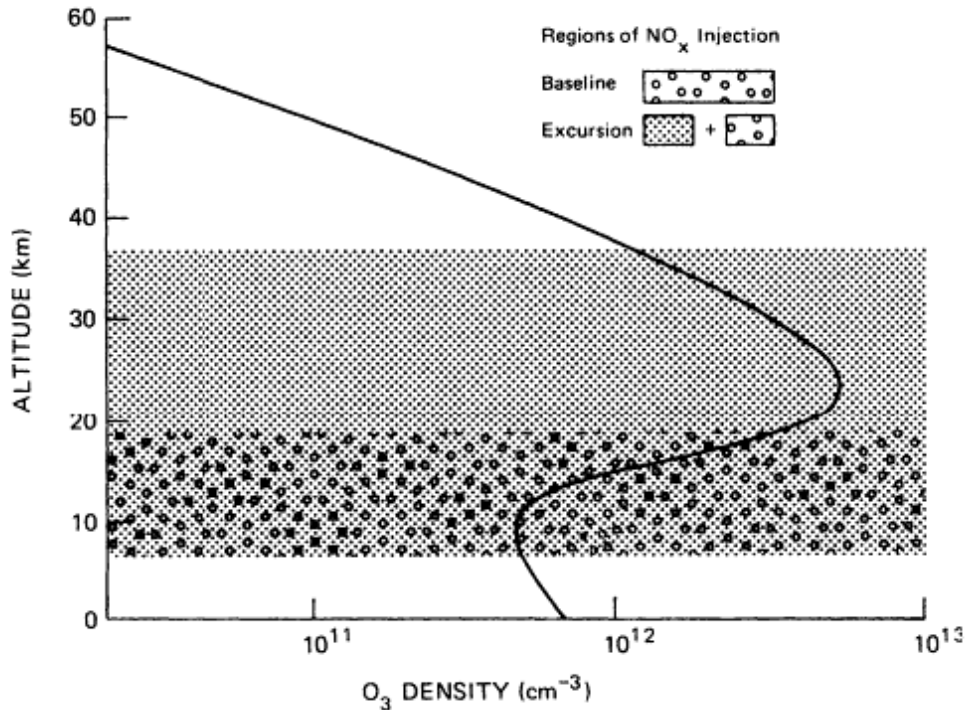
^h all weapons in the U.S. strategic arsenal.

ⁱ When the troposphere is included, the Ambio scenario actually results in a slight ozone increase. The Chang model also gives this result for the Ambio scenario.

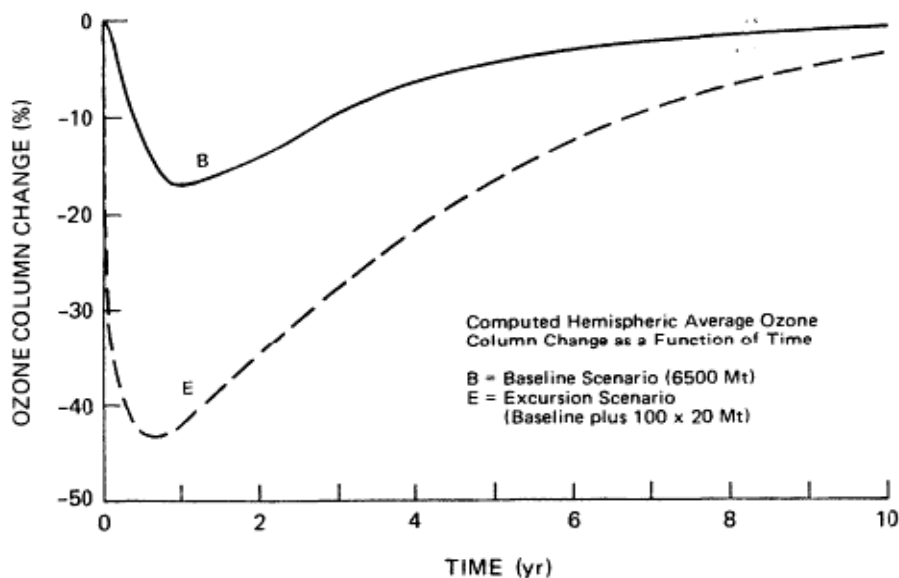
^j The Ambio excursion scenario consists of 5000 1-Mt detonations plus 500 10-Mt detonations and is identical to the NRC (1975) scenario.

^k The blocking of sunlight by nuclear dust and soot was accounted for, but the resulting heating of the stratosphere was not.

Στο σχήμα [11, fig. 6.3] παρουσιάζονται δύο σενάρια πολέμου το βασικό που όπως προαναφέραμε είναι υπολογισμένο για 6.500 Mt και το επαυξημένο για 8.500 Mt το οποίο είναι όμοιο με το βασικό, έχοντας επιπλέον 100 μεγαλύτερες εκρήξεις των 20Mt. Στο διάγραμμα έχει συμπεριληφθεί και το προφίλ του όζοντος για αδιατάρακτη στρατόσφαιρα.



Το εργαστήριο Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) δημιούργησε ένα μονοδιάστατο μοντέλο χημικών αντιδράσεων για την υπολογισμό της μείωσης του όζοντος και όπως φαίνεται στο σχήμα [11 fig. 6.4] εκτιμάται μέση μείωση 17% για το Βόρειο ημισφαίριο ένα χρόνο μετά την πολεμική σύραξη και επανέρχεται το 50% του ελαχίστου αυτού δύο χρόνια μετά (περίπτωση 6.500 Mt). Για σενάριο 8.500 Mt, επειδή περιλαμβάνει μεγαλύτερης ισχύος βόμβες, τα NOx θα φτάσουν ψηλότερα μέσα στη στρατόσφαιρα, οπότε 8 μήνες μετά θα έχουμε μείωση 43% από το οποίο θα ανακάμψει το 50%, 4 χρόνια μετά.



Η τελευταία μελέτη που θα παρουσιάσουμε [12], έγινε το 2008 και εξετάζει ένα σενάριο πολέμου στην υποτροπική περιοχή του βορείου ημισφαιρίου μεταξύ δυο χωρών που θα ανταλλάξουν πυρηνικές βόμβες μεγέθους Χιροσίμας 15Kt. Όπως έχουμε αναλύσει ενδελεχώς οι βόμβες αυτού του μεγέθους δεν στέλνουν NOx στη στρατόσφαιρα. Η μελέτη όμως των Mills et Al. Εξετάζει την θέρμανση που προκαλείται στη στρατόσφαιρα λόγω των καπνών από τις εκτεταμένες πυρκαϊές που θα φτάσουν εκεί οι οποίοι απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία με αποτέλεσμα την τοπική αύξηση της θερμοκρασίας. Οι υψηλότερες στρατοσφαιρικές θερμοκρασίες επιταχύνουν τις καταλυτικές αντιδράσεις ειδικά αυτές με διοξείδια του Αζωτού, οι οποίες καταστρέφουν το όζον.

Βλέπουμε λοιπόν ότι ακόμη κι' αν δεν φτάσουν στη στρατόσφαιρα NOx από την πυρηνική έκρηξη, οι επιδράσεις της εξακολουθούν να επηρεάζουν το όζον. Αναφέρουν ως παραδειγμα μια τοπική συγκρούση Ινδίας-Πακιστάν όπου θα χρησιμοποιούσε ο κάθε αντίπαλος 50 πυρηνικά όπλα μεγέθους Χιροσίμα (15 Kt), τα οποία θα προκαλούσαν 6,6 Tg αιωρούμενα σωματίδια άνθρακα που θα έφταναν στη Στρατόσφαιρα.

Για την ανάλυση τους χρησιμοποίησαν συνδυασμό των προγραμμάτων WACCM3 ένα πρόγραμμα για επίλυση χημικών-κλιματικών μοντέλων και το CARMA που είναι ένα 3διάστατο υπολογιστικό πακέτο φυσικής.

Τα αποτελέσματά τους δείχνουν ότι συνολικά θα καταστραφεί το 20% του όζοντος με 25-45% στα μέσα γεωγραφικά πλάτη και 50-70% στα βορειότερα. Αυτή η μείωση θα διασκέσει 5 χρόνια και η στηλή όζοντος θα παραμείνει <220 μονάδες Dobson για όλη την υδρόγειο για τρία χρόνια από τον πυρηνικό πόλεμο.

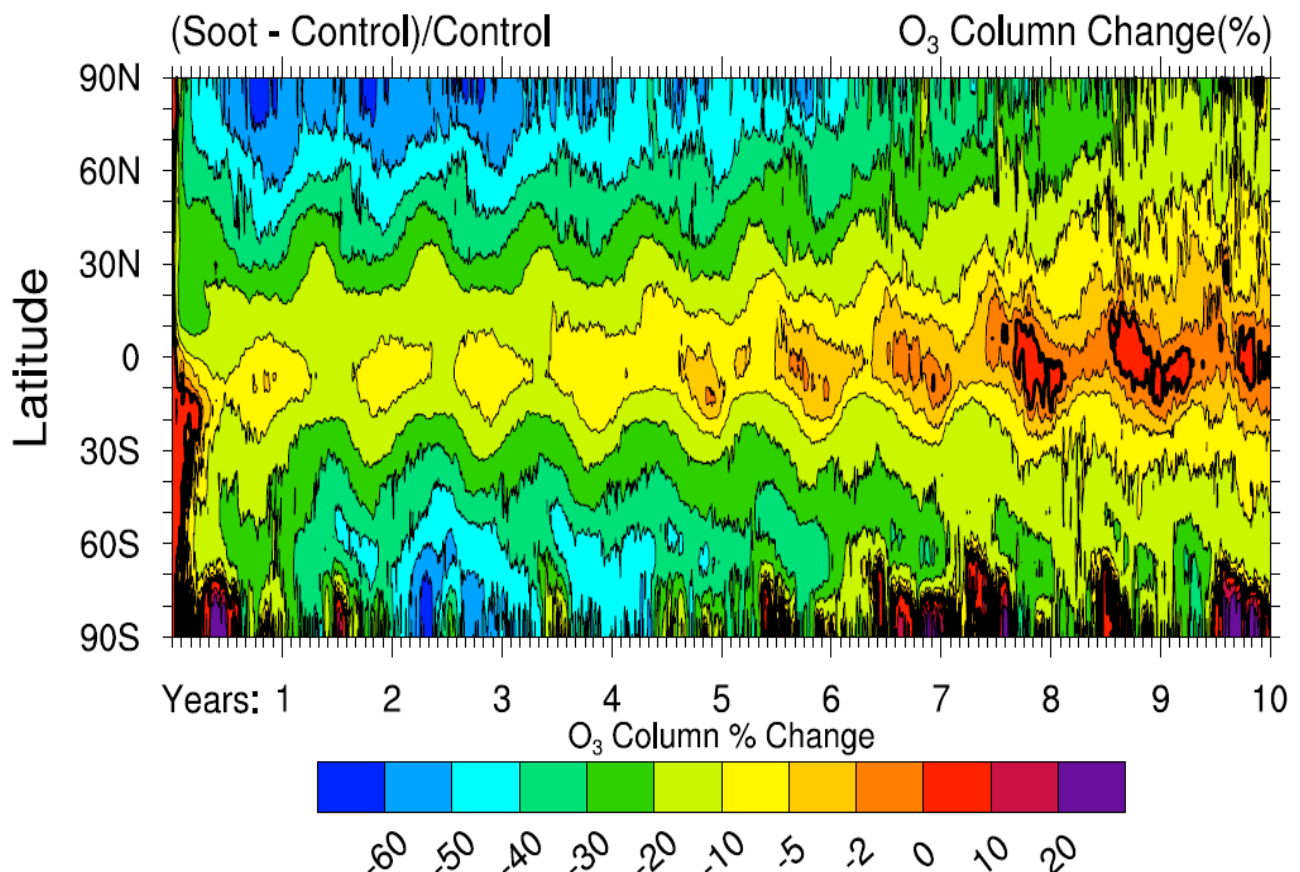


Fig. 2. Zonally averaged total ozone deviations from the baseline (in Dobson units) versus latitude as a function of time, for the same conditions as in Fig. 1. Note that the most rapid recovery of the ozone layer occurs at tropical latitudes.

3.3 Συγκεντρωτική Ανασκόπηση Ερευνών

Κλείνοντας το 3^ο κεφάλαιο, συγκεντρώνουμε τα δεδομένα από τη βιβλιογραφική που έρευνα έγινε για τις 12 δημοσιευμένες μελέτες που αναλύσαμε:

13. *Harold Johnston, «The Effect of Supersonic Transport Planes on the stratospheric Ozone Shield», *Envtl. Aff. L. Rev.* 736 (1972)*
Αναλύει την επίδραση NO_x στο όζον κανοντας μια εκτενή ανάλυση της χημείας της ατμόσφαιρας και επικεντρώνεται στα παραγόμενα NO_x από υπερηχητικά αεροπλάνα (SST). Κάνει μια πρώτη σύντομη αναφορά για την επίδραση των παραγόμενων NO_x από πυρηνικές δοκιμές
14. *Foley & Ruderman, «Stratospheric NO Production from Past Nuclear Explosions» *Journal of Geophysical Research*, July 20, 1973*
Δημοσιεύουν τους πρώτους φαινομενολογικούς τύπους για τον υπολογισμό του υψους που φτάνει η πύρινη σφαίρα, εκτιμούν τη συνολική εκπομπή ρύπων σε 3×10^{34} μόρια NO_x και διαπιστώνουν ότι δεν παρατηρήθηκαν μεγάλες καταλυτικές μειώσεις όζοντος κατα τους μήνες που ακολούθησαν τις μεγάλες πυρηνικές δοκιμές των αρχών του '60. Αναφέρουν πάντως ότι αν διπλασιαζόταν οι ποσότητες NO_x τότε θα μπορούσε να υπήρχε μείωση στο όζον έως και 10%
15. *H. Johnston, G. Whiten, J. Birks, «Effects of Nuclear Explosions on Stratospheric Nitric Oxide & Ozone», *Journal of Geophysical Research*, September 20, 1973*
Υπολογίζουν ότι έχουν παραχθεί τεχνητά 3×10^{34} μόρια NO_x και υπολογίζουν μείωση 1-6% στη στηλη όζοντος. Από τις μετρήσεις 90 επίγειων σταθμών παρατηρούν μια συστηματική «μικρή» μείωση του όζοντος στην αρχή της 10ετίας του '60 και διαπιστώνουν ότι το όζον επανέρχεται μετά το '63-70 σε φυσιολογικά επίπεδα.
16. *Goldsmith, Tuck, Foot, Simmons, Newson, «Nitrogen oxides, Nuclear weapon testing, Concorde and Stratospheric Ozone», *Nature Vol.244*, August 31, 1973*
Αναλύοντας αρχεία από επίγειους σταθμούς όζοντος καταλήγουν ότι δεν υπάρχουν «ανιχνευσιμές» αλλαγές στη συνολική ποσότητα όζοντος μετά από περιόδους πυρηνικών δοκιμών. Και οι τυχόν μικρές αποκλίσεις είναι εντός των ορίων μετρητικών σφαλμάτων.
17. *Forest Gilmore, «the production of Nitrogen Oxides by Low-altitude Nuclear Explosions», *Journal of Geophysical Research*, November 20, 1975.*
Ανακεφαλαιώνει όλες τις προηγούμενες έρευνες και υπολογίζει ότι τα παραγόμενα μόρια NO_x ανά MT εκρηκτικής ισχύος είναι εντός των ορίων (0.4×10^{32} και 1.5×10^{32})
18. *Ernst Bauer, Forest Gilmore, «Effect of Atmospheric Nuclear Explosions on Total Ozone», *Reviews of Geophysics and Space Physics*, August 1975.*
Κάνουν μια αναλυτική αναφορά στις προηγούμενες έρευνες καταλήγουν ότι την περίοδο '61-62 εξεράγησαν πυρηνικά ~300MT και παρήχθησαν τάξεως 10^{34} μόρια NO_x και ενώ προηγουμενοι ερευνητές έκαναν θεωρητικές προβλέψεις μεταξύ 1% για το Νότιο ημισφαίριο και 5% για το Βορειο, αυτοι ανέλυσαν μετρήσεις επίγειων σταθμών καθώς και του δορυφόρου Nimbus IV και κατέληξαν ότι υπάρχει μεν μείωση αλλά είναι εντός των μετρητικών σφαλμάτων και δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί θετικά.
19. *A. D. Christie, «Atmospheric Ozone Depletion by Nuclear Weapons Testing» *Journal of Geophysical Research*, May 20, 1976.*
Ανέλυσε την Γαλλική δοκιμή 2MT τον Ιούλιο του 1970. Χρησιμοποίησε δεδομένα από επίγειους σταθμούς αλλά και το δορυφόρο Nimbus IV. Αναφέρει ότι από την έκρηξη παράγεται εκτός από NO_x και σημαντική ποσότητα όζοντος λόγω της H/M ακτινοβολίας η οποία αρχικά δείχνει στις

μετρήσεις μια αύξηση της στήλης όζοντος τοπικά η οποία στη συνέχεια μειώνεται. Βεβαία αυτή η πρόσθετη ποσότητα όζοντος ισοσκελίζει σε μεγάλο βαθμό την καταλυτική καταστροφή όζοντος λόγω NO_x, και σε συνδιασμό με δυναμικά φαινόμενα ανάμιξης με τον περιβάλλοντα αέρα καταλήγει ότι δεν μπορούμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα για την πραγματική μείωση του όζοντος τοπικά, λόγω των παραγόμενων NO_x.

20. *Harold Johnston, «Expected Short-term Local Effect of Nuclear Bombs on Stratospheric Ozone», Journal of Geophysical Research, July 20, 1977.*

Αναφέρεται κι αυτός στην προηγούμενη Γαλλική δοκιμή και τις άμεσες επιδράσεις μιας πυρηνικής έκρηξης στο στρώμα του όζοντος της περιοχής. Υπάρχει μια μεγάλη αβεβαιότητα στις άμεσες μετρήσεις, γιατί κατά την έκρηξη εκτός από NO_x παράγονται και ποσότητες όζοντος (από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία) και για να εξουδετερωθούν αντιδρώντας με τα παραγόμενα NO, απαιτείται διάστημα περίπου 2 μηνών. Θα υπάρξει λοιπόν πολύ λίγη καταστροφή του O₃ κατά τις 10 πρώτες μέρες. Άρα λοιπόν οι επιδράσεις στο στρατοσφαιρικό όζον απαιτούν μακροχρόνια παρακολούθηση και δεν επαρκούν οι τοπικές μετρήσεις 10 ημερών που έδωσε ο Nimbus-4.

21. *J. Chang, W. Duewer, D. Wuebbles, «The Atmospheric Nuclear Tests, of the 1950's and 1960's a Possible Test of Ozone Depletion Theories», Journal of Geophysical Research, April 20, 1979.*

Χρησιμοποίησαν ένα εξελιγμένο μονοδιάστατο υπολογιστικό μοντέλο που περιλαμβάνει παραμέτρους που δεν είχαν συμπεριληφθεί παλαιότερα. Μετά από λεπτομερή ανάλυση και σύγκριση με παλαιότερα υπολογιστικά μοντέλα καταλήγει ότι ένα υπολογιστικό μοντέλο για να θεωρηθεί αξιόπιστο θα πρέπει να δίνει προβλέψεις σύμφωνα με τις παρατηρούμενες μειώσεις στο όζον που είναι της τάξεως του 4%.

22. *G. Reinsel, «Analysis of the Total Ozone Data for the Detection of Recent Trends and the effect of Nuclear Testing During the 1960's», Geophysical Research Letters, Vol.8, No.12, pages 1227-1230, December 1981.*

Έχοντας στη διάθεσή του όλες τις προηγούμενες μελέτες έχει δημιουργήσει μια αναλυτική σχέση για τη διακύμανση του όζοντος λαμβάνοντας υπ' όψιν του όλες τις γνωστές παραμέτρους. Καταλήγει ότι η συνολική επίδραση στο όζον για την περίοδο 1970-1979 λόγω των πυρηνικών δοκιμών, για το Βόρειο ημισφαίριο εκτιμάται σε (3.258 ± 1.570)%, ενώ συνολικά στην υδρόγειο οι μειώσεις του όζοντος για τις δοκιμές των αρχών του '60 (0,79 ± 1,30)% και για την περίοδο '70-79 (0,488±1,354)%. Αναφέρει όμως ότι δεν «αποδυνκνύεται» ότι η μείωση οφείλεται αποκλειστικά στις πυρηνικές δοκιμές λόγω της πολύπλοκης ταυτόχρονης επίδρασης και άλλων παραγόντων.

23. *National Research Council «The Effects on the Atmosphere of a Major Nuclear Exchange» Committee on the Atmospheric Effects of Nuclear Explosions, NATIONAL ACADEMY PRESS Washington, D.C. 1985.*

Η μελέτη που έγινε εξετάζει δυο σενάρια παγκοσμίου πολέμου μεταξύ ΗΠΑ και της τότε Σοβιετικής Ένωσης, με χρήση πυρηνικών όπλων. Εκτιμάται μέση μείωση 17% για το Βόρειο ημισφαίριο ένα χρόνο μετά την πολεμική σύραξη των 6.500 Mt. Για σενάριο 8.500 Mt, επειδή περιλαμβάνει μεγαλύτερης ισχύος βόμβες, τα NO_x θα φτάσουν ψηλότερα μέσα στη στρατόσφαιρα, οπότε 8 μήνες μετά θα έχουμε μείωση 43% από το οποίο θα ανακάμψει το 50%, 4 χρόνια μετά.

24. *M. Mills, O. Toon, R. Turco, D. Kinnison, and R. Garcia «Massive global ozone loss predicted following regional nuclear conflict», PNAS April 8, 2008, vol. 105 no. 14*

Είναι η πιο σύγχρονη έρευνα (2008). Θεωρούν δεδομένη την επίδραση των NO_x και εισάγουν για πρώτη φορά ένα νέο αίτιο καταστροφής του όζοντος, τον καπνό που παράγεται από τις πυρκαϊές λόγω ενός πυρηνικού πολέμου. Καθώς ανέρχεται ο καπνός

στην ατμόσφαιρα και εξαπλώνεται, συγκρατεί την ηλιακή ακτινοβολία και θερμαίνει τη στρατόσφαιρα με αποτέλεσμα την επιτάχυνση των φωτοχημικών καταλυτικών αντιδράσεων που καταστρέφουν το όζον. Με τη βοήθεια ενός χημικού-κλιματικού τριδιάστατου μοντέλου, υπολογίζουν την επίδραση στο όζον μιας υποθετικής σύραξης με 100 βόμβες μεγέθους Χιροσίμας (15 Kt) στην περιοχή Ινδίας-Πακιστάν. Καταλήγουν σε 20% παγκόσμια μείωση της στήλης όζοντος και ειδικά στα μέσα γεωγραφικά πλάτη 20-25% ενώ στα Βόρεια πλάτη 50-70% για τα πρώτα 5 χρόνια, ενώ και για τα επόμενα 3 χρόνια η στήλη όζοντος θα συνεχίσει να είναι <220 dobson.

Βιβλιογραφία – Αναφορές

- 1a. «Αθηνά», Ελληνικό κέντρο ελέγχου όπλων, <http://ekeo.gr>
- 1b. K.Tsipis, Arsenal, «Understanding weapons in the nuclear age», Simon &Schuster, 1983.
- 1c. S.Glasstone & P.Dolan, «The effects of nuclear weapons», US Department of Defence 1977
1. Harold Johnston, «The Effect of Supersonic Transport Planes on the stratospheric Ozone Shield», *Envtl. Aff. L. Rev.* 736 (1972)
2. Foley & Ruderman, «Stratospheric NO Production from Past Nuclear Explosions» *Journal of Geophysical Research*, July 20,1973
3. H. Johnston, G. Whiten, J. Birks, «Effects of Nuclear Explosions on Stratospheric Nitric Oxide & Ozone», *Journal of Geophysical Research*, September 20,1973
4. Goldsmith, Tuck, Foot, Simmons, Newson, «Nitrogen oxides, Nuclear weapon testing, Concorde and Stratospheric Ozone», *Nature* Vol.244, August 31, 1973
5. Forest Gilmore, «the production of Nitrogen Oxides by Low-altitude Nuclear Explosions», *Journal of Geophysical Research*, November 20, 1975.
6. Ernst Bauer, Forest Gilmore, «Effect of Atmospheric Nuclear Explosions on Total Ozone», *Reviews of Geophysics and Space Physics*, August 1975.
7. A. D. Christie, «Atmospheric Ozone Depletion by Nuclear Weapons Testing» *Journal of Geophysical Research*, May 20, 1976.
8. Harold Johnston, «Expected Short-term Local Effect of Nuclear Bombs on Stratospheric Ozone», *Journal of Geophysical Research*, July 20, 1977.
9. J. Chang, W. Duewer, D. Wuebbles, «The Atmospheric Nuclear Tests, of the 1950's and 1960's a Possible Test of Ozone Depletion Theories», *Journal of Geophysical Research*, April 20, 1979.
10. G. Reinsel, «Analysis of the Total Ozone Data for the Detection of Recent Trends and the effect of Nuclear Testing During the 1960's», *Geophysical Research Letters*, Vol.8, No.12, pages 1227-1230, December 1981.
11. National Research Council «The Effects on the Atmosphere of a Major Nuclear Exchange» Committee on the Atmospheric Effects of Nuclear Explosions, NATIONAL ACADEMY PRESS Washington, D.C. 1985.
12. M. Mills, O. Toon, R. Turco, D. Kinnison, and R. Garcia «Massive global ozone loss predicted following regional nuclear conflict», *PNAS* April 8, 2008, vol. 105 no. 14

4ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας θα προσπαθήσουμε να κάνουμε μερικούς υπολογισμούς για τους ρυπούς NOx που παραγονται και φτάνουν στη στρατοσφαιρα απο μια πυρηνική δοκιμή. Τα NOx αυτα όπως ειδαμε, είναι υπευθυνα για την καταλυτική καταστροφη του οζοντος. Στους υπολογισμους αυτους θα αρκεστουμε μονο στον προσδιορισμο της ποσοτητας NOx και όχι του οζοντος που καταστρέφεται, επειδη η ποσοτητα οζοντος που μπορεί να καταστρέψει μια συγκεκριμένη ποσότητα NOx δεν μπορεί να υπολογιστει με απλό τροπο, λογω της πολυπλοκοτητας του φαινομένου, οπως εχουμε εκτενωσ αναλύσει στο 3^ο μέρος της εργασιας.

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιηθηκαν οι εξής παραδοχές.

4.1 Παραδοχές

4.1.1 Πυρινη σφαιρα

Χρησιμοποιούμε τους τυπους των Folley-Ruderman που έχουμε ήδη παρουσιάσει στο 3^ο μέρος της εργασιας {9, Chang at Al}

Cloud Top $CT=21.64xY^{0.2}$ (Km)

Cloud Bottom $CB=13.14xY^{0.2}$ (Km)

4.1.2 Ζώνη Οζοντος

Η ζωνη οζοντος εχει διαφορετικό ελάχιστο και μέγιστο ύψος αναλόγως του Γεωγραφικού Πλάτους.

Το προφίλ του οζοντος για 9^ο και 71^ο φαίνεται στο επομενο σχήμα {6, Bauer & Gillmore, Figure-2}

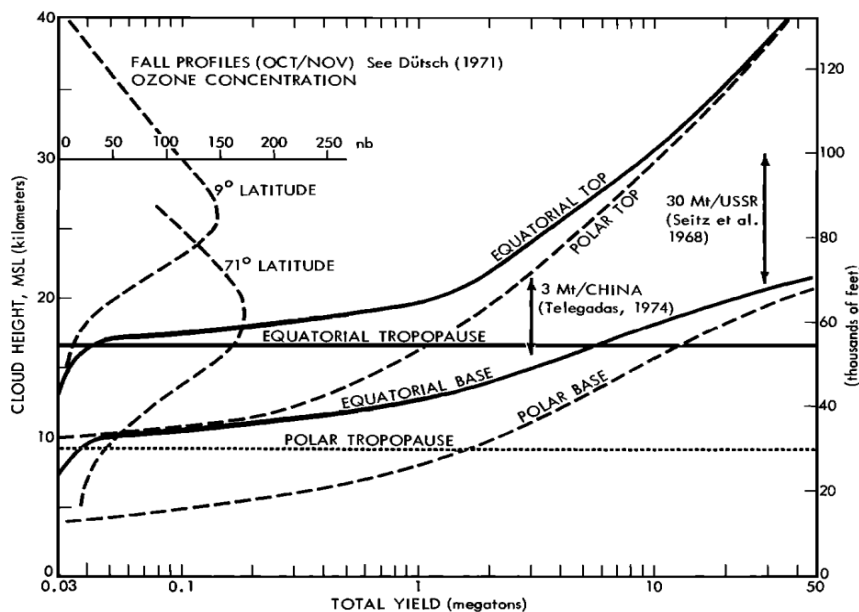


Fig. 2. Fireball rise height as a function of yield [from Peterson, 1970] compared with the ambient ozone profile [from Dütsch, 1971] for both equatorial and polar conditions. For the nuclear cloud an 'equatorial' refers to 0°–30° latitude; 'polar' refers to 30°–90°. Peterson's polar estimates of cloud rise appear to be too high, as judged by radioisotopic measurements of Soviet tests: see, in particular, the results of Seitz et al. [1968] for a 30-Mt test. The results of Telegadas [1974] for Chinese mid-latitude 3-Mt tests are also shown.

Το προφίλ του όζοντος για 45⁰ φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί {3, Johnson, White, Birks, Figure 1}

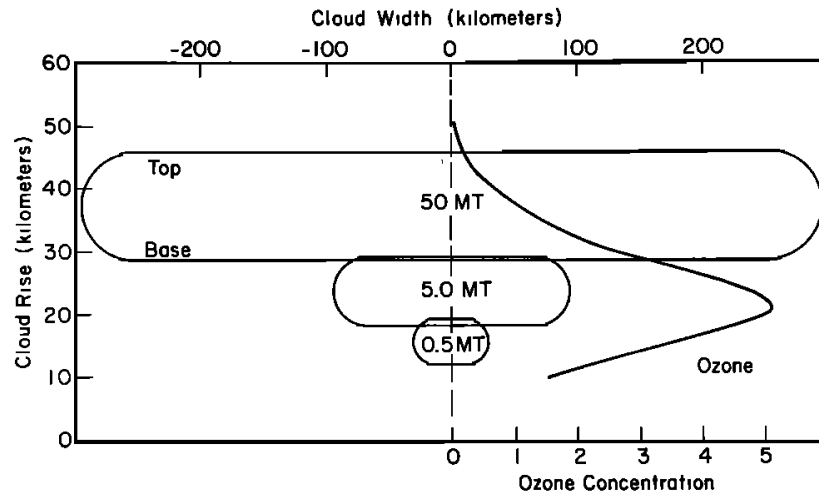
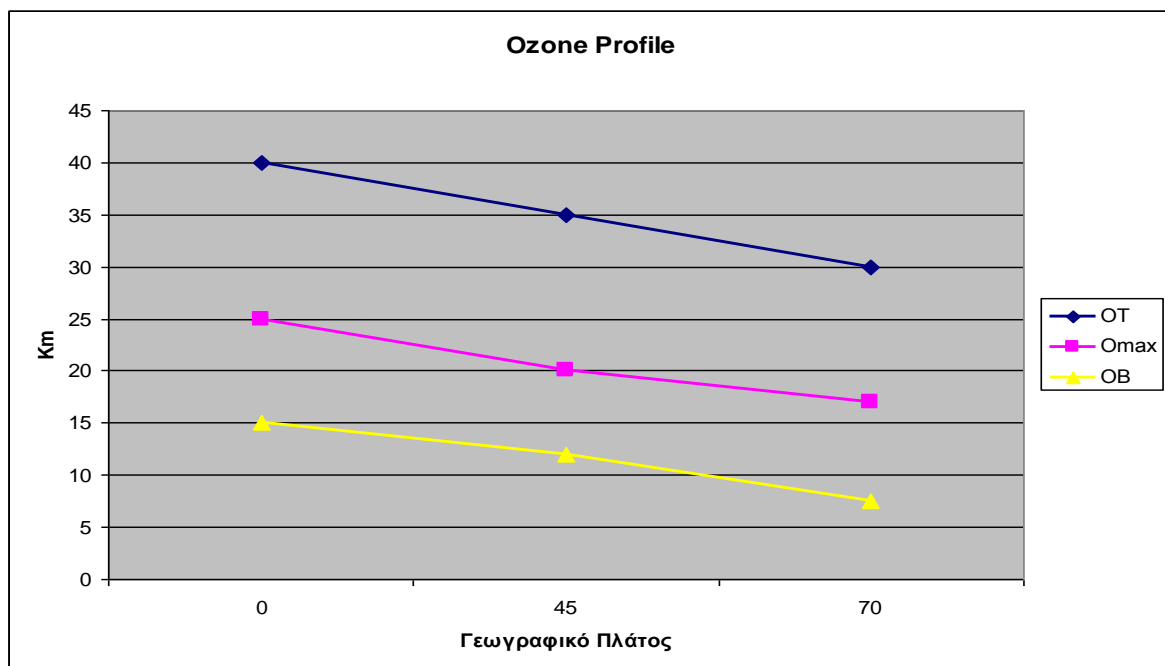


Fig. 1. Elevation and dimension of nuclear bomb clouds 30 min after detonation according to formulas by Foley and Ruderman. A standard ozone profile at 45° latitude is shown.

Για διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη συγκεντρώσαμε και χρησιμοποιούμε τις τιμές του πιο κάτω πίνακα:

Γεωγραφικό Πλάτος	Ozone Top OT	Ozone Bottom OB	Ozone Max OM	Βιβλιογραφική πηγή
0 ⁰	40 km	15 km	25 km	Bauer & Gillmore, figure 2
45 ⁰	35 km	12 km	20 km	Johnson, White, Birks, Figure 1
70 ⁰	30 km	7.5 km	17.5 km	Bauer & Gillmore , figure 2



4.1.3 Ποσότητα παραγόμενων NOx

Για τον υπολόγισμό της ποσότητας των παραγόμενων NOx, από μια πυρηνική δοκιμή ισχύος Y(Mt) χρησιμοποιήθηκε η σχέση από τον ακόλουθο πίνακα {9, Chang et Al}

$$\text{NO}_x = 0.67 \times 10^{32} \times Y \text{ Μόρια/Mt}$$

TABLE 1. Estimates of NO Yield per Megaton

	10 ³² Molecules/Mt
<i>Zeldovich and Raizur</i> [1967]	0.5
<i>Foley and Ruderman</i> [1972]	0.3–1.5
<i>Johnston et al.</i> [1973]	0.17–1.0
<i>Chang and Duerer</i> [1973]	0.5
<i>Goldsmith et al.</i> [1973]	1.0
<i>Gilmore</i> [1975]	0.4–1.5 (0.9)
<i>COMESA</i> [1975] (Goldsmith et al.)	0.6–1.1 (0.84)
<i>CMOESA</i> [1975] after allowance for disentrainment	0.5–0.9 (0.67)
This work	0.67

4.2 Υπολογισμος ποσοτητας NOx που φτάνει στην στρατόσφαιρα

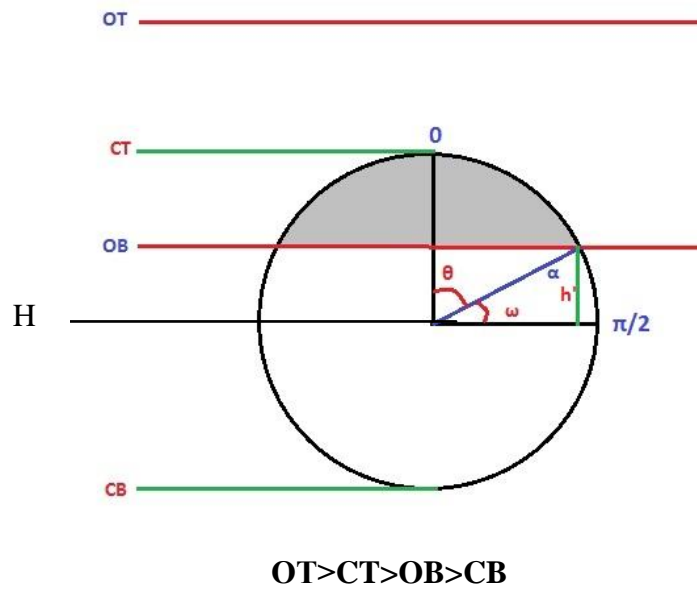
Στην ενότητα αυτη θα ξεκινήσουμε τους υπολογισμους για να υπολογισουμε την ποσότητα NOx που καταλήγει απο μια πυρηνική έκρηξη στη στρατόσφαιρα.

Ο συνδυασμός του υψους που φτάνει η πύρινη σφαίρα, του υψους της τροπόπαυσης και του πάχους της ζώνης όζοντος μας καθορίζουν τις ποσότητες NOx που τελικά καταλήγουν στη στρατόσφαιρα και αντιδρουν με το όζον καταστρέφοντάς το.

Στους υπολογισμούς που κάνουμε διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις:

4.2.1 Περίπτωση – Α

Ένα μέρος του νέφους έχει εισέλθει στη στρατόσφαιρα (διαγραμμισμένη περιοχή)



Ο όγκος μιας σφαίρας σε σφαιρικές συντεταγμένες είναι:

$$V = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{r=0}^{\alpha} r^2 \sin\theta dr d\theta d\varphi$$

Η ακτίνα της σφαίρας είναι: $\alpha = \frac{CT-CB}{2}$

Το κέντρο της σφαίρας βρίσκεται στο $HO = \frac{CT+CB}{2}$

Η γωνία θ καθορίζει τον όγκο της σφαίρας που έχει εισέλθει στη στρατόσφαιρα:

$$V = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta} \int_{r=0}^{\alpha} r^2 \sin\theta dr d\theta d\varphi$$

Η γωνία θ καθορίζεται σε σχέση με το υψος (h):

$$h = OB - HO$$

$$\alpha \cdot \cos\theta = h$$

Η γωνία θ ισούται: $\theta = \arccos(h/\alpha) = \arccos \frac{OB-HO}{\alpha} = \arccos \frac{OB - \frac{CT+CB}{2}}{\frac{CT-CB}{2}}$

Άρα το 2^ο ολοκλήρωμα έχει διάστημα ολοκλήρωσης $[0, \theta] = [0, \arccos \frac{OB - \frac{CT+CB}{2}}{\frac{CT-CB}{2}}]$

4.2.2 Περίπτωση – Β

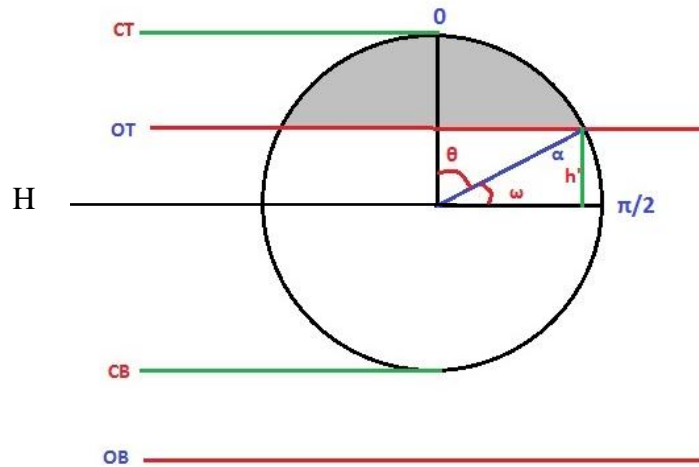
Ολη η σφαίρα βρίσκεται εντός της ζώνης του όζοντος

$$OT > CT \text{ και } CB > OB$$

Τότε ο όγκος της σφαίρας είναι $V = \frac{4}{3} \pi \alpha^3$

4.2.3 Περίπτωση – Γ

Ενα τμήμα της σφαίρας έχει υπερβεί το άνω μέρος της στρατόσφαιρας (διαγραμμισμένη περιοχή) οπότε το υπόλοιπο τμήμα της βρίσκεται εντός της ζώνης του όζοντος.



$$CT > OT > CB > OB$$

οπως εργαστηκαμε και πριν, η γωνία θ καθοριζει τον όγκο της σφαιρας που βρισκεται εντός της στρατόσφαιρας:

$$V = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta}^{\pi} \int_{r=0}^{\alpha} r^2 \sin\theta dr d\theta d\varphi$$

Η γωνία θ καθοριζεται σε σχεση με το υψος (h):

$$h = OT - H_0$$

$$\alpha \cdot \cos\theta = h$$

Η γωνία θ ισούται: $\theta = \arccos(h/a) = \arccos \frac{OT - H_0}{\alpha} = \arccos \frac{OT - \frac{CT+CB}{2}}{\frac{CT-CB}{2}}$

Αρα το 2^ο ολοκλήρωμα έχει διάστημα ολοκλήρωσης $[\theta, \pi] = \left[\arccos \frac{OT - \frac{CT+CB}{2}}{\frac{CT-CB}{2}}, \pi \right]$

4.2.4 Περίπτωση – Δ

Το κάτω τμήμα της πύρινης σφαίρας να είναι εντός της τροπόσφαιρας, ενώ το άνω τμήμα να έχει υπερβεί την στρατόσφαιρα.

$$CT > OT \text{ και } CB < OB$$

Αυτή η περίπτωση δεν υπάρχει στην πράξη για καμία τιμή εκρηκτικής ισχύος (Y) σε συνδυασμό με το πάχος της στρατόσφαιρας για διάφορα γεωγραφικά πλάτη ($0 - 90^0$).

4.2.5 Η αναλυτική επίλυση του τριπλού ολοκληρώματος για τον υπολογισμό του όγκου είναι:

$$V = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=\theta_1}^{\theta_2} \int_{r=0}^{\alpha} r^2 \sin\theta dr d\theta d\varphi =$$

$$\int_{\varphi=0}^{2\pi} d\varphi \int_{\theta=\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta \int_{r=0}^{\alpha} r^2 dr =$$

$$2\pi [-(\cos\theta_2 - \cos\theta_1)] \frac{\alpha^3}{3} \Rightarrow$$

$$V = \frac{2}{3} \pi \alpha^3 (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)$$

4.3 Περιγραφή του Προγράμματος υπολογισμού (NOx Calculator)

Το πρόγραμμα *NOx Calculator* έχει γραφτεί σε Visual Basic V-4

Η Visual basic είναι γλώσσα αντικειμενοστραφής (object oriented) και ο κώδικας είναι διάσπαρτος στα διάφορα αντικείμενα που ενσωματώνουμε στο πρόγραμμα.

Η λίστα εντολών που παρουσιάζουμε εδώ είναι ο κύριος κορμός του προγράμματος που εκτελεί τους υπολογισμούς.

Private Sub Command1_Click()

· Διαβάζει την ισχύ της έκρηξης (Y)

Y\$ = Val(Text1.Text)

· Επιλογή Γεωγραφικού πλάτους της έκρηξης (0⁰, 45⁰ και 70⁰ N)

· και καθορισμός υψους που αρχίζει και τελειώνει η στρατόσφαιρα

· Ob = ozone bottom

· Ot = ozone top

If Option1.Value = True Then

Ob = 15

Ot = 40

End If

If Option2.Value = True Then

Ob = 12

Ot = 35

End If

If Option3.Value = True Then

Ob = 7.5

Ot = 30

End If

· Εκτύπωση του υψους που αρχίζει και τελειώνει η στρατόσφαιρα

Text6.Text = Val(Ob)

Text7.Text = Val(Ot)

· Υπολογισμός ανώ και κάτω υψους της πύρινης σφαίρας

· Ct= Cloud top

· Cb= Cloud bottom

Ct = 21.64 * Y\$ ^ 0.2

Cb = 13.41 * Y\$ ^ 0.2

Text2.Text = CDbI(Ct)

text3.Text = CDbI(Cb)

· Υπολογισμός αριθμού μορίων NOx που παράγονται

Nno = Y\$ * 0.67 * 10 ^ 32

Text4.Text = CDbI(Nno)

· Υπολογισμός ακτινας πύρινης σφαίρας (α)

a = (Ct - Cb) / 2

· Υπολογισμός υψους του κέντρου της σφαίρας (Ho)

Ho = (Ct + Cb) / 2

‘Συνολικός όγκος πύρινης σφαίρας

$$\pi = 3.1415$$

$$V_{tot} = 4 / 3 * \pi * a ^ 3$$

‘ Περίπτωση -A

‘ Οι γωνίες θ_1 και θ_2 συμβολίζονται με t_1, t_2

If $O_t > C_t$ Then

If $C_t > O_b$ Then

If $O_b > C_b$ Then

$$h = O_b - H_o$$

$$X = h / a$$

$$t_1 = 0$$

$$t_2 = \text{Atn}(-X / \text{Sqr}(-X * X + 1)) + 2 * \text{Atn}(1)$$

‘αυτη η συναρτηση υποκαθιστα την arc-cosine στη Visual Basic

End If

End If

End If

‘ Περίπτωση -B

If $O_t > C_t$ Then

If $C_b > O_b$ Then

$$t_1 = 0$$

$$t_2 = \pi$$

End If

End If

‘ Περίπτωση -Γ

If $C_t > O_t$ Then

If $O_t > C_b$ Then

If $C_b > O_b$ Then

$$h = O_t - H_o$$

$$X = h / a$$

$$t_1 = \text{Atn}(-X / \text{Sqr}(-X * X + 1)) + 2 * \text{Atn}(1)$$

$$t_2 = \pi$$

End If

End If

End If

‘ Υπολογισμός όγκου σφαίρας που βρίσκεται εντός της στρατόσφαιρας (V_{in})

$$V_{in} = 2 / 3 * \pi * a ^ 3 * (\text{Cos}(t_1) - \text{Cos}(t_2))$$

‘ αναλογια ογκων (V_{in} / V_{tot}) για τον υπολογισμο των NO_x εντος της στρατόσφαιρας

$$S_p = V_{in} / V_{tot}$$

‘ υπολογισμος NO_x εντος στρατόσφαιρας και εκτυπωση

$$S_{no} = S_p * N_{no}$$

$$\text{Text5.Text} = \text{CSng}(S_{no})$$

End Sub

4.4 Αποτελέσματα και πίνακες πυρηνικών δοκιμών

Με τη χρήση του προγράμματος NOx Calculator κάναμε υπολογισμούς για πυρηνικές δοκιμές διαφορετικής ισχύος και υπολογίσαμε τα παραγόμενα NOx καθώς και τα NOx που καταλήγουν στη Στρατόσφαιρα. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον Πίνακα 4.1

Πίνακας 4.1 Παραγόμενοι ρύποι NOx από πυρηνικές Δοκιμές

Ισχύς Εκρηξεως	Γεωγραφική Περιοχή	Παραγόμενα NOx	NOx που καταλήγουν στη Στρατόσφαιρα
10 Kt	Τροπική Ζώνη 0 ⁰ -30 ⁰	6.7x10 ²⁹	0
	Ευκρατη Ζωνη 30 ⁰ -60 ⁰	6.7x10 ²⁹	0
	Πολικη Ζωνη 60 ⁰ -90 ⁰	6.7x10 ²⁹	2.28x10 ²⁹
100 Kt	Τροπική Ζώνη 0 ⁰ -30 ⁰	6.7x10 ³⁰	0
	Ευκρατη Ζωνη 30 ⁰ -60 ⁰	6.7x10 ³⁰	2.13x10 ³⁰
	Πολικη Ζωνη 60 ⁰ -90 ⁰	6.7x10 ³⁰	6.7x10 ³⁰
1 Mt	Τροπική Ζώνη 0 ⁰ -30 ⁰	6.7x10 ³¹	5.4x10 ³¹
	Ευκρατη Ζωνη 30 ⁰ -60 ⁰	6.7x10 ³¹	6.7x10 ³¹
	Πολικη Ζωνη 60 ⁰ -90 ⁰	6.7x10 ³¹	6.7x10 ³¹
10 Mt	Τροπική Ζώνη 0 ⁰ -30 ⁰	6.7x10 ³²	6.7x10 ³²
	Ευκρατη Ζωνη 30 ⁰ -60 ⁰	6.7x10 ³²	6.7x10 ³²
	Πολικη Ζωνη 60 ⁰ -90 ⁰	6.7x10 ³²	4.49x10 ³²

Παρατηρούμε ότι αν η ισχύς μια έκρηξης είναι μικρή < 10 Kt τότε στην Τροπική ζώνη δεν φτάνουν ρύποι στη Στρατόσφαιρα ενώ στην Πολική φτάνουν πολύ λίγοι.

Αντίθετα εάν η έκρηξη είναι πολύ μεγάλης ισχύος >10Mt, τότε στην Τροπική Ζώνη όλοι οι ρύποι καταλήγουν στη Στρατόσφαιρα ενώ στην Πολική Ζώνη ένα μέρος του νέφους ξεπερνά το υψος της Στρατόσφαιρας με αποτέλεσμα ένα μέρος των ρύπων να βγαίνει εκτός της ζώνης του όζοντος και να μην το επηρεάζει.

Τη δυσμενέστερη επίδραση για το όζον έχουν οι μέσες προς μεγάλες εκρήξεις (800 Kt- 2Mt) που στέλνουν σχεδόν όλο το παραγόμενο NOx στη στρατόσφαιρα.

Στη συνέχεια θα παραθέσουμε πίνακες από τις μέχρι σήμερα δοκιμές που έγιναν από τις χώρες που διαθέτουν πυρηνικά όπλα.

Από τους πίνακες πυρηνικών δοκιμών που έγιναν μέχρι σήμερα δημιουργήσαμε έναν πίνακα με σκοπό να δούμε πόσοι ήταν οι συνολικοί ρύποι NO_x που κατέληξαν στη στρατόσφαιρα με αποτέλεσμα να επηρεάσουν το όζον.

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα που κατασκευάσαμε (*NO_x Calculator*)

Τα κριτηρια που κάναμε το διαχωρισμό είναι τα εξής:

- Κατ' αρχήν διαχωρίσαμε τις ατμοσφαιρικές δοκιμές από τις υπόγειες, τις υποθαλάσσιες και τις εξωατμοσφαιρικές δεδομένου ότι μόνο οι ατμοσφαιρικές στέλνουν ρύπους NO_x στη στρατόσφαιρα.
- Από τις ατμοσφαιρικές δοκιμές κρατήσαμε μόνο αυτές που τα παραγόμενα NO_x καταλήγουν στη στρατόσφαιρα. Η επιλογή αυτή έγινε με κριτήριο τη γεωγραφική περιοχή της δοκιμής (Γεωγραφικό Πλάτος) και την εκρηκτική ισχύ της δοκιμής. Έτσι π.χ. απορίφθηκαν δοκιμές <20Kt στην Αρκτική και <200 Kt στον Ισημερινό. Συμπεριλήφθηκαν όμως δοκιμές που ενώ είχαν κατώτερη ισχύ από τις προαναφερθείσες, έγιναν σε μεγάλα ύψη π.χ. 2~5km και συνεπώς προσθετικά είχαν τη δυνατότητα να στείλουν ρύπους στη στρατόσφαιρα.

Για παράδειγμα μια εκρηξη 100Kt στον Ισημερινό, φτάνει το άνω σημείο του νέφους στα 13,65km ενώ η στρατόσφαιρα ξεκινάει από τα 15Km. Αν όμως η δοκιμή αυτή γίνει στα 5Km τότε φτάνει στα 18,5 km άρα ένα μέρος της εντός της στρατόσφαιρας.

Πίνακας 4.2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα με τη χρήση του προγράμματος *NO_x Calculator*

Χώρα	Συνολική Ισχύς (Mt)	Παραγόμενα μόρια NO _x
USA	124.1	8,315x10 ³³
USSR	250.4	1,678x10 ³⁴
U.K.	8.02	5,373x10 ³²
France	4.67	3,129x10 ³²
China	21.5	1,44x10 ³³
ΣΥΝΟΛΟ	408.67	2,738x10³⁴

Από τον πίνακα 4.2, παρατηρούμε ότι από τις συνολικές ατμοσφαιρικές δοκιμές που έχουν γίνει μέχρι σήμερα έχουν καταλήξει στη στρατόσφαιρα περίπου 2.738x10³⁴ μόρια NO_x.

Αυτά είναι υπεύθυνα για την καταλυτική καταστροφή του όζοντος που έχει εκτιμηθεί από διάφορους ερευνητές σε 1%-6%.

USA TESTS

Bicini- Enewatec 10⁰ N

Christmas Island 2⁰ N

Operation	Test	Site	Date	Yield (Mt)
Ivy 1952	IVY MIKE	Enewatac	November 1	10.4
Castle 1954	BRAVO	Bicini- Enewatac	March 1	15
	ROMEO	Bicini- Enewatac	March 27	11
	NECTAR	Bicini- Enewatac	May 14	1.69
	UNION	Bicini- Enewatac	April 26	6.9
	YANKEE	Bicini- Enewatac	May 5	13.5
Redwing 1956	CHEROKEE	Bicini- Enewatac	May 21	3.8
	ZUNI	Bicini- Enewatac	May 28	3.5
	DAKOTA	Bicini- Enewatac	June 26	1.1
	APACHE	Bicini- Enewatac	July 9	1.85
	NAVAJO	Bicini- Enewatac	July 11	4.5
	TEWA	Bicini- Enewatac	July 21	5
Hardtack I 1958	FIR	Johnston Island	May 12	1.36
	KOA	Johnston Island	May 13	1.37
	WALNUT	Johnston Island	June 15	1.45
	POPLAR	Johnston Island	July 12	9.3
	PINE	Johnston Island	July 27	2
Dominic I 1962	ARKANSAS	Christmas Island	May 2	1.09
	YESO	Christmas Island	June 10	3
	HARLEM	Christmas Island	June 12	1.2
	BIGHORN	Christmas Island	June 27	7.65
	BLUESTONE	Christmas Island	June 30	1.27
	STARFISH PRIME	Christmas Island	July 8	1.4
	SUNSET	Christmas Island	July 10	1
	PAMLICO	Christmas Island	July 11	3.88
	CHAMA	Christmas Island	October 18	1.59
	HOUSATONIC	Christmas Island	October 30	8.3
			ΣΥΝΟΛΟ	124.1 Mt

SOVIET TESTS

Semipalatinsk 50° N
Novaya Zemlya 73° N

Operation	Test	Site	Date	Yield (Mt)
1955	Binarnaya (Joe-19)	Semipalatinsk	November 22	1.6
1956		Semipalatinsk	August 30	0.9
1956		Semipalatinsk	November 17	0.9
1957		Novaya Zemlya	September 24	1.6
1957		Novaya Zemlya	October 6	2.9
1958		Novaya Zemlya	February 27	1.5
1958		Novaya Zemlya	September 30	1.2
1958		Novaya Zemlya	September 30	0.9
1958		Novaya Zemlya	October 12	1.45
1958		Novaya Zemlya	October 15	1.5
1958		Novaya Zemlya	October 18	2.9
1958		Novaya Zemlya	October 22	2.8
1958		Novaya Zemlya	October 24	1
1961		Novaya Zemlya	September 10	2.7
1961		Novaya Zemlya	September 12	1.15
1961		Novaya Zemlya	September 14	1.2
1961		Novaya Zemlya	September 16	.83
1961		Novaya Zemlya	September 18	1
1961		Novaya Zemlya	September 20	1.5
1961		Novaya Zemlya	October 4	3
1961		Novaya Zemlya	October 6	4
1961	Raduga	Novaya Zemlya	October 20	1.45
1961		Novaya Zemlya	October 23	12.5
1961	Tsar	Novaya Zemlya	October 30	57
1961		Novaya Zemlya	October 31	5
1961		Novaya Zemlya	November 4	1.5
1962		Novaya Zemlya	August 5	21.1
1962		Novaya Zemlya	August 20	2.8
1962		Novaya Zemlya	August 22	1.6
1962		Novaya Zemlya	August 25	10
1962		Novaya Zemlya	August 27	4.2
1962	Tyulpan	Novaya Zemlya	September 8	1.9
1962		Novaya Zemlya	September 15	3.1
1962		Novaya Zemlya	September 16	3.25
1962		Novaya Zemlya	September 18	1.35
1962		Novaya Zemlya	September 19	10
1962		Novaya Zemlya	September 21	2.4
1962		Novaya Zemlya	September 25	19.1
1962		Novaya Zemlya	September 27	20
1962		Novaya Zemlya	October 22	8.2
1962	Test 219	Novaya Zemlya	December 24	24.2
1962		Novaya Zemlya	December 25	3.1
			ΣΥΝΟΛΟ	250.4 Mt

BRITISH TESTS

Christmas Island 2° N

Malden Island 4° S

Operation	Test	Site	Date	Yield (Mt)
Grapple X 1957		Christmas Island	November 8	1.8
	Orange Herald	Malden Island	May 31	.72
Grapple Y 1958		Christmas Island	April 28	3
Grapple Z 1958	Flagpole	Christmas Island	August 22	1.2
	Halliard	Christmas Island	September 11	0.8
Granite 1957	Short	Malden Island	May 15	0.3
	Purple	Malden Island	June 19	0.2
			ΣΥΝΟΛΟ	8.02 Mt

FRENCH TESTS

Fangataufa 22° S

Algeria 26° N

Operation	Test	Site	Date	Yield (Mt)
Gebroise bleue 1960		Algeria	February 13	.07
Canopus 1962		Fangataufa	August 24	2.6
Lincorne 1970		Fangataufa	July 4	2
			ΣΥΝΟΛΟ	4.67 Mt

CHINA TESTS

Lop Nur 40° N

Operation	Test	Site	Date	Yield (Mt)
1966	No-3	Lop Nur	May 9	0.3
1966	No-5	Lop Nur	December 28	0.5
1967	No-6	Lop Nur	June 17	3.3
1968	No-8	Lop Nur	December 27	3
1969	No-10	Lop Nur	September 29	3
1970	No-11	Lop Nur	October 14	3
1972	No-14	Lop Nur	March 18	0.2
1973	No-15	Lop Nur	June 27	2
1974	No-16	Lop Nur	June 17	1
1976	No-19	Lop Nur	September 26	0.2
1976	No-21	Lop Nur	November 17	4
1980	No-27	Lop Nur	October 16	1
			ΣΥΝΟΛΟ	21.5 Mt

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα ανάλυση που κάναμε, αναδεικνύεται η πολυπλοκότητα υπολογισμού του πόσο οι πυρηνικές δοκιμές έχουν επηρεάσει το όζον της στρατοσφαιρας.

Ο κύριος λόγος είναι ότι κατά τη διάρκεια των μεγάλων δοκιμών δεν υπήρχε πλήρες και εκτενές δίκτυο ανιχνευτών Dobson σε όλη την επιφάνεια της γης και αντιστοίχα οι δορυφορικές μετρήσεις δεν καλύπταν όλη την υδρόγειο, με αποτέλεσμα μικρές ποσοστιαίες μεταβολές να εμπίπτουν στην περιοχή θορύβου των μετρήσεων.

Επιπλέον σε μεγάλης κλίμακας γεωφυσικά φαινόμενα τέτοιου είδους, η πληθώρα των αλληλεπιδράσεων και η πολυπλοκότητα τους δεν επιτρέπουν την εφαρμογή μοντέλων ακριβείας παρα μόνο την χοντρική προσέγγιση μεγίστων και ελαχίστων.

Τέλος δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι η κατάλυση του όζοντος είναι κατ'εξοχήν φωτοχημικό φαινόμενο και για την μελέτη του πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν παραγοντες όπως:

- Η θέση που έγινε η δοκιμή (Γεωγραφικό πλάτος)
- Το ύψος της έκρηξης
- Η ισχύς της έκρηξης
- Η εποχή του έτους
- Η ηλιακή δραστηριότητα (11ετης κύκλος)
- Ταχύτητα και κίνηση των ανέμων στην συγκεκριμένη περιοχή

Τα αποτελέσματα μιας έκρηξης δεν εμφανίζονται αμέσως αλλά υπάρχουν επιδράσεις που μπορεί να εμφανιστούν πολύ αργότερα και πιθανόν σε άλλο σημείο της υδρόγειου γεγονός που κάνει το φαινόμενο μη μετρήσιμο και όχι άμεσα συσχετισίμο με την αρχική έκρηξη.

Επίσης πρέπει λάβουμε υπ'όψιν μας ότι πολλές δοκιμές έγιναν χωρίς να έχουν προηγουμένως ανακοινωθεί δημόσια και φυσικά χωρίς να προηγηθούν μετρήσεις όζοντος ώστε να είναι συγκρίσιμα τα δεδομένα με τις μετρήσεις μετά.

Οι μετρήσεις του όζοντος δεν μπορούν να συσχετιστούν άμεσα με τα οξείδια του αζώτου που φτάνουν στην ατμόσφαιρα λόγω των πυρηνικών δοκιμών.

Δεν πρέπει επίσης να αγνοήσουμε ότι το όζον καταστρέφεται και από άλλες αιτίες, ανθρωπογενείς (κυρίως CFC's) ή φυσικές. Για παράδειγμα οι εκρήξεις ηφαιστειών μπορεί να εκτοξεύσουν υλικά όπως σκόνη σε μεγάλα ύψη και σε συνδιασμό με τις εκτεταμένες ατμοσφαιρικές κινήσεις που προκαλούν μπορεί να επηρεάσουν το όζον της στρατόσφαιρας. Μιά άλλη φυσική αιτία είναι ο 11ετής ηλιακος κύκλος, όπου λόγω των κοσμικών ακτινών οι οποίες εισέρχονται στη γή οδηγούμενες από το μαγνητικό πεδίο των πόλων, ιονίζονται άτομα N_2 και O_2 με αποτέλεσμα να παράγονται NO_x

Ως αποτέλεσμα των προαναφερθέντων από τις μετρήσεις του όζοντος είναι αδύνατο να διαχωριστεί η επίδραση μόνο των NO_x από τις πυρηνικές δοκιμές.

Λογω έλλειψης πλήρους κατανόησης όλων των φυσικών αιτιών μεταβολής του όζοντος δε μπορεί κάποιος οριστικά να συμπεράνει ποιές ήταν οι επιδράσεις στο όζον της ατμόσφαιρας από τις πυρηνικές δοκιμές που έγιναν στο παρελθόν. {11, σελ.117}

Κανονικά μια επιστημονική μελέτη χρησιμοποιεί ένα υπολογιστικό μοντέλο για να προβλέψει αποτελέσματα από μια ανάλυση δεδομένων. Όμως λόγω της αβεβαιότητας του ατμοσφαιρικού συστήματος μόνο ποιοτικά αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν. Οι διαταραχές στη στρατόσφαιρα λόγω των NO_x καθώς και των εκπομπών καπνου που προκαλούνται από πυρηνικές εκρήξεις μεγάλης κλίμακας δε μπορούν να προβλεφθούν με ακρίβεια από τα υπάρχοντα θεωρητικά μοντέλα.

Από τα προηγούμενα είναι καταληπτό ότι η ποσοτικοποίηση με απλούς συλλογισμούς που σχετίζουν την ισχύ μιας έκρηξης με τα παραγομενα NO_x και στη συνέχεια με την ποσότητα

όζοντος που αυτά μπορούν να καταλύσουν, είναι πολύ μακριά από την πραγματικότητα και ελάχιστα προσεγγίζουν την πολυπλοκότητα του φαινομένου.

Υπολογισμοί κάτω από συνθήκες αβεβαιότητας στο πολύπλοκο οικοσύστημα της ατμόσφαιρας δε μπορούν σε καμία περίπτωση να προβλέψουν τα αποτελέσματα με επιστημονική ακρίβεια. Μπορούν όμως να δώσουν μια εκτίμηση της επίδρασης στην ατμόσφαιρα, κατ' αρχήν ποιοτικά και και λιγότερο ποσοτικά των επιδράσεων αυτών.

Συνεπώς μονο ποιοτική προσέγγιση μπορεί να γίνει σε επίπεδο κατανόησης του πόσο ευαίσθητη είναι η γη, σέ όλες αυτές τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες.

Παρ' όλα αυτά, με την παρούσα εργασία και τους υπολογισμούς μας, **επιβεβαιώσαμε** ότι μέχρι σήμερα έχουν καταλήξει στη στρατόσφαιρα **2.74×10^{34} μόρια NO_x**, αριθμός που συμφωνεί με τα μεγέθη των προηγούμενων ερευνών 3×10^{34} {Κεφ.3, αναφορά 2, table 3} και σαν συνολική ποσότητα είναι σημαντική και έχει προκαλέσει απώλεια όζοντος (1-6%) όπως έχουμε ήδη αναφέρει στο Κεφάλαιο-3.

Από τους υπολογισμούς που κάναμε **βρηκαμε** ότι οι περισσότεροι ρύποι στη Στρατόσφαιρα έχουν προκληθεί από τις δοκιμές της Σοβιετικής Ένωσης ($1,678 \times 10^{34}$ μόρια NO_x) και των ΗΠΑ ($8,315 \times 10^{33}$ μόρια NO_x) οι υπόλοιπες «πυρηνικές» χώρες έχουν παράγει πολύ λιγότερες ποσότητες

Επίσης **αποδείξαμε** ότι αν η ισχύς μια έκρηξης είναι μικρή < 10 Kt τότε στην Τροπική Ζώνη δεν φτάνουν ρύποι στη Στρατόσφαιρα ενώ στην Πολική φτάνουν πολύ λίγοι.

Αντίθετα εάν η έκρηξη είναι πολύ μεγάλης ισχύος >10Mt, τότε στην Τροπική Ζώνη όλοι οι ρύποι καταλήγουν στη Στρατόσφαιρα ενώ στην Πολική Ζώνη ένα μέρος του νέφους ξεπερνά το υψος της Στρατόσφαιρας με αποτέλεσμα ένα μέρος των ρύπων να βγαίνει εκτός της ζώνης του όζοντος και να μην το επηρεάζει.

Τη δυσμενέστερη επίδραση για το όζον έχουν οι μέσες προς μεγάλες εκρήξεις (800 Kt- 2Mt) που στέλνουν σχεδόν όλο το παραγόμενο NO_x στη στρατόσφαιρα.

Κλείνοντας, πιστευουμε πως σημερα υπάρχουν ισχυρά υπολογιστικά μοντέλα, σε αντίθεση με τις δυνατότητες των ερευνητών των δεκαετιών '70-80, με τα οποία θα μπορούσε να επανεξεταστεί το θέμα της επίδρασης των NO_x στην καταλυση του όζοντος.

Αναφέραμε στο 3^ο κεφάλαιο {12, Mills et Al} ότι χρησιμοποίησαν για την αναλυση τους συνδυασμό των προγραμμάτων WACCM3 ένα πρόγραμμα για επίλυση χημικών-κλιματικών μοντέλων και το CARMA που είναι ένα 3-διάστατο υπολογιστικό πακέτο φυσικής.

Με τη χρήση λοιπόν τέτοιων συγχρονων υπολογιστικών μοντέλων ίσως αξίζει να γίνει επανεκτίμηση των επιδράσεων των NO_x στο στρατοσφαιρικό όζον.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ακολουθούν όλες οι πυρηνικές δοκιμές που έχουν καταγραφεί για κάθε χώρα.
Για κάθε χώρα υπάρχει:

- μια μικρή περιγραφή των δοκιμών που έχει κάνει,
- η γεωγραφική περιοχή των δοκιμών
- αναλυτικός πίνακας με χρονολογική σειρά των δοκιμών και τα πλήρη στοιχεία τους.

Η πρώτη πυρηνική δοκιμή έγινε το 1945 στην έρημο της Νεβάδας. Εκτοτε έχουν γίνει συνολικά σχεδόν 2,000 δοκιμές. Οι πρώτες δοκιμές έγιναν στην ατμόσφαιρα και στη συνέχεια έγιναν υποθαλάσσιες και στο διάστημα (εξωατμοσφαιρικές).

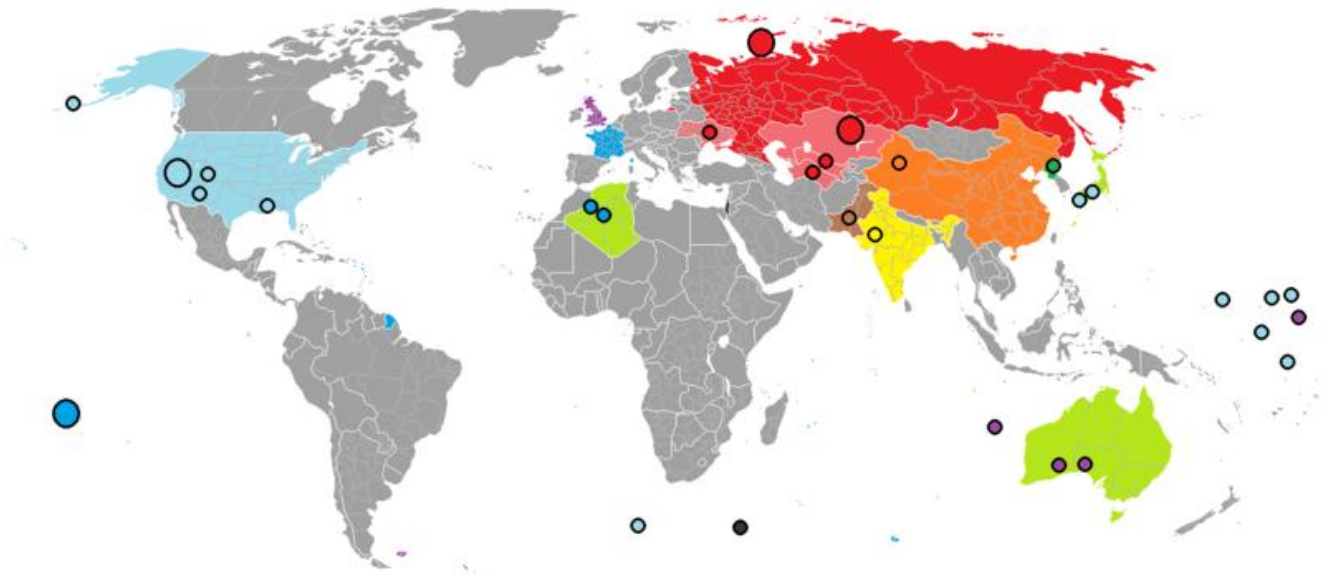
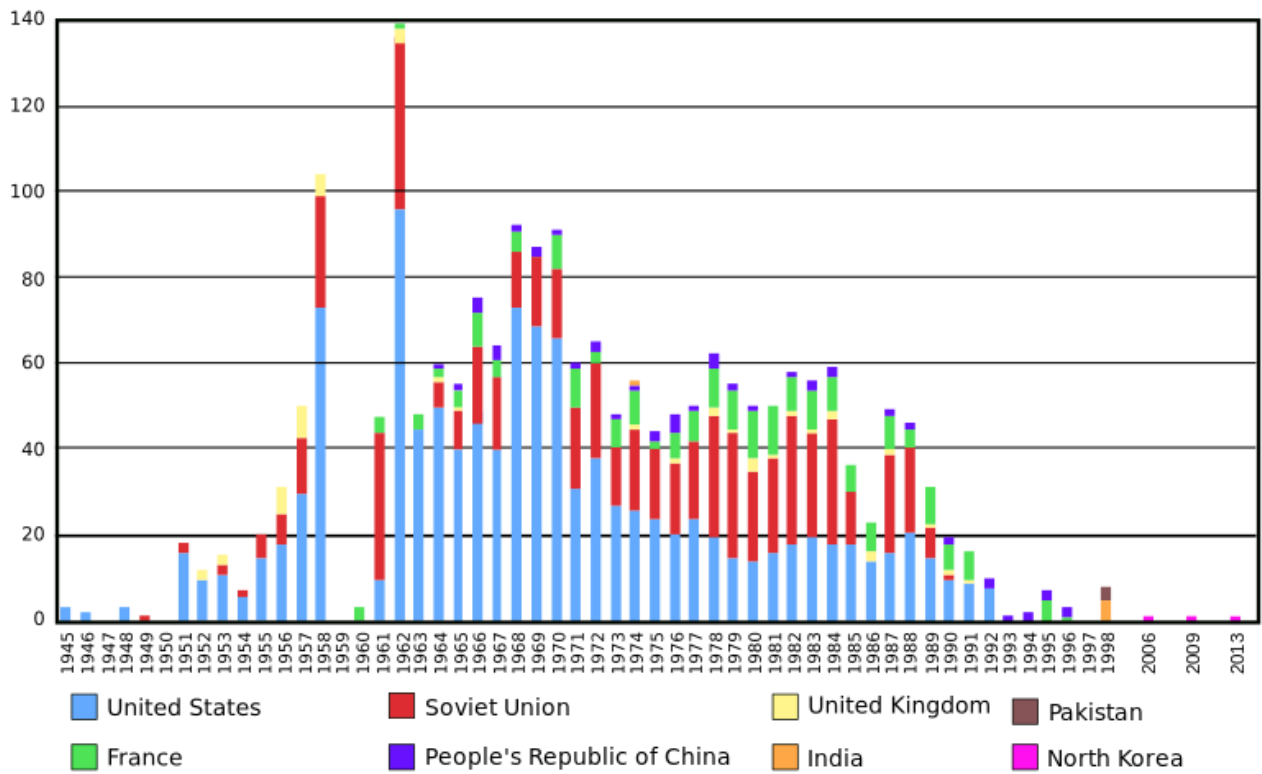
Από το 1963 συμφωνήθηκε απαγόρευση των πυρηνικών δοκιμών στην ατμόσφαιρα, στο διάστημα και υποθαλάσσια, με αποτέλεσμα να συνεχίζονται μόνο υπόγειες πυρηνικές δοκιμές.

Η παρουσίαση έγινε με στοιχεία που έχουν συλλεγεί:

- από την Wikipedia
- A History of the Nuclear Test Personnel Review Program, 1978-1986, by Abby A. Johnson, et al, Defense Nuclear Agency, DNA 6041F, 1986.
- China nuclear Chronology, Nuclear Threat Initiative, www.nti.org.
- Archive of Nuclear Data From NRDC's Nuclear Program
<http://www.nrdc.org/nuclear/>

Nuclear tests by known nuclear countries

Worldwide nuclear testing, 1945 - 2013



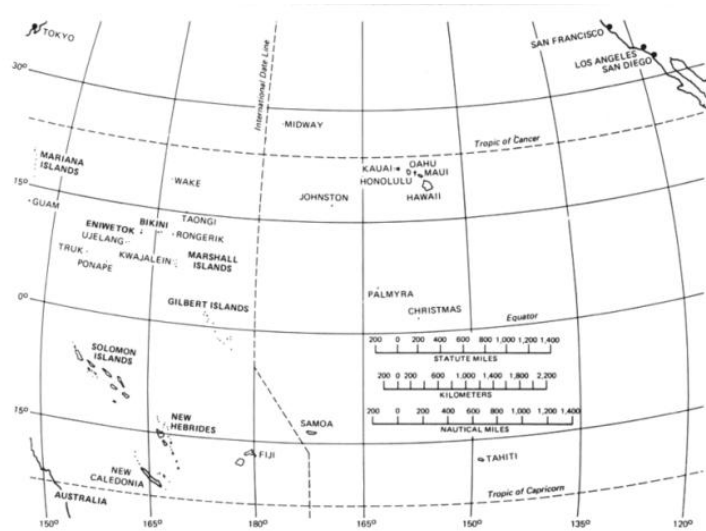
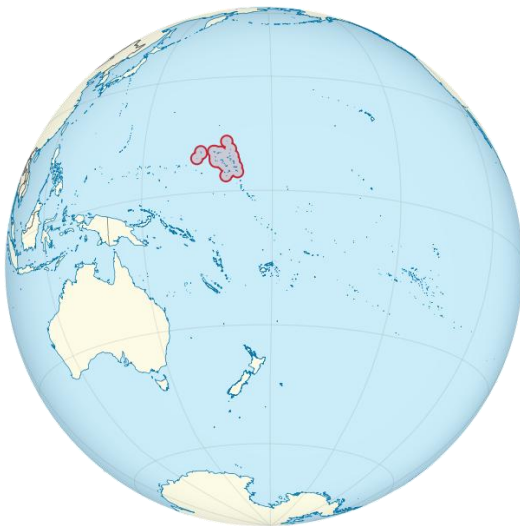
United States of America

The United States conducted around 1,054 nuclear tests (by official count) between 1945 and 1992. Some significant tests conducted by the United States include:

- The "[Trinity](#)" test on 16 July 1945, was the first-ever test of a nuclear weapon (yield of around 20 kt).
- The [Operation Crossroads](#) series in July 1946, was the first postwar test series and one of the largest military operations in U.S. history.
- The [Operation Greenhouse](#) shots of May 1951 included the first [boosted fission weapon](#) test ("Item") and a scientific test which proved the feasibility of thermonuclear weapons ("George").
- The "[Ivy Mike](#)" shot of 1 November 1952, was the first full test of a [Teller-Ulam design](#) "staged" hydrogen bomb, with a yield of 10 megatons. It was not a deployable weapon, however — with its full [cryogenic](#) equipment it weighed some 82 tons.
- The "[Castle Bravo](#)" shot of 1 March 1954, was the first test of a deployable (solid fuel) thermonuclear weapon, and also (accidentally) the largest weapon ever tested by the United States (15 megatons). It was also the single largest U.S. radiological accident in connection with nuclear testing. The unanticipated yield, and a change in the weather, resulted in [nuclear fallout](#) spreading eastward onto the inhabited [Rongelap](#) and [Rongerik](#) atolls, which were soon evacuated. Many of the [Marshall Islands](#) natives have since suffered from [birth defects](#) and have received some compensation from the [federal government](#). A [Japanese](#) fishing boat, the [Fifth Lucky Dragon](#), also came into contact with the fallout, which caused many of the crew to grow ill; one eventually died.
- Shot "Argus I" of [Operation Argus](#), on 27 August 1958, was the first detonation of a nuclear weapon in [outer space](#) when a 1.7-kiloton warhead was detonated at 200 kilometers' altitude during a series of [high-altitude nuclear explosions](#).
- Shot "Frigate Bird" of [Operation Dominic I](#) on 6 May 1962, was the only U.S. test of an operational [ballistic missile](#) with a live nuclear warhead (yield of 600 kilotons), at Christmas [Kiritimati](#) Island in the Pacific. In general, missile systems were tested without live warheads and warheads were tested separately for safety concerns. In the early 1960s, however, there mounted technical questions about how the systems would behave under combat conditions (when they were "mated", in military parlance), and this test was meant to dispel these concerns. However, the warhead had to be somewhat modified before its use, and the missile was only a [SLBM](#) (and not an [ICBM](#)), so by itself it did not satisfy all concerns.^[2]
- Shot "[Sedan](#)" of [Operation Storax](#) on 6 July 1962 (yield of 104 kilotons), was an attempt at showing the feasibility of using nuclear weapons for "civilian" and "peaceful" purposes as part of [Operation Plowshare](#). In this instance, a 1280-foot-in-diameter and 320-foot-deep [crater](#) was created at the Nevada Test Site.

Marshall Islands 10⁰N

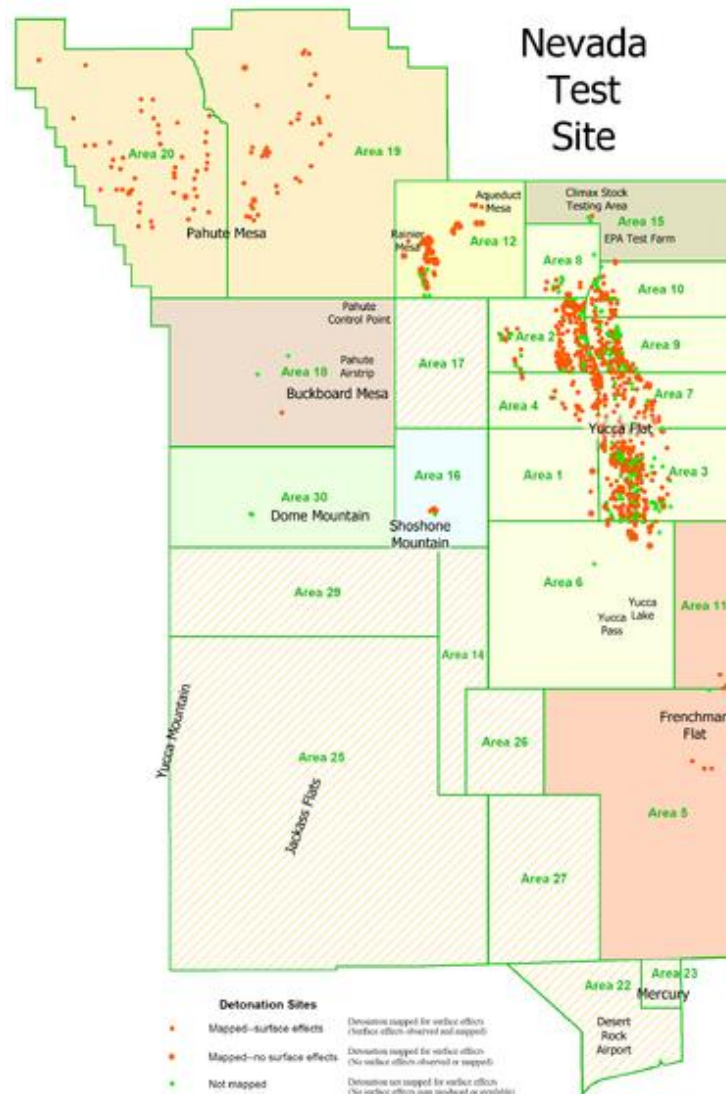
The **Pacific Proving Grounds** was the name used to describe a number of sites in the [Marshall Islands](#) and a few other sites in the [Pacific Ocean](#), used by the [United States](#) to conduct [nuclear testing](#) at various times between 1946 and 1962. In July 1947, after the first atomic weapons testing at [Bikini Atoll](#), the United States entered into an agreement with the [United Nations](#) to govern the [Trust Territory of the Pacific Islands](#) as a strategic [trusteeship territory](#). The Trust Territory is composed of 2,000 islands spread over 3,000,000 square miles (7,800,000 km²) of the [North Pacific Ocean](#). On July 23, 1947, the [United States Atomic Energy Commission](#) announced the establishment of the Pacific Proving Grounds. 105 [atmospheric](#) (i.e., not [underground](#)) [nuclear tests](#) were conducted there, many of which were of extremely high yield. While the Marshall Islands testing comprised 14% of all U.S. tests, it comprised nearly 80% of the total yields of those detonated by the U.S., with an estimated total yield of around 210 [megatons](#), with the largest being the 15 Mt [Castle Bravo](#) shot of 1954 which spread considerable [nuclear fallout](#) on many of the islands, including several which were inhabited, and some that had not been evacuated.



Testing chronology

- Operation Crossroads (1946)
- Operation Sandstone (1948)
- Operation Greenhouse (1951)
- Operation Ivy (1952)
- Operation Castle (1954)
- Operation Redwing (1956)
- Operation Hardtack I (1958)
- Operation Dominic (1962)

Nevada 37⁰ N



Between 1951 and 1992, there were a total of 928 announced nuclear tests at Nevada Test Site. Of those, 828 were underground.^[3] (Sixty-two of the underground tests included multiple, simultaneous nuclear detonations, adding 93 detonations and bringing the total number of NTS nuclear detonations to 1,021, of which 921 were underground.)^[4] The site is covered with subsidence craters from the testing. The Nevada Test Site was the primary testing location of American nuclear devices; 126 tests were conducted elsewhere (many at the Pacific Proving Grounds in the Marshall Islands).

During the 1950s, the mushroom clouds from these tests could be seen for almost 100 mi (160 km) in either direction, including the city of Las Vegas, where the tests became tourist attractions. Americans headed for Las Vegas to witness the distant mushroom clouds that could be seen from the downtown hotels.

On 17 July 1962, the test shot "Little Feller I" of Operation Sunbeam became the last atmospheric test detonation at the Nevada Test Site. Underground testing of weapons continued until 23 September 1992, and although the United States did not ratify the Comprehensive Test Ban Treaty, the articles of the treaty are nevertheless honored and further tests have not occurred. Subcritical testing, tests not involving the full creation of a critical mass, continue.

One notable test shot was the "Sedan" shot of Operation Storax on 6 July 1962, a 104-kilotonne-of-TNT (440 TJ) shot for the Operation Plowshare which sought to prove that nuclear weapons could be used for peaceful means in creating bays or canals—it created a crater 1,280 feet (390 m) wide and 320 feet (100 m) deep that can still be seen today. While most of the larger tests were conducted elsewhere, NTS was home to tests in the 500-to-1,000-kilotonne-of-TNT (2,100 to 4,200 TJ) range, which caused noticeable seismic effects in Las Vegas.

Nuclear test series carried out at the Nevada Test Site

- [Operation Ranger](#) — 1951
- [Operation Buster-Jangle](#) — 1951
- [Operation Tumbler-Snapper](#) — 1952
- [Operation Upshot-Knothole](#) — 1953
- [Operation Teapot](#) — 1955
- [Project 56](#) — 1955
- [Operation Plumbbob](#) — 1957
- [Project 57, 58, 58A](#) — 1957–1958
- [Operation Hardtack II](#) — 1958
- [Operation Nougat](#) — 1961–1962
- [Operation Plowshare](#) — 1961–1973 (sporadic, at least one test a year)
- [Operation Sunbeam](#) — 1962
- [Operation Dominic II](#) — 1962–1963
- [Operation Storax](#) — 1963
- [Operation Niblick](#) — 1963–1964
- [Operation Whetstone](#) — 1964–1965
- [Operation Flintlock](#) — 1965–1966
- [Operation Latchkey](#) — 1966–1967
- [Operation Crosstie](#) — 1967–1968
- [Operation Bowline](#) — 1968–1969
- [Operation Mandrel](#) — 1969–1970
- [Operation Emery](#) — 1970
- [Operation Grommet](#) — 1971–1972
- [Operation Toggle](#) — 1972–1973
- [Operation Arbor](#) — 1973–1974
- [Operation Bedrock](#) — 1974–1975
- [Operation Anvil](#) — 1975–1976
- [Operation Fulcrum](#) — 1976–1977
- [Operation Cresset](#) — 1977–1978
- [Operation Quicksilver](#) — 1978–1979
- [Operation Tinderbox](#) — 1979–1980
- [Operation Guardian](#) — 1980–1981
- [Operation Praetorian](#) — 1981–1982
- [Operation Phalanx](#) — 1982–1983
- [Operation Fusileer](#) — 1983–1984
- [Operation Grenadier](#) — 1984–1985
- [Operation Charioteer](#) — 1985–1986
- [Operation Musketeer](#) — 1986–1987
- [Operation Touchstone](#) — 1987–1988
- [Operation Cornerstone](#) — 1988–1989
- [Operation Aqueduct](#) — 1989–1990
- [Operation Sculpin](#) — 1990–1991
- [Operation Julin](#) — 1991–1992

List of nuclear weapons tests

List of nuclear weapons tests of the United States

As part of the [nuclear arms race](#), the [United States](#) conducted around 1,054 [nuclear tests](#) (by official count) between 1945 and 1992. Most of the tests took place at the [Nevada Test Site](#) and the [Pacific Proving Grounds](#) in the [Marshall Islands](#). Ten other tests took place at various locations in the United States, including Alaska, [Colorado](#), [Mississippi](#), and [New Mexico](#).

1945–1958

Year	Series	No. shots	Total yields	Location(s)	Notes
1945	Trinity	1	20 kt	Alamogordo, New Mexico	First ever nuclear explosion.
1946	Crossroads	2	46 kt	Pacific Proving Grounds	First postwar test series. First underwater nuclear explosion .
1948	Sandstone	3	104 kt	Pacific Proving Grounds	The first use of "levitated" cores. Developed the Mark IV warhead.
1951	Ranger	5	40 kt	Nevada Test Site	First tests at the Nevada Test Site .
1951	Greenhouse	4	398.5 kt	Pacific Proving Grounds	"George" shot was physics experiment relating to the hydrogen bomb; "Item" shot was first boosted fission weapon .
1951	Buster-Jangle	7	71.9 kt	Nevada Test Site	Many shots done in conjunction with troop exercises on ground.
1952	Tumbler-Snapper	7	104 kt	Nevada Test Site	Operation "Snapper" tested a number of new devices, and also explored the " rope trick effect ".
1952	Ivy	2	10.9 Mt	Pacific Proving Grounds	"Mike" shot was first hydrogen bomb; " King " shot was largest pure-fission bomb (500 kt).
1953	Upshot-Knothole	11	252.4 kt	Nevada Test Site	Grable shot used a 280mm M65 Atomic cannon .
1954	Castle	6	48.2 Mt	Pacific Proving Grounds	Deployable thermonuclears. " Bravo " was over twice as large as expected (most powerful ever by U.S.) and spread fallout over a wide area. Hydrogen bombs that used cryogenic fuel were obsolete.
1955	Teapot	14	167.8 kt	Nevada Test Site	First successful designs by Lawrence Livermore National Laboratory (after two years of trying).
1955	Wigwam	1	30 kt	Pacific Ocean	A single shot, 2000 ft underwater, to determine the vulnerability of submarines to nuclear explosions.
1955-56	Project 56	4	.01 to .1 kt	Nevada Test Site	Four 'one-point' safety tests, to ensure the safety of deployed designs.
1956	Redwing	17	20.82 Mt	Pacific Proving Grounds	All thermonuclear weapons designs tests, including first "three stage" weapon test.
1957	Project 57	1	0 t	Nellis Air Force Range	One 'one-point' safety test, to ensure the safety of deployed designs.
1957	Plumbbob	29	343.74 kt	Nevada Test Site	One of the most controversial test series, release more radiation to continental U.S. than any series. Close proximity of troop exercises to shot "Smoky" produced significantly increased levels of leukemia among exposed soldiers. ^{[1]:22}
1957–58	Project 58 , Project 58A	4	0.5 kt	Nevada Test Site	Four 'one-point' safety tests, to ensure the safety of deployed designs.

Year	Series	No. shots	Total yields	Location(s)	Notes
1958	Chariot		<i>Cancelled</i>	Cape Thompson, Alaska	Had planned to create an artificial harbor in Alaska as part of Operation Plowshare using thermonuclear explosions. Was eventually canceled amid controversy.
1958	Operation Hardtack I	35	35.6 Mt	Pacific Proving Grounds	First live nuclear bomb launched by a missile (U.S. Army's PGM-11 Redstone)
1958	Argus	3	5.1 kt	South Atlantic Ocean	Clandestine high-altitude test series carried out 1,110 miles southwest of South Africa to test whether nuclear explosions could create artificial Van Allen belts in near space.
1958	Operation Hardtack II	37	45.8 kt	Nevada Test Site	

Testing Moratorium of 1959–1960

A voluntary moratorium terminates all nuclear testing for the US along with the [Soviet Union](#) and the [United Kingdom](#). The moratorium is broken by [France](#), becoming the fourth nuclear state with its test, "[Gerboise Bleue](#)", on February 13, 1960. The Soviet Union responds by breaking the moratorium on September 1st by resuming testing (including the 50 Mt "[Tsar Bomba](#)" device on October 30, 1961) and the US joins in breaking the moratorium by resuming weapons testing on 15 September 1961.

1961–1963

Year	Series	No. shots	Total yields	Location(s)	Notes
1961–62	Nougat	32		Nevada Test Site, Carlsbad, New Mexico	First all-underground test series. Included Operation Plowshare shot "Gnome" in Carlsbad, New Mexico , which was detonated in an underground salt dome .
1962–63	Dominic	36	38.1 Mt	Christmas Island, Johnston Island, Central Pacific Ocean	"Frigate Bird" was the only operational test of a missile "mated" with a live warhead. Series also included three high-altitude tests known as Operation Fishbowl .
1962–63	Storax	48		Nevada Test Site	Included the " Sedan " test, a cratering experiment as part of Operation Plowshare .
1962	Sunbeam	4	2.19 kt	Nevada Test Site	Test of small tactical warheads, including the man-portable " Davy Crockett ". Last atmospheric test series.
1963	Roller Coaster	4	0	Nellis Air Force Range, Nevada	Storage-transportation safety experiment, measured plutonium dispersal risk.

After the signing of the [Partial Test Ban Treaty](#) in 1963, all U.S. nuclear testing became [underground testing](#).

1964–1992

Year	Series	No. shots	Total yields	Location(s)	Notes
1964–65	<i>Niblick</i>	41		Nevada Test Site	
1964–65	<i>Whetstone</i>	48		Nevada Test Site , Hattiesburg, Mississippi	
1965–66	<i>Flintlock</i>	48		Nevada Test Site , Amchitka, Alaska	
1966–67	<i>Latchkey</i>	38		Nevada Test Site , Hattiesburg, Mississippi	
1967–68	<i>Crosstie</i>	48		Nevada Test Site , Farmington, New Mexico	Included " Gasbuggy " Plowshare shot near Farmington, New Mexico .
1968–69	<i>Bowline</i>	48		Nevada Test Site	
1969	<i>Mandrel</i>	53		Nevada Test Site ; Grand Valley, Colorado ; Amchitka, Alaska	Included " Rulison " Plowshare shot near Grand Valley, Colorado , and 1.2 Mt shot "Milrow" in Alaska.
1970	<i>Emery</i>	16		Nevada Test Site	
1971–72	<i>Grommet</i>	34		Nevada Test Site , Amchitka, Alaska	Included largest US underground detonation , the >5 mt shot "Cannikin" (for the Spartan Missile warhead) in Alaska.
1972–73	<i>Toggle</i>	28		Nevada Test Site , Rifle, Colorado	Included Plowshare "Rio Blanco" test for gas stimulation
1973–74	<i>Arbor</i>	19		Nevada Test Site	
1974–75	<i>Bedrock</i>	27		Nevada Test Site	
1975–76	<i>Anvil</i>	21		Nevada Test Site	
1976–77	<i>Fulcrum</i>	21		Nevada Test Site	All "weapons related" tests.
1977–78	<i>Cresset</i>	23		Nevada Test Site	

1978–79	<i>Quicksilver</i>	18		Nevada Test Site	
1979–80	<i>Tinderbox</i>	15		Nevada Test Site	
1980–81	<i>Guardian</i>	16		Nevada Test Site	
1981–82	<i>Praetorian</i>	22		Nevada Test Site	
1982–83	<i>Phalanx</i>	19		Nevada Test Site	
1983–84	<i>Fusileer</i>	17		Nevada Test Site	
1984–85	<i>Grenadier</i>	17		Nevada Test Site	
1985–86	<i>Charioteer</i>	18		Nevada Test Site	Mighty Oak test using the Mk-21 RV warhead. was conducted on April 10, 1986. Containment failed and later radiation was released . Secondary sources put this venting into at 36,000 curies, which is 2000 times greater than the 3 Mile Island incident. Sources: Dr. Rosalie Bertell , Dr. Bonnie Eberhardt , journalist Paul Van Dam .
1986–87	<i>Musketeer</i>	15		Nevada Test Site	
1987–88	<i>Touchstone</i>	14		Nevada Test Site	
1988–89	<i>Cornerstone</i>	12		Nevada Test Site	
1989–90	<i>Aqueduct</i>	11		Nevada Test Site	
1990–91	<i>Sculpin</i>	8		Nevada Test Site	
1991–92	<i>Julin</i>	8	<460kt	Nevada Test Site	Last nuclear test series. Last shot was "Divider" (September 23, 1992). Exact yields not released.

A number of shots whose goals were to assess the non-military use of nuclear weapons were known as [Operation Plowshare](#), and done during many different test series.

The United States has not conducted any tests since 1992, though they have conducted a number of sub-critical tests (which do not involve a chain reaction). However, the United States has not ratified the [Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty](#).

Soviet Union

The [Soviet Union](#) conducted 715 nuclear tests (by official count) between 1949 and 1990, including 219 atmospheric, underwater, and space tests. Most of them took place at the [Semipalatinsk Test Site](#) in [Kazakhstan](#) and the [Northern Test Site](#) at [Novaya Zemlya](#). Additional tests were conducted at various locations in Russia and Kazakhstan, while a small number of tests were conducted in [Ukraine](#), [Uzbekistan](#), and [Turkmenistan](#).

In addition, a [large-scale military exercise](#) was conducted by [Soviet army](#) to explore the possibility of defensive and offensive [warfare](#) operations during [nuclear war](#). The exercise, under code name of "Snowball", involved detonation of a nuclear bomb twice as powerful one used in [Nagasaki](#) and approximately 45,000 soldiers coming through the [epicenter](#) immediately after the blast^[4] The exercise was conducted on September 14, 1954, under command of [Marshal Georgy Zhukov](#) to the north of [Totskoye](#) village in [Orenburg Oblast](#), [Russia](#).

Some significant Soviet tests include:

- [Operation First Lightning/RDS-1](#) (known as Joe 1 in the West), August 29, 1949 — first Soviet nuclear test.
- [RDS-6s](#) (known as [Joe 4](#) in the West), August 12, 1953 — first Soviet thermonuclear test using a sloika (layer cake) design. The design proved to be unscalable into megaton yields, but it was air-deployable.
- [RDS-37](#), November 22, 1955 — first Soviet multi-megaton, "true" hydrogen bomb test using Sakharov's "third design", essentially a re-invention of the Teller-Ulam.
- [Tsar Bomba](#), October 30, 1961 — largest nuclear weapon ever detonated, with a design yield of 100 Mt, de-rated to 50 Mt for the test drop.
- [Chagan](#), January 15, 1965 — large cratering experiment as part of [Nuclear Explosions for the National Economy](#) program.

The last Soviet test took place on October 24, 1990. After the dissolution of the USSR in 1992, Russia inherited their former nuclear stockpile, while Kazakhstan inherited the Semipalatinsk nuclear test area including one unexploded bomb, later blown up with conventional explosives by a team invited from the USA. No testing has occurred in the lands of the USSR since its dissolution.

Novaya Zemlya 73°N

In July 1954, Novaya Zemlya was designated the Novaya Zemlya Test Site, construction of which began in October and existed during much of the Cold War.

- "Zone A", Chyornaya Guba (70°42'N 54°36'E/70.7°N 54.6°E), was used in 1955–1962 and 1972–1975.
- "Zone B", Matochkin Shar (73°24'N 54°54'E/73.4°N 54.9°E), was used for underground tests in 1964–1990.
- "Zone C", Sukhoy Nos (73°42'N 54°00'E/73.7°N 54.0°E), was used in 1958–1961 and was the 1961 explosion site of the 100 megaton (fired device was a downgraded design to 50) Tsar Bomba, the biggest nuclear bomb ever detonated.

Other tests occurred elsewhere throughout the islands, with an official testing range covering over half of the landmass. In September 1961 two propelled thermonuclear warheads were launched from Vorkuta Sovetsky and Salekhard respectively to target areas on Novaya Zemlya. The launch rocket was subsequently deployed to Cuba. 1963 saw the implementation of the Limited Test Ban Treaty outlawing most atmospheric nuclear tests. The largest underground test at Novaya Zemlya took place on September 12, 1973, involving four nuclear devices of 4.2 megatons total yield. Although far smaller in blast power than the Tsar Bomba and other atmospheric tests, the confinement of the blasts underground led to pressures rivaling natural earthquakes. In the case of the September 12, 1973, test, a seismic magnitude of 6.97 on the Richter Scale was reached, setting off an 80 million ton avalanche that blocked two glacial streams and created a lake 2 kilometres (1.2 mi) in length.

Over its history as a nuclear test site, Novaya Zemlya hosted 224 nuclear detonations with a total explosive energy equivalent to 265 megatons of TNT. For comparison, all explosives used in World War II, including the detonations of two US nuclear bombs, amounted to only two megatons.

In 1988–1989, *glasnost* helped make the Novaya Zemlya testing activities public knowledge, and in 1990 Greenpeace activists staged a protest at the site. The last nuclear test explosion was in 1990 (also the last for the entire Soviet Union and Russia). The Ministry for Atomic Energy has performed a series of subcritical underwater nuclear experiments near Matochkin Shar each autumn since 1998. These tests reportedly involve up to 100 grams (3.5 oz) of weapons-grade Plutonium.



Semipalatinsk Test Site 50° N

The **Semipalatinsk Test Site** (STS or Semipalatinsk-21), also known as "The Polygon", was the primary testing venue for the [Soviet Union's nuclear weapons](#). It is located on the [steppe](#) in northeast [Kazakhstan](#) (then the [Kazakh SSR](#)), south of the valley of the [Irtys River](#). The scientific buildings for the test site were located around 150 km west of the town of [Semipalatinsk](#) (later renamed Semey), near the border of [East Kazakhstan Province](#) and [Pavlodar Province](#) with most of the nuclear tests taking place at various sites further to the west and south, some as far as into [Karagandy Province](#).

The Soviet Union conducted 456 nuclear tests at Semipalatinsk from 1949 until 1989 with little regard for their effect on the local people or environment. The full impact of radiation exposure was hidden for many years by Soviet authorities and has only come to light since the test site closed in 1991.



List of nuclear weapons tests of the Soviet Union

The following is a list of the [nuclear weapons tests](#) conducted by the [Soviet Union](#) between 1949 and 1962, and some remarks on the later tests.

1949 - 1958

Nº	Name	Date	Location	Type	Height (meters)	Yield (kilotons)	Note
1	Pervaya Molniya (Joe-1)	29/08/1949	Semipalatinsk	Atmospheric/Tower	30 m	22 kt	First nuclear test by the USSR.
x	---	---/---/1950	Semipalatinsk	Atmospheric/Tower	---	0 kt	No detonation.
2	Vtoraya Molniya (Joe-2)	24/09/1951	Semipalatinsk	Atmospheric/Tower	30 m	38.3 kt	
3	--- (Joe-3)	18/10/1951	Semipalatinsk	Atmospheric/Airdrop	380 m	42 kt	First Soviet nuclear test of an airdropped device.
4	Usilennaya? (Joe-4)	12/08/1953	Semipalatinsk	Atmospheric/Tower	30 m	400 kt	First Soviet test of a thermonuclear device.
5	--- (Joe-5)	23/08/1953	Semipalatinsk	Atmospheric/Airdrop	600 m	28 kt	First test of a RDS-4, the USSR's first tactical nuclear bomb.
6	--- (Joe-6)	03/09/1953	Semipalatinsk	Atmospheric/Airdrop	255 m	5.8 kt	
7	---	08/09/1953	Semipalatinsk	Atmospheric/Airdrop	220 m	1.6 kt	
8	---	10/09/1953	Semipalatinsk	Atmospheric/Airdrop	220 m	4.9 kt	
9	--- (Joe-8)	14/09/1954	Totskoye Polygon	Atmospheric/Airdrop	350 m	40 kt	First Soviet nuclear explosion in a military exercise with troops.
10	---	29/09/1954	Semipalatinsk	Atmospheric	210 m	0.2 kt	
11	---	01/10/1954	Semipalatinsk	Atmospheric	105 m	0.03 kt	
12	--- (Joe-9?)	03/10/1954	Semipalatinsk	Atmospheric	130 m	2 kt	
13	--- (Joe-10?)	05/10/1954	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	0 m	4 kt	
14	--- (Joe-11?)	08/10/1954	Semipalatinsk	Atmospheric	295 m	0.8 kt	
15	---	19/10/1954	Semipalatinsk	Atmospheric/Tower	15 m	<0.0001 kt	First test of a RDS-9. First fizzle of the Soviet nuclear program.
16	---	23/10/1954	Semipalatinsk	Atmospheric	410 m	62 kt	
17	---	26/10/1954	Semipalatinsk	Atmospheric	110 m	2.8 kt	
18	--- (Joe-14?)	30/10/1954	Semipalatinsk	Atmospheric/Airdrop	55 m	10 kt	
x	---	20/02/1955	---	Atmosférica/Cohete	---	0 kt	Probably first test with a rocket-launched shot. Fizzle.
19	--- (Joe-15)	29/07/1955	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	2.5 m	1.3 kt	First successful test of a RDS-9.
20	--- (Joe-16)	02/08/1955	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	2.5 m	12 kt	
21	---	05/08/1955	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	1.5 m	1.2 kt	
22	--- (Joe-17)	21/09/1955	Novaya Zemlya	Underwater/Barge	-10 m	3.5 kt	First nuclear test at Novaya Zemlya and first Soviet underwater nuclear explosion.
x	---	21/09/1955	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	---	<0.0001 kt	
23	--- (Joe-18)	06/11/1955	Semipalatinsk	Atmospheric/Airdrop	1000 m	250 kt	
24	Binarnaya? (Joe-19)	22/11/1955	Semipalatinsk	Atmospheric/Airdrop	1550 m	1600 kt	First Soviet test of a two-stage thermonuclear device.
25	Baikal	20/02/1956	Kapustin Yar	Atmospheric/Rocket	---	0.3 kt	First successful nuclear explosion with a rocket-launched shot.
26	---	16/04/1956	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	0.4 m	14 kt	
27	---	25/04/1956	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	1 m	5.5 kt	
28	---	24/08/1956	Semipalatinsk	Atmospheric/Tower	93 m	27 kt	
29	---	30/08/1956	Semipalatinsk	Atmospheric/Airdrop	1100 m	900 kt	

30	---	02/09/1956	Semipalatinsk	Atmospheric/Airdrop	1050 m	51 kt	
31	---	10/09/1956	Semipalatinsk	Atmospheric/Airdrop	270 m	38 kt	Military exercise with troops.
32	---	17/11/1956	Semipalatinsk	Atmospheric	2000 m	900 kt	
33	---	14/12/1956	Semipalatinsk	Atmospheric	1965 m	40 kt	
34	ZUR-215	19/01/1957	Kapustin Yar	Atmospheric/Rocket	10370 m	10 kt	
35	---	08/03/1957	Semipalatinsk	Atmospheric	610 m	19 kt	
36	---	03/04/1957	Semipalatinsk	Atmospheric	1100 m	42 kt	
37	---	06/04/1957	Semipalatinsk	Atmospheric	1145 m	57 kt	
38	---	10/04/1957	Semipalatinsk	Atmospheric	2000 m	680 kt	
39	---	12/04/1957	Semipalatinsk	Atmospheric	1145 m	22 kt	
40	---	16/04/1957	Semipalatinsk	Atmospheric	2000 m	320 kt	
41	---	22/08/1957	Semipalatinsk	Atmospheric	1880 m	520 kt	
42	---	26/08/1957	Semipalatinsk	Atmospheric	410 m	0.1 kt	
43	---	07/09/1957	Novaya Zemlya	Atmospheric/Tower	15 m	32 kt	First and only tower shot in Novaya Zemlya.
44	---	13/09/1957	Semipalatinsk	Atmospheric	780 m	5.9 kt	
45	---	24/09/1957	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	2000 m	1600 kt	First Airdrop at Novaya Zemlya.
46	---	26/09/1957	Semipalatinsk	Atmospheric	2000 m	13 kt	
47	---	06/10/1957	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	2120 m	2900 kt	
48	---	10/10/1957	Novaya Zemlya	Underwater/Torpedo	-30 m	10 kt	First nuclear test with a launched T-5 torpedo.
49	---	28/12/1957	Semipalatinsk	Atmospheric	615 m	12 kt	

1958 - 1959

Nº	Name	Date	Location	Type	Height (meters)	Yield (kilotons)	Note
50	---	04/01/1958	Semipalatinsk	Atmospheric	400 m	1.3 kt	
51	---	17/01/1958	Semipalatinsk	Atmospheric	500 m	0.5 kt	
52	---	23/02/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	2500 m	860 kt	
53	---	27/02/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	2500 m	250 kt	
54	---	27/02/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	---	1500 kt	
55	---	13/03/1958	Semipalatinsk	Atmospheric	475 m	1.2 kt	
x	---	13/03/1958	Semipalatinsk	Atmospheric	---	<0.001 kt	
56	---	14/03/1958	Semipalatinsk	Atmospheric	1030 m	35 kt	
57	---	14/03/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	---	40 kt	
58	---	15/03/1958	Semipalatinsk	Atmospheric	965 m	14 kt	
x	---	15/03/1958	Semipalatinsk	Atmospheric	---	<0.001 kt	
59	---	18/03/1958	Semipalatinsk	Atmospheric	290 m	0.16 kt	
60	---	20/03/1958	Semipalatinsk	Atmospheric	1015 m	12 kt	
61	---	21/03/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	2500 m	650 kt	
62	---	22/03/1958	Semipalatinsk	Atmospheric	1415 m	18 kt	
63	---	30/09/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	1500 m	1200 kt	
64	---	30/09/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	2500 m	900 kt	
65	---	02/10/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	1400 m	290 kt	
66	---	02/10/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	---	40 kt	
67	---	04/10/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	800 m	9 kt	
68	---	05/10/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	1200 m	15 kt	
69	---	06/10/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	1200 m	5.5 kt	
70	---	10/10/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	---	68 kt	
71	---	12/10/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	---	1450 kt	
72	---	15/10/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	2150 m	1500 kt	
73	---	18/10/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	---	2900 kt	
74	---	19/10/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	---	40 kt	
75	---	19/10/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	900 m	0.001 kt	
76	---	20/10/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	---	440 kt	
77	---	21/10/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	270 m	2 kt	
78	---	22/10/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	2070 m	2800 kt	
79	---	24/10/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	1525 m	1000 kt	
80	---	25/10/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	1500 m	190 kt	
81	---	25/10/1958	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	300 m	0.05 kt	
82	---	01/11/1958	Kapustin Yar	Atmospheric/Rocket	12000 m	10 kt	
83	---	03/11/1958	Kapustin Yar	Atmospheric/Rocket	12000 m	10 kt	Last test before a 33-month moratorium.

1961 - 1962

N°	Name	Date	Location	Type	Height (meters)	Yield (kilotons)	Note
84	---	01/09/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	660 m	16 kt	
85	---	04/09/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	725 m	9 kt	
86	---	05/09/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	500 m	16 kt	
87	---	06/09/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	685 m	1.1 kt	
88	Operation Groza (Joe-79) ^[3]	06/09/1961	Kapustin Yar	Atmospheric/Rocket	22700 m	10.5 kt	
89	---	09/09/1961	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	0 m	0.38 kt	
90	Vozduj?	10/09/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	2000 m	2700 kt	
91	Operation Volga	10/09/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric/Rocket	390 m	12 kt	Tactical nuclear missile test.
92	---	10/09/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	180 m	0.88 kt	
93	---	11/09/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	---	0.3 kt	
94	Operation Roza	12/09/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric/Rocket	1190 m	1150 kt	Strategic nuclear missile test.
95	Operation Volga	13/09/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric/Rocket	250 m	6 kt	Due to the low altitude of the explosion, the launch area was significantly contaminated.
96	---	13/09/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	710 m	10 kt	
97	---	14/09/1961	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	0.5 m	0.4 kt	
98	---	14/09/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric/Rocket	1700 m	1200 kt	
99	Operation Roza	16/09/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric/Rocket	---	830 kt	
100	---	17/09/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	695 m	21 kt	
101	---	18/09/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric	1500 m	1000 kt	
102	---	18/09/1961	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	1 m	0.004 kt	
103	---	18/09/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	---	0.75 kt	
104	---	19/09/1961	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	0 m	0.03 kt	
105	---	20/09/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	280 m	4.8 kt	
106	---	20/09/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric	1600 m	1500 kt	
107	---	21/09/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	110 m	0.8 kt	
108	---	22/09/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric	1300 m	260 kt	
109	---	26/09/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	665 m	1.2 kt	
110	---	01/10/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	700 m	3 kt	
111	---	02/10/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric	1500 m	250 kt	
112	---	04/10/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	605 m	13 kt	
113	---	04/10/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric	2100 m	3000 kt	
114	---	06/10/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric	2700 m	4000 kt	
115	Operation Grom (Joe-98) ^[3]	06/10/1961	Kapustin Yar	Atmospheric/Rocket	41300 m	40 kt	
116	Operation Shkval	08/10/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric/Cruise missile	1450 m	15 kt	First test with a cruise missile .
117	---	11/10/1961	Semipalatinsk	Underground/Tunnel	---	1 kt	First soviet underground detonation.
118	---	12/10/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	670 m	15 kt	
119	---	17/10/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	505 m	6.6 kt	
120	---	19/10/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	710 m	10 kt	
121	Raduga	20/10/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric/Rocket	530–1000 m	1450 kt	
122	Operation Korall-1	23/10/1961	Novaya Zemlya	Underwater/Torpedo	-20 m	4.8 kt	T-5 torpedo delivered by a B-130 submarine.
123	---	23/10/1961	Nueva Zembla	Atmospheric/Airdrop	3500 m	12500 kt	
124	---	25/10/1961	Nueva Zembla	Atmospheric	1450 m	300 kt	
125	---	25/10/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	---	0.5 kt	
126	Operación Korall-	27/10/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric/Torpedo	1.1 m	16 kt	Water surface burst.

	2						
127	K2 (<i>Joe-109</i>)	27/10/1961	Kapustin Yar/Sary Shagan?	Atmospheric/Rocket	300000 m	1.2 kt	First Soviet nuclear test in the thermosphere . ^[3]
128	K1 (<i>Joe-105</i>)	27/10/1961	Kapustin Yar/Sary Shagan?	Atmospheric/Rocket	150000 m	1.2 kt	
129	---	30/10/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	470 m	0.09 kt	
130	Tsar Bomba	30/10/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	3500 m	<57000 kt	Largest nuclear test in history.
131	---	31/10/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric	2200 m	5000 kt	
132	---	31/10/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric	1530 m	400 kt	
133	---	01/11/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	475 m	2.7 kt	
134	---	02/11/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric	1400 m	120 kt	
135	---	02/11/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric	1500 m	280 kt	
136	---	02/11/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	645 m	0.6 kt	
137	---	03/11/1961	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	0 m	0.001 kt	
138	---	03/11/1961	Semipalatinsk	Atmospheric	635 m	0.09 kt	
139	---	04/11/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric	1770 m	15 kt	
140	---	04/11/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric	1750 m	1500 kt	
141	---	04/11/1961	Novaya Zemlya	Atmospheric	2240 m	6 kt	
142	---	04/11/1961	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	0 m	0.2 kt	

1962 - 1963

N°	Name	Date	Location	Type	Height (meters)	Yield (kilotons)	Note
143	Argon-1	02/02/1962	Semipalatinsk	Underground/Tunnel	---	15 kt	First Soviet underground test with study of effects.
144	---	01/08/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	430 m	2.4 kt	
145	---	03/08/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	180 m	1.6 kt	
146	---	04/08/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	390 m	3.8 kt	
147	---	05/08/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	3600 m	21100 kt	Third largest nuclear test in history. ^[4]
148	---	07/08/1962	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	0 m	9.9 kt	
149	---	10/08/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	1560 m	400 kt	
150	---	18/08/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	710 m	7.4 kt	
151	---	18/08/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	310 m	5.8 kt	
152	---	20/08/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	2500 m	2800 kt	
153	---	21/08/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	590 m	23 kt	
154	---	22/08/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	1700 m	1600 kt	
155	Operation Shkval	22/08/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric/Cruise missile	60 m	6 kt	
156	---	22/08/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	740 m	3 kt	
157	---	23/08/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	680 m	2.5 kt	
158	---	25/08/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	715 m	1 kt	
159	---	25/08/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	2980 m	10000 kt	
160	---	27/08/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	3000 m	4200 kt	
161	---	27/08/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	245 m	11 kt	
162	---	31/08/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	700 m	2.7 kt	
163	---	02/09/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	1300 m	80 kt	
x	---	06/09/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	---	<0.001 kt	
164	Operation Tyulpan? ^[5]	08/09/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric/Rocket	1725 m	1900 kt	
165	---	15/09/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	---	3100 kt	
166	---	16/09/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	---	3250 kt	
167	---	18/09/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	2000 m	1350 kt	
x	---	18/09/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	---	10 kt	Probably was an unofficial thermonuclear fizzle .
168	---	19/09/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	3280 m	10000 kt	
169	---	21/09/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	3000 m	2400 kt	
170	---	22/09/1962	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	0 m	0.21 kt	
171	---	24/09/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	630 m	1.2 kt	
172	---	25/09/1962	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	0 m	7 kt	
173	---	25/09/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	4090 m	19100 kt	Fifth largest nuclear test in history. ^[4]
174	---	27/09/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	3900 m	20000 kt	Fourth largest nuclear test in history. ^[4]
175	---	28/09/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	695 m	1.3 kt	
176	---	06/10/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	1440 m	320 kt	
177	---	09/10/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	645 m	8 kt	
178	---	09/10/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	3000 m	15 kt	
179	---	10/10/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	665 m	9.2 kt	
180	---	13/10/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	720 m	4.9 kt	
181	---	14/10/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	725 m	10 kt	
182	---	20/10/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	635 m	6.7 kt	
183	---	22/10/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	3230 m	8200 kt	
184	K3 (Joe-157)	22/10/1962	Kapustin Yar/Sary Shagan?	Atmospheric	29000 m	300 kt	
185	---	27/10/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	1550 m	260 kt	
186	---	28/10/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	670 m	7.8 kt	
187	K4 (Joe-160)	28/10/1962	Kapustin Yar	Atmospheric	150000 m	300 kt	
188	---	28/10/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	645 m	7.8 kt	
189	---	29/10/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	1550 m	360 kt	
190	---	30/10/1962	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	0 m	1.2 kt	
191	---	30/10/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	1500 m	280 kt	
192	---	31/10/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	690 m	10 kt	
193	---	01/11/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	1500 m	240 kt	
194	K5 (Joe-168)	01/11/1962	Kapustin Yar	Atmospheric	59000 m	300 kt	
195	---	01/11/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	700 m	3 kt	

196	---	03/11/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	1500 m	390 kt	
197	---	03/11/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	4000 m	45 kt	
198	---	03/11/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	710 m	4.7 kt	
199	---	04/11/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	600 m	8.4 kt	
200	---	05/11/1962	Semipalatinsk	Atmospheric/Tower	15 m	0.4 kt	
201	---	11/11/1962	Semipalatinsk	Atmospheric/Tower	8 m	0.1 kt	
202	---	13/11/1962	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	0 m	0.001 kt	
203	---	14/11/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	660 m	12 kt	
204	---	17/11/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	715 m	18 kt	
205	---	24/11/1962	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	0 m	0.001 kt	
206	---	26/11/1962	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	0 m	0.031 kt	
207	---	01/12/1962	Semipalatinsk	Atmospheric	680 m	2.4 kt	
208	---	18/12/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	1600 m	110 kt	
209	---	18/12/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	1500 m	69 kt	
210	---	20/12/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	1070 m	8.3 kt	
211	---	22/12/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	1050 m	6.3 kt	
212	---	23/12/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	1460 m	430 kt	
213	---	23/12/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	1470 m	8.3 kt	
214	---	23/12/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	1270 m	2.4 kt	
215	---	23/12/1962	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	0 m	0.001 kt	
216	---	24/12/1962	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	0 m	0.007 kt	
217	---	24/12/1962	Semipalatinsk	Atmospheric/Surface	0 m	0.028 kt	
218	---	24/12/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	1320 m	1100 kt	
219	---	24/12/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric/Airdrop	3750 m	24200 kt	Second largest nuclear test in history. ^[4]
220	---	25/12/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	2250 m	3100 kt	
221	---	25/12/1962	Novaya Zemlya	Atmospheric	990 m	8.5 kt	Last Soviet atmospheric nuclear test.

1964 - 1990

Apart from *weapons* tests (not listed here) there has been:

- [Chagan](#), January 15, 1965 — large cratering experiment as part of [Nuclear Explosions for the National Economy](#) program.

The last Soviet test took place on October 24, 1990. After the dissolution of the USSR in 1992, Russia inherited their former nuclear stockpile, but has not conducted any nuclear tests.

United Kingdom

The [United Kingdom](#) has conducted 45 tests (21 in Australian territory, including 9 in mainland [South Australia](#) at [Maralinga](#) and [Emu Field](#), many others in the U.S. as part of joint test series). Tests include:

- [Operation Hurricane](#), October 3, 1952 (first atomic bomb)
- [Operation Totem](#), 1953
- [Operation Mosaic](#), 1956
- [Operation Buffalo](#), 1956
- [Operation Antler](#), 1957
- [Operation Grapple](#), 1957–1958 (first hydrogen bomb)

Last test: [Julin Bristol](#), November 26, 1991, vertical shaft.

Atmospheric tests involving nuclear material but conventional explosions:

- [Operation Kittens](#), 1953-1961 (initiator tests using conventional explosive)
- [Operation Rats](#), 1956-1960 (conventional explosions to study dispersal of uranium)
- [Operation Tims](#), 1955-1963 (conventional explosions for tamper, plutonium compression trials)
- [Operation Vixen](#), 1959-1963 (effects of accidental fire or explosion on nuclear weapons)

France

France conducted 210 nuclear tests between February 13, 1960 and January 27, 1996.

- [Operation Gerboise bleue](#), February 13, 1960 (first atomic bomb) and three more — [Reggane, Algeria](#); in the atmosphere; final test reputed to be more intended to prevent the weapon from falling into the hands of generals rebelling against [Charles de Gaulle](#) than for testing purposes.
- [Operation Agathe](#), November 7, 1961 and 12 more — In Ekker, [Hoggar](#) Algeria; underground
- Operation Aldébaran, July 2, 1966 and 45 more — [Moruroa](#) and [Fangataufa, French Polynesia](#); in the atmosphere;
 - first hydrogen bomb: August 28, 1968 [Canopus](#) (Fangataufa)
- Operation Achille June 5, 1975 and 146 more — Mururoa and Fangataufa, [French Polynesia](#); underground
 - last test: January 27, 1996 Operation Xouthos (Fangataufa)

Expérience	Date (heure locale)	Mode	Puissance (kt)	Axe principal	Retombées radioactives proches (en Gy/h à 1 m à H+1)	Retombées radioactives lointaines (en Bq/m ³ β dans l'air)	Conséquences radiologiques sur les personnes
GERBOISE BLEUE	13.02.60 à 7 h 04	tour (100 m)	70	vers l'Est (105°)	- à 300 m autour du point zéro > 10 - à 2,5 km petite tache > 1 - jusqu'à 30 km tache > 0,1 - jusqu'à 150 km tache > 0,01 - retombée sur postes ARAK à 400 km (0,7 mGy/h à H+4) et AKABU à 150 km (-0,1 mGy/h)	- FORT LAMY (2400 km) 150 (J+1) - OUAGADOUGOU (1700 km) 4 (J+3) - ABIDJAN (2500 km) 4 (J+5) - KHARTOUM (3200 km) 0,4 (J+6) - DAKAR (2400 km) 0,04 (J+9)	<u>Personnel du champ de tir</u> - 4 contaminations de la peau - Dose maxi : 97 mSv <u>Population civile</u> - spectro y sur 125 personnes de la palmeraie de REGGANE : pas d'activité décelée.
GERBOISE BLANCHE	01.04.60 à 6 h 17	au sol	< 5	vers le Sud (195°)	- à 80 m autour du point zéro > 10 - jusqu'à 3 km tache 1 km ² > 1 - jusqu'à 10 km tache 22 km ² > 0,1 - jusqu'à 25 km tache 220 km ² > 0,01 - retombée sur postes OUALLEN à 200 km (0,01 mGy/h à H+8) et BIDON V à 450 km (-0,001 mGy/h)	- TAMANRASSET (800 km) 4 (J+1) - BAMAKO (1900 km) 4 (J+3) - KHARTOUM (3200 km) 4 (J+4) - DAKAR (2400 km) 0,04 (J+4)	<u>Personnel du champ de tir</u> - Dose maxi : 61 mSv
GERBOISE ROUGE	27.12.60 à 7 h 28	tour (50 m)	< 5	vers le Sud (190-210°)	- à 200 m autour du point zéro > 1 - jusqu'à 6 km > 0,1 - jusqu'à 15 km > 0,01	- ATAR (1700 km) 370 (J+2) - DAKAR (2400 km) 4 (J+4)	<u>Personnel du champ de tir</u> - 5 contaminations de la peau - Dose maxi : 100 mSv <u>Population civile</u> - spectro y sur 70 nomades à TAMANRASSET : pas d'activité décelée.
GERBOISE VERTE	25.04.61 à 6 h 05	tour (50 m)	< 5	vers l'Ouest (240°)	- à 250 m autour du point zéro > 1 - jusqu'à 5 km tache > 0,05 - jusqu'à 8,5 km tache > 0,01 - jusqu'à 20 km tache > 0,001	- AMGUID (550 km) 37 (J+1) - ARAK (400 km) 370 (J+1) - EL GOLEA (600 km) 370 (J+3) - ADRAR (200 km) 37 (J+3)	<u>Personnel du champ de tir</u> - 42 contaminations de la peau - Dose maxi : 42 mSv

Synthèse des expérimentations aériennes

China

The [People's Republic of China](#) conducted 45 tests (23 atmospheric and 22 underground, all conducted at [Lop Nur](#) Nuclear Weapons Test Base, in [Malan, Xinjiang](#)) **40⁰ N**

- First test: "[596](#)" — October 16, 1964
- First hydrogen bomb test: "[Test No. 6](#)" - June 17, 1967
- 200kT-1MT atmospheric test, June 17, 1974 (16th test)
- Last atmospheric test: October 16, 1980. This would also be the last atmospheric nuclear test by any other country
- Last test: July 29, 1996, underground.

India

[India](#) announced it had conducted a test of a single device in 1974 near Pakistan's [eastern border](#) under the codename Operation *Smiling Buddha*. After 24 years, India publicly announced 5 further nuclear tests on May 11 and May 13, 1998. The official number of Indian nuclear tests is 6, conducted under two different code-names and at different times.

- May 18, 1974 — [Operation Smiling Buddha](#) (type: implosion, plutonium and underground). One underground test in a horizontal shaft around 107 m long under the long-constructed Indian Army [Pokhran Test Range](#) (IA-PTR) in the [Thar Desert](#), eastern border of Pakistan. The Indian [Meteorological Department](#) and the [Atomic Energy Commission](#) announced the yield of the weapon at 12 kt. Other Western sources claimed the yield to be around 2–12 kt. However, the claim was dismissed by the [Bulletin of the Atomic Scientists](#) and it was later reported to be 8 kt.
- May 11, 1998 — [Operation Shakti](#) (type: implosion, 3 uranium and 2 plutonium devices, all underground). The [Atomic Energy Commission](#) (AEC) of India and the [Defence Research and Development Organisation](#) (DRDO) simultaneously conducted a test of three nuclear devices at the [Indian Army Pokhran Test Range](#) (IAPTR) on May 11, 1998. Two days later, on May 13, the AEC and DRDO carried out a test of two further nuclear devices, detonated simultaneously. During this operation, AEC India claimed to have tested a three-stage thermonuclear device ([Teller-Ulam design](#)), but the yield of the tests was significantly lower than that expected from thermonuclear devices. The yields remain questionable, at best, by Western and Indian scholars, estimated at 20kt-45kt.

Pakistan

[Pakistan](#) conducted 6 official tests, under 2 different code names, in the final week of May 1998. From 1983 to 1994, around 24 nuclear cold tests were carried out by Pakistan; these remained unannounced and classified until 2000. In May 1998, Pakistan responded publicly by testing 6 nuclear devices.

March 11, 1983, — [Kirana-I](#) (type: implosion, [non-fissioned \(plutonium\)](#) and underground). The 24 underground cold tests of nuclear devices were performed near the [Sargodha Air Force Base](#). Due to serious [political repercussions](#), Pakistan did not announce the results of the tests and even the yield of the first weapon remains classified. Because it was a cold test, the Pakistan Atomic Scientists Foundation (PASF) estimated the yield at no more than around 12–25 kilotonnes.

- May 28, 1998 — [Chagai-I](#) (type: implosion, [HEU](#) and underground). One underground horizontal-shaft tunnel test (inside a granite mountain) of boosted fission devices at Koh Kambaran in the [Ras Koh Hills](#) in Chagai District of Balochistan Province. The announced yield of the five devices was a total of 40–45 kilotonnes with the largest having a yield of approximately 30–45 kilotonnes. An independent assessment however put the test yield at no more than 12 kt and the maximum yield of a single device at only 9 kt as opposed to 35 kt as claimed by Pakistani authorities.^[16] According to *The Bulletin of the Atomic Scientists*, the maximum yield was only 2–10 kt as opposed to the claim of 35 kt and the total yield of all tests was no more than 8–15 kt.
- May 30, 1998 — [Chagai-II](#) (type: implosion, plutonium device and underground). One underground vertical-shaft tunnel test of a miniaturized fission device having an announced yield of approximately 18–20 kilotonnes, carried out in the [Kharan Desert](#) in [Kharan District](#), Balochistan Province. An independent assessment put the figure of this test at 4–6 kt only. Some Western seismologists put the figure at a mere 2 kt.

North Korea

On October 9, 2006 [North Korea](#) announced they had conducted a nuclear test in [North Hamgyong Province](#) on the northeast coast at 10:36 AM (11:30 AEST). There was a 3.58 magnitude earthquake reported in [South Korea](#). There was a 4.2 magnitude tremor detected 240 miles north of P'yongyang. The low estimates on the yield of the test — potentially less than a kiloton in strength — have led to speculation as to whether it was a [fizzle](#) (unsuccessful test), or not a genuine *nuclear* test at all.

On May 25, 2009, North Korea announced having conducted a second nuclear test. A tremor, with magnitude reports ranging from 4.7 to 5.3, was detected at [Mantapsan](#), 233 miles northeast of P'yongyang and within a few kilometers of the 2006 test location. While estimates as to yield are still uncertain, with reports ranging from 3 to 20 kilotons, the stronger tremor indicates a significantly larger yield than the 2006 test.

On 12 February 2013, [North Korean](#) state media announced it had conducted an [underground nuclear test](#), its third in seven years. A tremor that exhibited a nuclear bomb signature with an initial [magnitude](#) 4.9 (later revised to 5.1) was detected by both [Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization Preparatory Commission](#) (CTBTO) and the [United States Geological Survey](#) (USGS).^[19] The tremor occurred at 11:57 local time (02:57 [UTC](#)) and the USGS said the [hypo](#)center of the event was only one [kilometer](#) deep. [South Korea](#)'s defense ministry said the event reading indicated a blast of six to seven [kilotons](#). However, there are some experts who estimate the yield to be up to 15 kt, since the test site's geology is not well understood.

Table of Known Nuclear Tests Worldwide:

Year	United States		Soviet Union		United Kingdom		France		China		Total
	A	U	A	U	A	U	A	U	A	U	
	<i>A = atmospheric; U = underground</i>										
1945	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1946	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
1947	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1948	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
1949	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
1950	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1951	15	1	2	0	0	0	0	0	0	0	18
1952	10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	11
1953	11	0	5	0	2	0	0	0	0	0	18
1954	6	0	10	0	0	0	0	0	0	0	16
1955	17	1	6	0	0	0	0	0	0	0	24
1956	18	0	9	0	6	0	0	0	0	0	33
1957	27	5	16	0	7	0	0	0	0	0	55
1958	62	15	34	0	5	0	0	0	0	0	116
1959	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1960	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3
1961	0	9/1*	58	1	0	0	1	1	0	0	71
1962	39	55/2	78	1	0	2**	0	1	0	0	178
1963	4	41/2	0	0	0	0	0	3	0	0	50
1964	0	39/6	0	9	0	2	0	3	1	0	60
1965	0	37/1	0	14	0	1	0	4	1	0	58
1966	0	44/4	0	18	0	0	5/1*	1	3	0	76
1967	0	39/3	0	17	0	0	3	0	2	0	64
1968	0	52/4	0	17	0	0	5	0	1	0	79
1969	0	45/1	0	19	0	0	0	0	1	1	67

Year	United States		Soviet Union		United Kingdom		France		China		Total
	A	U	A	U	A	U	A	U	A	U	
	<i>A = atmospheric; U = underground</i>										
1970	0	38/1	0	16	0	0	8	0	1	0	64
1971	0	23/1	0	23	0	0	5	0	1	0	53
1972	0	27	0	24	0	0	3/1	0	2	0	57
1973	0	23/1	0	17	0	0	5/1	0	1	0	48
1974	0	22	0	21	0	1	7/2	0	1	0	54
1975	0	22	0	19	0	0	0	2	0	1	44
1976	0	20	0	21	0	1	0	4/1	3	1	51
1977	0	20	0	24	0	0	0	7/2	1	0	54
1978	0	19	0	31	0	2	0	10/1	2	1	66
1979	0	15	0	31	0	1	0	10	1	0	58
1980	0	14	0	24	0	3	0	11/1	1	0	54
1981	0	16	0	21	0	1	0	12	0	0	50
1982	0	18	0	19	0	1	0	9/1	0	1	49
1983	0	18	0	25	0	1	0	9	0	2	55
1984	0	18	0	27	0	2	0	8	0	2	57
1985	0	17	0	10	0	1	0	8	0	0	36
1986	0	14	0	0	0	1	0	8	0	0	23
1987	0	14	0	23	0	1	0	8	0	1	47
1988	0	15	0	16	0	0	0	8	0	1	40
1989	0	11	0	7	0	1	0	8/1	0	0	28
1990	0	8	0	1	0	1	0	6	0	2	18
1991	0	7	0	0	0	1	0	6	0	0	14
1992	0	6	0	0	0	0	0	0	0	2	8
1993	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
1994	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
1995	0	0	0	0	0	0	0	5	0	2	7
1996	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	3
Total	215	815	219	496	21	24	50	160	23	22	2046#
	1030	715			45		210		45		

* Number after / beginning in 1961 in the U.S. column represents PNEs. In the French column number after / represents safety tests.

** All UK underground tests were conducted in the U.S.

Grand total includes one underground explosion by India conducted on May 18, 1974. No tests by these nations occurred from 1997-2002. For Indian and Pakistani tests see [accompanying table](#).

Table of Indian and Pakistani Nuclear Tests, 1974-2002

India			
Date			
May 18, 1974	02:34:55	27.095 N 71.752 E	2-5 kt
May 11, 1998	10:13:42	27.102 N 71.857 E	12 kt*
May 11, 1998	10:13	?	? *
May 13, 1998	06:51	?	? **
Local time is 5 and one-half hours later than GMT			
* The Indian government announced that three nuclear devices were detonated simultaneously in two shafts, about one kilometer apart. We count this as two tests.			
** Seismic records do not discriminate the explosions of two devices (announced by Indian scientists as being 0.2 kt and 0.6 kt), one or both of which may not have detonated.			

Pakistan			
Date			
May 28, 1998	10:16:15	28.862 N 64.818 E	9-12 kt#
May 30, 1998	06:54:55	28.487 N 63:787 E	5 kt
Local time is 5 hours later than GMT			
# Pakistani officials announced that five nuclear devices were tested. Seismic records do not discriminate these and possibly only one device was detonated.			