ΑΝΩΤΑΤΗ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΕΜΟΥ
Έδρα Ειδικών Όπλων & Ειδικών Επιχειρήσεων

ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΟΠΛΩΝ

Prof. Kosta Tsipis
Διευθυντής του Προγράμματος Επιστήμης
και Τεχνολογίας για τη Διεθνή Ασφάλεια
του Τεχνολογικού Ινστιτούτου Μασαχουσέτης (MIT)

Μετάφραση-Επιμέλεια
Θεόδωρος Ε.Λιόλιος, DipEngL.,B.Sc.,Ph.D.
Καθηγητής Ανωτάτης Σχολής Πολέμου.

www.ArmsControl.gr

Θεσσαλονίκη 1999

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

I.Πρόλογος του συγγραφέα
II. Πρόλογος της ελληνικής έκδοσης
III.Εισαγωγή: Ο σκοπός αυτού του βιβλίου και σύντομη ιστορική αναδρομή της εξέλιξης των πυρηνικών όπλων.

1. Μελέτη της πυρηνικής σχάσης
   1.1 Η καμπύλη της ενέργειας σύνδεσης
   1.2 Η σχάση των πυρήνων U^{235} και Pu^{239}
   1.3 Η αλυσιδωτή αντίδραση

2. Μελέτη της πυρηνικής σύντηξης
   2.1 Η καμπύλη ενέργειας σύνδεσης για μικρά Α
   2.2 Διαπερνώντας το φράγμα Coulomb

3. Μελέτη των πυρηνικών κεφαλών
   3.1 Η βόμβα σχάσης: Πρώτη γενιά
   3.2 Η βόμβα σύντηξης: Δεύτερη γενιά

4. Μελέτη των ενδοατμοσφαιρικών εκρήξεων
   4.1 Η πύρινη σφαίρα
   4.2 Άμεση και καθυστερημένη ραδιενέργεια
   4.3 Θερμική ακτινοβολία
   4.4 Φαινόμενα εναέριας έκρηξης

5. Μελέτη των εξωατμοσφαιρικών εκρήξεων
   5.1 Ακτίνες γάμα και ηλεκτρόνια Compton
   5.2 Ο Ηλεκτρομαγνητικός παλμός

6. Μελέτη των υπόγειων εκρήξεων: Πυρηνικές δοκιμές
   6.1 Η ανάγκη για πυρηνικές δοκιμές
   6.2 Μέθοδοι εντοπισμού ατμοσφαιρικών πυρηνικών δοκιμών
   6.3 Εντοπισμός υπογείων πυρηνικών δοκιμών

Επίλογος

www.ArmsControl.gr

I. ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Για πολλούς επιστήμονες που κατ'αρχάς εργάσθηκαν για να αναπτύξουν πυρηνικά όπλα και ύστερα αφιέρωσαν τις καριέρες τους στην προσπάθεια να αποκλείσουν τη χρήση και να περιορίσουν την εξάπλωσή τους , το τέλος του ψυχρού πολέμου ήταν ένα ελπιδοφόρο γεγονός που υπόσχονταν το τέλος του πυρηνικού ανταγωνισμού και την εξαφάνιση του φάσματος της πυρηνικής καταστροφής .
Πράγματι , οι μεγάλες πυρηνικές δυνάμεις μείωσαν σημαντικά τα πυρηνικά τους οπλοστάσια και απέσυραν το δάκτυλο απ'την πυρηνική σκανδάλη.
Δυστυχώς όμως η πιθανότητα πυρηνικής σύρραξης μεταξύ μικρότερων χωρών η και επεισοδίων πυρηνικής τρομοκρατίας δεν μειώθηκε. Τουναντίον, αναπτυσσόμενες χώρες όπως το Ιράν η Ινδία , το Πακιστάν, το Ιράκ βρίσκονται ήδη σε διάφορα στάδια πυρηνικής αυτάρκειας. Καθ'έξην επιθετικές χώρες όπως η Τουρκία θα μπορούσαν στο μέλλον να στραφούν στους πυρηνικούς εξοπλισμούς ώστε η στρατιωτική τους ισχύ να μην περιοριστεί από την κατοχή πυρηνικών όπλων από ανταγωνιστές όπως το Ιράν.
Υπ' αυτές τις δυνατές εξελίξεις είναι νομίζω σώφρον μέλλοντες στρατιωτικοί και πολιτικοί ηγέτες στην Ελλάδα να αποκτήσουν σχετική οικειότητα με τις αρχές λειτουργίας και τα αποτελέσματα χρήσης πυρηνικών όπλων . Το σύντομο τούτο εγχειρίδιο αποβλέπει να δώσει την ευκαιρία στους αποφασίζοντες και πληροφορούντες στην ελληνική κοινωνία να οικειοποιηθούν ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά των πυρηνικών όπλων και της χρήσης τους.
Οι εξισώσεις που περιέχει το κείμενο δεν πρέπει να τρομάζουν τους αναγνώστες .Ως επί το πλείστον είναι απλή άλγεβρα που όλοι μάθαμε στο Γυμνάσιο.

Κώστας Τσίπης

www.ArmsControl.gr

ΙΙ. ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΕΚΔΟΣΗΣ

Ο καθηγητής Κώστας Τσίπης γεννήθηκε το 1934 στην Αθήνα. Σπούδασε στις ΗΠΑ όπου πήρε M.Sc. στην Ατομική Φυσική (πανεπιστήμιο Rutgers) και Ph.D. στις υψηλές ενέργειες (πανεπιστήμιο Columbia). Έχει γράψει πλήθος επιστημονικών άρθρων και αναλύσεων και περίπου 15 βιβλία. Οι μελέτες του επικεντρώνονται στις επιπτώσεις και τον έλεγχο των πυρηνικών όπλων και του πυρηνικού πολέμου, των όπλων υψηλής ενέργειας και των βαλλιστικών πυραύλων. Έχει εργασθεί σκληρά στον τομέα του πυρηνικού αφοπλισμού και της διεθνούς ασφάλειας. Είναι μέλος σε ένα μεγάλο αριθμό επιστημονικών εταιριών και βραβεύθηκε με το βραβείο Szilard για την προσφορά του στον έλεγχο των πυρηνικών όπλων. Είναι Διευθυντής του Προγράμματος Επιστήμης και Τεχνολογίας για τη Διεθνή Ασφάλεια στο MIT των ΗΠΑ.

Ο καθηγητής Κώστας Τσίπης με βοήθησε στα πρώτα μου βήματα στον χώρο της άμυνας των ειδικών όπλων και με ιδιαίτερη χαρά παραδίδω αυτές τις σημειώσεις στους σπουδαστές της ΑΣΠ. Ελπίζω οι σημειώσεις αυτές να αποτελέσουν το πρόπλασμα για τη συγγραφή ενός ολοκληρωμένου επιστημονικού συγγράμματος για τα ειδικά όπλα στην ΑΣΠ.

Θεόδωρος Ε. Λιόλιος
Καθηγητής ΑΣΠ

www.Armscontrol.gr

ΙΙΙ.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σκοπός αυτού του βιβλίου

Τα πυρηνικά όπλα είναι μια φοβερή καινοτομία που γεννήθηκε κατά τη διάρκεια του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου αλλά η προέλευσή τους

πηγάζει από τις πειραματικές παρατηρήσεις του Ernest Rutherford μισό αιώνα νωρίτερα.

Τα πυρηνικά όπλα είναι εκρηκτικές συσκευές που εκλύουν ενέργεια περίπου ένα εκατομμύριο φορές περισσότερη από χημικά εκρηκτικά του ίδιου βάρους. Η πηγή αυτής της σημαντικής διαφοράς είναι ότι τα πυρηνικά όπλα αντλούν ενέργεια από την ισχυρή δύναμη της Φύσης. Αυτό το εγχειρίδιο περιγράφει την ιστορία της ανακάλυψης αυτής της δύναμης και την κατοπινή δημιουργία των πυρηνικών εκρηκτικών που βασίστηκαν στη σχάση των βαρέων πυρήνων και τη σύντηξη των ελαφρών πυρήνων.

Αυτό το εγχειρίδιο περιγράφει σύντομα την ιστορία της κατασκευής των πυρηνικών όπλων ως άμεση συνέπεια των επιστημονικών προόδων στην κατανόηση των ιδιοτήτων της ισχυρής (πυρηνικής) δύναμης, της στοιχειώδους δομής του ατομικού πυρήνα και την κβαντομηχανική φύση της συμπεριφοράς των στοιχειωδών σωματιδίων. Στη συνέχεια μελετάει τη φυσική βάση της πυρηνικής σχάσης και σύντηξης, καθώς και των εφαρμογών αυτών στη δημιουργία ακόμα πιο ανεπτυγμένων, ισχυρών και εύκολα μεταφερόμενων πυρηνικών κεφαλών. Επίσης περιγράφονται τα φυσικά φαινόμενα που συνοδεύουν μια πυρηνική έκρηξη στην ατμόσφαιρα, στο Διάστημα και κάτω από την επιφάνεια της Γης καθώς και τα αποτελέσματά τους στα ανθρώπινα όντα, στις κατοικίες τους και στο συνολικό περιβάλλον της Γης.

Στο εγχειρίδιο αυτό αποφεύγεται κάθε συζήτηση των φορέων των πυρηνικών κεφαλών : βομβαρδιστικά, βαλλιστικοί πύραυλοι και πύραυλοι Cruise αφού οι αρχές λειτουργίας τους δε σχετίζονται με τη Φυσική των πυρηνικών αντιδράσεων .
Για τον ίδιο λόγο δεν αναλύεται ούτε η ιστορία και τα αποτελέσματα των προσπαθειών ελέγχου των πυρηνικών όπλων κατά τη διάρκεια του ψυχρού πολέμου αλλά ούτε και το όλο θέμα της εξάπλωσης των. Επίσης αποφεύγεται κάθε συζήτηση της Φυσικής των απλών πρωτόγονων τρομοκρατικών πυρηνικών συσκευών.

Σύντομη ιστορία των πυρηνικών όπλων.

Το 1989 ο Rutherford βρήκε ότι το ουράνιο εξέπεμπε δύο διαφορετικά σωματίδια τα οποία ονόμασε α και β. Πέντε χρόνια αργότερα έκανε την πρωτογενή 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

www.ArmsControl.gr

επειδή η καινούρια αυτή δύναμη εξέλυε ενέργεια περίπου ένα εκατομμύριο φορές περισσότερη από τις κανονικές χημικές αντιδράσεις την ονόμασε "ισχυρή" δύναμη.

Ένα χρόνο αργότερα, το 1904, ο φοιτητής και συνεργάτης του Rutheford Frederick Soddy, είπε σε μια συγκέντρωση μηχανικών:
"Είναι πιθανό ότι κάθε βαριά ύλη περιέχει… ίδια ποσότητα ενέργειας (μ'αυτή του Ουρανίου)…Ο άνθρωπος που θα βάλει το χέρι του στο μοχλό με τον οποίο η φειδωλή φύση ελέγχει την έκλυση αυτού του αποθέματος ενέργειας, θα έχει στην κατοχή του ένα όπλο με το οποίο θα μπορούσε να καταστρέψει τη γη αν το ήθελε".

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 αναπτυχθεί ο μοχλός του Soddy.
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 είχε προβλέψει ο Soddy.

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 εκβάλει 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 ίσο (ή μεγαλύτερο) αριθμό νετρονίων. Όλα αυτά τα σωματίδια αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με την ισχυρή (πυρηνική) δύναμη η οποία, μέσα στην εμβέλειά της $\left(2-3\times10^{-13}cm\right)$ είναι ελκτική και περίπου 10^3

www.AmsControl.gr

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 Δεκέμβρη 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. Την εβδομάδα των Χριστουγέννων του 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. Το 1934 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. Ο μοχλός που είχε φανταστεί ο Soddy για την απελευθέρωση της ενέργειας εντός του πυρήνα έγινε εμφανής: Μια αυτοσυντηρούμενη αλυσιδωτή αντίδραση σε μία μάζα Ουρανίου κατά τη διάρκεια της οποίας δύο ή περισσότερα

www.ArmsControl.gr

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 η 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:

$$\sigma = \frac{\text{Αριθμός γεγονότων ορισμένου τύπου ανά μονάδα χρόνου και ανά πυρήνα}}{\text{Αριθμός προσπιπτόντων σωματιδίων ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας}}$$

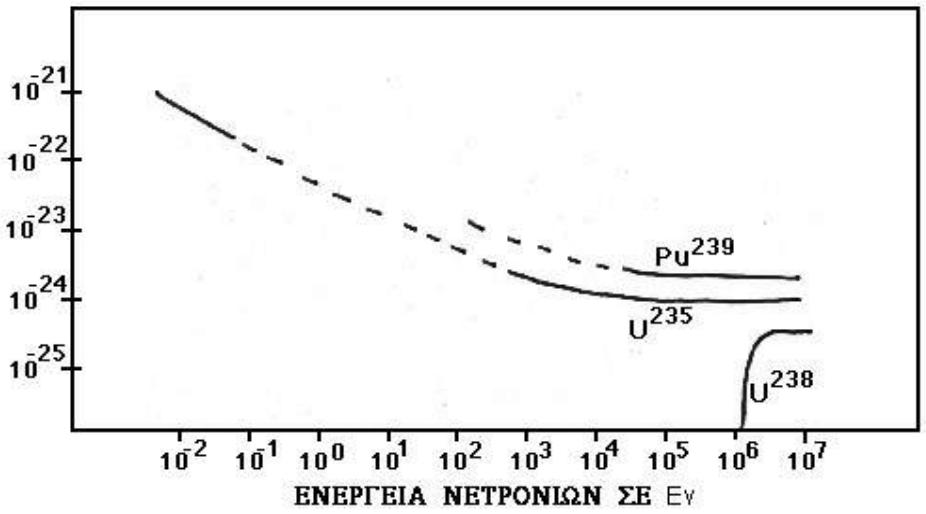
Με δεδομένες τις ενεργές διατομές της σύλληψης σκέδασης, σχάσης ή απλής διαφυγής νετρονίων από ένα πυρήνα, υπάρχει μια ποσότητα μάζας αρκετά μεγάλη ώστε να συντηρήσει μία αλυσιδωτή αντίδραση. Αυτή η ποσότητα ονομάζεται "κρίσιμη μάζα". Οποιαδήποτε μικρότερη ποσότητα δεν θα εκραγεί. Οποιαδήποτε μεγαλύτερη 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 μεγάλος 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.1 φαίνεται ότι πράγματι το U^{238} δεν σχάται από νετρόνια χαμηλής ενέργειας. Νωρίς 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.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.

1. Μελέτη της Πυρηνικής σχάσης: η πηγή της ενέργειας

1.1.Η καμπύλη της ενέργειας σύνδεσης

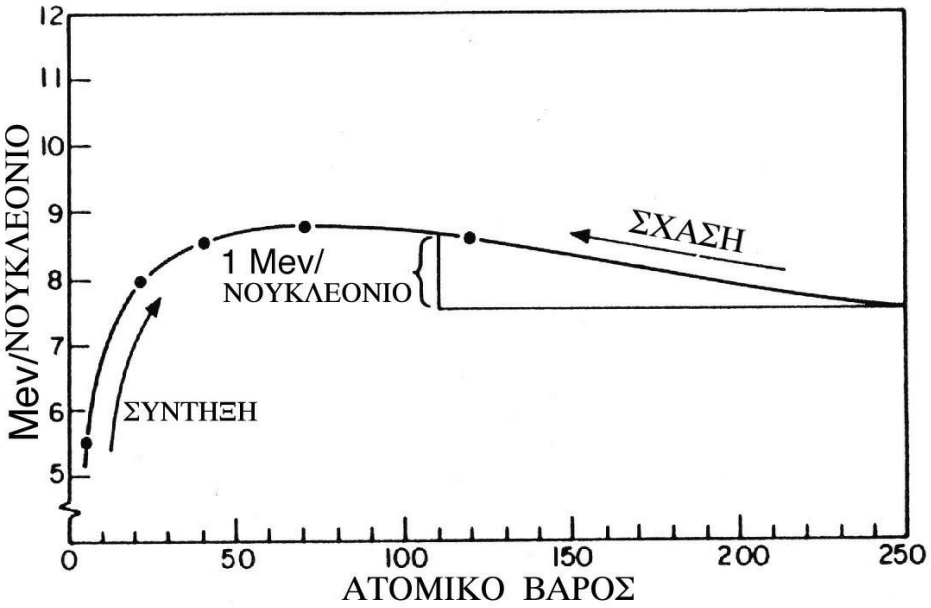
Το 1927 ο Βρετανός Φυσικός W.R.Aston δημοσίευσε ακριβείς μετρήσεις ατομικών βαρών που έδειχναν ότι το βάρος του πυρήνα είναι μικρότερο από το άθροισμα των βαρών των πρωτονίων και των νετρονίων που τον αποτελούν:

$$M_{nucleus} = ZM_{proton} + (A - Z)M_{neutron} - \delta M \qquad (1)$$

όπου Z είναι ο αριθμός των πρωτονίων του πυρήνα (Ατομικός αριθμός), Α 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: $E_{binding} = \delta Mc^2$.Αν διαιρέσουμε την ποσότητα $E_{binding}$ με τον αριθμό Α, το ατομικό βάρος του πυρήνα θα έχουμε $f = E_{binding} / A$ την ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο. Όπως δείχνει το σχ.2, η f μεταβάλλεται αργά με το Α. Αυτό δείχνει ότι η εμβέλεια της πυρηνικής δύναμης είναι πολύ περιορισμένη. Η f γίνεται μέγιστη για πυρήνες μεταξύ Α=20 και Α=140 αλλά ελαττώνεται καθώς το Α 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.

www.ArmsControl.gr



Σχ.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 Α και αφού η ηλεκτροστατική άπωση αντιτάσσεται στη συνδετική δράση της πυρηνικής δύναμης η ολική ενέργεια σύνδεσης μειώνεται για μεγάλα Α: Τα νουκλεόνια μέσα σε ένα πυρήνα Ουρανίου με Α=238 (ή Πλουτωνίου με Α=239) έχουν χαλαρότερη σύνδεση, ας πούμε, από ότι έχουν σε ένα πυρήνα σιδήρου με Α=56 η για να πούμε το ίδιο πράγμα διαφορετικά , τα νουκλεόνια μέσα σε ένα πυρήνα Ουρανίου η 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 Α 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 Me ενέργειας (δες σχ.2). Έτσι η ολική ενέργεια που απελευθερώνεται από έναν πυρήνα Πλουτωνίου (Α=239) που διασπάται σε δύο θραύσματα με Z=50 και Z=44 αντίστοιχα, θα είναι

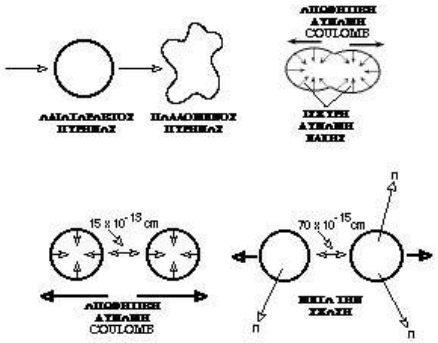
$239 \times (8{,}5 - 7{,}6) = 216\,MeV$ (δες σχ.2 για την πηγή των αριθμών στην παρένθεση).

Αυτή είναι η ενέργεια που εκλύεται από τη σχάση κάθε πυρήνα Πλουτωνίου είναι πραγματικά πολύ μικρή $\left(9 \times 10^{-12}\,calories\right)$, 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 $22.5 \times 10^{9}\,calories$.
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.

1.2 Η σχάση ενός πυρήνα U^{235}: Τα πρώτα 10^{-18} δευτερόλεπτα

Τι ακριβώς συμβαίνει μέσα στα πρώτα 10^{-18} δευτερόλεπτα μετά την πρόσκρουση ενός νετρονίου πάνω σε έναν πυρήνα Ουρανίου και με ποια μορφή η εκλυόμενη ενέργεια διαφεύγει από τον πυρήνα ;

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 σχεδόν σφαιρική μορφή με ακτίνα μερικών 10^{-12} cm (πρώτη εικόνα του σχ.3). 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.



Σχ.3. Οι φάσεις της σχάσης

www.ArmsControl.gr

Η απορρόφηση ενός νετρονίου παρέχει 5,5 MeV στον πυρήνα ανεξάρτητα από την κινητική ενέργεια του νετρονίου-ένα είδος αποπληρωμής της ενέργειας διαχωρισμού.

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 7,5MeV (εικόνα 2 του σχ.3) 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 (εικ.c ,σχ.3) 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 (εικ.d, σχ.3).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 :

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

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.

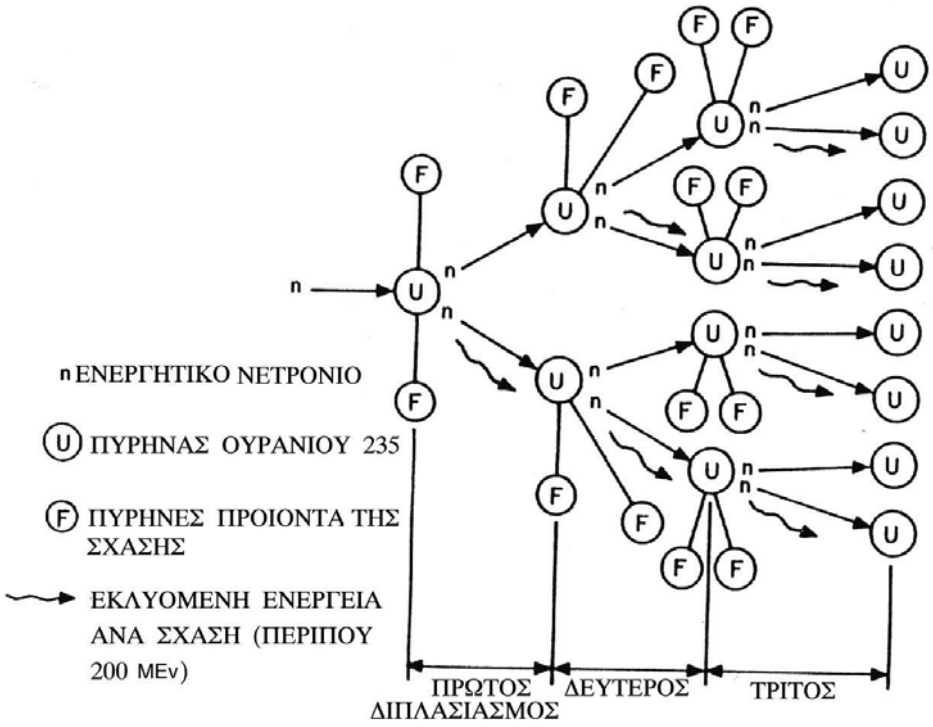
Αυτά τα νετρόνια έχουν μία Maxwellian κατανομή ενεργειών με μέγιστο στα 2 MeV. Έτσι κάθε νετρόνιο αφαιρεί περίπου 10 MeV από τα θραύσματα (περίπου 8 MeV ενέργεια διαχωρισμού και 2 MeV κινητική ενέργεια). Τα δύο θραύσματα μπορεί να είναι ακόμα σε διεγερμένη κατάσταση, κι όταν δε μπορούν να αποδιεγερθούν 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

www.ArmsControl.gr

εκπέμπουν ακτίνες βήτα (ηλεκτρόνια) και νετρίνο καθώς κάποια από τα διεγερμένα νετρόνια μετατρέπονται σε πρωτόνια.

1.3 Η αλυσιδωτή αντίδραση

Ας εξετάσουμε τώρα τον μηχανισμό αλυσιδωτής αντίδρασης που 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.4 δείχνει την αρχή της αλυσιδωτής αντίδρασης.



Σχ.4. Η 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, i.e. 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. Άρα $\tau = \dfrac{3cm}{3\cdot 10^9 \dfrac{cm}{\sec}} = 10^{-9}\sec$.

Δηλαδή ο χρόνος τ είναι περίπου ένα nanosecond. Συνεπώς 84 διπλασιασμοί θα ολοκληρωθούν σε 84 nanoseconds, πολύ λιγότερο από ένα εκατομμυριοστό του δευτερολέπτου. Πόση ενέργεια θα εκλυόταν εάν όλοι οι πυρήνες των 10Kgr του Pu^{239} σχώνταν ; Αφού κάθε πυρήνας εκλύει περίπου 220MeV το σύνολο θα ήταν $\left(\dfrac{10.000gr}{240gr}\right)\times 6\cdot 10^{23}\times 220\,MeV = 5.5\cdot 10^{27}\,MeV$ 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

www.Amsc.gr

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 $5{,}5\cdot 10^{27}$ MeV ή $8{,}8\cdot 10^{21}$ ergs.Στο τέλος της διαδικασίας της σχάσης όλη αυτή η ενέργεια περιέχεται σε έναν όγκο περίπου $\frac{10.000}{15} = 660 cm^3$, τον αρχικό δηλαδή όγκο της σφαίρας Pu^{239} αφού η πυκνότητα του Pu^{239} είναι $\rho = 15 gr/cm^3$.Άρα η πυκνότητα ενέργειας (ε) της σφαίρας του σχασμένου υλικού πριν τη διαστολή είναι $\varepsilon = 8{,}8\cdot 10^{21} ergs/660 cm^3$ ή αλλιώς $\varepsilon = 1{,}3\cdot 10^{19} erg/cm^3$. 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 $C_R = 7.6\cdot 10^{-15}$
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 $T \approx 10^8 K$.

Αφού η μάζα του Pu^{239} δεν έχει ακόμα διασταλεί, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η αύξηση της πίεσης θα είναι ανάλογη της αύξησης της Τ 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. Αυτοί είναι ιδανικοί αριθμοί που χρησιμοποιούνται εδώ για να εκφράσουν τις τάξεις μεγέθους που χαρακτηρίζουν τις παραμέτρους μίας πυρηνικής αλυσιδωτής αντίδρασης. Θα συναντήσουμε πραγματικούς

www.ArmsControl.gr

αριθμούς στην περιγραφή συγκεκριμένων πυρηνικών όπλων που ακολουθεί.

2. Μελέτη της πυρηνικής σύντηξης

2.1 Η καμπύλη ενέργειας σύνδεσης για μικρά Α

Ενώ η ελάττωση της ενέργειας σύνδεσης ανά νουκλεόνιο για μεγάλους αριθμούς Α (δες σχ.2) οφείλεται στην ηλεκτροστατική άπωση των πρωτονίων στον πυρήνα, η απότομη ελάττωση του $f = E_{binding} / A$ για μικρά Α 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 πίνακα 1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.

Στοιχείο	Ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο
$_1D^2$	1,1 MeV
$_1T^3$	2,8 MeV
$_2He^4$	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 Α συνεπάγεται ότι η ανά νουκλεόνιο έκλυση ενέργειας στη σύντηξη θα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της σχάσης.
Πραγματικά ας θεωρήσουμε τις αντιδράσεις:

$$_1D^2 + _1T^3 \rightarrow _2He^4 + _0n^1$$

και $$n + U^{235} \rightarrow Kr^{92} + Xe^{142} + 2n \quad .$$

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

$$_1D^2 \quad + \quad _1T^3 \quad \rightarrow \quad _2He^4 \quad + \quad \text{n}$$

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

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

Άρα η ενέργεια που εκλύεται ανά νουκλεόνιο $= \frac{17}{5} = 3.4\,MeV$.

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

www.Armscontrol.gr

Στη διαδικασία σχάσης, οι αντίστοιχες ενέργειες είναι:

$$n + U^{235} \rightarrow Kr^{92} + X^{142} + 2n$$

$$7{,}5 \cdot 235\,MeV \rightarrow 92 \cdot 8{,}6\,MeV + 142 \cdot 8{,}3\,MeV$$

Η διαφορά είναι $\Delta E = 207\,MeV$

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

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 femptometer = 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.

2.2 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 ισοτόπων 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:

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

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

www.ArmsControl.gr

0,3MeV 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:

$$\sigma(E_F) = \frac{C}{E_F}\exp\left[\frac{-27.4\,M^{\frac{1}{2}}Z_1Z_2e^2}{hE_F^{1/2}}\right]$$

Άρα λοιπόν στην περίπτωση της ενεργού διατομής D,T:

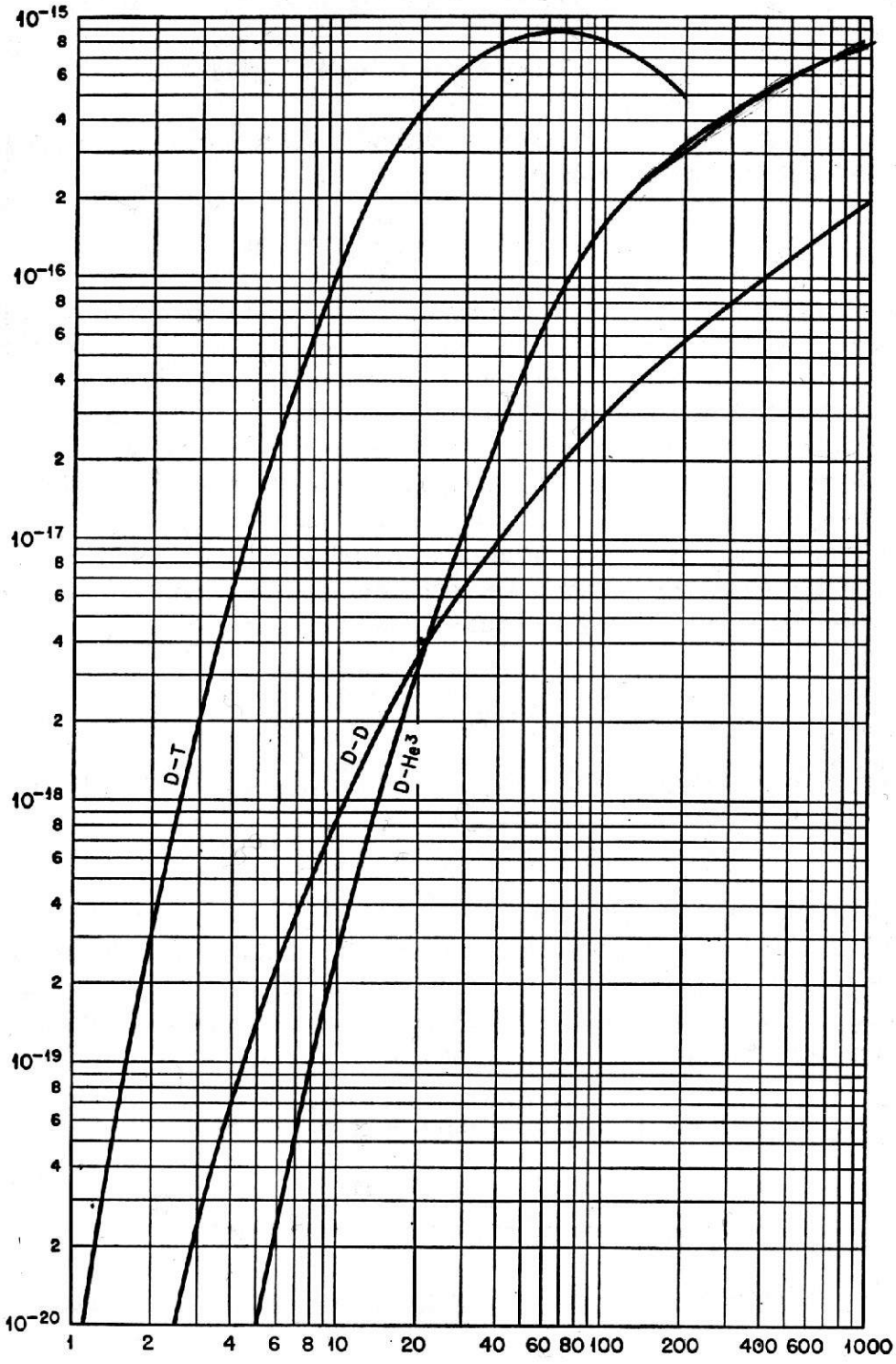
$$\sigma_{DT}(E_F) \approx \frac{C}{E_F}\exp\left[-22\frac{e^2}{hE_F^{1/2}}\right]$$

όπου C μία σταθερά, E_F η σχετική ενέργεια των πυρήνων, M η ανηγμένη μάζα $M = \frac{M_1M_2}{M_1+M_2}$ και h η σταθερά του Planck, $h \approx 6{,}6\cdot 10^{-27}\,erg\cdot\sec$.

Η σχέση αυτή υποδεικνύει μερικά πράγματα: Πρώτον ότι η ενεργός διατομή είναι πεπερασμένη για ενέργειες κάτω, αλλά πλησίον του φράγματος Coulomb.Δεύτερον, ότι αυξάνεται απότομα ως συνάρτηση της E_F και τρίτον ότι 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.5).

www.ArmsControl.gr



Σχ.5. Η ενεργός διατομή των αντιδράσεων σύντηξης

Συνηθίζεται στις αντιδράσεις σύντηξης να εκφράζουμε την κινητική ενέργεια των αντιδρώντων σωματιδίων σε μονάδες θερμοκρασίας. Αφού

η σταθερά Boltzmann είναι: $1.4 \cdot 10^{-16} erg / {}^0K$ και ένα KeV είναι $1.6 \cdot 10^7 ergs$ συνεπάγεται ότι $1KeV = 1.16 \cdot 10^7$ βαθμούς Kelvin.

Βλέπουμε λοιπόν ότι οι πυρήνες D και T θα έπρεπε να έχουν θερμοκρασίες περίπου 10^9 ^{0}K για να συντηχθούν 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 πρακτικού όπλου σύντηξης (θερμοπυρηνικού) είναι ότι τα υλικά D και T είναι αέρια υπό κανονικές συνθήκες. Καθώς όμως, όπως θα δούμε, 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 δύσχρηστα 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:

$$_0n^1 + {}_3Li^6 \rightarrow {}_2He^4 + {}_1T^3 + 4.6MeV$$

Από τα 4,6MeV τα 2,7MeV αποδίδονται στο $_1T^3$ και τα 2MeV στο $_2He^4$.
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.

3. Μελέτη των πυρηνικών κεφαλών

3.1 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. Το έργο αυτό φαίνεται απατηλά απλό. Για να καθορίσουν την κρίσιμη μάζα, οι επιστήμονες έπρεπε να μετρήσουν με ακρίβεια τις

www.ArmsControl.gr

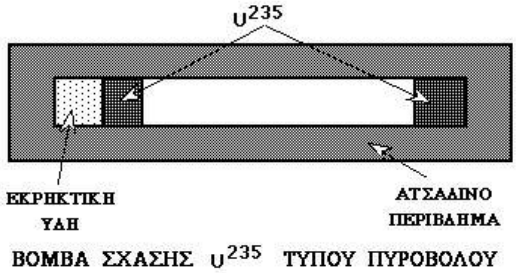
ενεργές διατομές των διαφόρων αντιδράσεων που υφίστανται τα νετρόνια με τους πυρήνες U^{235} και Pu^{239}. Όμως κανένα από αυτά τα υλικά δεν είναι διαθέσιμα στη φύση. Το Pu^{239} πρέπει να παραχθεί σε πυρηνικούς αντιδραστήρες με τον βομβαρδισμό πυρήνων U^{238} με νετρόνια. Το παραγόμενο ${}_{92}U^{239}$ ταχύτατα μετατρέπεται σε Ποσειδώνιο:

${}_{92}U^{239} \rightarrow e + {}_{93}Np^{239}$ εκπέμποντας ένα ηλεκτρόνιο.

Κατόπιν, το Ποσειδώνιο μετατρέπεται σε Πλουτώνιο με την εκπομπή ενός ή περισσότερων ηλεκτρονίων ${}_{93}Np^{239} \rightarrow e + {}_{94}Pu^{239}$

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 ισοτόπων: ${}_{94}Pu^{239}$, ${}_{94}Pu^{240}$, ${}_{94}Pu^{241}$.

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. Ήταν ο δεύτερος παγκόσμιος πόλεμος που 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.



ΒΟΜΒΑ ΣΧΑΣΗΣ U^{235} ΤΥΠΟΥ ΠΥΡΟΒΟΛΟΥ

Σχ.6α. Η διάταξη θαλάμης

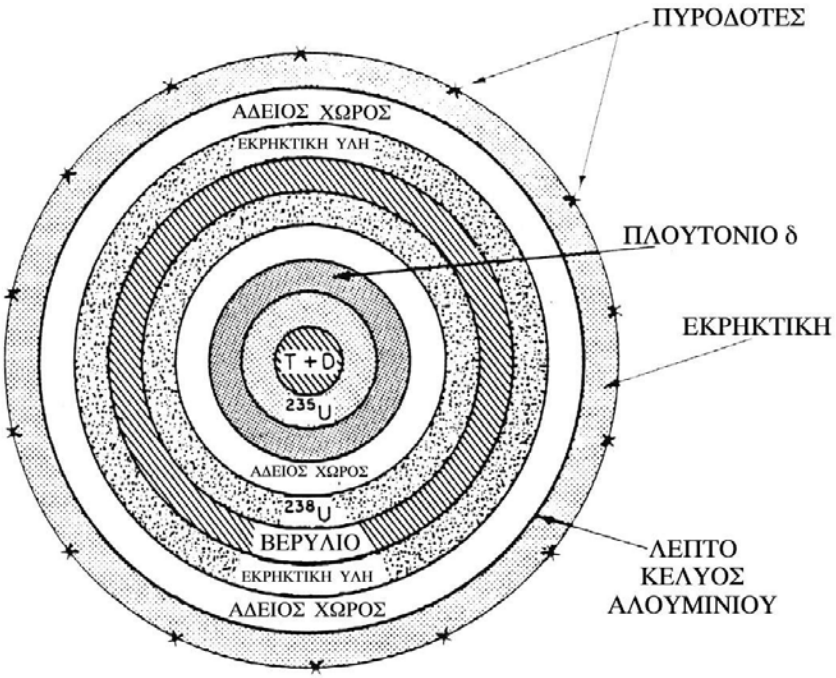
Η διαδικασία η οποία προκαλεί μία πυρηνική έκρηξη σε βόμβα Ουρανίου $_{92}U^{235}$ είναι σχετικά απλή: Δύο υποκρίσιμες μάζες καθαρού $_{92}U^{235}$, που στο σύνολό τους όμως αποτελούν περισσότερο από μια κρίσιμη μάζα όταν ενωθούν, ωθούνται ταχύτατα από μία χημική έκρηξη και συγκρούονται μέσα σε ένα ισχυρό κύλινδρο (σχ.6) ,για παράδειγμα μία θαλάμη κανονιού. Στην κατάλληλη χρονική στιγμή, η υπερκρίσιμη μάζα $_{92}U^{235}$ βομβαρδίζεται με νετρόνια από μια ηλεκτρονική 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 $14 \cdot 10^{12}\, calories \left(5{,}8 \cdot 10^{13}\, joules\right)$. Τα πρώτα πυρηνικά όπλα ήταν περίπου κατά 20% αποδοτικά δηλαδή μόνο το ένα πέμπτο των πυρήνων $_{92}U^{235}$ του υλικού σχώνταν.
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 $_{94}Pu^{240}$ 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

www.ArmsControl.gr

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 λιβρών ανά τετραγωνική ίντσα της επιφάνειας της σφαίρας, ελαττώνοντας έτσι τον όγκο της και καθιστώντας την υπερκρίσιμη.



Σχ.6β. Η διάταξη ενισχυμένης σχάσης

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. Το σχ.6,Εικ.b, επιδεικνύει μία τέτοια "ενισχυμένη" βόμβα σχάσης. Αυτή η βελτιωμένη βόμβα σχάσης αποτελείται από διάφορα διαδοχικά στρώματα υλικών. Το $_{92}U^{235}$ και το $_{94}Pu^{239}$ είναι τα ενεργά υλικά που σχώνται και παράγουν την απαιτούμενη ενέργεια. Σε κανονικές πυκνότητες (το Πλουτώνιο φάσης δ έχει πυκνότητα 15,9gr/cm^3 ενώ το εμπλουτισμένο Ουράνιο-235 (98%) έχει 18,9gr/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 υψηλότατη 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 $_{94}Pu^{239}$ και $_{92}U^{235}$ 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%.

3.2 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-Χ, και έναν κύλινδρο Li^6D που περιβάλλεται από ένα μανδύα ενός υλικού με μεγάλο ειδικό βάρος (πχ Χρυσό η 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} (δες σχ.7).

Όταν πυροδοτηθεί η εκρηκτική διάταξη σχάσης αποτελεί έντονη πηγή ακτίνων-Χ 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 (circa 1-2MeV) που εκπέμπονται από αυτή τη σχάση διασπούν 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 ${}_2He^4$ των 3.5MeV που προστίθενται στους πυρήνες ${}_2He^4$ των 2MeV που δημιουργούνται από τη διάσπαση του Li^6. Οι πυρήνες ${}_2He^4$ 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 διασπούν, 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 ${}_{92}U^{238}$ επιβραδύνουν τη διάλυση και αποτελούν επίσης μία πρόσθετη πηγή εκρηκτικής ενέργειας: Ενώ το ${}_{92}U^{238}$ 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 ${}_{92}U^{238}$ ελευθερώνοντας περίπου 220MeV/σχάση.
Η χρήση του ${}_{92}U^{238}$ 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 ${}_{92}U^{238}$ 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 ${}_{92}U^{238}$. 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 είναι παρούσες στα 8,4Kgr του lithium deuteride (Li^6D).

Για να παραχθούν 500 KT ενέργεια, δηλαδή $1{,}3\cdot10^{28}$ MeV από τη σχάση των πυρήνων $_{92}U^{238}$, όταν ο καθένας αποδίδει ενέργεια περίπου 220 MeV, απαιτούνται περίπου $6\cdot10^{25}$ 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 $_{92}U^{238}$ (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 $_{94}Pu^{239}$ 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 $_{92}U^{238}$ 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.

4. Μελέτη των ενδοατμοσφαιρικών Πυρηνικών εκρήξεων

4.1 Η πύρινη σφαίρα

www.Army-Control.gr

Η ενεργειακή απόδοση των πυρηνικών όπλων μπορεί να είναι από ένα κλάσμα ενός ΚΤ (10^{12} cal) 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 $_2He^4$ 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 μπορεί κανείς να υποθέσει με ασφάλεια ότι, 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 ($E_{rad} \approx 10\%$ για έκρηξη 1ΚΤ, $E_{rad} \approx 95\%$ 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, αλλά όχι από το φυσικό περιβάλλον μέσα στο οποίο το όπλο εκρήγνυται.

Αλλά η μορφή με την οποία η ενέργεια εισέρχεται στο περιβάλλον πράγματι 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:

$$\frac{R_1}{Y_1^{1/3}} = \frac{R_2}{Y_2^{1/3}} = \ldots = \frac{R_i}{Y_i^{1/3}}$$

σε κάποιο χρόνο

$$\frac{T_1}{Y_1^{1/3}} = \frac{T_2}{Y_2^{1/3}} = \ldots = \frac{T_i}{Y_i^{1/3}}$$

www.ams.gr

Άρα λοιπόν εάν η υπερπίεση P είναι γνωστή για δεδομένο Y και R, τότε αυτή μπορεί να υπολογιστεί για κάθε απόσταση και απόδοση. Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου θα πραγματευτούμε τα μακροσκοπικά φαινόμενα που προκαλούνται από πυρηνικές εκρήξεις στην ατμόσφαιρα.

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 ^{0}C). Σ'αυτές τις χαμηλές θερμοκρασίες η ακτινοβολούμενη 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-Χ. Αμέσως μετά την έκρηξη, μόνο νετρόνια, ακτίνες-γ και νετρίνο 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-Χ στον αέρα πριν απορροφηθεί (δηλαδή η μέση ελεύθερη διαδρομή) δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda \approx \frac{E^3}{5}(cm)$$

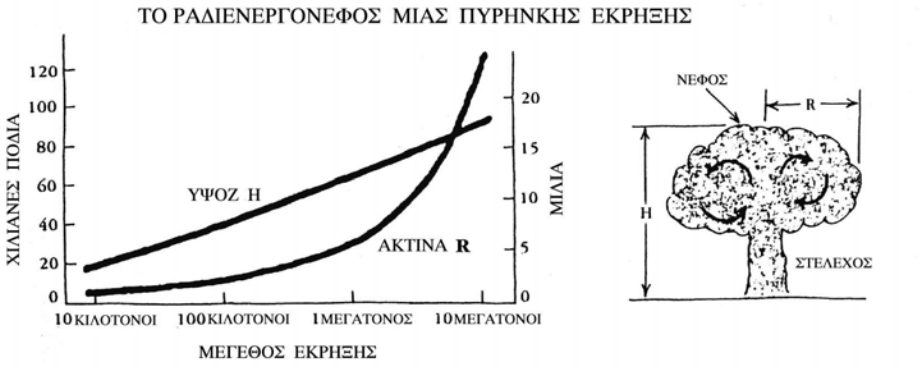
όπου η ενέργεια δίνεται σε KeV. Άρα για τις ακτίνες-Χ που δημιουργούνται από την πυρηνική έκρηξη η μέση ελεύθερη διαδρομή κυμαίνεται από λίγα εκατοστά μέχρι μερικές δεκάδες εκατοστά. Καθώς οι ακτίνες Χ απορροφώνται από το στρώμα αέρος που περιβάλλει άμεσα το σημείο της έκρηξης, ιονίζουν τα άτομα του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

www.armscontrol.gr

σημείο της έκρηξης διαστέλλεται υπερηχητικά. Στα πρώτα περίπου 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 ακτινοβόλος 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.8).

www.ArmsControl.gr



Σχ.8. 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.

4.2 Άμεση και καθυστερημένη πυρηνική ακτινοβολία

Οι δύο κύριοι τύποι των πυρηνικών εκρήξεων στην ατμόσφαιρα είναι η εναέρια και η επιφανειακή έκρηξη. Σε μια εναέρια έκρηξη, το πυρηνικό όπλο πυροδοτείται σε ύψος τέτοιο ώστε να εξασφαλιστεί ότι η πύρινη σφαίρα δεν θα αγγίξει το έδαφος. Αυτό ελαχιστοποιεί τα αποτελέσματα των φαινομένων της άμεσης πυρηνικής ακτινοβολίας, καθώς επίσης και την πρώιμη διασπορά των ραδιενεργών καταλοίπων της πυρηνικής έκρηξης, αφού το νέφος σκόνης που μεταφέρει τα ραδιενεργά νουκλίδια ανεβαίνει γρήγορα στην ανώτερη ατμόσφαιρα, ελαχιστοποιώντας το χρόνο κατά τον οποίο οι άμεσες ακτίνες-γ φτάνουν στο έδαφος χωρίς να υποστούν σημαντική απόσβεση. Αν και η αρχική άμεση πυρηνική ακτινοβολία αντιπροσωπεύει το 3% της ολικής ενέργειας που ελευθερώνεται από το πυρηνικό όπλο, μόνο ένα 1% αυτής διαφεύγει την απορρόφηση από τα θραύσματα του πυρηνικού όπλου και τον περιβάλλοντα αέρα. Το ποσό της άμεσης πυρηνικής ακτινοβολίας που

www.ArmsControl.gr

φτάνει στο έδαφος φθίνει με την απόσταση από το σημείο της έκρηξης πρώτον λόγω γεωμετρικής διασποράς (καθώς απομακρύνεται από τη σημείο της έκρηξης η αρχή διατήρησης της ενέργειας επιβάλλει ότι το ποσό που δέχεται κάθε μονάδα επιφάνειας του εδάφους να είναι αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της απόστασης) και δεύτερον επειδή η ακτινοβολία υφίσταται απορρόφηση καθώς περνάει μέσα από τον αέρα. Συνεπώς η δόση που δέχεται ένας στόχος είναι ανάλογη του $e^{-\mu r}$,όπου r η απόσταση από το σημείο της έκρηξης και μ ένας γραμμικός συντελεστής απόσβεσης μ=ρ/λ, όπου ρ η πυκνότητα αέρα και λ η μέση ελεύθερη διαδρομή των ακτίνων-γ η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την ενέργεια της ακτινοβολίας και το μέσο δια του οποίου διέρχονται. Μία πιο λεπτομερής έκφραση του αριθμού των ακτίνων-γ σε απόσταση r από το σημείο της έκρηξης του πυρηνικού όπλου απόδοσης Y είναι :

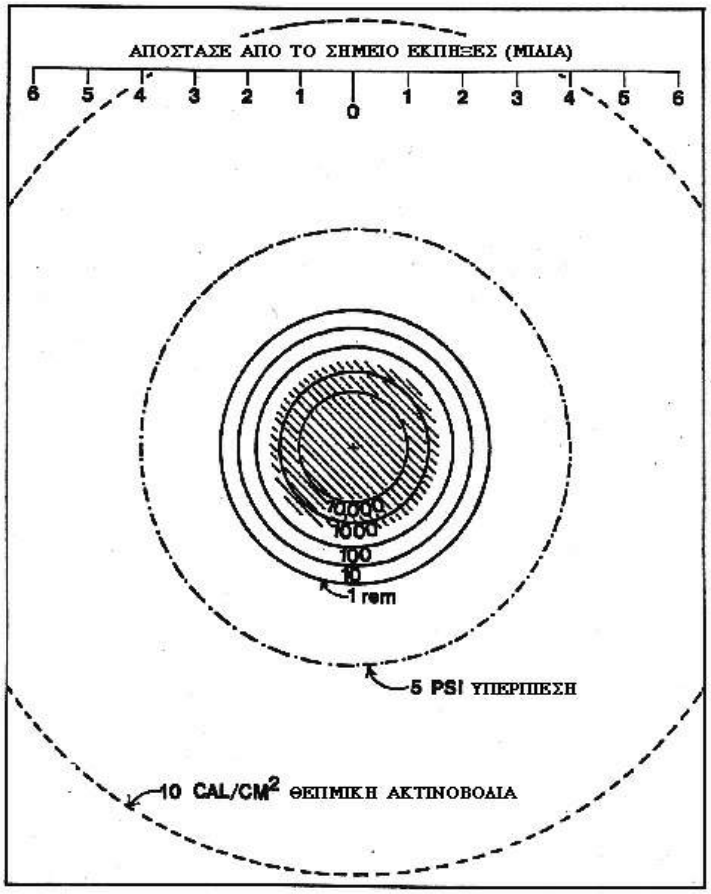
$$N(\gamma) = 3{,}15 \cdot 10^{12} \frac{Y}{r^2} f \exp\left(-\frac{r\rho}{\lambda}\right)(roentgens)$$

όπου Y σε MT, r και λ σε μέτρα και f ένας συντελεστής διόρθωσης

$$f = \left(1 + 6Y^2\right)\left(1 + 3 \cdot 10^{-2} Y^2 + 5 \cdot 10^{-3} Y^3\right)^{-1}$$

Έχουν αναπτυχθεί πολύπλοκα προγράμματα υπολογιστών που συνδυάζουν αυτά τα αποτελέσματα και δίνουν τη συνολική δόση σε μια δεδομένη απόσταση από μια πυρηνική έκρηξη δεδομένης απόδοσης. Μερικά από αυτά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχ.9. Η άμεση πυρηνική ακτινοβολία όμως δεν αναμένεται να προκαλέσει πολύ περισσότερες απώλειες από αυτές που θα προκληθούν άμεσα από το ωστικό κύμα και τη θερμική ακτινοβολία, διότι αυτά τα φαινόμενα είναι άμεσα και σίγουρα θανατηφόρα σ'αυτές τις αποστάσεις που η ακτινοβολία αυτή έχει θανάσιμα αποτελέσματα.

www.Armscontrol.gr



Σχ.9. Οι επιπτώσεις πυρηνικής έκρηξης ισχύος 0,5 ΜΤ σε βέλτιστο ύψος

Στην περίπτωση μιας εναέριας έκρηξης η πύρινη σφαίρα ανέρχεται γρήγορα στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Συνεπώς, πολύ μικρή τοπική διασπορά πυρηνικών καταλοίπων θα υπάρξει εάν οι τοπικές συνθήκες είναι ευνοϊκές. Ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες τα πυρηνικά κατάλοιπα μπορούν να ανέβουν και να εισέλθουν στο σταθερό στρώμα της στρατόσφαιρας όπου μπορούν να παραμείνουν για μήνες πριν ξαναπέσουν στη γη. Επίσης, ανάλογα με το χρόνο που θα παραμείνουν στην ανώτερη τροπόσφαιρα η ραδιενέργεια των υπολειμμάτων αυτών μπορεί να ελαττωθεί με το πέρασμα του χρόνου σημαντικά, ελαττώνοντας έτσι το βιολογικό τους παθογόνο αποτέλεσμα κατά την επιστροφή τους. Αυτή η ραδιενέργεια θα διασκορπιστεί σε μια μεγάλη περιοχή, ελαττώνοντας ακόμη περισσότερο τη πιθανότητα βιολογικής βλάβης.

Ενέργεια σχάσης μισού ΜΤ ισοδυναμεί με $2 \cdot 10^{13}$ Curies ραδιενέργειας τη στιγμή της έκρηξης. Υποθέτοντας μία ομοιόμορφη εναπόθεση των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης σε περιοχή Α, η χρονοεξαρτημένη δόση $\phi(t)$ θα είναι:

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = 6.6 \cdot 10^6 \frac{Y}{A} t^{-\frac{1}{2}} (rem/hr)$$

όπου t ο χρόνος σε ώρες. Τότε η ολική δόση ραδιενέργειας που λαμβάνεται σε χρόνο t μετά την έκρηξη με έναρξη εναπόθεσης τη στιγμή t_1 είναι:

$$\phi(t,t\ ) = \frac{16{,}6 \cdot 10^6}{A} \left(t_1^{-0,2} - t^{-0,2}\right)(rem)$$

Συνήθως θέτουμε $t_1 = 1\min$. Άρα η ολική δόση t ώρες μετά την έκρηξη θα είναι

$$\phi(t) = \frac{16.6 \cdot 10^6}{A}\left(2.26 - t^{-0.2}\right)(rem)$$

όπου Α σε τετραγωνικά χιλιόμετρα.

Δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί χωρίς επιπλέον πληροφορίες το ακριβές επίπεδο ραδιενέργειας σε μια δεδομένη περιοχή, επειδή ο ρυθμός εναπόθεσης εξαρτάται ευαίσθητα από τις καιρικές συνθήκες τόσο στην περιοχή κατά το χρόνο της έκρηξης, όσο και από τη διαδρομή που τα ραδιενεργά υπολείμματα θα ακολουθήσουν καθώς παρασύρονται από τα ρεύματα των τοπικών ανέμων. Κατά μέσο όρο, το σύννεφο των ραδιενεργών υπολειμμάτων που δημιουργείται από εναέρια έκρηξη 0,5ΜΤ θα ανέλθει σε 10-15 km μέχρι την τροπόσφαιρα και, πάλι κατά μέσο όρο, θα παραμείνει στην ατμόσφαιρα για χρόνο από ένα μήνα μέχρι ένα χρόνο. Άρα δεν είναι δυνατόν να υπολογιστεί με ακρίβεια ο τρόπος εναπόθεσης και τα επίπεδα ραδιενέργειας που προκαλούνται από την εκρηκτική έκλυση ενέργειας σχάσης ας πούμε μισού ΜΤ. Όμως μία σειρά φαινομένων μπορούν να περιορίσουν τη διασπορά των ραδιενεργών καταλοίπων ενός τέτοιου γεγονότος. Εάν βρέξει στην περιοχή της έκρηξης, τμήμα ή όλη η ραδιενέργεια μπορεί να πέσει στο έδαφος λόγω της βροχής, αυξάνοντας δραστικά τη δόση που δέχεται η περιοχή κοντά στο σημείο της έκρηξης. Η πύρινη σφαίρα επίσης μπορεί να περάσει μέσα από ένα κοινό σύννεφο και να εναποθέσει υπολείμματα πάνω του, τα οποία θα επιστρέψουν αμέσως στη Γη μέσω της βροχής.
Αυτά τα γεγονότα είναι πολύ απρόβλεπτα και καμία σοβαρή προσπάθεια δεν μπορεί να γίνει για την πρόβλεψη της προκύπτουσας καταστροφής με κάποια ακρίβεια.

Συμπερασματικά λοιπόν καταλήγουμε ότι ένας ακριβής υπολογισμός της καταστροφής που προκαλεί η ραδιενεργός διασπορά μιας εναέριας

www.ArmsControl.gr

έκρηξης μισού MT δεν μπορεί να γίνει. Η άμεση πυρηνική ακτινοβολία δεν αναμένεται να είναι η κύρια αιτία θανάτου για μεγάλο αριθμό θυμάτων, αφού η ραδιενέργεια που θα διασπαρθεί μπορεί να κυμαίνεται από πολύ μικρές τιμές έως τόσο υψηλές όσο αυτές που προκύπτουν από μία επιφανειακή έκρηξη (αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο). Όπως δείχνει το σχ.9 όμως, τα ωστικά και θερμικά φαινόμενα μιας τέτοιας πυρηνικής έκρηξης θα προκαλέσουν εκτεταμένες καταστροφές, πρακτικά σκοτώνοντας τους πάντες σε απόσταση 3 Km από το σημείο της έκρηξης.

Η περίπτωση της επιφανειακής έκρηξης είναι πολύ διαφορετική από την εναέρια, επειδή η πύρινη σφαίρα σηκώνει χιλιάδες τόνους υλικών από την περιοχή της έκρηξης μέσα στο ραδιενεργό νέφος, προκαλώντας έτσι μία πιο πρώιμη διασπορά. Ένα πυρηνικό όπλο 1 MT εκρηγνυόμενο στο έδαφος δημιουργεί ένα μεγάλο κρατήρα ο οποίος, ανάλογα με το είδος του εδάφους, μπορεί να είναι διαμέτρου 350 μέτρων και βάθους 150 μέτρων. Ένα μέρος του χώματος του κρατήρα εξατμίζεται, ενώ τα μεγαλύτερα σωματίδια ακολουθούν ανοδική πορεία παρασυρόμενα από τους ισχυρούς ανέμους που ακολουθούν.
Περίπου 50% έως 70% της διασποράς σε αυτή την περίπτωση οφείλεται σε σχετικά μεγάλα σωματίδια που επιστρέφουν στο έδαφος ταχύτατα και σε μεγάλες συγκεντρώσεις σε χρόνο λιγότερο από μία μέρα. Το υπόλοιπο γίνεται παγκόσμια διασπορά, αντιστοιχώντας περίπου στο ένα τρίτο του ποσού που δημιουργεί μια εναέρια έκρηξη.
Τα αποτελέσματα της άμεσης πυρηνικής ακτινοβολίας είναι όμοια με αυτά που συμβαίνουν σε μια εναέρια έκρηξη αν και οι δόσεις θα ελαττωθούν στο μισό για δεδομένη απόσταση εξ αιτίας της γεωμετρίας της έκρηξης. Αυτή η τροποποίηση δεν προκαλεί μεγάλη διαφορά όμως, διότι η θανατηφόρος περιοχή εξ αιτίας της άμεσης πυρηνικής ακτινοβολίας θα είναι περίπου η ίδια με την αντίστοιχη της εναέριας έκρηξης δηλαδή περίπου 12 Km^2. Ο μέσος αριθμός νετρονίων ανά cm^2 σε απόσταση r (μέτρα) από το «σημείο μηδέν» μιας πυρηνικής έκρηξης απόδοσης Y MT είναι:

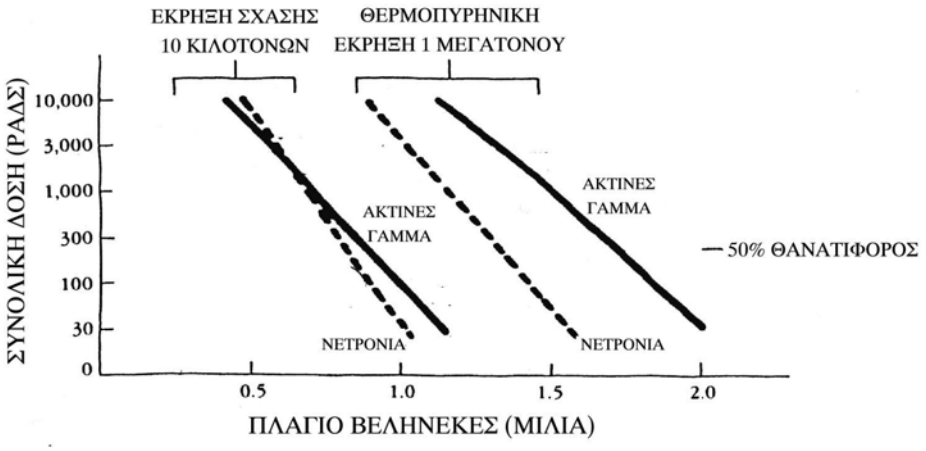
$$N(n) \approx 2 \cdot 10^{21} \frac{Y}{r^2} \exp\left(\frac{-r\rho}{235}\right)\left(n / cm^2\right)$$

$$\text{ή} \quad \approx 4.5 \cdot 10^{12} \frac{Y}{r^2} \exp\left(-\frac{r\rho}{235}\right)(rads)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα $\left(\rho = 1.1g / lt\right)$.Το σχ.10 δείχνει την ένταση των αρχικών ακτίνων-γ και νετρονίων για δύο αποδόσεις.

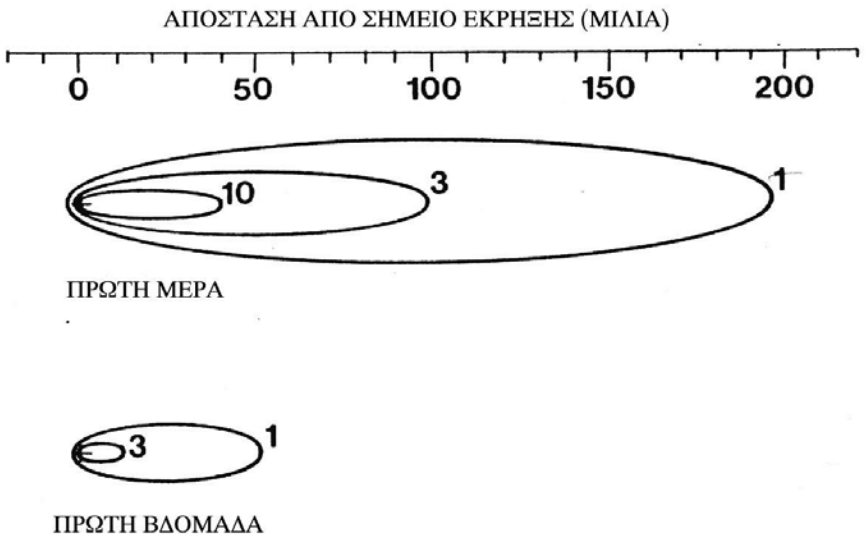
Επιπλέον, το έδαφος που βρίσκεται στην άμεση περιοχή της έκρηξης καθίσταται ραδιενεργό επειδή τα νετρόνια υψηλής ενέργειας που

εκπέμπονται διεγείρουν τους πυρήνες των υλικών του εδάφους. Αυτό ονομάζεται νετροπαράγωγος ακτινοβολία και συνεισφέρει σημαντικά



Σχ.10. Η ένταση της άμεσης πυρηνικής ακτινοβολίας.

όταν στοιχεία όπως Νάτριο περιέχονται στο έδαφος, τα οποία όταν διεγερθούν από νετρόνια εκπέμπουν ακτινοβολία γάμα. Αυτή η πηγή ραδιενέργειας περιορίζεται σε μία μικρή περιοχή και καθώς οι περισσότεροι από τους νετροδιεγερμένους ραδιενεργούς πυρήνες έχουν χρόνο ημισείας ζωής λιγότερο από μία ημέρα η νετροπαράγωγος ακτινοβολία δε συνεισφέρει σημαντικά στη μόλυνση μεγάλων περιοχών. Η κύρια καταστροφική συνεισφορά είναι αυτή της ραδιενέργειας από την πρώιμη διασπορά, η οποία μπορεί να εναποτεθεί εκατοντάδες μίλια από το σημείο της έκρηξης κατά τη διεύθυνση του ανέμου. Πολύπλοκα μοντέλα έχουν προταθεί για την πρόβλεψη των δόσεων που προκύπτουν από την πρώιμη διασπορά, αλλά αφού οι ατμοσφαιρικές συνθήκες είναι μεταβλητές, αξιόπιστοι υπολογισμοί πρέπει να αναμένονται μόνο στον υπολογισμό της συνολικής έκτασης της περιοχής που επηρεάζεται από την έκρηξη.



Σχ.11. Ο ρυθμός αύξησης της ραδιενέργειας από έκρηξη βόμβας ενός μεγατόνου στο έδαφος.

Τα περισσότερα μοντέλα προβλέπουν μία ραδιενεργό διασπορά που εκφράζεται με ισότιμα περιγράμματα ραδιενέργειας που μοιάζουν με πούρο, όπως στο σχ.11. Στην πραγματικότητα οι διακυμάνσεις στην κατάσταση των ανέμων καθιστούν αυτές τις καμπύλες ακανόνιστες.

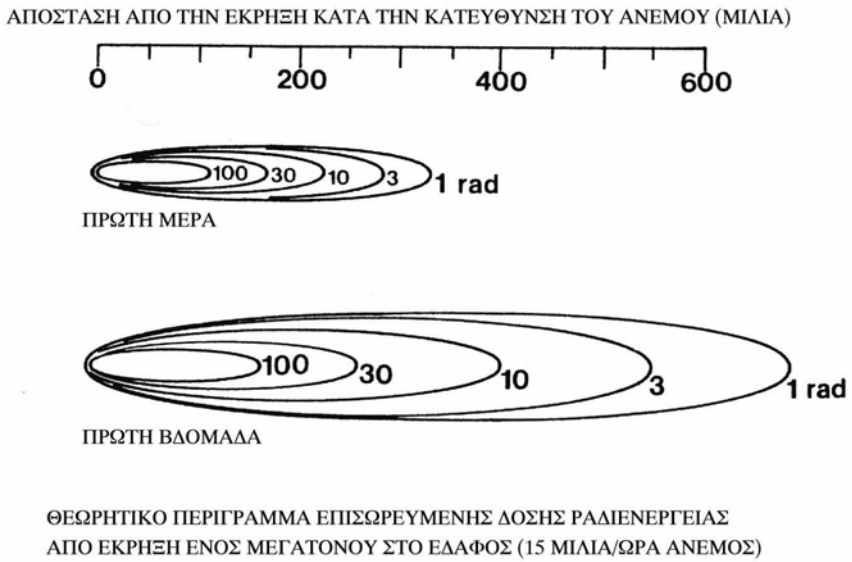
Το σχ.13 δείχνει τους τρόπους με τους οποίους εξελίσσεται η ραδιενεργός διασπορά με το χρόνο. Κατά τη στιγμή της έκρηξης η ολική δραστηριότητα του νέφους είναι στο μέγιστο αλλά το σύννεφο είναι πολύ περιορισμένο. Οι άνεμοι μεταφέρουν το ραδιενεργό νέφος που δημιουργείται από την έκρηξη, έτσι ώστε ο ρυθμός δόσης αυξάνεται με το χρόνο μετά την έκρηξη κατά την κατεύθυνση του ανέμου. Μετά την εναπόθεση όμως όλης της ραδιενεργού διασποράς ο ρυθμός δόσης αρχίζει να ελαττώνεται διότι η ένταση της ραδιενέργειας φθίνει με το χρόνο. Το σχ.12 δείχνει την ολική δόση που θα λαμβανόταν μέχρι κάποια χρονική στιγμή μετά την έκρηξη. Είναι φανερή η μεταβολή του ρυθμού συσσώρευσης. Επειδή ο ρυθμός εναπόθεσης είναι σχετικά μικρός για

χρόνους μεγαλύτερους από μία εβδομάδα, η συνολική συσσωρευμένη δόση αυξάνει πολύ αργά μετά το χρόνο αυτό.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Οι δόσεις και οι επιφάνειες που αναφέρονται στο σχήμα 12 (ένα mi^2 είναι περίπου 2560 στρέμματα).

Ολική δόση (σε rads) πάνω από:	Επιφάνεια μετά από μια μέρα (mi^2)	Επιφάνεια μετά από μία εβδομάδα (mi^2)
1000	160	250
300	440	770
100	1050	2300
30	2500	6600
10	4800	13500
3	7700	24000
1	9400	39000

Η περιοχή μέσα στις καμπύλες μπορεί να υπολογιστεί κατά προσέγγιση και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 2. Η θανατηφόρος



Σχ.12. Η επισωρευμένη δόση ραδιενέργειας.

περιοχή δηλαδή η περιοχή μέσα στην οποία ένα άτομο θα εκτίθονταν σε περισσότερα από 300 rem/day, είναι περίπου 1000 Km^2.Ο αριθμός των θανάτων υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την πυκνότητα του πληθυσμού με τη θανατηφόρο περιοχή. Οι πληθυσμιακές πυκνότητες στις ΗΠΑ κυμαίνονται από $4 \cdot 10^4$ άτομα/Km^2 σε μεγάλες μητροπόλεις σε

ώρες αιχμής, μέχρι λιγότερο από 2 άτομα/Km^2. Συνεπώς η έκρηξη για την οποία μιλάμε (1 MT) θα μπορούσε να σκοτώσει μόνο από την καθυστερημένη πυρηνική ακτινοβολία 5.000 έως 10.000.000 ανθρώπους, ανάλογα με τον τόπο και την ώρα της έκρηξης, τις καιρικές συνθήκες, την ύπαρξη ή μη προειδοποίησης για επικείμενη επίθεση και την περίθαλψη και προστασία στον πληγέντα πληθυσμό.

Ακόμη και αυτοί που θα επιζήσουν δεν θα μπορέσουν να επιστρέψουν στα σπίτια τους για μεγάλο χρονικό διάστημα, επειδή η περιοχή τους θα έχει μολυνθεί από ραδιενεργά σωματίδια. Θα πρέπει να περιμένουν μέχρι τα συνδυασμένα αποτελέσματα της βροχής, του χιονιού και της ραδιενεργού διάσπασης των πυρήνων να ελαττώσουν την ακτινοβολία σε επιτρεπτά όρια. Με δεδομένη τη μέγιστη επιτρεπτή δόση, που ορίζεται ως 2 rem το χρόνο σε περιόδους ειρήνης, μπορούμε να υπολογίσουμε την έκταση της περιοχής που θα παραμείνει ακατάλληλη για ανθρώπινη χρήση για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα. Ο πίνακας 3 δείχνει τα σημαντικά αυτά αποτελέσματα. Το σύνολο είναι περίπου 28.000 Km^2-year (11.000 mile-year) για μέγιστης δόση 2 rem/χρόνο. Όσον αφορά τις καλλιέργειες, εάν η μολυσμένη περιοχή ήταν καλλιεργήσιμη πριν το πυρηνικό γεγονός ,θεωρώντας το ίδιο ποσό μέγιστης επιτρεπτής δόσης καταλήγουμε στην αχρήστευση καλλιεργήσιμων εκτάσεων περίπου 4.000.000 στρέμματα για επτά χρόνια. Οι διαδικασίες απολύμανσης που μπορούν να εφαρμοστούν στην περίπτωση μιας περιορισμένης έκλυσης ραδιενέργειας λόγω ατυχήματος σε πυρηνικό αντιδραστήρα είναι αδιανόητες για τη ραδιενέργεια που θα εκλυθεί από μια επιφανειακή έκρηξης ενός πυρηνικού όπλου επειδή θα ήταν απαγορευτικά δαπανηρές. Οι αριθμοί του πίνακα 4 δείχνουν ότι μεγάλες περιοχές θα επηρεασθούν για μικρότερο χρονικό διάστημα αλλά και πάλι αρκετά κοινωνικά επιζήμια. Πάνω από 50.000 Km^2 θα καταστούν ακατοίκητα για ένα μήνα, γεγονός που θα προκαλέσει μαζικές μετακινήσεις εκατοντάδων χιλιάδων ή ακόμη και εκατομμυρίων ανθρώπων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. Η περιοχή που θα καταστεί ακατοίκητη ως συνάρτηση της ελάχιστης επιτρεπτής δόσης μετά από πυρηνική έκρηξη 1MT (ένα mi^2 είναι περίπου 2560 στρέμματα).

www.ASPmilitaria.gr

D_0 (rem/χρόνο)	Επιφάνεια μετά από μια εβδομάδα (mi^2)	Επιφάνεια μετά από ένα μήνα (mi^2)	Επιφάνεια μετά από ένα χρόνο (mi^2)
20	31000	21000	1200
10	13000	7400	120
50	4900	1400	26
100	1600	550	<18

ΠΙΝΑΚΑΣ 4. Η επιφάνεια που θα καταστεί ακατοίκητη για ορισμένο χρόνο με την προϋπόθεση ότι η μέγιστη επιτρεπτή δόση είναι 2 rem/χρόνο και για έκρηξη 1MT (ένα mi^2 είναι περίπου 2560 στρέμματα και η ταχύτητα του ανέμου θεωρείται σταθερή και ίση με 15 mph).

Διάρκεια ακαταλληλότητας	Επιφάνεια (σε mi^2)
Μια εβδομάδα	31000
Δυο εβδομάδες	26000
Ένα μήνα	21000
Δύο μήνες	17000
Έξι μήνες	5000
Ένα χρόνο	1200
Δύο χρόνια	150
Τρία χρόνια	55
Τέσσερα χρόνια	34
Πέντε χρόνια	11
Δέκα χρόνια	2

4.3 Θερμική ακτινοβολία

Ένα ποσοστό της ενέργειας μιας πυρηνικής έκρηξης εκπέμπεται με τη μορφή ακτίνων-Χ. Σε μια ατμοσφαιρική έκρηξη οι μαλακές (χαμηλής ενέργειας) ακτίνες-Χ 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 ροή των ακτίνων-Χ μιας πυρηνικής έκρηξης απόδοσης Y MT σε απόσταση R (Km) είναι:

www.ArmsControl.gr

$$N(x) = 7.9 \cdot 10^3 \frac{Y}{R^2} \exp\left(-\delta R \rho 10^5\right) \left(cal / cm^2\right)$$

όπου δ= συντελεστής απορρόφησης αέριας μάζας και ρ= πυκνότητα αέρα (περίπου $1{,}2 \cdot 10^{-3}\ g / cm^3$).

Η τιμή του δ εξαρτάται κρίσιμα από την ενέργεια του φωτονίου. Για ένα φωτόνιο 10 KeV το δ είναι περίπου 4 cm^2/g και ραγδαία πέφτει στην τιμή των 0,15 cm^2/g για 100 KeV.

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 εκλυόμενης 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:

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

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:

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

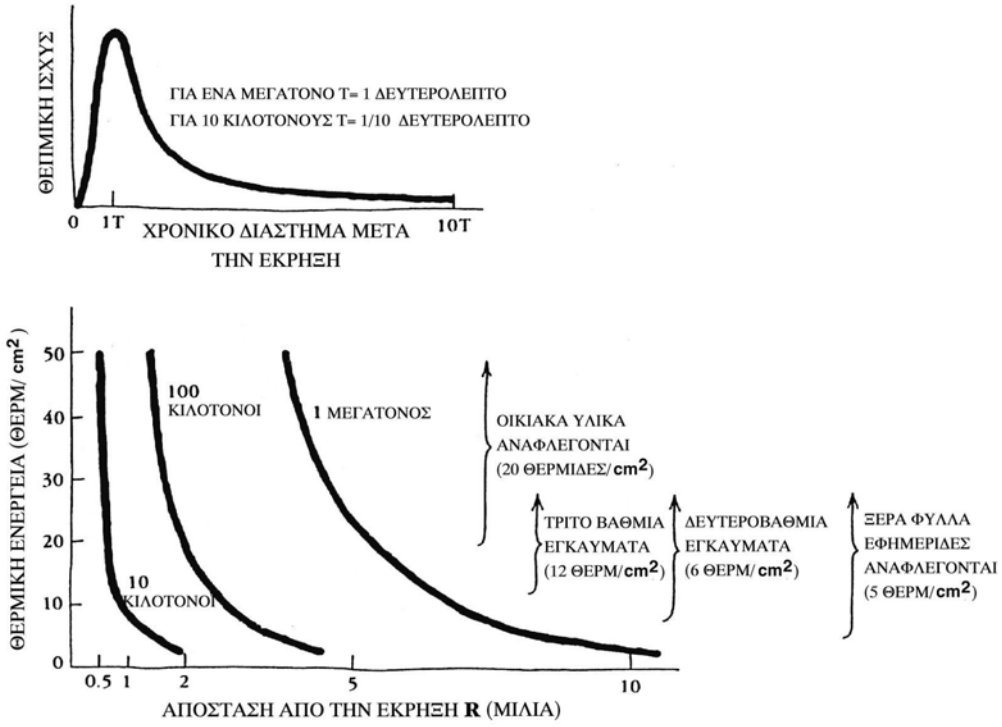
Η θερμική ακτινοβολία, ένα από τα πιο καταστροφικά αποτελέσματα μιας πυρηνικής έκρηξης, αποτελείται από φωτόνια της υπέρυθρης, ορατής και υπεριώδους περιοχής του φάσματος. Τα αποτελέσματα της θερμικής ακτινοβολίας πάνω σε ζωντανούς οργανισμούς εξαρτώνται από τρεις ιδιότητες της πηγής της ακτινοβολίας: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

www.ArmsControl.gr

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/cm^2 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/cm^2. 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.13).

www.Armscontrol.gr



Σχ.13. 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 ^{0}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 έγκαυμα 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 έγκαυμα 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 εκρηγνυόμενο 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 Όζοντος στη Στρατόσφαιρα. Σε ύψη 20 Km έως 30 Km πάνω από την επιφάνειά της, η Γη περιβάλλεται από ένα λεπτό στρώμα Όζοντος που παράγεται από μία πολύπλοκη σειρά φωτοχημικών αντιδράσεων. Το στρώμα αυτό είναι βιολογικά σημαντικό διότι απορροφάει το μεγαλύτερο μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας του Ηλίου και συνεπώς επιτελεί μία προστατευτική λειτουργία για τη ζωή στη Γη. Το υπεριώδες φως απορροφάται εύκολα από το δέρμα και ακόμη και σε ήπιες δόσεις προκαλεί ηλιακά εγκαύματα και μπορεί να βλάψει τον αμφιβληστροειδή του απροστάτευτου ματιού. Η τύφλωση από χιόνι για παράδειγμα, που είναι γνωστή στους σκιέρ, προκαλείται από το υπεριώδες φως που αντανακλάται από το χιόνι.

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 ^{0}C. 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 υπεριώδους 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 Όζοντος. Αρχικά δεν είναι ξεκάθαρο πώς το μέγεθος της πυρηνικής έκρηξης επηρεάζει το βαθμό ελάττωσης του Όζοντος. Τα νιτρικά οξείδια για να φθείρουν το στρώμα του Όζοντος 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 Όζοντος.

4.4 Τα αποτελέσματα του ωστικού κύματος

Μια πυρηνική έκρηξη στην ατμόσφαιρα είναι ουσιαστικά μία σημειακή πηγή πολύ μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας ($4{,}2 \cdot 10^{12}$ joules ανά KT) η οποία εκλύεται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα (μερικά milliseconds). Περίπου μισή από αυτή την ενέργεια τελικά καταναλίσκεται στο σχηματισμό και τη διάδοση του ωστικού κύματος που δημιουργείται από την ταχύτατη σφαιρική διαστολή των θερμών αερίων από την περιοχή της έκρηξης.

Σαν ένας τοίχος αέρα που διαστέλλεται με υπερηχητική ταχύτητα το ωστικό κύμα συμπιέζει και άρα θερμαίνει νέα ατμοσφαιρικά στρώματα χάνοντας μέρος της ενέργειάς του ενώ παράλληλα επιβραδύνεται. Αυτή η μεταφερόμενη αυξημένη πίεση του ωστικού κύματος γίνεται αισθητή σαν υπερπίεση σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση καθώς το ωστικό κύμα

www.Amsc.ntua.gr

διέρχεται από ένα δεδομένο σημείο. Η υψηλότερη τιμή της πίεσης αυτής ονομάζεται αιχμή υπερπίεσης και είναι συνάρτηση του ποσού ενέργειας που εκλύει το πυρηνικό όπλο:

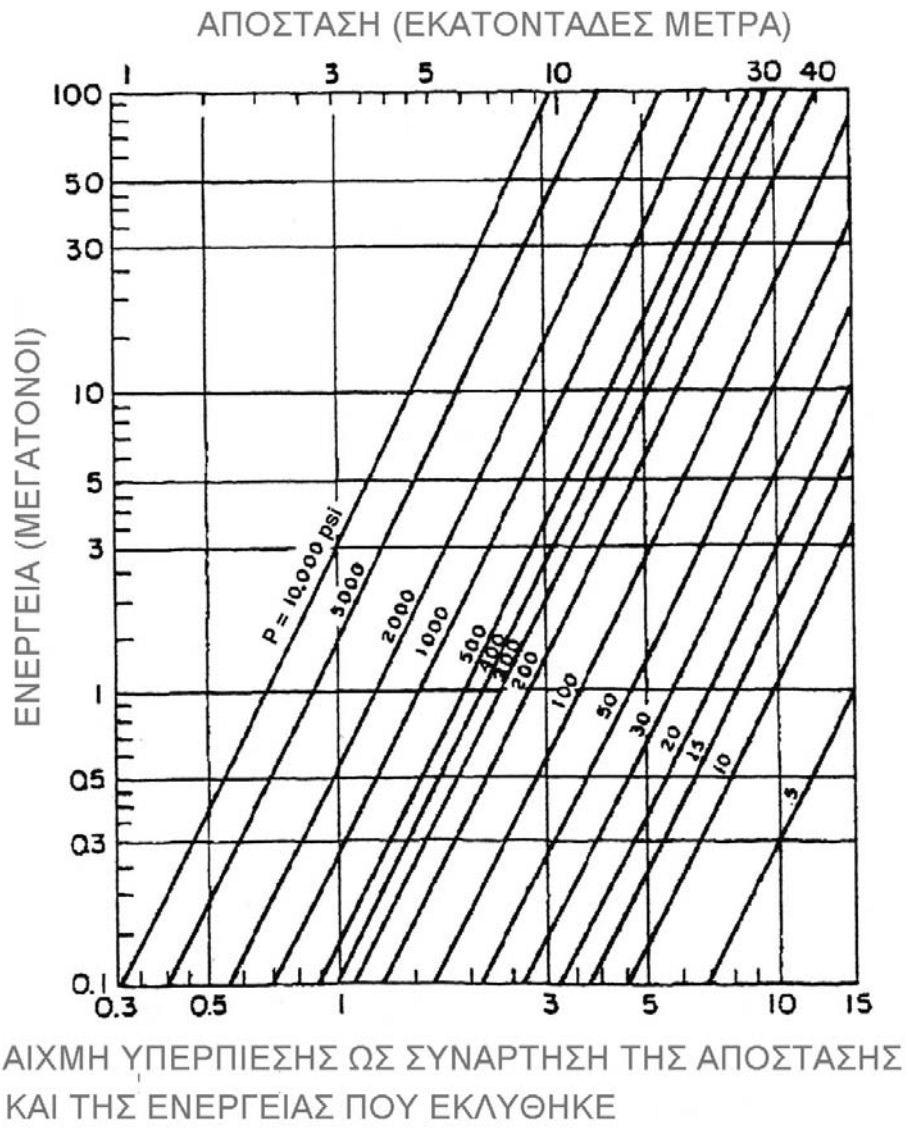
$$P_0 = 93\frac{Y}{R^3} + 32\left(\frac{Y}{R^3}\right)^{\frac{1}{2}}(psi)$$

όπου R σε Km,Y σε MT και psi = pounds per square inch.
Για τιμές P_0 μεγαλύτερες από 100 psi ο τύπος αυτός απλοποιείται :

$$P_0 = 100\frac{Y}{R^3}(psi)$$

Αυτοί οι τύποι αναφέρονται σε επιφανειακές εκρήξεις. Γενικά, τα ωστικά αποτελέσματα των επιφανειακών εκρήξεων υποτίθεται ότι είναι δύο φορές ισχυρότερα από τα αντίστοιχα μιας εναέριας έκρηξης ίδιας ισχύος.

www.ArmsControl.gr



Σχ.14. Η αιχμή υπερπίεσης ως συνάρτηση της απόστασης και της ενέργειας που εκλύθηκε

Η αιχμή υπερπίεσης ως συνάρτηση της απόστασης παριστάνεται στο σχ.14 για διάφορες τιμές έκλυσης ενέργειας. Καθώς το ωστικό κύμα απομακρύνεται από το σημείο της έκρηξης, δημιουργεί βίαιους ανέμους πίσω του που κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση. Αυτοί οι άνεμοι δημιουργούν μια πίεση στις επιφάνειες που συναντούν, η οποία ονομάζεται Δυναμική Πίεση. Οι απωστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται κατ'αυτόν τον τρόπο εξαρτώνται από το σχήμα, το μέγεθος και τον προσανατολισμό της επιφάνειας που υπόκειται στην πίεση αυτή, καθώς και στη μέγιστη τιμή της Δυναμικής Πίεσης. Η τιμή αυτή Q_0 συναρτάται από το μέγεθος της αιχμής υπερπίεσης με τη σχέση:

$$Q_0 = \frac{5}{2}\frac{{P_0}^2}{7P_A + P_0}(psi)$$

όπου P_A η ατμοσφαιρική πίεση $(14.7 psi)$.Αυτή η σχέση υποθέτει συνθήκες ιδανικών αερίων και συμφωνεί αρκετά καλά με πειραματικά δεδομένα για τιμές P_0 έως 1000 psi. Η Δυναμική Πίεση είναι ένας σημαντικός καταστροφικός μηχανισμός για οικοδομικές κατασκευές όπως σπίτια, εργοστάσια κλπ.

Λόγω της παρουσίας συνθηκών μη ιδανικών αερίων σε μια πυρηνική έκρηξη ο υπολογισμός της αιχμής υπερπίεσης από τους δεδομένους τύπους ενέχει κάποια αβεβαιότητα. Γενικά η Q_0 ,για δεδομένη απόσταση μπορεί αξιόπιστα να υπολογιστεί με σφάλμα $\pm 50\%$, ενώ η απόσταση για δεδομένο Q_0 υπολογίζεται με ακρίβεια $\pm 25\%$. Η αιχμή υπερπίεσης για δεδομένη απόσταση είναι αβέβαιη κατά $\pm 10\%$.Οι αβεβαιότητες προκαλούνται από τη μεταβλητή φύση της επιφάνειας του εδάφους καθώς και από τη δημιουργία ενός πρόδρομου κύματος που βρίσκεται μπροστά από το ΩΚ. Αυτά τα φαινόμενα, ειδικά το πρόδρομο κύμα, είναι πολύ σημαντικά για κατασκευές όπως σπίτια και εργοστάσια.

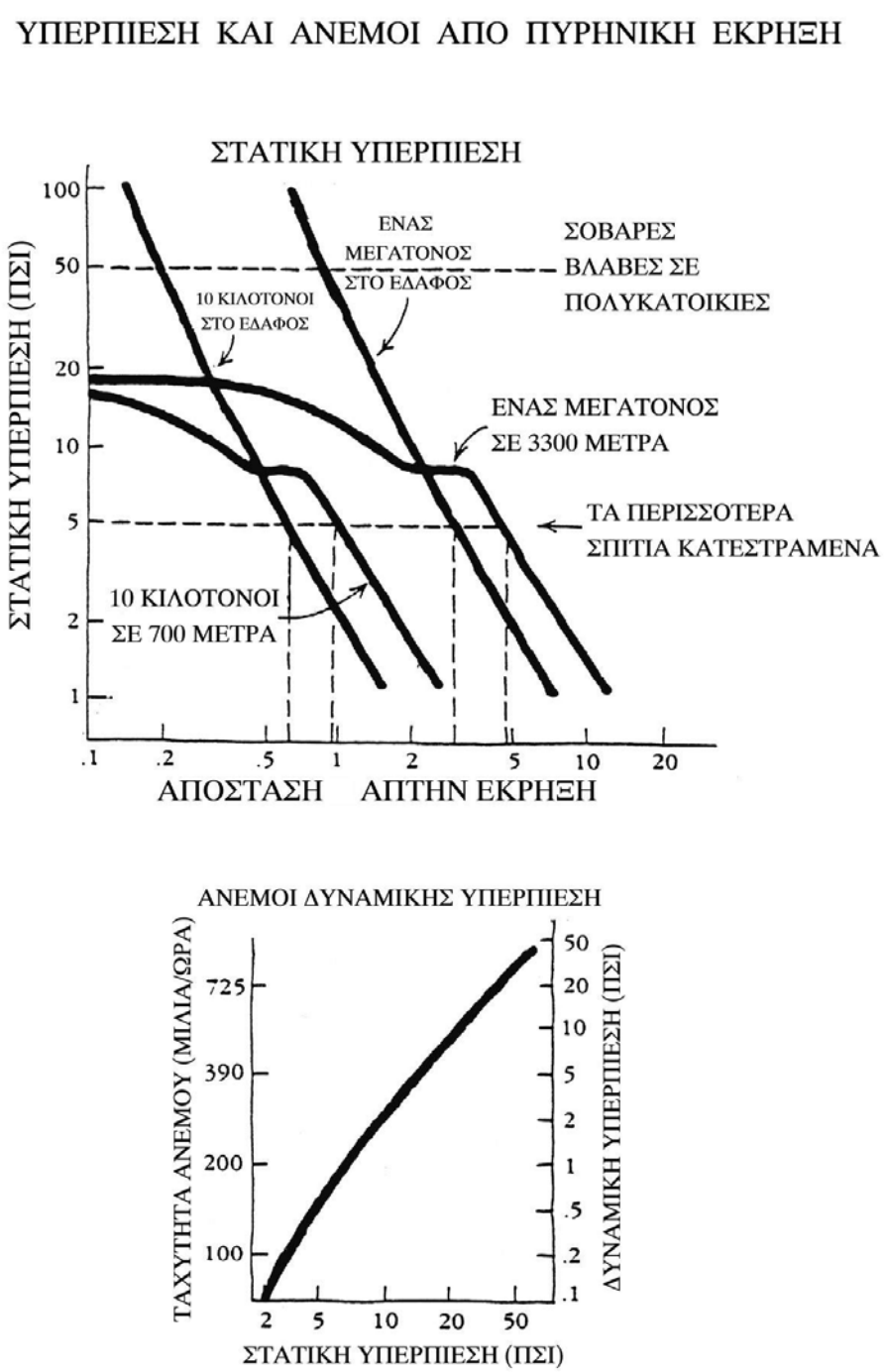
Η ταχύτητα του ωστικού κύματος καθώς απομακρύνεται από το σημείο της έκρηξης είναι:

$$U = C_0\sqrt{1+\frac{6P_0}{7P_A}}(m/\sec)$$

όπου C_0 είναι η ταχύτητα του ήχου στην αδιατάρακτη ατμόσφαιρα μπροστά από το ωστικό κύμα $(C_0 = 340 m/\sec)$ και P_A η ατμοσφαιρική πίεση $(P_A = 14.7 psi)$(δες σχ.15).

Κατά την έκρηξη ενός πυρηνικού όπλου πάνω από μία μη ανακλαστική επιφάνεια, όπως το ξερό έδαφος, η θερμική ακτινοβολία που προπορεύεται του ωστικού κύματος θερμαίνει την απορροφητική επιφάνεια του εδάφους ,η οποία με τη σειρά της δημιουργεί ένα στρώμα καυτού αέρα ακριβώς πάνω του. Το ωστικό κύμα ταξιδεύει ταχύτερα

www.AmsCom.org.gr



Σχ.15. Υπερπιέσεις και άνεμοι από πυρηνική έκρηξη

πάνω σ'αυτό το στρώμα και αυτό προκαλεί ένα επικουρικό ωστικό κύμα που διαδίδεται μπροστά από το κύριο ωστικό μέτωπο. Αυτό το επικουρικό κύμα είναι γνωστό ως "πρόδρομο κύμα" και η δημιουργία του αφαιρεί ένα μέρος από την ενέργεια του κυρίου ωστικού κύματος. Κατά

συνέπεια η αιχμή υπερπίεσης είναι μικρότερη από αυτή που προβλέπεται από τον τύπο της αλλά αντίθετα η Δυναμική πίεση μπορεί να αυξηθεί.
Τελικά η δημιουργία ενός προδρόμου κύματος τείνει να ενισχύσει τη Δυναμική πίεση και ασφαλώς καθιστά την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων μιας δεδομένης πυρηνικής έκρηξης σε οικοδομικές κατασκευές πιο αβέβαιη.

Εκτεταμένες δοκιμές των αποτελεσμάτων των πυρηνικών δοκιμών σε ανθρώπινες κατασκευές παρέχουν ένα μέτρο προβλεψιμότητας των αποτελεσμάτων του ωστικού κύματος και των συνοδευόντων ανέμων:υπερπιέσεις 3-5 psi καταστρέφουν συνηθισμένα σπίτια τούβλων ή ξύλινου σκελετού. Ο άνεμος που συνοδεύεται από υπερπιέσεις 4-5 psi ξεριζώνει δέντρα. Υπερπίεση 6-10 psi θα ισοπεδώνει τα πάντα μεταξύ των τσιμεντένιων πατωμάτων υψηλών κτιρίων. Σε 100 psi θα καταρρέουν οι χαλύβδινες κατασκευές.

Οι υψηλές υπερπιέσεις προκαλούν βλάβες στα πνευμόνια, τα ακουστικά τύμπανα και το κυκλοφορικό σύστημα των ανθρώπων. Μεγάλη πνευμονική βλάβη θα συμβεί σε υπερπιέσεις 20-30 psi.Τα τύμπανα του αυτιού σπάνε σε 5 psi.Εάν ένας άνθρωπος εκτεθεί σε 50 psi θα πεθάνει με μεγάλη πιθανότητα. Οι πιο πολλοί θάνατοι και τραυματισμοί συμβαίνουν όμως εξ αιτίας των υψηλών ανέμων που συνοδεύουν το ωστικό κύμα. Σε υπερπίεση 17 psi ο άνεμος θα εκσφενδονίσει ένα άτομο πάνω σε τοίχους ή άλλα αντικείμενα με ταχύτητα 100 Km/h

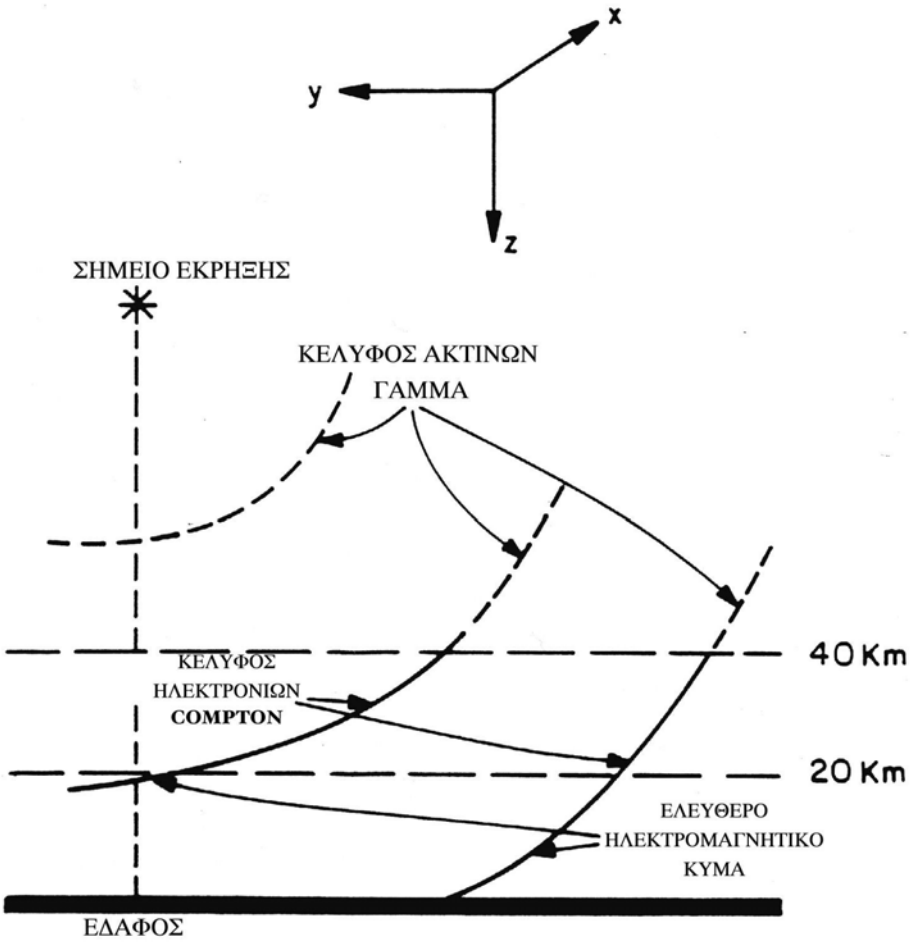
5. Μελέτη των εξω-ατμοσφαιρικών Πυρηνικών εκρήξεων

5.1 Ακτίνες γάμα και ηλεκτρόνια Compton

Μια πυρηνική έκρηξη ελευθερώνει ενέργεια στον περιβάλλοντα χώρο ενέργεια κυρίως με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας χαρακτηριστική ενός μέλανος σώματος θερμοκρασίας 10^8 ^{0}K. Περίπου 0.1% της ενέργειας αυτής εκλύεται με τη μορφή ακτίνων-γ με ενεργειακή κατανομή που μεγιστοποιείται γύρω στο 1 MeV. Άρα μία έκρηξη 1 MT θα ελευθερώσει περίπου 1 KT ενέργεια με τη μορφή ακτίνων-γ ενέργειας 1 MeV ,δηλαδή πάνω από 10^{25} απ'αυτές. Οι ακτίνες γάμμα αυτής της ενέργειας αντιδρούν με τα άτομα που συναντούν, υφιστάμενες κυρίως σκέδαση Compton πάνω στα ατομικά ηλεκτρόνια. Σε μια τέτοια σκέδαση, κατά μέσο, όρο η μισή ενέργεια της ακτίνας γ μεταβιβάζεται στο ανακλώμενο ηλεκτρόνιο.

www.ArmsControl.gr

Επειδή η γωνιακή κατανομή των ηλεκτρονίων Compton μεγιστοποιείται κατά την διεύθυνση των ακτίνων γάμμα, η ολική χωρική κατανομή των ηλεκτρονίων Compton που δημιουργούνται από μια εξω-ατμοσφαιρική πυρηνική έκρηξη θα εξαρτάται από τη χωρική μεταβολή της πυκνότητας του υλικού στον άμεσο χώρο της έκρηξης.
Καθώς τα πρωτογενή αυτά ηλεκτρόνια ταξιδεύουν μέσα στον αέρα ή σε άλλη ύλη χάνουν ενέργεια λόγω συγκρούσεων με ατομικά ηλεκτρόνια της ύλης. Ως αποτέλεσμα κάθε ηλεκτρόνιο Compton δημιουργεί περίπου $3 \cdot 10^4$ ζεύγη ιόντος-ηλεκτρονίου πριν να σταματήσει.



Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΑΛΜΟΥ

Σχ.16. Η γεωμετρία του ΗΜΠ

Ας θεωρήσουμε τώρα την έκρηξη ενός πυρηνικού εκρηκτικού 1 MT ψηλά πάνω από την ατμόσφαιρα (σχ.16).Οι ακτίνες-γ φεύγουν από το σημείο της έκρηξης ισοτροπικά, όμως μόνο αυτές που μπαίνουν στην ατμόσφαιρα αντιδρούν με τα άτομα και δημιουργούν το ρεύμα των ηλεκτρονίων Compton που ουσιαστικά γεννάει τον ηλεκτρομαγνητικό παλμό. Η μέση ελεύθερη διαδρομή των ακτίνων-γ από μία πυρηνική έκρηξη είναι περίπου 20 gr/cm^2 και η μάζα του αέρα ανά cm^2 μεταβάλλεται με το υψόμετρο πάνω από την επιφάνεια της γης ως εξής:

$$M(z) = 1280 \exp\left(-\frac{z}{h}\right) gr / cm^2$$

έτσι ώστε ο αριθμός των μέσων ελεύθερων διαδρομών N(γ) που διανύονται από ακτίνες-γ που οδεύουν κάθετα προς τα κάτω σε ύψος z πάνω από τη Γη είναι:

$$N(\gamma) = \left(\frac{1280}{20}\right) e^{-\frac{z}{h}} = 64 e^{-\frac{z}{h}}$$

όπου $h = 6.4 Km$ είναι η ατμοσφαιρική κλίμακα ύψους.
Αυτός ο τύπος δείχνει ότι η πλειοψηφία των ακτίνων-γ που υφίστανται σκέδαση Compton θα σκεδαστεί σε μια περιοχή 20-50 Km πάνω από το έδαφος και το μέγιστο αυτής της πηγής θα είναι στα $z = 26 Km$ για κάθετα καθοδική κίνηση των ακτίνων-γ.

Επειδή μόνο οι "άμεσες" ακτίνες-γ, δηλαδή αυτές που προκαλούνται περίπου μέσα στα πρώτα δέκα nanoseconds της έκρηξης, θα καθορίσουν το ύψος του πεδίου του ηλεκτρομαγνητικού παλμού που θα γίνει αντιληπτό στη Γη, η παρούσα ανάλυση του ηλεκτρομαγνητικού παλμού από μία έκρηξη 1 MT σε μεγάλο ύψος από την επιφάνεια της Γης θα περιοριστεί μόνο σ'αυτές τις ακτίνες-γ. Αφού αυτές οι άμεσες ακτίνες-γ ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός, θα φτάσουν στο πάνω μέρος της ατμόσφαιρας με τη μορφή ενός σφαιρικού κελύφους δέκα μέτρα πάχους με κέντρο το σημείο της έκρηξης. Τα ηλεκτρόνια Compton αρχίζουν να δημιουργούνται καθώς αυτές οι ακτίνες-γ εισέρχονται στην ατμόσφαιρα. Η αρχική μέση κατεύθυνση των ηλεκτρονίων αυτών είναι ακτινικά προς τα έξω από το σημείο της έκρηξης αλλά το γεωμαγνητικό πεδίο προκαλεί την παρέκκλισή τους και αυτό δημιουργεί ένα ρεύμα εγκάρσιο προς στην κατεύθυνση των ακτίνων-γ.

5.2 Ο Ηλεκτρομαγνητικός Παλμός

Η παρουσία του γεωμαγνητικού πεδίου επιφέρει τη δημιουργία δύο ηλεκτρικών ρευμάτων, J_{cr} ένα ρεύμα Compton κατά την ακτινική

www.ArmsControl.gr

διεύθυνση και J_{ct} ένα ρεύμα Compton κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Το J_{cr} δεν ακτινοβολεί κατά την ακτινική διεύθυνση ενώ το J_{ct} ακτινοβολεί. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία ακτινοβολούν κάθετα προς τη διεύθυνση του ρεύματος που τα δημιουργεί. Αυτά τα πεδία, όπως και οι ακτίνες-γ, ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός. Άρα τα πεδία που δημιουργούνται από ασκέδαστες ακτίνες-γ, καθώς αυτές ταξιδεύουν προς τη Γη, καθώς και τα ήδη υπάρχοντα πεδία βρίσκονται σε φάση. Συνεπώς, δημιουργείται μια συνεχής σειρά ακτινοβολούντων πηγών όλες με την ίδια φάση, που εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κατά τη διεύθυνση των ασκέδαστων ηλεκτρονίων Compton και των ακτίνων-γ.

Υπάρχουν λοιπόν δύο διαφορετικοί μηχανισμοί που παράγουν τον ηλεκτρομαγνητικό παλμό που γίνεται αντιληπτός στη γη λόγω μιας εξω-ατμοσφαιρικής έκρηξης. Επειδή το ακτινικό ρεύμα Compton J_{cr} δεν είναι σφαιρικά συμμετρικό στην κατανομή του ως προς το σημείο της έκρηξης, σύμφωνα με τις εξισώσεις του Maxwell, θα ακτινοβολεί πεδία χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρικού δίπολου. Ο δεύτερος μηχανισμός που βασίζεται στο εγκάρσιο ρεύμα J_{ct} παράγει πεδία που είναι τουλάχιστον 100 φορές δυνατότερα από τα αντίστοιχα του J_{cr}.
Ας θεωρήσουμε στη συνέχεια το μέγεθος, τη διάρκεια και τη συχνότητα αυτών των πεδίων. Η συχνότητα του εγκάρσιου πεδίου που παράγεται από τα ηλεκτρόνια Compton σχετίζεται με τη συχνότητα f_c της περιστροφής αυτών των ηλεκτρονίων στο γεωμαγνητικό πεδίο:

$$f_c = e\frac{B_0}{\gamma mc}$$

όπου B_0 το γεωμαγνητικό πεδίο,e το φορτίο του ηλεκτρονίου,m η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου (0,5 MeV) και $\gamma = \left(1-\beta^2\right)^{-\frac{1}{2}}$ με $\beta = u/c$ και u,c αντίστοιχα οι ταχύτητες των ηλεκτρονίων και του φωτός.

Καθώς το γ εξαρτάται από την κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων, η f_c θα καλύψει μια περιοχή τιμών η οποία, με δεδομένη την ενέργεια των ακτίνων γ από τις πυρηνικές αλληλεπιδράσεις και την κινηματική της σκέδασης Compton, θα είναι περίπου από $3\cdot10^6$ έως 10^7 rad/sec. Τα ηλεκτρόνια διαφορετικών ενεργειών θα βρεθούν εκτός φάσεως μεταξύ τους και θα πάψουν να συνεισφέρουν με συνοχή στο εγκάρσιο πεδίο μέσα σε $\pi/10^7$ sec μετά την παραγωγή τους. Συνεπώς η διάρκεια της μέγιστης τιμής του ηλεκτρομαγνητικού παλμού που προκαλείται από το J_{ct} θα είναι διάρκειας περίπου 1 μsec.

www.ArmedControl.gr

Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας του ηλεκτρομαγνητικού παλμού θα είναι της τάξης των $E\frac{\pi}{10^7} \approx 100m$, άρα μπορούμε να αναμένουμε ότι αντικείμενα συγκρίσιμου μεγέθους (κεραίες, καλώδια μεταφορά ενέργειας κλπ.) θα είναι άριστοι δέκτες του ηλεκτρομαγνητικού παλμού.

Τα μέγεθος του πεδίου του ηλεκτρομαγνητικού παλμού στο έδαφος καθορίζεται από δύο αντίθετους μηχανισμούς. Από τη μια η επαύξηση του J_{ct} είναι μία συνεχής πηγή ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που συμβάλλουν θετικά και συνεπώς αυξάνουν ως συνάρτηση του J_{ct}. Από την άλλη τα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια ($3\cdot10^4$ ανά ηλεκτρόνιο Compton) που ελευθερώνονται κατά τον ιονισμό των μορίων του αέρα από τα ηλεκτρόνια Compton, αυξάνουν την αγωγιμότητα του αέρα δια του οποίου διέρχεται ο ΗΜΠ. Το εγκάρσιο πεδίο E_t δίνεται τότε από την εξίσωση:

$$\left(\frac{\partial E_t}{\partial z}\right) + 2\pi\sigma E_t = 2\pi J_{ct}(z,t)$$

Στο σύστημα συντεταγμένων του σχ.6, το πεδίο E_t είναι παράλληλο με τον άξονα των χ, το γεωμαγνητικό πεδίο παράλληλο με τον άξονα των y και ο άξονας z αυξάνει προς τα κάτω. Έτσι σε ένα δεδομένο χρόνο το μέγεθος του εγκάρσιου πεδίου αυξάνεται με το J_{ct} και αποσβήνεται από το ρεύμα αγωγιμότητας σE_t. Άρα καθώς οι ακτίνες-γ μπαίνουν στην ατμόσφαιρα θα ισχύει $J_{ct} \approx e^{\frac{z}{h}}$ και συνεπώς το πεδίο E_t αυξάνει ως $\approx -2\pi\, hJ_{ct}$. Αλλά το σ επίσης αυξάνεται ως $e^{z/h}$ έτσι ώστε ο όρος αγωγιμότητας $2\pi\sigma E_t$ επίσης συνεχίζει να αυξάνει και τελικά κυριαρχεί πάνω στον όρο $\frac{\partial E_t}{\partial z}$ όταν :

$$-2\pi\, hJ_{ct} \geq -\frac{2J_{ct}}{\sigma}$$

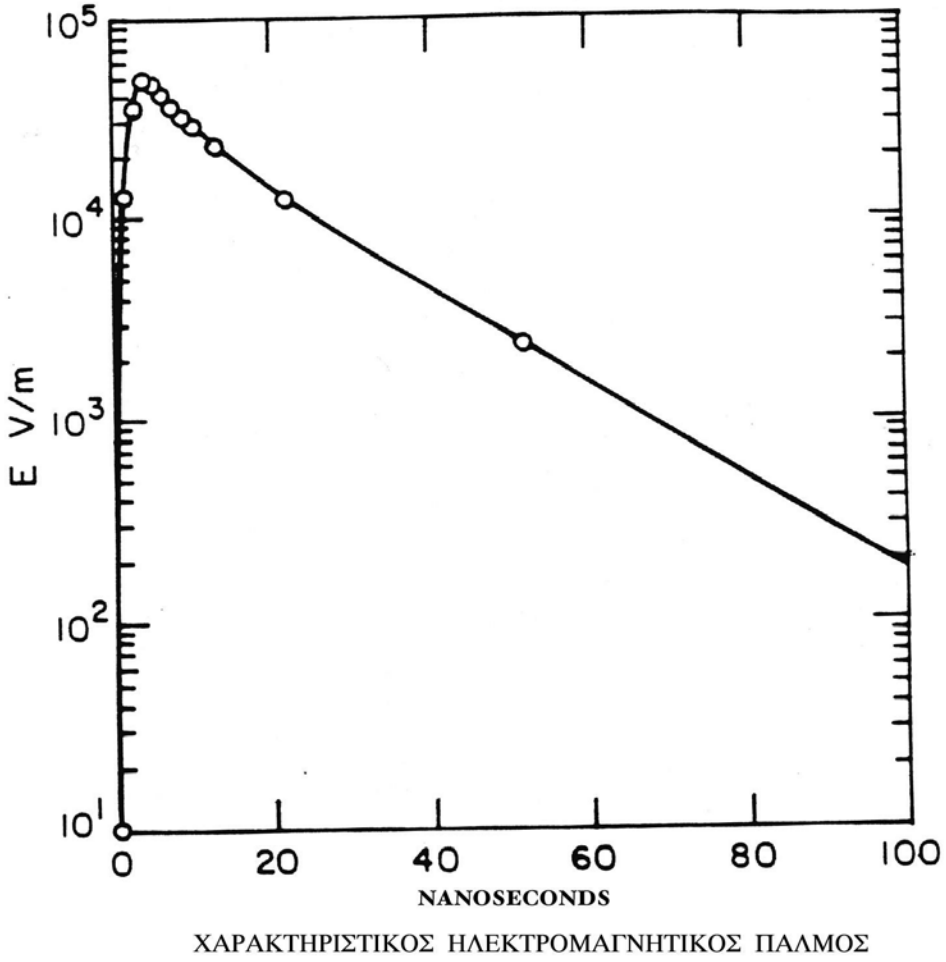
$$\text{ή όταν} \qquad \sigma \geq \frac{1}{\pi\, h}$$

οπότε λαμβάνει χώρα κορεσμός και $E_t = E_s = \frac{J_{ct}}{\sigma}$ που είναι η τιμή του πεδίου κορεσμού. Καθώς ο παλμός των ακτίνων γ διεισδύει βαθύτερα στην ατμόσφαιρα η ροή των ακτίνων-γ αποσβήνεται και η ποσότητα $\frac{\partial E_t}{\partial z}$ τείνει στο μηδέν. Σ'αυτό το σημείο (περίπου 20 Km πάνω από την επιφάνεια της γης) ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός αρχίζει να διαδίδεται σαν ένα σφαιρικό ελεύθερο ηλεκτρομαγνητικό κύμα και συνεπώς το πλάτος ελαττώνεται ως 1/r όπου r η απόσταση από το σημείο της έκρηξης. Το πλάτος της E_s έχει υπολογιστεί να είναι περίπου $3\cdot10^4$ V/m. Είναι ενδιαφέρον να τονίσουμε ότι όσο πιο νωρίς λαμβάνει χώρα ο

www.ArmsControl.gr

κορεσμός, κατά τη διάρκεια της μετάδοσης του παλμού των ακτίνων γ μέσα στην ατμόσφαιρα, τόσο πιο μεγάλο θα είναι το πλάτος του ηλεκτρομαγνητικού παλμού που γίνεται αντιληπτός στη γη, αφού $E_s\sigma \sim \frac{J_{ct}}{\sigma}$. Άρα για να αυξηθεί το πλάτος του αρχικού τμήματος του ΗΜΠ θα πρέπει να αυξηθεί η αρχική ροή των ακτίνων-γ που φτάνουν στο πάνω μέρος της ατμόσφαιρας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί όχι μόνο με την έκρηξη του πυρηνικού εκρηκτικού κοντά στην κορυφή της ατμόσφαιρας, γεγονός το οποίο θα περιόριζε την περιοχή που καλύπτεται από τον ηλεκτρομαγνητικό παλμό, αλλά με μια εναλλακτική λύση: να διαμορφωθεί το πυρηνικό όπλο έτσι ώστε να αποδώσει το μεγαλύτερο μέρος της εκλυόμενης ενέργειας με τη μορφή άμεσων ακτίνων-γ, που όλες περιέχονται σε ένα παλμό ακτίνων γ εύρους μερικών nanoseconds. Ένας τέτοιος παλμός θα παρήγαγε ηλεκτρομαγνητικό παλμό πάνω από $6 \cdot 10^4$ V/m. Το σχ.17 δείχνει ένα τυπικό ηλεκτρομαγνητικό παλμό όπως αυτός θα έφτανε 360 Km πάνω από το έδαφος μηδέν σε μία έκρηξη 200 Km πάνω από τη γη, υπολογισμένος με το μοντέλο παραγωγής ηλεκτρομαγνητικού παλμού του C.Longmire (1). Αυτό το μοντέλο H/Y λύνει ταυτόχρονα τις εξισώσεις του Maxwell και της κίνησης των ηλεκτρονίων Compton συνυπολογίζοντας τα αποτελέσματα των πεδίων πάνω τα ηλεκτρόνια, δίνοντας έτσι το μέγεθος των προκυπτόμενων ακτινοβολούντων πεδίων.

www.ArmsControl.gr



Σχ.17. Ένας χαρακτηριστικός ΗΜΠ

Υπάρχει ασφαλώς μία ασάφεια σχετικά με το μέγεθος του ηλεκτρομαγνητικού παλμού που θα προκληθεί από μία εξω-ατμοσφαιρική έκρηξη. Το μέγεθος και η μορφή του ηλεκτρομαγνητικού παλμού εξαρτάται από το μέγεθος και τη μορφή του παλμού των ακτίνων-γ του πυρηνικού όπλου που με τη σειρά τους εξαρτώνται από το σχεδιασμό του όπλου. Υπάρχει επίσης μία αβεβαιότητα όσον αφορά τη γνώση του ρυθμού επανασύνδεσης των ηλεκτρονίων με ιόντα στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Ο συνδυασμός αυτών των αβεβαιοτήτων εισάγει μία ολική αβεβαιότητα στον υπολογισμό του μεγέθους του ηλεκτρομαγνητικού παλμού κατά ένα συντελεστή του δύο.

6. Οι πυρηνικές δοκιμές και ο εντοπισμός τους

6.1 Η ανάγκη για πυρηνικές δοκιμές

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 Ναγκασάκι, 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 όπως έχουμε δει. 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 χρειάσθηκαν 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 πυρηνικών δοκιμών, 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.

www.HNSC.com.gr

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.

6.2 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 ΚΤ, 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:

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

όπου C μία σταθερά κατά μέσο όρο μεταξύ 2 και 7 ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και την εποχή του έτους. Υ είναι η απόδοση σε ΚΤ και R η απόσταση από το σημείο της έκρηξης σε χιλιάδες Km. Συνεπώς η έκρηξη ενός πυρηνικού όπλου ισχύος 1 ΜΤ 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.

www.Armscontrol.gr

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 αναγνωρίσθηκε από την έντονη παρουσία πυρήνων Be^7 στην ανώτερη ατμόσφαιρα που παράγονται από την αντίδραση Li^6 + πρωτόνιο $\rightarrow$ Be^7 προδίδοντας έτσι την παρουσία Li^6 , που είναι παρόν μόνο σε θερμοπυρηνικά όπλα.

6.3 Εντοπισμός υπόγειων πυρηνικών δοκιμών

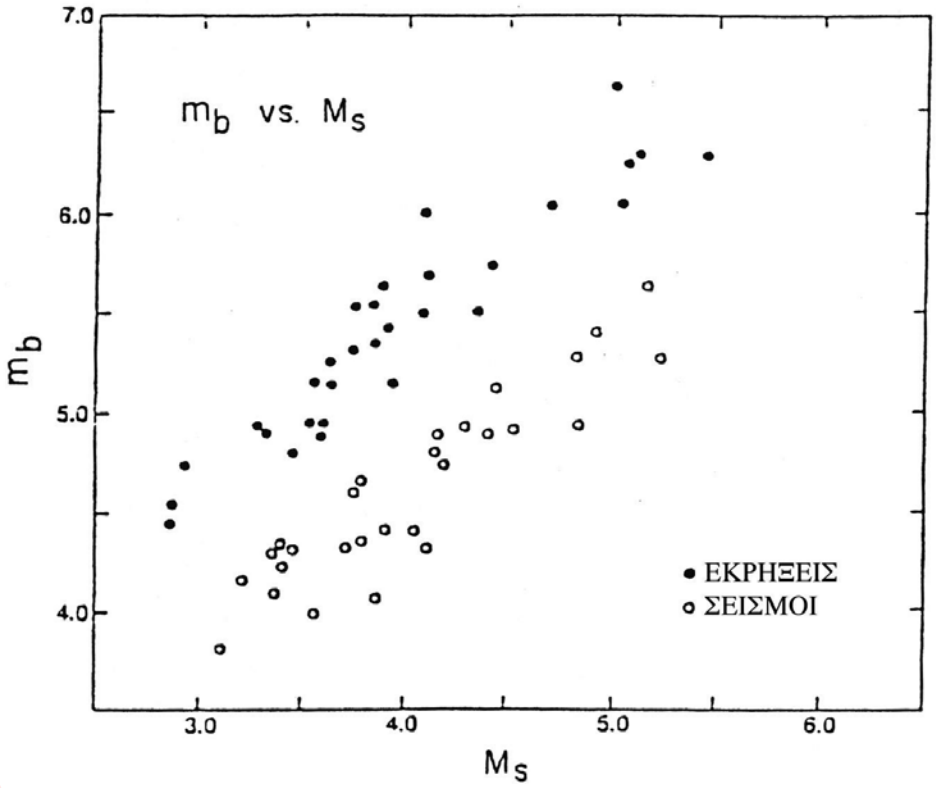
Σε μια απολύτως περιορισμένη υπόγεια πυρηνική δοκιμή η εκλυόμενη ενέργεια λιώνει και εξατμίζει τα πετρώματα και το έδαφος που περιβάλλουν το σημείο της έκρηξης δημιουργώντας μια μεγάλη υπόγεια κοιλότητα. Η πίεση μέσα στην κοιλότητα φτάνει σε εκατομμύρια ατμόσφαιρες και οι ατμοί διαστέλλονται ταχύτατα. 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 δεν δημιουργεί αντίστοιχα εγκάρσια S-κύματα. Δημιουργείται όμως η παραγωγή μεγάλων επιφανειακών κυμάτων (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 σεισμογράφων σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους και συνδεδεμένους με κεντρικό υπολογιστή, που λαμβάνει, επιβραδύνει κατάλληλα και αθροίζει τα επιμέρους σήματα που παράγουν οι συσκευές αυτές έτσι ώστε να αποσβήνεται 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 ΚΤ 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 διαφορική διάγνωση της υπόγειας πυρηνικής δοκιμής από τους φυσικούς σεισμούς.

Η διαφορά μεταξύ των κυμάτων που παράγονται από υπόγειες πυρηνικές δοκιμές και των σεισμών 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

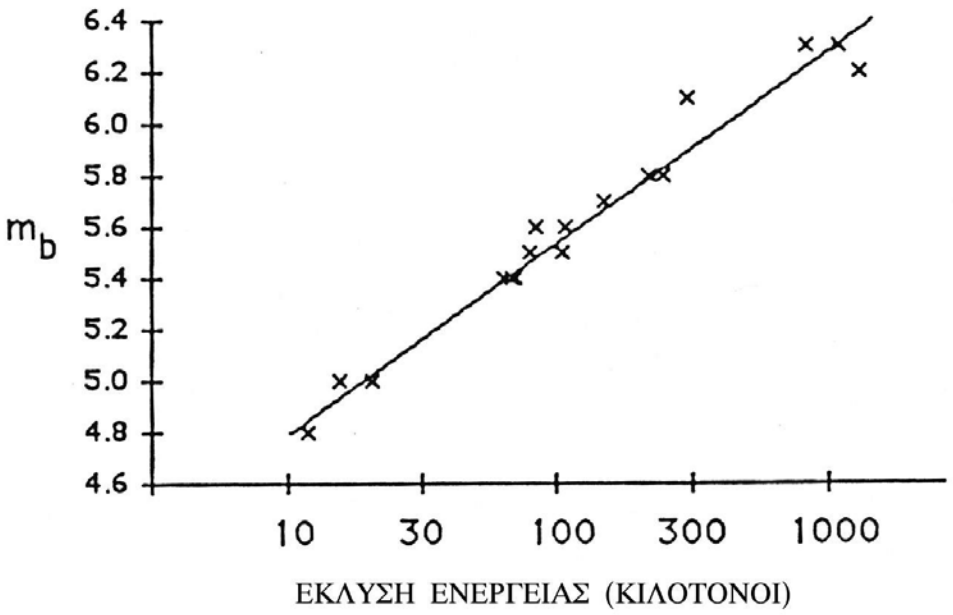
κύματος των σημάτων των εκρήξεων είναι μικρά και η διάδοσή τους είναι ανεξάρτητη του αζιμούθιου. Αντίθετα, ένας σεισμός λόγω της έκτασης της πηγής παράγει σήματα με μεγάλα μήκη κύματος και με μια κατανομή γωνιακή κατανομή αζιμουθίων που καθορίζεται από τον προσανατολισμό της ολισθαίνουσας κίνησης των 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.18).



Σχ.18. 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 σεισμογράφων. Το σχ.19 είναι ένα παράδειγμα αυτών των συσχετισμών.



Σχ.19. Το πλάτος χωρικού κύματος ως συνάρτηση της ενέργειας της έκρηξης.

Το 1958 εκφράστηκε από συντηρητικούς αμερικανούς επιστήμονες ο φόβος ότι εάν μια πυρηνική έκρηξη γινόταν σε μια κοιλότητα με ακτίνα ίση με την "ελαστική ακτίνα" (περίπου 100 $Y^{1/3}$ σε μέτρα και Y σε ΚΤ) τότε το παραγόμενο P-κύμα θα φαινόταν 100 φορές ασθενέστερο σε ένα σεισμογράφο. Συνεπώς, υπήρξε ο ισχυρισμός ότι ένας αντίπαλος μπορούσε να διεξάγει δοκιμές παραβιάζοντας τη συμφωνία η οποία είτε περιόριζε την απόδοσή τους ή τις απαγόρευε τελείως.

Όμως για σήματα συχνοτήτων $f \geq \frac{20}{Y^{1/3}} Hz$ όπου Y σε ΚΤ, η "αποσύζευξη" δοκιμών που πραγματοποιούνται σε μια μεγάλη κοιλότητα δεν μειώνει το πλάτος των σημάτων κάτω από το σεισμικό θόρυβο και έτσι η δοκιμή μπορεί να εντοπιστεί. Ακόμη και αν κάποιος ήθελε να

χρησιμοποιήσει αυτή την ιδιότητα θα συναντούσε τεράστιες τεχνικές δυσκολίες, διότι θα έπρεπε να σκάψει μία κοιλότητα 500.000 m^3 για μια έκρηξη 10 ΚΤ. Με τους κατασκοπευτικούς δορυφόρους να σαρώνουν την επιφάνεια της Γης, μια τέτοια ανασκαφή δεν θα μπορούσε να μη γίνει αντιληπτή. Και αν συνυπολογίσουμε τον εύκολο εντοπισμό των ραδιοϊσοτόπων που διαρρέουν από μία υπόγεια πυρηνική έκρηξη καθίσταται αδύνατο να αποκρυφτεί.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Παρ'όλη τη μυστικότητα που περιβάλλει τα πυρηνικά όπλα δεν υπάρχει τίποτα μυστηριώδες γι αυτά. Υπακούουν όπως τα πάντα στο Σύμπαν , τους νόμους της Φύσης και οι νόμοι που διέπουν τη λειτουργία τους και τα αποτελέσματά τους είναι γνωστοί σε πολλούς πυρηνικούς φυσικούς. Τα μυστικά των όπλων αυτών αν υπάρχουν πια τέτοια μυστικά έχουν να κάνουν με τεχνικές λεπτομέρειες μεταλλουργίας, υδροδυναμικής και την σωστή σύζευξη αριθμού λειτουργιών και φαινομένων στη σωστή χρονική σειρά.

Ελπίζω το μικρό τούτο εγχειρίδιο να αποδειχθεί χρήσιμο σ'αυτούς για τους οποίους κυρίως έχει γραφτεί : τους στρατιωτικούς, που δυστυχώς πρέπει να είναι γνώστες των βασικών στοιχείων των πυρηνικών όπλων, τους επιστήμονες που θέλουν να ασχοληθούν με την εθνική άμυνα και τους κυβερνητικούς αποφασίζοντες που , ο μη γένοιτο, ίσως χρειαστεί να λάβουν αποφάσεις στο μέλλον που να έχουν την ανάγκη γνώσης των αποτελεσμάτων της χρήσης των πυρηνικών όπλων . Το ενδιαφέρον του σκεπτόμενου κοινού είναι καλοδεχούμενο. Όσο περισσότεροι πολίτες καταλαβαίνουν τις καταστροφικές δυνατότητες των πυρηνικών όπλων τόσο η πιθανότητα απόκτησης και χρήσης των από ένα κράτος μειώνεται.

www.Armscontrol.gr