

PHYSICS TIME

#02

Το περιοδικό Physics Time εκδίδεται από τον Σύλλογο Μεταπτυχιακών και Υποψηφίων Διδασκόντων του Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ και διανέμεται δωρεάν σε ηλεκτρονική και έντυπη μορφή.

Physicstime.gr

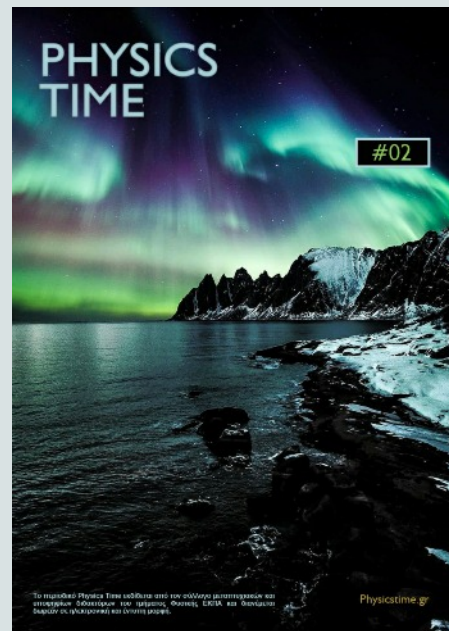
PHYSICS TIME

ΤΕΥΧΟΣ ΜΑΡΤΙΟΥ - ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2020.

Εξώφυλλο: Οι απότομες βουνοκορφές Okshornan στη νήσο Senja της Νορβηγίας (γνωστές και ως “σαγόνη του διαβόλου”) κατά τη διάρκεια μίας μαγνητικής υποκαταιγίδας όπως απθανατίστηκαν από τον Tobias Bjorkli.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Γυροκίνηση - ο Lorentz και η έλικα.
2. Χάνοντας έδαφος: Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη θάλασσα.
3. Elephant's Foot (Τσερνόμπιλ, 1986).
4. Προς τη θεωρία του Καθιερωμένου Προτύπου - Μέρος Πρώτο.



ΣΗΜΕΙΩΜΑ ΕΚΔΟΣΗΣ

Το δεύτερο τεύχος του περιοδικού Physics Time εκδίδεται με αρκετές βελτιώσεις στη μορφή και στον τρόπο διαμόρφωσης των άρθρων του. Γίνεται μία προσπάθεια ώστε το περιεχόμενο να απευθύνεται τόσο σε εξειδικευμένο κοινό όπως πτυχιούχους και φοιτητές θετικών επιστημών, όσο και σε μαθητές προσφέροντας -όπου είναι δυνατόν- πηγές για περαιτέρω μελέτη του θέματος κάθε άρθρου. Όποιος ενδιαφέρεται να συνεισφέρει σε επόμενα τεύχη του περιοδικού, θα ακολουθεί συγκεκριμένο πρότυπο κειμένου ώστε να επιμελείται ο ίδιος τη τελική εμφάνιση του άρθρου του. Μπορείτε να επικοινωνήσετε με τη συντακτική ομάδα (editing team) του Physics Time στέλνοντας email στο et@physicstime.gr.

Το περιοδικό Physics Time εκδίδεται από τον Σύλλογο Μεταπτυχιακών και Υποψηφίων Διδασκόντων του Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ και διανέμεται δωρεάν σε ηλεκτρονική και έντυπη μορφή υπό τους όρους της άδειας Creative Commons, Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση - Παρόμοια Διανομή [CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

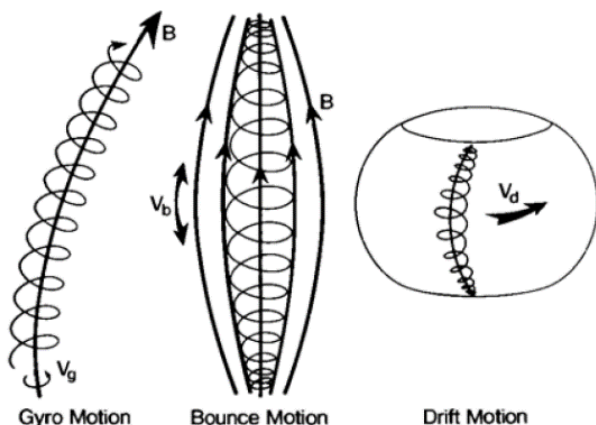
Copyright © Physics Time 2020 - [Physicstime.gr](https://physicstime.gr)



1 Γυροκίνηση – ο Lorentz και η έλικα

Γράφουν οι Πηνελόπη Αγγελοπούλου και Αφροδίτη Νάση

Η **γήινη μαγνητόσφαιρα** περιέχει διάφορους πληθυσμούς πλάσματος **φορτισμένων σωματιδίων**, οι οποίοι προέρχονται είτε από τη γήινη ιονόσφαιρα είτε από τον ηλιακό άνεμο (βλέπε και Άρθρο 1^{ου} Τεύχους: [Παγιδευμένα φορτισμένα σωματίδια γύρω από τη Γη](#)). Οι πληθυσμοί αυτοί αλληλεπιδρούν και επηρεάζουν ταυτόχρονα τις δομές των **ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων**, οι οποίες με τη σειρά τους καθορίζουν και την ίδια την κίνηση των σωματιδίων, οδηγώντας τα στο να πραγματοποιούν τις **τρεις χαρακτηριστικές κινήσεις** τους (Εικόνα 1-1): τη **γυροκίνηση** (gyro-motion), την **κίνηση αναπήδησης** (bounce motion) και την **κίνηση ολίσθησης** (drift motion). Ποιοι μηχανισμοί όμως οδηγούν σε αυτό το αποτέλεσμα; Σε αυτό το άρθρο θα εξετάσουμε τον τρόπο με τον οποίο ένα φορτισμένο σωματίδιο καταλήγει να εκτελεί γυροκίνηση γύρω από μία μαγνητική δυναμική γραμμή.



Εικόνα 1-1: Οι τρεις κινήσεις των παγιδευμένων φορτισμένων σωματιδίων μέσα στο μαγνητικό πεδίο. Πηγή: Kivelson & Russell (1995).

Ας ξεκινήσουμε από την γενικότερη περίπτωση.

Έστω ένα φορτισμένο σωματίδιο, το οποίο έχει μάζα m και φορτίο q , και το οποίο κινείται με ταχύτητα \vec{V} και επιτάχυνση $\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt}$, σε περιοχή με μαγνητικό πεδίο \vec{B} και ηλεκτρικό πεδίο \vec{E} . Τότε, στο σωματίδιο θα ασκείται η **δύναμη Lorentz**:

$$\vec{F}_L = q(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B})$$

(όπου το σύμβολο \times υποδηλώνει εξωτερικό γινόμενο). Έστω ακόμα ότι το σωματίδιο δέχεται και μια εξωτερική δύναμη \vec{F}_{ext} . Τότε, στο σωματίδιο θα ασκείται συνολική δύναμη:

$$\vec{F} = \vec{F}_L + \vec{F}_{\text{ext}} = q(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) + \vec{F}_{\text{ext}}$$

Αντικαθιστώντας τον 2^ο νόμο του Νεύτωνα ($\vec{F} = m\vec{a}$) στη σχέση για την δύναμη \vec{F} προκύπτει η εξίσωση κίνησης:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{q}{m}(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) + \vec{F}_{\text{ext}}$$

σύμφωνα με τη λύση της οποίας μπορούμε να περιγράψουμε λεπτομερώς την κίνηση του σωματιδίου.

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε την πιο απλή περίπτωση εφαρμογής των παραπάνω, και θα δούμε πώς αυτή οδηγεί στην πρώτη από τις τρεις χαρακτηριστικές κινήσεις των σωματιδίων, τη γυροκίνηση.

Υποθέτουμε ότι το σωματίδιο κινείται σε περιοχή στην οποία υπάρχει ένα ομογενές και σταθερό μαγνητικό πεδίο \vec{B} , απουσία ηλεκτρικού πεδίου, $\vec{E} = 0$. Κάνουμε επιπλέον την υπόθεση ότι δεν ασκείται καμία εξωτερική δύναμη, δηλαδή $\vec{F}_{\text{ext}} = 0$. Στην περίπτωση αυτή, η δύναμη που δρα στο σωματίδιο είναι:

$$\begin{aligned} \vec{F} &= \vec{F}_L + \vec{F}_{\text{ext}} = q(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) + \vec{F}_{\text{ext}} = \\ &= q(0 + \vec{V} \times \vec{B}) + 0 = q(\vec{V} \times \vec{B}) = q\vec{V} \times \vec{B} \end{aligned}$$

Η δύναμη αυτή έχει διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της ταχύτητας και του μαγνητικού πεδίου (όπως ορίζει το εξωτερικό γινόμενο, το οποίο υπολογίζεται εύκολα με τον κανόνα του δεξιού χεριού (Εικόνα 1-2)), και η φορά της εξαρτάται από το πρόσημο του φορτίου του σωματιδίου.

Χωρίζουμε την ταχύτητα του σωματιδίου σε δυο συνιστώσες, μια κάθετη (\perp) και μια παράλληλη (\parallel) στο μαγνητικό πεδίο:

$$\vec{V} = \vec{V}_{\perp} + \vec{V}_{\parallel}$$

και έτσι έχουμε:

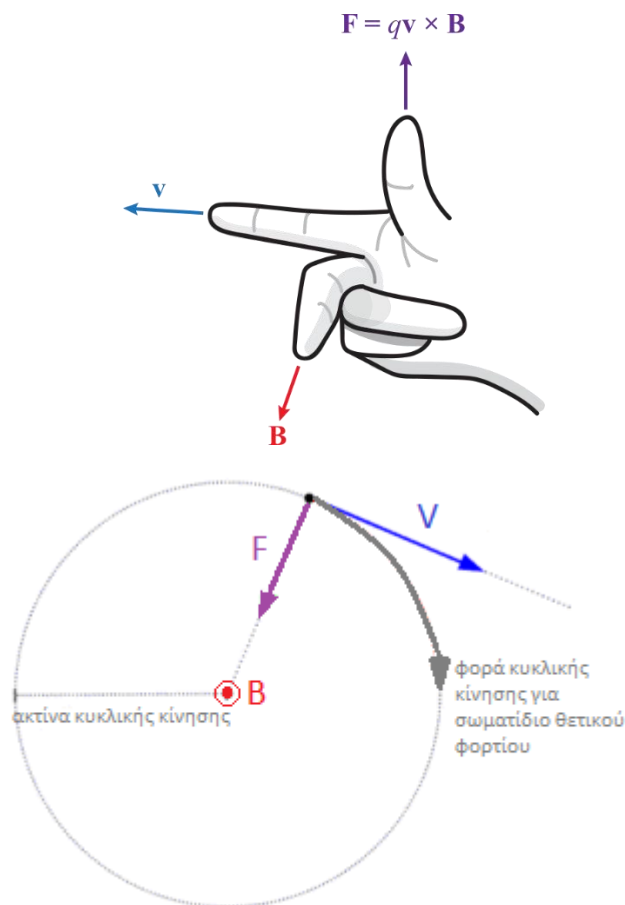
$$\vec{F} = q(\vec{V} \times \vec{B}) = q((\vec{V}_{\perp} + \vec{V}_{\parallel}) \times \vec{B}) = q\vec{V}_{\perp} \times \vec{B} + q\vec{V}_{\parallel} \times \vec{B}$$

Όμως το εξωτερικό γινόμενο παράλληλων ποσοτήτων ισούται με το μηδέν, άρα:

$$\vec{F} = q\vec{V}_{\perp} \times \vec{B} + q\vec{V}_{\parallel} \times \vec{B} = q\vec{V}_{\perp} \times \vec{B} + 0 = q\vec{V}_{\perp} \times \vec{B}$$

Επομένως, η δύναμη υπό την επίδραση της οποίας κινείται το σωματίδιο (όπως και πάλι ορίζει το εξωτερικό γινόμενο) είναι κάθετη και στο μαγνητικό πεδίο \vec{B} αλλά και στην

κάθετη ταχύτητα \vec{V}_\perp , το οποίο σημαίνει ότι δρα ως **κεντρομόλος δύναμη**, αναγκάζοντας το σωματίδιο να ακολουθεί κυκλική τροχιά γύρω από το μαγνητικό πεδίο \vec{B} , με φορά που εξαρτάται από το φορτίο του.



Εικόνα 1-2: Ο κανόνας του δεξιού χεριού δίνει εύκολα τη φορά της δύναμης Lorentz, γνωρίζοντας τη φορά της ταχύτητας V και του μαγνητικού πεδίου B (στην δεύτερη εικόνα αυτό εξέρχεται της σελίδας). Η δύναμη είναι πάντα κάθετη σε αυτά, αλλά η φορά της εξαρτάται από το φορτίο q του σωματιδίου. Για θετικό φορτίο ($q>0$), αυτό ακολουθεί τον αντίχειρα και κινείται δεξιόστροφα γύρω από το πεδίο B , ενώ για αρνητικό φορτίο ($q<0$) η φορά του είναι αριστερόστροφη. Στις συγκεκριμένες εικόνες, η ταχύτητα είναι πλήρως κάθετη στο μαγνητικό πεδίο, επομένως απεικονίζεται η V_\perp . (Πηγή και Πηγή)

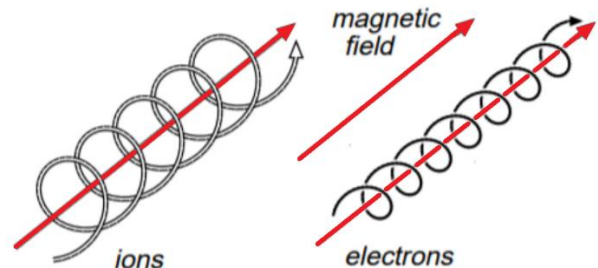
Διαπιστώνουμε λοιπόν ότι προκύπτουν δυο επιμέρους κινήσεις τις οποίες εκτελεί το σωματίδιο:

- Μια **ευθύγραμμη ομαλή κίνηση** παράλληλα στο μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα \vec{V}_\parallel , στην οποία το σωματίδιο κινείται κατά μήκος μιας μαγνητικής δυναμικής γραμμής.

- Μια **ομαλή κυκλική κίνηση (κίνηση Larmor)** κάθετα στο μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα \vec{V}_\perp , στην οποία το σωματίδιο κινείται γύρω από μια μαγνητική δυναμική γραμμή.

Ο συνδυασμός των δυο αυτών κινήσεων, αποτελεί τη **γυροκίνηση** (gyro-motion), η οποία είναι μία **ελικοειδής κίνηση κατά μήκος και γύρω από τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου**, με ακτίνα που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του σωματιδίου (μάζα m και φορτίο q).

Αυτό σημαίνει ότι τα δυο κύρια είδη φορτισμένων σωματιδίων που αποτελούν τους πληθυσμούς πλάσματος της μαγνητόσφαιρας, δηλαδή τα ηλεκτρόνια ($m=9\cdot 10^{-31}$ kg, $q=-1.6\cdot 10^{-19}$ C) και τα πρωτόνια ($m=1.6\cdot 10^{-27}$ kg, $q=+1.6\cdot 10^{-19}$ C), θα εκτελούν το ίδιο είδος κίνησης, αλλά το καθένα με διαφορετικά χαρακτηριστικά (διαφορετική ακτίνα και αντίθετη φορά κυκλικής κίνησης).

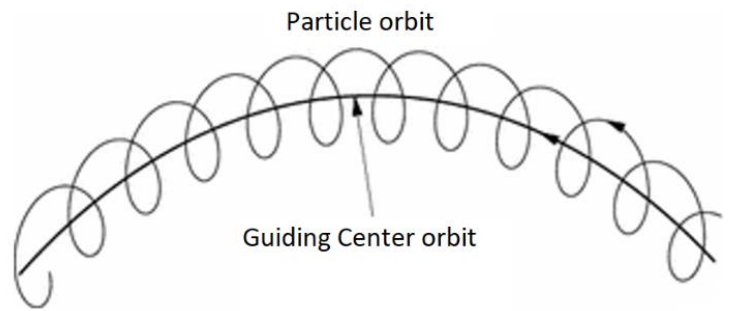
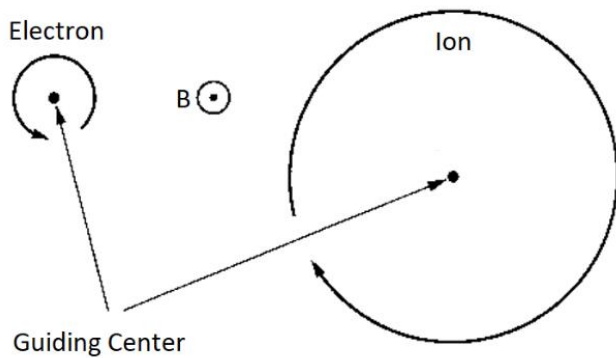


Εικόνα 1-3: Η γυροκίνηση που εκτελούν τα σωματίδια γύρω από τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Τα ηλεκτρόνια (μικρή μάζα, αρνητικό φορτίο) έχουν μικρή ακτίνα έλικας και αριστερόστροφη φορά, ενώ τα διάφορα ιόντα και τα πρωτόνια (μεγαλύτερη μάζα, θετικό φορτίο) έχουν μεγαλύτερη ακτίνα και δεξιόστροφη φορά. (Πηγή)

Για ευκολότερη περιγραφή της γυροκίνησης, πολλές φορές η κάθετη ταχύτητα της κυκλικής κίνησης ονομάζεται **“γυροταχύτητα”** ή **“ταχύτητα Larmor”** οπότε και συμβολίζεται με έναν δείκτη L , δηλαδή: $\vec{V}_\perp = \vec{V}_L$, ενώ η παράλληλη ταχύτητα της ευθύγραμμης κίνησης ονομάζεται **“ταχύτητα οδηγού κέντρου”** και συμβολίζεται με έναν δείκτη gc (από το guiding center): $\vec{V}_\parallel = \vec{V}_{gc}$.

Έτσι, ορίζοντας ως οδηγό κέντρο το κέντρο της κυκλικής τροχιάς, μπορούμε να αναλύσουμε την γυροκίνηση σε δυο επιμέρους κινήσεις, ως εξής:

- Μια **ευθύγραμμη ομαλή κίνηση** που εκτελεί το οδηγό κέντρο κατά μήκος μιας μαγνητικής δυναμικής γραμμής.
- Μια **ομαλή κυκλική κίνηση** που εκτελεί το σωματίδιο γύρω από το οδηγό κέντρο.



Εικόνα 1-4: Ο ορισμός του οδηγού κέντρου ως το κέντρο της κυκλικής κίνησης που εκτελούν τα σωματίδια γύρω από το μαγνητικό πεδίο, και ο διαχωρισμός των κινήσεων στην κίνηση του οδηγού κέντρου (κατά μήκος της μαγνητικής γραμμής), και του πραγματικού σωματιδίου (που κινείται κυκλικά γύρω από το οδηγό κέντρο). (Πηγή και Πηγή)

Ο διαχωρισμός αυτός θα μας φανεί χρήσιμος στη μελέτη των άλλων δύο κινήσεων, αφού θα μας επιτρέψει να μελετήσουμε πιο εύκολα τη συνολική κίνηση ενός σωματιδίου εντός της μαγνητόσφαιρας, λαμβάνοντας υπ' όψη μόνο την κίνηση του οδηγού κέντρου.

Σε επόμενα άρθρα θα δούμε πώς οι πιο σύνθετες περιπτώσεις οδηγούν στην **κίνηση ανάκλασης** και στην **κίνηση ολίσθησης**, αλλά και πώς οι κινήσεις αυτές συνδέονται με το σέλας.

Αναφορές:

- Ι. Α. Δαγκλής, Σημειώσεις μαθήματος Διαστημικής Φυσικής, [e-class](#).
- [Walt, Introduction to Geomagnetically Trapped Radiation](#).
- [Kivelson & Russel, Introduction to Space Physics](#).
- [Kallenrode, Space Physics](#).
- [Chen, Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion](#).
- [Βιβλίο Φυσικής Β Λυκείου](#), Κεφάλαιο 5.8.



Εικόνα 1-5: Φωτογραφία του σέλαος από τον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό. (Πηγή: [ESA/NASA](#))

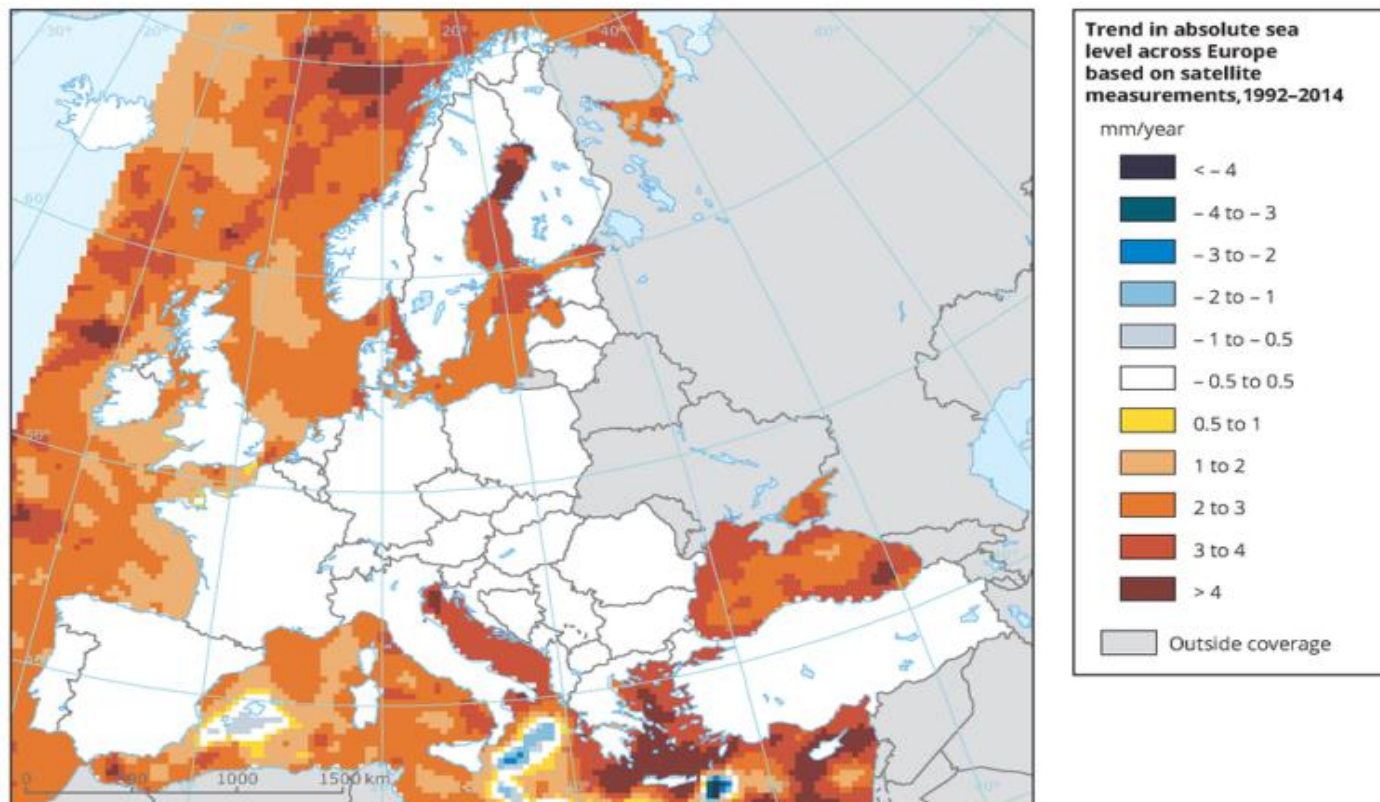
2 Χάνοντας έδαφος: Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη θάλασσα

Γράφει ο Βασίλης Ντούρος

Τα παράλια της Υδρογείου μαγνητίζουν και ελκύουν τον άνθρωπο καθ' όλη την ιστορική διαδρομή του πάνω στον πλανήτη. Ο John Tibbetts περιγράφει παραστατικά στο άρθρο του *Coastal Cities: Living on the Edge*, Nov 2002, τον εποικισμό των παραλίων, ως μία εκ των μεγαλύτερων μεταναστεύσεων στη σύγχρονη ιστορία όπου ανθρώπινα σμήνη μετακινούνται προς τις παραλιακές πόλεις, ιδιαίτερα των αναπτυσσόμενων κρατών, τα τελευταία 50 χρόνια. Επίσης στην Ευρώπη, οι παράκτιες περιοχές είναι πληθυσμιακά κέντρα έντονης οικονομικής δραστηριότητας που φιλοξενούν ποικίλα οικοσυστήματα. Ωστόσο η επαπειλούμενη κλιματική αλλαγή αντιλαμβανόμενη μέσα από την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, τη συχνότερη εμφάνιση εντονότερων θυελλογενών μετεωρολογικών παλινδρομιών και την διάβρωση των ακτών απειλεί τους ανθρώπους και τα φυσικά συστήματα των ακτών.

Η αύξηση της στάθμης της θάλασσας προκαλείται από τη θερμική διαστολή των θαλάσσιων μαζών και την τήξη των ηπειρωτικών πάγων. Η ασφαλής όμως εκτίμηση κατά πόσον

αυξάνεται η επικινδυνότητα μιας περιοχής από την άνοδο της στάθμης θαλάσσιων υδάτων δεν καθορίζεται μόνο από το ρυθμό και το εύρος ανόδου της στάθμης αλλά και από άλλους τοπικούς παράγοντες όπως είναι ο τεκτονισμός, η προσφορά ιζήματος (εκβολές ποταμών) και η παράκτια γεωμορφολογία/λιθολογία. Έτσι η απόλυτη στάθμη της θάλασσας δεν αυξάνεται ομοιογενώς σε όλες τις περιοχές αλλά οι παραπάνω παράγοντες λειτουργούν είτε προσθετικά είτε αφαιρετικά στην μεταβολή της στάθμης λόγω κλιματικής αλλαγής (Εικόνα 2-1). Αυτό όμως που πρέπει να γίνει γνωστό είναι πως η άνοδος της στάθμης της θάλασσας είναι σχετικά ανελαστική έναντι των μειώσεων εκπομπών αερίων ρύπων του θερμοκηπίου. Αυτό σημαίνει ότι ακόμα και αν δραστικές πολιτικές μετριασμού παγκοσμίως κατορθώσουν να σταθεροποιήσουν τις συγκεντρώσεις αυτών των αερίων, η άνοδος της θαλάσσιας στάθμης όπως και τα συνοδά φαινόμενα θυελλογενών παλινδρομιών και παράκτιας διάβρωσης θα συνεχίσουν να υφίστανται για αιώνες.



Εικόνα 2-1: Η τάση της μεταβολής της στάθμης της θάλασσας στην Ευρώπη όπως καταγράφηκε από δορυφορικές μετρήσεις την περίοδο 1992-2014 (image credit: ESA)

Οι Church & White μαζί με συνεργάτες τους σε δημοσίευσή τους ([Revisiting the Earth's sea-level and energy budgets from 1961 to 2008](#)) το 2011 παρουσιάζουν το ρυθμό ανόδου της στάθμης της θάλασσας από το 1972 έως το 2008 σε δύο διακριτές χρονικές περιόδους, 1972-2008 και 1993-2008 (Εικόνα 2-2). Στον πίνακα αυτό γίνεται φανερή η συνεισφορά των παραγόντων που επηρεάζονται από την κλιματική αλλαγή επιταχύνοντας το φαινόμενο της ανόδου της στάθμης τα τελευταία 15 χρόνια με ρυθμό 2.54 χιλ/έτος. Αντίθετα ο μέσος ρυθμός της περιόδου 1972-2008 είναι 1.78 χιλ/έτος. Αξιοπρόσκεκτη είναι η συνεισφορά από το λιώσιμο των πάγων της Γροιλανδίας, που ανέρχεται την τελευταία περίοδο σχεδόν στο 1 χιλ/έτος. Η ολική εκτίμηση του ρυθμού ανόδου της στάθμης της θάλασσας για την περίοδο 1993-2008 ανέρχεται στα 3.22 χιλ/έτος. Βέβαια, δεν είναι ακόμα εμφανές από τις παρατηρήσεις αν αυτός ο αυξημένος ρυθμός ανόδου θα συνεχιστεί και στο μέλλον. Είναι δεδομένο ότι υπεισέρχονται σφάλματα σε αυτές τις μετρήσεις όμως η γενική εικόνα είναι ξεκάθαρη έτσι όπως έχει αποτυπωθεί και από άλλους μελετητές και επισημοποιείται από το IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Η κλιματική αλλαγή συνεισφέρει και εντείνει την άνοδο της στάθμης της θάλασσας. Ωστόσο το να γίνουν προβλέψεις για το μέλλον είναι δύσκολο λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας που υπεισέρχεται στις επιστημονικές προσεγγίσεις είτε των εμπειρικών-στατιστικών μοντέλων είτε των αριθμητικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται. Παρ' όλα αυτά, είναι σίγουρο πως η άνοδος της στάθμης της θάλασσας θα συνεχιστεί και ύστερα από το 2100.

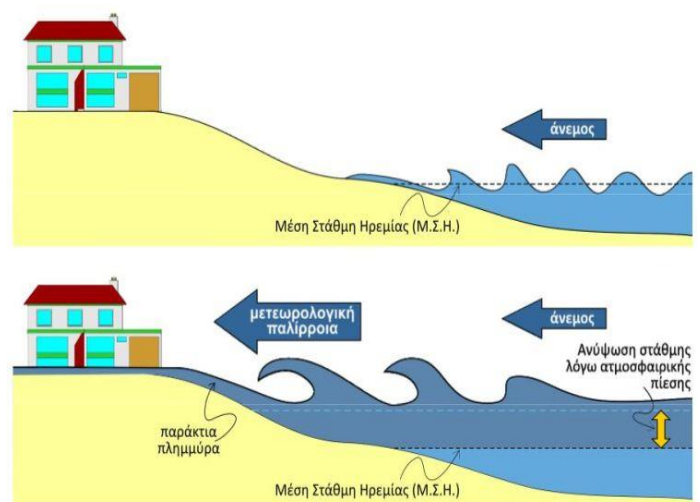
Table 1. The Sea-Level Budget^a

Component	1972 → 2008	1993 → 2008
Total s.l. (t.g. only)	1.83 ± 0.18^b	2.61 ± 0.55
Total s.l. (t.g. + sat)	2.10 ± 0.16	3.22 ± 0.41
Shallow thermal (0-700m)	0.63 ± 0.09	0.71 ± 0.31
Deep thermal (700-3000m)	0.07 ± 0.10	0.07 ± 0.10
Abyssal thermal (3000m-bottom)	0.10 ± 0.06	0.10 ± 0.06
Total thermal (full depth)	0.80 ± 0.15	0.88 ± 0.33
Glaciers & Ice Caps	0.67 ± 0.03	0.99 ± 0.04
Greenland Ice Sheet	0.12 ± 0.17	0.31 ± 0.17
Antarctic Ice Sheet	0.30 ± 0.20	0.43 ± 0.20
Land ice (G&IC, GIS, AIS)	1.09 ± 0.26	1.73 ± 0.27
Thermal (full depth) + Land ice	1.89 ± 0.30	2.61 ± 0.42
Dam retention	-0.44 ± 0.15	-0.30 ± 0.15
Groundwater depletion	0.26 ± 0.07	0.35 ± 0.07
Natural terrestrial storage	0.07 ± 0.10	-0.14 ± 0.10
Total terrestrial storage	-0.11 ± 0.19	-0.08 ± 0.19
Total mass contributions	0.98 ± 0.33	1.66 ± 0.33
Total thermal + Mass	1.78 ± 0.36	2.54 ± 0.46
Residual (t.g. only)	0.05 ± 0.40	0.08 ± 0.72
Residual (t.g. + sat)	0.32 ± 0.39	0.69 ± 0.62

Εικόνα 2-2: Συνεισφορά στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας (Church et al, Sea Level and Energy Budgets)

Η άνοδος της στάθμης όμως φέρνει και δυνητικά καταστροφικότερες φουσκοθαλασιές παρόλο που είναι δύο ξεχωριστά φαινόμενα. Ως φουσκοθαλασιά εδώ δεν εννοείται η αστρονομική παλίρροια αλλά η θυελλογενής μετεωρολογική παλίρροια, δηλαδή η άνοδος της στάθμης της θάλασσας εξαιτίας των ισχυρών ανέμων και μεταβολής της πίεσης της ατμόσφαιρας. Οι θυελλογενείς παλίρροιες είναι στενά συνδεδεμένες με την συχνότητα, την ένταση αλλά και τη διαδρομή που διαγράφει μία καταιγίδα καθώς και με το τοπικό ανάγλυφο της ακτής. Απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή όταν συνδυάζονται με τις αστρονομικές παλίρροιες αφού τότε το ύψος της στάθμης αλλά και των κυμάτων γίνεται επικίνδυνο (Εικόνα 2-3). Οι αλλαγές της μέσης στάθμης της θάλασσας και της έντασης των καταιγίδων (που επιτείνεται από τη κλιματική αλλαγή) μπορούν να προκαλέσουν ακραία κυματικά φαινόμενα και να έχουν αντίστοιχα σημαντικές επιπτώσεις στις παράκτιες περιοχές. Αυτό συμβαίνει διότι οι ισχυροί άνεμοι συγκεντρώνουν μεγαλύτερη μάζα νερού και ενέργειας, ενώ το ύψος των κυμάτων που προκαλούνται αυξάνεται όσο αυξάνεται και η μέση στάθμη της θάλασσας, με αποτέλεσμα την αύξηση αναρρίχησης των κυμάτων στο χερσαίο παράκτιο χώρο και σημαντικές συνέπειες για την παραλιακή μορφοδυναμική (Krestenitis et al. 2010)

Προβλέψεις είναι αδύνατο να γίνουν για τη συχνότητα και ένταση ενός τέτοιου φαινομένου στο μέλλον. Μάλιστα στην επιστημονική κοινότητα χαρακτηρίζεται ως πρόκληση κάτι τέτοιο. Κατά τον προηγούμενο αιώνα αρκετά περιστατικά φουσκοθαλασιών στοίχισαν ζωές και κατέστρεψαν περιουσίες στην Ευρώπη. Το πιο γνωστό γεγονός συνέβη το 1953, όταν συνδυάστηκε μία ισχυρή θυελλογενής μετεωρολογική παλίρροια με μία αστρονομική παλίρροια



Εικόνα 2-3: Ο συνδυασμός μιας αστρονομικής παλίρροιας και μιας μετεωρολογικής παλίρροιας μπορεί να αποβεί καταστροφικός.

και σημειώθηκαν 2.000 θάνατοι στο Βέλγιο, την Ολλανδία και το Ηνωμένο Βασίλειο, ενώ καταστράφηκαν περισσότερα από 40.000 κτίρια. Πέρα από τον ορατό κίνδυνο για τον άνθρωπο εξαιτίας εκτεταμένης πλημμύρας, επίσης οι καταστροφές υποδομών, η διάβρωση των ακτών και η είσοδος αλμυρού νερού σε βιότοπους και εκβολές ποταμών πρέπει να συνυπολογιστεί στις επιπτώσεις.

Τόσο η θυελλογενής καταιγίδα όσο και η εν γένει αύξηση της στάθμης της θάλασσας ως αποτέλεσμα έχουν την διάβρωση των ακτών. Στην Ευρώπη περισσότεροι από 5 εκατομμύρια άνθρωποι ζουν σε περιοχές που κινδυνεύουν από την διάβρωση των ακτών και από πλημμύρες (ορίζονται ως τέτοιες, οι περιοχές που έχουν υψόμετρο χαμηλότερο των 5 μέτρων και βρίσκονται σε απόσταση όχι μεγαλύτερη του 1 χιλιομέτρου από την ακτή). Έτσι, η συνεχώς αυξανόμενη χρήση των ακτών μετατρέπει τη διάβρωση από ένα φυσικό και φυσιολογικό γεγονός σε ένα πρόβλημα αυξημένης σοβαρότητας που περιλαμβάνει οικονομική ζημιά, οικολογική βλάβη και κοινωνικά προβλήματα.

Απώλεια περιουσίας, υποδομών, παραλιακής ακτής και πολύτιμων ενδιατημάτων στοιχίζουν εκατομμύρια ευρώ κάθε χρόνο, ενώ την ίδια στιγμή η προστασία στοιχίζει εξίσου ακριβά. Για παράδειγμα, στη Γαλλία ξοδεύονται περίπου 20 εκατομμύρια ευρώ σε μέτρα μετριασμού της διάβρωσης, ενώ στην Ολλανδία το ετήσιο κόστος για την αναπλήρωση άμμου είναι στα 41 εκατομμύρια ευρώ.

Γίνεται κατανοητό πως η κλιματική αλλαγή ενισχύει τους φυσικούς κινδύνους απέναντι στις κοινωνίες ενώ μεγάλα χρηματικά ποσά που θα γίνουν ακόμα μεγαλύτερα, θα διοχετευθούν σε μέτρα προστασίας απέναντι σε αυτούς. Η αντιμετώπιση αυτής της πραγματικότητας γίνεται πρώτα σε συμπεριφορικό επίπεδο και ύστερα σε τεχνολογικό και θεσμικό. Η ώρα για δράση είναι τώρα, ήταν χθες, θα είναι και αύριο. Το θέμα του περιβάλλοντος υπερβαίνει κάθε τι άλλο και μία νέα συνείδηση πρέπει να εδραιωθεί στη δική μας γενιά, διαφορετικά η επόμενη θα ζήσει στην εποχή των μεγάλων ανακατατάξεων και συγκρούσεων.



Εικόνα 2-4: Το τελευταίο σπίτι του βυθισμένου νησιού Holland των ΗΠΑ (image credit: Forbes)

3 Elephant's foot (Τσερνόμπιλ, 1986)

Γράφει ο Δημήτρης Δημόπουλος

Το πόδι του Ελέφαντα

Το πόδι Ελέφαντα (Elephant Foot) είναι ένα στερεοποιημένο πλέον μίγμα κυρίως δομικών μετάλλων, πυριτίου και ραδιενεργών υλικών που σχηματίστηκε κατά την τήξη του πυρηνικού αντιδραστήρα 4 στο Τσερνόμπιλ της Ουκρανίας, στις 26 Απριλίου 1986. Η δημιουργία του οφείλεται στη διαδοχική μηχανική αστοχία και τήξη των δομικών υλικών του εργοστασίου που χρησιμοποιήθηκαν στο εσωτερικό του αντιδραστήρα αλλά και στα κατάντη τμήματα του κτηρίου. Το μίγμα αυτό, τη στιγμή του σχηματισμού του, ήταν τόσο ραδιενεργό που μπορούσε να προκαλέσει θάνατο σε οποιονδήποτε παρέμενε κοντά του περισσότερο από λίγα λεπτά. Σήμερα παραμένει ακόμα εξαιρετικά ραδιενεργό.

Γεωμετρική διάταξη του πυρηνικού αντιδραστήρα 4

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες τύπου RBMK (РБМК) σχεδιάστηκαν και δοκιμάστηκαν στη Σοβιετική Ένωση τη

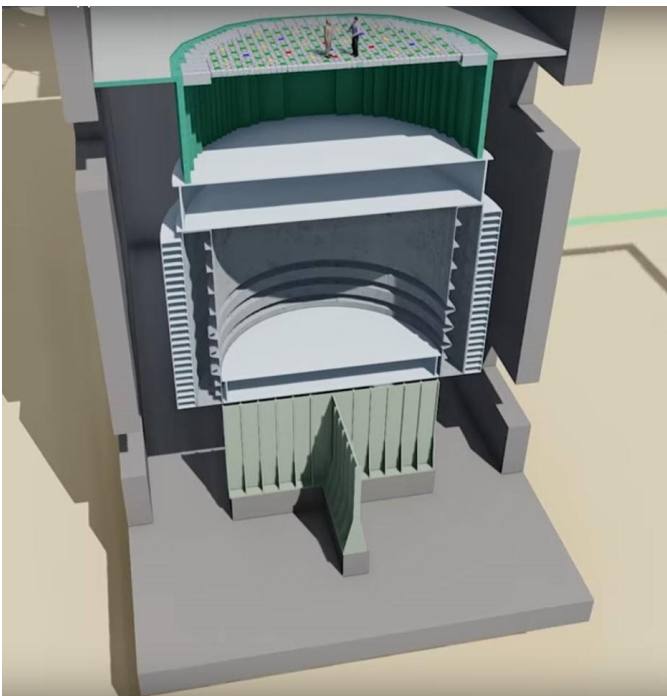
δεκαετία του '60 και κατασκευάστηκαν μαζικά για την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας μέχρι το 1986. Μετά το πυρηνικό ατύχημα του Τσερνόμπιλ, τον Απρίλιο του 1986, ο αρχικός σχεδιασμός άλλαξε και πολλοί αντιδραστήρες που ήταν ήδη στη διαδικασία παραγωγής ακυρώθηκαν. Από το 1986 έως σήμερα έχουν αποσυρθεί 16 αντιδραστήρες αυτού του τύπου στην Ουκρανία και Ρωσία ενώ 10 λειτουργούν ακόμη στις επαρχίες Κουρσκ, Λένινγκραντ και Σμόλενσκ.

Η βασική διάταξη του ΡΒΜΚ αντιδραστήρα 4 στο Τσερνόμπιλ της Ουκρανίας καταλάμβανε έναν κυλινδρικό χώρο διαμέτρου 14m και ύψους 8m που περιείχε μπλοκ καθαρού γραφίτη (C, σημείο τήξης 3600°C) τετραγωνικής διατομής 0,25 x 0,25m τα οποία ήταν συνδεδεμένα σε μία συμπαγή γεωμετρία που δημιουργούσε 2000 στήλες ύψους 8 μέτρων. Κάθε στήλη από μπλοκ γραφίτη είχε μία κεντρική κυκλική οπή από την οποία διερχόταν το υδραυλικό σύστημα κυκλοφορίας νερού από ανοξείδωτο χάλυβα



Εικόνα 3-1: Το πόδι του ελέφαντα όταν φωτογραφήθηκε το 1989. (photo: Rosatom)

(κράμα Fe και C, σημείο τήξης 1371°C) που έψυχε το πυρηνικό καύσιμο (UO₂, σημείο τήξης 2800°C) και τα προϊόντα σχάσης. Το πυρηνικό καύσιμο και τα παραγόμενα ραδιενεργά ισότοπα βρίσκονταν σφραγισμένα σε δοχεία κράματος ζirkονίου (Zr, σημείο τήξης 1855°C) μέσα στους σωλήνες ψύξης. Άρα σχηματικά μπορούμε να πούμε ότι το καύσιμο και τα προϊόντα σχάσης καλύπτονταν διαδοχικά από κράμα ζirkονίου, νερό και ατμό, ανοξείδωτο χάλυβα και γραφίτη. Για την μείωση της ισχύος του αντιδραστήρα υπήρχαν συνολικά 211 ράβδοι βορίου (2076°C) οι οποίοι τη στιγμή του ατυχήματος είχαν πλήρως αποσυρθεί από τον αντιδραστήρα και η απότομη κάθοδος τους υπήρξε καθοριστική για την εξέλιξη του φαινομένου.



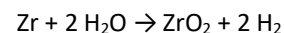
Εικόνα 3-2: Το κέλυφος του αντιδραστήρα και το σταυροειδές υποστύλωμα. (3D: Mike Bell)

Όλος ο αντιδραστήρας περιβαλλόταν περιμετρικά από μία χαλύβδινη θωράκιση συνολικού πάχους 6cm η οποία είχε διπλό τοίχωμα με διάκενο 2,4m ώστε να δημιουργείται μία δεξαμενή που περιείχε νερό για έκτακτη χρήση ως ψυκτικό. Γύρω από τη δεξαμενή αυτή υπήρχε μία δεύτερη περιμετρική δεξαμενή με τοιχώματα σκυροδέματος η οποία ήταν γεμάτη με χαλαζιακή άμμο (SiO₂, σημείο τήξης 1723°C). Στο άνω μέρος του αντιδραστήρα είχε τοποθετηθεί ένας χαλύβδινος δίσκος μικτού πάχους 3m και διαμέτρου 15m ο οποίος ήταν διάτρητος ώστε να διέρχονται τα 2000 κανάλια του υδραυλικού συστήματος ψύξης και πυρηνικού καυσίμου. Ο δίσκος αυτός χρησίμευε ως άνω βιολογική ασπίδα ενώ η απόληξη των καναλιών σχημάτιζε το δάπεδο από 2000 κύβους του ορόφου ελέγχου και αλλαγής πυρηνικού καυσίμου. Στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα ήταν επίσης τοποθετημένη μία χαλύβδινη πλάκα μικτού

πάχους 2m και διαμέτρου 14,5m η οποία ήταν διάτρητη ώστε να διέρχεται το υδραυλικό σύστημα ψύξης του αντιδραστήρα. Η πλάκα αυτή χρησίμευε ως κάτω βιολογική ασπίδα και έφερε τα φορτία όλης της υπερκείμενης κατασκευής. Εδραζόταν σε ένα χαλύβδινο υποστύλωμα σε σταυροειδή διατομή, το οποίο με τη σειρά του μετέφερε τα φορτία στην υποκείμενη πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος της αίθουσας του αντιδραστήρα η οποία ήταν εξ ολοκλήρου κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής (Εικόνα 3-2: Το κέλυφος του αντιδραστήρα και το σταυροειδές υποστύλωμα, 3D recreation: Mike Bell). Κάτω από τον αντιδραστήρα υπήρχαν 3 όροφοι ελέγχου του υδραυλικού συστήματος, κατασκευασμένοι από οπλισμένο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής και δεξαμενές νερού. Η θεμελίωση του εργοστασίου ήταν μία γενική κοιτόστρωση (ενιαία πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος) πάχους 1,5m. Εκτός από την κάτω βιολογική ασπίδα που ήταν ούτως ή άλλως απαραίτητη ως φέρουσα κατασκευή, ο αντιδραστήρας δεν είχε κάποιο άλλο εξειδικευμένο περιοριστικό όριο για τη συγκράτηση του ραδιενεργού υλικού σε περίπτωση κατάρρευσης του⁽¹⁾. Από τον πυθμένα του αντιδραστήρα ως το έδαφος θεμελίωσης παρεμβάλλονταν συνολικά 3m οπλισμένου σκυροδέματος (Εικόνα 3-5).

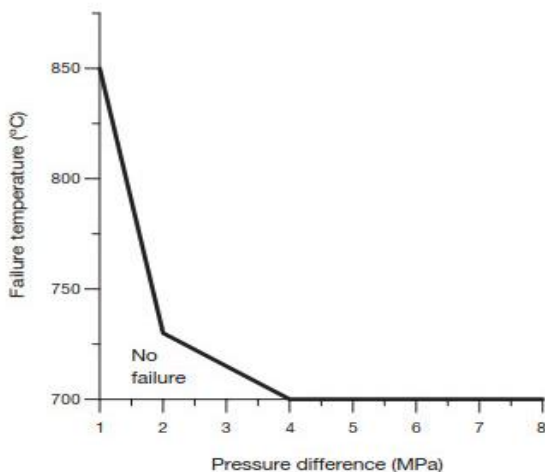
Αστοχία κράματος Ζirkονίου και έκρηξη

Η έκρηξη ήταν επακόλουθο (μεταξύ άλλων) της μηχανικής αστοχίας του κράματος ζirkονίου⁽²⁾ στις ράβδους πυρηνικού καυσίμου εξαιτίας της σταδιακής υπερθέρμανσης και οξείδωσης του. Σε συνθήκες λειτουργίας του αντιδραστήρα (T<350° C και P=7MPa⁽²⁾) το όριο μηχανικής διαρροής του κράματος ζirkονίου είναι 20MPa. Στους 850°C το όριο αυτό έχει πέσει στο 1MPa ενώ ταυτόχρονα η οξείδωση του ζirkονίου με τον ατμό παράγει υδρογόνο και επιπλέον θερμότητα (Εικόνα 3-3).



Για να ξεκινήσει η διαδικασία της ταχείας οξείδωσης, η θερμοκρασία στον αντιδραστήρα είχε ήδη φτάσει τους 1230°C⁽³⁾. Η μηχανική αστοχία των δοχείων καυσίμου έφερε τα υπέρθερμα ραδιενεργά ισότοπα απευθείας σε επαφή με το νερό και τον ατμό στο υδραυλικό σύστημα ψύξης.

Η έκρηξη του αντιδραστήρα 4 στις 26 Απριλίου 1986 προκάλεσε την εκτίναξη της άνω βιολογικής ασπίδας (η οποία είχε μάζα 2000 τόνων) και μέρους του πυρήνα, στον περιβάλλοντα χώρο του εργοστασίου και στις όμορες οροφές, οι οποίες έχοντας στεγανωτική ασφαλική επιστρώση, πήραν φωτιά. Το τμήμα του αντιδραστήρα που παρέμεινε εντός του εργοστασίου είχε υποστεί ολοκληρωτικές αστοχίες και ήταν πλέον σε επαφή με την ατμόσφαιρα.

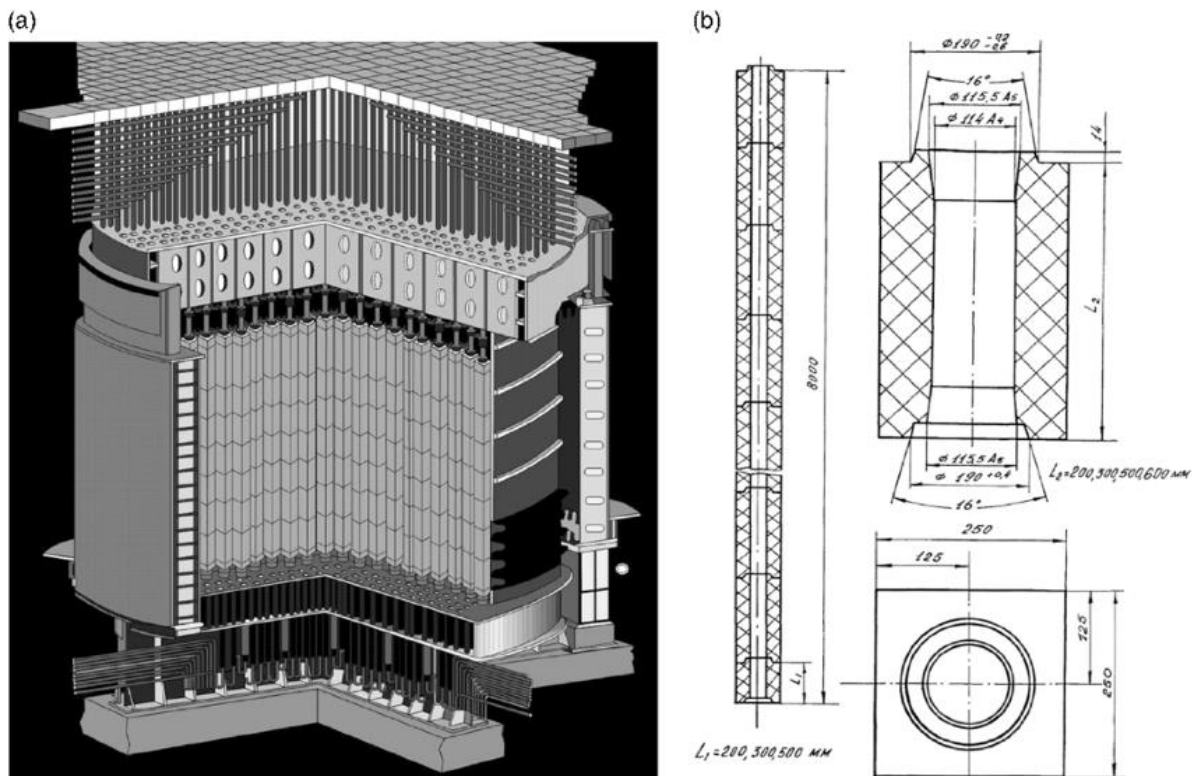


Εικόνα 3-3: Μηχανική Αντοχή του δοχείου Ζιρκονίου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας (IAEA)

Από την έκρηξη διατρήθηκε επίσης η κάτω βιολογική ασπίδα και μέρος του αντιδραστήρα κατέρρευσε στον πόδα του σταυροειδούς υποστυλώματος. Μετά την έκρηξη το υδραυλικό σύστημα ψύξης του αντιδραστήρα είχε καταστραφεί ολοσχερώς και το νερό σε υγρή μορφή που μετακινήθηκε λόγω διαρροών από τα ανάντη, εξατμίστηκε σε λεπτά. Ο κατεστραμμένος αντιδραστήρας, χωρίς ψύξη, συνέχισε να αποδίδει θερμότητα στο περιβάλλον εξαιτίας της σχάσης ουρανίου -όπου τα συντρίμματα γραφίτη το επέτρεπαν- και εξαιτίας της διαδοχικής ραδιενεργούς διάσπασης των υπολοίπων ραδιενεργών ισοτόπων που είχαν δημιουργηθεί από τη σχάση.

Καύση Γραφίτη

Ο γραφίτης (καθαρός C) είναι ένα υλικό με πολύ μεγάλη θερμική αγωγιμότητα που το κάνει εξαιρετικά ανίκανο να συντηρήσει, χωρίς εξωτερική πηγή θερμότητας, μία αυτόνομη διαδικασία καύσης. Μέσα στον πυρηνικό αντιδραστήρα ο γραφίτης υποβάλλεται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες του κατώτατου σημείου οξείδωσης του, που είναι η θερμοκρασία των 650°C. Για να μπορέσει ο γραφίτης να αναφλεγεί πρέπει να θερμανθεί σε θερμοκρασίες άνω των 650°C, να διατηρηθεί αυτή η θερμοκρασία από κάποια εξωτερική πηγή, να υπάρχει μία ικανή παροχή αέρα που θα απομακρύνει τα αέρια καύσης και θα παρέχει οξυγόνο χωρίς όμως να ψύχει υπερβολικά την επιφάνεια του γραφίτη⁽⁴⁾. Η έκρηξη του αντιδραστήρα 4 κατεδάφισε το βόρειο τμήμα της οροφής του εργοστασίου πάνω από τον αντιδραστήρα, φέρνοντας σε επαφή τον γραφίτη με την ατμόσφαιρα και τον βόρειο άνεμο, διατάραξε τη γεωμετρία δημιουργώντας ασυνέχειες και αεροδιαδρόμους ενώ η θερμότητα από τη ραδιενεργό διάσπαση συντηρούσε τις πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Η πυρκαγιά που προκλήθηκε δευτερόλεπτα μετά την έκρηξη ήταν λοιπόν ο γραφίτης του ίδιου του αντιδραστήρα που υπό ιδανικές συνθήκες καιγόταν σε διοξείδιο και μονοξείδιο του άνθρακα. Η πυρκαγιά αυτή συντηρήθηκε για 9 ημέρες και κατασβέστηκε με τη ρίψη 40 τόνων βορίου, 800 τόνων δολομίτη, 1800 τόνων άμμου και μαλακής αργίλου και 2400 τόνων μολυβδου. Υπολογίζεται ότι κάηκε το 10-50% του γραφίτη του αντιδραστήρα χωρίς όμως η θερμότητα από την καύση να έχει κάποια



Εικόνα 3-4: Οι στήλες γραφίτη στο εσωτερικό του αντιδραστήρα (photo: E. Narkunas et al, 2018)

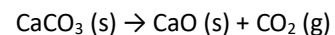
ουσιαστική σημασία στην τήξη του πυρήνα που από τις πρώτες ώρες μετά την έκρηξη είχε ξεκινήσει τη δημιουργία του corium⁽⁴⁾.

Δημιουργία Corium

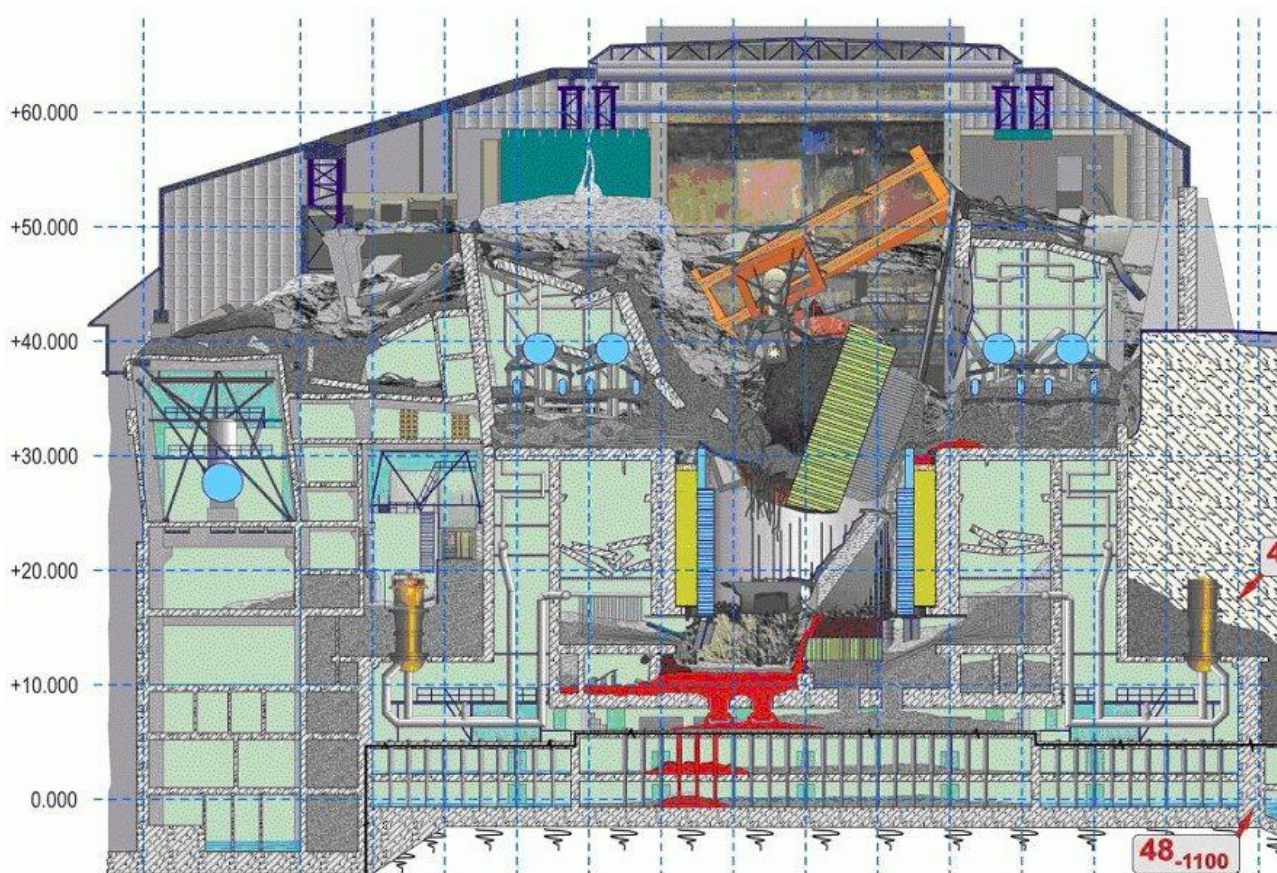
Η έκλυση θερμότητας από τη ραδιενεργή διάσπαση (decay heat) κρατά έναν αντιδραστήρα ενεργό ακόμα και αν η προκαλούμενη διαδικασία σχάσης έχει τερματιστεί. Στον αντιδραστήρα του Τσερνόμπιλ μετά την καταστροφή του, υπήρχαν ακόμα τμήματα γραφίτη και πυρηνικού καυσίμου που συνέχισαν τοπικά τη διαδικασία σχάσης ενώ το τμήμα του που είχε καταρρεύσει στον πόδα του υποστυλώματος του, ήταν πλέον ένας σωρός από γραφίτη, ουράνιο και ραδιενεργά ισότοπα, χάλυβα και λιωμένο κράμα ζirkονίου. Η συνεχής έκλυση θερμότητας δημιούργησε σύντομα ένα υγρό διάλυρο μίγμα υλικών, σαν λάβα, το οποίο κύλισε πάνω στην πλάκα σκυροδέματος που συγκρατούσε τα φορτία του αντιδραστήρα και ξεκίνησε τη διαδικασία διάτρησής της. Τα επόμενα λεπτά, ο υπόλοιπος πυρήνας του αντιδραστήρα που δεν είχε καταρρεύσει από την έκρηξη άρχισε να κατέρχεται σε υγρή διάλυρη μορφή πάλι καταλήγοντας στο πρώτο φράγμα σκυροδέματος. Η υγρή αυτή λάβα πήρε την ονομασία της από το μέρος προέλευσής της (core) και ονομάστηκε corium.

Διάτρηση σκυροδέματος

Από στοιχειακή άποψη τα βασικά συστατικά του σκυροδέματος είναι το Ca, Si, Al και Fe με επικρατές το πυρίτιο (Si) το οποίο κυριαρχεί στην χαλαζιακή άμμο. Το σκυρόδεμα δεν τήκεται ως υλικό, δηλαδή δεν ρευστοποιείται. Κατά τη θέρμανση του το σκυρόδεμα αρχικά διαστέλλεται και μετά του 300°C, το νερό που περιέχεται δεσμευμένο στις υδραυλικές ενώσεις του εξατμίζεται άρα το σκυρόδεμα μετατρέπεται σε πορώδες υλικό το οποίο καθώς η θερμοκρασία του αυξάνεται διασπάται σε βασικότερες μοριακές ενώσεις. Στους 825°C το ανθρακικό ασβέστιο διασπάται σε:



Η θέρμανση του σκυροδέματος απελευθέρωσε H₂O και CO₂ στον πυθμένα των συντριμμάτων με αποτέλεσμα να παραχθεί ακόμη μεγαλύτερη θερμότητα από την οξείδωση των μετάλλων μέσα στο διάλυρο μίγμα, αυξάνοντας τοπικά την πίεση. Το πυρίτιο που υπάρχει σε μεγάλες ποσότητες στο σκυρόδεμα υπό τη μορφή χαλαζία (SiO₂) τήκεται στους 1723°C. Τις πρώτες ώρες μετά την έκρηξη, υπολογίζεται ότι οι χημικές αντιδράσεις των μετάλλων και η ραδιενεργή διάσπαση (decay heat) δημιούργησαν θερμοκρασία μέχρι



Εικόνα 3-5: Τομή του εργοστασίου και οι περιοχές που στερεοποιήθηκε το corium. (source: chnpp.gov.ua)

2400°C στο εσωτερικό του corium. Η επαφή του corium με το σκυρόδεμα λοιπόν δημιούργησε αμέσως τις συνθήκες διάτρησης του, διασπώντας τη δομή του και «ρευστοποιώντας» τα επιμέρους συστατικά του. Επειδή το σκυρόδεμα είναι ένα υλικό με μεγάλη θερμοχωρητικότητα και η διαδικασία αποδόμησης του είναι ενδόθερμη, η διάτρηση του δεν έγινε τόσο γρήγορα όσο η τήξη των μετάλλων που ήρθαν σε επαφή με τα ραδιενεργά ισότοπα και τον ατμό. Αυτό έδωσε χρόνο στους σοβιετικούς μηχανικούς να αντλήσουν το νερό που βρισκόταν στις δεξαμενές κάτω από τον αντιδραστήρα πριν την κάθοδο του corium σε αυτές. Η διαδοχική διάτρηση των πλακών κατάντη του αντιδραστήρα υπολογίζεται ότι συντελέστηκε μέσα σε 6 ημέρες από την έκρηξη. Το corium σε αυτή τη χρονική περίοδο εμπλουτίστηκε από μεγάλες ποσότητες Si από την αλληλεπίδραση με το σκυρόδεμα. Σταδιακά το μίγμα βρήκε διεξόδους μέσα από το υδραυλικό σύστημα και μεταφέρθηκε σε ακόμα περισσότερα σημεία κατάντη του αντιδραστήρα. Η σοβιετική επιστημονική ομάδα που επισκέφτηκε το 1986, τον πόδα του σταυροειδούς υποστυλώματος, κάτω ακριβώς από τον αντιδραστήρα, περίμενε να βρει σε αυτόν τον θάλαμο τη μεγαλύτερη μάζα πυρηνικού καυσίμου. Το καύσιμο όμως υπό την μορφή corium είχε διαπεράσει αυτόν τον θάλαμο και βρισκόταν - στερεοποιημένο πλέον- στα κατώτερα επίπεδα. Η ανακάλυψη λοιπόν την πορείας της ραδιενεργούς λάβας ήρθε 3 χρόνια μετά τη δημιουργία της κι ενώ ακόμα εξέπεμπε θερμότητα, με αυτοψία στα θεμέλια του εργοστασίου. Σε ένα από τα πρώτα σημεία που ανακαλύφθηκε το corium, λήφθηκε και η ιστορική φωτογραφία. Ο τρόπος που είχε στερεοποιηθεί και η

πτυχωμένη επιφάνεια του θύμιζε πόδι ελέφαντα και αυτό το όνομα χρησιμοποιήθηκε για να επισημανθεί ως ραδιενεργό σημείο. Από αυτό το σημείο προσπάθησαν μελλοντικές αποστολές να πάρουν δείγμα με τρυπάνι αλλά αυτό κατέστη αδύνατο λόγω της μεγάλης σκληρότητας του υλικού. Τελικά με χρήση πιο ανορθόδοξων μεθόδων, δείγματα από το πόδι ελέφαντα ερευνήθηκαν στο εργαστήριο όπου παρατηρήθηκε ότι αποτελείται από μεγάλη ποσότητα πυριτίου μαζί με μικρότερες ποσότητες ζirkονίου, μαγνησίου, σιδήρου και ουρανίου. Το υλικό είναι ομογενές και από το 1998 το εξωτερικό του στρώμα έχει ξεκινήσει να ρηγματώνεται και να κονιορτοποιείται⁽⁶⁾. Θα παραμείνει εξαιρετικά ραδιενεργό για χιλιάδες χρόνια.

Αναφορές:

- (1) British Nuclear Energy Society, 1986. Chernobyl, a Technical Appraisal.
- (2) INSAG-7, 1992. The Chernobyl Accident.
- (3) IAEA, 2005. Safety Report Series No 43.
- (4) Schweitzer, D. G., Gurinsky, D. H., Kaplan, E., & Sastre, C. (1987). A safety assessment of the use of graphite in nuclear reactors licensed by the US NRC (No. NUREG/CR--4981). Brookhaven National Lab.
- (5) USA Dpt of Energy, Herbert Kouts, 1986. The Chernobyl Accident.
- (6) Vlasova, I., Shiryaev, A., Ogorodnikov, B., Burakov, B., Dolgopolova, E., Senin, R., ... & Kalmykov, S. (2015). Radioactivity distribution in fuel-containing materials (Chernobyl "lava") and aerosols from the Chernobyl "Shelter". *Radiation Measurements*, 83, 20-25.

4 Προς τη θεωρία του Καθιερωμένου Προτύπου – Μέρος Πρώτο

Γράφει ο Γιώργος Μελαχρινός

Το παρόν αποτελεί ένα πρώτο εισαγωγικό άρθρο σε μία σειρά άρθρων που θα ακολουθήσουν στα επόμενα τεύχη του Περιοδικού με θέμα τη φυσική των υψηλών ενεργειών και των στοιχειωδών σωματιδίων. Σκοπός των άρθρων είναι να παρουσιαστούν με όσο το δυνατόν απλό, περιεκτικό αλλά και κατανοητό τρόπο όχι μόνο οι θεωρητικές πτυχές της θεωρίας που περιγράφει σε εντυπωσιακή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα τα φαινόμενα της σωματιδιακής φυσικής, που ονομάζεται Καθιερωμένο Πρότυπο, αλλά και οι πειραματικές έρευνες που γίνονται σε διεθνές επίπεδο σε ευρωπαϊκά και όχι μόνο ερευνητικά κέντρα. Τέλος, θα γίνονται αναφορές σε βιβλία και άρθρα τα οποία θα βοηθήσουν τον αναγνώστη να φτάσει πιο βαθιά στην κατανόηση της φύσης και θα γίνουν αναφορές σε θεωρίες που θα μπορούσαν να συμπληρώσουν τη θεωρία του Καθιερωμένου Προτύπου.

Για αιώνες, η ατομική θεωρία, δηλαδή η θεωρία που υποστηρίζει ότι η ύλη αποτελείται από στοιχειώδη και αδιάσπαστα σωματίδια, τα άτομα¹ που προτάθηκε πρώτη φορά από τον Δημόκριτο, παρέμεινε αδρανής. Περί το 1800 μ.Χ. ο John Dalton επανέφερε στο προσκήνιο τη συγκεκριμένη θεωρία και τη βελτίωσε για να μελετήσει και να κατανοήσει τα αποτελέσματα των χημικών του πειραμάτων, θέτοντας επιπλέον μερικές αρχές οι οποίες θα πρέπει να ισχύουν και να μην παραβιάζονται από τα χημικά φαινόμενα που μελετούσε². Εν συντομία η θεωρία του περιγράφεται ως εξής:

- Κάθε στοιχείο, όπως είναι το υδρογόνο, το ήλιο, το οξυγόνο, ο σίδηρος, ο άνθρακας και πολλά άλλα αποτελείται από πολύ μικρά σωματίδια, τα οποία ονομάζονται άτομα.
- Όλα τα άτομα ενός στοιχείου είναι όμοια μεταξύ τους, ενώ τα άτομα διαφορετικών στοιχείων διαφέρουν μεταξύ τους (κατά μέγεθος, κατά μάζα).
- Τα άτομα ενός στοιχείου δεν μετατρέπονται σε άλλου είδους άτομα, ούτε καταστρέφονται, ούτε δημιουργούνται κατά τα χημικά φαινόμενα.
- Όταν διαφορετικά άτομα ενώνονται μεταξύ τους, σχηματίζονται χημικές ενώσεις όπως για παράδειγμα το νερό, το διοξείδιο του άνθρακα και πάρα πολλές άλλες.

- Σε κάθε χημική ένωση, το είδος των ατόμων και η μεταξύ τους αναλογία είναι σταθερή.

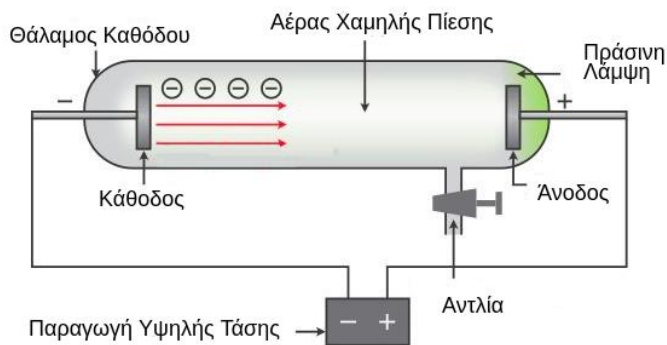
Το 1869 ο Dmitri Mendeleev κατέταξε τα μέχρι τότε γνωστά άτομα σε ένα πίνακα επτά γραμμών, ο οποίος ονομάστηκε Περιοδικός Πίνακας. Τα στοιχεία που τοποθετούνται στις ίδιες στήλες του πίνακα έχουν τις ίδιες χημικές ιδιότητες (δηλαδή συμπεριφέρονται με παρόμοιο τρόπο). Για παράδειγμα τα στοιχεία της τελευταίας στήλης είναι τα ευγενή αέρια (όπως είναι για παράδειγμα το ήλιο και το νέον) και είναι χημικά αδρανή, δηλαδή δεν αλληλεπιδρούν και δεν σχηματίζουν μεγαλύτερες δομές που ονομάζονται μόρια. Ο Mendeleev παρατήρησε πως ο πίνακας του παρουσίαζε κενά καθώς δεν ήταν όλα τα στοιχεία γνωστά. Ωστόσο μελετώντας τα στοιχεία της ίδιας στήλης κατάφερε να προβλέψει την ύπαρξη στοιχείων με συγκεκριμένες ιδιότητες. Σήμερα όλες οι θέσεις του περιοδικού πίνακα είναι κατειλημμένες. Επιπλέον γνωρίζουμε ότι όλα τα στοιχεία είναι τοποθετημένα κατά αύξοντα ατομικό αριθμό³ και επίσης γνωρίζουμε ότι όλη η ύλη που παρατηρούμε στην φύση αποτελείται από 94 άτομα/στοιχεία, τα οποία διαφέρουν ως προς το σχήμα, τη διάταξή τους στο χώρο, το μέγεθος, την μάζα και άλλα χαρακτηριστικά, και από κενό χώρο. Εκτός από τα 94 αυτά στοιχεία, υπάρχουν άλλα 24 στοιχεία που παρασκευάζονται σε εργαστήρια και πυρηνικούς αντιδραστήρες και δεν παρατηρούνται στη φύση⁽¹⁾.

Σχεδόν εκατό χρόνια αργότερα από τον Dalton, και ενώ οι εικασίες για την ύπαρξη υποατομικών σωματιδίων είχαν αρχίσει να πληθαίνουν, το 1897 ο J.J. Thomson, μελετώντας σωλήνες καθόδου (Εικόνα 4-1), ήρθε αντιμέτωπος με την ανακάλυψη του πρώτου στοιχειώδους σωματιδίου. Ως σωλήνες καθόδου χρησιμοποιούσε γυάλινους σωλήνες τους οποίους άδειαζε από αέρα με τη βοήθεια αντλίας. Στα άκρα τους εφάρμοζε διαφορά δυναμικού χρησιμοποιώντας δυο σύρματα, τα ηλεκτρόδια⁽²⁾. Παρατήρησε τότε ότι από το ηλεκτρόδιο αρνητικής τάσης, την κάθοδο, εκπεμπόταν πλήθος σωματιδίων τα οποία κατευθυνόταν προς το ηλεκτρόδιο θετικής τάσης, την άνοδο, τα οποία όταν έπεφταν στο γυαλί πίσω από την άνοδο δημιουργούσαν μια πράσινη λάμψη. Τα σωματίδια αυτά ονομάστηκαν ηλεκτρόνια.

¹ Από το α(στερητικό)+τέμνω (κόβω, χωρίζω, διαίρω)

² Για περισσότερες πληροφορίες μπορεί να ανατρέξει κανείς στα σχολικά βιβλία της Φυσικής και της Χημείας του Γυμνασίου και του Λυκείου, μερικά από τα οποία υπάρχουν στις αναφορές του παρόντος άρθρου.

³ Κάθε άτομο χαρακτηρίζεται από δύο αριθμούς, τον ατομικό που είναι χαρακτηριστικός του στοιχείου και είναι ίσος με τον αριθμό των πρωτονίων-ηλεκτρονίων και τον μαζικό αριθμό που είναι το άθροισμα του αριθμού των νετρονίων και των πρωτονίων και είναι διαφορετικός ακόμα και για άτομα του ίδιου στοιχείου δημιουργώντας έτσι τον ισοτοπικό χάρτη.

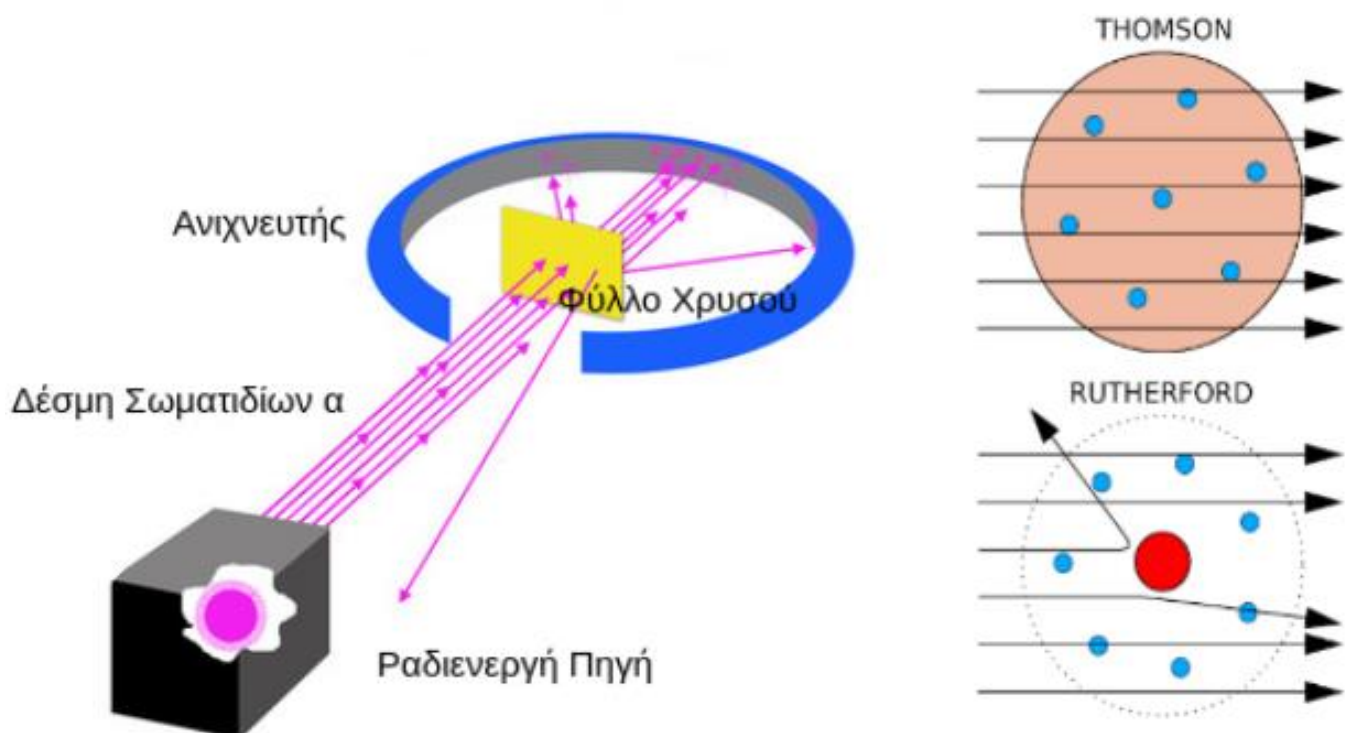


Εικόνα 4-1: Σωλήνας καθόδου. (Πηγή)

Τα πειράματα που ακολούθησαν τα επόμενα χρόνια οδήγησαν στην μέτρηση του φορτίου, της μάζας και τη μελέτη των υπόλοιπων χαρακτηριστικών αυτών των σωματιδίων. Ο Thomson πρότεινε μάλιστα το 1904 το μοντέλο του σταφιδόψωμου για να περιγράψει τη δομή των ατόμων. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, τα άτομα αποτελούνται από μια σφαίρα, η οποία είναι θετικά φορτισμένη, και μέσα σε αυτήν την σφαίρα είναι διασκορπισμένα τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια όπως περίπου είναι και οι σταφίδες σε ένα σταφιδόψωμο. Θα

πρέπει ωστόσο τα ηλεκτρόνια να είναι τόσα στον αριθμό ώστε το συνολικό φορτίο του ατόμου να είναι μηδέν.

Λίγα χρόνια αργότερα, το 1909, ο Rutherford κάνοντας το παρακάτω πείραμα απέρριψε την θεωρία του σταφιδόψωμου και ανακάλυψε τον πυρήνα, την περιοχή δηλαδή στο εσωτερικό του ατόμου που είναι συγκεντρωμένο το θετικό φορτίο του. Στα πειράματα του ο Thomson παρατήρησε ότι τα σωματίδια-α (πυρήνες Ηλίου) τα οποία εκπέμπονταν από ραδιενεργές πηγές όταν έπεφταν επάνω σε φύλλα χρυσού σκεδάζονταν, άλλαζαν δηλαδή πορεία σε σχέση με την αρχική τους κατεύθυνση με τρόπο που δεν μπορούσε να εξηγηθεί από την κατανομή των ηλεκτρονίων μέσα στο θετικό φορτίο όπως προέβλεπε το πρότυπο του σταφιδόψωμου. Αντίθετα θα πρέπει το θετικό φορτίο του ατόμου, το οποίο αποτελείται από μικρά σωματίδια που ονομάζονται πρωτόνια και έχουν κατά μέτρο όσο φορτίο έχουν και τα ηλεκτρόνια, να είναι συγκεντρωμένο στο κέντρο του, σχηματίζοντας μια περιοχή που ονομάζεται πυρήνας, και γύρω απ' αυτήν την περιοχή θα πρέπει να περιφέρονται τα ηλεκτρόνια όπως περιφέρονται και οι πλανήτες γύρω από τον Ήλιο. Θα πρέπει επίσης τα πρωτόνια, προκειμένου το άτομο να είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, να είναι στο πλήθος όσα είναι τα



Εικόνα 4-2: Αριστερά: η διάταξη του πειράματος του Rutherford. Δεξιά: Ο τρόπος που θα έπρεπε να σκεδάζονται τα σωματίδια -α ανάλογα με το μοντέλο της δομής του ατόμου. Το μοντέλο του Thomson δεν μπορούσε να εξηγήσει το γεγονός ότι σωματίδια α σκεδάζονται σε μεγάλες γωνίες ή ακόμα και το ότι οπισθοσκεδάζονται καθώς σύμφωνα με το πρότυπο του σταφιδόψωμου η τυχαία κατανομή των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό του ατόμου θα είχε ως αποτέλεσμα τα σωματίδια α να μην σκεδάζονται σε μεγάλες γωνίες, πόσο μάλιστα να οπισθοσκεδάζονται και να καταγράφονται πάνω στις φθορίζουσες επιφάνειες που λειτουργούν ως ανιχνευτές. (Πηγή)

ηλεκτρόνια. Ο Rutherford επίσης είπε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας του ατόμου είναι συγκεντρωμένο στον πυρήνα και πώς ο μεγαλύτερος όγκος που καταλαμβάνει το άτομο είναι κενός. Περισσότερες λεπτομέρειες για την σκέδαση Rutherford θα δοθούν σε επόμενο άρθρο του περιοδικού όπου θα μιλήσουμε για ελαστικές σκεδάσεις ηλεκτρονίων – πρωτονίων⁽³⁾. Μέχρι τότε, ο αναγνώστης μπορεί να δει τον παρακάτω [υπερσύνδεσμο](#).

Ωστόσο πολύ σύντομα προέκυψαν προβλήματα και με αυτή την θεωρία καθώς δεν μπορούσε να εξηγήσει την ευστάθεια του ατόμου. Σύμφωνα με την θεωρία του κλασικού Ηλεκτρομαγνητισμού δυο σωματίδια αντίθετου φορτίου έλκονται και έτσι τα ηλεκτρόνια θα έπρεπε καθώς περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα και επιταχύνονται να εκπέμπουν ενέργεια με την μορφή ακτινοβολίας. Έτσι θα πρέπει να διαγράφουν σπειροειδή τροχιά και να πέφτουν επάνω στον πυρήνα. Δηλαδή μια τέτοια υπόθεση για την δομή του ατόμου δεν μπορούσε να εξηγήσει την ίδια του την ευστάθεια. Επίσης παρατήρησαν ότι μια τέτοια θεωρία για την δομή των ατόμων δεν μπορούσε να εξηγήσει τα γραμμικά φάσματα εκπομπής των αερίων. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη θεωρία, τα ηλεκτρόνια καθώς επιταχύνονται και κατευθύνονται στον πυρήνα θα πρέπει να χάνουν ενέργεια με τρόπο συνεχή που θα υπακούει στον τύπο του Larmor σύμφωνα με τον οποίο όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο (όπως είναι και το ηλεκτρόνιο) επιταχύνεται, ακτινοβολεί ενέργεια με την μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και μάλιστα η ισχύς της ακτινοβολίας είναι ανάλογη του τετραγώνου του φορτίου του και του τετραγώνου της επιτάχυνσής του. Κάτι τέτοιο όμως ερχόταν σε πλήρη αντίθεση με τις διακριτές φωτεινές γραμμές που παρατηρούσαν κατά την αποδιέγερση αερίων.

Επιπλέον παρατήρησαν ότι υπήρχε αναντιστοιχία και με την μάζα των πυρήνων καθώς τα μέχρι τότε γνωστά συστατικά τους δεν μπορούσαν να εξηγήσουν το γεγονός ότι η μάζα του πυρήνα είναι περίπου διπλάσια από την μάζα των πρωτονίων. Έτσι ο Rutherford υπέθεσε ότι θα πρέπει να υπάρχει μια κατάσταση η οποία θα είναι ζεύγος πρωτονίου-ηλεκτρονίου ώστε η κατάσταση αυτή να μην έχει φορτίο και η μάζα του θα πρέπει να είναι σχεδόν ίδια με την μάζα του πρωτονίου ώστε να μπορούν να εξηγηθούν οι μέχρι τότε παρατηρήσεις. Το έργο της ανακάλυψης αυτού του ζεύγους έφερε εις πέρας ο Chadwick.

Το 1930 παρατηρήθηκε πως όταν το βηρύλλιο βομβαρδιστεί από σωματίδια-α, τότε εκπέμπεται ενεργητική και εξαιρετικά διεισδυτική ακτινοβολία η οποία είναι ουδέτερη καθώς δεν εκτρέπεται από μαγνητικά πεδία (ο μηδενισμός του φορτίου q στη δύναμη Lorentz: $\vec{F}_L = q(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B})$ οδηγεί στο μηδενισμό ολόκληρης της δύναμης⁽²⁾ (βλέπε και Άρθρο 1 του παρόντος Τεύχους).

Επίσης παρατήρησαν πως όταν η ακτινοβολία αυτή πέσει επάνω σε στόχο που είναι πλούσιος σε πρωτόνια, όπως είναι η παραφίνη, τότε πλήθος πρωτονίων εκπέμπονται από τον στόχο. Το 1932, ο Chadwick πρότεινε ότι αυτή η ακτινοβολία αποτελείται από ένα νέο σωματίδιο το οποίο ονομάστηκε νετρόνιο. Χρησιμοποιώντας μάλιστα την κινηματική της αντίδρασης που μελετούσε απέδειξε ότι η μάζα των σωματιδίων αυτής της νέας ακτινοβολίας είναι σχεδόν ίδια με αυτήν του πρωτονίου. Το 1935, ο Chadwick τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ για αυτήν του την ανακάλυψη. Η ανακάλυψη αυτή και η δημοσίευσή της οδήγησε στον Heisenberg να μιλήσει για το μοντέλο του πρωτονίου-νετρονίου για την δομή του πυρήνα.

Βέβαια και πάλι η ιστορία δεν τελειώνει εδώ. Η υπόθεση ότι το νετρόνιο ήταν ζεύγος πρωτονίου-ηλεκτρονίου αποδείχθηκε εσφαλμένη καθώς αυτό θα υπέθετε ότι στον πυρήνα υπήρχαν ηλεκτρόνια κάτι που δεν μπορούσε να εξηγηθεί από τα πειραματικά δεδομένα. Άρα πρόκειται για ένα εντελώς νέο σωματίδιο. Πολύ σύντομα ανακάλυψαν πως το καινούριο σωματίδιο όταν είναι ελεύθερο και δεν βρίσκεται μέσα σε πυρήνα, είναι ασταθές και μετά από κατά μέσο όρο 15 περίπου λεπτών διασπάται. Το ακόμα πιο περίεργο είναι ότι αν το νετρόνιο διασπάται σε ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο (όπως θα πρέπει τουλάχιστον να γίνεται προκειμένου να διατηρείται το ηλεκτρικό φορτίο) θα πρέπει και τα δύο σωματίδια-προϊόντα της αντίδρασης να έχουν καλά καθορισμένες ενέργειες και ορμές⁴. Μπορεί να δει κανείς ότι αν έχει ένα σωματίδιο Α το οποίο διασπάται στα σωματίδια Β και Γ, στο σύστημα κέντρου μάζας του μητρικού σωματιδίου οι ενέργειες των παραγόμενων σωματιδίων θα πρέπει να είναι ίσες με:

$$E_B = \frac{m_A^2 + m_B^2 - m_C^2}{2m_A} c^2 \text{ και } E_C = \frac{m_A^2 + m_C^2 - m_B^2}{2m_A} c^2$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός και m η μάζα του εκάστοτε σωματιδίου. Δηλαδή, στο πλαίσιο ενός πειράματος η μέτρηση της ενέργειας του ηλεκτρονίου θα πρέπει να δώσει μία γκαουσιανή κατανομή με κέντρο κοντά στην τιμή

$$E_e = \frac{m_n^2 + m_e^2 - m_p^2}{2m_n} c^2.$$

όπου e : ηλεκτρόνιο, n : νετρόνιο, p : πρωτόνιο. Το για ποιο λόγο θα προκύψει μια γκαουσιανή κατανομή ύστερα από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις της ενέργειας των ηλεκτρονίων που προέρχονται από την συγκεκριμένη διάσπαση θα συζητηθεί επίσης σε επόμενο άρθρο. Στην πραγματικότητα όμως οι επαναλαμβανόμενες μετρήσεις δεν φανέρωσαν μία τέτοια κατανομή αλλά ένα συνεχές φάσμα από το μηδέν έως και μία μέγιστη τιμή.

⁴ Αυτό μπορεί να το δει εύκολα κάποιος αν λύσει την άσκηση 3.16 από το βιβλίο του D. Griffiths "Introduction to Elementary Particles", 2nd, Revised Edition⁽⁴⁾.

Ιδιαίτερα χρήσιμος είναι και ο ακόλουθος [υπερσύνδεσμος](#) στον οποίο φαίνεται και η πραγματική κατανομή της ενέργειας του ηλεκτρονίου. Το συνεχές φάσμα υποδηλώνει το ότι το ηλεκτρόνιο δεν έχει καλά καθορισμένη ορμή και συνεπώς ότι το νετρόνιο δεν διασπάται σε πρωτόνιο και ηλεκτρόνιο και έτσι η συγκεκριμένη παρατήρηση έρχεται σε πλήρη αντίθεση με την αρχική υπόθεση ότι δηλαδή το ελεύθερο νετρόνιο διασπάται σε δύο σωματίδια. Το συνεχές φάσμα υποδηλώνει ότι κάθε φορά υπάρχει κάποια ποσότητα ενέργειας και ορμής που δεν μπορεί να μετρηθεί. Το 1930 λοιπόν ο Wolfgang Pauli πρότεινε την ύπαρξη ενός τρίτου σωματιδίου το οποίο θα πρέπει να μην έχει φορτίο ώστε πρώτον να μην παραβιάζεται στην αντίδραση η αρχή διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου και δεύτερον για να μην αλληλεπιδρά και ανιχνεύεται από τους ανιχνευτές όπως το ηλεκτρόνιο ενώ τέλος θα είναι και το σωματίδιο που θα φέρει την χαμένη ορμή και ενέργεια. Αυτό το σωματίδιο

ονομάστηκε (επειδή είχε μερικά όμοια χαρακτηριστικά με εκείνα του νετρονίου όπως είναι η ηλεκτρική ουδετερότητα) νετρίνο. Η διάσπαση αυτή των νετρονίων ονομάστηκε β^- διάσπαση καθώς ανιχνευόταν το ηλεκτρόνιο το οποίο συμβολιζόταν συχνά και ως β^- σωματίο.

Στο επόμενο άρθρο θα λύσουμε τα προβλήματα που έχει η υπόθεση του Rutherford στηριζόμενοι στις αρχές τις κβαντικής μηχανικής.

Αναφορές:

- (1) [Βιβλίο Χημείας Κατεύθυνσης Γ' Λυκείου](#), Κεφάλαια 6.3, 6.4.
- (2) [Βιβλίο Φυσικής Κατεύθυνσης Β' Λυκείου](#), σελίδα 163.
- (3) [Βιβλίο Φυσικής Κατεύθυνσης Β' Λυκείου](#), Κεφάλαιο 5.8.
- (4) Griffiths, D. (2008). [Introduction to elementary particles. John Wiley & Sons.](#)