



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ

Κοκκίνης Γιώργος 7764

Βασιλόπουλος Χρήστος 7678

Νικόλαος Σχοινάς Επίκουρος Καθηγητής

Πτυχιακή εργασία υποβληθείσα στο Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου

ΠΑΤΡΑ, μήνας, 2024

Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών
Κοκκίνης Γεώργιος – Βασιλόπουλος Χρήστος
© 2024 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάστηκε από
τους

Κοκκίνης Γεώργιος και Βασιλόπουλος Χρήστος

A.M. 7764 και 7678

την [ημέρα, μήνα, έτος]

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας δεν υποδηλοί την αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.
Κατά τη συγγραφή τηρήθηκαν οι αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μετατροπή Πυρηνικής Ενέργειας σε Ηλεκτρική

Κοκκίνης Γεώργιος – Βασιλόπουλος Χρήστος

Σε αυτή την πτυχιακή εργασία έγινε μια θεωρητική μελέτη στη βασική δομή της λειτουργίας των πυρηνικών εργοστασίων. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια αναλυτική επεξήγηση στην ατομική δομή, περιγράφοντας τα 3 βασικά μοντέλα με ιστορική σειρά. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της πυρηνικής δομής. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται οι θεμελιώδεις δομές του πυρήνα και οι διεργασίες που μπορούν να γίνουν. Στο τρίτο κεφάλαιο, με βάση το προηγούμενο, αναλύονται οι ενεργός διατομή, η πυρηνική σχάση και η πυρηνική σύντηξη. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή 8 τύπων πυρηνικών αντιδραστήρων. Δίνονται αναλυτικές περιγραφές για την αρχιτεκτονική, τα καύσιμα και του τρόπου λειτουργίας κάθε αντιδραστήρα. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των διαδικασιών για την μετατροπή της πυρηνικής ενέργειας σε θερμική και της θερμικής σε ηλεκτρισμό.

Λέξεις κλειδιά

Πυρηνική Ενέργεια, Παραγωγή Ενέργειας, Σχάση, Σύντηξη

ABSTRACT

Nuclear Energy Conversion into Electrical Energy

Kokkinis Georgios – Basilopoulos Christos

In this thesis a theoretical study was made in the basic structure of the operation of nuclear plants. In the first chapter there is a detailed explanation of the atomic structure, describing the 3 basic models in historical order. The second chapter analyzes the nuclear structure. This chapter describes the fundamental structures of the atomic nucleus and the processes that can be performed. In the third chapter, based on the previous one, cross section, nuclear fission and nuclear fusion are analyzed. In the fourth chapter, 8 types of nuclear reactors are described. Detailed descriptions of the architecture, fuel and operation of each reactor are given. Finally, in the fifth chapter there is an analysis of the processes for the conversion of nuclear energy into thermal energy and of thermal energy into electricity.

Key Words

Nuclear Energy, Energy produce, Fission, Fusion

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Πείραμα Rutherford	Σελίδα 5
Εικόνα 2 Διέγερση και αποδιέγερση ηλεκτρονίων	Σελίδα 7
Εικόνα 3 Φάσμα εκπομπής και απορρόφησης Υδρογόνου	Σελίδα 7
Εικόνα 4 Μοντέλο του Bohr... ..	Σελίδα 8
Εικόνα 5 Καταλληλότητα πυρήνων ανάλογα με την σχέση πρωτονίων νετρονίων.....	Σελίδα 15
Εικόνα 6 Ενέργεια σύνδεσης συναρτήσει του μαζικού αριθμού	Σελίδα 17
Εικόνα 7 Δυναμική ενέργεια μεταξύ πρωτονίου – πρωτονίου και νετρονίου – νετρονίου.Σελίδα	18
Εικόνα 8 Αριθμός πυρήνων συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές λ	Σελίδα 22
Εικόνα 9 Ραδιενεργά άτομα του περιοδικού πίνακα.....	Σελίδα 23
Εικόνα 10 Χρόνος ημιζωής συναρτήσει του ατομικού αριθμού	Σελίδα 24
Εικόνα 11 Διασπάσεις Ουρανίου και Ραδίου	Σελίδα 25
Εικόνα 12 Σειρές Διάσπασης	Σελίδα 30
Εικόνα 13 Διάσπαση Ουρανίου 235.....	Σελίδα 34
Εικόνα 14 Πυρηνικό Εργοστάσιο τύπου PWR	Σελίδα 39
Εικόνα 15 Αντιδραστήρας τύπου PWR.....	Σελίδα 42
Εικόνα 16 Πυρηνικό Εργοστάσιο τύπου BWR	Σελίδα 44
Εικόνα 17 Αντιδραστήρας τύπου PHWR	Σελίδα 49
Εικόνα 18 Πυρήνας αντιδραστήρα τύπου LWGR.....	Σελίδα 54
Εικόνα 19 Αντιδραστήρα τύπου LMFBR.....	Σελίδα 58
Εικόνα 20 Μαγνητική Ροή.....	Σελίδα 61
Εικόνα 21 Πρώτο πείραμα Faraday.....	Σελίδα 62

Εικόνα 22 Δεύτερο πείραμα Faraday.....	Σελίδα 62
Εικόνα 23 Τρίτο πείραμα Faraday.....	Σελίδα 63
Εικόνα 24 Ροή νερού μέσα στον πυρηνικό αντιδραστήρα	Σελίδα 64
Εικόνα 25 Βασική Δομή Πυρηνικού Εργοστασίου Παραγωγής Ηλεκτρισμού	Σελίδα 65

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	VI
ABSTRACT.....	IX
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	XII
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	XVI
1. ΑΤΟΜΙΚΗ ΔΟΜΗ.....	2
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2
1.2 Η ΑΝΑΚΑΛΥΨΗ ΤΗΣ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ	2
1.3 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ RUTHERFORD ΓΙΑ ΤΟ ΑΤΟΜΟ.....	4
1.4 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΒΟΗΡ.....	5
1.5 ΤΟ ΚΒΑΝΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	9
2.0 ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΔΟΜΗ.....	12
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΥΡΗΝΩΝ	13
2.3 ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ	14
2.4 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ.....	16
2.5 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΕΣΑ ΣΤΟΝ ΠΥΡΗΝΑ	18
2.6 ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	19
2.7 ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	21
2.8 ΟΙ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ.....	24
2.9 ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ	27

3.0	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ	32
3.1	ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗ	32
3.2	ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΣΧΑΣΗ	33
3.3	ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΣΥΝΤΗΞΗ.....	35
4.0	ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ	
	ΕΝΕΡΓΕΙΑ	39
4.1	ΠΥΡΗΝΙΚΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΝΕΡΟΥ	39
4.2	ΠΥΡΗΝΙΚΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΒΡΑΣΜΕΝΟΥ ΝΕΡΟΥ BWR.....	42
4.2.1	Βασική δομή και λειτουργία	42
4.3	ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ PWR ΚΑΙ BWR.....	44
4.4	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΒΑΡΕΟΣ ΝΕΡΟΥ PHWR	47
4.5	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΑΕΡΙΟΥ ΨΥΞΗΣ GCR	50
4.6	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΕΛΑΦΡΟΥ ΝΕΡΟΥ ΓΡΑΦΙΤΗ LWGR.....	52
4.7	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΤΑΧΕΩΝ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ FNR ΚΑΙ LMFBR.....	56
4.8	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΛΙΩΜΕΝΟΥ ΑΛΑΤΟΣ MSR.....	58
5.0	ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ.....	60
5.1	ΗΛΕΚΤΡΕΓΕΤΡΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ.....	60
5.2	ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΗ	62
5.3	ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΙΚΗ	63
5.4	ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟ.....	66
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	68

1. ΑΤΟΜΙΚΗ ΔΟΜΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μετατροπή της πυρηνικής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι μια κρίσιμη διαδικασία που τροφοδοτεί ένα σημαντικό μέρος του ηλεκτρικού δικτύου του κόσμου. Αυτή η διπλωματική εργασία στοχεύει να εξετάσει τις λεπτομέρειες αυτής της διαδικασίας μετατροπής, φωτίζοντας τις βασικές αρχές, τις τεχνολογίες και τις προκλήσεις. Παρακάτω γίνεται μια ιστορική επισκόπηση σχετικά με την χρήση της πυρηνικής ενέργειας, αναπτύσσονται οι θεμελιώδεις αρχές της θεωρίας και οι βασικές αρχές των πυρηνικών αντιδράσεων και των τεχνολογιών μετατροπής της πυρηνικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

1.2 Η ΑΝΑΚΑΛΥΨΗ ΤΗΣ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ

Ο ισχυρισμός ότι ο κόσμος είναι συγκροτημένος από άτομα αποτελεί, σήμερα, κοινοτοπία. Αν και η ύπαρξη των ατόμων επιβεβαιώθηκε πειραματικά μόλις τον 20ό αιώνα, η ατομική υπόθεση είχε διατυπωθεί και προωθηθεί πολύ νωρίτερα. Ο Δημόκριτος και ο Λεύκιππος, διατύπωσαν την εικασία ότι το αναλλοίωτο υπόστρωμα του κόσμου αποτελείται από κινούμενα άτομα [1]. Ο Lavoisier απέδειξε τη διατήρηση της ύλης [2]. Ο Dalton αντιλήφθηκε την ατομικότητα της ύλης στον νόμο πολλαπλών αναλογιών των χημικών ενώσεων [3]. Ο Avogadro διατύπωσε το αξίωμα ότι όλα τα καθαρά αέρια στις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης έχουν

τον ίδιο αριθμό μορίων ανά μονάδα όγκου [4]. Ο Maxwell απέδειξε ότι μακροσκοπικά μεγέθη μπορούν να προσδιοριστούν με χρήση στατιστικής σε μικροσκοπικά μεγέθη [5]. Τέλος ο Jean Perrin και ο Albert Einstein που για το θεωρητικό και πειραματικό έργο πάνω στην κίνηση Brown [6]. Ο κατάλογος θα μπορούσε να είναι πολύ μεγαλύτερος, αλλά κάτι τέτοιο ξεφεύγει από το πλαίσιο και τον σκοπό αυτής της διπλωματικής.

Ένα σύνολο ανακαλύψεων έδειξαν ότι τα άτομα αποτελούνται από αρνητικός φορτισμένα σωματίδια τα οποία περιστρέφονται γύρω από έναν πυκνό, θετικώς φορτισμένο πυρήνα. Αυτές οι ανακαλύψεις είναι:

1. Η ανακάλυψη της ηλεκτρόλυσης το 1833 από τον Faraday. Ο Faraday απέδειξε ότι η μάζα ενός στοιχείου που απελευθερώνεται σε ένα ηλεκτρόδιο είναι ευθέως ανάλογη προς το μεταφερόμενο φορτίο και προς το ατομικό βάρος του υλικού που απελευθερώνεται. [7]
2. Η ανακάλυψη του ηλεκτρονίου από τον J. J. Thomson το 1897. [8]
3. Η ακριβής μέτρηση του ηλεκτρικού φορτίου από τον Millikan το 1909. [9]
4. Η καθιέρωση του πυρηνικού μοντέλου από τον Ernest Rutherford, Geiger και Marsden το 1910. [10]

Το 1899 ο J. J. Thomson κατάρριψε την ιδέα των αδιαίρετων ατόμων, δηλαδή υλικά που παραμένουν στην ίδια ακριβώς κατάσταση στην οποία ήταν όταν άρχισαν να υπάρχουν, όπως έγραψε ο Maxwell το 1872. Με την απόδειξη της ηλεκτρόλυσης ο Thomson απέδειξε την ρήξη του ατόμου, κατά την οποία ένα μέρος της μάζας του ελευθερώνεται και αποσπάται από αυτό. Με τις ανακαλύψεις των Marie Currie, Ernest Rutherford και Frederic Soddy, οι οποίοι εξήγησαν τον

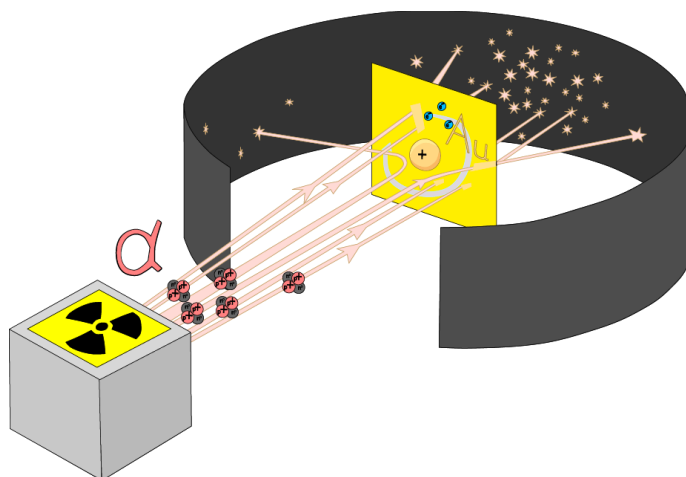
ραδιενεργό μετασχηματισμό των στοιχείων με την εκπομπή υποατομικών σωματιδίων, καταστράφηκε το μοντέλο της αδιαιρετότητας των ατόμων. Το πορώδες των ατόμων ήταν ήδη γνωστό από το 1910 από τα πειράματα του Lenard τα οποία έδειξαν ότι τα ηλεκτρόνια διέρχονται εύκολα δια μέσου λεπτών μεταλλικών επιφανειών [11]. Όλες αυτές οι ανακαλύψεις οδήγησαν στην ανάπτυξη αρκετών μοντέλων για την δομή του ατόμου.

1.3 TO ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ RUTHERFORD ΓΙΑ ΤΟ ΑΤΟΜΟ

Το πιο γνωστό από τα αρχικά μοντέλα για την δομή του ατόμου είναι το μοντέλο του σταφιδόψωμου του Thomson. Τέτοιου είδους μοντέλα θεωρούν ομοιόμορφη σφαιρική κατανομή μάζας και σφηνωμένο θετικό φορτίο στην επιφάνεια. Αν και παρουσιάζουν ηλεκτρική σταθερότητα αδυνατούν να εξηγήσουν τις φασματικές γραμμές. Παρακάτω γίνεται αναλυτική επεξήγηση των φασματικών γραμμών. Ο Rutherford μέσω ενός πειράματος απέδειξε ότι το μοντέλο του Thomson δεν ήταν ακριβές. Στο πείραμα του Rutherford, σωματίδια άλφα (πυρήνες Ηλίου) πρόσκρουαν πάνω σε ένα φύλλο χρυσού μερικών χιλιάδων ατομικών στρωμάτων. Τα περισσότερα άτομα περνούσαν μέσα από το φύλλο χρυσού, αποδεικνύοντας την διαπερατότητα των ατόμων. Μερικά σκεδαζόντουσαν υπό γωνία ϕ . Ο αριθμός των σκεδαζόμενων σωματιδίων άλφα σε κάθε γωνία ανά μονάδα επιφανείας ανά μονάδα χρόνου μετρήθηκε με την απαρίθμηση των σπινθήρων που παράγονταν από τα σκεδαζόμενα σωματίδια πάνω σε μια οθόνη ZnS.

Η ιδέα του Rutherford ήταν ότι η κινητική ενέργεια των σωματιδίων άλφα θα ήταν σχετικά μεγάλη ακόμη και με μικρή ταχύτητα λόγω της μεγάλης μάζας τους. Με αυτή την ενέργεια αν τα

άτομα είχαν την μορφή σταφιδόψωμου, τα σωματίδια α θα εκτρέπονταν ελαφρώς. Αντίθετα παρατηρήθηκε ότι τα σωματίδια εκτρέπονταν σε μεγάλη κλίμακα. Με αποτέλεσμα να συμπεράνει ότι το θετικό φορτίο βρίσκεται στο κέντρο του ατόμου, που αργότερα ονομάστηκε πυρήνας.



Εικόνα 1 Πείραμα Rutherford

1.4 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΒΟΗΡ

Τον Απρίλιο του 1913 ένας νεαρός Δανός Φυσικός, ο Niels Bohr δημοσίευσε μια εργασία που αποτελούταν από 3 μέρη, η οποία ταρακούνησε τον κόσμο της φυσικής μέχρι τα θεμέλια του. Ο Thomson και ο Rutherford αντιλήφθηκαν ότι τα ηλεκτρόνια πρέπει να περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα για να αποφύγουν την πτώση τους σε αυτόν. Σύμφωνα με την θεωρία του Maxwell επιταχυνόμενα με κεντρομόλο δύναμη φορτία που περιστρέφονται με συχνότητα f θα πρέπει να

ακτινοβολούν φως συχνότητας f , πράγμα που επιβεβαιώθηκε από τον Hertz. Εκεί το μοντέλο του

Rutherford δεν μπορεί να ανταπεξέλθει. Αν το ηλεκτρόνιο ακτινοβολεί συνεχώς ενέργεια θα μεταπίπτει συνεχώς σε χαμηλότερες τροχιές με αποτέλεσμα την καταστροφή των ατόμων. Κάτι που προφανώς δεν συμβαίνει.

Ο Bohr όρισε αξιωματικά ότι η εκπομπή συνεχούς φάσματος δεν ισχύει σε ατομικά συστήματα. Για να ξεπεράσει αυτό το πρόβλημα χρησιμοποίησε τις ιδέες του Planck και του Einstein για την κβαντική δομή της ύλης [13]. Έτσι, αξιωματικά όρισε ότι τα ηλεκτρονια είναι, γενικώς εγκλωβισμένα με σε ορισμένα ενεργειακά επίπεδα που δεν ακτινοβολούν. Υιοθέτησε την ιδέα των φωτονίων από τον Einstein. Έτσι κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η διαφορά 2 ενεργειακών σταθμών σε ένα άτομο είναι ανάλογη της συχνότητας ως:]

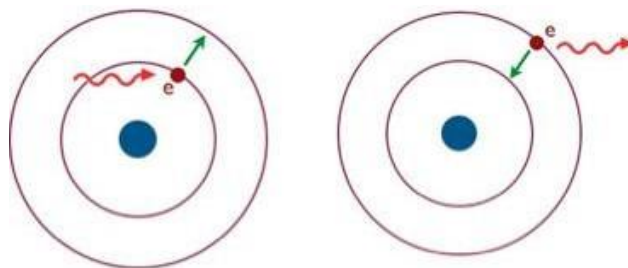
$$\Delta E = E_2 - E_1 = hf(1.4.1)$$

Όπου

$$h = 6.62507015 \times 10^{-34} m^2kg/s(1.4.2)$$

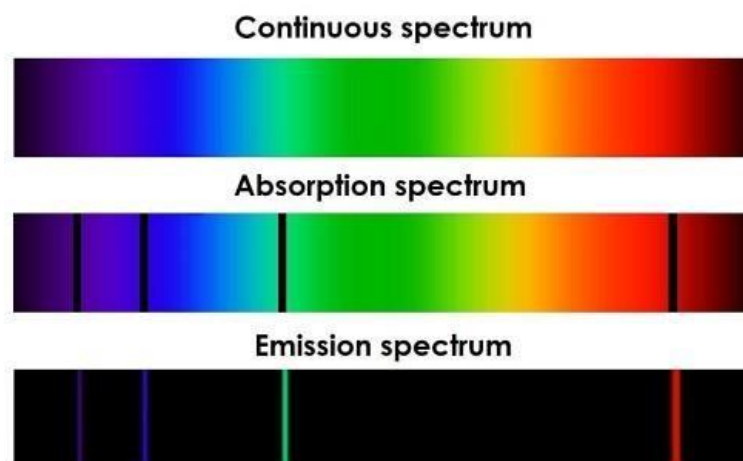
η σταθερά του Planck.

Με το παραπάνω ο Bohr κατάφερα να αναδείξει την ταυτότητα των ατόμων, δηλαδή το διακριτό του φάσμα. Ένα άτομο μπορεί να διεγερθεί από μια ενεργειακή κατάσταση E_1 σε μια ενεργειακή κατάσταση E_2 αν απορροφήσει ένα φωτόνιο ενέργειας $E = E_2 - E_1$. Αντίστοιχα η αποδιέγερση από μια ενεργειακή κατάσταση E_2 σε μια χαμηλότερη με ενέργεια E_1 , εκπέμπεται ένα φωτόνιο με ενέργεια $E = E_2 - E_1$. Το σύνολο των πιθανών φωτονίων που μπορεί να απορροφήσει ένα άτομο, ονομάζεται φάσμα απορρόφησης και το σύνολο των πιθανών φωτονίων που μπορεί να εκπέσει ονομάζεται φάσμα εκπομπής. Αυτά τα φάσματα εξαρτώνται από τις αποστάσεις μεταξύ των ενεργειακών επιπέδων, άρα με την δομή των ατόμων. Τα φάσματα χρησιμοποιούνται σαν ταυτότητες για τα άτομα.



Εικόνα 2 Διέγερση και αποδιέγερση ηλεκτρονίων

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το συνεχές φάσμα του ορατού φωτός, το φάσμα απορρόφησης για το Υδρογόνο και το Φάσμα εκπομπής για το υδρογόνο



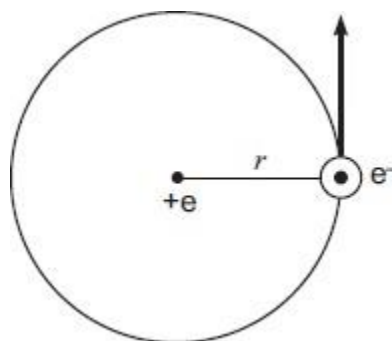
Εικόνα 3 Φάσμα εκπομπής και απορρόφησης Υδρογόνου

Η συνθήκη της κβάντωσης των τροχιών έχει σαν συνέπεια την κβάντωση της στροφορμής. Οι επιτρεπόμενες τροχιές είναι εκείνες για τις οποίες η τροχιακή στροφορμή του είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της σταθεράς

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad (1.4.3)$$

Έτσι ο Bohr κατάφερε να εξάγει τις ακτίνες και την ενέργεια τροχιών για τα άτομα υδρογόνου.

Έστω άτομο υδρογόνου με ένα ηλεκτρόνιο



Εικόνα 4 Μοντέλο του Bohr

Θεωρώντας δυναμικό Coulomb, η ενέργεια του είναι

$$E = K + U = \frac{1}{2} mu^2 - k \frac{e^2}{r} \quad (1.4.5)$$

Η δύναμη Coulomb που το συγκρατεί σε σταθερή τροχιά έχει τον ρόλο της κεντρομόλου

$$F_c = \frac{ke^2}{r^2} = \frac{mu^2}{r} \quad (1.4.6)$$

Όπου k η σταθερά Coulomb.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1.4.6) η κινητική ενέργεια γράφεται ως:

$$K = \frac{1}{2} mu^2 = \frac{ke^2}{2r} \quad (1.4.7)$$

Η κβάντωση της στροφορμής γράφεται ως

$$\vec{L} = r \times p = mur = n\hbar, n = 1, 2, 3, \dots \quad (1.4.8)$$

Αντικαθιστώντας την (1.4.8) στην (1.4.7) υπολογίζουμε την ακτίνα την n ενεργειακής κατάστασης

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{mke^2} \quad (1.4.9)$$

Αντικαθιστώντας τις σταθερές

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{mke^2} = 0.529 \times 10^{-10} m \quad (1.4.10)$$

Η (1.4.9) γράφεται ως

$$r_n = a_0 n^2 \quad (1.4.11)$$

Αντικαθιστώντας την (1.4.7) στην (1.4.5) υπολογίζουμε την ολική ενέργεια ως:

$$E = -\frac{ke^2}{2r} \quad (1.4.10)$$

Αντικαθιστώντας την (1.4.9) στην (1.4.10) υπολογίζουμε την ενέργεια της n ενεργειακής στάθμης

$$E_n = -\frac{ke^2}{2a_0} \left(\frac{1}{n^2}\right) = \frac{-13.6}{n^2} eV \quad (1.4.11)$$

1.5 ΤΟ ΚΒΑΝΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το 1920 οι επιστήμονες της εποχής ανακάλυψαν αρκετές αδυναμίες στο μοντέλο του Bohr.

Συγκεκριμένα τα προβλήματα που δεν μπορούσε να εξηγήσει συνοψίζονται παρακάτω:

1. Δεν μπορούσε να προβλέψει τις εντάσεις των φασματικών γραμμών
2. Λειτουργούσε ικανοποιητικά μόνο σε υδρογονοειδή άτομα.
3. Δεν είχε χρονική εξέλιξη.

Ηδη από την εποχή του Νεύτωνα υπήρχε η ιδέα ότι η ύλη έχει κυματικές ιδιότητες, χωρίς να μπορούν να εξηγηθούν. Το πρώτο βήμα προς την κβαντομηχανική το έκανε ο Louis de Broglie

στην διατριβή του, θεωρώντας αξιωματικά ότι τα φωτόνια έχουν και κυματικά και σωματιδιακά χαρακτηριστικά. Τα κύματα του de Broglie δεν είναι ηλεκτρομαγνητικά, αλλά κύματα που κατευθύνουν την ύλη. Στην πραγματικότητα ο de Broglie δεν γνώριζε την πραγματική υπόσταση των κυμάτων, αλλά με αυτά μπορούσε να εξηγήσει την συνθήκη κβάντωσης του Bohr άρα και τα υπόλοιπα φαινόμενα που περιγράφονται από το μοντέλο του Bohr. Στην πραγματικότητα ο de Broglie έδωσε την ιδέα της κυματομηχανικής στον Schrodinger κάνοντας την αρχή για ένα νέο είδος φυσικής, την κβαντομηχανική. Ο de Broglie θεώρησε ότι κάθε κινούμενο αντικείμενο έχει ένα μήκος κύματος

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (1.5.1)$$

Αποδεχόμενος ότι οι επιτρεπτές τροχιές του Bohr δημιουργούνται όταν τα υλικά κύματα του de Broglie συμβάλουν ενισχυτικά, δηλαδή όταν η περίμετρος της τροχιάς περιλαμβάνει έναν ακέραιο αριθμό μηκών κύματος

$$n\lambda = 2\pi r \quad (1.5.2)$$

Αντικαθιστώντας την (1.5.1) στην (1.5.2) εμφανίζεται η συνθήκη κβάντωσης του Bohr

$$mvr = n\hbar \quad (1.5.3)$$

[15]

Το 1926 ο Erwin Schrodinger προσπαθώντας να προσεγγίσει το ηλεκτρόνιο ως ένα μη σχετικιστικό σωματίδιο μέσω κυματομηχανικής, κατάφερε να δημιουργήσει την περίφημη εξίσωση που φέρει το όνομα του:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\Psi(x) + V(x)\Psi(x) = E\Psi(x) \quad (1.5.4)$$

Εισάγοντας την έννοια της κυματοσυνάρτησης. Αν και ο ίδιος δεν μπορούσε να εξηγήσει την φυσική της υπόσταση, μάλλον γιατί τις περισσότερες φορές είναι μιγαδική ποσότητα, μέσο αυτής προκύπτουν με φυσικό τρόπο οι διακριτές τιμές της ενέργειας στην ατομική φυσική [16]. Την ίδια χρονιά ο Max Born κατάφερε να εξηγήσει την έννοια της κυματοσυνάρτησης. Η κυματοσυνάρτηση δεν αποτελεί φυσική οντότητα, αλλά το μέτρο της στο τετράγωνο είναι μια πυκνότητα πιθανότητας.

$$\rho(x) = \Psi^*(x)\Psi(x)(1.5.5)$$

Πλεον η ερμηνεία του Born δείχνει ξεκάθαρα ότι ο μαθηματικός κόσμος που περιγράφει τον φυσικό κόσμο είναι πιθανοκρατικός και όχι ντετερμινιστικός. Αυτό όμως δεν σημαίνει και ότι ο φυσικός κόσμος είναι πιθανοκρατικός, η περιγραφή του όμως σίγουρα ακολουθεί κατανομές πιθανοτήτων και όχι συναρτήσεις [17]. Παράλληλα την ίδια χρονιά ο Heisenberg ανέπτυξε μια θεωρία βασισμένη σε μητρώα για την επεξήγηση του ατομικού κόσμου. Τελικά πρόκειται για το ίδιο πράγμα με διαφορετική αναπαράσταση, ο Heisenberg και ο Schrodinger αναπτύξαν την κβαντομηχανική την ίδια χρονική περίοδο με διαφορετικά μαθηματικά [18]. Τέλος όσον αφορά τον μη σχετικιστικό κόσμο η κβαντομηχανική αποτελεί την καλύτερη περιγραφή που έχουμε μέχρι και σήμερα. Λύνοντας την εξίσωση Schrodinger (1.5.4) για κάποιο δυναμικό βρίσκουμε την κυματοσυνάρτηση και έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε με χρήση στατιστικής φυσικές ποσότητες όπως η μέση θέση και η μέση ορμή. Αν και η ανάπτυξη της πυρηνικής φυσικής μπορεί να γίνει με χρήση κβαντικής φυσικής, κάτι τέτοιο δεν μας ενδιαφέρει [19]. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας και από την σκοπιά του μηχανικού, θα χρησιμοποιηθεί η ημικλασική προσέγγιση για την ανάπτυξη των παρακάτω.

2.0 ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΔΟΜΗ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το 1896 ο Becquerel ανακάλυψε ραδιενέργεια, δηλαδή σε ενώσεις ουρανίου παρατήρησε ακτινοβολία η οποία δεν προερχόταν από κάποιο φάσμα, και «ανάβλυζε» φυσικά [20]. Ο Rutherford απέδειξε ότι η εκπεμπόμενη ότι υπάρχει ακτινοβολία 3 τύπων, του τις ονόμασε ακτινοβολίες άλφα (α) – πυρήνες Ηλίου, βήτα (β) - ηλεκτρόνια και γάμμα (γ) – υψηλής ενέργεια φωτόνια. Το 1911, οι Rutherford, Geiger και Marsden μέσω πειραμάτων απέδειξαν ότι ο πυρήνας μπορεί να θεωρηθεί σημειακός, περιέχει το μεγαλύτερο μέρος της μάζας και επέδειξαν την ύπαρξη μια νέας δύναμης που εμφανίζεται μόνο σε ατομικές διαστάσεις τις τάξης του 10^{-15} [21]. Το 1930 μέσω επιταχυνόμενων σωματιδίων παρατηρήθηκαν πυρηνικές πυρηνικές αντιδράσεις από τους Cockroft και Walton [22]. Το 1932 ο Chadwick ανακάλυψε το νετρόνιο [23]. Το 1933 οι Joliot και Irene Curie ανακάλυψαν την τεχνητή ραδιενέργεια [24]. Το 1933 οι Hanh και Strassmann ανακάλυψαν την πυρηνική σχάση [25]. Τέλος, η μελέτη της πυρηνικής ενέργειας στο πλαίσιο της θεωρητικής φυσικής ήταν ήδη ολοκληρωμένη μέχρι το 1938 όπου δημιουργήθηκε ο πυρηνικός αντιδραστήρας ελεγχόμενης σχάσης από το Fermi [26].

2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΥΡΗΝΩΝ

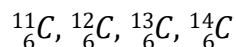
Για την περιγραφή των πυρήνων χρησιμοποιούνται οι παρακάτω ποσότητες:

1. Ατομικός αριθμός Z: Ο αριθμός των πρωτονίων που υπάρχουν σε έναν πυρήνα.
2. Αριθμός νετρονίων N: Ο αριθμός των νετρονίων που υπάρχουν σε έναν πυρήνα.
3. Μαζικός αριθμός A: Ο αριθμός νουκλεονίων, δηλαδή πρωτονίων και νετρονίων σε έναν πυρήνα.

Ο τρόπος αναπαράστασης των χημικών στοιχείων που χρησιμοποιείται στην πυρηνική φυσική είναι:

$${}^A_ZX \quad (2.2.1)$$

Όπου X το χημικό στοιχείο. Όταν δεν υπάρχει πιθανότητα σύγχυσης μπορεί να παραλειφθεί το Z. Οι πυρήνες όλων των ατόμων ενός συγκεκριμένου στοιχείου περιέχουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων, αλλά μπορεί να περιέχουν διαφορετικό αριθμό νετρονίων. Αυτοί οι πυρήνες ονομάζονται ισότοπα. Ένα παράδειγμα είναι τα παρακάτω 4 ισότοπα άνθρακα



Το δεύτερο ισότοπο αποτελεί το 98.9% του άνθρακα στη γη και το τρίτο το 1.1%. Μερικά ισότοπα δεν εμφανίζονται στη φύση, αλλά μπορούν να κατασκευαστούν στο εργαστήριο.

Το πρωτόνιο φέρει ίσο κατά απόλυτη τιμή φορτίο με το ηλεκτρόνιο και το νετρόνιο είναι ηλεκτρικά ουδέτερο. Η μάζα του πρωτονίου είναι περίπου 1836 φορές μεγαλύτερη από την μάζα του ηλεκτρονίου. Η μάζα του νετρονίου είναι και του πρωτονίου είναι περίπου ίσες. Στην πυρηνική φυσική χρησιμοποιείται η ενοποιημένη μονάδα μάζας u. Η αντιστοιχία σε μονάδες SI είναι:

$$1u = 1.660558 \times 10^{-27}kg(2.2.2)$$

και $12u$ είναι η μάζα του ^{12}C . Οι μάζες των ατομικών στοιχείων σε ατομικές μονάδες είναι:

- Μάζα πρωτονίου $m_p = 1.007276u$
- Μάζα νετρονίου $m_n = 1.008665u$
- Μάζα ηλεκτρονίου $m_e = 0.000549u$

[26]

Όπως θα φανεί παρακάτω συχνά η ενοποιημένη μονάδα μάζας που χρησιμοποιείται για τις πράξεις είναι σε μονάδες MeV/c^2

$$1u = 1.660558 \times 10^{-27}kg = 931.50MeV/c^2(2.2.3)$$

2.3 ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ

Ο Rutherford πειραματικά απέδειξε ότι οι περισσότεροι πυρήνες έχουν σφαιρικό σχήμα και η μέση ακτίνα τους δίνεται από την σχέση:

$$r = r_0A^{1/3}(2.3.1)$$

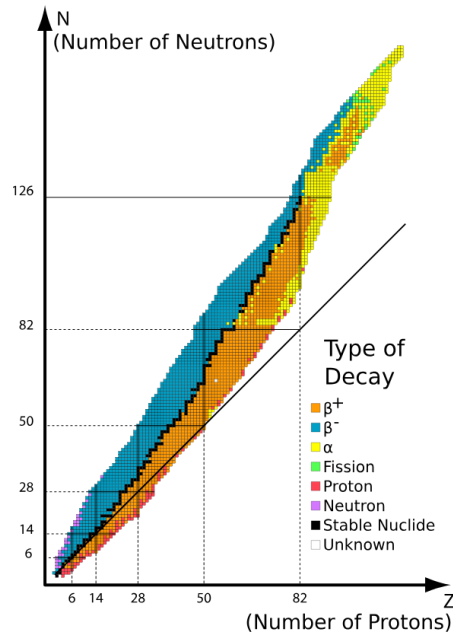
όπου A ο μαζικός αριθμός και r_0 μια σταθερά ίση με $r_0 = 1.2 \times 10^{-15} m$.

Θεωρώντας τα άτομα σφαιρικά ο όγκος τους είναι:

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A \quad (2.3.2)$$

δηλαδή είναι ανάλογος του μαζικού αριθμού. Δηλαδή όλοι οι πυρήνες έχουν σχεδόν την ίδια πυκνότητα. Άρα ο πυρήνας αποτελεί μια συλλογή από πυκνά συσσωρευμένα πρωτόνια και νετρόνια. Λογικό είναι να σκεφτεί κανείς ότι η απωστικές δυνάμεις Coulomb μεταξύ των

πρωτονίων δεν θα επέτρεπαν την συγκροτημένη δομή του πυρήνα. Η δύναμη που αντισταθμίζει την δύναμη Coulomb είναι η ισχυρή πυρηνική δύναμη. Συνολικά υπάρχουν περίπου 400 σταθεροί πυρήνες. Η σχέση μεταξύ του N και του Z για του σταθερούς πυρήνες είναι σχεδόν γραμμική. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα της σταθερότητας των πυρήνων.



Εικόνα 5 Καταλληλότητα πυρήνων ανάλογα με την σχέση πρωτονίων νετρονίων

- Τα μαύρα pixels δείχνουν την σχέση μεταξύ N και Z για σταθερούς πυρήνες. Όπως φαίνεται ελαφροί πυρήνες είναι σταθεροί για $N = Z$ και βαρείς πυρήνες για αριθμό νετρονίων μεγαλύτερο από αριθμό πρωτονίων. Αυτό συμβαίνει γιατί όσα περισσότερα πρωτόνια υπάρχουν τόσο αυξάνεται η απωστική δύναμη Coulomb. Ετσι χρειάζονται περισσότερα νετρόνια, τα οποία υφίστανται μόνο ελκτική δύναμη, για την διατήρηση της σταθερότητας. Τέλος, για $Z > 83$ οι απωστικές δυνάμεις μεταξύ πρωτονίων δεν μπορούν

να αντισταθμιστούν. Έτσι στοιχεία με $Z > 83$ δεν μπορούν να έχουν σταθερούς πυρήνες. Οι περισσότεροι σταθεροί πυρήνες έχουν άρτιο αριθμό A . Ειδικότερα για συγκεκριμένες τιμές Z και N υπάρχει ιδιαίτερη υψηλή σταθερότητα. Αυτές οι τιμές Z και N ονομάζονται μαγικοί αριθμοί και είναι Z ή $N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$. [27] [28]

- Τα πορτοκαλί pixels δείχνουν πυρήνες που είναι ασταθείς και εκπέμπουν ποζιτρόνια.
- Τα μπλε pixels δείχνουν πυρήνες που είναι ασταθείς και εκπέμπουν ηλεκτρόνια.
- Τα κίτρινα pixels δείχνουν πυρήνες που είναι ασταθείς και εκπέμπουν σωμάτια άλφα.
- Τα πράσινα pixels δείχνουν πυρήνες που κάνουν αυθόρμητη σχάση. Πράγμα που θα αναλυθεί παρακάτω.

2.4 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

Χρησιμοποιώντας την σχέση ενέργειας – μάζας του Einstein

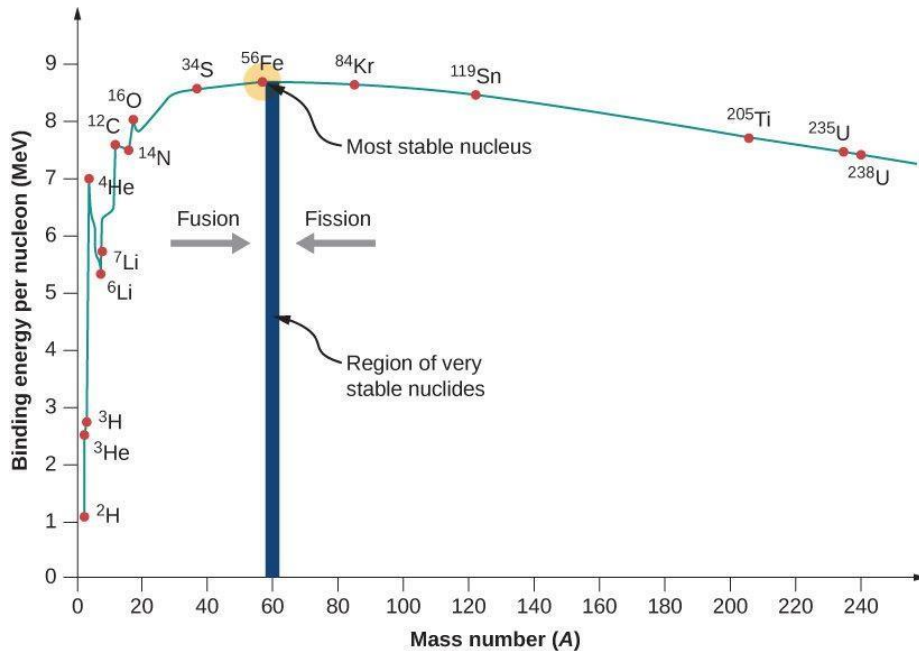
$$E = mc^2(2.4.1)$$

εύκολα παρατηρεί κανείς ότι η ενέργεια των νουκλεονίων του είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια του πυρήνα. Πρακτικά η συνολική μάζα των νουκλεονίων είναι μεγαλύτερη από την συνολική ενέργεια του πυρήνα. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται έλλειμα μάζας. Αυτή η μάζα Δm αν πολλαπλασιαστεί με c^2 , η ενέργεια που υπολογίζεται είναι η ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα. Εκτός της απλής ραδιενεργού διάσπασης υπάρχουν δύο σημαντικές διεργασίες που έχουν ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση ενέργειας από τον πυρήνα. Η πρώτη ονομάζεται πυρηνική σχάση, όπου ο πυρήνας διασπάται σε θραύσματα. Η δεύτερη ονομάζεται πυρηνική σύντηξη όπου δύο ή

περισσότερα νουκλεόνια συντίθενται για να σχηματίσουν έναν βαρύτερο πυρήνα. Η ενέργεια σύνδεσης οποιουδήποτε πυρήνα A_ZX που συμβολίζεται με

$$E_b(\text{MeV}) = (Zm_H + Nm_H - M({}^A_ZX)) \times 931.50 \text{ MeV}/u \quad (2.4.2)$$

Παρατηρώντας την καμπύλη E_b/A ως συνάρτηση του μαζικού αριθμού για σταθερούς πυρήνες:



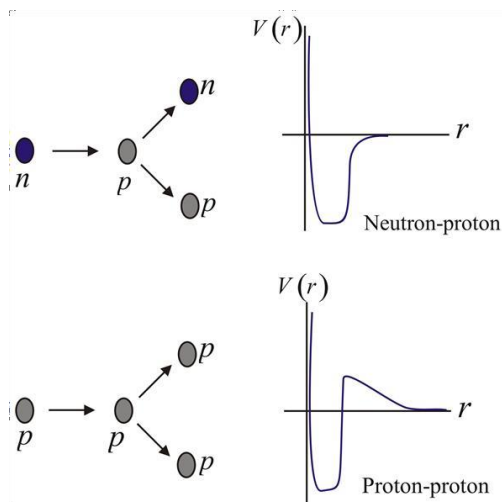
Εικόνα 6 Ενέργεια σύνδεσης συναρτήσει του μαζικού αριθμού

Συμπεραίνουμε ότι:

- Οι ελαφροί πυρήνες έχουν ενέργεια σύνδεσης περίπου 8eV
- Το μέγιστο εμφανίζεται περίπου στο $A = 60$. Άρα πυρήνες με A μεγαλύτερο ή μικρότερο του 60 δεν είναι τόσο σταθεροί. Οι πυρήνες με γύρω από το 60 βρίσκονται στο μέσο του περιοδικού πίνακα.
- Για $A > 40$ η καμπύλη προχωράει αργά, πράγμα που σημαίνει ότι επέρχεται κορεσμός της πυρηνικής δύναμης.

2.5 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΕΣΑ ΣΤΟΝ ΠΥΡΗΝΑ

Ένα συγκεκριμένο νουκλεόνιο αλληλοεπιδρά μόνο με τους πλησιέστερους γείτονες του. Μέσα στον πυρήνα η ισχυρή πυρηνική δύναμη κυριαρχεί της απωστικής Coulomb. Η πυρηνική δύναμη είναι ανεξάρτητη από το φορτίο, δηλαδή η πυρηνικές δυνάμεις πρωτονίου – νετρονίου, πρωτονίου – πρωτονίου και νετρονίου – νετρονίου είναι ίσες, εκτός από την πρόσθετη δύναμη Coulomb μεταξύ πρωτονίου – πρωτονίου. Στο παρακάτω διάγραμμα συνοψίζονται αυτές οι αλληλεπιδράσεις.



Εικόνα 7 Δυναμική ενέργεια μεταξύ πρωτονίου – πρωτονίου και νετρονίου - νετρονίου

Χρησιμοποιώντας την σχέση

$$\vec{F} = -\vec{\nabla}V(2.5.1)$$

Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι στην αλληλεπίδραση πρωτονίου – πρωτονίου για μεγάλες τιμές του r υπερισχύει η δύναμη Coulomb που είναι απωστική. Για μικρότερες τιμές του r η ελκτική δύναμη υπερβαίνει την απωστική δύναμη Coulomb. Αντίθετα στην αλληλεπίδραση

μεταξύ νετρονίου – νετρονίου δεν υπάρχει δύναμη Coulomb. Και στις 2 περιπτώσεις το ελάχιστο τον καμπυλών αντιστοιχεί στην ενέργεια σύνδεσης.

2.6 ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Η λεπτομερής φύση των πυρηνικών μοντέλων περιγράφεται καλύτερα, αλλά όχι πλήρως, με την χρήση κβαντικής θεωρίας πεδίου. Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιούμε φαινομενολογικά μοντέλα που είναι χρήσιμα για την κατανόηση χαρακτηριστικών γνωρισμάτων των πειραματικών δεδομένων. Παρακάτω γίνεται ανάλυση στο μοντέλο της σταγόνας που εξηγεί την πυρηνική ενέργεια σύνδεσης, το μοντέλο των ανεξάρτητων σωματιδίων που εξηγεί την ύπαρξη σταθερών ισότοπων και το συλλογικό μοντέλο.

Το μοντέλο της σταγόνας:

Το 1936 ο Bohr διατύπωσε το εμπειρικό μοντέλο της σταγόνας. Για αυτό το μοντέλο θεώρησε τα νουκλεόνια ως μια σταγόνα υγρού. Ο λόγος που έκανε αυτή την θεώρηση είναι γιατί τα αλληλοεπιδρώντα νουκλεόνια κινούνται άτακτα μέσα στον πυρήνα όπως και τα μόρια μέσα σε ένα υγρό. Βασισμένος πάνω σε 3 φαινόμενα κατάφερε να εξηγήσει την ενέργεια σύνδεσης:

1. Το φαινόμενο όγκου: Η ενέργεια σύνδεσης είναι ανάλογη του A . Αρα στην ενέργεια σύνδεσης υπάρχει μια σύνδεση έχει μια συνεισφορά C_1A , όπου C_1 μια σταθερά.
2. Το φαινόμενο επιφάνειας: Τα νουκλεόνια που βρίσκονται στην επιφάνεια έχουν λιγότερους κοντινότερους γείτονες από ότι εκείνα που βρίσκονται στο εσωτερικό της σταγόνας. Αρα αυτά θα μειώσουν την ενέργεια σύνδεσης κατά μια ποσότητα ανάλογη του

r^2 . Όμως η ακτίνα είναι ανάλογη του $A^{1/3}$, άρα θα υπάρχει μια μείωση στην ενέργεια σύνδεσης της τάξης $-C_2A^{2/3}$

3. Η άπωση Coulomb: Η ολική ενέργεια Coulomb αποτελεί το έργο που απαιτείται για να συναθροιστούν Z πρωτόνια από το άπειρο σε μια σφαίρα όγκου V . Αυτή η ενέργεια είναι ανάλογη προς τον αριθμό ζευγών πρωτονίων $Z(Z - 1)/2$ και αντιστρόφως ανάλογη της ακτίνας, άρα η μείωση της ακτίνας που επέρχεται από το φαινόμενο Coulomb είναι $-C_3Z(Z - 1)A^{1/3}$.
4. Για βαρείς πυρήνες, με μεγάλο πλεόνασμα ηλεκτρονίων η ενέργεια σύνδεση είναι ανάλογη ενός όρου $(A - 2Z)2/A$.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω ο εμπειρικός τύπος είναι:

$$E_b = C_1A - C_2A^{2/3} - C_3 \frac{Z(Z - 1)}{A^{1/3}} - C_4 \frac{(A - 2Z)^2}{A} \quad (2.6.1)$$

Για σταθερές $C_1 = 15.7MeV$, $C_2 = 17.8MeV$, $C_3 = 0.71MeV$, $C_4 = 23.6MeV$ ο παραπάνω τύπος λειτουργεί πολύ καλά για πυρήνες με $A > 15$. Το πρόβλημα με το μοντέλο της σταγόνας είναι ότι δεν εξηγεί την σταθερότητα και την στροφορμή των πυρήνων. [29]

Το μοντέλο των ανεξάρτητων σωματιδίων

Αυτό το μοντέλο ονομάζεται και μοντέλο των φλοιών ή στοιβάδων. Το μοντέλο των ανεξάρτητων σωματιδίων βασίζεται στη υπόθεση ότι κάθε νουκλεόνιο κινείται σε μια σταθερή τροχιά μέσα στον πυρήνα παρουσία ενός πεδίου που παράγεται από άλλα νουκλεόνια. Κάθε ενεργειακή κατάσταση περιέχει μόνο 2 πρωτόνια (ή νετρόνια) με αντίθετο spin ώστε να ικανοποιείται η απαγορευτική αρχή του Pauli [30]. Οι ενεργειακές στάθμες πρωτονίου είναι υψηλότερης ενέργειας από τις στάθμες νετρονίου, λόγω της προστιθέμενης απώσης Coulomb

μεταξύ πρωτονίων. Αυτό το μοντέλο είναι πολύ επιτυχημένο ως προς την πρόβλεψη της σταθερότητας και των στροφορμών. Δεν θα μπορούμε σε μεγαλύτερη ανάλυση αυτού του μοντέλου καθώς, είναι απαραίτητη η εφαρμογή της κβαντικής θεωρίας πράγμα που ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτής της εργασίας. [31]

Το συλλογικό μοντέλο

Το συλλογικό μοντέλο συνδυάζει τα 2 παραπάνω μοντέλα. Σύμφωνα με αυτό ο πυρήνας περιέχει ένα σύνολο σταθερών νουκλεονίων και υπάρχουν κάποια ακόμη νουκλεόνια που περιστρέφονται σε κβαντωμένες τροχιές. Το συλλογικό μοντέλο έχει μεγάλη επιτυχία ως προς την ερμηνεία πολλών φαινομένων.

2.7 ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ

Στην πρώτη του ανακάλυψη, ο Becquerel το 1896 ανακάλυψε ότι οι κρύσταλλοι αλάτων ουρανίου εκπέμπουν ακτινοβολία που μπορεί να θολώσει μια φωτογραφική πλάκα που είναι καλυμμένη [32]. Συμπέρανε ότι η ακτινοβολία είναι νέου τύπου αφού καταφέρνει να διαπεράσει υλικά χωρίς να απαιτεί κάποια εξωτερική διέγερση. Αυτή η διεργασία αυθόρμητης εκπομπής ονομάζεται ραδιενέργεια. Οι Marie και Pierre Currie κατάφεραν να ανακαλύψουν 2 νέα ραδιενεργά στοιχεία που τα ονόμασαν πολώνιο και ράδιο [33]. Πειράματα που ακολούθησαν από τον Rutherford έδειξαν ότι αυτή η ακτινοβολία προέρχεται από διασπάσεις ή αποσύνθεσης ασταθών πυρήνων [34].

Ο ρυθμός με τον οποίο γίνεται μια συγκεκριμένη διεργασία διάσπασης σε ένα ραδιενεργό δείγμα είναι ανάλογος προς τον αριθμό των ραδιενεργών πυρήνων που είναι παρόντες. Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει τις ραδιενεργές διασπάσεις είναι:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \quad (2.7.1)$$

Όπου:

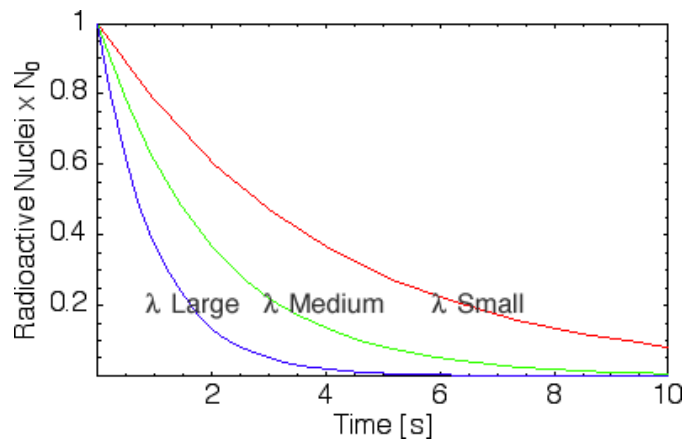
- $N(t)$ ο αριθμός των παρόντων ραδιενεργών πυρήνων στο άτομο την χρονική στιγμή t .
- λ η σταθερά διάσπασης που περιγράφει το πόσο γρήγορα μπορεί να διασπαστεί ο πυρήνας.

Για την επίλυση της παραπάνω μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος χωρισμού των μεταβλητών. Εστω αρχική συνθήκη ο αριθμός των πυρήνων την χρονική στιγμή 0 να είναι $N(t = 0) = N_0$.

Χωρίζοντας τις μεταβλητές βλέπουμε :

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \Rightarrow \ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t \Rightarrow N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.7.2)$$

Αρα ο αριθμός των πυρήνων ακολουθεί μια εκθετική πτώση ως συνάρτηση του χρόνου.



Εικόνα 8 Αριθμός πυρήνων συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές λ

Ένα επίσης σημαντικό μέγεθος για την πυρηνική φυσική είναι ο ρυθμός διάσπασης

$$R = \left| \frac{dN}{dt} \right| = N_0 \lambda e^{-\lambda t} = R_0 e^{-\lambda t} \quad (2.7.3)$$

Όπου $R = N \lambda$ είναι ο ρυθμός διάσπασης ή αλλιώς η ενεργότητα. Τέλος ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει τους ασταθείς πυρήνες είναι ο χρόνος ημιζωής. Ο χρόνος ημιζωής ορίζεται ως χρόνος υποδιπλασιασμού του πληθυσμού των ασταθών πυρήνων. Θέτοντας $N = N_0/2$ στην εξίσωση του αριθμού των πυρήνων και λύνοντας ως προς χρόνο βρίσκουμε

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (2.7.4)$$

1 H Hydrogen																	2 He Helium																												
3 Li Lithium	4 Be Beryllium																	5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluorine	10 Ne Neon																						
11 Na Sodium	12 Mg Magnesium																	13 Al Aluminum	14 Si Silicon	15 P Phosphorus	16 S Sulfur	17 Cl Chlorine	18 Ar Argon																						
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	25 Mn Manganese	26 Fe Iron	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Copper	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Selenium	35 Br Bromine	36 Kr Krypton																												
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine	54 Xe Xenon																												
55 Cs Cesium	56 Ba Barium	57 La Lanthanum	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungsten	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au Gold	80 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon																												
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac Actinium	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Mc Moscovium	116 Lv Livermorium	117 Ts Tennessine	118 Og Oganesson																												
<table border="1"> <tr> <td>58 Ce Cerium</td> <td>59 Pr Praseodymium</td> <td>60 Nd Neodymium</td> <td>61 Pm Promethium</td> <td>62 Sm Samarium</td> <td>63 Eu Europium</td> <td>64 Gd Gadolinium</td> <td>65 Tb Terbium</td> <td>66 Dy Dysprosium</td> <td>67 Ho Holmium</td> <td>68 Er Erbium</td> <td>69 Tm Thulium</td> <td>70 Yb Ytterbium</td> <td>71 Lu Lutetium</td> </tr> <tr> <td>90 Th Thorium</td> <td>91 Pa Protactinium</td> <td>92 U Uranium</td> <td>93 Np Neptunium</td> <td>94 Pu Plutonium</td> <td>95 Am Americium</td> <td>96 Cm Curium</td> <td>97 Bk Berkelium</td> <td>98 Cf Californium</td> <td>99 Es Einsteinium</td> <td>100 Fm Fermium</td> <td>101 Md Mendelevium</td> <td>102 No Nobelium</td> <td>103 Lr Lawrencium</td> </tr> </table>																		58 Ce Cerium	59 Pr Praseodymium	60 Nd Neodymium	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium
58 Ce Cerium	59 Pr Praseodymium	60 Nd Neodymium	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium																																
90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium																																

 - Radioactive element

Εικόνα 9 Ραδιενεργά άτομα του περιοδικού πίνακα

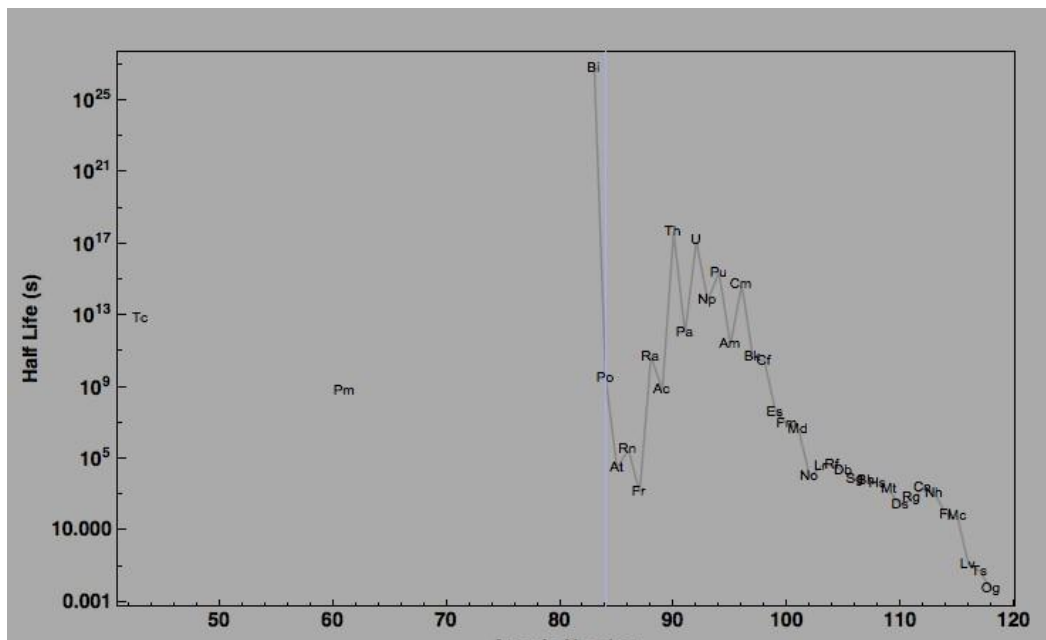
Ο χρόνος ημιζωής των ραδιενεργών πυρήνων είναι πολύ σημαντικός γιατί χρησιμοποιώντας των μπορούμε να υπολογίσουμε τον χρόνο για τον οποίο το υλικό είναι όντως ραδιενεργό. Σε μερικές εφαρμογές όπως στην ιατρική απαιτούνται υλικά με μικρό χρόνο ημιζωής, όπως το σκιαγραφικό υγρό και σε άλλες με μεγάλο όπως τα πυρηνικά εργοστάσια. Παρακάτω παρουσιάζονται τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα που είναι ραδιενεργά.

η ραδιενέργεια μετριέται σε Curie όπου

$$1Ci = 3.7 \times 10^{10} \text{ διασπασεις/s (2.7.5)}$$

αλλά στο διεθνές σύστημα μονάδων SI χρησιμοποιείται σαν μονάδα μέτρησης το Becquerel

$$1Bq = 1 \text{ δι\Phiσπαση/s (2.7.6)}$$

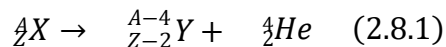


Εικόνα 10 Χρόνος ημιζωής συναρτήσει του ατομικού αριθμού

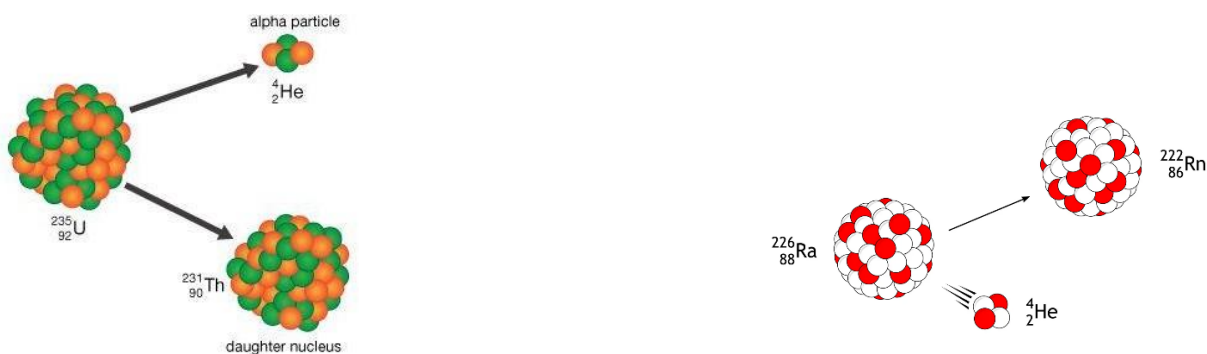
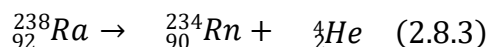
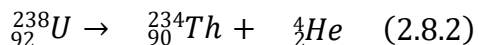
2.8 ΟΙ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ

Υπάρχουν 3 τύποι ακτινοβολίας που μπορεί να εκπέμπονται από μια ραδιενεργό ουσία. Η διάσπαση άλφα, κατά την οποία εκπέμπονται πυρήνες ηλίου 4He . Η διάσπαση βήτα κατά την οποία εκπέμπονται ηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια και η διάσπαση γάμα κατά την οποία εκπέμπονται φωτόνια

Διάσπαση άλφα: Ο μητρικός πυρήνας X εκπέμπει έναν πυρήνα Ηλίου, άρα χάνει 2 πρωτόνια και 2 νετρόνια. Έτσι δημιουργείται ο θυγατρικός πυρήνας Y .



Δυο γνωστά παραδείγματα διάσπασης άλφα είναι



Εικόνα 11 Διασπάσεις Ουρανίου και Ράδιου

Η ενέργεια που απελευθερώνεται από την διάσπαση, αν θεωρήσουμε την μάζα του μητρικού πυρήνα M_x και την μάζα του θυγατρικού M_y και την μάζα του πυρήνα ηλίου M_a είναι:

$$Q = (M_x - M_y - M_a)c^2 \quad [J] \quad (2.8.4)$$

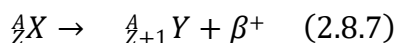
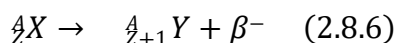
Αν και όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην πυρηνική φυσική χρησιμοποιούνται περισσότερο οι ατομικές μονάδες αντί για το σύστημα SI, οπότε η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$Q = (M_x - M_y - M_a) \times 931.50 \text{ MeV}/u \quad (2.8.5)$$

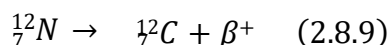
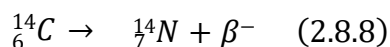
[35], [36]

Διάσπαση βήτα

Κατά την διάσπαση βήτα ο θυγατρικός πυρήνας έχει τον ίδιο αριθμό νουκλεονίων με το μητρικό πυρήνα και ο αριθμός του φορτίου μεταβάλλεται κατά 1. Δηλαδή εκπέμπεται ένα ηλεκτρόνιο ή ένα ποζιτρόνιο



Δύο γνωστές διεργασίες διάσπασης β είναι οι εξής:

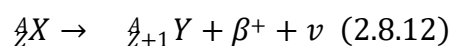
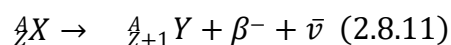


Στην πραγματικότητα το ηλεκτρόνιο ή το ποζιτρόνιο που φεύγει κατά την διάσπαση βήτα, προκύπτει από τον μετασχηματισμό ενός νετρονίου σε πρωτόνιο και ηλεκτρόνιο ή πρωτόνιο και ποζιτρόνιο.



Πειραματικά αποδεικνύεται ότι οι τα σωματρία βήτα μετά την εκπομπή τους ακολουθούν μια κατανομή φάσματος ενέργειας, άρα δεν είναι σταθερή η ενέργεια τους. Για να ισχύει η αρχή διατήρησης της ενέργειας θα πρέπει η ενέργεια του σωματιδίου βήτα και η ενέργεια του παραγόμενου ατόμου να δίνουν την αρχική ενέργεια. Αλλα αν ο πυρήνας έχει σταθερή μάζα, που όντως έχει, και τα σωματρία βήτα μεταβλητή δεν είναι δυνατόν να διατηρείται η ενέργεια. Οντως ο παραβιάζεται η αρχή διατήρησης της ενέργειας. Όπως επίσης και όλες οι βασικές αρχές διατήρησης στροφορμής, σπιν και ορμής. Αυτό το ιδιαίτερο φαινόμενο, οδήγησε τους φυσικούς του 1930 στο λογικό συμπέρασμα ότι κατά αυτές τις διασπάσεις υπάρχει ένα ακόμη σωματριο.

Αυτό κρυφό σωματίο πρέπει να έχει την χαμένη ενέργεια, ορμή, στροφορμή και σπιν και ταυτόχρονα να είναι ηλεκτρικά ουδέτερο και να αλληλοεπιδρά πολύ ασθενώς με την ύλη. Ο Fermi ονόμασε αυτό το σωματίδιο νεutrίνο. Το 1956 οι Raines και Cowan κατάφερα να ανιχνεύσουν αυτό το σωματίδιο και όντως πληρούσε όλες τις ιδιότητες που αναφέρονται παραπάνω. Έτσι οι διάσπαση βήτα πλέον γράφεται ως



Όπου το σύμβολο ν συμβολίζει το νεutrίνο και το σύμβολο $\bar{\nu}$ το αντινεutrίνο.

[36], [37], [38]

2.9 ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ

Οι ραδιενεργοί πυρήνες ταξινομούνται σε 2 ομάδες, στους ασταθής και στους σταθερούς. Οι ασταθείς πυρήνες που βρίσκονται στην φύση εμφανίζουν την φυσική ραδιενέργεια και αυτοί που κατασκευάζονται στο εργαστήριο την τεχνητή ραδιενέργεια. Οι σειρές ραδιενεργού διάσπασης είναι ακολουθίες ασταθών ισοτόπων, όπου κάθε ισότοπο αποσυντίθεται σε ένα άλλο μέχρι να επιτευχθεί ένα σταθερό ισότοπο. Στη φύση, υπάρχουν τρεις κύριες σειρές διάσπασης, η καθεμία ξεκινά από ένα διαφορετικό βαρύ στοιχείο. Αυτές οι σειρές είναι κρίσιμες για την κατανόηση της φυσικής ραδιενέργειας και έχουν εφαρμογές σε διάφορους τομείς, όπως η γεωλογία, η αρχαιολογία και η περιβαλλοντική επιστήμη.

1. Η Σειρά Ουρανίου ($4n+2$ Σειρά)

- Αρχικό Ισότοπο: Ουράνιο-238
- Τελικό Προϊόν: Μόλυβδος-206
- Κύρια Χαρακτηριστικά:
 - Ημιζωή του Ουρανίου-238: Περίπου 4,47 δισεκατομμύρια χρόνια.
 - Η σειρά περιλαμβάνει ισότοπα όπως το ράδιο-226 και το ραδόνιο-222.
 - Βρίσκεται σε βράχους και στο έδαφος.

Η Σειρά Ουρανίου είναι η πιο γνωστή φυσική σειρά αποσύνθεσης. Το ουράνιο-238 υφίσταται μια σειρά από διασπάσεις που περιλαμβάνουν άλφα και βήτα σωματίδια πριν φτάσει τελικά στο σταθερό ισότοπο, τον μόλυβδο-206. Αυτή η σειρά είναι ιδιαίτερα σημαντική λόγω της παρουσίας του ραδονίου-222, ενός ραδιενεργού αερίου που μπορεί να συσσωρευτεί σε κτίρια και έχει επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

2. Η Σειρά Θορίου ($4n$ Σειρά)

- Αρχικό Ισότοπο: Θόριο-232
- Τελικό Προϊόν: Μόλυβδος-208
- Κύρια Χαρακτηριστικά:
 - Ημιζωή του Θορίου-232: Περίπου 14 δισεκατομμύρια χρόνια.
 - Περιλαμβάνει ισότοπα όπως το ράδιο-224 και το ραδόνιο-220.
 - Συνηθισμένο σε γρανιτικούς βράχους και ορισμένους αποθέσεις.

Η Σειρά Θορίου ξεκινά με την αποσύνθεση του θορίου-232 και καταλήγει στη δημιουργία του σταθερού μολύβδου-208. Όπως και η σειρά Ουρανίου, περιλαμβάνει ένα μείγμα από άλφα και

βήτα διασπάσεις. Η παρουσία του ραδονίου-220, αν και λιγότερο επικρατούσα από το ραδόνιο-222 της σειράς Ουρανίου, είναι επίσης ανησυχητική για την ποιότητα του εσωτερικού αέρα.

3. Η Σειρά Ακτινίου ($4n+3$ Σειρά)

- Αρχικό Ισότοπο: Ουράνιο-235
- Τελικό Προϊόν: Μόλυβδος-207
- Κύρια Χαρακτηριστικά:
 - Ημιζωή του Ουρανίου-235: Περίπου 703,8 εκατομμύρια χρόνια.
 - Περιλαμβάνει ισότοπα όπως το ράδιο-223 και το ραδόνιο-219.
 - Λιγότερο αφθονεί από το Ουράνιο-238 αλλά φυσικά υπάρχει.

Η σειρά Ακτινίου ξεκινά με το Ουράνιο-235 και καταλήγει στο σταθερό ισότοπο Μολύβδου-207. Αυτή η σειρά είναι εμφανίζεται λιγότερο στην φύση σε σύγκριση με τη σειρά Ουρανίου-238 λόγω της χαμηλότερης φυσικής αφθονίας του ουρανίου-235.

Αντίστοιχες σειρές ραδιενεργών διασπάσεων μπορούν να δημιουργηθούν από πυρήνες που δεν υπάρχουν στη φύση, αλλά μπορούν να κατασκευαστούν σε ένα εργαστήριο. Ένα παράδειγμα είναι η σειρά του Ποσειδωνίου. Πήρε το όνομά της από το πιο μακρόβιο ισότοπό της, το Ποσειδώνιο-237, το οποίο έχει χρόνο ημιζωής περίπου 2.14 εκατομμύρια χρόνια. Αυτή η σειρά είναι μοναδική επειδή δεν εμφανίζεται φυσικά στη Γη σε σημαντικές ποσότητες. Ο λόγος για τη σπανιότητά της είναι ότι ο πρόγονος της σειράς, το Ποσειδώνιο-237, και οι προκάτοχοί του έχουν χρόνους ημιζωής πολύ μικρότερους από την ηλικία της Γης και έτσι οποιοδήποτε πρωτόγονο ποσειδώνιο έχει διασπαστεί.

Η σειρά του Ποσειδωνίου χαρακτηρίζεται από διαδικασίες διάσπασης που περιλαμβάνουν άλφα και βήτα διάσπαση. Στην άλφα διάσπαση, ένας ατομικός πυρήνας εκπέμπει ένα άλφα

Η ενέργεια αυτής της αντίδρασης υπολογίζεται ως

$$Q = (M_a - M_X - M_Y - M_b)c^2 \quad (2.9.3)$$

Αν αυτή η τιμή είναι θετική, τότε παράγεται ενέργεια από την διάσπαση και ονομάζεται εξώθερμη.

Αν η τιμή του Q είναι αρνητική, τότε για να γίνει η διάσπαση πρέπει να προσφερθεί ενέργεια και ονομάζεται ενδόθερμη.

[39],

[40]

3.1 ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗ

Ως ενεργός διατομή ορίζεται το μέτρο της πιθανότητας να συμβεί ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα σε μια πυρηνική διεργασία. Όταν μια δέσμη σωματιδίων προσπίπτει σε ένα στόχο, που αποτελείται από ένα σύνολο σωματιδίων, η πιθανότητα να συμβεί μια κρούση από των λόγω των ενεργών επιφανειών των σωματιδίων και του στόχου. Μαθηματικά η ενεργός διατομή είναι ένα μέτρο της ενεργής επιφάνειας που προσπίπτει ένα σωματίδιο με σκοπό να γίνει μια αλληλεπίδραση και εκφράζεται ως:

$$\sigma = \frac{N}{\Phi \times d} \quad (3.3.1)$$

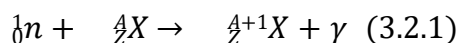
Όπου:

- N ο αριθμός των κρούσεων.
- Φ η εισερχόμενη ροή, δηλαδή ο αριθμός σωματιδίων ανά μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα χρόνου.
- d το πάχος του στόχου.

Ανάλογα με το είδος των κρούσεων ορίζονται και διαφορετικές ενεργές διατομές με μόνο διαφορά το N. Σε κάποια πειραματική ή θεωρητική μελέτη μπορούν να συμπεριληφθούν μόνο ελαστικές ή μόνο ανελαστικές κρούσεις ή ακόμη μόνο κρούσεις που μπορούν να ανιχνευθούν. Στα πλαίσια της θεωρητικής πυρηνικής φυσικής ο υπολογισμός της ενεργούς διατομής αναδεικνύει το αν μπορεί να συμβεί μια πυρηνική διαδικασία.

3.2 ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΣΧΑΣΗ

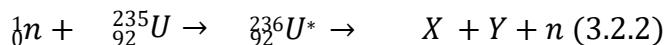
Κατά την πυρηνική σχάση ένας βαρύς πυρήνας διασπάται σε 2 μικρότερους πυρήνες. Οι 2 πυρήνες παρουσιάζουν έλλειμα μάζας σε σχέση με τον αρχικό πυρήνα. Αυτή η μάζα, άρα και ενέργεια, αντιστοιχεί στην ενέργεια που εκλύεται από μια τέτοια διεργασία. Η πυρηνική σχάση παρατηρήθηκε πρώτη φορά το 1939 από του Otto Hahn και Fritz Strassman, μέσω από αυτή την ανακάλυψη παρατηρήθηκαν πρώτη φορά το βάριο και το λανθάνιο [41]. Η κατανόηση της πυρηνικής σχάσης προϋποθέτει την κατανόηση της αλληλεπίδρασης νετρονίων – πυρήνων. Ένα ταχύ νετρόνιο αλληλοεπιδρά ασθενώς με την ύλη, λόγω του ουδέτερου φορτίου του, αλλά σε κάθε κρούση με ένα πυρήνα μεταφέρει μέρος της κινητικής του ενέργειας σε αυτόν. Το νετρόνιο κάνει αλληπάλληλες σκεδάσεις με έναν πυρήνα μέχρις ότου η ενέργεια του να φτάσει την τιμή $k_B T$, όπου T η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτά τα νετρόνια ονομάζονται θερμικά. Σε αυτή την ενέργεια το νετρόνιο απορροφάτε από ένα πυρήνα. Αυτή η διεργασία είναι γνωστή ως διεργασία σύλληψης νετρονίου



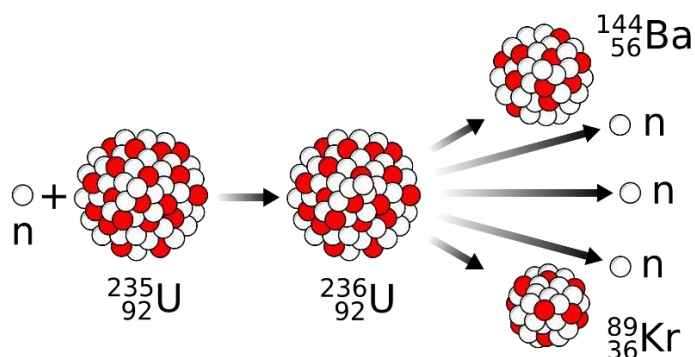
Στην πραγματικότητα ανάμεσα σε αυτή την διεργασία υπάρχει η διεγερμένη κατάσταση X^* για ένα απειροστό διάστημα χρόνου μέχρι να γίνει η διάσπαση γάμμα. Σε αυτή την κατάσταση θα αναφερθούμε αναλυτικά παρακάτω.

Η ενεργός διατομή σύλληψης του νετρονίου εξαρτάται από την φύση του υλικού που αλληλοεπιδρά. Σε υλικά όπως το νερό, ο γραφίτης και το βόριο κυριαρχούν οι ελαστικές κρούσεις έτσι τα νετρόνια γίνονται πολύ γρήγορα θερμικά. Αυτά τα υλικά είναι πολύ αποτελεσματικά και ονομάζονται επιβραδυντές.

Η πυρηνική σχάση μπορεί να επιτευχθεί από απορρόφηση θερμικών νετρονίων. Ένα γνωστό παράδειγμα αποτελεί η σχάση του Ουρανίου 235

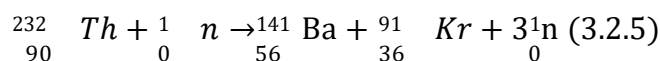
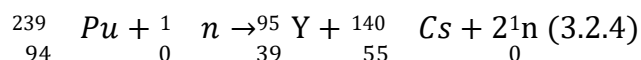
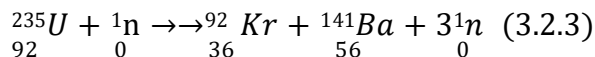


Η κατάσταση του διεγερμένου Ουρανίου 236 διαρκεί μόνο 10^{-12}s και υπάρχουν περίπου 90 πιθανοί συνδυασμοί για τα θραύσματα σχάσης που ικανοποιούν τις απαραίτητες αρχές διατήρησης. Στην παραπάνω διεργασία το Ουράνιο 235 συλλαμβάνει το θερμικό νετρόνιο, έτσι δημιουργείται το ασταθές Ουράνιο 236. Λόγω την περίσσιας ενέργειας του ο πυρήνας υφίσταται μεγάλες ταλαντώσεις. Λόγω των ταλαντώσεων μαζί με την δύναμη άπωσης μεταξύ των πρωτονίων ο πυρήνας διαχωρίζεται σε 2 τμήματα εκπέμποντας περίπου 3 νετρόνια σε κάθε διάσπαση.



Εικόνα 13 Διάσπαση Ουρανίου 235

Σε πυρηνικούς αντιδραστήρες συνήθως εμφανίζονται οι παρακάτω σχάσεις



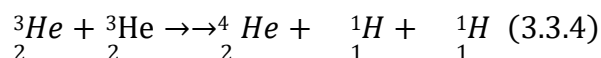
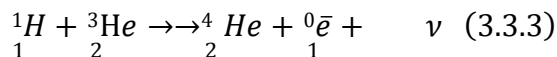
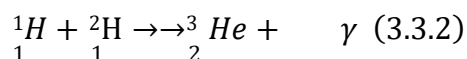
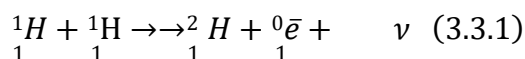
Τα νέα νετρόνια που εμφανίζονται χρησιμοποιούνται από τους υπόλοιπους πυρήνες με την ίδια διαδικασία, έτσι μια σχάση είναι μια αυτοσυντηρούμενη αλυσιδωτή αντίδραση.

3.3 ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΣΥΝΤΗΞΗ

Η διεργασία της σύντηξης είναι αντίστροφη της σχάσης. Δύο ελαφροί πυρήνες ενώνονται για να σχηματίσουν ένα βαρύτερο πυρήνα. Η μάζα του τελικού πυρήνα είναι μικρότερη από το άθροισμα των μαζών ηρεμίας των αρχικών πυρήνων, αυτή η απώλεια μάζα αντιστοιχεί και στην έκκληση ενέργειας μέσω της διάσημης σχέσης του Einstein $E = mc^2$. Η πυρηνική σύντηξη ανάλογα με το αν είναι ενδόθερμη ή εξώθερμη απορροφά ή εκλύει αντίστοιχα τεράστια ποσά ενέργειας.

Το 1915, ο Αμερικανός χημικός William Draper Harkins πρότεινε για πρώτη φορά την έννοια της πυρηνικής σύντηξης [41]. Στη συνέχεια, το 1921, ο Arthur Eddington πρότεινε ότι η σύντηξη υδρογόνου-ηλίου είναι η κύρια πηγή αστρικής ενέργειας.[42] Η ανακάλυψη του φαινομένου σήραγγας από τον Friedrich Hund το 1927[43] άνοιξε τον δρόμο για τους Robert Atkinson και Fritz Houtermans, οι οποίοι διαπίστωσαν ότι η σύντηξη μικρών πυρήνων μπορεί να απελευθερώσει σημαντικές ποσότητες ενέργειας [44]. Προχωρώντας από τα πρώιμα πειράματα της τεχνητής πυρηνικής σύντηξης του Patrick Blackett [45], ο Mark Oliphant [46] πέτυχε την εργαστηριακή σύντηξη των ισοτόπων του υδρογόνου το 1932. Κατά τη διάρκεια του υπόλοιπου

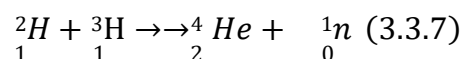
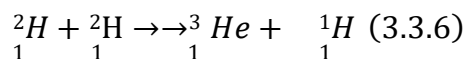
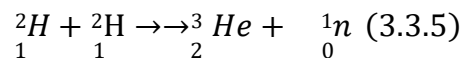
της δεκαετίας, ο Hans Bethe ανέπτυξε τη θεωρία του κύκλου της πυρηνικής σύντηξης στα άστρα [47]. Η έρευνα στη σύντηξη για στρατιωτικούς σκοπούς ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1940 ως μέρος του οργάνωσης Manhattan [48]. Η πρώτη εργαστηριακή πυρηνική σύντηξη πραγματοποιήθηκε στις 1 Νοεμβρίου 1952, με την βόμβα υδρογόνου Ivy Mike υδρογόνου [49]. Ενώ η σύντηξη επιτεύχθηκε με τη λειτουργία της βόμβας υδρογόνου η αντίδραση πρέπει να ελεγχθεί και να διατηρηθεί για να γίνει χρήσιμη πηγή ενέργειας. Η έρευνα για την ανάπτυξη ελεγχόμενης σύντηξης μέσα σε αντιδραστήρες σύντηξης συνεχίζεται από τη δεκαετία του 1930, αλλά η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη σε φάση ανάπτυξης. Γνωστά παραδείγματα πυρηνικής σύντηξης αποτελούν οι παρακάτω διεργασίες, που ονομάζονται κύκλος πρωτονίου - πρωτονίου



Οι παραπάνω πυρηνικές αντιδράσεις είναι ο βασικός κύκλος με τον οποίο ο ήλιος παράγει ενέργεια. Όλες οι παραπάνω αντιδράσεις είναι εξώθερμες με απελευθέρωση 25 MeV ανά διεργασία.

Η τεράστια έκλυση ενέργειας κατά τις διεργασίες σύντηξης επιβάλλει στην σύγχρονη κοινωνία την δημιουργία θερμοπυρηνικών ελεγχόμενων αντιδραστήρων σύντηξης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοιοι αντιδραστήρες μπορούν να λύσουν το ενεργειακό πρόβλημα λόγω της αφθονίας και της χαμηλής τιμής των καυσίμων, όπως το νερό. Μεγάλο πλεονέκτημα τέτοιων αντιδραστήρων είναι «τα απόβλητα» της καύσης δεν είναι ραδιενεργά, όπως το ήλιο. Δυστυχώς μέχρι το 2023 δεν έχει δημιουργηθεί κάποιο πυρηνικό εργοστάσιο σύντηξης.

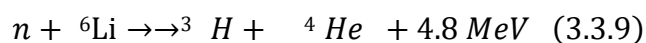
Οι αντιδράσεις σύντηξης που εμφανίζονται πολλά υποσχόμενες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι:



[50]

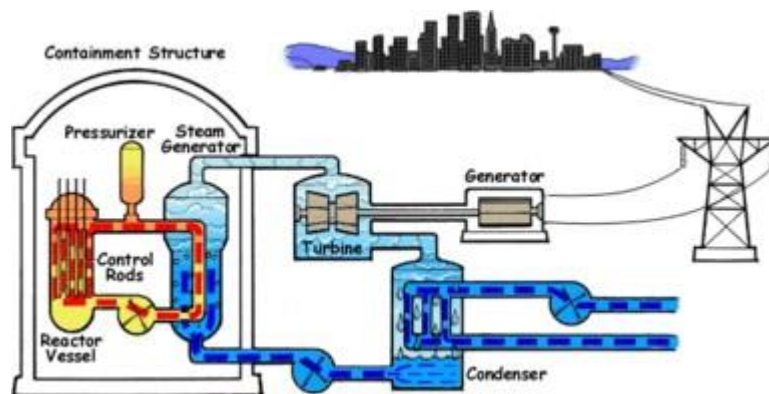
Με ενέργεια ανά αντίδραση ίση με $Q_1 = 3.27\text{MeV}$, $Q_2 = 4.03\text{MeV}$, $Q_3 = 17.59\text{MeV}$ αντίστοιχα.

Το δευτέριο υπάρχει σε τεράστιες ποσότητες στους ωκεανούς και η εξαγωγή του έχει χαμηλό κόστος, όμως το Τρίτιο δεν συναντάται τόσο συχνά στην φύση και είναι ραδιενεργό. Ένα θεωρητικό σχέδιο για την απολαβή ενέργειας από αντιδραστήρα σύντηξης είναι η καρδιά του αντιδραστήρα να περιβάλλεται από ένα κάλυμμα λιθίου. Τα νετρόνια θα απορροφούνται από το λειωμένο λίθιο και η θερμική ενέργεια θα παράγει ατμό, επίσης η απορρόφηση θα μετατρέπει το λίθιο σε τρίτιο το οποίο μπορεί να ανακυκλώνεται μέσα στον αντιδραστήρα ως καύσιμο.



4.0 ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

4.1 ΠΥΡΗΝΙΚΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΝΕΡΟΥ



Εικόνα 14 Πυρηνικό Εργοστάσιο τύπου PWR

Ενας αντιδραστήρας συμπιεσμένου νερού (PWR) αντιπροσωπεύει έναν τύπο πυρηνικού αντιδραστήρα ελαφρού νερού. Οι PWR αποτελούν τον κυρίαρχο τύπο πυρηνικών σταθμών

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

παγκοσμίως. Σε ένα PWR, το πρωτεύον ψυκτικό υγρό (νερό) αντλείται υπό υψηλή πίεση στον πυρήνα του αντιδραστήρα, όπου θερμαίνεται από την ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη σχάση των ατόμων. Το υψηλής πίεσης θερμαινόμενο νερό στη συνέχεια κατευθύνεται προς μια γεννήτρια ατμού, όπου παραδίδει τη θερμική ενέργειά του σε νερό χαμηλότερης πίεσης σε ένα δευτερεύον σύστημα, παράγοντας ατμό. Στη συνέχεια, ο ατμός ωθεί τους στροβίλους, οι οποίοι περιστρέφουν μια ηλεκτρική γεννήτρια.

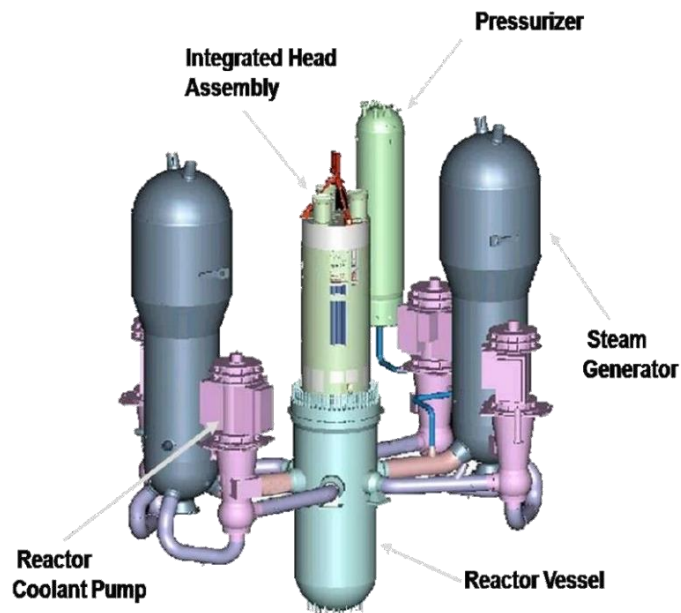
Οι αντιδραστήρες υπό πίεση νερού (PWR), χρησιμοποιούν ελαφρύ νερό ως κύριο ψυκτικό υγρό για να διευκολύνουν τις ελεγχόμενες αντιδράσεις σχάσης εντός του πυρήνα του αντιδραστήρα. Η διαδικασία ψύξης ξεκινά με την είσοδο νερού στον πυρήνα του αντιδραστήρα σε αρχική θερμοκρασία περίπου 548 K. Καθώς ανεβαίνει μέσω του πυρήνα, το νερό υφίσταται θέρμανση, φτάνοντας σε θερμοκρασία περίπου 588 K. Το νερό διατηρεί την υγρή του κατάσταση παρά την αυξημένη θερμοκρασία λόγω της υψηλής πίεσης εντός του βρόχου του πρωτεύοντος ψυκτικού υγρού, που συνήθως είναι γύρω στα 155 bar. Συγκεκριμένα, οι περιορισμοί που επιβάλλονται υπαγορεύουν ότι η θερμοκρασία δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 647 K και η πίεση δεν πρέπει να ξεπερνά τα 22.064 MPa.

Αναπόσπαστο στοιχείο της σταθερότητας του συστήματος PWR είναι ο συμπιεστής, ένα ξεχωριστό δοχείο που διασυνδέεται με το πρωτεύον κύκλωμα. Αυτό το δοχείο, μερικώς γεμάτο με νερό, χρησιμεύει ως βασικό στοιχείο για τη διατήρηση της απαιτούμενης πίεσης. Η επίτευξη πίεσης 155 bar συνεπάγεται θέρμανση του νερού μέσα στη συσκευή πίεσης σε θερμοκρασία κορεσμού 547 K χρησιμοποιώντας ηλεκτρικούς θερμαντήρες. Αυτή η λειτουργική διαμόρφωση παρέχει ένα περιθώριο υπό - ψύξης, που υποδηλώνει τη διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του συμπιεστή και της υψηλότερης θερμοκρασίας στον πυρήνα του αντιδραστήρα, ρυθμισμένη στους 300K. Η λειτουργία στους 547 K φέρνει το υγρό νερό στα όρια αλλαγής φάσης, συμβάλλοντας στη δυναμική ισορροπία. Προσαρμόζοντας τις θερμικές μεταβάσεις, μέσα στο σύστημα ψυκτικού του αντιδραστήρα, ο συμπιεστής υφίσταται σημαντικές διακυμάνσεις στον όγκο υγρού/ατμού. Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι διακυμάνσεις χωρίς να εκτεθούν οι τα πυρηνικά καύσιμα ή να καταστραφεί η συσκευή πίεσης, ο συνολικός όγκος του συμπιεστή σχεδιάζεται ανάλογα με τις ανάγκες του εργοστασίου. Οι περίπλοκες μεταβάσεις πιέσεων στο σύστημα πρωτεύοντος του

ψυκτικού εμφανίζεται ως διακυμάνσεις θερμοκρασίας στο συμπιεστή, που ελέγχονται μέσω αυτόματων θερμαντήρων και μηχανισμών ψεκασμού νερού.

Μια κρίσιμη πτυχή της λειτουργίας PWR έγκειται στους ισχυρούς μηχανισμούς άντλησης που χρησιμοποιούνται για την κυκλοφορία του πρωτεύοντος ψυκτικού υγρού σε όλο το σύστημα του αντιδραστήρα. Αυτές οι ισχυρές αντλίες, με ροή περίπου 100.000 γαλονιών ψυκτικού υγρού ανά λεπτό, παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση της επιθυμητής δυναμικής ροής και θερμοκρασίας. Μετά την απορρόφηση της θερμότητας στον πυρήνα του αντιδραστήρα, το πρωτεύον ψυκτικό υγρό υφίσταται μια διαδικασία μεταφοράς σε μια γεννήτρια ατμού. Αυτή η μεταφορά διευκολύνει τη μετατροπή του δευτερεύοντος ψυκτικού υγρού, που λειτουργεί σε χαμηλότερη πίεση, σε κορεσμένο ατμό — συνήθως στα 6,2 MPa και στους 555K. Αυτός ο ατμός υψηλής ενέργειας είναι καθοριστικός στην οδήγηση του αμοστρόβιλου, παράγοντας έτσι ηλεκτρική ενέργεια μέσω επαγωγής.

Η περίπλοκη αλληλεπίδραση θερμοκρασίας, πίεσης και δυναμικής ρευστών σε ένα PWR υποδεικνύει την πολυπλοκότητα της μηχανικής που είναι απαραίτητη για την αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας. Η συνεχής αναζήτηση για προόδους στην τεχνολογία των αντιδραστήρων εισάγει πιθανές οδούς, όπως οι αντιδραστήρες υπερκρίσιμου νερού, αν και οι προκλήσεις που σχετίζονται με αυξημένες πιέσεις και την ακεραιότητα του υλικού παραμένουν τρομερά εμπόδια. Από το 2022, αυτές οι προκλήσεις έχουν αποκλείσει την υλοποίηση αντιδραστήρων υπερκρίσιμου νερού σε πρακτικές εφαρμογές.



Εικόνα 15 Αντιδραστήρας τύπου PWR

[51], [52]

4.2 ΠΥΡΗΝΙΚΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΒΡΑΣΜΕΝΟΥ ΝΕΡΟΥ BWR

4.2.1 Βασική δομή και λειτουργία

Ο αντιδραστήρας βρασμένου νερού (BWR) είναι ένας τύπος πυρηνικού αντιδραστήρα ελαφρού νερού που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι ο δεύτερος πιο κοινός τύπος πυρηνικών αντιδραστήρων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μετά τον αντιδραστήρα υπό πίεση νερού (PWR). Η κύρια διάκριση μεταξύ ενός BWR και ενός PWR έγκειται στις μεθόδους μεταφοράς θερμότητας. Σε ένα BWR, ο πυρήνας του αντιδραστήρα

θερμαίνει το νερό, το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε ατμό και οδηγεί απευθείας έναν

ατμοστρόβιλο. Αντίθετα, ένα PWR θερμαίνει νερό χωρίς να το βράζει. Αυτό το ζεστό νερό μεταφέρει στη συνέχεια τη θερμότητα σε ένα σύστημα χαμηλότερης πίεσης, το οποίο μετατρέπει το νερό σε ατμό για να κινήσει τον στρόβιλο.

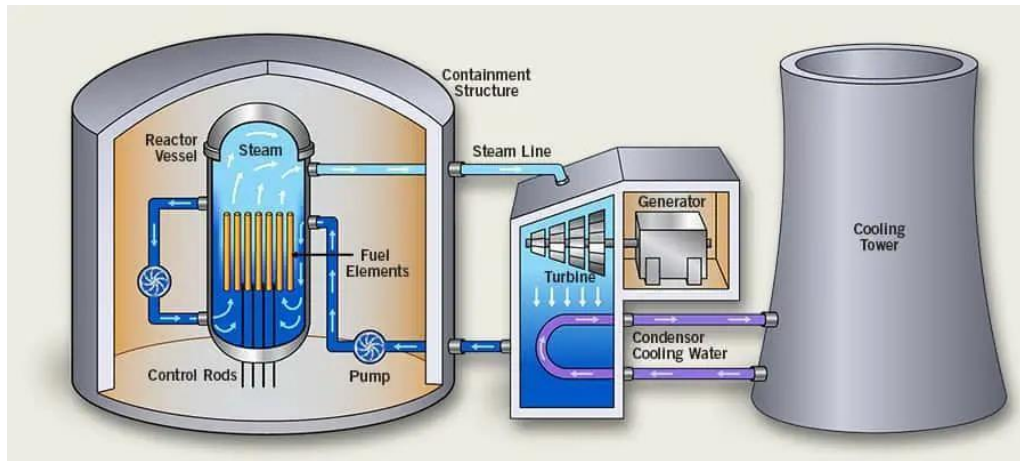
Αναπτύχθηκε στη Εθνικό Εργαστήριο Argonne και την General Electric (GE) στα μέσα της δεκαετίας του 1950, το BWR χρησιμοποιεί απιονισμένο νερό τόσο ως ψυκτικό όσο και ως συντονιστή νετρονίων. Η πυρηνική σχάση στον πυρήνα του αντιδραστήρα παράγει θερμότητα, με αποτέλεσμα το νερό ψύξης να βράζει και να παράγει ατμό. Αυτός ο ατμός χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την κίνηση ενός στρόβιλου, μετά τον οποίο ψύχεται σε συμπυκνωτή και μετατρέπεται ξανά σε υγρό νερό. Αυτό το νερό στη συνέχεια επιστρέφεται στον πυρήνα του αντιδραστήρα.

Οι συνθήκες λειτουργίας σε ένα BWR είναι τέτοιες ώστε το νερό ψύξης να διατηρείται σε περίπου 75 atm (7,6 MPa, 1000–1100 psi), που βράζει στον πυρήνα στους περίπου 285 °C (550 °F). Η συχνότητα βλάβης πυρήνα του αντιδραστήρα εκτιμάται ότι είναι μεταξύ 10^{-4} και 10^{-7} (δηλαδή, ένα ατύχημα πυρηνικής βλάβης ανά 10.000 έως 10.000.000 έτη αντιδραστήρα).

Ο ατμός που εξέρχεται από τον στρόβιλο ρέει σε συμπυκνωτές που βρίσκονται κάτω από τους στρόβιλους χαμηλής πίεσης. Ο ατμός ψύχεται και επιστρέφει στην υγρή κατάσταση. Στη συνέχεια, το συμπύκνωμα αντλείται μέσω θερμαντικών τροφοδοσίας νερού, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του χρησιμοποιώντας ατμό εξαγωγής από διάφορα στάδια του στρόβιλου. Το νερό τροφοδοσίας εισέρχεται στο δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα (RPV) και συνδυάζεται με το νερό που εξέρχεται από τους διαχωριστές υγρασίας.

Η ισχύς του αντιδραστήρα ελέγχεται με δύο μεθόδους: εισαγωγή ή απόσυρση ράβδων ελέγχου και αλλαγή της ροής του νερού μέσω του πυρήνα του αντιδραστήρα.. Αυτή η μέθοδος

παρέχει μια πιο ομοιογενή κατανομή ισχύος. Η ισχύς μπορεί επίσης να ελεγχθεί μεταβάλλοντας τη ροή του νερού, η οποία είναι η συνήθης μέθοδος για τον έλεγχο της ισχύος από περίπου 30% έως 100% ισχύος αντιδραστήρα.



Εικόνα 16 Πυρηνικό Εργοστάσιο τύπου BWR

[53], [54]

4.3 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ PWR ΚΑΙ BWR

Οι αντιδραστήρες υπό πίεση νερού (PWR) και οι αντιδραστήρες βραστό νερού (BWR) είναι και οι δύο τύποι πυρηνικών αντιδραστήρων ελαφρού νερού που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά λειτουργούν με βάση διαφορετικές αρχές και σχέδια.

Στα PWR, ο πυρήνας του αντιδραστήρα θερμαίνει το νερό σε έναν πρωτεύοντα βρόχο, αλλά αυτό το νερό διατηρείται υπό υψηλή πίεση για να αποτραπεί ο βρασμός του, ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες. Το θερμαινόμενο νερό στη συνέχεια ρέει μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας, όπου μεταφέρει τη θερμική του ενέργεια σε έναν δευτερεύοντα βρόχο νερού. Σε αυτόν τον δευτερεύοντα βρόχο, το νερό μετατρέπεται σε ατμό, ο οποίος στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την κίνηση του στρόβιλου. Αφού δαπανηθεί η ενέργειά του, ο ατμός συμπυκνώνεται ξανά σε νερό και επιστρέφει στον εναλλάκτη θερμότητας. Αυτός ο διαχωρισμός του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος βρόχου στα PWR σημαίνει ότι το νερό που ρέει μέσω του πυρήνα του αντιδραστήρα δεν περιστρέφει απευθείας τον στρόβιλο, ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο ραδιενεργής μόλυνσης στον στρόβιλο και στα υπόλοιπα συστήματα.

Τα BWR, από την άλλη πλευρά, απλοποιούν τη διαδικασία έχοντας μόνο έναν βρόχο. Σε αυτούς τους αντιδραστήρες, το νερό βράζεται απευθείας στον πυρήνα του αντιδραστήρα, μετατρέποντας σε ατμό που οδηγεί απευθείας τον στρόβιλο. Αφού περάσει μέσα από τον στρόβιλο, ο ατμός συμπυκνώνεται ξανά σε νερό και τροφοδοτείται πίσω στον αντιδραστήρα. Αυτός ο άμεσος κύκλος εξαλείφει την ανάγκη για έναν εναλλάκτη θερμότητας και έναν δευτερεύοντα βρόχο, αλλά σημαίνει επίσης ότι ο ατμός που διέρχεται από τον στρόβιλο έχει έρθει σε άμεση επαφή με τον πυρήνα του αντιδραστήρα, εγείροντας ανησυχίες για πιθανή ραδιενεργή μόλυνση σε περίπτωση διαρροής του συστήματος ή αποτυχία.

Οι πιέσεις λειτουργίας σε αυτούς τους αντιδραστήρες διαφέρουν επίσης σημαντικά. Τα PWR λειτουργούν σε υψηλότερες πιέσεις (περίπου 15 – 17 MPa) για να διατηρούν το νερό σε υγρή κατάσταση σε υψηλές θερμοκρασίες, συνήθως γύρω στους 310°C. Τα BWR λειτουργούν σε χαμηλότερες πιέσεις (περίπου 7 – 8 MPa), επιτρέποντας στο νερό να βράσει στους 285°C περίπου.

Αυτή η διαφορά στη λειτουργική πίεση έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικούς σχεδιασμούς και κατασκευές για τα δοχεία του αντιδραστήρα και τα σχετικά συστήματα.

Η θερμική απόδοση είναι ένα άλλο σημείο διάκρισης. Τα BWR γενικά έχουν υψηλότερη θερμική απόδοση λόγω της άμεσης χρήσης ατμού από τον αντιδραστήρα για την κίνηση του στροβίλου. Τα PWR, με το σύστημα δύο βρόχων τους, τείνουν να έχουν χαμηλότερη θερμική απόδοση. Ωστόσο, αυτό αντισταθμίζεται από την ενισχυμένη ασφάλεια που παρέχεται από τον διαχωρισμό του ραδιενεργού πρωτεύοντος βρόχου από το σύστημα του στροβίλου.

Η τοποθέτηση της ράβδου ελέγχου είναι μια άλλη αξιοσημείωτη διαφορά. Στα PWR, οι ράβδοι ελέγχου εισάγονται από την κορυφή του αντιδραστήρα, ενώ στα BWR, από το κάτω μέρος. Αυτή η διαφορά στο σχεδιασμό επηρεάζει την κατανομή και τον έλεγχο της πυρηνικής αντίδρασης εντός του πυρήνα του αντιδραστήρα.

Όσον αφορά τον όγκο πυρήνα, τα PWR έχουν συνήθως μικρότερο όγκο πυρήνα για την ίδια παραγωγή ενέργειας σε σύγκριση με τα BWR. Αυτό οφείλεται στην υψηλότερη πίεση στα PWR, η οποία επιτρέπει έναν πιο συμπαγή σχεδιασμό πυρήνα. Ωστόσο, οι BWR, με τον μεγαλύτερο όγκο πυρήνα τους, μπορεί να είναι πιο δύσκολο να διαχειριστούν όσον αφορά τη διατήρηση μιας ομοιόμορφης κατανομής θερμοκρασίας και ισχύος στον πυρήνα του αντιδραστήρα.

Όσον αφορά την ασφάλεια και τον κίνδυνο εξάπλωσης ραδιενέργειας, τα PWR γενικά θεωρείται ότι έχουν πλεονέκτημα λόγω του διαχωρισμού του ραδιενεργού πρωτεύοντος ψυκτικού από το σύστημα του στροβίλου. Στα BWR, δεδομένου ότι το ίδιο νερό διέρχεται από τον αντιδραστήρα και τον στροβίλο, υπάρχει μεγαλύτερος κίνδυνος εξάπλωσης ραδιενεργής μόλυνσης σε περίπτωση διαρροής ή βλάβης στο σύστημα.

Συμπερασματικά, ενώ τόσο τα PWR όσο και τα BWR είναι αποτελεσματικά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της πυρηνικής σχάσης, διαφέρουν ως προς το σχεδιασμό, τη λειτουργία, την απόδοση και τα χαρακτηριστικά ασφαλείας τους. Αυτές οι διαφορές επηρεάζουν την επιλογή του τύπου αντιδραστήρα ανάλογα με τις ειδικές ανάγκες, τις απαιτήσεις ασφάλειας και τις επιχειρησιακές εκτιμήσεις ενός πυρηνικού σταθμού.

[55]

4.4 ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΒΑΡΕΟΣ ΝΕΡΟΥ PHWR

Ένας αντιδραστήρας βαρέος νερού υπό πίεση (PHWR) είναι ένας τύπος πυρηνικού αντιδραστήρα που χρησιμοποιεί βαρύ νερό D_2O τόσο για ψύξη όσο και για μείωση των νετρονίων. Αυτοί οι αντιδραστήρες συχνά χρησιμοποιούν φυσικό ουράνιο ως πηγή καυσίμου, αν και μπορούν επίσης να χρησιμοποιούν ουράνιο χαμηλού εμπλουτισμού. Η συμπίεση του ψυκτικού υγρού βαρέος νερού το εμποδίζει να βράσει, επιτρέποντάς του να επιτύχει υψηλότερες θερμοκρασίες χωρίς σχηματισμό φυσαλίδων ατμού, παρόμοιες με τους αντιδραστήρες νερού υπό πίεση. Η χαμηλή απορρόφηση νετρονίων του βαριού νερού βελτιώνει σημαντικά την οικονομία νετρονίων του αντιδραστήρα, μειώνοντας την ανάγκη για εμπλουτισμένο καύσιμο.

Παρά το υψηλό κόστος του βαρέος νερού, αυτό εξισορροπείται από τη μειωμένη δαπάνη χρήσης φυσικού ουρανίου ή εναλλακτικών κύκλων καυσίμου. Από τις αρχές του 2001, υπήρχαν 31 επιχειρησιακά PHWR παγκοσμίως, με συνδυασμένη ισχύ 16,5 GWatt, που αντιπροσώπευαν

περίπου το 7,76% όλων των επιχειρησιακών αντιδραστήρων κατά αριθμό και το 4,7% βάσει δυναμικότητας παραγωγής.

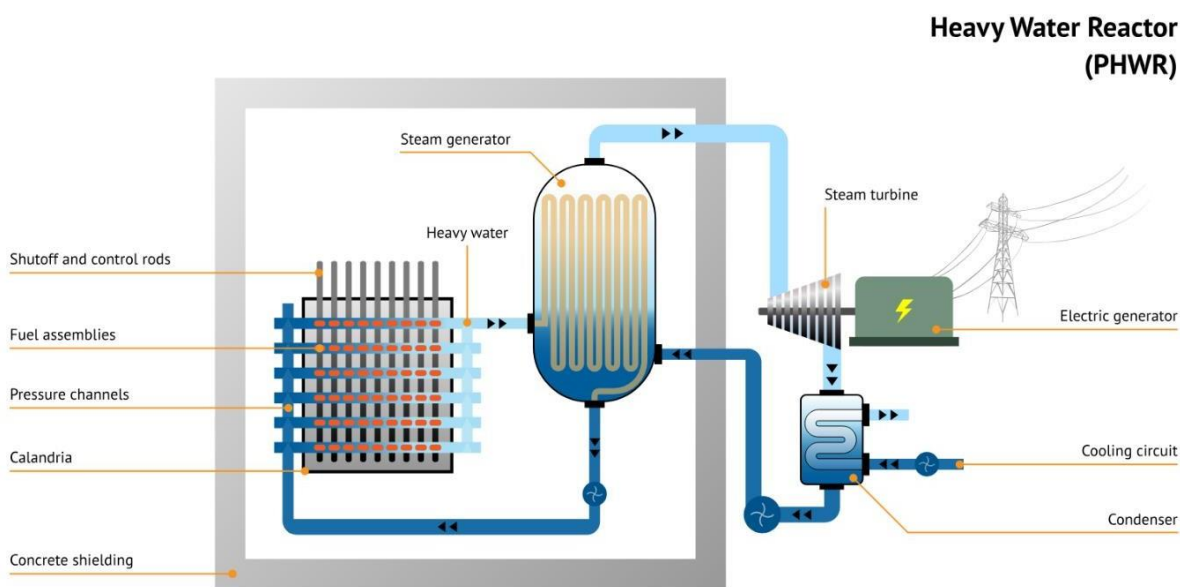
Ο πρωταρχικός σκοπός της χρήσης βαρέος νερού σε πυρηνικούς αντιδραστήρες είναι η διατήρηση μιας πυρηνικής αλυσιδωτής αντίδρασης. Αυτό επιτυγχάνεται διασφαλίζοντας ότι, κατά μέσο όρο, ένα νετρόνιο από κάθε γεγονός σχάσης πυροδοτεί ένα άλλο γεγονός σχάσης. Αυτό απαιτεί ακριβή σχεδιασμό του αντιδραστήρα και έλεγχο των δραστικών ουσιών. Το φυσικό ουράνιο, που αποτελείται κυρίως από ^{238}U και ένα μικρότερο κλάσμα ^{235}U (περίπου 0,72%), είναι το τυπικό καύσιμο. Το ^{238}U απαιτεί νετρόνια υψηλής ενέργειας για σχάση, ενώ το ^{235}U μπορεί να διατηρήσει μια αλυσιδωτή αντίδραση αλλά είναι περιορισμένο στο φυσικό ουράνιο. Η λύση είναι να επιβραδύνει τα εκπεμπόμενα νετρόνια χρησιμοποιώντας έναν συντονιστή νετρονίων, ο οποίος μειώνει την κινητική τους ενέργεια, επιτρέποντάς τους να αλληλοεπιδρούν πιο αποτελεσματικά με τα ^{235}U .

Το συνηθισμένο νερό είναι εξαιρετικός μετριαστής λόγω των ατόμων υδρογόνου του, αλλά απορροφά επίσης νετρόνια, εμποδίζοντας την αλυσιδωτή αντίδραση στο φυσικό ουράνιο. Αυτό απαιτεί εμπλουτισμένο ουράνιο σε αντιδραστήρες ελαφρού νερού. Ωστόσο, το βαρύ νερό, με το επιπλέον νετρόνιο του, απορροφά λιγότερα νετρόνια, καθιστώντας το πιο αποτελεσματικό μετριαστή για το φυσικό ουράνιο.

Τα πλεονεκτήματα των PHWR περιλαμβάνουν τη δυνατότητα χρήσης φυσικού ουρανίου, αποφεύγοντας την ανάγκη δαπανηρού εμπλουτισμού ουρανίου. Ο σχεδιασμός των PHWR, ιδιαίτερα του τύπου CANDU, επιτρέπει τη χρήση διαφόρων καυσίμων, συμπεριλαμβανομένων των αναλωμένων πυρηνικών καυσίμων από άλλους αντιδραστήρες. Ωστόσο, το υψηλό κόστος του

βαρέος νερού και η ανάγκη για πιο συχνή αντικατάσταση καυσίμου είναι αξιοσημείωτα μειονεκτήματα.

Ο κίνδυνος πυρηνικού ατυχήματος που σχετίζεται με τους αντιδραστήρες βαρέων υδάτων έγινε εμφανής όταν η Ινδία χρησιμοποίησε πλουτώνιο που παρήχθη σε ερευνητικό αντιδραστήρα βαρέων υδάτων για την πρώτη της δοκιμή πυρηνικών όπλων. Οι αντιδραστήρες βαρέος νερού μπορούν να παράγουν πλουτώνιο οπλικής ποιότητας εάν το καύσιμο αλλάζει συχνά και υποβάλλεται σε επανεπεξεργασία. Η παραγωγή τριτίου, βασικό συστατικό των προηγμένων πυρηνικών όπλων, επιδεινώνει περαιτέρω αυτόν τον κίνδυνο. Παρά αυτές τις ανησυχίες, οι αντιδραστήρες βαρέος νερού παραμένουν σημαντικό μέρος του παγκόσμιου τοπίου της πυρηνικής ενέργειας.



Εικόνα 17 Αντιδραστήρας τύπου PHWR

[56], [57]

4.5 ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΑΕΡΙΟΥ ΨΥΞΗΣ GCR

Οι αερόψυκτοι αντιδραστήρες αντιπροσωπεύουν μια εξελιγμένη κατηγορία πυρηνικών αντιδραστήρων, που διακρίνονται από τη χρήση αερίων όπως το ήλιο ή το διοξείδιο του άνθρακα ως ψυκτικά αντί για νερό. Αυτοί οι αντιδραστήρες έχουν σχεδιαστεί για να αξιοποιούν τη θερμότητα που παράγεται από την πυρηνική σχάση στον πυρήνα του αντιδραστήρα, ο οποίος περιέχει καύσιμο διοξείδιο του ουρανίου, συνήθως εμπλουτισμένο σε περίπου 2,5-3,5% U-235. Ο πυρήνας περιλαμβάνει επίσης έναν συντονιστή γραφίτη, απαραίτητο για την επιβράδυνση των νετρονίων για την ενίσχυση της διαδικασίας σχάσης.

Όσον αφορά τις συνθήκες λειτουργίας, οι αερόψυκτοι αντιδραστήρες διακρίνονται για τις υψηλές θερμοκρασίες πυρήνα τους. Για παράδειγμα, οι αντιδραστήρες με ψύξη αερίου υψηλής θερμοκρασίας (HTGR) μπορούν να φτάσουν σε θερμοκρασίες μεταξύ 750°C και 950°C, πολύ υψηλότερες από τις περίπου 300°C στους υδρόψυκτους αντιδραστήρες. Το ψυκτικό αέριο, είτε ήλιο είτε διοξείδιο του άνθρακα, κυκλοφορεί σε υψηλές πιέσεις. Στα AGR, το διοξείδιο του άνθρακα χρησιμοποιείται περίπου στα 40 bar και μπορεί να φτάσει σε θερμοκρασίες έως και 650°C, ενώ στα HTGR, το ήλιο χρησιμοποιείται σε πιέσεις γύρω στα 70 bar, επιτυγχάνοντας ακόμη υψηλότερες θερμοκρασίες.

Αυτές οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας επιτρέπουν στους αερόψυκτους αντιδραστήρες να επιτυγχάνουν μεγαλύτερη θερμική απόδοση σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς υδρόψυκτους αντιδραστήρες. Οι HTGR, για παράδειγμα, μπορούν να φτάσουν σε απόδοση 40-50%, ξεπερνώντας την απόδοση 33-35% που είναι τυπική των υδρόψυκτων αντιδραστήρων. Το θερμαινόμενο ψυκτικό αέριο μεταφέρει τη θερμότητά του σε ένα δευτερεύον κύκλωμα νερού σε έναν εναλλάκτη θερμότητας, παράγοντας ατμό σε θερμοκρασίες περίπου 540°C και πιέσεις 160-180 bar, ο οποίος στη συνέχεια οδηγεί τους ατμοστρόβιλους για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο έλεγχος της πυρηνικής αντίδρασης εντός αυτών των αντιδραστήρων γίνεται μέσω ράβδων ελέγχου που αποτελούνται από υλικά που απορροφούν νετρόνια όπως το βόριο ή το κάδμιο. Ο σχεδιασμός αυτών των ράβδων ποικίλλει ανάλογα με τις προδιαγραφές του αντιδραστήρα και παίζουν κρίσιμο ρόλο στη διατήρηση της επιθυμητής ροής νετρονίων, συνήθως στην περιοχή από 10^{13} έως 10^{14} νετρόνια ανά τετραγωνικό εκατοστό ανά δευτερόλεπτο.

Η ασφάλεια στους αερόψυκτους αντιδραστήρες αποτελεί πρωταρχικό μέλημα, η οποία αντιμετωπίζεται μέσω στιβαρών δομών συγκράτησης ικανών να αντέχουν πιέσεις πολλαπλάσιες της κανονικής πίεσης λειτουργίας και προηγμένων συστημάτων απομάκρυνσης θερμότητας αποσύνθεσης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε HTGR, όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστήματα παθητικής ψύξης λόγω της υψηλής θερμικής ικανότητας του ψυκτικού ηλίου.

Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα των αερόψυκτων αντιδραστήρων είναι οι υψηλοί ρυθμοί καύσης καυσίμου, που συχνά ξεπερνούν τα 100.000 MWd/t, γεγονός που μειώνει τη συχνότητα ανεφοδιασμού. Ωστόσο, αυτοί οι αντιδραστήρες αντιμετωπίζουν επίσης προκλήσεις, ιδιαίτερα στον τομέα της επιστήμης των υλικών. Οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας απαιτούν

προηγμένα υλικά για επένδυση καυσίμου και δομικά εξαρτήματα, που συχνά απαιτούν τη χρήση κραμάτων ή κεραμικών με βάση το νικέλιο.

Παραδείγματα αερόψυκτων αντιδραστήρων περιλαμβάνουν τους πρώιμους αντιδραστήρες Magnox του Ηνωμένου Βασιλείου, οι οποίοι χρησιμοποιούσαν φυσικό ουράνιο, ψυκτικό CO₂ και έναν συντονιστή γραφίτη, και τους πιο προηγμένους AGR, που αντιπροσώπευαν μια εξέλιξη του σχεδιασμού Magnox με εμπλουτισμένο ουράνιο και υψηλότερες αποδόσεις. Τα HTGR αντιπροσωπεύουν την κορυφή αυτής της τεχνολογίας, χρησιμοποιώντας ήλιο ως ψυκτικό και κατάλληλο τόσο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όσο και για βιομηχανικές διεργασίες υψηλής θερμοκρασίας.

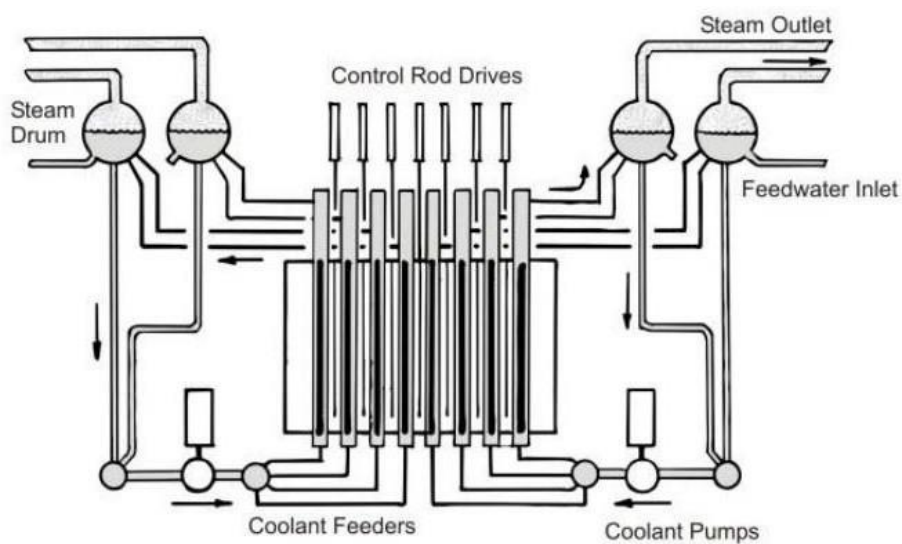
Συνοπτικά, οι αερόψυκτοι αντιδραστήρες, με την προηγμένη μηχανική τους και την υψηλή λειτουργική τους απόδοση, προσφέρουν μια μοναδική προσέγγιση στην παραγωγή πυρηνικής ενέργειας. Ενώ παρουσιάζουν πολύπλοκες προκλήσεις στον σχεδιασμό και την τεχνολογία υλικών, τα πλεονεκτήματά τους στην οικονομία καυσίμου και την ευελιξία στις εφαρμογές τους καθιστούν σημαντική εστίαση στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας.

[58]

4.6 ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΕΛΑΦΡΟΥ ΝΕΡΟΥ ΓΡΑΦΙΤΗ LWGR

Στους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος γραφίτη (LWGRs), γνωστοί και ως αντιδραστήρες RBMK, ο πυρήνας αποτελείται από συντονιστή γραφίτη διατεταγμένο σε κυλινδρική δομή διαμέτρου περίπου 7 μέτρων και ύψους 12 μέτρων. Αυτός ο συντονιστής αποτελείται από περίπου

2.000 μεμονωμένα μπλοκ γραφίτη, το καθένα μήκους περίπου 1 μέτρου και περιέχει κάθετα κανάλια διαμέτρου ~70mm. Συγκροτήματα καυσίμου, που αποτελούνται από ~90 ράβδους καυσίμου που περιέχουν εμπλουτισμένο οξείδιο ουρανίου (συνήθως ~2,3-4,4% U-235), στεγάζονται μέσα σε αυτά τα κανάλια. Σωλήνες πίεσης από κράμα ζirkονίου με διάμετρο ~80mm περιβάλλουν τις ράβδους καυσίμου και μεταφέρουν ελαφρό νερό υπό πίεση (~7MPa) που λειτουργεί ως ψυκτικό. Η αναλογία όγκου συντονιστή προς καύσιμο σε LWGRs είναι υψηλή, φτάνοντας ~1.600, σε σύγκριση με ~40-60 σε συμβατικούς αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος. Ράβδοι ελέγχου, που συνήθως περιέχουν καρβίδιο βορίου, εισάγονται σε καθορισμένα κανάλια μεταξύ των συγκροτημάτων καυσίμου για να χειριστούν τη ροή νετρονίων και να ρυθμίσουν την ισχύ του αντιδραστήρα. Αυτές οι ράβδοι συνήθως αποτελούνται από μια σταυροειδή δομή με συνολικό βάθος εισαγωγής ~7 μέτρων. Αξιοσημείωτο είναι ότι ο σχεδιασμός RBMK ενσωμάτωσε έναν θετικό συντελεστή κενού συντονιστή, που σημαίνει ότι η συντονισμός νετρονίων μειώθηκε με το βρασμό του ψυκτικού, γεγονός που έπαιξε καθοριστικό ρόλο στο ατύχημα του Τσερνόμπιλ. Ενώ προσφέρουν ορισμένα εγγενή χαρακτηριστικά ασφαλείας, η μοναδική δομή του πυρήνα και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των LWGRs οδήγησαν τελικά στη διακοπή τους λόγω ανησυχιών για την ασφάλεια και εγγενών περιορισμών σχεδιασμού



Εικόνα 18 Πυρήνας αντιδραστήρα τύπου LWGR

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται σε LWGRs είναι συνήθως εμπλουτισμένο οξείδιο ουρανίου (UO_2), όπως και στους περισσότερους εμπορικούς αντιδραστήρες. Ωστόσο, η βασική διαφορά έγκειται στο επίπεδο εμπλουτισμού. Σε αντίθεση με τους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (LWRs) που χρησιμοποιούν ουράνιο εμπλουτισμένο σε περίπου 3-5% U-235, οι LWGRs μπορούν να λειτουργούν με χαμηλότερα επίπεδα εμπλουτισμού, συνήθως περίπου 2,3-4,4% U-235. Αυτό είναι εφικτό λόγω των ιδιοτήτων συντονισμού του γραφίτη, ο οποίος επιβραδύνει τα νετρόνια και τα κάνει πιο πιθανό να προκαλέσουν σχάση στο U-235.

Το UO_2 καύσιμο κατασκευάζεται σε κυλινδρικά pellets, τα οποία στη συνέχεια φορτώνονται σε μακριούς, λεπτούς μεταλλικούς σωλήνες που ονομάζονται ράβδοι καυσίμου. Αυτές οι ράβδοι καυσίμου ομαδοποιούνται για να σχηματίσουν συγκροτήματα καυσίμου, τα οποία εισάγονται στους σωλήνες πίεσης μέσα στον πυρήνα του αντιδραστήρα.

Ο αριθμός των συγκροτημάτων καυσίμου σε έναν LWGR μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τον συγκεκριμένο σχεδιασμό του αντιδραστήρα. Για παράδειγμα, οι αντιδραστήρες RBMK που

χρησιμοποιούνταν στη πρώην Σοβιετική Ένωση είχαν περίπου 1661 συγκροτήματα καυσίμου διατεταγμένα σε πυρήνα με εξαγωνικό πλέγμα.

Καθώς ο αντιδραστήρας λειτουργεί, τα άτομα του U-235 στο καύσιμο καταναλώνονται σταδιακά. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται καύση καυσίμου. Η τυπική καύση καυσίμου σε LWGRs είναι περίπου 8-10%, πράγμα που σημαίνει ότι περίπου 8-10% των ατόμων U-235 στο καύσιμο έχουν σχαστεί τη στιγμή που το καύσιμο πρέπει να αντικατασταθεί.

Η χρήση καυσίμου με χαμηλότερο εμπλουτισμό σε LWGRs έχει ορισμένα πλεονεκτήματα ασφαλείας. Για παράδειγμα, είναι πιο δύσκολο να συμβεί ατύχημα κρισιμότητας εκτός του πυρήνα του αντιδραστήρα με καύσιμο χαμηλότερου εμπλουτισμού. Ωστόσο, υπάρχουν και ορισμένες προκλήσεις ασφαλείας που σχετίζονται με το καύσιμο LWGR. Για παράδειγμα, η χρήση γραφίτη ως συντονιστή μπορεί να οδηγήσει σε θετικό συντελεστή κενού, πράγμα που σημαίνει ότι η ισχύς του αντιδραστήρα μπορεί να αυξηθεί εάν συμβεί βρασμός του ψυκτικού. Αυτό ήταν ένας από τους παράγοντες που συνέβαλαν στο ατύχημα του Τσερνόμπιλ.

Συνολικά, το καύσιμο που χρησιμοποιείται σε LWGRs είναι παρόμοιο με εκείνο που χρησιμοποιείται σε άλλους εμπορικούς αντιδραστήρες, αλλά με ορισμένες βασικές διαφορές στο επίπεδο εμπλουτισμού και στους συλλογισμούς ασφαλείας.

[59],

[60]

4.7 ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΤΑΧΕΩΝ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ FNR ΚΑΙ LMFBR

Οι αντιδραστήρες ταχείας νετρονίων (FNRs) αντιπροσωπεύουν μια κατηγορία πυρηνικών αντιδραστήρων που διατηρούν μια αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης με γρήγορα νετρόνια (ενέργειες άνω του 1 MeV), σε αντίθεση με τα αργά θερμικά νετρόνια που χρησιμοποιούνται στους αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων. Αυτοί οι αντιδραστήρες δεν απαιτούν συντονιστή νετρονίων, αλλά βασίζονται σε καύσιμο πλούσιο σε σχάσιμο υλικό. Έχουν κατασκευαστεί περίπου 20 επίγειοι γρήγοροι αντιδραστήρες παγκοσμίως, συμπεριλαμβανομένου του αξιοσημείωτου ταχύψυκτου αντιδραστήρα Superphénix Sodium στη Γαλλία. Αυτοί αντιδραστήρες προσφέρουν πλεονεκτήματα σε σχέση με τους υδρόψυκτους και τους αερόψυκτους αντιδραστήρες, όπως η ευκολότερη επίτευξη κρισιμότητας λόγω της αυξημένης παραγωγής νετρονίων κατά τη σχάση.

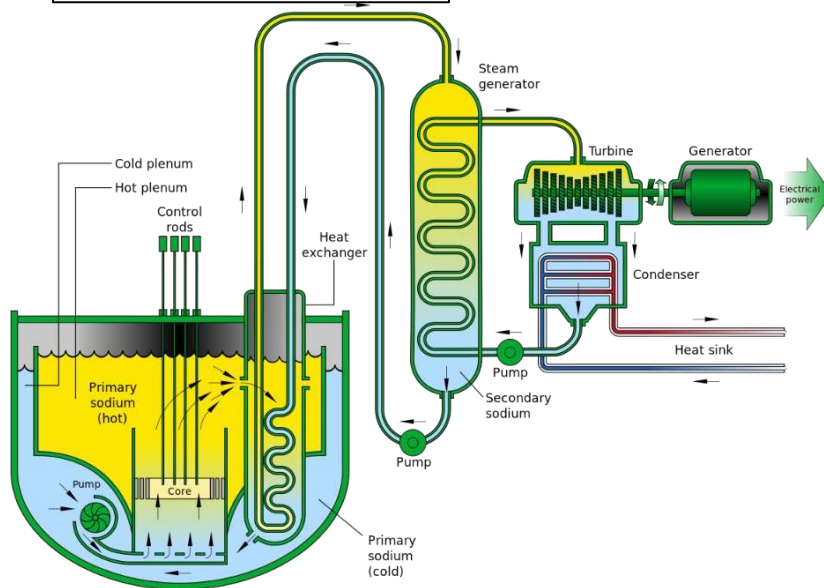
Η χρήση υγρών μετάλλων ως ψυκτικών, όπως το νάτριο και ο μόλυβδος, επιτρέπει τη λειτουργία σε χαμηλή πίεση, ενισχύοντας την ασφάλεια. Επιπλέον, αυτοί οι αντιδραστήρες επιτυγχάνουν υψηλότερη θερμοδυναμική απόδοση και μειώνουν την παραγωγή βαρύτερων ατόμων στα πυρηνικά απόβλητα, οδηγώντας σε χαμηλότερες απαιτήσεις διαχείρισης αποβλήτων.

Οι γρήγοροι αντιδραστήρες, ιδιαίτερα αυτοί που ψύχονται με νάτριο, έχουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών - ύδατος. Τα γεγονότα σχάσης σε αυτούς τους αντιδραστήρες παράγουν περισσότερα νετρόνια από ό,τι στους θερμικούς αντιδραστήρες. Η χρήση υγρών μετάλλων, όπως το νάτριο ή ο μόλυβδος, ως ψυκτικά επιτρέπει την αποτελεσματική απορρόφηση της θερμότητας, αποτρέποντας την αύξηση της πίεσης ακόμη και σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας. Με το νάτριο να έχει σημείο βρασμού 883 °C και τον μόλυβδο στους 1.749 °C και τους αντιδραστήρες να λειτουργούν γύρω στους 500-550 °C, υπάρχει μεγάλο περιθώριο

συντήρησης σε υγρή κατάσταση. Η ατμοσφαιρική πίεση εντός του αντιδραστήρα, σε συνδυασμό με τις δυνατότητες παθητικής ψύξης, διασφαλίζει την ασφάλεια και εξαλείφει τον κίνδυνο ατυχημάτων παρόμοια με το περιστατικό Fukushima Daiichi. Επιπλέον, η υψηλότερη θερμοκρασία του υγρού μετάλλου ή του άλατος ενισχύει την απόδοση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, φτάνοντας πιθανώς περίπου το 40% θερμική απόδοση, ενώ παρέχει επίσης την ευκαιρία να μειωθούν τα ρεύματα πυρηνικών αποβλήτων και να αυξηθεί σημαντικά η χρήση καυσίμου.

Οι αντιδραστήρες, που χρησιμοποιούν κυρίως νάτριο, μόλυβδο ή ψυκτικό υγρό μολύβδου-βισμούθιου, παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα. Ο έλεγχος της αντιδραστικότητας βασίζεται σε βραχυπρόθεσμους μηχανισμούς όπως η θερμική διαστολή και η διεύρυνση Doppler. Ο ανεφοδιασμός γίνεται δύσκολος λόγω της απουσίας οπτικών εργαλείων και απαιτούνται ακριβά και βαθμονομημένα ρομποτικά εργαλεία. Η έναρξη του αντιδραστήρα απαιτεί ηλεκτρική θέρμανση πριν από την πυρηνική λειτουργία με αποτέλεσμα το κόστος κατασκευής και λειτουργίας των ταχέων αντιδραστήρων να είναι ιδιαίτερα υψηλό. Το ψυκτικό νάτριο, ενώ είναι αποτελεσματικό, μπορεί να καεί. Ενώ ορισμένοι αντιδραστήρες που ψύχονται με νάτριο έχουν λειτουργήσει με ασφάλεια, για λόγους ασφαλείας απαιτείται σχεδιασμός συστήματος δύο βρόχων.

Εικόνα 19 Αντιδραστήρα τύπου LMFBR



Ειδική κατηγορία των παραπάνω είναι οι αντιδραστήρες υγρών μετάλλων Fast Breeder. Ανήκουν στην κατηγορία των FNR και χρησιμοποιούν ως ψυκτικό υγρά μέταλλα όπως το νάτριο. [61], [62]

4.8 ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΛΙΩΜΕΝΟΥ ΑΛΑΤΟΣ MSR

Οι αντιδραστήρες λιωμένου άλατος (MSR) είναι ένας τύπος αντιδραστήρα πυρηνικής σχάσης που χρησιμοποιεί τηγμένο άλας είτε ως πρωτεύον ψυκτικό ή καύσιμο, είτε και τα δύο. Τα MSR μετριάζουν τους κινδύνους πυρηνικής κατάρρευσης, λειτουργώντας κοντά στην ατμοσφαιρική πίεση. Μπορούν να ανεφοδιαστούν εύκολα, βελτιώνοντας την απόδοση σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς αντιδραστήρες. Οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουν αφορούν τη διαβρωτικότητα του θερμού αλατιού και τις χημικές αλλαγές λόγω της ροής νετρονίων.

Τα MSR επιτυγχάνουν αφαίρεση θερμότητας παθητικής αποσύνθεσης, αποτρέποντας τη ζημιά κατά την απώλεια ψυκτικού. Η λειτουργία σε χαμηλή πίεση εξαλείφει την ανάγκη για ένα ακριβό δοχείο συγκράτησης από χάλυβα, μειώνοντας το κόστος. Οι MSR υποστηρίζουν φθηνότερους κλειστούς κύκλους καυσίμου με αργά νετρόνια, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σύγκριση με τους αντιδραστήρες ελαφρού νερού. Η φάση υγρού καυσίμου επιτρέπει την πυροεπεξεργασία, εξαλείφοντας την παραδοσιακή κατασκευή ράβδων καυσίμου και αντικαθιστώντας την με σύνθεση αλατιού. Ορισμένα σχέδια μπορούν να χρησιμοποιούν γρήγορα νετρόνια, καίγοντας υπερουρανικά στοιχεία από αντιδραστήρες ελαφρού νερού. Οι MSR μπορούν να αντιδράσουν σε αλλαγές φορτίου σε λιγότερο από 60 δευτερόλεπτα, σε αντίθεση με τους αντιδραστήρες που επηρεάζονται από τη δηλητηρίαση με ξένο. Η λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες ενισχύει τη θερμική απόδοση, μειώνοντας το μέγεθος, το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τα MSR μπορούν να προσφέρουν υψηλή ειδική ισχύ, που αποδεικνύεται από το πείραμα του αντιδραστήρα αεροσκαφών. Υπάρχει δυνατότητα εκμετάλλευσης ενός κύκλου καυσίμου θορίου φτωχού σε νετρόνια.

Οι σχεδιασμοί κυκλοφορούντος καυσίμου-αλατιού ενδέχεται να απαιτούν πλήρως απομακρυσμένη συντήρηση λόγω των ραδιονουκλεϊδίων που είναι διαλυμένα στον εξοπλισμό που έρχεται σε επαφή με το καύσιμο. Ορισμένα MSR απαιτούν επιτόπια χημική επεξεργασία για τη διαχείριση του πυρήνα του μείγματος και την αφαίρεση του προϊόντος σχάσης. Ορισμένα σχέδια MSR βασίζονται σε ακριβά κράματα νικελίου επιρρεπή σε ευθραυστότητα υπό υψηλή ροή νετρονίων. [63]

5.0 ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ

5.1 ΗΛΕΚΤΡΕΓΕΤΡΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ

Εστω ένα απλό ηλεκτρικό κύκλωμα, που αποτελείται από μια μπαταρία και έναν λαμπτήρα. Γνωρίζουμε ότι στην πράξη το ρεύμα κάθε χρονική στιγμή το ρεύμα στο κύκλωμα είναι σταθερό σε όλα τα σημεία του. Δεδομένου ότι η μόνη κινητήρια δύναμη βρίσκεται μέσα στην μπαταρία και δεδομένου ότι η ταχύτητα κίνησης των ηλεκτρονίων στον χαλκό είναι πάρα πολύ μικρή, πως είναι δυνατόν να υπάρχει το ίδιο ρεύμα σε όλο το κύκλωμα; Στην πραγματικότητα οι δυνάμεις που έχουν να κάνουν με την κίνηση του ρεύματος στο κύκλωμα είναι η δύναμη της πηγής f_s και η ηλεκτεγετρική δύναμη που εξομαλύνει τη ροή και επικοινωνεί την επίδραση της πηγής στα απομακρυσμένα σημεία του κυκλώματος.

$$f = \vec{f}_s + \vec{E} \quad (5.1.1)$$

Το αποτέλεσμα που φέρει αυτή η δύναμη κατά μήκος του κυκλώματος είναι η ηλεκτριγετρική δύναμη

$$\mathcal{E} = \oint (\vec{f}_s + \vec{E}) \cdot d\vec{t} \quad (5.1.2)$$

Όμως

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{t} = 0 \quad (5.1.3)$$

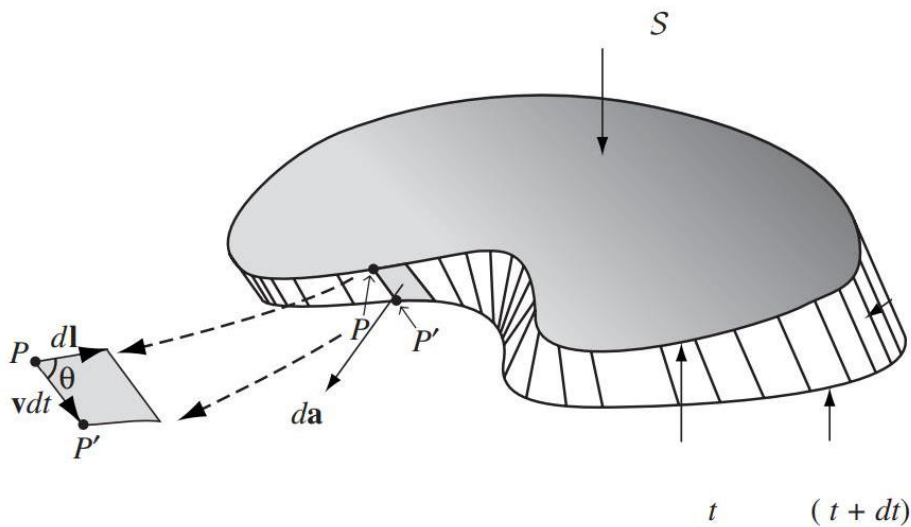
Αρα,

$$\mathcal{E} = \oint \vec{f}_s \cdot d\vec{t} \quad (5.1.4)$$

Η ΗΕΔ είναι το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της f_s , δηλαδή το έργο που δαπανάται από την πηγή ανά μονάδα φορτίου.

Εστω ένα συρμάτινος βρόχος σε κάποια χρονική στιγμή t . Για τον υπολογισμό της μαγνητικής ροής μετά από χρόνο dt χρησιμοποιούμε την σχέση

$$d\Phi = \Phi(t + dt) - \Phi(t) = \int_S \vec{B} \cdot d\mathbf{a} \quad (5.1.5)$$



Εικόνα 20 Μαγνητική Ροή

Θεωρώντας ότι ο βρόχος κάνει ευθύγραμμη ομαλή κίνηση

$$d\mathbf{a} = (\mathbf{v} \times d\mathbf{l}) dt \quad (5.5.6)$$

Επομένως

$$\frac{d\Phi}{dt} = \oint \vec{B} \cdot (\vec{v} \times d\mathbf{l}) \quad (5.5.7)$$

dt

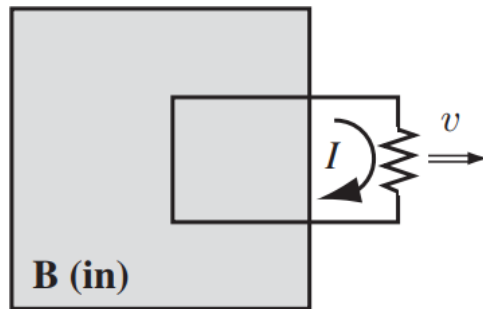
Δεδομένου $\vec{w} = (v + \vec{u})$ και ότι η \vec{u} είναι παράλληλη στο $d\vec{r}$, η σχέση αυτή μπορεί να γραφτεί ως

$$\frac{d\Phi}{dt} = \oint \vec{B} \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) dt = - \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = - \oint \vec{f} \cdot d\vec{l} = \mathcal{E} \quad (5.5.8)$$

5.2 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΗ

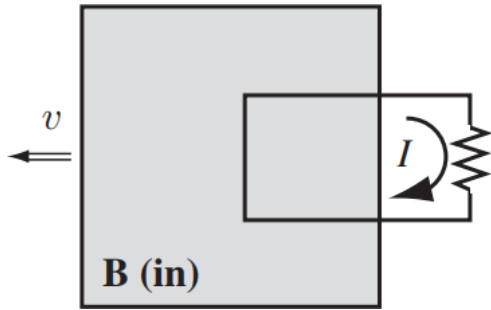
Το 1831 ο Michael Faraday παρουσίασε μια σειρά από τρία πειράματα:

1. Παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου, τράβηξε έναν συρμάτινο βρόχο προς τα δεξιά.
Στον βρόχο δημιουργήθηκε ρεύμα.



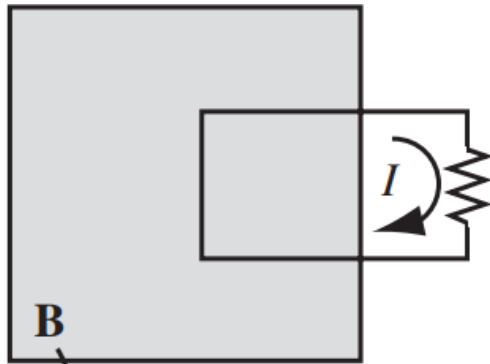
Εικόνα 21 Πρώτο πείραμα Faraday

2. Κρατώντας τον βρόχο ακίνητο, μετακίνησε τον μαγνήτη προς τα αριστερά. Πάλι δημιουργήθηκε ρεύμα.



Εικόνα 22 Δεύτερο πείραμα Faraday

-
3. Κρατώντας τον βρόχο και τον μαγνήτη ακίνητους, μετέβαλλε την ένταση του



Εικόνα 23 Τρίτο πείραμα Faraday

μαγνητικού πεδίου. Πάλι δημιουργήθηκε ρεύμα.

Ο Faraday κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η σχετική κίνηση είναι που δημιουργεί την ΗΕΔ. Δηλαδή ένα μεταβαλλόμενο μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί επαγωγικά ένα ηλεκτρικό πεδίο.

$$\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{t} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (5.5.9)$$

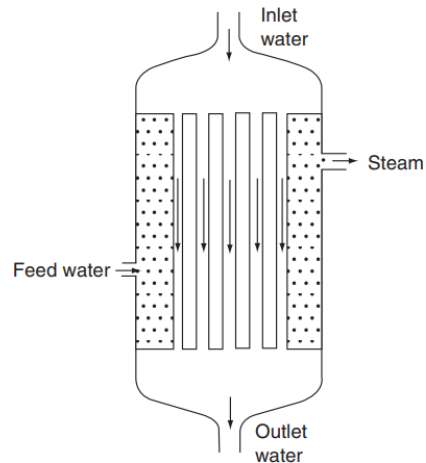
[64]

5.3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΙΚΗ

Η θερμική ενέργεια του αντιδραστήρα μετατρέπεται σε ατμό μέσω εναλλάκτη θερμότητας

ή γεννήτριας ατμού. Ο εναλλάκτης ή η γεννήτρια ατμού αποτελείται από έναν χώρο μερικώς

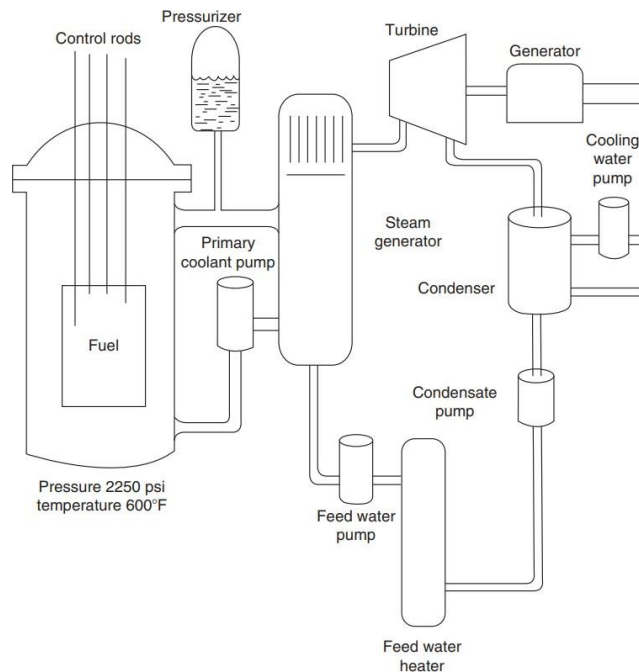
γεμάτο με νερό, μέσα από το οποίο περνούν πολλοί σωλήνες που περιέχουν θερμαινόμενο νερό



Εικόνα 24 Ροή νερού μέσα στον πυρηνικό αντιδραστήρα

από τον αντιδραστήρα.

Ο ατμός από τη γεννήτρια ρέει σε μια τουρμπίνα, ενώ το υπόλοιπο νερό επιστρέφει στον αντιδραστήρα. Στην συνέχεια γίνεται μετατροπή της θερμικής ενέργειας του ατμού σε μηχανική ενέργεια του για την περιστροφή ενός στροβίλου.



Εικόνα 25 Βασική Δομή Πυρηνικού Εργοστασίου Παραγωγής Ηλεκτρισμού

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει την απελευθέρωση σημαντικής θερμότητας και η θερμική απόδοση της διαδικασίας περιορίζεται από τις θερμοκρασίες λειτουργίας. Σύμφωνα με τον θεμελιώδη νόμο της θερμοδυναμικής, η απόδοση ενός κύκλου δίνεται από την εξίσωση

$$e = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad (5.3.1)$$

όπου T_c και T_h είναι οι χαμηλότερες και υψηλότερες απόλυτες θερμοκρασίες.

Οι πυρηνικοί σταθμοί πρέπει να διαχέουν την απορριπτόμενη θερμότητα. Για μια μονάδα 1000 MWe, η θερμική ισχύς είναι περίπου 3030 MWt, απαιτώντας την απόρριψη 2030 MWt αποβλήτων ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται ο ρυθμός ροής μάζας ψυκτικού που απαιτείται για τον περιορισμό της θερμοκρασίας. Η απορριπτόμενη θερμότητα μπορεί να είναι

πολύτιμος πόρος με διάφορες πιθανές χρήσεις όπως την δωρεάν θέρμανση του νερού των γύρω περιοχών.

[65]

5.4 ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟ

Για την μετατροπή της πυρηνικής ενέργειας σε ηλεκτρισμό βασικό ρόλο παίζει η ελεγχόμενη σχάση του πυρηνικού καυσίμου. Η σχάση προκαλεί απελευθέρωση θερμικής ενέργειας. Η προκύπτουσα θερμότητα απορροφάτε από το ψυκτικό που συνήθως είναι νερό. Στη συνέχεια, το θερμαινόμενο ψυκτικό υφίσταται μια φάση μετασχηματισμού εντός της γεννήτριας ατμού και δημιουργείται ατμός υψηλής πίεσης. Ο ατμός, ωθεί έναν στρόβιλο – τουρμπίνα. Ο στρόβιλος βρίσκεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, με αποτέλεσμα να επάγεται ΗΕΔ.

Μετά τη λειτουργία του στρόβιλου, ο ατμός διέρχεται στον συμπυκνωτή, όπου συμβαίνει μετάβαση φάσης και γίνεται πάλι νερό. Ο ατμός, που τώρα στερείται της κινητικής του ενέργειας, υφίσταται συμπύκνωση σε υγρό νερό, απελευθερώνοντας ταυτόχρονα θερμότητα. Ο συμπυκνωτής συνδέεται με ένα βοηθητικό σύστημα ψύξης, χρησιμοποιώντας συχνά νερό από μια εξωτερική πηγή. Αυτό το ψυκτικό μέσο διασχίζει τον συμπυκνωτή, απορροφώντας την υπολειπόμενη θερμότητα από τον συμπυκνωμένο ατμό. Αυτή η συρροή διαδικασιών διασφαλίζει την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα του συνολικού συστήματος. Το συμπυκνωμένο νερό, που ονομάζεται συμπύκνωμα, ολοκληρώνει το κυκλικό ταξίδι και επιστρέφει στη γεννήτρια

ατμού, έτοιμη για την επόμενη επανάληψη του συνεχούς μετατροπής ενέργειας. Ταυτόχρονα, το νερό ψύξης, φορτωμένο με θερμική ενέργεια που αποκτάται κατά τη διέλευση του μέσω του συμπυκνωτή, εκκενώνεται στο εξωτερικό περιβάλλον. Περιβαλλοντικά ρυθμιστικά πλαίσια διέπουν αυτήν την απόρριψη, ορίζοντας αυστηρούς περιορισμούς θερμοκρασίας για τον μετριασμό των πιθανών οικολογικών επιπτώσεων. [65]

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Pyle, Andrew. "Atomism and its critics: Problem areas associated with the development of the atomic theory of matter from Democritus to Newton." (1995).
- [2] Whitaker, Robert D. "An historical note on the conservation of mass." *Journal of Chemical Education* 52.10 (1975): 658.
- [3] Dutton, Frederic B. "Dalton's law of partial pressures." *Journal of Chemical Education* 38.8 (1961): A545.
- [4] Held, Lubomir. "Avogadro's Hypothesis after 200 Years." *Universal Journal of Educational Research* 5.10 (2017): 1718-1722.
- [5] Pathria, Raj Kumar. *Statistical mechanics*. Elsevier, 2016.
- [6] Newburgh, Ronald, Joseph Peidle, and Wolfgang Rueckner. "Einstein, Perrin, and the reality of atoms: 1905 revisited." *American journal of physics* 74.6 (2006): 478-481.
- [7] Walsh, Frank C. "The overall rates of electrode reactions: Faraday's laws of electrolysis." *Transactions of the IMF* 69.4 (1991): 155-157.
- [8] Thomson, Joseph John. "Discovery of the electron." *Philosophical Magazine* 44 (1897): 93.
- [9] Halyo, Valerie, et al. "Search for free fractional electric charge elementary particles using an automated millikan oil drop technique." *Physical Review Letters* 84.12 (2000): 2576.
- [10] Trenn, Thaddeus J., et al. "The Geiger-Marsden Scattering Results and Rutherford's Atom, July 1912 to July 1913: the shifting significance of scientific evidence." *Isis* 65.1 (1974): 74-82.
- [11] Radvanyi, Pierre, and Jacques Villain. "The discovery of radioactivity." *Comptes Rendus Physique* 18.9-10 (2017): 544-550.
- [12] Foot, Christopher J. *Atomic physics*. Vol. 7. OUP Oxford, 2004.
- [13] Klein, Martin J. "Max Planck and the beginnings of the quantum theory." *Archive for History of Exact Sciences* 1 (1961): 459-479.
- [14] Serway, Raymond A., and John W. Jewett. *Physics for scientists and engineers*. Cengage learning, 2018.

-
- [15] De Broglie, Louis. "Waves and quanta." *Nature* 112.2815 (1923): 540-540.
- [16] Schrödinger, Erwin. "An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules." *Physical review* 28.6 (1926): 1049.
- [17] Born, Max. "Statistical interpretation of quantum mechanics." *Science* 122.3172 (1955): 675-679.
- [18] Kvasnica, J. "Werner Karl Heisenberg (1901-1976)." *Vesmír* 71.1 (1992): 45-47.
- [19] Messiah, Albert. *Quantum mechanics*. Courier Corporation, 2014.
- [20] Becquerel, Antoine H. "On radioactivity, a new property of matter." *Les prix Nobel* (1903).
- [21] Murray, Raymond, and Keith E. Holbert. *Nuclear energy: An introduction to the concepts, systems, and applications of nuclear processes*. Elsevier, 2014.
- [22] Pierce, T. B., P. F. Peck, and D. R. A. Cuff. "Analytical applications of a 0.5-MeV Cockroft-Walton set based on the measurement of prompt γ -radiation. Γ -Radiation emitted during proton reactions." *Analyst* 92.1092 (1967): 143-150.
- [23] Chadwick, James. "Possible existence of a neutron." *Nature* 129.3252 (1932): 312-312.
- [24] Pinault, Michel. *Frédéric Joliot-Curie*. Odile Jacob, 2000.
- [25] Meitner, Lise, Otto Hahn, and Fritz Straßmann. "Über die Umwandlungsreihen des Urans, die durch Neutronenbestrahlung erzeugt werden." *Zeitschrift für Physik* 106.3-4 (1937): 249-270.
- [26] Dyson, Freeman. "A meeting with Enrico Fermi." *Nature* 427.6972 (2004): 297-297.
- [27] Shull, H., and G. G. Hall. "Atomic units." *Nature* 184.4698 (1959): 1559-1560.
- [27] Pfützner, M., et al. "Radioactive decays at limits of nuclear stability." *Reviews of modern physics* 84.2 (2012): 567.
- [28] Sorlin, O., and M-G. Porquet. "Nuclear magic numbers: New features far from stability." *Progress in Particle and Nuclear Physics* 61.2 (2008): 602-673.
- [29] Rainwater, James. "Background for the spheroidal nuclear model proposal." *Reviews of Modern Physics* 48.3 (1976): 385.
- [30] Kaplan, Ilya G. *The Pauli exclusion principle: origin, verifications, and applications*. John Wiley & Sons, 2017.

-
- [31] Green, Alex ES, D. L. Sellin, and A. S. Zachor. "Analytic independent-particle model for atoms." *Physical Review* 184.1 (1969): 1.
- [32] Becquerel, Antoine H. "On radioactivity, a new property of matter." *Les prix Nobel* (1903).
- [33] Curie, Marie. "Radium and the new concepts in chemistry." *Nobel lecture* (1911).
- [34] Rutherford, Ernest. "Properties of polonium." *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. Routledge, 2014. 180-181.
- [35] Mang, H. J. "Alpha decay." *Annual Review of Nuclear Science* 14.1 (1964): 1-26.
- [36] Brown, B. Alex. "Simple relation for alpha decay half-lives." *Physical Review C* 46.2 (1992): 811.
- [36] Konopinski, Emil Jan. "Beta-decay." *Reviews of Modern Physics* 15.4 (1943): 209.
- [37] Matumoto, Zyun-itiro, and Masami Yamada. "Formulas in the Fermi Theory of Beta-Decay, I: Beta-Spectrum." *Progress of Theoretical Physics* 19.3 (1958): 285-329.
- [38] Mohapatra, R. N., et al. "Theory of neutrinos: a white paper." *Reports on Progress in Physics* 70.11 (2007): 1757.
- [39] Blatt, John Markus, and Victor Frederick Weisskopf. *Theoretical nuclear physics*. Courier Corporation, 1991.
- [40] Bethe, Hans Albrecht. "Nuclear physics B. Nuclear dynamics, theoretical." *Reviews of Modern Physics* 9.2 (1937): 69.
- [41] Harkins, William Draper. "The nuclei of atoms and the new periodic system." *Physical Review* 15.2 (1920): 73.
- [42] Eddington, Arthur Stanley. *The internal constitution of the stars*. Cambridge University Press, 1988.
- [43] Born, Max, Friedrich Hund, and Pascual Jordan. *Vorlesungen über Atommechanik*. Vol. 1. Berlin: Springer, 1925.
- [44] Khriplovich, Iosif B. "The eventful life of Fritz Houtermans." *Physics Today* 45.7 (1992): 29-37.
- [45] Kirby, Maurice W., and Jonathan Rosenhead. "Patrick Blackett." *Profiles in Operations Research: Pioneers and Innovators*. Boston, MA: Springer US, 2011. 1-29.
- [46] Rotblat, Joseph. "Mark Oliphant (1901–2000)." *Nature* 407.6803 (2000): 468-468.
- [47] Bethe, Hans Albrecht. "Energy production in stars." *Physical Review* 55.5 (1939): 434.

-
- [48] Gosling, Francis George. *The Manhattan Project: making the atomic bomb*. Diane Publishing, 1999.
- [49] Van Dorn, William G. *IVY-MIKE: the first HYDROGEN BOMB (This book is covered under the Xlibris Bookstore Returnability Program)*. Xlibris Corporation, 2008.
- [50] Lyerly, Ray L., and Walter Mitchell. *Nuclear power plants*. US Atomic Energy Commission, Division of Technical Information, 1967.
- [51] Fernández-Arias, Pablo, Diego Vergara, and José A. Orosa. "A global review of PWR nuclear power plants." *Applied Sciences* 10.13 (2020): 4434.
- [52] Tong, Long Sun, and Joel Weisman. "Thermal analysis of pressurized water reactors." (1979).
- [53] Theriault, Kevin. "Boiling water reactors." *Nuclear Engineering Handbook*. CRC Press, 2016. 85-140.
- [54] Shabestary, Amirhosein Moonesi, et al. "Modelling of passive heat removal systems: a review with reference to the Framatome KERENA BWR reactor: Part I." *Energies* 13.1 (2020): 35.
- [55] Fernández-Arias, Pablo, Diego Vergara, and José A. Orosa. "A global review of PWR nuclear power plants." *Applied Sciences* 10.13 (2020): 4434.
- [56] Bajaj, S. S., and A. R. Gore. "The indian PHWR." *Nuclear Engineering and Design* 236.7-8 (2006): 701-722.
- [57] Gupta, S. K., et al. *A study of the Indian PHWR reactor channel under prolonged deteriorated flow conditions*. No. IAEA-TECDOC--984. 1997.
- [58] Khttab, K. "Nuclear power reactors in the world." *Atom and Development* 33.2 (2021): 43-55.
- [59] Kruglov, A. K., and A. P. Rudik. "Reactor production of radioactive nuclides." (1985).
- [60] Losey, David C., et al. *Core physics analysis in support of the FNR HEU-LEU demonstration experiment*. No. ANL/RERTR/TM--3. 1983.
- [61] Islam, Md Razibul, and Hossam A. Gabbar. "Study of small modular reactors in modern microgrids." *International Transactions on Electrical Energy Systems* 25.9 (2015): 1943-1951.
- [62] Serp, Jérôme, et al. "The molten salt reactor (MSR) in generation IV: overview and perspectives." *Progress in Nuclear Energy* 77 (2014): 308-319.
- [63] Bodansky, David. *Nuclear energy: principles, practices, and prospects*. Springer Science & Business Media, 2007.

[64] Griffiths, David J. "Introduction to Electrodynamics Fourth Edition." (2021).

[65] Serway, Moses. *Modern physics*. James Madison University, 2005.

[66] Murray, Raymond, and Keith E. Holbert. *Nuclear energy: An introduction to the concepts, systems, and applications of nuclear processes*. Elsevier, 2014.

