

**ΟΠΥΡΗΝ ΤΟΥ ΑΤΟΜΟΥ
ΚΑΙ Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ**

ΥΠΟ

ΙΩΑΝΝΟΥ ΓΡΑΤΣΙΑΤΟΥ

1. Εισαγωγή. Τὸ πρόβλημα τοῦ ἀτομικοῦ πυρῆνος εἶνε τὸ κατ' ἔξοχὴν φλέγον ζήτημα τῆς συγχρόνου Φυσικῆς. Εἰς τὸ κεφάλαιον αὐτὸ ἐγένοντο αἱ σπουδαιότεραι ἀνακαλύψεις τῶν τελευταίων ἐτῶν, καὶ ἀπὸ αὐτὸ ἀναμένεται ἡ προσεχὴς ἐξέλιξις τῆς φυσικῆς ἐρεῦνης. Καὶ τοῦτο διότι, ἐνῶ διὰ τοῦ συστήματος τῶν ἐννοιῶν τῆς νέας Μηχανικῆς τῶν *Quanta* ἐπετεύχθη ἡ πλήρης θεωρητικὴ κατανόησις καὶ περιγραφὴ τῶν φαινομένων, τῶν σχετικῶν μὲ τὸ ἐξ ἠλεκτρονίων περίβλημα, τὸ ὁποῖον μετὰ τοῦ πυρῆνος ἀποτελεῖ τὸ ἄτομον τῆς ὕλης, δὲν ἐπετεύχθη αὕτη καὶ διὰ τὰ φαινόμενα τοῦ πυρῆνος. Ἡ Μηχανικὴ τῶν *Quanta* κατέστησε δυνατὴν τὴν ποιοτικὴν ταξινομήσιν τῶν φαινομένων τοῦ πυρῆνος, οὐχὶ ὁμως, ἔκτος ὠρισμένων ἐξαιρετικῶν περιπτώσεων, καὶ τὴν ποσοτικὴν περιγραφὴν αὐτῶν καὶ ἐπομένως τὰ φαινόμενα ταῦτα εἶνε ἀκόμη, κατὰ μέγα μέρος, ἀνεξήγητα.

2. Ὁ πυρῆν καὶ τὸ περιοδικὸν σύστημα τῶν στοιχείων. Τὴν ὕπαρξιν τοῦ πυρῆνος καὶ τὴν ἐν γένει κατασκευὴν τοῦ ἀτόμου μᾶς ἀπεκάλυψαν τὸ πρῶτον παρατηρήσεις, σχετικαὶ μὲ τὴν δίοδον ἀκτίνων, ἀποτελουμένων ἐξ ὕλικῶν σωματιδίων, διὰ τῆς ὕλης. Ἐκ τῆς μελέτης τῆς ραδιενεργείας ἦτο γνωστόν, ὅτι αἱ ἀκτίνες α, αἱ ἐκπεμπόμεναι ὑπὸ τῶν ραδιενεργῶν σωμάτων, ἀποτελοῦνται ἐκ ταχέως (μὲ ταχύτητα 1,5 ἕως 2.10⁹ cm/sec) κινουμένων σωματιδίων, ἐχόντων τὴν μᾶζαν τοῦ ἀτόμου τοῦ στοιχείου ἡλίου καὶ φερόντων δύο στοιχειώδη ἠλεκτρικὰ φορτία θετικά¹.

Οἱ Geiger καὶ Marsden² μελετήσαντες πειραματικῶς τὸ φαινόμενον τῆς διόδου τῶν ἀκτίνων α, διὰ τῆς ὕλης, ἐξηκρίβωσαν ὅτι τὰ σωματίδια α ὑφίστανται διασκεδασμὸν, δηλ. ἐκτρέπονται τῶν ἀρχικῶν τῶν τροχιῶν, δι' ἑκαστὸν δὲ μέρος αὐτῶν αἱ γωνίαι ἐκτροπῆς εἶνε μεγάλαι. Ἡ διερεύνησις τῶν πειραμάτων τούτων ὑπὸ τοῦ Rutherford³ ἤγαγεν εἰς τὸ

¹ Τὸ στοιχειῶδες ἠλεκτρ. φορτίον, ἴσον κατ' ἀπόλυτον τιμὴν πρὸς τὸ φορτίον τοῦ ἠλεκτρονίου (διότι τὸ τελευταῖον τοῦτο εἶνε ὀρνητικόν), εἶνε 4,77.10⁻¹⁰ ἠλεκτροστατικαὶ μονάδες φορτίου.

² Geiger καὶ Marsden, Proceedings of the Royal Society, London (A) 82 (1909), p. 495.

³ E. Rutherford, Philosophical Magazine 21 (1911), p. 669.

συμπέρασμα, ὅτι μόνον ἰσχυρὰ ἠλεκτρικὰ πεδία εἶνε δυνατόν νὰ προκαλῶσι τόσον μεγάλης ἐκτροπᾶς τῶν σωματιδίων α , ἢ ὑπαρξίς δὲ τοιούτων πεδίων δὲν ἐξηγεῖται εἰμὴ διὰ τῆς παραδοχῆς, ὅτι ἐντὸς τῶν ἀτόμων τῆς ὕλης ὑπάρχουν ἠλεκτρικὰ φορτία συγκεντρωμένα ἐντὸς περιοχῶν πολὺ μικρῶν σχετικῶς πρὸς τὰς διαστάσεις τῶν ἀτόμων. Ἐπὶ πλέον ὁ διασκεδασμὸς τῶν ἀκτίνων α ὑπὸ τῶν ἀτόμων τῆς ὕλης ἀντιστοιχεῖ πρὸς ἐκεῖνον, τὸν ὁποῖον ὑφίστανται ἠλεκτρικῶς φορτισμένα σωματίδια ὑπὸ ἠλεκτροστατικῆς πεδίου προκαλουμένου ὑπὸ σημειωδῶν ἠλεκτρικῶν φορτίων κατὰ τὸν νόμον τοῦ Coulomb.

Τὰ ἀνωτέρω συμπεράσματα ὠδήγησαν εἰς τὸ ἀτομικὸν πρότυπον τοῦ Rutherford, συμφώνως πρὸς τὸ ὁποῖον τὸ ἄτομον ἀποτελεῖται ἀπὸ πυρῆνα πολὺ μικρῶν διαστάσεων (περὶ τὰ 10^{-13} cm), φέροντα θετικὸν ἠλεκτρικὸν φορτίον, ἐν τῷ ὁποίῳ εἶνε συγκεντρωμένη ὅλη σχεδὸν ἡ μᾶζα τοῦ ἀτόμου· ὁ πυρῆν περιβάλλεται ἀπὸ ἀριθμὸν ἠλεκτρονίων, τοιοῦτον ὥστε τὸ ὅλκιον ἠλεκτρικὸν φορτίον αὐτῶν νὰ εἶνε ἀπολύτως ἴσον πρὸς τὸ φορτίον τοῦ πυρῆνος καὶ ἐπομένως νὰ ἐξουδετερωῆ αὐτό. Τὰ ἠλεκτρόνια εὐρίσκονται ἐντὸς περιοχῆς, ἀκτίνος περίπου 10^{-8} cm.

Τὸ κυριώτερον μέγεθος, τὸ χαρακτηρίζον τὸν πυρῆνα εἶνε τὸ ἠλεκτρικὸν φορτίον αὐτοῦ, τὸ ὁποῖον κατὰ τὰ ἀνωτέρω εἶνε ἀκέραιον πολλαπλάσιον τοῦ φορτίου τοῦ ἠλεκτρονίου e . Ἐὰν τὸ φορτίον πυρῆνος τινος εἶνε Ze , ὁ ἀκέραιος ἀριθμὸς Z , ἴσος μὲ τὸν ἀριθμὸν τῶν ἠλεκτρονίων, ἅτινα μετὰ τοῦ πυρῆνος ἀποτελοῦσι τὸ ἀντίστοιχον ἄτομον, μᾶς δίδει τὴν τάξιν τοῦ ἀτόμου τούτου ἐν τῷ περιοδικῷ συστήματι τῶν στοιχείων. Τοῦτο διατυπωθὲν κατ' ἀρχὰς ὡς ὑπόθεσις ὑπὸ τοῦ Bohr, ἐπηληθεύθη ὑπὸ τῶν ἐρευνῶν τοῦ Moseley, τῶν σχετικῶν μὲ τὰ φάσματα τῶν ἀκτίνων Röntgen τῶν στοιχείων καὶ ἔλαβεν ἄμεσον πειραματικὴν ἐπιβεβαίωσιν ὑπὸ τοῦ Chadwick¹, ὅστις ἐκ μετρήσεων τοῦ διασκεδασμοῦ τῶν ἀκτίνων α ὑπὸ πολλῶν στοιχείων, προσδιώρισε μὲ μεγάλην ἀκρίβειαν τὸ φορτίον τοῦ πυρῆνος αὐτῶν. Οὕτω τὸ ὕδρογόνον (H), μὲ $Z=1$, κατέχει ἐν τῷ περιοδικῷ συστήματι τῶν στοιχείων τὴν πρώτην θέσιν, τὸ ἥλιον (He) μὲ $Z=2$ τὴν δευτέραν, τὸ λίθιον (Li), $Z=3$, τὴν τρίτην κ. ο. κ.

Κατὰ ταῦτα τὸ φορτίον τοῦ πυρῆνος ἀτόμου τινος προσδιορίζει τὸν χημικὸν χαρακτῆρα καὶ συνεπῶς τὰς κυριωτέρας ἰδιότητας αὐτοῦ.

3. Ἡ μᾶζα τοῦ πυρῆνος καὶ ἡ ἰσοτοπία. Ἐκτὸς τῆς τάξεως ἐν τῷ περιοδικῷ συστήματι, ἢ τοῦ φορτίου τοῦ πυρῆνος, ὑπάρχει δι' ἕκαστον χημικὸν στοιχεῖον καὶ ἕτερον χαρακτηριστικὸν μέγεθος, τὸ ἀτομικὸν του βάρους. Ἐὰν τὸ ἀτομ. βάρους τοῦ ὀξυγόνου (O) τεθῆ ἴσον πρὸς 16, τότε τὸ

¹ J. Chadwick, Phil. Mag. 40 (1920) p. 734.

άτομ. βάρος τοῦ ὑδρογόνου εἶναι 1,00778, τὸ τοῦ ἡλίου 4,00216 κ. τ. λ. Τὸ ἀτομικὸν ὅμως βάρος δὲν εἶναι χαρακτηριστικὸν τῶν καθ' ἕκαστα πυρῆνων. Αἱ σχετικαὶ ἔρευναι ἀπέδειξαν πράγματι, ὅτι τὰ ἄτομα τῶν πλείστων στοιχείων, ὡς ταῦτα εὐρίσκονται ἐν τῇ φύσει, δὲν ἔχουν ὅλα πυρῆνας τῆς αὐτῆς μάζης, ἀλλ' ὅτι, ἐκτὸς ἐξαιρέσεων τινων, ἕκαστον στοιχεῖον ἀποτελεῖται ἀπὸ περισσότερα συστατικὰ ἔχοντα τὸ αὐτὸ φορτίον πυρῆνος ἐπομένως καὶ τὰς αὐτὰς χημικὰς ιδιότητες ἀλλὰ διάφορον μᾶζαν (ἀτομ. βάρος). Τὰ συστατικὰ ταῦτα ὡς καταλαμβάνοντα τὴν αὐτὴν θέσιν ἐν τῷ περιοδικῷ συστήματι τῶν στοιχείων ἐκλήθησαν ἰσότοπα.

Τὰ ἰσότοπα ἕκαστου στοιχείου, παρίστανται συνήθως ὑπὸ τοῦ χημικοῦ συμβόλου τοῦ στοιχείου, φέροντος δύο δείκτας, ἐκ τῶν ὁποίων ὁ κατώτερος παριστάνει τὴν τάξιν τοῦ στοιχείου εἰς τὸ περιοδικὸν σύστημα ὁ δὲ ἄνωτερος τὸ εἰς ἀκέραιον ἀριθμὸν στρογγυλευμένον ἀτομικὸν βάρος τοῦ ἰσοτόπου. Οὕτω τὴν πρώτην θέσιν τοῦ περιοδικοῦ συστήματος καταλαμβάνουν τὰ τρία ἰσότοπα τοῦ ὑδρογόνου ${}^1\text{H}_1$, ${}^2\text{H}_1$, ${}^3\text{H}_1$ μὲ ἀτομικὰ βάρη ἀντιστοίχως 1,00778, 2,01363, 3,0151, τὴν δευτέραν τὰ δύο ἰσότοπα τοῦ ἡλίου ${}^3\text{He}_2$ (3,0164) καὶ ${}^4\text{He}_2$ (4,00216), τὴν τρίτην τὰ δύο ἰσότοπα τοῦ λιθίου ${}^6\text{Li}_3$ (6,0145) καὶ ${}^7\text{Li}_3$ (7,0146). κ. ο. κ.

Ἐκαστον χημικὸν στοιχεῖον εἶναι κατὰ ταῦτα μίγμα ἰσοτόπων, τὸ γεγονὸς δὲ ὅτι ἔχει ὄρισμένον ἀτομικὸν βάρος, ὀφείλεται εἰς τὸ ὅτι τὰ διάφορα ἰσότοπα ὑπάρχουν ἐν αὐτῷ καθ' ὄρισμένας ἀναλογίας, ὡς ἔχοντα δὲ τὰς αὐτὰς χημικὰς ιδιότητες δὲν δύναται νὰ χωρισθοῦν διὰ χημικῶν με-

¹ Μέχρι πρὸ ὀλίγων ἐτῶν τὸ Η ἐθεωρεῖτο ὡς ἀποτελούμενον ἐξ ἐνὸς μόνου ἰσοτόπου. Ἡ πρώτη ὑπόνοια περὶ τῆς ὑπάρξεως καὶ ἄλλων ἰσοτόπων ἐγεννήθη, ὅταν μετὰ τὴν ἀνακάλυψιν δύο ἰσοτόπων τοῦ ὀξυγόνου O_8^{17} , O_8^{18} (G i a n q u e καὶ J o h n s t o n 1929) εὐρέθη ὅτι τὸ ἀτομικὸν του βάρος προσδιοριζόμενον διὰ τοῦ φασματογράφου μάζης τοῦ Aston, ὁλοτε ἀναφέρεται εἰς τὸ O_8^{16} ὅταν ὑπολογισθῇ σχετικῶς μὲ τὸ μίγμα τῶν τριῶν ἰσοτόπων τοῦ Ο, προκρίπτει διάφορον τοῦ χημικῶς προσδιοριζομένου, τὸ ὁποῖον ἀναφέρεται εἰς τὸ αὐτὸ μίγμα. Τὸ H^2 ἀνεκαλύφθη ὑπὸ τῶν U r e y, B r i c k w e d d e καὶ M u r p h y (Physical Review, 39 (1932), p. 164· 40 (1932), p. 464) διὰ φασματοσκοπικῆς μεθόδου· ἡ ὑπαρξίς του ἐπεβεβαιώθη ὑπὸ τοῦ B a i n b r i d g e (Phys. Rev. 41 (1932), p. 115· 42 (1932), p. 1), τῇ βοήθειᾳ τοῦ ἰδίου του φασματογράφου μάζης. Ὁ Bainbridge προσδιώρισε διὰ τῆς αὐτῆς μεθόδου τὸ ἀτομ. του βάρος. Τὸ «βαρὺ ὑδρογόνον» H_1^2 εὐρίσκειται ἀναμεμιγμένον μετὰ τοῦ H_1^1 κατ' ἀναλογίαν 1 : 5000. Τῷ 1932 ἐπετεύχθη ὑπὸ τῶν W a s h b u r n καὶ U r e y ὁ χωρισμὸς τῶν δύο ἰσοτόπων δι' ἠλεκτροχημικῆς μεθόδου καὶ ἀπὸ τοῦ 1934 ἡ διὰ τελειοποιήσεως τῆς αὐτῆς μεθόδου βιομηχανικὴ παρασκευὴ μεγάλων ποσοτήτων σχεδὸν καθαρῷ βαρέος ὕδατος ($(\text{H}_1^2)_2\text{O}$).

Περὶ τῆς ἀνακάλυψεως τοῦ H_1^3 ἴδε κατωτέρω.

θόδων. Οὕτω τὸ χημικῶς προσδιοριζόμενον ἄτομ. βάρος στοιχείου εἶναι εἰς μέσος ὄρος τῶν βαρῶν τῶν ἰσοτόπων του.

Ἡ πρώτη ἀνακάλυψις ἰσοτόπων ἐγένετο ἐν ἔτει 1913 ὑπὸ τοῦ J. J. Thomson, ὅστις ἀπέδειξε πειραματικῶς ὅτι τὸ εὐγενὲς ἀέριον νέον (Ne_{40}) χημικοῦ ἀτομικοῦ βάρους 20,2 ἀποτελεῖται ἀπὸ δύο διάφορα εἶδη ἀτόμων μὲ ἀτομικὰ βάρη 20 καὶ 22 (ἀργότερον ἀνεκαλύφθη καὶ τρίτον ἰσότοπον ἀτομ. βάρους 21). Ὁ Thomson μετεχειρίσθη πρὸς τοῦτο τὴν μέθοδον ἀναλύσεως τῶν διαυλικῶν ἀκτίνων. Δι' ἐπιδράσεως ἠλεκτρικῶν καὶ μαγνητικῶν πεδίων ἐπὶ τῶν θετικῶς ἠλεκτρισμένων (ιονισμένων) ἀτόμων τῶν ἀποτελούντων τὰς ἀκτῖνας ταύτας καὶ μετρήσεως τῆς ἐξ αὐτῆς προερχομένης ἀποκλίσεως αὐτῶν ἐκ τῶν τροχιῶν των, καθίσταται δυνατὸς ὁ προσδιορισμὸς τοῦ λόγου τοῦ ἠλεκτρικοῦ φορτίου πρὸς τὴν μᾶζαν τῶν ἀτόμων τούτων. Γνωστοῦ δὲ ὄντος τοῦ ἠλεκτρικοῦ φορτίου, τὸ ὁποῖον εἶνε πάντοτε ἀκέραιον πολλαπλάσιον τοῦ στοιχειώδους φορτίου e , εὐρίσκεται ἡ μᾶζα.

Ἐπὶ τῆς αὐτῆς ἀρχῆς στηρίζεται ὁ « φασματογράφος μάζης » τοῦ Aston¹, ὅστις ἀπὸ τοῦ 1919 ἀνέπτυξε τὴν ἔρευναν τῶν ἰσοτόπων εἰς ἰδιαιτέρον κλάδον τῆς Πειραματικῆς Φυσικῆς, τὴν φασματοσκοπίαν μάζης. Τῇ βοηθείᾳ τοῦ φασματογράφου μάζης τοῦ Aston καὶ τῶν τροποποιήσεων του (Bainbridge, Smythe κ. ἄ.) κατορθοῦται ὁ προσδιορισμὸς τῶν ἀτομ. βαρῶν μὲ ἀκρίβειαν πολὺ μεγαλυτέραν τῆς διὰ χημικῶν μεθόδων ἐπιτυγχανομένης, ὡς καὶ ὁ προσδιορισμὸς τῶν ἀναλογικῶν κατὰ τὰς ὁποίας εὐρίσκονται τὰ ἰσότοπα ἐντὸς τῶν διαφόρων στοιχείων. Σήμερον εἶνε γνωστὰ περὶ τὰ 250 εὐσταθῆ ἰσότοπα καὶ ἡ ἀνακάλυψις τῶν πλείστων ἐξ αὐτῶν ὀφείλεται εἰς τὸν Aston.

Αἱ ἀνωτέρω ἔρευναι ἀπέδειξαν ὅτι αἱ μᾶζαι τῶν πυρήνων τῶν ἰσοτόπων εἶνε μὲ μεγάλην προσέγγισιν ἀκέραια πολλαπλάσια τῆς μάζης τοῦ πυρήνος τοῦ ὕδρογόνου (τοῦ πρωτονίου). Κυρίως πρόκειται ἐνταῦθα περὶ τῆς μάζης τοῦ πυρήνος σὺν τῇ μάζῃ τῶν ἠλεκτρονίων ἐκάστου ἰσοτόπου, ἐπειδὴ ὅμως ἡ μᾶζα τοῦ ἠλεκτρονίου εἶνε περίπου $\frac{1}{1847}$ τῆς μάζης τοῦ πρωτονίου, τὸ ἀποτέλεσμα δὲν μεταβάλλεται οὐσιωδῶς.

4. Σύνθεσις τῶν πυρήνων. Τὸ γεγονός ὅτι αἱ μᾶζαι ὄλων τῶν πυρήνων εἶνε περίπου ἀκέραια πολλαπλάσια τῆς μάζης τοῦ πρωτονίου, ἤγαγεν εἰς τὴν παραδοχὴν ὅτι οἱ πυρήνες εἶναι συντεθειμένοι ἐκ πρωτονίων καὶ ἠλεκτρονίων. Ὁ πυρὴν π. χ. τοῦ ἡλίου, τοῦ ὁποίου τὰ ἀτομ. βάρους εἶνε περίπου 4 πρέπει κατὰ ταῦτα νὰ περιέχῃ 4 πρωτόνια. Τὰ 4

¹ F. W. Aston, Mass Spectra and isotopes, London 1933.

πρωτόνια έχουν θετ. ηλεκτρ. φορτίον $4e$, επειδή λοιπόν ο πυρήν του ήλιου έχει φορτίον $2e$ πρέπει να περιέχη και δύο ηλεκτρόνια με φορτίον $2e$ αρνητικών.

Ώρισμένοι κανονικότητες, τας οποίας παρουσιάζει τὸ σύστημα τῶν ισοτόπων, ἄγουν ἐπίσης εἰς τὴν παραδοχὴν, ὅτι οἱ πυρῆνες τῶν ισοτόπων περιέχουν, ἐκτὸς τῶν ἀνωτέρω καὶ ἄλλα, ἐνδιάμεσα, συστατικά καὶ δὴ πυρῆνας ἡλίου (σωματίδια α). Ἡ παραδοχὴ αὕτη ἐπιβεβαιούται ὑπὸ τοῦ γεγονότος τῆς ἐκπομπῆς σωματιδίων α ὑπὸ τῶν ῥαδιενεργῶν πυρήνων καὶ τῆς μεγάλης εὐσταθείας τοῦ πυρῆνος τοῦ ἡλίου, περὶ τῆς οποίας ἀναφέρομεν κατωτέρω.

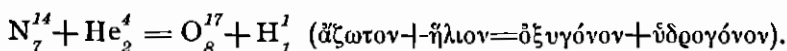
Ἡ ἀντίληψις, ὅτι ὅλοι οἱ πυρῆνες ἀποτελοῦνται ἐκ πρωτονίων καὶ ηλεκτρονίων ἐπεκράτει γενικῶς μέχρι τοῦ ἔτους 1932. Ἄλλ' ἢ κατὰ ἔτη 1932 καὶ 1933 ἀνακάλυψις δύο νέων στοιχειωδῶν σωματιδίων, τοῦ οὐδέτερου καὶ οὐδετερονίου (neutron) καὶ θετικοῦ ηλεκτρονίου (positron), ἦγαγεν εἰς τροποποίησιν αὐτῆς. Εἰς τὴν ἀνακάλυψιν τῶν νέων τούτων ὑλικῶν σωματιδίων συνετέλεσαν αἱ ἔρευναι αἱ σχετικαὶ μὲ τὸν θρυμματισμὸν τῶν ἀτόμων.

5. Θρυμματισμὸς τῶν ἀτόμων. Ὡς ἀνεφέρομεν, ὁ πυρῆν φέρει ηλεκτρικὸν φορτίον τόσον μεγαλύτερον, ὅσον ἡ τάξις τοῦ ἀντιστοίχου στοιχείου ἐν τῷ περιοδικῷ συστήματι καὶ τὸ ἀτομικὸν του βάρους εἶνε μεγαλύτερα. Ἐὰν λοιπὸν βομβαρδίσωμεν πυρῆνας ἑλαφροῦ στοιχείου δι' ἀκτίνων α ἀρκετὰ μεγάλης ταχύτητος (ἢ κινητικῆς ἐνεργείας), τὰ σωματίδια α ὑπερνικῶσι τὰς ἀπωστικὰς δυνάμεις τῶν πυρήνων, αἵτινες εἶνε σχετικῶς μικραὶ λόγῳ τοῦ μικροῦ φορτίου καὶ τινα ¹ ἐξ αὐτῶν προσκρούοντα ἐπὶ τῶν πυρήνων ἀποσπῶσι συστατικὰ αὐτῶν μετασχηματίζοντα οὕτω τοὺς πυρῆνας. Τὸν μετασχηματισμὸν ἢ θρυμματισμὸν τοῦτον ἐπέτυχε κατὰ πρῶτον ὁ Rutherford ² τῷ 1910 διὰ τὸν πυρῆνα τοῦ ἀζώτου (N_7^1) μεταχειρισθεὶς ἀκτῖνας α τοῦ ῥαδίου C'. Ἡ μελέτη τοῦ φαινομένου ἀπέδειξεν ὅτι ἡ κρούσις ἔχει ὡς ἀποτέλεσμα τὴν ἀπόσπαιον ἀπὸ τοῦ πυρῆνος ἐνὸς

¹ Λέγομεν τινα, διότι διὰ νὰ προσκρούσῃ ἐν σωματίδιον α ἐπὶ πυρῆνος πρέπει ἡ τροχιά του νὰ διέρχεται δι' αὐτοῦ. Δεδομένου ὅτι αἱ διαστάσεις τοῦ πυρῆνος εἶναι τὸ $1 : 10^4$ τῶν διαστάσεων τοῦ ἀτόμου καὶ ἐπομένως ὁ ὄγκος τῶν $1 : 10^{10}$ τοῦ ὄγκου τοῦ ἀτόμου, καὶ ὅτι ἀπ' ἐτέρου ἐν σωματίδιον α διατρέχον διάστημα 1 cm. διέρχεται διὰ 10^7 ἀτόμων τὸ πολὺ, ἐπεταὶ ὅτι ἡ πιθανότης νὰ συναντήσῃ ἕνα πυρῆνα εἶναι τὸ πολὺ $10^7 : 10^{12}$ δηλ. $1 : 10^5$. Δηλ. ἐπὶ 100000 προσπιπόντων σωματ. α ἐν τῷ πολὺ ἐπιφέρει πράγματι θρυμματισμὸν. Συνεπῶς καὶ αἱ ποσότητες τῶν παραγομένων οὐσιῶν κατὰ τὰ πειράματα θρυμματισμοῦ εἶνε ἐλάχιστα.

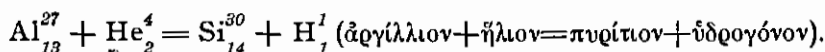
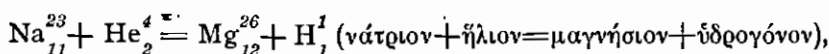
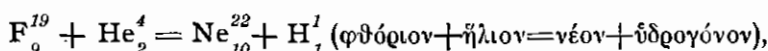
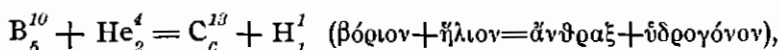
² E. Rutherford, Phil. Mag. 37 (1919) p. 581. E. Rutherford καὶ J. Chadwick, Phil. Mag. 42 (1921), p. 809.

πρωτονίου, τὸ ὁποῖον ἐκσφενδονίζεται μὲ μεγάλην ταχύτητα, ἐνῶ τὸ προσπίπτον σωματίδιον παραμένει ἐντὸς τοῦ πυρήνος. Ἐπέρχεται ἐπομένως μεταβολὴ τῆς μάζης καὶ τοῦ ἠλεκτρικοῦ φορτίου τοῦ πυρήνος, δηλ. μεταστοιχείωσις αὐτοῦ, τὴν ὁποῖαν δυνάμεθα νὰ παραστήσωμεν διὰ τῆς χημικῆς ἐξισώσεως.



Ἡ μεταστοιχείωσις αὕτη ὑπῆρξεν ἡ πρώτη πειραματικὴ ἐπιβεβαίωσις τῆς ὑποθέσεως ὅτι οἱ πυρήνες εἶνε σύνθετοι ἐξ ἀπλουστέρων συστατικῶν.

Τὰ πειράματα ἐσυνεχίσθησαν, τόσον ὑπὸ τοῦ R u t h e r f o r d καὶ τῶν μαθητῶν του ἐν Cambridge ὅσον καὶ ὑπὸ τῶν Kirsch καὶ Pettersson ἐν Βιέννῃ, ἐπιτευχθέντος τοῦ θρυμματισμοῦ πολλῶν ἄλλων ἐλαφρῶν στοιχείων, ὅπως π. χ.



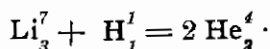
Εἰς ὅλας αὐτὰς τὰς περιπτώσεις ὁ θρυμματισμὸς γίνεται κατὰ τὸν αὐτὸν τρόπον ὡς καὶ εἰς τὸ ἄζωτον, δηλ. δι’ ἀποσπάσεως ἀπὸ τοῦ πυρήνος ἑνὸς πρωτονίου, ἐνῶ τὸ σωματ. α παραμένει ἐντὸς αὐτοῦ. Τοιοῦτου εἴδους θρυμματισμοὶ θεωροῦνται σήμερον βέβαιοι ἐκτὸς τῶν ἀνωτέρω καὶ ὁ τοῦ μαγνησίου (Mg_{12}) καὶ τοῦ φωσφόρου (P_{15}).

Μέχρι τοῦ 1932 τὸ μόνον μέσον πρὸς θρυμματισμὸν τοῦ πυρήνος ἦτο ὁ βομβαρδισμὸς αὐτοῦ δι’ ἀκτίνων α. Κατὰ τὸ ἔτος τοῦτο ἐπετεύχθη καὶ ἡ «τεχνητὴ» μεταστοιχείωσις, δηλ. ὁ θρυμματισμὸς τοῦ πυρήνος διὰ μέσων, ἅτινα δὲν εὐρίσκονται ἔτοιμα ἐν τῇ φύσει, ὅπως αἱ ἀκτίνες α τῶν ῥαδιενεργῶν οὐσιῶν, ἀλλὰ παράγονται τεχνητῶς ἐν τῷ ἐργαστηρίῳ. Δύο μαθηταὶ τοῦ Rutherford, οἱ Cockroft καὶ Walton ¹ ἐπέτυχον τῷ 1932 τὸν θρυμματισμὸν τοῦ λιθίου, βομβαρδίσαντες αὐτὸ διὰ πρωτονίων (ἀκτίνων H).

Ἡ ὑπαρξὶς ἀκτίνων ἀποτελουμένων ἐκ πρωτονίων εἶχε διαπιστωθῆ

¹ T. D. Cockroft καὶ E. T. S. Walton, Proc. Roy. Soc. (A), 136 (1932), p. 619-137 (1932), p. 229-144 (1934), p. 704.

πειραματικῶς ἀπὸ τοῦ 1914 ὑπὸ τῶν Marsden καὶ Rutherford οἵτινες παρήγαγον ταύτας διαβιβάσαντες ἀκτίνες α δι' ὕδρογόνου. Οἱ Cockcroft καὶ Walton παρήγαγον τὰς ἀκτίνες Η ὡς διαυλικὰς ἀκτίνες ἐντὸς εἰδικοῦ σωλήνος ἠλεκτρικῆς ἐκκενώσεως καὶ κατόπιν ἐπετάχυναν αὐτὰς δι' ἰσχυροῦ ἠλεκτρικοῦ πεδίου, οὕτω δὲ ἐπέτυχον τὸν θρυμματισμὸν τοῦ λιθίου κατὰ τὴν ἀντίδρασιν.



Διὰ τῆς αὐτῆς μεθόδου, τροποποιηθείσης καὶ τελειοποιηθείσης ὑπὸ τῶν Rutherford καὶ Oliphant¹ καὶ τῶν Lawrence καὶ Livingston² ἐπετεύχθη ὁ θρυμματισμὸς διαφόρων ἄλλων ἐλαφρῶν πυρρήνων, ὅπως τοῦ βηρυλλίου, τοῦ βορίου, τοῦ φθορίου, τοῦ νατρίου, τοῦ μαγνησίου καὶ τοῦ ἀργιλίου³.

6. Τὸ οὐδετερόνιον. Οἱ Bothe καὶ Becker⁴ μελετῶντες ἐν ἔτει 1930 τὴν ἐπίδρασιν τῶν ἀκτίνων α ἐπὶ ἐλαφρῶν στοιχείων, παρετήρησαν, ὅτι τὸ βηρύλλιον (Be_4), βομβαρδιζόμενον ὑπὸ ἀκτίνων α, ἐκπέμπει ἀσθενῆ, ἀλλὰ λίαν διαπεραστικὴν ἀκτινοβολίαν. Τὸ αὐτὸ φαινόμενον, ἐν μικροτέρῳ βαθμῷ, παρετηρήθη καὶ εἰς τὸ λίθιον, φθόριον, νάτριον, μαγνήσιον καὶ ἀργίλιον.

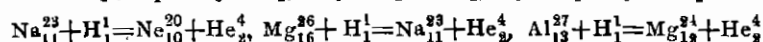
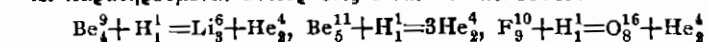
Ἀργότερον, οἱ Curie καὶ Joliot⁵ διεπίστωσαν, ὅτι ἡ ἀκτινοβολία αὕτη, ἥτις κατ' ἀρχὰς ἐθεωρήθη φύσεως καθαρῶς ἠλεκτρομαγνητικῆς (ἀκτίνες γ), διερχομένη δι' οὐσιῶν περιεχουσῶν ὕδρογόνον, π.χ. διὰ παραφίνης, ἀποσπᾷ ἀπ' αὐτῶν πρωτόνια, τὰ ὁποῖα ἐκσφενδονίζει μὲ μεγάλην ταχύτητα.

Ὁ Chadwick⁶ συνεχίζων τὰ πειράματα τῶν Curie-Joliot, ἔδειξεν ὅτι ἡ ἐν λόγῳ ἀκτινοβολία ἐξασκεῖ ὁμοίαν ἐπίδρασιν ἐπὶ τῶν πυρρήνων ὅλων τῶν ἀτόμων, ἀλλ' ὅτι ἡ ἐπίδρασις αὕτη ἐξασθενεῖ ταχέως, αὐ-

¹ Lord Rutherford καὶ M. L. Oliphant, Proc. Roy. Soc. (A) 141 (1933), p. 259.

² E. O. Lawrence καὶ M. S. Livingston, Phys. Rev. 40 (1932) p. 19, 45 (1934), p. 220, 608.

³ Αἱ παρατηρούμεναι ἀντιδράσεις εἶναι αἱ ἀκόλουθοι :



⁴ H. Becker καὶ W. Bothe, Zeitschr. f. Phys. 66 (1930), p. 289 (1932) p. 421.

⁵ I. Curie καὶ F. Joliot, Comptes - Rendus de l' Académie des Sciences 194 (1932), p. 273, 708, 876.

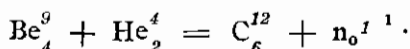
⁶ J. Chadwick, Nature 33 (1933), p. 312 Proc. Roy. Soc. (A) 136 (1932), p. 693.

ξανομένης τῆς μάζης τοῦ πυρῆνος, οὕτως ὥστε τὸ φαινόμενον παρουσιάζεται σαφῶς μόνον διὰ τὰ ἑλαφρὰ στοιχεῖα, καὶ ἰδίως τὸ ὑδρογόνον. Αἱ μετρήσεις τῆς ἐνεργείας τῶν ἐκσφενδονιζομένων πυρῆνων ἤγαγον τὸν Chadwick εἰς τὸ συμπέρασμα ὅτι ἡ ἀκτινοβολία αὕτη ἀποτελεῖται, ἐν μέρει τοῦλάχιστον, ἐξ ὑλικῶν σωματιδίων, ἡ δὲ μεγάλη διαπεραστικότης τῆς εἰς τὸ ὅτι τὰ σωματίδια ταῦτα δὲν φέρουν ἠλεκτρικὸν φορτίον διὰ τοῦτο ἐκλήθησαν οὐδτερόνια. Μὴ φέροντα ἠλεκτρικὸν φορτίον δὲν ἀπωθοῦνται ὑπὸ τοῦ ἐξ ἠλεκτρονίων περιβλήματος τῶν ἀτόμων, διὰ τοῦτο πλησιάζουν εὐκόλως τοὺς πυρῆνας καὶ προσκρούοντα ἐπ' αὐτῶν, τοὺς θρυμματίζουν.

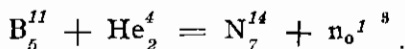
Ὁ Chadwick εὗρεν ὅτι ἡ μάζα τοῦ οὐδτερονίου εἶνε μὲ μεγάλην προσέγγισιν ἴση μὲ τὴν μάζαν τοῦ ἀτόμου τοῦ ὑδρογόνου. Ὅσον ἀφορᾷ τὴν ἀκριβῆ τιμὴν αὐτῆς, ὑφίσταντο μέχρι τοῦ 1935 διαφωναίαι, τῶν ἄγγλων φυσικῶν δεχομένων διὰ τὸ ἀτομ. βάρους τοῦ οὐδτερονίου τὴν τιμὴν 1,0067, τῶν δὲ γάλλων τὴν τιμὴν 1,0098. Σήμερον, δυνάμεθα νὰ δεχθῶμεν ὡς ἀκριβῆ τὴν τιμὴν 1,0085 μὲ λάθος $\pm 0,0005$.

Τὸ οὐδτερόνιον παρίσταται διὰ τοῦ συμβόλου n_0^1 , θεωρούμενον ὡς στοιχεῖον τάξεως 0, ἐφ' ὅσον τὸ ἠλεκτρικὸν του φορτίον εἶνε 0.

Ἡ παραγωγή οὐδτερονίων ἐκ τοῦ βηρυλλίου γίνεται κατὰ τὴν ἀντίδρασιν



Ἄλλοι θρυμματισμοί, κατὰ τοὺς ὁποίους παράγονται οὐδτερόνια εἶνε π. χ.



7. Τὸ θετικὸν ἠλεκτρόνιον. Κατὰ τὸ ἔτος 1932 ἀνεκαλύφθη ἐπίσης τὸ θετικὸν ἠλεκτρόνιον ὑπὸ τοῦ ἀμερικανοῦ φυσικοῦ Anderson, ὅστις ἐμελέτα τὴν καλουμένην κοσμικὴν ἀκτινοβολίαν⁴. Ἡ κοσμικὴ ἀκτι-

¹ Οἱ Curie - Joliot ἔδειξαν, ὅτι τὰ οὐδτερόνια, συνοδεύονται πάντοτε ὑπὸ ἀκτινοβολίας γ πολὺ μικροῦ μήκους κύματος.

² L. Meitner, Die Naturwissenschaften 22 (1934), p. 420. Τὸ B_5^9 δὲν εἶναι εὐσταθές, ἀλλὰ ῥαδιενεργὸν (Πρβ. κατωτέρω εἰς τὰ περὶ τεχνητῆς ῥαδιενεργείας).

³ T. W. Bonner καὶ L. M. Mott-Smith, Phys. Rev. 45 (1934), p. 554-46 (1934), p. 258.

⁴ Ἡ κοσμικὴ ἀκτινοβολία εἶνε ἀκτινοβολία ἐξόχως διαπεραστικῆ, προσεχομένη ἐκ τοῦ ἀστρικοῦ διαστήματος. Ἀνεκαλύφθη τῷ 1910 ὑπὸ τοῦ Hess καὶ Kohlhörster καὶ ἐμελετήθη ἀπὸ τοῦ 1920 ἰδίως ὑπὸ τοῦ Millikan καὶ τῶν συνεργατῶν του (Bowen, Cameron, Anderson κ. λ. π.). Περιέχει ἠλεκτρικῶς φορτισμένα σωματίδια, ἂν δμως αὐτὴ καθ' ἑαυτὴν εἶνε φύσεως ὑλικῆς ἢ ἠλεκτρομαγνητικῆς δὲν εἶνε ἀσφαλῶς γνωστὸν ἀκόμη.

νοβολία προκαλεί ιονισμόν τοῦ ἀέρος, τὰ ἰόντα τοῦ ὁποίου ἀκολουθοῦσι σαφῶς καθωρισμένας τροχάς, εὐκόλως δυναμένας νὰ παρατηρηθοῦν ἐντὸς θαλάμου τοῦ Wilson. Ὁ Anderson¹, τῇ βοηθείᾳ ἰσχυροῦ μαγνητικοῦ πεδίου καὶ πλακὸς μολύβδου χωρίζουσης τὸν θάλαμον τοῦ Wilson εἰς δύο, ἐπιστοποίησε τὴν ὑπαρξιν τροχιῶν ἀνηκουσῶν εἰς ἠλεκτρόνια καὶ ἄλλων ἀνηκουσῶν εἰς πρωτόνια. Παρατήρησε ὅμως καὶ μίαν τροχίαν, τῆς ὁποίας ἡ μορφή δὲν ἠδύνατο νὰ ἐξηγηθῇ ἢ διὰ τῆς παραδοχῆς ὅτι ἀνῆκεν εἰς σωματίδιον, ἔχον τὴν μᾶζαν καὶ τὸ ἠλεκτρικὸν φορτίον τοῦ ἠλεκτρονίου, ἀλλὰ θετικόν. Ὁ Anderson ἐξακολουθήσας τὰς ἐρεῦνας του παρέτηρησε πολλὰς ἄλλας τοιαύτας τροχιάς. Τὰ ἀποτελέσματα τοῦ ἐπεβεβαιώθησαν ὑπὸ τῶν Blackett καὶ Occhialini², οἵτινες ἐτελειοποίησαν τὴν μέθοδον παρατηρήσεως, εἰς τρόπον ὥστε κατώρθωσαν νὰ λάβουν φωτογραφίας φερύσας πολὺ περισσοτέρας τροχιάς καταλλήλους διὰ μετρήσεις, ἐπὶ πλέον δὲ καὶ ὁμάδας τροχιῶν ἠλεκτρονίων ἀρνητικῶν καὶ θετικῶν, δι' ἐκάστην τῶν ὁποίων ὅλαι αἱ τροχιαὶ ἔχουν τὴν αὐτὴν ἀρχήν.

Διὰ τῶν πειραμάτων τοῦ Blackett καὶ Occhialini ἡ ὑπαρξις τοῦ θετικοῦ ἠλεκτρονίου κατέστη γεγονὸς ἀναμφισβήτητον.

8. Ἡ ὄλοποίησις τῆς ἐνεργείας. Ἡ δυνατότης ὑπάρξεως τοῦ θετικοῦ ἠλεκτρονίου εἶχε προβλεφθῆ ὑπὸ τοῦ Dirac, ἐπὶ τῇ βάσει τῆς θεωρίας τοῦ ἠλεκτρονίου, τὴν ὁποίαν οὗτος εἶχεν ἀναπτύξει γενικοποιῶν τὴν

¹ C. D. Anderson, Science 76 (1932), p. 238. Phys. Rev. 43 (1933), p. 491. Ἡλεκτρικῶς φορτισμένον σωματίδιον εἰσερχόμενον ἐντὸς ὁμογενοῦς μαγν. πεδίου καθέτου ἐπὶ τὴν διεύθυνσιν τῆς κινήσεώς του διαγράφει περιφέρειαν κύκλου ἐν ἐπιπέδῳ καθέτῳ ἐπὶ τὴν διεύθυνσιν τοῦ πεδίου, μὲ ἀκτίνα ἀνάλογον πρὸς τὴν ταχύτητα καὶ τὴν μᾶζαν του καὶ ἀντιστρόφως ἀνάλογον πρὸς τὴν ἔντασιν τοῦ πεδίου καὶ τὸ ἠλεκτρικὸν του φορτίον. Διερχόμενον διὰ πλακὸς μολύβδου ὑφίσταται ἀπώλειαν ταχύτητος συνεπεῖα τῆς ὁποίας ἡ ἀκτίς τῆς τροχιάς ἐλαττοῦται (ἡ καμπυλότης αὐξάνει). Ἀφ' ἐτέρου δύο σωματίδια μὲ ἀντίθετα ἠλεκτρ. φορτία εἰσερχόμενα ἐντὸς τοῦ μαγν. πεδίου κατὰ τὴν αὐτὴν διεύθυνσιν διαγράφουν τροχιάς στρεφούσας τὸ κοῖλον μέρος αὐτῶν κατ' ἀντιθέτους διευθύνσεις, ἐνῶ ἂν κινῶνται ἀντιστρόφως τὰ κοῖλα μέρη τῶν τροχιῶν τῶν εἶνε ἐστραμμένα πρὸς τὸ αὐτὸ μέρος. Ὁ Anderson παρατήρησε τροχιάς διαπερώσας τὴν μολυβδίνην πλάκα καὶ ἐκ τῆς συγκρίσεως τῶν καμπυλοτήτων τῶν ἀνωθεν καὶ κάτωθεν τῆς πλακὸς εὔρε τὴν διεύθυνσιν τῆς κινήσεως τῶν ἀντιστοίχων σωματιδίων (ἡ πλάξ ἦτο διατεταγμένη ὀριζοντίως). Ἐνῶ λοιπὸν ἡ διάταξις ἦτο τοιαύτη ὥστε αἱ τροχιαὶ τῶν ἀρνητ. ἠλεκτρονίων, τῶν κινουμένων ἐκ τῶν κάτω πρὸς τὰ ἄνω, νὰ στρέφουν τὰ κοῖλα πρὸς τὰ δεξιὰ παρατήρησε τὸ πρῶτον μίαν τροχίαν σωματιδίου κινουμένου ἐκ τῶν κάτω πρὸς τὰ ἄνω, ἔχουσαν καμπυλότητα οἷον καὶ αἱ τροχιαὶ τῶν ἀρνητ. ἠλεκτρονίων, ἀλλὰ στρέφουσαν τὰ κοῖλα πρὸς τὰ ἀριστερά. Αὕτη δὲν ἦτο δυνατόν νὰ ἐξηγηθῇ, ἢ ὡς ἀνήκουσα εἰς ἠλεκτρόνιον θετικόν.

² P. M. S. Blackett καὶ G. P. S. Occhialini, Proc. Roy. Soc. (A) 139 (1933), p. 699.

Κυματομηχανικήν τοῦ Schrödinger. Κατὰ τὴν θεωρίαν τοῦ Dirac τὸ θετικὸν ἠλεκτρόνιον δὲν δύναται νὰ ὑπάρξῃ ἐπὶ μακρόν. Συναντῶν ἓν ἀρνητικὸν ἠλεκτρόνιον ἐξαφανίζεται μετ' αὐτοῦ ὑπὸ ἐκπομπὴν ἠλεκτρομαγνητικῆς ἀκτινοβολίας. Ἐκ τῆς πειραματικῆς ἀποδείξεως τῆς ὑπάρξεως τοῦ θετικοῦ ἠλεκτρονίου ἐγεννήθη οὕτω τὸ ζήτημα κατὰ πόσον εἶνε δυνατόν νὰ παρατηρηθῇ ἡ μετατροπὴ ὕλης (ἑνὸς ἠλεκτρονίου + καὶ ἑνὸς -) εἰς ἐνέργειαν, καὶ τὸ ἀντίστροφον φαινόμενον τῆς ὑλοποιήσεως τῆς ἐνεργείας.

Ἡ θεωρία τῆς σχετικότητος διδάσκει ὅτι εἰς ποσὸν μάζης m ἀντιστοιχεῖ ποσὸν ἐνεργείας mc^2 , ὅπου $c=3.10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ εἶνε ἡ ταχύτης τοῦ φωτός ἐν τῷ κενῷ, καὶ ὅτι ἡ ἀρχὴ τῆς διατηρήσεως τῆς ὕλης καὶ τῆς ἐνεργείας ἰσχύει μόνον, λαμβανομένης ὑπ' ὄψιν τῆς ἰσοδυναμίας αὐτῶν συμφῶνως μὲ τὴν ἀνωτέρω σχέσιν. Κατὰ ταύτην, τὸ ποσὸν ἐνεργείας τὸ περιεχόμενον εἰς ἓν γραμμάριον μάζης ἀνέρχεται εἰς 9.10^{20}erg. , ἐπειδὴ δὲ τὸ ἠλεκτρόνιον ἔχει μάζαν 9.10^{-28}g. , ἡ ἀντίστοιχος ἐνέργεια εἶνε $8,1.10^{-7} \text{erg.}$ Ἐν τῇ Φυσικῇ τοῦ ἀτόμου ἀντὶ τῆς μηχανικῆς μονάδος ἐνεργείας erg χρησιμοποιεῖται συνήθως ἡ μονὰς $\text{electron-Volt (eV)}$, δηλ. τὸ ποσὸν τῆς κινητικῆς ἐνεργείας, τὸ ὁποῖον ἀποκτᾷ ἓν ἠλεκτρόνιον ἀφοῦ διατρέξῃ διαφορὰν δυναμικοῦ ἑνὸς Volt. Τοῦτο ἰσοῦται μὲ τὸ φορτίον τοῦ ἠλεκτρονίου $e=4,77.10^{-10}$ ἠλεκτροστατ. μον. φορτίου ἐπὶ τὴν διαφορὰν δυναμικοῦ $1 \text{ Volt} = \frac{1}{300}$ ἠλεκτροστ. μον. δυναμικοῦ, δηλ. $1 \text{ eV} = 1,59.10^{-12} \text{ erg.}$

Κατὰ ταῦτα ἡ ἐνέργεια, ἡ ἀντιστοιχοῦσα εἰς τὴν μάζαν τοῦ ἠλεκτρονίου (ἢ ἐσωτερικὴ ἐνέργεια) ἀνέρχεται εἰς $\frac{8,1.10^{-7}}{1,59.10^{-12}} = 509000 \text{ eV}$, δηλ. περίπου $\frac{1}{2} \text{ meV}$ ($1 \text{ meV} = 1 \text{ mega-electron-Volt} = 1 \text{ ἑκατομμύριον eV}$). Ἐξαφανιζομένων λοιπὸν ἑνὸς θετικοῦ καὶ ἑνὸς ἀρνητικοῦ ἠλεκτρονίου παράγεται ἐνέργεια 1 meV περίπου καὶ ἀντιστρόφως, πρὸς παραγωγὴν ἑνὸς ζεύγους ἠλεκτρονίων, πρέπει νὰ καταναλωθῇ τὸ ποσὸν αὐτὸ ἐνεργείας. Ἐν μόνον ἠλεκτρόνιον δὲν δύναται νὰ ἐξαφανισθῇ ἢ νὰ παραχθῇ δεδομένου ὅτι ἰσχύει ὁ νόμος τῆς διατηρήσεως τοῦ ἠλεκτρικοῦ φορτίου.

Πρὸς παραγωγὴν λοιπὸν ἑνὸς ζεύγους ἠλεκτρονίων ἐξ ἠλεκτρομαγνητικῆς ἀκτινοβολίας, εἶνε κατάλληλος μόνον ἀκτινοβολία, τῆς ὁποίας τὰ φωτόνια, ὅπου ὡς γνωστὸν εὐρίσκεται συγκεντρωμένη ἡ ἐνέργεια αὐτῆς περιέχουν ἕκαστον ἐνέργειαν 1 meV τοῦλάχιστον. Τοιαύτη εἶναι ἡ ἀκτινοβολία γ ῥαδιενεργῶν τινων οὐσιῶν, μὲ ἐξαιρετικῶς μικρὸν κύματος¹, ὅπως τοῦ πολωνίου (Po) μὲ ἐνέργειαν φωτονίου $0,8 \text{ meV}$ τοῦ ῥαδίου C (RaC) μὲ

¹ Ἡ ἐνέργεια ἑκάστου φωτονίου ἰσοῦται ὡς γνωστὸν μὲ $h\nu$, ἔνθα h ἡ σταθερὰ τοῦ Planck $h=6,55.10^{-27} \text{ erg. sec}$ καὶ ν ἡ συχνότης τῆς κυμάνσεως $\nu=c/\lambda$ (λ =μῆκος κύματος).

1,8 meV και του θορίου C'' (Th C'') με 2,6 meV, επίσης δὲ καὶ ἡ δευτερογενὴς ἀκτινοβολία τοῦ βηρυλλίου, ἥτις ἐκπέμπεται κατὰ τὸν θρυμματισμὸν του δι' ἀκτίνων α συγχρόνως μετὰ τὰ οὐδετερόνια, τῆς ὁποίας τὰ φωτόνια περιέχουν ἐνέργειαν περίπου 5 meV¹.

Ἐν ἔτει 1933 ἐπετεύχθη πράγματι ὑπὸ τῶν Anderson καὶ Neddermeyer², ἐν Ἀμερικῇ, τῶν Meitner καὶ Phillip³ ἐν Γερμανίᾳ καὶ τῶν Curie καὶ Joliot⁴, ἐν Γαλλίᾳ ἡ παραγωγή ἠλεκτρονίων ἐξ ἀκτίνων γ. Οὗτοι ἀπέδειξαν ὅτι μεταλλικὸν φύλλον ἐκπέμπει, ὑπὸ τὴν ἐπίδρασιν ἀκτίνων γ, θετικὰ ἠλεκτρόνια. Τὸ πείραμα ἐπέτυχε μόνον μετὰ τὰς ἀκτίννας γ, τοῦ RaC τοῦ ThC'' καὶ τοῦ Be, οὐχὶ δὲ καὶ μετὰ τὰς τοῦ Po, ὡς ἀπαιτεῖ ἡ θεωρία. Ὅτι πρόκειται πράγματι περὶ ὑλοποίησεως τῶν ἀκτίνων γ προκύπτει ἐκ φωτογραφῶν δεικνυσῶν ὅτι ἕκαστον θετικὸν ἠλεκτρόνιον ἐκπέμπεται μαζὺ μετὰ ἓν ἀρνητικὸν ἐκ τοῦ αὐτοῦ σημείου τοῦ μετάλλου, ἂν δὲ ἡ ἔντασις τῶν ἀκτίνων γ ὑποβιβασθῇ εἰς τὸ ἡμισυ (διὰ παρενθέσεως πλακὸς ἐκ μολύβδου μὴ ἀπορροφώσης τὰ οὐδετερόνια τὰ ἐκπεμπόμενα ὑπὸ τοῦ βηρυλλίου), καὶ ὁ ἀριθμὸς τῶν ἐκπεμπομένων θετικῶν ἠλεκτρονίων ἐλαττοῦται εἰς τὸ ἡμισυ⁵. Ἐπὶ πλέον ἀπεδείχθη ὅτι ἡ διαφορὰ ἐνεργείας ἑνὸς φωτονίου τῶν ἀκτίνων γ καὶ τῆς ἐσωτερικῆς ἐνεργείας τοῦ παραγομένου ζεύγους ἠλεκτρονίων, ἐμφανίζεται ὡς κινητικὴ ἐνέργεια τούτων.

Ἐκ τῶν ἀνωτέρω συνάγεται, ὅτι πράγματι λαμβάνει χώραν μετατροπὴ ἠλεκτρομαγνητικῆς ἐνεργείας εἰς ἠλεκτρόνια καὶ κινητ. ἐνέργειαν αὐτῶν. Ὅτι αὕτη λαμβάνει χώραν μόνον ἐντὸς τῆς ὕλης ἐξηγεῖται ἐπὶ τῆ βάσει τοῦ νόμου τῆς διατηρήσεως τῆς ποσότητος κινήσεως⁶. Ἀποδεικνύεται πράγματι ὅτι πρὸς διατήρησιν τῆς ποσότητος κινήσεως πρέπει ἐκτὸς τῶν δύο παραγομένων ἠλεκτρονίων νὰ ὑπάρχη καὶ ἄλλο ὕλικόν σωματίδιον, παραλαμβάνον μέρος αὐτῆς. Τὸν ὅλον αὐτὸν παιζουσαν ἑνταῦθα οἱ πυρῆνες τοῦ μετάλλ. φύλλου.

¹ Ἡ ἀκτινοβολία αὕτη εἶχε τὸ ἐλάχιστον μέχρι τοῦ 1933 γνωστὸν μήκος κύματος. Βραδύτερον ἀνεκαλύφθησαν ἄλλαι ἀκτινοβολίαι μετὰ μήκος κύματος ἔτι μικρότερον (μετὰ ἐνέργειαν φωτονίου ἄνω τῶν 10 meV).

² C. D. Anderson καὶ S. H. Neddermeyer, Phys. Rev. 43 (1933), p. 1034.

³ L. Meitner καὶ K. Phillip, Naturwiss. 21 (1933), p. 268, 468.

⁴ I. Curie-F. Joliot C. R. Ac. Sc. (1933), p. 1105, 1518.

⁵ Ὁ ἀριθμὸς τῶν ἐκπεμπομένων θετικῶν ἠλεκτρονίων εἶναι πολὺ μεγαλύτερος τοῦ τῶν θετικῶν, λόγῳ τοῦ φωτοηλεκτρικοῦ φαινομένου, τὸ ὁποῖον λαμβάνει χώραν εἰς τὴν ἐπιφάνειαν τοῦ μετάλλου.

⁶ Ἡ ποσότης κινήσεως ὕλικου σημείου εἶνε γεωμ. μέγεθος διδόμενον ὑπὸ τοῦ γινομένου τῆς μάζης ἐπὶ τὴν ταχύτητα τοῦ σημείου. Ἡ ποσότης κινήσεως φωτονίου ἐνεργείας ἦν ἰσοῦται μετὰ $h\nu/c$.

Τὸ ἀντίστροφον φαινόμενον τῆς μετατροπῆς τῆς ὕλης εἰς ἐνέργειαν παρατηρήθη ὑπὸ τῶν Gray καὶ Tarrant ¹. οἱ ὁποῖοι ἀπέδειξαν ὅτι ὁ μόνυβδος ὑπὸ τὴν ἐπίδρασιν ἀκτίνων γ τοῦ ThC'' ἐκπέμπει πρὸς ὄλας τὰς διευθύνσεις φωτόνια ἐνεργείας 0,5 καὶ 1 meV. Τὰ πρῶτα προέρχονται ἐκ μετατροπῆς ἑνὸς ζεύγους ἠλεκτρονίων (παραγομένων ἐντὸς τοῦ μόλυβδου ἐκ τῶν ἀκτίνων γ) εἰς δύο φωτόνια, τὰ δὲ δεύτερα ἐκ μετατροπῆς εἰς ἓν. Τέλος ὁ Joliot ² βομβαρδίσας διάφορα μέταλλα διὰ θετικῶν ἠλεκτρονίων παρατήρησε ἐκπομπὴν φωτονίων ἐνεργείας 0,5 meV, προσδιορίσας δὲ τὸν ἀριθμὸν τῶν παραγομένων φωτονίων σχετικῶς πρὸς τὸν ἀριθμὸν τῶν προσπιπτόντων θετικῶν ἠλεκτρονίων εὔρε τὸν πρῶτον μὲ μεγάλην προσέγγισιν διπλάσιον τοῦ δευτέρου, ὅπως πρέπει νὰ συμβαίῃ ὅταν ἓν θετικὸν καὶ ἓν ἀρνητικὸν ἠλεκτρόνιον μετατρέπονται εἰς δύο φωτόνια ἐνεργείας 0,5 meV ³.

9. Θρυμματισμὸς τῶν ἀτόμων διὰ δευτερονίων καὶ οὐδετερονίων.

Ἀμέσως μετὰ τὴν ἀνακάλυψιν τοῦ βαρέος ὕδρογόνου καὶ τοῦ οὐδετερονίου, ἐχρησιμοποιήθησαν καὶ ταῦτα ὡς μέσα θρυμματισμοῦ.

Ὁ θρυμματισμὸς διὰ πυρήνων H_1^2 (καλουμένων καὶ δευτερονίων) ἐμελετήθη ἰδίως ὑπὸ ἀμερικανῶν φυσικῶν (Lawrence, Lauritsen, Crane, Livingston, Lewis κ.λ.π.) καὶ νεωστὶ ὑπὸ τοῦ Rutherford καὶ τῶν μαθητῶν του.

Ἡ παραγωγὴ τῶν ἀκτίνων H_1^2 ἐπιτυγχάνεται δι' ἠλεκτρικῆς ἐκκενώσεως ἐντὸς βαρέος ὕδρογόνου καὶ ἐπιταχύνσεως τῶν παραγομένων διαυλικῶν ἀκτίνων, ὅπως εἰς τὴν περίπτωσιν τῶν ἀκτίνων H_1^1 .

Οὕτως ἐπετεύχθη, τὸ πρῶτον ὑπὸ τῶν Lawrence, Livingston καὶ Lewis ⁴, ὁ θρυμματισμὸς τοῦ λιθίου ὑπὸ ἐκπομπῆν ἀκτίνων α .

Τὸ λίθιον ἔχει δύο ἰσότοπα τὸ Li_3^6 καὶ τὸ Li_3^7 . Τῷ 1934 οἱ Oliphant, Shire καὶ Crowther ⁵ ἐχώρισαν ταῦτα καὶ παρασκευάσαντες λεπτὰ φύλλα ἐξ αὐτῶν ἐμελέτησαν τὸν θρυμματισμὸν των, ὑπὸ τὴν ἐπίδρασιν ἀκτίνων H_1^1 καὶ H_1^2 . Τὰ πειράματα ταῦτα ἐπεβεβαίωσαν κατ' ἀρχάς, ὅτι τὸ Li^7 θρυμματίζεται διὰ τοῦ H_1^1 καὶ τὸ Li^6 διὰ τοῦ H_1^2 κατὰ τὰς

¹ L. H. Gray καὶ G. P. T. Tarrant, Proc. Roy. Soc. 143 (1934), p. 681, 706.

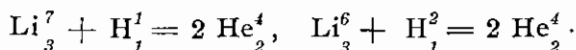
² F. Joliot, C. R. Paris 197 (1933), p. 1622 Journ. d. Phys. 5 (1934), p. 299.

³ Ἀποδεικνύεται θεωρητικῶς, ὅτι ἡ πιθανότης τῆς μετατροπῆς ἑνὸς ζεύγους ἠλεκτρονίου εἰς δύο φωτόνια εἶνε πολὺ μεγαλυτέρα τῆς πιθανότητος μετατροπῆς αὐτῶν εἰς ἓν.

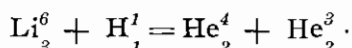
⁴ E. O. Lawrence, M. S. Livingston, G. N. Lewis, Phys. Rev. 44 (1933) p. 53.

⁵ M. L. Oliphant, E. S. Shire, B. M. Crowther, Nature, 133 (1934).

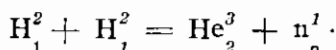
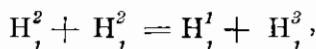
ἀντιδράσεις :



Διεπιστώθη ὅμως ὅτι καὶ τὸ Li_3^6 ὑπὸ τὴν ἐπίδρασιν πρωτονίων θρυμματίζεται ἐκπέμπον δύο ομάδας σωματιδίων διαφόρου ἐνεργείας, τοῦτο δὲ ἤγαγεν εἰς τὴν παραδοχὴν τῆς ἀντιδράσεως :



Τὴν ὑπαρξιν ἑνὸς ἕως τότε ἀγνώστου ἰσοτόπου τοῦ ἡλίου μὲ ἀτομ. βάρος 3 ἐπιβεβαιοῦν πειράματα θρυμματισμοῦ πυρήνων H_1^2 ὑπὸ ἀκτίνων H_1^2 γενόμενα ἐν ἔτει 1934 ὑπὸ τῶν Oliphant, Harteck καὶ Rutherford¹ τὰ ὁποῖα ἀπεκάλυψαν συγχρόνως τὴν ὑπαρξιν τοῦ τρίτου ἰσοτόπου τοῦ ὕδρογόνου H_1^3 . Κατὰ τὸν θρυμματισμὸν τοῦτον παρατηρεῖται ἐκπομπὴ πρωτονίων καὶ οὐδετερονίων, ἐρμηνευόμενα ὑπὸ τῶν ἀντιδράσεων :



Ἡ ὑπαρξις τοῦ H_1^3 ἐντὸς βαρέος ὕδρογόνου ἐπιβεβαιώθη ἀσφαλῶς ὑπὸ τῶν Lozier, Smith καὶ Bleakney² διὰ τῆς μεθόδου τοῦ φασματογράφου μάζης. Ἐντὸς καθαροῦ βαρέος ὕδρογόνου εὐρίσκεται τοῦτο κατὰ ποσοστὸν 1:200000 περίπου.

Ἡ ὑπαρξις τοῦ He_2^3 ἐπιβεβαιοῦται ὑπὸ πειραμάτων θρυμματισμοῦ τῶν Harnwell, Smyth καὶ Urry³ τῶν Oliphant Kempton, Rutherford κ.λ.π.⁴ Ἐκ φασματοσκοπικῶν ἐρευνῶν συνάγεται, ὅτι τὸ ποσοστὸν αὐτοῦ ἐντὸς συνήθους ἡλίου δὲν εἶναι μεγαλύτερον τοῦ 1:100000.

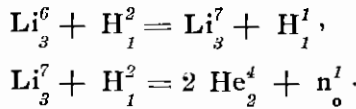
Κατὰ τὸν θρυμματισμὸν τοῦ λιθίου διὰ δευτερονίων, πλὴν τῶν ἀντιδράσεων τὰς ὁποίας ἀνεφέρομεν παρατηροῦνται καὶ αἱ δύο ἀκόλουθοι.

¹ M. L. Oliphant, P. Harteck καὶ Lord Rutherford, Proc. Roy. Soc. (A) 144 (1934) p. 692. P. J. Dee Proc. Roy. Soc. (A) 148 (1935), p. 623.

² N. W. Lozier, Ph. T. Smith, W. Bleakney, Phys. Rev. 45 (1934), p. 655.

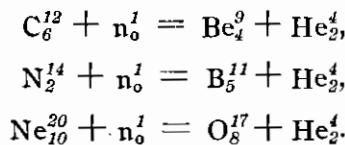
³ G. P. Harnwell, H. D. Smyth, W. D. Urry, Phys. Rev. 46 (1934) p. 437.

⁴ Oliphant, Kempton, Rutherford, Proc. Roy. Soc. (A) 150 (1935), p. 241. T. W. Bonner, W. W. Brubaker, Phys. Rev. 49 (1936), p. 19.



Τῇ βοηθείᾳ δευτερονίων κατορθώθη ὁ θρυμματισμὸς ὄλων σχεδὸν τῶν ἑλαφρῶν στοιχείων καὶ πολλῶν βαρέων, διὰ τὰ πλείστα ὁμῶς τῶν τελευταίων, τὸ βαρύτερον τῶν προϊόντων τοῦ θρυμματισμοῦ δὲν εἶνε εὐσταθὲς ἀλλὰ ῥαδιενεργόν.

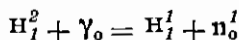
Λίαν δραστικὸν μέσον πρὸς θρυμματισμὸν τῶν πυρήνων ἀποτελοῦσι τὰ οὐδετερόνια δι' οὓς λόγους ἀνωτέρω ἀνεφέραμεν. Δι' αὐτῶν κατορθοῦται ὁ θρυμματισμὸς ὄλων σχεδὸν τῶν πυρήνων, τῶν βαρέων πυρήνων μετατροπομένων καὶ εἰς τὴν περίπτωσιν ταύτην εἰς ῥαδιενεργούς. Ἐνταῦθα ἀναφέρομεν ὡς παραδείγματα θρυμματισμοῦ ἑλαφρῶν πυρήνων, τὸν θρυμματισμὸν τοῦ ἄνθρακος, ἀζώτου καὶ νέου, ἐξ ὧν ὁ τελευταῖος δι' οὐδενὸς ἄλλου μέσου ἐπιτυγχάνεται.



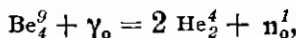
Ἡ ἐπιτυγχανομένη κατὰ τὰ πειράματα θρυμματισμοῦ ἀπόδοσις εἶνε συνήθως τάξεως $1:10^6$ δηλαδὴ ἐπὶ ἑνὸς ἑκατομμυρίου προσπιπτόντων βλημάτων ἐν ἐπιφέρει πρᾶγματι θρυμματισμὸν. Ἐξαιρετικῶς μεγάλη ἀπόδοσις ($1:10^4$ περίπου) παρατηρεῖται εἰς τὴν περίπτωσιν τοῦ θρυμματισμοῦ τοῦ H_1^2 διὰ H_1^2 , καὶ τῶν Be, B, F, Al δι' ἀκτίνων α τοῦ πολωνίου (παρωγωγὴ οὐδετερονίων). Ἡ ἀπόδοσις ἐλαττοῦται ταχέως δι' ἐνέργειαν τῶν βλημάτων μικροτέραν τῶν 10^5 eV¹.

Ἡ διὰ χημικῶν μεθόδων ἐξακρίβωσις τῶν ἀντιδράσεων αἰτινες λαμβάνουν χώραν κατὰ τοὺς θρυμματισμοὺς ἐπετεύχθη μόνον εἰς μεμονωμένας τινὰς περιπτώσεις, ἀπὸ τοῦ 1934. Συνήθως συνάγονται αὐταὶ ἐκ τοῦ

² Ἐκτὸς τῶν ἀνωτέρω ἐκτεθέντων τρόπων μεταστοιχειώσεως, παρατηρήθη εἰς ὀλίγας τινὰς περιπτώσεις μεταστοιχειώσεως διὰ φωτονίων. Αὕτη ἐπετεύχθη τὸ πρῶτον ὑπὸ τῶν Chadwick καὶ Goldhaber (Nature 134 (1934) p. 237), διὰ τὸ δευτερόνιον τῇ βοηθείᾳ τῶν ἀκτίνων γ τοῦ ThC'' :



Παρατηρήθη ἐπίσης, ὑπὸ τοῦ L. Szilard καὶ T. A. Chalmers, (Nature 134 (1934) p. 494) μεταστοιχειώσεως τοῦ βηρυλλίου διὰ τῶν ἀκτίνων γ τοῦ ῥαδίου :



ὡς καὶ τοῦ ἀργιλίου, καθ' ἣν παράγεται ῥαδιενεργὸν μαγνήσιον.

προσδιορισμοῦ τῆς φύσεως τῶν κατὰ τὸν θρυμματισμὸν ἐκπεμπομένων σωματιδίων, δηλαδὴ τοῦ ἐλαφροτέρου προϊόντος τοῦ θρυμματισμοῦ. Τὰ μέχρι σήμερον παρατηρηθέντα τοιαῦτα εἶναι πρωτόνια, σωματίδια, α καὶ οὐδετερόνια.

Διὰ τὸν προσδιορισμὸν τοῦτον χρησιμοποιοῦνται θάλαμοι ἰονισμοῦ μετὰ καταλλήλων διατάξεων ἠλεκτρομέτρων, ἀριθμηταὶ δι' ἀκίδος, μέθοδοι σπινθηρισμοῦ καὶ ἰδίως ἡ μέθοδος τοῦ θαλάμου τοῦ Wilson¹. Ἡ ἱκανότης ἰονισμοῦ, ἐκ τῆς ὁποίας ἐξαρτᾶται ἡ σαφήνεια καὶ τὸ πλάτος τῶν τροχιῶν ἐντὸς τοῦ θαλάμου τοῦ Wilson, μετρήσεις ἀποκλίσεως (καμπυλότητος τῆς τροχιάς) ἐντὸς μαγνητικοῦ πεδίου, μετρήσεις ἀπορροφήσεως ὑπὸ καταλλήλων οὐσιῶν ἐπιτρέπουν τὸν προσδιορισμὸν τοῦ ἠλεκτρικοῦ φορτίου, τῆς μάζης καὶ τῆς ἐνεργείας τῶν σωματιδίων.

Ἡ μελέτη τοῦ θρυμματισμοῦ τῶν πυρήνων ἤγαγεν ἐν ἔτει 1935 εἰς νέον ὑπολογισμὸν τῶν ἀτομικῶν βαρῶν τῶν στοιχείων, καθ' ὅσον ἀπεδείχθη, ὅτι ἐπὶ τῇ βάσει τῶν παλαιότερων ἀτομ. βαρῶν πολλὰ ἀντιδράσεις πυρήνων εἶναι ἀδύνατον νὰ ἐρμηνευθοῦν. Τὰ σφάλματα τῶν διὰ τῆς μεθόδου τοῦ φασματογράφου μάζης παλαιότερων προσδιορισμῶν, προέρχονται ἐκ τοῦ ὅτι ἡ γενομένη δεκτὴ τιμὴ τοῦ λόγου $O^{16} : He^4$ δὲν εἶναι ἐντελῶς ἀκριβής. Ὁ νέος ὑπολογισμὸς ἐγένετο ἀφ' ἐνὸς ὑπὸ τοῦ Bethe²

¹ Ἡ μέθοδος αὕτη ἐφνευθεῖσα κατὰ τὰς ἀρχὰς τοῦ 20οῦ αἰῶνος ἀπὸ τοῦ C. T. R. Wilson στηρίζεται εἰς τὸ ὅτι ἰόντα ἀερίων, εὐρισκόμενα ἐντὸς ὑπερκεκορεσμένου ὕδατος ἀποτελοῦσι πυρήνας συμπυκνώσεως αὐτοῦ, σχηματιζομένων οὕτω σταγονιδίων ὕδατος περὶ τὰ ἰόντα. Τὰ σταγονίδια φωτογραφούμενα μᾶς δίδουν τὰς θέσεις τῶν ἰόντων. Ἡλεκτρικῶς φορισμένα σωματίδια (ἀκτίνες α, β, κ. λ. κ.) διερχόμενα δι' ἀέρος ἢ ἄλλου ἀερίου παράγουν ἰόντα· ἐὰν ἡ φωτογραφία ληφθῆ τόσον ταχέως, ὥστε τὰ ἰόντα νὰ μὴ ἔχουν ἀπομακρυνθῆ τῶν σημείων, ὅπου ἐσχηματίσθησαν παρατηροῦνται ἐπ' αὐτῆς σαφεῖς γραμμαὶ ἀποτελούμεναι ἐκ τῶν σταγονιδίων αἵτινα ἐσχηματίσθησαν περὶ τὰ ἰόντα διὰ συμπυκνώσεως τοῦ ὕδατος τοῦ ἀναμειγμένου μὲ τὸν ἀέρα. Αἱ γραμμαὶ αὗται συμπίπτουν προφανῶς μὲ τὰς τροχιάς τῶν παραγόντων τὰ ἰόντα σωματιδίων, αἵτινες καθίστανται οὕτω ὄραταί.

Ὁ θάλαμος τοῦ Wilson ἀποτελεῖται ἐκ κιβωτίου, κατασκευασμένου οὕτως ὥστε νὰ ἐπιτρέπη ταχυτάτην ἐκτόνωσιν (αὕξησιν ὄγκου) τοῦ περιεχομένου ἀέρος καὶ ἀτμοῦ καὶ μετατροπὴν τοῦ ἀτμοῦ εἰς ὑπερκεκορεσμένον. Τὰ τοιχώματα τοῦ κιβωτίου εἶναι τοιαῦτα, ὥστε νὰ ἐπιτρέπουν τὴν διόδον τῶν ἐξεταζομένων σωματιδίων καὶ τὴν φωτογράφησιν τῶν τροχιῶν αὐτῶν. Ὁ φωτισμὸς διὰ τὴν φωτογράφησιν γίνεται δι' ἠλεκτρικοῦ σπινθηῆρος, παραγομένου διὰ καταλλήλου μηχανισμοῦ συγχρόνως μὲ τὴν ἐκτόνωσιν.

Τὰ οὐδετερόνια, ἐν ἀντιθέσει πρὸς τὰ ἄλλα ἐλαφρὰ προϊόντα θρυμματισμοῦ δὲν προκαλοῦν ἰονισμόν, ἐπομένως δὲν παράγουν ἀπ' εὐθείας τροχιάς, ἀποτελουμένας ἐκ σταγονιδίων. Ἡ παρατήρησις των γίνεται ἐπὶ τῇ βάσει τῶν δευτερογενῶν ἀκτίνων, τὰς ὁποίας παράγουν, προσκρούοντα ἐπὶ καταλλήλων οὐσιῶν (παραφίνης).

² H. Bethe, Phys. Rev. 47 (1935), p. 633, 795.

καὶ ἀφ' ἑτέρου ὑπὸ τῶν Rutherford, Kempton καὶ Oliphant¹, οὕτως ὥστε διὰ τῶν νέων τιμῶν νὰ ἐρμηνεύωνται ὅλαι αἱ ἀσφαλῶς γνωσταὶ ἀντιδράσεις καὶ τὰ κατ' αὐτὰς ἐκλυόμενα ποσὰ ἐνεργείας. Αἱ τιμαὶ αὗται τῶν ἀτομικῶν βαρῶν εὐρίσκονται ἐν ἀρκετὰ ἱκανοποιητικῇ συμφωνίᾳ πρὸς τὰ ἀποτελέσματα νέων μετρήσεων τοῦ Aston² διὰ τοῦ φασματογράφου μάζης.

Ἐπί πλῆθος I δίδει τὰς μέχρι τοῦ 1934 δεκτὰς τιμὰς τῶν ἀτομικῶν βαρῶν, τῶν στοιχείων 0—8, ὁ δὲ πίναξ II τὰς νέας τοιαύτας.

ΠΙΝΑΞ I

Στοιχεῖον	Ἀτομικὸν βᾶρος
n_0^1	1,0080
H_1^1	1,00778
H_1^2	2,01363
H_1^3	—
He_2^3	—
He_2^4	4,00216
Li_3^6	6,0145
Li_3^7	7,0146
Be_4^9	9,0155
B_5^{10}	10,0135
B_5^{11}	11,0110
C_6^{12}	12,0036
C_6^{13}	13,0039
N_7^{14}	14,008
N_7^{15}	15,003
O_8^{16}	16
O_8^{17}	17,0029
O_8^{18}	18,0065

¹ M. L. E. Oliphant, A. E. Kempton καὶ Lord Rutherford, Proc. Roy. Soc. (A) 149 (1935) p. 406, 150 (1935) p. 253.

² F. W. Aston, Nature 135 (1935) p. 541.

ΠΙΝΑΞ Ι Ι

Στοιχείον	Ἀτομικὸν βάρους	
	Κατὰ Bethe	Κατὰ Rutherford Kempton και Oliphant
n_0^1	1,0085± 0,0005	1,0083± 0,003
H_1^1	1,00807±0,00007	1,0081±0,0001
H_1^2	2,01423±0,00015	2,0142±0,0002
H_1^3	3,01610±0,00033	3,0161±0,0003
He_2^3	3,01699±0,00046	3,0172±0,0003
He_2^4	4,00336±0,00023	4,0034±0,0004
Li_3^6	6,01614±0,00050	6,0163±0,0006
Li_3^7	7,01694±0,00048	7,0170±0,0007
Be_4^9	9,0135± 0,0007	9,0138±0,0005
B_5^{10}	10,0146± 0,0010	10,0143±0,0003
B_5^{11}	11,0111± 0,0011	11,0110
C_6^{12}	12,0037± 0,0007	12,0027±0,0003
C_6^{13}	13,0069± 0,0007	
N_7^{14}	14,0076± 0,0004	
N_7^{15}	15,0053± 0,0005	
O_8^{16}	16	
O_7^{17}	17,0040± 0,0002	

10. Ραδιενέργεια. Ἐκτὸς τῶν ἀνωτέρω περιγραφέντων φαινομένων θρυμματισμοῦ, τὰ ὁποῖα παράγονται δι' εἰσδύσεως ξένου σωματιδίου ἐντὸς τοῦ πυρῆνος ὑπάρχουν καὶ ἀπλούστερα, κατὰ τὰ ὁποῖα ὁ πυρὴν διασπᾶται ἀφ' ἑαυτοῦ, ἐκπέμπων ἐν σωματίδιον. Τοιαῦτα εἶνε τὰ ἀπὸ τοῦ τέλους τοῦ 19^{ου} αἰῶνος γνωστὰ φαινόμενα τῆς ῥαδιενεργείας. Τὰ ῥαδιενεργὰ στοιχεῖα, τῶν ὁποίων οἱ πυρῆνες ἔχουσι τὴν ιδιότητα ταύτην, εὐρίσκονται εἰς τὸ τέλος τοῦ περιοδικοῦ συστήματος τῶν στοιχείων καὶ ἀποτελοῦσι τρεῖς οἰκογενείας ἢ σειρᾶς¹, τὴν σειρὰν τοῦ ῥαδίου—οὐράνιου ($Ra_{88}^{226} - U_{92}^{238}$), τὴν σειρὰν τοῦ ἄκτινίου (Ac_{89}^{226}) καὶ τὴν σειρὰν τοῦ θορίου (Th_{90}^{232}). Τὸ πρῶτον στοιχείον τῆς σειρᾶς τοῦ ῥαδίου εἶνε τὸ οὐράνιον I

¹ Ἐκτὸς τῶν τριῶν σειρῶν παρουσιάζουν ἀσθενῆ ῥαδιενέργειαν τὰ στοιχεῖα κάλιον (K_{19}), ῥουβίδιον (Rb_{37}) καὶ σαμάριον (Sm_{62}).

(U_{92}^{238}), τῆς σειρᾶς τοῦ ἄκτινίου, τὸ οὐράνιον Υ (UY_{90}^{230}) καὶ τῆς σειρᾶς τοῦ θορίου, τὸ θόριον. Ἐκαστον στοιχεῖον οἰασθήποτε σειρᾶς προέρχεται ἐκ μετατροπῆς τοῦ προηγούμενου του δι' ἐκπομπῆς ἄκτινων α ἢ β (ταχέων ἠλεκτρονίων). Κατὰ τὸν θεμελιώδη νόμον τῶν Soddy καὶ Fajans (1913), μετατροπὴ ῥαδιενεργοῦ στοιχείου ὑπὸ ἐκπομπῆν ἄκτινων α ὑποβιβάζει τὸ στρογγυλευμένον ἀτομικόν του βάρους κατὰ 4 καὶ τὴν τάξιν του ἐν τῷ περιοδικῷ συστήματι κατὰ 2, μετατροπὴ δὲ ὑπὸ ἐκπομπῆν ἄκτινων β, αὐξάνει τὴν τάξιν κατὰ 1 ἄνευ μεταβολῆς τοῦ ἀτομ. βάρους. Εἰς πολλὰς περιπτώσεις αἱ ἄκτινοβολαὶ α καὶ β συνοδεύονται ὑπὸ ἄκτινοβολίας γ (ἠλεκτρομαγνητικῆς ἄκτινοβολίας μήκους κύματος $10^{-11}=10^{-9}$ cm.), προερχομένης καὶ ταύτης ἐκ τοῦ πυρῆνος τῶν ῥαδιενεργῶν στοιχείων.

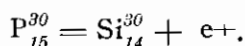
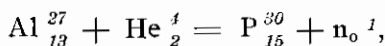
Τὸ ὅτι κατὰ τὴν μετατροπὴν τῶν ῥαδιενεργῶν στοιχείων λαμβάνουν χώραν φαινόμενα αὐτόματα καὶ τυχαῖα, καταδεικνύεται ἐκ τοῦ ὅτι, ἂν ἓνός μὲν ἢ μετατροπὴ αὕτη δὲν δύναται νὰ ἐπηρεασθῇ ὑπὸ οὐδενὸς ἐξωτερικοῦ αἰτίου (μεταβολῆς τῆς θερμοκρασίας, τῆς πιέσεως, ἐπιδράσεως ἠλεκτρικῶν ἢ μαγνητικῶν πεδίων κ. λ. π.), ἂν ἓτέρου δὲ ὅτι ἢ ἔντασις τῆς ἄκτινοβολίας οἰασθήποτε ῥαδιενεργοῦ οὐσίας ἐλαττοῦται μὲ τὸν χρόνον κατὰ νόμον ἐκθετικόν. Οἱ σπινθηρισμοὶ τοὺς ὁποίους προκαλεῖ ἡ ἄκτινοβολία α προσπίπτουσα ἐπὶ διαφράγματος κεκαλυμμένου διὰ στρώματος θειοῦχου ψευδαργύρου καὶ ἄλλα σχετικὰ πειράματα, δεικνύουν ὅτι λαμβάνουν χώραν μεμονωμένα ἐκπομπαὶ καὶ ὄχι συνεχῆς τοιαύτη. Ἡ φυσικωτέρα ἐρμηνεία τούτου εἶναι ὅτι τὰ ἄτομα τῆς ῥαδιενεργοῦ οὐσίας μετατρέπονται τὸ ἐν μὲ τὸ ἄλλο κατὰ τρόπον ἐντελῶς τυχαῖον, καθ' ὅσον τὸ κατὰ τί διαφέρουν τὰ μετατρέπομενα ἄτομα τῶν ἄλλων διαφεύγει ἐντελῶς τὴν παρατήρησιν μας. Ἐκ τοῦ νόμου καθ' ὃν μεταβάλλεται ἡ ἔντασις τῆς ἄκτινοβολίας μὲ τὸν χρόνον ἔπεται ὅτι ὁ ἀριθμὸς τῶν εἰς ἓν μικρὸν χρονικὸν διάστημα μετατρεπομένων ἀτόμων ῥαδιενεργοῦ οὐσίας εἶναι ἀνάλογος πρὸς αὐτὸ καὶ πρὸς τὸν ὅλον ἀριθμὸν τῶν ἀτόμων τῆς οὐσίας ¹ ὑποτιθεμένου τούτου πολὺ μεγάλου, ἐπομένως δυνάμεθα νὰ προειπώμεν πόσα ἄτομα θὰ διασπασθοῦν κατὰ τὸ διάστημα τοῦτο, ὄχι ὁμως καὶ ποῖα. Τὸ φαινόμενον ὑπόκειται εἰς τοὺς νόμους τῆς τύχης.

Ἡ παράγωγος ἀναλογίας λ εἶναι χαρακτηριστικὸν μέγεθος ἐκάστης ῥαδιενεργοῦ οὐσίας, προσδιορίζον προφανῶς τὴν ταχύτητα μὲ τὴν ὁποίαν ἀποσυντίθεται αὕτη, καλεῖται δὲ σταθερὰ ἀποσυνθέσεως. Ἄντ' αὐτοῦ χρησι-

¹ Ἐὰν N_0 εἶναι ὁ ἀριθμὸς τῶν ἀτόμων ῥαδιενεργοῦ οὐσίας κατὰ τὸν χρόνον 0 ὁ ἀριθμὸς αὐτῶν N κατὰ τὸν χρόνον t εἶναι $N = N_0 e^{-\lambda t}$ ($e = 2.718$ ἢ βάσις τῶν φυσικῶν λογαρίθμων). Ἄρα ὁ ἀριθμὸς τῶν εἰς τὸ μικρὸν χρον. διάστημα ἀπὸ t ἕως $t + dt$ μετατρεπομένων ἀτόμων εἶναι: $dN = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} dt = -\lambda N dt$ ἥτοι ἀνάλογος τοῦ N καὶ τοῦ dt .

μοποιείται πολλάκις ὡς χαρακτηριστικὴ σταθερὰ ὁ « χρόνος ὑποδιπλασιασμοῦ », ἤτοι ὁ χρόνος μετὰ παρέλευσιν τοῦ ὁποίου δοθεῖσα ποσότης ραδιενεργοῦ οὐσίας ἐλαττοῦται, συνεπεῖα τῆς μετατροπῆς, εἰς τὸ ἥμισυ. Οἱ χρόνοι ὑποδιπλασιασμοῦ τοῦ ραδίου, ἀκτινίου καὶ θορίου εἶναι ἀντιστοιχῶς 1590 a (ἔτη), 13,5 a, 1,8 · 10¹⁰ a.

11. Τεχνητὴ ραδιενέργεια. Κατὰ τὸ ἔτος 1934 ὁ ἀριθμὸς τῶν γνωστῶν ραδιενεργῶν στοιχείων ηἰξήθη κατὰ πολὺ, ἀνακαλυφθείσης τῆς τεχνητῆς ραδιενεργείας. Ἡ ἀνακάλυψις αὕτη ὀφείλεται εἰς ἐρεῦνας τῶν Curie - Joliot σχετικὰς μὲ τὸν θρυμματισμὸν τοῦ ἀργιλίου (Al_{13}^{27}), δι' ἀκτίνων α τοῦ πολωνίου (Po ἢ $Ra F_{84}^{210}$) κατὰ τὸν ὁποῖον παρατηρεῖται ἐκπομπὴ θετικῶν ἠλεκτρονίων (e^+). Οἱ Curie καὶ Joliot παρετήρησαν ὅτι καὶ ἀφοῦ παύσῃ ἡ ἐπίδρασις τῶν ἀκτίνων α, ἡ ἐκπομπὴ θετικῶν ἠλεκτρονίων ὑπὸ τοῦ ἀργιλίου δὲν παύει, ἀλλ' ἐξακολουθεῖ, ἐλαττωμένη βαθμιαίως, πλέον τοῦ ἑνὸς τετάρτου τῆς ὥρας. Διαπιστώσαντες δὲ ὅτι ὁ ἀριθμὸς τῶν ἐκπεμπομένων e^+ ἐλαττοῦται μὲ τὸν χρόνον κατὰ νόμον ἐκθετικόν, ὅπως καὶ ἡ ἀκτινοβολία τῶν ραδιενεργῶν στοιχείων, κατέληξαν εἰς τὸ συμπέρασμα, ὅτι ἡ ἐκπομπὴ αὕτη ὀφείλεται εἰς τεχνητὴν ραδιενέργειαν προκαλουμένην ὑπὸ τῶν ἀκτίνων α. Τῇ ἐπιδράσει τούτων πυρήνες τοῦ ἀργιλίου μετατρέπονται εἰς νέους ἀσταθεῖς, δηλ. εἰς πυρήνας ραδιενεργοῦ οὐσίας εἰς τὴν ὁποίαν ἀντιστοιχεῖ ὠρισμένος χρόνος ὑποδιπλασιασμοῦ, 3 min 15 sec, ὁ αὐτὸς πάντοτε καὶ ὅταν χρησιμοποιοῦνται πρὸς παραγωγὴν αὐτῆς ἀκτίνος α διαφόρου ἐνεργείας. Πρόκειται περὶ πυρήνων φωσφόρου (ῥαδιοφωσφόρου), παραγομένων καὶ μετατροπομένων κατὰ τὰς ἀντιδράσεις :



Ὅτι πρόκειται πράγματι περὶ στοιχείου ἔχοντος τὰς χημικὰς ιδιότητας τοῦ φωσφόρου, ἀπέδειξαν οἱ Curie - Joliot διαλύσαντες τὸ ραδιενεργὸν ἀργίλλιον (δηλ. τὸ μίγμα $Al_{13}^{27} + P_{15}^{30}$) ἐντὸς ὕδροχλωρίου, HCl. Τὸ Cl σχηματίζει μετὰ τοῦ Al χλωριοῦχον ἀργίλλιον ($AlCl_3$), ἐνῶ τὸ H ἐνοῦται μετὰ τοῦ φωσφόρου εἰς PH_3 , ὅπερ ἀπομακρύνεται ὑπὸ ἀερίαν μορφήν. Εὐρέθη πράγματι, ὅτι μετὰ τὴν ἀπομάκρυνσιν τοῦ ἀερίου τὸ διάλυμα $AlCl_3$ δὲν ἦτο πλέον ραδιενεργόν.

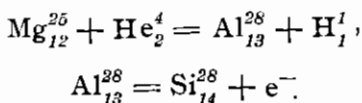
Οἱ Curie - Joliot¹, Meitner², καὶ ὁ Frisch³ ἔδειξαν

¹ I. Curie καὶ F. Joliot, C. R. Paris 198 (1934), p. 254, 559 Journ. d. Phys. 5 (1934), p. 153. ² L. Meitner, Naturwiss. 22 (1934), p. 420. ³ O. R. Frisch, Nature, 133 (1934), p. 721.

ὅτι καὶ ἄλλα ἑλαφρὰ στοιχεῖα καθίστανται ῥαδιενεργὰ καθ' ὅμοιον τρόπον, ἦτοι διὰ προσλήψεως ἑνὸς σωματιδίου α καὶ ἐκπομπῆς ἑνὸς οὐδετερονίου, τοῦ ῥαδιενεργοῦ στοιχείου μετατρεπομένου κατόπιν εἰς εὐσταθῆς δι' ἐκπομπῆς ἑνὸς e^{-} . Τὰ μέχρι σήμερον γνωστὰ τοιαῦτα εἶνε, ἐκτὸς τοῦ Al, τὰ Li_3^6 , Be_5^{10} , N_7^{14} , F_9^{19} , Na_{11}^{23} , Mg_{12}^{24} καὶ P_{15}^{31} , ἅτινα μετατρέπονται εἰς τὰ ῥαδιενεργὰ B_5^9 , N_7^{13} , F_9^{17} , Na_{11}^{22} , Al_{13}^{26} , Si_{14}^{27} καὶ Cl_{17}^{34} . Τὰ ῥαδιενεργὰ ταῦτα στοιχεῖα ἔχουν ἄτομ. βάρους μικρότερον τοῦ ἑλαφροτέρου ἰσοτόπου αὐτῶν, τὰ δὲ προϊόντα τοῦ μετασχηματισμοῦ των, ἦτοι ἀντιστοιχῶς τὰ Be_4^9 , C_6^{13} , O_8^{17} , Ne_{10}^{22} , Mg_{12}^{26} , Al_{13}^{27} , S_{16}^{34} εἶναι τάξεως μικροτέρας.

Οἱ χρόνοι ὑποδιπλασιασμοῦ εἶνε ἀσφαλῶς γνωστοὶ διὰ τὰ N_7^{13} , F_9^{17} , Al_{13}^{26} καὶ Cl_{17}^{34} καὶ ἀνέρχονται ἀντιστοιχῶς εἰς 10,5 min, 1,2 min, 7 sec, 40 min.

Ἐὰν ἓν στοιχεῖον ἀποτελεῖται ἐκ πλείονων ἰσοτόπων, δυνατόν νὰ διδῇ γένεσιν εἰς πλείονα ῥαδιενεργὰ. Τοιοῦτον εἶναι τὸ μαγνήσιον, τοῦ ὁποίου τὸ ἰσότοπον Mg_{12}^{25} μετατρέπεται εἰς ῥαδιενεργὸν ἀργίλλιον κατὰ τὴν ἀντίδρασιν ¹



Τὸ Al_{13}^{28} εἶναι, ἐν ἀντιθέσει πρὸς τὰ προηγούμενα ῥαδιενεργὰ στοιχεῖα, βαρύτερον τοῦ εὐσταθοῦς ἰσοτόπου του Al_{13}^{27} καὶ ἐκπέμπον ἓν ἀρνητικὸν ἠλεκτρόνιον, μετατρέπεται εἰς στοιχεῖον τάξεως ἀνωτέρας. Ὁ χρόνος ὑποδιπλασιασμοῦ αὐτοῦ εἶναι 2, 5 min.

Ἡ ἀνακάλυψις αὕτη ἦγαγε φυσικὰ εἰς τὴν ἀναζήτησιν τοῦ κατὰ πόσον εἶνε δυνατὴ ἡ παραγωγὴ ῥαδιενεργῶν στοιχείων τῇ βοήθειᾳ τῶν ἄλλων μέσων τῶν χρησιμοποιουμένων πρὸς θρυμματισμὸν τῶν ἀτόμων δηλ. τῶν πρωτονίων, οὐδετερονίων καὶ δευτερονίων.

Παραγωγὴ τεχνητῆς ῥαδιενεργείας διὰ πρωτονίων παρατηρήθη μόνον εἰς τὴν περίπτωσιν τοῦ ἀνθρακος ². Οἱ Crane καὶ Lauritsen ³ (1934) εὗρον τεχνητὴν ῥαδιενέργειαν καὶ εἰς τὴν περίπτωσιν τοῦ βορίου. Νεώτεροι ὁμοίως ἔρευναι ⁴ (1935) ἀπέδειξαν ὅτι τοῦτο δὲν συμβαίνει. Κατὰ

¹ J. Curie, F. Joliot, F. Preiswerk, C. R. Paris 193 (1934), p. 2089.

² J. D. Cockroft, C. W. Gilbert, E. T. S. Walton, Nature, 143 (1934), p. 328.

³ H. R. Crane, C. C. Lauritsen, Phys. Rev., 45 (1934), p. 497.

⁴ J. D. Cockroft, C. W. Gilbert, E. T. S. Walton, Proc. Roy. Soc. (A) 148 (1935), p. 225.

τὴν μετατροπὴν τοῦ ἄνθρακος λαμβάνουν πιθανῶς χώραν αἱ ἀντιδράσεις

$$C_6^{12} + H_1^1 = N_7^{13}, N_7^{13} = C_6^{13} + e^-.$$

$$C_6^{13} + H_1^1 = N_7^{13} + n_0^1, N_7^{13} = C_6^{13} + e^-.$$

(χρόνος ὑποδιπλασιασμοῦ 11 ± 1 min).

Ἡ χημ. ἐξέτασις τῆς ῥαδιενεργοῦ οὐσίας δίδει ἀποτελέσματα σύμφωνα με τὴν παραδοχὴν ὅτι αὕτη εἶναι ἰσότοπος τοῦ ἀζώτου, χωρὶς ὅμως νὰ ἀποκλείεται νὰ εἶναι ἄλλο τι ἀέριον π. χ. ὄξυγόνον.

Ἡ δι' οὐδτερονίων μετατροπὴ εὐσταθῶν στοιχείων εἰς ῥαδιενεργὰ ἐμελετήθη ἰδίως ὑπὸ τοῦ Fermi¹ καὶ τῶν συνεργατῶν του ἐν Ρώμῃ. Οὗτοι κατώρθωσαν ἐκ 59 στοιχείων, ἅτινα ἐξήτασαν, νὰ μετατρέψουν τὰ 39 εἰς ῥαδιενεργὰ. Ὁ ἄμεσος προσδιορισμὸς τοῦ χημικοῦ χαρακτῆρος τοῦ παραγομένου ῥαδιενεργοῦ στοιχείου ἐπετεύχθη εἰς 16 περιπτώσεις.

Διεπιστώθησαν μέχρι σήμερον τριῶν εἰδῶν ἀντιδράσεις, λαμβάνουσαι χώραν κατὰ τὰς μετατροπὰς ταύτας. Ἐὰν A εἶναι τὸ ἀτομικὸν βάρους καὶ z ἡ τάξις τοῦ στοιχείου ἐν τῷ περιοδικῷ συστήματι, δυνάμεθα νὰ παραστήσωμεν τὰς ἀντιδράσεις ὡς ἑξῆς:

$$\begin{aligned} A_z + n_0^1 &= (A-3)_{z-2} + He_2^4, & (A-3)_{z-2} &= (A-3)_{z-1} + e^-, \\ A_z + n_0^1 &= A_{z-1} + H_1^1, & A_{z-1} &= A_z + e^-, \\ A_z + n_0^1 &= (A+1)_z, & (A+1)_z &= (A+1)_{z+1} + e^-. \end{aligned}$$

Καὶ εἰς τὰς τρεῖς περιπτώσεις οἱ παραγόμενοι ῥαδιενεργοὶ πυρῆνες μετατρέπονται δι' ἐκπομπῆς ἑνὸς e^- , εἰς πυρῆνας ἀνωτέρας τάξεως. Αἱ δύο πρῶται ἀντιδράσεις λαμβάνουν χώραν μόνον διὰ σχετικῶς ἐλαφρὰ στοιχεῖα, πρᾶγμα τὸ ὁποῖον ἐξηγεῖται ἐκ τοῦ ὅτι, διὰ νὰ ἀποσπασθῇ ἀπὸ τὸν πυρῆνα ἓν σωμα. α ἢ ἓν πρωτόνιον, πρέπει νὰ ὑπερνικήσῃ τὰς ἐλκτικὰς δυνάμεις τοῦ ὑπολοίπου τοῦ πυρῆνος, αἵτινες ἀξάνουν πολὺν μὲ τὴν τάξιν καὶ τὸ ἀτομ. βάρους τοῦ στοιχείου.

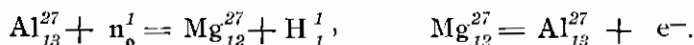
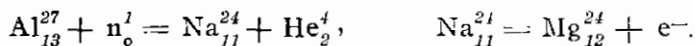
Κατὰ τὴν τρίτην ἀντίδρασιν μετατρέπονται ἐλαφρὰ καὶ βαρέα στοιχεῖα (ὅταν ἡ ἐνέργεια τῶν οὐδτερονίων εἶνε ἀρκετὰ μεγάλη μόνον τὰ τελευταῖα), ἀπὸ τοῦ βαναδίου V_{23}^{51} μέχρι τοῦ οὐρανίου.

Ἡ δι' οὐδτερονίων παραγωγή τεχνητῆς ῥαδιενεργείας ἐκτείνεται μέχρι τοῦ τελευταίου στοιχείου τοῦ περιοδικοῦ συστήματος, τοῦ οὐρανίου,

¹ E. Amaldi, O. d' Agostino, E. Fermi, B. Pontecorvo, F. Rasetti, E. Segrè, Proc. Roy. Soc. (A) 146 (1934), p. 483· 149 (1935), p. 522.

ἀλλ' ἡ ἔρμηνεία τῶν μετατροπῶν αἵτινες λαμβάνουν χώραν παρουσιάζει εἰς πολλὰς περιπτώσεις βαρέων στοιχείων δυσκολίας.

Ὡς παράδειγμα μετατροπῆς σχετικῶς ἑλαφροῦ στοιχείου ἀναφέρομεν τὸ ἀργίλλιον, διὰ τὸ ὁποῖον παρειρηγήθησαν καὶ αἱ τρεῖς ἀντιδράσεις, αἱ δύο πρῶται μόνον κατὰ τὸν βομβαρδισμόν διὰ ταχέων οὐδετερονίων, ἡ δὲ τρίτη μόνον κατὰ τὸν βομβαρδισμόν διὰ βραδέων, οὕτως ὥστε τὸ οὐδετερόνιον νὰ εἰσέρχεται μὲν ἐντὸς τοῦ πυρῆνος ἀλλὰ νὰ μὴ δύναται νὰ ἀποσπάσῃ συστατικὰ αὐτοῦ:



Ὁ χαρακτήρ τῶν προκυπτόντων ῥαδιενεργῶν στοιχείων προσδιορίσθη διὰ χημικῶν μεθόδων. Οἱ χρόνοι ὑποδιπλασιασμοῦ εὐρέθησαν ἴσοι πρὸς 15 h διὰ τὸ Na_{11}^{24} , 10 min διὰ τὸ Mg_{12}^{27} καὶ 2, 5 min διὰ τὸ Al_{13}^{28} . Ὁ τελευταῖος οὗτος χρόνος συμπίπτει μὲ τὸν ἀντιστοιχοῦντα εἰς τὸ Al_{13}^{28} τὸ προκύπτον, ὡς ἀνωτέρω ἀναφέρομεν, ἐκ τοῦ Mg_{12}^{28} διὰ βομβαρδισμοῦ μὲ ἀκτῖνας α, πρᾶγμα τὸ ὁποῖον ἀποδεικνύει, ὅτι πρόκειται περὶ τῆς αὐτῆς ῥαδιενεργοῦ οὐσίας.

Ὡς παραδείγματα μετατροπῆς βαρέων στοιχείων ἀναφέρομεν τὸ βανάδιον καὶ τὸν χρυσὸν (Au_{79}^{197}):



(χρόνος ὑποδιπλασιασμοῦ $T=4$ min).

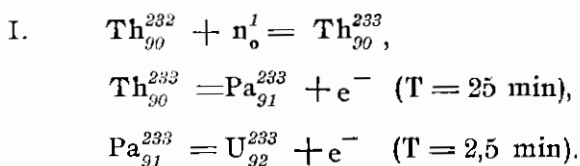


($T=2,7$ d).

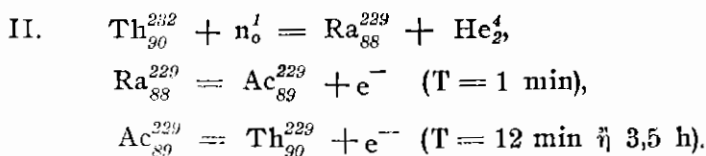
Ἰδιαιτέρον ἐνδιαφέρον παρουσιάζουν τὰ τεχνητὰ ῥαδιενεργὰ στοιχεία, ἅτινα παράγονται κατὰ τὸν βομβαρδισμόν τοῦ θορίου (Th_{90}^{232}) καὶ τοῦ οὐρανίου (U_{92}^{238}) δι' οὐδετερονίων.

Τὰ φυσικὰ ῥαδιενεργὰ στοιχεία τῆς σειρᾶς τοῦ θορίου ἔχουν στρογγυλεωμένα ἀτομικὰ βάρη, δυνάμενα νὰ παρασταθοῦν διὰ τοῦ συμβόλου $4n$, ὅπου n ἀκέραιος ἀριθμὸς (διὰ τὸ θόριον π. χ. $n=58$). Τὰ ἀτομ. βάρη τῶν στοιχείων τῆς σειρᾶς τοῦ ῥαδίου δύναται νὰ παρασταθοῦν διὰ

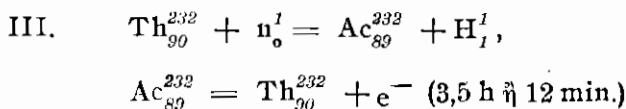
$4n + 2$, καὶ τῆς σειρᾶς τοῦ ἄκτινίου διὰ $4n + 3$. Ἐλείπε ἐπομένως μέχρι τοῦδε ἡ σειρά μὲ ἄτομ. βάρη τῆς μορφῆς $4n + 1$. Οἱ Hahn καὶ Meitner¹ καὶ οἱ Curie, Halban καὶ Preiswerk² ἀπέδειξαν ὅτι ἡ σειρά αὕτη ἀποτελεῖται ἀπὸ ῥαδιενεργὰ στοιχεῖα, γεννώμενα κατὰ τὸν βομβαρδισμόν τοῦ θορίου μὲ οὐδετερόνια. Παράγονται πέντε ῥαδιενεργὰ στοιχεῖα μὲ χρόνον ὑποδιπλασιασμοῦ 1 min, 2,5 min, 12 min, 25 min καὶ 3,5 h, ἅτινα παριστῶμεν μὲ R (1 min) κ.λ.π. Κατὰ τοὺς Curie, Halban καὶ Preiswerk τὰ R (3,5 h) καὶ R (12 min) εἶνε ἰσότοπα τοῦ ἄκτινίου, τὸ R (1 min) ἰσότοπον τοῦ ραδίου καὶ τὸ R (2,5 min) ἰσότοπον τοῦ πρωτακτινίου (Pa_{91}^{231}) καὶ παράγωγον τοῦ R (25 min), τὸ ὁποῖον ἀπεδείχθη χημικῶς ὡς ἰσότοπον τοῦ θορίου, ἔχει δὲ ἄτομ. βάρος 233 (Fermi). Ἡ παραγωγή τῶν ῥαδιενεργῶν αὐτῶν στοιχείων, ἐρμηνεύεται ὑπὸ τῶν ἐξῆς ἀντιδράσεων :



Τὸ U_{92}^{233} ἐκπέμπει πιθανῶς ἀκτινοβολίαν α καὶ ἔχει μέγαν χρόνον ὑποδιπλασιασμοῦ.



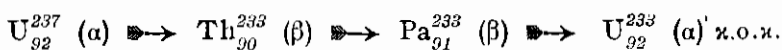
Τὸ Th_{90}^{229} εἶνε πιθανῶς, κατ' ἀναλογίαν πρὸς τὰς φυσικὰς ῥαδιενεργοῦς σειρὰς, ῥαδιενεργὸν στοιχεῖον ἐκπέμπον ἀκτινοβολίαν α, μὲ μέγαν χρόνον ὑποδιπλασιασμοῦ.



¹ O. Hahn καὶ L. Meitner, Naturw. 23 (1935), p. 320.

² I. Curie, H. v. Halban, P. Preiswerk, Journ. d. Phys. VI (1935), p. 361.

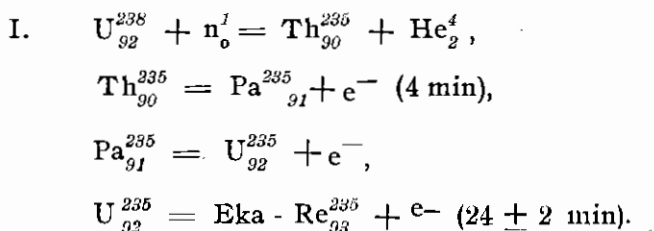
Τὰ κατὰ τὰς ἀντιδράσεις I. παραγόμενα ῥαδιενεργὰ στοιχεῖα ἀποτελοῦν μέλη τῆς σειρᾶς $4n+1$, ἥτις εἶναι ἡ ἀκόλουθος:



Τὸ γράμμα ἐντὸς ἐκάστης παρενθέσεως παριστᾷ τὴν ἀκτινοβολίαν, τὴν ὁποίαν ἐκπέμπει τὸ προηγούμενον τῆς παρενθέσεως στοιχεῖον.

Εἰς τὴν περίπτωσιν τοῦ οὐρανίου παρατηρήθησαν ὑπὸ τοῦ Fermi τέσσαρες χρόνοι ὑποδιπλασιασμοῦ ἴσοι πρὸς 10 sec, 40 sec, 13 min, 100 min, ἀντιστοιχοῦντες εἰς τέσσαρας διαφόρους ῥαδιενεργούς πυρῆνας. Ἡ χημικὴ ἐξέτασις τῶν δύο τελευταίων ἀπέδειξεν, ὅτι οὗτοι δὲν εἶνε ἰσότοποι μὲ κανὲν ἐκ τῶν στοιχείων ἀπὸ τοῦ Hg₈₀ μέχρι τοῦ U₉₂, ἐπομένως φαίνεται ὅτι ἡ τάξις των εἶνε μεγαλυτέρα τοῦ 92. Κατὰ τὸν Fermi (1934) ὁ πυρὴν τῶν 13 min ἀνήκει εἰς στοιχεῖον τάξεως 93 (Eka-henium) καὶ ὁ τῶν 100 min εἶνε ἰσότοπος αὐτοῦ, ἐνῶ κατὰ τοὺς Hahn καὶ Meitner προέρχεται ἐκ τούτου δι' ἐκπομπῆς ἑνὸς e⁻ καὶ ἀνήκει εἰς στοιχεῖον τάξεως 94 (Ekaosmium) Νεώτεροι ἔρευναὶ τῶν Fermi¹ κ.λ.π., Hahn καὶ Meitner² Hahn, Meitner καὶ Strassmann³ ἀπέδειξαν ὅτι οἱ δύο οὗτοι πυρῆνες δὲν εἶνε ἰσότοποι καὶ ὅτι παράγεται καὶ πέμπτος ῥαδιενεργὸς πυρὴν μὲ χρόνον ὑποδιπλασιασμοῦ περὶ τὰς 3,5 d., ἀνήκων, ὡς καὶ οἱ δύο προηγούμενοι, εἰς στοιχεῖον τάξεως μεγαλυτέρας τοῦ 92 καὶ μὴ ἰσότοπος πρὸς τὸν πυρῆνα τῶν 100 min.

Οἱ Hahn καὶ Meitner συνεχίζοντες τὰς ἐρεῦνας των, ἀνεκάλυψαν καὶ ἄλλα προϊόντα μετασηματισμοῦ, τῶν ὁποίων κατώρθωσαν νὰ προσδιορίσουν τὸ χημικὸν χαρακτῆρα. Κατὰ τὴν τελευταίαν ἀνακοίνωσιν αὐτῶν⁴ τὰ προϊόντα ταῦτα εἶναι δέκα, ἡ παραγωγή δὲ αὐτῶν ἐρμηνεύεται ὑπὸ τῶν ἀκολούθων ἀντιδράσεων:



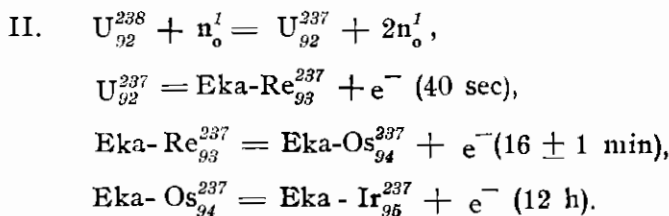
¹ E. Amaldi, O. d' Agostino, E. Fermi, B. Pontecorvo, E. Segrè, Ric. sci. Progresso tecn. Econ. naz. 6 (1935), p. 435.

² O. Hahn καὶ L. Meitner, Naturw. 23 (1935), p. 230.

³ O. Hahn, L. Meitner καὶ F. Strassmann Naturw. 23 (1935), p. 544.

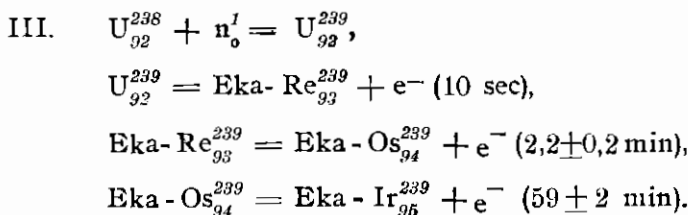
⁴ O. Hahn καὶ L. Meitner, Naturw. 24 (1936), p. 158.

Ὁ χρόνος ὑποδιπλασιασμοῦ τοῦ Pa_{91}^{235} δὲν προσδιορίσθη. Διὰ φωτογραφιῶν ἐν θαλάμῳ Wilson ἀπεδείχθη ὅτι τὸ U_{92}^{235} ἐκπέμπει ἀκτινοβολίαν β καὶ ἐπομένως μετατρέπεται εἰς στοιχεῖον τάξεως 93 καὶ ὁμόλογον τοῦ ῥηνίου (Re_{75})¹, τὸ ὁποῖον παρίσταται μὲ τὸ σύμβολον Eka-Re_{93}^{235} . Εἰς τὴν μετατρέπεται τὸ τελευταῖον τοῦτο (πιθανῶς δὲ ἐκπομπῆς ἀκτίνων α) δὲν ἐξηκριβώθη ἀκόμη.



Τὸ Eka-Re_{93}^{237} θεωρεῖται ὡς συμπύκνωση μὲ τὸ στοιχεῖον διὰ τὸ ὁποῖον ὁ Fermi δίδει χρόνον ὑποδ. 13 min.

Διὰ τὸ Eka-Os_{94}^{237} , ὁμόλογον τοῦ ὁσμίου Os_{76} ², ὑποτίθεται ὅτι ἔχει χρόνον ὑποδ. 12 h, ἡ ἕπαρξις τοῦ ὁποῖου διεπιστώθη ὑπὸ τῶν Hahn καὶ Meitner, διότι εἶναι βέβαιον ὅτι ἀπὸ τὸ Eka-Re_{93}^{237} δὲν προκύπτει προϊόν μὲ χρόνον ὑποδ. μικρότερον ὠρῶν τινων. Καὶ ἐδῶ δὲν εἶναι γνωστὸν εἰς τὴν μετατρέπεται τὸ Eka-Ir_{95}^{237} .



Ἡ κατ' ἀρχὰς ὑπὸ τοῦ Fermi εὑρεθεῖσα οὐσία μὲ χρόνον ὑποδ. 100 min, ἀποδεικνύεται ὡς μίγμα τῶν οὐσιῶν μὲ χρόνους 59 min καὶ 12 h.

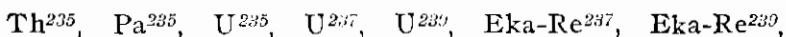
Ἡ κατάταξις τῆς οὐσίας μὲ χρόνον ὑποδ. 3 d εἶναι ἀκόμη ἀμφίβολος. Πιθανῶς πρόκειται περὶ τοῦ Eka-Ir_{95}^{239} τοῦ παραγομένου ἐκ τοῦ

¹ Τὸ Re ἀποτελεῖται ἐκ δύο γνωστῶν ἰσοτόπων, Re_{75}^{185} , Re_{75}^{187} .

² Τὰ μέχρι σήμερον γνωστά ἰσότοπα τοῦ ὁσμίου εἶναι ἔξ, Os_{76}^{186} ἕως Os_{76}^{192} (δὲν ὑπάρχει τὸ Os_{76}^{191}).

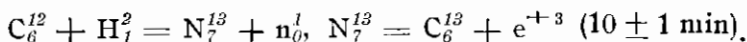
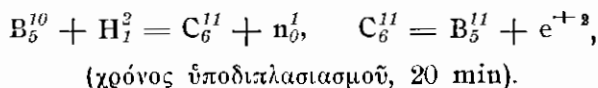
Eka-Os²³⁹. Το Eka-Ir²³⁹₉₅ ὡς εκπέμπον ἀκτινόβολιαν β μετατρέπεται εἰς Eka-Pt²³⁹₉₆ (ὁμόλογον τῆς πλατίνης).

Οὕτω ἔχομεν ἐκ τοῦ οὐρανίου τὰ δέκα τεχνητὰ ῥαδιενεργὰ στοιχεῖα:



Eka-Os²³⁷ (πιθανῶς), Eka-Os²³⁹, Eka-Ir²³⁹ (πιθανῶς), ἐκ τῶν ὁποίων τὰ πέντε εἶναι τάξεως μεγαλυτέρας τοῦ 92.

Πολὴ εὐνοϊκὰ ἀποτελέσματα ἀπέδωσεν ἐπίσης ὁ βομβαρδισμὸς τῶν ἐλαφρῶν στοιχείων διὰ δευτερονίων. Πρῶτοι οἱ Henderson, Livingston καὶ Lawrence¹, ἐξετάσαντες ἀπὸ τῆς ἀπόψεως ταύτης ὅλα τὰ στοιχεῖα ἀπὸ τοῦ λιθίου μέχρι τοῦ χλωρίου (ἐκτὸς τοῦ νέου καὶ τοῦ θείου), παρέτήρησαν εἰς ὅλα τεχνητὴν ῥαδιενέργειαν, προσδιώρισαν δὲ κατὰ προσέγγισιν καὶ τινὰς χρόνους ὑποδιπλασιασμοῦ. Ἐν συνεχείᾳ ἐμελετήθησαν αἱ μετατροπαὶ αὗται καὶ ὑπὸ ἄλλων, προσδιορισθέντων τοῦ χρόνου ὑποδιπλασιασμοῦ καὶ τοῦ χημικοῦ χαρακτῆρος τοῦ παραγομένου ῥαδιενεργοῦ στοιχείου. Τοιαῦται περιπτώσεις εἶνε π. χ.



Κατὰ τὸν αὐτὸν τρόπον μετατρέπονται τὰ N¹¹₇, O¹⁶₈, εἰς τὰ ῥαδιενεργὰ O¹⁵₈ καὶ F¹⁷₉ καὶ ταῦτα πάλιν εἰς τὰ εὐσταθεῖ N¹⁵₇, O¹⁷₈, (χρόνοι ὑποδιπλασιασμοῦ 126 ± 5 sec, 1,16 min)⁴. Ἀπεναντίας τὸ Al²⁷₁₃ μετατρέπεται κατὰ τὴν ἀντίδρασιν:



¹ M. C. Henderson, M. S. Livingston, E. O. Lawrence, Phys. Rev. 45 (1934), p. 428.

² J. D. Cockroft, C. W. Gilbert, E. T. S. Walton, Proc. Roy. Soc. (A) 148 (1935), p. 225.

³ C. C. Lauritsen, H. R. Crane, W. W. Harper, Science (1934), p. 234. Ὁ χημικὸς χαρακτῆρ τῶν C¹¹₆ καὶ N¹³₇ ἐξηκριβώθη ὑπὸ τῶν D. M. Yost, K. N. Ride-nour καὶ K. Shinohara (Journ. Phys. Chem. 3 (1935), p. 133).

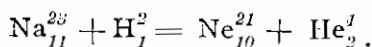
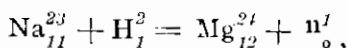
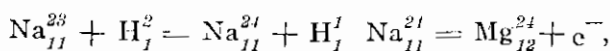
⁴ E. Mac. - Millan καὶ M. S. Livingston, Phys. Rev. 47 (1935), p. 452. H. W. Newson, Phys. Rev. 48 (1935), p. 482.

⁵ E. O. Lawrence Phys. Rev. 46 (1934), p. 746.

Ὅμοίως μετατρέπονται τὰ Si_{14}^{30} , P_{15}^{31} εἰς τὰ ῥαδιενεργὰ Si_{14}^{31} , P_{15}^{32} καὶ ταῦτα εἰς τὰ εὐσταθῆ P_{15}^{31} , S_{16}^{32} (170 min, 14, 5 d).

Ὁ Lawrence¹ μελετήσας τὴν μετατροπὴν τοῦ νατρίου, ἔδειξεν ὅτι τοῦτο ὑπὸ τὴν ἐπίδρασιν δευτερονίων ἐκπέμπει ἀκτῖνας α, πρωτόνια καὶ οὐδετερόνια καὶ καθίσταται ῥαδιενεργόν. Ἡ χημικὴ ἐξέτασις τῆς ῥαδιενεργοῦ οὐσίας ἀπέδειξεν ὅτι εἶναι ἰσότοπος τοῦ νατρίου. Τὸ ῥαδιοαίτιον τοῦτο ἐκπέμπει ἀκτῖνας β συνοδευομένας ὑπὸ λίαν διαπεραστικῆς καὶ ἐντατικῆς ἀκτινοβολίας γ (ἐνεργείας 5,5 MeV). Ὁ χρόνος ὑποδιπλασιασμοῦ αὐτοῦ εὐρέθη ἴσος πρὸς 15,5 h.

Αἱ κατὰ τὴν μετατροπὴν τοῦ νατρίου λαμβάνουσαι χώραν ἀντιδράσεις εἶναι αἰ. ἀκόλουθοι:



Ὁ Lawrence κατώρθωσε νὰ παρασκευάσῃ ποσότητα ῥαδιονατρίου ἐκπέμπουσαν 10^7 ἠλεκτρόνια ἀνὰ sec. Ἡ ἀκτινοβολία τοῦ ῥαδιονατρίου εἶναι, χάρις εἰς τὴν διαπεραστικότητά καὶ τὴν μεγάλην διάρκειάν της, λίαν κατάλληλος δι' ἱατρικοὺς σκοποὺς.

Ὅλα τὰ μέχρι τοῦδε παρασκευασθέντα τεχνητὰ ῥαδιενεργὰ στοιχεῖα ἐκπέμπουν θετικὰ καὶ ἀρνητικὰ ἠλεκτρόνια, ἐνίοτε δὲ καὶ ἀκτῖνας γ. Ἐκπομπὴ βαρυτέρων σωματιδίων (n_0^1 , H_1^1 , He_2^4) δὲν παρατηρήθη μέχρι τοῦδε.

Ἡ ἀπόδοσις εἰς ῥαδιενεργὸν οὐσίαν κατὰ τὰς μετατροπὰς δι' ἀκτῖνων α, πρωτονίων καὶ δευτερονίων, αὐξάνει αὐξανομένης τῆς ἐνεργείας τῶν χρησιμοποιουμένων βλημάτων. Ἡ σχετικὴ ἀπόδοσις κυμαίνεται ἀπὸ 10^{-10} ἕως 10^{-6} , εἶναι δέ, προκειμένου περὶ τοῦ αὐτοῦ στοιχείου, πολὺ μεγαλύτερα κατὰ τὴν μετατροπὴν διὰ δευτερονίων, ἢ κατὰ τὴν μετατροπὴν διὰ πρωτονίων.

Οὕτω κατὰ τὰς μετρήσεις τῶν Ellis καὶ Henderson² ἡ σχετικὴ ἀπόδοσις κατὰ τὴν μετατροπὴν τοῦ Al_{13}^{27} εἰς ῥαδιενεργὸν P_{15}^{30} δι' ἀκτῖνων α, αὐξάνει ἀπὸ $9 \cdot 10^{-9}$ ἕως $4,14 \cdot 10^{-6}$, ὅταν ἡ ἐνέργεια τῶν σωματιδίων α αὐξάνει ἀπὸ $3,9 \cdot 10^6$ eV ἕως $8,25 \cdot 10^6$ eV.

Ἡ ἀπόδοσις τοῦ ἀνθρώπου εἰς ῥαδιενεργὸν ἄζωτον εἶναι κατὰ μὲν

¹ E. O. Lawrence, Phys. Rev. 47 (1935), p. 17.

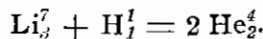
² Ellis καὶ Henderson, Proc. Roy. Soc. (A) 146 (1934), p. 206.

τήν μετατροπήν του διὰ πρωτονίων $2 \cdot 10^{-10}$, κατὰ τὴν διὰ δευτερονίων $2 \cdot 10^{-9}$, ἥτοι δεκαπλασία τῆς προηγουμένης ¹.

Ἡ ἀπόδοσις εἰς ῥαδιενεργὸν οὐσίαν κατὰ τὴν παραγωγὴν δι' οὐδετερονίων, αὐξάνει μὲ τὴν ἐνέργειαν τῶν βλημάτων ὅταν ἡ μετατροπὴ γίνεται κατὰ τὴν πρώτην ἢ δευτέραν ἀντίδρασιν τῆς σελ. 356. Ἄπ' ἐναντίας ἐὰν ἡ μετατροπὴ γίνεται κατ' ἀντίδρασιν τοῦ τρίτου τύπου, ἡ ἀπόδοσις αὐξάνει, ἐλαττωμένης τῆς ἐνεργείας τῶν οὐδετερονίων. Ὁ Fermi ² καὶ οἱ v. Grosse καὶ Agruss ³ ἀπέδειξαν, ὅτι αἱ ὑδρογονοῦχοι οὐσίαι ἔχουσι κατ' ἔξοχὴν τὴν ιδιότητα νὰ ἐλαττώνουν τὴν ταχύτητα τῶν οὐδετερονίων.

12. Σχέσεις ἐνεργείας κατὰ τὰ φαινόμενα τοῦ πυρῆνος. Ἐν ἐκ τῶν σπουδαιότερων χαρακτηριστικῶν τῶν φαινομένων τοῦ πυρῆνος εἶναι τὰ κολοσιαῖα ποσὰ ἐνεργείας, ἅτινα ἐκλύονται ἢ ἀπορροφῶνται κατὰ τὰ φαινόμενα ταῦτα. Ἐνῶ τὰ ποσὰ ἐνεργείας τὰ μετατρεπόμενα κατὰ τὰς μεταβολὰς τοῦ ἐξωτερικοῦ στρώματος ἠλεκτρονίων τοῦ ἀτόμου (ιονισμόν, χημικὴν ἔνωσιν) εἶνε τάξεως 5 eV, τὰ ἐκλύομενα ἢ ἀπορροφώμενα, ὅταν λαμβάνουν χώραν μεταβολαὶ εἰς τὸν πυρῆνα εἶναι περὶ τὰς 10^6 φορές μεγαλύτερα. Τοῦτο ἦτο γνωστὸν ἀπὸ τὰς μετρήσεις τὰς σχετικὰς μὲ τὴν φυσικὴν ῥαδιενέργειαν (τῶν ταχυτήτων τῶν ἀκτίνων α καὶ β, τοῦ μήκους κύματος τῶν ἀκτίνων γ).

Τὰ ποσὰ ταῦτα ἐνεργείας προκαλοῦσιν, λόγῳ τοῦ μεγέθους των, αἰσθητὰς μεταβολὰς τῆς μάζης τῶν ὑλικῶν σωματιδίων, ὑπὸ τῶν ὁποίων ἐκλύονται ἢ ἀπορροφῶνται. Γνωρίζοντες ἐπομένως τὰς μεταβολὰς μάζης δυνάμεθα νὰ ὑπολογίσωμεν τὰ ἀντίστοιχα ποσὰ ἐνεργείας καὶ ἀντιστρόφως. Εἶδομεν π.χ. ὅτι οἱ Cockroft καὶ Walton ἐπέτυχον τὸν θρυμματισμὸν τοῦ λιθίου κατὰ τὴν ἀντίδρασιν.



Τὰ ἀτομ. βάρη τῶν στοιχείων τούτων εἶναι

$$\text{Li}^7 = 7,0146, \text{H}^1 = 1,00778, \text{He}^4 = 4,00216.$$

Ἡ μάζα τοῦ παραγομένου ἡλίου εἶνε μικροτέρα τοῦ ἀθροίσματος τῶν μαζῶν τοῦ λιθίου καὶ ὑδρογόνου καθ' ὅσον

$$7,0146 + 1,00778 = 2 \cdot 4,00216 + \Delta m$$

$$\Delta m = 0,0181.$$

¹ Cockroft, Gilbert καὶ Walton, Proc. Roy. Soc. (A) 148 (1935), p. 225.

² Fermi κ.λ.π., Proc. Roy. Soc. (A) 146 (1934), p. 483.

³ v. Grosse καὶ Agruss, Phys. Rev. 47 (1935), p. 91.

Ἦτοι κατὰ τὸν θρυμματισμὸν 7,0146 gr. λιθίου (Li^7) διὰ πρωτονίων ἔχομεν ἀπώλειαν μάζης 0,0181 gr., ἄρα κατὰ τὸν θρυμματισμὸν ἑνὸς ἀτόμου λιθίου ἔχομεν ἀπώλειαν μάζης $\frac{0,0181}{6,06 \cdot 10^{23}}$ (διότι εἰς 7,0146 gr. λιθίου 7 περιέχονται $6,06 \cdot 10^{23}$ ἄτομα), εἰς τὴν μάζαν ταύτην ἀντιστοιχεῖ ἐνέργεια $\frac{0,0181}{6,06 \cdot 10^{23}} \cdot 9 \cdot 10^{20} = 27 \cdot 10^{-6}$ erg. Ἐτέρου ἢ κινητικῆ ἐνέργεια

ἐκάστου τῶν σωματιδίων α εὐρέθη ἴση μὲ $13,6 \cdot 10^{-6}$ erg δηλ. περίπου ἴση μὲ τὸ $\frac{1}{2}$ τῆς ἀνωτέρω. Ἐπομένως ἡ ἀπωλεσθεῖσα μάζα μετετράπη πρᾶγματι εἰς κινητικὴν ἐνέργειαν τῶν σωματιδίων α.¹

Ἀντιστρόφως, ἐὰν γνωρίζωμεν τὴν κινητ. ἐνέργειαν ὄλων τῶν σωματιδίων, ἅτινα λαμβάνουν μέρος εἰς ἀντίδρασιν τινα καὶ τὸ ποσὸν τῆς ἠλεκτρομαγνητικῆς ἀκτινοβολίας, ἣτις ἐνδεχομένως ἐκλύεται κατὰ τὴν ἀντίδρασιν ὡς καὶ ὄλας τὰς μάζας πλὴν μᾶς, δυνάμεθα νὰ ὑπολογίσωμεν ταύτην. Οὕτως ὑπολογίζεται ἡ μάζα τοῦ οὐδετερονίου ἐκ διαφόρων ἀντιδράσεων (ὁ πρῶτος ὑπολογισμὸς ὑπὸ τοῦ Chadwick ἐπὶ τῇ βίψει τῆς ἀντιδράσεως $\text{B}_6^{11} + \text{He}_2^4 = \text{N}_7^{14} + \text{p}_0^1$ ἔδωσε τὴν τιμὴν 1,0067).

Κατὰ τὸν ἴδιον τρόπον ἐξηγεῖται τὸ γεγονός, ὅτι αἱ μάζαι τῶν διαφόρων πυρῆνων δὲν εἶναι ἀκριβῶς ἀκέραια πολλαπλάσια τῆς μάζης τοῦ πρωτονίου². ἄλλὰ παρουσιάζουν μικρὰς διαφορὰς. Πράγματι κατὰ τὴν σύνθεσιν πυρῆνος τινος ἐκ τῶν συστατικῶν του (πρωτονίων καὶ ἠλεκτρονίων) πρέπει, ἵνα ὁ πυρῆν εἶναι εὐσταθής, νὰ ἔχωμεν ἔκλυσιν ἐνεργείας, καὶ ἀντιστρόφως διὰ νὰ διασπῶμεν τὸν πυρῆνα εἰς τὰ συστατικά του, πρέπει νὰ καταναλώσωμεν τὸ αὐτὸ ποσὸν ἐνεργείας. Ἡ μάζα τοῦ θεωρουμένου πυρῆνος θὰ εἶναι ἐπομένως μικροτέρα τοῦ ἀθροίσματος τῶν μαζῶν τῶν συστατικῶν του κατὰ τὴν μάζαν τῆς ἐνεργείας ταύτης. Εἰς ἕκαστον πυρῆνα ἀντιστοιχεῖ κατὰ ταῦτα μία ὀρισμένη διαφορὰ μάζης (défaut de masse, Massendefekt), δίδουσα τὸν βαθμὸν εὐσταθείας τοῦ πυρῆνος.

Οὕτω π. χ. διὰ τὸν πυρῆνα τοῦ ἡλίου He_2^4 , ἐὰν λάβωμεν ὑπ' ὄψιν ὅτι οὗτος ἀποτελεῖται ἀπὸ 4 πρωτόνια καὶ 2 ἠλεκτρόνια, ὅτι ἡ ἀτομικὴ του μάζα εἶνε $4,00216 - 2m_e$ ³ καὶ ἡ μάζα τοῦ πρωτονίου 1,00778— m_p

¹ Κατὰ τὸν συλλογισμὸν τοῦτον παρελείφθη ἡ ἐνέργεια τοῦ θρυμματίζοντος πρωτονίου. Αὕτη εἰς τὰ πειράματα τῶν Cockroft-Walton ἦτο τάξεως 100000 e V δηλ. περίπου 10^{-7} erg., πολὺ μικροτέρα τῆς ἐνεργείας τῶν σωματιδίων α.

² Ἀκριβέστερον ἡ μάζα ἐκάστου πυρῆνος εἶνε διάφορος τοῦ ἀθροίσματος τῶν μαζῶν τῶν ἀπαρτιζόντων αὐτὸν πρωτονίων καὶ ἠλεκτρονίων.

³ $m_p = 0,00054$ εἶνε ἡ μάζα τοῦ ἠλεκτρονίου εἰς μονάδας ἀτομ. μάζης, δηλ. ἡ μάζα ὄλων τῶν ἠλεκτρονίων ἅτινα περιέχονται εἰς τὴν ἀτομ. μάζαν τοῦ ὑδρογόνου.

εὐρίσκομεν διαφορὰν μάζης :

$$4(1,00778 - m_a) + 2m_a - (4,00216 - 2m_a) = 0,02896.$$

Ἦτοι διὰ 4,00216 gr. ἡλίου ἔχομεν διαφορὰν μάζης 0,02896 gr. Ἐπειδὴ δὲ εἰς 4,00216 gr. ἡλίου περιέχονται $6,06 \cdot 10^{23}$ πυρῆνες, ἡ διαφορὰ μάζης ἑνὸς πυρῆνος θὰ εἶναι

$$\frac{0,02896}{6,06} \cdot 10^{23} = 48 \cdot 10^{-27} \text{ gr.}$$

Ἡ ἐνέργεια ἡ ἀντιστοιχοῦσα εἰς τὴν μάζαν ταύτην εἶναι ἴση πρὸς $48 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{20} \text{ erg.}$ ἢ $28 \cdot 10^6 \text{ eV}^1$. Τὸ ποσὸν τοῦτο ἐνεργείας εἶναι τρεῖς ἕως πέντε φορὰς μεγαλύτερον ἀπὸ τὰ ποσὰ ἐνεργείας, ἅτινα ἐκλύονται ἢ ἀπορροφῶνται κατὰ τὰς ἀντιδράσεις τῶν πυρῆνων, πρῶγμα τὸ ὁποῖον ἐξηγεῖ τὴν μεγάλην εὐστάθειαν τοῦ πυρῆνος τοῦ ἡλίου καὶ δικαιολογεῖ τὴν παραδοχὴν, ὅτι τὰ πρωταρχικὰ συστατικὰ τῶν βαρύτερων πυρῆνων εὐρίσκονται ἐντὸς αὐτῶν συντεθειμένα ἐν μέρει εἰς σωματίδια α.

13. Θεωρία τῶν φαινομένων τοῦ πυρῆνος. Ὡς καὶ ἐν ἀρχῇ ἀνεφρόμεν, ἀπέχομεν σήμερον ἀκόμη πολὺ ἀπὸ τοῦ νὰ ἔχωμεν πλήρη θεωρητικὴν περιγραφὴν τῶν φαινομένων τοῦ πυρῆνος. Ἡ Μηχανικὴ τῶν Quanta, ἐπαρκοῦσα πλήρως πρὸς ποιοτικὴν ταξινομήσιν τῶν φαινομένων τούτων, καθιστᾷ τὴν εὐρεσιν ποσοτικῶν σχέσεων δυνατὴν μόνον εἰς τὰς περιπτώσεις ἐκείνας κατὰ τὰς ὁποίας τὸ καθ' ἑαυτὸ φαινόμενον δὲν λαμβάνει χώραν ἐντὸς τοῦ πυρῆνος, ἀλλ' εἰς τὴν ἐγγυτῆτην περιοχὴν αὐτοῦ, ὅπως π. χ. συμβαίνει κατὰ τὸν διασκεδασμὸν τῶν ἀκτίνων α ὑπὸ τῶν πυρῆνων, τὴν δαδιενεργὸν μετατροπὴν δι' ἐκπομπῆς ἀκτίνων α, τὴν παραγωγὴν ἑνὸς ζεύγους ἠλεκτρονίων ἐξ ἠλεκτρομαγνητικῆς ἀκτινοβολίας.

Ὁ διασκεδασμὸς τῶν ἀκτίνων α (καὶ οἰωνδήποτε ἄλλων ὑλικῶν ἀκτίνων) ὑπὸ τῆς ὕλης ἐξηγεῖται τόσον ὑπὸ τῆς κλασικῆς θεωρίας², ὅσον

¹ Ἐάν, συμφώνως πρὸς τὴν νεωτέραν ἀντίληψιν, δεχθῶμεν, ὅτι ὁ πυρῆν τοῦ ἡλίου συγκρίσεται ἐκ δύο οὐδετερονίων (μάζης 1,0085) καὶ δύο πρωτονίων, εὐρίσκομεν διαφορὰν μάζης $2 \cdot 1,0085 + 2 \cdot 1,00778 - 4,00216 = 0,03040$, μεγαλύτεραν τῆς ἀνωτέρω.

² Ἐκτὸς τοῦ καλουμένου ἀνωμάλου διασκεδασμοῦ, ὅστις παρατηρεῖται ὅταν ἡ ἐνέργεια τῶν ἀκτίνων α εἶναι μεγαλύτερα μιᾶς ὀρισμένης χαρακτηριστικῆς τοῦ θεωρουμένου πυρῆνος τιμῆς, οὕτως ὥστε τὰ σωματίδια α νὰ πλησιάζουν τὸν πυρῆνα εἰς ἀποστάσεις διὰ τὰς ὁποίας ἡ ἀλληλεπίδρασις δὲν ἀκολουθεῖ τὸν νόμον τοῦ Coulomb, ὡς καὶ δι' ὀρισμένας ἄλλας τιμὰς τῆς ἐνεργείας τῶν ἀκτίνων α, συμπιπτοῦσας μὲ τιμὰς τῆς ἐσωτερικῆς ἐνεργείας τοῦ πυρῆνος (διασκεδασμὸς συντανισμού). Ὁ ἀνώμαλος διασκεδασμὸς ἐξηγεῖται κατ' ἀρχὴν διὰ τῆς Μηχανικῆς τῶν Quanta. Ἡ κλασικὴ θεωρία τοῦ διασκεδασμοῦ ὀφείλεται εἰς τὸν Rutherford (Phil. Mag. 21 (1911), p. 699).

ὑπὸ τῆς Μηχανικῆς τῶν Quanta ¹.

Ἡ θεωρητικὴ κατανόησις τῆς ῥαδιενεργοῦ μετατροπῆς δι' ἐκπομπῆς ἀκτίνων α κατέστη δυνατὴ μόνον μετὰ τὴν θεμελίωσιν τῆς Κυματομηχανικῆς, ἐνῶ κατὰ τὴν κλασικὴν Μηχανικὴν τὸ φαινόμενον εἶνε ἀκατανόητον. Διότι μεταξὺ τοῦ σωματιδίου α καὶ τοῦ ὑπολοίπου τοῦ πυρῆνος ἐξασκεῖται ἠλεκτροστατικὴ ἄπωσις, ἐφ' ὅσον ἡ ἀπόστασις τῶν εἶναι μεγάλη σχετικῶς μὲ τὰς διαστάσεις τοῦ πυρῆνος (τὰ πειράματα τοῦ Rutherford ἐπὶ τῶν ὁποίων στηρίζεται τὸ πρότυπον τοῦ ἀτόμου ἀποδεικνύουν πράγματι ὅτι ὁ νόμος τοῦ Coulomb ἰσχύει μέχρι ἀποστάσεων τάξεως 10^{-12} cm). Διὰ μικροτέρας ὁμως ἀποστάσεις πρέπει ἡ ἄπωσις αὕτη νὰ μετατρέπεται εἰς ἰσχυρὰν ἔλξιν, διότι ἄλλως τὸ σωματίδιον α δὲν θὰ ἦτο δυνατόν νὰ παραμείνῃ ἐντὸς τοῦ πυρῆνος. Ἐκ πειραμάτων τοῦ Rutherford σχετικῶν μὲ τὸν διασκεδασμὸν ἀκτίνων α ὑπὸ πυρῆνων οὐρανίου, ἔπεται ἄφ' ἑτέρου, ὅτι ἡ κινητικὴ ἐνέργεια τῶν σωματιδίων α εἶναι μικροτέρα τῆς ἀπαιτουμένης πρὸς ὑπερνίκησιν τῶν ἑλκτικῶν δυνάμεων τοῦ πυρῆνος, ὑπὸ τοῦ ὁποίου ταῦτα ἐκπέμπονται, ἐπομένως ἡ ἔξοδος τῶν σωματιδίων α εἶναι κατὰ τὴν κλασικὴν Μηχανικὴν ἀδύνατος.

Ἡ Μηχανικὴ τῶν Quanta περιγράφει τὸ φαινόμενον τοῦτο ὡς μετάπτωσιν τοῦ πυρῆνος ἀπὸ μιᾶς στασίμου καταστάσεως καθ' ἣν τὸ σωμα α εὐρίσκεται ἐντὸς τοῦ πυρῆνος εἰς ἄλλην, τῆς αὐτῆς ἐνεργείας, καθ' ἣν τὸ σωμα α ἐξῆλθε τοῦ πυρῆνος μὲ ὠρισμένην ταχύτητα, ἀλλὰ κατ' ἀπροσδιόριστον διεύθυνσιν. Ἡ συνάρτησις κυμάνσεων τῆς Κυματομηχανικῆς μᾶς ἐπιτρέπει νὰ ὑπολογίσωμεν τὴν πιθανότητα, ἵνα συμβῇ τοῦτο ἐντὸς ὠρισμένου χρόν. διαστήματος. Ἡ πιθανότης εἶναι μὲν μικρὰ (τόσον μικροτέρα ὅσον αἱ ἑλκτικαὶ δυνάμεις, ἢ ἡ διαφορὰ δυναμικοῦ, αἵτινες πρέπει νὰ ὑπερνικηθῶν εἶναι μεγαλύτεραι), ἀλλὰ διάφορος τοῦ μηδενός.

Ἡ θεωρία τοῦ φαινομένου ἐδόθη ὑπὸ τοῦ Gamow ² καὶ ἀνεξαρτήτως ὑπὸ τῶν Condon καὶ Gurney, οἵτινες εὗρον σχέσιν δίδουσαν τὴν σταθερὰν διασπάσεως λ τοῦ θεωρουμένου πυρῆνος συναρτήσει τῆς τάξεως αὐτοῦ Z, τοῦ φορτίου τοῦ σωμα. α, τῆς μάζης του καὶ μιᾶς μέσης ἀκτίνος τοῦ πυρῆνος. Ἐκ τῆς σχέσεως ταύτης ἔπονται ὅλαι αἱ πειραματικῶς γνωσταὶ ιδιότητες τῆς ἐκπομπῆς τῶν ἀκτίνων α, ὅπως π. χ. ἡ ἀπὸ μακροῦ γνωστὴ ἐμπειρικὴ σχέσις τῶν Geiger-Nuttall, κατὰ τὴν ὁποίαν δι' ἐκάστην ῥαδιενεργὸν σειρὰν οἱ λογάριθμοι τῶν σταθερῶν λ δίδονται ὑπὸ

¹ W. Gordon. Z. S. für Phys. 48 (1928), p. 180. H. M. Taylor, Proc. Roy. Soc. (A) 134 (1931), p. 103. 136 (1932), p. 602.

² G. Gamow, Z. S. f. Phys. 51 (1928), p. 204. R. W. Gurney καὶ E. U. Condon, Nature 122 (1928), p. 439. Phys. Rev. 33 (1929), p. 127.

γραμμικῆς συναρτήσεως τῆς ταχύτητος, μὲ τὴν ὁποίαν ἐκπέμπονται αἱ ἀκτῖνες α.

Πρὸς εὐρεσιν τῆς σχέσεως ταύτης δὲν ἀπαιτεῖται οὐδεμία ὑπόθεσις σχετικῶς μὲ τὴν ἑλεκτρικὴν δύναμιν ἣτις ἐξασκεῖται μεταξὺ πυρῆνος καὶ σωματιδίου α. Τὸ τελικὸν ἀποτέλεσμα ἐξαρτᾶται ἀπ' αὐτῆς διὰ τῆς μέσης ἀκτίνος τοῦ πυρῆνος, ἣτις εἶναι ἡ ἀπὸ τοῦ κέντρου τοῦ πυρῆνος ἀπόστασις εἰς τὴν ὁσοίαν ἡ ἕξις μετατρέπεται εἰς ἄπωσιν ἀκολουθοῦσαν τὸν νόμον τοῦ Coulomb. Αὕτη ὑπολογίζεται ἐκ τῆς ἀνωτέρω σχέσεως τοῦ Gamow τῇ βοήθειᾳ τῶν πειραματικῶς γνωστῶν τιμῶν τῆς σταθερᾶς λ καὶ τῆς ταχύτητος τῶν σωμα. α διὰ τοὺς διαφόρους ῥαδιενεργοὺς πυρῆνας.

Ὁ Gamow ὑπελόγησεν ἐπίσης τὴν πιθανότητα θρυμματισμοῦ πυρῆνος δι' ἠλεκτρικῶς φορτισμένου σωματιδίου, ἐν ἱκανοποιητικῇ συμφωνίᾳ πρὸς τὰ πειραματικὰ δεδομένα.

Ἐξαιρετικᾶς δυσκολίας παρουσιάζει ἡ ἐξηγήσις τῶν φαινομένων, εἰς τὰ ὁποῖα παίζουν ρόλον ἠλεκτρόνια, ὅπως εἶναι ἡ ῥαδιενεργὸς μετατροπὴ δι' ἐκπομπῆς ἀκτίνων β. Ἡ παρατήρησις ἔδειξεν, ὅτι τὰ ἠλεκτρόνια β, τὰ ἐκπεμπόμενα ὑπὸ μᾶς ῥαδιενεργοῦ οὐσίας δὲν ἐκπέμπονται ὅλα μὲ τὴν αὐτὴν ταχύτητα (ἢ πλείονας διακεκριμένας), ὅπως συμβαίνει μὲ τὴν ἐκπομπὴν τῶν ἀκτίνων α, ὅπου παρατηροῦνται μία, ἢ περισσότεραι ομάδες σωματιδίων α, σαφῶς καθωρισμένης κινητικῆς ἐνεργείας. Ἀπ' ἐναντίας ἡ κινητ. ἐνέργεια τῶν διαφορῶν σωματιδίων β τῆς αὐτῆς οὐσίας κυμαίνεται ἀπὸ τοῦ 0 μέχρις ἑνὸς ἀνωτέρου ὅριου χαρακτηριστικοῦ διὰ τὴν οὐσίαν, δυναμένη νὰ λάβῃ οἰανδήποτε ἐνδιάμεσον τιμὴν. Τὸ «φάσμα ἐνεργείας» τῶν ἀκτίνων β, δηλ. ἡ καμπύλη ἢ παριστώσα τὸν ἀριθμὸν τῶν ἐκπεμπομένων ἠλεκτρονίων, συναρτῆσει τῆς κινητικῆς ἐνεργείας αὐτῶν, ἄρχεται ἀπὸ τοῦ μηδενὸς (διὰ κινητ. ἐνέργειαν 0), φθίνει μέχρις ἑνὸς μεγίστου, ἐπίσης χαρακτηριστικοῦ διὰ τὴν θεωρουμένην οὐσίαν καὶ κατέρχεται πάλιν εἰς τὸ 0, διὰ τὸ ἀνώτερον ὅριον τῆς κινητ. ἐνεργείας. Τὸ ὅριον τοῦτο Ε ἀντιστοιχεῖ, κατὰ τὰς παρατηρήσεις, εἰς τὴν διαφορὰν μάζης μεταξὺ ἑνὸς ἀτόμου τῆς ἀρχικῆς οὐσίας καὶ ἑνὸς ἀτόμου τοῦ προϊόντος τῆς μετατροπῆς, συμφώνως πρὸς τὴν ἀρχὴν τῆς ἰσοδυναμίας μάζης καὶ ἐνεργείας.¹ Ἐπὶ πλέον ἡ ὅλη ἐνέργεια ἡ ἐκλυομένη κατὰ τὴν ῥαδιενεργὸν μετατροπὴν ὑπὸ ἐκπομπῆν ἀκτίνων β μετατρέπομένη εἰς θερμότητα καὶ μετρουμένη, εὐρίσκειται ἴση πρὸς τὴν κινητ. ἐνέργειαν τῶν ἀκτίνων β, ὡς αὕτη δίδεται ὑπὸ τοῦ φάσματος ἐνεργείας αὐτῶν, τοῦ ἀντιστοιχοῦντος εἰς τὴν θεωρουμένην ῥαδιενεργὸν οὐσίαν.²

¹ C. D. Ellis καὶ N. F. Mott, Proc. Roy. Soc. (A) 141 (1933), p. 502.

² C. D. Ellis καὶ W. A. Wooster, Proc. Roy. Soc. (A) 117 (1927), p. 109. L. Meitner καὶ Orthmann, ZS. f. Phys. 69 (1930), p. 143.

Όταν επομένως ἐν ἠλεκτρονίον β ἐκπέμπεται μὲ ἐνέργειαν E' μικροτέραν τῆς E , ἔχομεν ἀδικαιολόγητον ἀπώλειαν ποσοῦ ἐνεργείας $E-E'$, τουλάχιστον ἐφ' ὅσον δεχώμεθα ὅτι οἱ πυρῆνες τῆς ῥαδιενεργοῦ οὐσίας εἶναι ἐντελῶς ὅμοιοι μεταξύ των καὶ επομένως περιέχουν τὸ αὐτὸ ποσὸν ἐνεργείας, τὸ αὐτὸ δὲ συμβαίνει καὶ μὲ τοὺς πυρῆνας τοῦ προϊόντος τῆς τῆς μετατροπῆς. Ἀντίθετος ὅμως παραδοχὴ οὐδαμοῦ στηρίζεται, ἀπ' ἐναντίας ἢ συμπεριφορὰ τῶν πυρῆνων τούτων παρουσιάζεται κατὰ τὰ ἄλλα ἐντελῶς ὁμοία δι' ὅλους.

Τὸ γεγονός τοῦτο ἤγαγε τὸν Bohr¹ εἰς τὴν παραδοχὴν ὅτι διὰ τὴν ἐκπομπὴν τῶν ἀκτίνων β ἡ ἀρχὴ τῆς διατηρήσεως τῆς ἐνεργείας δὲν ἰσχύει.

Διέξοδον ἐκ τῆς δυσκολίας ταύτης ὑπέδειξεν ὁ Pauli², διατυπώσας τὴν ὑπόθεσιν, ὅτι ἐκτὸς τοῦ σωματιδίου β ἐκπέμπεται καὶ ἄλλο σωματίδιον οὐδέτερον ἠλεκτρικῶς, ἔχον πολὺ μικρὰν μᾶζαν καὶ πολὺ μεγάλην διαπεραστικὴν ἱκανότητα, τὸ ὁποῖον ἐκάλεσεν ὑπουδετερόνιον (Neutrino, neutret). Τὸ σωματίδιον τοῦτο ὀφείλει νὰ περιέχῃ τὴν διαφορὰν ἐνεργείας $E - E'$, λόγῳ ὅμως τῆς μεγάλης διαπεραστικότητος αὐτοῦ ἡ ἐνέργεια αὕτη διαφεύγει τὴν παρατήρησιν, κατὰ τὸν προσδιορισμὸν τῆς ὀλικῆς ἐνεργείας τῆς ἐκλυομένης κατὰ τὴν ῥαδιενεργὸν μετατροπὴν δι' ἐκπομπῆς ἀκτίνων β. Εἶναι εὐνόητον ὅτι ἡ ἔλλειψις ἠλεκτρικοῦ φορτίου, ἡ μεγάλη διαπεραστικὴ ἱκανότης καὶ ἡ πολὺ μικρὰ μᾶζα καθιστῶσιν ἐξαιρετικῶς δυσχερῆ τὴν πειραματικὴν ἀπόδειξιν τῆς υπάρξεως τοῦ ὑπουδετερονίου, ἧς πράγματι δὲν ἐπετεύχθη μέχρι τοῦδε.

Ὁ Fermi³, στηριζόμενος ἐπὶ τῆς ὑποθέσεως ταύτης τοῦ Pauli καὶ τῆς Μηχανικῆς τῶν Quanta, ἀνέπτυξε θεωρίαν τῆς ῥαδιενεργοῦ μετατροπῆς δι' ἐκπομπῆς ἀκτίνων β, ἧς εὐρίσκεται ποιοτικῶς ἐν ἀρμονίᾳ μὲ τὰ πειραματικὰ δεδομένα. Ἐν τούτοις δὲν δύναται νὰ θεωρηθῇ ἐντελῶς ἱκανοποιητικὴ, διότι καθιστᾷ μὲν δυνατὴν τὴν ἐφαρμογὴν τῶν νόμων τῆς Μηχανικῆς τῶν Quanta εἰς τὰ προβλήματα τοῦ πυρῆνος, ἀλλὰ στηρίζεται ἐπὶ αὐθαρέτου παραδοχῆς σχετικῶς μὲ τὰς δυνάμεις αἰτνες ἐξασκοῦνται μεταξύ τῶν ἐκπεμπομένων ἐλαφρῶν σωματιδίων (ἠλεκτρονίου καὶ ὑπουδετερονίου) καὶ τῶν βαρυτέρων συστατικῶν τοῦ πυρῆνος.

Ἐκ τῆς θεωρίας τοῦ Fermi εὐρίσκεται τὸ φάσμα ἐνεργείας τῶν ἀκτίνων β ὡς συνάρτησις τοῦ φορτίου τοῦ πυρῆνος καὶ τῆς μεγίστης τιμῆς τῆς ἐνεργείας E , μὴ ἀνταποκρινόμενον ὅμως μὲ ἀρκετὴν ἀκρίβειαν πρὸς τὰ δεδομένα τοῦ πειράματος. Παρὰ ταῦτα θεωρεῖται βέβαιον ὅτι ἡ

¹ N. Bohr, Faraday-Lecture 1930 (Journ. Chem. Soc. 1932, p. 349).

² W. Pauli, Congrès. Solvay 1933.

³ E. Fermi, Z. S. f. Phys. 88 (1934), p. 161.

υπόθεσις τοῦ ὑπουδετερονίου θὰ ἀποτελέσῃ ἀναπόφρευκτον βάσιν πάσης μελλοντικῆς θεωρίας τῆς ἀκτινοβολίας β καὶ γενικώτερον τοῦ πυρῆνος.

Κατὰ τὴν σήμερον ἐπικρατοῦσαν ἀντίληψιν ¹, οἱ πυρῆνες εἶναι συνθεθειμένοι ἐκ πρωτονίων καὶ οὐδετερονίων, ἡ δὲ ἐκπομπὴ ἐνός ἤλεκτρονίου β ὑπὸ ραδιενεργοῦ πυρῆνος ἐρμηνεύεται ὡς συνέπεια τῆς διασπάσεως ἐνός ἐκ τῶν οὐδετερονίων αὐτοῦ εἰς ἓν πρωτόνιον ἐν ἤλεκτρονίον καὶ ἓν ὑπουδετερόνιον. Πρὸς ταῦτο ὁμῶς δὲν εἶναι ἀνάγκη, ὡς κατ' ἀρχὰς συνέβη, νὰ θεωρήσωμεν τὸ οὐδετερόνιον σύνθετον ἐκ τῶν τριῶν ἀνωτέρω συστατικῶν, καθ' ὅσον μᾶς εἶναι γνωστὸν καὶ τὸ φαινόμενον τῆς μετατροπῆς τοῦ πρωτονίου εἰς οὐδετερόνιον, ὑπὸ ἐκπομπὴν ἐνός θετικοῦ ἤλεκτρονίου καὶ ἐνός ὑπουδετερονίου (ἐκπομπὴ θετικῶν ἤλεκτρονίων ὑπὸ τεχνητῶν ραδιενεργῶν στοιχείων). Ἡ προσφορωτέρα παραδοχὴ εἶναι, ὅτι τὸ οὐδετερόνιον δύναται νὰ μετατραπῇ εἰς πρωτόνιον ὑπὸ ἐκπομπὴν ἐνός ἀρνητικοῦ ἤλεκτρονίου καὶ ἐνός ὑπουδετερονίου, ἅτινα γεννῶνται κατὰ τὴν στιγμὴν τῆς μετατροπῆς, καὶ ὅτι ἀντιστρόφως τὸ πρωτόνιον δύναται νὰ μετατραπῇ εἰς οὐδετερόνιον ὑπὸ σύγχρονον παραγωγὴν καὶ ἐκπομπὴν ἐνός θετικοῦ ἤλεκτρονίου καὶ ἐνός ὑπουδετερονίου.

Ἡ ἐκπομπὴ ἀκτίνων γ, ἥτις εἰς πολλὰς περιπτώσεις συνοδεύει τὴν ἐκπομπὴν τῶν ἀκτίνων α ἢ β, προέρχεται ἐκ τοῦ ὅτι ὁ μετὰ τὴν ἐκπομπὴν ταύτην ἀπομένων πυρῆν δὲν εὐρίσκεται εἰς τὴν κατάστασιν τῆς ἐλαχίστης δυνατῆς ἐνεργείας. Μεταπίπτων ἐπομένως εἰς κατάστασιν μικρότερης ἐνεργείας ἐκπέμπει ἓν φωτόνιον γ, ὠρισμένης ἐνεργείας. Ἡ τάξις μεγέθους τῆς ἐνεργείας ταύτης εἶναι ἡ αὐτὴ μὲ τὴν τῶν ἀκτίνων α καὶ β καὶ τὸ ἀντίστοιχον μῆκος κύματος περὶ τὰ 10^{-10} cm. Τὰ φωτόνια γ δύνανται νὰ ὑποστοῦν « ἐσωτερικὴν μετατροπὴν », δηλ. νὰ ἀπορροφηθοῦν ἐντὸς τοῦ ἑξ ἤλεκτρονίων περιβλήματος τοῦ αὐτοῦ ἀτόμου, μὲ ἀποτέλεσμα τὴν ἐκπομπὴν δευτερογενῶν ἀκτίνων β. Αἱ δευτερογενεῖς ἀκτῖνες β, ἐν ἀντιθέσει πρὸς τὰς πρωτογενεῖς τοιαύτας, ἀποτελοῦνται ἑξ ὀμάδων ἤλεκτρονίων ἐχόντων ἐντὸς ἐκάστης ὀμάδος, ἐντελῶς καθωρισμένην ἐνεργειαν. Δι' ἐκτροπῆς τῶν δευτερογενῶν ἀκτίνων β ὑπὸ μαγνητικοῦ πεδίου, προσδιορίζονται αἱ ἐνεργεῖαι τῶν διαφορῶν ὀμάδων ἤλεκτρονίων μὲ μεγάλην ἀκρίβειαν, ἡ δὲ γνῶσις τῶν ἐνεργειῶν τούτων ἐπιτρέπει τὴν εὔρεσιν τῆς ἐνεργείας τῶν φωτονίων γ, ἥτις δὲν δύναται νὰ γίνῃ ἀκριβῶς δι' ἀπ' εὐθείας μετρήσεως τοῦ μήκους κύματος, λόγῳ τῆς σμικρότητος τοῦ τελευταίου.

Ἡ πιθανότης τῆς ἐσωτερικῆς μετατροπῆς ὑπελογίσθη ὑπὸ τῶν Taylor καὶ Mott ², μὲ μεγάλην ἀκρίβειαν, καὶ ἐν ἀρκετὰ βιανοποιητικῇ συμφωνίᾳ πρὸς τὰ ἀποτελέσματα τῶν μετρήσεων.

¹ Πρβ. κατωτέρω.

² H. M. Taylor καὶ N. F. Mott, Proc. Roy. Soc. (A) 138 (1932), p. 665.

Μετά την ανακάλυψιν τοῦ οὐδετερονίου οἱ Iwanenko¹ καὶ Heisenberg² διετύπωσαν τὴν ὑπόθεσιν, ὅτι οἱ πυρῆνες εἶναι συντεθειμένοι ἐκ πρωτονίων καὶ οὐδετερονίων. Ἡ παραδοχὴ αὕτη δύναται νὰ δικαιολογηθῇ ὡς ἑξῆς³: Ὡς συστατικὰ ἑνὸς συνθέτου σώματος θεωροῦνται τὰ ἀπλούστερα σωματίδια εἰς τὰ ὁποῖα τοῦτο δύναται νὰ ἀποσυντεθῇ δι' ἐξωτερικῶν ἐπιδράσεων. Κατὰ τὸν θρυμματισμὸν τῶν πυρῆνων ἐκπέμπονται μόνον βαρῆα σωματίδια (δηλ. πρωτόνια, οὐδετερόνια κ.λ.π.), οὐδέποτε δὲ θετικὰ ἢ ἀρνητικὰ ἠλεκτρόνια. Τὰ μόνα ὅμως βαρῆα σωματίδια, τὰ ὁποῖα δὲν εἶναι συντεθειμένα ἐξ ἄλλων βαρέων, εἶναι τὸ πρωτόνιον καὶ τὸ οὐδετερόνιον. Θετικὰ καὶ ἀρνητικὰ ἠλεκτρόνια δὲν ὑπάρχουν ἔτοιμα ἐντὸς τοῦ πυρῆνος, διότι ἄλλως θὰ ἔπρεπε νὰ ὑπάρχουν περιπτώσεις θρυμματισμοῦ, κατὰ τὰς ὁποίας νὰ ἐκπέμπωνται τοιαῦτα. Πρέπει λοιπὸν νὰ δεχθῶμεν ὅτι γεννῶνται κατὰ τὴν στιγμήν τῆς ἐκπομπῆς των. Ἡ ἐκπομπὴ αὕτη σχετίζεται μὲ τὴν ἐσωτερικὴν ὑφὴν τοῦ πρωτονίου καὶ τοῦ οὐδετερονίου καὶ γίνεται κατὰ τρόπον μὴ δυνάμενον νὰ περιγραφῇ διὰ τῆς σημερινῆς θεωρίας.

Ἐπὲρ τῆς ἀνωτέρω ὑποθέσεως τῶν Iwanenko καὶ Heisenberg συνηγοροῦν διάφορα ἄλλα δεδομένα, τόσον θεωρητικὰ ὅσον καὶ πειραματικά. Ἰδίως ἀποφεύγονται δι' αὐτῆς δυσκολίαι σχετικαὶ μὲ τὴν ιδιότητα τῶν στοιχειωδῶν συστατικῶν τῆς ὕλης νὰ συμπεριφέρονται ὡς μικροὶ στρόμβοι καὶ ὡς μικροὶ μαγνήται, ἧτις ἔπαιξε σπουδαιότατον ρόλον κατὰ τὴν ἐξέλιξιν τῆς θεωρίας τοῦ ἀτόμου. Λαμβανομένης ὑπ' ὄψιν τῆς ιδιότητος ταύτης, ἡ προγενεστέρα παραδοχὴ, ὅτι οἱ πυρῆνες ἀποτελοῦνται ἐκ πρωτονίων καὶ ἠλεκτρονίων, ὀδηγεῖ, εἰς μερικὰς περιπτώσεις, εἰς συμπεράσματα ἐμπειρικῶς ψευδῆ.

Κατὰ τὴν νεωτέραν ἀντίληψιν, πυρὴν τάξεως Z καὶ στρογγυλευμένου ἀτομικοῦ βάρους A ἀποτελεῖται ἀπὸ Z πρωτόνια καὶ A-Z οὐδετερόνια, τῶν ὁποίων ἡ κίνησις ἀκολουθεῖ τοὺς νόμους τῆς Μηχανικῆς τῶν Quanta. Ἡ ἐπὶ τῇ βάσει τῆς ὑποθέσεως ταύτης ἀπαγωγικὴ εὕρεσις τῶν ιδιοτήτων τῆς κατασκευῆς καὶ τῶν ἀντιδράσεων τῶν πυρῆνων δὲν κατέστη μέχρι σήμερον δυνατὴ, καὶ τοῦτο διότι δὲν ἔχομεν ἀκριβῆ γνώσιν τῶν δυνάμεων τῶν ἐξασκουμένων ἐντὸς τοῦ πυρῆνος, μεταξὺ τῶν ἀπαρτιζόντων αὐτὸν σωματιδίων.

Ἐκ τῶν μέχρι τοῦδε ὑπαρχόντων πειραματικῶν δεδομένων δύναται ὅμως νὰ συναχθοῦν διάφορα γενικὰ συμπεράσματα, σχετικὰ μὲ τὰς δυ-

¹ D. Iwanenko, Nature 129 (1932) p. 798.

² W. Heisenberg, Z. S. f. Phys. 77 (1932), p. 1 · 78 (1932) p. 156 · 80 (1933), p. 587 · 96 (1935), p. 473.

³ Πρβλ. C. F. v. Weizsäcker, Die Atomkerne, Leipzig 1937.

νάμεις ταύτας. Οἱ ὄγκοι τῶν πυρήνων καὶ αἱ ἐνέργειαι ἐνώσεως αὐτῶν ¹ (ὑπολογιζόμεναι ἐκ τῶν διαφορῶν μάζης) εἶναι, κατὰ πρώτην προσέγγισιν, ἀνάλογοι πρὸς τὴν μάζαν τῶν πυρήνων, δηλ. πρὸς τὸν ὅλον ἀριθμὸν τῶν πρωτονίων καὶ οὐδτερονίων, τῶν εὕρισκομένων ἐντὸς αὐτῶν. Οὕτω κάθε νέον σωματίδιον προστιθέμενον εἰς πυρῆνα, πρὸς παραγωγὴν βαρυτέρου τοιούτου, ἀξάνει τὸν ὄγκον καὶ τὴν ἐνέργειαν ἐνώσεως τοῦ πυρήνος κατὰ σταθερὰν περιῖπου ποσότητα. Τὴν ιδιότητα ταύτην παρουσιάζουν τὰ ὑγρά, ἐπομένως οἱ πυρῆνες δύνανται νὰ παραβληθῶν πρὸς σταγόνας ὑγροῦ σταθερᾶς πυκνότητος, ἐκτὸς τοῦ ἐπιφανειακοῦ στρώματος αὐτῶν, ὅπου ἡ πυκνότης ἐλαττοῦται ἀπὸ τῆς σταθερᾶς τιμῆς μέχρι τοῦ μηδενός. Πρὸς ἐξήγησιν τῆς ιδιότητος ταύτης ἀρκεῖ κατὰ τοὺς Heisenberg καὶ Majorana νὰ παραδεχθῶμεν, ὅτι ἡ δύναμις ἢ συγκρατοῦσα τὸν πυρῆνα εἶναι ἐλκτική δύναμις ἐξασκουμένη μεταξὺ πρωτονίου καὶ οὐδτερονίου. Ἡ δύναμις αὕτη, ἣτις πρέπει νὰ εἶναι πολὺ μεγαλύτερα τῆς ἠλεκτροστατικῆς δυνάμεως τοῦ Coulomb, ἀνήκει εἰς τὴν κατηγορίαν τῶν «δυνάμεων ἀνταλλαγῆς», αἵτινες διαφέρουν τῶν συνήθων δυνάμεων κατὰ τὸ ὅτι σχετίζονται μὲ μεταβολὴν τῆς καταστάσεως τῶν ἀλληλεπιδρώντων σωματιδίων, συνισταμένην εἰς μετατόπισιν (ἀνταλλαγὴν) ἠλεκτροικοῦ φορτίου. Ἐν οὐδτερονίον δύναται δηλ. ἐκπέμπον ἐν ἀρνητικὸν ἠλεκτρόνιον νὰ μετατραπῆ εἰς πρωτόνιον καὶ ὅταν ἀκόμη ὁ πυρῆν εἰς τὸν ὁποῖον ἀνήκει δὲν δύναται νὰ ἐκπέμψῃ ἀκτινοβολίαν β δηλ. ὅταν εἰς τὴν νέαν κατάστασιν αὐτοῦ ἀντιστοιχεῖ ἐνέργεια μεγαλύτερα τῆς προηγουμένης. Τότε ὅμως τὸ ἀρνητικὸν ἠλεκτρόνιον ἀπορροφᾶται ἀμέσως ὑπὸ γειτονικοῦ πρωτονίου τοῦ πυρήνος, τὸ ὁποῖον μετατρέπεται εἰς οὐδτερονίον. Ἐπίσης ἐν πρωτόνιον δύναται νὰ ἐκπέμψῃ ἐν θετικὸν ἠλεκτρόνιον, τὸ ὁποῖον ἀπορροφᾶται ἀμέσως ὑπὸ γειτονικοῦ οὐδτερονίου. Ἡ μετατόπισις αὕτη τοῦ ἠλεκτροικοῦ φορτίου ἔχει ὡς συνέπειαν τὴν ἀνταλλαγὴν τῆς θέσεως πρωτονίου καὶ οὐδτερονίου καὶ τὴν ὑπαρξιν ἐλκτικῆς δυνάμεως μεταξὺ τῶν σωματιδίων τούτων. Χαρακτηριστικὸν τῆς δυνάμεως ταύτης εἶναι, ὅτι δὲν δύναται νὰ ἐξασκηθῆ μεταξὺ ἐνός πρωτονίου καὶ ὁσωνδήποτε οὐδτερονίων ἢ ἀντιστρόφως, ἀλλ' ὅτι μετὰ τὴν ἐνῶσιν ὠρισμένου ἀριθμοῦ σωματιδίων ἐπέρχεται «κορεσμὸς» αὐτῆς. Διὰ τῶν δυνάμεων ἀνταλλαγῆς ἐξηγεῖ ἡ Μηχανικὴ τῶν Quanta τὴν ὑπαρξιν τῶν ὁμοιοπολικῶν χημικῶν ἐνώσεων (π. χ. τῶν μορίων τῶν διατομικῶν ἀερίων).

Ὡς πρὸς τὴν δύναμιν τὴν ἐξασκουμένην μεταξὺ δύο πρωτονίων δὲν ὑπάρχει οὐδεὶς λόγος νὰ δεχθῶμεν, ὅτι ἐντὸς τοῦ πυρήνος παύει ἰσχύων

¹ Ἐνέργειαν ἐνώσεως πυρήνος καλοῦμεν τὸ ποσὸν ἐνεργείας, τὸ ὁποῖον δέον νὰ καταβάλωμεν ὅπως διασπάσωμεν τὸν πυρῆνα εἰς πρωτόνια καὶ οὐδτερόνια καὶ ἀπομακρύνωμεν ταῦτα μέχρι τοῦ ἀπέιρου.

ὁ νόμος τοῦ Coulomb, καθ' ὅσον ἡ τάξις μεγέθους τῆς ἀκτίνος τοῦ πρωτονίου ὑπολογίζεται εἰς 10^{-16} cm, ἐνῶ αἱ ἀποστάσεις τῶν σωματιδίων ἐντὸς τοῦ πυρήνος εἶναι τάξεως 10^{-13} cm, δηλ. πολὺ μεγαλύτεραι. Ὅμοίως, κατὰ τὸν Majorana ¹, δὲν ὑπάρχει λόγος νὰ παραδεχθῶμεν ὅτι μεταξὺ δύο οὐδετερονίων ἐξασκεῖται αἰσθητὴ ἀλληλεπίδρασις.

Αἱ ἀνωτέρω παραδοχαὶ εἶναι ἐπαρκεῖς πρὸς ἐξήγησιν τοῦ γεγονότος τῆς ὑπάρξεως περιορισμένου ἀριθμοῦ εὐσταθῶν πυρήνων καὶ τῆς ὁμοιότητος αὐτῶν πρὸς σταγόνας ὑγροῦ.

Ἡ ἐπὶ τῇ βίσει τῶν παραδοχῶν τούτων εὗρεσις ποσοτικῶν σχέσεων ἐπιτυγχάνεται ὡς ἑξῆς: Διὰ τὴν μεταξὺ πρωτονίου καὶ οὐδετερονίου ἐξασκουμένην δύναμιν εἰσάγεται αὐθαιρέτως ἀπλή, συνήθως ἐκθετικὴ, συνάρτησις τῆς ἀποστάσεως τῶν δύο σωματιδίων περιέχουσα μερικά, συνήθως δύο, ἀπροσδιόριστα μεγέθη (παραμέτρους) καὶ διὰ τῶν μεθόδων τῆς Μηχανικῆς τῶν Quanta ὑπολογίζονται αἱ ἐνέργειαι ἐνώσεως τῶν διαφόρων πυρήνων, κατόπιν δὲ προσδιορίζονται αἱ παράμετροι, οὕτως ὥστε αἱ οὕτω προκύπτουσαι ἐνέργειαι νὰ συμφωνοῦν πρὸς τὰς ἐμπειρικῶς γνωστὰς τοιαύτας.

Ἐνῶ ὅμως διὰ τοὺς ἐλαφροτέρους πυρήνας (ἀπὸ τοῦ H_2^2 μέχρι τοῦ He_4^4) ὁ ὑπολογισμὸς οὗτος γίνεται μὲ ἀρκετὴν ἀκρίβειαν, διὰ τοὺς βαρύτερους, τοὺς περιέχοντας μεγαλύτερον ἀριθμὸν σωματιδίων, δύναται νὰ γίνῃ μόνον διὰ στατιστικῶν μεθόδων, ὀλιγότερον ἀκριβῶν, αἱ δὲ τιμαὶ αἱ προκύπτουσαι ἔξ αὐτῶν διὰ τὰς παραμέτρους δὲν συμφωνοῦν μὲ τὰς εὐρισκομένας ἀπὸ τοὺς ἐλαφροτέρους πυρήνας. Πιθανὸν τοῦτο νὰ προέρχεται ἐκ τῆς ἀνεπαρκοῦς ἀκρίβειας τῶν στατιστικῶν μεθόδων, πάντως ὅμως τὸ ζήτημα δὲν ἔχει εἰσέτι διευκρινισθῆ.

Τὸ ἀνωτέρω περιγραφέν «σταγονοειδές» πρότυπον τοῦ πυρήνος ἀποτελεῖ μόνον μίαν πρώτην προσέγγισιν πρὸς τὴν πραγματικότητα. Ἡ συμπεριφορὰ τῶν ἐλευθέρων οὐδετερονίων καὶ πρωτονίων (ἢ στατιστικὴ τὴν ὁποῖαν ἀκολουθοῦν) καθιστᾷ πιθανὸν τὸ ὅτι εἶναι ταῦτα ἐντὸς τοῦ πυρήνος διατεταγμένα κατὰ στρώματα ἀποτελούμενα ἐκ δύο πρωτονίων καὶ δύο οὐδετερονίων, εἰς ἕναστον τῶν ὁποίων ἀντιστοιχεῖ διάφορος ἐνέργεια ἐνώσεως. Ἄφ' ἑτέρου εἶναι πιθανὸν ὅτι τὰ πρωτόνια καὶ τὰ οὐδετερόνια εὐρίσκονται ἐντὸς τοῦ πυρήνος συντεθειμένα, τοῦλάχιστον ἐν μέρει, εἰς μεγαλύτερα σωματίδια καὶ δὴ σωματίδια α . (μεγάλῃ εὐστάθεια τοῦ σωματ. α). Ἐπειδὴ ὅμως οὐδεμία τῶν δύο τούτων παραστάσεων ἔπεται τόσον ἀμέσως ἐκ τῶν πειραματικῶν δεδομένων, ὅσον ἡ παράστασις τῆς σταγόνας, ἢ ἐνταῦθα ἐπικρατοῦσα ἀβεβαιότης εἶναι ἔτι μεγαλύτερα.

Τὸ πρόβλημα τῆς μεταξὺ πρωτονίου καὶ οὐδετερονίου ἐξασκουμέ-

¹ E. Majorana, Z. S. f. Phys. 82 (1933), p. 137.

νης δυνάμεως σχετίζεται με τὸ πρόβλημα τῆς ἀκτινοβολίας β. Ἐκ τῆς θεωρίας τοῦ Fermi, καὶ ἀνεξαρτήτως τῶν εἰδικῶν παραδοχῶν ἐφ' ὧν αὕτη στηρίζεται, ἔπεται ὅτι μεταξὺ πρωτονίου καὶ οὐδτερονίου ἐξασκεῖται δύναμις ἀνταλλαγῆς (Tamim, Iwanenko). Ἐκ τῆς εἰδικῆς ὁμως θεωρίας τοῦ Fermi τὸ μέγεθος τῆς δυνάμεως ταύτης προκύπτει πολὺ μικρὸν ἐν σχέσει μετὰ τὰς ἐμπειρικῶς γνωστὰς ἐνεργείας ἐνώσεως τῶν πυρῆνων. Ἐπρωτάθησαν τροποποιήσεις τῆς θεωρίας τοῦ Fermi, ἀποδίδουσαι καλῶς τὸ φαινόμενον τῆς ἀκτινοβολίας β, ἀλλὰ καὶ αὐταὶ δὲν δύνανται σήμερον νὰ θεωρηθῶσιν ὡς ὀριστικά, ἐπομένως τὸ ζήτημα παραμένει καὶ ἀπὸ τῆς πλευρᾶς ταύτης ἔκκρεμές.

Οὕτως ἡ Φυσικὴ τοῦ πυρῆνος εὐρίσκεται ἀκόμη ἐν πλήρει ἐξελίξει. Ἀπὸ τὴν συμπλήρωσιν τῆς πειραματικῆς ἐρεύνης καὶ ἀπὸ τὴν πληρεστέραν χρησιμοποίησιν τῶν ἀποτελεσμάτων αὐτῆς ὑπὸ τῆς θεωρίας ἀναμένομεν ὄχι μόνον τὴν ἐξήγησιν τῶν φαινομένων τοῦ πυρῆνος, ἀλλὰ καὶ τὴν λύσιν τῶν ἔκκρεμῶν θεμελιωδῶν προβλημάτων τῆς Μηχανικῆς τῶν Quanta. Ἡ Μηχανικὴ τῶν Quanta, ὡς ἐθεμελιώθη ὑπὸ τῶν Heisenberg, Schrödinger καὶ Dirac, μολοντοῦ ἐπέτυχε πλήρως τὴν ἐξήγησιν τῶν φαινομένων τοῦ ἐξ ἠλεκτρονίων περιβλήματος τοῦ ἀτόμου δὲν δύναται νὰ θεωρηθῆ ὡς ἐντελῶς περατωμένη. Ἀφ' ἑνὸς μὲν δὲν κατορθώθη νὰ ἐφαρμοσθῆ αὕτη ἄνευ ἀντιφάσεων πρὸς τὰς ἀρχὰς τῆς θεωρίας τῆς Σχετικότητος, ἀφ' ἑτέρου δὲ δὲν δίδει οὐδεμίαν ἐξήγησιν τῆς ὑπάρξεως στοιχειῶδους ἠλεκτρικοῦ φορτίου, ἢ ὁποῖα κατὰ πᾶσαν πιθανότητα ἀποτελεῖ φαινόμενον τῶν Quanta. Οὕτω τὰ ἐρωτήματα: Διατί ὑπάρχει στοιχειῶδες ἠλεκτρ. φορτίον καὶ ἐν γένει στοιχειῶδη σωματίδια; Διατί ἔχουν τὰ στοιχειῶδη σωματίδια αὐτὰς τὰ ἰδιότητας; Διατί ὁ λόγος τῶν μαζῶν πρωτονίου καὶ ἠλεκτρονίου εἶναι ἀκριβῶς 1838; κ.λ.π. παραμένουν ἄνευ ἀπαντήσεως, παρὰ τὰς μεγάλας προσπάθειάς αἵτινες κατεβλήθησαν, ἰδίως ὑπὸ τῶν θεωρητικῶν τῆς Σχετικότητος. Στοιχειῶδη σωματίδια κινούμενα μετὰ ταχύτητας περίπου ἴσας πρὸς τὴν ταχύτητα τοῦ φωτός, (ἐντὸς ταχέως μεταβαλλομένων δυναμικῶν πεδίων), παρουσιάζουν φαινόμενα, διὰ τὴν ἐξήγησιν τῶν ὁποίων ἡ θεωρία τῆς Σχετικότητος καὶ ἡ θεωρία τῶν Quanta παίζουν ἐξ ἴσου σπουδαῖον ῥόλον. Τοιοῦτον ἀκριβῶς φαινόμενον εἶναι ἡ ἔκπομπὴ ἠλεκτρονίων ὑπὸ τῶν ῥαδιενεργῶν πυρῆνων, ἦτις, ὡς καὶ προηγουμένως ἀναφέρομεν, δὲν δύναται νὰ περιγραφῆ πλήρως ὑπὸ τῆς σημερινῆς θεωρίας. Ἀναμένομεν λοιπὸν ὅτι ἡ πλήρης θεωρητικὴ κατανόησις τοῦ φαινομένου τούτου θὰ μᾶς ὀδηγήσῃ εἰς τὴν λύσιν τῶν μετ' αὐτοῦ σχετιζομένων προβλημάτων τῆς ὑφῆς τῶν στοιχειωδῶν συστατικῶν τοῦ πυρῆνος, πρωτονίου καὶ ἠλεκτρονίου καὶ τῆς ἀλληλεπίδρασσεως αὐτῶν καὶ ὅτι, πιθανῶς, θὰ χορηγήσῃ τὰ στοιχεῖα πρὸς θεμελίωσιν μιᾶς θεωρίας τῶν στοιχειωδῶν σωματιδίων.

