

Πυρηνική Φυσική και Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (5ου εξαμήνου, χειμερινό 2016-17)

Τμήμα Τ3: Κ. Κορδάς & Χ. Πετρίδου

Μάθημα 2

**Πείραμα Rutherford και μέγεθος πυρήνων,
Πυρήνες-συμβολισμοί**

Κώστας Κορδάς

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Πυρηνική & Στοιχειώδη Ι, Αριστοτέλειο Παν. Θ/νίκης, 29 Σεπ. 2016

Βασικά

- **Περίπου πόσο μεγάλοι είναι οι πυρήνες**
 - Πείραμα Rutherford , Μήκος κύματος σωματιδίων α
 - Μονάδες και σχετικιστική κινηματική
- **Συμβολισμοί-ορισμοί**

Βασικά

Cottingham & Greenwood:

- **Παρ. 1.4, Παρ. 4.4**
 - Μονάδες, amu
- **Παρ. 2.3 και Παράρτημα Ε.1**
 - μέσος χρόνος ζωής και ενεργότητα (επίσης από **Σημειώσεις Πυρηνικής, Κεφ. 4, παρ. 4.1-4.5**)
- **Πάρτημα Α.1-Α.3**
 - Ενεργός διατομή και ρυθμός αντιδράσεων

Χ. Ελευθεριάδης: παρ. 1.1, 1.2, 3.3.3

- **Ιστοσελίδα μαθήματος:**
 - <http://www.physics.auth.gr/course/show/125>

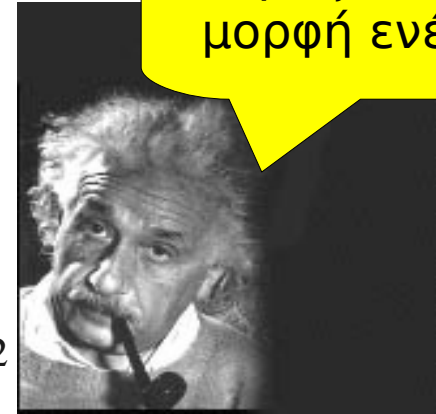
Σχετικιστική κινηματική

Σχετικιστική κινηματική:

$E = mc^2$ = η ενέργεια που έχω επειδή απλά και μόνο έχω μάζα m
 c = ταχύτητα του φωτός

ενέργεια E
μάζα m

Η μάζα είναι μια μορφή ενέργειας



γενικά, με κινητική ενέργεια K , έχουμε: $E = K + mc^2$

$$E = m \gamma c^2, \text{ όπου } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \text{ και } \beta = v/c, \text{ με } v = \text{ταχύτητα σωματιδίου}$$

$$p = m \gamma v = m \gamma \beta c, \text{ όπου } p = \text{ορμή}$$

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 \quad \rightarrow \quad E [\text{MeV}], p [\text{MeV}/c], m [\text{MeV}/c^2]$$

Σημείωση: με $c = 1$, γράφουμε: $E^2 = p^2 + m^2$, κλπ.

$$\text{Χρήσιμα: } \beta = \frac{pc}{E} \text{ και } \beta\gamma = \frac{p}{mc}$$

Μονάδες

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \equiv \text{μονάδα ταχύτητας} \equiv 1$$

$$\text{μονάδα ενέργειας} \equiv eV = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Cb} * V = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

Συνήθως χρησιμοποιούμε το MeV ($= 10^9 \text{ eV}$)

$$\text{Σταθερά του Plank} = \mathbf{h} = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

$$\hbar c = 197 \text{ MeV fm}, \text{ όπου } \hbar = \frac{h}{2\pi} \equiv \text{μονάδα δράσης (ενέργειας} \times \text{χρόνου)} \equiv 1$$

$$\alpha = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 \hbar c} [mks] = \frac{e^2}{\hbar c} [cgs] = \frac{1}{137}$$

$$\alpha = \text{η σταθερά λεπής υφής} = 1/137$$

Θα χρησιμοποιούμε παντού:
eV για ενέργεια (ή MeV στην πυρηνική),
 $1/4\pi\epsilon_0 = 1$ σε όλους τους τύπους,

$$\text{και θα βάζουμε } e^2 = \alpha \hbar c, \text{ όπου } \alpha = 1/137$$

$$\hbar c = 197 \text{ MeV fm}$$

Μετράμε:

Μάζα: MeV/c^2 (αφού $E = mc^2$)

Ορμή: MeV/c (αφού $p = m\gamma\beta c$)

Χρόνος σε: $1/\text{MeV}$ (αφού η μονάδα δράσης = Ενέργεια * Χρόνος = 1)

Μήκος σε: μονάδες χρόνου = $1/\text{MeV}$ (αφού η μονάδα ταχύτητας=1)

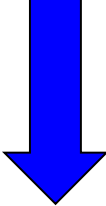
$$1 \text{ amu} = 1/12 \text{ μάζας ουδέτρου ατόμου } ^{12}\text{C} = 931.5 \text{ MeV}/c^2$$

$$\text{Μάζα ηλεκτρονίου} = 0.511 \text{ MeV}/c^2$$

$$\text{Μάζα πρωτονίου} = 938.3 \text{ MeV}/c^2, \text{ Μάζα νετρονίου} = 939.6 \text{ MeV}/c^2$$

Ξέρουμε ότι τα υλικά είναι φτιαγμένα από άτομα

- Αναλύοντας τα δομένα παρατηρήσεων, φτάσαμε να ξέρουμε ότι υπάρχουν άτομα και κενός χώρος
 - Ατομική θεωρία του Dalton, Avogandro κ.α.

Τα άτομα των 92 στοιχείων (19ος αιώνας)	1. Υδρογόνο (H)	Μάζα $M_H \approx 1.7 \times 10^{-24} \text{ g}$	 Αυξανόμενη μάζα
	2. Ήλιο (He)		
	3. Λίθιο (Li)		
			
			
	92. Ουράνιο (U)	Μάζα $\approx 238 M_H$	

Κι έχουμε μια ιδέα για το μέγεθος των ατόμων

- Αριθμός ατόμων / $\text{cm}^3 = n = N_A \frac{\rho}{A}$

$$\left(\begin{array}{l} N_A \approx 6 \times 10^{23} \text{ άτομα/mol (σταθερά Avogadro)} \\ A: \text{ατομική μάζα (gr/mol)} \\ \rho: \text{πυκνότητα (gr/cm}^3\text{)} \end{array} \right) \leftarrow$$

- Τα άτομα ως σφαίρες: $V = \frac{4}{3} \pi R^3$

- Πακεταρισμένες σφαίρες: 

- Ποσοστό κάλυψης του χώρου = **f = 52-74%**

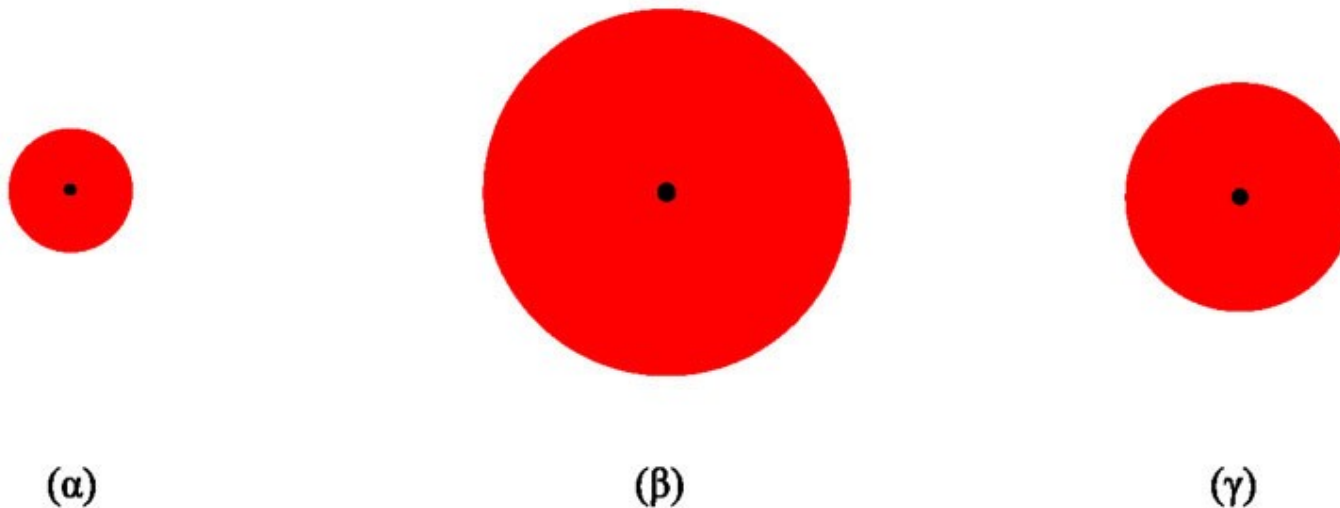
- Ακτίνα ατόμου: $\rightarrow R = \left(\frac{3f}{4\pi n} \right)^{1/3}$

Παράδειγμα:

Σίδηρος ($A=55.8 \text{ g/mol}$, $\rho=7.87 \text{ g cm}^{-3}$) $\rightarrow R = (1.1 - 1.3) \times 10^{-8} \text{ cm}$

Μέγεθος από αρχές κβαντομηχανικής

Τραχανάς, “Κβαντομηχανική Ι”, κεφ. 13, σελ. 339



ΣΧΗΜΑ 8.5: Πώς το ηλεκτρόνιο επιλέγει τη θεμελιώδη του κατάσταση στο άτομο του υδρογόνου.

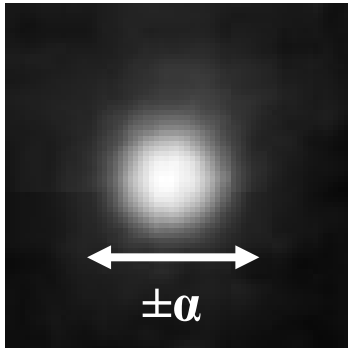
Σενάριο (α): Προσπαθώντας να «αξιοποιήσει» την έλξη του πυρήνα –δηλαδή να ελαχιστοποιήσει τη δυναμική του ενέργεια– το ηλεκτρόνιο «φτιάχνει» μια πολύ εντοπισμένη κυματοσυνάρτηση, οπότε όμως αυξάνεται υπερβολικά η κινητική του ενέργεια λόγω αρχής της αβεβαιότητας.

Σενάριο (β): Προκειμένου να αποφύγει τον υπερβολικό εντοπισμό και να μειώσει έτσι την κινητική του ενέργεια, το ηλεκτρόνιο «ανοίγει» πολύ την κυματοσυνάρτησή του, οπότε όμως εξανεμίζεται το ενεργειακό του όφελος από την έλξη του πυρήνα.

Σενάριο (γ): Το άτομο επιτυγχάνει τελικά την κατάσταση ελάχιστης ολικής ενέργειας εξισορροπώντας τις ανταγωνιστικές απαιτήσεις κινητικού και δυναμικού όρου. Σε αυτή την κατάσταση η κυματοσυνάρτησή του δεν είναι ούτε πολύ «σφικτή» ούτε πολύ «χαλαρή»: έχει ένα βέλτιστο μέγεθος.

Μέγεθος ατόμου από αρχές κβαντομηχανικής

Ερμηνεία με Αναγωγή στην Αρχή Απροσδιοριστίας
Διαστατική ανάλυση



$$\Delta x \sim \alpha$$

$$\langle p \rangle = 0$$

$$\Delta p \neq 0$$

$$\Delta x \times \Delta p \approx h \Rightarrow \Delta p \approx h/\alpha$$

$$(\Delta p)^2 = \langle p^2 \rangle - \langle p \rangle_0^2 \Rightarrow p^2 \equiv \langle p^2 \rangle \approx \left(\frac{h}{\alpha} \right)^2$$

$$K = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{p^2}{2m}$$

$$E = K + V = \frac{p^2}{2m} - \frac{e^2}{\alpha} = \frac{h^2}{2m\alpha^2} - \frac{e^2}{\alpha}$$

$e = \frac{|q_e|}{4\pi\epsilon_0}$

Βασική Κατάσταση = Κατάσταση Ελαχίστης Ενέργειας

$$\frac{dE}{d\alpha} = \frac{-h^2}{m\alpha^3} + \frac{e^2}{\alpha^2} = 0$$

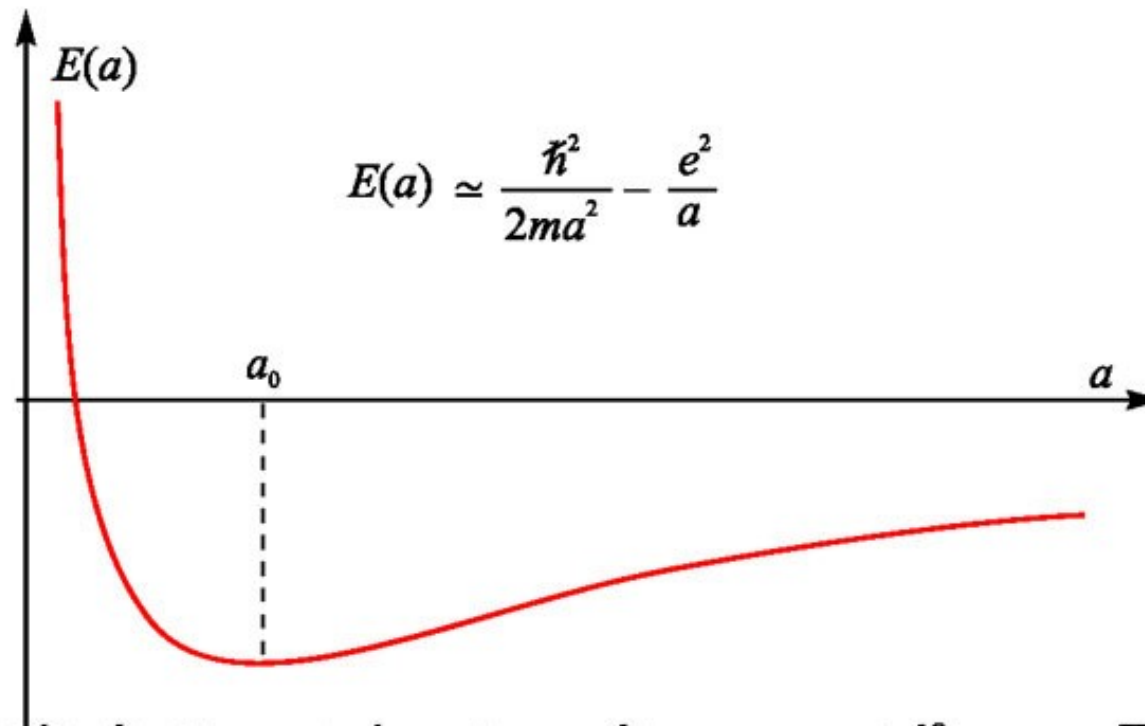
$$\alpha_0 = \frac{h^2}{m e^2} = 0.528 \times 10^{-10} m$$

ακτίνα Bohr

Η Ενέργεια για $\alpha < \alpha_0$ είναι αύξουσα συνάρτηση του μεγέθους του ατόμου

Μέγεθος από αρχές κβαντομηχανικής

Τραχανάς, “Κβαντομηχανική Ι”, κεφ. 13, σελ. 339



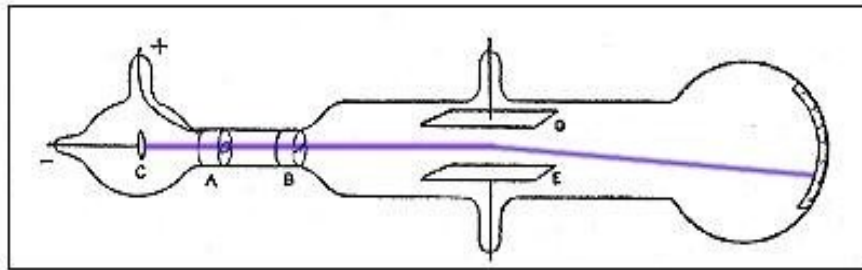
ΣΧΗΜΑ 8.6: Η ολική ενέργεια του ατόμου ως συνάρτηση του μεγέθους του. Το άτομο δεν έχει «συμφέρον» ούτε να γίνει πολύ μικρό –διότι τότε μειώνεται μεν η δυναμική του ενέργεια αλλά αυξάνεται υπέρμετρα η κινητική– ούτε όμως και πολύ μεγάλο, διότι τότε μειώνεται μεν η κινητική του ενέργεια αλλά αυξάνεται υπερβολικά –γίνεται λιγότερο αρνητική– η δυναμική. Η ελάχιστη ολική ενέργεια επιτυγχάνεται όταν η ακτίνα του ατόμου γίνει ίση με την ακτίνα του Bohr.

Χαρακτηριστικό μέγεθος ατόμων

Τα άτομα έχουν ακτίνα $\sim 10^{-10} \text{ m} = 0.1 \text{ nm} = 1 \text{ \AA}$

Τα άτομα... τεμαχίζονται

- Τα άτομα έχουν δομή = δεν είναι θεμελιώδη
 - J.J Thomson (πειράματα 1894-1897)
 - το ηλεκτρόνιο είναι συστατικό του ατόμου



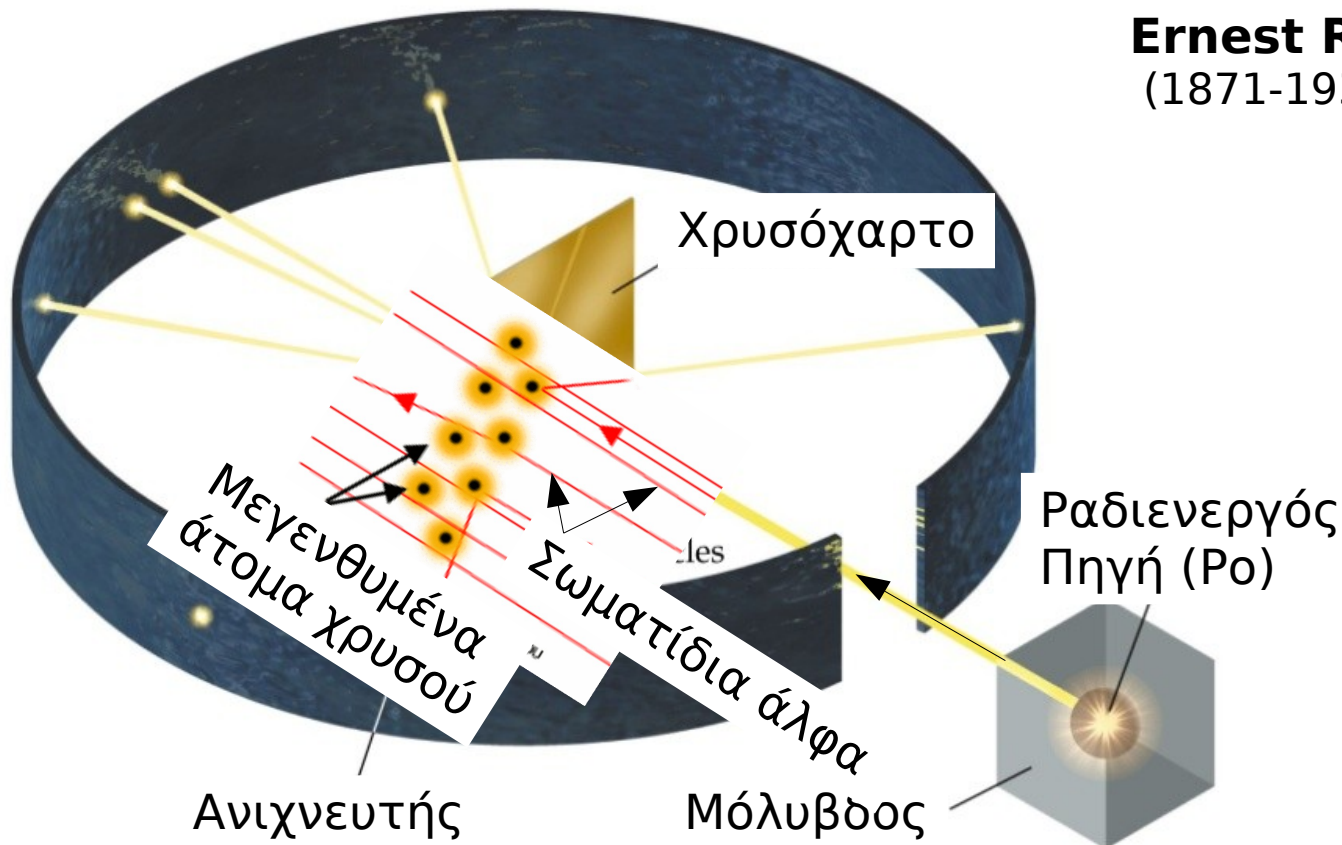
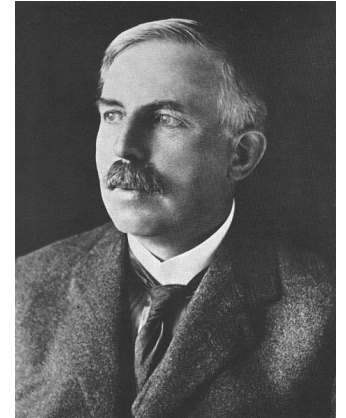
Καθοδικός σωλήνας (cathode ray tube)

- Αλλά, τα άτομα είναι ηλεκτρικά ουδέτερα.
- **Ερώτηση: Πώς είναι κατανεμημένα τα ηλεκτρόνια μέσα στο άτομο;**
 - Είναι το άτομο σαν το σταφιδόψωμο;
 - “Σταφίδες” → τα ηλεκτρόνια
 - “Ζύμη” → το θετικό φορτίο

Απάντηση με πειράματα σκέδασης

- Ο Ernest Rutherford, Hans Geiger και Ernest Marsden, κάνουν πειράματα σκέδασης σωματιδίων άλφα πάνω σε χρυσόχαρτο (1906)

Ernest Rutherford
(1871-1937)



Το άτομο έχει το
θετικό του φορτίο
συγκεντρωμένο
σ' έναν πυρήνα



έτσι εξηγείται
η σκέδαση
σε μεγάλες γωνίες

Σωματίδια με το κατάλληλο μήκος κύματος

- Κβαντική Φυσική – τα σωματίδια συμπεριφέρονται και ως κύματα
 - Όσο **μεγαλύτερη** είναι η **ορμή p** (= **μάζα** x **ταχύτητα**) ενός σωματιδίου
 - τόσο **μικρότερο μήκος κύματος (λ)** έχει:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$



Louis de Broglie (1924)

Σταθερά του Planck = $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$

Αφού στο πείραμα Rutherford-Geiger-Mersden τα βλήματα (σωματίδια α) σκεδάστηκαν από τους πυρήνες χρυσού, σημαίνει ότι τα σωματίδια α είχαν το σωστό μήκος κύματος για να “διακρίνουν” τους πυρήνες αυτούς. Δηλαδή μήκος κύματος παραπλήσιο με τις διαστάσεις των πυρήνων χρυσού.

Άσκηση

Αφού στο πείραμα Rutherford-Geiger-Mersden τα βλήματα (σωματίδια α) σκεδάστηκαν από τους πυρήνες χρυσού, σημαίνει ότι τα σωμάτια α είχαν το σωστό μήκος κύματος για να “διακρίνουν” τους πυρήνες αυτούς, Δηλαδή μήκος κύματος παραπλήσιο με τις διαστάσεις των πυρήνων χρυσού.

Άσκηση:

Πόσο μήκος κύματος είχαν τα σωμάτια α στο πείραμα αυτό? (Ή με άλλα λόγια: “πόση ήταν η διακριτική ικανότητα” των σωμάτων α ?).

Δίνεται ότι η κινητική τους ενέργεια ήταν 5.41 MeV.

Άσκηση: διακριτική ικανότητα = μήκος κύματος των εκπεμπόμενων α

- $K = 5.41 \text{ MeV}$ (κινητική ενέργεια)

- $m = 3727.38 \text{ MeV}/c^2$

Ξεχνάω τα c και βάζω παντού MeV . Στο τέλος όμως βάζω τις σωστές μονάδες

- $E = K + m = 5.41 + 3727.38 = 3732.79 \text{ MeV}$

$$p = \sqrt{E^2 - m^2} = \sqrt{3732.79^2 - 3727.38^2} \sim 200 \text{ MeV}/c$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi \hbar c}{p c} = \frac{2\pi \times 197 \text{ MeV fm}}{200 \text{ MeV}} \sim 6.2 \text{ fm}$$

Άσκηση: Γιατί δούλεψε το πείραμα Rutherford

- Τα σωματίδια α που εκπέμπονταν από το Πολώνιο (Po) είχαν **μήκος κύματος** συμβατό με τις **διαστάσεις** των βομβαρδιζόμενων πυρήνων χρυσού (Au)

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi \hbar c}{p c} = \frac{2\pi \times 197 \text{ MeV fm}}{200 \text{ MeV}} \sim 6.2 \text{ fm}$$

Στο επόμενο μάθημα θα δούμε ότι η ακτίνα των πυρήνων Πολωνίου είναι:

$$R = 6.5 \text{ fm}$$

Χαρακτηριστικό μέγεθος Πυρήνων

Οι πυρήνες έχουν ακτίνα $\sim 1-10 \text{ fm}$
 $= 1-10 * 10^{-15} \text{ m} = 10^{-5} - 10^{-4} \text{ A}^\circ$

- Οι πυρήνες είναι 10 με 100 χιλιάδες φορές μικρότεροι των ατόμων

Συμβολισμοί και Ορολογία

- **νουκλίδιο** X : $\overset{A}{\underset{Z}{X}}$ (π.χ. ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$, ${}^3_1\text{H}$)

A = άθροισμα πρωτονίων και νετρονίων (**νουκλεόνια**)

Z = αριθμός πρωτονίων
→ δίνει το όνομά του στο κάθε στοιχείο.

πχ., κάθε στοιχείο με δύο πρωτόνια ($Z=2$) ονομάζεται ήλιο (He).

** Ειδικά ονόματα για το υδρογόνο ($Z=1$): υδρογόνο, δευτέριο, τρίτιο:

H ($A=1$) , D ($A=2$), T ($A=3$)

- **Ισότοπο** : νουκλίδιο με ίδιο αριθμό πρωτονίων (Z)
- **Ισότονο** : νουκλίδιο με ίδιο αριθμό νετρονίων (N)
- **Ισοβαρές** : νουκλίδιο με ίδιο μαζικό αριθμό A

Periodic Table of Elements

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1 H Hydrogen 1.00794	Atomic # Symbol Name Atomic Mass																2 He Helium 4.002602	
2	3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012182	C Solid Hg Liquid H Gas Rf Unknown Alkali metals Alkaline earth metals Lanthanoids Actinoids Transition metals Poor metals Other nonmetals Noble gases										5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.0107	7 N Nitrogen 14.0067	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.9984032	10 Ne Neon 20.1797	
3	11 Na Sodium 22.98976928	12 Mg Magnesium 24.3050											13 Al Aluminium 26.9815386	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosphorus 30.973762	16 S Sulfur 32.065	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948	
4	19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955912	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938045	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933195	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.64	33 As Arsenic 74.92160	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798	
5	37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90585	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybdenum 95.96	43 Tc Technetium (97.9072)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.90550	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.8682	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90447	54 Xe Xenon 131.293	
6	55 Cs Caesium 132.9054519	56 Ba Barium 137.327	57–71		72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.94788	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.084	79 Au Gold 196.966569	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98040	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)
7	87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89–103		104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (277)	109 Mt Meitnerium (268)	110 Ds Darmstadtium (271)	111 Rg Roentgenium (272)	112 Uub Ununbium (285)	113 Uut Ununtrium (284)	114 Uuq Ununquadium (289)	115 Uup Ununpentium (288)	116 Uuh Ununhexium (292)	117 Uus Ununseptium (294)	118 Uuo Ununoctium (294)

For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.

Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah (michael@dayah.com). <http://www.ptable.com/>



57 La Lanthanum 138.90547	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.90768	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92535	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.93032	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.93421	70 Yb Ytterbium 173.054	71 Lu Lutetium 174.9668
89 Ac Actinium (227)	90 Th Thorium 232.03806	91 Pa Protactinium 231.03588	92 U Uranium 238.02891	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)