

# ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟ ΚΑΙ ΑΤΟΜΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ

Joseph John Thomson (Nobel 1906)

ηλεκτρόνιο 1897 J. J. Thomson

Το πρώτο ανακαλύφθέν υποατομικό σωματίδιο: οι καθοδικές ακτίνες αποτελούνται από αρνητικά φορτισμένα σωματίδια πολύ μικρότερα των ατόμων με μεγάλο  $\frac{q}{m}$ .

{ φασματικά ... κυβικό πρότυπο (1902),  
πρότυπο "σταφιδώφωφου" (1904),  
πρότυπο Κράντ (1904) κ.α. } ("ηλεκτρονία")

πολλά φαινόμενα σχετίζονται με ηλεκτρόνια ατόμων & στερεών δεν εξηγούνται με κλασική φυσική

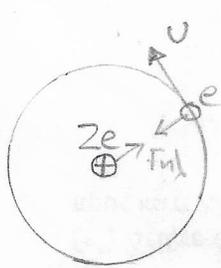
παλαιά κλασική θεωρία (1900-1925)  
↓  
κλασική μηχανική (>1925)

## ΑΤΟΜΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ RUTHERFORD (1911)

→ παλαιά κλασική εξήγηση το δ οποίου είναι το ΑΤΟΜΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ Bohr (1913)

πειράματα Rutherford → τα ηλεκτρόνια περιφέρονται γύρω από έναν μικρό, πυκνό, θετικά φορτισμένο πυρήνα

Ατομικό πρότυπο Rutherford: ιδιότυπο κλασικό, «ηλιακό» ή «πλανητικό» σύστημα



$$F_{nl} = F_k \Rightarrow \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2} = \frac{m_e v^2}{r}$$

$$\frac{m_e v^2}{2} = E_{kin} = \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

$$E_{dyn} = (-e) \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze}{r} = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

\* { K.M. = πυρήνας  
σύνθετα σωματίδια  
 $m_p \approx 1836 m_e$   
 $m_n \approx 1839 m_e$  }

$$E_{tot} = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

$$v = \sqrt{\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 m_e r}}$$

$$v = \omega r = 2\pi f r$$

$$\Rightarrow f = \sqrt{\frac{Ze^2}{16\pi^3 \epsilon_0 m_e r^3}}$$

\* {  $F_{nl} \gg F_{βαρ}$   
Να αποδειχτεί  
ως ακριβές }

Όμως, οι παραπάνω εξισώσεις παρουσιάζουν αντιφάση

1m) εξίσωση Larmor  $P = \frac{q^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3}$

a: επιτάχυνση (έδώ κεντρομόλος)  
q: φορτίο (έδώ -e)

εκπεμπόμενη ισχύς από μη σχετικιστικό επιταχυνόμενο φορτίο

εκπομπή ΗΜ ακτινοβολίας  $\Rightarrow E_{tot} \downarrow \Rightarrow |E_{tot}| \uparrow \Rightarrow r \downarrow \Rightarrow v \uparrow \text{ & } f \uparrow$

Το ηλεκτρόνιο χάνει ενέργεια διαγράφοντας μια σπειρωδή κίνηση συνεχώς μικρότερης ακτίνας  $r \downarrow$  ...  
συνεχώς μεγαλύτερης ταχύτητας  $v \uparrow$  συνεχώς μεγαλύτερης συχνότητας  $f \uparrow$

... καταπιπτότατος μορφαία στον πυρήνα!

Δηλαδή το κλασικό πρότυπο Rutherford είναι ένα καταστροφικό πρότυπο.

$\Delta n$   $v \downarrow$  συνεχώς  $f \uparrow$  συνεχώς  
 $v \uparrow$  συνεχώς

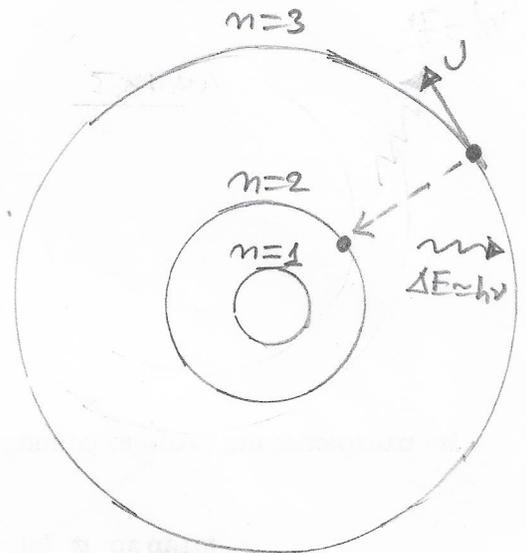
Πώς μπορεί αυτό να συμβιβαστεί με τα πειραματικά δεδομένα, τα οποία, ήδη από το γέλοι του 19ου αιώνα, έδειχναν πως τα άτομα εκπέμπουν φως σε διακριτές και όχι συνεχώς συχνότητες (ενέργειες)

σειρές Lyman, Balmer, Paschen, ... (φύλλο 4)

Ατομικό Πρότυπο Bohr (1913)

παράφερε να εξηγήσει τον πειραματικό νόμο Rydberg για τις φασματικές γραμμές εκπομπής του ατόμου του H.

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), n_1, n_2 \in \mathbb{N}^*$$
  
σταθερά Rydberg  
 $\approx 1.097 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$



$n_1$	$n_2$	Όνομα φασματικής σειράς	Συχνότητα προς
1	$2 \rightarrow \infty$	Lyman	91.13 nm (UV)
2	$3 \rightarrow \infty$	Balmer	364.51 nm (~Visible)
3	$4 \rightarrow \infty$	Paschen	820.14 nm (IR)
4	$5 \rightarrow \infty$	Breckett	1458.03 nm (FIR)
5	$6 \rightarrow \infty$	Pfund	2278.17 nm (FIR)
6	$7 \rightarrow \infty$	Humphreys	3280.56 nm (FIR)

μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε υδρογονοειδή ιόντα π.χ.  $\text{He}^+$ ,  $\text{Li}^{2+}$ ,  $\text{Be}^{3+}$

$$\frac{1}{\lambda} = RZ^2 \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

μπορεί ακόμα να εφαρμοστεί σε μακρινά ηλεκτρόνια πολυηλεκτρονικών ατόμων όπου το ενεργό πυρηνικό φορτίο μπορεί να θεωρηθεί  $\approx e > 0$   
άρα όλα τα πυρηνικά φορτία, είναι από ένα, διαφορετικά από τα στοιχεία ηλεκτρόνια

ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ

① Το ηλεκτρόνιο κινείται σε κυκλική τροχιά λόγω  $F_{ηλ} = F_K$  και υπακούει στους νόμους της κλαστικής μηχανικής, τους οποίους εκφράζουν οι εξισώσεις τις οποίες γράψαμε προηγουμένως για τα  $F_{ηλ} = F_K, E_{ΚΗ}, E_{ΔΥΗ}, E_{ΟΔ}, v, f$

② Άλλω, ότι για τις άπειρες επιτρεπόμενες κλασικές τροχιές (σε ορατά φως ακτίνες), το ηλεκτρόνιο μπορεί να κινείται μόνο σε τροχιές:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} \quad L = r p = m_e v r = n \hbar \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

στροφορμή

ΕΙΣΑΓΕΤΑΙ ΑΞΙΩΜΑΤΙΚΑ  
 Διακριτότητα  
 («κβάντωση»)

σήμερα ονομάζεται  
 κύριος κβαντικός αριθμός  
 principal quantum number

③ Στις επιτρεπόμενες αυτές στάσιμες τροχιές (stationary orbits) το ηλεκτρόνιο ΔΕΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΕΙ (δηλ. δεν ισχύει η εξ. Larmor για την P)  
 Σε αυτές τις τροχιές, σε καθορισμένες αποστάσεις από τον πυρήνα, το ηλεκτρόνιο έχει καθορισμένη, σταθερή ενέργεια.

④ Η ακτινοβολία εκπέμπεται ή απορροφάται όταν το ηλεκτρόνιο αλλάξει επιτρεπόμενη τροχιά και η συχνότητα της εκπέμπεται ή απορροφάται ΗΜ ακτινοβολίας είναι

$$hf = |E_i - E_f|$$

initial                  final

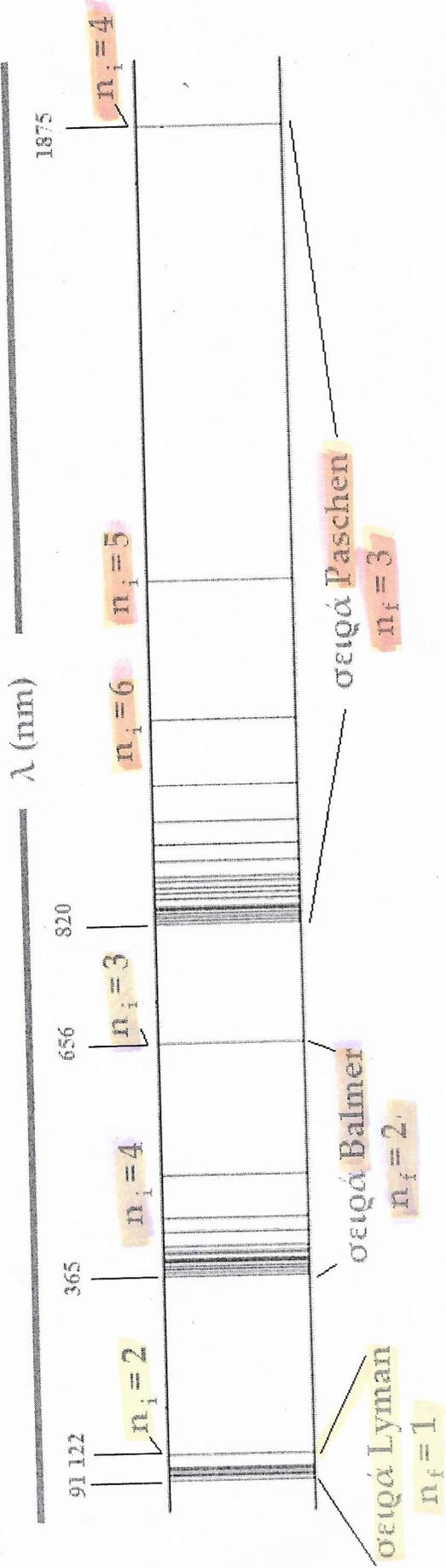
$$\left. \begin{aligned} m_e v r &= n \hbar \\ v &= \sqrt{\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 m_e r}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{m_e^2 r^2 Ze^2}{4\pi\epsilon_0 m_e r} = n^2 \hbar^2 \Rightarrow \boxed{r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{Ze^2 m_e} \cdot n^2}$$

$$a_0 := \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} \approx 0.529 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

ακτίνα Bohr

$a_0$ : χονδραειδίως, τυπικό μέγεθος του ατόμου  
 $10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}$   
 (ξηλ. τυπικό μέγεθος πυρήνα  $10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$ )

- $r_1 = a_0$
- $r_2 = 4a_0 \dots$  στο άτομο H
- $r_3 = 9a_0$
- ...



IR  
δημιούρα

UV-vis

UV  
δημιούρα

visual 380 nm - 760 nm  
πείρα

δραση στον "μεσο" ανθρωπινο οφθαλμο

$$E_{ολη} = E_n = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 a_n} = -\frac{Ze^2 Z e^2 m_e}{8\pi\epsilon_0 4\pi\epsilon_0 \hbar^2 n^2} \Rightarrow E_n = -\frac{Z^2 m_e e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2}$$

Να συμπληρώσει τα προδόμενα

K	m
M	μ
G	n
T	p
P	f

$$R_E := \frac{m_e e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \approx 13.6 \text{ eV}$$

Ενέργεια Rydberg

$$E_n = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2} \text{ στο H}$$

$$E_1 \approx -13.6 \text{ eV}$$

$$E_2 \approx -3.4 \text{ eV}$$

$$E_3 \approx -1.5 \text{ eV}$$

...

\* Η άμεση μάζα  $\mu = \frac{m_e m_p}{m_e + m_p} \approx m_e$  επειδή  $m_p \approx 1836 m_e$

$$\text{Από } hf = |E_{n_2} - E_{n_1}| \Rightarrow h \frac{c}{\lambda} = \left| -\frac{R_E}{n_2^2} + \frac{R_E}{n_1^2} \right| \Rightarrow$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{R_E}{hc} \left| \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right|$$

$$R := \frac{R_E}{hc} \approx 1.097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

σταθερά Rydberg

Δηλαδή, προκύπτει ο πειραματικός τύπος του Rydberg! ΕΠΙΤΥΧΙΑ

ΜΕΙΩΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΣ ΠΡΩΤΟΥ ΒΟΗΡ

- 1ο εφαρμόζεται μόνο στο H, στα He<sup>+</sup>, Li<sup>2+</sup>, Be<sup>3+</sup>... , έξωτερικά ηλεκτρόνια πολυηλεκτρονικών ατόμων (διωράκιου)  
μονοηλεκτρονικά άτομα
- δεν επαρκεί ούτε για το άτομο του He.
- 2ο Δεν μπορεί να εξηγήσει γιατί κάποιες φασματικές γραμμές είναι πιο έντονες από άλλες, δηλ. γιατί κάποιες μεταβάσεις μεταξύ ενεργειακών επιπέδων έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να συμβούν από άλλες.
- 3ο Δεν μπορεί να εξηγήσει γιατί πολλές φασματικές γραμμές είναι πολλαπλές, δηλ. αποτελούνται από ξεχωριστές γραμμές των οποίων τα μήκη κύματος διαφέρουν ελάχιστα (λόγω ύψις ατομικών φασμάτων)
- 4ο Δεν μπορεί να εξηγήσει γιατί επίσης μαγνητικό πεδίο οι πολλαπλές γραμμές διαχωρίζονται (φαινόμενο Zeeman) (φύλλο 7)
- 5ο Δεν κτλ. επιτρέπει να κατανοήσουμε πώς άλληλεπίδραση τα άτομα ώστε να σχηματίσουν μόρια, στερεά και άλλα συσσωρευτώμερα

ΧΗΜΕΙΑ ΦΥΣΙΚΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΜΕΝΗΣ ΥΛΗΣ

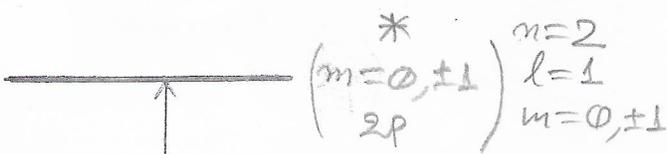


οιχα' οισα' > 1925

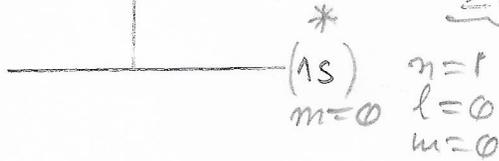
κβαντική μηχανική  
quantum mechanics

Ἔτεζ δὲ οὐδὲν ἴδμεν ἐν φύσει γὰρ ἢ ἀληθείᾳ»

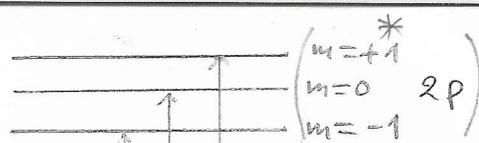
ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ  
~ 470 - 370 π.Χ



φαινόμενο  
Zeeeman



χωρίς μαγνητικό πεδίο

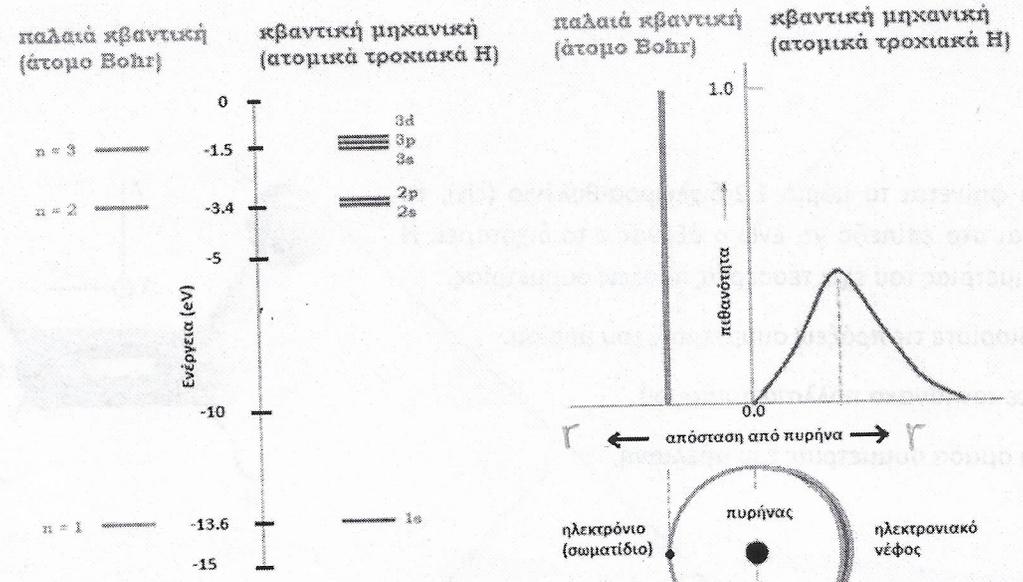


με μαγνητικό πεδίο

\* σύμφωνα με το πρώτο αξονικό τροχιακό το άτομο θα εφεύρουμε άρχισια

# Σύγκριση πρώτου Bohr - πρώτου άτομικών τροχιακών

## © ΑΤΟΜΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ



Σύγκριση Ενεργειών

Σύγκριση θέσεων

### ΜΕΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΕΣ

$$f(x,y) \quad \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} := \frac{df(x,y)}{dx} \Big|_{y=\text{σταθερή}}$$

$$\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} := \frac{df(x,y)}{dy} \Big|_{x=\text{σταθερή}}$$

όμοια για συνάρτηση περισσότερων μεταβλητών

Εδώ πια  $n > 3$  να έχουμε  $f(x,t)$ ,  $f(x,y,z,t)$

π.χ.

$$f(x,y) = x^2 + y^2$$

$$g(x,y) = xy^2 + 3x^2y$$

$$h(x,y,z) = 4xyz^4$$

ΑΣΚΗΣΗ: Βρείτε το λόγο  $\frac{F_{ηλ}}{F_{βαρ}}$  στο άτομο του υδρογόνου.

$$\left. \begin{aligned} F_{ηλ} &= \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \\ F_{βαρ} &= \frac{G m_p \cdot m_e}{r^2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{F_{ηλ}}{F_{βαρ}} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 G m_p m_e}$$

$$e \approx 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\epsilon_0 \approx 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$G \approx 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$$

$$m_e \approx 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$m_p \approx 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\frac{F_{ηλ}}{F_{βαρ}} \approx \frac{1.6^2 \cdot 10^{-38}}{4\pi \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 6.67 \cdot 10^{-11}}$$

$$\approx \frac{9 \cdot 10^{-31} \cdot 1.67 \cdot 10^{27}}{2.3 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{10^{-38}}{10^{-81}}}$$

$$\approx 2.3 \cdot 10^{39}$$

Δηλαδή, η ηλεκτρική δύναμη είναι συντηρητικώς μεγαλύτερη.

2008/1/10

κλασική μηχανική

άρχινη θέση  $x_i$   
άρχινη ορμή  $p_i$   
ασκοούμενες δυνάμεις

}  $\Rightarrow$  μέλλον γνωστό ακριβώς

ΑΙΤΙΑ  $\Rightarrow$  ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ

στον καθημερινό κόσμο  
από τις ποσότητες μπορούμε να καθορίσουμε  
με μέγιστη ακρίβεια ώστε οι προβλέψεις της κλασικής μηχανικής  
να συμφωνούν με το πείραμα & γενικά με όσα έχουμε στην καθημερινότητα μας

κβαντική μηχανική

άρχη αβεβαιότητας  
uncertainty principle

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\hbar = 1.054 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-1}$$

για την καθημερινή ζωή  
αυτή η αβεβαιότητα  
δεν έχει σημασία

οι αβεβαιότητες δεν οφείλονται σε συστηματικό ή τυχαίο σφάλμα  
μέτρησας

οποιαδήποτε μέτρηση οδηγεί στην αύξηση κι άλλο την αβεβαιότητα μας

? Αφού δεν γνωρίζουμε  
εξακριβώς το παρόν

$\Rightarrow$  Δεν μπορούμε να γνωρίζουμε  
εξακριβώς το μέλλον

Η άγνοιά μας δεν είναι εθελουσιαστική. Μπορούμε να γνωρίζουμε  
πιθανότητες

π.χ. παρουσία σε χώρο  
οργάνω  
κλπ

Η κβαντική φυσική διερευνά σχέσεις μεταξύ πιθανοτήτων

ΑΙΤΙΑ & ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΑΛΩΜΑ