



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

# Ηλεκτρομαγνητισμός - Οπτική - Σύγχρονη Φυσική

Ενότητα: Σύγχρονη Φυσική

Βαρουτάς Δημήτρης  
Σχολή Θετικών Επιστημών  
Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

# Ατομική φυσική

## Εφαρμογές της κβαντικής μηχανικής στην ατομική φυσική

Ένα μεγάλο μέρος αυτού του κεφαλαίου επικεντρώνεται στο άτομο του υδρογόνου. Το άτομο του υδρογόνου είναι σημαντικό, μεταξύ άλλων, για τους εξής λόγους:

- Το άτομο του υδρογόνου είναι το μοναδικό ατομικό σύστημα για το οποίο μπορούμε να βρούμε ακριβή λύση.
- Μεγάλο μέρος της γνώσης που αποκτήθηκε κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα για το άτομο του υδρογόνου, το οποίο έχει ένα μόνο ηλεκτρόνιο, μπορεί να επεκταθεί και σε ιόντα με ένα ηλεκτρόνιο, όπως το He<sup>+</sup> και το Li<sup>2+</sup>.
- Το άτομο του υδρογόνου είναι ένα ιδανικό σύστημα για την εκτέλεση ελέγχων ακριβείας των θεωρητικών προβλέψεων με τα πειραματικά δεδομένα.
  - Επίσης βελτιώνει τη συνολική κατανόηση για την ατομική δομή.
- Οι κβαντικοί αριθμοί που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των επιτρεπτών καταστάσεων του υδρογόνου μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη πιο σύνθετων ατόμων.
  - Επιτρέπει την κατανόηση του περιοδικού πίνακα των στοιχείων.
- Προτού επιχειρήσουμε να ασχοληθούμε με τις πολύπλοκες δομές των μορίων και τη δομή των στερεών, πρέπει να κατανοήσουμε καλά τις βασικές πτυχές της ατομικής δομής.

Εισαγωγή

## Άλλες ιδέες στην ατομική φυσική

Από την εφαρμογή της πλήρους μαθηματικής λύσης της εξίσωσης Schrödinger στο άτομο του υδρογόνου προκύπτει μια ολοκληρωμένη και κομψή περιγραφή των ιδιοτήτων του ατόμου.

Οι κβαντικοί αριθμοί χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των διαφόρων επιτρεπτών καταστάσεων του ατόμου.

Οι κβαντικοί αριθμοί έχουν φυσική σημασία.

Ορισμένες κβαντικές καταστάσεις επηρεάζονται από την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου.

Η απαγορευτική αρχή είναι σημαντική για την κατανόηση των ιδιοτήτων των ατόμων με πολλά ηλεκτρόνια και για την διάταξη των στοιχείων στον περιοδικό πίνακα.

Εισαγωγή

## Ατομικά φάσματα

Όλα τα σώματα εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία, η οποία χαρακτηρίζεται από μια *συνεχή* κατανομή μηκών κύματος.

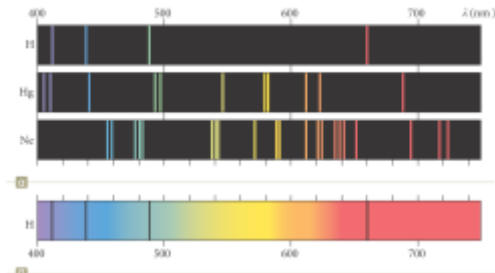
Όταν ένα αέριο σε χαμηλή πίεση υφίσταται ηλεκτρική εκκένωση, παρατηρείται ένα διακριτό **γραμμικό φάσμα**.

Η παρατήρηση και ανάλυση αυτών των φασματικών γραμμών ονομάζεται **φασματογραφία εκπομπής**.

Το άτομο του υδρογόνου έχει το απλούστερο γραμμικό φάσμα.

Ενότητα Σ4.1

## Παραδείγματα φασμάτων εκπομπής



Ενότητα Σ4.1

## Η μοναδικότητα των ατομικών φασμάτων

Τα άλλα άτομα παρουσιάζουν εντελώς διαφορετικά γραμμικά φάσματα.

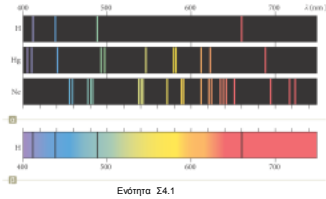
Επειδή δεν υπάρχουν δύο στοιχεία που να έχουν το ίδιο γραμμικό φάσμα, αυτό το φαινόμενο αποτελεί μια πρακτική και ευαίσθητη μέθοδο αναγνώρισης των στοιχείων που περιέχονται σε άγνωστα δείγματα.

Ενότητα Σ4.1

## Φασματογραφία απορρόφησης

Το **φάσμα απορρόφησης** δημιουργείται κατά τη διέλευση λευκού φωτός, το οποίο εκπέμπει μια συνεχής πηγή, μέσα από ένα αέριο ή από ένα αραιό διάλυμα του στοιχείου που αναλύουμε.

Το φάσμα απορρόφησης αποτελείται από μια σειρά σκοτεινών γραμμών που υπερτίθενται στο συνεχές φάσμα της φωτεινής πηγής.



Ενότητα Σ4.1

## Σειρά Balmer

Το 1885, ο Johann Balmer ανακάλυψε μια εμπειρική συνάρτηση η οποία προέβλεπε σωστά τα μήκη κύματος των τεσσάρων ορατών γραμμών εκπομπής του υδρογόνου.

- $H_\alpha$  (ερυθρό),  $\lambda = 656.3 \text{ nm}$ .
- $H_\beta$  (μπλε-πράσινο),  $\lambda = 486.1 \text{ nm}$ .
- $H_\gamma$  (μπλε-ιώδες),  $\lambda = 434.1 \text{ nm}$ .
- $H_\delta$  (ιώδες),  $\lambda = 410.2 \text{ nm}$ .



Ενότητα Σ4.1

## Το φάσμα εκπομπής του υδρογόνου – Συνάρτηση

Τα μήκη κύματος των φασματικών γραμμών του υδρογόνου μπορούν να υπολογιστούν από τη σχέση:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

- $R_H$  είναι η σταθερά Rydberg.
  - $R_H = 1.0973732 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$
- Το  $n$  είναι ακέραιος,  $n = 3, 4, 5, \dots$
- Οι φασματικές γραμμές αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές του  $n$ .
- Οι ακέραιες τιμές του  $n$  από 3 έως 6 δίνουν τις τέσσερις ορατές γραμμές.
- Οι ακέραιες τιμές του  $n$  για  $n > 6$  δίνουν τις υπεριώδεις γραμμές της σειράς Balmer.
- Το όριο σειράς είναι το μικρότερο μήκος κύματος της σειράς και προκύπτει όταν  $n \rightarrow \infty$ .

Ενότητα Σ4.1

## Άλλες σειρές του υδρογόνου

Έχουν επίσης ανακαλυφθεί και άλλες σειρές. Τα μήκη κύματος των γραμμών αυτών των σειρών μπορούν να υπολογιστούν από τις παρακάτω σχέσεις:

Σειρά Lyman:  $\frac{1}{\lambda} = R_H \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 2, 3, 4, \dots$

Σειρά Paschen:  $\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 4, 5, 6, \dots$

Σειρά Brackett:  $\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 5, 6, 7, \dots$

Ενότητα Σ4.1

## Joseph John Thomson

1856–1940

Άγγλος φυσικός

Τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ Φυσικής το 1906.

Συνήθως, σε αυτόν αποδίδεται η ανακάλυψη του ηλεκτρονίου.

Πραγματοποίησε έρευνα στην εκτροπή των καθοδικών ακτίνων (ηλεκτρονίων) μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο.

- Δημιούργησε τον κλάδο της υποατομικής σωματιδιακής φυσικής.



Ενότητα Σ4.2

## Τα πρώτα μοντέλα του ατόμου – Το μοντέλο του Thomson

Ο J. J. Thomson προσδιόρισε τον λόγο του φορτίου προς τη μάζα για τα ηλεκτρόνια.

Σύμφωνα με το μοντέλο του Thomson για το άτομο:

- Το άτομο είναι μια κατανομή θετικού φορτίου στον χώρο.
- Τα ηλεκτρόνια βρίσκονται σε διάφορες θέσεις σε ολόκληρο τον όγκο.
- Το άτομο συνολικά είναι ηλεκτρικά ουδέτερο.



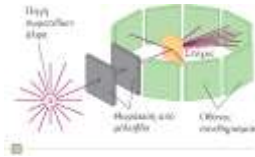
Ενότητα Σ4.2

## Το πείραμα του λεπτού μεταλλικού φύλλου του Rutherford

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε το 1911.

Μια δέσμη θετικά φορτισμένων σωματιδίων άλφα προσκρούει σε έναν λεπτό μεταλλικό στόχο και σκεδάζεται.

Το μοντέλο του Thomson δεν μπορούσε να εξηγήσει τις μεγάλες εκτροπές.



Ενότητα Σ4.2

## Τα πρώτα μοντέλα του ατόμου – Το μοντέλο του Rutherford

Το μοντέλο του Rutherford:

- Πλανητικό μοντέλο.
- Βασίστηκε στα αποτελέσματα των πειραμάτων με το λεπτό μεταλλικό φύλλο.
- Το θετικό φορτίο είναι συγκεντρωμένο στο κέντρο του ατόμου, το οποίο ονομάζεται πυρήνας.
- Τα ηλεκτρόνια περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα όπως οι πλανήτες γύρω από τον Ήλιο.



Ενότητα Σ4.2

## Δυσκολίες με τον μοντέλο του Rutherford

Τα άτομα εκπέμπουν ορισμένες συγκεκριμένες χαρακτηριστικές συχνότητες ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

- Το μοντέλο του Rutherford δεν μπορεί να εξηγήσει αυτό το φαινόμενο.

Τα ηλεκτρόνια που προβλέπει το μοντέλο του Rutherford έχουν κεντρομόλο επιτάχυνση.

- Το ηλεκτρόνιο θα έπρεπε να εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα συχνότητας ίδιας με αυτήν την κυκλικής κίνησης.
- Καθώς το ηλεκτρόνιο θα εξέπεμπε ακτινοβολία, η ακτίνα της τροχιάς του θα έπρεπε συνεχώς να μειώνεται.
- Το ηλεκτρόνιο θα έπρεπε τελικά να προσκρούσει στον πυρήνα.
  - Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει.

Ενότητα Σ4.2

## Niels Bohr

1885–1962

Δανός φυσικός

Συμμετείχε ενεργά στα πρώτα στάδια της ανάπτυξης της κβαντικής μηχανικής.

Ήταν διευθυντής του Ινστιτούτου Προχωρημένων Σπουδών της Κοπεγχάγης.

Το 1922, τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ Φυσικής.

- Για τη μελέτη της δομής των ατόμων και της ακτινοβολίας που εκπέμπουν.



Ενότητα Σ4.3

## Η θεωρία του Bohr για το άτομο του υδρογόνου

Το 1913 ο Bohr έδωσε μια ερμηνεία για το ατομικό φάσμα, η οποία περιλάμβανε μερικά από τα χαρακτηριστικά της σύγχρονα αποδεκτής θεωρίας.

Το μοντέλο του περιελάμβανε ιδέες τόσο της κλασικής όσο και της σύγχρονης φυσικής.

Ο Bohr εφάρμοσε τις ιδέες του Planck για τις κβαντισμένες ενεργειακές στάθμες στα ηλεκτρόνια που διαγράφουν κυκλική τροχιά στο άτομο του Rutherford.

Αυτό το μοντέλο θεωρείται πλέον παρωχημένο.

Έχει αντικατασταθεί πλήρως από την πιθανοκρατική κβαντομηχανική θεωρία.

Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα για την ανάπτυξη των εννοιών της κβάντωσης της ενέργειας και της στροφορμής, όπως εφαρμόζονται στα συστήματα ατομικής κλίμακας.

Ενότητα Σ4.3

## Το πρώτο αξίωμα του Bohr για το άτομο του υδρογόνου

Το ηλεκτρόνιο διαγράφει κυκλική τροχιά γύρω από το πρωτόνιο υπό την επίδραση της ελκτικής ηλεκτρικής δύναμης.

- Η δύναμη Coulomb παρέχει την κεντρομόλο επιτάχυνση.

Επειδή το απεικονισμένο ηλεκτρόνιο εκπέμπει ενέργεια, η ακτίνα της τροχιάς του φθίνει γρήγορα μέχρι προσφύκει στο πυρήνα.



Ενότητα Σ4.3

## Το δεύτερο αξίωμα του Bohr για το άτομο του υδρογόνου

Μόνο ορισμένες τροχιές των ηλεκτρονίων είναι σταθερές.

- Οι καταστάσεις του ηλεκτρονίου που αντιστοιχούν σε αυτές τις σταθερές τροχιές ομοιάστηκαν από τον Bohr **στάσιμες καταστάσεις**.
- Όταν το ηλεκτρόνιο βρίσκεται σε μία από αυτές τις σταθερές τροχιές δεν εκπέμπει ενέργεια υπό μορφή ακτινοβολίας, παρόλο που επιταχύνεται.
- Επομένως, η συνολική ενέργεια του ατόμου παραμένει σταθερή και η κίνηση του ηλεκτρονίου μπορεί να περιγραφεί βάσει της κλασικής μηχανικής.
- Σύμφωνα με το μοντέλο του Bohr, το ηλεκτρόνιο που επιταχύνεται από την κεντρομόλο δύναμη δεν εκπέμπει συνεχώς ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να μη χάνει ενέργεια και τελικά να μην προσκρούει στον πυρήνα.

Ενότητα Σ4.3

## Το τρίτο αξίωμα του Bohr για το άτομο του υδρογόνου

Το άτομο εκπέμπει ακτινοβολία όταν το ηλεκτρόνιο μεταπίπτει από μια αρχική στάσιμη κατάσταση υψηλής ενέργειας σε μια στάσιμη κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας.

- Αυτή η μετάπτωση δεν μπορεί να αναλυθεί με την κλασική θεωρία.
- Η συχνότητα του φωτονίου που εκπέμπεται κατά τη μετάπτωση σχετίζεται με τη μεταβολή της ενέργειας του ατόμου.
- Η συχνότητα είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα της τροχιακής κίνησης του ηλεκτρονίου.
- Η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας δίνεται από τη σχέση:

$$E_i - E_f = hf$$

- Αν απορροφηθεί ένα φωτόνιο, το ηλεκτρόνιο μεταπίπτει σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη.

Ενότητα Σ4.3

## Το τέταρτο αξίωμα του Bohr για το άτομο του υδρογόνου

Η ακτίνα των επιτρεπτών τροχιών ενός ηλεκτρονίου καθορίζεται από μια συνθήκη που επιβάλλεται στη στροφορμή του ηλεκτρονίου.

Επιτρεπτές τροχιές είναι αυτές για τις οποίες η στροφορμή του ηλεκτρονίου κατά την περιφορά του γύρω από τον πυρήνα είναι κβαντισμένη και ίση με ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του  $\hbar = h/2\pi$ .

Ενότητα Σ4.3

## Τα αξιώματα του Bohr – Σημειώσεις

Αυτά τα αξιώματα συνδυάζαν καθιερωμένες αρχές και νέες ιδέες.

Το πρώτο αξίωμα προέρχεται από την κλασική μηχανική.

- Θεωρεί ένα ηλεκτρόνιο που βρίσκεται σε τροχιά γύρω από τον πυρήνα σαν έναν πλανήτη σε τροχιά γύρω από έναν αστέρα.

Το δεύτερο αξίωμα ήταν μια νέα ιδέα.

- Ερχόταν σε πλήρη αντίθεση με τα όσα ήταν γνωστά για τον ηλεκτρομαγνητικό εκείνη την εποχή.

Το τρίτο αξίωμα αντιπροσωπεύει την αρχή της διατήρησης της ενέργειας.

Το τέταρτο αξίωμα ήταν μια νέα ιδέα.

- Δεν βασιζόταν στην κλασική θεωρία της φυσικής.

Ενότητα Σ4.3

Μαθηματική θεώρηση των παραδοχών του Bohr και τα αποτελέσματά τους

Η στροφορμή ενός ηλεκτρονίου κατά την περιφορά του γύρω από τον πυρήνα είναι:

$$m_e v r = n \hbar \quad \text{όπου } n = 1, 2, 3, \dots$$

Η συνολική ενέργεια του ατόμου δίνεται από τη σχέση:

$$E = K + U = \frac{1}{2} m_e v^2 - k_e \frac{e^2}{r}$$

Το ηλεκτρόνιο μοντελοποιείται ως σωματίδιο που εκτελεί ομαλή κυκλική κίνηση. Επομένως, η ηλεκτρική δύναμη που ασκείται στο ηλεκτρόνιο πρέπει να ισούται με το γινόμενο της μάζας του και της κεντρομόλου επιτάχυνσης:

$$E = -\frac{k_e e^2}{2r}$$

Η συνολική ενέργεια μπορεί επίσης να εκφραστεί ως:

- Η συνολική ενέργεια είναι αρνητική, κάτι που δείχνει ότι το ζεύγος ηλεκτρονίου-πρωτονίου είναι δέσμιο.

Ενότητα Σ4.3

## Ακτίνα Bohr

Οι ακτίνες των επιτρεπτών τροχιών δίνονται από τη σχέση:

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e k_e e^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

- Από αυτή τη σχέση προκύπτει ότι οι ακτίνες των επιτρεπτών τροχιών έχουν διακριτές τιμές, δηλαδή είναι κβαντισμένες.
- Το αποτέλεσμα αυτό βασίζεται στην παραδοχή ότι το ηλεκτρόνιο μπορεί να βρίσκεται μόνο σε συγκεκριμένες επιτρεπτές τροχιές που καθορίζονται από τον ακέραιο  $n$  (τέταρτο αξίωμα του Bohr).
  - Η μικρότερη επιτρεπτή ακτίνα τροχιάς ονομάζεται **ακτίνα Bohr** και συμβολίζεται με  $a_0$ .
  - $a_0 = 0.0529 \text{ nm}$

Ενότητα Σ4.3

Οι ακτίνες των τροχίων και οι ενέργειες στις οποίες αντιστοιχούν

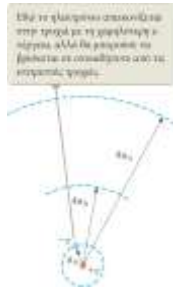
Η παρακάτω γενική σχέση δίνει την ακτίνα οποιασδήποτε τροχιάς σε ένα άτομο υδρογόνου:

$$r_n = n^2 a_0$$

Η ενέργεια που αντιστοιχεί σε οποιαδήποτε τροχιά δίνεται από τη σχέση:

$$E_n = -\frac{k_e e^2}{2a_0} \left( \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

- Η οπδία γίνεται:  $E_n = -13.606 \text{ eV}/n^2$



Ενότητα Σ4.3

## Συγκεκριμένες στάθμες ενέργειας

Επιτρέπονται μόνο οι ενέργειες οι οποίες ικανοποιούν την εξίσωση της ενέργειας.

Η χαμηλότερη επιτρεπτή ενεργειακή στάθμη ονομάζεται **θεμελιώδης κατάσταση**.

- Αντιστοιχεί σε  $n = 1$  με  $E = -13.606 \text{ eV}$ .

Αν η ενέργεια του ατόμου ξεπεράσει εκείνη της θεμελιώδους κατάστασης και γίνει ίση με οποιαδήποτε ενέργεια μεγαλύτερη του μηδενός, τότε λέμε ότι το άτομο ionίζεται. Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για τον ionισμό ενός ατόμου από τη θεμελιώδη κατάσταση ονομάζεται **ενέργεια ionισμού**.

- Η ενέργεια ionισμού του υδρογόνου είναι  $13.6 \text{ eV}$ .

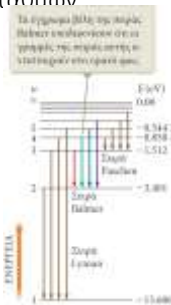
Ενότητα Σ4.3

## Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών

Αριστερά αναφέρονται οι κβαντικοί αριθμοί, ενώ δεξιά οι ενέργειες (σε ηλεκτρονιοβόλτ).

Η ανώτατη στάθμη,  $E = 0$ , αντιστοιχεί στην κατάσταση ionισμού του ατόμου, στην οποία το ηλεκτρόνιο έχει μηδενική κινητική ενέργεια.

- Η προσθήκη περισσότερης ενέργειας από αυτήν, εκδηλώνεται ως κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου.



Ενότητα Σ4.3

## Η συχνότητα και το μήκος κύματος των εκπεμπόμενων φωτονίων

Η συχνότητα του φωτονίου που εκπέμπεται όταν το ηλεκτρόνιο μεταπίπτει από μια εξωτερική τροχιά σε μια εσωτερική τροχιά δίνεται από τη σχέση:

$$f = \frac{E_i - E_f}{h} = \frac{k_e e^2}{2a_0 h} \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

Μας εξυπηρετεί να εκφράσουμε την παραπάνω σχέση συναρτήσει του μήκους κύματος:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{f}{c} = \frac{k_e e^2}{2a_0 h c} \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) = R_H \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

Η τιμή της σταθεράς  $R_H$  από την ανάλυση του Bohr βρίσκεται σε εξαιρετική συμφωνία με την πειραματικά καθορισμένη τιμή αυτής της σταθεράς.

Ενότητα Σ4.3

## Επέκταση του μοντέλου του υδρογόνου σε άλλα άτομα

Ο Bohr επέκτεινε το μοντέλο του υδρογόνου και σε άλλα στοιχεία, από τα οποία είχαν αφαιρεθεί όλα τα ηλεκτρόνια εκτός από ένα.

$$r_n = (n^2) \frac{a_0}{Z}$$

$$E_n = -\frac{k_e e^2}{2a_0} \left( \frac{Z^2}{n^2} \right) \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

- $Z$  είναι ο **ατομικός αριθμός** του στοιχείου και ισούται με τον αριθμό των πρωτονίων στον πυρήνα.

Ενότητα Σ4.3

## Δυσκολίες με το μοντέλο του Bohr

Με τη χρήση βελτιωμένων τεχνικών φασματοσκοπίας διαπιστώθηκε ότι πολλές από τις φασματικές γραμμές του υδρογόνου δεν ήταν απλές γραμμές.

- Κάθε μία από αυτές τις γραμμές ήταν μια ομάδα γραμμών σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους.

Όταν τα άτομα βρίσκονταν σε πολύ ισχυρό μαγνητικό πεδίο, ορισμένες απλές φασματικές γραμμές διαχωρίζονταν σε τρεις πολύ κοντινές γραμμές.

Το μοντέλο του Bohr δεν μπορεί να εξηγήσει το φάσμα πιο πολύπλοκων ατόμων.

Πειράματα σκέδασης δείχνουν ότι το ηλεκτρόνιο ενός ατόμου υδρογόνου δεν διαγράφει έναν επίπεδο κύκλο, αλλά ότι το άτομο είναι σφαιρικό.

Η στροφορμή του ατόμου στη θεμελιώδη κατάσταση είναι μηδέν.

Αυτές οι αποκλίσεις από το μοντέλο του Bohr οδήγησαν στην τροποποίηση της θεωρίας και τελικά στην αντικατάστασή της από μία άλλη.

Ενότητα Σ4.3

## Η αρχή της αντιστοιχίας του Bohr

Σύμφωνα με την **αρχή της αντιστοιχίας του Bohr**, όταν η διαφορά μεταξύ των κβαντισμένων ενεργειακών σταθμών τείνει στο μηδέν (κάτι που συμβαίνει σε πολύ μεγάλους κβαντικούς αριθμούς), η κβαντική φυσική συμφωνεί με την κλασική φυσική.

- Αυτή η περίπτωση είναι παρόμοια με εκείνη κατά την οποία η νευτώνεια μηχανική αναγάγεται σε μια ειδική περίπτωση της σχετικιστικής μηχανικής όταν  $v \ll c$ .

Ενότητα Σ4.3

## Το κβαντικό μοντέλο του ατόμου του υδρογόνου (1)

Οι δυσκολίες εξήγησης των πειραματικών αποτελεσμάτων με το μοντέλο του Bohr αironται αν για την περιγραφή του ατόμου του υδρογόνου χρησιμοποιηθεί ένα πλήρως κβαντικό μοντέλο, το οποίο στηρίζεται στην εξίσωση του Schrödinger.

Η συνάρτηση δυναμικής ενέργειας για το άτομο του υδρογόνου είναι:

$$U(r) = -k_e \frac{e^2}{r}$$

όπου:

- $k_e$  είναι η σταθερά του Coulomb,
- $r$  είναι η ακτινική απόσταση από το πρωτόνιο μέχρι το ηλεκτρόνιο.
  - Το πρωτόνιο βρίσκεται στο σημείο  $r = 0$ .

Ενότητα Σ4.4

## Το κβαντικό μοντέλο του ατόμου του υδρογόνου (2)

Τυπικά, για να λύσουμε το πρόβλημα του ατόμου του υδρογόνου, αντικαθιστούμε την κατάλληλη συνάρτηση δυναμικής ενέργειας στην εξίσωση Schrödinger, βρίσκουμε τις γενικές λύσεις της εξίσωσης και εφαρμόζουμε τις οριακές συνθήκες.

Επειδή πρόκειται για ένα πρόβλημα σε τρεις διαστάσεις, μπορούμε να το λύσουμε ευκολότερα αν μετατρέψουμε τις καρτεσιανές συντεταγμένες σε σφαιρικές συντεταγμένες.

Ενότητα Σ4.4

Το κβαντικό μοντέλο του ατόμου του υδρογόνου (τελική διαφάνεια)

Μετατρέπουμε την  $\psi(x, y, z)$  στην  $\psi(r, \theta, \varphi)$ .

Στη συνέχεια, μπορούμε να διαχωρίσουμε τις χωρικές μεταβλητές:

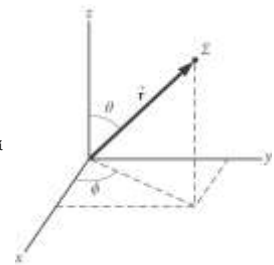
$$\psi(r, \theta, \varphi) = R(r) \cdot f(\theta) \cdot g(\varphi)$$

Όταν εφαρμόσουμε όλες τις οριακές συνθήκες και στις τρεις συναρτήσεις, προκύπτουν τρεις διαφορετικοί κβαντικοί αριθμοί για κάθε επιτρεπτή κατάσταση.

Οι τρεις διαφορετικοί κβαντικοί αριθμοί περιορίζονται σε ακέραιες τιμές.

Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε τρεις βαθμούς ελευθερίας.

- Στις τρεις χωρικές διαστάσεις.



Ενότητα Σ4.4

## Κύριος κβαντικός αριθμός

Ο πρώτος κβαντικός αριθμός σχετίζεται με την ακτινική συνάρτηση  $R(r)$ .

- Ονομάζεται **κύριος κβαντικός αριθμός**.
- Συμβολίζεται με  $n$ .

Η συνάρτηση δυναμικής ενέργειας εξαρτάται μόνο από την ακτινική συντεταγμένη  $r$ .

Οι τιμές των ενεργειών των επιτρεπών καταστάσεων του ατόμου του υδρογόνου είναι ίδιες με τις τιμές  $E_n$  που προβλέπει η θεωρία του Bohr.

Ενότητα Σ4.4

## Τροχιακός κβαντικός αριθμός και μαγνητικός κβαντικός αριθμός

Ο **τροχιακός κβαντικός αριθμός** συμβολίζεται με  $\ell$ .

- Σχετίζεται με την τροχιακή στροφορμή του ηλεκτρονίου.
- Είναι ακέραιος.

Ο **μαγνητικός κβαντικός αριθμός** συμβολίζεται με  $m_\ell$ .

- Σχετίζεται επίσης με την τροχιακή στροφορμή του ηλεκτρονίου και είναι ακέραιος.

Ενότητα Σ4.4

## Κβαντικοί αριθμοί – Σύνοψη επιτρεπτών τιμών

Ο κβαντικός αριθμός  $n$  παίρνει ακέραιες τιμές από 1 έως  $\infty$ .

Ο κβαντικός αριθμός  $\ell$  παίρνει ακέραιες τιμές από 0 έως  $n - 1$ .

Ο κβαντικός αριθμός  $m_\ell$  παίρνει ακέραιες τιμές από  $-\ell$  έως  $\ell$ .

Παράδειγμα:

- Αν  $n = 1$ , τότε οι μόνοι επιτρεπτοί κβαντικοί αριθμοί είναι οι  $\ell = 0$  και  $m_\ell = 0$ .
- Αν  $n = 2$ , τότε  $\ell = 0$  ή 1.
  - Αν  $\ell = 0$  τότε  $m_\ell = 0$ .
  - Αν  $\ell = 1$  τότε ο  $m_\ell$  μπορεί να είναι  $-1, 0$ , ή 1.

Ενότητα Σ4.4

## Κβαντικοί αριθμοί – Συνοπτικός πίνακας

**ΠΙΝΑΚΑΣ Σ4.1** Οι τρεις κβαντικοί αριθμοί που τα άτομα του υδρογόνου

Κβαντικός αριθμός	Όνομα	Επιτρεπτά τιμές	Αριθμός επιτρεπτών καταστάσεων
$n$	Κύριος κβαντικός αριθμός	1, 2, 3, ...	Υποσφαιρικοί αριθμοί
$\ell$	Υποκβαντικός αριθμός	0, 1, 2, ..., $n - 1$	$n$
$m_\ell$	Μαγνητικός κβαντικός αριθμός	$-\ell, -\ell + 1, \dots, \ell - 1, \ell$	$2\ell + 1$

Ενότητα Σ4.4

## Στιβάδες

Για ιστορικούς λόγους, λέμε ότι όλες οι καταστάσεις που έχουν τον ίδιο κύριο κβαντικό αριθμό σχηματίζουν μια **στιβάδα**.

- Οι στιβάδες συμβολίζονται με τα γράμματα K, L, M, ... που αντιστοιχούν στις καταστάσεις  $n = 1, 2, 3, \dots$

Όλες οι καταστάσεις που έχουν τις ίδιες τιμές  $n$  και  $\ell$ , λέμε ότι σχηματίζουν μια **υποστιβάδα**.

- Τα πελά γράμματα  $s, p, d, f, g, h, \dots$  συμβολίζουν τις υποστιβάδες για τις οποίες  $\ell = 0, 1, 2, 3, \dots$

Ενότητα Σ4.4

## Συμβολισμοί στιβάδων – Συνοπτικός πίνακας

**ΠΙΝΑΚΑΣ Σ4.2**  
Συμβολισμοί ατομικών στιβάδων

$n$	Σύμβολο στιβάδας
1	K
2	L
3	M
4	N
5	O
6	P

Ενότητα Σ4.4

## Συμβολισμοί υποστιβάδων – Συνοπτικός πίνακας

**ΠΙΝΑΚΑΣ Σ4.3**  
Συμβολισμοί ατομικών υποστιβάδων

$\ell$	Σύμβολο υποστιβάδας
0	s
1	p
2	d
3	f
4	g
5	h

Ενότητα Σ4.4

## Οι κυματοσυναρτήσεις του υδρογόνου

Η απλούστερη κυματοσυναρτηση για το άτομο του υδρογόνου περιγράφει την κατάσταση  $1s$  και συμβολίζεται με  $\psi_{1s}(r)$ .

$$\psi_{1s}(r) = \frac{1}{\sqrt{\pi a_0^3}} e^{-r/a_0}$$

Καθώς η  $\psi_{1s}(r)$  τείνει στο μηδέν,  $r$  τείνει στο  $\infty$  και είναι κανονικοποιημένη.

Η  $\psi_{1s}(r)$  παρουσιάζει σφαιρική συμμετρία.

- Αυτή η συμμετρία υπάρχει για όλες τις καταστάσεις  $s$ .

Ενότητα Σ4.5



## Πυκνότητα πιθανότητας

Η πυκνότητα πιθανότητας για την κατάσταση 1s είναι:

$$|\psi_{1s}|^2 = \left(\frac{1}{\pi a_0^3}\right) e^{-2r/a_0}$$

Η **ακτινική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας**  $P(r)$  είναι η πιθανότητα ανά μονάδα ακτινικού μήκους να εντοπιστεί το ηλεκτρόνιο σε ένα σφαιρικό κέλυφος ακτίνας  $r$  και πάχους  $dr$ .

Ενότητα Σ4.5

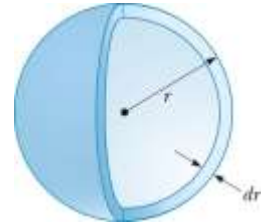
## Ακτινική πυκνότητα πιθανότητας

Ένα σφαιρικό κέλυφος ακτίνας  $r$  και πάχους  $dr$  έχει όγκο:

$$4\pi r^2 dr$$

Η ακτινική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι:

$$P(r) = 4\pi r^2 |\psi|^2$$



Ενότητα Σ4.5

Ακτινική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας  $P(r)$  για την κατάσταση 1s του υδρογόνου

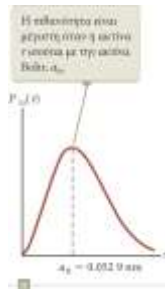
Η ακτινική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για το άτομο του υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάσταση είναι:

$$P_{1s}(r) = \left(\frac{4r^2}{a_0^3}\right) e^{-2r/a_0}$$

Η κορυφή της καμπύλης αντιστοιχεί στην πιο πιθανή τιμή της  $r$  για τη συγκεκριμένη κατάσταση.

Η κορυφή εμφανίζεται στην τιμή που αντιστοιχεί στην ακτίνα Bohr.

Η μέση τιμή της  $r$  για τη θεμελιώδη κατάσταση του υδρογόνου είναι  $3/2 a_0$ .



Ενότητα Σ4.5

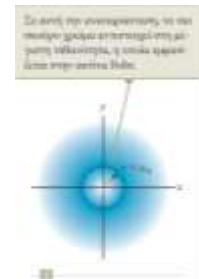
## Ηλεκτρονικά νέφη

Σύμφωνα με την κβαντική μηχανική, το άτομο δεν έχει αυστηρά καθορισμένα όρια, όπως προτείνει η θεωρία του Bohr.

Το φορτίο του ηλεκτρονίου μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν να εκτείνεται σε μια ολόκληρη περιοχή του χώρου, η οποία συνήθως ονομάζεται **ηλεκτρονικό νέφος**.

Η εικόνα παρουσιάζει την πυκνότητα πιθανότητας που αντιστοιχεί στο ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου στην κατάσταση 1s συναρτήσει της θέσης του στο επίπεδο  $xy$ .

Η σκοτεινότερη περιοχή, που εμφανίζεται στην ακτίνα  $r = a_0$ , αντιστοιχεί στην πιο πιθανή τιμή που μπορεί να έχει η απόσταση,  $r$ , του ηλεκτρονίου από τον πυρήνα.



Ενότητα Σ4.5

## Κυματοσυνάρτηση της κατάστασης 2s

Η επόμενη απλούστερη κυματοσυνάρτηση για το άτομο του υδρογόνου είναι εκείνη που αντιστοιχεί στην κατάσταση 2s.

- $n = 2, \ell = 0$ .

Η κανονικοποιημένη κυματοσυνάρτηση γι' αυτή την κατάσταση είναι:

$$\psi_{2s}(r) = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \left(\frac{1}{a_0}\right)^{3/2} \left(2 - \frac{r}{a_0}\right) e^{-r/2a_0}$$

- Η  $\psi_{2s}$  εξαρτάται μόνο από την ακτινική απόσταση  $r$  και παρουσιάζει σφαιρική συμμετρία.

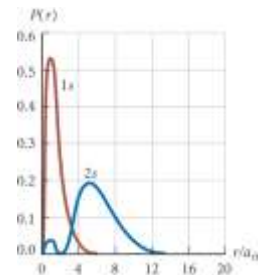
Ενότητα Σ4.5

## Σύγκριση των καταστάσεων 1s και 2s

Το γράφημα της ακτινικής πυκνότητας πιθανότητας για την κατάσταση 2s έχει δύο κορυφές.

Η μεγαλύτερη τιμή της  $P$  αντιστοιχεί στην πιθανότερη τιμή.

- Σε αυτή την περίπτωση,  $r \approx 5a_0$ .



Ενότητα Σ4.5

## Φυσική ερμηνεία του τροχιακού κβαντικού αριθμού $\ell$

Το μέτρο της στροφορμής ενός ηλεκτρονίου ως προς το κέντρο της κυκλικής τροχιάς του είναι:

$$L = m_e v r$$

Η κατεύθυνση του διανύσματος της στροφορμής είναι κάθετη στο επίπεδο του κύκλου.

- Η κατεύθυνση δίνεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού.

Στο ατομικό μοντέλο του Bohr, το μέτρο της στροφορμής του ηλεκτρονίου περιορίζεται στα πολλαπλάσια του  $\hbar$ .

- Αυτό προβλέπει εσφαλμένα ότι η θεμελιώδης κατάσταση του ατόμου του υδρογόνου έχει μια μονάδα στροφορμής ( $1\hbar$ ).
- Αν στο μοντέλο του Bohr θεωρηθεί ότι η στροφορμή  $L$  ισούται με μηδέν, το ηλεκτρόνιο πρέπει να αναπαρασταθεί ως σωματίδιο που ταλαντώνεται κατά μήκος μιας ευθείας, η οποία διέρχεται από τον πυρήνα.

Ενότητα Σ4.6

## Φυσική ερμηνεία του τροχιακού κβαντικού αριθμού $\ell$ (συνέχεια)

Οι δυσκολίες στο μοντέλο του Bohr αίρονται με τη βοήθεια της κβαντικής μηχανικής.

Σύμφωνα με την κβαντική μηχανική, το μέτρο της τροχιακής στροφορμής ενός ατόμου που βρίσκεται σε μια κατάσταση με κύριο κβαντικό αριθμό  $n$ , μπορεί να πάρει τις ακόλουθες διακριτές τιμές:

$$L = \sqrt{\ell(\ell+1)}\hbar \quad \ell = 0, 1, 2, \dots, n-1$$

- Το  $L$  μπορεί να ισούται με μηδέν, γεγονός που δημιουργεί μεγάλη δυσκολία σε οποιαδήποτε απόπειρα εφαρμογής της κλασικής μηχανικής σε αυτό το σύστημα.
- Σύμφωνα με την κβαντομηχανική ερμηνεία, το ηλεκτρονικό νέφος για την κατάσταση  $L = 0$  είναι σφαιρικά συμμετρικό χωρίς βασικό άξονα περιστροφής.

Ενότητα Σ4.6

## Φυσική ερμηνεία του μαγνητικού κβαντικού αριθμού $m_\ell$ (1)

Το άτομο έχει τροχιακή στροφορμή.

Εφόσον υφίσταται η έννοια της περιφοράς του ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα, υπάρχει στροφορμή και άρα μαγνητική ροπή.

Το διάνυσμα της μαγνητικής ροπής έχει επιτρεπτές, διακριτές διευθύνσεις ως προς το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου.

Επειδή η μαγνητική ροπή  $\vec{\mu}$  του ατόμου μπορεί να συσχετιστεί με το διάνυσμα της στροφορμής, η ύπαρξη διακριτών διευθύνσεων του διανύσματος της μαγνητικής ροπής συνεπάγεται ότι η διεύθυνση της στροφορμής είναι κβαντισμένη.

Επομένως, η  $L_z$ , η προβολή της  $\vec{L}$  στον άξονα  $z$  μπορεί να έχει μόνο διακριτές τιμές.

Ενότητα Σ4.6

## Φυσική ερμηνεία του μαγνητικού κβαντικού αριθμού $m_\ell$ (2)

Ο μαγνητικός κβαντικός αριθμός  $m_\ell$  προσδιορίζει τις επιτρεπτές τιμές της συνιστώσας  $z$  της τροχιακής στροφορμής σύμφωνα με τη σχέση:

$$L_z = m_\ell \hbar$$

Η κβάντωση των πιθανών προσανατολισμών της στροφορμής  $\vec{L}$  ως προς ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο συχνά αναφέρεται ως **κβάντωση χώρου**.

Το διάνυσμα της στροφορμής  $\vec{L}$  δεν δείχνει προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση.

- Παρόλο που η συνιστώσα  $z$  είναι σταθερή.
- Η γνώση όλων των συνιστωσών της στροφορμής δεν είναι σε συμφωνία με την αρχή της αβεβαιότητας.

Φανταστείτε ότι το διάνυσμα  $\vec{L}$  μπορεί να βρίσκεται σε οποιοδήποτε σημείο μιας κωνικής επιφάνειας που σχηματίζει γωνία  $\theta$  με τον άξονα  $z$ .

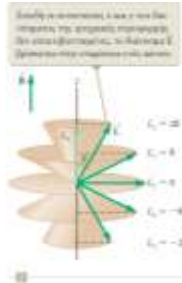
Ενότητα Σ4.6

## Φυσική ερμηνεία του μαγνητικού κβαντικού αριθμού $m_\ell$ (τελική διαφάνεια)

Η γωνία  $\theta$  είναι επίσης κβαντισμένη.

Οι τιμές της καθορίζονται από τη σχέση:

$$\cos \theta = \frac{L_z}{L} = \frac{m_\ell \hbar}{\sqrt{\ell(\ell+1)}\hbar}$$

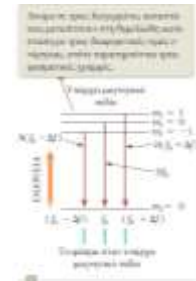


Ενότητα Σ4.6

## Φαινόμενο Zeeman

Το **φαινόμενο Zeeman** είναι ο διαχωρισμός των φασματικών γραμμών όταν εφαρμόζεται ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο.

Σε αυτή την περίπτωση, η ανώτερη στάθμη, με  $\ell = 1$ , χωρίζεται σε τρεις διαφορετικές στάθμες οι οποίες αντιστοιχούν στις τρεις διαφορετικές κατευθύνσεις της μαγνητικής ροπής  $\mu$ .



Ενότητα Σ4.6

## Μαγνητικός κβαντικός αριθμός του σπιν $m_s$

Η **ιδιοστροφορμή**, ή αλλιώς το **σπιν**, του ηλεκτρονίου, δεν προκύπτει από την εξίσωση του Schrödinger.

Για να ερμηνευθούν οι επιπλέον καταστάσεις, απαιτείται ένας τέταρτος κβαντικός αριθμός για κάθε κατάσταση.

Αυτός ο τέταρτος κβαντικός αριθμός είναι ο **μαγνητικός κβαντικός αριθμός του σπιν**,  $m_s$ .

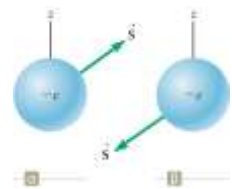
Ενότητα Σ4.6

## Το σπιν του ηλεκτρονίου

Υπάρχουν μόνο δύο κατευθύνσεις για το σπιν του ηλεκτρονίου.

Το ηλεκτρόνιο μπορεί να έχει *σπιν επάνω* (εικ. α) ή *σπιν κάτω* (εικ. β).

Όταν υπάρχει μαγνητικό πεδίο, η ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι ελαφρώς διαφορετική για τις δύο κατευθύνσεις του σπιν. Σε αυτή τη διαφορά ενέργειας οφείλεται η διπλή γραμμή στο φάσμα ορισμένων αερίων.



Ενότητα Σ4.6

## Το σπιν του ηλεκτρονίου (συνέχεια)

Η ιδέα του ηλεκτρονίου που περιστρέφεται είναι εννοιολογικά χρήσιμη.

Το ηλεκτρόνιο είναι σημειακό σωματίδιο, χωρίς χωρική έκταση.

- Επομένως, δεν μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το ηλεκτρόνιο πραγματικά περιστρέφεται.

Ωστόσο, όλα τα πειραματικά στοιχεία ενισχύουν την ιδέα ότι το ηλεκτρόνιο έχει κάποια εγγενή στροφορμή, η οποία περιγράφεται με τον κβαντικό αριθμό του σπιν,  $m_s$ .

Ο Dirac έδειξε ότι αυτός ο κβαντικός αριθμός προέρχεται από τις σχετικιστικές ιδιότητες του ηλεκτρονίου.

Ενότητα Σ4.6

## Στροφορμή λόγω σπιν

Η συνολική στροφορμή του ηλεκτρονίου σε μια συγκεκριμένη ηλεκτρονική κατάσταση περιέχει τη συνεισφορά της τροχιακής στροφορμής αλλά **και** τη συνεισφορά του σπιν.

Το σπιν του ηλεκτρονίου μπορεί να περιγραφεί από έναν μοναδικό κβαντικό αριθμό  $s$ , του οποίου η τιμή μπορεί να είναι μόνο  $s = \frac{1}{2}$ .

Η στροφορμή ενός ηλεκτρονίου λόγω σπιν δεν μεταβάλλεται ποτέ.

Το μέτρο της στροφορμής λόγω σπιν είναι:

$$S = \sqrt{s(s+1)}\hbar = \frac{\sqrt{3}}{2}\hbar$$

Η στροφορμή λόγω σπιν μπορεί να έχει μόνο δύο προσανατολισμούς ως προς τον άξονα  $z$ , οι οποίοι καθορίζονται από τον μαγνητικό κβαντικό αριθμό του σπιν  $m_s = \pm \frac{1}{2}$ .

- Η τιμή  $m_s = +\frac{1}{2}$  αντιστοιχεί στην περίπτωση του *σπιν επάνω*.
- Η τιμή  $m_s = -\frac{1}{2}$  αντιστοιχεί στην περίπτωση του *σπιν κάτω*.

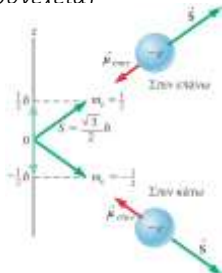
Ενότητα Σ4.6

## Στροφορμή λόγω σπιν (συνέχεια)

Η συνιστώσα της στροφορμής λόγω σπιν στον άξονα  $z$  είναι:

$$S_z = m_s \hbar = \pm \frac{1}{2} \hbar$$

Η στροφορμή λόγω σπιν είναι κβαντισμένη.



Ενότητα Σ4.6

## Μαγνητική ροπή του σπιν του ηλεκτρονίου

Η μαγνητική ροπή  $\mu_{\text{σπιν}}$  του σπιν του ηλεκτρονίου και η στροφορμή λόγω σπιν συνδέονται μέσω της σχέσης:

$$\vec{\mu}_{\text{σπιν}} = -\frac{e}{m_0} \vec{S}$$

Η συνιστώσα  $z$  της μαγνητικής ροπής μπορεί να πάρει τις τιμές:

$$\mu_{\text{σπιν},z} = \pm \frac{e\hbar}{2m_0}$$

Ενότητα Σ4.6

## Κβαντικές καταστάσεις

Υπάρχουν οκτώ κβαντικές καταστάσεις που αντιστοιχούν στην τιμή του κβαντικού αριθμού  $n = 2$  του ατόμου του υδρογόνου.

- Αυτές οι καταστάσεις εξαρτώνται από την πρόσθεση των δυνατών τιμών του  $m_l$ .
- Στον Πίνακα Σ4.4 συνοψίζονται αυτές οι καταστάσεις.

Ενότητα Σ4.6

## Κβαντικοί αριθμοί για την κατάσταση $n = 2$ του υδρογόνου

ΠΙΝΑΚΑΣ Σ4.4 Οι κβαντικοί αριθμοί για την κατάσταση  $n = 2$  του υδρογόνου

$n$	$l$	$m_l$	$m_s$	Υποστιβάδα	Στιβάδα	Αριθμός καταστάσεων στην υποστιβάδα
2	0	0	$\pm \frac{1}{2}$	2s	L	2
2	0	0	$\pm \frac{1}{2}$			
2	1	1	$\pm \frac{1}{2}$	2p	L	6
2	1	0	$\pm \frac{1}{2}$			
2	1	0	$\pm \frac{1}{2}$			
2	1	-1	$\pm \frac{1}{2}$			

Ενότητα Σ4.6

## Wolfgang Pauli

1900–1958

Αυστριακός φυσικός

Έγραψε ένα σημαντικό άρθρο ανασκόπησης για τη σχετικότητα.

- Στην ηλικία των 21 ετών.

Άλλες σημαντικές συνεισφορές του ήταν:

- Η ανακάλυψη της απαγορευτικής αρχής.
- Η εξήγηση της σχέσης μεταξύ του σπιν των σωματιδίων και της στατιστικής.
- Θεωρίες σχετικιστικής κβαντικής ηλεκτροδυναμικής.
- Η υπόθεση του νετρίνου.
- Η υπόθεση του πυρηνικού σπιν.



Ενότητα Σ4.7

## Η απαγορευτική αρχή

Οι τέσσερις κβαντικοί αριθμοί που εξετάσαμε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή όλων των ηλεκτρονικών καταστάσεων ενός ατόμου, ανεξαρτήτως από τον αριθμό των ηλεκτρονίων στη δομή του.

Σύμφωνα με την *απαγορευτική αρχή*, δύο ηλεκτρόνια του ίδιου ατόμου δεν μπορούν ποτέ να βρίσκονται στην ίδια κβαντική κατάσταση.

- Επομένως, δεν μπορούν να χαρακτηρίζονται από το ίδιο σύνολο κβαντικών αριθμών.

Αν η απαγορευτική αρχή δεν ίσχυε, ένα άτομο θα ακτινοβολούσε ενέργεια μέχρι κάθε ηλεκτρόνιο του να βρεθεί στη χαμηλότερη δυνατή ενεργειακή κατάσταση και επομένως η χημική συμπεριφορά των στοιχείων θα ήταν πολύ διαφορετική.

Ενότητα Σ4.7

## Συμπλήρωση υποστιβάδων

Η ηλεκτρονική δομή πολύπλοκων ατόμων μπορεί να θεωρηθεί ως μια σειρά από διαδοχικά συμπληρωμένες στάθμες ολοένα αυξανόμενης ενέργειας.

Μόλις συμπληρωθεί μια υποστιβάδα, το επόμενο ηλεκτρόνιο καταλαμβάνει την επόμενη κενή υποστιβάδα με τη χαμηλότερη ενέργεια.

- Αν το άτομο δεν βρίσκεται στη χαμηλότερη δυνατή ενέργεια, τότε ακτινοβολεί ενέργεια μέχρι να φτάσει στην κατάσταση αυτή.

Ενότητα Σ4.7

## Τροχιακά

Ως *τροχιακό* ορίζεται η ατομική κατάσταση που χαρακτηρίζεται από τους κβαντικούς αριθμούς  $n$ ,  $l$ , και  $m_l$ .

Σύμφωνα με την απαγορευτική αρχή, σε κάθε τροχιακό μπορούν να υπάρχουν μόνο δύο ηλεκτρόνια.

- Ένα ηλεκτρόνιο θα έχει σπιν επάνω και ένα ηλεκτρόνιο σπιν κάτω.

Επειδή σε κάθε τροχιακό μπορούν να υπάρχουν μόνο δύο ηλεκτρόνια, ο αριθμός των ηλεκτρονίων που μπορούν να καταλαμβάνουν κάθε στιβάδα είναι επίσης περιορισμένος.

Ενότητα Σ4.7

## Επιτρεπτές κβαντικές καταστάσεις - Παράδειγμα με $n = 3$

**Πίνακας 14.5** Επιτρεπτές κβαντικές καταστάσεις για τον ατομικό όμοιο  $n = 3$

Σύμβολο	s	p	d	f	g	h	i	j
Επιτρεπτές καταστάσεις	1	3	5	7	9	11	13	15
Επιτρεπτές ενέργειες	1	2	3	4	5	6	7	8
Επιτρεπτές κβαντικές καταστάσεις	1	3	5	7	9	11	13	15

Γενικά, κάθε στιβάδα μπορεί να φιλοξενήσει μέχρι  $2n^2$  ηλεκτρόνια.

Ενότητα 14.7

Ενότητα 14.7

## Ο κανόνας του Hund

Σύμφωνα με τον κανόνα του Hund, όταν ένα άτομο έχει τροχιακά ίσης ενέργειας, η σειρά με την οποία καταλαμβάνονται από ηλεκτρόνια είναι τέτοια ώστε ο αριθμός των ηλεκτρονίων με παράλληλα spin να είναι μέγιστος.

- Μερικές εξαιρέσεις του κανόνα εμφανίζονται σε στοιχεία με υποστιβάδες είτε κατά το ήμισυ κατειλημμένες είτε σχεδόν πλήρως κατειλημμένες.

## Ηλεκτρονική διάταξη

Η πλήρωση των καταστάσεων των ηλεκτρονίων πρέπει να υπακούει τόσο στην απαγορευτική αρχή όσο και στον κανόνα του Hund.

Ατομικό	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d	5f	6s	6p	6d	6f	7s	7p	7d	7f	7g	
1	↑↓																							
2	↑↓	↑↓	↑																					
3	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑																			
4	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑																		
5	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑																	
6	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑																
7	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑															

Ενότητα 14.7

## Περιοδικός πίνακας

Ο Dmitri Mendeleev έκανε μια πρώτη προσπάθεια να κατατάξει τα χημικά στοιχεία.

Κατέταξε τα στοιχεία σύμφωνα με τις ατομικές μάζες και τις χημικές ομοιότητες τους.

Ο πρώτος πίνακας είχε πολλές κενές θέσεις και ο Mendeleev δήλωσε ότι εκείνα τα κενά υπήρχαν απλώς επειδή τα αντίστοιχα στοιχεία δεν είχαν ανακαλυφθεί ακόμα.

Παρατηρώντας τις στήλες στις οποίες θα έπρεπε να βρίσκονται αυτά τα υπολειπόμενα στοιχεία, μπόρεσε να κάνει κάποιες γενικές προβλέψεις για τις χημικές ιδιότητές τους.

Μέσα σε 20 χρόνια από τις προβλέψεις του, είχαν ανακαλυφθεί τα περισσότερα από αυτά τα χημικά στοιχεία.

Η διάταξη των στοιχείων στον περιοδικό πίνακα είναι τέτοια ώστε όλα τα στοιχεία κάθε στήλης να έχουν παρόμοιες χημικές ιδιότητες.

Ενότητα 14.7

## Περιοδικός πίνακας - Εξήγηση

Η χημική συμπεριφορά ενός στοιχείου εξαρτάται από την τελευταία στιβάδα που περιέχει ηλεκτρόνια.

Για παράδειγμα, τα αδρανή (ή ευγενή) αέρια (στην τελευταία στήλη) έχουν συμπληρωμένες υποστιβάδες και εμφανίζουν μεγάλο ενεργειακό χάσμα μεταξύ της συμπληρωμένης στιβάδας και της επόμενης διαθέσιμης στιβάδας.

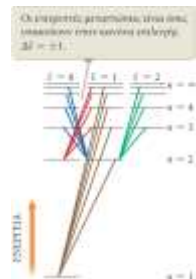
Ενότητα 14.7

Επανεξέταση του διαγράμματος των ενεργειακών σταθμών του υδρογόνου

Οι επιτρεπτές τιμές του  $\ell$  είναι χωρισμένες οριζόντια.

Η πιθανότητα να συμβούν μεταπτώσεις στις οποίες το  $\ell$  δεν μεταβάλλεται είναι πολύ μικρή, γι' αυτό και οι μεταπτώσεις αυτές ονομάζονται **απαγορευμένες**.

- Αυτές οι μεταπτώσεις μπορούν να συμβούν, αλλά η πιθανότητα τους είναι πολύ μικρή συγκριτικά με την αντίστοιχη πιθανότητα των «επιτρεπτών μεταπτώσεων».



Ενότητα 14.8

## Κανόνες επιλογής

Οι κανόνες επιλογής για τις επιτρεπτές μεταπτώσεις είναι:

- $\Delta \ell = \pm 1$
- $\Delta m_\ell = 0, \pm 1$

Η στροφορμή του απομονωμένου συστήματος ατόμου-φωτονίου πρέπει να διατηρείται.

Επομένως, το φωτόνιο το οποίο εμπλέκεται στη διεργασία πρέπει να έχει στροφορμή.

- Το φωτόνιο έχει στροφορμή ίση με τη στροφορμή ενός σωματιδίου με σπιν 1.
- Κάθε φωτόνιο έχει ενέργεια, ορμή και στροφορμή.

Ενότητα Σ4.8

## Άτομα με πολλά ηλεκτρόνια

Για άτομα με πολλά ηλεκτρόνια, το θετικό πυρηνικό φορτίο  $Ze$  καλύπτεται σε κάποιο βαθμό από το αρνητικό φορτίο των ηλεκτρονίων που βρίσκονται στις εσωτερικές στιβάδες.

- Τα εξωτερικά ηλεκτρόνια αλληλεπιδρούν με συνολικό φορτίο μικρότερο από το πυρηνικό φορτίο.

Οι επιτρεπτές ενέργειες είναι:

$$E_n = - \frac{(13.6 \text{ eV}) Z_{\text{eff}}^2}{n^2}$$

- Η τιμή του ενεργού πυρηνικού αριθμού  $Z_{\text{eff}}$  εξαρτάται από τα  $n$  και  $\ell$ .

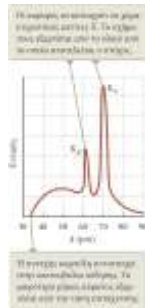
Ενότητα Σ4.8

## Φάσματα ακτίνων X

Οι ακτίνες X της εικόνας είναι απόρροια της επιβράδυνσης ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας, καθώς αυτά προσπίπτουν σε έναν μεταλλικό στόχο.

Η κινητική ενέργεια που χάνεται σε κάθε αλληλεπίδραση μπορεί να είναι από μηδενική έως και τη συνολική κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου.

Το συνεχές φάσμα ακτινοβολίας X που προκύπτει ονομάζεται **ακτινοβολία πέδησης** (ή αλλιώς **ακτινοβολία bremsstrahlung**).



Ενότητα Σ4.8

## Φάσματα ακτίνων X (συνέχεια)

Οι διακριτές γραμμές ονομάζονται **χαρακτηριστικές ακτίνες X**.

Δημιουργούνται όταν:

- Ένα ηλεκτρόνιο συγκρούεται με κάποιο από τα άτομα του στόχου.
- Το ηλεκτρόνιο αφαιρεί ένα από τα ηλεκτρόνια των εσωτερικών στιβάδων του ατόμου.
- Ένα ηλεκτρόνιο από μια υψηλότερη στάθμη μεταπίπτει στη στάθμη όπου υπάρχει το κενό.

Το φωτόνιο που εκπέμπεται κατά τη διάρκεια αυτής της μετάπτωσης έχει ενέργεια ίση με τη διαφορά ενέργειας μεταξύ των δύο ενεργειακών σταθμών.

Συνήθως, η ενέργεια τέτοιων μεταπτώσεων ξεπερνά τα 1000 eV.

Τα εκπεμπόμενα φωτόνια ακτίνων X έχουν μήκη κύματος από 0.01 nm έως 1 nm.

Ενότητα Σ4.8

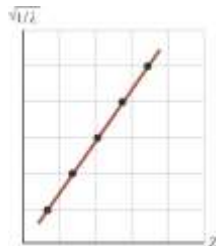
## Διάγραμμα Moseley

Ο Henry G. J. Moseley σχεδίασε για διάφορα στοιχεία το γράφημα της εικόνας.

Όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος της γραμμής  $K_\alpha$  κάθε στοιχείου.

- Η γραμμή  $K_\alpha$  αντιστοιχεί στο φωτόνιο που εκπέμπεται όταν ένα ηλεκτρόνιο μεταπίπτει από τη στιβάδα L στη στιβάδα K.

Από αυτό το γράφημα, ο Moseley συνέταξε έναν περιοδικό πίνακα ο οποίος συμφωνούσε με εκείνον που βασίζεται στις χημικές ιδιότητες.



Ενότητα Σ4.8

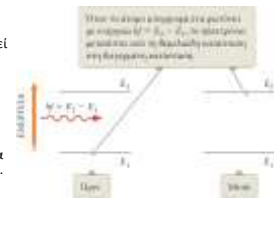
## Εξαναγκασμένη απορρόφηση

Όταν ένα φωτόνιο έχει ενέργεια  $h\nu$ , η οποία ισούται με την ενεργειακή διαφορά  $\Delta E$  μεταξύ δύο ενεργειακών σταθμών, τότε μπορεί να απορροφηθεί από το άτομο.

Αυτή η διεργασία ονομάζεται **εξαναγκασμένη απορρόφηση**, επειδή το φωτόνιο εξαναγκάζει το άτομο να μεταπέσει σε υψηλότερη στάθμη.

Σε φυσιολογικές θερμοκρασίες, τα περισσότερα άτομα ενός δειγματος θα βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση.

Η απορρόφηση του φωτονίου αναγκάζει ορισμένα από τα άτομα να μεταπέσουν σε διεγερμένες καταστάσεις.



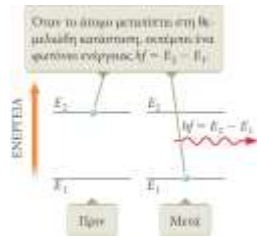
Ενότητα Σ4.9

## Αυθόρμητη εκπομπή

Όταν ένα άτομο διεγείρεται, μπορεί να επιστρέψει σε μια στάθμη χαμηλότερης ενέργειας εκπέμποντας ένα φωτόνιο.

Αυτή η διεργασία είναι γνωστή ως **αυθόρμητη εκπομπή** (ή **αποδιέγερση**).

- Επειδή συμβαίνει φυσικά.



Ενότητα Σ4.9

## Εξαναγκασμένη εκπομπή

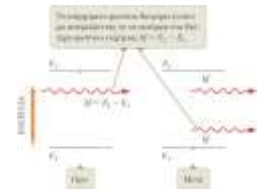
Εκτός από την αυθόρμητη εκπομπή, παρατηρείται και το φαινόμενο της **εξαναγκασμένης** (ή **παραινικουμένης**) **εκπομπής**.

Εξαναγκασμένη εκπομπή μπορεί να συμβεί όταν η διεγερμένη κατάσταση είναι **μετασταθής**.

Μετασταθής κατάσταση είναι μια κατάσταση ο χρόνος ζωής της οποίας είναι πολύ μεγαλύτερος από τον συνήθη χρόνο των  $10^{-8}$  s μιας διεγερμένης κατάστασης.

Ένα προσπίπτον φωτόνιο μπορεί να προκαλέσει επιστροφή του ατόμου στη θεμελιώδη κατάσταση χωρίς να απορροφηθεί.

Επομένως, μετά την εξαναγκασμένη εκπομπή υπάρχουν δύο φωτόνια που έχουν ίση ενέργεια: το προσπίπτον φωτόνιο και το εκπεμπόμενο φωτόνιο. Τα δύο φωτόνια έχουν την ίδια φάση και κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση.



Ενότητα Σ4.9

## Λέιζερ – Οι ιδιότητες του φωτός λέιζερ

Το φως ενός λέιζερ είναι σύμφωνο.

- Κάθε φωτεινή ακτίνα μιας δέσμης λέιζερ διατηρεί σταθερή φάση ως προς τις υπόλοιπες.

Το φως ενός λέιζερ είναι μονοχρωματικό.

- Το φως μιας δέσμης λέιζερ έχει πολύ στενό εύρος μηκών κύματος.

Το φως ενός λέιζερ έχει πολύ μικρή γωνία απόκλισης.

- Δηλαδή η δέσμη ανοίγει ελάχιστα, ακόμα και σε πολύ μεγάλες αποστάσεις.

Ενότητα Σ4.10

## Λέιζερ – Λειτουργία

Ένα φωτόνιο που προσπίπτει σε ένα άτομο μπορεί να προκαλέσει τη μετάπτωση του ατόμου είτε προς μια ανώτερη ενεργειακή στάθμη είτε προς μια κατώτερη.

- Εξαναγκασμένη απορρόφηση ή εξαναγκασμένη εκπομπή.

Αν δημιουργηθεί μια κατάσταση κατά την οποία βρίσκονται σε διεγερμένη κατάσταση περισσότερα άτομα από όσα βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση, τότε θα εκπέμπονται περισσότερα φωτόνια από όσα θα απορροφώνταν.

- Αυτή η κατάσταση ονομάζεται **αντιστροφή πληθυσμού**.

Τα φωτόνια μπορούν να εξαναγκάσουν και άλλα άτομα να εκπέμψουν φωτόνια, δημιουργώντας έτσι μια αλυσίδα παρόμοιων διεργασιών.

Ο μεγάλος αριθμός φωτονίων τα οποία παράγονται με αυτόν τον τρόπο είναι η πηγή του έντονου σύμφωνου φωτός ενός λέιζερ.

Ενότητα Σ4.10

## Συνθήκες για τη συσσώρευση φωτονίων

Το σύστημα πρέπει να βρίσκεται σε κατάσταση αντιστροφής πληθυσμού.

Η διεγερμένη κατάσταση του συστήματος πρέπει να είναι μετασταθής.

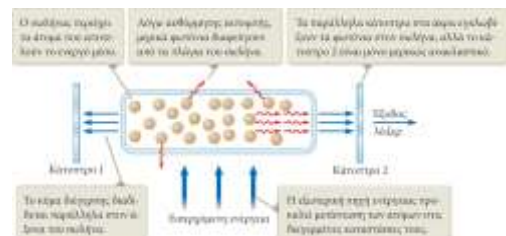
- Σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να συμβεί αντιστροφή πληθυσμού, οπότε θα είναι πιο πιθανό να συμβεί εξαναγκασμένη εκπομπή πριν συμβεί αυθόρμητη εκπομπή.

Τα εκπεμπόμενα φωτόνια πρέπει να εγκλωβιστούν στο σύστημα για αρκετό χρονικό διάστημα, ώστε να μπορέσουν να εξαναγκάσουν και άλλα διεγερμένα άτομα σε εκπομπή.

- Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ανακλαστικών κατόπτρων.

Ενότητα Σ4.10

## Σχηματικό διάγραμμα διάταξης λέιζερ

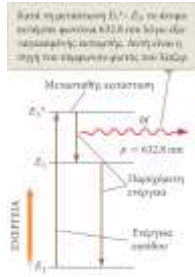


Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών ενός ατόμου νέου σε ένα λέιζερ ηλίου-νέου

Τα άτομα εκπέμπουν φωτόνια μήκους κύματος 632.8 nm μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής.

Η μετάπτωση είναι η  $E_3^* \rightarrow E_2$

- Ο αστερίσκος (\*) συμβολίζει τη μετασταθή κατάσταση.



Εικόνα Σ4.10

## Εφαρμογές των λέιζερ:

Στις εφαρμογές του λέιζερ περιλαμβάνονται:

- χειρουργικές επεμβάσεις,
- ακριβείς τοπογραφικές μετρήσεις και μετρήσεις μήκους,
- κοπή μετάλλων και άλλων υλικών με ακρίβεια,
- τηλεπικοινωνίες
- βιολογικές και ιατρικές έρευνες.

Εικόνα Σ4.10



Τέλος

Ατομική Φυσική

# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

# Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Βαρουτάς Δημήτρης. «Ηλεκτρομαγνητισμός - Οπτική - Σύγχρονη Φυσική. Σύγχρονη Φυσική». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/DI121/>.



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

