



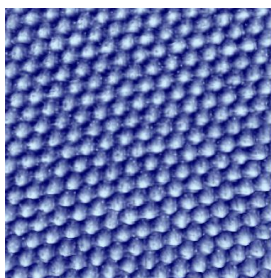
Γέφυρα μεταξύ της έρευνας στη σύγχρονη φυσική
και της επιχειρηματικότητας στον τομέα της νανοτεχνολογίας

Κβαντοφυσική

*Η φυσική των πολύ μικρών στοιχείων
με τις μεγάλες εφαρμογές*

Μέρος 2

ΚΒΑΝΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ



Μαθησιακός Σταθμός VIII: Φαινόμενο Σήραγγας - ΣΜΣ

ΜΕΤΑΦΡΑΣΗ:



Το Quantum Spin-Off χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση υπό το πρόγραμμα LLP Comenius (540059-LLP-1-2013-1-BE-COMENIUS-CMP).

Renaat Frans, Robert Sum

Στοιχεία επικοινωνίας: renaat.frans@khlim.be
sum@nanosurf.com



Το παρόν υλικό αντικατοπτρίζει τις απόψεις των συγγραφέων και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δεν μπορεί να θεωρηθεί υπεύθυνη για τη χρήση οποιασδήποτε πληροφορίας περιέχεται στο παρόν

Πίνακας Περιεχομένων

ΜΑΘΗΣΙΑΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΙΧ: ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΚΑΙ ΣΜΣ	36
1 Υπέρβαση ενός φράγματος δυναμικού χωρίς την απαιτούμενη ενέργεια	36
1.α Τα κλασικά σωματίδια δεν μπορούν να διανοίξουν σήραγγα	36
1.β Το φως μπορεί να διανοίξει σήραγγα μέσω ενός φράγματος	36
1.γ Το φαινόμενο της σήραγγας στην καθημερινή ζωή	38
2 Διάνοξη σηράγγων: ένα χαρακτηριστικό των κυμάτων	39
3 Τα ηλεκτρόνια μπορούν επίσης να ανοίξουν σήραγγες	40
3.α Μια εφαρμογή: Μνήμη Flash	40
3.β Ερμηνεία της Μνήμης Flash μέσω της διάνοξης σηράγγων από κύματα ηλεκτρονίων	41
3.γ Η διάνοξη σηράγγων βρίσκεται στη βάση πολλών διαδικασιών	42
4 Σαρωτική Μικροσκοπία Σήραγγας (ΣΜΣ)	43
4.α Σαρωτική Μικροσκοπία Σήραγγας (ΣΜΣ)	43
5 Έννοιες στον Σταθμό Μάθησης VIII	48

Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση - Παρόμοια Διανομή 4.0 Διεθνές (CC BY-NC-SA 4.0)

Υπό τους ακόλουθους όρους:

- Αναφορά στον δημιουργό — Πρέπει να κάνετε [κατάλληλη μνεία](#), να παρέχετε σύνδεσμο στην άδεια και [να δηλώνετε τυχόν τροποποιήσεις](#). Αυτό μπορείτε να το κάνετε με οποιοδήποτε εύλογο τρόπο, χωρίς όμως να υπονοείται ότι ο αδειοδότης εγκρίνει εσάς ή τη χρήση σας.
- Μη-εμπορική — Δεν επιτρέπεται η χρήση του υλικού για [εμπορικούς σκοπούς](#).

Μπορείτε να:

- Μοιραστείτε - να αντιγράψετε και να αναδιανείμετε το υλικό με οποιοδήποτε μέσο ή μορφή
 - Προσαρμόσετε - να αναμείξετε, να τροποποιήσετε και να δημιουργήσετε πάνω στο υλικό
- Ο δικαιούχος δεν μπορεί να ανακαλέσει αυτές τις ελευθερίες, εφόσον τηρείτε τους όρους της άδειας.

Αναφορά στο έργο πρέπει να γίνεται ως εξής:

Frans R., Sum R. (Μαθησιακοί Σταθμοί του Quantum SpinOff (2015). Φαινόμενο Σήραγγας και Σαρωτικό Μικροσκόπιο Σήραγγας (ΣΜΣ). Centre for Subject Matter Teaching KHLim, Diepenbeek Belgium - Nanosurf AG, Liestal



Μαθησιακός Σταθμός VIII: Φαινόμενο Σήραγγας και ΣΜΣ

1 Υπέρβαση ενός φράγματος δυναμικού χωρίς την απαιτούμενη ενέργεια

1.a Τα κλασικά σωματίδια δεν μπορούν να διανοίξουν σήραγγα



(Πηγή: Concord.org)

Αν θελήσετε να κυλήσετε μια μπάλα ώστε να περάσει πάνω από την κορυφή ενός λόφου, πρέπει να της δώσετε αρκετή (κινητική) ενέργεια, ώστε να υπερβεί το εμπόδιο της δυναμικής ενέργειας που δημιουργείται από τον λόφο.

1. Αν δεν διαθέτει αρκετή ενέργεια, (θα/δεν θα) περάσει την κορυφή
2. Αν διαθέτει αρκετή ενέργεια, (θα/δεν θα) περάσει την κορυφή

Το περίεργο είναι ότι αντίθετα από τα μακροσκοπικά σφαιρίδια, *τα κβαντικά σωματίδια*, όπως τα ηλεκτρόνια και τα φωτόνια (σωματίδια φωτός), μπορούν να περάσουν πράγματι ένα φράγμα, ακόμα κι αν δεν διαθέτουν την απαιτούμενη ενέργεια. Πράγματι, η κβαντική φυσική προβλέπει την πιθανότητα διάνοιξης σήραγγας από το κβαντικό αντικείμενο μέσω ενός ενεργειακού φράγματος ανάλογα με την ενέργεια του σωματιδίου και το ύψος και πλάτος του φράγματος.

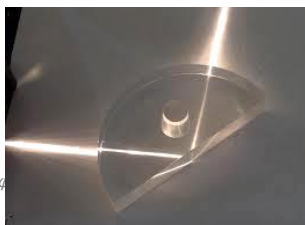
1.b Το φως μπορεί να διανοίξει σήραγγα μέσω ενός φράγματος

Όπως θυμόσαστε, οι ακτίνες του φωτός που κατευθύνονται από ένα οπτικά πυκνό μέσο προς ένα οπτικά αραιό μέσο είναι δυνατό να ανακλώνται εξ ολοκλήρου ή να μεταβιβάζονται. Το φαινόμενο οφείλεται στη μεταβαλλόμενη ταχύτητα του φωτός η οποία είναι (βραδύτερη/ταχύτερη) στο πυκνό μέσο από ό,τι στο αραιό.

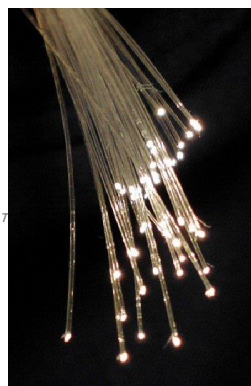


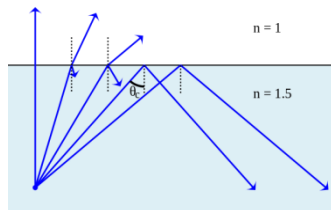
Αν η γωνία της πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη από μια συγκεκριμένη κρίσιμη γωνία, η οποία εξαρτάται από τον σχετικό δείκτη διάθλασης, το φως ανακλάται ολικά στο

οπτικά πυκνό μέσο.



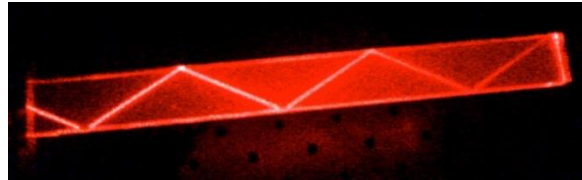
Κβαντοφυσική: η φ





(Πηγή: Διασκευασμένο από το Υλικό που είναι Κοινό Κτήμα της Wikipedia)

Αυτό επιτρέπει στο φως να μείνει σε μια οπτική ίνα. Έτσι, το φως δεν μπορεί να εξέλθει από το πυκνό μέσο, εφόσον η γωνία της πρόσπτωσης είναι αρκετά μεγάλη.

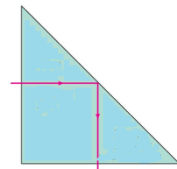


Frustrated Total Internal Reflection

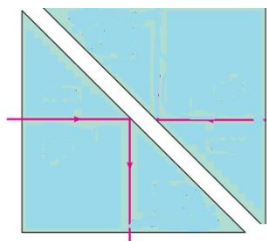
Όμως, το φαινόμενο της σήραγγας καθιστά δυνατό το φως να υπερβαίνει αυτό το αδιαπέραστο εμπόδιο. Αυτό είναι δυνατό να καταδειχτεί μέσω ενός πειράματος με δύο πρίσματα. Μπορείτε να παρακολουθήσετε το βίντεο [στο http://www.youtube.com/watch?v=aC-4iSD2aRA](http://www.youtube.com/watch?v=aC-4iSD2aRA)

Πείραμα: συμπίεσμένη ολική εσωτερική ανάκλαση με φως

Ως παράδειγμα, ας σκεφτούμε μια δέσμη λέιζερ που πέφτει στη μία πλευρά του πρίσματος, όπως στο σχήμα. Στην άλλη πλευρά η γωνία της πρόσπτωσης είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να προκληθεί ολική εσωτερική ανάκλαση: το φως δεν μπορεί να εξέλθει από το μέσο.



Τότε, όμως, πλησιάζουμε με ένα δεύτερο πρίσμα. Όταν τοποθετήσουμε το δεύτερο πρίσμα πάνω στο πρώτο (αν χρειαστεί, μπορείτε να βρέξετε τις πλευρές με νερό) το φως μπορεί αμέσως να διαπεράσει το πρίσμα και να φτάσει στο δεύτερο πρίσμα, παρότι στην κλασική φυσική απαγορεύεται η υπέρβαση αυτού του χάσματος.



Ένα κλασικό σωματίδιο δεν μπορεί να ξέρει ότι κρατάτε ένα δεύτερο πρίσμα εκεί κοντά. Είναι λόγω της κβαντικής κυματικής φύσης του φωτός που αυτό μπορεί να διεισδύσει στο χάσμα και να διανοίξει σήραγγα μέσω του χάσματος.

Πείραμα: συμπίεσμένη ολική εσωτερική ανάκλαση με μικροκύματα

Το κενό μεταξύ των πρισμάτων πρέπει να είναι της τάξης του μήκους κύματος του φωτός. Για το κόκκινο φως αυτό είναι περίπου 600 nm. Αυτό σημαίνει πως τα δύο πρίσματα πρέπει να είναι πολύ κοντά το ένα στο άλλο. Για τα μικροκύματα, που έχουν μήκος κύματος της τάξης των εκατοστών, μπορεί να καταδειχθεί ότι ένα κενό λίγων εκατοστών είναι ήδη αρκετό για να επιτευχθεί το φαινόμενο της σήραγγας.

Μπορείτε να παρακολουθήσετε μια πειραματική εφαρμογή μικροκυματικής διάνοιξης σήραγγας <http://www.sixtysymbols.com/videos/reflection.htm>



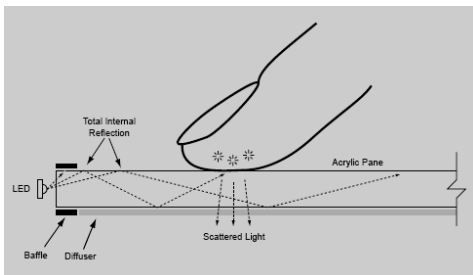
(Πηγή: University of Nottingham))

1.c Το φαινόμενο της σήραγγας στην καθημερινή ζωή



Όταν κρατάτε ένα ποτήρι νερό, δεν μπορείτε να δείτε τα δάχτυλά σας λόγω της ολικής εσωτερικής ανάκλασης του φωτός στο νερό.

Όταν, όμως, πιέσετε τα δάχτυλά σας σφιχτά πάνω στο γυαλί, οι ακρολοφίες του δέρματος γίνονται ορατές, επειδή το φως διανοίγει σήραγγα μέσω του κενού. Το φαινόμενο είναι παρεμφερές με το πείραμα με το πρίσμα που περιγράφηκε παραπάνω: Το φως διανοίγει σήραγγες από το ποτήρι στις ακρολοφίες μέσω του πολύ μικρού κενού (αέρας) που σχηματίζεται όταν ασκείτε πίεση (Πηγή: Wikipedia, υλικό που είναι κοινό κτήμα)



Το φαινόμενο της διάνοιξης σήραγγας με το φως (σπάσιμο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή μιας οθόνης αφής: με ένα φωτοευαίσθητο κελί μπορούμε να ανιχνεύσουμε το ανακλώμενο φως και να εντοπιστεί η θέση του δαχτύλου σας στην οθόνη.

(Πηγή: New York University: cs.nyu.edu/~jhan/ftirsense/)

2 Διάνοιξη σηράγγων: ένα χαρακτηριστικό των κυμάτων

Ας εξηγήσουμε αυτό το φαινόμενο της διάνοιξης σηράγγων.

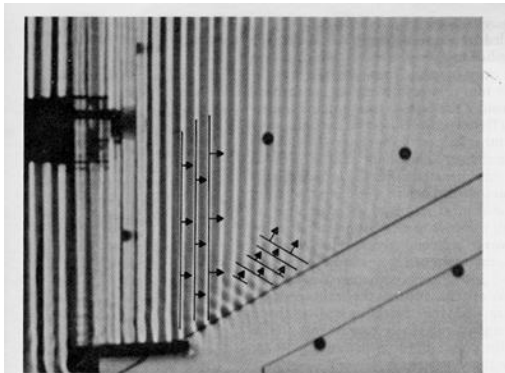
Συμπιεσμένη ολική εσωτερική ανάκλαση: Ερμηνεία μέσω της διάνοιξης σηράγγων

Όσο το φως είναι εξ ολοκλήρου μέσα στο γυαλί, δεν μπορεί να "γνωρίζει" τι βρίσκεται πέρα από το γυαλί. Για να το μάθει, το φως πρέπει να διαπεράσει μια μικρή απόσταση φτάνοντας στην απαγορευμένη ζώνη, ίσως αρκετά μήκη κύματος μακριά. Αν ένα δεύτερο κομμάτι γυαλί τοποθετηθεί στο ενδιάμεσο της απόστασης, η δέσμη φωτός μπορεί να επανεμφανιστεί. Η πιθανότητα διείσδυσης του φωτός στο κενό αέρος μειώνεται όσο το πλάτος του φράγματος αυξάνεται.

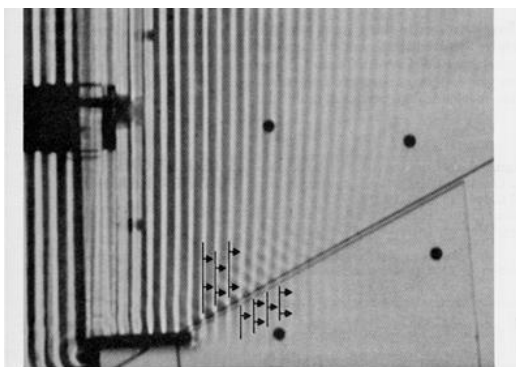
Διάνοιξη σηράγγων των υδάτινων κυμάτων

Η ολική εσωτερική ανάκλαση προκαλείται από μια απότομη αλλαγή στην ταχύτητα μετάδοσης του φωτός στο όριο. Για παράδειγμα, στο γυαλί η ταχύτητα του φωτός είναι πολύ (βραδύτερη/ταχύτερη) από ό,τι στον αέρα.

Η ταχύτητα των υδάτινων κυμάτων εξαρτάται επίσης *από το βάθος* του νερού. Σε ρηχό νερό, η ταχύτητα των κυμάτων είναι βραδύτερη, ενώ σε βαθύ νερό τα υδάτινα κύματα μεταδίδονται ταχύτερα. Συνεπώς, το φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης παρατηρείται και με τα υδάτινα κύματα, όπως ακριβώς παρατηρείται με το φως στην ύλη.



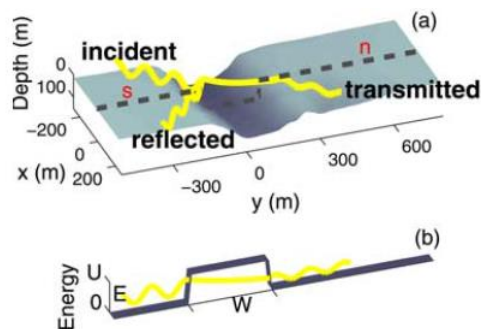
Οι δύο επικλινείς γραμμές οριοθετούν τη ζώνη όπου το νερό είναι βαθύτερο. Τα κύματα που έρχονται από τα αριστερά, αντικατοπτρίζονται σε αυτή τη βαθιά ζώνη.



Όταν στενέψουμε επαρκώς το κενό που δημιουργείται από το βαθύ νερό (της τάξης του μεγέθους των ίδιων των κυμάτων) τα κύματα ξαφνικά μπορούν να ανοίξουν σήραγγα μέσω του κενού και (μερικώς) μεταβιβάζονται στην άλλη πλευρά.

Πηγή: Education Development Center, Newton, MA USA

Η διάνοιξη σήραγγας των κυμάτων παρατηρείται επίσης με τα κύματα στους ωκεανούς πάνω από υποθαλάσσιες χαράδρες!



Thomson, J., Elgar, S., & Herbers, T. H. C. (2005). Reflection and tunneling of ocean waves observed at a submarine canyon. *Geophysical research letters*, 32(10).

3 Τα ηλεκτρόνια μπορούν επίσης να ανοίξουν σήραγγες.

Εφόσον γνωρίζουμε ότι το φως και η ύλη διαθέτουν μια δυαδική κυματική-σωματιδιακή υπόσταση, η διάνοιξη σήραγγων δεν είναι δυνατή μόνο για τα φωτόνια, αλλά και για τα ηλεκτρόνια.

Η κβαντική φυσική περιγράφει επακριβώς αυτήν την κυματική φύση των ηλεκτρονίων. Τα κύματα ηλεκτρονίων μπορούν να διανοίξουν σήραγγα μέσω ενός αδιαπέραστου στην κλασική φυσική φράγματος.

Συνεπώς, για την κβαντική φυσική είναι φυσικό και τα ηλεκτρόνια να μπορούν να ανοίξουν σήραγγα μέσω ενός φράγματος, παρότι δεν διαθέτουν αρκετή ενέργεια ώστε να υπερβούν το εν λόγω φράγμα.

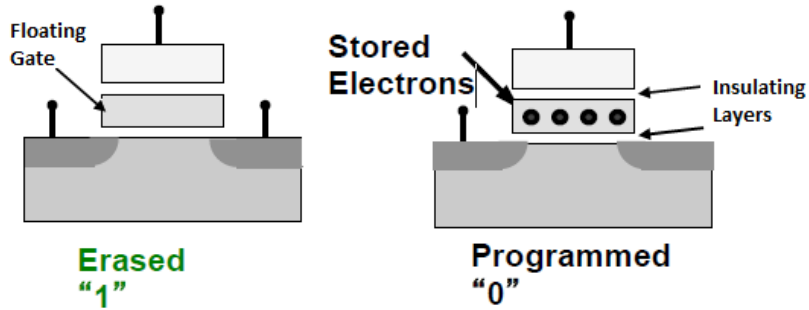
3.a Μια εφαρμογή: Μνήμη Flash

Μια ωραία εφαρμογή που βασίζεται στη διάνοιξη σήραγγων από ηλεκτρόνια είναι η μνήμη flash που χρησιμοποιείται στα usb stick, τις έξυπνες κάρτες και αλλού. Η μνήμη flash διατηρεί τα δεδομένα της, χωρίς να απαιτείται κάποια εξωτερική πηγή ρεύματος.

Βασίζεται στην αποθήκευση ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια αποθηκεύονται σε μια "επιπλέονσα πύλη" (floating gate), δηλαδή *απομονωμένη από την υπόλοιπη συσκευή* μέσω της μόνωσης επιπέδων οξειδίου: **όλα τα ηλεκτρόνια που τοποθετούνται εκεί παγιδεύονται και κατ' επέκταση αποθηκεύουν τις πληροφορίες.**

Τα ηλεκτρόνια ανοίγουν σήραγγα μέσω του μονωτικού στρώματος και παγιδεύονται στην Επιπλέονσα Πύλη. Μετά τη διάνοιξη της σήραγγας, το πλάτος του φράγματος μεγαλώνει αρκετά, ώστε να τα συγκρατεί εκεί για πολλά χρόνια.

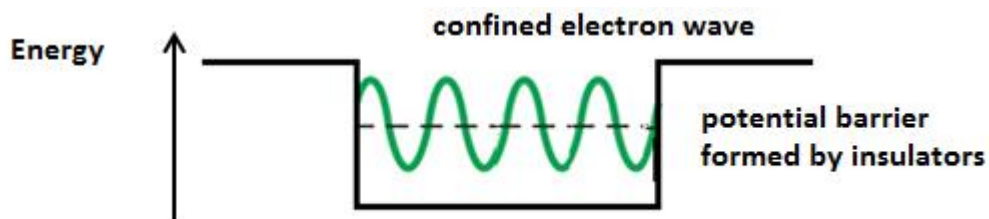
Η διάνοιξη σηράγγων από τα ηλεκτρόνια μέσω ενός (ηλεκτρικού) φράγματος δυναμικού μπορεί να γίνει κατανοητή με την κυματική φύση του ηλεκτρονίου, μια υπόθεση που διατυπώνεται στην κβαντική φυσική.



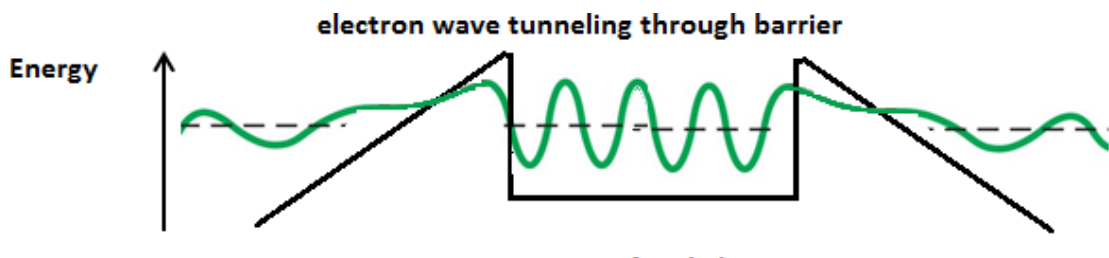
Πηγή: Massachusetts Institute of Technology Open Course Ware

3.b Ερμηνεία της Μνήμης Flash μέσω της διάνοιξης σηράγγων κυμάτων ηλεκτρονίων

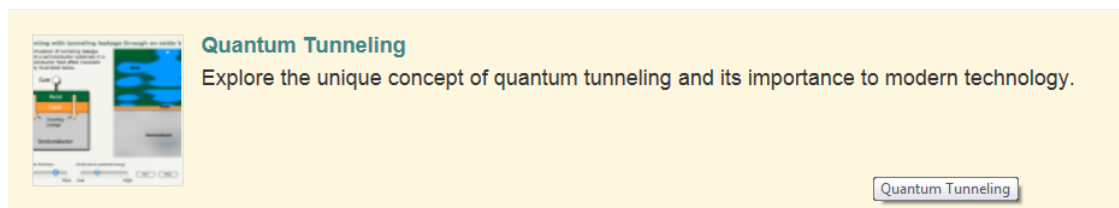
Τα περιβάλλοντα μονωτικά στρώματα περιορίζουν το ηλεκτρόνιο στο ενεργειακό πηγάδι, όπου μπορεί να παραμείνει για πολλά χρόνια χωρίς κάποια εξωτερική πηγή ενέργειας. Αυτή είναι η βάση για τη μη πτητική αποθήκευση.



Εφαρμόζοντας ένα ηλεκτρικό πεδίο στην πύλη, τα φράγματα δυναμικού γίνονται λεπτότερα, έτσι που το ηλεκτρόνιο να μπορεί να ανοίξει σήραγγα βγαίνοντας από την πύλη ή ξαναπαίνοντας σε αυτήν. Η διάνοιξη σηράγγων μας επιτρέπει να γράψουμε μηδέν ή ένα μέσα στην πύλη.



Μπορείτε να βρείτε **περισσότερο εκπαιδευτικό υλικό για τη διάνοιξη σηράγγων και μια προσομοίωση της λειτουργίας της μνήμης flash στο concord.org**



Προσομοιώσεις της Κβαντικής Διάνοιξης Σηράγγων στο Concord.org

3.c Η διάνοιξη σηράγγων βρίσκεται στη βάση πολλών διαδικασιών

Γίνεται όλο και σαφέστερο ότι η κβαντική διάνοιξη σηράγγων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη χημεία, αλλά και στη χημεία της ζωής ¹. Για παράδειγμα, στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης τα ηλεκτρόνια ανοίγουν σήραγγες από το ένα μόριο στο άλλο, διεισδύουν σε μεμβράνες και αλλού και άρα ταχείες διαδικασίες μεταφοράς ενέργειας καθίστανται δυνατές. Η έρευνα στον τομέα αυτόν έχει ανοίξει πολλές δυνατότητες στο αναδυόμενο πεδίο της κβαντικής βιολογίας, ρίχνοντας φως ακόμα και σε μια μέθοδο για την ανάπτυξη πιο αποδοτικών ηλιακών κελιών.

Επίσης, διαδικασίες όπως η εκπομπή σωματιδίων He στη διάσπαση ραδιενεργών σωματιδίων άλφα, μπορούν να γίνουν κατανοητές μόνο βάσει της διάνοιξης σηράγγων, στην προκειμένη περίπτωση από τον πυρήνα των ατόμων. Η καθαρή στοχαστική φύση των ραδιενεργών διαδικασιών πρέπει να γίνει αντιληπτή ως συνέπεια της κβαντικής φύσης των σωματιδίων. Ο πιθανολογικός χαρακτήρας της φύσης, ο οποίος γίνεται αντιληπτός σε επίπεδο νανοκλίμακας, ερμηνεύεται από τη δυαδικότητα κύματος-σωματιδίου. Τα πλάτη των κβαντικών μηχανικών κυμάτων είναι ανάλογα της πιθανότητας μέτρησης μιας κβαντικής ενέργειας (ενός σωματιδίου) σε διαφορετικές θέσεις.

Στα ηλεκτρονικά κυκλώματα, οι αγώγιμες περιοχές (που δημιουργούνται από μέταλλα) όπου κινούνται τα ηλεκτρόνια χωρίζονται από μονωτικά στρώματα όπου, σύμφωνα με την κλασική φυσική, απαγορεύονται τα ηλεκτρόνια. Αυτές οι μονωτικές περιοχές λειτουργούν ως φράγματα για τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, έτσι ώστε να επιτρέπεται η κίνησή τους μόνο εντός αγώγιμων περιοχών. Στα πρώιμα κυκλώματα, το πλάτος των φραγμάτων ήταν μεγάλο, γεγονός που καθιστούσε αμελητέα τη διάνοιξη σηράγγων από τα ηλεκτρόνια. Ωστόσο, όταν τα φράγματα γίνονται πιο λεπτά, η διάνοιξη σηράγγων γίνεται έντονη και τα φράγματα χάνουν μέρος της περιοριστικής τους λειτουργίας. Τούτο αποτελεί πρόβλημα για την περαιτέρω σμίκρυνση των κυκλωμάτων. Από την άλλη, η διάνοιξη σηράγγων δίνει νέες ευκαιρίες για καινούργιες εφαρμογές

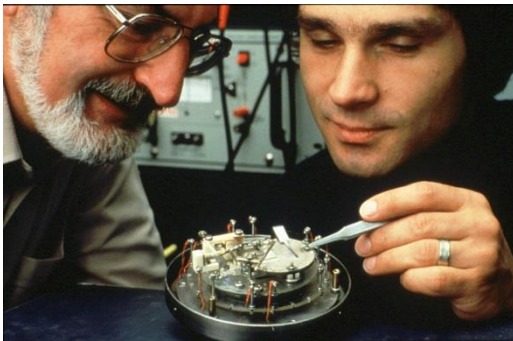
Πράγματι, *τρισεκατομμύρια περιστατικά διάνοιξης σηράγγων συντελούνται, ενόσω διαβάζετε αυτήν τη σελίδα, τόσο στη φύση όσο και στην τεχνολογία*. Η διάνοιξη σηράγγων είναι μια νέα ιδιότητα της φύσης που οι επιστήμονες και οι μηχανικοί που μελετούν τον νανόκοσμο πρέπει να καταλάβουν καλύτερα.

¹ Βλέπε για παράδειγμα: Moser, C. C., Keske, J. M., Warncke, K., Farid, R. S., & Dutton, P. L. (1992). Nature of biological electron transfer. *Nature*, 355(6363), 796-802.

Μια συναρπαστική εφαρμογή της διάνοιξης σήραγγων από τα ηλεκτρόνια είναι η ανάπτυξη του Σαρωτικού Μικροσκοπίου Σήραγγας: μιας συσκευής που μας επιτρέπει να εμβαθύνουμε στην ατομική, ακόμα και την υποατομική, κλίμακα.

4 Σαρωτική Μικροσκοπία Σήραγγας (ΣΜΣ)

4.α Σαρωτική Μικροσκοπία σήραγγας (ΣΜΣ)



Το Σαρωτικό Μικροσκόπιο Σήραγγας αναπτύχθηκε το 1982 στην Ελβετία στο ερευνητικό εργαστήριο της IBM στο R schlikon και  λαβε το βραβείο Νόμπελ Φυσικής το 1986. Το ΣΜΣ κατέστησε δυνατό για πρώτη φορά να "δούμε" ή αλλιώς να "σαρώσουμε"  τομα. Οι απαραίτητες τεχνικές και φυσικές συνθήκες θα συζητηθούν παρακάτω.

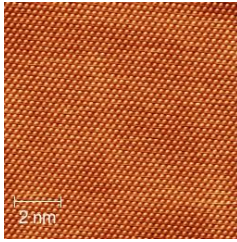
Οι Heinrich Rohrer και Gerd Binnig με το πρώτο τους σαρωτικό μικροσκόπιο σήραγγας (πηγή: IBM)

Αξιοποιώντας τη φύση των κυμάτων

Η κβαντική μηχανική διδάσκει ότι τα ηλεκτρόνια δεν κινούνται στο  τομο σαν μικρές σφαίρες σε τροχιά αλλά βρίσκονται κάπως "θαμπά" σε περιοχές– δηλαδή τα τροχιακά για τα οποία συζητήσαμε στο τέλος του σταθμού μάθησης V. Πρόκειται για συνέπεια της κυματικής φύσης των ηλεκτρονίων. Σε μια πυρηνική δομή, π.χ.  να μέταλλο, *υπάρχει μια μικρή πιθανότητα τα ηλεκτρόνια να βρίσκονται ελαφρώς εκτός της επιφάνειας*, κάτι που δεν είναι δυνατόν, σύμφωνα με την κλασική φυσική. Εάν μετακινήσετε  ναν αισθητήρα μέτρησης αρκετά κοντά σε αυτή τη μεταλλική επιφάνεια, θα μετρήσει  να μικρό ηλεκτρικό ρεύμα. Φαίνεται πραγματικά σαν τα  τομα να "ανοίγουν σήραγγες" μέσω αυτού του κενού ή ενεργειακού φραγμού. Κατά συνέπεια, το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό και ως "φαινόμενο της σήραγγας".



Το σαρωτικό μικροσκόπιο σήραγγας της NanoSurf



Εικόνα από ΣΜΣ: Ατομική δομή του αργύρου (Ag(111)).

(πηγή: University of Basel, Department of Physics)

Από τη στιγμή που τα ηλεκτρόνια βρίσκονται μόλις πάνω από την επιφάνεια- σε απόσταση των διαμέτρων 1-2 ατόμων – ο αισθητήρας μέτρησης πρέπει να μετακινηθεί πολύ κοντά και με ακρίβεια προς την επιφάνεια. Αυτό ήταν ήδη γνωστό από τη δεκαετία του 1950, αλλά δεν ήταν σαφές πώς μπορούσε να υλοποιηθεί από τεχνικής άποψης. Ήταν το 1982 που οι Gerd Binnig και Heinrich Rohrer κατάφεραν να το πραγματοποιήσουν με μια συσκευή που ονομάζεται σαρωτικό μικροσκόπιο σήραγγας.

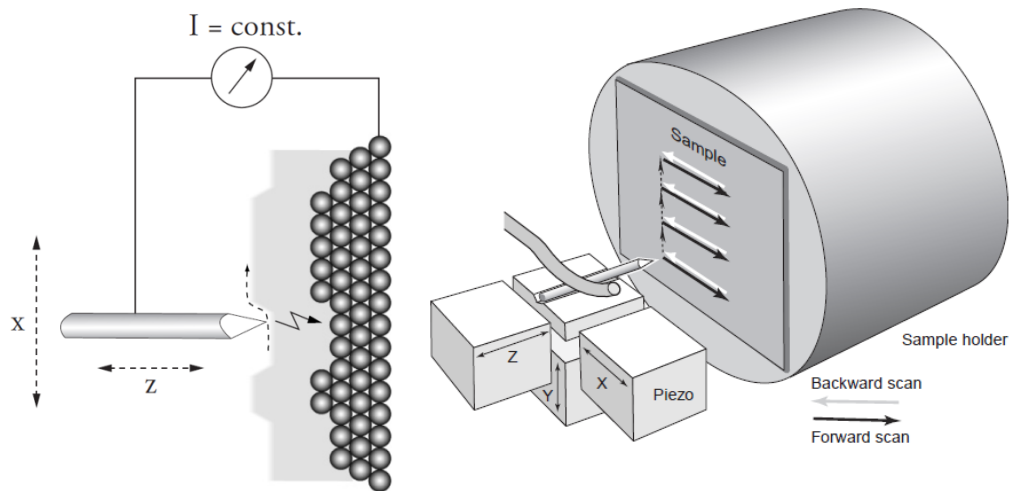
Άσκηση 4.1:

Προσπαθήστε να αποτυπώσετε τους παράγοντες που δυσκολεύουν την τοποθέτηση του ανιχνευτή μέτρησης σε απόσταση ενός ατόμου ($\sim 0.1 \text{ nm}$) πάνω από μια επιφάνεια.

Λειτουργική αρχή του ΣΜΣ:

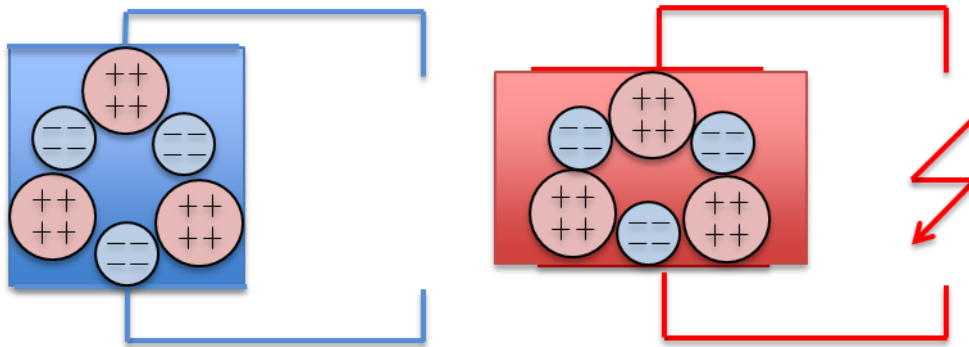
Το σαρωτικό μικροσκόπιο σήραγγας βασίζεται στη μέτρηση του **ρεύματος της σήραγγας στην επιφάνεια του δείγματος**. Για αυτό τον λόγο χρησιμοποιείται ένας ανιχνευτής από πλατίνα ή βολφράμιο, ο οποίος σαρώνει τις επιφάνειες με ένα συγκεκριμένο ρεύμα σήραγγας. Ο μηχανισμός τοποθέτησης κατευθύνει τον ανιχνευτή πάνω από την επιφάνεια με τρόπο που να μετρείται πάντα το ίδιο ρεύμα. Οι κινήσεις ανίχνευσης ²καταγράφονται και επιστρέφουν μια εικόνα της επιφάνειας.

² Η κίνηση του ανιχνευτή κατά μήκος της επιφάνειας ή η διορθωτική μεταβλητή των αντίστοιχων πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών στον άξονα x/y (βλέπε Σχήμα 4.1)



Σχήμα 4.1: Λειτουργική αρχή του ΣΜΣ:

Κατάλληλοι για αυτά τα δύσκολα καθήκοντα μετατόπισης είναι οι εμπονομαζόμενοι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι, π.χ. ο χαλαζίας ή ο μόλυβδος ζirkονίου τιτανίου. Αυτοί εμφανίζουν ελάχιστη διαστολή κατά την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης. Αντίστροφα, παράγουν τάση όταν βρεθούν υπό πίεση.

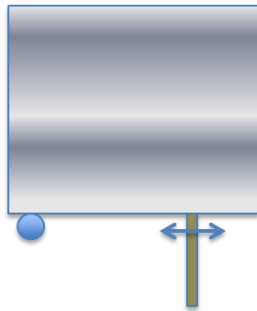


Σχήμα 4.2: Λειτουργική αρχή του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου, δηλαδή του κρυστάλλου που αποκτά φορτίο όταν συμπιέζεται, συστρέφεται ή παραμορφώνεται. Πιέζοντας έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο παράγουμε μια ηλεκτρική τάση και έτσι μπορούμε να κάνουμε ηλεκτρικό ρεύμα να διέλθει από μέσα του ενώνοντας τις δύο πλευρές για να φτιάξουμε ένα κύκλωμα (δεξιά εικόνα). Η αντίστροφη διαδικασία φαίνεται στην αριστερή εικόνα: ο κρύσταλλος δέχεται μηχανική τάση (αλλάζει σχήμα) όταν μία τάση εφαρμόζεται στις αντίθετες πλευρές του.

Άσκηση 4.2:

Πού βρίσκουμε πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους στην καθημερινή μας ζωή;

Η επόμενη τεχνική πρόκληση κατά την κατασκευή του ΣΜΣ είναι η προσέγγιση του ανιχνευτή στην επιφάνεια του δείγματος που πρόκειται να μετρηθεί. Για το σκοπό αυτό είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν περίτεχνες βίδες μικρομέτρων ακριβείας με ενεργοποιητή βηματικού κινητήρα ή απλοί πιεζοηλεκτρικοί βηματικοί κινητήρες.



Η αρχή λειτουργίας είναι η παρακάτω: Ένας κύλινδρος στέκεται σε υποστήριγμα (μπλε) και ένα κινητό έλασμα πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου (πράσινο) το οποίο μπορεί να κινηθεί μπρος-πίσω με τη χρήση ηλεκτρικής τάσης. Αν το έλασμα κινηθεί αργά προς τα δεξιά, ο κύλινδρος μπορεί να ακολουθήσει την κίνηση. Αν το έλασμα κινηθεί ταχύτερα προς τα δεξιά, ο κύλινδρος δεν μπορεί να ακολουθήσει λόγω της αδράνειάς του και μένει πίσω. Αν επαναλάβετε τη διαδικασία, ο κύλινδρος κινείται προς τα δεξιά.

Αυτού του είδους κινητικά βήματα της τάξης των 50-100 νανόμετρων μπορούν να επιτευχθούν επιτρέποντας στο δείγμα να κινείται εντός του φάσματος ελέγχου του ανιχνευτή μέτρησης.

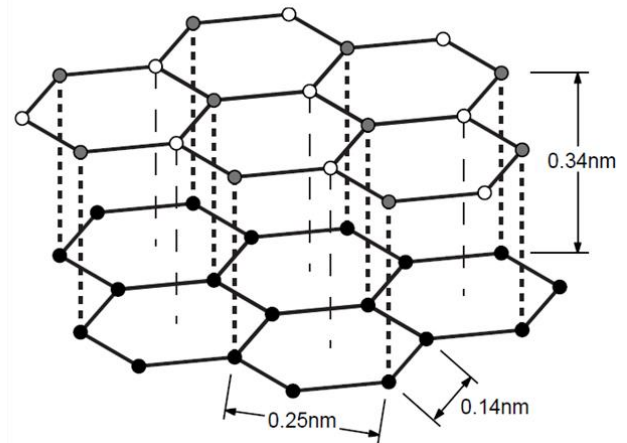
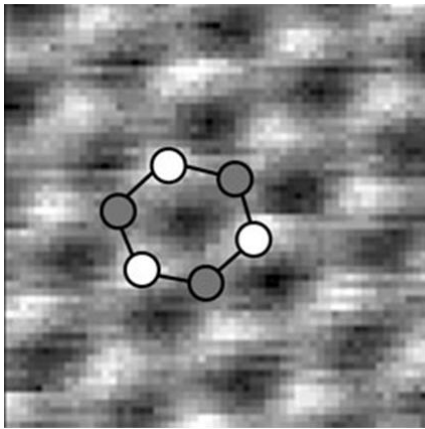
Άσκηση 4.1: Ευαισθησία στη θερμοκρασία:

Υπολογίστε πόσο διαστέλλεται ο κύλινδρος με ένα βαθμό στην κλίμακα Kelvin.

Μήκος κυλίνδρου 2.5 cm, συντελεστής διαστολής του σιδήρου: $\alpha = 11.8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Ποια μέτρα πρέπει, λοιπόν, να ληφθούν για να εξασφαλιστούν ομαλές λειτουργίες;

Το σαρωτικό μικροσκόπιο σήραγγας δεν μετράει μόνο το σχήμα της επιφάνειας, αλλά ταυτόχρονα την ηλεκτρική αγωγιμότητα κοντά στην επιφάνεια του δείγματος. Μια τυχόν μέτρηση υψηλότερης τάσης στο σημείο αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια συνδέονται λιγότερο στενά με τα άτομα σε εκείνο το σημείο από ό,τι σε άλλα σημεία. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να διαπιστωθεί όταν η μέτρηση γίνεται σε γραφίτη.



Στα αριστερά μπορείτε να δείτε τη μέτρηση ενός ατομικού πλέγματος μιας επιφάνειας γραφίτη - ωστόσο, δεν μπορείτε να δείτε την εξαγωνική δομή του πλέγματος που μας είναι γνωστή από πειράματα σκέδασης. Φαίνεται πως μπορούμε να δούμε μόνο κάθε 2ο άτομο άνθρακα στην εικόνα που λαμβάνουμε με το ΣΜΣ.

Άσκηση 4.4:

Δεδομένης της δομής των επιπέδων γραφίτη, πώς μπορείτε να εξηγήσετε ότι μόνο κάθε 2ο άτομο είναι ορατό;

Περισσότερο εκπαιδευτικό υλικό σχετικά με το μικροσκόπιο σάρωσης θα βρείτε στο concord.org

Προσομοιώσεις ΣΜΣ στο Concord.org

Λύσεις:**4.1:**

Δόνηση, θερμική διαστολή

4.2:

Πιεζοηλεκτρικό μεγάφωνο, ταλαντούμενοι χαλαζίες σε ρολόγια χειρός και ραδιόφωνα, πιεζοαναφλεκτήρας³

4.3:

$\Delta L \approx \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T = 295 \text{ nm}$. Το σαρωτικό μικροσκόπιο σήραγγας πραγματοποιεί μετρήσεις σε νανοκλίμακα και η διαστολή είναι αρκετές εκατοντάδες νανόμετρων, γεγονός που διαστρεβλώνει σημαντικά τη μέτρηση. Μετρήσεις πρέπει να γίνονται για τη θερμική σταθεροποίηση, όπως την προστασία από ρεύματα αέρα με τη χρήση καλύματος, την αποφυγή μιας άμεσης πηγής φωτός ή την διασφάλιση επαρκούς χρόνου για σταθεροποίηση.

4.4:

Υπάρχουν 2 διαφορετικές θέσεις στο πλέγμα γραφίτη: Οι "γκρίζες" που έχουν κάποιον "γείτονα" στο κάτω επίπεδο του πλέγματος - τα ηλεκτρόνια αυτών των ατόμων αλληλεπιδρούν με τα άτομα του υποκείμενου στρώματος και ως εκ τούτου η σύνδεσή τους είναι ισχυρότερη. Τα «λευκά» άτομα δεν έχουν γείτονα στο υποκείμενο επίπεδο και μπορούν να απελευθερώνουν ηλεκτρόνια ευκολότερα, με αποτέλεσμα να είναι πιο ορατά.

³ Οι πιεζοαναφλεκτήρες χρησιμοποιούνται σε ψησταριές υγραερίου και αναπτήρες.

Έννοιες στον Σταθμό Μάθησης VIII

Συμπληρώστε προσθέτοντας τις έννοιες που λείπουν

Κλασσικές έννοιες

Μακροσκοπικά αντικείμενα μπορούν να ξεπεράσουν ένα φράγμα δυναμικής ενέργειας αν έχουν

Η ολική εσωτερική ανάκλαση συμβαίνει για φωτεινά που μεταβαίνουν από ένα οπτικά μέσο σε ένα οπτικά όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι..... από μια κρίσιμη γωνία.

Το ίδιο φαινόμενο μπορεί να παρατηρηθεί με υδάτινα κύματα αφού η ταχύτητά τους εξαρτάται από το..... του νερού. Ωστόσο όταν το κενό που δημιουργείται από το βαθύ νερό γίνει αρκετά..... – της τάξης μεγέθους του κύματος- τα κύματα μπορούν να διέλθουν ανάμεσα στο κενό και μεταδίδονται (μερικώς).

Κβαντικές Έννοιες

Τα σωματίδια μπορούν να διέλθουν μέσω ενός ενεργειακού φράγματος λόγω της.....

Αυτό είναι ένα κβαντικό φαινόμενο επειδή το φαινόμενο σήραγγας συμβαίνει – κάθε φωτόνιο έχει κυματική φύση.

Λόγω της, τα ηλεκτρόνια και η ύλη εν γένει μπορούν να διανοίξουν σήραγγα. Δηλαδή μπορούν να διέλθουν από ένα ενεργειακό φράγμα παρ' ότι δεν έχουν αρκετή ενέργεια ώστε να το υπερκεράσουν.

Η πιθανότητα ένα κβαντικό αντικείμενο να διανοίξει σήραγγα μέσω ενός ενεργειακού φράγματος εξαρτάται από την του σωματιδίου και το του φράγματος.