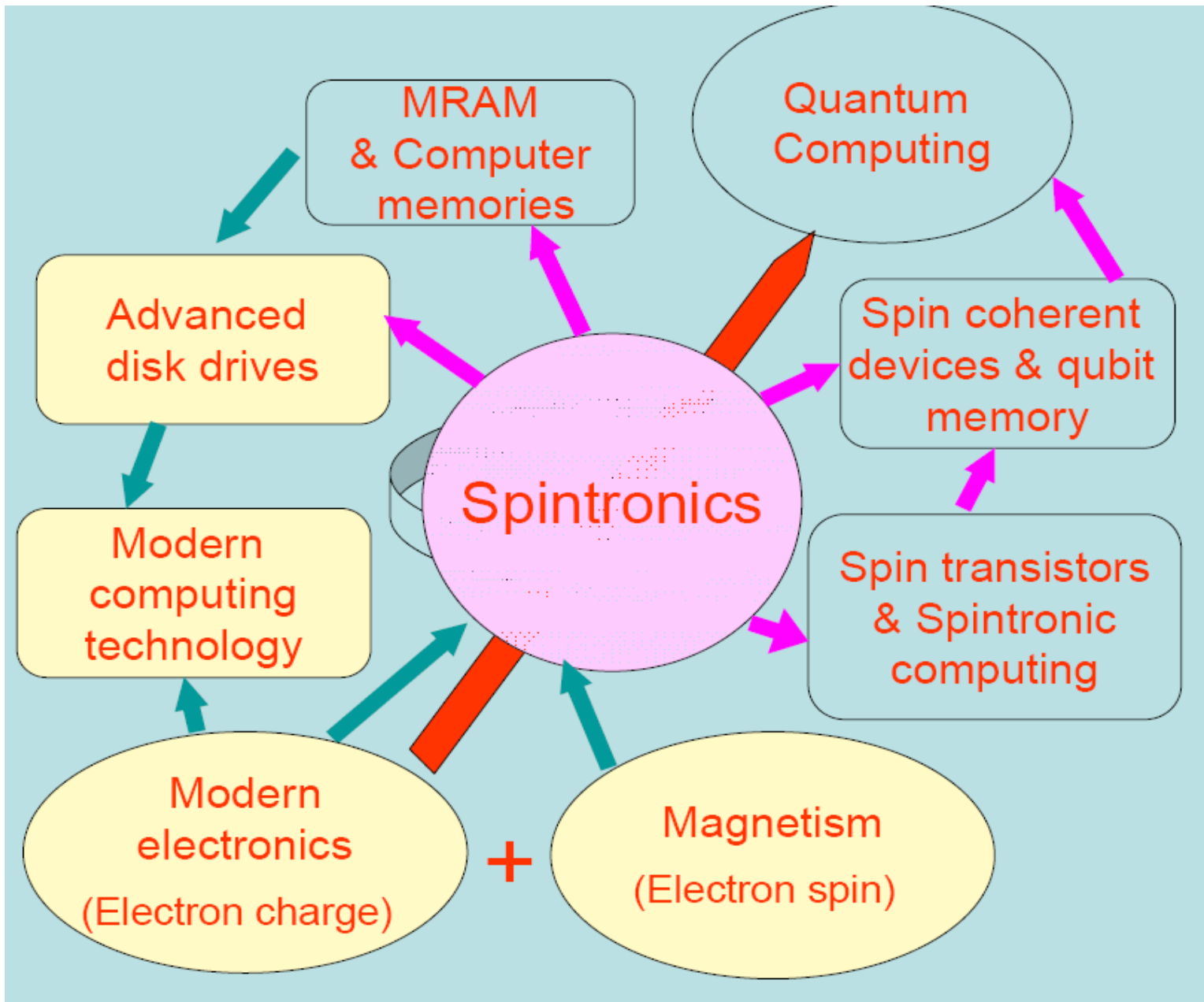


# ספינת רחוקה וחישוב קוונטי

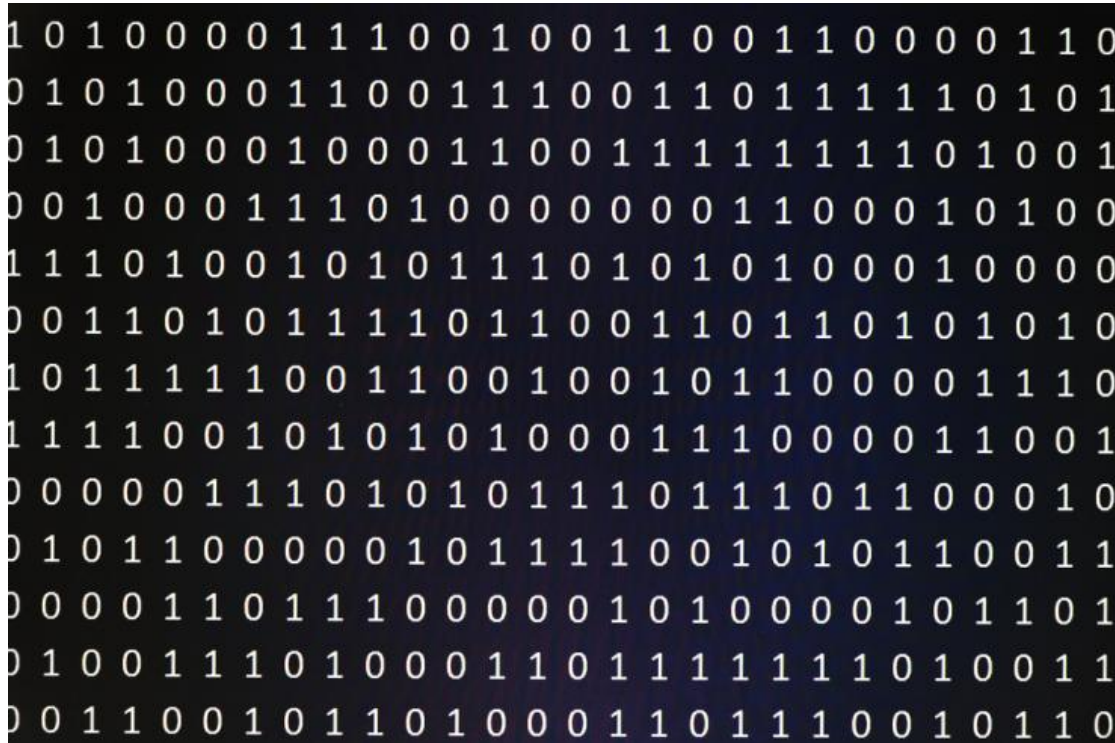
אמנון אהרוני



# חישוב "קלאסי" מבוסס על "ביטים":

המידע בנוי מיחידות, שלכל אחת מהן יש אחד

משני ערכים, 0 או 1

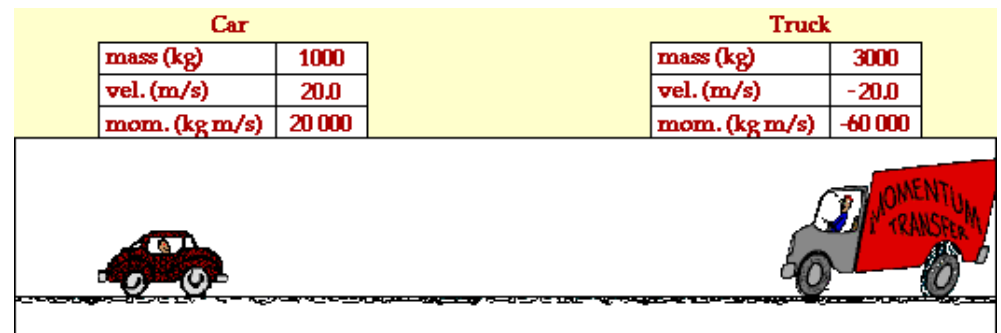
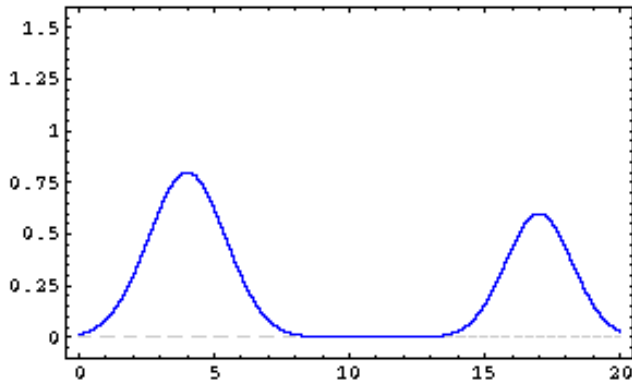


חישוב קוונטי מבוסס על "קוביטים", שיוסברו בהמשך

# קוונטים - ההבדל בין חלקיקים וגלים:

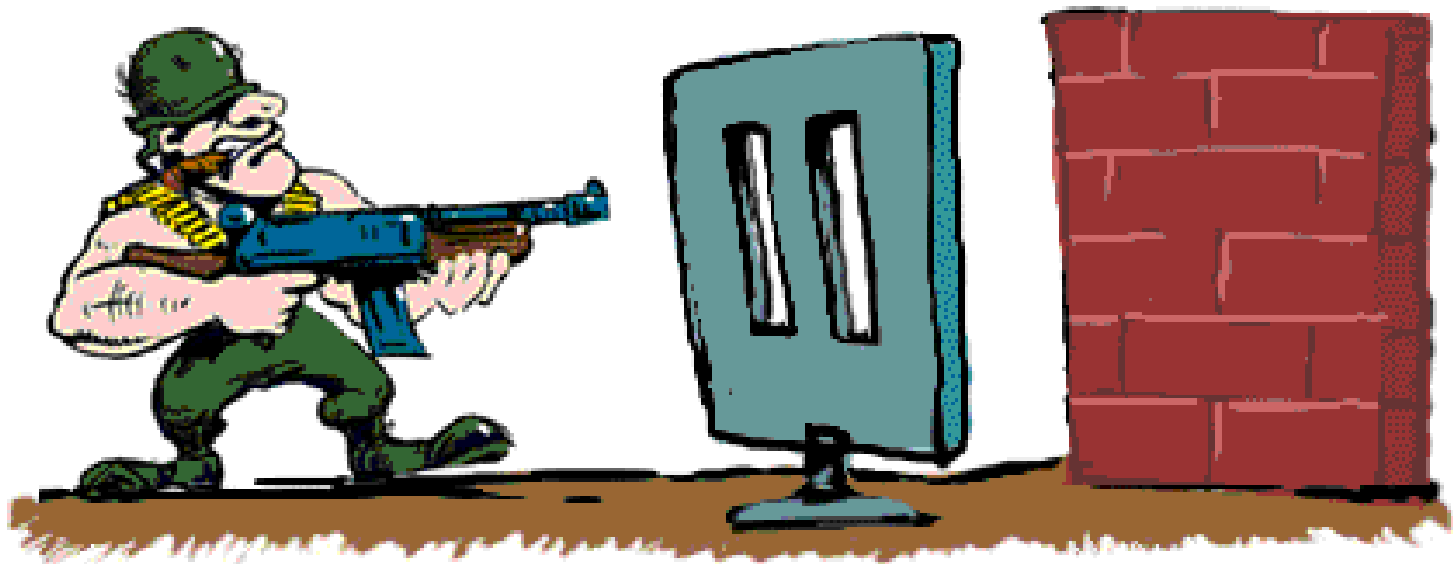
גלים יכולים לעבור האחד דרך השני!

במעבר הם יכולים לחזק או להחליש את התוצאה.

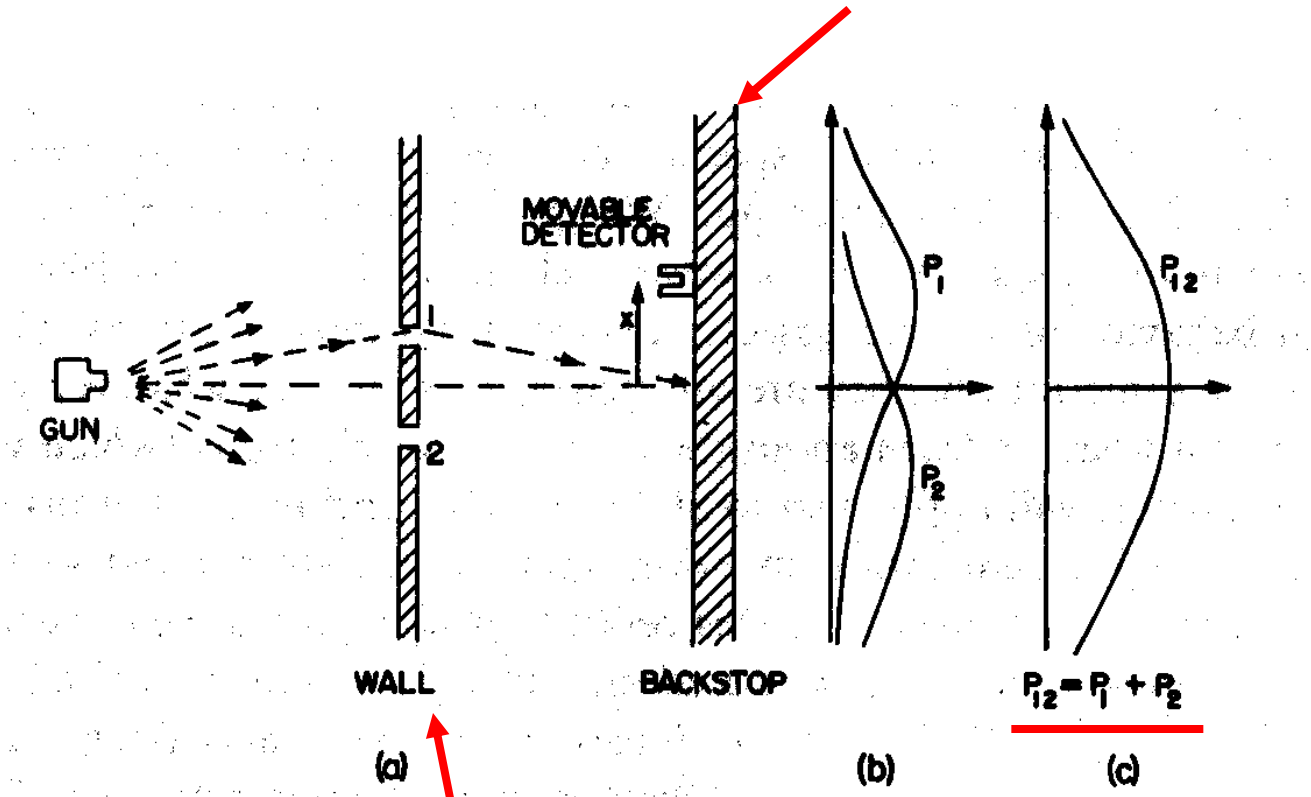


דה ברולי: אלקטרונים הם גם חלקיקים וגם גלים

# ניסוי שני הסדקים בחלקיקים קלאסיים

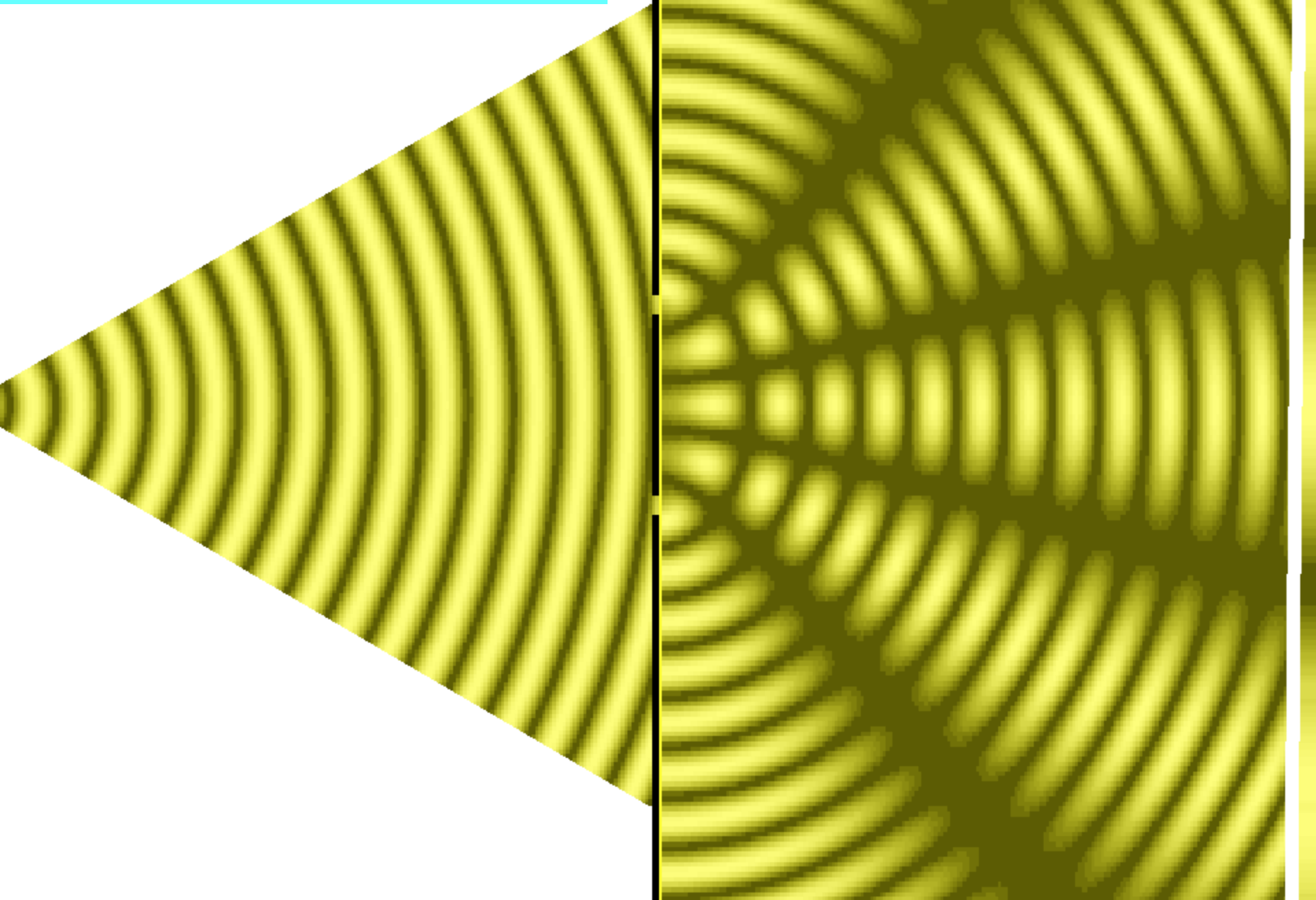


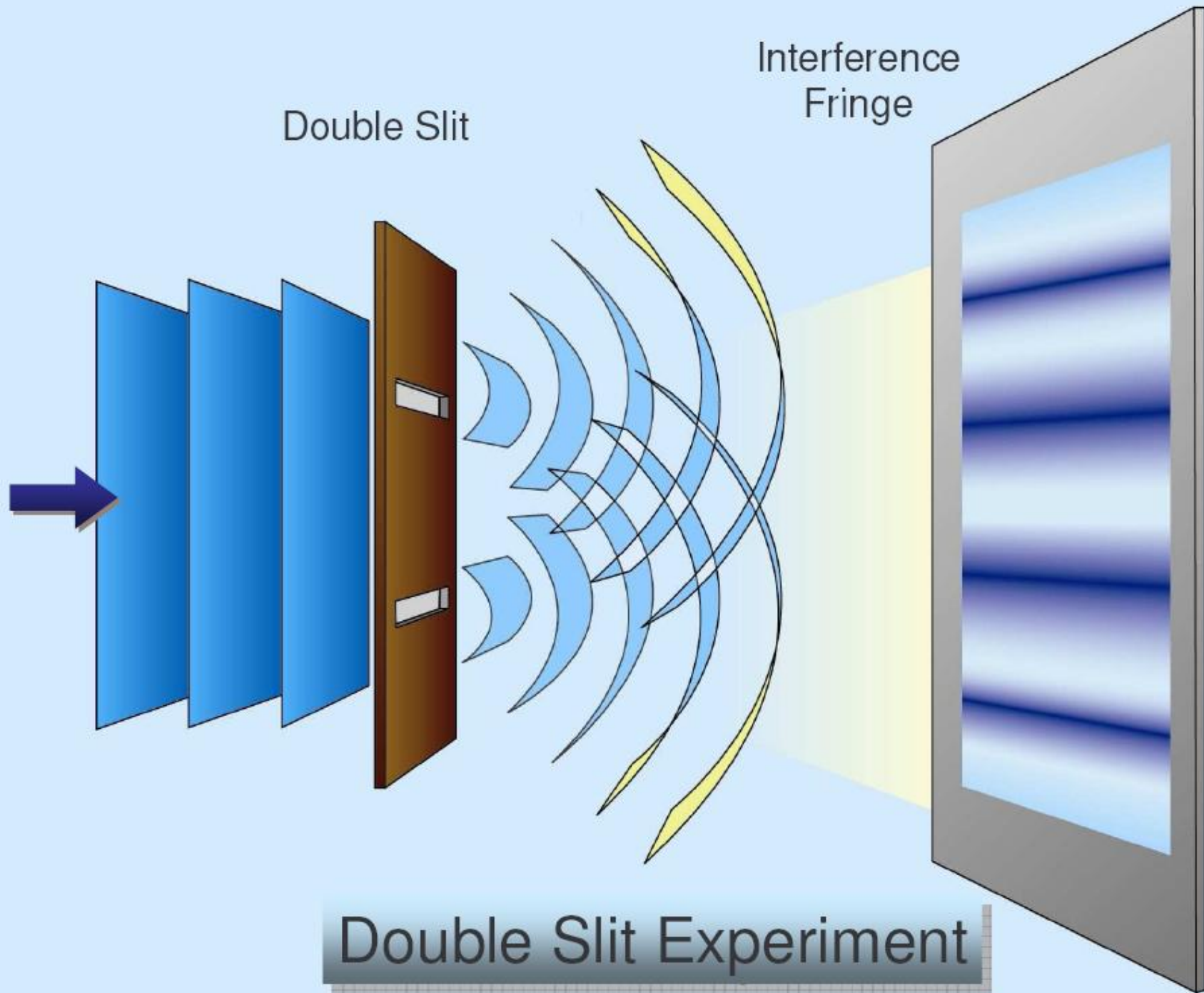
# עץ או בלוקים



מתכת

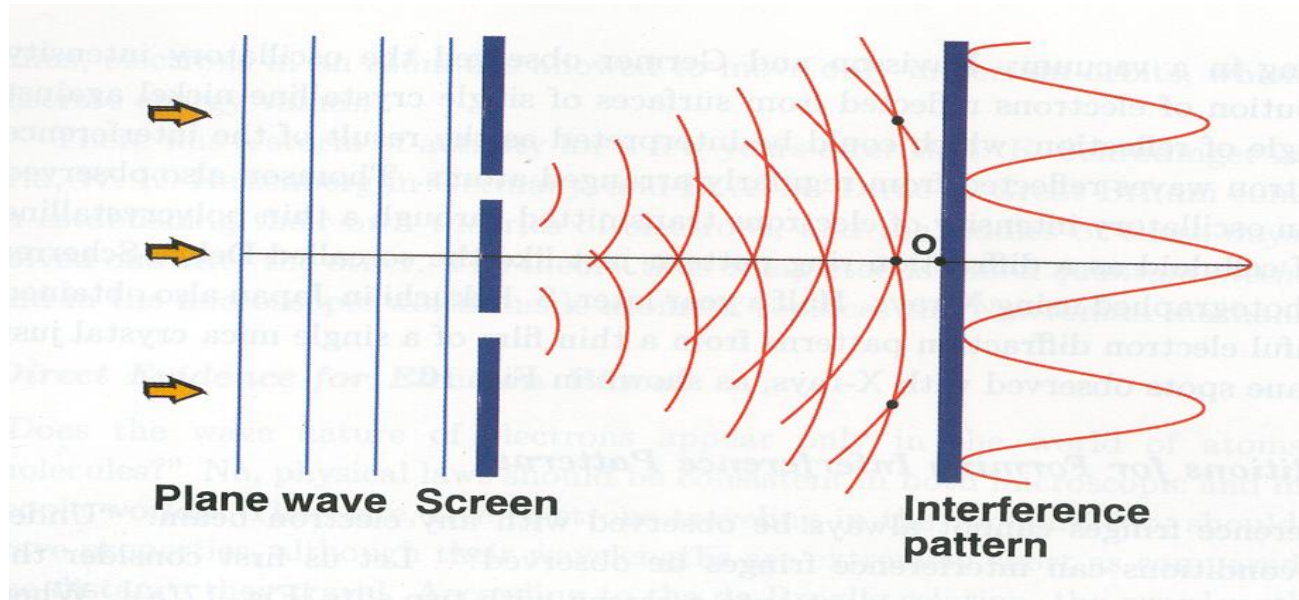
# אותו ניסוי עם גלים





Double Slit Experiment

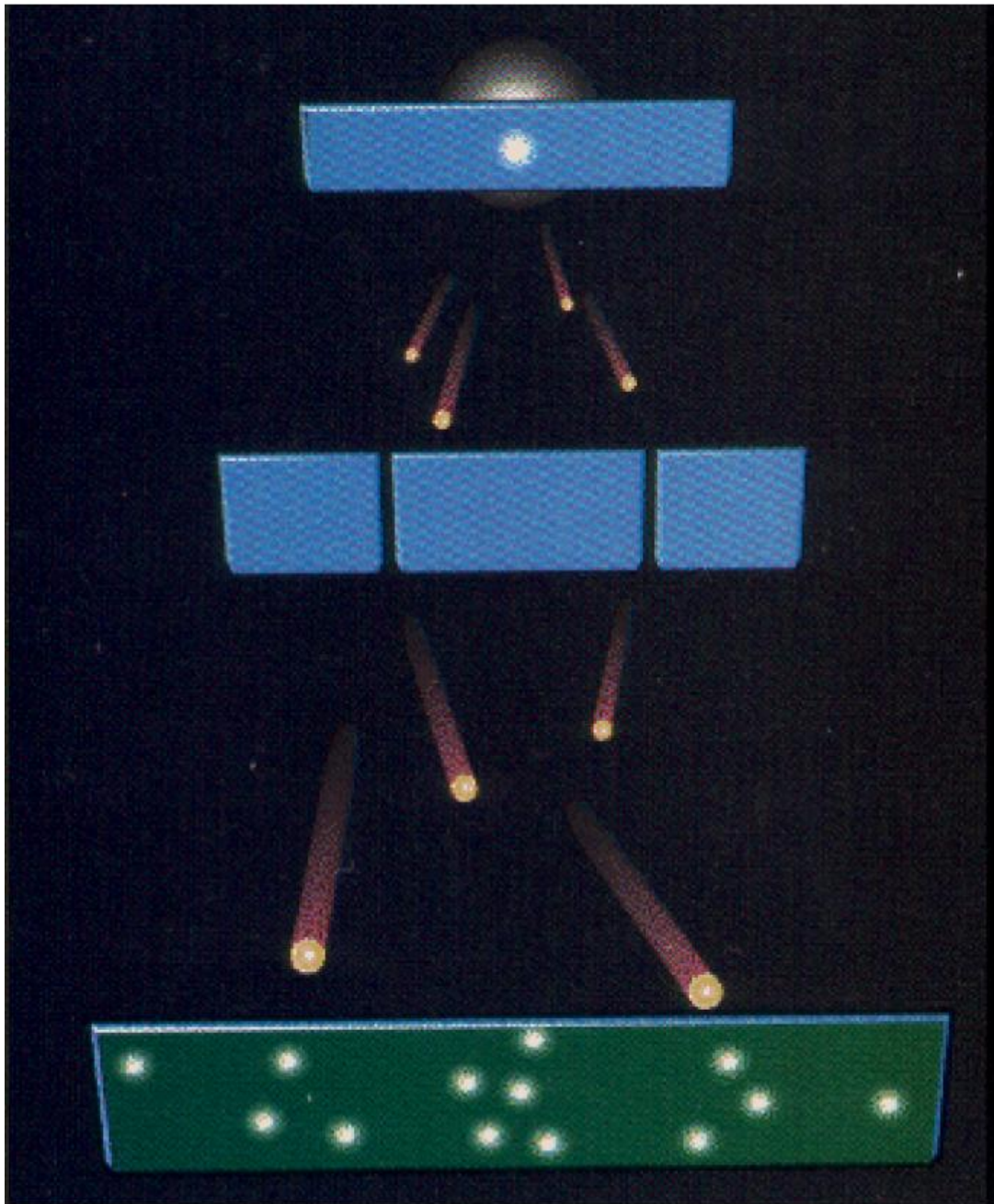




$$\varphi_1 = |\varphi_1|e^{i\alpha_1}, \quad \varphi_2 = |\varphi_2|e^{i\alpha_2}$$

$$P_{12} = |\varphi_1 + \varphi_2|^2 = |\varphi_1|^2 + |\varphi_2|^2 + 2|\varphi_1||\varphi_2|\cos(\alpha_1 - \alpha_2)$$

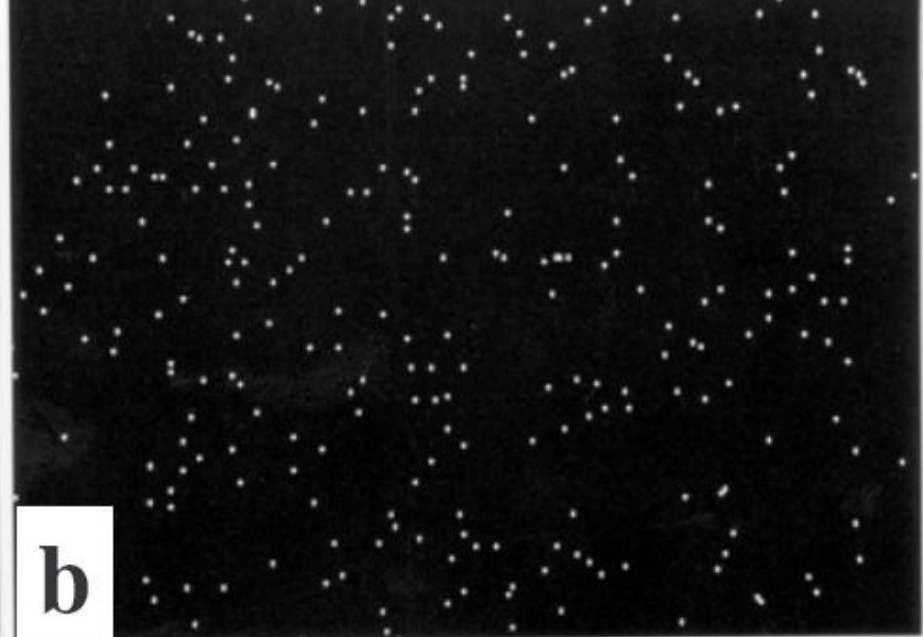
---



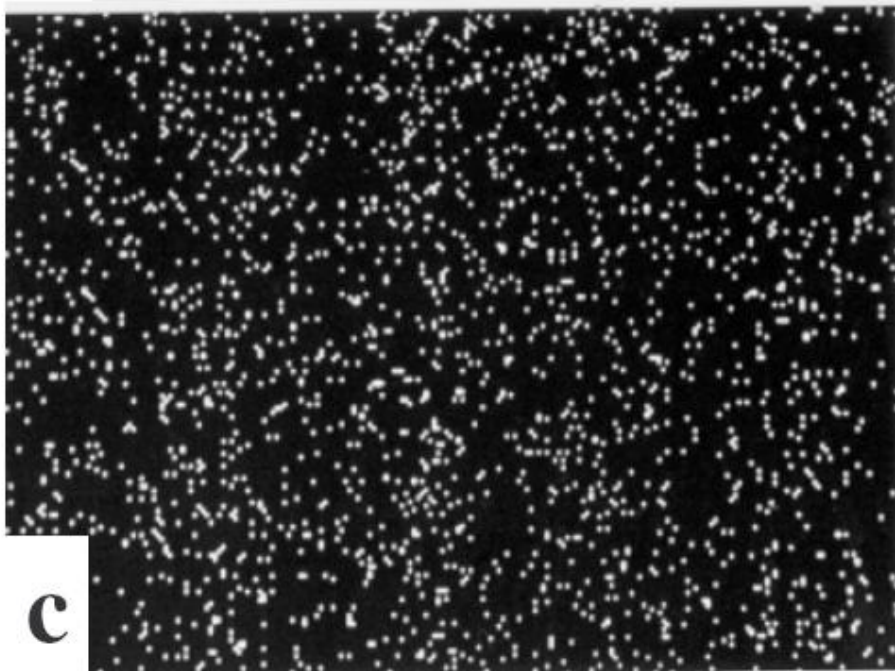
אותו ניסוי  
עם אלקטרונים



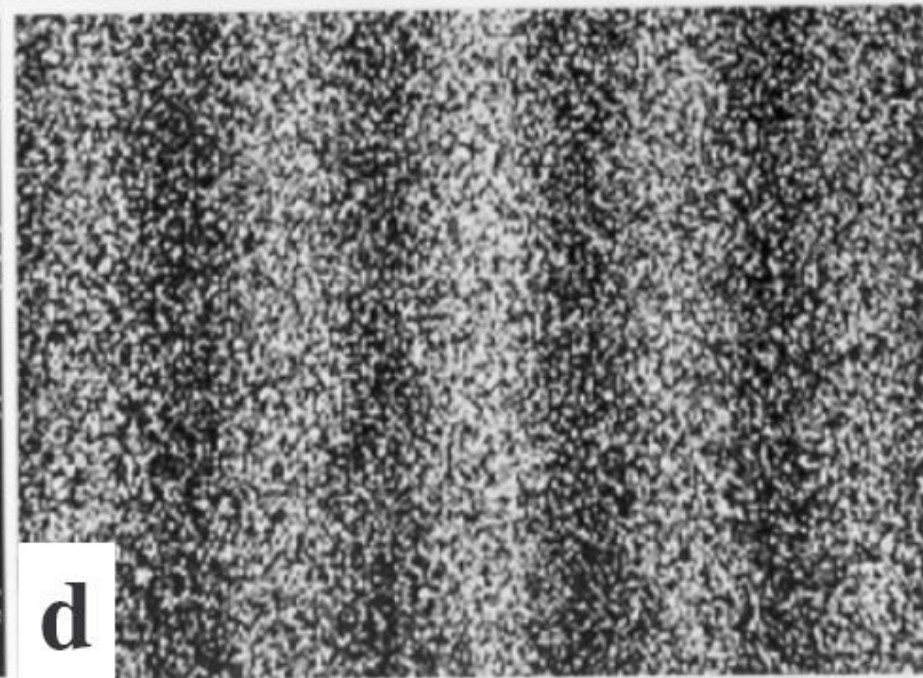
**a**



**b**



**c**



**d**

**Single-electron Build-up of Interference Pattern**

## בפיסיקה קוונטית

תנועה של גופים "קטנים" איננה דטרמיניסטית:  
הם נמצאים בהרבה מצבים באותו זמן, ומדידות שונות יכולות לתת תוצאות שונות.  
התיאוריה יכולה רק לחשב את **הסיכוי הסטטיסטי** לקבל תוצאות שונות במדידה.



מסלול קלאסי



מפת ההסתברויות של המסלול  
בתורת הקוונטים

# למרות שאולי קשה להבין אותה, תורת הקוונטים

## שימושים:

לייזרים

מוליכים למחצה - טרנזיסטורים

מסכי מחשב LED

משקפות לראיית לילה

MRI

מוליכי על

מיקרוסקופים אלקטרוניים

ננוטכנולוגיה

ספינטרוניקה

חישוב קוונטי? טלפורטציה?

קריפטוגרפיה?

## מסבירה:

מינהור

דעיכה רדיואקטיבית

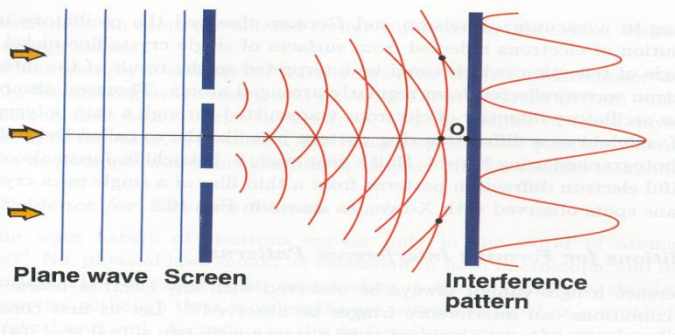
הטבלה המחזורית

כימיה - מולקולות

מבנה החומר

מוצקים

גרעינים - חלקיקים



## עקרון הסופרפוזיציה:

פונקצית הגל של החלקיק היא סכום (שזירה) של פונקציות גל

שכל אחת מהן מתארת תוצאה אפשרית של המדידה,

עם מקדמים שמייצגים את הסיכויים לתוצאות השונות.

$$\varphi_1 = |\varphi_1|e^{i\alpha_1}, \quad \varphi_2 = |\varphi_2|e^{i\alpha_2}$$

$$P_{12} = |\varphi_1 + \varphi_2|^2 = |\varphi_1|^2 + |\varphi_2|^2 + 2|\varphi_1||\varphi_2| \cos(\alpha_1 - \alpha_2)$$

**גם וגם...**

# SCIENTIFIC AMERICAN

MAY 1994

\$3.95

U.K. £2.75

*Biology and homosexuality: a debate.*

*The crisis in air-traffic control.*

*How our species came to be.*

DISPLAY  
CERN-LIBRARY  
24 MAY 1994



## ניסוי מחשבתי להמחשת עקרון הסופרפוזיציה: החתול של שרדינגר

החתול נמצא בסופרפוזיציה  
של שני מצבים:  
הוא גם חי וגם מת!

*Quantum cat in Schrödinger's thought experiment  
gets a reprieve from a rival theory.*



## סופרפוזיציה

$$\psi = a \text{  } + b \text{  }$$

החתול חי עם סיכוי  $|a|^2$  ומת עם סיכוי  $|b|^2$

$$\psi = a |0\rangle + b |1\rangle$$

$$\psi = a \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + b \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$



$$\psi = a \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + b \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

**הקוביט בנוי על שזירה של שני מצבים (למשל פונקציות גל).**

**פונקציית הגל של הקוביט תלויה במקדמים, שהם מספרים מרוכבים.**

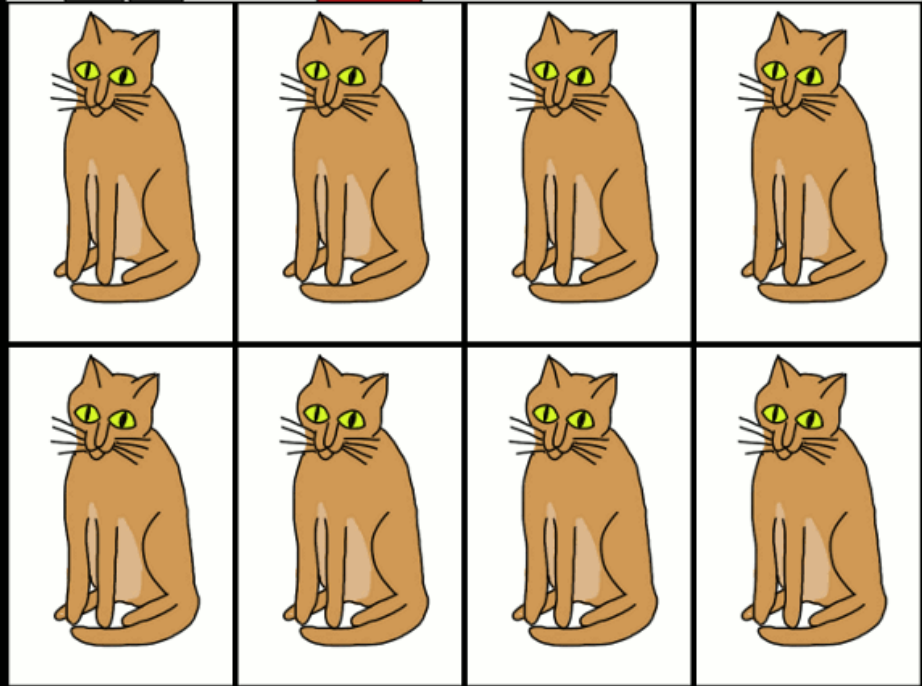
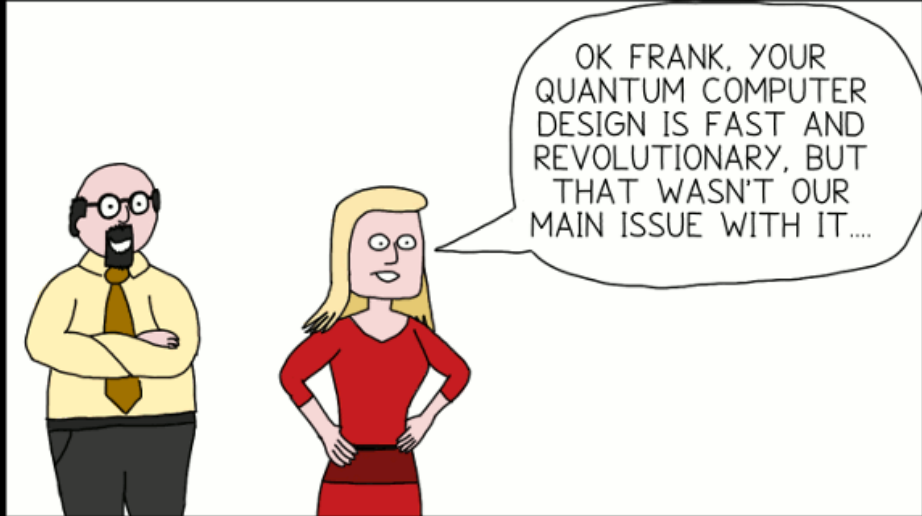
**חישוב קוונטי משנה את המקדמים הללו, שמכילים הרבה יותר מידע**

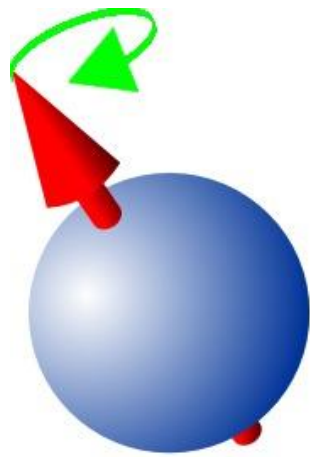
**(בהשוואה לביטים הקלאסיים)**

כל מערכת של שני מצבים יכולה להתאים:

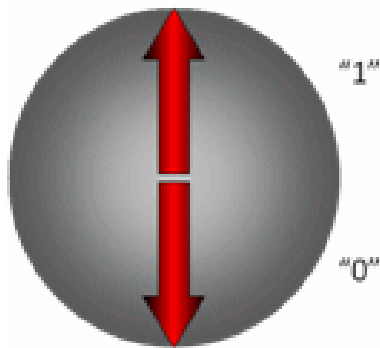
- ספינים של אלקטרונים על נקודות קוונטיות
- ספינים של גרעינים במולקולות
- מצבים אלקטרוניים של אטומים או של יונים במלכודות
- מצבים אקסיטוניים של גבישים קטנים
- פולריזציה של פוטונים (קוביטים נעים)
- ספינים של גרעינים בגביש
- יונים בגבישים אופטיים
- זוגות קופר במוליכי על
- קיטוב של אלקטרונים נעים (קוביטים נעים)

"Quantum Computer"





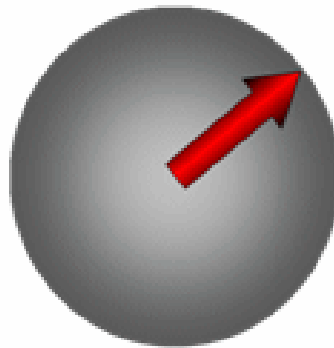
הספין של  
האלקטרון



"1"

"0"

"Classical" bit

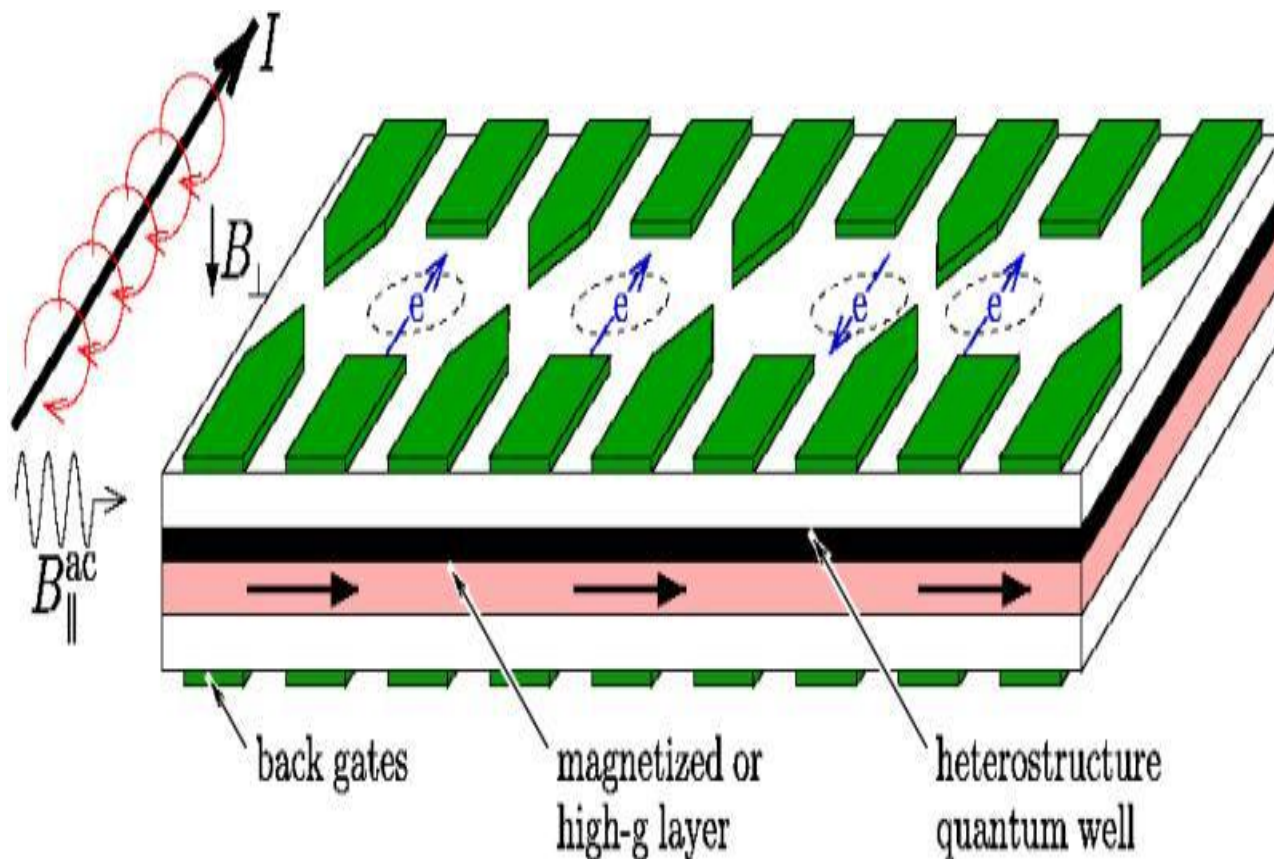


"Quantum" bit

$$|\psi\rangle = \alpha|↑\rangle + \beta|↓\rangle$$

פונקצית הגל של הספין משמשת בתור **קוביט**.  
המקדמים קובעים את כיוון הקיטוב, ולהיפך

# קוביטים סטטיים: אלקטרונים שלכודים בנקודות קוונטיות



$$\psi = a |000\rangle + b |001\rangle + c |010\rangle + \dots$$

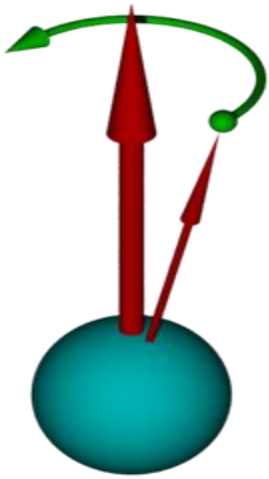
סופרפוזיציה של 8 מצבים

במקום קוביטים סטטיים, נדון עכשיו בקוביטים ניידים: כל אלקטרון מקוטב, ונושא איתו את המידע הקוונטי.

כדי לכתוב אינפורמציה קוונטית על הקוביט צריך להכין אותו במצב מקוטב.



**פילטר ספין: יוצר זרם של קוביטים זהים ומקוטבים. כל אחד נושא איתו את המידע הקוונטי**



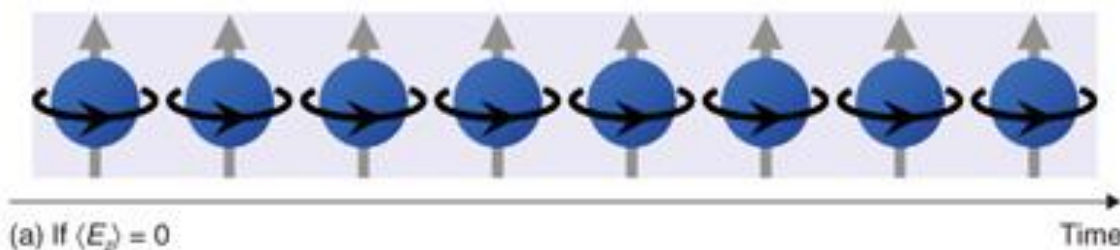
כשמומנט מגנטי נע בשדה מגנטי הוא מבצע  
פרצסיה סביב השדה.

האינטראקציה ספין-מסילה: שדה חשמלי  
שפועל על האלקטרון יוצר שדה מגנטי אפקטיבי,  
שניצב לכיוון התנועה ולשדה החשמלי.

האינטראקציה ספין מסילה גורמת לסיבוב  
המומנט המגנטי הספיני של האלקטרון, ולכן  
לשינוי הקוביט ששייך אליו תוך כדי התנועה.

# האינטראקציה ספין-מסילה: הספין של האלקטרון מסתובב כאשר נע בניצב לשדה חשמלי

בלי שדה חשמלי

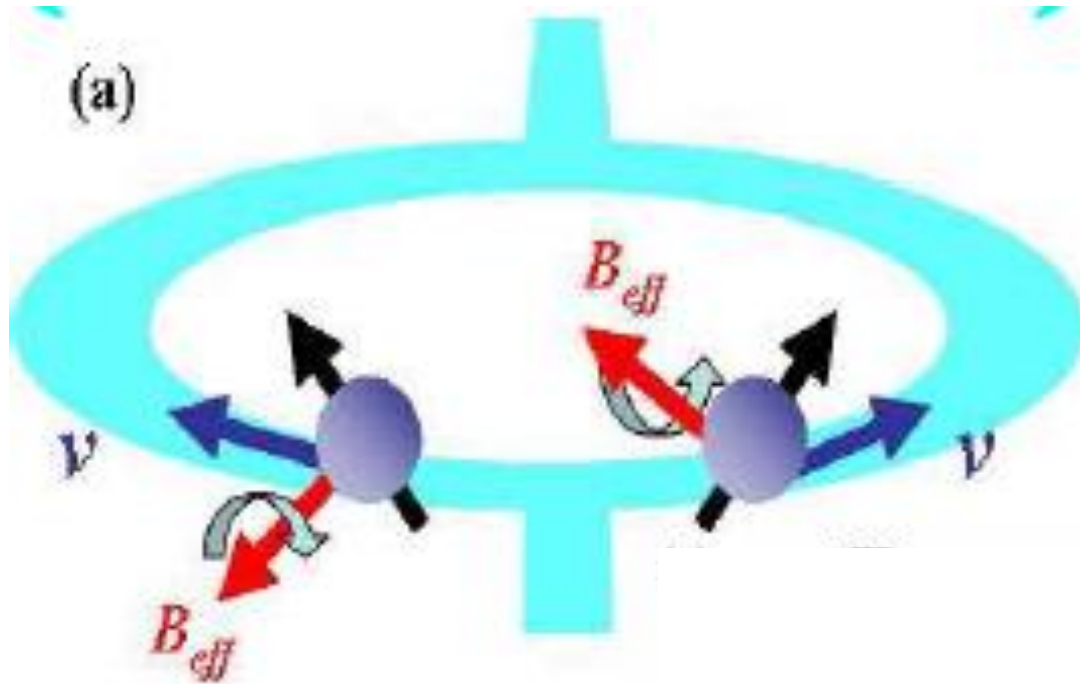


עם שדה ניצב ללוח



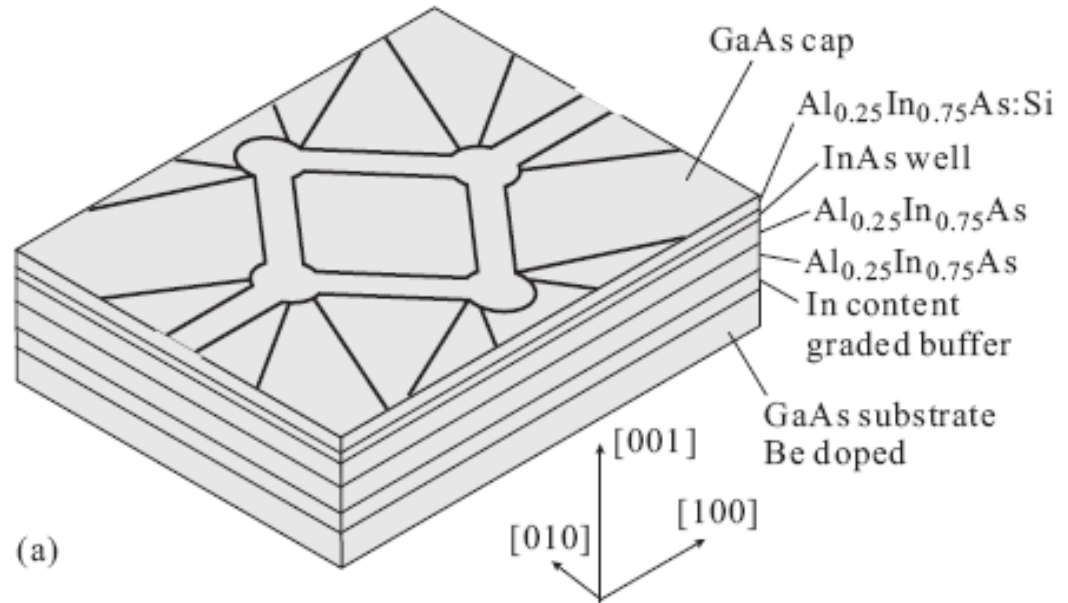


# התאבכות קוונטית:

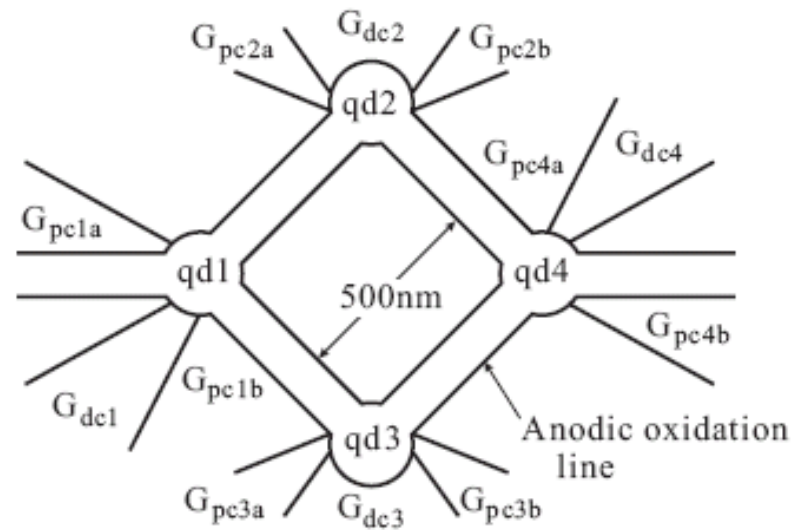


אפשר לבחור שדות חשמליים ומגנטיים כך שרק כיוון קיטוב אחד יעבור

כדי למנוע אובדן  
 קוהרנטיות  
 צריך דגמים  
 קטנים,  
 טמפרטורה  
 נמוכה -  
 פיסיקה  
 מזוסקופית



(a)



(b)

# מעדרה

