

1.1

Quantum no-cloning

אין אפשרות להעתיק מצב קוונטי לא ידוע. כל ניסיון להעתיק מצב קוונטי יגרום לשינוי במצב המקורי. זה נובע מהליניאריות של מכניקת הקוונטים.

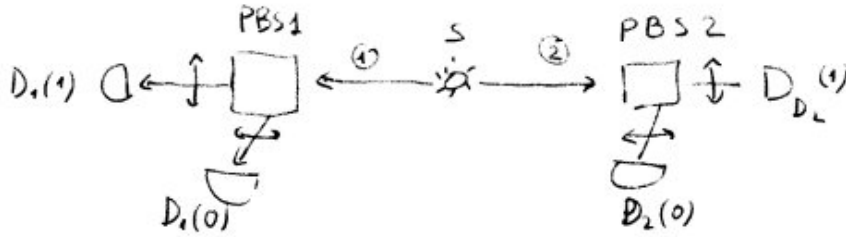
1.2

- \* Entangled states - EPR
- \* Bell's theorem
- \* Principle of teleportation
- \* Experimental Demonstration of teleportation
- \* Generation of entangled photon pairs
- \* Single photon interference experiments

# Entangled states - EPR \*

הצהרה: אם לא ניתן למדוד את פונקציות הבה והכליך במכשירי על פונקציות על זה המקינות, כמו שגם entangled

קובלנה - גומור פוטונים עם קובלניה



(2)

Bell states

קובלניה חיובית:

$$|\Phi^{\pm}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [ |0, 0\rangle \pm |1, 1\rangle ]$$

קובלניה שלילית:

$$|\Psi^{\pm}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [ |0, 1\rangle \pm |1, 0\rangle ]$$

המצבים Bell states  $|\Phi^{\pm}\rangle$  ו-  $|\Psi^{\pm}\rangle$  נקראים

מצבים קיטוב של פוטון אחד בהכרח יתגלו כמו זה הקיטוב של הפוטון השני ב-100%.

קובלניה חיובית:

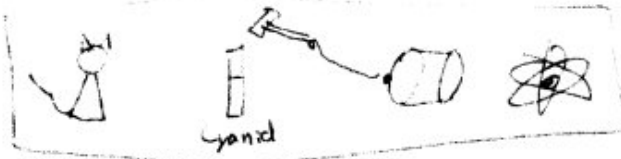
$$P(0,0) = |\langle 0,0 | \Phi^{\pm} \rangle|^2 = \frac{1}{2}$$

קובלניה שלילית:

$$P(1,0) = P(0,1) = |\langle 0,1 | \Psi^{\pm} \rangle|^2 = \frac{1}{2}$$

(1)

קובלנה נוספת למצבים entangled - שגם א מייצגת:



$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [ |live, 1\rangle + |dead, 2\rangle ]$$

המצב במצב קובלניה של "חי" ו"מת".  
הסיכוי למצוא את המצב החיים הוא 50%.

(2)

# Bell's Theorem

Copenhagen interpretation - Niels Bohr

"hidden variables" - EPR thought experiment

LHV		Copenhagen	
↑	↓	↑	↓
50%	50%	50%	50%
<del>~~~~~</del>		↓	↑
		$P(\uparrow) = P(\downarrow) = \frac{1}{2}$	

... of the experiment

Bell's theorem and EPR thought experiment

... of the experiment

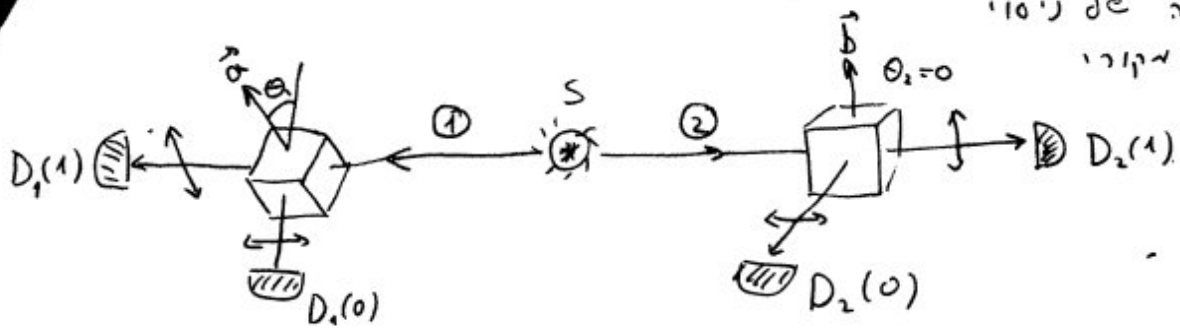
... of the experiment

Bell's theorem and LHV

Bell's theorem and LHV

... of the experiment

והיא ציבה של ניסוי EPR מקורי



\* ציונים של שני המקבלים שונים.

\* כאשר  $\theta_1 = \theta_2$  מקבלים EPR מקורי.

\* תוצאות אפשריות של מקידה:

$P_{11}(\theta_1, \theta_2)$ : בהסתברות  $D_2(1)$  ו-  $D_1(1)$

$P_{10}(\theta_1, \theta_2)$ : בהסתברות  $D_2(0)$  ו-  $D_1(1)$

$P_{01}(\theta_1, \theta_2)$ : בהסתברות  $D_2(1)$  ו-  $D_1(0)$

$P_{00}(\theta_1, \theta_2)$ : " "  $D_2(0)$  ו-  $D_1(0)$

- התנאים הנכונים חייבים להיקיים:

EPR מקורי עם קורלציה חזקה

$$\begin{cases} P_{11}(\theta, \theta) = 0.5 & (1) \\ P_{10}(\theta, \theta) = 0 \\ P_{01}(\theta, \theta) = 0 \\ P_{00}(\theta, \theta) = 0.5 \end{cases}$$

$$P_{11}(\theta_1, \theta_2) + P_{00}(\theta_1, \theta_2) = 0.5 \quad (2)$$

$$P_{01}(\theta_1, \theta_2) + P_{00}(\theta_1, \theta_2) = 0.5$$

$$P_{11}(\theta_1, \theta_2) + P_{01}(\theta_1, \theta_2) = 0.5$$

$$P_{10}(\theta_1, \theta_2) + P_{00}(\theta_1, \theta_2) = 0.5$$

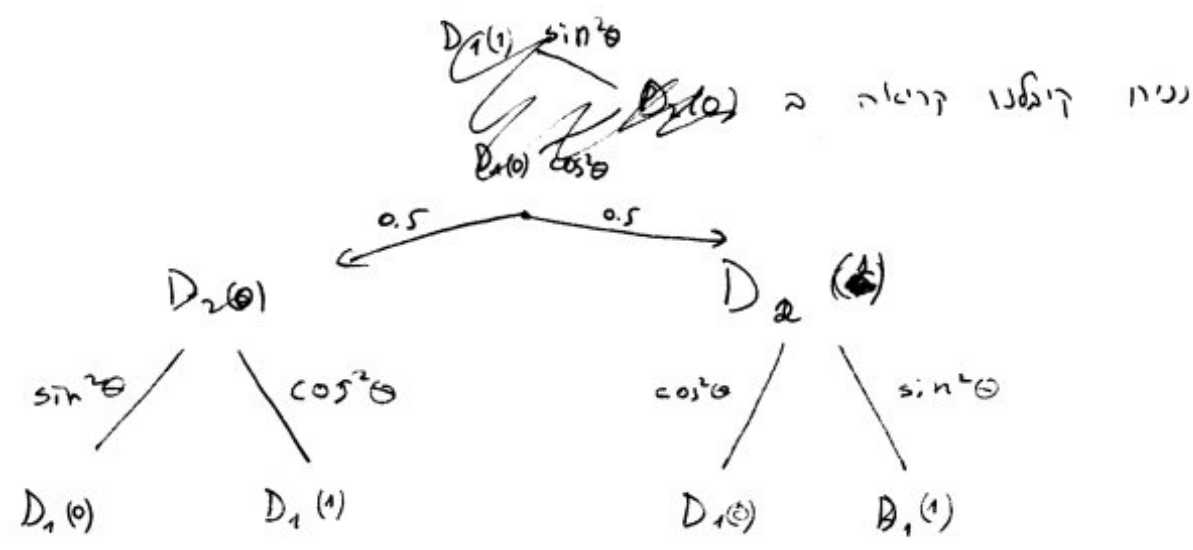
עבור ניסוי נתון, סה"כ ההסתברות לקבל 1 או 0 חייבת להיות 50%

נחשב את תוצאות המדידות של המדידות השונות של הניסוי בשני היישורים.  
 נניח המקור כולל ציוד פוטונים עם קורלציה חיובית:

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [ |0_1, 0_2\rangle + |1_1, 1_2\rangle ]$$

בדיקה הקלאסית

נבחר למדידה במסלול המסלול עם צירים של PBS2.



$$\Rightarrow P_{11}(\theta_1, 0) = \frac{1}{2} \cos^2 \theta_1 \quad P_{01}(\theta_1, 0) = \frac{1}{2} \sin^2 \theta_1$$

$$P_{10}(\theta_1, 0) = \frac{1}{2} \sin^2 \theta_1 \quad P_{00}(\theta_1, 0) = \frac{1}{2} \cos^2 \theta_1$$

נאלץ מודדים ~~ב~~ במסלול שני צירים, התוצאות של הניסוי יהיו תלויות בהפרש הזוויות:

$$P_{11}(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2} \cos^2(\theta_1 - \theta_2)$$

$$P_{10}(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2} \sin^2(\theta_1 - \theta_2)$$

$$P_{01}(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2} \sin^2(\theta_1 - \theta_2)$$

$$P_{00}(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2} \cos^2(\theta_1 - \theta_2)$$

במקרה של קורלציה שלילית,  $\cos \leftrightarrow \sin$

נניח שהמקור כולל זוג כוונות באותו קוטב בהסתברות שווה,

כלומר שניהם מקבלים  $\frac{1}{\sqrt{2}} [ |11\rangle + |00\rangle ]$

דבר זה  $\theta_1 = \theta_2$  נקבע את התוצאות עם ניסוי EPR מקורי, אולם עבור  $\theta_1$  ו  $\theta_2$  שרירותי, נקבע נקבע את ההסתברויות הבאות:

$$P_{11}(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2} [ \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 ]$$

$|11\rangle \qquad \qquad \qquad |00\rangle$

$$P_{10}(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2} [ \sin^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 ]$$

$$P_{01}(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2} [ \cos^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 ]$$

$$P_{00}(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2} [ \cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 ]$$

אם  $\theta_2 = 0$  מקבלים תוצאה זהה ל"קוונטית"  
 אם  $\theta_2 \neq 0$  מקבלים תוצאות שונות

ברק בחורה מאיך אסתר את ההבדל בין הניסוי הלא נגמר

$$\theta_1 = \theta_2 = 0 \quad \text{ובשאר } \theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$$

אם מקור אטומי אחד סביב, לא אמור להיות שום הבדל בין שני המקרים כי בחינה הבסיס שרירותית.

בשיעור LHV במקרה של  $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$  מקבלים:

$$P_{11} = P_{10} = P_{01} = P_{00} = \frac{1}{4}$$

~~בניק חיימה לנסות~~

ב Clauser, Horne, Shimony, Holt, 1968 (CHSH) המקורי בוגט

5 באותו ניסוח למקור ג'ניווי

6

$$S = E(\theta_1, \theta_2) - E(\theta_1, \theta_2') + E(\theta_1', \theta_2) + E(\theta_1', \theta_2')$$

כאן

$$E(\theta_1, \theta_2) = P_{11}(\theta_1, \theta_2) + P_{00}(\theta_1, \theta_2) - P_{10}(\theta_1, \theta_2) - P_{01}(\theta_1, \theta_2)$$

יבחינו כי מיון Bell

$$-2 \leq S \leq 2$$

מקיים עבור כל מקור אקסטרן LHV

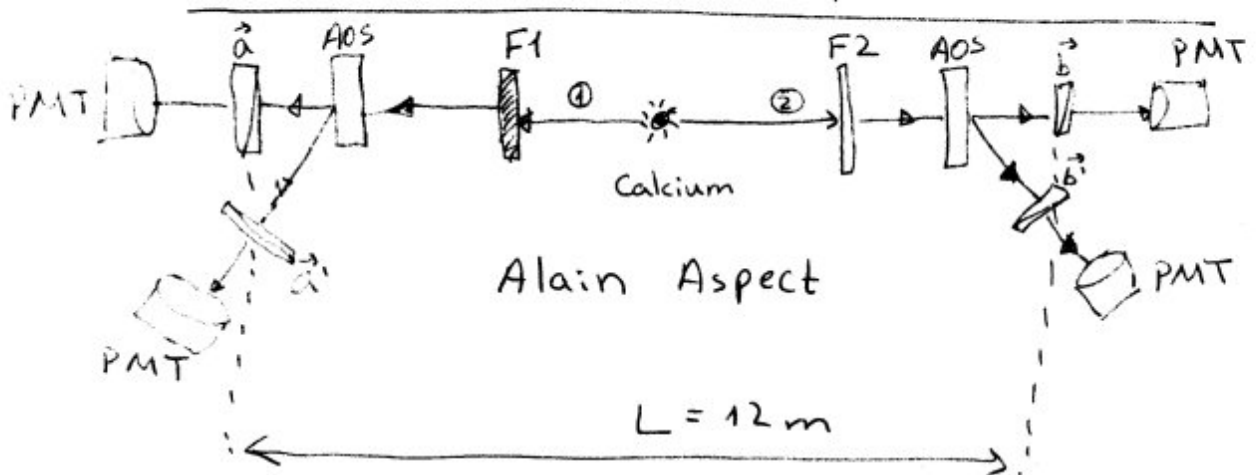
כי לא יבוא דוגמה שגורמת להפרת המיון הזה!

$$\theta_1 = 0, \theta_2 = 22.5^\circ, \theta_1' = 45^\circ, \theta_2' = 67.5^\circ$$

↓

$$S = 2\sqrt{2}$$

הנה כי מיון Bell מוכיח כי מקבלים קוונטום



AOS - acousto-optical switch

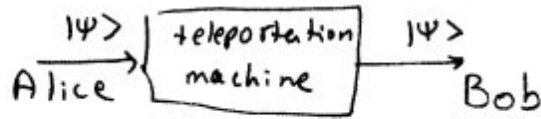
$$t_{\text{switch}} < L/c \quad (40 \text{ nsec})$$

ישו כי מוכיח שכל מקבלים מקור מקומי

1982 - 1981 ג'ן ג'ורג'ס - 1981

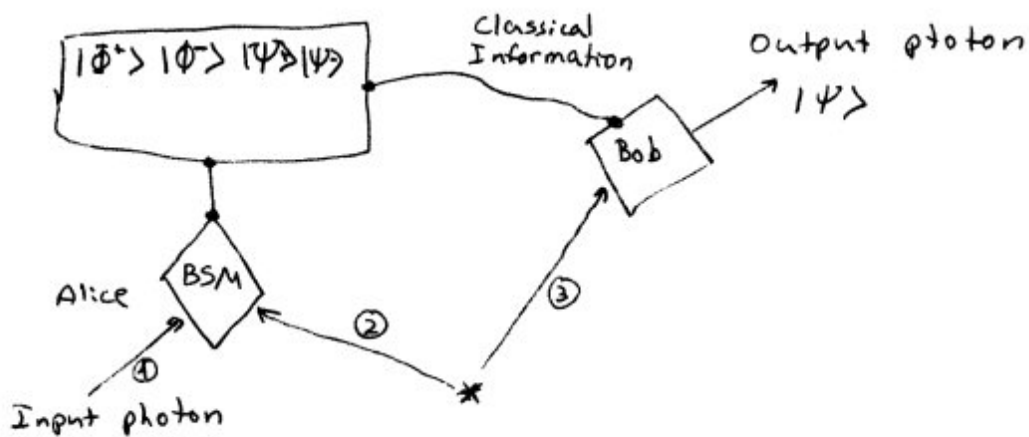
# Principles of Teleportation

- מבנה האי אוקיות היא המפתח לטלפורטציה קוונטית
- הודיון בבסיס הטלפורטציה היא לידע מלב קוונטי מתקין למה מתקין את המידע ממנו.



נמצא בטלפורטציה שבוטונים כי מרגע הניסויים שנסעו עד כה נדעו בוטונים, אם כי ניתן לפרש טלפורטציה גם לאטומים, אלקטרונים, אנדונים וכו'.

נניח להדגיר מלב קיטוב פוטרון  $|\psi\rangle = c_0|0\rangle_1 + c_1|1\rangle_1$



אם כן נצדק לפני בוטונים נוספים. הם יכולים להיות בכל אחד מאננות מצבי Bell. הצירוף הנישום כן נשמע

$$|\psi\rangle_{23} = \frac{1}{\sqrt{2}} [ |0\rangle_2 |1\rangle_3 - |1\rangle_2 |0\rangle_3 ]$$

השכיח מתבסס הטלפורטציה: או אלים מקבל אג 1 ו 2 ומבצר חיים מנייה של מצב Bell. הנישום הנישום האוניברסליה האג הנישום קלאסי.

הנישום הנישום טרנספורטציה אנטארית  $\hat{U}$  הנישום 3. לפי הנישום הנישום הנישום Alice, ומקבל

8

$$|\psi\rangle_3 = c_0|0\rangle_3 + c_1|1\rangle_3$$



נראה איך "הספק טובה":

$$|\psi\rangle_{123} = \frac{1}{\sqrt{2}} [c_0 |0\rangle_1 + c_1 |1\rangle_1] [ |0\rangle_2 |1\rangle_3 - |1\rangle_2 |0\rangle_3 ]$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} [c_0 |0\rangle_1 |0\rangle_2 |1\rangle_3 - c_0 |0\rangle_1 |1\rangle_2 |0\rangle_3 + c_1 |1\rangle_1 |0\rangle_2 |1\rangle_3 + c_1 |1\rangle_1 |1\rangle_2 |0\rangle_3]$$

נשתמש בסיווגים de מצבי Bell המקיפים 1 ו 2

כדי לרשום את  $|\psi\rangle_{123}$

$$|\Phi^\pm\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} [ |0\rangle_1 |0\rangle_2 \pm |1\rangle_1 |1\rangle_2 ]$$

$$|\Psi^\pm\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} [ |0\rangle_1 |1\rangle_2 \pm |1\rangle_1 |0\rangle_2 ]$$

⇓

$$|\psi\rangle_{123} = \frac{1}{2} [ |\Phi^+\rangle_{12} (c_0 |1\rangle_3 - c_1 |0\rangle_3) + |\Phi^-\rangle_{12} (c_0 |1\rangle_3 + c_1 |0\rangle_3) + |\Psi^+\rangle_{12} (-c_0 |0\rangle_3 + c_1 |1\rangle_3) - |\Psi^-\rangle_{12} (c_0 |0\rangle_3 + c_1 |1\rangle_3) ]$$

נניח Alice קבעה את המצב  $|\Phi^-\rangle$  Bob מיד יודע

שהבוטאן מאזכר הוא במצב:

$$|\varphi\rangle = c_0 |1\rangle_3 + c_1 |0\rangle_3$$

כל מה שנותר ל Bob לעשות הוא לבצע הפעולה האוניטרית

$$\hat{U} |\varphi\rangle = \dots$$

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \hat{U} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{שבו}$$

$$\hat{U} |\varphi\rangle = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \end{pmatrix}$$

$$\boxed{\hat{U} |\varphi\rangle = |\psi\rangle} \quad !!!$$

הסדרה חשובה:  
 א. המדידת מאלים לבניה צעד בעזרת קלאו - אין בעיה של יחסות  
 ב. כל אלים ולא בוב מצדו את המצב של הבוטאן לבח, לכן אין שום  
 אינטראקציה לפני  $c_0$  ו  $c_1$  הבוטאן 2 נהיה שזור עם 1

9