

## אוטו שטרן



אוטו שטרן. יהודי גרמני נולד ב 17.2.1888 בעיר צורי בקיסרות הגרמנית (כיום האיזור שייך לפולין). בגיל 6 עבר עם משפחתו לעיר ברסלאו שם למד בתיכון ויותר מאוחר הלך לאוניברסיטה בעיר ללימודי פיסיקה כימיקלית, ובשנת 1912 סיים את לימודיו בתואר דוקטור. באותה השנה הוא הצטרף לאלברט איינשטיין באוניברסיטת פראג ואח"כ המשיך עימו למכון הטכנולוגי של ציריך. ב1915 הוא סיים את הפוסט-דוקטורט שלו באוניברסיטת פרנקפורט. באוניברסיטה זו הוא נשאר עד שנת 1921 עם הפסקה לישרות צבאי קצר. בשנתיים לאחר מכן עבד כפרופסור באוניברסיטת רוסטוק ובשנת 1923 עזב לאוניברסיטת המבורג שם גם כיהן כפרופסור וגם היה מנהל מעבדה. באוניברסיטת המבורג שטרן נשאר עד שנת 1933 לאחר מכן אולץ להתפטר עקב עלייתם של הנאצים לשלטון והחוקים החדשים אשר חוקקו על ידם. שטרן עזב לאר"ב ועד שנת 1945 עבד במכון הטכנולוגי קרנגי כפרופסור. בשנת 1945 עזב לאוניברסיטת קליפורניה ברקלי ושם נשאר עד פרישתו. ב17 לאוגוסט 1969 לקה בהתקף לב ונפטר.

העבודות המוקדמות שלו עסקו בעיקר בסטטיסטיקה תרמודינמית ובתיאוריה הקוונטית. אחרי שנת 1919 תשומת לבו הופנתה בעיקר לכיוון הפיסיקה הניסויית. לתגליתו, שיטת הקרן המתודית, היו ישומים רבים בעיקר בחקר תכונות של מולקולות, אטומים, וגרעיני אטום. אחת האפליקציות הראשונות לקרן המתודית הייתה הוידוא הניסויי של חוקי מקסוול – בולצמן בגזים. ב1922 ערך ניסוי יחד עם מדען גרמני נוסף ולטר גרלך, על הניסוי נפרט בהמשך, עבודותיו הנוספות של שטרן עסקו במדדידת המומנט המגנטי של חלקיקים תת-אטומיים, לרבות הפרוטון שעליו התגלה כי ערך המומנט גדול פי שתיים וחצי מהערך התיאורטי שחושב עד אז. במחקרים אחרים שלו הדגים את האופי הגלי של אטומים ומולקולות דרך התאבכות קרני המימן וההליום.

בשנת 1943 זכה בפרס נובל על גילוייו. זאת לאחר שהפרס לא חולק בשלושת השנים הקודמות. הוא זכה בנובל לבדו, וועדת הפרס נמנעה מלהזכיר את שמו של גרלך ואת חלקו בגילויים כיוון שהאחרון עדיין היה פעיל במפלגה הנאצית.

## ניסוי-שטרן-גרלך

בשנת 1921 אוטו שטרן חבר לפיסיקאי גרמני אחר, וולטר גרלך השניים ביצעו ניסוי בתחום הפיסיקה האטומית והמכניקה הקוונטית. הניסוי הראה כי לאטומים יש תנע זוויתי מקוונטט וכי קיים ספין לאלקטרונים. ניסוי זה הרבה פעמים משמש להדגמה של העקרונות הבסיסיים במכאניקה הקוונטית. ניסוי זה מראה כי לאלקטרונים ואטומים יש תכונות קוונטיות אינטרינזיות וכיצד מדידת המערכת משפיעה על המערכת הנמדדת.



ניסוי שטרן גרלך בוצע בפרנקפורט שבגרמניה. באותו זמן שטרן היה אסיסטנט של מקס בורן באוניברסיטת פרנקפורט, מכון לפיסיקה תיאורטית, גרלך גם כן היה אסיסטנט באותה האוניברסיטה רק במכון לפיסיקה ניסויית. באותה תקופה מודל בוהר נחשב למודל הנכון ביותר לתיאור האטום. לפי המודל אלקטרונים טעונים שלילית נעים סביב הגרעין טעון חיובית רק באורביטלים דיסקרטיים או במילים אחרות ברמות אנרגיה מקוונטטות. הניסוי של שטרן-גרלך אמר היה לבחון את ההנחה של בוהר-סומרפלד אשר תענה כי כיוון התנע הזוויתי מקוונטט. ניסוי שטרן-גרלך היה אישור לתיאורית בוהר-סומרפלד.

הניסוי עצמו מתבסס על העברת עלומת חלקיקים בעלי מומנט מגנטי דרך שדה מגנטי לא אחיד (השדה האי הומוגני נוצר ע"י כל שקוטב אחד של "מגנט פרסה" רחב יותר מהקוטב השני שלו) וצפייה בסטייה שלהם מהמסלול. בד"כ הניסוי מבוצע עם חלקיקים ניטרליים או אטומים. זאת על מנת להימנע מסטיות משמעותיות של חלקיק טעון הנע דרך שדה מגנטי ולתת יותר דגש לאפקטים תלויי ספין. ניסוי שטרן-גרלך נערך בעזרת מכשיר היורה אלומת אטומי כסף דרך מגנט היוצר שדה לא אחיד ההסחה של אטומי הכסף דרך השדה המגנטי פרופורציונלית למצב הקיטוב של המומנט המגנטי. פגיעת האטומים בגלאי תקבע את ההתפלגות של מצב הקיטוב. אם היה מדובר במקרה קלאסי התנע הזוויתי יכול לקבל (בכיוון מסוים) רצף של ערכים, והתפלגות פגיעות חלקיקים בגלאי אמורה לשקף זאת. לעומת זאת בניסוי שטרן-גרלך החלקיקים הוסטו או למעלה או

למטה בגודל מוגדר של  $\pm \hbar/2$ . מכאן נובעת המסקנה כי לחלקיקים יש ספין  $\frac{1}{2}$  וכך גם לאלקטרונים.

$$|\psi\rangle = C_1 |\uparrow\rangle + C_2 |\downarrow\rangle$$

$$C_1 = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

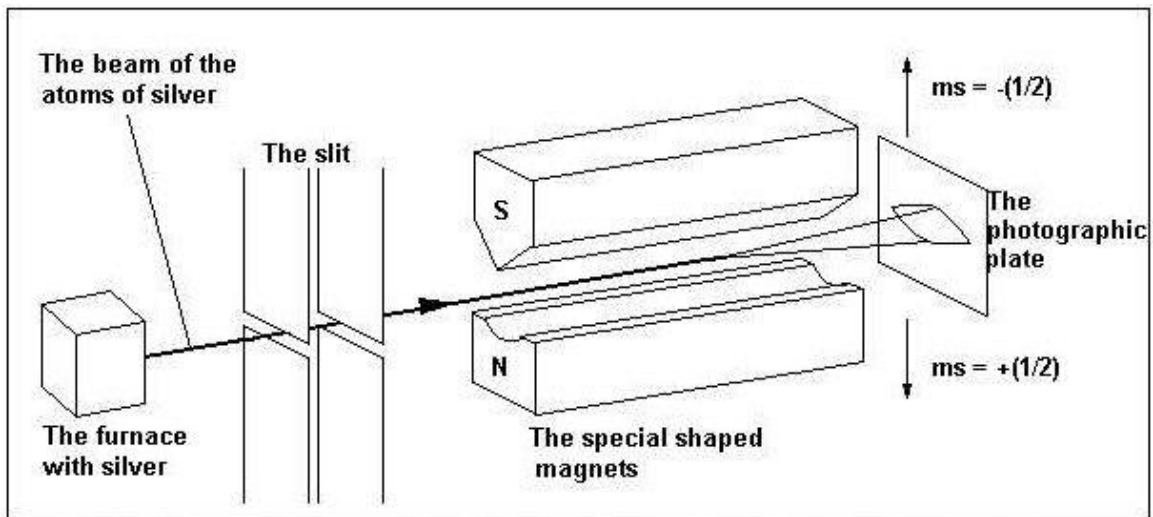
$$C_2 = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

ההסתברות למדידה של הספין המכוון מעלה נתונה ע"י  $|C_1|^2$  וההסתברות למדוד ספין המכוון כלפי מטה נתונה ע"י  $|C_2|^2$ .

ניסוי נוסף שאפשר להגדיר הינו: השדה המגנטי מוארגן כך שהאלומה מתפצלת ולאחר מכן מתאחדת חזרה החלקיק עובר דרך המכשיר ואינו נצפה כלומר אינו נמדד אזי החלקיק יוצא ממכשיר המדידה באותו המצב בו הוא נכנס. במקרה כזה אומרים שהחלקיק עובר "בו זמנית" בשני מסלולים כמו בניסוי שני סדקים.

כארש מסלול אחד נחסם מתקבל מסנן המעביר את החלקיקים במצב קיטוב יחיד. אם יש לנו אלומת חלקיקים עם מצב קיטוב  $|\rightarrow\rangle$  אז רק 50% יעברו דרך המסנן שמוצב אנכית בכיוון ציר Z, אבל 100% יעברו דרך מסנן שמוצב אופקית בכיוון ציר X.

כאשר חלקיקים עוברים דרך האפרטוס של שטרן-גרלך הם נצפים וצפייה במכאניקה קוונטית שווה למדידה. אם מסתכלים על האלומה העוברת במכשיר המדידה אך לא חוסמים את תנועתה נקבל תערובת של ספינים כאשר ההסתברות למצוא ספין במצב + או - שווים. כלומר האלומה שתצא תהיה לא מקוטבת את זה אפשר לודא על ידי כך ששמים מכשיר מדידה נוסף ורואים שאין קיטוב בשום כיוון מדידה.

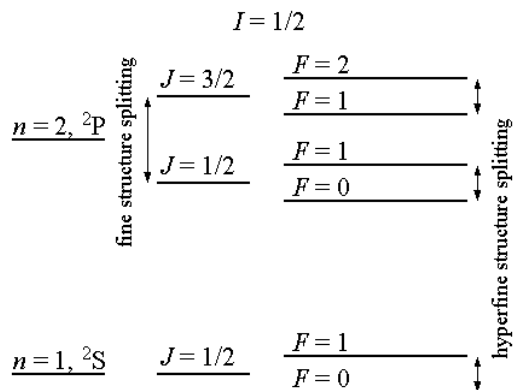


**The Stern-Gerlach experiment. On the photographic plate are two clear tracks.**

כלומר אפשר לראות כי התנהגות החלקיקים בניסוי שטרן-גרלך ובניסוי שני הסדקים זהה. כאשר החלקיק לא נצפה/נמדד הוא יכול להימצא בו זמנית בכמה מקומות שונים. אבל כאשר מתבצעת מדידה החלקיק "נאלץ" לבחור מסלול יחיד.

## השלכות לניסוי-שטרן-גרלך

1. בעשור לאחר ביצוע הניסוי הראשוני מדענים נוספים, בשימוש בטכניקות דומות, הראו כי לגרעינים של אטומים מסויימים גם כן יש תנ"ז מקוונטט. והאינטרקציה בין התנ"ז לספין של האלקטרון אחראית על של hyperfine structure של הקווים הספקטרוסקופיים.



2. בשנות ה-30 באמצעות הגירסה המורחבת של מכשיר המדידה של שטרן-גרלך הצליח איזידור רבי להראות את ההתנהגות המחזורית של מערכת קוונטית בעלת שני מצבים בנוכחות שדה מגנטי קבוע ושדה מגנטי מתנווד. המחזוריות המדוברת היא של בליעה ופליטה של האנרגיה ע"י של חלקיקי המערכת.

3. בשנים יותר מאוחרות מדען בשם רמסי שיפר את מכשיר המדידה של רבי וכך פתר את בעית הדיוק במדידת המומנט המגנטי של האטום. הדיוק כ"כ גבוה שעד היום הטכניקה בשימוש בשעונים אטומיים.

## ביבליוגרפיה

1. <http://tipid2.wordpress.com/2011/08/17/1969-%D7%90%D7%95%D7%98%D7%95-%D7%A9%D7%98%D7%A8%D7%9F-%D7%A4%D7%99%D7%96%D7%99%D7%A7%D7%90%D7%99-%D7%99%D7%94%D7%95%D7%93%D7%99-%D7%92%D7%A8%D7%9E%D7%A0%D7%99-%D7%96%D7%95%D7%9B%D7%94-%D7%A4/>
2. [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1943/stern-bio.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1943/stern-bio.html)
3. [http://en.wikipedia.org/wiki/Stern%E2%80%93Gerlach\\_experiment](http://en.wikipedia.org/wiki/Stern%E2%80%93Gerlach_experiment)