

# ניתוח התאבכות של גלים בגישה איכותית מתקדמת

מאת: רפאל כהן  
בית הספר התיכון האזורי רמלה-לוד  
והמחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע

דיון כתופעות של התאבכות ועקיפה במסגרת האופטיקה הפיסיקלית הוא השיא בתוכנית "אור וגלים" הנלמדת בבית הספר שלנו. אלה התופעות הסיפוסיות המפריכות את המודל החלקיקי המוצע לכתחילה, ותופעות מופלאות בזכות עצמן, בעלות היקף וחשיבות גדולים מאוד בכל הפיסיקה של ימינו. והנה, בספר "אור וגלים" קיים ניתוח פשטני של ניסוי יאנג, יש רמז לטריג עקיפה, ואין כלל הסבר לתופעת העקיפה (אם כי התופעה עצמה מוזכרת). הסיבה לכך ברורה: הספר נועד מלכתחילה לתלמידי כיתות י' לא מגמתיות, ואין להעמיס עליהם הסברים מעבר ליכולתם. אולם בנושא של אופטיקה פיסיקלית יש צורך להעמיק בכליות הלומדות ברמות של 4 ו-5 נקודות. לצורך זה יצא זה עתה ספר משלים, מפרי עטו של צבי גלר<sup>(1)</sup>, אשר מביא בסימונו את הטיפול המתמטי המקובל של התופעות הנ"ל.

ברצוני להביא כאן הצעה לטיפול בנושא ברמת ביניים, אשר מאפשרת הבנה מלאה שלו ללא כניסה מעמיקה לצד המתמטי. עלי לציין כי אפילו הצעה זו גולשת כמקצת מדרישות תוכנית בחינת הבגרות (ולא כל שכן הספר החדש), אולם יש בה כדי לספק את הצרכים של התלמידים הסקרנים יותר, יוצרת שלמות מסוימת בנושא ותוך כדי כך מביאה סיפוק גם למורה.

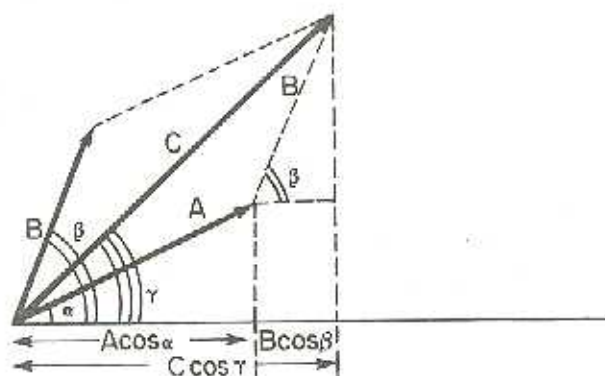
הצעה זו מתבססת על השיטה הגרפית המקובלת לחיבור פונקציות טריגונומטריות. כידוע, אם עלינו למצוא את הגודל  $y$  לפי הנוסחה:

$$y = A \cos \alpha + B \cos \beta$$

$$y \text{ יהיה גודל בעל הצורה } y = C \cos \gamma$$

1. גלים ואופטיקה פיסיקלית, צבי גלר, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע.

ונוכל למצוא את הערכים של  $C$  ו- $\gamma$  מתוך תרשים 1:



תרשים 1:

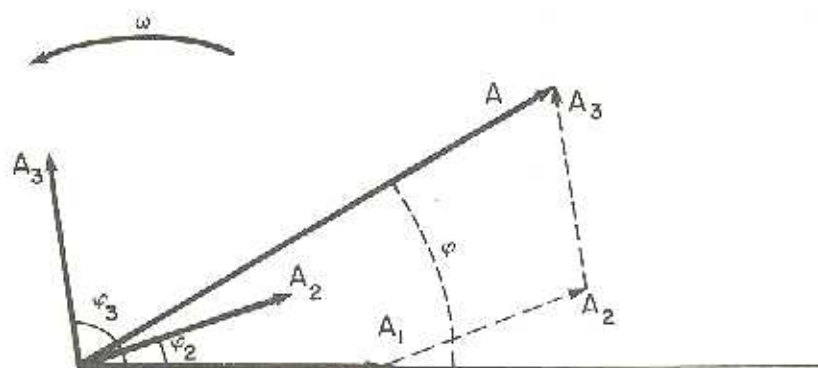
אם  $A \cos \alpha$  מיוצג על ידי וקטור בעל מודול A וזווית  $\alpha$  עם ציר שרירותי, ו  $B \cos \beta$  מיוצג על ידי וקטור בעל מודול B וזווית  $\beta$  עם אותו ציר, אזי סכומם של ביטויים אלה מיוצג על ידי וקטור C, שהוא הסכום הוקטורי של הוקטורים A ו-B.

גל הבא ממקור כלשהו לנקודה מסויימת M במרחב, יוצר בנקודה זו תנודה בעלת הצורה הכללית  $y = A \cos(\omega t + \phi)$ , בה A היא אמפליטודת הגל,  $\omega = 2\pi f$  תדירותו הזוויתית ו- $\phi$  המופע של הגל (הנקבע על ידי גודל ההעתק y בזמן t שנבחר כ- $t = 0$ ). גלים הבאים ממקורות שונים, בעלי אותה תדירות  $\omega$ , יגיעו לנקודה M כמופעים שונים  $(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_n)$  כדרך כלל, ולפעמים גם באמפליטודות שונות  $(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n)$ . על-פי עקרון הסופרפוזיציה, ההעתק הכולל בנקודה M יהיה בעל הצורה:

$$Y = A \cos \phi = A_1 \cos(\omega t + \phi_1) + A_2 \cos(\omega t + \phi_2) + \dots + A_n \cos(\omega t + \phi_n)$$

כל אחד מן הוקטורים, הנקראים גם פאזורים, המייצגים את הגלים המגיעים ל-M, מסתובב בתדירות  $\omega$ , אולם מצבם היחסי של וקטורים אלה אינו משתנה. לכן התנודה הכוללת בנקודה M תיוצג על ידי פאזור שהוא הסכום הוקטורי של כל הפאזורים  $(A_k, \phi_k)$ . פאזור זה מסתובב גם הוא בתדירות  $\omega$ , ומתאים לתנודה בעלת תדירות השווה לתדירות כל הגלים המגיעים ל-M.

הסרטוט עצמו, במקרה זה, אינו מתחשב בסיבוב הוקטורים, היות וכולם מסתובבים באותה תדירות  $\omega$  (תרשים 2).

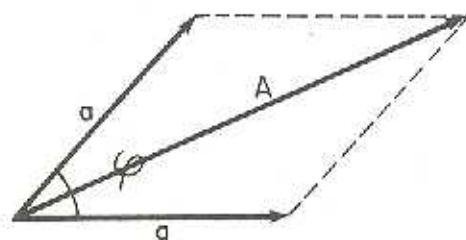


תרשים 2: מציאת ההנודה השקולה ל-3 תנודות המגיעות ל-M הסרטוט כולו מסתובב במהירות זוויתית  $\omega$ .

### התאבכות מ-2, 3 ו-4 מקורות בעלי אותו מופע

בהחיל בבדיקת התנודה המתקבלת בנקודה M כמרחק מסויים משני מקורות בעלי אותו מופע (למשל זוג סדקים צרים מוארים על ידי מקור צר הנימצא על האנך האמצעי של הקטע המחבר את הסדקים. הפרש המופע בין הגלים המגיעים ל-M משני המקורות תלוי אך ורק בדרכים האופטיות שלהם, ובמקרה של הוורך אחיד, בהפרש הדרכים מ-M למקורות. הפרש דרכים של  $\lambda$  מכניס הפרש זמנים של מחזור שלם, ומכניס הפרש מופע של  $2\pi$  או  $360^\circ$ . (סיבוב שלם בסרטוט.) הפרש של חלק מ- $\lambda$ ,  $x\lambda$ , מביא הפרש מופע של אותו חלק מ- $2\pi$ ,  $x \cdot 2\pi$ . לדוגמה, הפרש דרכים של  $\frac{\lambda}{2}$  מביא הפרש מופע של  $\pi$ , או  $180^\circ$ .

בין שני הגלים המגיעים ל M יהיה איפוא הפרש מופע  $\phi$ , וזהו בעלי אותה אמפליטודה a. חתקבל איפוא ב M תנועה בעלת אמפליטודה A התלויה ב  $\phi$ . (תרשים 3).



תרשים 3

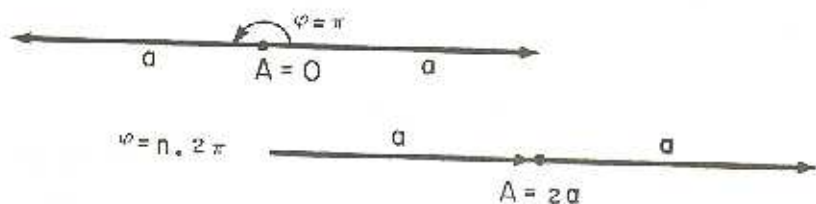
האמפליטודה הכוללת  $A$  תלך ותקטן ככל שגדל  $\phi$  לקראת  $\pi$ , ולאחר מכן תגדל שוב לקראת  $2\pi$  כאשר  $\phi$  תמשיך לגדול לקראת  $2\pi$ . כללית רואים כאן כי האמפליטודה הכוללת תהיה 0 עבור כל הפרש מופע המקיים  $\phi = (2n - 1)\pi = (n - \frac{1}{2}) \cdot 2\pi$  ( $n = 1, 2, \dots$ ). האמפליטודה תהיה מכסימלית ( $A = 2a$ ) עבור הפרש מופע המקיים

$$(n = 0, 1, 2, \dots) \quad \phi = n \cdot 2\pi$$

אם נתרגם זאת להפרשי מסלול  $\Delta$  ( $2\pi \rightarrow \lambda$ ) נקבל  $A = 0$  עבור:

$$(n = 1, 2, \dots) \quad \Delta = (n - \frac{1}{2})\lambda$$

וכן נקבל  $A = 2a$  עבור:  $\Delta = n\lambda$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) (תרשים 4).



תרשים 4:

כזכור מן התיאוריה הבסיסית,  $A = d \sin \theta$ , כאשר  $d$  הוא המרחק בין המקורות ו- $\theta$  היא הזווית שהקו  $MO$  (0 - אמצע קטע המקורות) יוצר עם האנך האמצעי לקטע המקורות. מכאן שיתקבלו קווי צומח בכיוונים המקיימים:

$$(n = 1, 2, 3, \dots) \quad \sin \theta_n = (n - \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{d}$$

ותתקבל עוצמת  $I$  מכסימלית:  $I \propto A^2$  בכיוונים המקיימים:

$$(n = 0, 1, 2, \dots) \quad \sin \theta_n = n \frac{\lambda}{d}$$

אין בנוסחות אלה כל חדש, והתיאוריה הפשוטה המופיעה בספר "אור וגלים" מביאה לאותן התוצאות. אך הפיחות משמש הכנה למצבים מסובכים יותר, והעובדה שהתוצאות זהות היא אישור לשיטה המובאת בזה.

בעבור עתה למספר מקורות הולך וגדל.

3 מקורות: נתונים לדוגמה, שלושה חריצים צרים (בעלי אותו רוחב) במרחקים שווים  $d$  זה מזה. בנקודה  $M$  הרחוקה מהמקורות (באופן שהקווים המחברים אותה למקורות מקבילים למעשה) יגיעו הגלים כהפרשי מופע שווים  $\phi$  (בגלל הפרשי מסלול שווים). ברור מילד כי מכסימום של עוצמה יתקבל כאשר

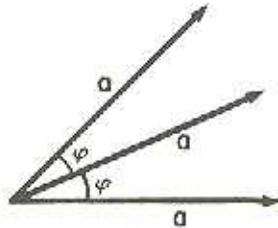
$$\phi = n2\pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\text{כאשר } \Delta = n\lambda \text{ או } \sin\theta_n = \frac{n\lambda}{d}$$

$$\text{במקרה זה } A = 3a \text{ , } I_n = 9I^*$$

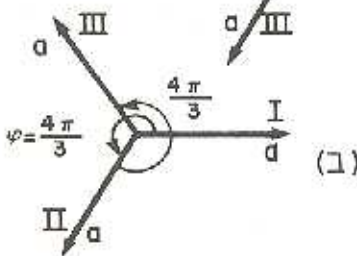
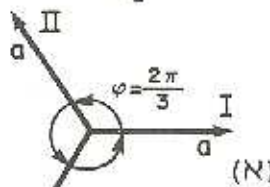
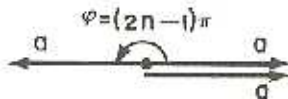
( $I^*$  - העוצמה המתקבלת מחריץ אחד

בלבד) בגלל הקשר הריבועי בין עוצמה לאמפליטודה.



תרשים 5:

אם עתה מתכרר כי עבור  $\phi = (2n - 1)\pi$ , אין ביטול של כל הפאזורים. אחד מהם נשאר, כך ש-  $A = a$  ,  $I = I^*$ .



תרשים 6:

לעומת זאת, ניתן למצוא שני מצבים בהם מתבטלים כליל שלושת הפאזורים המיליצגים את הגלים המגיעים ל-  $M$ : בהפרש מופע של  $\frac{2\pi}{3}$  בין הגל המגיע ראשון והגל המגיע שני ל-  $M$  (מצב א' בתרשים 6), ובהפרש מופע של  $\frac{4\pi}{3}$  בין גלים אלה (מצב ב'). הפרשי מופע אלה מתקבלים עבור

$$(A) \Delta = \frac{\lambda}{3} \text{ וגם } (B) \Delta = \frac{2\lambda}{3}$$

באופן זה מתקבלים שני קווי

$$\text{צומת בכיוונים } \sin\theta = \frac{\lambda}{3d} \text{ ; } \sin\theta = \frac{2\lambda}{3d}$$

היות ומצבים אלה יופיעו גם אם נוסף  $2\pi$  לכל המופעים, יופיעו שני קווי צומת בין כל שני מכסימה ראשיים, ויופיע מכסימום משני בין שני קווי צומת אלה, אשר גובהו יהיה  $1/9$  מגובה המכסימה האלה.



4 חריצים אם נלקח 4 חריצים במקום שלושה, עלינו לחבר 4 פאזורים כאורך

$a$  וזווית  $\phi$  כיניהם המייצגים את

ארבעת הגלים המגיעים ל-M גם

כאן כרוך שעוצמה מכסימלית תתקבל

כאשר  $\phi = 2\pi n$ , ותהיה  $I_0 = 16I^*$

כלומר גם כאן יתקבלו מכסימה ראשיים

בזוויות המקסימות  $\sin\theta_n = n \frac{\lambda}{d}$

סכום הפאזורים יהיה אפס בשלושה

מצבים שונים (תרשים 6 א', ב', ג').

כמצב א' מגיע הגל השני בהפרש מופע

$\frac{\pi}{2}$  לעומת הראשון ולכן  $\sin\theta = \frac{\lambda}{4d}$

כמצב ב' מגיע הגל השני בהפרש

מופע  $\pi$  ולכן  $\sin\theta = \frac{\lambda}{2d}$

כמצב ג' מגיע הגל השני בהפרש

מופע  $\frac{3\pi}{2}$  ולכן  $\sin\theta = \frac{3\lambda}{4d}$

הוספת  $2\pi$  למופע אינה משנה

כלום ולכן קיימים בין כל שני

מכסימה ראשיים שלושה קווי צומת,

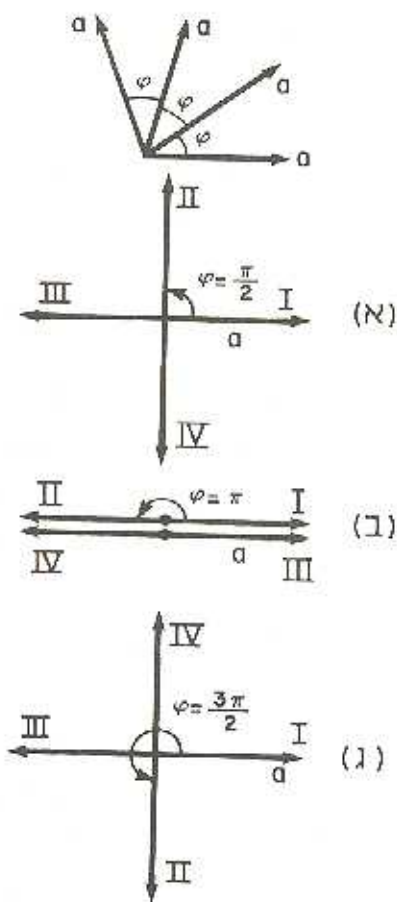
כמרחקים זוויתיים שווים. כערך

באמצע בין קווי צומת אלה

יופיעו מכסימה משניים אשר

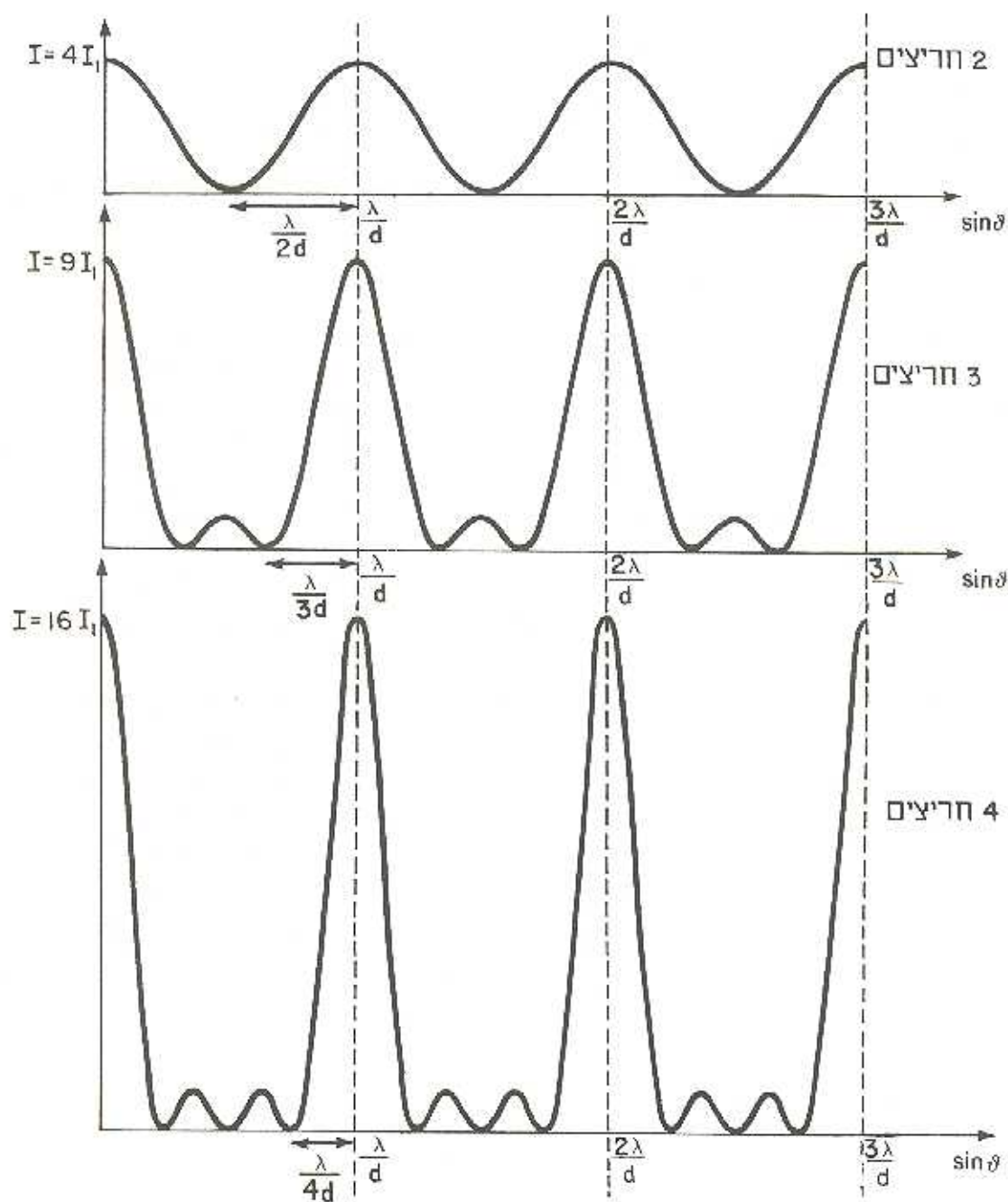
עוצמתם תהיה כערך  $1/16$  מעוצמת

המכסימה הראשיים.



תרשים 7:

הגרפים הבאים מציגים את התמונה המתקבלת (בקנה מידה) עבור 3, 2 ו-1 עברו (תרשים 8).



תרשים 8 :

מן הגרפים האלה ברור, כי העוצמת של המכסימה הראשיים גדלה עם ריבוע מספר החריצים, ורוחבם הזוויתי הוא ביחס הפוך למספר זה.

### התאככות מ-N מקורות

נעבור עתה ל-N חריצים (שריג עקיפה). יהיה עלינו לחבר N פאזורים בהפרשי מופע  $\phi$  כדי למצוא את אמפליטודת הגל (ולאחר מכן את עוצמתו) בנקודה M. בממקרים הקודמים ברור כי יתקבלו מכסימה ראשיים עבור:

$$\phi = n \cdot 2\pi, \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\left( \sin \theta_n = \frac{\lambda}{d} = n \lambda N^* \right); \quad \text{הוא קבוע השריג.} \quad N^* = \frac{1}{d}$$

הזוויות בהן מופיעים המכסימה הראשיים אינן תלויות במספר החריצים, כי אם בצפיפותם (מרחק d זה מזה), וכמוכן באורך הגל. אמפליטודת כל מכסימום כזה תהיה  $A = Na$  ולכן עוצמתו:

$$I_0 = N^2 a^2 = N^2 I^*$$

כדי למצוא מה קורה בין מכסימה ראשיים אלה, עלינו לבדוק בעזרת הפאזורים מה קורה כאשר הפרש המופע  $\phi$  בין שני גלים הבאים משני חריצים סמוכים הולך וגדל מ-0 עד  $\pi$ . [מספיק לחקור עד  $\pi$ , כי מסביב לכל מכסימום ראשי התכנית סימטרית: אין הבדל אם אחד הגלים מקדים או מפגר ב- $\phi$  לעומת השני].

האמפליטודה השקולה ל-N פאזורים בעלי אמפליטודה a בהפרש מופע  $\phi$  היא הסכום הווקטורי של כל הפאזורים האלה.

צירוף פאזורים אלה יוצר מצולע

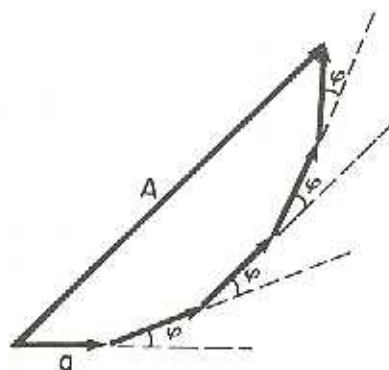
(תרשים 8), והאמפליטודה תתאפס

בפעם הראשונה כאשר מצולע זה

"ייסגר". במצב זה סכום הזוויות

החיצוניות,  $N\phi$ , שווה ל- $2\pi$ . לכן:

$$\phi = \frac{2\pi}{N}$$



תרשים 9:



הפרש מופע זה מתקבל עבור הפרש מסלולים  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{\lambda}{N}$$

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{Nd} \quad \text{ולכן בזווית}$$

אולם המצולע יכול "להיסגר" פעמיים, שלוש,  $k$  פעמים, ובכל מקרה כזה תתקבל אמפליטודה אפס. אלה מצבים בהם קיים:

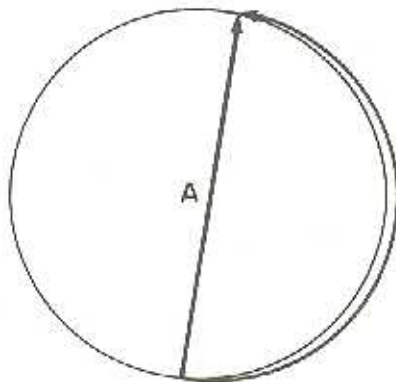
$$k = 1, 2, \dots, (N - 1) \quad \phi = k \frac{2\pi}{N}$$

$$k = 1, 2, \dots, (N - 1) \quad \Delta = k \frac{\lambda}{N}$$

$$\sin \theta_k = k \frac{\lambda}{Nd}$$

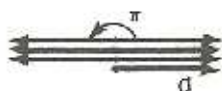
$k$  הוא מספר שלם קטן מ- $N$  (כי עבור  $k = N$  יש מכסימום ראשי). תוספת של  $2\pi$  למופע אינה משנה כלום בניתוח, ולכן בין כל שני מכסימה ראשיים נקבל  $N - 1$  קורי צומת.

בין כל שני קורי צומת כאלה מופיע מכסימום משני. למשל, בין קור הצומת הראשון (המתקבל עבור מצולע הנסגר פעם אחת) ובין השני (המצולע הנסגר פעמיים) גדלה האמפליטודה מחוש. היות ואנו דנים בסריגים עם מספר גדול של חריצים  $N$ , מצולע הפאזורים יהיה בקירוב טוב קור רציף בעל עקמומיות קבועה, כלומר מעגל. המכסימום המשני הראשון יתקבל (בקירוב טוב) כאשר אורך הקו, שהוא תמיד  $\lambda$ , "יתלפף" על מעגל וחצי (תרשים 9), ואז האמפליטודה השקולה היא הקוטר. המכסימום המשני השני יתקבל כאשר הקו יצייר שניים וחצי מעגלים, השלישי עבור שלושה וחצי מעגלים, וכו'. ברור מכאן שהאמפליטודה של כל מכסימום כזה הולכת ויורדת. כאשר מגיעים ל- $\phi = \pi$  (האמצע בין שני מכסימה ראשיים) כל הפאזורים האלמנטריים מתבטלים



תרשים 10:

אם  $N$  זוגי, ואילו עבור  $N$  אי-זוגי נותר אחד כלבד, בעל אמפליטודה  $a$ . שני המכסימה המשניים בקרבת האמצע יהיו בעלי אמפליטודה קרובה ל- $a$ . יוצא איפוא שבין כל שני מכסימה ראשיים יש  $N - 2$



תנשים 11:

מכסימה משניים, שהאמפליטודה שלהם הולכת ויורדת לקראת  $a$  באמצע, שם העוצמה תהיה  $I_0$ , כלומר פי  $N^2$  קטנה יותר מאשר במכסימום הראשי.

את האמפליטודה של המכסימה המשניים הקרובים למכסימום ראשי לא קשה לחשב. לגבי המכסימום המשני הראשון, כבר הערנו כי האמפליטודה מהווה קוטר של מעגל, שהיקף וחצי ממנו שווה  $Na$ ,

$$\frac{2}{3} Na = \pi A_1 \quad \text{לכן נוכל לכתוב:}$$

$$A_1 = \frac{2}{3\pi} Na \Rightarrow I_1 = \frac{4}{9\pi^2} N^2 a^2 = \frac{4}{9\pi^2} I_0$$

$$\frac{I_1}{I_0} = \frac{4}{9\pi^2} \approx 0.047$$

עוצמת המכסימום המשני הראשון היא איפוא כ- 4.7% מעוצמת המכסימום הראשי. במכסימום המשני השני יהיה:

$$\frac{2}{5} Na = \pi A_2$$

$$A_2 = \frac{2}{5\pi} Na$$

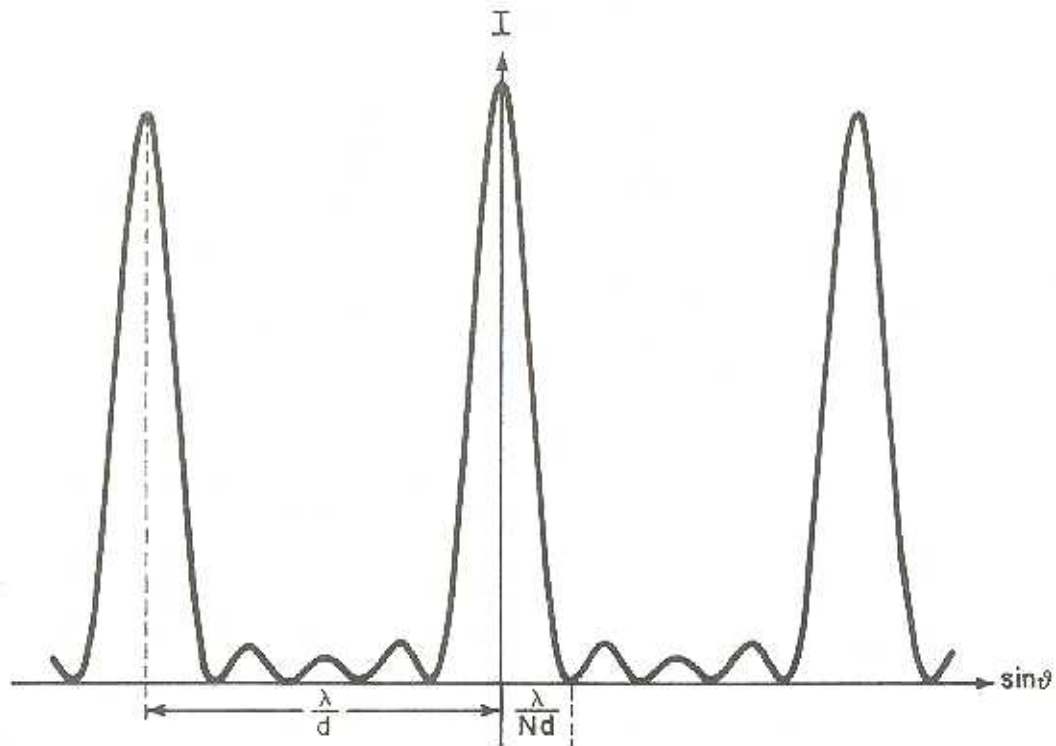
$$\frac{I_2}{I_0} = \frac{4}{25} \pi^2 = 0.016$$

ובאופן כללי במכסימום המשני ה- $k$  יהיה:

$$\frac{I_k}{I_0} = \frac{4}{(2k + 1)^2 \pi^2}$$

כדאי להעיר כאן, כי נוסחה זו טובה רק בקרבת המכסימה הראשיים, כל עוד  $\psi$ , הפרש המופע בין גלים הבאים משני מקורות סמוכים, אינו גדול מדי. רק

במקרה זה, אמנם, אפשר לקרב את המצולע של הפאזורים המתקבל מצירוף כל הגלים, לקו רציף עקום. עוצמותיהם התלוות של המכסימה המשניים (גם הראשון שבהם אינו אלא 4.7% מן המכסימום הראשי) מטבילה מדוע אין רואים אותם בדרך כלל כאשר מסתכלים דרך סריג אל מקור אור מונוכרומטי.

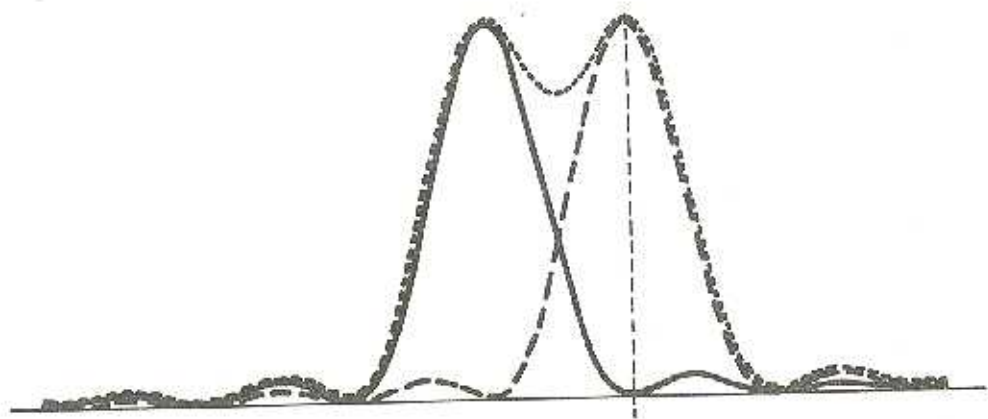


תרשים 12: עוצמת דגם העקיפה בסריג.

אם במקור האור שני אורכי גל קרובים זה לזה  $\lambda_1$  ו-  $\lambda_2$  ( $\lambda_1 \sim \lambda_2$ ) מתברר כי ניתן להפריד בין המכסימה הראשיים אם אחי מהם מופיע בקו הצומת הראשון של השני לפחות (קריטריון Rayleigh). משמע, המרוק הזוויתי כיניהם צריך להיות לפחות  $\frac{\lambda}{Nd}$  (תרשים 13).

$$\text{אפשר איפוא לכתוב: } n \frac{\lambda_1}{d} - n \frac{\lambda_2}{d} \geq \frac{\lambda}{Nd} \quad (\text{סדר } n)$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \geq \frac{1}{nN}$$



תרשים 13: קריטריון Rayleigh

במקום אחר (2) הראיתי שאפשר להגיע לאותה מסקנה ללא כל חשבון כזה, בעזרת חוק שימור האנרגיה.

קל להבין עתה את אחת הסיבות לאי-יכולתנו להבחין בדובלט של חנתרן בסריג העקיפה המקובל בבתי הספר שלנו. לסריג זה הקבוע  $\frac{\text{קווים}}{\text{ס"מ}} = 5300 \cdot N^*$ . כאשר מסתכלים בעד סריג זה, רוחבו האפקטיבי (רוחב אישון העין) הוא כ-2 מ"מ. מספר הקווים ברוחב זה הוא כ-1000. בסדר הראשון, איפוא,

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 10^{-3}$$

אורך הגל של הדובלט הוא  $\lambda \approx 6000\text{\AA}$ , ולכן גבול ההפרדה הוא כ-6\text{\AA}. אולם ההפרש בין אורכי הגל של הדובלט [5896\text{\AA} - 5890\text{\AA}]. מכאן, שגם לו עמד לרשותנו סריג כזה באיכות טובה, היינו מתקשים להבחין בדובלט. לא כל שכן בסריג שלנו שהוא כסך הכל רפליקה. יש להניח כי שימוש במצלמה מתאימה עם עדשה טובה אשר תגדיל את הרוחב האפקטיבי לסנטימטרים אחדים, היה מאפשר להבחין כדובלט על התצלום.

(2) תהודה, כרך 9, חוברת 1, עמ' 31.

## עקיפה בסדק יחיד

בספר הנ"ל של צבי גלר (1), מובא הסבר לעקיפה על-פי השיטה המקובלת ב-PSSC, של חלוקת הסדק לקבוצות של מקורות בקודתיים. הסבר זה מספיק ללא ספק לפי דרישות התוכנית הרשמית, ומתאים לרוב התלמידים ברמה של 4 ו-5 יחידות. אולם ישנם תלמידים חקרניים יותר שאינם משתכנעים משיטה זו, ואפשר בקלות לעבור מטריג עקיפה לעקיפה בסדק יחיד בשיטת הפאזורים.

אפשר להתייחס לסדק בודד כאל סריג, שמספר החריצים בו הולך וגדל לאינסוף, ואילו רוחבו של הסדק נשאר קבוע.

אם נחזור לתיאורית הטריג, אך נניח כי המרחק בין החריצים שואף לאפס, יתכן רק מכסימום ראשי אחד במרכז, כי לא יתכן שבוין הגלים תבאים משני חריצים סמוכים יהיה הפרש מסלולים של  $\lambda$ , ואף לא של חלק גדול מ- $\lambda$ .

עתה, מסביב למכסימום הראשי, כל מה שפותח עבור סריג עקיפה תופס כאן ביתר תוקף. נחלק את הסדק ל-N פסים לרוחב, שכל אחד יוצר גל בעל אמפליטודה  $a$ . בזווית אפס תהיה האמפליטודה  $Na$  והעוצמה:

$$I_0 = N^2 a^2$$

בזווית  $\theta$  ההולכת וגדלה, הולך וגדל הפרש המופע בין הגלים הבאים מ-N הפסים; הפאזורים המייצגים אותם יוצרים קו עקום, שאורכו יהיה תמיד  $Na$ .

הפעם מותר לנו לומר בפירוש קו עקום, בגלל הרציפות כאשר  $N \rightarrow \infty$ . (תרשים 14).

נקבל בקודות צומח ככיוונים בהם הקו העקום מצויר מעגל שלם, שניים, שלושה וכו';

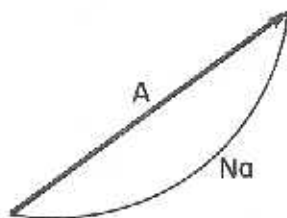
כלומר, כאשר הפרש המופע בין הגל הבא מצד אחד של הסדק, ובין הגל הבא מן הצד השני יהיה  $n \cdot 2\pi$ .

זה מתאים להפרש מסלולים של  $\lambda \cdot n$ ,

ולכן נקבל צמתים בזוויות  $\theta_n$

(תרשים 15):

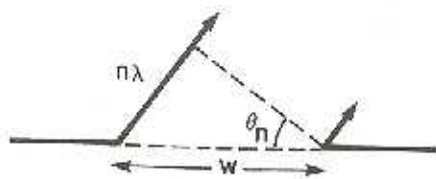
$$\sin \theta_n = n \frac{\lambda}{W}$$



תרשים 14



כשווה עם הסריג: שם מצאנו צמתים  
 בזוויות  $\theta_k$ :



$$\sin \theta_k = k \frac{\lambda}{Nd}$$

אך  $Nd = w$  (רוחב הסריג כולו).

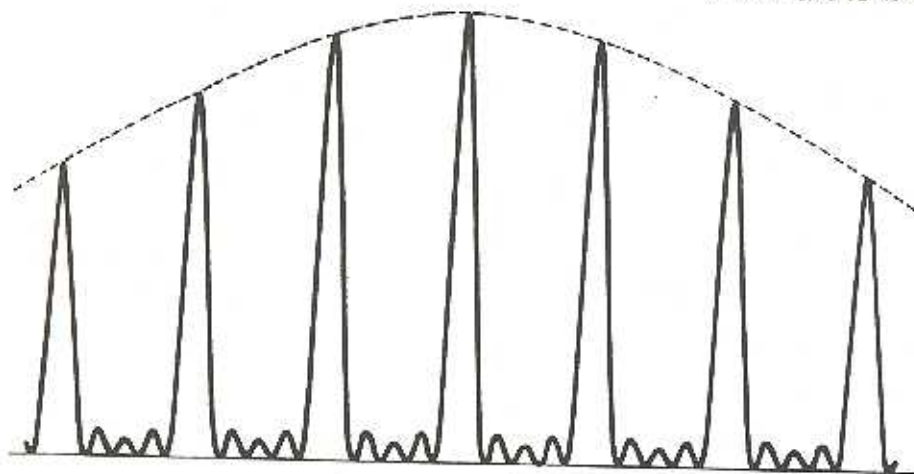
תרשים 15:

כאופן דומה, יתקבלו מכסימה משניים בין צמתים אלה, וגובהיהם מתאימים לקוטר של מעגל שבו  $N\lambda$  הוא היקף וחצי, שניים וחצי היקפים וכו', ובאופן כללי  $(2k + 1)$  חצאי היקפים. לכן עבור עוצמת המכסימה המשניים נקבל את הנוסחה הכללית:

$$\frac{I_k}{I_0} = \frac{4}{(2k + 1)^2 \pi^2}$$

עם אותו הפירוט שהיה בסריג עקיפה.

למען השלמת התמונה, אפשר לציין כי לכל חריץ בסריג יש תמונת עקיפה, רחבה מאוד בגלל רוחבו הקטן, אשר גורמת לירידת האמפליטודה של המכסימה הראשיים בסדרים הגבוהים (תרשים 16). תופעה זו כמעט ואינה מורגשת, והיא שולית לגמרי.



תרשים 16:

אפשר לסכם איפוא, את הדיון בצורה כזו:  
 בסריג עקיפה יש מכסימה ראשיים בעוצמה  $I_0$ , כאשר מסביב לכל מכסימום כזה יש תבנית עקיפה הנגרמת על ידי הסריג כולו כסדר בודד.