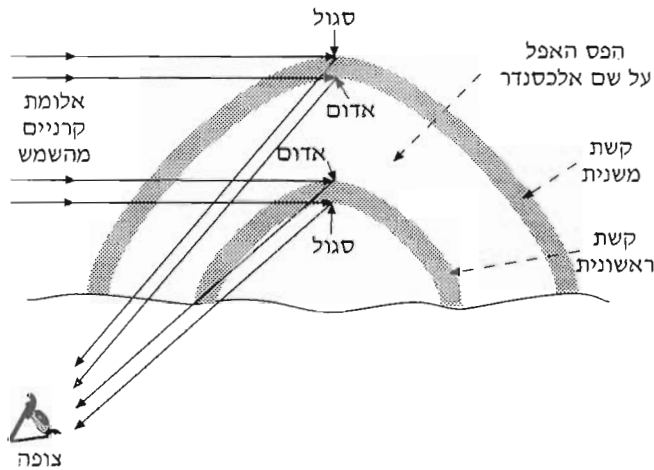




הקשת בענן (Rainbow)

רמי אריאלי, המחלקה להוראת המדעים, מכון וייצמן למדע



איור 1: תופעת ה"קשת בענן"

בין שתי הקשתות קיים **פס בלתי מואר**, הקרוי: "**הפס האפל על שם אלכסנדר**" (על שמו של פילוסוף יווני מהמאה השנייה לספירה, אשר תאר פס זה לראשונה). למעשה, צורתה המלאה של הקשת בענן היא מעגל שלם (!), ואכן זו הצורה הנראית לצופה הממוקם גבוה (למשל ממטוס). על פני הקרקע רואים רק את חצי המעגל כפי שמודגם באיור 2.

תופעת הקשת בענן אינה תגלית של העולם המודרני, והיא מוזכרת בכתבים עתיקים כגון במקרא (בראשית ט', י"ד): "והיה בענני ענן על הארץ ונראתה הקשת בענן". במקרא מתוארת הקשת כסימן שנתן האלוהים לאדם לאות שלא יהיה עוד מבול. השאלה המעניינת היא האם לפני המבול לא הופיעה קשת בענן?...

הסבר למהלך קרני האור:

מהשמש מגיעה אלומת קרניים כמעט מקבילות. קרניים אלו פוגעות בטיפות הגשם, נשברות בהן וחלק מן האור המוחזר יוצר את תופעת הקשת בענן.

לצורך הפשטות נתייחס בפירוט לטיפת גשם אחת שצורתה כדורית, עם רדיוס R, ומקדם שבירה n. עקב סימטריות הכדור, די במשתנה אחד להגדרת מיקום פגיעת הקרן בטיפה.

כל אחד עומד משתאה מול משחק הצבעים של הטבע, כאשר בזמן ירידת הגשם מבצבצת השמש מבין העננים ויוצרת קשת צבעונית. קשת זו פורשת על פני השמים את ספקטרום הצבעים לפי סדר מוגדר, זהה לסדר הצבעים המתקבל בעת שבירת האור במנסרה.

רוב המקורות בהם מוסברת היווצרות הקשת בענן מסתמכים על חוקי האופטיקה הגיאומטרית ועל **תופעת הנפיצה (Dispersion)** של האור. נפיצת האור מתבטאת בעובדה שמקדם השבירה (n) של חומר, שונה עבור אורכי גל שונים של האור העובר בחומר.

מאמר זה סוקר את תכונות הקשת בענן, ומסביר את היווצרותה במערך צבעים נתון ובמיקום מסוים בשמיים. כמו-כן מסביר המאמר טעות הנפוצה במספר רב מהמקורות בהם מופיעים הסברים "מדעיים" של תופעה זו.

כאשר מסתכלים על הקשת בענן במקום פתוח, רואים קשת המכסה חצי היקף מעגל. הצבע האדום מופיע תמיד בצידה העליון (החיצוני) של הקשת, ובצידה הפנימי מופיע הצבע הסגול. בין שני צבעים קיצוניים אלו מופיעים שאר **צבעי הספקטרום**:

אדום, כתום, צהוב, ירוק, כחול, אינדיגו (כחול כהה) וסגול.

כאשר רוצים לראות את הקשת בענן, יש לעמוד כך שקרני השמש יפגעו בגב הצופה (מקור אלומת האור מאחוריו) והגשם לפניו.

מיקום הקשת בשמים הוא תמיד מיקום יחסי לצופה (כפי שיוכח בהמשך). לכן, לא ניתן להתקדם קרוב יותר לקשת בענן, וכך גם לגבי אגדת הילדים על האוצר הקבור לרגלי הקשת - אין סיכוי לגלותו...

כאשר תנאי הראות טובים, ניתן להבחין מעל הקשת בענן (שהיא הקשת הראשונית) גם **קשת משנית**, בה סדר הצבעים **הפוך** לזה של הקשת הראשונית: הצבע האדום מופיע בצד הפנימי של הקשת והצבע הסגול בצידה החיצוני (ראה איור 1).

פרמטר ההתנגשות מקבל את הערכים מאפס, עבור קרן העוברת דרך מרכז הכדור, ועד לגודל הרדיוס (R) עבור קרן הפוגעת בכיוון משיק לכדור.

אלומת הקרניים הפוגעת בטיפה עוברת תהליך של שבירה והחזרה במשטח הגבול בין האוויר לנוזל הטיפה (מים). באמצעות איור 3 ניתן לעקוב אחר מהלך קרן מסוימת שבחרנו מתוך האלומה:

בנקודה A מתבצעת **החזרה** של אלומת הקרניים (החזרת פרנל), כאשר אחוז הקרינה המוחזרת הוא אחוז קטן מאד. עבור מעבר מאוויר למים (בהנחה שהפגיעה ניצבת):

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 = \left(\frac{1.33 - 1.0}{1.33 + 1.0} \right)^2 = \left(\frac{0.33}{2.33} \right)^2 = 2\%$$

כמו כן מתבצעת **שבירה** של אלומת הקרניים לפי חוק סנל:

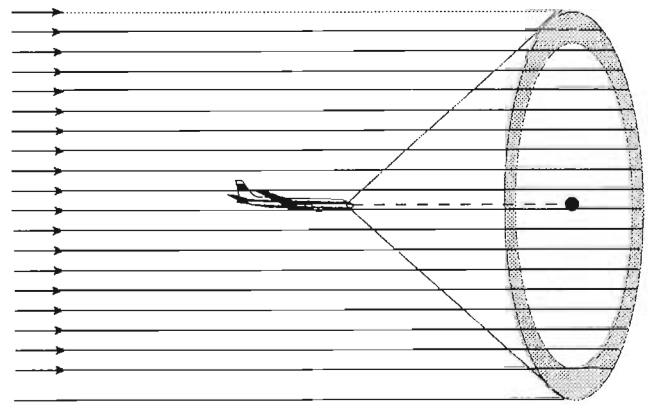
$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

אם נתייחס לכתוב בספרי לימוד הפיסיקה, הרי שהקרן ממשיכה בתוך הטיפה עד לנקודה B, בה היא "מוחזרת החזרה פנימית מלאה"⁽¹⁾⁽⁸⁾ (!!!) וזוהי **טעות עקרונית**.

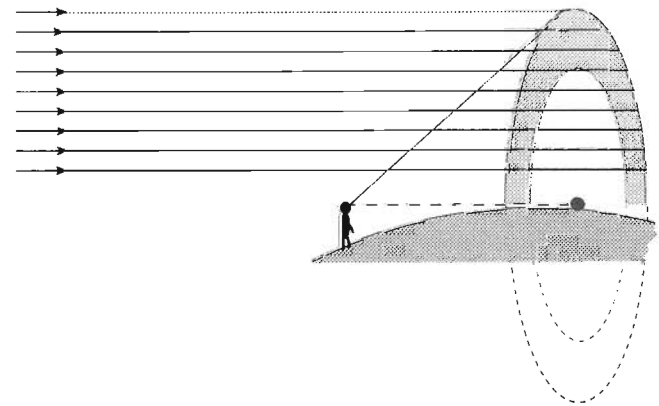
המושג "**החזרה פנימית מלאה**" מוכר לקורא מלימודי האופטיקה הגיאומטרית. הוא מתאר תהליך הנגרם עקב תופעת פגיעת אלומת קרניים במשטח גבול בין שני תווכים בזווית גדולה מהזווית הקריטית. בתהליך כזה מוחזרת כל הקרינה הפוגעת (100%), ואין קרינה העוברת את משטח הגבול. בטיפת המים הכדורית אין תהליך זה יכול להתרחש:

הסבר: ברור לקורא הנבון כי זווית הפגיעה וזווית השבירה של הקרן נמדדות לגבי האנך בנקודת השבירה. מכיוון שהטיפה כדורית הרי שזווית השבירה (r) נמדדת ביחס לרדיוס הטיפה. מטעמי סימטריה, זווית הפגיעה של הקרן בדופן הנגדית של הטיפה, זהה לזווית השבירה (r) (שני הרדיוסים יוצרים עם המיתר משולש שווה שוקיים, שבו זוויות הבסיס שוות). חוק סנל מתקיים גם בפגיעה הראשונה, בנקודה A, וגם בנקודה השנייה B, ולכן הקרן יוצאת מהטיפה מצידה הנגדי. קיבלנו כי **לא תתכן בשום מקרה החזרה פנימית מלאה עקב זווית הגדולה מהזווית הקריטית!**

מסקנה: על פי התיאור הגיאומטרי הפשוט, לא תיתכן תופעת הקשת בענן. זאת, מכיוון שהחלק היחסי המוחזר בהחזרת פרנל בפגיעה במשטח הגבול מים-אוויר, הוא של אחוזים בודדים, שלא יתבטאו בתופעה כל כך בולטת ויזואלית.

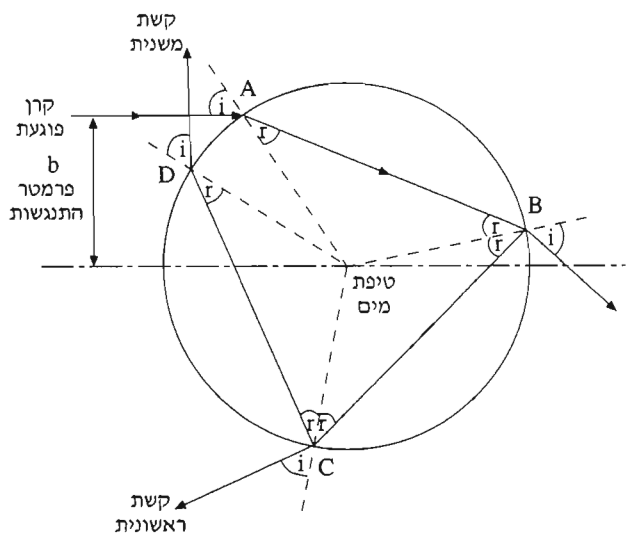


אלומת קרניים מקבילות מהשמש



איור 2: מעגל שלם נראה כאשר צופים בתופעה מגבוה

נגדיר **פרמטר התנגשות** (Impact Parameter) b, כמרחק האנכי בין נקודת הפגיעה של הקרן בטיפה לבין הציר היוצא ממרכז הטיפה, לכיוון המקביל לאלומת הקרניים הפוגעות (ראה איור 3).



איור 3: מהלך קרן אחת בתוך טיפת מים

★ **בין הזוויות 130° ל- 138° אין קרניים מוחזרות**, וכך מוסברת היווצרות הפס האפל על שם אלכסנדר, המצוי בתחום זווית אלו.

יש לשים לב שבכל מהלך ההסבר על פי דקארט, אין התייחסות לגודל הטיפה, ולכן הסבר זה מתאים עבור טיפה בגודל כלשהו (!!!).

כמו כן אין הסבר זה מתאר כיצד נוצרים צבעי הקשת, מכיוון שניטון עם ניסויי המנסרה שלו הסביר את **תופעת הנפיצה** רק בשנת 1666 (!). על פי **ניטון**, אשר הסביר את היווצרות צבעי הקשת בענן בספרו OPTICS שפורסם לראשונה ב-1704, האור הלבן מכיל את כל צבעי הספקטרום, ולטיפות המים יש **מקדם שבירה שונה עבור כל אחד מהצבעים**. לכן, לכל אחד מהצבעים קיימת זווית מינימום משלו, ואנו רואים בקשת בענן את סיכום התופעות הנוצרות לחוד עבור כל אחד מהצבעים.

ניטון מצא שעבור הצבע האדום זווית הקשת: $58^{\circ} 137'$, ועבור הצבע הסגול: $43^{\circ} 139'$.

ההבדל ביניהם $1^{\circ} 45'$, שהיא הזווית של רוחב הקשת שהיתה נוצרת אילו קרני השמש היו מקבילות לחלוטין. מכיוון שהשמש אינה מקור נקודתי, אלא בעלת רוחב מסוים של בערך $30'$, הרי שרוחב הקשת המתקבל יכול להגיע עד $2^{\circ} 15'$, שהוא בערך רוחב הקשת הנמדד נסיונית.

הזווית בין כיוון קרני השמש הפוגעות לבין אלומת קרני הקשת בענן היא כ- 42° , ואילו הזווית לקשת המשנית היא כ- 8° יותר גבוה בשמים (50°).

מקובל כיום להגדיר את הזווית **כשינני בכיוון קרני השמש** כלומר, הזווית המשלימה לזווית 42° : $138^{\circ} = 180^{\circ} - 42^{\circ}$. בצורה דומה, הזווית לקשת המשנית: 130° (ראה איור 4).

מאחר שאלומת קרני השמש הפוגעות בטיפה מכסות בו זמנית את כל התחום האפשרי של פרמטר ההתנגשות (b), הרי האור מוחזר לכל הכיוונים האפשריים. נותרנו שוב עם השאלה הבלתי פתורה: כיצד נוצרת הקשת בענן בכיוון מוגדר?

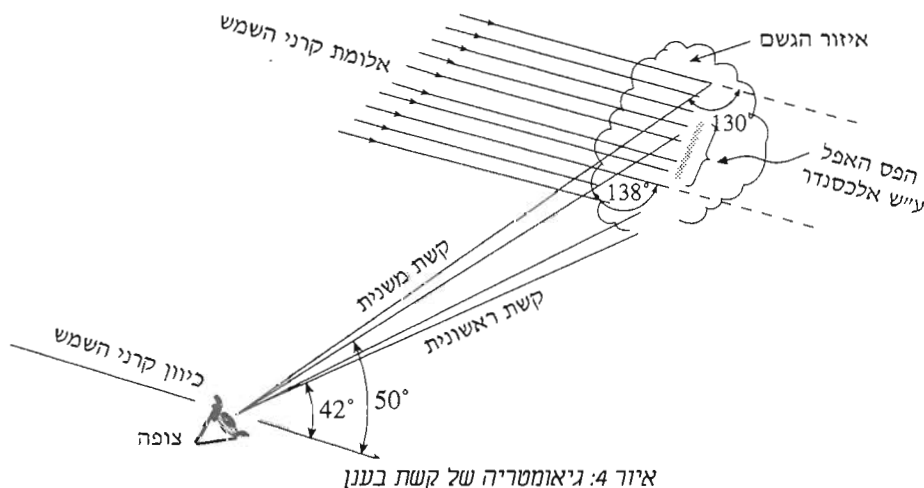
הראשון שהציע הסבר לכך היה דקארט (בתחילת המאה ה-17 לספירה!). הוא חישב את השבירה וההחזרה לפי חוק סנל במספר רב של נקודות על פני הטיפה (פרמטרי התנגשות שונים), ושירטט את מהלך כל אחת מן הקרניים - (וזאת ללא מחשב (!!!)).

סיפור מעניין הוא שסנל גילה את חוק השבירה הקרוי על שמו 16 שנה לפני פירסומו של דקארט. אלא שהוא לא פירסם אותו ובינתיים נפטר. דקארט פירסם את החוק והואשם בגניבתו. עד היום בצרפת נקרא חוק השבירה חוק דקארט ולא חוק סנל.

כיום ניתן בקלות לבצע סימולציה של מהלך הקרניים במחשב, ומקבלים כי:

★ עבור פרמטר התנגשות אפס, הקרן מוחזרת ב- 180° .
 ★ עבור אלומת הקרניים המוחזרת מהדופן הנגדית, ככל שגדל פרמטר ההתנגשות (הקרן מתרחקת ממרכז הטיפה), קטנה זווית הקרן המוחזרת. זווית זו מגיעה לערך מינימום כאשר פרמטר ההתנגשות שווה ל- $R(7/8)$ ואחר כך גדלה שוב. ערך מינימום זה מתאים לזווית של 138° .

★ עבור אלומת הקרניים שהוחזרה פעמיים מהדופן הנגדית, מתרחשת תופעה דומה, והפעם הזווית היא 130° .
 ★ מכיוון שהארת הטיפה ע"י קרינת השמש היא אחידה (אלומת קרני השמש מקבילה), מתקבלים **ערכי מכסימום להחזרות עבור שתי זוויות אלו**.

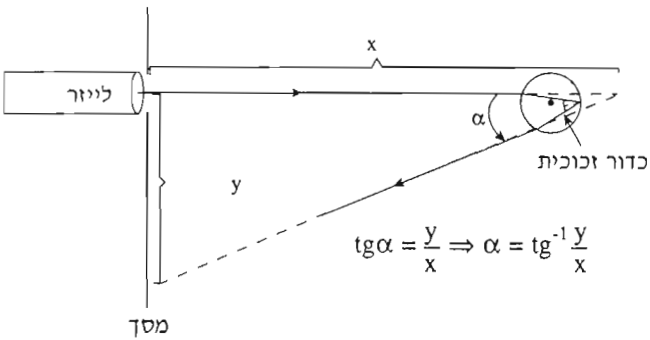


איור 4: גיאומטריה של קשת בענן

הדגמות:

כדי להמחיש את תופעת ההחזרה בזוויות מסוימות ניתן להשתמש באלומת אור מלייזר הליום-ניאון הפוגעת בכדור זכוכית (ראה איור 6).

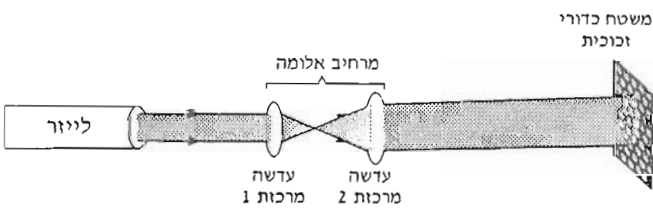
הדגמה פשוטה עוד יותר לביצוע היא כאשר מתייחסים רק למישור מסוים החותך את הכדור במרכזו. חתך מעגלי זה ניתן לדמות ע"י גליל ממוט זכוכית או פרספקס, המונח בניצב לאלומת הלייזר (איור 6). במקום המוט ניתן להשתמש במבחנת זכוכית עגולה בעלת דופן דקה, מלאה במים (או נוזל שקוף אחר כגון גליצרין). אם רוצים להבחין בבירור במהלך אלומת קרני הלייזר בתוך מבחנת הנוזל, יש להוסיף לו טיפה אחת או שתיים של חלב או מעט אבקת פלורסין.



איור 6: הדגמת קרינת לייזר המוחזרת מכדור זכוכית

הקרינה פוגעת במבחנת הנוזל במאונך. משתמשים באלומת אור צרה כך שהקרינה יוצאת מהלייזר ישירות למבחנה. באמצעות יצירת תנועה יחסית בכיוון ציר y, בין המבחנה לאלומה, ניתן לעקוב אחר התפלגות הקרינה המוחזרת.

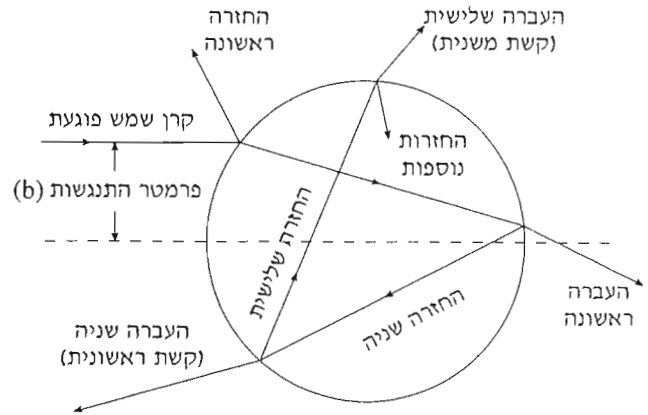
הדגמה יפה של תופעת ההחזרה בכיוון מועדף, ניתן לקבל כאשר מאירים באמצעות אלומת לייזר רחבה כדורי זכוכית קטנים המודבקים על משטח שחור. את המשטח עם כדורי הזכוכית מחזיקים בכיוון מאונך לאלומת הקרינה (ראה איור 7).



איור 7: הדגמת "קשת בענן" במעבדה

ניתן להבין את היווצרות הקשת באמצעות החזרות מטיפה כדורית אחת, ואכן זהו ניסוי שניתן לבצע במעבדה יש לזכור כי טיפה אחת יוצרת החזרה מתאימה של צבע אחד בלבד לכיוון הצופה. כלומר, כל צבעי הקשת מתקבלים מהחזרות מטיפות שונות

נתייחס לכל אחת מההחזרות בתוך הטיפה באופן נפרד (ראה איור 5):



איור 5: פירוט ההחזרות והשבירות בתוך טיפה

(1) בפגיעה במשטח החיצוני של הטיפה מתקיימת החזרה ראשונה (≈2%).

(2) חלק מהקרן שנשברה בתוך הטיפה מוחזר מהמשטח הנגדי - החזרה שנייה, וחלק אחר יוצא מעברה השני של הטיפה - העברה ראשונה.

(3) הקרן שהוחזרה בהחזרה שנייה מגיעה למשטח הקידמי של הטיפה, ומשם היא יכולה להמשיך ב-2 אופנים:

א. חלקה פוגע בדופן ונשבר החוצה לפי חוק סנל - העברה שנייה, זוהי אלומת הקרניים היוצרת את הקשת הראשונה.

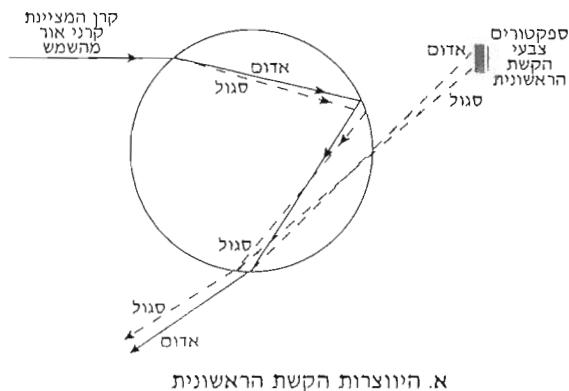
ב. חלקה מוחזר הצידה ועובר שוב את התהליך של שבירה החוצה והחזרה לכיוון אלומת הקרינה המקורית. החלק המוחזר הוא זה שעובר אחר כך שבירה החוצה ויוצר את הקשת המשנית (לאחר שעבר שתי החזרות בתוך הטיפה).

למעשה, עקב מיקומנו על וזקרקע, אנו רואים את הקשת הראשונה כתוצאה מאלומת הקרניים שפגעה בחלקים העליונים של הטיפות (ממרכז הטיפות ומעלה). את הקשת המשנית (שעברה שתי החזרות בתוך הטיפה), אנו רואים כתוצאה מאלומת הקרניים שפגעה בחלקן התחתון של הטיפות (ממרכז הטיפות ומטה).

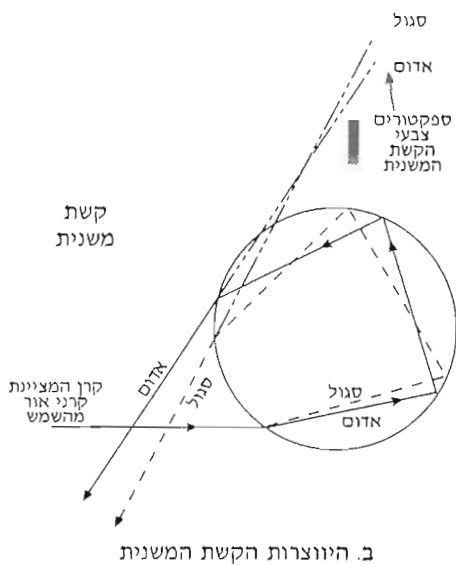
מיקום מרכז המעגל, שהקשת מהווה קטע ממנו, הוא על הציר המחבר את מקור האור (שמש) עם עיני הצופה. הצל של הצופה, אותו יוצר מקור האור, מורה לכיוון נקודת השיא של הקשת בענן.

מסקנה:

אין אפשרות לצפות בקשת בענן מהצד, למרות שבני האדם מרבים להשתמש בתאור ציורי זה, החל מציורו המפורסם של רובנס: "הקשת בענן" מתחילת המאה ה-17, וכלה באיורים 1, 2 במאמר זה.



א. היווצרות הקשת הראשונית

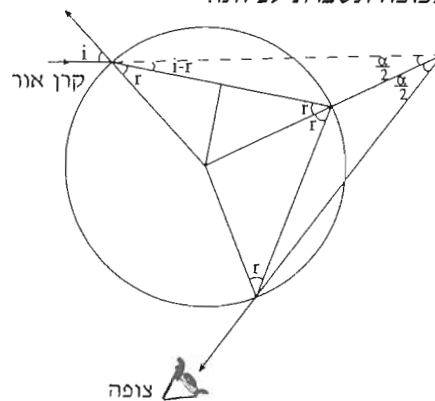


ב. היווצרות הקשת המשנית

איור 10: מהלך שתי הקרניים הקיצוניות בתוך הטיפה

הקשת בענן מסמנת את גבול איזור העיגול המואר, כאשר כמות האור בקצות העיגול גדולה מזו שבמרכזו (ראה איור 9). את תשומת הלב של הצופה מושכים צבעי הספקטרום המופיעים בקשת, ולכן מקובל להתעלם מאיזור האור הלבן שמתחת לקשת.

תיאור פשוט של מעבר אלומת קרני אור בטיפה כדורית מופיע באיור 8. הקרן פוגעת בזווית i , נשברת בזווית r . קרן זו פוגעת בדופן הנגדית בזווית r , וחלקה מוחזר בזווית r (זווית פגיעה שווה לזווית החזרה). קרן זו פוגעת בדופן הקרובה לצופה ונשברת לכיוונו.



איור 8: זווית הקשת α

מהגיאומטריה הפשוטה, מקבלים כי זווית חיצונית במשולש, שווה לסכום שתי הזוויות הפנימיות שאינן צמודות לה. כלומר:

$$r = (i - r) + (\alpha / 2)$$

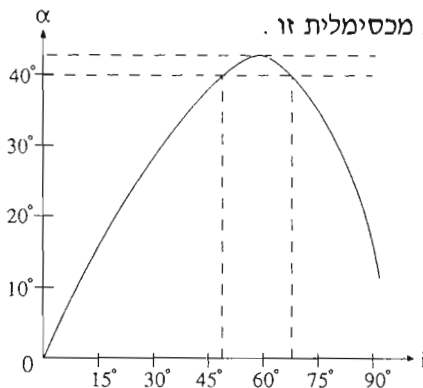
$$\Rightarrow 2r = 2i - 2r + \alpha$$

$$\Rightarrow \alpha = 4r - 2i$$

הזווית α מגדירה את הזווית שיוצר כיוון המקור המדומה (בו רואה הצופה את הקשת), עם הכיוון המקורי של האלומה היוצרת את הקשת.

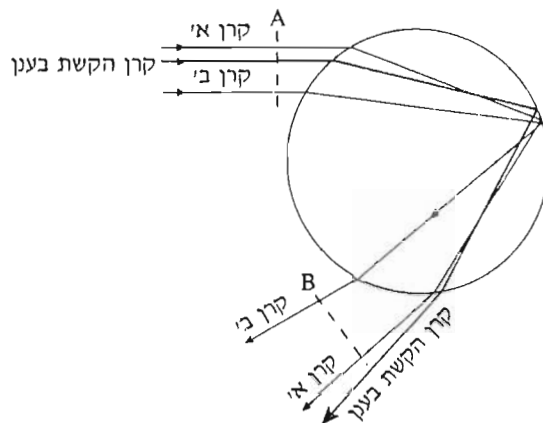
באיור 9 מופיע תיאור הזווית α כפונקצייה של הזווית i , עבור מקדם שבירה של מים ($n = 1.33$). באיור זה רואים זווית מכסימלית עבור $\alpha = 42^\circ$.

כמו-כן רואים שהמספר הרב של הקרניים הפוגעות בטיפה בתחום הזוויות: $55^\circ < i < 65^\circ$, יוצר אלומת קרניים המוחזרות בכיוון זווית מכסימלית זו.



איור 9: זווית הקשת α כפונקצייה של זווית הפגיעה i

כדי להבליט את השפעת תופעת הנפיצה בטיפת המים, מתוארות באיור 10 (בהגזמה), שתי הקרניים המתארות את הצבעים הקיצוניים של ספקטרום האור הנראה: אדום וסגול. רואים כי מתקבלת זווית α גדולה יותר עבור הקרן האדומה, ואכן זוהי הזווית המופיעה בצידה העליון של הקשת הראשונית.



איור 11: מקור הקשתות SN

תופעה נוספת, אשר לעתים ניתן לראותה ביחד עם קשת ספקטרום הצבעים, היא סדרה של פסים חיוורים. פסים אלו מופיעים בדרך כלל בצבעים ירוק וורוד לסירוגין, בצידה הפנימי המואר של הקשת הראשונית. פסים אלו נקראים: "Supernumerary Arcs".

ההסבר לפסים אלו קשור לאופי הגלי של האור, וניתן לראשונה לאחר שנת 1803, בה גילה תומס יאנג את תופעת ההתאבכות.

באיזור המואר שמתחת לקשת הראשונית, יש שתי אלומות קרניים העוברות החזרה אחת מהדופן הנגדית בטיפה (ראה איור 5). שתי אלומות אלו, מתקבלות מקרני שמש הפוגעות בטיפה בזוויות קרובות לזווית המקסימלית משני צדדיה (מעט גדולות ממנה ומעט קטנות ממנה - ראה איור 11). שתי האלומות מתקדמות באותו כיוון, למרות שהן יוצאות מהטיפה בשתי נקודות שונות (האלומות עברו מסלולים שונים בתוך הטיפה). בהתאם להסברו של יאנג, שתי אלומות הקרניים דומות לשני המקורות בניסוי ההתאבכות שהודגם על ידו. בכל פעם שהפרש הדרכים האופטיות בין שתי האלומות שווה לחצי אורך גל, ההתאבכות ביניהן הורסת, ובכל פעם שהפרש זה שווה לאורך גל שלם - ההתאבכות בונה. כתוצאה, מקבלים **שינוי מחזורי** בעוצמת האור המפוזר מטיפות הגשם היוצרות את הקשת בענן.

מכיוון שהדרך האופטית בתוך הטיפה קובעת את הפרש הפאזה בין שתי אלומות הקרניים, ברור כי הזוויות בהן יופיעו הפסים הבהירים והאפלים תלויות בקוטר הטיפה.

לכן, **בניגוד** לזוויות בהן נצפית הקשת בענן, קשתות ה-SN (Supernumerary) תלויות בקוטר הטיפה גדולה יותר, הפרש הדרכים האופטיות בין שתי האלומות גדל מהר יותר כתלות בפרמטר ההתנגשות, ולכן ההפרדה הזוויתית בין קשתות SN קטנה יותר. עבור טיפות בקוטר הגדול מ-1 מילימטר כבר לא ניתן להבחין בקשתות SN. מכיוון שטיפות הגשם מתעבות בנופלן ארצה, קל יותר להבחין בקשתות SN ליד פיסגת הקשת בענן (שם הטיפות עדיין קטנות).

תכונה נוספת, (וכמעט בלתי מוכרת), של אלומת האור המגיעה לעיני הצופה מתופעת הקשת בענן, היא שאור זה הוא **אור מקוטב!**

אור השמש אינו מקוטב, אולם תופעת ההחזרה ממשטחי הגבול בין המים לאוויר יוצרת את תופעת הקיטוב. על פי נוסחאות ההחזרה שמצא פרנל, כאשר זווית הפגיעה במשטח הגבול (כפי שהיא נמדדת ביחס לאנך למשטח הגבול) קטנה, גם ההחזרה קטנה. כאשר הזוויות גדלות, ההחזרה גדלה, ומגיעה עד לערך של 100% בזוויות מסויימות. בזוויות המתקרבות לזווית ברוסטר, אלומה בעלת **קיטוב מאונך** למישור הפגיעה מוחזרת, ואילו ההחזרה עבור אלומה **המקוטבת במקביל** למישור הפגיעה יורדת לערך אפס!

ניסוי פשוט של התבוננות בתופעת הקשת בענן דרך משקפי "פולרואיד", ממחיש את העובדה שהאור המגיע לצופה מקוטב כמעט לחלוטין. סיבוב המשקפיים ב-90° יגרם להעלמות תמונת הקשת!

התופעה אופיינית למים, מכיוון שבמים זווית ההחזרה מהדופן בתוך הטיפה, קרובה מאוד לזווית ברוסטר.

למעשה, ניוטון הצליח, באמצעות האופטיקה הגיאומטרית בלבד, להסביר את כל תופעות הקשת בענן המקובלות, פרט להיווצרות הקשתות המתחלפות לסירוגין (Supernumerary Arcs).

הסברים מפורטים ומעמיקים עוד יותר, ניתן למצוא במאמר סיכום יפה⁽⁴⁾, בספרים על אופטיקה של תופעות טבע⁽⁵⁾,⁽⁶⁾. בספר נוסף, שהוקדש כולו לתופעת הקשת בענן⁽⁷⁾, מתוארת בפירוט השתלשלות ההיסטורית של התייחסות בני האדם לתופעה זו. בפעם הבאה כאשר הינכם מסתכלים ונהנים מתופעות הטבע המרשימות, עיצרו לרגע והיזכרו כמה מאות שנים נדרשו לאדם כדי להבין ולהסביר תופעות אלו.

ביבליוגרפיה

4. האם ניתן להגיע למקום בו הקשת נוגעת באדמה?
5. האם ניתן לעבור לעברה השני של הקשת ולהסתכל עליה מאחור?
6. מדוע רואים קשת בענן בעיקר בבוקר או בערב ולא בצהריים? (מיקום זוויתי של השמש ביחס לצופה. אם זווית השמש גדולה מ 42° לא ניתן כלל לראות קשת בענן).
7. האם אנשים שונים רואים את אותה קשת? (לא, כל אחד רואה את ההחזרות מטיפות גשם הנמצאות בזווית המתאימה יחסית אליו).
8. מכיוון שטיפות הגשם נעות מטה כל הזמן, מדוע הקשת נותרת במקומה? (כל טיפה תורמת לקשת בענן רק באותה שניה בו היא נמצאת בזווית המתאימה).

הערה:

לפני שליחת מאמר זה לדפוס התגלה לכותב המאמר מקור נוסף בעברית, המתאר את תופעת הקשת בענן (עיתון "מדע" כרך ל"א חוברת 2 (1987)). במאמר זה מופיעים צילומים צבעוניים יפים של תופעות הקשת בענן, אך לא ברורות שתי הנוסחאות המופיעות במסגרת.

1. H. D. Young: "Physics" (8th ed.), Addison Wesley, pp. 955-956. (1992).
2. C. M. Cartwright: "Rainbows", Physics Education 27, pp. 155-158, (1992).
3. C. Siddons: "Experiments in Physics", Chapter 9, pp. 66-72, (1988).
4. H. M. Nussenzweig: "The Theory of the Rainbow", Scientific American, pp. 116-127, (1977).
5. M. Minnaert: "The Nature of Light & Color in the Open Air" Dover Publications Inc. (1954).
6. C. B. Boyer: "The Rainbow, From Myth to Mathematics", Princeton University Press (1987).
7. R. Greenler: "Rainbows, Halos, and Glories", Cambridge University Press, (1980).
8. דוד זינגר: "פיזיקה - אור וגלים", מדריך למורה חלק א', הוצאת המחלקה להוראת המדעים, מכון וייצמן למדע, עמ' 85, (1986).

כדי לראות האם הנך מבין את תופעת הקשת בענן, נסה לענות לעצמך על אחדות מהשאלות ששואלים ילדים:

1. מהו המרחק מהצופה אל הקשת בענן?
2. מה גודלה של הקשת בענן?
3. האם ניתן להתקרב לקשת בענן?

חוברות תהודה תצאנה לאור שלוש פעמים בשנה; אם ברצונך להיות מנוי עליהן אנא מלא את הספח המצורף ושלה אותו לחברת ההפצה שלנו "גסטליט".

המחיר למנוי עבור שלוש חוברות הוא 36 ש"ח, כולל משלוח; ללא המשלוח - 30 ש"ח. המחיר לחוברת בודדת 14 ש"ח כולל משלוח; 12 ש"ח ללא המשלוח.



לכבוד חברת "גסטליט", חברה לשיווק והפצה בע"מ, רח' היוצק 4, מפרץ חיפה, ת.ד. 2088, חיפה 31020
טל. 04-419353, 04-410083

ברצוני להיות מנוי על "תהודה" (כרך 16) לשנת תשנ"ד (3 חוברות)

השם: _____ הכתובת: עיר _____ רח' _____ מס' _____

מיקוד _____ מספר טלפון בעבודה: _____ מספר טלפון בבית: _____

אני מצרף המחאת דאר/צ'ק על סך: _____ עבור 3 חוברות (כולל/לא כולל דמי משלוח, מחק/י את המיותר).