

אמר ר' ישראל בעל שם טוב:
"אור" בגימטריה — "רז"

הקשת בענן: ים

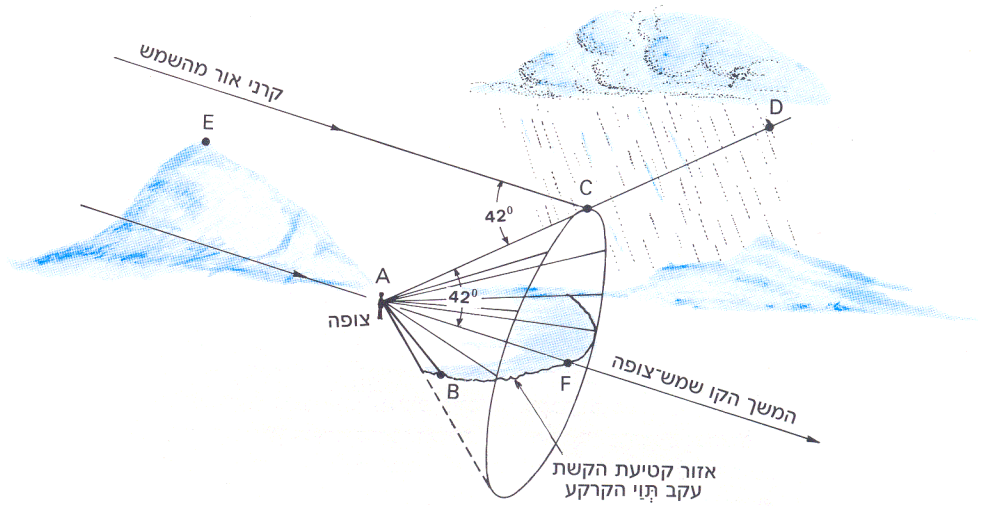
כיצד מתפזר אור השמש בטיפה בודדת? כיצד מתפזר אור באוכלוסיה צפופה של טיפות

הקשת שאנו רואים בענן קשורה בשלושה תחומים רוחניים: האמנות, האמונה והמדע. מאז פקח האדם את עיניו והיה מודע למראות העולם שסביב לו, הבחין בודאי בקשת, והתרשם מיופיה הנדיר; ואכן, משוררים וסופרים בכל הדורות עסקו בקשת בהביעם תחושות של פליאה וקסם. בכל המיתולוגיות הקדומות ישנה התייחסות, רוויה ביראת כבוד, לקשת בענן — כאל סימן מובהק של כננות בורא-עולם או האלים השולטים בטבע.

האדם והקשת — רומן ארוך

ביהדות, נזכרת הקשת בסיפור המקראי (בראשית ט', י"ב-י"ז). הקשת בענן ניתנה לראשונה לאחר המבול כאות וכמזכרת ברית בין האל לבין ניצולי המבול, משפחת נח וצאצאיה — האנושות כולה לדורותיה, כי "לא יהיה עוד מבול לשחת את הארץ". "את קשתי נתתי בענן והיתה לאות ברית ביני ובין הארץ. והיה בענני ענן על הארץ ונראתה הקשת בענן" (בראשית ט', י"ג-י"ד). הקשת אינה נזכרת עוד במקרא, פרט לשימושה הסמלי בפי הנביא יחזקאל בתיאור המרכבה האלוהית: "כמראה הקשת אשר יהיה בענן ביום הגשם כן מראה הנגה סביב הוא מראה דמות כבוד ה'". (יחזקאל א' כ"ח). חז"ל מנו את הקשת בין עשרה דברים, שנבראו "בערב שבת בין השמשות" (אבות ה', ר'). כלומר בין הניסים והנפלאות שעל גבול הטבע. הרואה את הקשת חייב לברך "ברוך זוכר הברית, ונאמן בבריתו וקיים במאמרו" (ברכ' נ"ט, ע"א).

גם במיתולוגיות ובאמונות אחרות תופסת הקשת מקום חשוב: בשבת היורוקה במערב אפריקה, מתיחסים לקשת כמו אל אליל ומכנים אותה "הנחש הגדול של מטה", העולה לפעמים כדי לשתות מים מהשמים. אינדיאנים משבט הקטובה (Catawba) בצפון אמריקה מכנים את הקשת "דרך המתים". בני שבט הארוואק באיזור הים הקריבי סבורים כי הקשת מבשרת את בואם של אנשים לבנים, מהכיוון שממנו הופיעה. בני שבט הקריבים באזור הים הקריבי מאמינים שקשת מעל הים מבשרת טובות, ואילו קשת על היבשה היא רוח מזורה המבקשת



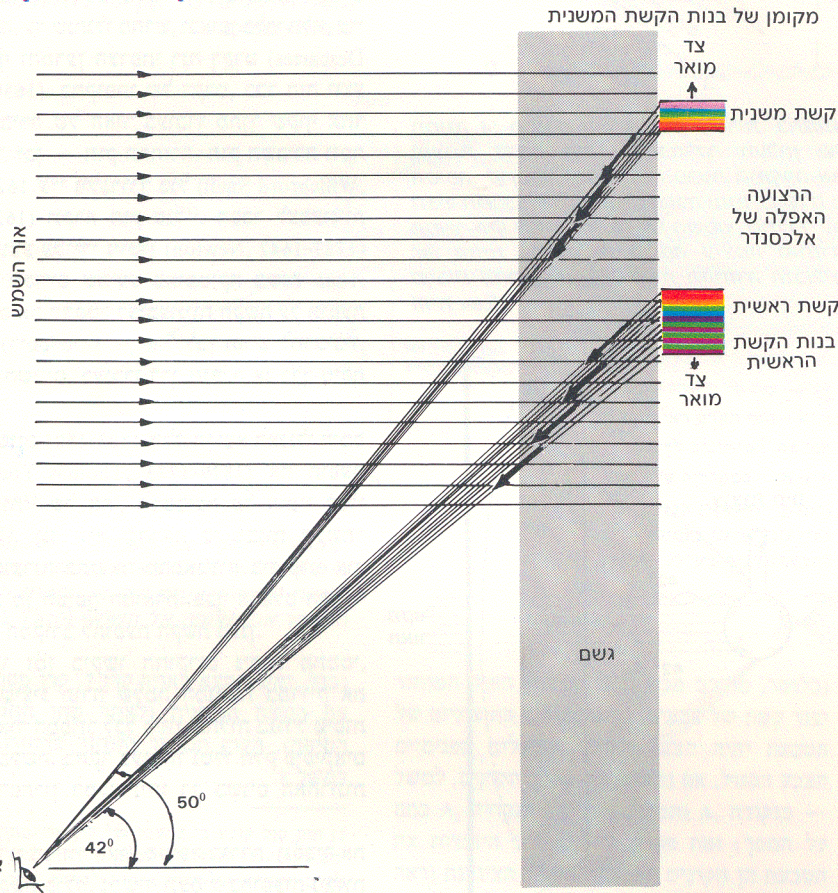
תמונה 1: חרוט הקשת (הסבר בטכסט).

תמונה 2: קשת ראשית ומעליה ניתן להבחין בקשת המשנית. התמונה צולמה באזור מעוד חיים. (צילום: איל יפה, קיבוץ מעוד חיים).



ששל טיפופות ואור

שבאור? מהו ההסבר הפיסיקלי לאחת התופעות המרהיבות והידועות מימי קדם – הקשת?



תמונה 3: חתך בחרוט הקשת במישור שיוצר המשולש FCA שבתמונה 1. התמונה מציגה את חלקיה השונים של הקשת.

להרוג מישהו, ולכן הם מתחבאים מפניה. המשורר והסופר הגרמני הדגול גֶתֶה (Goethe, 1749-1832), ערך מחקרים רבים במדעי הטבע ואף כתב ספר עב-כרס על טבעו של האור. בין השאר כתב כי ניתוחו של ניוטון לתופעת הקשת בענן – "גדע את ליבו של הטבע..."

התאור המדעי של הקשת נראה לעיתים מזומנות כבעיה פשוטה באופטיקה גיאומטרית, בעיה שנפתרה מזה זמן רב, בתקופתם של ניוטון ודקרט. אך, למרבה הפליאה, תיאוריה שלמה, המנתחת באופן כמותי את כל צדדיה השונים של תופעת הקשת, פותחה רק בשנות השבעים של המאה העשרים! יתירה מזו, התיאוריה אינה מוגבלת לתחום האופטיקה הגיאומטרית בלבד, אלא יש בה יסודות מכל הידוע לנו על אופיו של האור, כמו תכונות הגלית הנגלית בתופעות ההתאבכות, העקיפה והקיטוב, וכן תכונותיו הקנטיות-חלקיקיות של האור. לצורך ניתוח תופעת הקשת בשלמותה נדרשים כלים מתמטיים-פיסיקליים מן המפותחים ביותר שנוצרו עד כה. שיטות אלו מאפשרות לטפל בבעיות רבות. ברשימה זו נסקור רק מעט ממיכלול תופעות הקשת בענן, ונגביל עצמנו לכלים מתמטיים ופיסיקליים פשוטים למדי.

נציין כי רבים מבין הפילוסופים והמדענים עסקו בבחינה מדעית של חידת הקשת בענן. הפילוסוף היווני אַנְקְסִימֶנֶס (Anaximenes, נולד במילֶטוס בערך ב-570 לפנה"ס ומת בערך ב-500 לפנה"ס), היה כנראה הראשון שטען כי הקשת בענן היא תופעת טבע ולא אלילה או סימן אלוהי.

הראשון שהציע הסבר רציונלי לקשת המופיעה בענן היה הפילוסוף היווני אריסטו (Aristo, 384-322 לפנה"ס). הוא הציע כי הקשת נובעת מסוג מיוחד של החזרת אור השמש מהעננים. האור המוחזר נפלט בזווית קבועה, היוצרת חרוט מעגלי של "קרני קשת בענן". כך הסביר אריסטו באופן נכון את צורתה המעגלית של הקשת, ואת היותה תופעה התחומה במרחב, ולא עצם חומרי בעל מיקום מוגדר. מה שקרה בתחומי מדע רבים, קרה גם בחקר הקשת: השפעתו הרבה של אריסטו וסמכותו המדעית היו כה גדולות, עד שאיש לא העז

לחלוק על השקפתו מאות שנים אחריו. ואכן חלפו 1600 שנה מאז אריסטו, עד שחלה התפתחות נוספת בהבנת תופעת הקשת.

בשנת 200 לספירה בערך תאר אלכסנדר מאַפְרוֹדִיֶסֶס את הרצועה האפלה הנראית בין הקשת הראשית לִמְשֵׁנִית (נתאר אותן בהמשך). ככל הידוע – זהו התאור הראשון לרצועה האפלה, ומכאן שמה – "הרצועה האפלה של אלכסנדר".

חקר תופעת הקשת בענן, כמו תופעות נוספות של שירה והחזרה של אור, מתואר בכתביו של הפילוסוף וחוקר הטבע הערבי אלהזן (Alhazen,

עמוס כהן (Amos Cohn) – יליד קיבוץ מעוז חיים וחבר בו. סים לימודי בוגר בפיסיקה ובמתמטיקה (1981) ולימודי מוסמך בפיסיקה עיונית (1985) באוניברסיטה העברית רמת ברושלים. במסגרת לימודי הדוקטורט במכון לפיסיקה באוניברסיטה העברית בירושלים עוסק בספקטרוסקופיה של פלסמה חמה, בקרינה הנפלטת ממנה ובני תוח תהליכים אטומיים המתרחשים בה. עוסק בהדרכת נוער שוחר מדע וחובבי מדע.

כיוון שכך, רק טיפות מעטות נמצאות על חלקה התחתון של מעטפת החרוט (למשל לאורך הקו AB שבתמונה), ותרומתן לקשת אפסית. עיקר התרומה לקשת תבוא, אם כן, ממעטפת החרוט, שאינה קטועה, ומצויה מעל לאופק (למשל, לאורך הקו ACD שבתמונה). ברור מצורת חרוט הקשת כי ככל שהשמש תהיה גבוהה יותר ביחס לפני הקרקע, כך תשקע הקשת ותלך. כאשר השמש תגביה מעל האופק בזווית הגדולה מזווית הקשת, המושך הקו ACD יפגע מתחת לאופק ואז תשקע הקשת לחלוטין ותעלם.

אם נדאג להמצא בנקודת תצפית כזאת כך שגם מתחת לנו תהיה אוכלוסיה צפופה של טיפות מים, נוכל להבחין בקשת על פני מעגל שלם! ואכן ניתן להבחין בכך ממטוס, מראש מגדל גבוה, מראש הר גבוה (למשל הנקודה E בתמונה 1), או, לעיתים, בהתבוננות על ממטרות, מיזרות, או על מפל רב נתוים.

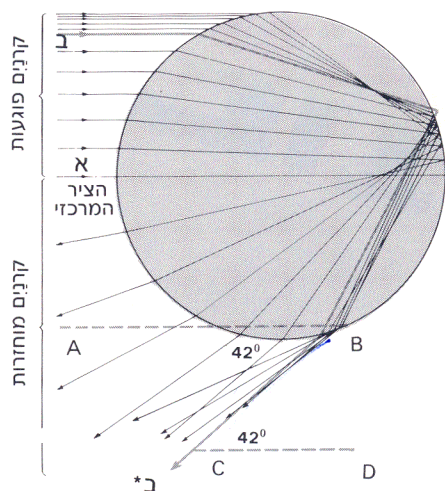
הקשת המשנית נוצרת כמעגל המקיף את מעגל הקשת הראשית (תמונה 2). סדר הצבעים בקשת המשנית הפוך לזה של הקשת הראשית: בקשת הראשית הצבע האדום נמצא בקרקע החיצון של מעגל הקשת והצבע הסגול נמצא בתוך המעגל. בקשת המשנית הצבע האדום נמצא בתוך מעגל הקשת והסגול מחוץ למעגל. במילים אחרות, הקשתות ניפרשות כך שהצבע האדום של הקשת האחת פונה לצבע האדום של הקשת השנייה.

בין הקשת הראשית והמשנית ניתן להבחין ברצועה אפלה יחסית המכונה הרצועה האפלה של אלכסנדר. בשוליים הפנימיים של מעגל הקשת הראשית, ניתן לעיתים להבחין ב"בנות הקשת" (Supernumerary arcs). אלו הן קשתות נוספות ש"מעל לתקן", שהופעתן קשורה בתופעת ההתאבכות של קרני אור המוחזרות מן הטיפות. צורתן וצבעיהן של בנות הקשת תלויים בגודל טיפות המים שבאוויר; זאת בניגוד לקשתות המשנית והראשית, שאינן תלויות כלל בגודל טיפות הגשם. על פי רוב עשויות בנות הקשת מקשתות של נרוד וירוק לסרוגין.

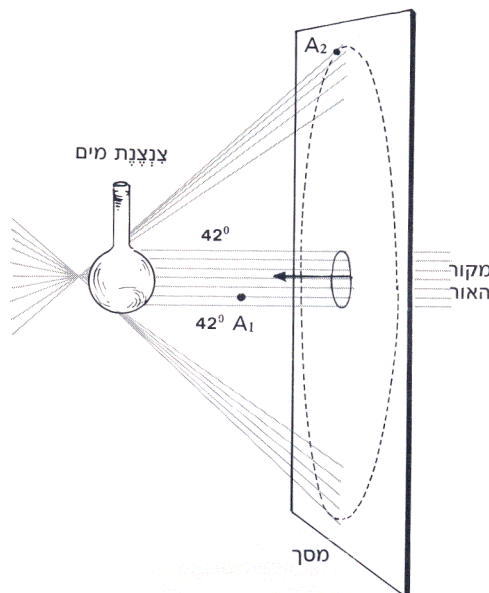
להלכה, יתכנו בנות קשת גם לקשת המשנית, ומקומן צריך להיות מחוץ למעגל הקשת המשנית, אך בדרך כלל הקשת המשנית חלשה כל כך שלא ניתן כלל להבחין בבנותיה החלשות ממנה.

כפי שנאמר, האזור הנמצא בין הקשת הראשית והמשנית (הרצועה האפלה של אלכסנדר) אפל יותר מהאזור שמחוץ לשתי הקשתות. לכן, האזור שמחוץ לקשתות נקרא האזור המואר. (הסבר לכך – בהמשך).

את מיכלול התופעות תארנו בתמונה 3. בתמונה זו נראה חתך דרך מעגלי הקשתות. החתך נעשה במישור המשולש AFC כפי שנראה בתמונה 1. ניתן להראות כי זווית הקשת הראשית היא 42.4° ביחס להמשך הקו המחבר את השמש עם הצופה, וזווית הקשת המשנית היא 50° ביחס לאותו קו.



תמונה 4: החזרת אור מטיפה כדורית. בתמונה מוצגות קרנים הפוגעות בחלקה העליון של הטיפה. קרן ב', למשל, היא טבעת המקיפה את הציר המרכזי של הטיפה. הצופה עומד בנקודה c. המשך הקו המלכד אותו עם השמש, מתלכד עם הוויית בה נראה לצופה עוצמה מוחזרת מרבית (זווית DCB) שנה לזווית ההחזרה הגבולית (זווית CBA).



תמונה 5: המתקן של תאודוריק: ניסוי המדגים את ההחזרה המרבית בעזרת צינצנת מים כדורית. אם נחסום את האור בנקודה A1, נקודה A2, שעל המסך תהיה חשוכה.

מעטפתו, היא זווית הקשת. בתמונה מצוירת זווית של 42° . צורתה של הקשת, ביחס לצופה, היא צורת מעגל, אך זאת בתנאי שכל מעטפת החרוט עשירה בטיפות מים המוארות היטב. על-פירוב אין הדבר כך – בדרך כלל ניצב הצופה סמוך לפני הקרקע כך שמעטפת חרוט הקשת ניקטעת בחלקה התחתון.

אבו עלי אל חסן איבן אל חייטם, נולד בבצרה בערך ב-965 ומת בקהיר בערך ב-1038). בשנת 1266 מדר רוג'ר בייקון (Roger Bacon, 1220-1292) את זווית הקשת (להלן).

בשנת 1304 דחה הנזיר הגרמני תאודוריק (Theodoric) מפרייברג, את השערתו של אריסטו, לפיה הקשת נוצרת מהחזרה של אור מקל טיפות המים בענן. הוא הציע כי כל טיפה יוצרת בעצמה "חרוט-קשת" של אור צבעוני באותן הזוויות של הקשת עצמה. הוא אף הציע דרך מקסימה לבחון את הסברו (בדומה לניסוי הצינצנת הכדורית שאותו נתאר בהמשך). גילוייו של תאודוריק נשארו כמעט בלתי ידועים במשך שלוש מאות שנה, עד שנתגלו מחדש, ובאופן בלתי תלוי, ע"י הפילוסוף והמדען הצרפתי רנה דקרט (René Descartes, 1596-1650). בתקופתו של דקרט, כבר היה ידוע חוק השבירה של האור בעוברו מתוך שקוף אחד למישנהו, וכן – חוק ההחזרה. חוק השבירה נוסח בשנת 1621 ע"י וילהלם סנל (Willebrord Snell, 1591-1626) ונקרא חוק סנל⁽¹⁾. הסבר לצבעוניות הקשת הוצע על-ידי ניוטון (Newton, 1642-1727) בעקבות ניסויים שביצע באופטיקה בשנת 1666. הוא ביסס את ההסבר לצבעוניות הקשת על תופעת הנפיצה (דיספרסיה) – אור לבן נפרש למרכיביו, הצבעים השונים, בעוברו דרך מנסרה או דרך טיפת מים.

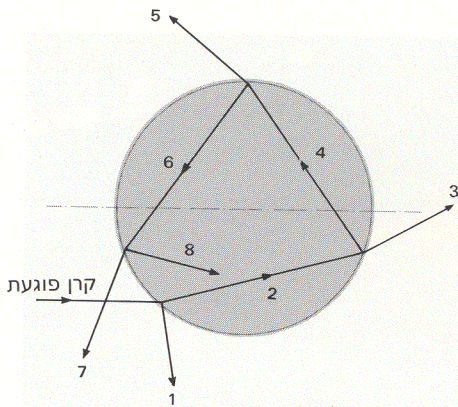
רק בשנים 1801-1803 גילה הרופא האנגלי תומס ינג (Thomas Young, 1773-1829) את תופעת ההתאבכות⁽²⁾ של אור, המצביעה על אופי הגלי המובהק⁽³⁾. ינג הוא שהראה כי "בנות הקשת" (להלן) נוצרות כתוצאה מהתאבכות בין קרני אור המגיעות מן הטיפה המוארת. בכך הושלם ההסבר האיכותי המקורב לתופעת הקשת בענן.

מאותו זמן ביקשו החוקרים ניתוח מתמטי, כמותי, שיציג תורה שלמה המבארת במדויק את עצמת האור המפוזר לכל כיוון, כתלות בגודל טיפות המים שבקשת. בחקר בעיה זו נטלו חלק פיסיקאים רבים, והפתרון המלא ניתן רק בשנים האחרונות ממש.

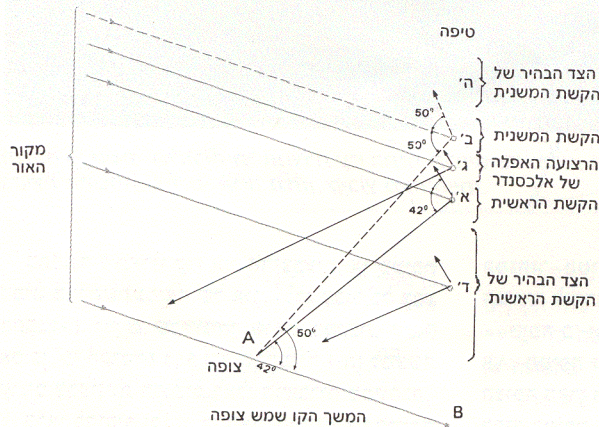
אנו נדון בפיוור האור מטיפה בודדת, ונסביר את יצירת הקשת כולה. נמשיך וננסוק בתופעות נילוות כמו הרצועה האפלה של אלכסנדר, בנות הקשת, סדר הצבעים בקשתות השונות ועוד.

סוגי הקשתות

הקשת נוצרת מהחזרת אור השמש על ידי טיפות מים כדוריות הנמצאות במקום גיאומטרי מוגדר היטב: אוסף כל הנקודות במרחב הנמצאות על מעטפת חרוט הקשת. חרוט זה, קודקודו מצוי בעין הצופה, וצירו מתלכד עם המשך הקו המחבר את הצופה אל מקור האור: השמש (תמונה 1), וזהו הקו צופה – צל הצופה. זווית הפתיחה של החרוט, כלומר הזווית שבין ציר החרוט וקו העובר על



תמונה 7: פגיעה של קרן אור בטיפת מים כדורית (הסבר בכססו).



תמונה 8: קרני אור מקבילות הפוגעות בטיפות מים המצויות בזווית ראייה שונות ביחס לצופה A. הזוויות נמדדות ביחס לקו AB, שהוא המשך הקו המחבר את הצופה אל השמש (הסבר בכססו).

גבול, ומשם תצא לאויר קרן 7. קרן מסוג 7 תיצור את הקשת המשנית (לאחר שתי החזרות בתוך הטיפה). הקרן תמשיך ותוחזר בהחזרות נוספות, למשל 8.

(1) חוק סנל קובע כי כמעבר של קרן אור מתוך 1 לתוך 2, יחס סינוסי הזוויות של הקרן בתוך 1 והקרן בתוך 2, הוא יחס מקדם השבירה של האור בתוך 1 (הזוויות נמדדות ביחס לאנך למישטח הגבול שבין שני התנכים).

(2) תופעת ההתאבכות מוסברת היטב על-פי התיאוריה הגלית של האור. לדוגמה, כאשר אור מועבר דרך מסך אטום ובו שני חורים המצויים זה ליד זה, שתי הקרניים הבוקעות מהחורים "מתאבכות" זו עם זו. ההתאבכות יוצרת אזורים כהים ובהירים לסרגוין, כאשר האזורים הבהירים השונים נקראים "סדרי ההתאבכות".

(3) תופעה יג ערך מחקרים חשובים גם בתחומים אחרים. הוא תרם רבות לחקר התכונות האלסטיות של מוצקים, ועל שמו נקרא מודול ינג – המאפיין את מידת האלסטיות של כל מוצק. כמו כן תרם ינג תרומה חשובה לפיענוח כתב החרטומים – הכתב המצרי הקדום.

(4) על פי התיאוריה הגלית של האור, ניתן לתאר את האור כתנועה המתרחשת בשדה האלקטרומגנטי. כאשר התנועה של המרכיב החשמלי (או המגנטי) של השדה האלקטרומגנטי מתבצעת בכיוון אחד בלבד – האור יהיה מקוטב.

בתיבה מוצגת הנוסחה המתארת את החזרת האור מהטיפה, כפי שתארנו בתמונה 4 ואנו מציגים כאן הדגמה, המוצעת כניסוי לקורא: זהו "הניסוי של תאודורין" והוא מתואר בתמונות 5 ו-6. (דָקְרֵט חזר על ניסוי זה ב-1637 מבלי שידע על עבודתו של תאודורין). על צינצנת זכוכית כדורית המלאה במים מאירים באלומת אור חזקה בעלת קרניים מקבילות (ניתן להשיג זאת ע"י הארה דרך נקב, כפי שנראה בתמונה). הצינצנת משולה לטיפת המים הבודדת. האור מוחזר מהצינצנת לאחור, לכיוון המסך, בכל הזוויות שבין 0° ל-42°. עיקר העוצמה מתקבלת על המסך כטבעת בשולי אזור ההחזרה. מעבר לה לא מוחזר כל אור. אם האור המוקרן הוא "לבן"



תמונה 6: צילום צינצנת כדורית מלאה במים, המוארת באור השמש, והקשת שהיא מטילה על המסך שמאחוריה (צילום: אברהם ברוך, המרכז הלימודי בקבוץ מעוז חיים).

פזיור האור מטיפה בודדת

קרני האור המקבילות המגיעות מהשמש פוגעות בטיפת המים (תמונה 4), במרחקים שונים מהציר המרכזי (המתלכד עם קרן א), ובמקביל לו. בתמונה מתוארות 12 קרניים אופיניות חד-צבעיות, הפוגעות בטיפה בקציה העליון. הקרניים מפוזרות מהטיפה לאחר החזרה אחת בלבד בתוך הטיפה. ניתן להבחין כי קרני האור מפוזרות לאחור, בכיוון הנגדי ביחס לציר המרכזי, בזווית שבין 0° ל-42° ביחס לציר זה, כשהעוצמה המכסימלית של הקרינה המוחזרת היא בסמוך לזווית הגבולית – 42° (זווית ABC). הצפיפות הגבוהה של קרני-אור מוחזרות בסמוך לקרן ב* מייצגת עובדה זאת. מעבר לזווית הגבולית לא יהיה כל פיזור שהוא. הזווית הגבולית, בת 42°, שווה לזווית שבה רואה הצופה את העוצמה המוחזרת המכסימלית (המשך הקרן ב*). הזווית הזאת נמדדת ביחס להמשך הקו המחבר את השמש לבין מיקומו של הצופה. (בתמונה שלנו זהו הקו CD), והיא "זווית מתחלפת" לזווית הגבולית.

מאחר שכל אורך-גל נשבר באופן שונה בטיפת המים, לכל צבע כיוון הקרן ב* יהיה שונה במקצת. לכן, סמוך לצבע האדום יתקבל הצבע הכתום, לידו הצבע הצהוב וכן הלאה.

בין הזוויות 0° ל-42° יתקבל אור חלש המוחזר מהטיפה. סמוך לזווית הגבולית בת 42° (ביחס להמשך הקו המחבר את השמש לצופה) תתקבל עוצמה חזקה ומעבר לזווית הגבולית לא תחזיר טיפת המים כל אור שהוא. זאת הסיבה לקיומה של "הרצועה האפלה של אלכסנדר" מעבר לזווית הגבולית.

יש להוסיף כי עקב הסימטריה הכדורית שקובעת טיפת המים, הקרן המיוצגת ע"י קרן ב* היא למעשה טבעת. במילים אחרות, התמונה מציגה חתך מישורי במיכנה בעל סימטריה כדורית.



אפנה. אפוא. ממיל תמה אַחֲרָה! מפל המים הפורץ צוק סלע. אותו בהשתאית גואה אסקרה. מתהום לתהום נקלע ככךף הקלע. נפשק לאלף רבאות בני אשד, תמרה של קצף מעלה תנושא לה. על שצף זה בקמור דדר – הקשת. הססגונית. תמידת-תמורות. מרקשת. יש כי שלמה היא. יש באויר נקלשת. סביבה צנת של ריחנית שופעת. היא – כסף האדם ראי מוצא בה. הגה בה. ואן מיטיב לדעת: תינו מה – ספקלרית שלל צבע. (מתוך "פאקט לגתה, בתרגום יצחק כפכפי, הוצאת דביר בע"מ, 1975).



(כלומר, מורכב מכל צבעי הקשת) האור המוחזר יצור קשת של צבעים, כך שבשולים החיצוניים של הטבעת יהיה הצבע האדום ובשולים הפנימיים הצבע הסגול. אם נחסום, את מהלך הקרניים, למשל – בנקודה A₁ (תמונה 5), נקבל בנקודה A₂ כתם על המסך; זאת מקיין שקרני האור היוצרות את הטבעת הן הקרניים הפוגעות בשולי הצינצנת (ראו את מהלכה של קרן ב-ב* בתמונה 4).

חלק מן הקרן הפוגעת בטיפה בודדת (תמונה 7) מוחזר החוצה לאויר (קרן 1) ואילו חלק אחר חודר למים וגשבר (משנה את כיוונו המקורי). הקרן שחזרה (2) ממשיכה להתקדם בתוך המים עד שמגיעה שוב למשטח גבול. חלקה יחזור את שכבת הגבול ויצא אל האויר תוך שבירת הכיוון (קרן 3) וחלקה (4) ייחזר, ימשיך בתוך הטיפה ויגיע שוב למשטח גבול: חלקו יצא לאויר תוך שבירת כיוונו (קרן 5) וחלקו יחזור וימשיך לנוע בתוך הטיפה (קרן 6). קרן מסוג 5 היא הקרן שתיצור את הקשת הראשית (לאחר החזרה אחת בטיפה). חלק הקרן שימשיך בתוך הטיפה (6), יגיע שוב למשטח

החיצון של הקשת הראשית וחלקה הפנימי של הקשת המשנית יהיו אדומים. במילים אחרות, הצד האדום של הקשת האחת פונה לצד האדום של הקשת השנייה.

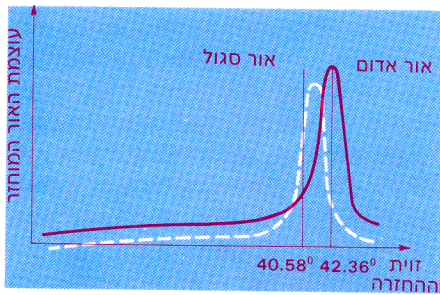
"האזורים הבהירים" של הקשת הראשית והמשנית צבעם לבנבן. כדי לעמוד על סיבת הדבר נניח שטיפת מים בקשת מוקרנת בשני צבעים בלבד – אדום וסגול. תמונה 10 מראה את תלות עוצמת האור המוחזר מהטיפה בזוית ההחזרה. ההחזרה המרבית של האור האדום היא בזוית גבולית בת 42.36° (הקו המלא). ההחזרה המרבית של הסגול – בזוית גבולית בת 40.58° (הנוסחה לחישוב זוויות אלו מובאת בתיבה). לכן, בזוויות הגבוליות, שבהן עוצמות ההחזרה חזקות במיוחד, יש הפרדה טובה בין שני הצבעים. לעומת זאת, בזוויות החזרה קטנות יותר, שבהן עוצמת האור המוחזר נמוכה, תרומת שני הצבעים בכל זווית וזווית היא קטנה. "עירובוב" הצבעים בזוויות הנמוכות מהזוויות הגבוהות הוא שמקנה ל"אזורים הבהירים" את צבעם הלבנבן.



תמונה 9: קשת "מלאכותית" הנוצרת ע"י התזת תרסיס של טיפות באור שמש חזק. למעלה, ניתן להבחין בקשת המשנית. (צילום: אריה גנתון, קיבוץ מעוז חיים).

בנות הקשת

סמוך לצד הסגול של כל קשת, בתחום האזורים הבהירים, ניתן להבחין בקשתות נוספות "שמעל לתקן" (Supernumerary arcs). נכנה אותן "בנות קשת". לקשת הראשית, צמודות בנות הקשת



תמונה 10: התלות של עוצמת ההחזרה של אור מטיפת מים כדורית, בזווית. האור מורכב משני צבעים: אדום וסגול. לכל צבע זווית החזרה מרבית שונה.

המוחזר מטיפה זאת יוצר את הקשת הראשית הנראית לאותו צופה.

טיפה ב' נמצאת בזווית ראייה של 50° ביחס לקו AB. מטיפה זאת ומשכנותיה הקרובות מוחזרת אל הצופה הקרן הגבולית שעברה שתי החזרות פנימיות בתוך הטיפה. קרן זאת יוצרת את הקשת המשנית. טיפה ג' אינה מחזירה אור אל הצופה משום שהיא מעבר לזווית הגבולית הראשונה (42°) ומתחת לזווית הגבולית השנייה (50°). אזור זה מכונה "הרצועה האפלה של אלכסנדר".

כל טיפת מים המצויה מתחת לטיפה א' (לדוגמה – טיפה ד') מחזירה לעינו של הצופה קרניים בזוויות הקטנות מ- 42° . מתוך מה שהוסבר לגבי החזרה מטיפה בודדת, אור זה הוא בעל עוצמה נמוכה. אזור הטיפות המרחפות מתחת לקשת הראשית נקרא "הצד הבהיר של הקשת הראשית".

טיפה המצויה מעל לטיפה ב' (למשל – טיפה ה') נראית בזווית-ראייה הגדולה מ- 50° , וגם היא מחזירה לעינו של הצופה אור בעוצמה נמוכה. קרני אור אלו עברו שתי החזרות פנימיות בתוך הטיפה. אזור הטיפות הזה, שמעל לקשת המשנית, נקרא "הצד הבהיר של הקשת המשנית".

אור השמש מורכב, כמובן, מצבעים (או אורכי גל) שונים. מפיין ששכירת האור שונה במעט בכל צבע וצבע, ההחזרות של הצבעים השונים יתרחשו בזוויות גבוליות שונות במעט וסמוכות זו-לזו, ומכאן צבעוניותן היפה של הקשתות. בתמונה 9 מוצגת קשת "מלאכותית", שנעשתה ע"י פיזור אור השמש בתרסיס של טיפות, ונראית בה חלוקת הצבעים בקשת הראשית. כמו במקרה של החזרה מטיפה בודדת, האזור

בתמונה 7 תארנו קרן אור חד-צבעית, אך בטיפת המים מתרחשת נפיצה של אור, ולכן עבור כל צבע מתקבלות קרניים שכייוניהן שונים במקצת. יוצא, אם כן, כי הקרניים 3, 5 ו-7 שבתמונה 7 הן למעשה קרניים צבעוניות הדומות לאלו הנשברות ממינסרה. כדאי להוסיף ולציין, כי האור המוחזר מן הטיפה הוא אור מקוטב⁴ (דבר אופייני לאור המוחזר משכבת גבול חלקה של תך שקוף). ניתן להבחין בכך בעזרת מקטבים (או דרך משקפי פולרוידי): סיבוב המקטב יגרום להעלמות חלקים שונים של הקשת! המתבונן בקשת דרך משקפי פולרוידי עלול לתמוה מדוע נמחק קטע מהקשת בעוד חבריו מתפעלים מיופיה ומשלמותה.

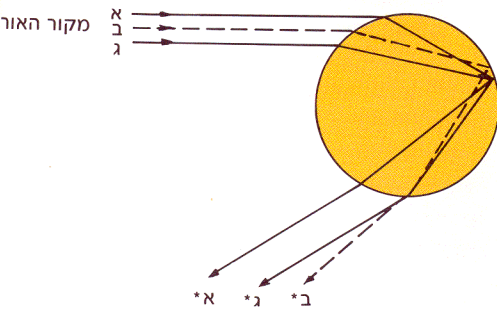
ים של טיפות

מה קורה כאשר יש באוויר אוכלוסיה צפופה של טיפות מים כדוריות? איך מוחזר האור מ"ים" הטיפות שבאוויר?

הטיפה הבודדת לא תשנה, כמובן, את התנהגותה – היא תיצור קשת ראשית בזווית פתיחה של כ- 42° וקשת משנית בזווית של כ- 50° . אך האם כל קרני האור, המפוזרות מטיפה רחוקה, מגיעות אל עינו של הצופה?

בתמונה 8 מוצגות חמש טיפות מים המרחפות באוויר ומוקרנות באור חד-צבעי. הן נראות לצופה בזווית ראייה שונות (ביחס להמשך הקו המחבר את מקור האור עם הצופה, כלומר קו AB).

טיפה א' נמצאת בזווית ראייה של 42° ביחס לקו AB. מטיפה זאת ומשכנותיה הקרובות מוחזרת אל הצופה קרן בעוצמה חזקה במיוחד. זוהי הקרן הגבולית, שעברה החזרה אחת בתוך הטיפה. האור



תמונה 11: עבור קרן אור (ב), הפוגעת בטיפת מים כדורית ומוחזרת בזווית מרבית, ניתן תמיד למצוא שתי קרניים (א ו ג) כך שהחזרותיהן תהיינה קרניים מקבילות; אלו יתאבכו וייצרו את "במרת הקשת".

זווית הפיזור הגבולית θ_1 , היוצרת את הקשתות מקימת את המישואה⁽⁶⁾ (תמונה 12).

$$\sin^2 \theta_1 = \frac{(k+1)^2 - n^2}{(k+1)^2 - 1}$$

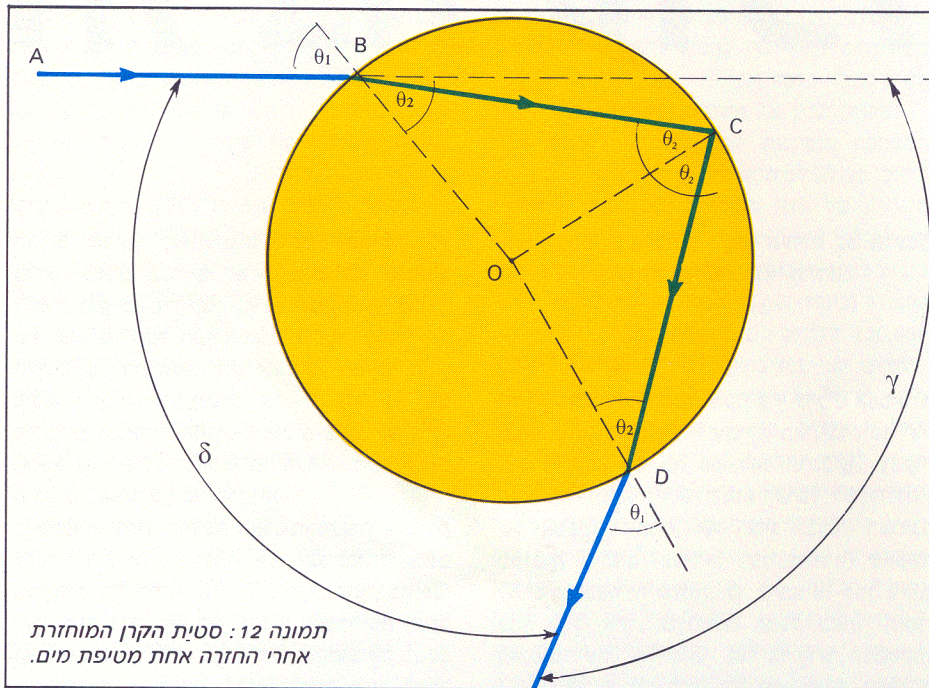
θ_1 מוצגת בתמונה n הוא היחס בין מקדם השבירה של האור במים ומקדם השבירה של האור באויר. k הוא מספר שלם המציג את מספר ההחזרות של קרן האור בטיפה (ראה תמונה 7).

עבור $k=1$ נקבל את זווית הפיזור של הקשת הראשית ועבור $k=2$ נקבל את זווית הפיזור של הקשת המשנית. יתכנו קשתות נוספות המתאימות לערכי k גדולים יותר. קשה מאוד להבחין בהן בטבע, אולם בניסויים בפיזור של אור לייזר בטיפות מים, ניתן להבחין בקשתות חדיצבעיות רבות, עד עשר קשתות ויותר.

כאשר $k=1$, עבור הקשת הראשית, נקבל:

$$\sin^2 \theta_1 = \frac{4 - n^2}{3}$$

עבור $n=1.3311$, $\theta_1=59.52^\circ$. לפי חוק סנל $\theta_2=40.35^\circ$ זווית הקשת הראשית (תמונה 12) מקימת $\theta_2=40.35^\circ$ כאשר θ_2 מוצגת בתמונה. לכן $\delta=42.36^\circ$. באור סגול, שעבורו $n=1.3435$, נקבל באותו אופן $\delta=40.58^\circ$.



תמונה 12: סטיית הקרן המוחזרת אחרי החזרה אחת מטיפת מים.

(5) נחזור על הטענה באופן אחר: נניח שהקרניים המקוריות מיוצגות ע"י הגורם המשתנה x וזוויות ההחזרה מיוצגות ע"י הגורם y, כך ש-y=f(x): x פונקציה רציפה של x. נניח ש-y מקבל ערך מקסימלי y_0 , ב- x_0 . ניתן למצוא שני ערכים, x_1 ו- x_2 הסמוכים ל- x_0 כך שעבורם $y=f(x_1)=f(x_2)$. בדימוי אחר: סמוך לנקודת השיא של גבעה יש נקודות שונות שגיבהן שנה.

(6) ראה:

C.B. Daish, "Light", The English Universities Press Ltd., 1971, 30-33.

P.S.S.C. Teacher's Resource Book and Guide, Part II, D.C. Heath and comp., 1960, Appendix 2, 3-11.

מהציר המרכזי. נניח שהקרן ב תפוזר בזווית הפיזור המרכזית ותיצור את הקשת הראשית. שתי הקרניים האחרות, א ו-ג, יפוזרו ויצאו מהטיפה כך ש-א* ו-ג* יהיו בדיק באותו כיוון. (ניזכר בתמונה 4, בקרן הגבולית ב* שהחזרה בזווית החזרה מרכזית). ניתן תמיד למצוא שתי קרניים שכנות ל-ב*, משני צידיה, אשר יחזרו מהטיפה בדיק באותה זווית, הקטנה כמובן מהזווית הגבולית⁽⁵⁾. בין הקרניים א* ו-ג* תתרחש התאבכות⁽²⁾ שתיצור את בנות הקשת. כך משמשת הטיפה, כשני מקורות אור שונים לקרניים מקבילות. הצופה בכיוון זה יבחין בהתאבכות בין קרניים אלו ויראה מספר "בנות קשת" המיוצגות סדרי התאבכות שונים; אלה גורמים להופעת צבעים שונים בזוויות שונות. בדרך-כלל ניתן להבחין באחד עד שלושה סדרים של התאבכות, הניכרים בצבעי ירקק ונרוד לסרוגין. אופי ההתאבכות תלוי בהפרש המסלולים שעברו הקרניים א*, ג* בתוך הטיפה. לכן תבנית ההתאבכות המתקבלת תלויה מאד בגודל הטיפות, לעומת כל יתר התופעות שהכרנו עד כה, שכלל אינן תלויות בגודל הטיפות (הנחנו רק שהטיפות כדוריות). על פי עוצמתן של "בנות הקשת" וגוניהן — ניתן לאמוד את גודל הטיפות שבאוויר!

לסיום נזכיר כי לכל צופה — קשת משלו. כשאנו זזים אנו חדלים להבחין בקשת שראינו קודם ורואים כעת קשת המפוזרת מטיפות אחרות: הקשת נעה איתנו! אדם המתבונן בקשת הנוצרת מטיפות הקרובות אליו מאוד (במרחק הקטן ממטר) עשוי להבחין בשתי קשתות ראשוניות מכיין שכל עין רואה את הקשת המתאימה למיקומה: עצום עין אחת — ותעלם הקשת שלה! ■

מכפנים, ואילו לקשת המישנית — מבחוץ. מפיין שהקשת המישנית חלשה בהרבה מן הראשית, יהיו בנותיה כמעט בלתי נראות. בנות הקשת של הקשת הראשית נראות כסדרה בת אחת, שתיים או שלוש קשתות בגווני ירוק ונרוד.

תופעה זו אינה ניתנת להסבר באמצעות האופטיקה הגיאומטרית בלבד. ואכן דקרט וניוטון שחקרו את הופעת הצבעים בקשת לא הצליחו להסבירה. כדי להבין תופעה זו נחזור ונתבונן בקרניים הפוגעות בטיפת מים (תמונה 7), ובמיוחד בקרן 5 היוצרת את החזרת האור של הקשת הראשית. כעת נתבונן בתמונה 11. א, ב, ג, הן קרני שמש הפוגעות בטיפה הכדורית במרחקים שונים



תמונה 13: צילום של קשת דרך מסנן המעביר אור תת-אדום בלבד. בנות הקשת נראות בבירור מתחת לקשת הראשית. מעליה ניתן גם לראות את הקשת המשנית. (מתוך ספרו של Jon Darius, "Beyond Vision", Oxford University Press, 1984, 124.)

לקריאה נוספת

- R. Greenler, "Rainbows, halows and glories", Cambridge University Press, 1980.
- H.M. Nussenzveig, "The theory of the rainbow", Scientific American, April 1977, 116.
- Jearl Walker, "Mysteries of rainbows", Scientific American, June 1980, 146.



תמונת קשת שצולמה ממרומי
מצפה עין־גדי.

(צילום: יוסף כפיר, החברה להגנת הטבע).