

”... ונראתה הקשת בענן”

**הקשת בענן - הצעות לפעילות חווייתית לכל המשפחה
הזמנה לבנייה לניסוי ולחקר, הסברים ומקורות לעיון**

פעילויות, הסברים ומקורות על תופעת הקשת בענן - להורים ולילדים מתעניינים - לימי המדע

מאת: ד"ר עמוס כהן - אורנים – המכללה האקדמית לחינוך
ומרכז אחר"ת, בית המדרש 'נקודת ארכימדס' למורים חוקרים בפיזיקה.
דוא"ל: amos_c@oranim.ac.il

להורים ולילדים שלום רב!

בעמודים הבאים נציע לכם פעילויות שונות הקשורות לתופעת הקשת בענן ולדרכים להתנסות בה ולחקור אותה ביחד.

הקשת בענן נוצרת כתוצאה מפיזור האור (של השמש, או הירח, או אפילו מנורת רחוב חזקה), מטיפות מים כדוריות שבאוויר.

מדוע טיפות המים מתכדרות לכדורים מושלמים בכדוריותם?
יש מקום לברר ולחקור - גם את נושא מתח הפנים של המים.

מה אפשר לחקור בקשת בענן?

ראשית, נצפה בתופעה:

סרטון: הקשת בענן - פעילות עם נוער, חקר והדגמה - במכללת אורנים. עמוס כהן ומיכל שורצון (2015):
”קשת בענן החוג למדעים באורנים”

<https://www.youtube.com/watch?v=7zSyblgPKL0>

פעילויות מוצעות:

באתר של עמוס: קשת מדעים

בתת האתר על פעילויות בנושא הקשת בענן: <https://amoscohn.com/rainbow>

ניתן למצוא מידע רב על קשת בענן ועל מתקנים המסייעים בחקר הקשת.

הבניה של מושגים בחקר הקשת בענן

הקשת בענן מופיעה במקום מוגדר מאד, ביחס לכיוון השמש, ומיקומו של הצופה.
הקשת בענן מתקבלת מטיפות מים מוארות הנמצאות על פני "חרוט הקשת בענן".
על מנת לחוש את מיקומו של חרוט הקשת – עלינו להבנות את המושג הזה, וקודם כל – מומלץ לבנות במו
ידינו את חרוט הקשת. להלן קישור עם הנחיות לבנייה של מתקן חרוט הקשת בענן:

בניית חרוט הקשת בענן - ראו קובץ הנחיות לבנייה של חרוט הקשת או: "לכודת הקשת בענן"

עיינו באתר: קשת מדעים; עמוס כהן; ספרים; מאמרים; תחומי חקר; הוראת חקר.

ובכן, מה אפשר לחקור בקשת בענן?

1. קשתות מסדרים גבוהים: לפתח ביטוי אנליטי (חיפוש הקרניים הגבוליות, האקסטרמליות) היוצרות קשת בענן, לאחר שהקרניים עברו k החזרות בטיפה.
2. להכין רשימה של כ- 10 – 15 קשתות מסדרים גבוהים, ולכל אחת לחשב את הזווית הגבולית לצבע אדום ולצבע סגול (גבולות הספקטרום הנראה). לברר האם קשת מסדר k תיראה כמעגל סביב כיוון צל הצופה או סביב כיוון השמש.
3. לבנות מערכת ניסוי רגישה במעבדה ולמדוד הלכה למעשה את זוויות הקשתות מהסדרים הגבוהים, גם מעבר לאלו הנצפים בטבע.
4. תופעת 'בנות הקשת' supernumerary arcs לחקור ולהבין מה מקורה של התופעה. מדוע תופעה זו, היא היחידה מתופעות הקשת בענן, אשר תלויה בגודל טיפות המים שבאוויר? [התרגום העברי לתופעה זו, הוצע לראשונה על ידי עמוס כהן במאמרו מ- 1987].
5. לנסות למצוא את הקשר בין צבעוניות בנות הקשת לבין גודל הטיפות שבאוויר. האם נוכל לקבוע את גודל טיפות המים באוויר בעזרת ניתוח צבעי בנות הקשת?
6. חקר האור המקוטב מהקשת בענן. מהו כיוון הקיטוב של אור הקשת? מדוע?
7. הקמת מתקן ממטרות ויצירת קשת בענן בכל עת. מדוע בטבע אין קשת בצהרים? מה צריך להתקיים על מנת שנוכל ליצור קשת מעגלית שלמה ולהבחין היטב בכל הצבעים?
8. קשת בענן מטיפות של נוזלים שונים כמו: מי מלח, שמן ועוד.
9. "קשת בענן" מכדורי זכוכית - המפוזרים בסביבה. בניית אקווריום משובץ בכדורי זכוכית.
10. כיצד משמשים כדורי זכוכית כמחזירי - אור בכבישים ובשלטי הדרכים? היכן כאן אפקט הקשת בענן? מדוע.
11. מאיזה חומרים (מאיזה מקדמי שבירה) ניתן לקבל קשת בענן, ומאיזה חומרים לא ניתן?
12. האם ניתן לקבל קשת בענן מטיפות מים אליפטיות? איך תתקבל הקשת?
13. מדוע הקשת נפרשת על פני מעגל שלם? מהו המקום הגיאומטרי של מעגל (חרוט) הקשת?
14. האם ניתן לראות ולצלם קשת בענן בלילה? מאור הירח? מפנס רחוב? כיצד תיראה הקשת?

ועוד ...

תופעת הקשת בענן

הקשת בענן כוללת מגוון רחב של היבטים ותופעות שכולן ראויות להיחקר ולכולן נוכל ליצור מתקני מעבדה אשר מהווים עזרים וכלי חקר מצוינים.

למרבה הפלא – אנו עתידים לגלות, כי רב הנסתר על הידוע: מרבית תופעות הקשת בענן אינן מוכרות לציבור!

הנה רשימה של שלל התופעות שניתן להבחין בהן, ושלל ההקשרים שנוכל להכיר ולחקור:

1. **הקשת הראשית**: מיקומה על פני מעגל שלם שמרכזו צל הצופה. אנו רגילים לראות את הקשת כחלק של מעגל, על פי רוב מחצית המעגל או פחות מכך. אף על פי כן התופעה הפיזיקלית היא תופעה של קשת הנפרסת על פני מעגל שלם!
2. **"חרוט הקשת"** חרוט שזווית הפתיחה שלו (הזווית שבין הקו היוצר את החרוט - לבין הציר המרכזי שלו) היא זווית הקשת: 42° בקירוב. קודקוד החרוט - בעין הצופה. ציר החרוט הוא הקו: מעין הצופה - אל צל ראשו של הצופה. לכל צופה קשת משלו! חרוט הקשת נע עם הצופה!
3. **הקשת המשנית**: מחוץ לקשת הראשית, על פני חרוט קשת בזווית פתיחה של כ- 51° .
4. סדר הצבעים של הקשתות - הפוך: **האדום** של האחת פונה **אל האדום** של חברתה.
5. **הרצועה האפלה של אלכסנדר** (על שם אלכסנדר מאפרודיסיאס) היא אזור אפל יותר (למעשה - שקוף יותר) בין שתי הקשתות. יש לשים לב לצד האפל ולצד המואר של כל קשת.
6. **הקשת בטבע**: מדוע בטבע, בתנאי תצפית רגילים, מופיעה הקשת רק על קטע של מעגל – ולא על פני מעגל שלם. במקרים מיוחדים ניתן לראות קשת על פני מעגל שלם! למשל, במתקן הקשת שבנינו.
7. בטבע ניתן להבחין בקשת **רק בשעות הבוקר או אחרי הצהריים** - אך לעולם איננו רואים קשת טבעית **בצהריים**. למרות כל זאת, בתנאים מיוחדים, ניתן לראות קשת גם **בצהריים**: במתקן הקשת שבנינו (המתקן המוצג בסרטון הקשת באורנים, ברשימת המקורות), בתצפית ממטוס, בתצפית ממגדל או מהר גבוה.
8. תופעת **'בנות הקשת'** Supernumerary arcs היא תוצאה של התאבכות קרני האור המפוזרות מן הטיפה. Supernumerary arcs פירושו קשתות נוספות, שמעל למניין, מעל לתקן. **המונח העברי 'בנות קשת'** הוצע לראשונה במאמר (כהן, עמוס 1987) ומאז נתקבל בספרות המקצועית.
9. אור הקשת הוא **אור מקוטב**: המתבונן בקשת דרך מקטבים (או דרך משקפי פולרואיד) יגלה כי "נמחק" חלק הקשת בכיוון שבו ציר המקטב (E) - משיק למעגל הקשת.
10. הפיזיקה של הקשת: שבירה של אור ופיזור האור בזוויות שונות מטיפה כדורית. מציאת **הקרן הגבולית**, הקרן שפוזרה לזווית סטייה מרבית ביחס לכיוונה המקורי. דיון ושימוש **בעקרון הווריאציה** למציאת הקרן הגבולית, כדוגמה לעיקרון פיזיקלי כללי ביותר. פיתוח הנוסחה הכללית לחישוב הזווית הגבולית בכל סדר וצבע (בעקבות החישוב של סר איזיק ניוטון): **הזווית היא הצבע!** (הנוסחה מוצגת ללא פיתוח, בסוף המאמר: הקשת בענן – ים של טיפות ואור).
11. **סדר הקשת** (ראשית, משנית וכו') הוא מספר **ההחזרות הפנימיות** שהקרן הוחזרה בתוך הטיפה - עד שיצאה החוצה.
12. הקשת מופיעה בכל המיתולוגיות של כל התרבויות האנושיות, יש לה ביטוי אֶמְנוֹתִי ססגוני בצירוף, בספרות ובשירה בכל הדורות. הקשת מופיעה כמובן בתנ"ך בסיפור המבול. מעניין לאסוף סיפורים מיתולוגיים מתרבויות שונות ומאזורים שונים.

13. תולדות המחקר הפיזיקלי וחקר תופעת הקשת שזורים בתולדות המחשבה האנושית משחר ההיסטוריה, ועברו התפתחויות רבות. התשובות לשאלות המחקר הושגו במאמץ אנושי רב: לעתים תוך עבודת נמלים עצומה, ולעתים בקפיצות מחשבתיות של ענק יחיד בדורו. היכרות עם מחקר הקשת יכולה ללמד על דרך המחקר המדעי תוך הדגשת ביקורתיות ופתיחות מחשבתית.



הדגמה של תופעת הקשת בענן במכללת אורנים באמצעות מתקן הקשת בענן שפותח על ידי עמוס כהן.

עזרי המחשה לחקר הקשת בענן

- **מתקן הקשת** לפיזור נתזי-מים: באמצעותו ניתן ליצור קשת בכל שעות היום! ולא רק בשעות הבוקר ואחר הצהריים, כפי שמתרחש בטבע.
- **המתקן של תיאודוריץ**: צנצנת מים כדורית, המייצגת טיפת מים כדורית, מוארת באלומת קרני אור מקבילות. הצנצנת הכדורית מפזרת חרוט של אור ויוצרת קשת מטיפה בודדת. המתקן מדגים את המושגים: "חרוט הקשת" ו-"הזווית הגבולית" הבונה את הקשת.
- מודל "חרוט הקשת" הבנוי מחרוט קשיח בעל כוונת פשוטה - הממחיש את מיקום הקשת במרחב: ביחס לצופה ובהתאם לכיוון קרני השמש. המודל מאפשר לנו "למשש את המושג המופשט" של חרוט זווית הראייה.
- מתקן המחשה "מטיפה בודדת - לקשת שלמה", אשר מראה בפשטות את תרומת הטיפות השונות ליצירת הקשת: ים של טיפות ואור.
- **ערכת מקטבים** (לוחיות מסננות אור פולרוואיד) לבחינת הקיטוב של אור הקשת.
- **תכנית מחשב פשוטה** (למשל גיליון אלקטרוני) לחישוב "זוויות הקשת הגבוליות" של קשתות מסדרים שונים, עבור מקדמי שבירה שונים של האור בהתאם לתווך שממנו נוצרו הטיפות (מי-גשם, מי-ים ואפילו טיפות שמן).



המתקן של תיאודוריד : צנצנת מים כדורית, המייצגת טיפת מים כדורית



מודל חרוט הקשת הבנוי מחרוט קשיח בעל כוונת פשוטה

הצעה לנושאי חקר מתקדמים לחקירה מעמיקה יותר של הקשת בענן

- חקר תופעת 'בנות הקשת' Supernumerary arcs כתופעה של התאבכות קרני אור הסמוכות לקרן הגבולית.
- מה משפיע על הגוונים המתקבלים ב'בנות הקשת' ? האם תופעה זו תלויה בגודל הטיפות?
- חקר הרוחב הזוויתי של הקשת – כתלות בגודל הטיפות.
- חקר תופעת הקשת בענן מחומרים שונים, בסביבות שונות. האם תמיד תתקבל קשת?
- קשתות מסדרים גבוהים. באילו כיוונים עלינו לחפש את קשת מסדר 3 וסדר 4 ?

הצעה לחקר תופעות טבע הקשורות בפיזור אור ממפזרים באוויר

- טיפות מים גדולות - הקשת בענן.
- טיפות מים קטנות בענן - ענן של ערפל לבן אטום.
- גבישי קרח באוויר - הילה ועטרה : מתקבלת טבעת זוהרת סביב הירח או סביב השמש.
- חלקיקי אבק באוויר : מצב של אובך.

דגשים נוספים אודות חקר הקשת בענן:

1. ניתן לקבל קשת בענן מאור הירח וכן מאור של פנס רחוב חזק. חשוב שהמקור יהיה חזק ככל האפשר ויחיד בכל הסביבה (לכן פנס חזק בלילה יכול להיות מקור אור מתאים). חשוב שהמקור יהיה חזק, יחיד ללא מקורות אור נוספים מתחרים. רצוי שיהיה רחוק כדי שקרני האור תהיינה מקבילות. ראו תמונת קשת לאור הירח בספר: כהן וכהן שניר 2019 עמ' 104.
2. מתקן הקשת שלנו הוא בעיקרו מערכת של ממטרות. הממטרות מתיזות הרבה טיפות מים צפופות.
3. חרוט הקשת אינו הכרחי. הוא כלי עזר להמחיש ולחוש את מיקום הקשת.

באופן הבסיסי ביותר – **לקשת בענן אין גודל מוחלט!**
הקשת הנה תופעה של חרוט של זווית ראייה, כפי שניתן לראות בסרטון של אורנים המצורף לכאן.

כיוון שכך, הקשת תמיד תיראה באותה זווית ראייה, סביב כיוון הצל של הצופה.
להלן קישור עם הנחיות לבנייה של מתקן חרוט הקשת בענן:
[בניית חרוט הקשת בענן](#) - ראו קובץ הנחיות לבנייה של חרוט הקשת או "**[לוכד הקשת בענן](#)**"

מקורות

סרטון: הקשת בענן - פעילות עם נוער, חקר והדגמה - במכללת אורנים. עמוס כהן ומיכל שורצזון (2015):
"קשת בענן החוג למדעים באורנים"

<https://www.youtube.com/watch?v=7zSyblgPKL0>

כהן, עמוס וכהן שניר, אורנית (2019). **מעשה ומחשבה בחקר המדעי: דיאלוגים על חקר וגילוי במדעים ובמתמטיקה, בנייה ופיתוח של פרויקטים מדעיים יצירתיים.**
תל אביב: מכון מופ"ת.

בקישור הבא, באתר מכון מופ"ת ניתן לראות את תמונת הספר ומידע נוסף:

<https://store.macam.ac.il/store/books/1421>

בקישור שלהלן: **[תוכן עניינים ומבוא](#)**

ניתן לעיין ב- 22 העמודים הראשונים של הספר, הכוללים: תוכן עניינים, דברי תודה, מבוא, מקורות והערות למבוא. הספר נמצא לעיון במאגר כותר – ספרי עיון

כהן, עמוס (1987). **קשת בענן - ים של טיפות ואור.** מדע, כרך ל"א חוברת 2. דצמבר 1987, עמ' 74 - 79. ירושלים: מוסד ויצמן לפרסומים במדעי הטבע ובטכנולוגיה.



http://moodle.oranim.ac.il/moodle/blocks/exabis_eportfolio/portfoliofile.php?access=view/has/h/72260000-5b40bf54&itemid=55

כהן, עמוס (2001). טוב מעשה במחשבה תחילה: מדריך ללמידה באמצעות פרויקטים מדעיים יצירתיים. תל אביב: מכון מופ"ת.

באתר האישי של עמוס כהן: [קשת מדעים](#) ניתן למצוא מידע רב על קשת בענן ועל מתקנים המסייעים בחקר הקשת. עיינו באתר: עמוס כהן; ספרים; מאמרים; תחומי חקר; הוראת חקר.

גילית פורת באתר סיפת"ח <https://sites.google.com/site/siptahforyou> מצגת של גילית פורת באתר סיפת"ח - על הקשת בענן: https://sites.google.com/site/siptahopticmodern/home/c03_rainbow.ppsx?attredirects=0

אריאלי, רמי (1993). הקשת בענן (Rainbow). תהודה, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע. תהודה - עתון מורי הפיסיקה. כרך 15, חוברת מספר 3, תשרי תשנ"ד, אוקטובר 1993. עמ' 81 - 75. בהוצאת המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות.

קרקובר, זאב - ההערה היומית בפיזיקה. בתוך האתר מספר הערות הקשורות לקשת בענן:

<http://my.ort.org.il/mop/physics/daily/>

<http://my.ort.org.il/mop/physics/daily/cont.html>

Lee, R. L. and Fraser, A. B. (2001). The Rainbow Bridge: Rainbows in Art, Myth, And Science. Pa.: Pennsylvania State University Press.

Greenler, R. (1980). Rainbows, halos and glories. Cambridge University Press.

Nussenzveig, H.M. (1977). The Theory of the Rainbow. Scientific American, pp. 116-127. (April 1977).

- Walker, J. (1980). Mysteries of Rainbows. Scientific American, June, 1980. pp. 146.
- Young, H.D. (1992). Physics. 8th ed., Addison Wesley, pp. 955-956 .
- Cartwright, C.M. (1992). Rainbows. Physics Education, 27, pp. 155-158.
- Siddons, C. (1988). Experiments in Physics. Chapter 9, pp. 66-72.
- Williamson, S.J. & Cummins, H.Z. (1983). LIGHT and COLOR - in nature and art. John Wiley and Sons.
- Minnaert, M. (1954). The Nature of Light & Colour in the Open Air. Dover Publications Inc.
- Humphreys, W.J. (1964). Physics of The Air. Dover Publications Inc.
- Boyer, C.B. (1987). The Rainbow - From Myth to Mathematics. (With new color illustrations and commentary by Robert Greenler). N.J.: Princeton University Press.
- Hecht, E. (2014). Optics. Fourth Ed., England and U.S.A.: Pearson Education Limited.
- Jacobs, D. (1995). Somewhere over the Rainbow. Physics Review, May 1995, pp. 2 - 5.

בהצלחה רבה בחקר תופעת הקשת בענן!

ד"ר עמוס כהן - אורנים - המכללה האקדמית לחינוך
ומרכז אחר"ת, בית המדרש 'נקודת ארכימדס' למורים חוקרים בפיזיקה.

דוא"ל: amos_c@oranim.ac.il

ד"ר עמוס כהן - מנהל בית המדרש למנחי חקר בפיזיקה 'נקודת ארכימדס' במרכז אחר"ת בגליל
מרצה בכיר לפיזיקה ולהוראת המדעים, אורנים - המכללה האקדמית לחינוך

דוא"ל: amos_c@oranim.ac.il

טלפון נייד: 0524794961

אתר מרכז אחר"ת: <http://www.acheret.org.il>

דף אישי במכללת אורנים: http://www.oranim.ac.il/personal/amos_c/default.aspx

אתר אישי עם פיזיקה מחקרית: [קשת מדעים](#)