



ראייתו של אייל הצפון ויתרונותיו של אף זוהר

Nathaniel J. Dominy^{1,2*}

¹המחלקה לאנתרופולוגיה, Dartmouth College, Hanover, ניו המפשייר, ארצות הברית
²המחלקה למדעי הביולוגיה, Dartmouth College, Hanover, ניו המפשייר, ארצות הברית

סוקרת צעירה

CAROLINE
גיל: 13



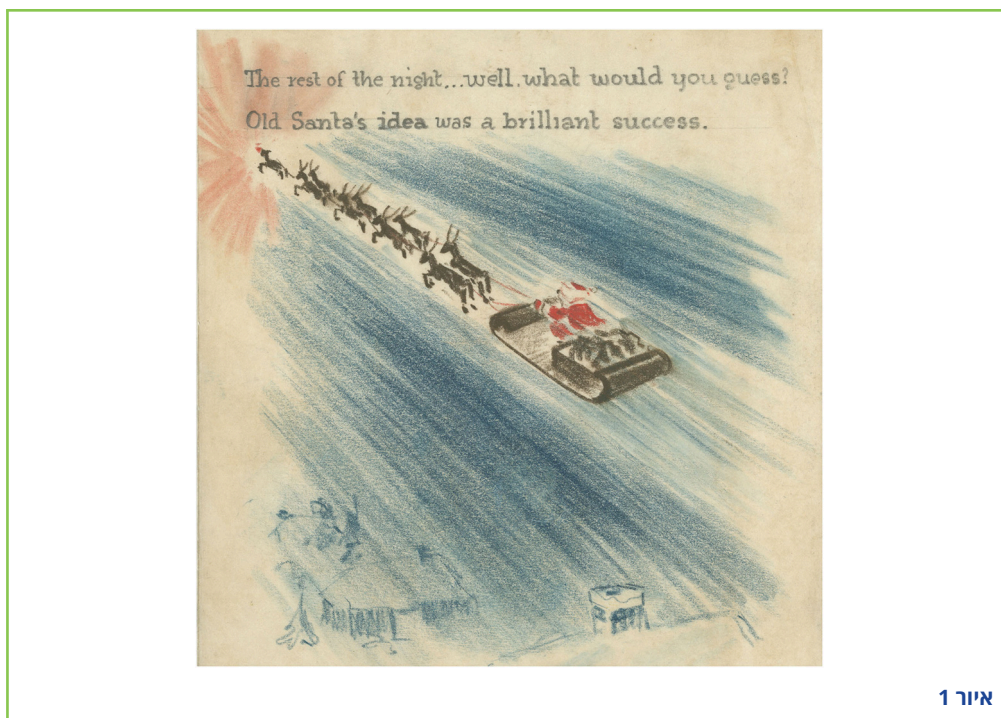
לאייל הצפון הארקטי יש מערכת ראייה ועיניים מיוחדות מאוד. בניגוד לרוב היונקים, אייל הצפון יכול לראות אור אולטרה-סגול שהוא בלתי נראה עבורנו. יש לו בעין גם רקמה מחזירת אור אשר משנה את צבעה מזהוב, במהלך חודשי הקיץ, ועד כחול עמוק במהלך חודשי החורף. יחד, התכונות המיוחדות האלה מסייעות לאייל הצפון לראות מזון צמחי או טורפים בשלג, במיוחד במהלך החורף כשאור היום באזור הארקטי הוא עמום וסגולגל. בעיה אחת שיש בראייה טובה של צבעים כחולים וסגולים היא שהצבעים האלה הם בלתי נראים בערפל. בערפל, אורות אדומים נראים הכי טוב, ומכך נובע שאייל הצפון, יותר מיונקים אחרים, יכול להרוויח מאף שמייצר אור אדום. ידוע שלפחות זן אחד של אייל הצפון הוא בעל אף שפולט אור (זוהר) אשר פועל טוב בתנאים של ערפל. מטרת המאמר היא להעריך את מידת האדמומיות של האף הזה, ולחקור את יתרונותיו ואת חסרונותיו.

הקדמה

"רוזולף אייל הצפון אדום-האף" הוא סיפור קלאסי על התנהגותן של חיות, פרי עטו של הסופר Robert L. May [1]. הוא מתאר איילי צפון שמשתעשעים ומשחקים בינם לבין עצמם,

איור 1

רשמיו המקוריים של
 Robert L. May מאבחנותיו
 על איילי הצפון נכתבו במשקל
 שירי שנקרא
 anapestic tetrameter.
 המחברת שלו כללה רישומים
 של Denver L. Gillen,
 והעמוד שבתמונה לעיל
 ממחיש את האף האדום
 הזוהר של רודולף בתנאים
 סביבתיים של חושך וראות
 מוגבלת (שוחזר ברשות
 Rauner Special
 Collections Library
 מ-Dartmouth College).



איור 1

ומדירים מהקבוצה אייל בשם רודולף בְּנֶשֶׁל אפו הגדול והאדום באופן חריג. האור שנפלט מאפו של רודולף, שניתן לתיאור כ"מְסַנֵּר" באור יום ו"זוהר" באור לילה, התברר מאוחר יותר כיעיל כאשר בליל כל הקדושים הערפל העבה של הקוטב הצפוני הפריע להכנות הטיסה של סנטה קלאוס והצוות שלו, שמורכב מ-8 איילי צפון. בתנאים הערפיליים האלה, אפו של רודולף פלט מספיק אור כדי לאפשר טיסה בטוחה וְלְחַלֵּק את המתנות ברחבי העולם (איור 1). הסיפור הזה על אפו של רודולף והגאונות שבו מְכַר למרבית הילדים, המבוגרים והביולוגים בארצות הברית, אולם הוא גם נחשב כְּאֵנוֹמֵלִי, כלומר יוצא דופן באופן חריג. ככלל, מדענים נוטים להימנע ממחקר של תכונות אנומליות. העובדה שְׁאֵפִים לומינֶסְנֵטִים (זוהרים) הם נדירים כל כך מסבירה מדוע הצבע והיתרונות או החסרונות של אפים זוהרים כמעט ולא נחקרו. ממצאים חדשים על צבע הראייה של אייל הצפון יכולים לְסַפֵּק רמזים חשובים בדבר הערך של אף זוהר. לדוגמה, התגלה לאחרונה כי אייל הצפון הארקטי (ששמו המדעי הוא *Rangifer tarandus tarandus*) יכול לראות אור **אולטרה-סגול** (UV) [2], שהוא בלתי נראה עבור בני אדם ועבור מרבית היונקים שפעילים בעיקר בשעות היום. היתרונות של ראיית UV ידועים, והיכולת לראות UV יכולה לסייע לאייל הצפון לראות דברים חשובים, כמו טורפים או מזון. לדוגמה, פרוותם הלבנה של זאבים וְחֵלְקֵם מהצמחים האכילים החשובים, כמו חֲזִיזֵית, סופגים אור UV וגורמים להם להיראות שחורים, כך שְׁקָל יותר לראותם בשלג מְאָחַר ששלג מחזיר קרינת UV ועל כן נראה בוהק [3]. היתרונות של ראיית אור UV עשויים להיות משמעותיים ביותר באמצע החורף, כשהשמש נמוכה בשמי האזור הארקטי ופיזור האור גבוה באטמוספירה מייצר אור שהוא בעיקר בקרינת UV ואורכי גל סגולים [4].

מפתיעה אפילו יותר היא יכולתן של עֵינֵי אייל הצפון לשנות את צְבָעֵן עם השתנות עונות השנה. בעיניהם של איילי הצפון יִשְׁנֶה שכבה מחזירת אור דמוית מְרָאָה שנקראת **Tapetum lucidum**, אשר משמעותה בלטינית "שטיח מבריק". השכבה הזו גורמת לעיניהם לזרוח, תופעה שנראית לעיתים קרובות כשפנסי המכוניות שלנו מאירים לתוך עיניהן

לומינֶסְנֵטִי

(Luminescent)

נהורני – פולט אור, בוהק, זוהר.

אולטרה-סגול

(Ultraviolet)

סוג של אור שהוא בלתי נראה עבור אנשים, אולם נראה עבור חיות מסוימות. לדוגמה, ציפורים וחרקים רבים יכולים לראות אור אולטרה-סגול.

(Tapetum lucidum)

שכבה מחזירת אור דמוית מְרָאָה בעיניהן של חלק מהחיות, אשר גורמת לעיניהם שלהן לזרוח כאשר אור פוגע בהן.

של חיות פרא או של חיות מחמד. רקמת ה-tapetum lucidum חשובה עבור חיות ליליות (שפעילות בשעות הלילה), מאחר שהיא מאפשרת להם לראות בחושך. הדבר יוצא הדופן לגבי איילי הצפון הוא שה-tapetum lucidum שלהם משתנה מצבע זהוב עשיר במהלך הקיץ לצבע כחול עמוק במהלך החורף [5]. הגורמים שיוצרים את שינוי הצבע הזה ידועים, אולם היתרונות (בהנחה שישנם) עדיין מסתוריים. אפשרות אחת היא שהשינוי הזה עשוי להגביר את יכולתו של אייל הצפון לראות אור כחול בתנאים של תאורה עמומה. לכן, ברור שלאייל הצפון הארקטי יש סוג ראייה שהוא מעניין מאוד ובלתי שגרתי. אולם בד בבד היכולת המיוחדת הזו לראות אור כחול היא ללא ספק יתרון בתנאים הערפיליים של סוף חודש דצמבר.

העברת אור בערפל

ערפל הוא הצטברות של טיפות מים קטנטנות או גבישי קרח שמרחפים מעל פני השטח של כדור הארץ. הוא נוצר כאשר לחות באוויר מתקררת מתחת לטמפרטורה מסוימת, וחלק מאדי המים מתעבים (כלומר הופכים לטיפות מים נוזליות קטנטנות). לפי הגדרה, מזג האוויר נחשב לערפילי כאשר איננו יכולים לראות יותר מ-1,000 מטרים קדימה. בספרו, Robert L. May מתאר את הערפל כ"עבה כמו קצף לבן" וגורם לראות קרובה לאפס, מה שמרמז על כך שהערפל יכל להיות אחד משני סוגים: ערפל של קרינה או ערפל של קרח. ערפל של קרינה נוצר כאשר הקרקע מקררת את האוויר שמעליה על-ידי מנע ביניהם. ערפל של קרח נוצר כאשר אוויר חם בא במגע עם אוויר קר במיוחד, ואדי המים משתנים ישירות למוצק ומייצרים גבישי קרח קטנטנים שמרחפים באוויר.

היכולת של האור לזרוח דרך ערפל משתנה לפי הצבעים של האור. אור אדום יותר מתקדם הכי רחוק, אולם המרחק שהאור יכול לעבור קטן אם גודלם של גבישי הקרח או טיפות המים בערפל הוא גדול [6]. אם הטיפות הן מעל גודל מסוים, אז התהליך שנקרא **פיזור מיי** יכחיד את כל סוגי האור [7]. פיזור מיי מתרחש ברוב סוגי הערפל, מה שהופך את הראייה לקשה דרך רוב סוגי הערפל. אולם, אף אדום זוהר צפוי להתעלות על כל סוג אף אחר, כשהאור האדום מתקדם הכי רחוק בערפל של קרח מאחר שבגבישי הקרח קטנים יותר מאשר טיפות המים בערפל של קרינה [8, 9]. כדי להבין עד כמה אפו של רודולף יכול לסייע בערפל, הכרחי לדעת מהו הצבע המדויק של האור שזוהר מהאף שלו.

צבע האף של רודולף

רָמָז לצבע אפו של רודולף מגיע מגרסתה של Barbara Hazen לסיפור המקורי של May [10]. בגרסה הזו, רודולף מתחבא מאחורי שיח של צמח הצינית כך ש"אפו האדום התמזג עם הציניות האדומות הבהקות". איור 2 ממחיש את האירוע הזה ואת כמות האור של כל אורך גל, שהוא דרך למדידה של הצבע, אשר מקפץ מציניות או מוחזר מהן. סוג כזה של גרף נקרא ספקטרום התְּזָרָה. אם אנו מניחים שהציניות שמוצגות באיור 2 דומות לאלה שיש באזור הארקטי, אנו יכולים להעריך שאפו של רודולף מייצר אור בעוצמה מקסימלית בסביבות אורך גל של 700 ננומטרים, מאחר שזהו אורך הגל של האור שמוחזר באופן החזק ביותר מציניות מהסוג הזה. התְּזָרָה מקסימלית באורך גל של 700 ננומטרים משמעותה שהציניות, ולכן גם אפו של רודולף, צריכים להיות אדומים להפליא – ככל הנראה במידת האדמומיות המקסימלית שעניהם של יונקים מסוגלות לראות.

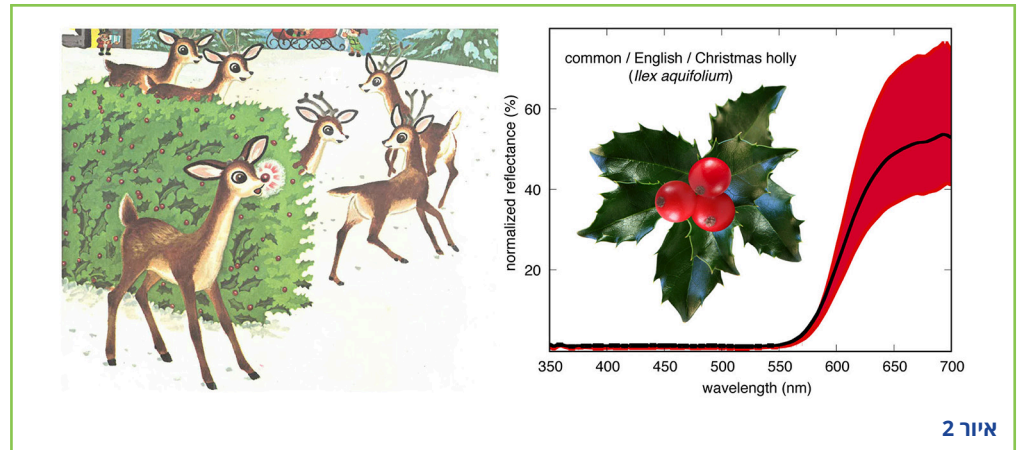
פיזור מיי

(Mie scattering)

תהליך שנקרא על שמו של Gustav Mie, פרופסור גרמני לפיזיקה. פיזור זה מתרחש כאשר חלקיקים עגולים או כדוריים בגדלים מסוימים גורמים לאור להתפזר.

איור 2

גרסה מאוחרת יותר של רודולף אייל הצפון אדום האף [10] דנה בצבעם הדומה של ציניות ושל אפו של רודולף. איור ההמחשה הזה של Richaed M. Scarry מוצג יחד עם תמונה של פרי הציניות (שם באנגלית: Christmas holly; שם מדעי: *Ilex aquifolium*). הגרף מראה את ספקטרום ההחזרה של הציניות, שמתאר באופן בסיסי את האדמומיות והבוהק של צבעם. האזור האדום מייצג את השונות, והקו השחור מייצג את הממוצע מדגימה של 10 ציניות.



איור 2

ההערכה הזו היא רק ניחוש מושכל, אולם היא מציעה שאור הערפל האדום טוב יותר מאשר כל אור אחר. אפו של רודולף עשוי להיות חשוב במיוחד בחורף, כשעיניהם של אייל הצפון רואות טוב יותר צבעים כחולים. מאחר שערפל חוסם אור כחול, הגיוני שאיילי הצפון יזדקקו הכי הרבה לאור ערפל בחודשי החורף כמו דצמבר. זה מסייע להסביר מדוע אפו של רודולף היה כה שימושי עבור טיסה בערפל כבד. אולם אף אדום זוהר עשוי להיות גם בעל חסרונות. באפיהם של איילי הצפון יש מערכת של המון ורידים קטנטנים [11], ולכן הם די חמים [12], תכונה שלא רק מונעת מהם לקפוא אלא גם גורמת לחום מגופו של אייל הצפון להיאבד לאוויר שבסביבה. אם חום רב מדי נאבד מאפו הזוהר, רודולף יכול להסתכן בהיפותרמיה (תת-חום, טמפרטורת גוף נמוכה באופן מסוכן) בתנאי מזג אוויר קרים במיוחד. לכן, חשוב מאוד שילדים יספקו מאכלים עתירי קלוריות כדי לסייע לרודולף לשמור על חום הגוף שלו בערב חג המולד.

סך הכול, היתרונות של אף לומיניסנטי מסתמנים כגדולים יותר מאשר החסרונות, מה שמעלה את השאלה עד כמה תכופים מופעים של אפים אדומים אצל איילי הצפון. נכון להיום, אנו יודעים רק על אף לומיניסנטי אחד באוכלוסיית איילי הצפון, אולם היתרונות שלו מעלים את הסבירות שהוא יועבר הלאה לדורות הבאים של איילי הצפון. מצד אחר השכיחות של מזג אוויר ערפילי יורדת ברחבי העולם בעקבות שינוי האקלים [13], מה שעשוי לגרום ליתרונות של אף אדום זוהר להיות פחות חשובים בעתיד ממה שהם כיום. השערויות אחרות מציעות כי אפו של רודולף מזהם ולכן הוא אדום ונפוח [14]. רעיונות שונים כל כך בדבר אדמומיות אפו של רודולף מצביעים על כך שנדרשת חקירה נוספת, ואנו מקווים שקוראי המאמר הזה יסייעו לעתיד המחקר על תכונות של אור וערפל באזור הארקטי. מחקרים כאלה יוכלו לשפוך אור חדש על הביולוגיה המדהימה של אייל הצפון ועל מערכת הראייה המופלאה שלו.

תודות

אני אסיר תודה ל- A. L. Witzel, M. R. Swan, J. D. Shaw על הסיוע הארכיוני וכן לצוות ספריית אוספים מיוחדים של ראונר, מכללת דרטמות'. אני אסיר תודה למשפחת May על שהתירו וסייעו לשכפל תמונות של רודולף. המחקר וההשקפות שהוצגו כאן קיבלו השראה מבתי אלינור, שאוהבת לשאול למה.

מימון

המימון התקבל מקרן David and Lucile Packard (מלגה במדע והנדסה מספר 2007-31754).

מקורות

1. May, R. L. 1939. *Rudolph the Red-Nosed Reindeer*. Chicago, IL: Montgomery Ward.
2. Hogg, C., Neveu, M., Stokkan, K.-A., Folkow, L., Cottrill, P., Douglas, R., et al. 2011. Arctic reindeer extend their visual range into the ultraviolet. *J. Exp. Biol.* 214:2014–9. doi: 10.1242/jeb.053553
3. Meinander, O., Kontu, A., Lakkala, K., Heikkilä, A., Ylianttila, L., and Toikka, M. 2008. Diurnal variations in the UV albedo of arctic snow. *Atmos. Chem. Phys.* 8:6551–63. doi: 10.5194/acp-8-6551-2008
4. Tyler, N. J. C., Jeffery, G., Hogg, C. R., and Stokkan, K.-A. 2014. Ultraviolet vision may enhance the ability of reindeer to discriminate plants in snow. *Arctic* 67:159–66. doi: 10.14430/arctic4381
5. Stokkan, K.-A., Folkow, L., Dukes, J., Neveu, M., Hogg, C., Siefken, S., et al. 2013. Shifting mirrors: adaptive changes in retinal reflections to winter darkness in Arctic reindeer. *Proc. R. Soc. Lond. B* 280:20132451. doi: 10.1098/rspb.2013.2451
6. Arnulf, A., Bricard, J., Curé, E., and Véret, C. 1957. Transmission by haze and fog in the spectral region 0.35 to 10 microns. *J. Opt. Soc. Am.* 47:491–8. doi: 10.1364/josa.47.000491
7. Grabner, M., and Kvicera, V. 2011. The wavelength dependent model of extinction in fog and haze for free space optical communication. *Opt. Express* 19:3379–86. doi: 10.1364/oe.19.003379
8. Kumai, M. 1973. Arctic fog droplet size distribution and its effect on light attenuation. *J. Atmos. Sci.* 30:635–43. doi: 10.1175/1520-0469(1973)030<0635:AFDSDA>2.0.CO;2
9. Price, J. 2011. Radiation fog. Part I: observations of stability and drop size distributions. *Boundary-Layer Meteorol.* 139:167–91. doi: 10.1007/s10546-010-9580-2
10. Hazen, B. S. 1958. *Rudolph the Red-Nosed Reindeer*. New York, NY: Golden Press.
11. van der Hoven, B., Klijn, E., van Genderen, M., Schaftenaar, W., de Vogel, L. L., van Duijn, D., et al. 2012. Microcirculatory investigations of nasal mucosa in reindeer *Rangifer tarandus* (Mammalia, Artiodactyla, Cervidae): Rudolph's nose was overheated. *Deinsea* 15:37–46. Available from: http://www.hetnatuurhistorisch.nl/fileadmin/user_upload/documents-nmr/Publicaties/Deinsea/Deinsea_15/DSA15_Hoven_et_al.pdf
12. Ince, C., van Kuijen, A.-M., Milstein, D. M. J., Yürük, K., Folkow, L. P., Fokkens, W. J., et al. 2012. Why Rudolph's nose is red: observational study. *BMJ* 345:e8311. doi: 10.1136/bmj.e8311
13. Torregrosa, A., O'Brien, T. A., and Faloona, I. C. 2014. Coastal fog, climate change, and the environment. *Eos Trans. Am. Geophys. Union* 95:473–4. doi: 10.1002/2014EO500001

14. Halvorsen, O. 1986. Epidemiology of reindeer parasites. *Parasitol. Today* 2:334–9. doi: 10.1016/0169-4758(86)90053-0

פורסם אונליין: 08 בפברואר 2019

נערך על ידי: Silvia A. Bunge, University of California, Berkeley, USA

ציטוט: Dominy NJ (2019) ראיתו של אייל הצפון ויתרונותיו של אף זוהר. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2015.00018-he

תורגם והותאם:

Dominy NJ (2015) Reindeer Vision Explains the Benefits of a Glowing Nose. *Front. Young Minds* 3:18. doi: 10.3389/frym.2015.00018

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

COPYRIGHT © Dominy 2015. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים (המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה). השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרת צעירה

CAROLINE, גיל: 13

שמי קרוליין. אני בת 13 ולומדת בכיתה ז'. הצבע האהוב עליי הוא ירוק, והמספר האהוב עליי הוא 36. בזמני הפנוי אני נהנית מקריאה, מאומנות, מיוגה, מצילום, מעזרה לקהילה ומתיפוף.

הכותב

NATHANIEL J. DOMINY

אני מתעניין בצמחים ובחיות, במיוחד בפרימטים, אשר כוללים בני אדם וקופים. עבודתי כפרופסור היא לשאול ולחקור שאלות על האופן שבו פרימטים מוצאים מזון אכיל, כיצד הם מעכלים אותו וכיצד אכילת מזון משפיעה על ההתנהגות שלהם ועל הישרדותם. אני חושב שמחקר של התהליך הזה עשוי לסייע לנו להבין מדוע הגוף שלנו שונה כל כך מגופים של חיות אחרות. לכן, אני מבלה זמן רב בצפייה בפרימטים אוכלים במרכז אמריקה, באפריקה ובדרום אסיה. זו עבודה מהנה מאוד. כשאינני עובד אני מבלה עם שני ילדיי - אלינור בת ה-4, ואמרסון בן השנתיים. אני גם אוהב לקרוא על תולדות הטבע ולטייל. *nathaniel.j.dominy@dartmouth.edu



Hebrew version
provided by

מזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים (נ.ר.)
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem

