

# השמש והירח חידה בשמיים

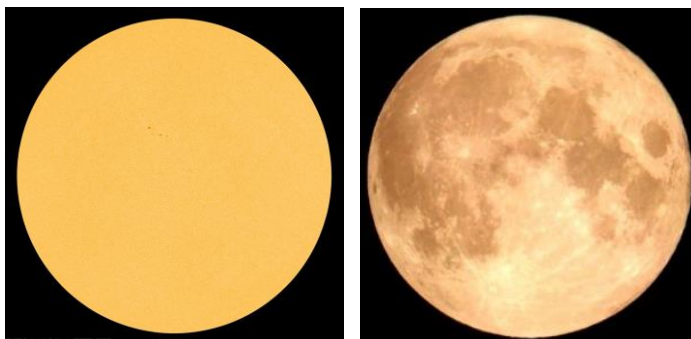
אורי לכיש

urila@zahav.net.il

**תקציר:** הדמות האחידה של הירח המלא ידועה משחר ההיסטוריה. בעשורים האחרונים יש תמונות בקונפיגורציה דומה של הארץ כפי שהיא נראית מהירח ומהחלל. כמו כן יש תמונות דומות של כל כוכבי הלכת והירחים שלהם. התמונות הן כולן אחידות בקרוב. תמונות כאלה נחשבות לא-למברטיות כי הן לא מקיימות את חוק הקוסינוס של למבר. תיאוריות של האחידות עוסקות בתמונות הירח בלבד. מעבר לכך שהן אינן משכנעות למקרה של הירח, הן לא ניתנות ליישום כמעט בכל המקרים האחרים. יש אלפי אלפים של תמונות דומות, אבל אין אפילו תמונה אמיתית בודדת אחת אשר מקיימת את חוק הקוסינוס של למבר. כל התמונות, אשר כאילו מקיימות את החוק, הן מסומלצות לפחות בחלקן. מוצג כאן חישוב, המבוסס על עקרונות ראשוניים, אשר מבהיר את אחידות התמונה בכל התמונות ואשר אינו תלוי בתכונות פני השטח של הגופים המצולמים. האחידות היא תוצאה ישירה של פיזור אקראי של אור השמש. אין צורך בהנחות נוספות, או במודלים נוספים כדי להצדיק את האחידות. תמונות השמש והירח המלא אחידות, למרות שצפיפות האור על פני השמש אחידה, וצפיפות האור על פני הירח אינה אחידה. ואף-על-פי-כן, תמונת האור האחידה של הירח המלא היא תוצאה ישירה של פיזור אור שמש יחיד מהירח.

תמונת השמש אחידה מחוץ למעט טשטוש בהיקפה. תמונת הירח המלא מראה פרטים של הרים ושל אגמים יבשים, אבל מחוץ לכך תמונת הירח אחידה כמו זאת של השמש.

שתי התמונות הבאות בתמונה-1 מראות את השמש והירח המלא:



תמונה-1: תמונת השמש<sup>1</sup> ותמונת הירח המלא<sup>2</sup>. בשתייהן התפלגות הבהירות של האור אחידה.

השמש היא מקור אור למברטי, כל נקודה על פניה מפזרת אור בצורה אחידה בכל הכיוונים. הירח מפזר את אור השמש שנפל על פניו, ולפי חוק פיזור הקוסינוס של למבר, אור הירח יהיה הבהיר ביותר במרכזו, ועצמת האור תדעך לאפס כשנעים מהמרכז להיקף.

אבל, כפי שתמונה-1 מראה, וכפי שאפשר לראות בעין בכל חודש, תמונת הירח המלא אחידה. תיאוריות של פיזור אור לא למברטי מפני הירח הוצעו כדי להסביר את התצפיות<sup>3,4</sup>.

תמונות של כל כוכבי הלכת, שצולמו מהחלל עם השמש מאחור לצופה, מראות אחידות דומה<sup>5</sup>. מאדים דומה לירח, אבל נוגה מוקף בעננים כבדים ואור השמש מפזר ממנו מפאזה גזית.

תמונה-2 מראה את הארץ כפי שהיא נראית מהירח:<sup>6</sup>



תמונה-2: הארץ כפי שהיא נראית מהירח.

התמונה כוללת שטחים גדולים של אדמה מוצקה, מים נוזלים, וענני גז, והאחידות נראית בכל פאזה. לכן, לא נראה כי האחידות הזאת היא תוצאה של תכונה כלשהי של התווך המפזר. מודלים של פיזור אור למקרים אלו עוסקים רק בפיזור משטחים מוצקים. קשה מאוד למצוא הסברים או מודלים שיעבדו לפיזור משלשת הפאות.

נוסף לירח המלא, יש תמונות רבות של כדורים ומשטחים אחרים עקמומיים עם תאורה דומה בכוון אחד, אבל שוב, קשה למצוא תמונות של איזה מהם שמציית לחוק הקוסינוס של למבר. נראה שכל התמונות שמצייתות לחוק הן תמונות סימולציה, לפחות חלקית.

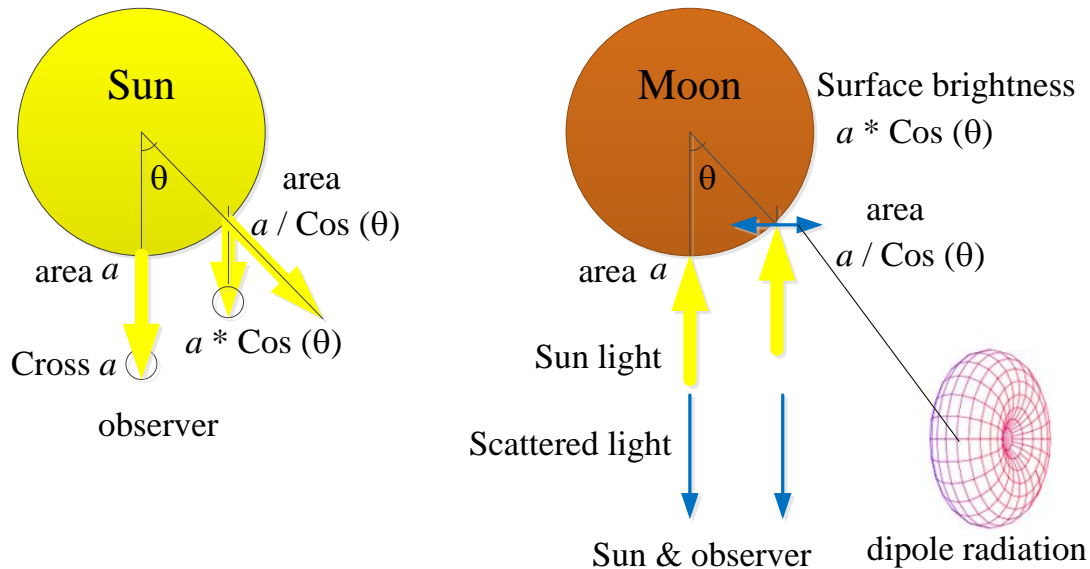
כאשר גל אלקטרומגנטי מתקדם בתווך הוא מקטב את החומר שלו, וכל דיפול מקוטב הוא מקור של גל אלקטרו מגנטי. האפקט של כל הדיפולים מחושב, למשל, על-ידי חיבור וקטורי של כל השדות החשמליים שלהם. לכל דיפול יש פאזה שונה שתלויה במקומו במרחב, ואם החומר אחיד שדות אלו מבטלים זה את זה בכל הכוונים חוץ מהכוון קדימה, שבו האפקט הוא שבירה.

פיזור אור בא מחוסר אחידות החמר בתווך, אור מפוזר יכול להתקדם בכל הכוונים. עוצמת האור המפוזר היא סכום העוצמות של המרכזים המפזרים והוא אינו תלוי בפאות של הדיפולים המפזרים.

מטרת הדיון להלן היא להצביע על כך שאחידות התמונה של הירח המלא היא תוצאה ישירה של פיזור אקרעי. מנגנונים או מודלים נוספים אינם נחוצים. פני השטח של הירח הם מפזר למברטי אחרי הכל, אפילו שהאור המפוזר אינו מציית לחוק הקוסינוס של למבר.

חשוב על קו דמיוני בין השמש לארץ, או בין השמש לירח, ועל יחידת שטח  $a$  על מישור ניצב לקו הזה.

תמונה-3 מראה צופה על הארץ מסתכל ישירות בשמש (שמאל), או מסתכל בלילה אל הירח המלא, כאשר השמש מאחוריו (ימין).



תמונה-3: מצב יחסי של השמש, הירח וצופה על הארץ.

(1) שטח שמש  $a / \cos(\theta)$  נצפה דרך שטח חתך  $a$ . אור שמש  $a * \cos(\theta)$  מכוון לצופה על הארץ.

(2) בהירות שמש  $a * \cos(\theta)$  על הירח, מאירה שטח  $a / \cos(\theta)$  מבעד ל  $a$ . אור השמש מקטב את פני שטח הירח בכיוון ניצב להתקדמות האור. הדיפולים של הירח מפזרים אור מקסימאלי בחזרה אל השמש ואל צופה על הירח.

$\theta$  היא הזווית בין קו ממרכז השמש לצופה על הארץ, לבין קו ממרכז השמש לנקודה כלשהי על פניה.

השמש היא מקור אור למברטי שנפלט מפניה, תמונה-3 (שמאל). כל נקודה על פניה פולטת אור באותה עוצמה בכל הכוונים של הזווית המרחבית  $2\pi$ , והאור הממוצע הנפלט מהנקודה, ניצב לפני השמש באותה נקודה.

$\theta$  בתמונה-3 היא הזווית בין קו ממרכז השמש לצופה על הארץ, ובין קו ממרכז השמש לנקודה כלשהי על פניה.  $\theta$  מגדירה בצורה דומה כל מקום על פני הירח.

תחשוב על קו דמיוני בין מרכז השמש למרכז הארץ, או בין מרכז השמש למרכז הירח, ויחידת שטח  $a$  על מישור הניצב לקו זה.

השטח על פני השמש שרואים דרך יחידת השטח  $a$  הוא:

$$a / \cos(\theta), \quad (1)$$

לכן, הוא שווה ל- $a$  במרכז השמש, והוא גדל ככל שמתקרבים להיקף. האור הממוצע שנפלט משטח זה ניצב לפני השמש, והמרכיב שרואה צופה על הארץ, יהיה פרופורציוני ל- $\cos(\theta)$ .

מכך נובע שאור השמש, אשר רואה צופה על הארץ דרך יחידת שטח החתך  $a$ , יהיה פרופורציוני ל-:

$$I_s * (a / \cos(\theta)) * \cos(\theta). \quad (2)$$

כאשר  $I_s$  צפיפות אור השמש על פניה. לכן האור אל הצופה אינו תלוי ב- $\cos(\theta)$ , ובהירות השמש הנצפית מהארץ תהיה אחידה<sup>7-8</sup>.

המקרה של הירח המלא, תמונה-3 (ימין), נדון בצורה דומה. אבל אור הירח הוא אור שמש מפוזר, ואור השמש על פני הירח, הוא  $I_m * \cos(\theta)$ , כאשר  $I_m$  היא צפיפות אור השמש במרכז פני הירח.

בחזרה על אותם נימוקים, אור הירח המלא יהיה פרופורציוני ל-:

$$I_m * \cos(\theta) * (a / \cos(\theta)) * \cos(\theta). \quad (3)$$

$\cos(\theta)$  השמאלי במשוואה (3) בא מאור השמש הדועך על פני הירח כאשר נעים אל היקפו. לכן, על-פי משוואה (3), גם תמונות הירח המלא תדעך לאפס במעבר בין המרכז להיקף. זה לא המקרה כפי שרואים בתמונה-1 (ימין), או כאשר מסתכלים על הירח המלא בשמיים.

בחזרה מנגנון פיזור האור קצת יותר לעומק תביא תועלת. אור שמש שנופל על הירח, תמונה-3 (5), יוצר תנודות של מטעני דיפול על פניו. כל דיפול כזה הוא מקור של אור, והאור המפוזר הכללי נובע מתנודות כל הדיפולים.

כל דיפול מתנדנד בכיוון השדה החשמלי של אור השמש שבא אליו, זאת אומרת, במישור ניצב לכיוון תנועת האור, והפליטה המכסימלית של קרינת דיפול היא בניצב לכיוון התנודה שלו, וזה אומר בחזרה אל השמש.

לכן, אור הירח הממוצע יהיה מכוון בחזרה אל השמש, וכשהירח מלא, גם אל צופה בארץ. הוא לא יהיה ניצב לפני הירח, כמו במקרה של פני השמש. אין צורך ב- $\cos(\theta)$  הימני של משוואה (2) במשוואה (3).

כשחוזרים על הנימוק עם אור שמש דועך על פני הירח, אור הירח המפוזר יהיה פרופורציוני ל-:

$$(a / \cos(\theta)) * \cos(\theta), \quad (4)$$

וצופה על הארץ יראה ירח מלא אחיד.

בסיכום, לאור הירח המלא הממוצע, המפוזר אקרעית מפניו, מקסימום המכוון בחזרה אל השמש כי הדיפולים המפזרים על הירח מתנדנדים במישור ניצב לכיוון קרינת השמש. כל חישוב, שאינו לוקח בחשבון את כוון התנודה של הדיפולים, לא יהיה נכון.

פיזור אור לאחור יוצר תמונת ירח מלא אחידה. כמו כן תמונה אחידה של הארץ, ותמונות אחידות של כל כוכבי הלכת והירחים שלהם.

פיזור אור לאחור ממשטח כלשהו לא יהיה תלוי בזווית המשטח יחסית לאור הפוגע, ומשטח עקמומי יראה אחיד. לכן, לא מפליא שקשה מאוד למצוא תמונות אמיתיות שמקיימות את חוק הקוסינוס של למבר.

בחשוב חוק הקוסינוס של למבר יש הנחה סמויה שהדיפולים המפזרים מתנדנדים באופן אקראי בכל הכוונים במרחב. זה לא המקרה עם הירח, ויתכן גם במקרים אחרים. כאשר יש פיזור אור בודד, הדיפולים של האור המתפזר שומרים את מישור הפולריזציה של אור השמש, ומובילים לתמונת פיזור אחידה. כאשר יש מספר רב של פיזורים תכונת הקיטוב הזאת נעלמת. ואז האור המפוזר יהיה לפי חוק הקוסינוס של למבר, לפי משוואה (3).

אבל, ככל שהתהליך מכיל יותר ויותר שלבי פיזור, ההסתברות שלו תלך ותרד. הפיזור הראשון יהיה הקובע ביותר.

תמונת הירח מראה כי פיזור אור בודד הוא המנגנון שאחראי לאחידות. במקרים מסוימים פיזור אור מרובה יוסיף חסר אחידות כלשהו.

<sup>1</sup> Sun image [https://sdo.gsfc.nasa.gov/assets/img/latest/latest\\_1024\\_HMIIF.jpg](https://sdo.gsfc.nasa.gov/assets/img/latest/latest_1024_HMIIF.jpg)

<sup>2</sup> Moon image <http://www.newsfour.ie/wp-content/uploads/2018/02/moon-1.jpg>

<sup>3</sup> Z.K. Kopal, *An Introduction to the Study of the Moon*, (Springer, 1966), p. 330

<http://pdf.to/bookinfo/an-introduction-to-the-study-of-the-moon.pdf/>

<sup>4</sup> Michael K. Shepard, *Introduction to Planetary Photometry*, *Contemporary Physics*, 59(1):1-1 · October 2017, (Cambridge, 2017)

<sup>5</sup> True-Color Photos of All the Planets <https://owlcation.com/stem/True-Color-Photos-of-All-the-Planets>

<sup>6</sup> Earth image <https://qz.com/458826/ behold-nasas-first-image-in-decades-of-the-whole-earth/>

<sup>7</sup> W. J. Smith, *Modern Optical engineering*, 3<sup>rd</sup> Ed., (McGraw-Hill, NY, 2000), pp. 221-222.

<sup>8</sup> F. L. Pedrotti, L. S. Pedrotti, *Introduction to Optics*, 2<sup>nd</sup> Ed. (Prentic-Hall, NJ, 1993), pp. 11-12.

<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1808/1808.01024.pdf>

version 1: <http://urila.tripod.com/Moon ver-1.pdf>

<http://urila.tripod.com/oldLevana.pdf>

ברשת: יולי 2018

<http://urila.tripod.com/Levana.pdf>

עדכון: מרץ 2020

<http://urila.tripod.com/Moon.pdf>

באנגלית:

## חושב שעמוד זה נכון? בבקשה הפץ אותו לאחרים

### מוסר השכל של סיפור:

פיזור אור לאחור, בדומה לתמונה האחידה של הירח המלא, הוא תוצאה ישירה של תהליך בודד של פיזור אור. בתהליך פיזור אור בודד הקרינה המפוזרת קוהרנטית כי הדיפולים המפזרים מופעלים ישירות על ידי האור המאיר את החומר.

אין צורך במודלים כדי לדון בתופעה ולהבין אותה.

אור מפוזר נחשב בספרות כאור דיפוזיבי, אור אשר עובר מספר תהליכי פיזור לפני שהוא עוזב את החומר המפזר. אור מפוזר דיפוזיבי חייב לציית לחוק הקוסינוס של פיזור למבר. כאשר האור המאיר הוא חד כווני, לאור מפוזר לאחור מפני שטח של כדור תהיה עצמת פיזור מכסימלית במרכז פני השטח של הכדור, והיא תלך ותדעך לאפס לפי חוק הקוסינוס כלפי ההיקף.

אף-על-פי-כן, הירח המלא נראה אחיד. אנשים ממשויכים להניח שהאור מפוזר ממנו בתהליך דיפוזיבי, ועושים סלטות כפולות, עם פליק-פלאק לאחור, כדי לנסות להסביר את האחידות, לדעת, לא בהצלחה.

יותר מכך. תמונת פני הכדור האחידה, או הקרובה לכך, משותפת לכל הפלנטות והירחים שלהן, כולל את כדור הארץ כפי שהוא נראה מהירח. למעשה, מתוך אלפי אלפים של תמונות אמיתיות דומות, אין אפילו תמונה אמיתית אחת שמצייתת לחוק הקוסינוס של למבר. התמונות היחידות שמצייתות לחוק הן תמונות שעברו שיפצור, תמונות שעברו סימולציה, לפחות חלקית. שיפצור – אם התיאוריה לא מתאימה למציאות, משנים את המציאות.

בניגוד לכל זה, אם מניחים שפיזור האור הוא תהליך של פיזור בודד, אז כל הדיפולים המפזרים מופעלים ישירות על ידי האור המאיר את החומר המפזר. ואז הקרינה שהם מפזרים חייבת להיות קוהרנטית. תמונת הירח המלא, ושל כל הגופים האחרים המוארים בגיאומטריה דומה, חייבת להיות אחידה, לפחות בקירוב. הירח המלא מספר לנו שפיזור בודד הוא תהליך הפיזור הדומיננטי. אולי עם תיקונים קטנים של פיזור רב-פעמי.

למה פיזור בודד של אור הוא דומיננטי? נראה שהתהליך הוא גיאומטרי וסטטיסטי. אם חושבים על תהליך פיזור אחד, תהליך של שני פיזורים, ..., תהליך של הרבה פיזורים, אז ההסתברות לתהליך עם מספר פיזורים כלשהו תלך ותרד ככל שמספר הפיזורים בו יעלה. לתהליך פיזור אחד יש הסתברות של לפחות 50% מכל אפשרויות הפיזור, והוא יהיה התהליך החזק ביותר. מניח שמישהו יכול לעשות חשבון סטטיסטי יותר מדויק.

לסיכום, הירח המלא אומר לנו איך לסלק אור מפריע לא קוהרנטי מאור מפוזר קוהרנטי, למשל במדידות אופטיות של בליעת אור.

Added, April 2020

פיזור מרובה

כל מרכז פיזור הוא מקור קרינה בכל הכוונים. קרינה אשר מתפזרת בכוון אקראי מאבדת את הקוהרנטיות שלה לקרינה המעוררת מחוץ לכוון קדימה. שבו היא ממשיכה להיות קוהרנטית אליה. לכן, פיזור מרובה של קרינה בכוון קדימה הוא קוהרנטי, ולכן יוסיף לאות בכוון קדימה. בכוונים אחרים הקרינה המפוזרת יוצאת מהפאזה של הקרינה המעוררת והופכת להיות חלק מרקע רעש המקום.

פיזור קרינה קדימה דומיננטי במוצקים (פיזור "מי"), כאשר גודל מרכז הפיזור גדול בהשוואה לאורך גל הקרינה. בנוזלים וגזים גודל מרכז הפיזור קטן בהשוואה לאורך הגל והפיזור איזוטרופי (פיזור "ריילי"), והאפקט בולט פחות.

Added, May 2020.

[העוורים והפיל](#)

מאת המחבר:

[The Sun and the Moon a Riddle in the Sky](#)

[Full-Moon and Opposition](#)

[Poster](#)

[Enhancing Tissue Depth Imaging](#)