

כדור – ארץ או עולם חלול ?

ברנד סרינג, ביה"ס התיכון למדעים ולאמנויות, ירושלים¹
והמחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות²

תקציר על-פי מודל העולם החלול, אנו חיים על הדופן הפנימית של כדור שבתוכו סגור שאר היקום. הסיבה לכך שבמזג אוויר יפה איננו יכולים לראות מכאן את אוסטרליה היא, שהאור מתקדם לאורך מסלולים עקומים. רעיון מנוחך? קשה מאוד להוכיח את ההיפך!

מילות מפתח: טרנספורמצית היפוך (inversion), מודל כדורי, מודל העולם החלול, בועת הארץ

2.1 הצגת הנימוקים בעד צורתה הכדורית של הארץ (15 דקות זמן הוראה)

הנה רשימה של סיבות שגורמות לנו להאמין בצורתה הכדורית של הארץ⁴:

- א. צילומים מהחלל⁵
- ב. הקפת העולם על-ידי פ.מגלאן⁶ (1521-1519)
- ג. הניסוי של ארטוסתנס⁷ (Eratosthenes 195-276 לפה"ס) שהבחין בעובדה, שגודל הצללית שעצם מטיל בשעת הצהרים תלוי במיקום הגיאוגרפי. ארטוסתנס השתמש במודל כדורי של הארץ על מנת להסביר תופעה זו והצליח לחשב את הרדיוס של כדור זה בדיוק מפתיע.
- ד. העובדה שבים הפתוח קיים קו אופק ברור, שאליו לא ניתן להגיע (על-פני צלחת שטוחה לא היה קיים קו אופק כזה, וניתן היה להגיע ל"קצה העולם").
- ה. העובדה שהתורן של אונייה מתגלה ראשון, כאשר היא מתקרבת לנמל מהים
- ו. העובדה שהגובה הזוויתי של כוכבים מעל האופק תלוי במיקום הגיאוגרפי של הצופה
- ז. המחזור של יום ולילה (המודל הכדורי מספק הסבר פשוט לתופעה זו).
- ח. המחזור של עונות השנה (כנ"ל)
- ט. בליקוי ירח צללית הארץ על-פני הירח נראית עגולה אפשר להרחיב את הרשימה הזאת בסעיפים נוספים; בן-אדם שמאמין במודל הכדורי יסתמך בדרך-כלל על תת-קבוצה קטנה מקבוצת הנימוקים שהבאנו. כוח השכנוע של צילומים מהחלל חזק ביותר. תרשים 1 מציג את מודל העולם הכדורי (בהפשטה מסוימת).

1. מבוא

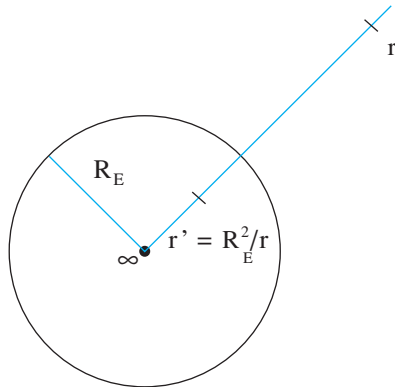
שיעורי המדעים בבית-הספר התיכון אמורים, בנוסף להעברת ידע מקצועי, לעורר מודעות למהותה של "החשיבה המדעית". למשימה זו לא הוקצו מקום וזמן מסוימים בתכנית הלימודים, וכל מורה חופשי להעלות את הנושא בהקשר שנראה לו מתאים. בהמשך אתאר פעילות לימודית שדורשת 90 דקות זמן הוראה ושבמרכזה עומדת סוגייה חשובה בפילוסופיה של המדע - הבנת היחסים המורכבים בין המושגים "אמונה" ו"ידיעה"³. פעילות זו איננה דורשת ידע מוקדם מלבד ידע בסיסי בהנדסת המישור. מקומה הטבעי הוא בפרק "אופטיקה גיאומטרית", אך לימדתי אותה בשנים האחרונות בכיתות ט' עד י"ב מבלי שנתקלתי בקשיים בהבנת השיעור מצד התלמידים. למען האמת, כולם היו תלמידים טובים.

2. תוכן השיעור

רובנו חונכנו (בבית, בבית-הספר, דרך ספרים, כתבי עת והטלוויזיה) באמונה שאנו חיים על-פני כדור ענק (כדור-הארץ). רוב התלמידים בכיתות שפגשתי ראו בהבנת ה"עובדה" הזאת סממן לקידמת האנושות בכלל. הם חילקו את היסטורית המין האנושי לתקופה אפלה (שאותה מכנים בשם הגנאי "ימי-הביניים") שבה רווחה הדעה, שהארץ הנה צלחת שטוחה, ולעידן החלל שבו אנו מצוידים בתמונות צבע של כדור-הארץ שצולמו מהירח. ומה יכול להוכיח את צורתה הכדורית של הארץ באופן משכנע יותר מאשר צילום מהחלל ?

מסתבר, שקיים **מודל הסותר** את אמונתנו בצורתה הכדורית של הארץ ("מודל העולם החלול"); מודל זה עומד בכל המבחנים האמפיריים המובאים שגורמים לנו להאמין במודל הכדורי. מתגלה, שעקרונות אין מבחנים אלה מסוגלים להבדיל בין המודל הכדורי לבין מודל העולם החלול.

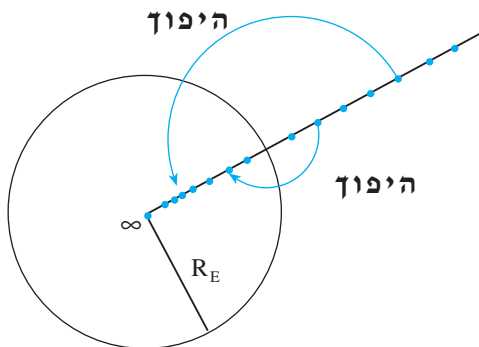
2.2 הצגת "מודל העולם החלול" (15 דקות זמן הוראה)
2.2.1 על-פי מודל העולם החלול, אנו חיים על הדופן הפנימית של כדור, שבתוכו סגור שאר היקום (ראה תרשים 2). למבנה זה נקרא בהמשך "בועת הארץ".



תרשים 3: טרנספורמציית ההיפוך ביחס לספירת הארץ

קוטר השמש בעולם החלול הוא כ-5 מטרים, והיא נמצאת במרחק של 270 מ' בערך מהנקודה ∞ . גודלו של הירח הוא כ-2 ק"מ, והוא נמצא במרחק של 107 ק"מ בערך מהנקודה ∞ . כוכבי השבת נמצאים בסביבתה המיידית של ∞ .

2.2.3 כיצד מתפשט האור בתוך העולם החלול? על-פי המודל הכדורי, פולס קצר של אור שנשלח רדיאלית מכדור-הארץ לחלל יתקדם בריק לאורך קו ישר. אם נסמן על קו זה נקודות במרחקים שווים (ראה תרשים 4), יעברו פרקי זמן שווים בין הגעת הפולס מנקודה לנקודה סמוכה. במעבר למודל העולם החלול, בעיקבות טרנספורמציית ההיפוך ביחס לספירת הארץ, הופכת סדרת נקודות זו לסדרה שמתכנסת ל- ∞ , כאשר המרחקים בין שתי נקודות סמוכות קטנים. מכאן מתקבל **הכלל הראשון של האופטיקה הגיאומטרית בעולם החלול: אור לא יכול להגיע בזמן סופי מנקודה כלשהי לנקודה ∞ .**



תרשים 4: התקדמות האור בקטעי זמן שווים על-פי שני המודלים

אפשר להוכיח (ראה נספח) שקו ישר עובר בטרנספורמציית ההיפוך ביחס לספירת הארץ, למעגל. במודל הכדורי, אור מתפשט לאורך קווים ישרים. אם נזכור שכל קו ישר מגיע לאין-סוף, נוכל לנסח את **הכלל השני של האופטיקה הגיאומטרית בעולם החלול:**



תרשים 1: המודל הכדורי של הארץ



תרשים 2: מודל העולם החלול

מודל זה מסביר בהצלחה את **כל** התופעות א-ט, שצוינו בסעיף הקודם כראיות לטובת המודל הכדורי. ואמנם מסתבר, שלא ניתן להבדיל באמצעות תופעות אלה בין שני מודלים שונים של העולם הנראים שונים זה מזה באופן קיצוני.

2.2.2 על-פי מודל העולם החלול⁸ (מודל בועת הארץ) מהווה המודל הכדורי פרשנות שגויה של הנתונים האמפיריים, המבוססת על דעה קדומה לגבי המבנה הגיאומטרי של העולם. נקודה כלשהי, שמרחקה ממרכז כדור-הארץ (על-פי המודל הכדורי) נקבע כ- r , נמצאת "באמת" בתוך בועת הארץ במרחק

$$r' = \frac{R_E^2}{r}$$

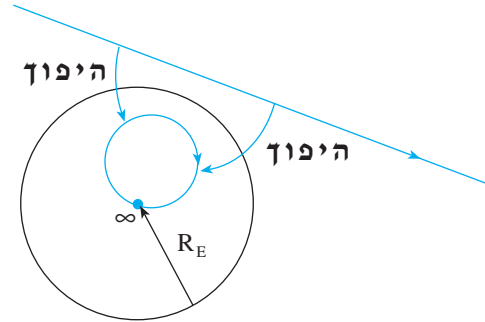
כאשר R_E מסמן את רדיוס כדור-הארץ (או בועת-הארץ; רדיוס הארץ זהה בשני המודלים - ראה תרשים 3).

מבחינה גיאומטרית, טרנספורמציה זו מהווה **היפוך ביחס לספירה** בעלת רדיוס R_E . קל לראות, שנקודות על-פני הארץ הנן אינווריאנטיות תחת שיקוף זה. מרכז כדור-הארץ מתרחק לאין-סוף, וכל הנקודות באין-סוף מוטלות על נקודה אחת במרכז בועת-הארץ. לנקודה זו נקרא להלן **"נקודת האין-סוף"** ונסמן אותה בסמל ∞ .

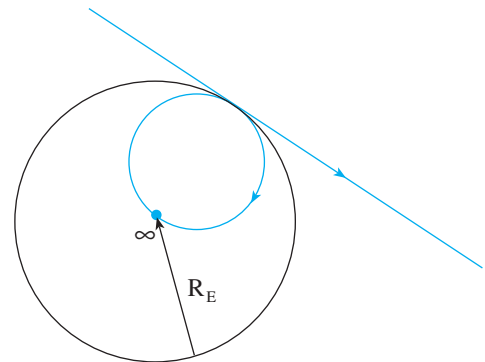
המסלול שבו אור נע מנקודה A לנקודה B הוא חלק מהמעגל

היחיד שעובר דרך הנקודות A, B ו- ∞ .

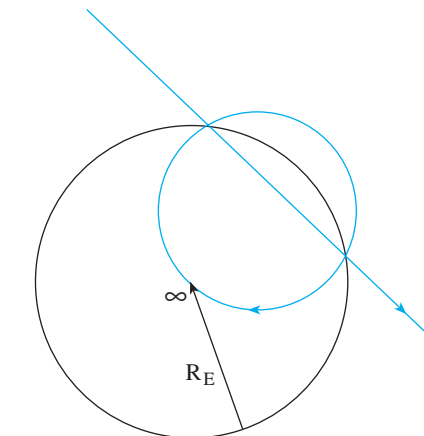
תרשימים 5 - 7 מראים את מעגלי האור האפשריים במצבים שונים. מסלולו של האור נחסם כאשר עליו לעבור דרך הנקודה ∞ או דרך חומר אטום (כמו סלעים).



תרשים 5: קרן אור העוברת (בקו ישר) ליד כדור-הארץ מיוצגת במודל העולם החלול כמעגל, שנמצא כולו בתוך בועת הארץ.



תרשים 6: קרן אור המשיקה לכדור-הארץ מיוצגת במודל העולם החלול ע"י מעגל שמשיק לבועת הארץ באותה הנקודה



תרשים 7: קרן אור החותכת את כדור-הארץ מיוצגת במודל העולם החלול כמעגל שחותך את בועת הארץ באותן הנקודות

2.3 בדיקה אמפירית של מודל העולם החלול (45 דקות זמן הוראה)

נבדוק עתה האם תיאורית העולם החלול מסוגלת להסביר את התופעות אי-טי' שהוצגו בפרק [2.1] כראיות התומכות במודל הכדורי.

2.3.1 מובן שמעשהו האמיץ של מגלאן (תופעה ב') היה מצליח באותה המידה בעולם החלול - הקפת העולם אפשרית על כל מעטפת סגורה.

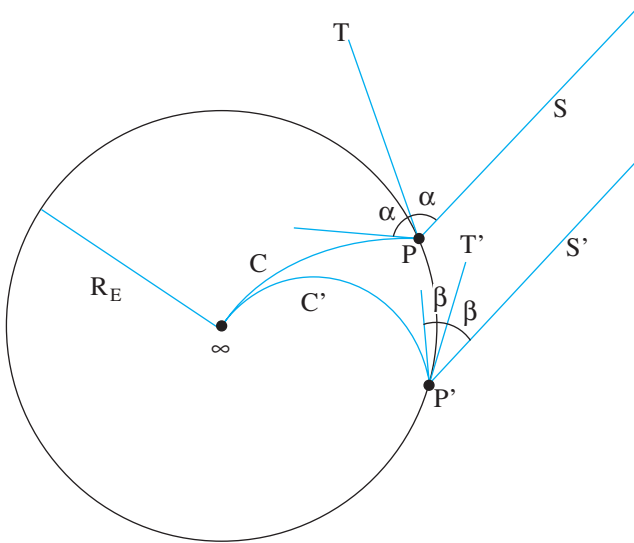
2.3.2 הניסוי של ארטוסתנס (תופעה ג')

בעיר אסוואן שבמצרים, מוט ישר נתקע אנכית באדמה ביום שבו השמש עומדת בזְנִית (ולכן אין למוט צללית). באותה השעה (כאשר השמש עוברת דרך המרידיאן²) מודדים בעיר אלכסנדריה הנמצאת כ-1000 ק"מ צפונית לאסוואן, את אורך הצללית של מוט זהה. מאורך הצללית ומהמרחק הידוע בין שתי הערים ניתן לחשב בקלות את רדיוס כדור הארץ.

הניסוי של ארטוסתנס היה מצליח גם בעולם החלול והיה מפיך את אותו ערך מספרי עבור רדיוס הארץ (ראה תרשים 8). בשני המודלים לא תהיה צללית למוט באסוואן, ואורך הצללית של המוט באלכסנדריה שווה בשני המקרים; הדבר נובע מאינוריאנטיות פני-הארץ לטרנספורמציית היפוך. מאינוריאנטיות זו נובע גם, שרדיוס הארץ איננו יכול להיות תלוי במודל (כדורי או חלול) שבו מחשבים אותו.

2.3.3 האינטואיציה שלנו מציעה שבעולם חלול היינו מסוגלים לראות ארצות אחרות תלויות בשמיים מעל ראשנו. אם העולם אכן חלול, מדוע איננו רואים מכאן את אוסטרליה? בעולם הכדורי, תופעת הקיום של קו אופק שמעבר לו לא ניתן לראות (תופעה ד') מוסברת בצורה הבאה (ראה תרשים 9): כאשר צופה עומד על מגדל T, קיים קשר עין בינו לבין כל נקודה שממנה אור יכול להתפשט לאורך קו ישר עד אליו. קו האופק עבור צופה זה מוגדר כקבוצת הנקודות שבהן המשיקים מ-T לכדור-הארץ נוגעים בו. בתרשים 9, נקודות P ו-P' נמצאות על קו האופק. הצופה מסוגל לראות את הנקודה B, אך לא את הנקודה A, כי אור שמנסה להגיע מ-A ל-T בקו ישר ייתקל בכדור-הארץ. מכאן גם ברור, שהצופה במגדל T איננו מסוגל לראות את גוף האנייה S המתקרבת מהים, בשעה שהתורן שלה מתרומם כבר מעל הקו הישר R ולכן מעל קו האופק (תופעה ה').

כיצד עלינו לנתח את אותה הסיטואציה במודל החלול?



תרשים 10: הגובה הזוויתי של כוכב בשני המודלים

כיצד עלינו לנתח את אותה הסיטואציה במודל החלול?

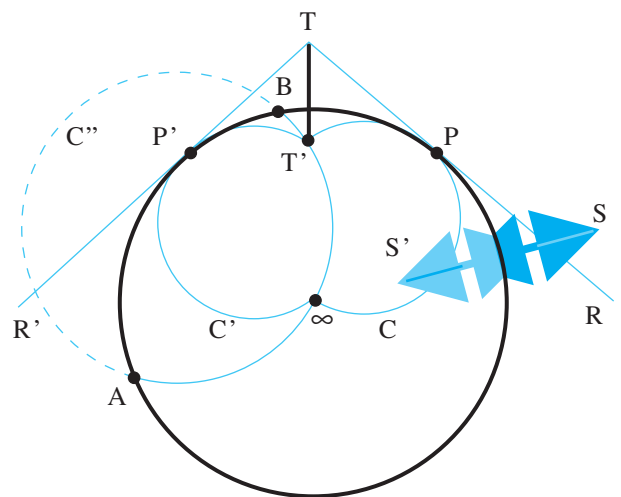
בעולם החלול, המרחק בין הכוכב לבין הנקודה ∞ זניח. כל המעגלים שעוברים דרך ∞ , כאשר הם משיקים זה לזה בנקודה זו, מהווים מחלקת שקילות שאותה נכנה "כיוון הצפייה באין-סוף" (זאת האנלוגיה ל"קרניים המקבילות" שמגיעות ממקור אור רחוק מאד במודל הכדורי); המעגלים C ו-C' שייכים לאותה המחלקה ומהווים שני מסלולים שבהם אור מגיע מאותו הכוכב הרחוק אל שתי נקודות שונות על פני-הארץ. הזוויות בין המשיקים למעגלים אלה בנקודות P ו-P' לבין מישורי האופק באותן הנקודות הם הגבהים הזוויתיים של הכוכב באותן הנקודות. ניתן להוכיח שזוויות אלה הן אותן הזוויות שמתקבלות במודל הכדורי¹¹.

2.3.5 אם עולמנו אכן חלול ואם השמש סגורה בתוכו, מהו מקור המחזור של יום ולילה (תופעה ז')?

במודל הכדורי ההסבר הינו פשוט ביותר (ראה תרשים 11): כאשר השמש נמצאת בנקודה S (בתרשים קרבו את השמש לכדור-הארץ על מנת להבהיר את הגיאומטריה של המצב), רק צד אחד של כדור-הארץ מואר. הנקודות P ו-P' נמצאות על קו הגבול בין יום ולילה. אם השמש מסתובבת סביב כדור-הארץ או אם כדור-הארץ מסתובב סביב צירו, מתקבל מחזור של יום ולילה.

כיצד עלינו לנתח את אותה הסיטואציה במודל החלול?

בעולם החלול, שמש זעירה נמצאת בנקודה S'; המעגלים C ו-C' עוברים דרך הנקודה ∞ , דרך השמש ומשיקים לפני הארץ בנקודות P ו-P'. מעגלים בעלי רדיוס קטן יותר מזה של C



תרשים 9: ההסבר לתופעות ד' ו-ה' בשני המודלים

כאשר צופה עומד על מגדל T', יש לו קשר עין עם כל נקודה שממנה אור יכול להתפשט לאורך קשת של מעגל דרך אותה הנקודה, דרך T' ודרך הנקודה ∞ . קו האופק עבור צופה זה מוגדר כקבוצת הנקודות שבהן מעגלים שעוברים דרך T', דרך ∞ ומשיקים לבועת הארץ, נוגעים בה. בתרשים 9, נקודות P ו-P' נמצאות על קו האופק. הצופה ב-T' מסוגל לראות את הנקודה B, אך לא את הנקודה A, כי אור שמנסה להגיע מ-A ל-T' באחת משתי הקשתות האפשריות של המעגל C'' ייתקל מצד אחד בכדור-הארץ או יצטרך לעבור מהצד השני דרך הנקודה ∞ , דבר שלא ניתן לביצוע בזמן סופי. (ראה את כללי האופטיקה הגיאומטרית בעולם החלול). מכאן גם ברור, שהצופה במגדל T' איננו מסוגל לראות את גוף האנייה S' המתקרבת מהים, בשעה שהתורן שלה מתרומם כבר מעל המעגל C, ולכן מעל קו האופק עבור הצופה ב-T' (תופעה ה').

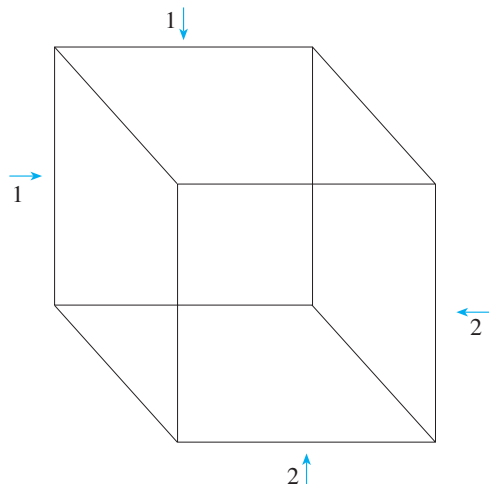
2.3.4 כלל פשוט בניווט אומר, שהגובה הזוויתי של כוכב הצפון מעל האופק שווה לרוחב הגיאוגרפי¹⁰ של הצופה (תופעה ו'). צופה באנגליה יראה את כוכב הצפון יותר גבוה בשמים מאשר צופה בישראל.

כיצד מוסברת תופעה זו במודל הכדורי? שני צופים שנמצאים בנקודות P ו-P' רואים כוכב בכיוונים מקבילים S ו-S' (הכוכב נמצא כאילו באינסוף). הגובה הזוויתי של הכוכב מעל האופק הוא הזווית שבין כיוון הצפייה בכוכב לבין המישור המשיק לכדור-הארץ במקומו של הצופה. הגובה הזוויתי של הכוכב בנקודה P הוא α ובנקודה P' הוא β ; ברור ש- $\alpha > \beta$. (תרשים 10).

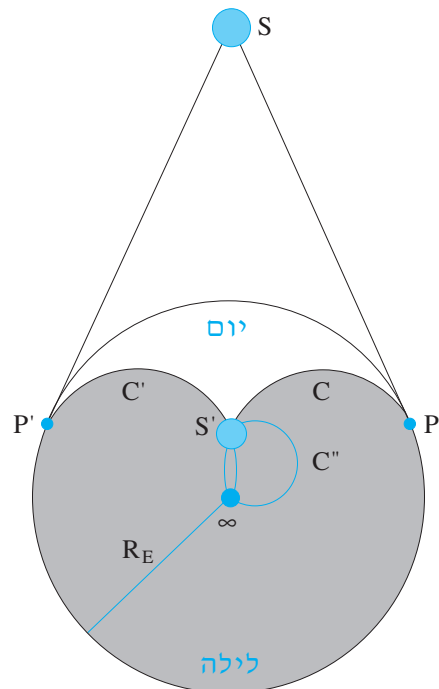


תרשים 12: תצלום של כדור-הארץ או של בועת הארץ? (תמונה: NASA)

על-פי אלו מאפיינים אנו מחליטים שמדובר בצילום של כדור קמור: תרשים 12 מציג לפני הכל אובייקט דו-ממדי (דיסק הצבוע בצבעים מסוימים); ראיית העומק והוספת הממד השלישי הנן פרשנות המבוצעת על-ידי מנגנון הראייה המוחי שלנו, שמעדיף את הפרשנות התלת-ממדית על הפרשנות הדו-ממדית, וזאת על סמך ניסיונו בעבר בניחוח המבנה המרחבי של העולם¹². לעתים, פרשנות זו מבוססת על בחירה של אחת מתוך קבוצה של פרשנויות אפשריות; ציירים רבים (ולא רק שלם¹³. דוגמה פשוטה יחסית וידועה לכפל משמעות מיוצגת בתרשים 13.



תרשים 13: האוריינטציה המרחבית של הקוביה מתהפכת, כאשר ממקדים את העיניים על קודקוד 2 במקום קודקוד 1



תרשים 11: יום ולילה בשני המודלים

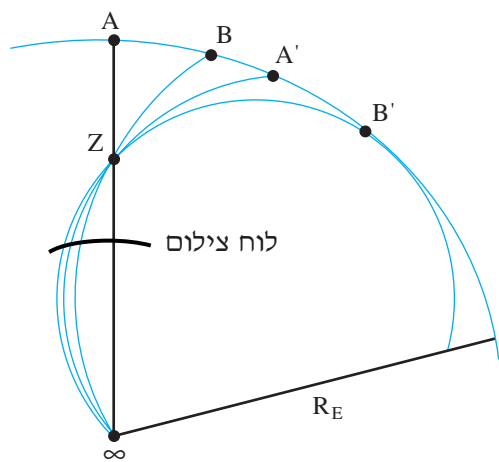
ו- C' (כמו המעגל C'' בתרשים 11) אינם מגיעים לפני הארץ – אור שיוצא בכיוון הזה מהשמש נע לעבר הנקודה ∞ דרך החלל שבתוך בועת הארץ. מעגלים בעלי רדיוס גדול יותר מגיעים מצד אחד לפני-הארץ, אך נאלצים לעבור בצד השני דרך הנקודה ∞ שאותה לא ניתן לעבור בזמן סופי. לכן קיימת גם במודל העולם החלול הפרדה לאזורים של יום ולילה הזהים לאזורים שמתקבלים במודל הכדורי. תנועה של השמש סביב ∞ או תנועה סיבובית של בועת הארץ סביב עצמה מסבירות את המחזור של יום ולילה.

תופעת עונות השנה (**תופעה ח'**) מוסברת בעולם החלול על-ידי תנועה שנתית נוספת של השמש, שאינה מתבצעת באותו המישור כמו תנועתה היומית (אלא במישור הנטוי ב- 23.5° ביחס למישור השני).

2.3.6 על-פי אותם הכללים ניתן להסביר במודל העולם החלול את העובדה שבליקוי ירח, צללית הארץ על-פני הירח נראית מעגלית (**תופעה ט'**). זהו תרגיל מעניין מאוד, ומומלץ להשאיר לתלמידים לפתור אותו. (רמז: "הצללית" של הארץ בעולם החלול מוגדרת כהאזור שאליו אור מהשמש יכול להגיע רק במעגלים, שנתקלים בדרכם בפני-הארץ).

2.3.7 שמרנו את ההוכחה המשכנעת ביותר לטובת המודל הכדורי לסוף – צילומים מהחלל, שמראים "בבירור" שלארץ שלנו צורה של כדור (**תופעה א'**).

ולכן מתקבל אותו העיוות בצילום שגורם לנו לפרשו כתמונה של כדור קמור.



תרשים 15: צילום של פני הארץ

2.4 דיון (15 דקות זמן הוראה)

מסתבר שהעובדות האמפיריות שגורמות לנו להאמין במודל הכדורי של עולמנו אינן מבדילות בין מודל זה לבין מודל העולם החלול. בעקבות תגלית זו, אנו עומדים מול השאלות הבאות:

* האם ניתן למצוא תופעות כלשהן, שבכוחן להבדיל בין שני המודלים? לדוגמה: ידוע שיבשות הארץ צפות על מגמה חמה מאוד. במודל העולם החלול, בועת הארץ עטופה בחומר חם מאוד ולכן הייתה צריכה להתחמם בהתאם. האם ניתן לשנות את חוק הולכת החום כך שהכל "יסתדר"? האם ניתן לשנות את כל חוקי הפיזיקה בהתאם?

* מה עושים, כאשר שני מודלים מתחרים מסבירים את כל התופעות הידועות? על-פי אלו קריטריונים (מדעיים או לאו) בוחרים אחד מהם? אם אכן מדובר בקריטריונים לא מדעיים - האם מותר לטעון שאין כל הוכחה מדעית שהעולם איננו חלול?

* כיצד עלינו לפרש את העובדה שהשוני בין שני המודלים מתבטא בטרנספורמציה גיאומטרית פשוטה? האם כל טרנספורמציה מסוג זה תספק לנו מודל חדש של העולם, שלא ניתן להבדיל בינו לבין מודלים אחרים? האם עלינו להסיק, שאנו מכירים את צורת העולם רק modulo היפוך ביחס לספירת הארץ?

על-פי ניסיוני, תלמידים אינם שוכחים את השיעור הזה (גם אם - כעבור זמן מה - כבר לא יהיו מסוגלים לשחזר אותו בכל פרטיו) והם חוזרים עוד אחרי מספר שבועות עם

בכוונתי לטעון, שהצילום המיוצג בתרשים 12 מאפשר שתי פרשנויות מרחביות במידה שווה: הראשונה מתאימה למודל המקובל של הארץ הכדורית, השנייה מתאימה למודל העולם החלול.

ננסה עתה להבין מהם המאפיינים בצילום הנ"ל שגורמים לנו "לראות כדור".

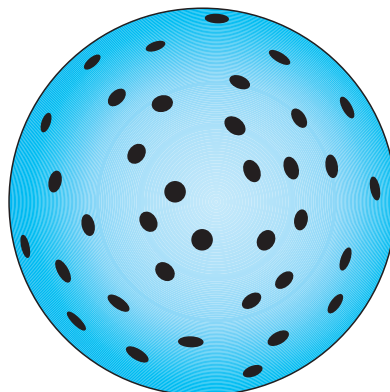
* העובדה שהארץ מצטלמת כדיסקה

באמצעות היפוך פשוט של מהלך הקרניים בתרשים 11 משתכנעים, שגם בעולם החלול צילום של פני-הארץ היה נראה כך.

* העובדה שעצמים במרכז הדיסקה נראים גדולים יותר

מאשר בקציה

בתרשים 12 אנו רואים את הקצה הדרומי של יבשת אפריקה בתקריב, בשעה שהים התיכון וחצי האי הערבי דחוסים לממדים קטנים יותר בקצה דיסקת הארץ. (ניתוח זה מתבסס על היכרותנו עם הצורה ה"אמיתית" של היבשות; הוא עושה שימוש בידע מוקדם ולא במידע המגיע לחושים בלבד). עיוות ספירי מהסוג הנ"ל מתפרש מיידית כנוכחות של משטח קמור, אפילו במקרים פשוטים ביותר כמו זה המיוצג בתרשים 14.



תרשים 14: ספירה קמורה

ניתן להראות שצילום פני-הארץ בעולם החלול היה גורם לאותו העיוות שבגללו היינו מגיעים למסקנה, שהתמונה מראה לנו כדור קמור. הסיטואציה מיוצגת בתרשים 15.

המרחקים AB ו-A'B' על פני-הארץ שווים. המקביל ללוח צילום מישורי בעולם הכדורי הנו לוח ספירי בעולם החלול. על האור שמגיע ללוח זה לעבור קודם לכן דרך הצמצם Z (הנקב שבמצלמת נקב). נקודת החיתוך של מעגל אור דרך נקודה על פני-הארץ ודרך Z עם לוח הצילום הנה הנקודה שבה דמות הנקודה הזאת תופיע בצילום. מתרשים 15 ברור שהחלקים המרכזיים של התמונה מוגדלים לעומת השוליים,

10. הסיפור המרתק של מציאת שיטה למדידת האורך הגיאוגרפי מסופר בספר:

D. Sobel, **Longitude**, 1995, Penguin Books, N.Y.

11. כאן מתגלה ה"סוד" שלנו: ההיפוך ביחס למעגל במישור המרוכב $z \rightarrow c/z$ הינו מפה קונפורמית (משמרת זוויות), ולכן לא נוכל לקוות שנימוק כלשהו, שמקורו באופטיקה גיאומטרית, יבדיל בין שני המודלים.

12. ראה גם: צ. ינאי, "המציאות כאינטרפרטציה של המציאות", מחשבות, גיליון מס' 62, דצמבר 1991, ע' 42-67.

13. מספר דוגמאות יפות ניתן לראות בגלריה הוירטואלית הבאה:

http://www.illusionworks.com/html/hall_of_illusions.html

נספח

טענה: קוו ישר עובר בטרנספורמציה היפוך ביחס למעגל, למעגל.

הוכחה:

ישר מתואר בצורה כללית על ידי המשוואה: $Ax + By + C = 0$
טרנספורמציה ההיפוך ביחס למעגל בעל רדיוס R נתונה על-ידי:

$$x \rightarrow x' = \frac{xR^2}{x^2 + y^2} ; y \rightarrow y' = \frac{yR^2}{x^2 + y^2}$$

הטרנספורמציה ההופכית היא:

$$x' \rightarrow x = \frac{x'R^2}{x'^2 + y'^2} ; y' \rightarrow y = \frac{y'R^2}{x'^2 + y'^2}$$

נציב את הביטויים עבור x ו-y במשוואת הקוו הישר:

$$A \frac{x'R^2}{x'^2 + y'^2} + B \frac{y'R^2}{x'^2 + y'^2} + C = 0$$

נכפול ב- $(x'^2 + y'^2)$ ונקבל:

$$x'^2 + y'^2 + \frac{A}{C} R^2 x' + \frac{B}{C} R^2 y' = 0$$

מכיוון שלשני האיברים הריבועיים אותו מקדם, מדובר במשוואה של מעגל.

מש"ל
דרך הבנייה הגיאומטרית של טרנספורמציה ההיפוך של ישר ביחס למעגל אפשר למצוא באינטרנט⁸.

תודה

"הוכחה" חדשה, שמודל העולם החלול הנו שגוי. תלמידים בכיתות ט' או י' מגיבים לרוב בהתרגשות מסוימת לאור הגילוי שכדור הארץ איננו כדור, בשעה שבכיתות הגבוהות קל יותר להפנות את תשומת ליבם של התלמידים לעובדה שתמונת העולם "המדעית" שלנו מתבססת על לא מעט אלמנטים אי-רציונליים.

סיכום

מדען שואל שאלות, בשעה שטכנאי מנצל מנגנונים מוכנים למטרותיו. השימוש בשיטות עבודה "מדעיות", ללא מודעות למהותן ולמגבלותיהן, אינו אלא שימוש טכנוקרטי במדע. ב"חינוך המדעי", אלמנט החינוך חשוב באותה מידה כמו העברת הידע המקצועי. על מנת שתלמיד ותלמיד המדעים יתחנכו לחשיבה עצמאית ולביקורת עצמית, יש צורך לעצור לעתים את מהלך תכנית הלימודים ולהקדיש זמן לרפלקציה. המודל ה"מגוחך" של העולם החלול מהווה הזדמנות טובה למימוש הכוונה הזאת.

מראי מקום

1. דואר אלקטרוני: bernard@iasa.jlm.k12.il
 2. דואר אלקטרוני: ntbernd@wis.weizmann.ac.il
 3. דיון מתומצת וקריא מאוד בסוגייה זו נמצא בספר: W.V. Quine, J.S. Ullian, 1978, **The Web of Belief**, Random House, N.Y.
 4. במהלך השיעור, התלמידים ירחיבו את הרשימה.
 5. ראה: ר.א.גלנט, 1993, היקום, ספרית מעריב, ת"א ע' 122.
 6. מגלאן בעצמו נהרג לפני סיום המסע, כאשר התערב בענייניהם הפרטיים של ילידי הפיליפינים. בן-האדם הראשון שהקיף את העולם היה עבד אלמוני של מגלאן, יליד איי המולוקה.
 7. ראה: ר.א.גלנט, 1993, היקום, ספרית מעריב, ת"א ע' 15, ובעיקר:
 8. ראה גם: S.Toulmin, J. Goodfield, 1961, **The Fabric of the Heavens**, Hutchinson & Co., London
9. זהו המעגל הגדול דרך שני הקטבים השמימיים ודרך נקודת הדרום במישור המשווה השמימי. הרגע שבו השמש (הממוצעת) עוברת דרך המרדיאן מוגדר כ"צהריים".