

חידת קופרניקוס: למה חלפו 2000 שנה עד לגילוי שכדור הארץ מסתובב סביב השמש?

הרצאה של ד"ר בועז כץ – 14.2.2017

אהלן, לי קוראים בועז כץ. אני הצטרפתי פה לפקולטה לפיזיקה לפני שנתיים וחצי, אני אסטרופיזיקאי. אגיד במילה מה אני עושה, כי ההרצאה היא לא על מה שאני מתעסק. אני עסוק בלהבין איך מתפוצצות סופרנובות, לא אסביר מה זה עכשיו, רק אזכיר שהן מאוד חשובות לדיון שלנו, כי הן היסודות בטבלה המחזורית שנוצרו בסופרנובות או פוזרו על ידיהן. לכן הן חשובות. גם רואים אותן הרבה, היום מתעדים כחמש סופרנובות ביום. יש המון נתונים, ולהפתעתי ביחס למה שלמדתי כשהייתי בתואר ראשון, האמת הפשוטה היא שלא יודעים איך סופרנובות מתפוצצות. יש לנו הרבה רעיונות, אבל באמת אנחנו לא יודעים. בזמן האחרון דווקא הגעתי לתשובה, יחד עם עוד מישהו פה מהפקולטה בשם ד"ר דורון קושניר, שאני עובד איתו בשיתוף פעולה. יש לנו תשובות שאנחנו חושבים שהן נכונות, אבל באספקט הזה לחשוב מה התשובה – הייתי אומר שזה אפילו לא חצי הדרך לפתרון, אולי שלישי. שני שלישי זה להסביר איך אנחנו יודעים אם התשובה נכונה או לא, וזה הקשר היחיד להרצאה היום. ההרצאה עוסקת יותר בשאלה איך אנחנו יודעים משהו מאשר בשאלה מה הרעיון, תיכף תראו למה.

ההרצאה היא מתוך העבודה שהכנתי לקורס מבוא לאסטרופיזיקה במכון, התחלתי לחזור אחורה להבין איך דברים עובדים, לגבי הדברים המקוריים איך הגענו אליהם; השאלה שבטח הרבה התעסקו בה, זו לא שאלה חדשה, והיא עלתה מתוך זה שלא צריך למצוא תשובה טובה.

הנה הבעיה פחות או יותר. אני מניח שכולכם שמעתם שכדור הארץ מסתובב סביב השמש, שלא תמיד כך האמינו, למעשה רוב ההיסטוריה האמינו שכדור הארץ לא זז כלל והשמש מסתובבת סביבו. נקודת המפנה בסיפור, בנרטיב הרגיל של ההיסטוריה, היא פחות או יותר ביום שקופרניקוס פירסם את ספר זה, זה תרגום מאנגלית – על המהפכה, זה שנה שבה הוא נפטר, מרגע שפירסם את ספרו *on the revolutions of the heavenly spheres*, שטוען שכדור הארץ מקיף את השמש, מאז יודעים שכדור הארץ מקיף את השמש.

הבעיה עם הסיפור הזה היא שהיתה הרבה עבודה לפני קופרניקוס, שהתחילה עם הבבלים, המצרים. איפה שבאמת היתה התקדמות רצינית היה אצל היוונים, אני סופר את היוונים – אני לא היסטוריון, אל תאמינו לי לשום מילה על היסטוריה – משנת מינוס 500, פיתגורס. היתה לו תרומה אסטרונומית חשובה, אם סופרים ממינוס 500 עד 1500 – שאז בא קופרניקוס – עברו 2000 שנה שהיה בהן הרבה עיסוק – לא אגיד את כל הפרטים – עיסוק שהגיע לרמות תחכום ודיוק מתמטיות גבוהות.

מה יש בקופרניקוס, שהאסטרונומיה היתה לו עיסוק צדדי, הוא בעצם היה איש כנסייה, מה הוא הבין שמאות אנשים שעסקו בזה לא הבינו? מיד אפשר לחשוב שאולי היה טלסקופ, אבל הטלסקופ היה אחר כך. לא היתה עוד מתמטיקה, אז משהו צועק, משהו מוזר – מה פתאום קם בנאדם וטוען שכל מה שאמרו קודם לא נכון, ומאז כל ההיסטוריה של המדע משתנה. משהו פה צועק ודורש הסבר, אני מקווה שאתם מזדהים עם זה.

לפני שנדון בזה יותר, ובמה יש לאנשים להגיד על כך, יש השאלה למי אכפת? למה זה חשוב? אני חושב שהמסמך הזה הוא אחד המסמכים – לא האחד, אבל אחד המסמכים המדעיים החשובים

בהיסטוריה. זה נשמע צעד קטן, אבל זה לא כדור הארץ בלבד, זו גם האמירה ששאר כוכבי הלכת מסתובבים סביב השמש. זאת היתה פריצת דרך, עוד כמה צעדים לנסח את כוח המשיכה עם מתמטיקה, זן פריצת הדרך שממנה קל לעקוב אחרי הצעדים שמובילים לניסוח כוח המשיכה, שעד כמה שאני יודע זו בעיה המדעית המדויקת הראשונה שנפתרה. מדובר באוסף תופעות רחב אך מדויק, שמצליחים למצוא בו חוקיות, פה קופרניקוס עשה כברת דרך רצינית.

זה בבירור התחלת המהפכה המדעית, יש שאלה כמה זה הגורם לה, אבל זו תחילתה. למה דווקא תנועת כוכבי הלכת וכוח משיכה זו הבעיה המדויקת ראשונה שנפתרה? אני לא יודע מה התשובה, אבל עובדה שתנועת כוכבי הלכת היא איטית מאוד. יש לנו שעון מצוין שזה כדור הארץ, שמסתובב פעם ב-24 שעות, יש לנו שעון גס של 24 שעות; אם מודדים דברים על פני שנים וזוויות בדיוק של מעלה, אז יש לנו משהו שבלי עזרת שום אמצעי טכנולוגי אפשר להגיע לדיוק של יותר מאחוז, שיש בו הרבה חוקיות. זה מייחד את זה – בלי אמצעים טכנולוגיים אפשר לעשות המון מדידות. בלי לעשות את הקפיצה הזאת אי אפשר להתקדם. אני חושב שהקפיצה הזאת – מקווה שאתם מסכימים אתי – היא חשובה.

בואו נחזור לשאלה, נראה כמה אפשרויות הגיוניות למה אולי זה יכול להיות. אפשר לחשוב למה אף אחד לא העלה זאת על דעתו וקופרניקוס בא עם הרעיון? זה עובדתית לא נכון. לא רק שמישהו חשב על זה, זה היה אחד האסטרונומים החשובים בהיסטוריה של האסטרונומיה היוונית, אדם בשם אריסטארכוס מסאמוס, שכתב על זה ספר. הספר לא נשמר לצערנו, אנשים היו משלמים כסף רב לראות מה כתוב בספר. אני מזכיר שקופרניקוס זה 1500 אחרי הספירה, הספר של אריסטארכוס זה 250 אחרי הספירה. יש ציטוט של הספר בספרו של ארכימדס. אני לא אומר אם אני מסכים לזה או לא, אבל עושה חשבון לגבי היקום: הוא אומר שמסאמוס כתב שהכוכבים והשמש לא נעים ושכדור הארץ מקיף את השמש על היקפו של מעגל. תבינו את החשיבות של זה – היוונים ידעו את גודל הירח, הוא חשב שהוא יודע גם את גודל השמש; הוא קצת טעה, אבל זה לא מישהו צדדי, זה מישהו מקובל מאוד. ידוע על עוד יווני שקנה את הסיפור הזה, כך שלא סתם חשבו על זה, מישהו מרכזי חשב על זה.

אז לא יכול להיות שהתשובה למה אחרי קופרניקוס הכל השתנה, היא שלא חשבו על זה קודם, כי כן חשבו על זה. עד קופרניקוס הרוב המוחלט חשבו שהשמש זזה סביב כדור הארץ, למרות שמישהו טען שכדור הארץ מסתובב סביב השמש.

אם כדור הארץ מסתובב סביב השמש, לא משנה מה המרחק מהשמש, הוא צריך לזוז מהר מאוד, היום אומרים שזה 30 קילומטרים לשנייה, זה מה שאנחנו זזים עכשיו. לא ידעו בדיוק את המרחק מהשמש, אז לא ידעו את המספר הזה בדיוק, אבל ידעו שזה חייב להיות נורא מהר.

אני מרגיש שאני זז מהר? אני רואה פה דברים עפים במהירות של 30 קילומטרים לשנייה? אנשים אומרים שגם הם היו חושבים על זה – וחשבו על זה, אלה דברים שמתועדים גם במה שיוונים חשבו – זה כל כך סותר את הניסיון היומיומי שלנו שכדור הארץ זז כל כך מהר; גם אם למישהו יש טיעונים בעד, הרי אנחנו לא זזים, אל תקשקשו לי. זה הטיעון המרכזי שתשמעו הרבה פעמים, לא אדון בו אם כי מעניין לדון בו. קופרניקוס לא מתחמק מהשאלה, הוא עושה הקבלה לאונייה – כשאני שט באונייה אני לא מרגיש שאני זז, דברים לא זזים לי, כך גם כדור הארץ.

עוד דבר – נניח שאני לא רוצה שכדור הארץ יזוז, אני רוצה לדעת מה עושים שאר כוכבי הלכת, האם הם מסתובבים סביב השמש. מבחינת קפיצת מדרגה, גם להבין שכוכבי הלכת מסתובבים סביב השמש זו ממילא קפיצה גדולה. לכן נעזוב את השאלה האם כדור הארץ מסתובב סביב השמש; בואו נגיד שכדור הארץ עומד, אבל השאלה האם כוכבי הלכת מסתובבים סביב השמש. רק צריך לשים לב שכך זה נראה (מראה בשקף), אז למה לא היה מקובל שכוכבי הלכת מסתובבים סביב השמש? תעזבו את כדור הארץ, אבל השאלה הזאת היא התחמקות, אפשר לא להתמודד עם השאלה שכדור הארץ מסתובב, אבל עדיין האנושות לא עשתה את הקפיצה שקופרניקוס עשה.

עוד משהו שעולה, שאולי אפשר היה להעלות השערות כאלה ואחרות – אריסטרכוס חשב שכל כוכבי הלכת מקיפים את השמש, אחרים חשבו שלא, אפשר להתווכח ואלו תיאוריות, לא היו עדויות, לא היתה דרך באמת לדעת. הנקודה הזאת היא בהחלט נקודה שהרבה היסטוריונים אומרים אותה. והנה כמה ציטוטים. ראשון - סליחה שזה באנגלית. תומס קון, אחד הפילוסופים המפורסמים של המדע אמר כך: The initial choice between Copernicus' system and Ptolemy could only be a matter of taste. כלומר, היתה תיאוריה כזאת והיתה תיאוריה אחרת, והבחירה ביניהן היא עניין של טעם.

יש עוד ציטוטים. תסתכלו בוויקיפדיה, אני לא יודע אם אתם מאמינים לוויקיפדיה יותר מאשר להיסטוריון של המדע. בוויקיפדיה, בערך קופרניקוס, כתוב: רק תצפיותיו של גליליי אל כוכב הלכת נוגה בעזרת הטלסקופ שבנה, היו הראיות הממשיות הראשונות לתיאוריה של קופרניקוס. זה הסבר שמאוד רוצים להתחבר אליו. היו תיאוריות קודם, קופרניקוס אינו הראשון, מה המיוחד בו? שהוא אמר את זה כל כך מאוחר שקצת אחרי כן המציאו את טלסקופ אז זוכרים אותו. פשוט קודם אי אפשר היה לדעת, קופרניקוס פשוט היה אחרון לפני המצאת הטלסקופ.

זו שאלה שצריך להתמודד איתה. כמו שאנחנו מקשיבים למה שאומרים על קופרניקוס, מעניין מה הוא אומר על ההצעה שלו. לא ברור מאליו מה יגיד. אולי אמר: יש לי תיאוריה כלשהי. אולי אמר: אני חושב שאני צודק. אצטט תרגום שלי לעברית, על המילים שאמר קופרניקוס בלטינית על התיאוריה שלו – טענות אלו הן קשות וכמעט בלתי נתפסות, הן מנוגדות כמובן לאמונה של הרוב. למרות זאת, בעזרת האל, אראה שהן ברורות כאור השמש – עם הסתייגות – לפחות לאלו שאומנות המתמטיקה לא זרה להם. אצל קופרניקוס אין שאלה, זו לא תיאוריה שהוא חושב, אלה הוא אומר בביטחון: חבר'ה, כוכבי לכת וכדור הארץ מסתובבים סביב השמש, נקודה. והוא אמר את זה לפני הטלסקופ.

יש סתירה בין מה שקופרניקוס חושב על התיאוריה שלו, לבין מה שחלק מההיסטוריונים חושבים על עבודתו, וזה נושא ההרצאה הזאת. אני מניח שמהטון שלי יש לכם תחושה מה דעתי, אבל אני חושב שההיסטוריונים פשוט טעו. אני לא היסטוריון, אני קורא את הכלים שלו שהם בעיניי משכנעים, ואנסה להציג אותם. אני חושב שקופרניקוס צודק והם טועים, אבל אם הם היו נותנים הרצאה, הם היו משכנעים אחרת. זה אומר שבסוף אתם תצטרכו לשפוט בעצמכם, בלי שיגידו לכם "ככה זה".

אני אנסה לתת טיעונים, והדרך הטובה לשפוט בעצמכם היא לקרוא את הספרים. הראשון זה ספר של קופרניקוס, אחד המסמכים המדעיים החשובים בהיסטוריה. לא צריך לקרוא את כולו, רק עשרים עמודים, לא שווה? כדי להשיג אותו לא צריך לקנות, זה בחינם, צריך להיכנס לגוגל, לכתוב את שם הספר – on the revolutions of the heavenly spheres, להקיש אנטר, לרדת למטה, רואים פה full

text, הנה יש לכם את זה באנגלית. ממילא אין פה כל הספר, הרבה מזה הוא פחות מעניין, אבל בשביל לדעת את הטיעונים המרכזיים לא צריך יותר. יש פה המון שטויות, כי קופרניקוס אמר גם המון שטויות, אבל הטיעונים המרכזיים שלו משכנעים, לפחות אותי. אנסה להסביר. כפי שאמרתי, ספר אחד זה קופרניקוס והטענות שלו. אני לא היסטוריון, אני רוצה לשאול – בהינתן המידע שהיה להם והדרך, האם יש עדויות או לא? האם מישהו היה יכול לצאת לפני 2000 שנה עם מד זוויית, לא שעון, רק דף שיכול לתעד תאריכים ולהגיע למסקנה שכוכבי הלכת מסתובבים סביב השמש, ואולי גם למצוא את חוק המשיכה, רק עם מתמטיקה? זו השאלה המדעית שאני רוצה לשאול.

ספר שני הוא של תלמי, הנה שמו פה, קלאודיוס תלמי עצמו היה אסטרונום יווני שתרם לפיתוח האסטרונומיה, אבל הנקודה המרכזית בספר היא שזה סיכום של 600 שנים של מחקר יווני. ואם תסכלו על האנשים מפיתגורס עד תלמי, זה פרוס על 600 שנים, אנשים נכנסו לפרטי פרטים במשך 600 שנים, ופה יש סיכום שהיה מקובל כספר המרכזי עד קופרניקוס. הוא מסכם את הידע היווני, אבל לא היתה פריצת דרך משמעותית עד קופרניקוס. ואנחנו כל פעם נשאל מה תלמי אמר, מה קופרניקוס אמר.

הגיע זמן להגיע לעניין... צריך לחזור שנייה אחורה. אמרנו כל הזמן: האם כדור הארץ מסתובב סביב השמש או השמש מסתובבת סביב כדור הארץ? למה לחשוב שמישהו מסתובב סביב מישהו, אולי אף אחד לא זז? לא סתם מעלים תיאוריה, פשוט כך זה נראה בשמיים. אבל כדי לראות איך זה נראה בשמיים, צריך לצאת החוצה ודרושה סבלנות, לא צריך טלסקופ. פה אתם רואים תמונה שצילמתי עם אייפון בלי אפליקציה, שש בערב אתמול, רחוב הרצל, רואים כוכב אחד. עדיין לא לילה. תנסו לצרוב את התמונה, או שתצאו הערב ותסתכלו, אם לא יהיו עננים. אני לא זוכר אם יש היום ירח, אבל נשים אותו בצד, חוץ מירח יש כוכב אחד שבוהק יותר מכולם, אני מניח שחלקכם יודעים מיהו.

אז אנחנו מסתכלים על הכוכבים, השאלה מה קורה כשמסתכלים לאורך זמן. מתמונה אחת אין הסכמה. כדי להסתכל לאורך זמן, הכי טוב לצלם הרבה תמונות, אבל אני עצלן.. אני אוהב להשתמש בתוכנה שמציגה את זה. את מיקום גרמי השמיים ידעו היוונים מצוין. את התוכנה זאת הם היו יכולים לעשות. זאת תוכנה ששמה את האובייקטים על פי מיקומם כמו שאנחנו רואים אותם, זו תוכנה חינוכית נחמדה, פה הכנסתי את התאריך של אתמול באותה שעה, 18:05. אמנם מתל אביב ולא רחובות, אבל זה אותו הדבר. אני מסתכל מערבה, רואה את הכוכב הבהיר קצת אחרי שקיעה, לידו יש עוד כוכב קטן שאפשר לראות בעין אבל המצלמה לא תופסת אותו. השאלה המעניינת היא מה קורה לאורך זמן. נתחיל להריץ את הזמן, כרגע זה בֶּפְרִיז, נגיד לו לזוז, רואים שהשניות מתחילות לזוז. צריך לחכות כמה שנים ונראה דברים מדהימים.

הדרך להתמודד עם זה – כיוון שאלה לא תמונות אמיתיות – אפשר להאיץ את הזמן קדימה, אתם רואים שהשניות רצות יותר מהר, נעשה את זה עוד קצת מהר, מתחילים אולי לראות תזוזה, רואים תזוזה עכשיו – הכוכבים שוקעים. עוד קצת נריץ. הנה השעות עוברות, נהיה יום, השמש שוקעת, הכוכבים שוקעים, חבל שלא רואים פה עוד כוכבים, אבל כל הכוכבים עושים את הדבר המוזר הזה, שוקעים בערב. כמו שהם שוקעים בערב, מה קורה בבוקר? תסתכלו לכיוון מזרח, הם זורחים, זה

הירח הגדול, בבוקר השמש זורחת והכוכבים זורחים, ובערב הם שוקעים. כדי לראות קצת יותר טוב מה קורה, כדאי להסתכל צפונה, לא רואים את השמש דווקא. אבל לא רואים כוכבים.

אוי, למה לא רואים כוכבים?

אומרים לו להוריד את האטמוספירה ואז יראו. לא...

עכשיו אעצור את הזמן, הקלטתי סרט של התוכנה, נראה אם זה יעבוד טוב יותר. משום מה נראה לי שכן.. בואו נראה.

זה יהיה מאוד חבל אם לא תוכלו לראות כוכבים. עכשיו כן רואים כוכבים, נכון?

אנחנו קצת חוזרים אחורה בזמן. מאיצים את הזמן, מסתכלים מערבה, הכוכבים שוקעים, השמש זורחת, שוקעת; אם מסתכלים על המזרח, הכוכבים זורחים. כמו שאמרתי, אם נסתכל צפונה בלילה, אולי יהיה קצת יותר קל לראות מה קורה פה. כוכב שלא זז זה כוכב הצפון. נראה שהכל מסתובב סביבו. סיבוב כזה לוקח פחות או יותר 24 שעות, אז אוקיי, נראה שהדברים מסתובבים סביבנו, אבל הסיבוב הזה הוא לא נושא ההרצאה.

כמו שיודעים היום – את ההשערה הזאת העלו מזמן – אנחנו יושבים על קרוסלה שזה כדור הארץ, קרוסלה שמסתובבת מהר פעם ביממה, לכן הכל מסתובב לנו מהר נורא. גם על זה אפשר להתווכח, האם כדור הארץ מסתובב או השמיים מסתובבים, אבל זה לא נושא ההרצאה. זה סיבוב של כל השמיים עם השמש וכוכבי הלכת סביבנו; גם תלמי וגם קופרניקוס ברוב הספר לא דנים בזה, אלא שואלים איך דברים זזים ביחס לכוכבים. לכן ניפטר מהדבר המעצבן הזה, יש דרך לעשות זאת.

שאלה: את זה היוונים הבינו?

ד"ר בועז כץ: כן. חלק טענו שכדור הארץ מסתובב סביב עצמו, חלק טענו שכל גלגל השמיים מסתובב כל 24 שעות. אבל שאר התמונות שמעניינות אותנו זה ביחס לגלגל האחורי של הכוכבים. הטריק להתמודד עם זה – שמתי אותו פה בסוף – הכל מסתובב מהר פה, מה נעשה? **תנו לי עוד משהו לנסות פה, בדבר הזה. אולי זה ילך. לא, אני לא יודע למה לא רואים כוכבים.**

איך ניפטר מזה? יש שתי דרכים טובות לעשות זאת. אחת מהן, נשים את המצלמה שלנו על ציר שמסתובב כנגד כדור הארץ. כלומר, כשכדור הארץ מסתובב הוא מסתובב לכיוון השני. או כמו היוונים, בגלל שגלגל השמיים מסתובב כל הזמן, הכדור מסתובב יחד איתו. אז בתמונה לא נראה את הסיבוב הזה שעושה לנו סחרחורת.

נחזור לאותה שעה לראות מה קורה. חזרנו לאותה שעה, שוב לחצנו על הכפתור זה, כיוון שהמצלמה מסתובבת, רואים שכדור הארץ מסתובב. כדי להקל על החיים אוריד את האטמוספירה וכדור הארץ. למה מותר לי? בתצפיות כמובן שאסור לי, אבל מכיוון שגם היוונים ידעו איפה כל גוף נמצא, הם גם יכלו לעשות זאת. על זה אין ויכוח אין הדברים נראים. בשש בערב מצליחים כך לראות את השמש. עכשיו מה יקרה כאשר נאיץ את הזמן? נתחיל להאיץ את הזמן... רואים שהזמן זז לאט, נאיץ אותו, הדקות עוברות, השעות עוברות, וזה כבר לא זז. זה היה הרעיון. אבל עכשיו כשמתחילים להאיץ ממש מהר והתאריכים זזים, רואים שרוב הכוכבים לא זזים, אבל כמה גופים זזים. זה השמש, זה הכוכב הבהיר, השמש זזה. עכשיו הזמן רץ עוד יותר מהר. רואים את החודשים עוברים, משהו חולף פה, כל חודש זה הירח. השמש, נראה שהיא עושה סיבוב, כל פעם זה קורה בינואר. פעם בשנה השמש חוצה. כאשר אני מבטל את הסיבוב של כדור הארץ והכוכבים, רוב הכוכבים לא זזים אבל השמש חוצה.

יש כמה גופים שזזים, בהיסטוריה ידוע על חמישה חוץ משמש, פה רואים את כולם יחד. נראה איזה תנועה הם עושים. תסתכלו על החבר הזה, תראו מה הם עושים, תגידו איך זה נראה לכם. תראו את הלייזר שלי, הוא זז מצד שמאל של השמש, צד ימין של השמש. צד שמאל של השמש, צד ימין של השמש. כמו מה זה נראה? אתם מסכימים שהחבר הזה, שיש לו את השם כוכב חמה, נראה כאילו הוא מסתובב סביב השמש?

קריאה: לא.

ד"ר בועז כץ: לא? באיזה מובן? אשאל איפה השמש, איפה הוא, הוא פעם בצד ימין, פעם בצד שמאל, פעם בימין, פעם בשמאל. עכשיו אני לא יודע מי זה מי. אם תסתכלו על הכוכב הבהיר שהסתכלנו עליו בהתחלה, גם הוא לפעמים בצד ימין של השמש, לפעמים בצד שמאל, הוא הולך כל הזמן מימין לשמאל, אף פעם לא מתרחק מאוד מהשמש. אעצור את זה כדי שלא יסחרר אתכם. לכוכב הבהיר קוראים נוגה. איך אפשר, בלי לעשות את כל זה, לראות בעין שהוא מחובר לשמש? בצורה הבאה. תזכרו את התמונה, רואים את השקיעה ורואים את נוגה. את נוגה תראו לפעמים קצת אחרי השקיעה, תראו אותו לפעמים קצת לפני הזריחה, אבל אף פעם לא תראו אותו באמצע הלילה. בניגוד לשאר כוכבי הלכת שזזים. למה לא תראו אותו באמצע הלילה? את זה יודעים מהתזוזה שלו, הוא אף פעם לא מתרחק מהשמש. כדי לראות את נוגה באמצע הלילה בשמיים, לא תראו אותו גבוה למעלה בשמיים. כי כשרואים אותו למעלה בשמיים, גם השמש תהיה בשמיים, ואז זה יום ולא לילה.

שאלה: איך צילמת אותו?

ד"ר בועז כץ: אפשר לראות את נוגה קצת אחרי השקיעה או קצת לפני הזריחה. פשוט אפשר לראות אותו בעין. אם עוקבים בצורה מסודרת, רואים שאם זאת השמש וזה נוגה, לאורך זמן אם אעקוב אחרי המיקום שלהם, הוא עושה דבר כזה (מדגים). את ההקשר הזה עשה פיתגורס. בהתחלה ראו שיש כוכב שרואים אותו רק בערב וכוכב אחר שרואים רק בבוקר, פיתגורס היה ראשון שאמר שזה אותו כוכב.

לפחות באופן גס נראה שנוגה וכוכב חמה, כשהם מסתובבים סביב השמש, הם עושים ככה, תנועה כזאת (מדגים). האם זה אומר שהם מסתובבים סביב השמש? אפשר להתווכח. אבל צריך לעשות משהו מדויק כדי לראות זאת. אפשר למדוד פה שני דברים, זמן וזוויות. לכאורה תנועה בשמיים דורשת שתי זוויות. זה קשה. כל כוכבי הלכת שזזים, זזים לאורך קו בשמיים. מאוד בגדול, השמש וחמישה גופים שזזים מסתובבים על מעגל גדול בשמיים, על אותו קו בערך. כבר יש תחושה שמהו מסתובב סביבנו, כולם מסתובבים סביבנו, בפרט השמש. זה שהם על אותו קו בקירוב, זה אומר שיש זווית אחת שצריך למדוד. אבחר כוכב בשמיים, הכל אני מודד ביחס לרקע של הכוכבים; אבחר כיוון שאקרא לו אפס, אמדוד את הזווית של כל אחד מהם כתלות בזמן. אז אפשר לנסות למדל את זה.

איזה מודל אעשה? אעשה מודל הכי פשוט שאני יכול לדמיין. נגיד שכדור הארץ במרכז, זו השמש, אני רואה את נוגה זז מימין לשמאל, אני חושב שהוא מקיף את השמש. המודל הכי פשוט – השמש נראה שהיא מסתובבת סביבנו בקצב קבוע פעם בשנה. אגיד שאולי נוגה עושה תנועה מעגלית סביב השמש, אז בלי לשחק עם זה אני לא יודע כמה זמן לוקח לו להקיף את השמש או מה הרדיוס. אבל

נראה אם מודל כזה מסביר את התצפיות. אנסה להראות משהו אינטראקטיבי, אני מקווה שהוא לא יקרוס לנו ואז אוכל להאשים אותו...

אני מריץ משהו שיצייר את הנתונים של השמש. מה שרואים פה זה ימים וזווית. הזווית זה המיקום של השמש ושל נוגה ביחס לאיזושהי נקודה בשמיים, לא כל כך חשוב איזו, באופן גס הזווית כל הזמן עולה, כל הזמן עושים סיבוב. מה זה זווית שגדולה מ-360 מעלות? זה אומר שהשלימו יותר מסיבוב. השמש ונוגה דבוקים אחד לשני, נוגה לא מתרחק מהשמש אף פעם, השמש עושה קו ישר, ונוגה עושה את התנועה המוזרה הזאת. זה לא נראה כמו סינוס, האם אפשר להסביר זאת על ידי מודל פשוט שנוגה מקיף את השמש? זה מה שאעשה עכשיו. אצייר רק את נוגה. פה רואים קו כחול שזה נתונים של נוגה, הקו אדום זה תוצאה של המודל. מי שידע מתמטיקה, תראו כמה המודל פשוט, כולו נמצא פה. אפשר לראות, אני מניח שהשמש עושה קוסינוס וסינוס של זווית, סך הכל היא במרחק גבוה, יש זמן מחזור לנוגה, אז המיקום של נוגה זה מיקום של שמש ועוד רכיב X ורכיב Y. זה הכל, זה המודל שלי. מה שחשוב הוא שתבינו שזה סך הכל שנוגה מקיף את השמש בקצב קבוע במעגל, הכל פשוט.

נראה איך זה משתנה. המודל לא מצליח, הקו אדום לא מתאים לקו הכחול. אבל השאלה מה זמן המחזור, מה רדיוס המעגל. אם אשחק עם זמן המחזור, הקו הכחול משתנה. נעשה משהו כמו זמן מחזור של נתונים, מה הזווית ההתחלתית? נעשה משהו כזה, ויש לנו מה רדיוס המעגל. זה משנה מה אני עושה. הנה אעשה משהו כזה. נראה לא רע? אפשר את זה, נראה עוד יותר טוב. המודל הכי פשוט הוא שנוגה מסתובב סביב השמש; לא רק שבעין זה נראה, זה פשוט מתאים לנתונים. יוצאים החוצה, נוגה הוא הכוכב הכי בוהק בשמיים, עוקבים אחרי תנועה שלו, אחרי השמש, במלוא מובן המילה נראה שנוגה מסתובב סביב השמש, ולא סתם מסתובב אלא בתנועה הפשוטה האפשרית, מעגל בקצב קבוע. זו פשוט עובדה.

דרך אגב, גם על העובדה זו אף אחד לא יכול להתווכח. תלמי לא אומר את העובדה הזאת, אבל הוא אומר את מה שמביא לעובדה הזאת. זה לא מה שבני אדם טוענים; מה שרואים בעין ומה שמתאים במודל הכי פשוט זה לא מה שאנשים טוענים. אז מה בני אדם טוענים? נראה מה תלמי אומר לנו על זה. אמרנו שזה המודל הפשוט שאנחנו הצענו, המודל הזה מתאים מצוין לנתונים. איך יכול להיות שתלמי שידע את נתונים מצוין אומר משהו אחר? מה הוא אומר? הוא אומר אותו הדבר, אותו מודל כמעט זה כדור הארץ, נוגה מקיף משהו, נקודה במרחב, פשוט הנקודה במרחב הזאת היא לא השמש, רק מכוונת כלפי השמש. הרי כשאני מסתכל על גוף בשמיים, אני יודע איפה הוא נמצא מבחינת זווית, אני לא יודע מה המרחק. נראה שנוגה מקיף משהו בכיוון כמו השמש, מי אמר לי שהוא באותו מרחק כמו השמש? אולי השמש סתם על אותו קו? אני לא יודע מה איתכם, לי על פניו זה נשמע אבסורד. נכון שאני לא יכול להוכיח מתמטית שהשמש נמצאת במרכז המעגל של נוגה, אבל היא נראית במרכז המעגל של נוגה.

למה להגיד דבר כזה? חשוד העניין. תלמי דן איפה נשים את השמש. הרי אני לא יודע את המרחק, אולי זה מחוץ למעגל, אולי מבפנים. מה עם האופציה שהשמש במרכז המעגל? הוא לא טוען את זה. זה חשוד שהוא לא הזכיר את זה אפילו. נשמע לי על פניו – אגיד את דעתי – הבנאדם הזה משוגע, מה קורה לו? יש הסבר סופר פשוט, הוא הופך אותו למשהו כל כך לא הגיוני. תדמינו שזה

היה – מדברים על ירחים של צדק, רואים את צדק, רואים ירחים, אולי צדק יותר רחוק ורק נראה שהירחים מקיפים אותו? לי זה נשמע אבסורד.

אגיד מה התשובה סופית, איך בעיני תלמי והאנושות זה לא היה אבסורדי. אבל אגיד משהו להגנתם. נסתכל על שאר כוכבי הלכת, פה נגמר הסיפור. נראה שנוגה מסתובב סביב השמש, המודל עובד מצוין, כך זה נראה. אבל מה עם שאר כוכבי הלכת? אז נוגה וחמה אותו סיפור. השאלה מה עם צדק, מאדים ושבתאי, אם נעקוב בשמיים האם לא נראה במבט ראשון שהם מסתובבים סביב השמש? מה אני רואה? השמש מסתובבת, והם בקצב אחר, איטי יותר, כל הזמן השמש עוקפת אותם. לא נראה, כמו במקרה של חמה או נוגה, שהם מסתובבים ככה סביב השמש.

בואו נמדוד במדויק את הזווית שלהם, כך נראה המסלול המוזר של נוגה בשמיים. אתם שמים לב שאם מסתכלים על צדק, גם איכותית זה נראה דומה, רק שאם פה רואים שלושה קווים – שמש, נוגה וחמה הם בממוצע יושבים אחד על השני, כי הם עוקבים אחרי השמש. במקרה של מאדים, צדק ושבתאי הם בממוצע לא יושבים על השמש, זה משהו שונה אבל משהו דומה, צורה עם התנהלות המוזרה, הם כאילו מקיפים משהו רק שזה לא השמש. ואז אתה אומר רגע רגע, נוגה נראה שמקיף את השמש, הם נראה שמקיפים משהו שאינו השמש. מה המודל שלהם? זה מודל של צדק לפי תלמי, יש את השמש שעושה סיבוב סביבנו, זה צדק שמקיף נקודה במרחב, רק שהנקודה הזאת איננה שמש.

אוקיי, אז יש עוד נקודות דמיוניות שכוכבי הלכת מקיפים. אבל כולם שמו לב לדבר המוזר הבא – המודל הזה יעשה אותו סוג צורה מוזרה, אראה בערך איך הוא נראה, הוא מתאים למדידות ולמודל, יש עדיין קשר לשמש וידעו אותו מצוין. אם תסתכלו שוב על המודל, תראו שיש פה שני מעגלים, מעגל גדול של אותו גוף דמיוני במרחב שלא קיים, שכאילו צדק מקיף אותו, יש המעגל הקטן שזה איך צדק מקיף אותו. אם תסתכלו על הקו שמחבר את מרכז המעגל הקטן לצדק, הוא תמיד מקביל לקו בין כדור הארץ לשמש. ידעו את זה בתור חוק. בואו נראה את זה. ידעו את זה, זה מנוסח בתור הנחה. אתם רואים שהקו הירוק תמיד מקביל לכיוון השמש? למה? ככה, הטבע מתנהל כך. אולי אשתמש בזה להגנתם, הם אמרו פה באופן ברור שצדק לא מקיף את השמש, זה לא מסתדר, זה לא בכיוון של השמש; הוא מקיף נקודה אחרת, אבל חלק ממסלולו הוא מצביע בדיוק כמו השמש. אז אולי זה שנראה לנו שמרכז המעגל שנוגה מקיף את השמש מצביע לכיוון השמש, זה גם סתם מקרי. אבל זה לא מקרי, זה חוק שאינני מבין למה הוא, כי בצדק יש משהו שמצביע על השמש, אבל לא מרכז המעגל.

אם מסתכלים כך על הדברים, יש טיפה מקום להגיד: אוקיי, אני קצת פחות בטוח מקודם שנוגה מקיף את השמש. אבל עכשיו הנה מגיעה נקודה שהם פיספסו, זו נקודה פשוטה מאוד. מה זה פספסו? אני לא רואה שהם כותבים אותה. היא עובדה מתמטית פשוטה, אחרי שמבינים אותה – אקפוז' לסוף – במובן מסוים נראה שצדק כן מקיף את השמש. אז בואו שנייה נבין את הנקודה. זה המודל של תלמי לצדק (בשקף). יש לי את כדור הארץ, נראה שצדק מקיף פה מעגל, נקודה דמיונית שזזה כל הזמן במעגל. תלמי צריך להבין שאם זה המודל שלו, יש לו חופש בחירה שייתן בדיוק אותן תוצאות, לא בקירוב אלא מתמטית בדיוק אותן תוצאות. אם מודל כזה עובד, אני יכול את שני קווים אלה שמצביעים למיקום של צדק, כפי שתלמי חושב, להחליף בשני קווים אחרים שיצביעו על אותה נקודה. במקום לעשות את הקו הזה ואחר כך קו גדול וממנו קו קטן, אצייר קו קטן מקביל

וממנו קו גדול. אתם מסכימים שבגלל שיש פה מקבילית, אם אעתיק את הקו הזה למקום הזה ואת הקו הירוק למקום אחר, זה יצא מקבילית. במקום לחשוב על הקו הגדול ואז על הקו הקטן, אחשוב על קו קטן ואז קו גדול, ואגיע מתמטית לאותה נקודה.

בואו נראה מה אומר החופש הזה. זה אומר שלתלמי יש חופש, במקום לחשוב כך (קו גדול ואז קו קטן) – ברגע מסוים בזמן מותר לו באותה מידה לחשוב כך (קו קטן ואז קו גדול). זה חופש, זה ייתן אותו מיקום של צדק בשמיים, אז זה יתאים לתצפיות באותה מידה. נראה איך זה נראה במונחים של מודל ממש. יש פה שני מודלים שרצים בבת אחת, בשניהם כדור הארץ פה (מראה בשקף), בשניהם צדק בקצה. אם תסתכלו היטב, המיקום של צדק ביחס לכדור הארץ – קשה לראות, אבל תנסו לזכור – הוא אותו דבר. אלה מודלים שמבחינת המיקום של צדק ביחס לכדור הארץ נותנים אותו דבר בדיוק. פשוט החלפתי בין הקו הירוק לקו האדום, הקו הירוק הוא וקטור שמסתובב מסביב לקו האדום, סכום של שניהם – אפשר לעשות זה ועוד זה או זה ועוד זה; שני מודלים אלה שבשניהם יש שני מעגלים, אחד קטן ואחד גדול, הם שקולים.

זה אומר שכל מודל של תלמי שעובד, יש לו שתי דרכים להסתכל על הדברים. מה היה קורה אם הוא היה מסתכל על המודל של צדק בבחירה השנייה שמותרת לו כי מתמטית היא נכונה? נחזור למודל החדש של תלמי, שהיה צריך לספר שהוא שקול למודל שלו. תסתכלו שוב איפה השמש, פה צדק (מראה בשקף), וזה המודל של תלמי לצדק, שקול לחלוטין למה שכתוב בספר שלו. צדק מקיף את מרכז המעגל שמסתובב, ומרכז המעגל הזה מצביע על השמש. בגלל שאני לא יודע את מרחק לשמש, באותה מידה המודל של תלמי שקול בצורה מדויקת למודל הזה. צדק מסתובב סביב השמש. מה קצת מוזר בסיפור? המעגל שצדק מסתובב סביב שמש הוא כל כך גדול, שהוא מקיף אותנו. השמש מסתובבת סביבנו, צדק מסתובב סביב השמש ברדיוס כזה שעובר מאחורינו, לכן לא תמיד רואים אותו קרוב לשמש. הדוגמא הבאה, בנקודה הזאת האחרונה בזמן, שמש בכיוון הזה וצדק בכיוון אחר, כיוונים הפוכים. אם נמשיך עוד קצת, פה קצת יותר מוסבר שצדק מסתובב סביב השמש. הנה טענה שתלמי היה חייב להגיד. המודלים שלנו הם קונסיסטנטיים עם זה שכוכבי הלכת מקיפים את השמש. במקרה של נוגה וחמה רואים את זה בעין, נראה שהם מקיפים את השמש בשמיים. במקרה של צדק – וזה עובד גם על מאדים ושבתאי – זה קצת מוסתר מאחורי מקבילית, אבל אתם יודעים כמה מקביליות יש בספר? יש המון. זה קצת חשוד בעיניי, האם תלמי ידע את זה ושכח להגיד או פשוט לא ידע את הדבר?

כך או כך, אני אגיד שוב את דעתי. כמישהו שידע את זה, אני לא חושב שיש מקום לספק, זו עדות ממדרגה ראשונה שכוכבי הלכת מקיפים את השמש. המודל עובד ונראה שכוכבי הלכת מקיפים את השמש במעגל בקצב קבוע. אם אתם מתעקשים שלא, יש לכם עובדות מוזרות בלי הסבר: במקרה של נוגה, במקרה מרכז המעגל מצביע על השמש, במקרה של שבתאי – אם עושים את הבחירה נכונה – מרכז מעגל מצביע על השמש. למה? ככה. זה המחיר שאתם משלמים אם אתם אומרים שכוכבי הלכת לא מקיפים את השמש. גם אין מחיר להגיד שכוכבי הלכת מקיפים את השמש, זה לא אומר שכדור הארץ זז. הוא יכול להיות פה עומד בלי שנעוף...

כל העיסוק הזה, המסר הוא – הכל היה פה. גם אם לא עקבתם אחרי הכל, מי שרוצה להיזכר וטיפה יודע גיאומטריה, יכול לצייר את זה על דף, אני מבטיח שהוא יצליח. תעשו את זה בבית על דף כדי

להבין בדיוק. אבל כל זה לא אומר כלום על כדור הארץ. כדי להתקדם לכדור הארץ, לדעתי מתוך הנתונים צריך לעשות הדבר הבא שקופרניקוס עשה חלק ממנו.

מה הרווחנו מזה? כל מיני דברים שהיו לא מוסברים. יש לי מעגל מצביע לכיוון השמש, פתאום ברור שזה כי הוא מקיף את השמש. זה נתן לנו עשרה מספרים מדויקים שהוסברו בבת אחת. זה הרווח. אבל הרווחנו משהו מאוד חשוב, שזה מפתח לכוח המשיכה. עד קופרניקוס, או עד למודל שלו, אני יכול לקחת המודל של נוגה והשמש, לשים באיזה מרחק שבא לי. במעגל קל לראות זאת, אם אגדיל אותו פי 10, הזווית בשמיים תישאר אותה זווית. אם אקח גם את העיגול הירוק פה (בשקף), גם את העיגול הסגול, אכפיל פי 10, הזוויות יישארו. תלמי עושה ניחושים חצי פילוסופיים, אבל לא יודע מה המרחק של הגופים השונים. ברגע שאומרים שהשמש לא בלתי תלויה, השמש היא פה – אני מזכיר לכם שגם לנוגה וגם לצדק השמש היא אותה שמש – אז אין לי יותר חופש לשנות את המרחקים. זה אומר שאני יודע את המרחקים של כל כוכבי הלכת מהשמש. לא בקילומטרים, כי אני יודע רק יחסים, אני לא יודע מה המרחק בין נוגה לשמש, אבל אני יודע מה היחס בין המרחק של נוגה מהשמש לבין המרחק של כדור הארץ מהשמש. המספרים האלה – מי שיש לו הספר ביד, לא צריך לעשות חשבון, זה פשוט נמצא בטבלה. אם מסתכלים בטבלה, ממצב שלא ידעו מרחקים - פתאום יודעים מרחקים. קופרניקוס אמר כך: לכל מסלול כזה – נחזור למסלול הנכון, זו השמש, זה כדור הארץ, נוגה מקיף את השמש – לכל מסלול יש שני מספרים מעניינים, כמה נוגה רחוק מהשמש וכמה זמן לוקח לו להקיף את השמש. מה המספרים האלה? שימו לב, ברגע שאני מסתכל על זה כך, אני רואה שככל שהמרחק גדול יותר, כוכב חמה הכי קרוב, נוגה יותר רחוק; ככל שהמרחק יותר רחוק, גם זמן המחזור גדל. יש סדר בדברים, זה לא מספרים אקראיים. כוכב חמה הכי קרוב, הוא מקיף מהר את השמש, תוך 88 ימים. נוגה יותר רחוק, מקיף יותר לאט, ב-224 ימים. מאדים יותר רחוק, מקיף ב-687 ימים. צדק יותר רחוק, מקיף את השמש ביותר מ-4000 ימים. שבתאי יותר רחוק, מקיף את השמש הכי לאט, ב-29 שנים. אז יש הרמוניה, יודעים את המרחקים. ברגע שהחלטנו שכולם מסתובבים סביב השמש, קיבלנו פתאום סדר.

עכשיו נחזור לכדור הארץ. כולם מסכימים שאם השמש מסתובבת סביב כדור הארץ או כדור הארץ סביב השמש, הביבטים של זוויות זה אותו דבר. אין דרך מתמטית עם הנתונים אלה, פשוט אין, כדי להבחין בין מצב שכדור הארץ מסתובב סביב השמש או השמש מסתובבת סביב כדור הארץ. אבל ברגע שהיה סדר, שנראה שככל שהמרחק של כוכבי הלכת מהשמש הוא גדול יותר, גם זמן המחזור גדול יותר – אם אני בוחר להסתכל על כדור הארץ כאחד מכוכבי הלכת, אני יכול לבדוק אם הסדר הזה מתקיים. קופרניקוס בדק ואמר שכדור הארץ יושב במרחק בין נוגה למאדים, גם זמן המחזור – 365 ימים – הוא בין נוגה למאדים. אם יש לי סדרת מספרים – מרחק וזמן מחזור, וכשזה עולה גם זה עולה – בני האדם המודרניים היו אומרים: יש לי שני גדלים קשורים, מרחק וזמן מחזור; כשאחד עולה, השני עולה. מה אנסה לחפש? קשר ביניהם. נשים את זה על גרף, כך זה נראה על גרף לוגריתמי.

מה שרואים פה, אני לקחתי את הנתונים מהספר של תלמי משנת 150 לספירה, ורק שמתי אותם על הגרף. לקחתי את הנתונים של צדק ומאדים כמו שהם, לגבי נוגה וחמה עשיתי אחד חלקי כי הוא הסתכל על המעגלים לא נכון. הנה המרחקים מהשמש, 1 ו-10. הנה זמני מחזור, רואים שלא סתם ככל שהמרחק גדל גם הזמן המחזור גדל – אלה כוכבי הלכת, לפי הנתונים שהיו לתלמי, יושבים על

קו אחד. זה לא סתם שכדור הארץ מבחינת הסדר הוא במקום הנכון, הוא יושב על קורלציה, הקורלציה היא פונקציה – הקו השחור כאן זה לא סתם קו, זה המרחק בחזקת 3 חצאים, החוק השלישי של קפלר. הדבר האחרון שקפלר עשה, גם קופרניקוס ותלמי היו יכולים לעשות זאת, אם לא בגרף אז למצוא קשר אריתמטי, ומכאן עוד שתי שורות מגיעים לכוח המשיכה שהוא 1 חלקי R בריבוע. אחר כך צריך להשוות עם הירח, וגם כוח המשיכה. זה מוטבע בו. 1 חלקי R בריבוע, נמצא בנתונים של הטבלה של תלמי.

אני חושב שאם נחזור לשאלה המקורית – האם היו עדויות? לדעתי האישיית בפירוש היו עדויות ברורות שכוכבי הלכת מקיפים את השמש. אם מוסיפים את זה (מראה בשקף), שזה נמצא פה ולא שמו לב, זה לא דורש שום טכנולוגיה, זו עדות מדעית חזקה שכדור הארץ מקיף את השמש. אני חושב שבני אדם יכלו לגלות את זה לפני אלפיים שנה. אם אשאל למה לא עשו זאת, אין לי תשובה.

קריאה: אולי בגלל הנצרות?

ד"ר בועז כץ: הדת נוצרית לא היתה בימי אריסטו ותלמי, קופרניקוס הקדיש את הספר שלו לאפיפיור, זה פרסום רשמי של כנסייה, אני ממליץ לקרוא את ההקדשה שלו. אין לי תשובה למה לא גילו את זה, אבל זה מעלה את השאלה: כמו שאלפיים שנה אנשים פיספסו משהו שהיה להם פה בתוך הטבלאות וצריך רק מקבילית, האם יש משהו שאנו מפספסים עכשיו? זן שאלה שתיאורטיקנים שואלים, האם יש משהו שיש לו נתונים ואנחנו מפספסים אותו?

מחיאות כפיים.