

פרופ' סלים זארובי

קרינת קו המימן וגילוי החומר האפל בגלקסיות



אלקטרומגנטית באורך 14.6 מטר, שנמצאות בתחום קרינת הרדיו, המוגדרת כקרינה אלקטרומגנטית עם אורך גל הגדול מ-1 מ"מ (שימו לב כי אין גבול עליון לאורך גל הרדיו, שהרי נמדדו גלי רדיו באורך הגדול מ-100 ק"מ). במהלך בדיקת האנטנות הבחין ג'נסקי בהפרעה החוזרת על עצמה כל 24 שעות. בהתחלה חשב ג'נסקי שמקור הפרעה זו הוא השמש, מכיוון שהסיבוב היומי של כדור הארץ סביב עצמו נמשך 24 שעות. אך מאוחר יותר הוא גילה שמקורה לא בשמש, אלא במקום קבוע אחר בשמי הלילה, שמשלים גם הוא סיבוב שלם כל 24 שעות. מקור זה, הסתבר, הוא הגלקסיה שלנו, גלקסיית שביל החלב. יותר ספציפית, הקרינה מקורה מהאינטראקציה של חלקיקים טעונים בתווך הבינ-כוכבי של הגלקסיה שלנו עם השדה המגנטי הגלקטי. זו הייתה התגלית הראשונה של קרינת רדיו המגיעה מהחלל החיצון, והיא הובילה לתחום המחקר של רדיו-אסטרונומיה שבוחן את מקורות קרינת הרדיו ביקום. תגלית זאת, למרות חשיבותה, לא משכה תשומת לב עד סוף שנות ה-30, כאשר מהנדס הרדיו והאסטרונום החובב גרוטה ריבר (Grote Reber) איש

גילוי קו המימן (קו 21 ס"מ) בחלל

רוב שנות מלחמת העולם השנייה הייתה הולנד תחת הכיבוש הנאצי שהקשה מאוד על חיי התושבים בכל התחומים, ובכללם בתחום האקדמי. למרות המצב הקשה וצעדי הדיכוי הדרקוניים, מדענים רבים באוניברסיטאות המשיכו ביצירה מדעית ואינטלקטואלית. למשל, למרות שחלק מהאוניברסיטאות נסגרו לתקופות מסוימות, הרבה מהמרצים שלהן שלא נעצרו המשיכו להעביר הרצאות לסטודנטים בחשאי, ואילו המרצים העצורים ארגנו הרצאות לאסירים. רוח התנגדות זו יצרה את אחת התרומות המדעיות החשובות ביותר של מדענים הולנדים לאסטרופיזיקה, והיא הבנת החשיבות של קו המימן - קו 21 ס"מ - ששייך לתחום קרינת הרדיו.

כדי להבין מהי תגלית זו ואת חשיבותה, עלינו לחזור לתחילת שנות ה-30, כאשר המהנדס האמריקאי קרל ג'נסקי (Karl Jansky), שעבד במעבדות בל (Bell Labs) במדינת ניו ג'רזי, פיתח אנטנות תקשורת טרנסאטלנטיות. אנטנות אלה היו רגישות לקרינה

"הנתונים
התצפיתיים
מראים שהיקום
מכיל פי חמישה
יותר חומר אפל
מהחומר הרגיל,
כלומר החומר
המוגדר 'נורמלי'
הוא למעשה
חומר משני
ויוצא דופן
ביקום"



צילום: עודד קרני



מאז התפתח תחום זה מאוד, הן תיאורטית והן תצפיתית. התפתחות זו הפכה את קו המימן לאחד האמצעים התצפיתיים החשובים ביותר לחקר אובייקטים אסטרונומיים בפרט, ולחקר היקום בכלל. אבל מהו הקו הזה, ומה המקור שלו? כדי לענות על שאלה זו עלינו להתעמק בפרטים פיזיקליים.

פיזיקת קו המימן

באטום המימן הניטרלי יש פרוטון ואלקטרון, והם משפיעים זה על זה במספר דרכים. קודם כל, קיים ביניהם כוח משיכה חשמלי שמסביר הרבה מתכונות המימן. אזכיר כאן, שהממדים שאנו מדברים עליהם קטנים מאוד, שכן המרחק הממוצע בין האלקטרון לפרוטון באטום המימן הוא כחמש חלקי מיליארד סנטימטר (ס"מ). בממדים אלה תורת הקוונטים שולטת בחוקי הפיזיקה, ואי אפשר להשתמש בחוקי ניוטון. תורת הקוונטים היא תורה מוזרה וקשה להבנה, ולכן אזכיר כאן רק חלק מהתכונות שלה לצורך הדיון שלנו.

אחת התכונות הקוונטיות המאפיינת חלקיקים תת־אטומיים היא תכונת הספין, תכונה המזכירה את התנע הזוויתי של גוף המסתובב סביב עצמו בפיזיקה הקלאסית. החלק המוזר הוא שבכל כיוון שנחליט למדוד את ספין האלקטרון או הפרוטון נקבל רק שתי תוצאות אפשריות, הנבדלות רק בסימן (חיובי או שלילי). תוצאות אלה מתאימות לאחת משתי מגמות הסיבוב האפשריות: עם כיוון השעון או נגדו. ביחידות מתאימות הגודל של הספין הוא $\frac{1}{2}$, וכך נהוג לקרוא לו. כלומר, באטום המימן יש שתי אפשרויות - הראשונה היא שכיווני הספין של הפרוטון ושל האלקטרון מקבילים (כפי שמוצג בצד השמאלי של איור 1), והאפשרות השנייה היא שכיווני הספין שלהם מנוגדים (בצד הימני של האיור).

כתוצאה מהאינטראקציה בין הספין של האלקטרון לזה של הפרוטון, או ליתר דיוק בין המומנטים המגנטיים של שניהם, יש הבדל בין אנרגיית אטום המימן בשני המצבים. האנרגיה במקרה שהספינים מנוגדים (צד ימין של איור 1), הנקרא "מצב יסוד", נמוכה מהאנרגיה במקרה שהספינים מקבילים (צד שמאל של איור 1), הנקרא "מצב מעורר". אטום מימן הנמצא במצב מעורר תמיד מנסה לעבור למצב יסוד, כי המימן מעדיף להיות

את תגליותיו של ג'נסקי ואף הרחיב אותן, ופרסם את ממצאיו במאמר מדעי שראה אור בשנת 1940.

החדשות לגבי תגליות אלה הגיעו לאסטרונומים ההולנדים באותה שנה. יאן אורט (Jan Oort) מאוניברסיטת ליידן, אחד האסטרונומים החשובים ביותר של המאה ה־20, ביקש מאחד הסטודנטים המבריקים, הנדריק ואן דה הולסט (Henk van de Hulst), לבחון את המכניזמים הפיזיקליים האפשריים של מקורות קרינת רדיו באסטרונומיה, נושא שנדון בין שניהם מאז 1941. באפריל 1944 העביר ואן דה הולסט הרצאה שכותרתה "גלי רדיו מהחלל", ובה סרק את המכניזמים הפיזיקליים השונים בגלקסיה שלנו העשויים לגרום לקרינה זו. בסוף הרצאתו הוא הזכיר קרינה באורך גל של 21 ס"מ שמקורה אטום המימן, והיא ידועה בשם "קרינת קו מימן" (היא נקראת גם "קרינת 21 ס"מ"). ואן דה הולסט הראה שקרינה זו שכיחה בגלקסיה שלנו, כמו גם בגלקסיות רבות אחרות ביקום. מהרצאה זו, ומהמאמר של ואן דה הולסט מ־1945 על תוכנה, הבנו לראשונה את הפוטנציאל הגדול של קו 21 ס"מ ככלי חשוב מאוד למעקב אחרי המימן האטומי ביקום.

בשנת 1949, לאחר תום המלחמה ושחרורה של הולנד משליטת הנאצים, יזם אורט בנייה של טלסקופ רדיו, כדי למדוד קרינת 21 ס"מ שמגיעה מהגלקסיה שלנו. לבניית הטלסקופ הזה השתמשו אורט ועמיתיו בצלחות מכ"ם שהצבא הנאצי השאיר מאחוריו. אבל במרץ 1949 התרחשה שריפה במעבדה שלהם, שהרסה את רוב המכשירים ועיכבה את ההולנדים בפיתוח הטלסקופ בכמעט שנה. עיכוב זה אפשר לצוות אמריקאי מתחרה מאוניברסיטת הרווארד, בראשות הרולד איווין (Harold Ewen) ואדוארד פורסל (Edward Purcell), לבנות טלסקופ רדיו נוסף שאפשר להם, בשנת 1951, למדוד את קרינת קו המימן מהגלקסיה שלנו, בדיוק כפי שחזה ואן דה הולסט. ארבעה חודשים לאחר שהודיעו על תגליתם, אישר הצוות ההולנדי בראשות אורט ומהנדס הרדיו שלו מולר (Muller) את התוצאות של האמריקאים. באותה שנה פורסמו התוצאות האלה בכתב העת "נייצ'ר" (Nature) בגיליון 168 שלו בשני מאמרים שדיווחו על התגלית החשובה הזו - המאמר הראשון על הקבוצה האמריקאית ומייד אחריו המאמר על הקבוצה ההולנדית.

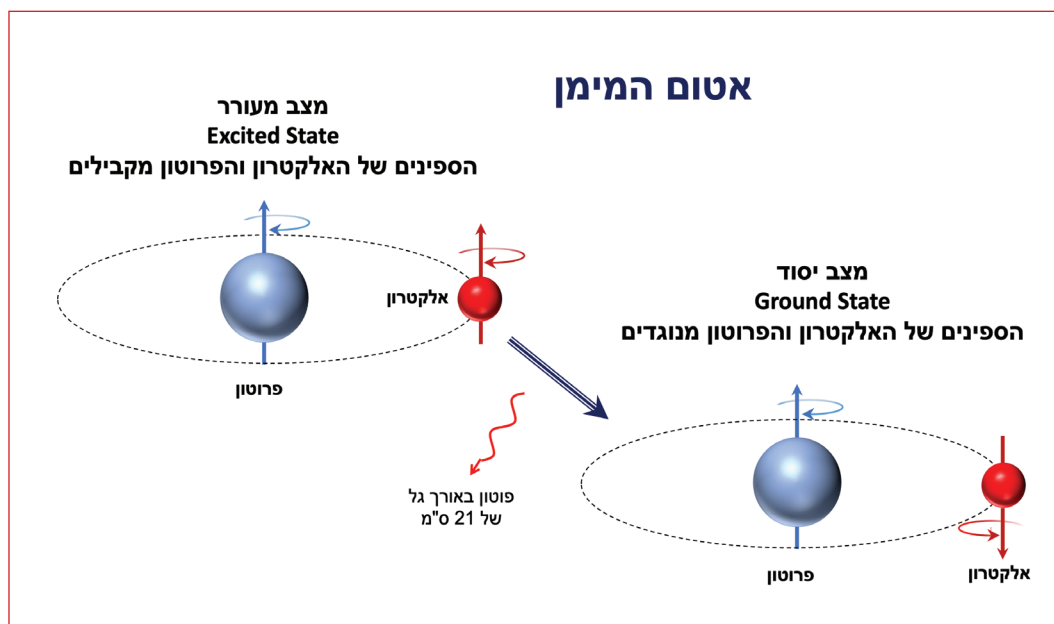


במצב הכי פחות אנרגטי, כמו כדור המתגלגל מפסגת הר למרגלותיו.

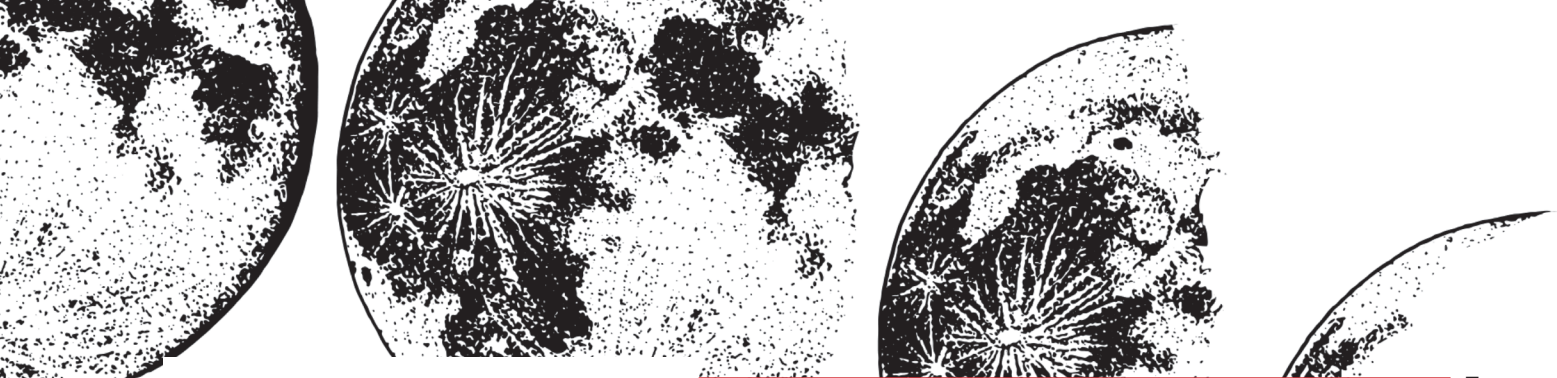
כתוצאה של מעבר אטום המימן מהמצב המעורר למצב היסוד, הוא מאבד אנרגיה ומשחרר פוטון (גל קרינה אלקטרומגנטית) באורך של 21 ס"מ. המעבר הזה משנה את המצב היחסי בין הספינים של האלקטרון ושל הפרוטון ממצב מקביל למצב מנוגד. מעבר זה נקרא מעבר על-דק (Hyperfine transition), בגלל הפרש האנרגיה הקטן מאוד בין שני המצבים. במקרה שלנו, אנרגיית פוטון באורך גל של 21 ס"מ קטנה בערך פי מיליון מאנרגיית פוטון של האור הסגול (שאורך הגל שלו כ-1/2 מיקרון).

מעברים ממצב אחד למשנהו באטומים או במולקולות, גם אם מעברים אלו טובים יותר לאטום או למולקולה מבחינה אנרגטית. המעבר שפולט את קרינת 21 ס"מ הוא אחד המעברים האסורים. אם כך, נשאלת השאלה: איך המעבר קורה למרות שהוא אסור על פי חוקי מכניקת הקוונטים? כדי לענות על השאלה, עלינו להבין שחוקי מכניקת הקוונטים הם הסתברותיים במהותם, כך שכאשר אנו אומרים כי מעבר ממצב אחד למצב אחר אסור, כגון המעבר המתואר באיור 1, אנו מתכוונים שהסתברות להתרחשותו נמוכה מאוד, וכי המערכת הפיזיקלית של אטום המימן נשארת במצב המעורר זמן רב מאוד לפני שהיא עוברת למצב היסוד.

לקרינה זאת יש היבט נוסף, הקשור גם הוא לתורת הקוונטים, והוא מתייחס לזמן שלוקח לקרינת 21 ס"מ לעבור מהמצב המעורר למצב היסוד. אחד המאפיינים של תורת הקוונטים הוא שבמקרים מסוימים היא אוסרת



איור 1: אטום מימן ניטרלי. הצד הימני של האיור מציג את המצב שבו הספין של האלקטרון מנוגד לספין של הפרוטון - זה המצב עם האנרגיה הנמוכה ביותר (מצב יסוד). הצד השמאלי של התרשים מציג את המקרה שבו ספין האלקטרון וספין הפרוטון מקבילים (מצב מעורר). כאשר אטום מימן עובר מהמצב המעורר (הצד השמאלי של האיור) למצב היסוד (הצד הימני של האיור), נפלט פוטון עם אורך גל של 21 ס"מ.

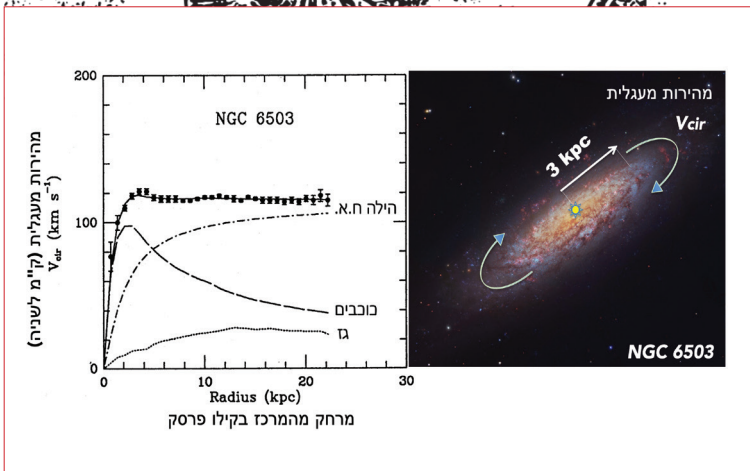


תפקידה של קרינת 21 ס"מ בגילוי החומר האפל בגלקסיות

כפי שציינתי בחלק הקודם, אנו יכולים להשתמש בקרינת קו המימן כדי לצפות בתופעות רבות ביקום. אחת החשובות ביניהן היא תופעת המימן האטומי בגלקסיות ספירליות, מימן המצוי בתווך הבין-כוכבי (Interstellar medium) שבגלקסיה. כתוצאה מתנאי החום וסוגי הקרינה בתווך זה, מימן ניטרלי משתרע הרבה מעבר לאזורים האלה שהכוכבים מרוכזים בהם בתוך גלקסיות ספירליות. לכן, קו המימן מאפשר למדוד את תכונות הגלקסיה במרחקים גדולים יותר ממרכז הגלקסיה, יחסית לאלה שהכוכבים נמצאים בהם. איור 2 של גלקסיה ספירלית (NGC 6964) מבהיר נקודה זו. הצד השמאלי של איור 2 מראה תמונה של NGC 6964 שצולמה על ידי הטלסקופ היפני סובארו בתחום האור הנראה שנפלט מהכוכבים בגלקסיה. האיור גם מראה (בצד ימין) שגז המימן הניטרלי משתרע ברחבי הגלקסיה על מרחקים הגדולים בהרבה מהכוכבים. השטחים המתוארים בשני צידי האיור שווים.

התפלגות המימן ברחבי הגלקסיה, שרואים בבירור בגלקסיות ספירליות באמצעות קרינת 21 ס"מ, עוזרת להבין בצורה עמוקה יותר את מהות החומר המרכיב את הגלקסיות והתפלגותו ברחבי הגלקסיות. במיוחד, קרינת 21 ס"מ חושפת את נוכחותו של סוג אחר של חומר בגלקסיות, החומר האפל (Dark Matter), בנוסף לכוכבים ולתווך הבין-כוכבי (המורכב מגז ומאבק). התפתחות טלסקופי הרדיו, במיוחד אלה המודדים את קרינת 21 ס"מ שאירעה בשנות ה-60 וה-70, תרמה לגילוי החומר האפל בכל הגלקסיות הספירליות שנצפו. למעשה, היום אנו יודעים שהחומר האפל הוא אחד המרכיבים החשובים ביותר של היקום, והוא תורם לצפיפות היקום פי חמישה מתרומת החומר הרגיל, שממנו מורכב כל מה שאנו רואים סביבנו על פני כדור הארץ.

בשנות ה-70 של המאה הקודמת החלו מדענים לעקוב אחר מהירות הסיבוב של כוכבים וגז המימן סביב מרכזי הגלקסיות הספירליות. הפונקציה המתארת נתונים אלה נקראת "עקומת הסיבוב של הגלקסיה" (Galaxy Rotation Curve), והיא משתמשת באפקט



צילום: NASA, ESA

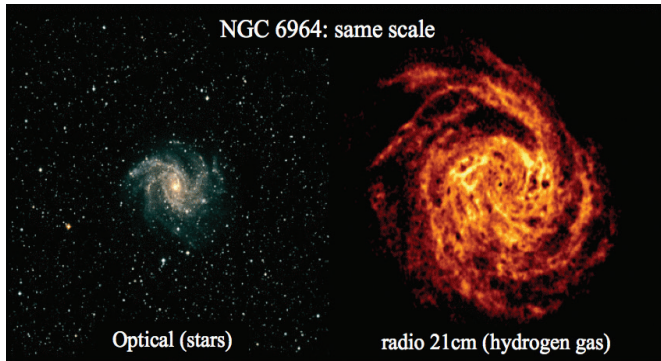
חישובים ומדידות מראים כי אם אטום מימן נמצא במצב המעורר, הוא יישאר בו בממוצע יותר מעשרה מיליון שנים לפני שהוא עובר למצב היסוד. משמעות הדבר היא ששחרור קרינת 21 ס"מ הוא נדיר, אבל בכל זאת אנו רואים שהוא מתרחש הרבה ביקום. הסיבה לכך היא המספר העצום של אטומי המימן ביקום, במיוחד במקומות שבהם הצפיפות גבוהה יחסית. מספר גדול זה של אטומי המימן הופך את קרינת 21 ס"מ לאחד מסוגי הקרינה החשובים ביותר שאנו צופים באמצעותם ביקום.

לפני שעוברים לחלק הבא, צריך לציין שהמימן נמצא בטבע בצורות שונות: הוא עשוי להיות מיונן, כך שהאלקטרון אינו קשור לפרוטון; או אטומי (ניטרלי) כאשר האלקטרון והפרוטון קשורים יחד ונמצאים באטום מימן הנפרד מאטומים אחרים, כמו המצב שדנים בו כאן (איור 1). כמו כן, מימן עשוי להיות חלק ממולקולה, כגון מים (H₂O), שבו שני אטומי המימן קשורים לאטום חמצן; או מימן מולקולרי שבו אטומי המימן קשורים זה לזה (H₂).

מכל הצורות השונות האלה של המימן, יש רק מקרה אחד שבו הוא משחרר קרינת 21 ס"מ - המצב האטומי הניטרלי. במקרים האחרים שבהם המימן הוא חלק ממולקולה, נוכחותם של אטומים אחרים באותה מולקולה משבשת את האינטראקציה בין הספינים של האלקטרון והפרוטונים. כמובן שבמקרה שהמימן מיונן לא תהיה אינטראקציה כזו בכלל.

איור 2: צד ימין של האיור מראה תמונה של הגלקסיה NGC 6503 שנלקחה מטלסקופ החלל האבל ומטלסקופ סובארו היפני. צד שמאל של האיור מראה את עקומת הסיבוב של הגלקסיה כפי שנמדדה באמצעות קו המימן (סמלים מרובעים), הכוכבים (הקו המקוטע) והגז הבין-כוכבי (הקו המנוקד). הקו המקוטע - מנוקד מראה את התרומה שצריכה להיות להילת החומר האפל, כדי שנוכל להסביר את עקומת הסיבוב של הגלקסיה. הקו השחור הרציף, שסביבו מפורזות נקודות התצפיות המרובעות, הוא תוצאה של סכום התרומות השונות לעקומת הסיבוב: תרומת הגז, הכוכבים והילת החומר האפל.

איור מתוך: K. G. Begeman, A. H. Broeils and R. H. Sanders, Extended rotation curves of spiral galaxies: Dark haloes and modified dynamics, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 249, 523 (1991).



איור 3
משמאל - תמונה של
NGC 6964 שצולמה
על ידי הטלסקופ היפני
סובארו בתחום האור
הנראה שנפלט מהכוכבים
בגלקסיה. מימין -
גז המימן הניטרלי
משתרע ברחבי הגלקסיה
על מרחקים הגדולים
בהרבה מהכוכבים.
השטחים המתוארים בשני
צידי האיור שווים.

הגלקסיה, והוא מכיל פי חמישה מהחומר הרגיל. הקו הרביעי, הקו השחור הרציף, שסביבו מפורזות נקודות התצפיות המרובעות, הוא תוצאה של סכום התרומות השונות לעקומת הסיבוב: תרומת הגז, תרומת הכוכבים ותרומת החומר האפל; כלומר, סכום שלושת הקווים האחרים. ברור שלא נוכל להשיג התאמה טובה בין תוצאות התצפיות לבין התחזיות התיאורטיות, ללא השערה של קיום חומר אפל.

בחמשת העשורים האחרונים הצטברו עדויות רבות אחרות לקיומו של החומר האפל ביקום. עדויות אלה מראות כי חומר זה אינו רק אפל, אלא גם שונה בתכלית מהחומר הרגיל שיוצר את כל מה שאנו רואים על פני כדור הארץ. התכונה העיקרית של החומר האפל המבדילה אותו מהחומר הרגיל היא שהוא אינו מושפע מהכוח האלקטרומגנטי ולא משתתף באינטראקציה איתו. לעומת זאת, הכוח האלקטרומגנטי ממלא תפקיד מרכזי בקביעת התכונות הפיזיקליות והכימיות של החומר הרגיל. הנתונים התצפיתיים מראים גם שהיקום מכיל פי חמישה יותר חומר אפל מהחומר הרגיל, כלומר מה שאנו מתארים כחומר "נורמלי" הוא למעשה חומר משני ויוצא דופן ביקום.

זו הייתה אחת התגליות החשובות ביותר בקוסמולוגיה שלמדנו בשנות ה-70 וה-80 על היקום הודות לקרינת 21 ס"מ.

דופלר כדי למדוד את מהירות הכוכבים והגז בגלקסיה כפונקציה של המרחק ממרכזה. בשנות ה-70 הבחינה המדענית האמריקאית ורה רובין (Vera Rubin), שמדדה את מהירות הסיבוב של הכוכבים סביב מרכז הגלקסיה, שהעקומה מתנהגת באופן לא צפוי - היא נשארת קבועה אחרי מרחק מסוים מהמרכז. רובין שיערה שהתנהגות זו מתרחשת בגלל קיומו של החומר האפל, אבל הנתונים שהשתמשה בהם היו בתחום האור הנראה (שלא מגיע מרחוק מספיק), ולכן הם לא הראו את התופעה שרובין טענה שהיא קיימת בצורה משכנעת.

באותה תקופה השתמש צוות הולנדי מאוניברסיטת חרונינגן, האוניברסיטה השנייה שלי, בראשות טיירד ואן אלבדה (Tjeerd van Albada) ורנו סאנצ'יזי (Renzo Sancisi), בנתוני קרינת 21 ס"מ העוקבים אחר גז המימן בגלקסיה, כדי למדוד את עקומת הסיבוב. הצוות הצליח למדוד את מהירות סיבוב הגז במרחקים גדולים יחסית, כיוון שגז זה מגיע גם לחלקים החיצוניים של הגלקסיה, ומצא כי עקומת הסיבוב נשארת קבועה בקירוב (כפי שרובין טענה). אי-השתנות מהירות הסיבוב כפונקציה של המרחק מצביעה על נוכחותו של חומר מסוג נוסף (אפל), המהווה את רוב המסה של הגלקסיה.

צד שמאל של איור 3 מראה דוגמה למדידת מהירות מעגלית באמצעות קו המימן, כפונקציה של המרחק ממרכז הגלקסיה הספירלית NGC 6503. הצד הימני של האיור מראה תמונה של הגלקסיה בתחום האור הנראה. בצד השמאלי של האיור רואים סמלים מרובעים שמציגים את מהירות הסיבוב שנצפתה באמצעות קרינת 21 ס"מ של המימן. הקו המנוקד באותו צד מראה את תרומת הגז בתווך הבין-כוכבי לעקומת הסיבוב, והקו המקווקו מראה את תרומת הכוכבים לאותה עקומה, כאשר שתי התרומות נמדדות בצורה ישירה. מהאיור ברור שתרומת הכוכבים והחומר הבין-כוכבי קטנה מכדי להסביר את העקומה הנמדדת. הקו השלישי, הקו המקוטע-מנוקד, מראה את התרומה שצריכה להיות להילת החומר האפל כדי שנוכל להסביר את עקומת הסיבוב של הגלקסיה. כאמור, החומר האפל מגיע למרחקים גדולים יותר מכוכבים בתוך