

תכנית החלל הישראלית¹

יצחק בן ישראל²

החלל נוכח בחיינו הרבה יותר ממה שנדמה לנו. איננו שמים לזה לב כי השימוש בלוויינים הוא "שקוף". ישראל משתייכת למועדון מצומצם ביותר של מדינות בעולם, מועדון החלל.

מבוא

החלל נוכח בחיינו הרבה יותר ממה שנדמה לנו. איננו שמים לזה לב כי השימוש בלוויינים הוא "שקוף". לדוגמה, אנחנו קמים בבוקר, פותחים את הרדיו או גולשים ברשת כדי לדעת מהו מזג האוויר. כיצד החזאים יודעים שמחר יירד גשם? הם רואים בצילומי הלוויין את ענני הגשם עוד כשהם בדרך מקפריסין לישראל. אנחנו משתמשים בניווט בחיי היום יום ב-"Waze" או ב-GPS. שתי המערכות הללו מסתמכות על רשת לווויינים שמקיפים את כדור הארץ.

כאשר אנחנו פותחים את הטלויזיה בערב, אנחנו מקבלים שידורים מכל העולם. הם לא מגיעים אלינו בקפיצה. הם מגיעים אלינו דרך לוווייני תקשורת. השידור יוצא מארה"ב (לדוגמה), עולה אל לווויין תקשורת ומגיע אלינו. החיים שלנו מוקפים בהרבה מאוד לווויינים שאיננו מודעים לקיומם למרות שאנו משתמשים בשירותיהם. גם האינטרנט מגיע אלינו היום בחלקו דרך ערוצי לוווייני התקשורת הללו. כמו שאנו רואים, החלל משחק בחיי היום יום שלנו תפקיד הרבה יותר גדול ממה שנדמה לנו.

הלוויין נקרא כך מלשון "ללוות", "ליווי". הוא גוף שסובב סביב גוף אחר ו"מלווה" אותו במסעו בחלל. כדי שלווין יסתובב סביב כדור הארץ, הוא צריך להגיע למהירות גבוהה. המהירות ההתחלתית שיש לתת לכל לווין היא כ-8 קילומטר לשנייה. במהירות הזו,

הלוויין יחוג סביב כדור הארץ בלי שיפול אליו חזרה. הלוויין יכול להסתובב קרוב לפני כדור הארץ (במסלול נמוך) או להסתובב במסלולים רחוקים מכדור הארץ. ככל שיתרחק מכדור הארץ, ייחלש כוח המשיכה. מה שמחזיק את הלוויין במסלול קבוע הוא שני כוחות: כוח המשיכה והכוח הצנטריפוגלי (הכוח ש"זורק" את הלוויין אל מחוץ לכדור הארץ).

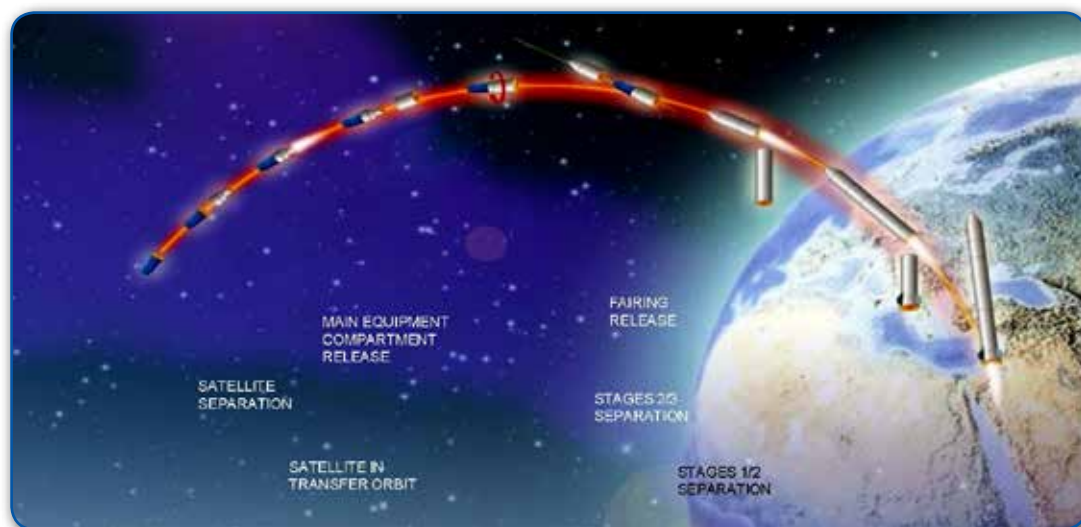
גם כדור הארץ מסתובב סביב צירו. לוווייני התקשורת מסתובבים סביב כדור הארץ באותה המהירות הזוויתית שכדור הארץ מסתובב סביב צירו - סיבוב אחד שלם כל 24 שעות. אם נעמוד על כדור הארץ ונסתכל על הלוויין, יידמה לנו שהוא עומד מעלינו ולא זז, לווויינים כאלו מכונים גיאוסטציונרים. לוווייני התקשורת הם לווויינים גיאוסטציונרים. הם כאילו תמיד "עומדים" במקום קבוע מעל פני כדור הארץ.

החלל בישראל

גם בעולם וגם בישראל העיסוק בחלל התחיל מסיבה ביטחונית. אצלנו, למשל, לאחר שנים של מלחמות עם מצרים, נחתם ב-1981 הסכם שלום בין ישראל למצרים. הסכם זה העלה בעיה: המצרים התחייבו בהסכם לא להכניס כוחות צבא לסיני. אבל באופן פרדוקסאלי, בגלל ההסכם לא יכלה ישראל לדעת בוודאות שהם עומדים בהסכם. לפני חתימת ההסכם, יכולנו לשלוח מטוסי צילום אל

1 מאמר זה מבוסס על [הרצאה מתוקשבת](#) ששודרה במסגרת "אקדמיה ברשת" ב-7.2.16. תמלול: אפרת סולומון. האירורים המשולבים הם חלק ממצגת ההרצאה והזכויות שמורות לפרופ' יצחק בן-ישראל.

2 פרופ' יצחק בן ישראל, יו"ר סוכנות החלל הישראלית במשרד המדע.



איור 1: טיל השביט

לאן ניתן לשגר לוויין מישראל?

בישראל אי אפשר לשגר לוויין לשום כיוון יבשתי, מאחר שהשליבים עלולים ליפול בתחומי המדינות השכנות לנו. המקום היחיד שנוכל לשגר אליו הוא מערבה לים התיכון, שם השליבים יפלו בים. אליה וקוץ בה: שיגור טילים מערבה יוצר בעיה. כדור הארץ מסתובב כאמור סביב צירו, והוא מסתובב ממערב למזרח. משום כך בשיגור מערבה (הפוך למקובל) אנו מפסידים אנרגיה כי איננו נעזרים במהירות תנועת כדור הארץ. זו הסיבה לכך שמתוך כ-1000 לוויינים החגים כיום סביב כדור הארץ ממערב למזרח, רק כ-20 לוויינים (כולם ישראלים) חגים בכיוון ההפוך.

איך התגברנו על הבעיה של שיגור הפוך?

ישראל השקיעה הרבה מאוד אנרגיה, מחשבה, כושר המצאה ותושייה בבניית לוויינים כך שיהיו קלים יותר. ליתר דיוק: לא קטנים יותר, אלא קלים יותר. הסיבה שאי אפשר ליצור לוויין קטן יותר היא כי אנחנו רוצים שהתמונות תהיינה באיכות גבוהה. תמונה באיכות גבוהה נמדדת על ידי גודל העדשה של הטלסקופ שנמצא בלוויין. לוויין קטן אינו יכול לשאת טלסקופ גדול מספיק. הגודל הפיזי של הטלסקופ הוא שקובע את איכות התמונה, והוא שקובע גם מה יהיה גודל הלוויין. אי אפשר להקטין את הלוויין בגלל הטלסקופ שעליו, אבל אפשר להקטין את משקלו. זאת אם החומרים שהלוויין עשוי מהם קלים יותר. המטרה היא שלווין לא ישקול יותר מ-300 קילוגרם. כאמור, הלוויינים הישראליים מתאפיינים

שטח מצרים. לאחר ההסכם, הדבר נאסר בגלל שהוא מהווה פעולה של "הפרת הריבונות". כדי להמשיך לצלם ללא הפרה של ריבונות, היינו צריכים לשלוח לוויין שיחוג סביב כדור הארץ בחלל. החלל אינו נחשב תחום ריבוני השייך למדינה זו או אחרת. הוא תחום בין-לאומי.

בגלל הצורך הביטחוני, מצאנו עצמנו מחזיקים נכסים כמו "אופק", כלומר, לווייני צילום. אנו מחזיקים במספר לווייני "אופק" אשר מקיפים את כדור הארץ.

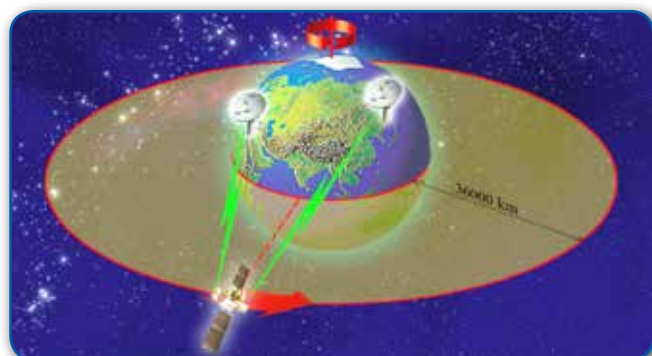
הצורך הראשוני שלנו לדעת מה קורה במדינות שגובלות אתנו הוא עתיק יומין. גם בתנ"ך מופיע פסוק שאומר "שלח לך אנשים, ויתורו את ארץ כנען" (במדבר, י"ג, ב' - סיפור המרגלים). הלוויין הוא המשך של אותו הסיפור בטכנולוגיה המודרנית.

טיל השביט מיוצר בישראל, והוא המשגר את הלוויין (איור 1). שיגור לוויין מתבצע בדרכ כלל באמצעות טיל רב-שלבי. השלב הראשון מוצת תחילה וגורם לטייל לעלות מעלה. כאשר הדלק אוזל בשלב ראשון, הוא מתנתק משאר השלבים. רק אז מציתים את השלב השני שצובר גם הוא מהירות. בהמשך גם השלב השני מתנתק ונופל מטה, ואז מציתים את השלב השלישי. כך מתקבלת עוד מהירות עד להגעה ל-8 ק"מ בשנייה שזוהי המהירות הנחוצה כדי שלווין יסתובב סביב כדור הארץ.



לוחיים גיאוסטציונרים

מלבד משפחת לוחייני הצילום קיימת כאמור משפחת לוחיינים אחרת, היא משפחת הלוחיינים הגיאוסטציונרים (איור 3), אלו שנראים כאילו הם עומדים מעל ראשנו. את הלוחיינים האלו אין ישראל משגרת לבד. אלו בדרך כלל לוחיינים מסחריים ששיגורם נקנה בדרך כלל בחברה מסחרית שמבצעת את השיגור. המרחק של הלוחייני במסלול הגיאוסטציונרי הוא 36,000 קילומטרים מעל פני כדור הארץ. לוחייני צילום נעים במרחק אופייני של 500 קילומטרים "בלבד" מעל כדור הארץ. המרחק של הלוחיינים הגיאוסטציונרים אומנם גדול מאוד, אבל יתרונם בכך שבגובה הזה הם מסתובבים יחד עם כדור הארץ.



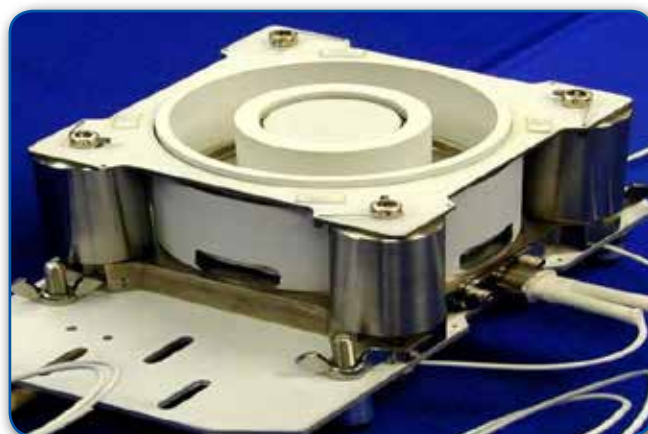
איור 3: לוחיינים גיאוסטציונרים

ישראל בונה כאמור גם לוחייני תקשורת. בשנת 1996 הציבה ישראל בחלל את הלוחייני עמוס-1 (משפחת "אופק" היא משפחת לוחייני הצילום, ומשפחת "עמוס" הם לוחייני התקשורת, איור 4). אחר כך באו עמוס-2, 3... וכן הלאה.

עמוס 5 נקנה ברוסיה. הוא לא יוצר בישראל בגלל הזדמנות מסחרית. זמן לא רב אחרי הצבתו קרתה ללוחייני עמוס 5 תקלה פתאומית שהשביתה אותו.

מדינת ישראל מחוברת לתקשורת העולמית דרך הלוחיינים האלו. באמצעותם (ובאמצעות מספר קטן של כבלים תת-ימיים) מתקבלת כל האינפורמציה העולמית המגיעה לטלוויזיה, לאינטרנט וכולי. הצרכנים הם בדרך כלל גופים עסקיים. לכן לוחייני תקשורת הם בדרך כלל לוחיינים מסחריים. הלוחייני הבא שתוכנן בסדרת לוחייני התקשורת הוא עמוס-6, לוחייני

בחומרים קלי משקל לצורך זה, גם חלק מהמערכות בלוחיינים הישראליים שונות מהמקובל בעולם. לדוגמה: מערכת ההנעה בלוחייני. החלל הוא כמעט ריק, ולכן כמעט שאין בו חיכוך. במקום ללא חיכוך הלוחייני יכול לחוג סביב כדור הארץ לנצח. אבל הלוחייני נמצא באזור שבו יש בכל זאת מעט חלקיקים ומעט חיכוך, לכן אחרי מספר מספיק של סיבובים יתחיל הלוחייני לרדת לכיוון כדור הארץ. כדי שהוא לא יתרסק, צריך לתת לו דחיפה קטנה בעזרת מנוע. המנוע נדרש גם כדי לכוון את הטלסקופ ליעד שאותו רוצים לצלם. המנוע עובד על גז, אך מכל הגז גדול מאוד וכבד מאוד. בישראל נמצאה שיטה אחרת, והיא מנוע חשמלי קטן יותר ומבוסס על אינטראקציה של חלקיקים טעונים חשמלית (יונים) עם שדה מגנטי בניצב, היוצר כוח אלקטרומגנטי. אנרגיה חשמלית שהומרה מאנרגיה סולרית, מצויה בלוחייני בשפע. על הלוחייני יש תאים סולאריים שאוגרים את אנרגיית השמש בכל סיבוב של הלוחייני סביב כדור הארץ והופכים אותה לאנרגיה חשמלית. שימוש במנוע יונים כמתואר לעיל יחסוך בסופו של יום משקל רב (איור 2).



איור 2: מנוע חשמלי (יוני)

חשוב לציין שוב שלמרות משקלם הקל, הלוחיינים הישראליים הם בעלי ביצועי צילום מעולים, ורק הלוחיינים האמריקנים עולים עליהם. כל לוחייני אחר - רוס, סיני וכו' - נותן ביצועים פחות טובים מלוחייני הצילום של ישראל וארה"ב. הלוחיינים הישראליים אמנם טובים קצת פחות מלוחיינים האמריקנים אך הם קלים מהם במידה משמעותית. לוחייני צילום אמריקני אופייני שוקל כמה טונות, בעוד שלוחייני ישראלי שוקל 300 קילוגרם.



בחליפות ותאים מוגנים. אפילו לוויין שאין בו חיים צריך להיות מוגן. בחלל אין כמעט כלום, אין אוויר, אין לחץ אוויר, הכול ואקום כמעט מוחלט, ריק. אם יישאר אוויר בתוך הלוויין, הלחץ שיווצר יכול לגרום לו להתפוצץ, כמו בלון שעולה גבוה מדי. לכן כל מערכות הלוויין צריכות להתנהל ולהתמודד בתנאי ריק, ואקום.

נוסף לכך קיימת בעיה של טמפרטורה. לוויין צילום עושה סיבוב מלא סביב כדור הארץ כל שעה וחצי, שמתוכה הוא ניצב מול השמש שלוש רבעי השעה, ואין אטמוספירה שתגן עליו, וכך הוא מתחמם למאות מעלות צלזיוס. שלוש רבעי השעה לאחר מכן הוא נמצא בצל מאחורי כדור הארץ, והוא מתקרר לטמפרטורה שקרובה לאפס המוחלט -237°C . החומרים שבלוויין צריכים לעמוד בתנאי חום וקור קיצוניים. הרכיבים חייבים להיות עמידים או לפחות להיות עטופים ב"שמיכות תרמיות" שיבודדו אותם מחילופי החום בסביבה. בעיית הטמפרטורה היא עצומה.

קיימת גם בעיית הקרינה. לא רק קרינות אלקטרומגנטיות או קרינות המגיעות אלינו מהשמש, אלא גם חלקיקים שנמצאים בחלל. למרות שהחלל ריק כמעט לגמרי, עדיין יש שם שרידים של אטמוספירה, וגם היא מהווה בעיה. כל חלקיק קטן שמתנגש בלוויין במהירויות העצומות של הלוויין, יכול להיות הרסני ביותר. החלל הוא אפוא סביבה אכזרית מאוד. כשבונים לוויין, צריך לבנות אותו בצורה כזו שבראש ובראשונה יתפקד על כדור הארץ, כדי שנוכל לבדוק אותו כאן, וכדי שלאחר מכן יצליח לעמוד בכל התנאים הלא פשוטים שהחלל מייצר.

יש אפוא צורך להקים תעשייה שלמה שיודעת לבנות רכיבים שיעמדו בכל התנאים של הלוויין. לדוגמה, אם נרצה להציב מחשב בלוויין, לא נוכל להציב מחשב פשוט שאנחנו קונים בחנות מחשבים. המחשב צריך להיות עמיד בטמפרטורות ובלחץ שהחלל מציב מולנו. כאשר המחשב שלנו בבית מתחמם, אנו מפזרים את החום בעזרת מאוורר קטן. מאוורר לא יעבוד בחלל כי אין שם אוויר. פרופלור מסתובב לא ידחוף אוויר בחלל כי אין מה לדחוף, ולכן צריך לחשוב איך מפזרים את החום מהלוויין בחלל.

כל הסוגיות האלו מחייבות תעשייה שלמה. מדינת ישראל צברה כבר 40 שנות עיסוק בלוויינים, ולכן התעשייה הזאת

עצום בגודלו, כמו בניין רב-קומות. עמוס-6 היה אמור להיות הלוויין הגדול ביותר והמשוכלל ביותר שנבנה ע"י תעשיית החלל בארץ. השירותים המסחריים של עמוס-6 נקנו בין היתר על ידי "פייסבוק". מרק צוקרברג קנה את שירותיו כדי לספק דרכו שירותי אינטרנט למרכז אפריקה, על מנת להתגבר על הקושי בהצבת תשתית כבלים באזור.



איור 4: הלוויין עמוס

לצערנו, בזמן ההכנות לשיגור ממשגר מסחרי בארה"ב, אירעה תקלה במשגר, שגרמה בין היתר להשמדת עמוס-6 לפני השיגור.

מועדון החלל הישראלי

אחרי שיגור לווייני הצילום ולווייני התקשורת, ישראל מצאה את עצמה משתייכת למועדון מצומצם ביותר של מדינות בעולם, מועדון החלל. הראשונה שהייתה חברה בו היא ברית המועצות (כיום רוסיה), השנייה ארה"ב, אחר כך הצטרפו מספר מדינות אירופאיות כמו אנגליה וצרפת. מדינות אירופה הבינו שלבנות לוויין זה עניין יקר ולכן החליטו כל מדינות אירופה להתאחד לסוכנות חלל אחת שתבנה את לווייני אירופה ביחד - סוכנות החלל האירופית. המדינות הנוספות שהצטרפו למועדון היו סין, הודו, יפן ולבסוף ישראל. מתוך 9 מדינות ישראל היא השביעית שהצטרפה למועדון ב-1988. מועדון זה הוא מועדון של מדינות שיודעות לבנות ולשגר לעצמן את הלוויינים. כל מדינה אחרת שלא חברה במועדון החלל, קונה לוויין מאחת המדינות החברות במועדון.

אתגרים בחלל

החלל, בניגוד לתנאי הסביבה על פני כדור הארץ, הוא מקום שקשה מאוד לחיות בו. בני אדם שנשלחים לחלל צריכים להיות



לרכיב ישראלי שנמצא במערכת חשובה מאוד, וזו גם דוגמה לשיתוף הפעולה שיש בין ישראל לסוכנויות חלל אחרות, במקרה הזה - לסוכנות החלל האמריקנית נאס"א.

לווין "ונוס"

לפני מספר שנים פנתה סוכנות החלל הצרפתית לישראל בבקשה לבנות יחד לוויין. נודע לה שיש ישראל בונה לוויינים קלים (בגלל הצורך לשגר לוויינים נגד כיוון סיבוב כדור הארץ), וזה גרם לה לפנות בבקשה לבנייה משותפת. צרפת ביקשה שישראל תבנה את הלוויין עצמו, והם יבנו את המצלמה (בנוסף למשגר ולתחנות הקרקע). לצרפתים היה ידע במצלמות שבזמנו לא היה בידי ישראל. כך נוצר שיתוף פעולה על לוויין שנקרא "ונוס", כמפעל משותף של צרפת וישראל, דהיינו, סוכנות החלל בישראל (ISA), וסוכנות החלל הצרפתית (CNES).



איור 5: רכב החלל על המאדים, Curiosity

לצרפתים יש יכולת מדהימה בבניית מצלמות, אבל למרות

זאת התברר להם כי אין ביכולתם לבנות

מצלמה שתעמוד בדרישות הנובעות מכך שמדובר בלוויין קל משקל. המצלמות שהם ידעו לבנות לא היו קלות מספיק בשביל הלוויין, והידע על בניית מצלמה קלה יותר לא היה בידיהם. זו הסיבה לכך שהצרפתים הוציאו מרכז עולמי לבניית המצלמה, והפלא ופלא - מי שזכה במרכז הייתה החברה הישראלית "אלאופ"/"אלביט" שהתמחתה בייצור מצלמות קלות משקל עבור הלוויינים הישראליים. כל זה יצר מצב שבו כל הלוויין נבנה בישראל בסופו של דבר. חלקו במימון ישראלי וחלקו במימון צרפתי. "ונוס" שוגר לחלל באוגוסט האחרון, והוא ממלא את משימתו המדעית בהצלחה, לטובת ניטור סביבת כדור הארץ (מציאת זיהומים במים, למשל) ועזרה למשימות חקלאיות.

קיימת. בדרך כלל התעשייה האווירית היא שבונה את גוף הלוויין, והיא גם האינטגרטור, כלומר - היא מחברת אל הלוויין את כל שאר המערכות. גם תעשיות אחרות תורמות את חלקן, כמו "אלביט" (באמצעות חטיבת "אלאופ") הבונה את המצלמות האופטיות. "אלתא" בונה את סטעדי המכ"ם של הלוויינים. "אקיוביט" בונה את השעונים האטומים, "רמון ציפס" את המחשבים וכך הלאה.

כתוצאה מכל זה, יש ברשותנו למעלה מ-15 לוויינים ששוגרו לחלל, חלקם לווייני צילום ממשפחת "אופק", חלקם לווייני תקשורת ממשפחת "עמוס", חלקם לווייני מכ"ם. אולי אחד הדברים המדהימים יותר בסיפור הזה הוא שישראל מחזיקה ב-100% הצלחה של פעולת לוויינים בחלל. אם הלוויין מגיע למסלול המיועד, ומשהו מתקלקל בו, קשה מאוד לתקן אותו. אי אפשר למשל לשלוח טכנאי שיתקן אותו.

מעבר לכך כל הרכיבים שהוזכרו צריכים כאמור לעמוד בתנאי סביבה חלליים. הצלחנו לפתח רכיבים שיש להם ביקוש, ולכן הם נקנים על ידי הרבה מאוד חברות אחרות שמייצרות לוויינים באירופה בארה"ב. יש היום תתי-מערכות ישראליות בלמעלה מ-50 לוויינים של מדינות אחרות. גם זה חלק מתעשיית החלל בישראל. דוגמה לכך היא רכב החלל ("רובר") שנוסע כיום על מאדים. שמו הוא Curiosity ("סקרנות" בעברית, איור 5). לרכב יש מחפר שמוציא דגימות מאדמת המאדים ובתוכו קיימת מין מעבדה קטנה שם הוא בודק את מרכיבי הקרקע מבחינה כימית וספקטרלית. את התוצאות הוא משדר לכדור הארץ. כל זה במטרה עתידית לאפשר נחיתה של בני האדם על המאדים בעוד כ-20 שנה. ל"קוריוסיטי" יש מערכת קירור שמיוצרת בחברת "ריקור" בקיבוץ עין חרוד. זאת דוגמה