

כרכ' יי מס' 1, 1965
מחיר החוברת 1.80 ל"י

אלה עתון מדעי לכל



אנו ותורשה

הגעה אלקטרוסטטית

חרדמת חורף

סדרניות ותיכנון בחקלאות

צמחיים פאובניים בישראל

חינוך נבואה בצרפת

בסיסות המחקר

ספרים

חרשות החלל

כתבות וסדרורים קבועים

הנעה אלקטו-ריסטאטית

מאת

ישעיהו זינגרד

של הרקטה משמשים לקירור הכוח וסופגים, בדרך זו, את הארגוגיה הגרעינית המשחררת. לנו יכול כל גז לשמש כדלק לרקטה האטומית.

הן בראקטה הרכבתית והן בראקטה-האטומית מוגבלת מהירות הפליטה של הגאים ביחס לракטה (על חטיבתה של מהירות הפליטה בהגעה רקטית עוד נעמד להלן). הגבלה זו גובעת מכך שמהירות הפליטה של הגאים תלויות בטפראותה שלם, לפני התפשטותם, וטפראותם, ומצדיה מוגבלת ע"י כוח העמידה של דפנות המיכל בו מתרחשת הריאקציה.

דין כל-הרכב החלילי כדיין כל טיפוס אחר של כל-ירכב מי-מנוע. מנווע טוב הינו מנוע המתאים לשילוחתו: המרחק שעלי לעבור, וכן הנזעה, ממדדי המיטען ואופיו (מכשרים, אנשיים וכליים) וכיוצה באלה. ישנן כמה וכמה אמות-מידה להערכת יציעות המנווע והשיבותו היחסית משתנה לפי טיב השילוחות. אמת-מידה רואונה היא החיסכון בחומר-דלק. נהוגים להשתחש במנונה "תקיפה סגולית". תקיפה סגולית הנה החיס בין הדחף (thrust) שנוצר לבין שיעור הספיקה המשקלית של החומר הנפלט מניר המנווע. הויל והדחף נמדד ביחס מרשל (ק"ג) ורויימת-המאמסה (דלק) נמדד ביחסות-ימשל לשניות, תהא התקיפה-הסגולית מבוטאת בשניות. אפשר להתחבוע על ערך זה כאשר קאיilo הינה מיצג את משך הזמן בו מתפללה ק"ג אחד של חומר-דלק אם הוא יספק בראכיות, ק"ג אחד של דחף.

על-מנת לעשות את התקיפה הסגולית מacistsimalit, על מהירות הפליטה להיות גדולה, ככל האפשר. בראקטות הרגוליט מփשים דרכם להגדלת התקיפה הסגולית או להגדלת מהירות הפליטה (וחוצאת הדבר שווה). לשם כך נשרפ הדלק בהארבעה בטפראותה גבוהה ככל-האפשר, כי בדרך זו נעשה מיניה אנרגיה כימית רבה ככל האפשר. החום מועבר لأنרגיה מכנית במאחסנים ייעילות, ע"י בניית גאותה של נחיר הרא-קטה, דרכו נפלטים, במירות רבה, גאים להטמים.

המהירות הסופית (V_g) של הרקטה תלויות מכובן באופי המסלול אליו היא נשלחת. באופן כללי, ככל שהמטרה וחוקה יותר המהירות הסופית הדרישה גדולה יותר. מספר מהירותים אופיניות מובאות בטבלה 1.

טבלה 1: המהירות הנדרשת מראקטה, כדי להגיע למטרות שונות

ניחס משדה-הכוכב של צדור-הארץ	ק"מ בשנייה
מסלול סביב הארץ למסלול סביב מאדים ובחזרה	23
"	25
"	40
"	73
"	120
נוגה	"
כוכב (מרקורי) ובחזרה	"
צדק ובחזרה	"
שבתאי ובחזרה	"

"鬥"ע", כרך י', מס' 1, איד' תשכ"ה, מאי 1965

כיצד הגיע האדם לכוכבי-הලכת המרוחקים ואולי אף לכוכבים אחרים? הדור הקיים של הרקטות, אלו הרקטות הכימיות, יכול לעשות דברו עד לירח ועד למאדים. אך מרחוק כמרחקה של הנוגה מציב גבו ליעילותו של רקטות אלו ואילו טיסה לפולונין בראקטה כימית תארך 43 שנים. אם חוץ האדם מראקטות אלה והמצוד במערכות-הנעה רבות-יעצומה מן המזויות כיו"ם.

בעשר השנים האחרונות התחרב שדה המחקה בהנעת רקטות במידה חסרת תקדים. התורמה המכערת לכך באה משני סוגים חדשים של מנועי-ראקטות: המנווע האטומי והנעה האלקטרו-ריסטאטית.

כאשר אנו חושבים על רקטה הטסה לחלל, מציין מוחנו תמונה של תא-שריפה, בו מתרחשת ויאקציה כימית סוערת, היוצרת זרמי-גזים להטמים, אשר פליטתם מביאה להנעת הרקטה. למעשה כל הרקטות שעוזבו עד היום את פניה האדמתה הונעו בדומה דומה מאוד: אם בעורת דלק נזול — למשל הטילים מטיפוס "אטלאס" או "סטורון" — ואם בעורת דלק מזוק.

חוק התנועה השלישי של נוטון עומד בסיסו תנועתן של כל הרקטות: כאשר מתרחשת פעולה בכיוון אחד, מכוורת להתרחש פעולה-נגד, בכיוון נגד, השווה לה בעוצמתה. הכוח שבו נזחף חומר-הדלק מתא-הפליטה לאחרור שווה בדיק לכוח בו נזחף כל-הרכב קדימה. ואם כל שר התנאים יהיו שווים תביא הגדלת ציריך הדלק, בפרק-זמן מסוים, להגברת ספיקת הגאים הנפלטים, ולפיכך להגדלת הדחף ($thrust$).

מנוע אטומי אינו שונה בעירקו ממנועי-ראקטה רגיל. בשני המקרים כוח ההנעה בא מפליטת גאים להטמים, המתרחש דרך נזיר. מעלוותיו מקרוון בכך, שהחים הגאים הנפלטים משמש כור-אטומי במקום ריאקציה כימית. במנוע רקטה רגיל מוגבלת בהירות הדלק לפחות על הדלק להיכנס לרייקציה כימית ("להירף") בכך ליזור את גאו-הפליטה הלוותים; הגבלה זאת אינה קיימת במנווע אטומי: במנוע כזה גאו-הפליטה מתלהים מן הארגוגיה המשחררת, תוך כדי פיצול האטומים בכור-גרעיני הנמצא בראקטה; גאו-הפליטה

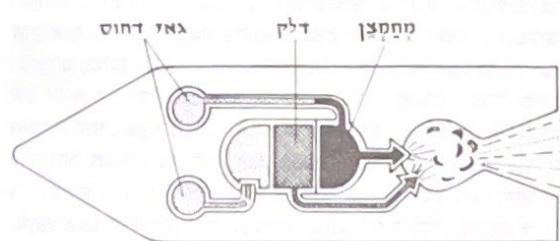
* ראה מאמרו של משה אשפטין "קליעים נהוגים ובאליסטיים", "מדע" ג'-1.

ישעיהו זינגרד נולד בארץ בשנת 1938. סיים את הפקולטה להנדסה מכנית בסכניון בחיפה בשנת 1962, ובשנת 1964 קיבל את התואר B.Sc. המשיך את לימודיו בארה"ב, ובשנת 1964 קיבל את התואר M.Sc. באוניברסיטת בר-אילן, פורטLAND. עתה הוא תלמיד-מחקר באוניברסיטה זו.

ракמות תרמאליות



ציור 1 : רакטה המופעלת בדלק מוצק

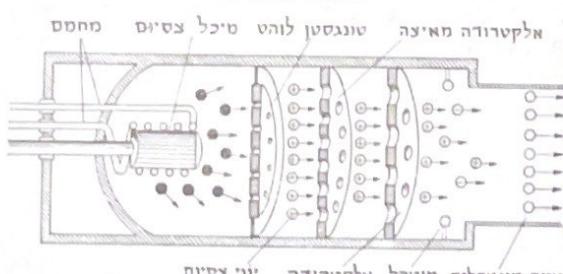


ציור 2 : רакטה המופעלת בדלק נחל



ציור 3 : רакטה המופעלת בכור גרעיני

מנוע היוני



ציור 4 : סכמה של מרכיבי ה发动ה האלקטרו-טטואטי

הנעה בדלק כימי. הרכבתה הימית מהירות גאות הפליטה מוגבלת ע"י כמות האנרגיה הניתנת להפיכה לאנרגיית-תנועה של הגז ויום, וע"י כושר-עמידה חרמי של דפנות תא-השפה ונחרה-פליטה. במוצע, התקיפה הסגולה המתקבלה משימוש בדלק מוצק היא 250–200 שניות, ואילו שימוש בדלק נוזלי מאפשר קבלת תקיפה סגולית בתחום 250–300 שניות. בראקטה אוטומטית, הטמפראטורה המאכטימאלית של הגז — ועם מהירות פליטה זו — מוגבלים ע"י כוח-העמידה של החומר ממנה עשוי המיכל. כור אוטומי בעל מזקה מוגבל בטמפראטור-עבודה של 2200 מ"צ, המשמש במינן גאו-כטני, מאפשר השגת תקיפה סגולית של כ-800 שניות והמחר בכיוון וה מבטחים תקיפות סגוליות גבוהות עוד יותר.

אם נבחן את המהירותים הסופיים הדרושים לשיסת בין-כוכבית, בהשוואה למחרה האפשרית של גאו-הפליטה בראש-תקה-כימות מקובלות, או אף בראקטה אוטומית, יתברר לנו שהוא צורק לבנות רакטה העשויה מיכל-דלק ענק, המשמש להטסת כדוריון קטן.

הנעה אלקטרו-טטואטית

מנוע היונים (ion engine) — כפי שהנעה האלקטרו-טטואטית קרויה לעיתים — כוללת עומת-זאת מהפה של ממש. במנוע מסוג זה "גאו-הפליטה" הם חלקים טעונים, שהזואנו על-ידי שדה חשמלי. לאחר ואנרגיה גאו-הפליטה היא אנרגיה חשמלית — ולא אנרגיה-יחסום, כבקרים הקודמים, ההגבלה של הטמפראטורה על מהירות הגזאים ביחס לרקטה אינה קיימת במונע יוניים; ולכן ניתן להשיג במונע זה מהירות-פליטה גבוהה הרבה יותר.

הנעה האלקטרו-טטואטית יצרה אופקים חדשים בשדה ההנעה הרקטית — אך גם הצילה בניה בעיות חדשות. לשם השוואת עם הנותנים המצווטים בטבלה 1 — מהירות גאו-הפליטה במונע-יוניים יכולה להגיע לכדי 100 ק"מ בשניה; עמידה זאת אין מושטע מכאן כי בכל מקרה נשודל לקבל מהירות גאו-הפליטה הגבוהה ביותר. את אופטימום מהירות-הפליטה מחשבים לפי הנחות המתאימים לכל מקרה ומקרה. בדרך-כלל, שואים פים לכך שמהירות הפליטה תחאים למאכטום של מיטען מועיל, ביחס למשקל הכללי של הרקטה. ב"מיטען מועיל" מתכוונים לאותו מיטען — שלחטתו מתוכנת הטישה כולה. הרקטה, הדלק וכל שאר המכשירים המשמשים לצרכי-הטיה עצמה, אינם נכללים ב"מיטען המועיל".

כוח הדחף

גורם חשוב אחר בהנעה וראקטית הוא כוח-הדחף. כוח-הדחף של רакטה מוגדר, כאמור, כמכפתה המאהה הנפליטת ביחס זמן. בעוד שהתקיפה הסגולית קבועה, כפי שראינו, את ההיחס בין מישקל הרקטה הכללי למשקל הדלק הדרוש לטיסה, הנה כוח הדחף קבוע את אפשרות הרקטה לנوع נגד הכוחות הפעילים עליה (בדרך כלל — כוח המשיכה).

ונitin להסביר זאת נך: בכדי שגוף ינוע בתאוצה בכיוון מסוים, יש להפעיל עליו כוח בכיוון זה. בכדי שראקטה תעוזב

בשתחי-מראות של 180 מ"ג, בקירוב; בסביבת המאדים, טמפרטורה
מן המשמש גדול פי 1.5 מזו של האדמה, היה צורך בשעה-
מראות כפול, כדי לקבל כמות שווה של אנרגיה.

אם-כ"י אין בעיה זו כדי לבטל את השימור באנרגיית המשמש
בעתיד הקרוב, נראה בבירור כי מקור האנרגייה הראשי להגעה
אלקטרוסטטית חייב להיות כור אטומי. ציר 4 מראה, בזורה
סכמתית, כמה מרכיבי ההגעה האלקטרוסטטיות.

הדלק ומגנטו היוניים: המושגים היסודיים הכרוכים
במנועי-יונים הם פשוטים. "הדלק" מורכב מחלקיים טעונים,
היווצאים ממוקרי-יונים ומואצם על-ידי שדה-יחשמלי, עד למ-
הירות רצואה. מהירות היונים נקבעת ע"י הפרש המתח V .
בין האלקטרודה המאיצה לבין מקור-יונים, מיטען הינו
ומאסתו m , לפי המשווה

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

הואיל ולינונים אלה מיטען חובי, הם נמשכים על-ידי כל
אלקטרודה בעלת מיטען שלילי. מנוע היונים הטיפוסי מבודד
בלוח-אלקטродת, הנמצא מאחוריו מוקרי-יונים. לולות, או לפחות
חרום במרקוז. היונים נעים במחירות לקראת המאיץ אלם
בקום לפגוע בלוח עצמו הם מושטים מסלולם, על-מנת
שייצרו קרניים שתעבורנה דרך חורי-הלהוח; היונים ממשיכים
בחנוותם אל מעבר לו. מעבר לאלקטרודה המאיצה מזורק
לחוץ אלומת-היונים ורם של אלקטرونים, כך שאת הרакטה
עווב סילון המורכב ממספר שורה של יונים ואלקטרונים. חלק
מנוע זה, המועד להזרקה האלקטרונית וניטROL האלומה מב'-
חינה החלמית, השיבוות מיוונית, הואיל ואם יעוזו את הרакטה,
בחלל, יותר יונים מאלקטرونים, ייעשה גוף-הראקטה טען
ותוך ומין קזר, ייווצר שדה החשמלי נגדי לשדה המאץ, ורם
החלקיים ייפסק. יש לציין שבינויו הראשוני בחלל — היחידי
עד עתה — שנערך בחודש يول'י 1964 בארץ-ישראל, הדגמה
החשיבות המכרצה של ניטROL נכון של אלומת היונים. תיאור
סכמתית של מנועי-יונים מובא בצייר 4. תפקוד האלקטרודה
המאיצה, הנראית בצייר זה, יוביר בהמשך המאמר.

את הבועות המדיעות והטכנולוגיות הכרוכות במבנה מנוע
יונים ניתן לחלק לשבע קבוצות, בהתאם לשבעת המרכיבים
העיקריים של המנוע: מקור-יונים, האלקטרודות וניטROL
האלומה. חז' מלאה מושקע כמעט רב בפיתוח ספינcano
מתאים, לייצור שדה-חשמלי חזק, הדורש להאצת היונים.
מקור היונים: על מקור היונים למלא אחר שלוש
דרישות עיקריות:

1) עליו להיות מסוגל לספק ציפויות-יזום (חלקיים טעוי-
נים ליחידת-זמן) המתאימה להפרש-המתח שבין
המקור לאלקטרודה-המאיצה; במילוי אחרות: ציפויו הולם
תהייה תלויה במידה האלקטרודה המאיצה ולא ביכולת המקור
לספק את החלקיים. זרימה כזאת של החלקיים טעונים קרויה
זרימה מוגבלת ע"י מיטען מרチ ב' (space charge limited flow),
ובה העלתה מתח האלקטרודה המאיצה אינו משנה את ציפוי-

את פנים כדור הארץ, עליוו להפעיל, בכיוון התנועה, כוח
גדול יותר ממישקל הרакטה, בהתחשב בעובדהISMישקל
הרתקטה הוא כוח הפועל נגד כיוון התנועה הרצוי, באופן
שהכוונה-נטו (הSKUOL) הפועל בכיוון הרצוי ישמש להאצת הרא-
קטה. הכוח המופעל על הרתקטה נגד כוח המשיכה וכוחות
החיכוך באוויר, הוא כוח 'הՃף'.

בכל מצב בו מוצאת הרתקטה, על הכוח הדוחף אותה להיות גדול
מסכום כל הכוחות הפעילים כנגד תנועת הרתקטה, או במקורה
גבולי, להשתווות להם. בעוד שהדוחף תלוי במכפלה של מסת-
הדלק הנוצרת ביחס-זמן במהלך פליטה, תהיה התקיפה
הסגולית גבוהה, אך כוח-הՃף נמור. ואכן בהגעה האלקטרו-
טאטית — אם-כ"י מהירות גאי הפליטה היא גבוהה, קצב איכול
הדלק קטן עד כדי-כך, שהՃף המתקבל ממכלת השמיים,
גמור-מאוד. השימוש בהגעה אלקטרוסטטית מוגבל, איפוא,
לחותה כנגד שלא יעל על $g \cdot 10^{-4}$ (עשרה הפרומיל
של כוח משיכת כדור הארץ) — מצב הקים למשל בשל החיל
הছיצון. הגעה כימית — או אטומית — תשאר תמיד האמצע
להטסת הרתקטה אל מוחץ בתחום המשיכה של הגוף השמי-
מיים; ואילו התנועה בחלל החיצון — ובנסיבות בין-כוכביות
המדובר הוא בפרק-זמן של חדש אחים ויתר — תיעשה ב'
אמצעות מערכות-ההגעה אלקטרוסטטיות, או אלקטромגנטיות.
גורם משדר-הזמן הדורש לטישה לא כלל עד עתה בין
הגורומים שהוכרנו. באופן כללי — ככל שהՃף גדול, משך
טישה קצר; אך יחד עם זאת קטן גם היחס בין המיטען המועיל,
למיישל הכללי של הרתקטה. דוגמה טובה לכך שימוש בעיתם
הטסת רתקטה אל מוחץ בתחום שדה-המשיכה של כדור הארץ:
טישה אנכית ישירה דורשת דוח עזום, כמוות דלק גודלה, ויחס
זעיר של מיטען מועיל למיישל הכללי של הרתקטה (M_{p}/Mo)
אך טישה זו נשמרת רק דקota אחת. כאשר המטרה היא מקבל
יחס M_{p}/Mo גדול ככל-האפשר תיערך הטישה במסלולים סביב
כדור הארץ, כאשר רדיוס המשסל גדול וдолח. זמני-הימלטות,
במקורה זה, הוא יום וארבע וחצי שבוע, אחר שימוש הקפות
סביב כדור הארץ.

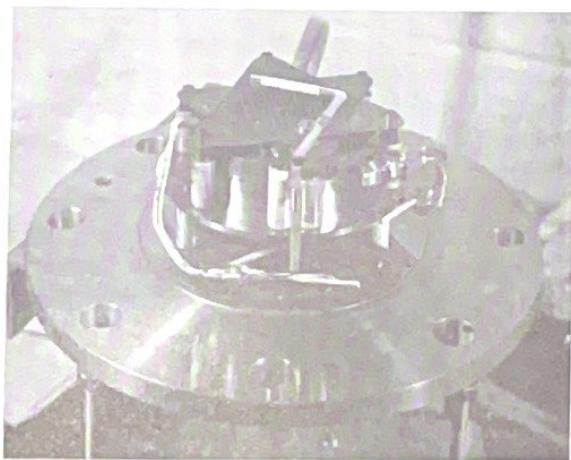
המרכיבים של מערכת-ההגעה אלקטרוסטטית
המרכיבים העיקריים של רתקטה או של חלל, המונעת
בהגעה אלקטרוסטטית, הם מנוע-יונים, הדלק, תחנת-יכון
להספקת הכוח-החשמלי, גוף-הראקטה והמיטען המועיל. מלבד
תחנת הכוח המתווספת כאן, והה רשות זו עם רשות מרכיבי
הראקטה הכלכלי. נגזר זה המישקל והגודל היחסים של
המנוע והדלק שונים בתכלית בכל אחת מצורות הגעה אלה.
תחבת 'כוח': שני מוקודות-אנרגייה בלבד מסוגלים לשמש
קיים להגעה אלקטרוסטטית: השימוש והכור האטומי. ניתן
השימוש כמקור-אנרגיה אינו רעון חדש וקיים שיטות אחדות
להפיקת קרינת-שימוש לאנרגיה חשמלית: תא פוטו-אלקטרי,
צמד-תרמי, גנרטטור חומרני ועוד. הביעיה העיקרית הכרוכה
בשימוש במקור-אנרגיה זה הם השתחים הגדולים, יחסית, של
מראות מרכזיות, הדורשים לקבלת כמות אנרגייה כלשהי. אם
נניח כי מוגצלים 30 אחוזים של האנרגייה הנקלטה במראות
יהיא על הרתקטה הטסה למאדים להציג, בסביבות כדור הארץ,

נים. בעיה זו מקבילה למשוואת פואסון (Poisson), המתארת את תלות המתח במטען המרובי. הפתרון לורימה חד-メンedia הינו פשוט מאד (ראה נספח ב'), אך להגעה מוסבכת יותר, פיתרון אנאליטי אינו דועץ. תיכנן האלקטרודות נעשה לכן גם בדרך ניסויים וגם בשימוש באNALוגים שונים ובמחשב אלקטרוני.

כפי שכבר רأינו, כמה היונים העוברים את הרקטה, ביחידות יזם, תלויות במתה המאץ, וכי לקלוט כוח-דחף גדול, יש להגדיל מתח זה עד כמה אפשר. לעומת זאת המהירות האופטימלית של גזוי הפליטה מחייבת למתח נמוך בהרבה מהמאקסימלי. כדי לאפשר מהירות גזוי-פליטה נמוכה מזו המאקסימלית, הקבילה למתח המאץ, נהוגים לתת אלקטרודה-המאיצה מעבר לאלקטרודה-המאיצת, במתה המתאים למהירות הרצויה של גזוי-פליטה (ראה צייר 4).

את הצורות הגיאומטריות המקובלות באלקטרודות היא לחימכת שטוח ודק — בדרך כלל מנחושת — המחוורר בצורה סימטרית. האלקטרודות מסודרות אחת מעל השנייה, כאשר החורים באלקטרודות השונות הופפים זה מעל זה, ואלומת היונים מתකלה מאחודה כל האלומות הקטנות, יחסנו היחס בין קטרי החורים באלקטרודות השונות, המרחוקים בין האלקטרודות וצורת מקור היונים מקום חשוב בחישוב אחר הסדרור הנכון. בתמונה 1 נראה תצלום של מכונת-יונים, בה עובד המחבר באוניברסיטת בר-און. ניסויים-מעבדה בהנעה אלקטrostטית נערכים בירק, בו החלק הוא חלק אחד בעשרה אלפיים מן הלוח האטמוספררי.

ניטרול האלומה: הבעיה של ניטרול אלומת היונים לא נפתרה עדין מבחינה מדעית; מגנוני הירובוב בין האלקטרונים ליונים ויצירת אלומת הגזו הלהט והמיואן (פלאסמה) טרם הוברו די- הצורך, והמחקר בכיוון זה נמצא בעיצומו. עיקרו בכך מחקר זה בעורמת מחשבים אלקטרוניים. האלקטרודה המנתרת עשויה בדרך-כלל מחוט טונגסטן להט (כ-2500 מ"ג), המכונן מאהורן האלקטרודה-המאיצת, ופולט אלקטرونים לתוך אלומת היונים העוברת. בניסוי בחלל, שנערך



תמונה 1 : מכונת-יונים, בה עובר המחבר באוויר.

פוח הום, כי אין המקור יכול לספק חלקיקים נוספים. קל להראות שכמות החלקיקים העוברים ביחסית-זמן מוקור הממלא אחר דרישת זו והוא יחסית לשטח המקור ולהפרש המתח המאץ בחזקה 3/2, וכן עומדת היא ביחס הפהר לריבוע המרחק שבין האלקטרודה-המאיצה והמקור (ראה נספח ב').

(2) על מנת שתתקיים נצילות סבירה, על כמות האנרגיה, הדרושה במכצע לצירוף יוז, להיות כפופה בהרבה מהאנרגיה שאותו יון מקבל ע"י האצתו בשדה החשמלי.

(3) על המקור להיות ברוני: אסור שכמות החלקיקים הנאותרליים, העוברים את המקור, תעללה בוثر מאחווה אחד על כמות היונים העוברים אותו. הסיבה לדרישת זו וטמונה בעובדה שאטום נוטרלי אינו מושפע מן השדה החשמלי, אלא נע במרחב שבין המקור לאלקטרודה-המאיצת, תוך-ידי התנגש שווות עם החלקיקים טעונים, וגורם לשינוי מסלולם. האחרונים, במקומות להמשך עם האלומה, סוגרים באלקטרודה המאיצת. הרעה הנובעת מן החלקיקים הפגעים באלקטרודה המאיצת, אינה הקטנת הנצילות אלא קריית קרעים זעירים מגוף עצמה. משך-הזמן של האלקטרודה נקבע לפיק"ה ע"י כמות החלקיקים הפגעים בה.

שתי השיטות העיקריות בהן משתמשים לייצור מקורי-יונים הן: יאון ע"י מגע בטונגסטן לוהט ויאון ע"י הפצתה באלקטרונים.

יאוֹן ע"י מגע: מזה שנים רבות ידוע, שכאר טובי לים מתחה להחתה בעלת מה שמכונה "פונקציית-עבודה" (work function) מתח-יאוֹן (E_i) ו-E_c (ionization potential), מפסידים אלектرون ואטומי האד הפגעים במתכת הלהטת — מתאיינם. זוגות מתאיינים של מתח ואדום, בעלי E_c הקטן מ-E_i הם נדרירים מאוד. אחד מוגנות מעתים אלה הוא הטונגסטן להטת ואדי-הציגום. על הטונגסטן להיות בטמפרטורה של 1000 עד 1100 מ"צ. על-מנת שכדי-הציגום יבואו ברגע עם המתחת הלהטת מקובל הסידור הבא (ראה צייר 4) : אל-

צדו האחד של לח-טונגסטן נקבעו מגעים אדי-הציגום;

הם מפעפים דרכו, מפסידים אלקטرونים, מתאיינם ועובדים את הלווה כיוונים. גודל הנקבוביות הללו גמدد במיקרונים אחדים. הטונגסטן הנקבע מיציר מאבק-טונגסטן מודבקת (sintered). מעדיפים את השימוש בצעום, על-שם הקלות בה הוא מתייאן ועל-שם מייסקלו האטומי הכבב, יחסית, המעניין.

דחף יותר, יחסית, על כל יון שנפלט. יאוֹן ע"י הפצתה באלקטרונים: אדריהם-הומר העתיד להתיאן בשיטה זו (מקובל השימוש בקספית) נמצא אים מICIAL תחת הפצתה מתחמת של אלקטرونים. כאשר אלקטרון פוגע באטום ב מהירות גבוהה דיה האטום מתייאן ועובה את המיכל בהשפעת השדה החשמלי. שינוי השדה המאגנטית מונע بعد האלקטרונים מלוועב את המיכל. האלקטרודות: תיכנן האלקטרודות, במטרה שמינימום החלקיקים טעונים יפגע בהן, וכן אלומה חומרה ומוגדרת שתשועב את פניו האלקטרודה והאחורונה, מהוות עיה מאטאי-מאטית בתחום פיתרון משוואות-הנתונה של החלקיקים הטבעי.

במושואה [1] M מסמל את המסה הכללית של הרакטה בכל רגע ורגע. גוף הרакטה, משא, מנוע וכמות הדלק שעדיין לא נזרקה. $\frac{du}{dt}$ תואמת הרакטה; \dot{M} מהירות גזוייה-פליטה ביחס

לראקטה ו- \dot{M} — כמות הדלק הנזרכת ביחידת זמן.
אינטגרציה של מושוואת-הגובה עולה את המהירות הסופית של הרакטה, לאחר שכל הדלק נזול

$$M_e = v_0 \log \frac{M_0}{M_t} \quad [2]$$

במושואה [2] v_t מצין את המהירות הסופית של הרакטה, את המסה ההתחלית של הרакטה והדלק ואילו, M_e , את המסה הסופית של הרакטה — לפחות. מושוואת [2] רואים שהגדלת המהירות הסופית של הרакטה תישנה או ע"י הגדלת מהירות גזוייה-פליטה — התקיפה הסגולית, או ע"י הגדלת כמות הדלק. כן ברור שבדרכן השניה היא פחות יעילה, הוואיל ומאסת-הדלק מופיעה מתחת סימן הלוגאריטם.

נספח ב

מערכת המשוואות הפותרת את חוקת המתח ותנועת החלקיקים בשדה חידמי, בוריימה מתחמת, בהנחה שאין התגשיות בין החלקיקים ובין אוריית הגז (ריך מספיק גבוהה) היא

$$\frac{d^2V}{dX^2} = 4ne \quad [1]$$

$$mnv \frac{dv}{dX} = neV \quad [2]$$

$$J = env \quad [3]$$

$$\frac{dJ}{dX} = 0 \quad [4]$$

X — מתח חשמי
 J — ציפויות החלקיקים
 n — מיטען החלקיקים
 e — זרירות החלקיקים
 v — מרחק בין אלקטטרודה למקורה

אינטגרציה של מושואה [2], הצבתה מ- M במשוואת [3] ו- v במשוואת [2] לתוך מושואה [1] יתנו

$$\frac{d^2V}{dX^2} = \frac{4\pi}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{m}{e}} \frac{J}{\sqrt{V}} \quad [5]$$

הכפלת [5] בגורם האינטגרציה $\frac{2}{dX}$ ו-אינטגרציה נותנים לפיה מושואה [4]: J הוא קבוע

$$\left(\frac{dV}{dX} \right)^2 = \frac{16\pi}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{m}{e}} JV^{1/2} + C_1 \quad [6]$$

תנאי-הגבול המתאים לוירמה מוגבלת ע"י מיטען מרחבי V על פני מקורי- החלקיקים $O = \frac{dV}{dX}$; הוואיל ותמיד אפשר לבחור את מתח-המקור כאפס, אנו מקבלים לפ"י תנאי-גבול זה $C_1 = 0$.

אינטגרציה בסופת של מושואה [5] בוגרת

$$\frac{4}{3} V^{3/4} = \sqrt{\frac{16\pi}{\sqrt{2}}} \sqrt{\frac{m}{e}} J X_0^{1/2} + C_2 \quad [7]$$

לפי תנאי הגבול השני, כאשר $O = X_0 = 0$, $V = 0$ ואנו מקבלים $O = C_2$. סידור אחר של מושואה [7] נותן את חוק צ'ילדס — לנגןאי צ'ילדס (Child's Langmuir Law) בצוותו המקובל

$$J = \frac{\sqrt{2}}{9\pi} \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{V^{3/2}}{X_0^{1/2}} \quad [8]$$

בחודש يولי 1964, השתמשו במונטREL מסווג זה, כל עוד המונטREL היה בדרך של האלומה, החמיד סילון-היונים בוריתמו; ברגע שהוצא המונטREL פסק מיד גם זרם היונים.

שימושים להנעה אלקטטרוסטטית

נוסף לאותן טיסות בין-כוכביות — שכאמור המהירות הסופית הגדולה הדרושה להן, מושגת ביום רק באמצעות הנעה אלקטטרוסטטית — קיימים גם שימושים אחרים לצורת הנעה זו. באופן כללי — בכל מקרה בו דרוש דחף נמוך אך קבוע לחזקות ומין מושחתה — ההנעה האלקטרוסטטית עונה על הדרישות.

לדוגמה: אם מסיבות שונות, מטא栗וגיות או צבאות, דרוש להפעיל לוויין בגובה לא-ארב, מעל פני כדור-הארץ — גובה בו צפיפות האטמוספרה חייבת עדין להילך בחשבו — כוח החיכוך בין הלויין לאטמוספירה, במהלך התנועה, יגרום להקטנה מתמדת של רادرום המסלול. דחף מתאים שיופעל ע"י הרакטה, ימנע זאת. כוח-הדחף הדרוש הוא נמוך מאוד יחסית — כמה מאות גראם. ההנעה האלקטרוסטטית מתאימה למקרה זה, הוואיל ומשר-ההדים הנדרש מהמנוע מקביל למשר-ההדים של הלויין, דהיינו: שנים אחדות.

סיכום

ההנעה האלקטרוסטטית, על-אף מיועט שנותיה, היא האחות הבכירה במשפחה "ההנעה האלקטרומאגנטית". כפי שמרמו השם, הכוונה היא לניצול אותם כוחות, הפעלים בין חלק טעון, הנע בשדה מגנטי, לבין השודה עצמה, לשם האצת החלקיקים. צורתה הנעה אלקטית אחרת שראוי להזכיר כאן (electro-thermal propulsion) (arc jet), שיש לשוגה בין-

ההנעה המקובלת בין-ההנעה האלקטרוסטטית. בשיטה ההנעה האלקטרוסטטית מגיעה העבודה המחקר הבסיסית לשילוב-시스템. האפשרות לשימוש מעשי בצורת-ההנעה זו — בתחום בו היא עדיפה על צורות-ההנעה אחרות — אינה מוטלת עד בספק. עיקר העבודה, הנעשה ביום בתחום זה, היא "כמותית": הדחף הנitin להשגה בהנעה אלקטטרוסטטית הוא עדין ועריר ומאז רבי מושקע בחיפוש אחר דרכים להגדלו; יצירת חלקיקים טעוניים בכדים יותר — למשל קולואידים טעוניים — או יצירת יוגנים שליליים, לשם ניטרול אלומת היונים החוביים, הינו שתיים מבין האפשרויות השונות הנבחנות ביום (ע"י ניטROL ביןונים שליליים מתකבל דחף נסוך, כי תרומת האלקטרון לדחף אפסית, בגל מסתו הזעיר). מושגים גם שיפורים אחרים במקור היונים, בתיכון האלקטרודות או בצורת הניטרול ויש לראות בהם את פתיחת התקופה השנייה בחיה מוכנת היונים — תקופת הניסויים בחלל.

נספח א

מושוואת התנועה של הרакטה נובעת ישירות מתחום מושוואת המונטREL (כמota התנועה) של המערכת כולה, הרакטה וגזוייה-פליטה.

$$M \frac{dv}{dt} = \dot{M}v \quad [1]$$