

**HEAVY ISOTOPES OF KRYPTON AND
XENON IN THERMAL NEUTRON
INDUCED FISSION OF ^{235}U**

Thesis submitted for the degree "Doctor of Philosophy"

by

HANA FELDSTEIN

Submitted to the Senate of the Hebrew University in 1977

ISRAEL ATOMIC ENERGY COMMISSION

Soreq Nuclear Research Centre

July 1979

HEAVY ISOTOPES OF KRYPTON AND
XENON IN THERMAL NEUTRON
INDUCED FISSION OF ^{235}U

Thesis submitted for the degree of
"Doctor of Philosophy"

by

HANA FELDSTEIN

Submitted to the Senate of the
Hebrew University, Jerusalem
January, 1977

**This work was carried out under the
supervision of Prof. Saadia Amiel.**

CONTENTS

	<u>Page</u>
1. Introduction	1
1.1 The purpose of the study	1
1.2 General background	1
1.2.1 A schematic description of the fissioning nucleus	1
1.2.2 Nuclear Models.....	4
1.2.3 Formulas for nuclear charge dispersion in a mass chain.....	4
1.2.4 Deviations from normal distribution.....	6
1.2.5 Experimental methods for measurement of fission yields.....	6
1.2.5.1 Physical methods for the separation of Fission Products.....	6
1.2.5.2 Chemical methods for the separation of fission products.....	8
1.2.5.3 Combined physical and chemical methods...	9
1.2.6 Isotopes of krypton and xenon yields and nuclear properties.....	9
2. The experimental set-up and calculations.....	12
2.1 General.....	12
2.2 The neutron source.....	12
2.3 The uranium containing target.....	12

	<u>Page</u>
2.3.1 The material of the target.....	12
2.3.2 The structure of the target.....	15
2.4 Solis - Soreq on line isotope separator.....	15
2.5 Radiation detectors and data taking assembly.....	18
2.5.1 Beta detector	18
2.5.2 Gamma detector	18
2.5.3 The collecting tape.....	18
2.5.4 The electronic system.....	20
2.5.5 The programmer.....	20
2.6 Methods of calculation.....	21
2.6.1 Measurements of half-lives.....	21
2.6.2 Calculation of transfer function.....	21
3. Results.....	24
3.1 The gamma spectrum.....	24
3.2 Half-lives.....	24
3.3 Measurement of fission yields.....	31
3.4 Evaluation of errors.....	33
4. Discussion.....	43
4.1 Direct measurements of short lived isotopes.....	43
4.2 Fission yields of krypton and xenon.....	44
4.3 Fission yields of krypton and xenon compared with normal distribution, the odd-even effect...	48
5. Summary.....	53

Attached

1. Calculation of fission yields of the beta activity growth curve, program on-line.
2. Activity of separated isotopes as a function of irradiation time.

Publications

1. Identification of ^{94}Kr and ^{143}Xe and Measurement of γ -Ray Spectra and Half-Lives of Nuclides in the Mass Chains 93, 94 and 143.
S. Amiel, H. Feldstein, M. Oron and E. Yellin. Phys. Rev. C5 270, (1972)
2. A Systematic Odd-Even Effect in the Independent Yield Distributions of Nuclides from Thermal Neutron Induced Fission of ^{235}U .
S. Amiel and H. Feldstein, In Physics and Chem. of Fission Vol. II p. 65 I.A.E.A., Vienna 1974.
3. Odd Even Systematics in Neutron Fission Yields of ^{233}U and ^{235}U .
S. Amiel, H. Feldstein, Phys. Rev. C 11, 845 (1975).
4. Distribution of fission products from various low energy fission reactions and the systematics of the odd-even fluctuations.
S. Amiel, H. Feldstein, T. Izak-Biran, Submitted for publication to Phys. Rev. C.
5. On line study of gaseous fission products, Rapid transfer techniques.
H. Feldstein and S. Amiel.

INTRODUCTION

The purpose of this work was to investigate the heavy isotopes of Krypton and Xenon produced in the fission of ^{235}U induced by thermal neutrons. In the empirical approach to the phenomenon of fission, the study of fission products is a tool for a better understanding of this highly complicated process, especially in its last stages. The various models of the fissioning nucleus like the Liquid Drop Model (LDM), the Shell Model or Strutinsky's Hybrid Model, give only partial solutions to the phenomena of fission. For example the LDM may be applicable to high energy fission since it predicts a symmetric distribution of the yields of fission products and the shell model describes pretty well fission of nuclei with $Z \leq 84$. For low energy fission of uranium Strutinsky's semiempirical model is the best, but still it gives only an approximate solution to a problem like the yields of fission products. Therefore, precise experimental data is required in order to improve the existing semi-empirical models.

Several techniques were developed in order to investigate the properties and yields of the various fission products. Those techniques include very rapid chemical separations, which enable a good definition of the element, while the mass of the separated isotope may be evaluated from the systematics of half lives. The physical methods are based mainly on collection of fission fragments recoiling from a

target of fissile material. In order to identify those fragments, the preservation of the momentum is assumed thus by measuring the energy or velocity or both of the recoils, their mass may be calculated. The evaluation of the atomic charge of the recoils is done either by X-ray measurements or by measuring the total number of beta decays in a photographic emulsion or in a proportional counter.

Experimental set-up

The investigation of Krypton and Xenon produced in fission was done by electromagnetic separation of chemically pure noble gases emanated from a target containing uranium Oxide and Barium stearate, or uranyl stearate. In this way separated isotopes of known A and Z were obtained at the collector with relatively low contamination by adjacent masses (up to 5%) and by the volatile precursors Br and I (up to 1%). The SOLIS (Soreq On-Line Isotope Separator) was operated at 60 KV, with a Nielsen type plasmatron ion source. The target irradiated by thermal neutrons was swept by Helium containing ~3% Kr or Xe which served as markers and maintained a steady ion current. The separated isotopes were beta-counted, with the aid of a telescopic device (thin and thick plastic scintillators operating in coincidence) and the rate of beta counts recorded as a function of time by a multichannel analyzer operating in the multiscale mode. The Solis was operated in cycles of irradiation and counting with the time for each function adjusted according to the expected half life of the separated isotope. The operation was automatic, controlled by electronic programmer. Simultaneously with the beta-counting it was

possible to measure the gamma-ray spectrum and follow the decay of characteristic gamma peaks. In that way it was possible to discern between the separated isotope and its radioactive daughter. Another way of separating between the noble gas and its decay product was by means of a moving tape on which the separated isotopes were collected. By changing the velocity of the tape the count rate of the radioactive daughter could be reduced to minimum. The tape could also be operated stepwise according to the irradiation/decay cycle, thus reducing the background caused by accumulated long-lived activities.

Results

Two new isotopes ^{94}Kr and ^{143}Xe were detected and characterized by their half-lives (0.2 ± 0.02 and 0.3 ± 0.03 sec. respectively) by analyzing their beta decay curves. The other half-lives measured (masses 90-93 and 139-142) were in good agreement with previous publications. In gamma-ray measurements, the prominent gamma peaks of ^{93}Kr and ^{93}Rb were identified and their relative intensities were calculated. The gamma-ray measurements in masses 143, 94 did not give any conclusive results due to very low peak/background ratio.

Relative, independent fission yields of the heavy isotopes of Krypton and Xenon were obtained by analyzing the beta decay curves obtained at similar operating conditions. For the lighter isotopes e.g. ^{87}Kr , ^{139}Xe , absolute yields were obtained by calculating the ratio of cumulative yield of the halogen precursor to the independent

yield of the noble gas, from curves describing the growth of beta activity as a function of irradiation time. In those calculations known transfer function and half-lives were assumed as well as steady ion current. The ratio could be translated to absolute fission yields since in the mass chains considered, the noble gas and its precursors constitute more than 95% of the chain yield and the chain yields are known with good precision. The following table summarizes the fission yields obtained in this work:

Krypton isotope mass number	fission yield %	Xenon isotope mass number	fission yield %
87	0.507 ^{+0.06} _{-0.01}	137	1.73 ^{+0.24} _{-0.10}
88	1.16 ^{+0.22} _{-0.16}	138	5.39 ^{+0.28} _{-0.16}
89	3.40 ^{+0.5}	139	4.67 ^{+0.08}
90	4.48 ^{+0.26}	140	3.80 ^{+0.65}
91	3.60 ^{+0.5}	141	0.99 ^{+0.22}
92	1.98 ^{+0.46}	142	0.44 ^{+0.24}
93	0.58 ^{+0.13}	143	0.14 ^{+0.05}

The fission yields obtained in this work are higher than those predicted by the "normal" Gaussian distribution suggested by Wahl. Since both Krypton and Xenon have even numbers of protons it was suggested that the high yields are due to preservation of proton

pairs in the fission of even Z nucleus. Consequently all the published fission yields were compared with the "normal" distribution and an average enhancement of $22(+7)\%$ was found in the yields of even Z isotopes with a corresponding decrease in the yields of the odd Z ones. A similar odd-even effect was found also in the thermal neutron fission of ^{233}U . The work concerning the odd-even effect was published. The dependence of the odd-even effect on the excitation energy at the saddle and the atomic number of the fissioning nucleus shows a significant decrease of the o-e effect both with increasing excitation energy and with increasing Z. The work is summarized in an article sent for publication.

איזוטופים כבדים של קריפטון וקסטון
בביקוע של אורניום-235 ע"י נייטרונים

חיבור לשם קבלת תואר דוקטור לפילוסופיה

פאת

חנה פלדשטיין

הוגש לסנט האוניברסיטה העברית ב-1977

הועדה לאנרגיה אטומית
המרכז למחקר גרעיני נחל שורק

יולי 1979

**איוטופים ככרים של קריפטון וקסנון בביקוע
של אורניום-235 ע"י נויטרונים**

חבור לשם קבלת תואר דוקטור לפילוסופיה

מאת

חנה פלדטין

הוגש לסנט האוניברסיטה העברית

תש"ז ירושלים 1977

העבודה בוצעה בהדרכתו

של פרופ' סעדיה עמילאל

**תודתי העמוקה בתרומה למרוץ' סעדיה עמיאל
אשר הנחה ועודד אותי בכל שלבי העבודה.
כן ברצוני להודות לצוות המפעלה של הסוליסט,
למפעילי הכור בממ"ג שורק ולמחלקת תעוד
על ההדפסה הנאה והמהירה של דו"ח זה.**

תוכן העניינים

עמוד

1. מבוא	1
1.1 מטרת העבודה	1
1.2 רקע כללי	1
1.2.1 תאור סכמטי של הגרעין המתבקע	1
1.2.2 מודלים גרעיניים	4
1.2.3 שיטות החשוב של התחלקות המטענים בשרשרת מטה	4
1.2.4 סטיות מהתפלגות נורמלית	6
1.2.5 שיטות נסיוניות למדידת יכולים	6
1.5.2.1 שיטות פיסיקליות	6
1.2.5.2 שיטות הפרדה ביומיות	8
1.2.5.3 שלוב שיטות הפרדה פיסיקליות וביומיות	9
1.2.6 איזוטופים של קריפטון וקסנון - יכולים ותכונות	9
2. המערכת הנסיונית ושיטות החשוב	12
2.1 כללי	12
2.2 מקור הנויטרונים	12
2.3 מטרה המכילה אורניום	12
2.3.1 חומר המטרה	12
2.3.2 מבנה המטרה	15
2.4 מפרד, איזוטופים, הטוליס	15
2.5 גלאי קרינה ומערכות מניה	18
2.5.1 גלאים לחקיקי ביהא	18
2.5.2 גלאי לקרינת גמא	18
2.5.3 סרט אוסף	18

תוכן עניינים (המשך)

עמוד

20.....	2.5.4 המערכת האלקטרונית
20.....	2.5.5 המרוגמר
21.....	2.6 שיטות החשוב
21.....	2.6.1 מדידת מחציות חיים
21.....	2.6.2 חישוב פונקציית המעבר
24.....	3. תוצאות המדידות
24.....	3.1 ספקטרום גמא
24.....	3.2 מחציות חיים
31.....	3.3 מדידת יבולי בקוע
33.....	3.4 הערכת זיוק המדידה
43.....	4. נתוח התוצאות
43.....	4.1 מדידה ישירה של איזוטופים קצרי חיים
44.....	4.2 יבולי קריפטון וקסנון
43.....	4.3 יבולי הבקוע של קריפטון וקסנון בהשוואה להתפלגות נורמלית -
48.....	אפקט זוג פרט
53.....	5. סכום
54.....	<u>נספחים</u> : 1. חשוב יבולי בקוע מתוך עקומת הגדול של רדיואקטיביות תכנית ONLINE
56.....	2. פעילות האיזוטופים המופרדים כפונקציה של זמן ההקרנה
	<u>מאמרים</u> :
.....	1. זהו של ^{94}Kc ו- ^{143}Xe מדידת קרינת גמא ומחציות חיים של גרעינים בשרשרות מסה 93, 94, 143
.....	2. אפקט זוג-פרט בהתפלגות היבולים הראשוניים של גרעינים בבקוע של ^{235}U עיי נויטרונים תרמיים
.....	3. סיסטמטיקה של אפקט זוג-פרט בבקוע של ^{235}U ו- ^{233}U עיי נויטרונים
.....	4. התפלגות יבולי בקוע בריאקציות בקוע שונות באנרגיה נמוכה וסיסטמטיקה של תנודות זוג-פרט

1. מכרז

1.1 מטרת העבודה

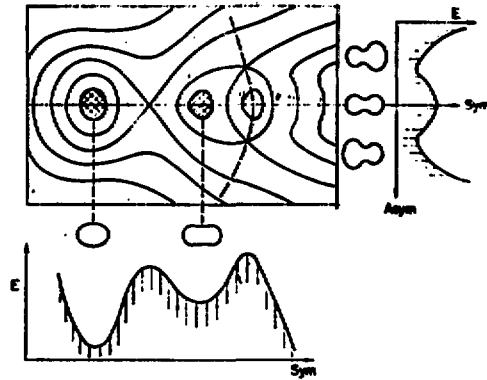
מטרת העבודה היא למוד תחוקיות בהחלפות תוצרי הבקוע, כנגמה לתרום להבנה טובה יותר של תהליך הבקוע בשלבי האחרונים. חלקה הנסיוני של העבודה הוקדש למדידה היכולים והתכונות הגרעיניות של איזוטופים של קריפטון וקסנון הנוצרים בבקוע אורניום - 235 ע"י נויטרונים אטיים.

מאחר שהבקוע הינו תהליך מורכב מאוד, ועל כך מעידים המספר הרב של רסיסי בקוע והתפלגותם הרחבה, חשיבות רבה נודעת לכל מידע נסיוני מהימן הקשור בתופעה. מכאן נובע העניין הרב שיש בעבודות הקשורות במדידה ישירה של יכולים בבקוע ותכונות גרעיניות של תוצרי הבקוע כי כל פרט נוסף עשוי לתרום לבניית דגם מדויק יותר של הגרעין המתבקע.

1.2 רקע כללי

1.2.1 תאור סכמטי של הגרעין המתבקע

אח הגרעין במצב יסוד ניתן לתאר כגוף כדורי או אליפטואיד בו היחס בין אורכי הצירים קרוב ל- 1. בשלבי הבקוע הראשונים עובר הגרעין עוות, כלומר, היחס בין אורכי הצירים של האליפטואיד גדל. בעוות מתקדם יותר נוצר צואר דק בין שני חלקי הגרעין והתהליך מסתיים בניחוק בין שני החלקים. מבחינה אנרגטית, העוות דורש הוספת אנרגיה עד למכסימום שהינו המחסום האנרגטי לבקוע. העוות בו האנרגיה הפוטנציאלית היא מכסימלית מוגדר כנקודת המחסום, לבקוע (ציור מס' 1) למרבית הגרעינים הבקיעים וביניהם גם אורניום - 236, יש שתי נקודות מחסום (1) וביניהן מינימום אנרגטי (הגבוה בדרך כלל ממצב היסוד) בו הגרעין מסוגל להמצא במשך זמן ארוך בהשוואה לזמן הדרוש לויברציה גרעינית. תהליך הבקוע עשוי להתחיל גם במינימום השני ולאז דוקא במצב היסוד, ואמנם במדידות נתגלה בקוע איזומרי (2)



ציור מס' 1 - תאור סכמטי של אנרגיית העוות כפונקציה של עוות סימטרי ואסימטרי (לקוח מטסנג ווילהלמי (1)).

תאור סכמטי של המחטום השני לבקוע כפונקציה של העוות לאורך ציר הסימטריה של הגרעין נותן צורה דמוית אוכף, כאשר אנרגיית המחטום גדלה כאשר העוות הסימטרי גדל אולם קטנה כאשר הגרעין מקבל צורה בלתי סימטרית (1), מכאן נובעת ההתייחסות אל המחטום השני לבקוע כאל נקודת האוכף.

מידת ה"בקיעות" של הגרעין היא פונקציה של האזון בין הדחיה הקולונית בין הפרוטונים מהד, וכוחות שטח הפנים שהנם כוחות משיכה מאידך. מקדם ה"בקיעות" של הגרעין מוגדר ע"י המשוואה (3).

$$(1) \quad X = B \cdot Z^2 / A$$

כאשר X - מקדם הבקיעות

Z - מספר הפרוטונים בגרעין

A - מספר הנוקלאונים בגרעין

B - קבוע, ערכו לפי חשובי מודל הספה 1.3 / 50.

למקדם ה"בקיעות" השפעה על מחצית החיים בבקוע ספונטני. נמצא כי תאור על ניח אמילוגרטימי של מחצית החיים לבקוע ספונטני כפונקציה של X נותן קו ישר בעל שפוע עלילי, דהיינו - מחצית החיים קטנה ככל ש-X גדל (4) אם אקסטרפולציה

ליניארית של קו זה מותרת, אזי גרעינים בהם $Z \geq 125$ אינם יכולים להתקיים כלל, כי נחצית החיים שלהם תהיה מסדר גודל של ויברציה גרעינית אחת. הגרעין המתבקע מתחלק על פי הרוב לשני רסיסים כאשר הבקוע לשלושה מהווה רק שבר של אחוז (5) ולכן לא אתיחס אליו בטקירה זאת.

להלן נגדיר:

רסיסי בקוע שני הגרעינים המקוריים הנוצרים בזמן הבקוע.

תוצרי בקוע ראשוניים - רסיסי בקוע לאחר פליטה נויטרונים מידיים אך לפני פליטת חלקיקי ביחה.

לגרעין הנמצא בנקודת האוכף שתי אפשרויות:

1. לחזור למצב היסוד.

2. להתקדם למצב של נתק ובקוע.

מבחינת לוח זמנים ניתן לתת את ההערכות הבאות:

1. הזמן הדרוש לויברציה גרעינית $\sim 2 \times 10^{-22}$ שניות (6)

2. הזמן המשוער הדרוש למעבר מהאוכף לנתק 3×10^{-21} שניות (6)

3. הזמן הדרוש לפליטת נויטרונים ע"י רסיסי הבקוע 10^{-18} - 10^{-14} שניות (7,8)

4. הזמן הדרוש לפליטת קרינת גמא מידית 10^{-8} - 10^{-11} שניות (9)

לשני רסיסי הבקוע אנרגיה קינטית הנקבעת ע"י הדחיה הקולונית של המטענים ולכן

היא פונקציה של המטען והמסה של הגרעין המתבקע. בקרוב די טוב משתנה האנרגיה

הקינטית הממוצעת ליניארית עם הגורם $Z^2/A^{1/3}$ (10) כאשר Z , מספר הפרוטונים ו- A

מספר הנוקלאונים בגרעין המתבקע. בבקוע של $^{236}_{92}\text{U}$ (235U+N) האנרגיה הקינטית הממוצעת

היא כ- 170 מא"ו. בכל המקרים של בקוע באנרגיות נמוכות, מהווה האנרגיה הקינטית של

הרסיסים מעל ל- 80% מהאנרגיה המשתחררת בבקוע (10). כדי לתאר תאור כמותי ומדויק

את מבנה הגרעין ואת התגובות הגרעיניות האפשריות, כולל בקוע, משתמשים במודלים

שיסקרו בקצרה להלן.

1.2.2 מודלים גרעיניים

רבות מהתכונות הגרעיניות נבחנות לחשוב בעזרת מודלים מתימטיים המתארים את האינטראקציות בין הפרוטונים והנויטרונים בתוך הגבולות המוגדרים של הגרעין. המודלים המקובלים ביותר למטרות החשוב הם:

1. מודל הטפה (LDM) ⁽¹¹⁾ בעזרתו חושבו מסות גרעיניות ⁽¹²⁾ והאנרגיה הממוצעת המשתחררת בביקוע ⁽¹³⁾.

2. מודל הקלפות ⁽¹⁴⁾ אשר נותן ביטוי למבנים גרעיניים יציבים יותר מהממוצע, כגון קלפות סגורות של פרוטונים או נויטרונים. בעזרת מודל זה ניתן היה לתקן את חשובי המסות ולחשב עוותים במצב יסוד.

3. המודל ההיברידי של סטרויטנסקי ^(15,16) המכניס תקוני קלפות למודל הטפה.

מבחינת הבקוע, מודל הטפה מתאים לחשובי בקוע באנרגיות גבוהות המאופיין ע"י התחלקות סימטרית ואילו מודל הקלפות מתאר היטב את הבקוע עבור $Z \leq 84$ ^(17,18) שאף הוא הנו סימטרי. ההתחלקות האסימטרית בביקוע, האופינית לביקוע באנרגיות נמוכות ובקוע ספונטני מתוארת בצורה הטובה ביותר בעזרת המודל ההיברידי של סטרויטנסקי. מודל זה מאפשר לחשב את צורת המסתום לבקוע שהנו בדרך כלל בעל שני שיאים ומאפשר בקוע איזומרי. תוך שמוש בפרמטרים סמיאמפיריים, אפשר לחשב בעזרת המודל של סטרויטנסקי, את התחלקות המסות בבקוע של גרעינים שונים, בהתאמה טובה עם הנתונים הנסיוניים ⁽¹⁹⁾.

העובדה שלא נמצא עדיין מודל "אוניברסלי" שמסוגל לתאר את כל התהליכים הגרעיניים

בכל תחומי האנרגיה, מצביעה על מורכבות הבעיה ועל הצורך בקבלת נתונים נסיוניים מדויקים ככל האפשר.

1.2.3 שטות החשוב של ההחלקות המטענים בשרשרת מסה

תוצרי הבקוע הראשוניים נוצרים עם עודף נויטרונים ודועכים ע"י פליטת חלקיקי

ביתא עד לקבלת איזוטופים יציבים. להלן נגדיר:

יבול ראשוני של איזוטופ - אחוז הבקועים בהם נוצר ישירות האיזוטופ שמדובר בו.

יבול מצטבר - סכום היבולים הראשוניים של איזוטופ כלשהו וכל הקודמים לו בשרשרת

דעיכת ביחא. יבול חלקי (ראשוני או מצטבר) - יבול (ראשוני או מצטבר) המתואר
כשבר של יבול שרשרת המטה.

מהוך מדידת יבולים של הוצרי בקוע שונים, נמצא כי היבולים היחסיים
הראשוניים בכל שרשרת מטה, מתארים גאוסיאן שרוחבו קבוע עבור כל שרשרת המטה,
בבקוע של אורניום 235 עיי נויטרונים הרמיים. רוחב הגאוסיאן נקבע כ- 0.56 ± 0.06
יחידות מטען (20). יתר על כן, נמצא כי אין רוחב הגאוסיאן משתנה בבקוע של
גרעינים שונים (21) וגם לא באנרגיות ערור גבוהות עד כ- 40 מאיו (22).

עיי תאור התפלגות היבולים בעזרת גאוסיאן מניחים כי המטען Z מתנהג כמשתנה
רציף ולגאוסיאן מכסימום בנקודה $Z=Z_p$. יבול חלקי ראשוני של כל יסוד בשרשרת
המטה ינתן איפוא עיי המשואה (21):

$$Y_Z = (C\pi)^{-\frac{1}{2}} \exp[-(Z-Z_p)^2/C]$$

כאשר C מתיחס לרוחב הגאוסיאן σ בהתאם לתקון שפרד (21) $C = 2(\sigma^2 + 1/12)$.

תקון זה נובע מהעובדה ש- Z איננו משתנה רציף.

היבול המצטבר בהנחת פונקציה רציפה ינתן עיי (21):

$$\sum_0^Z y_n = |\sigma(2\pi)^{\frac{1}{2}}|^{-1} \int_{-\infty}^{Z+\frac{1}{2}} \exp -|(n-Z_p)^2/2\sigma^2| dn$$

מאחר שרוחב הגאוסיאן הוא קבוע, הפרמטר היחיד שיש לקבוע עבור כל שרשרת מטה

הוא Z_p . לשם חשוב Z_p הוצעו שיטות אחדות כמו:

UCD - יחס המטען למטה של רסיסי הבקוע זהה לזה של הגרעין המתבקע.

ECD - מרחק רסיס הבקוע הקל מהגרעין היציב ביותר בשרשרת האיזוברית זהה לזה

של הרסיס הכבד (23).

MPE - התאמת Z_p לאנרגיה פוטנציאלית מינימלית של רסיסי הבקוע (24).

עבור בקוע של ^{235}U עיי נויטרונים באנרגיה נמוכה, מצא Wahl (20) כי הפונקציה

הטובה ביותר של Z_p ניתנת עיי המשואה $Z_p = Z_{\text{UCD}} \pm 0.45$, כאשר ברסיסים הקליים

צפיפות המטען גבוהה יותר מאשר בכבדים.

1.2.4 סטיות מהתפלגות נורמלית

חשוב היבולים הראשונים בהנחה גאוסיאן סטנדרטי (התפלגות נורמלית) נותן קרוב סביר לתוצאות הנסיוניות אולם סטיות בשעור 20-30% הן שכיחות מאד. כבר בשנת 1969 הציג ⁽²⁰⁾ Wahl קיום של אפקט זוג-פרט, לפיו יבולי יסודות בעלי מספר זוגי של פרוטונים, גבוהים מהתחזית לפי ההתפלגות הנורמלית. בדיקת הגורמים המשפיעים על התפלגות היבולים של תוצרי הבקוע היתה אחת ממטרות עבודה זאת ואמנם במהלך העבודה נבדקו היבולים שנמדדו בבקוע של ^{235}U ו- ^{233}U ע"י נויטרונים אסיים ונמצא כי הסטיה הממוצעת מההתפלגות הנורמלית היא בשני המקרים $(\pm 7) 22\%$ ^(25,26). תופעה זאת ידועה כאפקט זוג-פרט וארחיב עליה את הדבור בפרק המוקדש לדיון על התוצאות.

לעומת השמור הבולט של זוגות פרוטונים בזמן הבקוע השפעת הקלפות הגרעיניות על היבולים היא קטנה ^(27,28) אולם אין לבטלה לגמרי ⁽²⁹⁾.

1.2.5 שיטות נסיוניות למדידת יבולים

השיטות למדידת היבולים של תוצרי הבקיע מתחלקות לשלוש קבוצות עקריות והן: שטות פסיקליות, שיטות כימיות, שלוב של שתי השיטות הראשונות. להלן אסקור בקצרה את השיטות האלה:

1.2.5.1 שיטות פסיקליות

השיטות הפסיקליות מבוססות על התלות בין מהירות המעוף לבין המסה של רסיסי הבקוע, מאחר שחוק שמור התנע מתקיים גם בתנאים אלה. מדידה בו זמנית של המהירויות של שני רסיסי הבקוע הנרתעים ממקור בקוע מאפשרת חישוב מיידי של המסות לפי היחס

$$m_1 = \frac{M}{1 + U_2/U_1}$$

כאשר M - המסה של הגרעין המתבקע.

U_1, U_2 - מהירויות רסיסי הבקוע.

m_1, m_2 - המסות של רסיסי הבקוע.

למעשה, אין אפשרות למדוד ישירות את רסיסי הבקוע, ויש לתקן את החשוב לפליטה נויטרונים. מדידת אנרגיות קינטיות נותנת תוצאות דומות אולם במקרה זה התקון לפליטה נויטרונים מורכב יותר. מכאן, שמדידת התפלגות המהירויות או האנרגיות הקינטיות מאפשרת חשוב התפלגות יבולי המסת בבקוע. מדידה בו זמנית של אנרגיות קינטיות ומהירויות מאפשרת לחשב הן את התפלגות יבולי המסת והן את פליטת: הנויטרונים המידיים כפונקציה של מסה (30). השיטה המקובלת למדידת מהירות היא זמן המעוף (31) ואילו אנרגיות ניתן למדוד בעזרת חאי יוניזציה או גלאי מצב מוצק. לאחרונה עם שפור כושר ההפרדה של גלאי מצב מוצק הם מקובלים מאוד למדידות יבולי מסות של גרעינים רבים הן בבקוע ספונטני והן מושרה ע"י נויטרונים איטיים, לדוגמא אפשר להביא את העבודה שבוצעה במעבדות ארגון (32) בשיטה זאת אפשר לעבוד גם עם מקורות בקוע חלשים.

השיטות הפיסיקליות למדידת התפלגות המטען הגרעיני בבקוע הן:

1. מדידה בו זמנית של קרינת X ואנרגיה קינטית. (33)

מגבלת השיטה - יבול קרינת X תלוי גם במטען הגרעיני וגם במסה ולכן החשוב הכמותי של יבולי הבקוע מורכב ואינו מדויק.

2. מדידת קרינת גמא של רסיסי בקוע בהתלכדות עם אנרגיה קינטית, השיאים הבולטים

בספקטרום המתקבל שייכים למעברים $0 \rightarrow +2$ ביסודות בעלי מספר זוגי של פרוטונים ונויטרונים (34). השיטה מוגבלת ליסודות זוגיים בלבד.

3. העזרות במפרד איזוטופים והפרדת תוצרי הבקוע לפי מסה ואנרגיה קינטית. שיטה

זאת מספקת מידע גם לגבי התפלגות האנרגיה הקינטית והשפעתה על היבולים. על מנת לקבל אינפורמציה נוספת לגבי התחלקות המטען בתוך השרשרת האיזוברית

קיימות אפשרויות אחדות כמו:

א. מדידת אורך השרשרת ע"י השואת מספר דעיכות ביתא (מונה 4π) למספר הבקועים (35)

ב. מדידת אורך השרשרת ע"י איסוף תוצרי הבקוע המופרדים לפי מסה ואנרגיה מתוך

אמולסית צלום וספירת העקבות של התפרקויות ביתא (36,37). יש אי התאמה בולטת

בין התוצאות שהתקבלו בשיטה זאת לבין מדידות רדיוכימיות.

ג. לאחרונה פותחה שיטה לקביעת המטען הגרעיני של תוצרי בקוע הנרתעים ממטרה דקה, ע"י מדידת הפסדי האנרגיה הקינטית בתוך בולע הומוגני כמו פחמן (39,38) או סיליקון (40). מדידה זאת הבאה לאחר הפרדה אלקטרומגנטית לפי אנרגיה ומסה, מאפשרת מדידת יבולים של תוצרי בקוע בודדים בשיא הקל של התפלגות המסות. בתחום הכבר כושר ההפרדה של הבולע ההומוגני אינו מספק, לפי שעה. בכל השיטת הפיסיקליות שנמנו לעיל, הפרדת תוצרי הבקוע מבוססת על רתיעה מהמטרה בגלל האנרגיה הקינטית הגבוהה וזמני ההפרדה הם קצרים ביותר. מגבלת השיטות - כושר ההפרדה למסות אינו מספק וכן הקושי בקביעת יבולים של תוצרי בקוע בודדים.

1.2.5.2 שיטות הפרדה כימיות

שיטות הפרדה כימיות מאפשרות קביעה חד-משמעית של המטען הגרעיני של תוצרי הבקוע ואילו המשקל האטומי נקבע על פי רוב מתוך סיטטמטיקות של מחציות החיים של האיזוטופים המופרדים ותוצרי הדעיכה שלהם. כדי למדוד את היבולים הראשוניים של תוצרי הבקוע ולהקטין ככל האפשר את ההפרעות עקב דעיכות ביתא, פותחו שיטות הפרדה מהירות מאוד בעזרת מצויים, שקוע, קולונות כרומטוגרפיות, נדוף ועוד. מהירות ההפרדה מוכתבת ע"י מחצית החיים הקצרה ביותר שמעוניינים לקבל אולם בדרך כלל, ככל שזמן ההפרדה קצר יותר, כן הניצולת ונקיון ההפרדה גרועים יותר. כדוגמא לשיטת הפרדה מהירה המתאמת ליסודות בלתי נדיפים אפשר להביא את טכניקת SISAK (41) המבוססת על מצוי נוזל-נוזל והפרדה צנטריפוגלית. ההפרדה יכולה להיות רב שלבית, כאשר הזמן הדרוש לשלב אחד הוא כ- 3-5 שני. בשיטה זאת נמדדו מחציות חיים וספקטרום גמא של איזוטופים כבדים של צריום, לנטנום ופרסאודימיום (42-44) כאשר מחצית החיים הקצרה ביותר שנמדדה היא 4.0 ± 0.6 שניות עבור צריום - 150 (44) שיטה אחרת שהשתמשו בה בעיקר עבור ניוביום היא אסוף רתעים מבקוע בתוך חומר נושא בעל סמפי רתיחה גבוהה (כלוריד הרוטניוט) נדוף ועבוי סלקטיבי של יסודות שונים בטמפרטורות שונות (45). במקרה של יסודות נדיפים, אפשרית הפרדה מהירה יותר, כגון שהיה קריפטון וקסנון ממטרות המכילות יורניל סטארט או בריום סטארט, אשר עוצרים

את יתר תוצרי הבקוע ⁽⁴⁶⁾, או תגובת אטומים "חמים" של יוד וברום עם מתן וקבלת מחיל-הלידים גזיים ⁽⁴⁷⁾ (אטומים חמים - אטומים בעלי אנרגיה הגבוהה מהממוצעת בשווי משקל תרמי עם הטביבה). בשיטות אלה מדובר בזמני הפרדה בסביבת חצי שניה.

1.2.5.3 שילוב שיטות הפרדה פיסיקליות וכימיות

ע"י שילוב שיטות הפרדה פיסיקליות וכימיות אפשר להשיג דיוק טוב הן בקביעת המסה והן בקביעת המטען הגרעיני. ההפרדה מבוססת על הוצאה סלקטיבית של יסוד כלשהו ממטרו. הבקוע והפרדה אלקטרומגנטית בין האיזוטופים השונים. לדוגמא אפשר להביא הפרדה אלקטרומגנטית ב"קו רצוף" של גזים אצילים המשתחררים ממטרו עשויה ממלחי חומצה סטארית העוזרים את תוצרי הבקוע האחרים ^(48,49) או יינון סלקטיבי של יסודות אלקליים ⁽⁵⁰⁾ או הלוגנים ⁽⁵¹⁾ והפרדה אלקטרומגנטית ב"קו רצוף". זמני הפרדה בשיטות אלה חלויים במהירות ההפרדה הכימית והעברת היסודות המופרדים למקור היונים של המפרד האלקטרומגנטי. זמני הפרדה אופייניים משתנים בין 0.5-10 שניות, בהתאם למערכת.

בעבודה זאת בחרנו להשתמש בשילוב של הפרדה כימית ואלקטרומגנטית המאפשר קביעת יבולים ותכונות גועיניות של איזוטופים מופרדים, בדיוק שאינו ניתן להשגה כרגע בשיטות פיסיקליות או כימיות בלבד.

1.2.6 איזוטופים של קריפטון וקסנון - יבולים ותכונות

טבלה מס' 1 - מסכמת בקצרה את היבולים של איזוטופים של קריפטון וקסנון בבקוע של אורניום 235 ע"י נויטרונים איטיים את מחציות החיים שלהם, ואת השיאים האפיניים בספקטרום גמא כפי שהם ידועים כיום. הערכים המופיעים בטבלה הם בחלקם הוצאה של עבודה זאת ופורסמו בעתונות המדעית. יבולי הבקוע הם ערכים משוכללים של נתונים נסיוניים שונים המפורטים בפרסום קודם ⁽²⁵⁾.

מעקב אחרי דעיכתם של איזוטופים מופרדים של קריפטון וקסנון המתקבלים בבקוע, מספק אינפורמציה גם לגבי תוצרי הדעיכה שלהם, דהיינו מחציות חיים וספקטרום קרינות ביתא וגמא.

ציור מס' 2 - מתאר את הקטעים מלוח האיזוטופים המתייחסים לשרשרות המסה. שנחקרו בעבודה זו.

טבלה מס' 1 - מחציות חיים, יבולים ראשוניים ושיאים בולטים בטקסטורם גמא של איזוטופים של קריפטון וסגורן הנוצרים מבקוע של אורניום 235 ע"י נויטרונים אינטיים.

קריפטון

מסה	יבול שרשרת % (52)	יבול ראשוני (26) יחסי	יבול ראשוני %	זמן מחצית חיים	שיאי גמא בולטים			מסה
					אנרגיה (KeV)	צמחה	אנרגיה (KeV)	
86	1.95±0.05	0.03 ±0.01	0.058±0.019	יציב	-	-	-	86
87	2.55±0.07	0.15 ±0.01	0.382±0.027	דק, 76.31±0.62	0.483	2554.5	0.086	53) 87
88	3.62±0.07	0.37 ±0.03	1.339±0.112	דק, 171.6 ±1.0	0.378±0.02	2392.0	0.378±0.02	54) 88
89	4.80±0.10	0.67 ±0.04	3.216±0.203	דק, 3.18±0.02	0.186	585.8	0.225	56) 89
90	5.89±0.11	0.76 ±0.03	4.476±0.195	שב, 32.23±0.09	0.53	1118.7	0.58	57) 90
91	5.93±0.11	0.55 ±0.015	3.261±0.107	שב, 8.6 ±0.04	0.153	506.8	0.409	58) 91
92	5.97±0.07	0.31 ±0.01	1.851±0.063	שב, 1.84±0.008	0.305	1218.6	0.327	59) 92
93	6.40±0.07	0.08 ±0.01	0.512±0.07	1.2 ±0.1	1.00*	253	0.10*	48) 93
94	6.44±0.07	0.027±0.005	0.174±0.034	0.2 ±0.01	1.00*	253	0.10*	48) 94

סגורן

135	6.60±0.16	0.04 ±0.01	0.264±0.072	דק, 15.65±9.083	0.92	249.8	0.026	61) 135
136	6.18±0.14	0.24 ±0.04	1.483±0.281	יציב	0.3	455.6	0.006	62) 136
137	6.26±0.16	0.47 ±0.06	2.942±0.451	דק, 3.83±0.02	0.325	434.5	0.202	63) 137
138	6.80±0.17	0.74 ±0.08	5.032±0.67	דק, 14.17±0.07	0.29	174.9	0.29	64) 138
139	6.50±0.12	0.68 ±0.10	4.42 ±0.732	שב, 39.58±0.14	0.61*	1413.7	1.00*	65) 139
140	6.36±0.06	0.58 ±0.04	3.689±0.289	שב, 13.6 ±0.1	0.65*	118.6	1.00*	66) 140
141	5.82±0.06	0.20 ±0.02	1.164±0.128	שב, 1.72±0.013	0.83*	656.8	1.00*	67) 141
142	5.87±0.06	0.107±0.015	0.628±0.094	שב, 1.24±0.02				142
143	5.95±0.08	0.008±0.001	0.048±0.007	שב, 0.3 ±0.03				143

* צמחה יחסית.

Y67 141 80a 17 20a 20 21a 21 22a	Y68 142 80a 18 20a 21 22a 22 23a	Y69 143 80a 19 20a 22 23a 23 24a	Y70 144 80a 20 20a 23 24a 24 25a	Y71 145 80a 21 20a 24 25a 25 26a	Y72 146 80a 22 20a 25 26a 26 27a	Y73 147 80a 23 20a 26 27a 27 28a	Y74 148 20a 24 20a 27 28a 28 29a	Y75 149 20a 25 20a 28 29a 29 30a	Y76 150 20a 26 20a 29 30a 30 31a	Y77 151 20a 27 20a 30 31a 31 32a	Y78 152 20a 28 20a 31 32a 32 33a	Y79 153 20a 29 20a 32 33a 33 34a	Y80 154 20a 30 20a 33 34a 34 35a	Y81 155 20a 31 20a 34 35a 35 36a	Y82 156 20a 32 20a 35 36a 36 37a	Y83 157 20a 33 20a 36 37a 37 38a	Y84 158 20a 34 20a 37 38a 38 39a	Y85 159 20a 35 20a 38 39a 39 40a	Y86 160 20a 36 20a 39 40a 40 41a	Y87 161 20a 37 20a 40 41a 41 42a	Y88 162 20a 38 20a 41 42a 42 43a	Y89 163 20a 39 20a 42 43a 43 44a	Y90 164 20a 40 20a 43 44a 44 45a	Y91 165 20a 41 20a 44 45a 45 46a	Y92 166 20a 42 20a 45 46a 46 47a	Y93 167 20a 43 20a 46 47a 47 48a	Y94 168 20a 44 20a 47 48a 48 49a	Y95 169 20a 45 20a 48 49a 49 50a	Y96 170 20a 46 20a 49 50a 50 51a	Y97 171 20a 47 20a 50 51a 51 52a	Y98 172 20a 48 20a 51 52a 52 53a	Y99 173 20a 49 20a 52 53a 53 54a	Y00 174 20a 50 20a 53 54a 54 55a	Y01 175 20a 51 20a 54 55a 55 56a	Y02 176 20a 52 20a 55 56a 56 57a	Y03 177 20a 53 20a 56 57a 57 58a	Y04 178 20a 54 20a 57 58a 58 59a	Y05 179 20a 55 20a 58 59a 59 60a	Y06 180 20a 56 20a 59 60a 60 61a	Y07 181 20a 57 20a 60 61a 61 62a	Y08 182 20a 58 20a 61 62a 62 63a	Y09 183 20a 59 20a 62 63a 63 64a	Y10 184 20a 60 20a 63 64a 64 65a	Y11 185 20a 61 20a 64 65a 65 66a	Y12 186 20a 62 20a 65 66a 66 67a	Y13 187 20a 63 20a 66 67a 67 68a	Y14 188 20a 64 20a 67 68a 68 69a	Y15 189 20a 65 20a 68 69a 69 70a	Y16 190 20a 66 20a 69 70a 70 71a	Y17 191 20a 67 20a 70 71a 71 72a	Y18 192 20a 68 20a 71 72a 72 73a	Y19 193 20a 69 20a 72 73a 73 74a	Y20 194 20a 70 20a 73 74a 74 75a	Y21 195 20a 71 20a 74 75a 75 76a	Y22 196 20a 72 20a 75 76a 76 77a	Y23 197 20a 73 20a 76 77a 77 78a	Y24 198 20a 74 20a 77 78a 78 79a	Y25 199 20a 75 20a 78 79a 79 80a	Y26 200 20a 76 20a 79 80a 80 81a	Y27 201 20a 77 20a 80 81a 81 82a	Y28 202 20a 78 20a 81 82a 82 83a	Y29 203 20a 79 20a 82 83a 83 84a	Y30 204 20a 80 20a 83 84a 84 85a	Y31 205 20a 81 20a 84 85a 85 86a	Y32 206 20a 82 20a 85 86a 86 87a	Y33 207 20a 83 20a 86 87a 87 88a	Y34 208 20a 84 20a 87 88a 88 89a	Y35 209 20a 85 20a 88 89a 89 90a	Y36 210 20a 86 20a 89 90a 90 91a	Y37 211 20a 87 20a 90 91a 91 92a	Y38 212 20a 88 20a 91 92a 92 93a	Y39 213 20a 89 20a 92 93a 93 94a	Y40 214 20a 90 20a 93 94a 94 95a	Y41 215 20a 91 20a 94 95a 95 96a	Y42 216 20a 92 20a 95 96a 96 97a	Y43 217 20a 93 20a 96 97a 97 98a	Y44 218 20a 94 20a 97 98a 98 99a	Y45 219 20a 95 20a 98 99a 99 100a	Y46 220 20a 96 20a 99 100a 100 101a	Y47 221 20a 97 20a 100 101a 101 102a	Y48 222 20a 98 20a 101 102a 102 103a	Y49 223 20a 99 20a 102 103a 103 104a	Y50 224 20a 100 20a 103 104a 104 105a	Y51 225 20a 101 20a 104 105a 105 106a	Y52 226 20a 102 20a 105 106a 106 107a	Y53 227 20a 103 20a 106 107a 107 108a	Y54 228 20a 104 20a 107 108a 108 109a	Y55 229 20a 105 20a 108 109a 109 110a	Y56 230 20a 106 20a 109 110a 110 111a	Y57 231 20a 107 20a 110 111a 111 112a	Y58 232 20a 108 20a 111 112a 112 113a	Y59 233 20a 109 20a 112 113a 113 114a	Y60 234 20a 110 20a 113 114a 114 115a	Y61 235 20a 111 20a 114 115a 115 116a	Y62 236 20a 112 20a 115 116a 116 117a	Y63 237 20a 113 20a 116 117a 117 118a	Y64 238 20a 114 20a 117 118a 118 119a	Y65 239 20a 115 20a 118 119a 119 120a	Y66 240 20a 116 20a 119 120a 120 121a	Y67 241 20a 117 20a 120 121a 121 122a	Y68 242 20a 118 20a 121 122a 122 123a	Y69 243 20a 119 20a 122 123a 123 124a	Y70 244 20a 120 20a 123 124a 124 125a	Y71 245 20a 121 20a 124 125a 125 126a	Y72 246 20a 122 20a 125 126a 126 127a	Y73 247 20a 123 20a 126 127a 127 128a	Y74 248 20a 124 20a 127 128a 128 129a	Y75 249 20a 125 20a 128 129a 129 130a	Y76 250 20a 126 20a 129 130a 130 131a	Y77 251 20a 127 20a 130 131a 131 132a	Y78 252 20a 128 20a 131 132a 132 133a	Y79 253 20a 129 20a 132 133a 133 134a	Y80 254 20a 130 20a 133 134a 134 135a	Y81 255 20a 131 20a 134 135a 135 136a	Y82 256 20a 132 20a 135 136a 136 137a	Y83 257 20a 133 20a 136 137a 137 138a	Y84 258 20a 134 20a 137 138a 138 139a	Y85 259 20a 135 20a 138 139a 139 140a	Y86 260 20a 136 20a 139 140a 140 141a	Y87 261 20a 137 20a 140 141a 141 142a	Y88 262 20a 138 20a 141 142a 142 143a	Y89 263 20a 139 20a 142 143a 143 144a	Y90 264 20a 140 20a 143 144a 144 145a	Y91 265 20a 141 20a 144 145a 145 146a	Y92 266 20a 142 20a 145 146a 146 147a	Y93 267 20a 143 20a 146 147a 147 148a	Y94 268 20a 144 20a 147 148a 148 149a	Y95 269 20a 145 20a 148 149a 149 150a	Y96 270 20a 146 20a 149 150a 150 151a	Y97 271 20a 147 20a 150 151a 151 152a	Y98 272 20a 148 20a 151 152a 152 153a	Y99 273 20a 149 20a 152 153a 153 154a	Y00 274 20a 150 20a 153 154a 154 155a	Y01 275 20a 151 20a 154 155a 155 156a	Y02 276 20a 152 20a 155 156a 156 157a	Y03 277 20a 153 20a 156 157a 157 158a	Y04 278 20a 154 20a 157 158a 158 159a	Y05 279 20a 155 20a 158 159a 159 160a	Y06 280 20a 156 20a 159 160a 160 161a	Y07 281 20a 157 20a 160 161a 161 162a	Y08 282 20a 158 20a 161 162a 162 163a	Y09 283 20a 159 20a 162 163a 163 164a	Y10 284 20a 160 20a 163 164a 164 165a	Y11 285 20a 161 20a 164 165a 165 166a	Y12 286 20a 162 20a 165 166a 166 167a	Y13 287 20a 163 20a 166 167a 167 168a	Y14 288 20a 164 20a 167 168a 168 169a	Y15 289 20a 165 20a 168 169a 169 170a	Y16 290 20a 166 20a 169 170a 170 171a	Y17 291 20a 167 20a 170 171a 171 172a	Y18 292 20a 168 20a 171 172a 172 173a	Y19 293 20a 169 20a 172 173a 173 174a	Y20 294 20a 170 20a 173 174a 174 175a	Y21 295 20a 171 20a 174 175a 175 176a	Y22 296 20a 172 20a 175 176a 176 177a	Y23 297 20a 173 20a 176 177a 177 178a	Y24 298 20a 174 20a 177 178a 178 179a	Y25 299 20a 175 20a 178 179a 179 180a	Y26 300 20a 176 20a 179 180a 180 181a	Y27 301 20a 177 20a 180 181a 181 182a	Y28 302 20a 178 20a 181 182a 182 183a	Y29 303 20a 179 20a 182 183a 183 184a	Y30 304 20a 180 20a 183 184a 184 185a	Y31 305 20a 181 20a 184 185a 185 186a	Y32 306 20a 182 20a 185 186a 186 187a	Y33 307 20a 183 20a 186 187a 187 188a	Y34 308 20a 184 20a 187 188a 188 189a	Y35 309 20a 185 20a 188 189a 189 190a	Y36 310 20a 186 20a 189 190a 190 191a	Y37 311 20a 187 20a 190 191a 191 192a	Y38 312 20a 188 20a 191 192a 192 193a	Y39 313 20a 189 20a 192 193a 193 194a	Y40 314 20a 190 20a 193 194a 194 195a	Y41 315 20a 191 20a 194 195a 195 196a	Y42 316 20a 192 20a 195 196a 196 197a	Y43 317 20a 193 20a 196 197a 197 198a	Y44 318 20a 194 20a 197 198a 198 199a	Y45 319 20a 195 20a 198 199a 199 200a	Y46 320 20a 196 20a 199 200a 200 201a	Y47 321 20a 197 20a 200 201a 201 202a	Y48 322 20a 198 20a 201 202a 202 203a	Y49 323 20a 199 20a 202 203a 203 204a	Y50 324 20a 200 20a 203 204a 204 205a	Y51 325 20a 201 20a 204 205a 205 206a	Y52 326 20a 202 20a 205 206a 206 207a	Y53 327 20a 203 20a 206 207a 207 208a	Y54 328 20a 204 20a 207 208a 208 209a	Y55 329 20a 205 20a 208 209a 209 210a	Y56 330 20a 206 20a 209 210a 210 211a	Y57 331 20a 207 20a 210 211a 211 212a	Y58 332 20a 208 20a 211 212a 212 213a	Y59 333 20a 209 20a 212 213a 213 214a	Y60 334 20a 210 20a 213 214a 214 215a	Y61 335 20a 211 20a 214 215a 215 216a	Y62 336 20a 212 20a 215 216a 216 217a	Y63 337 20a 213 20a 216 217a 217 218a	Y64 338 20a 214 20a 217 218a 218 219a	Y65 339 20a 215 20a 218 219a 219 220a	Y66 340 20a 216 20a 219 220a 220 221a	Y67 341 20a 217 20a 220 221a 221 222a	Y68 342 20a 218 20a 221 222a 222 223a	Y69 343 20a 219 20a 222 223a 223 224a	Y70 344 20a 220 20a 223 224a 224 225a	Y71 345 20a 221 20a 224 225a 225 226a	Y72 346 20a 222 20a 225 226a 226 227a	Y73 347 20a 223 20a 226 227a 227 228a	Y74 348 20a 224 20a 227 228a 228 229a	Y75 349 20a 225 20a 228 229a 229 230a	Y76 350 20a 226 20a 229 230a 230 231a	Y77 351 20a 227 20a 230 231a 231 232a	Y78 352 20a 228 20a 231 232a 232 233a	Y79 353 20a 229 20a 232 233a 233 234a	Y80 354 20a 230 20a 233 234a 234 235a	Y81 355 20a 231 20a 234 235a 235 236a	Y82 356 20a 232 20a 235 236a 236 237a	Y83 357 20a 233 20a 236 237a 237 238a	Y84 358 20a 234 20a 237 238a 238 239a	Y85 359 20a 235 20a 238 239a 239 240a	Y86 360 20a 236 20a 239 240a 240 241a	Y87 361 20a 237 20a 240 241a 241 242a	Y88 362 20a 238 20a 241 242a 242 243a	Y89 363 20a 239 20a 242 243a 243 244a	Y90 364 20a 240 20a 243 244a 244 245a	Y91 365 20a 241 20a 244 245a 245 246a	Y92 366 20a 242 20a 245 246a 246 247a	Y93 367 20a 243 20a 246 247a 247 248a	Y94 368 20a 244 20a 247 248a 248 249a	Y95 369 20a 245 20a 248 249a 249 250a	Y96 370 20a 246 20a 249 250a 250 251a	Y97 371 20a 247 20a 250 251a 251 252a	Y98 372 20a 248 20a 251 252a 252 253a	Y99 373 20a 249 20a 252 253a 253 254a	Y00 374 20a 250 20a 253 254a 254 255a	Y01 375 20a 251 20a 254 255a 255 256a	Y02 376 20a 252 20a 255 256a 256 257a	Y03 377 20a 253 20a 256 257a 257 258a	Y04 378 20a 254 20a 257 258a 258 259a	Y05 379 20a 255 20a 258 259a 259 260a	Y06 380 20a 256 20a 259 260a 260 261a	Y07 381 20a 257 20a 260 261a 261 262a	Y08 382 20a 258 20a 261 262a 262 263a	Y09 383 20a 259 20a 262 263a 263 264a	Y10 384 20a 260 20a 263 264a 264 265a	Y11 385 20a 261 20a 264 265a 265 266a	Y12 386 20a 262 20a 265 266a 266 267a	Y13 387 20a 263 20a 266 267a 267 268a	Y14 388 20a 264 20a 267 268a 268 269a	Y15 389 20a 265 20a 268 269a 269 270a	Y16 390 20a 266 20a 269 270a 270 271a	Y17 391 20a 267 20a 270 271a 271 272a	Y18 392 20a 268 20a 271 272a 272 273a	Y19 393 20a 269 20a 272 273a 273 274a	Y20 394 20a 270 20a 273 274a 274 275a	Y21 395 20a 271 20a 274 275a 275 276a	Y22 396 20a 272 20a 275 276a 276 277a	Y23 397 20a 273 20a 276 277a 277 278a	Y24 398 20a 274 20a 277 278a 278 279a	Y25 399 20a 275 20a 278 279a 279 280a	Y26 400 20a 276 20a 279 280a 280 281a	Y27 401 20a 277 20a 280 281a 281 282a	Y28 402 20a 278 20a 281 282a 282 283a	Y29 403 20a 279 20a 282 283a 283 284a	Y30 404 20a 280 20a 283 284a 284 285a	Y31 405 20a 281 20a 284 285a 285 286a	Y32 406 20a 282 20a 285 286a 286 287a	Y33 407 20a 283 20a 286 287a 287 288a	Y34 408 20a 284 20a 287 288a 288 289a	Y35 409 20a 285 20a 288 289a 289 290a	Y36 410 20a 286 20a 289 290a 290 291a	Y37 411 20a
----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	-----------------------------------------------	-------------------------------------------------	--------------------------------------------------	--------------------------------------------------	--------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------	----------------

2. המערכת הנסיונית ושיטות החשב

2.1 כללי

המערכת הנסיונית להפרדת קריפטון וקסנון מבקוע כללה:

1. מקור נויטרונים.
 2. מטרה המכילה אורניום.
 3. מפרד איזוטופים - הסוליס.
 4. גלאי קרינה ומערכת מניה.
- ציור מסי 3 מתאר בצורה טכמטית את הסוליס ואת אזור ההקרנה.

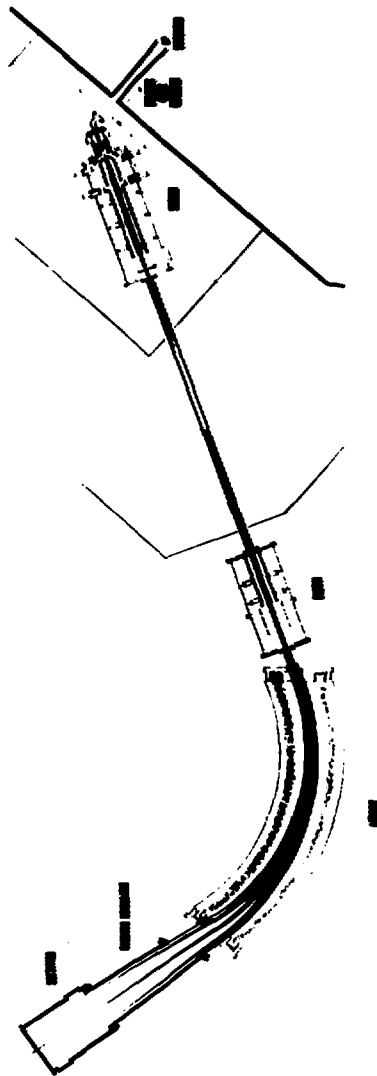
2.2 מקור הנויטרונים

כמקור ניוטרונים שמש "צנור אלומה" באורך של כ- 2.5 מ' שקצהו האחד מכוון כלפי לבת הכור והקצה השני יוצא לאולם הכור. לצנור חתך קוני וצדו הרחב מופנה כלפי הלבנה. בקצה הצנור נמצא סגר עופרת בעובי 30 ס"מ המצופה בשכבת קדמיום דקה, בשעת ההקרנה מרוקנים את "צנור האלומה" ממים הממלאים אותו בדרך כלל, מטעמי בטיחות קרינה, ומסובבים את סגר העופרת בעזרת אויר דחוס, כך שפתחו יימצא מול הפתח של "צנור האלומה". שטף הנויטרונים הממוצע המתקבל בקצה הצנור משתנה בהתאם להספק הכור וגאומטריה של הלבנה והוא נע בין $10^9 - 2 \times 10^8$ נויטרונים/סמ"ר. בדיקת השטף נעשית ע"י הקרנת עלי זהב, ציור מסי 4 מתאר התפלגות שטף אפינית על מנת להבטיח רקע נמוך באולם הכור, נמצא הפתח של צנור האלומה בתוך מבנה בטון אשר כולל גם וולק ממפרד האיזוטופים (ראה ציור מסי 3) בנוסף לסגר העופרת ישנו גם סגר קדמיום לבליעה נויטרונים בלבד, שהופעל בזמן עבודה במחזורים.

2.3 מטרה המכילה אורניום

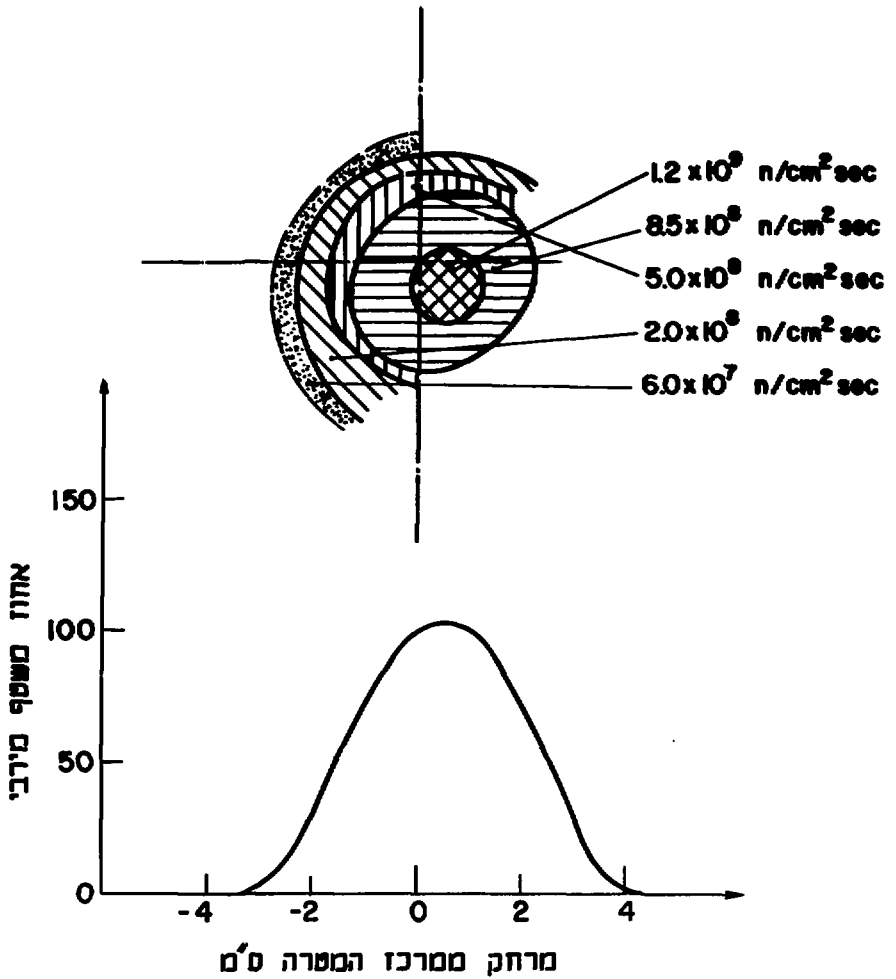
2.3.1 חומר המטרה:

מטרת האורניום היתה מיועדת להוצאה סלקטיבית של הגזים האציליים מיתר תוצרי הבקוע ולכן השתמשו באבקה דקה של אורניל סטארט או חערובת של תחמוצת האורניום עם בריום סטארט. מטרות מסוג זה משחררות כמותית את הגזים האציליים בזמני שהיה של 0.1 שני' ומבטיחות הפרדה טובה (1% ~) מיוד וברום שאף הם הינם נדיפים (46). נוסה



30113

ציר נס' 3 - הסוליס ואזור ההקרנה.



צילור מס' 4 - התפלגות שטף הנויטרונים במטרה.

גם שמוט במטרה שהכילה אורניום מטומח על פחם פעיל במקום הסטארט, אשר טובל מנזקי קרינה. מטרה זאת לא הוכנסה לשמוט מטום שהרכבו המכטימלי של תחמוצת האורניום בפחם פעיל היה 5% וכמות האורניום במטרה הייתה קטנה מכפי שנדרש כדי לקבל סטטיסטיקה טובה של מנייה בזמן קיר. בכל המקרים השתמשנו באורניום המועשר באיזוטום 235 בשעור 93.3%.

2.3.2 מבנה המטרה

מבנה המטרה מתואר בציור מסי' 5. האבקה המכילה אורניום הייתה סגורה בתוך טבעת מאלומיניום בקוטר של כ- 5 ס"מ, בין נירות סנון ורשת מפלבי"ם בעלת צפיפות של 400 מ"יש. הטבעת ישבה בהוך בית מטרה סגור הרמטית אשר התחבר דרך צואר קצר בקוטר 2.5 ס"מ למקור היונים של מפרד האיזוטופים. דרך האבקה הוזרם הליום שהכיל 2-3% קריפטון או קסנון יציבים, בהתאם לתוצר הבקוע שהיינו מעוניינים לבדוק, ואשר שמש גז נושא לתוצרי בקוע והבטיח קבלת בלסטמה יציבה במקור היונים. המטרה ישבה מול פתח ההקרנה בנויטרונים, סמוך ככל האפשר לקיר, כאשר המרחק המינימלי בין המטרה לבין הקיר נקבע לפי שקולים של פריצות מתח גבוה (המטרה ישבה בפוטנציאל של כ- 60KV) כדי להקטין את זמן השהיה הממוצע של תוצרי הביקוע בתוך המטרה, השתמשנו גם במטרה המחולקת למחיצות רבועיות של 5x5 מ"מ.

2.4 מפרד איזוטופים, הטוליס

Soreq On-Line Isotope Separator.

חלקיו העיקריים של הטוליס הם:

1. מקור היונים.

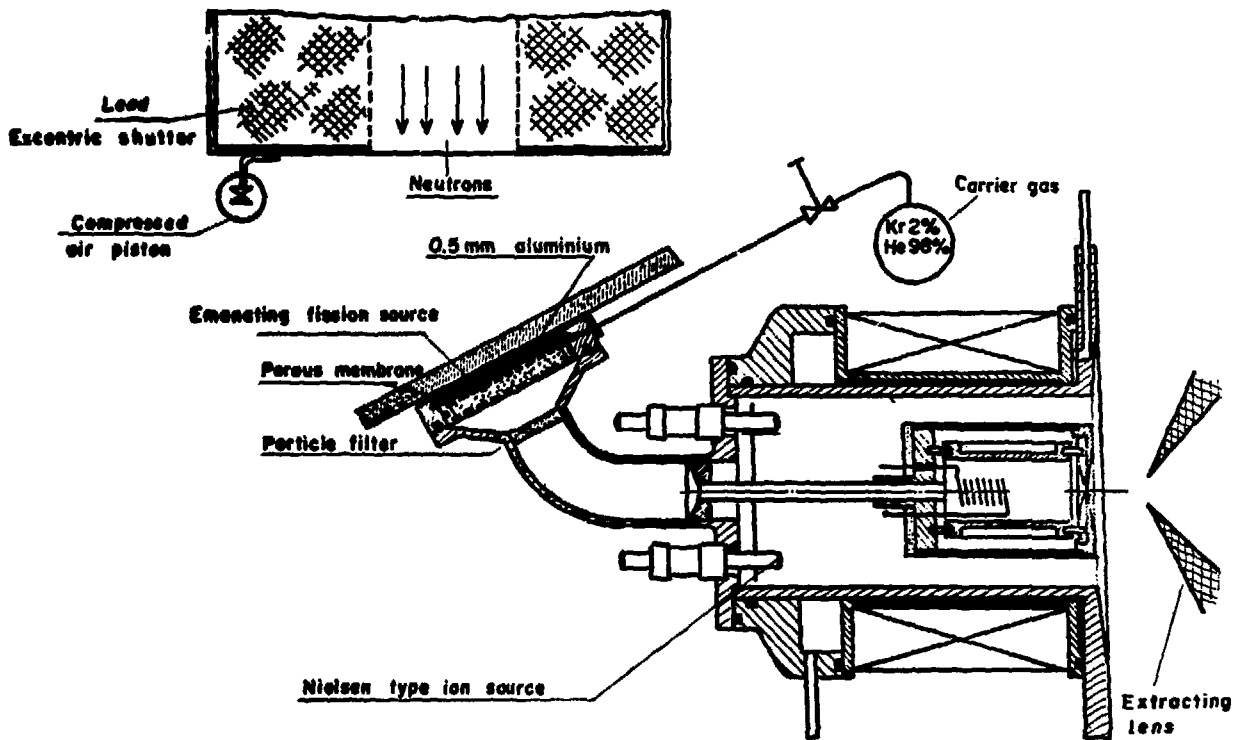
2. מערכת עדשות אלקטרוסטטיות.

3. מגנט הטיה.

4. הקולקטור.

להלן פריט קצר של המרכיבים:

מקור היונים - בו השתמשנו היה פלסמטרון מדגם נילסן (ציור מסי' 5), הפלסמה התקבלה ע"י הפצצת הגז בתוך המקור (הליום עם כ- 3% קריפטון או קסנון) ע"י אלקטרונים שנפלטו מחוט טונגסטן לוהט והואצו כלפי אנודה גלילית מגרפיט לאנרגיה של כ- 100



SOLIS-emanation target and ion source 1971

ציור מס' 5 - מטרת הבקוע ומקור היונים מטפוס פלסמטרון.

אלקטרון וולט. (פוטנציאל היינון של הליום הינו 24.46 eV) משלול האלקטרונים בין חוט הלחט לאנודה נקבע ע"י שדה מגנטי המקיף את מקור היונים. מקור היונים יושב בפוטנציאל של כ- $+60 \text{KV}$ ולכן היונים היוצאים ממנו מואצים כלפי הקולקטור. כדי ליעל את "פצווי" היונים מהמקור, משתמשים בעדשת אקסטרקטור השלילית ביחס למקור (כ- 10KV) והיושב ליד הפתח של מקור היונים. אפשר לכוון את טיב ההפרדה ועצמת האלומה ע"י שנויים בקטרו של פתח היציאה ממקור היונים, כאשר פתח קטן מבטיח הפרדה טובה ואילו הגדלתו מגדילה את עצמת האלומה. בגלל ההפרשים הגדולים בפוטנציאל היוניזציה בין הליום לבין יתר מרכיבי הגז ($\text{Kr } 13.93 \text{ eV}$, $\text{Xe } 12.08 \text{ eV}$), קיים מעבר מסען בין יוני הליום לבין היסודות האחרים גם אם רכוזם בתערובת נמוך, כך שההליום מהווה רק אחוז קטן מאלומת היונים היוצאת מהמקור. עצמת אלומת יונים בלתי מופרדת היוצאת ממקור היונים היתה כ- $100-200$ מיקרואמפרים. קיימת גם אפשרות ליוניזציה כפולה אולם בגלל פוטנציאל היוניזציה הגבוה ($\text{Kr } 26.4 \text{ eV}$) היא המהווה רק חלק קטן מהאלומה (כ- 10%).

העדשות האלקטרוסטטיות - מיקוד אלומת היונים לאורך ציר המפרד בוצע בעזרת שלוש

עדשות אלקטרוסטטיות ששחים מהן ממוקמות סמוך לעדשת האקסטרקטור ואילו השלישית בכניסה למגנט. בין שתי קבוצות העדשות עובר צנור ארוך המעביר את האלומה דרך המסוכים של תא ההקרנה, (ציור מס' 3) ומסיבה זאת מקוד טוב חשוב מאוד להבטחת יעילות ההעברה. העדשות מאפשרות מקוד דו-ממדי, וזה הודות לשדה השוליים שלהן.

מגנט הטיה - עצמת השדר המגנטי ניתנת לשנוי רצוף וע"י זה אפשר לקבל בנקודת

המדידה בקולקטור כל מסה בתחום משקלים אטומיים בין 1 ל- 240 .

הקולקטור - הקולקטור מאפשר אסוף בו זמני של כ- 20 מסות מופרדות בסביבת מסה

100 (המרחק בין המסות עבור $A=100$ הוא 15.6 מ"מ). כושר ההפרדה בין המסות נמצא ביוחס הפוך למסה המופרדת. (17.3 מ"מ במסה 90 ו- 11.1 מ"מ ב- 140) הקולקטור מצויד במחט רוטטת המודדת את עצמת האלומה כפונקציה של מקום ומאפשרת לראות את האלומה המופרדת על גבי מסך של אלקטרוסקופ. רגישות המערכת - 10^{-9} אמפר. כמו כן נמצאת בקולקטור כוסיית פרדי למדידה זרם אלומה המורכבת על גבי בורג מילמטרי וניתן לקבוע את מיקומה בדיוק של ± 0.5 מ"מ. הרגישות לזרם - 10^{-12} אמפר. ממרכז הקולקטור ניתן

להוציא אלומת יונים למערכות מניה שונות כמו סרט נע, מונה יונים או לוחית אסוף, וכן ניתן להחזיר לאוכו סרגל המאפשר אסוף בו זמני של כל המסות המופרדות. הלחץ בקולקטור הוא כ- 10^{-6} טור וכל עליה בלחץ מקטינה את עצמת האלומה המופרדת ומקלקלת את צורתה.

2.5 גלאי קרינה ומערכות מניה

2.5.1 גלאים לחלקיקי ביתא

מדידת מחציות חיים ויבולים התבטטה בעיקר על מנית חלקיקי ביתא. למטרה זאת השתמשנו בנצנצים פלסטיים מסוג NE102, כאשר המדידה בוצעה בקו דציף עם ההפרדה, או במוני גז פרופורציוניים עבור איזוטופים ארוכי חיים. מאחר שהמדידות בקו רצוף בוצעו באולם הכור בו יש רקע גבוה של קרינת גמא, נעזרנו במונה "טלסקופי" לשם מנית ביתא. מונה זה היה מורכב מגביש דק (2 מ"מ עובי) וגביש עבה (40 מ"מ עובי) המורכב מאחוריו. ממערכות המניה נרשמו רק פולסים שבאו בהתלכדות משני המונים ובאופן כזה הרקע הורד עד למינימום. ציור מס' 6 מתאר באופן סכמטי את מערכות המדידה אתן עבדנו. מגרעת המונה הטלסקופי - רק חלקיקי ביתא בעלי אנרגיה הגבוהה מ-700 קא"וו מצליחים לחדור למונה העבה ולכן יעילות המניה קטנה בצורה ניכרת עבור גרעינים בעלי Q_{β} נמוך יחסית. מן הדין לציין כאן כי איזוטופים קצרי החיים בהם היה לנו ענין הינם בעלי Q_{β} של כ-4-5 מא"וו ולכן מגבלת המונה הטלסקופי הינה בעלת חשיבות משנית בלבד. יעילות המניה של המונה הטלסקופי נמדדה בהשואה למונה גז פרופורציוני בעל יעילות מניה של כ-30% ועקומת כיוול שטוחה כפונקציה של אנרגיה.

2.5.2 גלאי לקרינת גמא

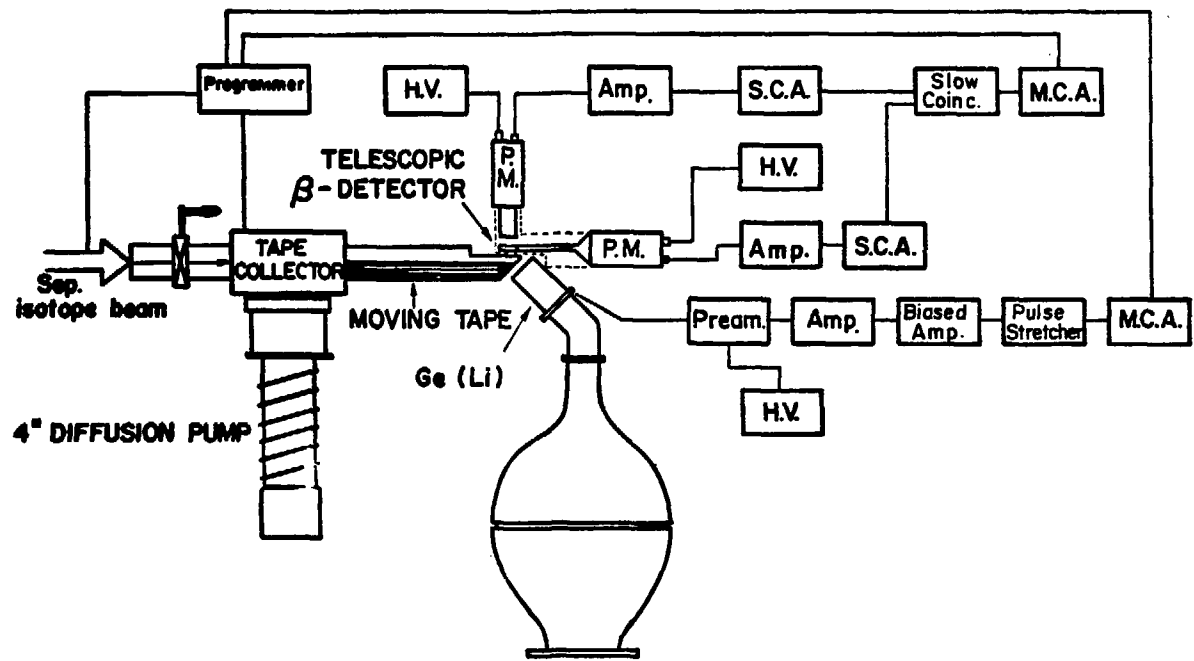
כגלאי לקרינת גמא שמש גביש מגרמניום Ge(Li), קואקסיאלי, בעל נפח פעיל של 29 סמ"ק. כושר ההפרדה של הגביש 2.6 קא"וו באנרגיה של 1330 קא"וו ויחס שיא לקומפטון = 16.

2.5.3 סרט אוסף

כאמור (2.4) ניתן להוציא ממרכז הקולקטור אלומה בודדת של יונים מופרדים ולעצרה בסמוך לגלאי הקרינה. כמו כן ניתן לעצור את האלומה על סרט פלסטי מוליך המאפשר מדידה סלקטיבית של יסוד כלשהו בשרשרת הדעיכה.

SOLIS

β AND γ COUNTING SYSTEM



צ'ור מס' 6 - האור סכמטי של מערכת המניה -
 PM - מכפילור, H.V. - ספק מתח גבוה, SCA - ממיינן חד ערוצי,
 MCA - ממיינן רב ערוצי.

ניתן להפעיל את המערכת כאשר הסרט מסתובב במהירות קווית קבועה בין 6-0 ס"מ/שניה. או לחליפין - אסוף אלומה על סרט נח והסעת הסרט בגמר מחזור של אסוף ומניה לשם הרקת הבנות ארוכות החיים המעלות את הרקע.

2.5.4 המערכת האלקטרונית

השתמשנו בציור סטנדרטי המותאם לעיבוד הפולסים המתקבלים מגלאי הקרינה (ציור מס' 6). הפולסים ה"מעובדים" הוזנו לממין רב ערוצים בעל 4096 ערוצי זכרון שהיה מסוגל לעבוד בשני אופנים:

א. כממין אנרגיה, לשם מדידת ספקטרום גמא. במצב זה היה גם אופציה לעקוב אחרי השתנות ספקטרום גמא כפונקציה של הזמן ע"י תלוקת הזכרון לקטעים - 8×512 או 16×256 והעברה אוטומטית של המניה מחלק אחד של הזכרון למשנהו לאחר זמן שנקבע מראש.

ב. כמולטיסקיילר - במקרה זה נמדדת האקטיביות כפונקציה של הזמן, כאשר זמן הצבירה בערוץ כלשהו יכול להשתנות בין 1/1000 שניות לבין שניה אחת כאשר משתמשים בשעון הפנימי של הממין וזמנים ארוכים יותר - בעזרת שעון חיצוני.

2.5.5 הפרוגרמר

כדי לשפר את סטטיסטיקת המדידה, אפשר היה להפעיל את המערכת במחזורים אשר כללו הקרנה, מניה והעברת הסרט האוסף. על פעולות אלה פיקד פרוגרמר אלקטרוני בעל 8 תחנות שזמן שהייה בהן ניתן לכוון מראש בקפיצות של 0.01 שניות או 1 שניה ובתחום 1 - 9999 יחידות.

סדר הפעולות של הפרוגרמר היה כדלקמן:

1. הפעלת ממין רב ערוצי בפונקציה של מולטיסקיילר.
2. פתיחת הסגר האלקטרומגנטי של אלומת היונים.
3. פתיחת סגר הנויטרונים.
4. סגירת סגר הנויטרונים.
5. סגירת הסגר האלקטרומגנטי של אלומת היונים.
6. הסעת הסרט האוסף.
7. עצירת הסרט.
8. תחילת מחזור נוסף.

2.6 שיטות החשוב

2.6.1 מדידת מחציות החיים

מחציות חיים של האיזוטופים המופרדים נמדדו בקו רצוף עם מערכת ההפרדה עיי מבית חלקיקי ביחא. ספקטרום הדעיכה היה ברוב המקרים מורכב בגלל תרומת תוצרי הדעיכה (הבנות) לפעילות הכללית של הדוגמא. פרוק עקומות הדעיכה למרכיביהן, לפי מקדמי הדעיכה השונים בוצע בעזרת תכנית מחשב CLSQ היכולה להפריד עקומת דעיכה המכילה עד 10 מרכיבים שחלק מהם (עד 5) הנו בעל מחצית חיים בלתי ידועה.

2.6.2 חישוב פונקציית המעבר

לשם חישוב כמותי של היבולים בביקוע של איזוטופים קצרי חיים דרושה ידיעה טובה של הזמן העובר מהרגע שגרעין כלשהו נוצר במטרה עד רגע הגיעו לקולקטור, וזאת על מנת לתקן את יבולי הביקוע לדעיכה. התפלגות זמני המעבר חושבה לפי עקומות של גידול אקטיביות של איזוטופים בעלי מחצית חיים ידועה וארוכה ביחס לזמן המעבר המשוער, בהם תרומת ה"אסי", הנשארת במטרה ליכול הינה זניחה. בחרנו באיזוטופים קריפטון - 91 וקסנון 140 כמתאימים לחשוב זמני מעבר. בהנחה שאין אפקט איזוטופי במטרת אמנציה ניתן לחקן בעזרת הפונקציה המחושבת את יבולי כל האיזוטופים.

נסמן: K קצב הווצרות האיזוטופ הנחקר - אטומים/שניה (קבוע).

ρ_t הסכוי לעזוב את המטרה בזמן t אחרי ההיווצרות.

ΔM_{CT} מספר האטומים שנמצאים בקולקטור בזמן T לאחר ההוצרות.

Kdt מספר האטומים שנוצרו בפולס קצר בזמן $t=0$.

מכאן נקבל:

$$(1) \quad \Delta M_{CT} = \int_0^T K \rho_t e^{-\lambda T} dt$$

בהקרנה רצופה במשך זמן τ נקבל בקולקטור

$$(2) \quad M_{C\tau} = \int_0^{\tau} \Delta M_{CT} = K \int_0^{\tau} \left| e^{-\lambda T} \int_0^T \rho_t dt \right| dT$$

פתרון נומרי של משוואה (2) הוא כולקמן:

$$P_T = \int_0^T \rho_t dt$$

$$(3) \quad \frac{dM_{CT}}{dT} = K e^{-\lambda T} \cdot P_T \quad \text{אם: } \frac{A}{\lambda \Delta Ch}$$

כאשר $A = \lambda M$ - מספר המניות לערוץ λM .

ΔCh - מספר הערוצים.

לשם חישוב P_T נכרוק את השתנות מספר המניות בערוצים עוקבים ולכן $\Delta Ch = 1$ ומכאן

נובע ש- $T_2 - T_1 = \Delta T$, קבוע.

$$(4) \quad \frac{\Delta M_{C1}}{\Delta M_{C2}} = e^{\lambda \Delta T} \frac{P_{T1}}{P_{T2}} = \frac{\Delta A_1}{\Delta A_2}$$

מכאן

את ערכי P_T ניתן לחשב אם נניח כי $P_{T_m} = 1$.

ציר מס' 7 - מחאר את הפונקציות P_T ו- ρ_t עבור שני סוגים של מטרות:

א. מטרה ללא מחיצות, בה כל האורניום י בתא אחד.

ב. מטרה עם מחיצות בצורת רשת עם חורים בגודל 5x5 מ"מ.

המדידות הראו כי מטרה עם מחיצות מאפשרת העברה מהירה יותר של תוצרי הביקוע

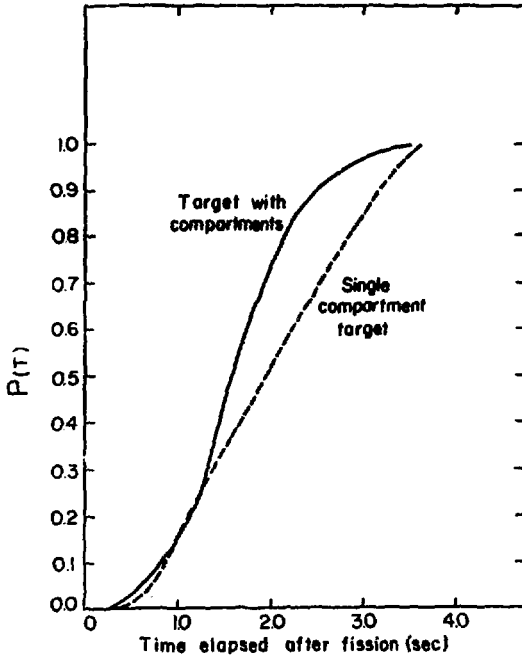
לקולקטור וגם הגדירה מדיקת יותר של זמן המעבר.

בנספח מס' 1 נותנה תכנית המחשב ONLINE בעזרתה מחושבים היבולים היחסיים של

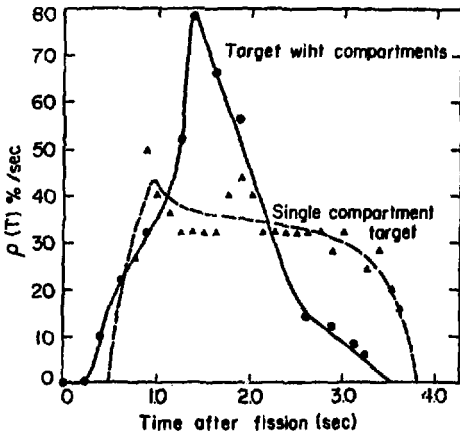
הגזים האצילים וההלוגנים (הנשארים במטרה) מחוך עקומת ההיכנות של האקטיביות בזמן

ההקרנה בתנאי שפונקצית המעבר ידועה, וכן ידועות מחציות החיים של האיזוטופ המופרד,

האם (במטרה) והנת הנוצרת בקולקטור.



צירוף 7 א' - ההסתברות להגיע לקולקטור תוך זמן T לאחר ביקוע במטרה עם מחיצות ובמטרה ללא מחיצות.



צירוף 7 ב' - $\rho(T)$ התפלגות הסבויים לעזיבה המטרה כפונקציה של זמן במטרה עם מחיצות ובמטרה ללא מחיצות.

3. תוצאות המדידה

3.1 ספקטרום גמא

ספקטרום הגמא של האיזוטופים המופרדים נמדד בעזרת גביש גרמניום $Ge(Li)$

קואקסיאלי בעל נוחה מעיל של 29 ט"ק. זהו שיאי הגמא האופייניים נעשה ע"י קביעת המסה ומדידת מחצית החיים.

ציון מסי' 8 - מתאר את ספקטרום גמא האופייני שנמדד במסה 93 ואילו טבלה מסי' 2

מסכמת את השיאים העיקריים שנמדדו במסות 93, 94 ו-143. התוצאות במסות 94

ו-143 הן חלקיות בלבד אולם עוצמת הקרינה של מסות אלה היא נמוכה מאוד הן בגלל יבול בקוץ נמוך והן בגלל מחציות החיים הקצרות יחסית לזמן המעבר הממוצע.

התוצאות החלקיות מסכמות אסוף של כאלף מחזורי הקרנה אולם היחס בין השיאים לרקע היה נמוך ביותר ולא היה טעם להמשיך במחזורי הקרנה.

במסות הנמוכות מ-92 ו-142 ספקטרום הגמא ידוע ובמדידות שלנו התקבלה התאמה טובה עם הטרופות.

3.2 מחציות החיים

מחציות החיים נקבעו ע"י מעקב אחר דעיכת הדוגמא לאחר הפסקת ההקרנה

והפרדת עקומת הדעיכה המתקבלת ידנית או בעזרת חכנית המחשב CLSQ. עקומות הדעיכה

התקבלו בדרך כלל, ע"י מדידת חלקיקי ביחה בעזרת מונה טלסקופי שהתפקידו להקטין

את הרקע, (ראה סעיף 2.5.1) הפרדת עקומות הדעיכה למרכיביהן ואקסטרוולציה לסוף

ההקרנה, נתנו בדרך כלל התאמה טובה בין הפעילות המר שבת מתוך עקומת דעיכה

לבין הפעילות המחושבת מתוך משוואות הדעיכה. (נספח מסי' 2 מסכם את משוואות הדעיכה

והגודל של הבנות). מקרה בולט של אי התאמה בין קסנון לצסיום שנוצר כתוצאה

מדעיכת הקסנון היה במסה 143, בה באופן קבוע הצסיום היה גבוה יותר מן המחושב

לפי כמות הקסנון. אי התאמה עשויה לנבוע מזהוים קל ע"י מסה 142 ועל כך ארחיב

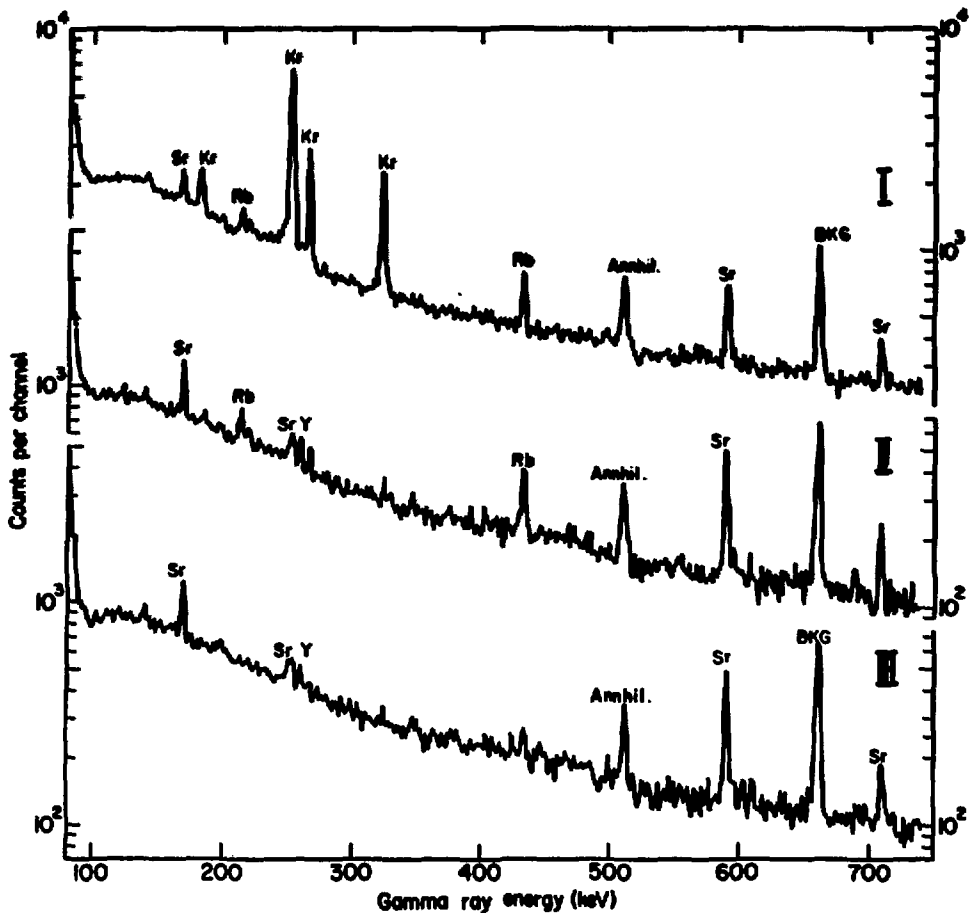
את הדבור בפרק המעריך את דיוק המדידות.

ציון מסי' 9 מתאר עקומת דעיכה אופינית במסה 94 וציורים 10, 11 ו-12 מתארים עקומות

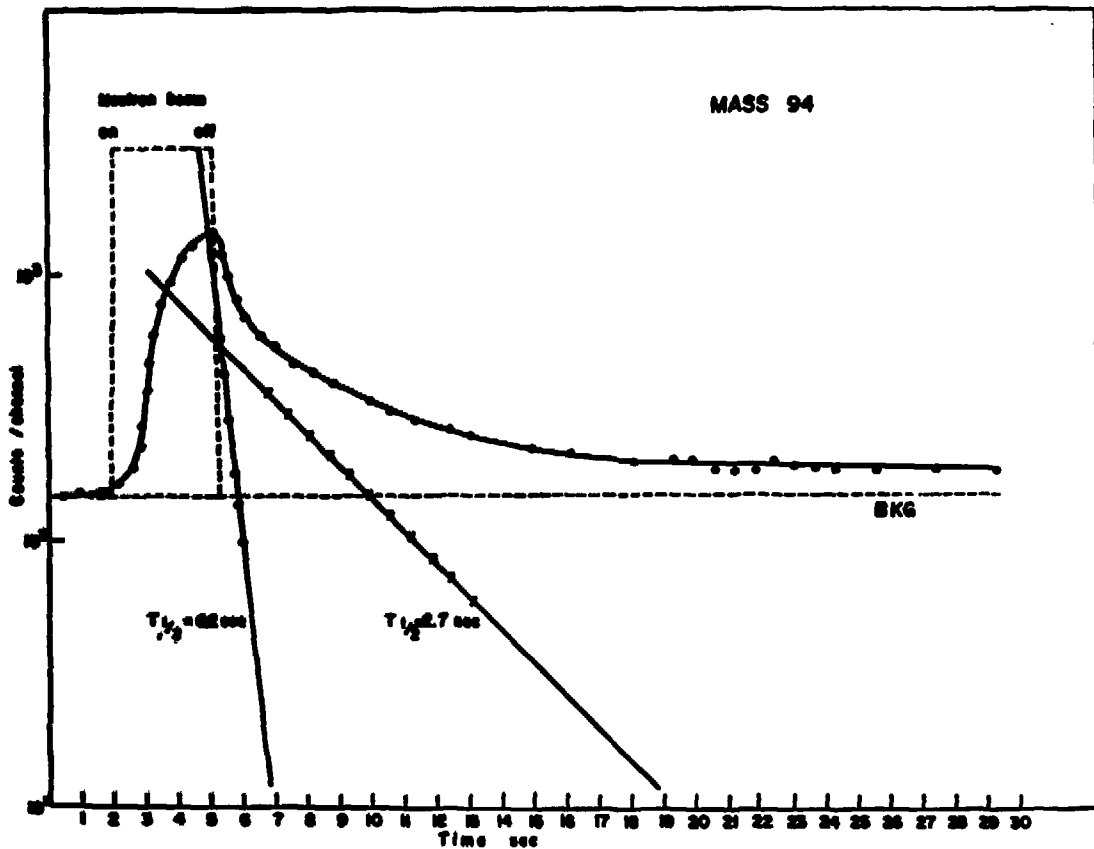
דעיכה של המסות 143, 93 ו-92 בהתאמה.

טבלה 2 - אנרגייה ועוצמת יחסיות של שיאי גמא במסרת 93, 94 ו-143

מדידת קדומה		עכורה זמא		איזוטופ	מסה
עוצמה יחסית	אנרגייה במא KeV	עוצמה יחסית	אנרגייה במא KeV		
	257 ⁽⁶⁹⁾	0.10	182±2	Kr	93
		1.00	253±2		
		0.29	267±2		
		0.49	323±2		
			0.30	215±2	Rb
		1.00	431±2		
0.17	178 ⁽⁷⁰⁾	0.29	169±2	Sr	
0.13		255	0.15		
1.00	600	1.00	590±2		
0.35	710	0.58	710±3		
0.76	880	0.55	876±3		
		0.39	869±3		
			200±2	Kr	94
			230±2		
			188±2	Rb	
			222±2		
	1430 ⁽⁷¹⁾		1420±3	Sr	
			לא זוהר במדה	Xe	143
			173±2	Cs	
			195±2		
			230±2		
			212±2	Ba	

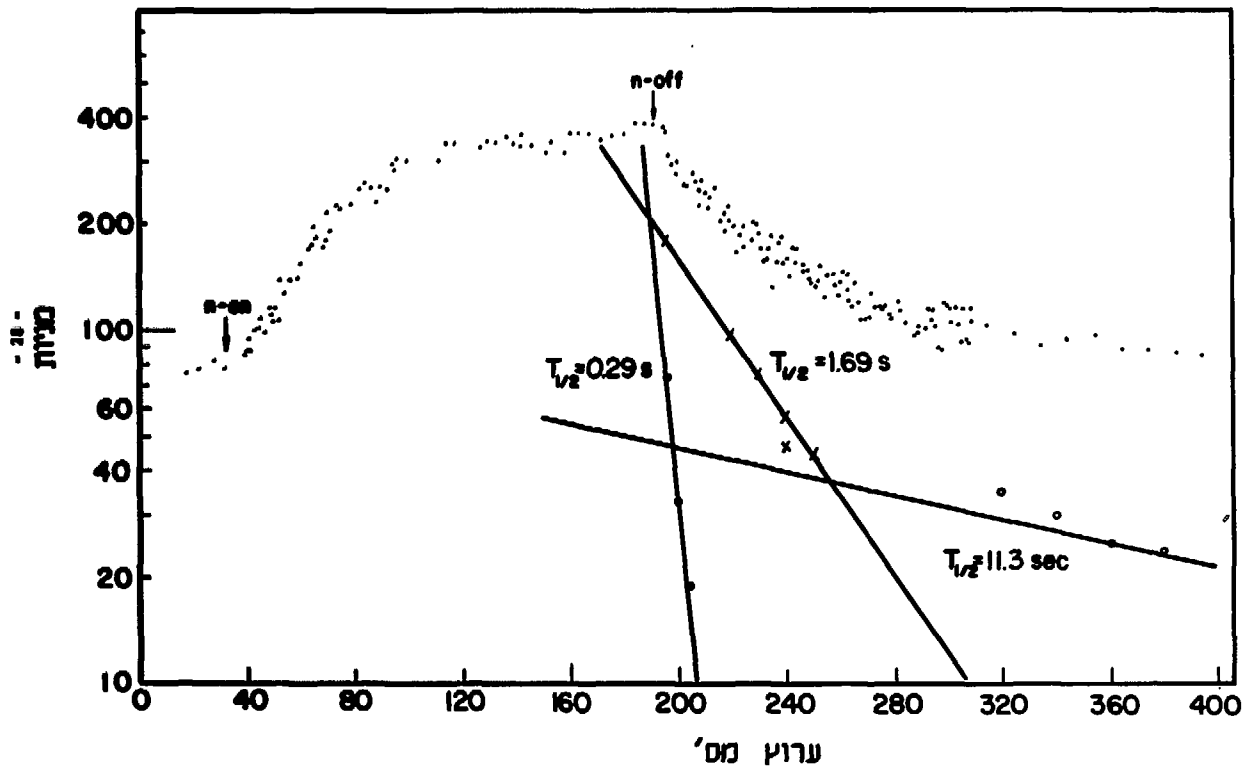


ציור מס' 8 - ספקטרום גמא במסה 93.
I - נמדד בסוף התקרנה.
II - נמדד 12 שניות לאחר תום התקרנה.
III - נמדד 24 שניות לאחר סוף התקרנה.

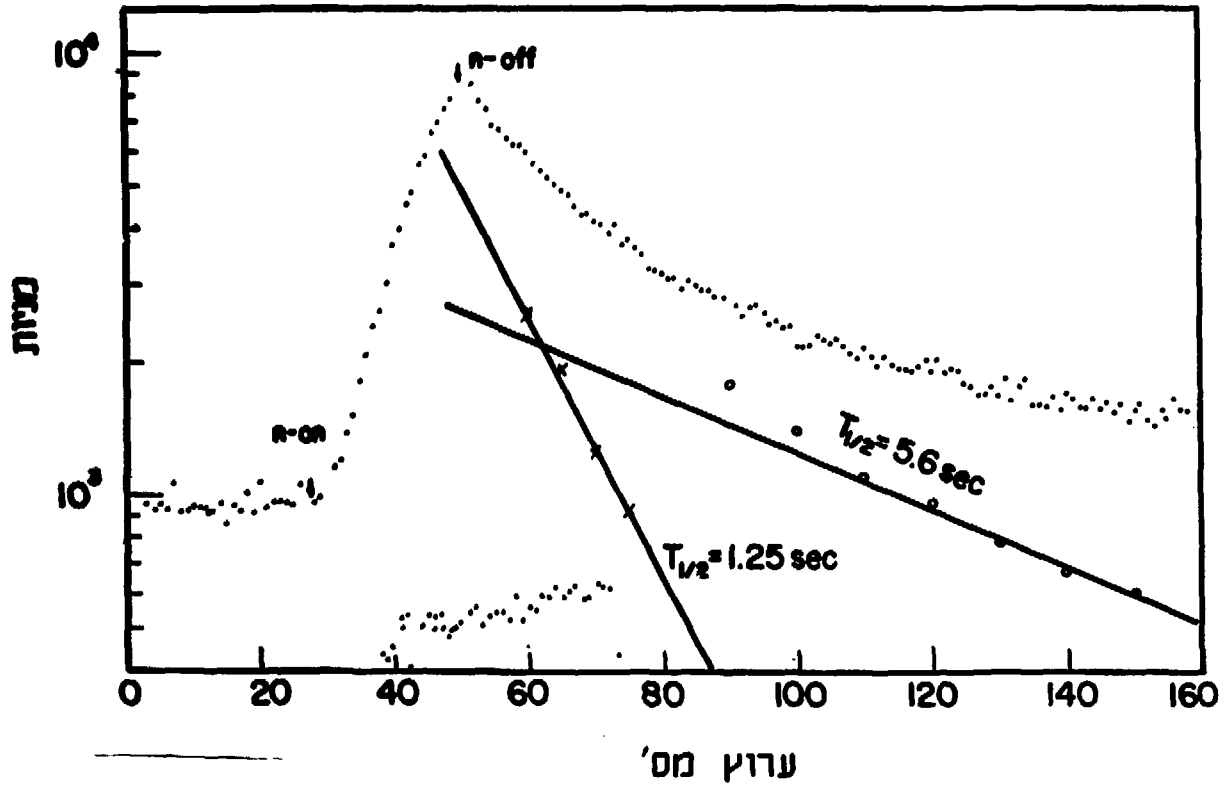


MASS 94

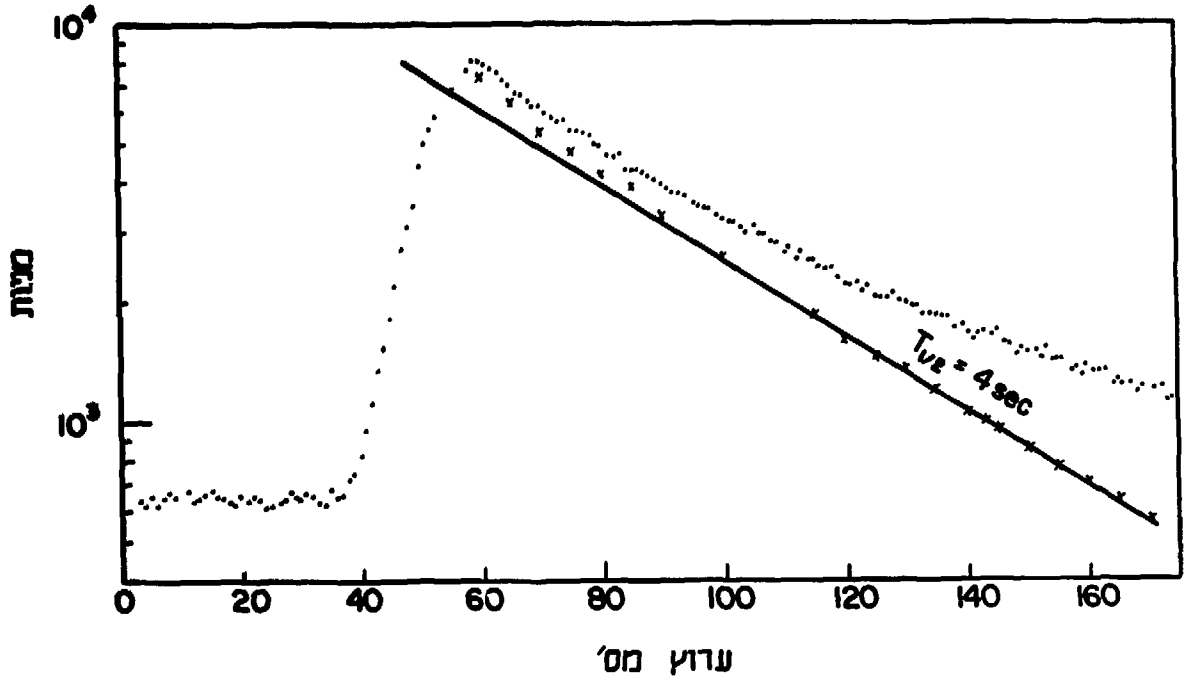
צירוף מס' 9 - קצאת דעיכת β של מסה 94.



צילור מס' 10 - עקומת דעיכת β של מסה 143.



צילום מס' 11 - עקומת דעיכת n של מסה 93.



ציור מס' 12 - עקומת דעיכה של מסה ל

שכלה מטי 3 - מסכמת את מהציות המייע שנהדרו ו/או אושרו על ידינו .
1 מדידות בייקו רצוף" של מהציות המייע של איזוטופים קלים יותר מחסה 99 ו-143 נמנו בכל המקרים המאמה טובה למרטופים קודמים, מרט לרובידיום 90, המתקבל כמזאמא מדעיכה הקריפטון . טעקומת מדעיכה של מרובידיום לא ניתן ללמדו על קיומ שני איזוטופים אשר נגללו במסרדה ישירה של רובידיום מבקוע . מהצית המייע שנהדרה על ידינו , 0.1 ו 3 דקות , קרובה יותר לוו של מאיזומר בעל מהצית המייע הקצרה שלרובידיום 90 (154±3 שניות) ומכאן ניתן ללמדו כי הקריפטון דועך בעקר לאיזומר זה . מתוך הממרט בין מהציות המייע של רובידיום שנהדרו ישירות ומתוך דעיכה קריפטון ניתן למחירך כי הגבול העליון של אכלוס מאיזומר בעל מהצית המייע המרוכה עיי דעיכה קריפטון הוא כ- 1/3 . הערכה זאת מתאימה למדידות אמרום (55) מהציות המייע המרוכות יותר מאשר כ- 3 דקות נמדדו שלא בייקו רצוף" , במוני גז פרופוציונייס . היונים המופרדים "מושתלים" במוך מרט אלומניום דק המחובר לסרגל שאפשר להחדירו לקולקטור מבלי להפסיק את עבודה המפרד . במום ההקרנה , מוציאים את המרגל מחלקים את מרט האלומניום לפי מיקומן של המסות המופרדות ומודדים כל מטה במפרד במונה ביתא . בכל מקרה נבדק נקיון האלומה והוערך שער הזהום עיי המסות השכנות .

3.3 מדידת יבולי בקוע

השואת הפעילויות של האיזוטופים השונים שהופרדו בתנאי הפעלה דומים של המפרד , מאפשרת לקבוע את יחסי היבולים של אותם האיזוטופים . קביעה זאת אינה מדויקת כיון שגם בתנאי הפעלה דומים קיימות תנודות בפעילות הדוגמאות המופרדות בשעור המגיע לכדי $\pm 20\%$ הנובעות בעיקר מתנודות בעצמת הזרם של אלומת היונים . כתוצאה מזה השגיאה בחשוב יבולי הבקוע היא גדולה .

דיוק טוב יותר אפשר להשיג בחשוב היבולים מתוך "עקומת הבניה" (גדול הפעילות כפונקציה של זמן ההקרנה) בהנחה שפונקציה המטי ר ידועה והאלומה נשארת יציבה במשך כל מתזור ההקרנה . במקרה זה ניתן לחשב את היבול הראשוני של האיזוטופ המופרד , יחסית ליבול המצטבר של הקודמים לו בשרשרת הדעיכה . שיטת החשוב מווארת בנספח. מטי 1 .

טבלה מס' 3 - מחציות החיים של גזים אצילים ותוצרי הדעיכה שלהם, במסמך 93, 94, 141 ו-143

מחצית חיים (שניות)

איזוטופ	עבודה זאת	מדיווח קודמות ישירות	קביעות קודמות בלתי ישירות
^{95}Kr	1.2 ± 0.1	1.19 ± 0.05^{72}	1.17 ± 0.04^{73}
^{93}Rb	5.8 ± 0.1	1.289 ± 0.012^{55}	5.1 ± 0.3^{74}
		5.86 ± 0.13^{55}	
		5.89 ± 0.04^{50}	
		5.6 ± 0.05^{72}	
^{94}Kr	0.20 ± 0.01		$\leq 1^{73}$
		2.8 ± 0.1	2.9 ± 0.3^{75}
^{94}Rb	2.8 ± 0.1	2.67 ± 0.04^{50}	
^{141}Xe	1.81 ± 0.1	1.720 ± 0.013^{55}	1.7 ± 0.05^{73}
		1.8 ± 0.2^{76}	
^{143}Xe	0.30 ± 0.03		0.96 ± 0.02^{73}
			1.1 ± 0.3^{73}
^{143}Cs	1.7 ± 0.1	1.69 ± 0.13^{77}	2.0 ± 0.4^{78}

טבלה מס' 4 - מטכמת את יכולי הבקוע של האיזוטופים הקלים של קריפטון וקסנון, אשר חושבו מתוך "עקומות הבניה", ההתאמה עם תוצאות נסיוניות אחרות היא בדרך כלל טובה, פרט לשרשרת 137, בה יכול הקסנון כפי שחושב מתוך עקומת הבניה, בהחשב בפונקציית המעבר, נמוך בצורה בולטת בהשוואה למדידות אחרות.

טבלה מס' 5 וציורים מס' 13 ו-14, מטכמים את התפלגות היבולים של האיזוטופים של קריפטון וקסנון בבקוע של אורניום 235 ע"י נויטרונים איטיים, כפי שהתקבלו בעבודה זאת, ע"י השוואת הפעילויות של האיזוטופים המפורדים שנמדדו בתנאי הקרנה דומים.

3.4 הערכת דיוק המדידה

מדידת ספקטרום גמא ומחציות חיים מושפעת במידה מועטת בלבד מזהומים ע"י מסות שכבות בשעור של אחוזים מספר, ומתנודות בעצמת האלומה. ברוב המקרים, מחציות החיים של האיזוטופים הנמדדים, שונות במידה מספקת זו מזו שאפשר יהיה לקבוע מחצית חיים מדויקה גם במקרה של זהומים קלים. המקרה הקשה ביותר הוא השרשרות 142-143 כיון שמחציות החיים של ^{143}Cs ו- ^{142}Cs קרובות מאוד. (1.7 שני ו-1.68 שני' בהתאמה) כיון שיכול הבקוע של ^{142}Xe גבוה מזה של ^{143}Xe ויעילות האסוף שלו גבוהה בהרבה מזו של ^{143}Xe , בגלל התפלגות זמני המעבר, זהו קל של מסה 142 ב-143 משנה במדה נכרת את יחסי הפעילות קסנון-צסיום ביחס למחושב בהנחה של דעיכת אם לבת. (נספח 2) ואמנם במסה 143 התקבלה אי התאמה בולטת בין היחס המדוד למחושב של פעילות קסנון-צסיום. כאשר הפעילות המתאימה למחצית החיים של צסיום גבוהה ב-70%-100 מהמחושבת לפי פעילות הקסנון.

יכול קסנון 142 גבוה פי 3 מזה של קסנון 143 (טבלה 5) ויעילות האסוף שלו טובה פי 7 (זמן מעבר) לפירך זהו של 1% של מסה 142 בתוך 143 יתבטא בעליה של 21% של פעילות המתאימה למחצית החיים של צסיום 143. לפיכך אי התאמה של 70% בין פעילות צסיום וקסנון, עשויה לנבוע מזהוים של 4% של מסה 142 בתוך 143. זהוים שלכ-5% בין מסות שכבות בקסנון הוא סביר, ונמצא גם באיזוטופים

טבלה מס' 4 - יבולי בקרע של קריפטון וקסנון מחושבים מחוך עקומת הגדרול של פעילות ביחס כפונקציה של זמן ההקרנה.

מדידת קודמרה		יבול מצטבר של הלוגן %	יבול ראשוני של גז אציל %	יחס יבולים * הלוגן-גז אציל	יבול שרשרת %	איזוטופ
הלוגן	גז אציל					
2.0 ± 0.22 (39)	0.36 ± 0.03 (49) 0.51 ± 0.06 (39)	$1.96^{+0.01}_{-0.06}$	$0.507^{+0.06}_{-0.01}$	$3.87^{+0.1}_{-0.5}$	2.55 ± 0.07	87_{Kr}
1.86 ± 0.44 (51)	1.32 ± 0.1 (49) 1.66 ± 0.11 (39)	$2.40^{+0.22}_{-0.23}$	$1.16^{+0.22}_{-0.16}$	2.07 ± 0.5	3.62 ± 0.07	88_{Kr}
2.52 ± 0.4 (52) 1.07 ± 0.11 (39)	3.26 ± 0.19 (49) 3.41 ± 0.15 (39)	1.17 ± 0.5	3.40 ± 0.5	-	4.80 ± 0.10	89_{Kr}
1.81 ± 0.4 (51)	$2.97^{+0.4}_{-0.32}$ (49)	$4.66^{+0.16}_{-0.24}$	$1.73^{+0.24}_{-0.16}$	$2.7^{+0.2}_{-0.5}$	6.26 ± 0.16	137_{Xe}
0.64 ± 0.17 (51)	$0.05^{+0.62}_{-0.50}$ (49)	$1.06^{+0.16}_{-0.28}$	$0.39^{+0.25}_{-0.16}$	0.196 ± 0.05	6.80 ± 0.17	138_{Xe}
0.47 ± 0.25 (51)	$0.16^{+0.5}_{-0.4}$ (49)	0.44 ± 0.03	4.67 ± 0.03	0.094 ± 0.02	6.5 ± 0.12	139_{Xe}

* יחס בין יבול מצטבר של ההלוגן ליבול ראשוני של הגז האציל.

טבלה מס' 5 - יבולי בקוע יחסיים במדידה בקו רצוף

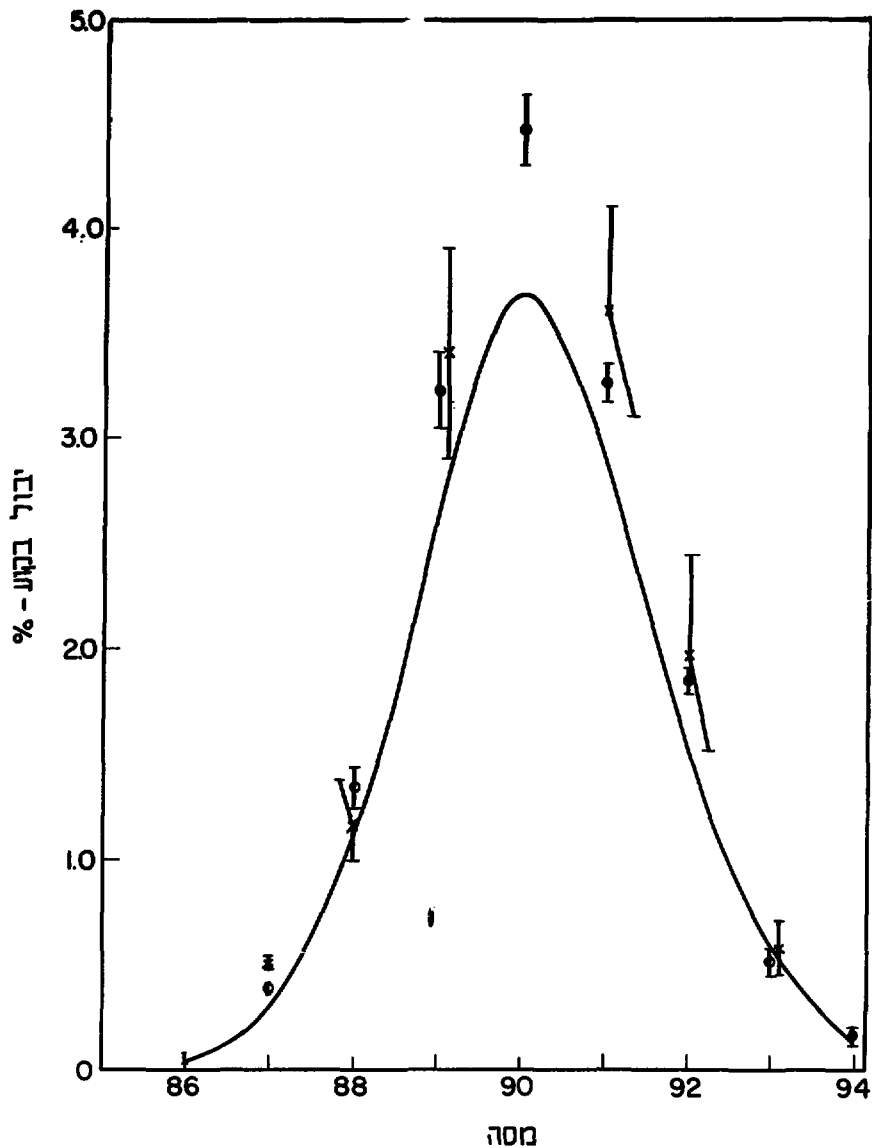
א) יבולים ראשוניים של קריפטון

יבול הבקוע מפרסום (26) %	יבול בקוע %	יבול יחסי למסה 91	מסה
4.43±0.26	4.46±0.26 ^z	1.24±0.09	90
3.26±0.16	3.6±0.5	1.0	91
1.85±0.07	1.98±0.46	0.55±0.05	92
0.51±0.07	0.58±0.15	0.16±0.015	95

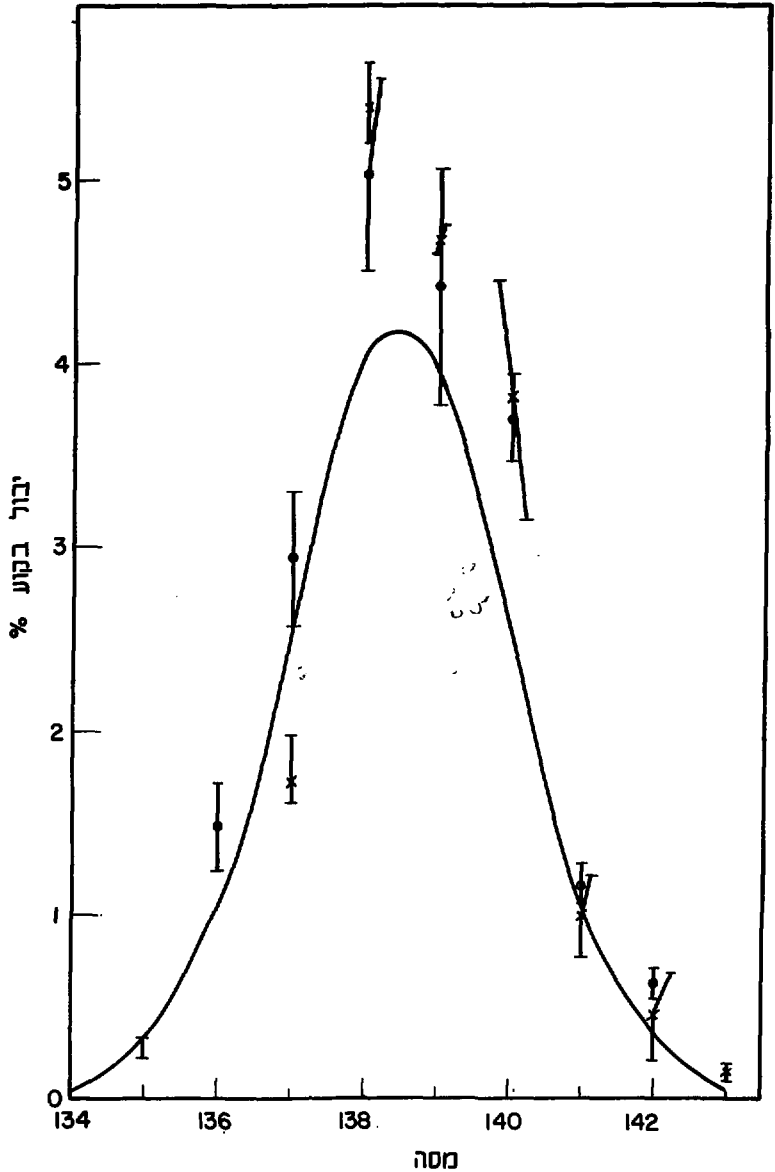
* הערך נלקח מפרסום קודם²⁶⁾, לצורך נרמול

ב) יבולים ראשוניים של קסניון

יבול הבקוע מפרסום (26) %	יבול בקוע	יבול יחסי למסה 139	מסה
4.43±0.71	4.68±0.08	1.00	139
3.7±0.30	3.80±0.65	0.81±0.12	140
1.16±0.13	0.99±0.22	0.21±0.04	141
0.63±0.10	0.44±0.24	0.09±0.05	143
0.05±0.01	0.14±0.05	0.03±0.01	143



צ'ור מסי 13 - יבולי בקע של איזוטומים של קריפטון בהשוואה להתפלגות נורמלית
(קו רגוף) O - פרסום 26, X - התקבל בעבודה זו.



צירוף מס' 14 - יבולי בקוע של איזוטופים של קטגור בהשוואה לתחלופות נורמליות
(קו רגוף) 0 - פרסום 26, X - החקבל בעבודה זו.

בזמנו הועלתה הסכרת של קיום איזומר נוסף של קטנון. בעל מוציאת חיים קרובה יותר לזו של הצטיוס⁽⁴⁸⁾, אולם מדידות נוספות הצביעו על התאמה דיי טובה בין פעילות הנריס 143 לזו של קטנון 143 ולפיכך יש לתניח כי מקור אי הומוג'ה של האיזילוריות היא זהום בין המסות בלבד. טבלה מס' 6 מסכמת את המדידות השונות של מסה 143.

כנגוד למדידת ספקטרום ומחציות החיים, הערכת היבולים בנסוע רגישה מאוד ליציבות האלומה וזהומים הדדיים, בעיקר אם היבולים פחושבים מתוך "עקומת הבניה". חשוב היחס בין היכול הראשוני של האיזוטופ המופרד לכין היכול המצטבר של האם הנשארת במטרה, מבוסס על ההנחות הבאות:-

א. אין בריחת "אמי" מהמטרה.

ב. אין זהום הדדי בין המסות.

ג. האלומה נשארת יציבה במשך כל מחזור ההקרנה.

שלושת התנאים הנ"ל נבדקו במגמה להעריך את ריוק התוצאות.

א. בריחת "אמי" מהמטרה נמדדה במסות יציבות 136 ו- 86 ונמצאה בסביבת 1% עבור יוד-136 וכ- 0.5% עבור ברומ 86. זהום זה עשוי לגרום לשגיאה של 10% בחישוב

היכול המצטבר של יוד-137 בקו רצוף, 100% ביוז 138 ו- 15% ביוז 139. מכאן שאין שיטת החשוב של יחסי היבולים בין הגז האציל לבין הקורמים לו בשורשה, מתוך

עקומת הבניה, מוואימה למסות 138 ו- 88. במקרים אלה חושב היחס מתוך פעילות¹³⁸ Cs

ו-⁸⁸ Kx שנמדדו במונה גז פרופוציוני לאחר הקרנות בזמנים שונים, בתנאי פעולה יציבים של המפרד. בוצעו הקרנות מספר והתכנסות התוצאות היתה טובה.

ב. זהום הדדי בין המסות בקטנון נמצא בסביבת 5%.

לזהום זה אין חשיבות במדידה בקו רצוף של מסה 137 מאחר שמחצית החיים של קטנון¹³⁸

ארוכה פי 3.5 מזן של¹³⁷ Xe לעומת זה במסה 138 יגרום זהום ע"י מסה 139 בשעור

של 5% לעליה בפעילות בשעור של 100% ובמסה 139 יגרום זהום דומה ע"י מסה 140

לעליה בפעילות בשעור של 15%.

טבלה מס' 6 - מסה 143 - מכרם מדידות בקר רצוף

מס' מחזוריים	זמן הקדנה שניות	מחצית זייס שניות	קצב הרוצרות אטומים/שניה מחזור	מחצית חיים שניות	קצב הרוצרות אטומים/שניה מחזור	מחצית חיים שניות	קצב הרוצרות אטומים/שניה מחזור	יחס קצב הרוצרות
		Xe	Ca	Ca	Ca	Ca	Ba/Cs/Xe	
450	3	0.3	1.62	1.69	2.5		- /1.54/1	
447	3	0.27	1.77	1.69	3.18		- /1.8/1	
460	10	0.3	3.08	1.54	5.06	11	1.1/1.64/1	3.39
300	4.5	0.3	3.05	1.6	7.28		- /2.39/1	
423	10	0.25	3.35	1.66	5.58	11.3	1.29/1.66/1	4.32
514	4.5	0.31	3.57	1.81	7.56		- /2.12/1	
300	4.5	0.33	7.37	2.0	25.0	13.3	0.97/3.38/1	7.14
430	3	0.27	14.98	1.65	28.66		- /1.9/1	

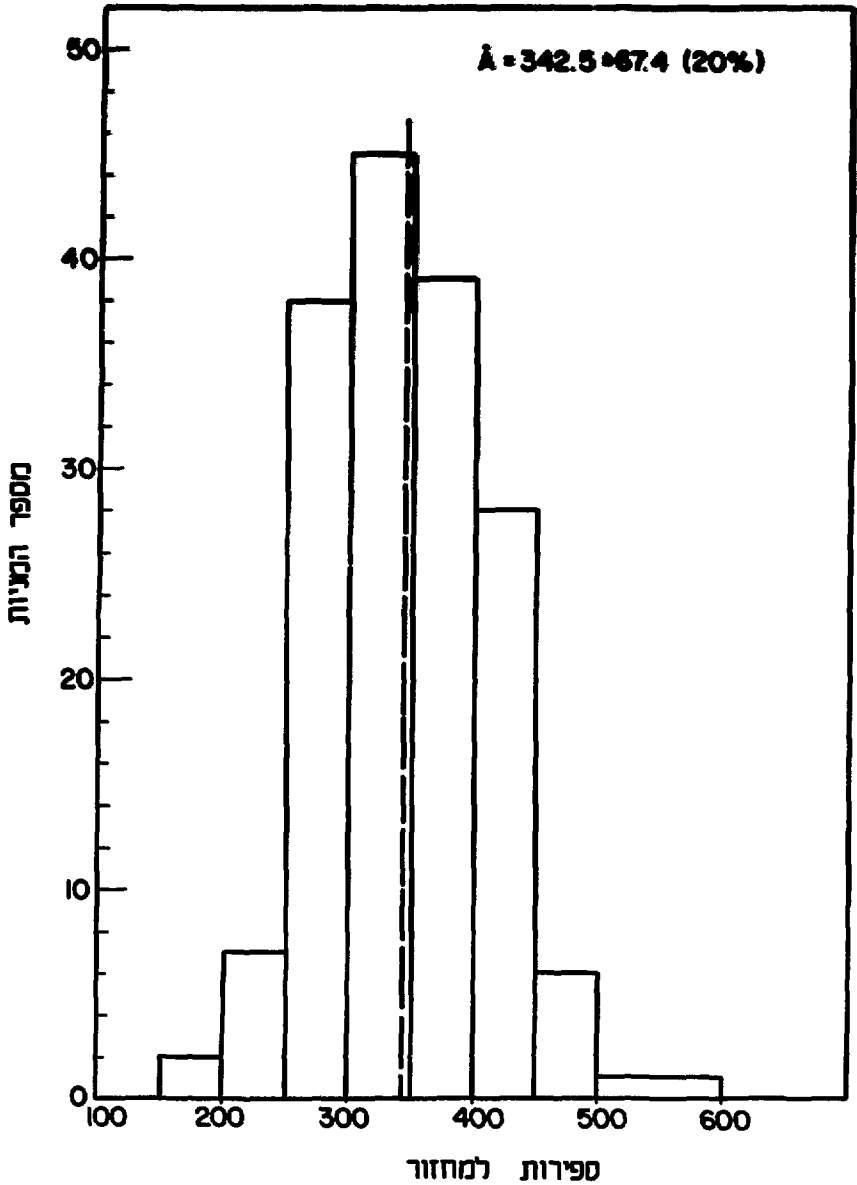
תזומת המדדי בין המסות בקריסטון נמצא בסביבת 34. אין לזכור זה השינוי במקרה של מסה 7 אולם זמזם של 10 של מסה 88 במוך 88 מעלה את פעילות ה- הנמדדת בקו רצוף בשעור של 55%. ואמנם, לא ניתן להטב את יחס היבולים בין הקריסטון (ראשוני) לבין מברום (מצטבר) במסג 88 מתוך עקומת הגדול. טבלה מס' 7 מסכמת את הדיוק שניתן להשיג בהטוב יחסי יבולים במסות השונות.

ג. אלוות היונים לא היחם לגמרי יציבה במשך זמן התקרנה, אולם בזכות רבני מחזורי התקרנה התנודות של האלוות יוטרז בצורת מספיק. רשום מספר התפרקויות שנמדדו מוך כדי הקרנה במספר רב של מחזורים, נותן התפלגות צרה שביב הממוצע עם שטית קטן של 20% ±. ציור מס' 15 מראה את התפלגות המניות שביב ערך המוצע, במסה 143. למרות האמור לעיל, נסיונות שבוצעו בהפרשי זמן גדולים זה מזה מראים על הבדלים גדולים מאוד בפעילות הסגולית, אשר נובעים הן משנויים בשטף הנויטרונים והן מתנאי הפעלה שונים של המפרד (לדוגמא טבלה מס' 6) לפיכך, לשם קביעת התפלגות היבולים הושוו רק מדידות אשר בוצעו באותם התנאים. בהשוואת היבולים הונחה יעילות מניה זהה עבור כל האיזוטופים. הנחה זאת נכונה כאשר g_2 נע בסביבת 4 מא"ו ומעלה. במקרה של אנרגית 8 נמוכה יותר, יעילות המניה של המונה הטלסקופי יורדת. מסיבה זאת רגישות מערכת המניה למסות 138 ו- 88 היחה קטנה יותר מאשר עבור איזוטופים אחרים, וכפי שכבר צוין לעיל, מסות אלה נמדדו במוני גז פרופורציוניים בעלי חלון דק, לאחר הקרנה בפרקי זמן ידועים.

טבלה מס' 7

האמצע זכרם הררי כיון המסומן על דיוק המישוב של יחסי זכרלים הלוגן/גז וציל
המדידה פעילות ביחמ בקו רצוף

<u>שביטת כתישוב היכול</u>	<u>שעור הוזהרם</u>	<u>גורם מזהרם</u>	<u>סה</u>
80% - כתישוב כרום מצטבר	1%	87 _{Zr}	87
אין אפשרות לחשב	1%	88 _{Zr}	88
עליה פעילות ג בשעור 55% לפי מחצית חיים של 3 דקות	1%	89 _{Kr}	88
40% - כתישוב כרום מצטבר	1%	89 _{Zr}	89
עליה פעילות ג בצעור 6% לפי מחצית חיים של 30 שניות	1%	90 _{Kr}	89
10% - כתישוב יור מצטבר	1%	137 _I	137
עליה של 1% בפעילות ג	1%	138 _{Xe}	137
אין אפשרות לחשב	1%	138 _I	138
עליה של 2% בפעילות ג, לפי מחצית חיים של 40 שניות	1%	139 _{Xe}	138
15% - כתישוב יור מצטבר	1%	139 _I	139
עליה של 1% בפעילות ג	1%	140 _{Xe}	139



4. גמות התוצאות

4.1 מידת ישירות של איזוטופים קצרי חיים

היתרון הגדול של המדידה ב"קו רצוף" ביחס לשיטות אפיון אחרות של תוצרי הבקוע, היא האפשרות לקבוע ישירות איזוטופים בעלי מחציות חיים קצרות עד כדי 0.1 שניה. בשיטות המדידה כימיות מהירות, אפשר רק לתעריך מחציות חיים קצרות ע"י בדיקת הפעילות של בה המופרדת בזמנים שונים לאחר סוף ההקרנה. ברם, כאשר מדובר במחציות חיים מסדר גודל של 0.1 שניה, אין השיטות הכימיות יעילות כלל, הן בגלל הקושי הנטיבני לדייק בזמני המדידה והן משום שקיים קשר בין מחצית החיים ליכול בקוע ואיזוטופים בעלי מחציות חיים קצרות מאוד נמצאים לרוב רחוק מאוד מקו היציבות והיכול שלהם בבקוע אינו משמעותי.

מידת ריטיבי בקוע הנרתעים ממטרה בקוע, בעזרת גלאי חלקיקים (33,34), מאפשרת אמנם להבחין באיזוטופים בעלי מחציות חיים קצרות מאוד, אולם מאידך אין הן מאפיינות חלקיקים אלה מבחינת מחצית חיים, משה ומטען מדויקים ורמות גרעיניות. הטוליס מאפשר המדידה תוצרי בקוע תוך כדי הקרנת המטרה של תחומר הבקיע (המדידה בקו-רצוף) ובשיטת המדידה זאת נמדדו לראשונה מחציות החיים של ^{94}Kr 0.20 ± 0.01 שניות ו- ^{143}Xe 0.3 ± 0.03 שניות (48) (טבלה 3) האיזוטופים אופיינו ע"י מדידה פעילות בתא כוללת, לאחר סיום הקרנה, ופרוק עקומת הדעיכה המתקבלת למרכיביה לפי קבועי דעיכה.

^{143}Xe ו- ^{94}Kr רחוקים מהמטה המסתבר ביותר והתפלגות האיזוטופים (^{138}Xe ו- ^{90}Kr)

ולפיכך יכולי הביקוע שלהם נמוכים. נוסף על כך, בגלל מחציות החיים הקצרות שלהם בהשוואה לזמני ההפרדה רק חלק קטן ממה שנוצר בביקוע מגיע לקולקטור (ב- ^{143}Xe כ- 8%). נתוח המרכיבים התורמים לפונקציית המעבר במערכת נסיונית המורכבת ממטרה אמנציה ומקור יונים העובד בלחצים נמוכים, מסוג מלשמטרוון, מצביע על כך כי זמן המעבר הוא בעיקר הזמן הנדרש לרקון המטרה וזרימה מהמטרה למקור היונים (79). לפיכך הורדה משמעותית של זמני המעבר קטורה בהקטנת נפח המטרה והצמדתה למקור

מיונים. מאידך גיטא, הקטנת המטרה מרובת מחות חומר בקיע ומחות הוצרי בקוע. מכאן שאפשרויות התמרון במגמת לשמר את סטטיסטיקת המדידה של ^{94}Kr ו- ^{143}Xe הן מוגבלות מאוד במערכת הנוכחית. מדידת ספקטרום גמא במסות 94 ו- 143 נמנה הוצאות מקורבות בלבד. (טבלה 2). בסטטיסטיקת המדידה נמוכת כמו במקרה של שתי המסות האלה, יש לרקע, אפילו אם הוא נמוך, חשיבות מכרעת ומסיבה זאת חשימים שאובחנו היו גבוהים בשעור של כ- 20% בלבד מעל לרקע ולא היה כל טעם לקבוע עוצמות יחסיות של שיאי הגמא האופייניים.

איזוטופים כבדים יותר מ- ^{94}Kr ו- ^{143}Xe לא אובחנו במדידה ישירה על

הפוליס ודבר זה היה למעשה צפוי לאור הסטטיסטיקה הגרועה במניח הפעילות של

^{94}Kr ו- ^{143}Xe . מאידך, מדידת כמות ארוכות חיים של Kr במוני גז פרוטורציוניים

ורקע נמוך (יעילות מניה של כ- 30% ורקע כ- 7 מניות לדקה) הצביעה על המצאות

^{95}Zr ($T_{1/2} = \text{limf}$) כלומר ^{95}Kr מגיע עדיין לקולקטור, אשר ל- ^{144}Xe לא ניתן

לברר אם הוא עוד מגיע לקולקטור כיון שתוצר הדעיכה שלו ^{144}Ce הוא בעל מחצית

חיים ארוכה מכדי יכולת מדידה באמצעים שעמדו לרשותנו ($T_{1/2} = 285$ יום)

בטיכום, ניתן לומר כי המדידות בקו רצוף של קריפטון וקסנון הנוצרים בבקוע,

הקיפו את כל האיזוטופים בעלי יכולת שמעוחי ומחציות חיים ארוכות מ- 0.2 שניות.

אפיון תוצרי בקוע רחוקים יותר מקו היציבות וקרוב לודאי בעלי מחציות חיים

קצרות יותר, דורש מערכת נטיבית שונה, בה פונקציית מעבר היא קצרה ביותר.

במדידות שבוצעו לאחרונה בעזרת מפרד איזוטופים לווהנגרין בגרנובל, צרפת (80,39)

המבוססות על מדידה ישירה של רחעים ממטרת בקוע מכלי שעברו תרמליזציה (אנרגיה של

כ- 90 מא"ו ומטען ממוצע +20) לא אופינו איזוטופים של קריפטון הכבדים מ- ^{94}Kr

למרות זה שלא היתה כאן כל בעיה של פונקציית מעבר. דבר זה מאשר את ההנחה כי

יבולי הבקוע של איזוטופים אלה נמוכים ביותר ואפיונם דורש מאמצים מיוחדים.

4.2 יבולי קריפטון וקסנון

חשוב יבולי בקוע מתוך מדידת פעילות ביתא של האיזוטופים המופרדים אינו

יכול להבטיח דיוק רב, וזאת מסיבות אחדות. ראשית - קשה להבטיח אלומת יונים

יציבה במשך שעות מספר, ועל אחת כמה וכמה - במשך ימים מספר. שנית - במדידת

ביתא איפיון האיזוטופים נעשה רק ע"י מחצית החיים ומסיבה זאת לא תמיד ניתן

להבאין בזמנם קל בין איזוטופים שכנים בעלי מחציות חיים קרובות, כמו למשל במקרה של המסות 142-143, דבר אשר גורם לטגיאת בחשוב יחסי היבולים. שליטי - פונקצית המעבר בעזרתה מתקנים את יבולי הבקוע הממוצעים, היא בעלת התפלגות רחבה (ציור 7) ולכן ככל שהחצית החיים של האיזוטום המורדר קטנה, כן התקון לזמן המעבר פחות מדויק. ורביעית - התנחת כי יעילות המניה זתה עבור כל האיזוטופים, טובה רק כאשר אנרגית בתיא של האיזוטום הנמדד היא גבוהה (כ- 4 מאיו), אולם כאשר אנרגית בתיא קטנה, גם יעילות המניה קטנה (מחציות חיים ארוכות יותר).

בעבודה זתה, יבולי הבקוע חושבו מתוך פעילות בתיא יחסית של האיזוטופים המופרדים ונרמול ביחס ליבול של אחר האיזוטופים הקלים יותר, אשר נלקח מהספרות (^{90}Kr) או חושב מתוך עקומת הגדול (^{139}Xe).

עיי אסוף בו זמני של כל שורת האיזוטופים הנוצרים בבקוע ומדידתם לאחר מכן במוני גז פרופורציוניים (49) ניתן להקטין את השגיאות הנובעות מאי יציבות האלומה, זהום הדדי בין המסות ויעילות המניה. מאידך בשיטה זתה לא מקבלים שום אינפורמציה בקשר לפונקצית המעבר, אותה מוכרחים לחשב מתוך מדידות בקו רצוף. עבור איזוטופים קצרי חיים התקון לזמני המעבר הוא התקון המשמעותי ביותר, כפי שמפורט בטבלה מס' 8, ולכן למרות מגבלותיה, המדידה בקו רצוף עדיפה על מדידה במונים פרופורציוניים, אם כי במקרים אחדים (^{138}Xe , ^{88}Kr) הכרחי שלוב בין

השיטות. טבלה מס' 8 - מקדמי תקון בחשוב יבולים בבקוע.

143	142	141	140	ההפרעה
$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	אי יציבות האלומה
5%	5%	5%	5%	זהום בין המסות
12.7	1.97	1.55	1.06	זמן מעבר

באיזוטופים בהם ההלוגן הנשאר במטרה תורם תרומה משמעותית ליבול השרשרת, חושב היבול הראשוני של הגז האציל והיבול המצטבר של ההלוגן עיי נתוח עקומת הגדול, תוך החחשוב בפונקצית המעבר, בעזרת תכנית ON-LINE (נטפח מס' 1)

התגבלות של שיטת הסוב זאת נדונו כבר במרק דון באשוב השגיאות ושוכחו בטבלה מס' 7. בגלל אפיה של המכרחה הנטיבית, דהיינו זהום הדדי בין המטות בקטנון בטעור של כ- 5% ופליטת יוד בטעור של כ- 1%, לא הייתה כל השמעות לנתוח עקומת הגדול של ^{138}Xe ו- ^{88}Kr אשר התקבלו בקו רצוף. במקרים אלה נבנתה עקומת גדול "מאוחרת" מתוך מדידות פעילות בימא של ^{138}Cs ו- ^{88}Kr במוני גז פרופורציוניים, כאשר זמני התקרבה של הדוגמאות הנמדדות השתנו בהדרגה. בצורה זאת ניתן לתפריד בין פעילות בימא של המסה המופרדת לבין זאת של המטות השכנות ע"י הפרדת עקומת הדעיכה למרכיביה לפי מחציות החיים ופליטת ההלוגנים קצרי החיים השפיעה על התוצאות לפי ערכה הממטי, כלומר כ- 1%.

יבולי הבקוע שנמדדו בעבודה זאת, מסוכמים בטבלאות מס' 4 - נתוח עקומת הבניה הוך התחשבות בתרומת האס במטרה ומס' 5 - יבולים יחסיים של עשרות מטה. התקבלה התאמה טובה בין תוצאות אלה לבין התוצאות של ארנברג (49) אשר אסף בו זמנית את כל המטות המופררות ומדד את פעילויות הכיחא במונים פרופורציוניים, וכן לתוצאות שהתקבלו לאחרונה במפרד המטות בלוהנגרין (39). רק במקרה של ^{137}Xe התקבלה סטיה משמעותית מהתוצאות של ארנברג וכן מהסיסטמטיקה של התפלגות היבולים בבקוע, כפי שנקבעה על ידינו (25,26).

נתוח עקומת הגדול של מטה 137 נתן יחס יבולים של $2.7 \pm 0.2 / 0.5$ בין היוד המצטבר לבין הקטנון הראשוני, (מתוקן לפליטת נויטרונים מושהים ולזמן מעבר) בעור שהיחס הצפוי הוא 1.0 ± 0.29 (26). לפי חסובי השגיאות, ההפרעות הצפויות בנתוח עקומת הגדול של מטה 137 הן הקטנות ביותר ופליטת יוד מהמטרה מתבטאת בהקטנת היבול המחושב של היוד ולא להפך. מאחר שהתוצאה נראית חריגה, חזרנו על המדידות של עקומת הגדול ע"י מדידת הגמא האפינית של ^{137}Xe (455 KeV) אולם גם במקרה זה התקבלה התאמה טובה למדידות של בימא.

יבול הבקוע הנמוך של ^{137}Xe פרושו יבול מצטבר גבוה של ^{137}I -4.66%. מאחר שיוד פולט נויטרונים מושהים בקבוצה השניה בה התורמים העקריים הם ^{88}Br ו- ^{137}I , ניתן לבדוק את טבירות התוצאה לפי מאזן הנויטרונים המושהים, היות ויבול

הנויטרונים המושהים של הקבוצה השנייה ידוע היטב ותוא 1.8 ± 0.8 ⁸¹⁾ נויטרונים ל- 10^4 בקועים. תוצאות החשוב מסוכמות בטבלה מס' 9.

טבלה מס' 9 - יבול נויטרונים מושהים בקבוצה השנייה.

איזוטופ	יבול בקוע (טבלה 4)	P_n ⁸²⁾ %	נויטרונים בקועים 10^4	P_n ⁸³⁾ %	נויטרונים בקועים 10^4
88 זר	2.4 ± 0.2	5.5 ± 0.74	13.2 ± 2.9	-	13.2 ± 2.9
137 I	4.66 ± 0.2	6.65 ± 1.17	31 ± 6.8	6.1 ± 0.8	28.4 ± 4.95
סה"כ			<u>44.2 ± 7.4</u>		<u>41.6 ± 5.7</u>

היות ויבול הנויטרונים המושהים המבוטס על היבול הגבוה של יוד-137, גבוה בשעור של כ- 20% מהיבול המדוד של הקבוצה ברור כי התוצאה המחושבת עבור יבול יוד-137, מהוך עקומת הגדול, גבוהה מדי. אמנם הערכת שגיאות המבוטסות על נתונים פיסיקליים של האיזוטופים הסמוכים, נותנת את השגיאה הקטנה ביותר דוקא למטה 137, קיימת עדיין אפשרות לקבלת שגיאה גדולה מאוד הנובעת מהתעצמות זרם אלומת היונים תוך כדי הקרנה. בחשוב אנליטי התעצמות מסוג זה יכולה להתפרש כשות ערך לדעיכת היוד במטרה, בעיקר אם קצב הגדול דומה למחצית החיים של היוד. במקרה זה גדול של 5% בעצמת האלומה מהבטא בגדול היחס יוד/קסנון בשעור של 50%, מכאן שהיחס הגבוה בין יוד לקסנון יכול להתפרש גם כגדול של כ- 15% בעצמת האלומה, בקצב הקרוב למחצית החיים של ¹³⁷I. גדול מסוג זה אפשרי במערכת כמו הסוליס בה זרם האלומה לא היה מיוצב מבחינת העצמה. מאידך, חשובי פונקצית המעבר היו מבוטסות על הקרנות קצרות ולא ניתן לגלות בעזרתם גדול איטי בעצמה. נוסף על כך, הפעילות הסגולית של מסה 137 היתה גבוהה מאד ועקומת הגדול נקבעה ע"י מספר קטן של מחזורי הקרנה (8-5 מחזורים) ולכן אי יציבות האלומה במחזור או שנים עשויה לשבט את כל החשובים (בעקר כאשר מדובר בשנויים קטנים בורט) בעוד שבמקרים בהם אוגרים מספר רב של מחזורי הקרנה, אי יציבות במחזור או שנים אינה מתבטאת כלל בתוצאות החשוב. מסקנה מן האמור לעיל היא כי על מנת לקבל תוצאות

ההימנות של יבולי בקוע ממערכת נסיונית כמו הטוליס, יש ללוות כל מחזור קצונה ברשום של זרם האלומה, דבר אשר לא נעשה בעבודה שלנו.

4.3 יבולי הבקוע של קריפטון וקסנון בחשואה להתפלגות ה"נורמלית"

המונח התפלגות "נורמלית" מתייחס להנחה הסטטיסטית של Wahl (21) לפיה

יבולי האיזוטופים בכל שרשראות המטה מתארים גאוסיאן בעל רוחב קבוע של

0.56 ± 0.06 יחידות מטען. מרכז הגאוסיאן או המטען המסתבר ביוצר Z_p , נקבע

מתוך הנחה שקיימת סטיה קבועה בין צפיפות המטען של רסיסי הבקוע לזו של הגרעין המתבקע כאשר צפיפות המטען ברסיסי הבקוע הקלים גבוהה מזו של הכבדים.

($Z_p = Z_{UCD} \pm 0.45$) כאשר Z_{UCD} , צפיפות המטען של הגרעין המתבקע) יבולי הבקוע של

קריפטון וקסנון, כפי שנמדדו בעבודה זו (טבלאות 4 ו-5), גבוהים בצורה

בולטת מאלה המחושבים על סמך ההתפלגות הנורמלית. ציורים 13 ו-14 מתארים את תוצאות המדידה ביחס להתפלגות הנורמלית.

מתוך ההנחה של התפלגות "נורמלית" של היבולים בבקוע של גרעין בעל מספר

זוגי של פרוטונים ונויטרונים כמו ^{236}U משתמע כי בזמן הבקוע אין כל משמעות

לכוחות הזווג בין הנוקלאונים ולפיכך רסיסי בקוע עם מספרים זוגיים ובלתי

זוגיים של פרוטונים ונויטרונים נוצרים באותה מידה של סבירות. יבולי הבקוע

של קריפטון וקסנון, שהם יסודות בעלי מספר זוגי של פרוטונים מצביעים על סטיה עקבית מההתפלגות הנורמלית, תוך שמירה על צורתה הכללית של התפלגות זו. מאידך,

בעבודה מקבילה, בה נמדדו יבולי הבקוע של Cs ו-Rb, יסודות בעלי מספר בלתי

זוגי של פרוטונים, נמצאה ירידה עקבית של היבולים ביחס למחושב לפי ההתפלגות הנורמלית (84). בשני המקרים מדובר ביסודות המהווים מעל ל-10% מכלל תוצרי

הבקוע ואפשר למדוד את יבולי הבקוע שלהם בדיוק סביר. תוצאות המדידות מצביעות

כי למעשה ההנחה של פלוג נורמלי אינה מדויקת והיא מהווה מין ממוצע של כלל

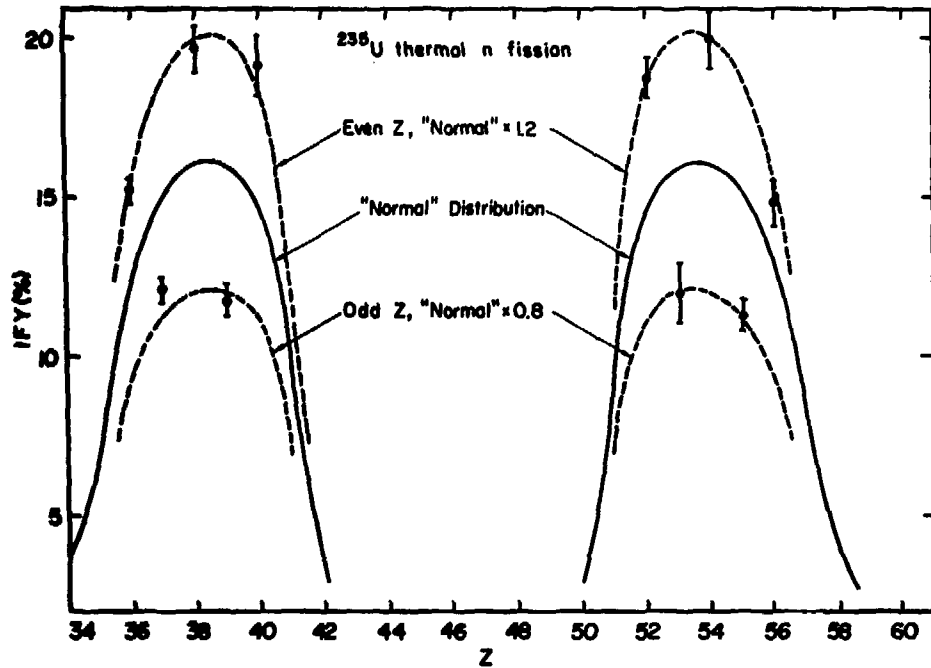
תוצרי בקוע, אולם ניתן למצוא קורלציות נפרדות עבור תוצרי בקוע זוגיים ואי

זוגיים. בעקבות ממצאים אלה נבדקו יבולי הבקוע של איזוטופים שונים, שנקבעו

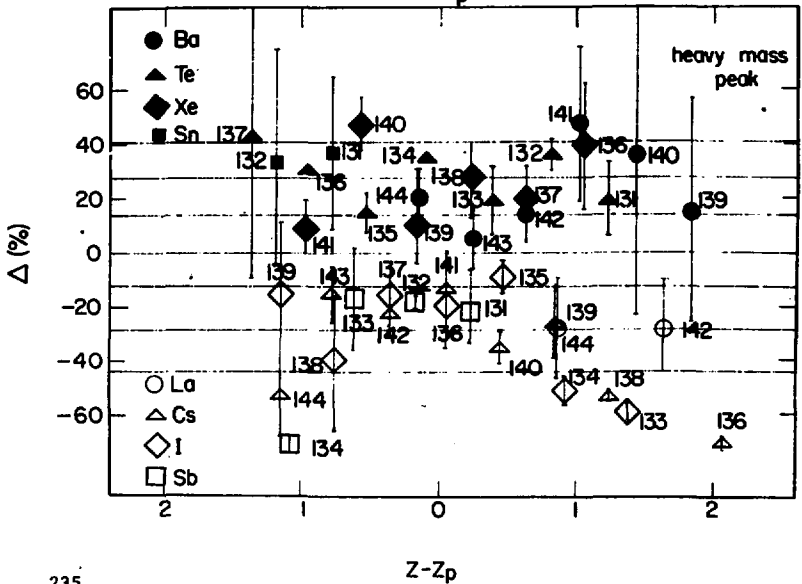
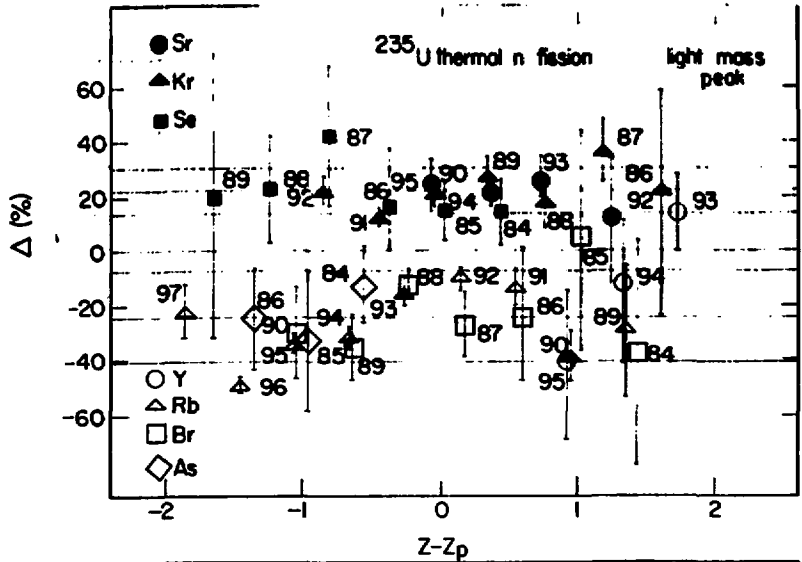
בשיטות שונות והושוו עם ההתפלגות הנורמלית (25). מסקנת הסקר היתה כי הסטיה

ההתפלגות נורמלית שנמדדה עבור הגזים האציליים והמתכות האלקליות אופיינית לכלל תוצרי הבקוע וערכה במקרה של בקוע U^{235} ע"י נויטרונים תרמיים הוא $\pm 22(\pm 7)\%$ ציור מס' 16 מראה את יכולי היסודות השונים בבקוע תרמי של אורניום-235, לעומת היבולים המחושבים לפי ההתפלגות הנורמלית. במקום עקומה אחת המיצגת את התפלגות היבולים של כל היסודות קיימות בפרוש שתי עקומות - אחת מתארת את התפלגות היבולים בעלי מספר זוגי של פרוטונים, והשניה מותאמת ליסודות בעלי מספר בלתי זוגי של פרוטונים. ציור מס' 17 מציג את הסטיה של תוצרי בקוע בודדים מההתפלגות הנורמלית, כפונקציה של הפרמטר $2p-2$. גם במקרה של תוצרי בקוע בודדים בולטת ההתפלגות העקבית בין תוצרים בעלי מספר זוגי של פרוטונים לבין אלה בעלי מספר בלתי זוגי של פרוטונים כשמספר החריגים הוא קטן, כמו כן לא נראית כל מגטה של שנוי הסטיה הממוצעת כאשר מתרחקים ממרכז הגאוסיאן $2p$, בתחום ± 2 יחידות מסען. הסטיה בין היבול הראשוני המדוד לבין זה המחושב על בסיס ההתפלגות הנורמלית, יקרא להלן - אפקט זוג פרט.

קיום אפקט זוג פרט ביבולים של רסיטי בקוע בעלי אנרגיה קינטית הגבוהה מהממוצע צוין לראשונה בעבודתם של תומס וונדנבוש⁽⁸⁵⁾ ואוטר לאחר מכן במדידותיהם של קונצני וקבוצתו^(36,37) ורייסדורף וקבוצתו.⁽⁸⁶⁾ ווהל⁽²⁰⁾ ציין איכותית את קיום האפקט גם כאשר מדובר ביבולי בקוע באנרגיה קינטית ממוצעת, אולם טפול כמותי מקיף ניתן לתופעה רק בעבודתנו⁽²⁵⁾, המצורפת לטכום זה. בעבודה מאוחרת יותר⁽²⁶⁾ נבדק אפקט זוג פרט גם לגבי תוצרי בקוע של U^{233} ע"י נויטרונים תרמיים והערך הממוצע שהתקבל היה קרוב מאוד לממוצע שהתקבל עבור U^{235} , דהיינו $\pm 21(\pm 7.5)\%$ בדיקה ראשונית של יכולי בקוע של אורניום 235 המושרה ע"י נויטרונים מהירים (ספקטרום בקוע), הראתה כי האפקט קטן בצורה ניכרת - תופעה שניתן לייחס לאנרגית ערוך גבוהה יותר בנקורת האוכף. גם פרסום זה מצורף לעבודת טכום זאת. במדידות יכולים של תוצרי בקוע שבוצעו בעזרת מפרד האיזוטופים לונהגרין⁽³⁹⁾ התקבלה התאמה מצוינת בין אפקט זוג פרט שחושב ממדידה ישירה של כל האיזוטופים לבין האפקט הממוצע שחושב על ידינו ממדידות רדיוכימיות שונות^(25,26). למעשה ניתן לראות באפקט זוג פרט השתמרות חלקית של זוגות הפרוטונים תוך כדי תהליך



ציור מס' 16 - יבולי היסודות בנקוע של ^{235}U ע"י נויטרונים תרמיים, בתשואה להתפלגות נורמלית.



ציר מס' 17 - אפקט זוג-פרט ביבולי בקוע של איזוטופים בודדים, בבקוע ^{235}U ניטרונים תרמיים.

הבקוע. מבחינת התפלגות היבולים, אפקט זה בולט יותר מאפקט הקלמה הסגורה, דהיינו - לתוצרי בקוע ווגייט, עם קלמה סגורה, אפקט זוג פרט גבוה מתמווצע אולם אינו מריג.

דיון מורחב יותר המוקדש להשפעות אפקט זוג פרט בגרעינים שונים כפונקציה של אנרגיית הערור באוכף מוכן לאחרונה לפרטום (87) ומצורף לשכום זה.

באפקט "זוג פרט" אנו רואים השתפרות של זוגות נוקלאונים מוך כדי תהליך הבקוע. בגלל פליטת נויטרונים עיי רשימי הבקוע בזמנים קצרים עד כדי כך שאינם מאפשרים מדידות ישירות של יכולי הרשימים, אובחן האפקט לגבי פרוטונים בלבד. הנטינות להטב אפקט זוג פרט בנויטרונים מתוך מדידות היבולים של תוצרי הבקוע (86) אינם משכנעים, אם כי האפקט צריך להיות קיים על סמך אותם השקולים המטבירים אם קיום האפקט בפרוטונים. בהנחת קיום אפקט זוג פרט בנויטרונים הוצע לאחרונה (87) דגם להתפלגות רשימי הבקוע (לפני פליטת נויטרונים מידיים), ובעזרתו חושבו יכולי המסות של רשימי הבקוע, וכן פליטת נויטרונים מרשימי הבקוע. העקמות הממוטבות הושגו עם מדידות נטיביות והתקבלה התאמה משביעת רצון.

5. סכום

סכום נוכח לומר כי חלק הנטיבני של עבודה זו מתייחס אל מחזורי הידע המתייחסים לאיזוטופים כבדים של קריפטון וקסנון ע"י הגדרת מחציות חיים של ^{94}Kr ו- ^{143}Xe . מוצאת המדידה שלנו המפתחו בלוחות איזוטופים (68)

1 - Nuclear Data Sheets (69)

המחלוקת יכולי הבקוע של האיזוטופים של קריפטון וקסנון הביאה לנמוח כמותי של אפקט דוג שרט (שמוד זוגות נוקלאונים בבקוע) ובדיקת הגורמים המשפיעים על גודלו של אפקט זה. עבודה זאת שוכמת בשני מאמרים (25,26) אשר עוררו עניין בין החוקרים במחוס הבקוע והם מצורפים לסכום זה ומתוירים חלק ממנו.

נספח ט"ז: 1

הנספח ממאר את דרך החישוב של היבולים הראשוניים בקצו, מאוך מדידת

פעילות של האיזוטופים המוסדרים.

הנחות היסוד הן:

1. רק הגזים האצילים עוזבים את מטרת האמנציה ואילו החלוגים דועכים במטרה

(למעשה כ- 10 של החלוגים נפלט מהמטרה, בעיקר בצורת הידרידים).

2. מחציות החיים של האיזוטופ המוסדר, ושל ת"הורה" ות"בנות" בשרשרת הדעיכה

הרדיואקטיבית, ידועות.

3. התפלגות זמני המעבר של מטרת האמנציה, ידועה.

נסמן: λ - מספר האטומים של החלוגן (ברום או יוד) במטרה.

λ_H - קבוע הדעיכה של החלוגן.

M_T - מספר האטומים של הגז האציל במטרה.

M_C - מספר האטומים של הגז האציל בקולקטור.

λ_A - קבוע הדעיכה של הגז האציל.

D - מספר האטומים של הבת בקולקטור.

λ_D - קבוע הדעיכה של הבת.

K_I - קצב ההוצרות של החלוגן בקבוע.

K_M - קצב ההוצרות של הגז האציל בביקוע.

$P(t)$ - הסתברות להגיע מהמטרה לקולקטור בזמן t אחרי הארוע.

η - יעילות מניה של הבת יחסית לזו של האם.

מספר האטומים של הגז האציל בקולקטור הנוצרים כתוצאה מדעיכת החלוגן במטרה,

בזמן t ואחרי תחילת ההקרנה, יהיה

$$(A1) \quad K_H \int_{t=0}^t [(1 - e^{-\lambda_H t}) \cdot \Delta t \cdot P(t-t) e^{-\lambda_M(t-t)}] = \alpha_{(t)} K_H$$

מספר האטומים של הגז האציל בקולקטור בזמן t אחרי תחילת ההקרנה, הנוצרים

יטירות בביצוע:

$$(A2) \quad K_H \sum_{t=0}^T e^{-\lambda t} (\tau-t) p(\tau-t) \Delta t = \beta_t(\tau) K_H$$

מספר המסופים של המב בקולקטור

$$(A3) \quad \sum_{t=0}^T (a_t(\tau) K_H + \beta_t(\tau) K_H) \lambda_H e^{-\lambda t} D^{(\tau-t)} \cdot \Delta t = \gamma \cdot K_H + \delta K_H$$

הפעילות הכוללת הנמדדת בזמן

$$(A4) \quad A(\tau) = K_H (a_t \lambda_H + \tau \lambda_D \cdot \eta) + K_H (\beta_t \lambda_H + \delta_t \lambda_D \eta) = X_t K_H + Y_t K_H$$

מרוון בשיטת הרבועים המינימליים בזמן

$$(A5) \quad K_H = \frac{\sum A_t \cdot Y_t - \sum X_t Y_t}{(\sum X_t Y_t)^2 - \sum Y_t^2 \cdot \sum X_t^2}$$

$$(A6) \quad K_H = \frac{\sum A_t \cdot X_t - \sum X_t Y_t}{(\sum X_t Y_t)^2 - \sum Y_t^2 \cdot \sum X_t^2}$$

מכניח המחשב ONLINE מחשב את הערכים $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \lambda$ ופורמט את המשוואות

A5 - A6

בנסחה מס' 2

פעילות האיזוטופים המופרדים כפונקציה של זמן התקרנה.

הנחות:

1. נסמן את האיזוטופ המורה ב- M ומכאן נקבל:

M - מספר האטומים של האיזוטופ המופרד.

λ_M - קבוע הדעיכה של האיזוטופ המופרד.

K_M - קצב התווצרות בקבוע של האיזוטופ המופרד (אטומים/יח' זמן).

2. האיזוטופ המופרד נוצר גם כתוצאה מדעיכה הקודם לו בשרשרת (להלן "ההורה").

הורה נשאר כולו במורה.

נסמן את מספר האטומים של ההורה ב- P, קבוע הדעיכה ב- λ_P וקצב התווצרות ב- K_P

3. ה- D דועך בקולקטור לתוצר רדיואקטיבי (להלן "בתי") שיעורו ב- D עם קבוע דעיכה

λ_D . ה"בתי" אינה משתחררת מהמורה ופעילותה המדודה נובעת רק מדעיכה האיזוטופ

המופרד.

4. ה"בתי" יכולה לדעוך לנכדה רדיואקטיבית שיעורו ב- G, עם קבוע דעיכה λ_G .

בנסחה מס' 1 ניתן לתרון נומרי לחשוב הערכים של K_M ו- K_P כאשר ידועה פונקציה

מעבר נטיבית. נסחה זה נותן מתרון אנליטי לשוואות הבניה והדעיכה של הפעילות

הרדיואקטיבית בתזמנת פונקציה המעבר. כאשר מדובר באיזוטופים ארוכי חיים

ביחס לפונקציה המעבר, המתרון האנליטי המדויק מהווה קרוכ טוב.

במורה נקבל:

1. השתנות מספר האטומים של ההורה:

$$\frac{dP}{dt} = K_P - P\lambda_P$$

ולפיכך, בהנחה כי בתחילת התקרנה P=0 נקבל

$$(1) \quad P = \frac{K_P}{\lambda_P} (1 - e^{-\lambda_P t})$$

בקולקטור נקבל:

1. השתנות מספר האטומים של האיזוטופ המופרד:

$$\frac{dM}{dt} = P\lambda_P + K_M - M\lambda_M = K_P(1 - e^{-\lambda_P t}) + K_M - M\lambda_M$$

מפרון המטואה בזמן $t=0$ כאשר $M=0$: יהיה:

$$(2) \quad M = \frac{K_P}{\lambda_M - \lambda_P} (e^{-\lambda_M t} - e^{-\lambda_P t}) + \frac{K_M + K_P}{\lambda_M} (1 - e^{-\lambda_M t})$$

2. המטואה מספר המטופים של הבא בקולקטור:

$$\frac{dM}{dt} = M\lambda_M - D\lambda_D = \frac{K_P \lambda_M}{\lambda_M - \lambda_P} (e^{-\lambda_M t} - e^{-\lambda_P t}) + (K_M + K_P)(1 - e^{-\lambda_M t}) - D\lambda_D$$

ומפרון המטואה יהיה:

$$(3) \quad D = \frac{K_M + K_P}{\lambda_D} (1 - e^{-\lambda_D t}) + \frac{K_P}{\lambda_D - \lambda_P} \cdot \frac{\lambda_M}{\lambda_M - \lambda_P} (e^{-\lambda_D t} - e^{-\lambda_P t}) + \left(\frac{K_P \lambda_P}{(\lambda_D - \lambda_M)(\lambda_M - \lambda_P)} - \frac{K_M}{\lambda_D - \lambda_M} \right) (e^{-\lambda_M t} - e^{-\lambda_D t})$$

לאחר הקרנה במשך זמן τ יהיה מספר המטופים של האיזוטופ המופרד M_0 ושל הבא D_0 .

$$M = M_0 e^{-\lambda_M \tau} \quad \text{כמוצא מדעיכה בקבל}$$

$$\frac{dD}{dt} = M\lambda_M - D\lambda_D = M_0 \lambda_M e^{-\lambda_M t} - D\lambda_D$$

ומפרון המטואה יהיה:

$$(4) \quad D = D_0 e^{-\lambda_D \tau} + \frac{M_0 \lambda_M}{\lambda_D - \lambda_M} (e^{-\lambda_M \tau} - e^{-\lambda_D \tau})$$

אם נאעלם מפעילות הנכדה הרדיואקטיבית (כרוב המקרים זה מוצדק בגלל מחצית

החיים הארוכה יחסית) נקבל:

$$A_t = M\lambda_M + D\lambda_D \quad \text{פעילות כללית בדעיכה}$$

$$(5) \quad A_t = M_0 \lambda_M \left(1 + \frac{\lambda_D}{\lambda_D - \lambda_M} e^{-\lambda_M t} \right) + \lambda_D \left(D_0 - \frac{M_0 \lambda_M}{\lambda_D - \lambda_M} \right) e^{-\lambda_D t}$$

עיי פרק עקומת הדעיכה הנטיבית לפרכיבים לפי קבועי דעיכה, בעזרת הכניח

מחשב (CLSQ) או ידניה על ניר חצי לוגריתמי, מקבלים במקסטרופולציה ל- $z=0$

ערכים שמהם ניתן לחשב את קצב ההווצרות של האטום המופרד בקבוע. עיי הצבה

מטואה (2) ו- (3) עבור ערכי M_0 ו- D_0 לזמן הקרנה τ לחוך (5) נקבל:

$$(6) \quad A_t = \left[(K_M + K_P) - (K_M + K_P) \frac{\lambda_P}{\lambda_P - \lambda_M} e^{-\lambda_M \tau} - \frac{K_P \lambda_M}{\lambda_M - \lambda_P} e^{-\lambda_P \tau} \right] \left(1 + \frac{\lambda_D}{\lambda_D - \lambda_M} \right) e^{-\lambda_M t} + \frac{\lambda_M}{\lambda_M - \lambda_D} \left[(K_M + K_P) + \frac{K_P \lambda_D}{\lambda_D - \lambda_P} e^{-\lambda_P \tau} - (K_M - K_P) \frac{\lambda_P}{\lambda_D - \lambda_P} \right] e^{-\lambda_D t}$$

Bibliography

1. C.F. Tsang, and J.B. Wilhelmy Nucl. Phys. A184, 417, (1972)
2. R. Vandenbosch and J.R. Huizenga, in Nuclear Fission, Academic Press 1973, New York and London p. 59
3. Ref. 2, p.
4. Ref. 2, p.
5. T.D. Thomas and S.L. Whitstone Jr. Phys. Rev. 144, 1060, (1966)
6. Ref. 2, p. 262
7. V.F. Rimont, Sov. At. Energy 19, 1000, (1965)
8. J.S. Fraser, Phys. Rev. 88, 536, (1952)
9. H. Maier - Leibnitz, P. Armbruster and H.J. Specht, in Proc. IAEA Symp. Phys. Chem. Fission, Salzburg 1965, Vol. 4, p. 113 IAEA Vienna.
10. J.P. Unik and J.E. Gindler, Rep. ANL - 7748, (1971) Argonne Nat. Lab., Argonne, Illinois.
11. L. Meitner and O.R. Frisch, Nature (London) 143, 239, (1939)
12. W.D. Meyers and W.J. Swiatecki, Nucl. Phys. 81, 1, (1966)
13. A.E.S. Green, Phys. Rev. 95, 1006, (1954)
14. B.R. Mottelson, S.G. Nilsson Kgl. Dan. Vidensk. Nat. Fys. Sk. 1, No. 8, (1959)
15. V.M. Strutinsky, Nucl. Phys. A95, 420, (1967)
16. V.M. Strutinsky, Nucl. Phys. A122, 1, (1968)
17. J.R. Nix, W.J. Swiatecki, Nucl. Phys. 71, 1, (1965)
18. J.R. Nix, Nucl. Phys. A130, 241, (1969)
19. B.D. Wilkins, and E.P. Steinberg, Phys. Lett. 42B, 141, (1972).

20. A.C. Wahl, A.E. Morris, R.A. Rouse and J.C. Williams, in Proceedings of the Second IAEA Symposium on Physics and Chem. of Fission, IAEA Vienna 1969 p. 813
21. A.C. Wahl, R.L. Ferguson, D.R. Mathewy, D.E. Treatner, and K. Wolfsberg, Phys. Rev. 126, 1112,(1962)
22. J.A. McHugh and M.C. Michel, Phys. Rev. 172, 1160,(1968)
23. L.E. Glendenin, C.D. Coryell, and R.R. Edwards, in Radiochemical Studies: The Fission Products, edited by C.D. Coryell and M. Sugarman (McGraw Hill New York 1951) Vol. 9, Div. IV, p. 489.
24. C.D. Coryell, M. Kaplan, and R.D. Fink, Can. J. Chem. 39, 646,(1961)
25. S. Amiel and M. Feldstein in Proceedings of the Third IAEA Symposium on Physics and Chemistry of Fission 1973, Vol. II, p. 65,(IAEA, Vienna 1974)
26. S. Amiel and M. Feldstein, Phys. Rev. C11, 845.(1975)
27. A. Wahl, R. Demig, J. Inorg. Nucl. Chem. 34, 2413, (1972)
28. R. Mausmann, H. Folger, H.O. Denschlag, J. Inorg. Nucl. Chem. 34, 1795,(1972)
29. J.K. Kratz, G. Herrmann in Ref. 25, p. 95
30. J. Falvinci, E. Melkonian, W.W. Havens Jr. Proc. Topical Conf. Neutron Induced Fission, Bombay 1971 IAEA IMDC-7/U, 31
31. S.L. Whetstone Jr. Phys. Rev. 131, 232, (1963)
32. J.P. Unik, J.E. Gindler, L.E. Glendenin, K.F. Flynn, A. Gorski, R.K. Sjoblom in Ref. 25, p. 19.
33. W. Reisdorf, J.P. Unik, H.C. Griffin, L.E. Glendenin Nucl. Phys. A177, 337,(1971)

34. E. Chaifetz, J.N. Wilhelmy, R.C. Jared and S.A. Thompson, Phys. Rev. C4, 1913 (1971)
35. K. Sistemich, P. Armbruster, J. Eidens and E. Beekel, Nucl. Phys. A139, 200, (1969)
36. E. Konecny, M. Gunther, H. Bialar, G. Siegert, W. Ewald, Z. Phys. 231, 59, (1970)
37. M. Gunther, G. Siegert, R.L. Ferguson, H. Ewald, E. Konecny, Nucl. Phys. A196, 401, (1972)
38. H.G. Clerc, K.H. Schmidt, H. Wohlfarth, W. Lang, H. Schrader, K.E. Pferdekämper, R. Jungmann, H. Asghar, J.P. Bocquet, and G. Siegert. Nucl. Phys. A247, 74, 1975
39. H.G. Clerc, W. Lang, H. Wohlfarth, K.A. Schmidt, H. Schrader, K.E. Pferdekämper, R. Jungmann, Zeitschrift für Physik A274 203, (1975)
40. G. Siegert, J. Greif, H. Wollnik, G. Fiedler, R. Decker, M. Asghar, G. Baillet, J. B. Bocquet, J.P. Gautheron, H. Schrader, P. Armbruster and H.Ewald, Phys. Rev. Lett. 34, 1034, (1975)
41. P.O. Aronsson, B.E. Johansson, J. Rydberg, S. Skarnemark, J. Alstad, B. Bergersen, E. Kvale, and M. Skarestad, J. Inorg. Nucl. Chem, 36, 2397, (1974)
42. P.O. Aronsson, G. Skarnemark, and M. Skarestad, J. Inorg. Nucl. Chem. 36, 1689 (1974)
43. P.O. Aronsson, G. Skarnemark, E. Kvale and M. Skarestad, Inorg. Nucl. Chem. Letters 10, 753, (1974)

44. P.O. Aronsson, G. Skarnemark, and M. Skarstedt, *Inorg. Nucl. Chem. Letters* 10, 499, (1974)
45. J. Blachot, L.C. Carran, P. Cavallini, A. Cadelle, A. Moussa in *Ref. 20*, p. 803.
46. A.C. Wahl, *J. Inorg. Nucl. Chem.* 6, 263, (1958)
47. K.L. Kratz, G. Herrmann, *Radiochem. Radioanal. Letters* 13/5-6/385, (1973)
48. S. Amiel, M. Feldstein, M. Oren, and E. Yellin, *Phys. Rev.* C5, 270, (1972).
49. B. Ehrenberg and S. Amiel, *Phys. Rev.* C6, 618, (1972)
50. I. Amarel, R. Bernas, R. Foucher, J. Jastrzebski, A. Johnson and J. Taillac, *Phys. Letters* 24B, 402, (1967)
51. A. Venezia Ph.D. Thesis, Hebrew University, Jerusalem, (1973)
52. W.H. Walker AECL-4704, (1974)
53. A. Shihab-Eldin, S.G. Frassin, F.H. Bernthal and J.O. Rasmussen, *Nucl. Phys.* A160, 33, (1971)
54. H. Lycklama, T.J. Kennel, *Can. J. of Physics* 48, 753, (1970)
55. G.C. Carlson, W.C. Schick, Jr., W.L. Talbert Jr., and K.F. Wohn *Nucl. Phys.* A125, 267, (1969)
56. E.A. Henry, W.L. Talbert, Jr., and J.R. McConnell, *Phys. Rev.* C7, 222, (1973)
57. J.F. Mason, and M.W. Johns, *Can. J. of Phys.* 48, 2056, (1970)
58. E. Achterberg, F.C. Iglesias, A.E. Jech, J.A. Moraes, D. Otero, M.L. Perez, A.N. Proto, J.J. Rossi and W. Scheuer, *Phys. Rev.* C9, 299, (1974)

59. R.J. Olsen, W.L. Talbert Jr. and J.R. McConnell
Phys. Rev. C2, 2095, (1972)
60. E.A. Henry, Nuclear Data Sheets 14, No. 2 (1975)
61. P. Alexander and J.P. Lou, Nucl. Phys. A121, 632, (1968)
62. G. Moln, Arkiv Fysik 37, 1, (1968)
63. E. Monnard, R. Briseot, L.C. Carras, J. Crançon, C. Ristori,
F. Schussler, and A. Moussa Nucl.Phys. A195, 192 (1972)
64. G. Holm, S. Borg, U. Fagerquist, F. Kropff - Arkiv Fysik,
34, 447, (1967)
65. W. Schick Jr., W.L. Talbert Jr. and J.R. McConnell
Phys. Rev. C4, 507, (1971)
66. R.L. Auble, Nucl. Data Sheets 10, No. 2, 175, (1973)
67. J.T. Larsen, W.L. Talbert Jr., J.R. McConnell, Phys. Rev. C3,
1372, (1971)
68. Chart of the Nuclides, Naval Reactors, U.S. Atomic Energy
Commission, 1972
69. J.W. Grüber, K. Sistemich, P. Armbruster, J. Eidens and
H. Lawin, International Conference on the Properties of Nuclei
far from the Region of β Stability. Proceedings Vol. 2, 967,
Leysin 1970
70. W.V. Prestwich, K. Fritze, and T.Y. Kennett, Nucl. Phys. 37,
(1962) 45
71. D. Hovestadt, P. Armbruster, J. Eidens, Z. für Physik 178,
(1964) 226

72. S. Amiel, Y. Gilat, A. Norea, and E. Yellin, Delayed Fission Neutrons (IAEA Vienna 1968) p. 115
73. F. Patselt, and G. Herrmann, Symposium on the Physics and Chemistry of Fission 1965, Vol. 2, p. 243
74. A.C. Wahl, and A.E. Morris. Phys. Rev. 146, (1966) 931
75. K. Fritze, T.Y. Kennett, W.V. Fraetwisch, Can. J. Chem. 39, (1961) 675
76. T. Alvager et. al. Phys. Rev. 167, (1968) 1105
77. I. Amarel, H. Gauvin, A. Johnson, J. Inorg. Nucl. Chem. 31, (1969) 577
78. K. Fritze, Can. J. Chem. 40, (1962) 1262
79. H. Feldstein and S. Amiel, Proc. of 8th Inter. EMIS Conf. (1973)
80. C. Ristori, M. Asghar, J. Crançon, and J.P. Gautheron,
Submitted to Zeitschrift für Physik
81. G.R. Keepin, Nuclear Technology 13, 53, (1972)
82. S. Amiel, T. Izak - Biran Nucl. Sci. & Eng. 57, 117 (1975)
83. M. Asghar, J.P. Gautheron, G. Bailleul, J.P. Bocouet, J. Greif,
H. Schrader and G. Siegert Nucl. Phys. A247, 355 (1975)
84. J. Chaumont, Ph.D. Thesis, presented to Univ. of Paris, (1970)
85. T.D. Thomas and R. Vandenbosch, Phys. Rev. 133, B 976, (1964)
86. W. Reisdorf, J.P. Unik, L.E. Glendenin, Nucl Phys. A205,
348 (1973)
87. S. Amiel, H. Feldstein and T. Izak-Biran, submitted to Phys.
Rev. C

88. B.L. Tracy, J. Chaumont, R. Klapisch, J.M. Nitschke,
A.M. Peckanser, K. Roedel, C. Thibault, Phys. Rev. CS,
222, (1972)
89. Nuclear Data Sheets 13 (2), 229 (1974)

