



מכון ויצמן למדע
WEIZMANN INSTITUTE OF SCIENCE

אל מרחבי היקום ולעומק האטום

100 אבני דרך בחקר הפיסיקה
במכון ויצמן למדע



משולחנו של הדיקן הרפתקה הגדולה

הצעירים המצטרפים אליה, שמחה וגאה בהישגים של כל אחת מקבוצות המחקר שלה, ופועלת כגוף אחד המורכב מן המדענים, תלמידי המחקר והצוותים תומכי המדע – כדי להשיג מציאות.

בספר זה מוצגות ומתוארות בקצרה 100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע, ובתולדות הפקולטה לפיסיקה במכון. אנו מקווים שמעבר לשרטוט קווי ההתפתחות של הפקולטה, מעבר לדוגמאות של הישגים ניסיוניים ותיאורטיים, מעבר למיגוון ולעושר של המחקר הפיסיקלי בכללותו, יוכלו הקוראים גם להעריך את ההרפתקה האינטלקטואלית, ואולי אפילו לחוש את "חדוות הפיסיקה" הפועמת בכל העוסקים במדע מיוחד זה.

יוסי ניר

המחקר בפיסיקה נובע משאיפתנו להבין את חוקי הטבע, את הדרך שבה הם מכתיבים תופעות במערכות גדולות כקטנות, ואת האפשרויות להשתמש בהם לתועלת האנושות. מיגוון התופעות שבהן עוסקים הפיסיקאים הוא עצום: הן יכולות להיות גדולות כמו היקום כולו, או קטנות כמו החלקיקים הזעירים המרכיבים את הפרוטון, אנרגטיות כמו פריצי קרני גמא, או קרות כמו קרינת הרקע הקוסמית. המחקר בפיסיקה הוא הרפתקה הכרוכה במסע אל הלא-נודע.

ההתקדמות המדעית בפיסיקה כרוכה בשיח ושיג בין ניסוי לתיאוריה. לעיתים זהו הניסוי שמפריך את התיאוריה הקיימת ומאתגר את התיאורטיקאים לפרוץ דרכי מחשבה חדשות, ולעיתים התיאוריה היא זו אשר מנבאת תופעות שטרם נצפו, ומובילה את הניסיונאים לתכנן את הניסוי אשר יוכל לאשש או להפריך את הניבויים התיאורטיים. בפקולטה לפיסיקה במכון ויצמן למדע מתקיימת הפריה הדדית כזו של תיאוריה וניסוי לאורך כל שנות קיומה.

הפקולטה לפיסיקה היא, מצד אחד, מדען ועוד מדען ועוד מדען, כל אחד וקבוצת המחקר שלו, השאלות המסקרנות אותו, ודרך הפעולה הניסיונית או החשיבה התיאורטית שהוא בוחר אבל מצד אחר הפקולטה לפיסיקה היא גם קהילה אשר קובעת בצוותא את עתידה, באמצעות בחירת המדענים



משולחנו של הנישֵׁך התחדשות מתמדת

גורמות לנו להתפעל בכל פעם מחדש מהחזון ומהאומץ של מנהיגי המכון לחזרתיהם. תחומי מחקר חדשים זכו לתמיכה, תוך נטילת סיכונים לא מבוטלים. המכון תמיד נמצא בחזית המחקר העולמית, ולעיתים אפילו הוביל תחומים חדשים.

ספר זה מציג 100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע, וככה, הוא משרטט קו עלילה מפותל ומפתיע. לפעמים קשה להאמין שבמשך זמן קצר כל כך הספיקו והצליחו מדעני המכון להניח יסודות איתנים כל כך, להטביע את חותמם על ההיסטוריה של המדע העולמי, להשפיע על הכלכלה ועל החברה של מדינת ישראל, ולרכוש מוניטין של חדשנות מתמדת – המתמשכת עד לימינו אלה, בדרכה אל העתיד.

דניאל זייפמן

העובדה שיש לנו כיום במכון ויצמן למדע פקולטה גדולה ועתירת הישגים בפיסיקה חייבת את קיומה לחזונו של כמה אנשים שידעו לקבל, בשלבים שונים, החלטות בעלות מעוף, בתנאים שכיום קשה לנו לתארם. בשנותיה הראשונות עמדה מדינת ישראל הצעירה בפני קשיים עצומים – קליטת עלייה המונית, אספקת מזון לכל תושביה, והקמת שירותי בריאות ותשתיות שונות עבור האוכלוסייה שגדלה במהירות. ובכל זאת, מנהיגי המדינה, ובראשם דוד בן-גוריון, החליטו להקצות את המשאבים הדרושים, ולשלוח חמישה סטודנטים צעירים ללימודי פיסיקה בחו"ל, על חשבון המדינה.

כשחזר, התברר שבן-גוריון פרש לשדה בוקר, התוכניות להקמת מכון מחקר מדעי נגנזו. והעתיד היה לוטה בערפל. באותה עת נוהל מכון ויצמן בידי חמשת ראשי המחלקות: חיים פקרים, ישראל דוסטובסקי, יצחק ברנבלום, אפרים קציר ואהרן קציר. יחד עם נשיא המכון דאז, מאיר וייסגל, הם קיבלו החלטה רבת מעוף ותעוזה – להזמין את הפיסיקאים הצעירים שחזרו מחו"ל להקים במכון מחלקה לפיסיקה גרעינית, ולהצטרף לפעילות שכבר התקיימה במכון בתחומים אחרים של חקר הפיסיקה – קרינה אינפרא-אדומה ותהודה מגנטית גרעינית.

מאז, שוב ושוב, התקבלו במכון ויצמן למדע החלטות בתחום המחקר הפיסיקלי, שבמבט לאחור



1949

החמצן של המדינה

מדעני המכון תיכננו ובנו, בשנות ה-50 של המאה ה-20, מתקן ייחודי להפרדת איזוטופים. איזוטופים הם מעין גרסאות של אטומי היסודות השונים. איזוטופים שונים של אותו יסוד מכילים פרוטונים ואלקטרונים בכמות זהה, אך הם נבדלים זה מזה במספר הניטרונים המצויים בגרעיניהם. כך, למעשה, קיימים איזוטופים כבדים יותר וקלים יותר של אותו יסוד עצמו. מתקן הפרדת האיזוטופים שתוכנן, נבנה והופעל במכון, שימש להפקת איזוטופים כבדים של חמצן: חמצן 17 (שריכוזו בחמצן הטבעי הוא 0.037%), וחמצן 18 (שריכוזו בחמצן הטבעי הוא 0.204%). האיזוטופים הללו משמשים בעיקר לצורכי מחקר בתחומי הכימיה והפיסיקה, וכן למחקרים בביוכימיה ובפואזה, למשל בחקר בעיות תזונה בקרב ילדים צעירים ונשים בהריון, וכן בבדיקת צריכת האנרגיה בשרירים. יש חוקרים הנעזרים בהם גם לחקר תופעות שונות הקשורות במחלות נוירולוגיות של המוח, כמו פרקינסון ואלצהיימר.

במשך שנים רבות סיפק המתקן הזה את רוב הביקוש העולמי לאיזוטופים אלה. העיסוק ביצוא האיזוטופים הוביל את מכון ויצמן להקמת חברת היישומים "ידע מחקר ופיתוח בע"מ", החברה הראשונה מסוגה בישראל, ומהראשונות בעולם.

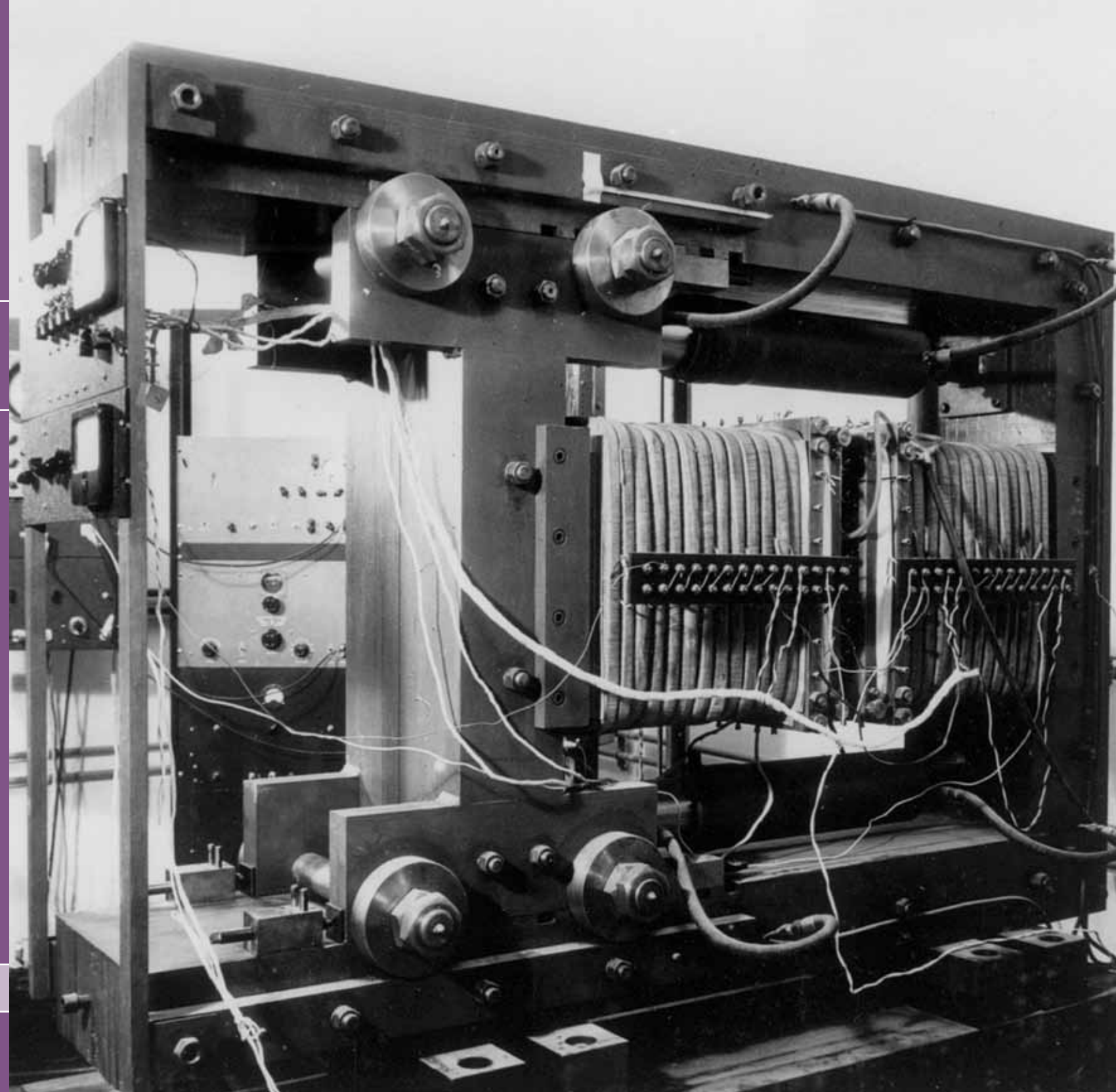
1954

תהודה מגנטית גרעינית

מדעני המכון בנו בשנות ה-50 של המאה ה-20 את ספקטרומטר התהודה המגנטית-גרעינית (NMR), ובכושר הפרדה גבוה, השני בעולם. המערכת שימשה במכון למחקר חלוצי בריאקציות כימיות בתנאי שיווי משקל, וכן לחקר מבניהן והתנהגותן של מולקולות. בהמשך פיתחו מדעני המכון שיטה למדידת תנועותיהן של מולקולות בגבישים מולקולריים, תוך שימוש בתהודה קוואדרופולית גרעינית.



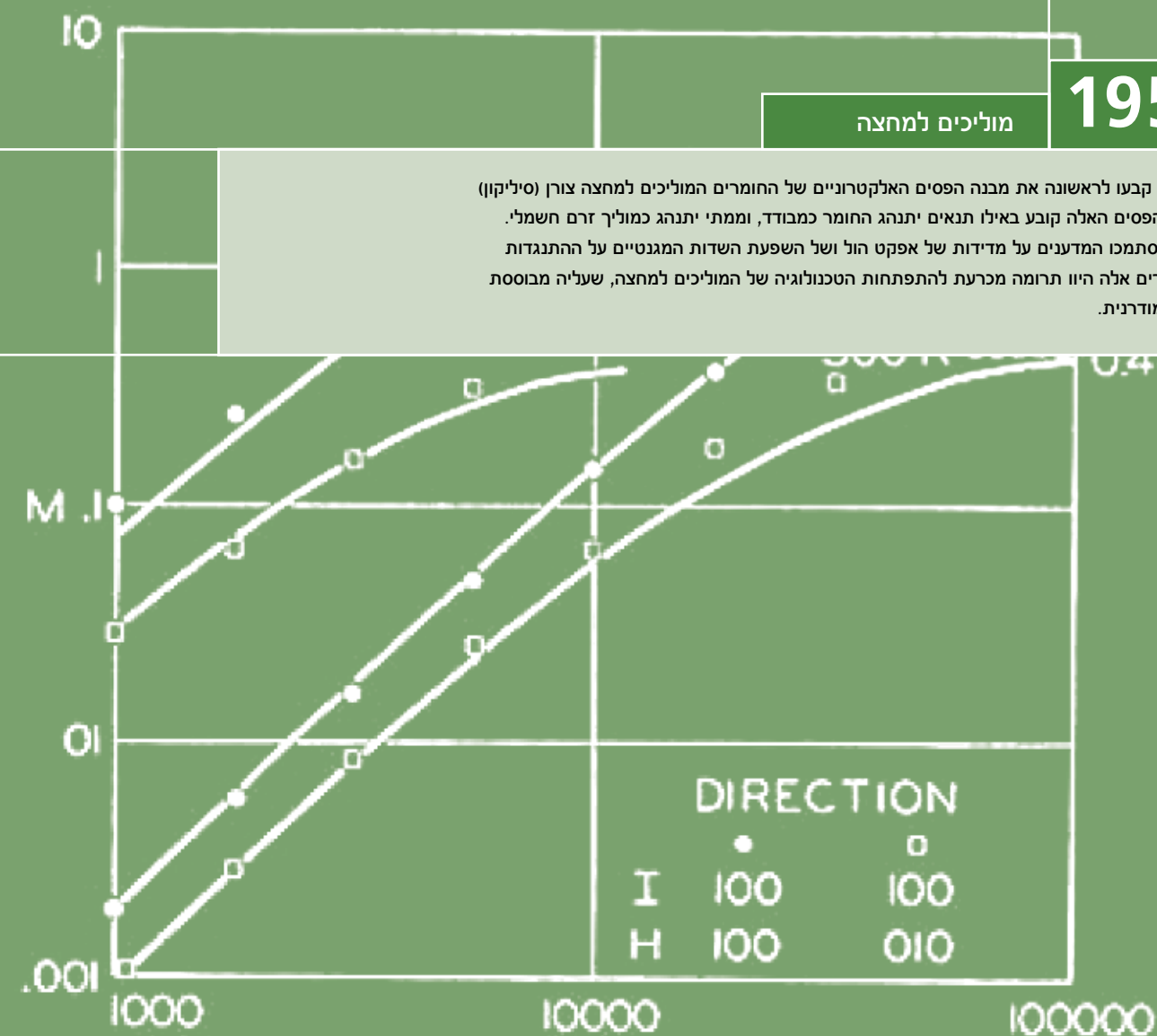
100 אבני דרך בחקר הפיזיקה במכון ויצמן למדע



1954

מוליכים למחצה

מדעני המכון קבעו לראשונה את מבנה הפסים האלקטרוניים של החומרים המוליכים למחצה צורן (סיליקון) ווגרמניום. מבנה הפסים האלה קובע באילו תנאים יתנהג החומר כמבודד, וממתי יתנהג כמוליך זרם חשמלי. במחקרים אלה הסתמכו המדענים על מדידות של אפקט הול ושל השפעת השדות המגנטיים על ההתנגדות החשמלית. מחקרים אלה היוו תרומה מכרעת להתפתחות הטכנולוגיה של המוליכים למחצה, שעליה מבוססת האלקטרוניקה המודרנית.



100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע

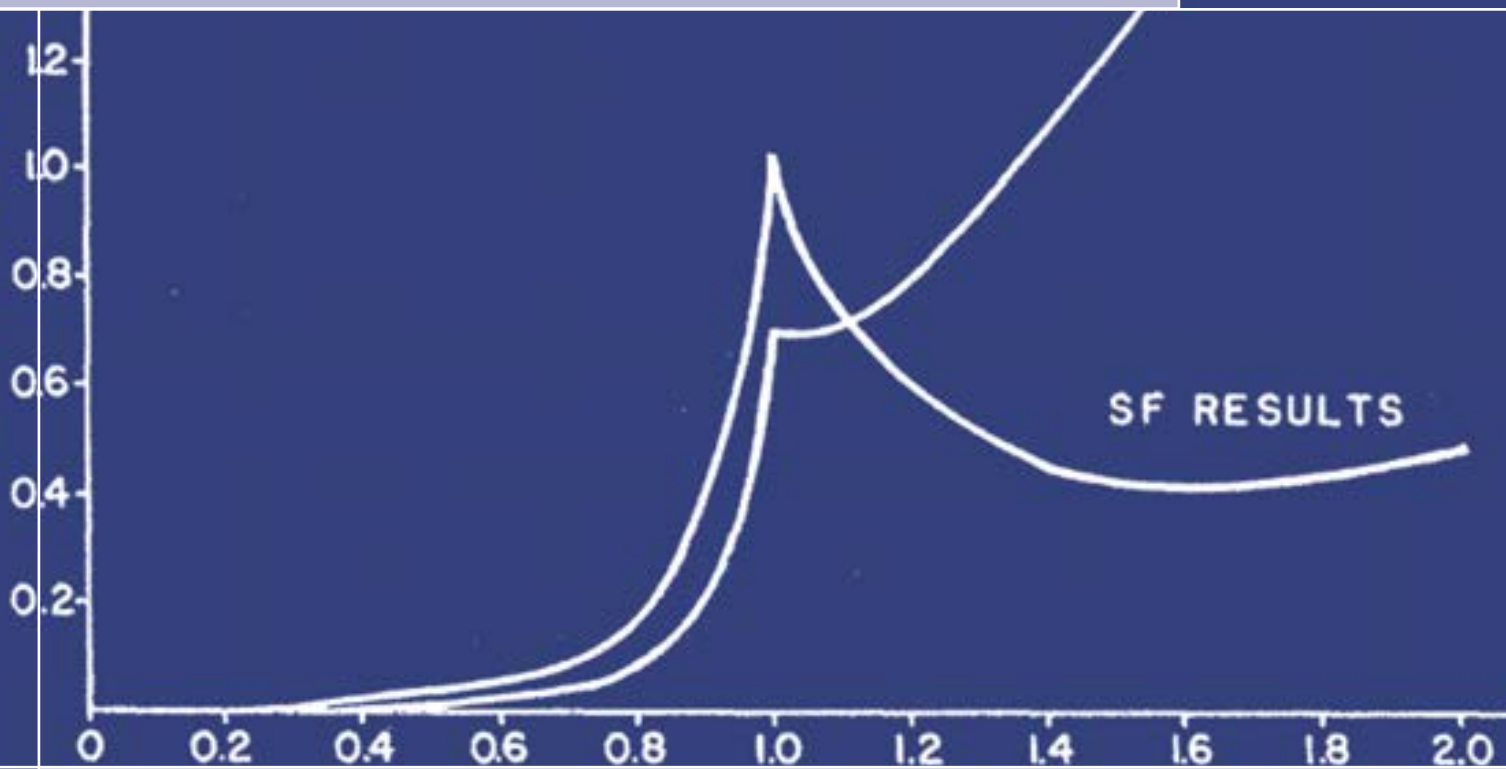
1954

היכרות מאוחרת

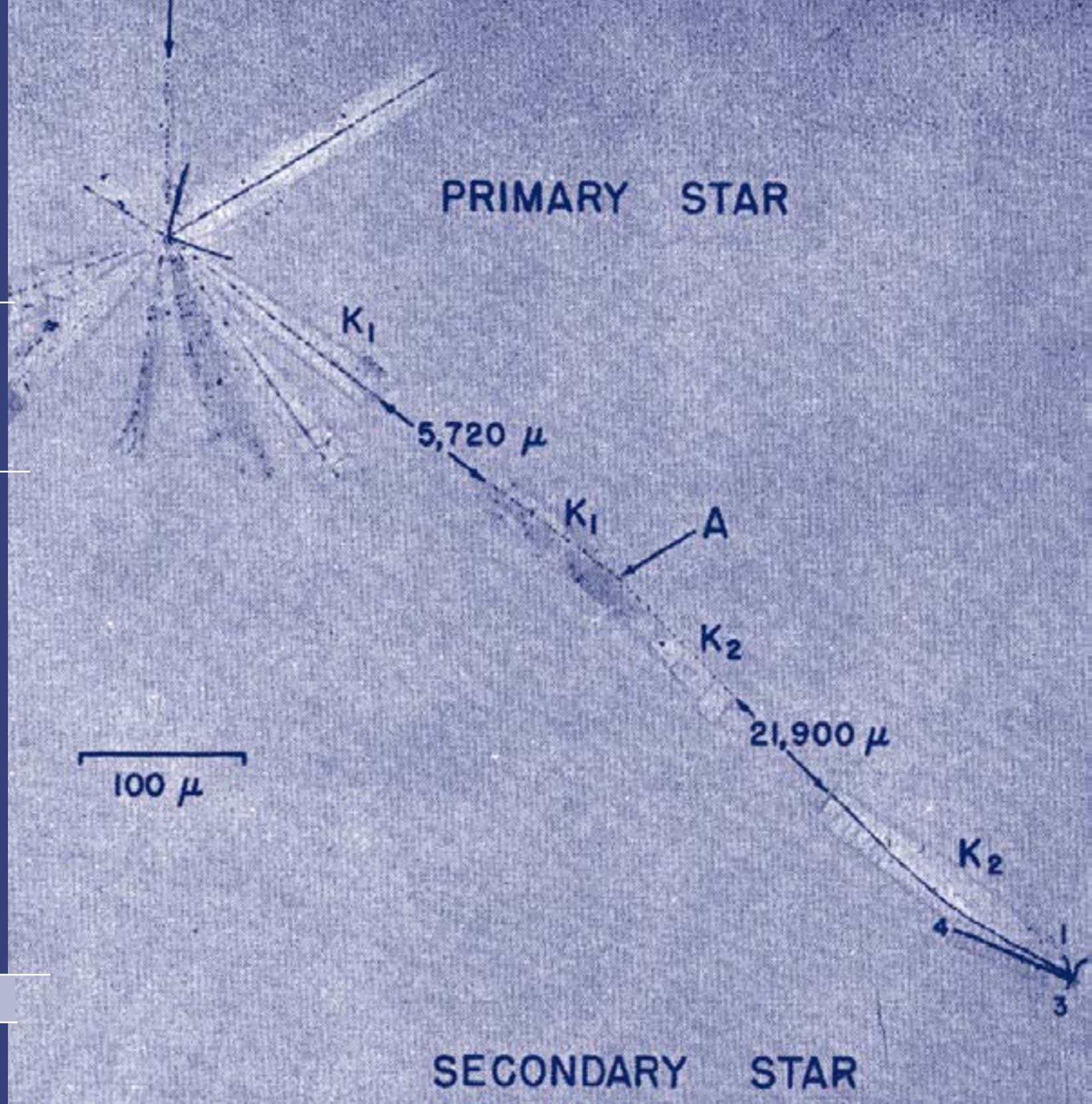
מדעני המכון זיהו, באמצעות גלאי חלקיקים המבוססים על אמולסיות צילומיות, חלקיק בעל תכונות לא מוכרות ולא צפויות. במשך כעשור שנים נותר האירוע הזה בגדר חידה, אבל עם התגלותו של החלקיק אומגה מינוס התברר שהחלקיק המיסתורי, אשר הותיר את חותמו בגלאי החלקיקים של מדעני המכון, היה, ככל הנראה, אומגה מינוס. גילוי החלקיק הזה אישר את התיאוריה הידועה בכינוי "דרך השמונה", שלפיה תכונות מסוימות של חלקיקים (כגון "מוזרות", או מטען חשמלי) יכולות לקבל ערכים קבועים בלבד (למשל, מספרים שלמים, מספרים חצויים ועוד).

ED TS

RELATIVE CROSS SECTION



100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע

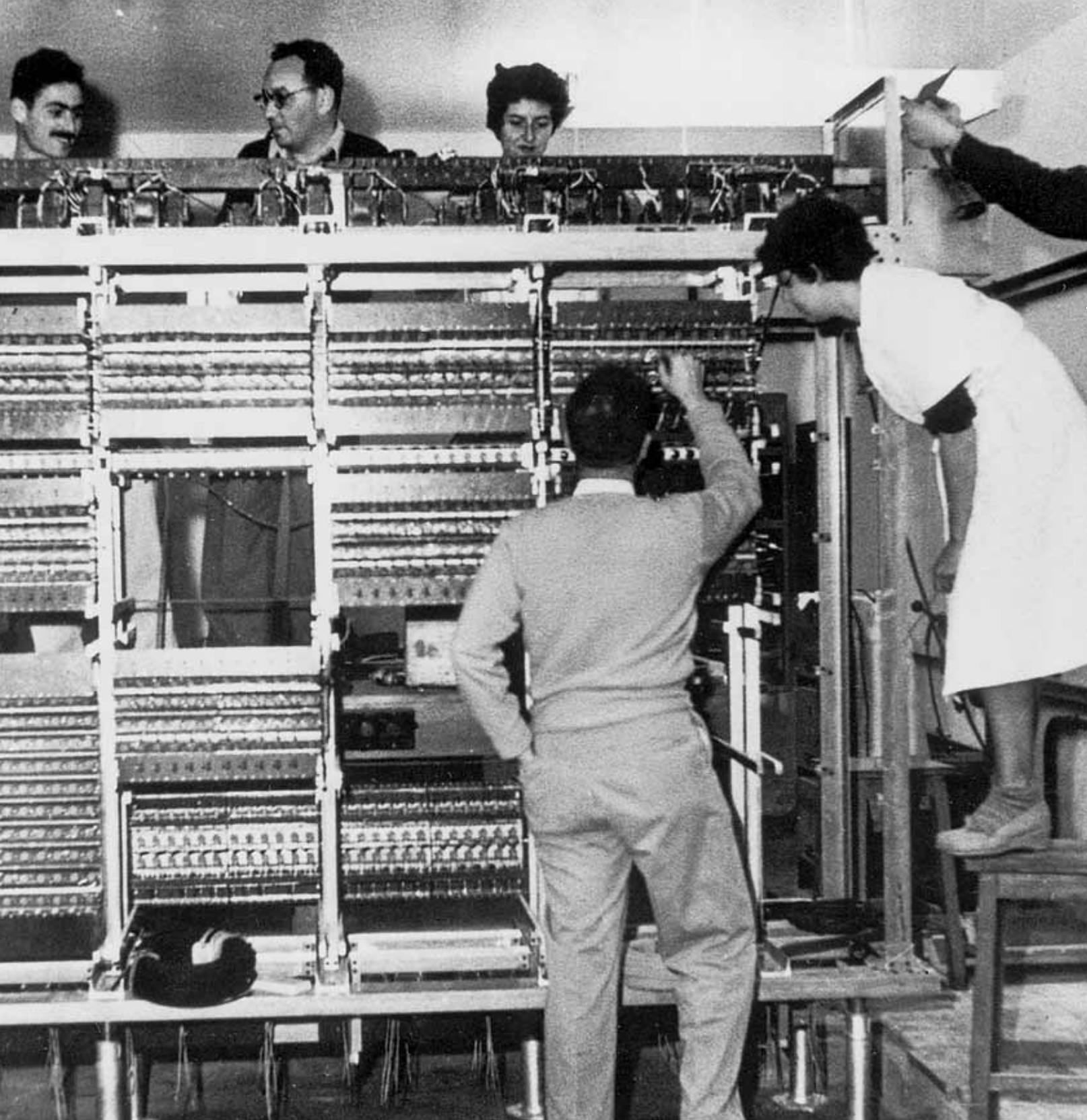


SECONDARY STAR

1955

חלוצי המחשב

"וויצק", אחד המחשבים האלקטרוניים הראשונים בעולם, והראשון בישראל, תוכנן ונבנה במכון בשנת 1954 ופעל עד ראשית שנות ה-60 של המאה הקודמת. "וויצק" שימש למחקר מתמטי, כגון פתרון בעיות הקשורות ובגאות ובשפל, וכן לחישוב הספקטרום של אטום הליום, הכולל שלושה גופים: גרעין ושני אלקטרונים הנעים סביבו. פתרון מערכת היחסים הדינמית בין שלושה גופים נחשב למשימה מתמטית מורכבת מאוד, ולמעשה, עד היום - עם כל ההתקדמות בתחום המחשבים - עדיין אין בידינו פתרון מלא לבעיות מסוג זה.



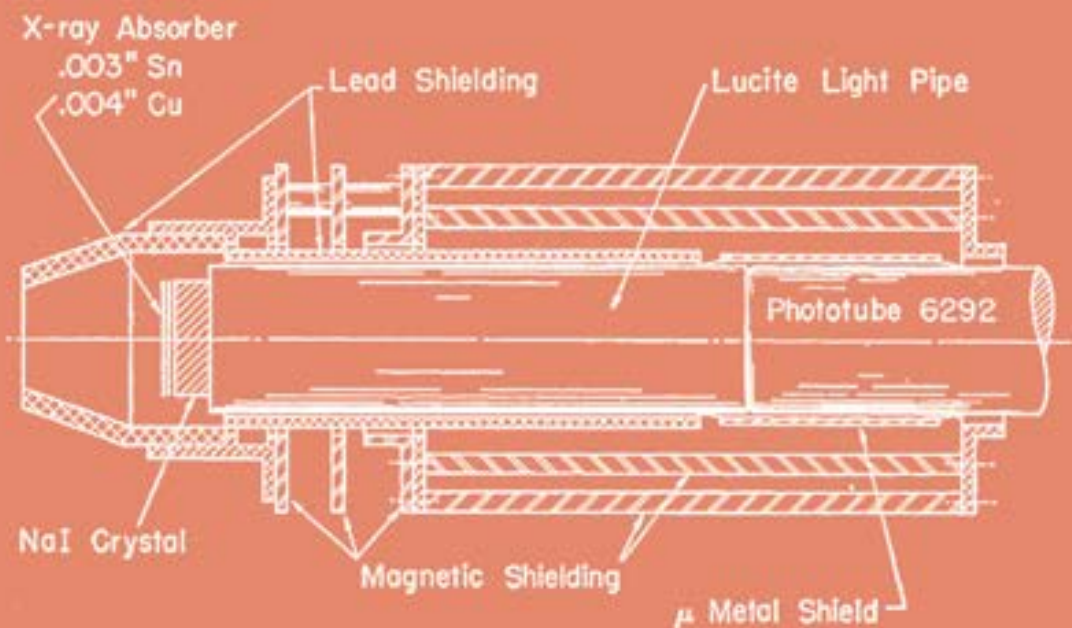
100 אבני דרך בחקר הפיזיקה במכון ויצמן למדע

1956

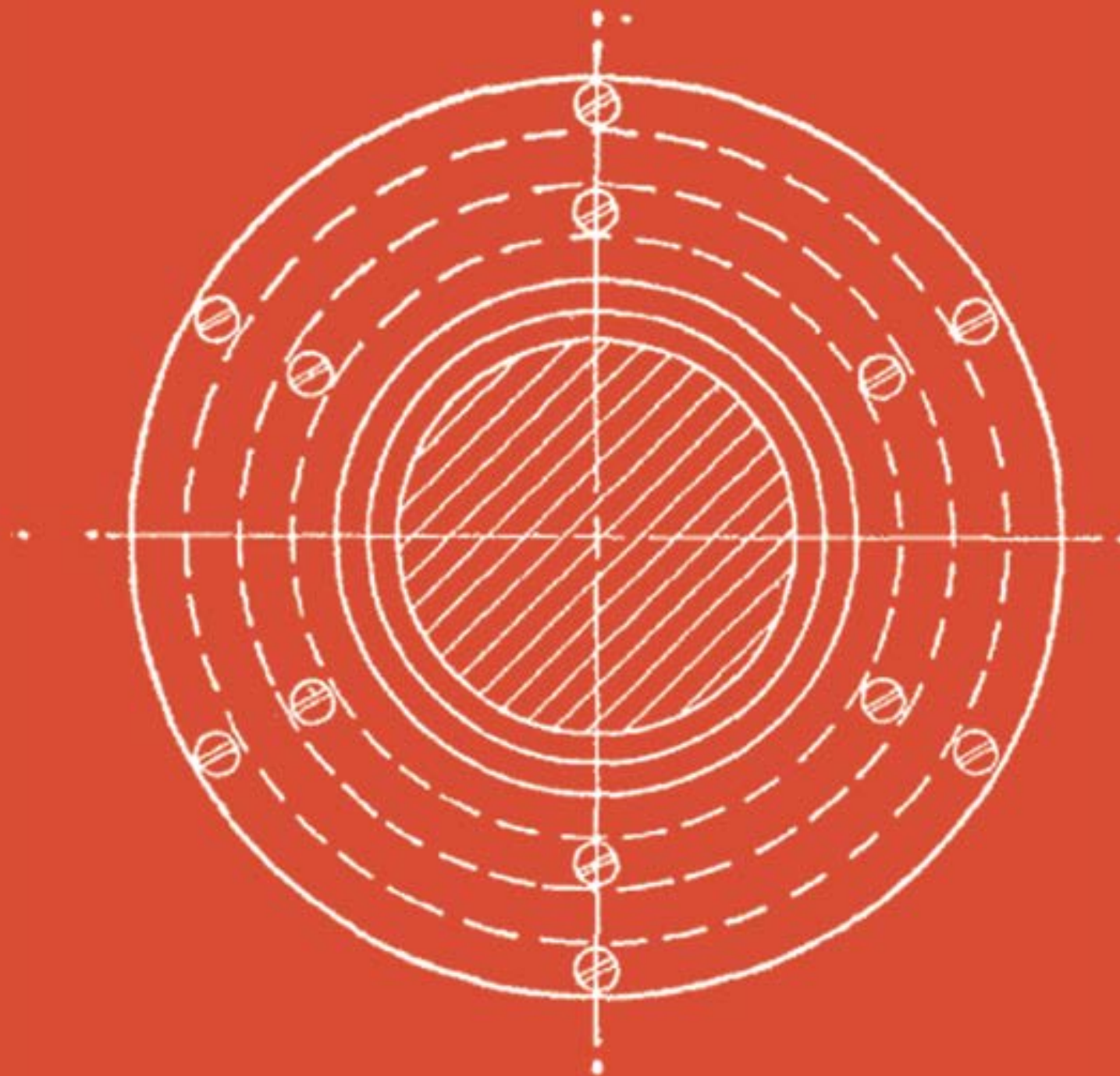
תנועה קולקטיבית

מדעני המכון הרימו תרומה מרכזית להבנת תופעת התנועה הקולקטיבית המתחוללת בגרעיני האטומים. תנועה זו מתבטאת בזרימה מתמדת של חלק ממרכיבי הגרעין (פרוטונים וניטרונים). בתחילה סברו, כי כל מרכיבי הגרעין משתתפים בתנועה הקולקטיבית, אך מדעני המכון הראו שאין זה כך, ותרמו תרומה חשובה לפיענוח מהות התנועה הקולקטיבית של פרוטונים וניטרונים בגרעין האטום.

במחקרים אלה פיתחו מדעני המכון שיטות מדידה מקוריות, אשר התבססו על ניצול הקשר (החשמלי-מגנטי) שבין גרעין האטום לבין האלקטרונים הסובבים אותו. המחקר בוצע בגרעיני אטומים מעוררים שהופקו בתשלובת מאיצי היונים של המכון, אשר כללה שלושה מאיצי יונים: מאיץ ואן דה-גראף, מאיץ טנדם, ומאיץ פלטרון. מאיצים אלה משגרים אלומות של יונים לעבר מטרת ניחות.



100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע



1957

כנס הפיסיקאים

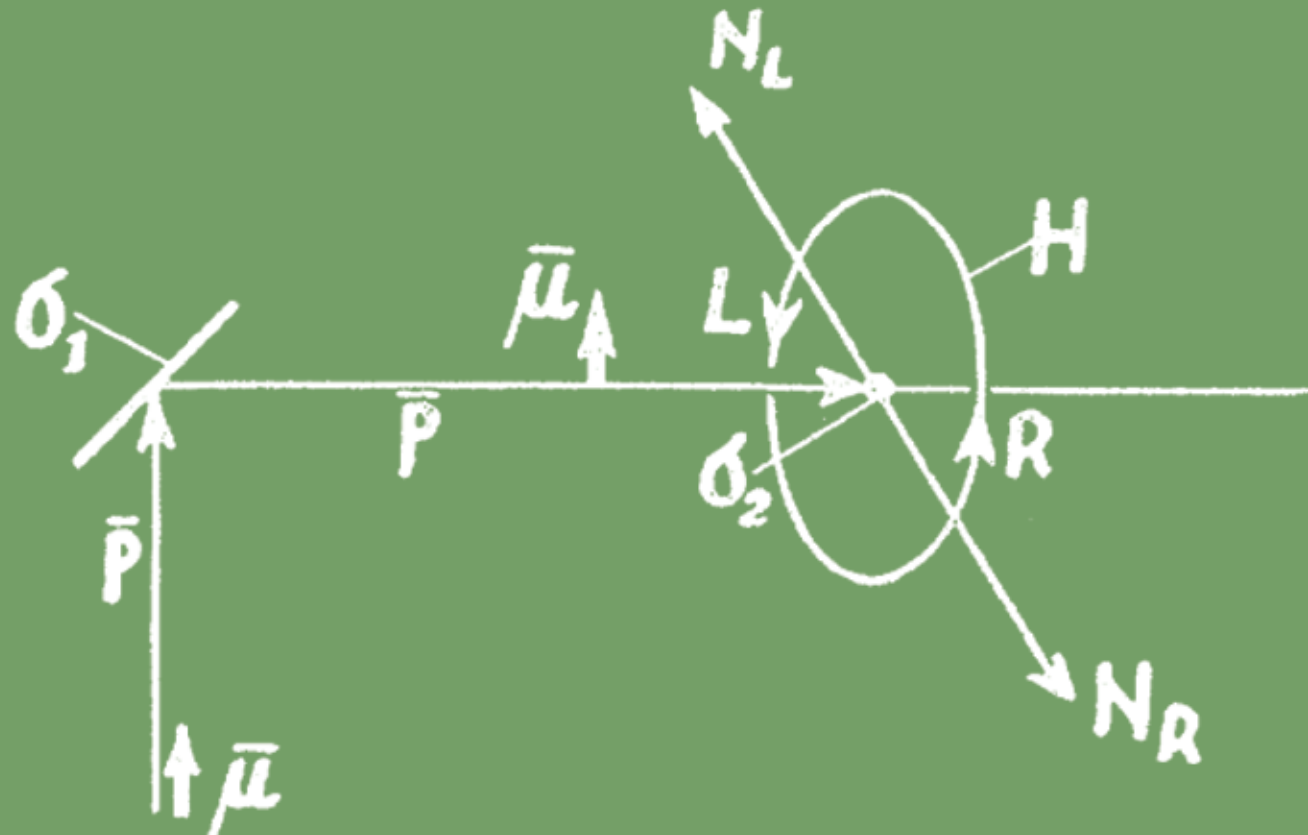
עחודש ספטמבר 1957 התקיים במכון ויצמן למדע הכנס הבין-לאומי למבנה גרעין האטום. היה זה הכנס המדעי הבין-לאומי הראשון במדינת ישראל הצעירה, וקיומו של כנס מרכזי זה ברחובות ביטא הכרה של הקהילה הבין-לאומית של חוקרי הגרעין במעמדה של המחלקה לפיסיקה במכון ויצמן. כנסים כאלה התקיימו עד אז רק במרכזי מחקר מוכרים בעולם.

לכנס נרשמו 220 פיסיקאים, מהם 155 מ-18 מדינות שונות. בין המשתתפים הרבים היו המדענים שהוכיחו את אי-שימור הזוגיות, מפתחי המודל הקולקטיבי, מודל הקליפות, ועוד. הכנס העסיק את העיתונים בארץ, ומדי יום ביומו התפרסמו דיווחים על מהלכו. בארוחה החגיגית שהתקיימה במכון השתתפו, בין השאר, ראש הממשלה, דוד בן-גוריון, וגולדה מאיר.

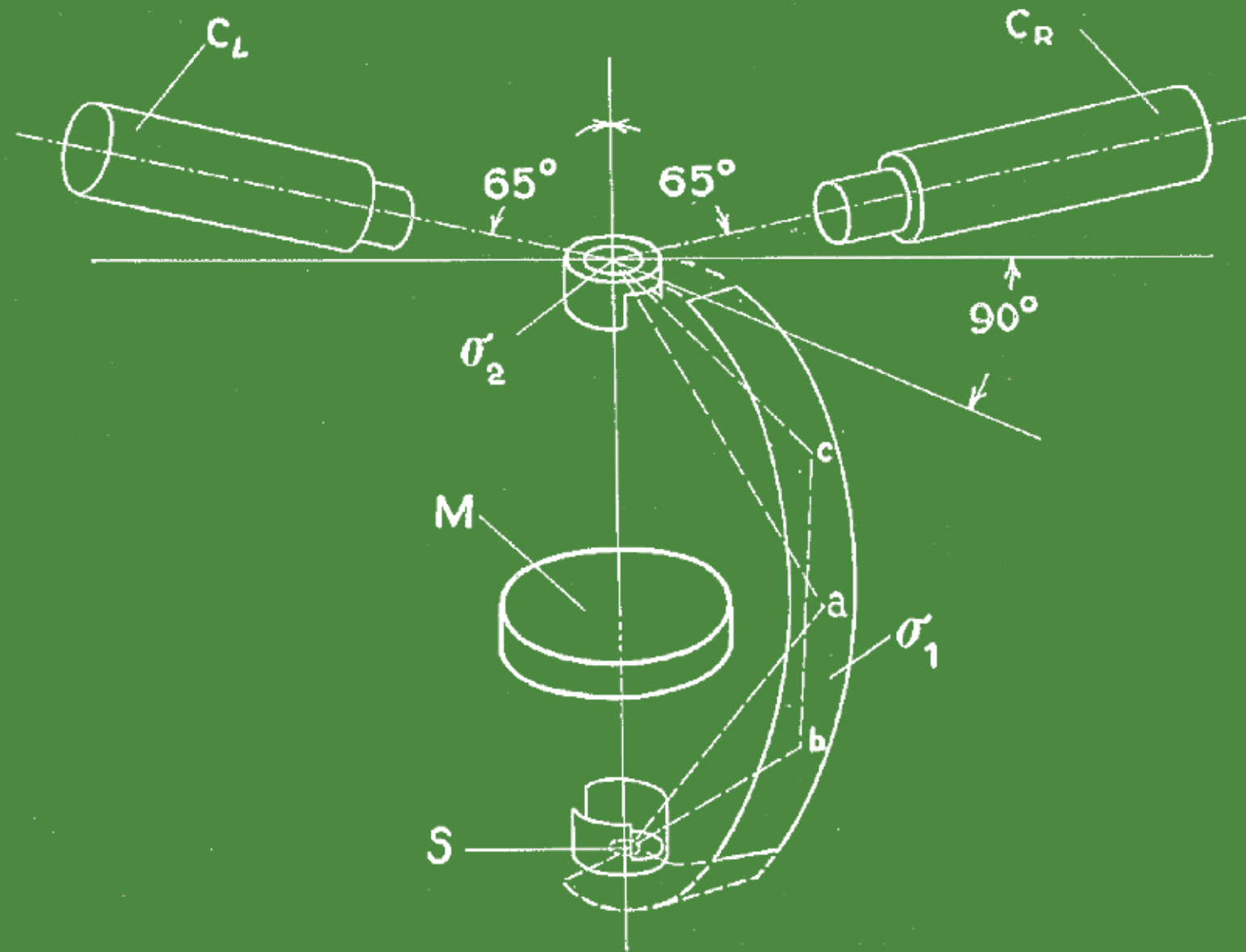


100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע

מדעני המכון פיתחו שיטה למדידת הקיטוב של אלקטרונים שמקורם בפליטת קרינה רדיו-אקטיבית מסוג ביתא. באמצעות השיטה הזאת נמצא, כי האלקטרונים של קרינת הביתא מקוטבים תמיד בקיטוב שמאלי. ממצא זה סייע להבנת אופיה של קרינת ביתא. בהמשך שימשה השיטה לתכנון מתקני מדידה לצורכי מחקר ולבנייתם.



100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע

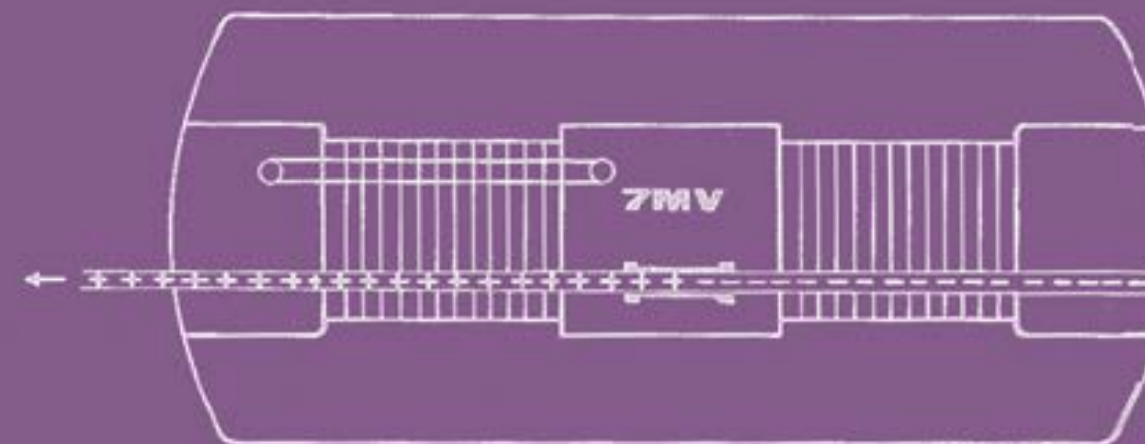


1958

מאיץ החלקיקים הראשון בישראל

מאיץ החלקיקים ואן דה-גראף נחנך בחודש מאי 1958, יחד עם חנוכת בניין המחלקה לפיסיקה. בשנה זו ניצב הוואן דה-גראף בחזית הטכנולוגיה העולמית, והודות לו הגיעו מדעני המכון לחזית המדע בתחום הפיסיקה הגרעינית. כבר בשנת פעולתו הראשונה בוצעו בו ניסויים במשולב עם מחשב (באותה עת עשו זאת בשני מקומות בעולם בלבד). גם הניסוי הראשון בעולם שבוצע בשילוב של מאיץ חלקיקים עם טרנזיסטור נעשה במכון, על הוואן דה-גראף.

באוגוסט 1998, השתתפו, לצד ותיקי המשתמשים במאיץ, גם מדענים צעירים שהמשיכו להשתמש בו במחקריהם בחזית המדע: בשנות ה-80 של המאה הקודמת התברר, שהמאיץ הוותיק עשוי לשמש כלי מרכזי במחקרים בתחום הפולימרים (שהם מולקולות ארוכות ומפותלות תבניות מיחידות משנה החוזרות על עצמן), וכן בפיתוח חישנים וגלאים שונים, לבחינת אמצעים להגנה על לוויינים מפני קרינה בחלל, ולחקר מוליכים למחצה. מחקר מתקדם בתחום הפיסיקה של השמש, אשר בוצע באמצעות המאיץ הזה, מתואר בקטע מספר 100, החותם ספר זה.



100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע

10

1958

בניין הפיסיקה על שם ק. ב. ועדנה וייסמן

את בניין הפיסיקה על-שם ק. ב. ועדנה וייסמן תיכננו האדריכלים אריה שרון, נחום זלקינד ובנימין אידלסון בשנת 1957, ובמבט ראשון נדמה כי הוא מתוכנן בסגנון המינימליזם הפונקציונלי - המבוסס על מרכיבים סדרתיים אשר חוזרים על עצמם - שהיה מקובל במבני משרדים ובמבני ציבור רבים. רצפות הקומות הבולטות אל מעבר לקו חזית החלונות מצביעות על החלוקה הפנימית לשתי קומות ומרתף. היחס בין גובה הבניין לאורכו (72 מטרים) הוא 1:9, דבר שיוצר תחושה כללית של מבנה ארוך ושטוח.

עדי לשבור את הצלילית הארוכה והאופקית החליטו המתכננים להציב לוחות הצללה אנכיים. מבט מהצד על לוחות הצללה אלה יוצר תמונה חדשה ושונה של חזית הבניין, כשרצף צפוף מעלים בהדרגה את החלונות כמו מאחורי רפפות. הסימטריה והסדרתיות של לוחות הצללה אלה נפסקות בכניסה לבניין, הכוללת שני עמודים עגולים אשר עליהם נשענת מסגרת הגגון שמסביב למבואה, וכן מדרגת פסיפס אדומה, הממשיכה פנימה בריצוף המבואה והמדרגות העולות לקומה השנייה, כאילו היה מדובר בשטיח אדום.



100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע

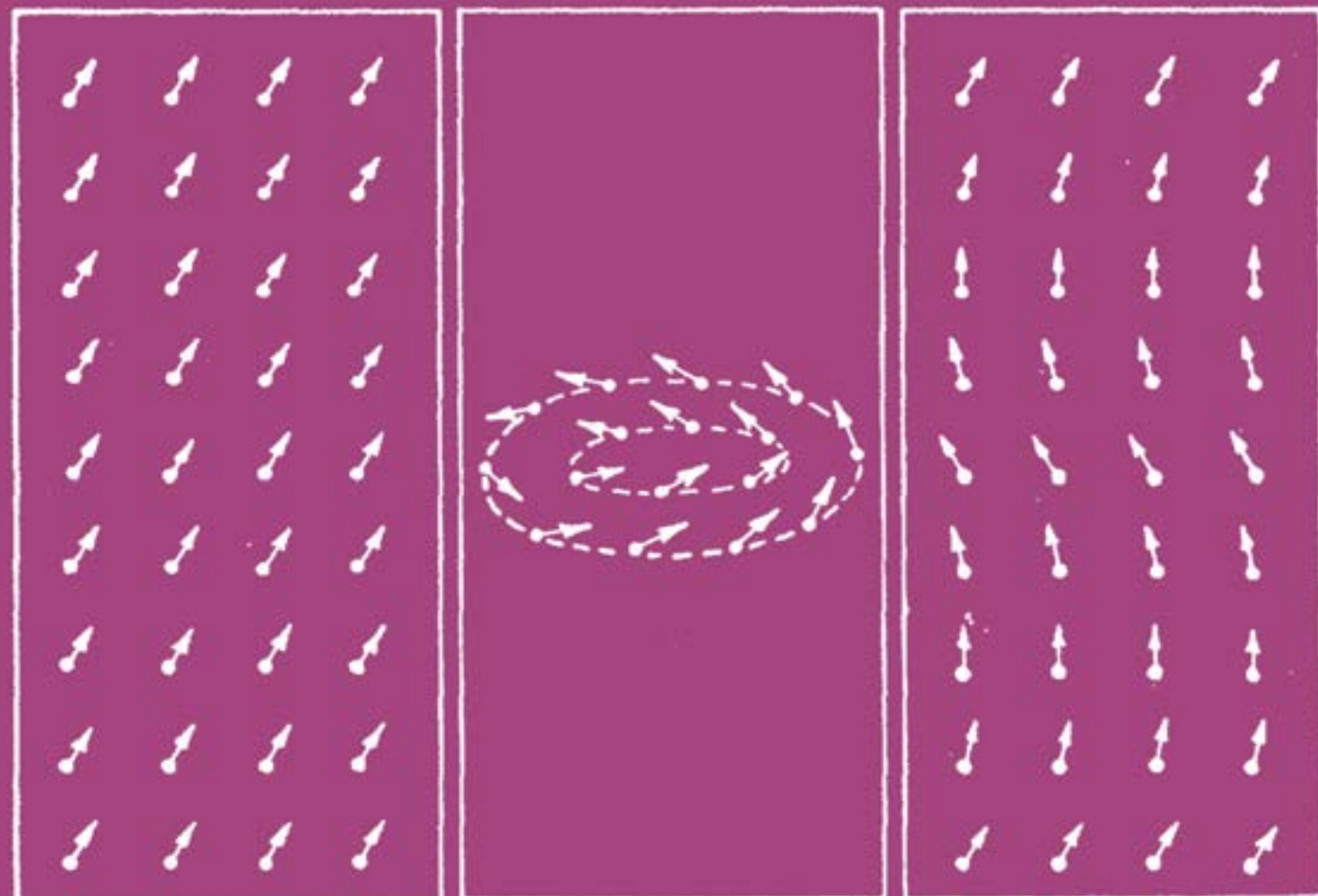


Rotation in Unison

1961

מקורות המגנטיות

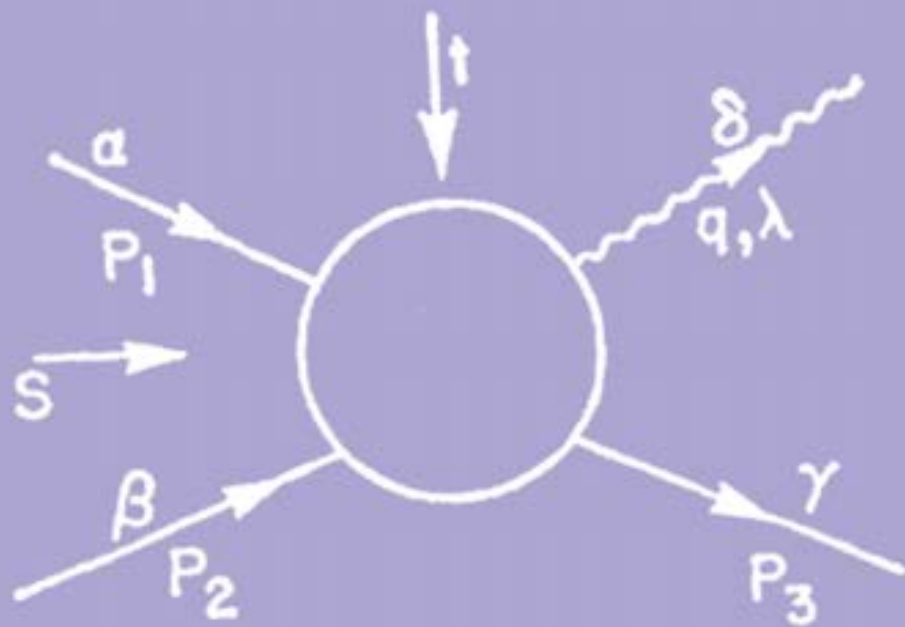
מדעני המכון פיתחו תיאוריה המסבירה כיצד משפיעים שינויים בשדה המגנטי על שינוי כיווניהם של חלקיקים מגנטיים זעירים המצויים בשדה. תיאוריה זו מסבירה, בין היתר, כיצד מבוצעת פעולת ההקלטה והמחיקה של סרט מגנטי (במחשבים, או ברשמי קול).



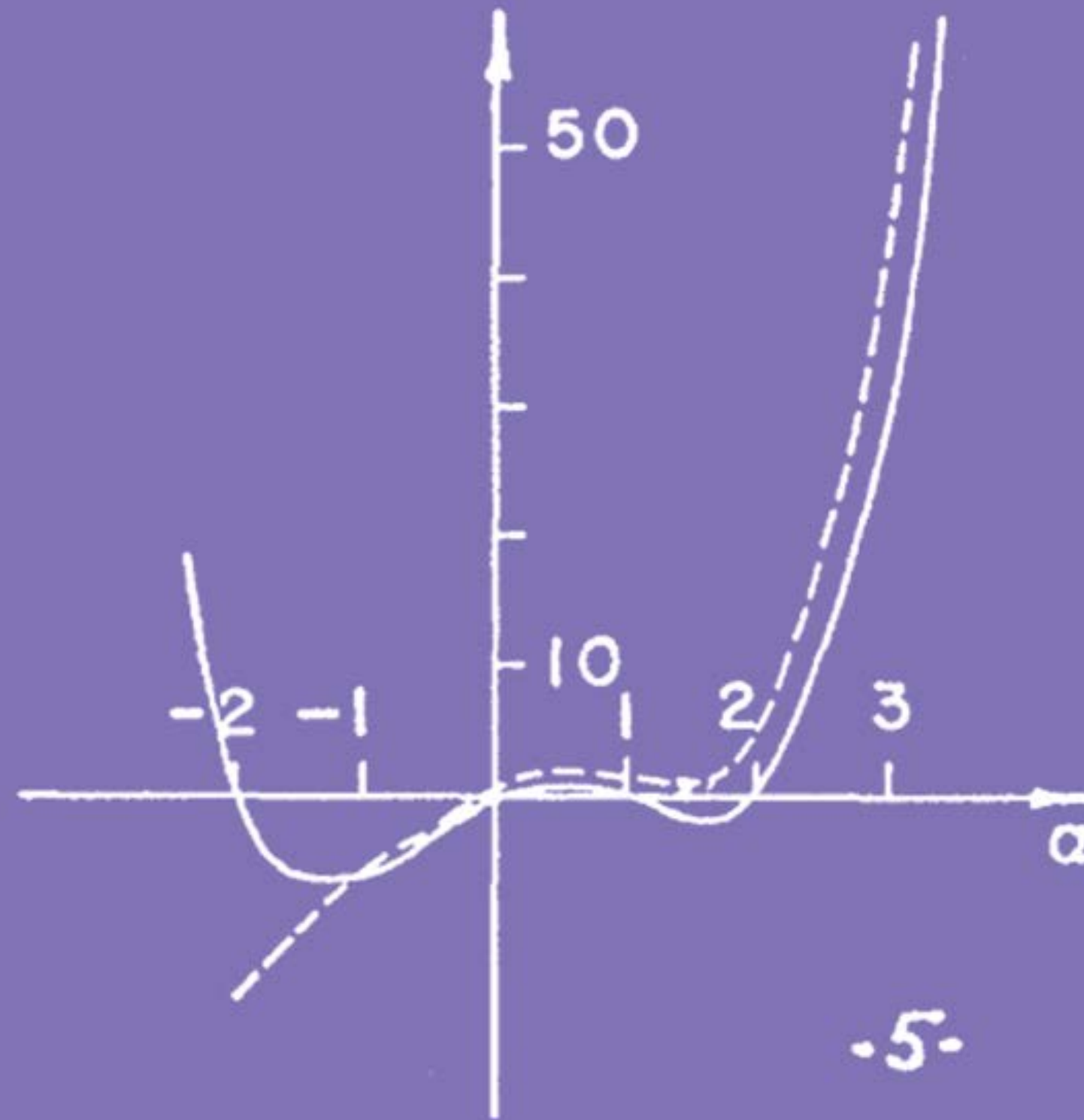
Buckling

Curling

מדעני המכון שעסקו בחקר תופעת ה"דואליות" בפיסיקה של חלקיקים הדרונים (פרוטונים, נייטרונים, פיונים, ועוד) פיתחו את הנוסחה המתארת את פיזורם של חלקיקים לאחר שהם מתנגשים זה בזה (לרבות המקרים שבהם שני החלקיקים המתפזרים שונים מהחלקיקים ה"מקוריים" שהתנגשו זה בזה). נוסחה מפורשת זו העניקה תנופה להבנת תהליכי הפיזור בין חלקיקים (הדרונים) מתנגשים.



100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע



1963

מקלפים גרעיניים

4- 1.32 1.312

0.89 5-

0.80

0.03
0

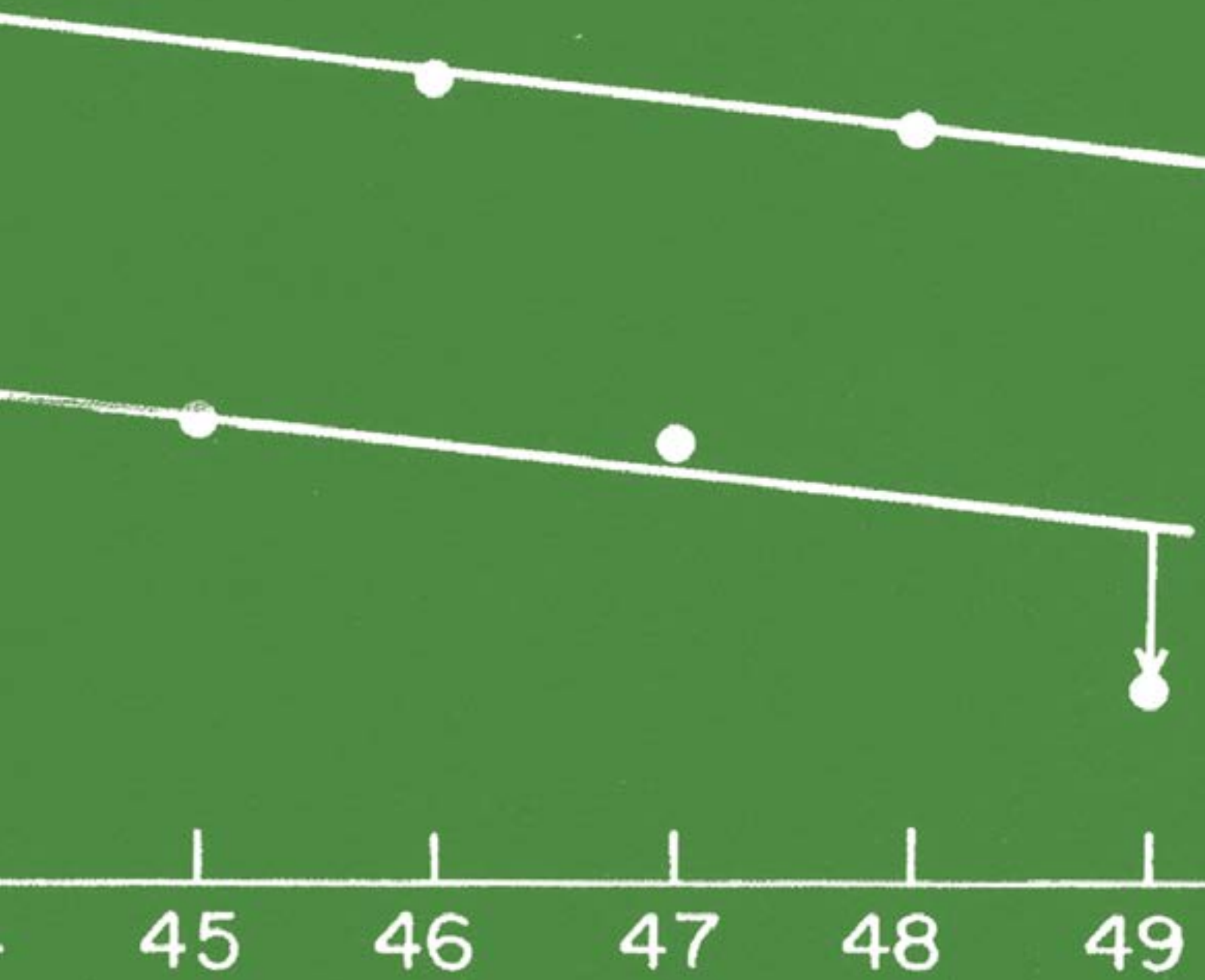
מדעני המכון תרמו להבנת הארגון הפנימי של גרעיני אטומים, ופיתחו דרך לבצע חישובים כמותיים של אנרגיות הגרעינים ולחזות את האנרגיה של גרעיני אטומים במצבים שונים.

גרעיני האטומים מכילים פרוטונים אשר נושאים מטענים חשמליים חיוביים הדוחים זה את זה, וכן ניטרונים שהם נייטרליים מבחינה חשמלית. הכוחות הגרעיניים החזקים הפועלים בין הפרוטונים לבין הניטרונים מתגברים על כוחות הדחייה החשמליים הפועלים בין הפרוטונים עצמם, ובכך הם מאלצים אותם לדור בכפיפה אחת, דבר שמאפשר את קיומם של גרעיני אטומים יציבים. מחקרים שבוצעו במקומות שונים בעולם העלו, כי מרכיבי הגרעינים האטומיים מאורגנים במעין "קליפות" המזכירות קליפות בצל, בדומה לדרך שבה מאורגנים האלקטרונים הסובבים סביב הגרעין ("מודל הקליפות"). הפרוטונים והניטרונים נעים ללא הרף סביב השדה הממוצע שיוצרים כל החלקיקים שבגרעין (כתוצאה מפעולתם של הכוחות השונים אשר פועלים עליהם).

כוחות אלה נמדדו בניסויים שונים, ונמצא שהם חזקים מאוד וטווח פעולתם קצר מאוד. לכן אי-אפשר להשתמש בהם בתיאוריה של מודל הקליפות. דבר זה סיכל את מאמצייהם של מדענים רבים בעולם אשר ניסו לחשב את אנרגיית הגרעין. התברר, שיש צורך בחישובים מסובכים ביותר כדי לקבל מהכוחות החזקים כוחות שאפשר להשתמש בהם במודל הקליפות. למעשה, עד היום אין פתרון מספק לשאלה זו.

אך מדעני המכון פיתחו שיטה שמאפשרת להתגבר על הקושי הזה. בשיטה זו מתקבלים "הכוחות האפקטיביים" המתאימים למודל הקליפות מאנרגיות של גרעינים אשר נמדדו בניסויים. בהסתמך על תוצאות של כמה מדידות הסיקו המדענים מה טיבם וגודלם של כוחות אלה. כך עלה בידם לבא בהצלחה לתוצאות של ניסויים שונים.

מדעני המכון פיתחו נוסחה פשוטה לחישוב המאסות של קבוצות גרעינים. שיטת חישוב זו התקבלה בכל העולם, ומאז - זה עשרות שנים - היא משמשת כלי חישוב בסיסי בפיסיקה גרעינית, המאפשר, בין היתר, לחזות את האנרגיה של גרעיני אטומים אשר נתונים במצבים שונים. כמה חישובים בתחום זה מתבצעים במחשבי ענק, ותוצאותיהם מתאימות לתוצאות הניסויים.



$19K_{21}^{40}$	$17Cl_{21}^{38}$	Cl^{35}
$d_3^3 f_7$	$d_3 f_7$	

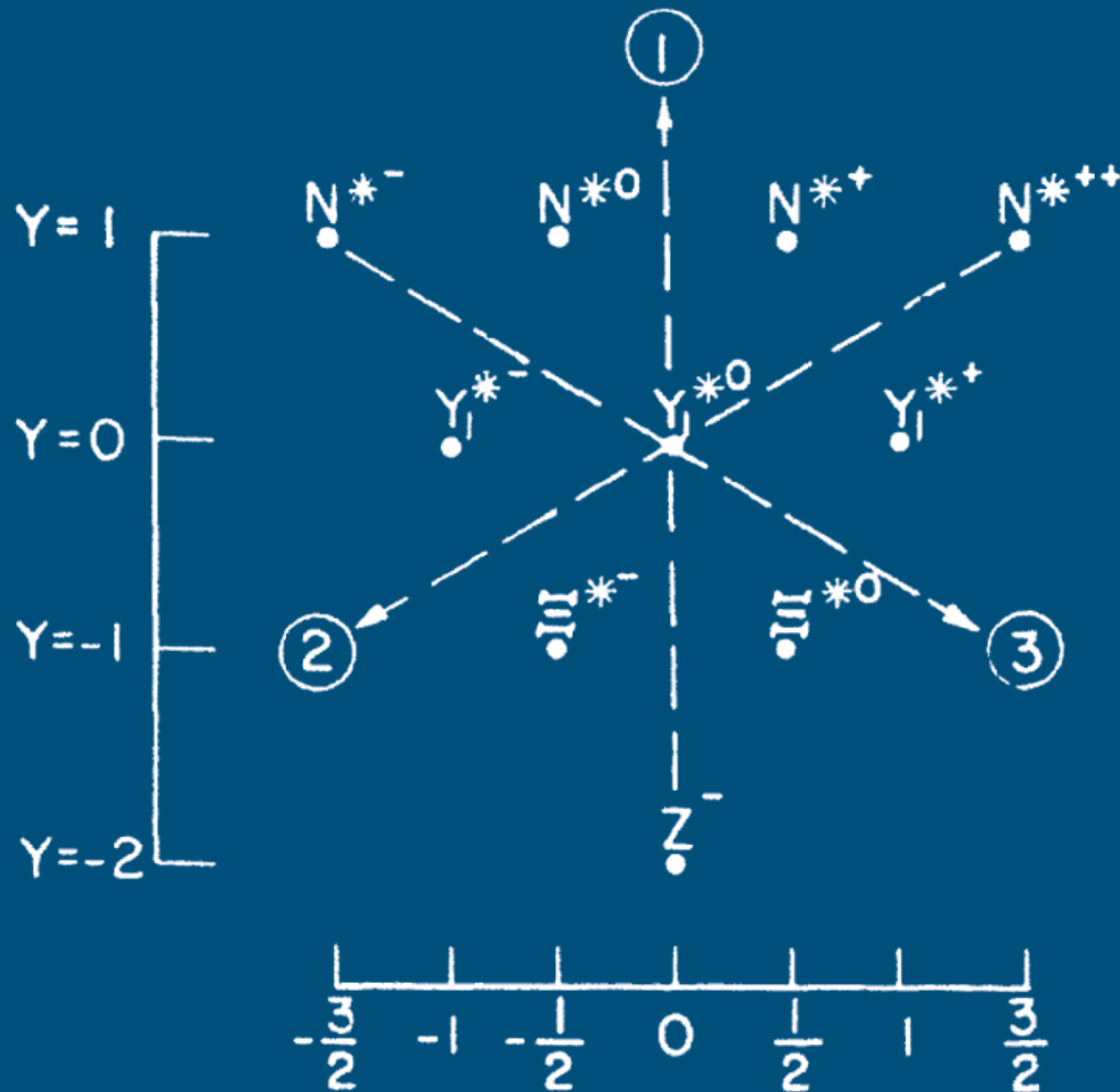
100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע

EXPERIMENTAL	CALCULATED	P. R. 100
--------------	------------	-----------

בשנות ה-60 של המאה ה-20 נתגלו כ-100 חלקיקי יסוד בטבע, חלקם נפוצים יותר וחלקם נדירים ביותר, וכמעט כולם בעלי אורך חיים קצרצר, שבסופו הם מתפרקים לחלקיקים אחרים. חלקיקים אלה נקראו 'הדרונים', והמוכרים שבהם הם הפרוטון והניטרון, מהם מורכבים גרעיני כל האטומים. קיומם של חלקיקים כה רבים ללא סדר וללא פשר היווה חידה מרכזית בתחום הפיזיקה הבסיסית. מדעני מכון ויצמן תרמו רבות למציאת חוקי סימטריה הקושרים בין חלקיקים אלה, ומאפשרים ניבוי כמה מתכונותיהם של החלקיקים הידועים, והסקת מסקנות בדבר קיומם ותכונותיהם של חלקיקים חדשים. מאוחר יותר, כאשר הוצע המודל הקובע שכל החלקיקים האלה מורכבים משלושה סוגים של אבני בניין יסודיות יותר המכונות "קווארקים", היו מדעני המכון בין הראשונים שהציעו מבחנים ניסיוניים להשערה זו, ורבים ממבחנים אלה סיפקו עדויות מסייעות חשובות לגיבוש ההכרה שמודל הקווארקים אכן מייצג את מבנה ההדרונים.

$$(\pi^- p | Y_1^{*0} K^{*0}) = -A/\sqrt{2}.$$

100 אבני דרך בחקר הפיזיקה במכון ויצמן למדע



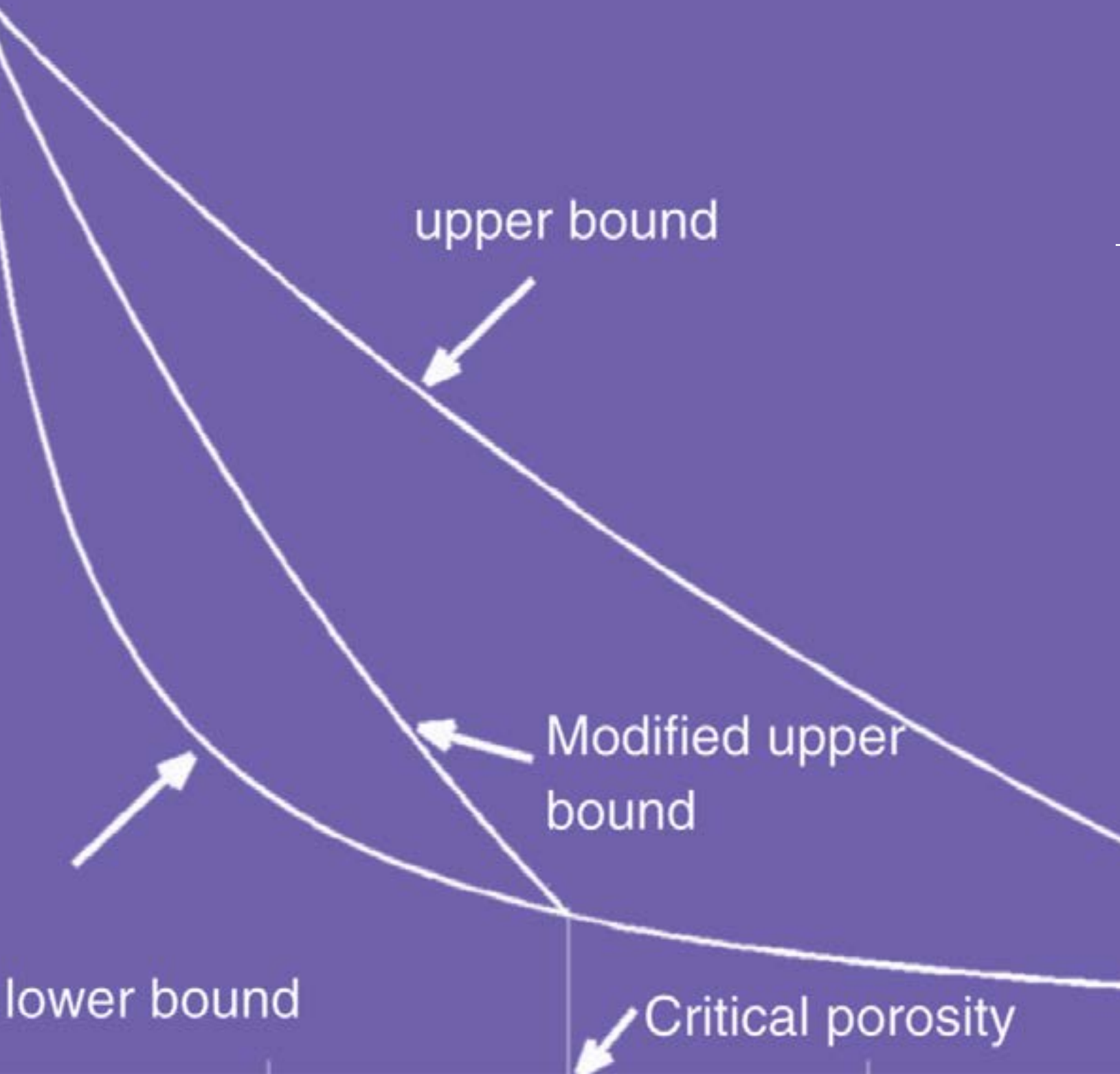
1964

חומר ועוד חומר

חומרים מרוכבים (הבנויים משני חומרים, או יותר) מציבים אתגר חישובי: כיצד לחשב את תכונותיהם הכוללות, על בסיס תכונות המרכיבים וצורתם. מדובר במטלה מורכבת ומסובכת מאוד, ובמקרים רבים נאלצו המדענים להסתפק בתוצאות מקורבות. בדרך כלל, צורתן של יחידות החומר אינה ידועה, והנתון הברור העיקרי הוא היחס הכמותי (הנפחי) בין החומרים השונים. מדעני המכון ושותפיהם למחקר חישובי ומצאו חסמים עליונים ותחתונים לתכונות הכוללות של חומרים מרוכבים - בהתאם לצורות האפשריות השונות של יחידות החומר הבסיסיות (בהנחה שהנתון הידוע היחיד הוא יחסי הנפח בין החומרים). מודל זה מגדיר את תחום השוני האפשרי של תכונות החומר המרוכב. תגלית זו מסייעת בתכנונם של חומרים מרוכבים, שתכונותיהם הרצויות מוגדרות מראש.

$$\frac{1}{K^*_0} = \sum_{r=1}^{r=n} \frac{v_r}{K_r},$$

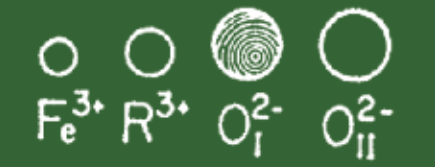
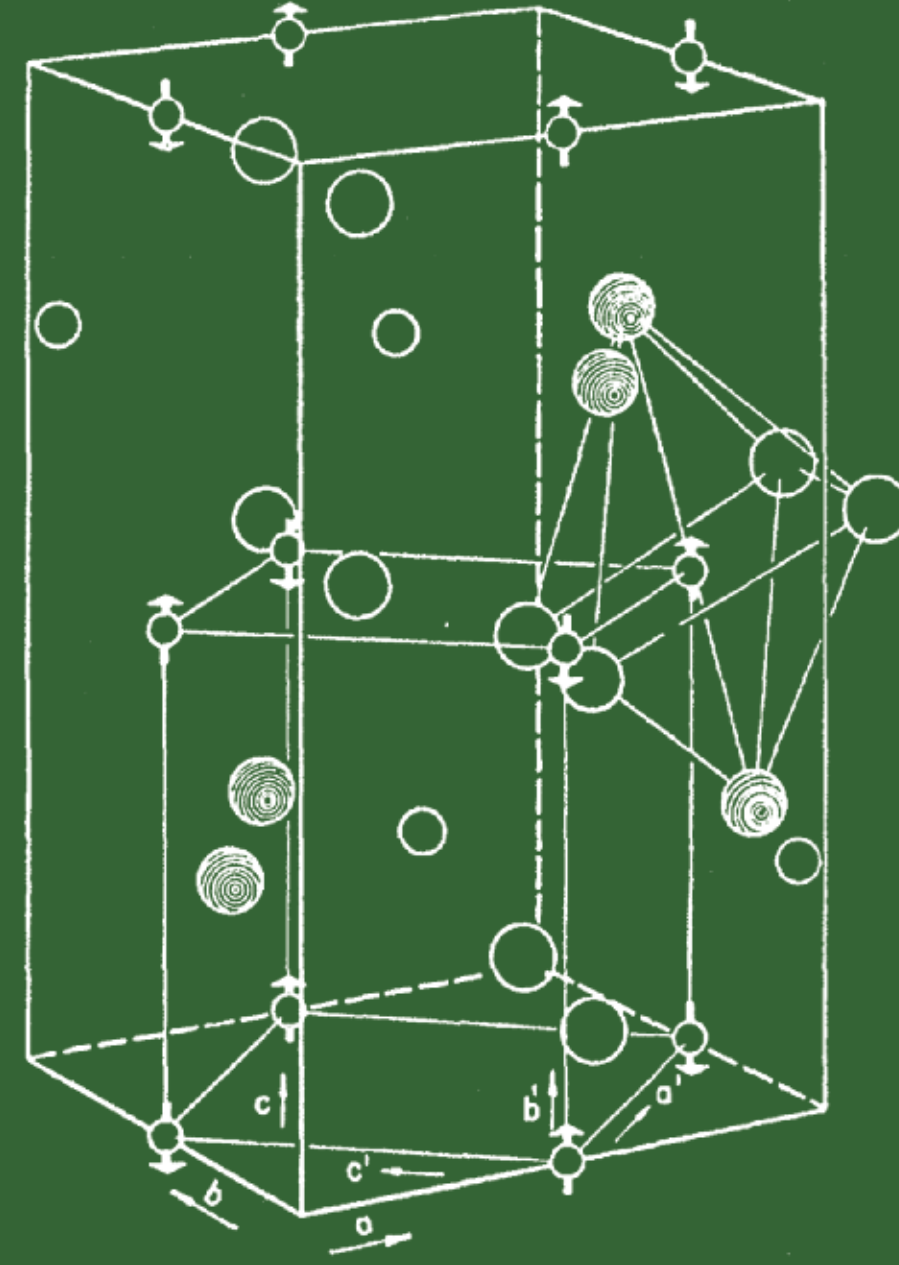
100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע



1966

קולטים ופולטים ללא רתע

מדעני המכון תיכננו ובנו מתקן למדידת "אפקט מוסבאור", המתאר את תופעת הקליטה והבליעה של קרינה ללא רתיעה. מדידות אלה חשובות למדידת תכונותיהם של חומרים מגנטיים, ולהבנת מעברי פאזה שונים המתחוללים בחומרים מגנטיים. מדעני המכון אשר השתמשו במכשיר זה אימתו תורות כיול ליד מעברי פאזה בחומרים מגנטיים. על בסיס התיכנון של מדעני המכון נבנו ונמכרו מתקנים כאלה בכמויות גדולות, למדענים ולטכנאים רבים, בכל העולם. מתקן זה היה אחד ממוצרי הבסיס של אחת מהתעשיות הישראליות המתקדמות הראשונות.

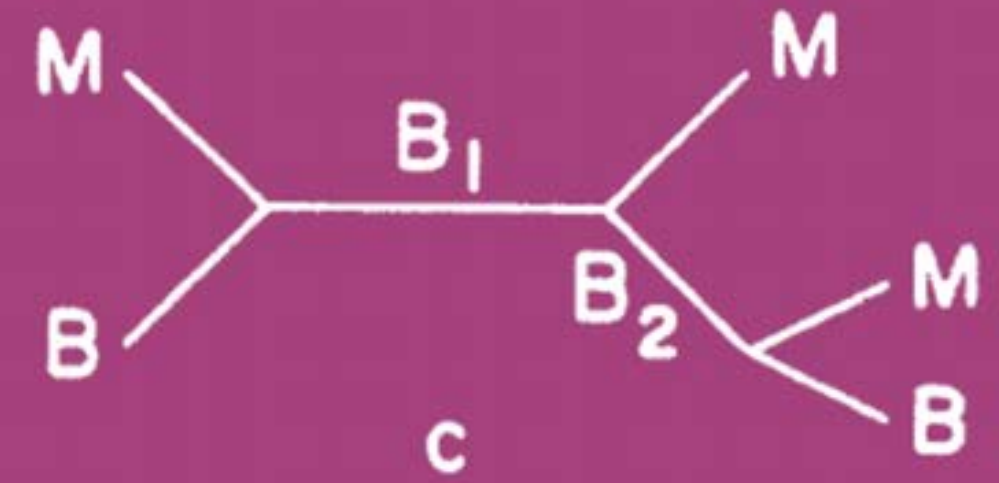
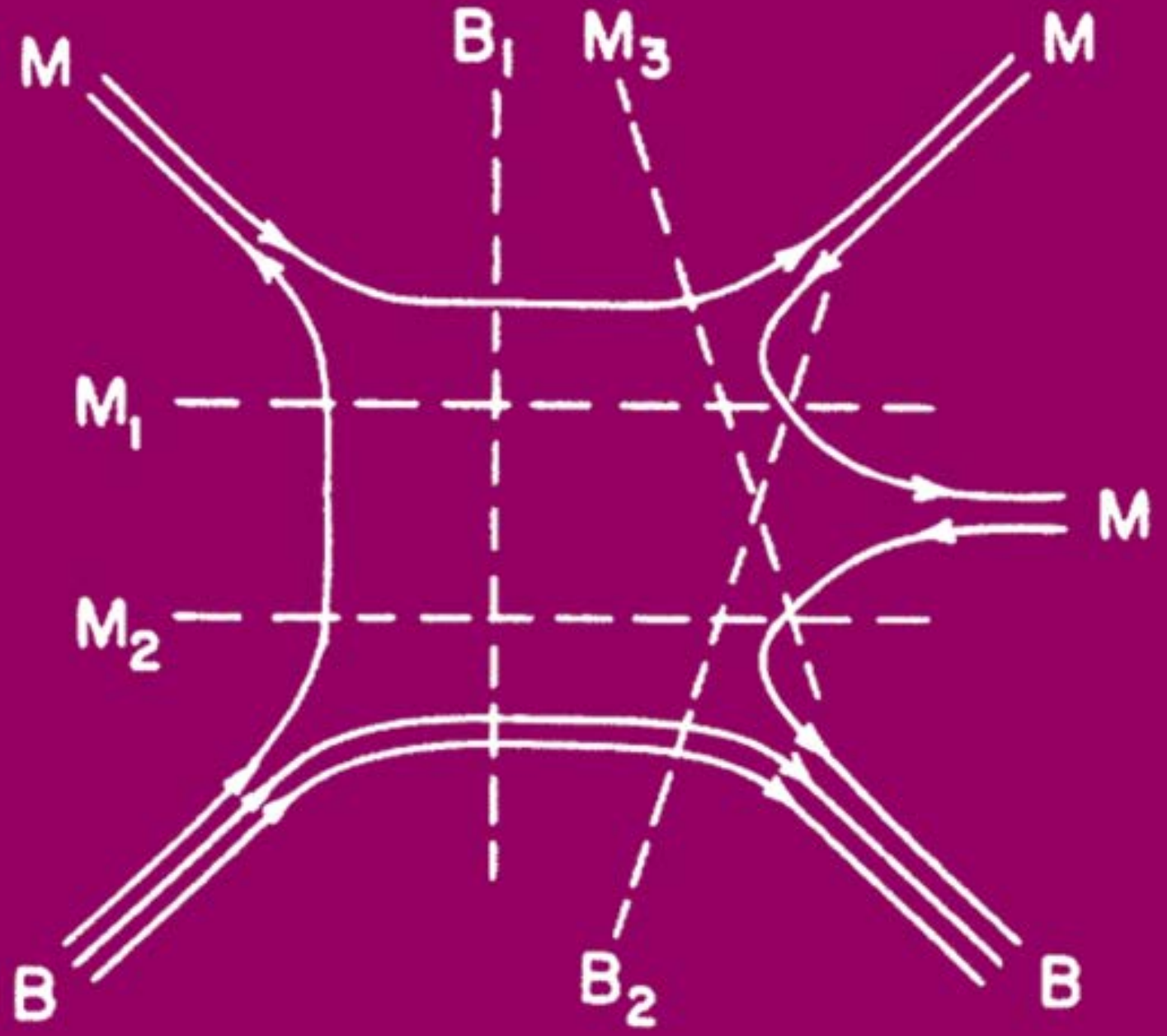


100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע

1968

דואליות משבר זהות

כאשר שני חלקיקי יסוד מתנגשים זה בזה, עשוי להתחולל תהליך שבו נוצרים שני חלקיקים חדשים (בדומה לתהליך כימי). במשך שנים חשבו הפיסיקאים שתהליך כזה יכול להתחולל בשתי דרכים שונות: או ששני החלקיקים יוצרים לזמן קצר חלקיק מורכב וזה מתפצל מיד לשני חלקיקים חדשים, או שאחד החלקיקים משגר לעבר החלקיק השני שבר חלקיק, ועקב כך משנה החלקיק המקורי את אופיו, והחלקיק השני, הקולט את המסר, משנה גם הוא את תכונותיו. בשני המקרים יהיו תוצרי ההתנגשות שונים מהחלקיקים המקוריים. למרבה ההפתעה, שני סוגי התהליכים התגלו כשתי פנים שונות של אותו תהליך, ונוצרה דואליות בתיאור ההתנגשויות שיכלו להיות מוסברות בעת ובעונה אחת כתהליך מהסוג הראשון או כתהליך מהסוג השני. מדעני המכון היו בין המובילים בעולם בתחום מחקר זה. הם היו הראשונים שהסבירו מה מתחולל בתהליכים שבהם לא מתרחש שינוי זהות בחלקיקים המקוריים והסופיים. בהמשך הצליחו להסביר את תופעת הדואליות בעזרת דיאגרמות המתארות תנועת קווארקים (שהם אבני הבניין אשר מהם מורכבים החלקיקים). הם גם היו הראשונים שפיתחו נוסחאות מתמטיות המתארות את תופעת הדואליות במלואה. כל אלה הובילו, שנים רבות לאחר מכן, לפיתוח תורת המיתרים, שהיא אחת מאבני הפינה של פיסיקת החלקיקים העכשווית.



100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע

1969

עמוס דהשליט

פרופ' עמוס דה-שליט היה אחד המדענים הבולטים בקרב חבורה של צעירים ילידי הארץ אשר לאחר מלחמת השחרור הקדישו עצמם ללימודי הפיזיקה ולהוראתה, וזכו למוניטין בקנה מידה בין-לאומי. אבא אבן אמר עליו ש"פרק חייו הקצר היה כקרן אור בתולדות ישראל". עמוס נולד בירושלים בשנת 1926, קיבל תואר מוסמך למדעים מהאוניברסיטה העברית בירושלים ב-1949, ותואר דוקטור לפילוסופיה מהמכון הטכנולוגי הפדראלי בשווייץ (E.T.H.) ב-1951. בשנים 1947-1949 שירת בחמ"ד (חיל המדע של צה"ל). בשנים 1952-1954 השתלם באוניברסיטת פרינסטון, במכון לטכנולוגיה של מסצ'וסטס MIT, ובמכון לחקר האטום שבסקליי שבצרפת. לאחר שובו לארץ התמנה בשנת 1954 לראש המחלקה החדשה לפיזיקה גרעינית במכון ויצמן למדע. במשך עשר שנים כיהן בתפקיד זה, ועיצב, ביסס והרחיב את המחלקה, שהיא כיום אחת המחלקות המרכזיות במכון, ומן הידועות בעולם כולו. במקביל לתפקיד זה כיהן כיועץ מדעי למשרד הביטחון. בשנת 1961 התמנה למנהל המדעי של המכון, ובתפקיד זה שימש עד לשנת 1963. לאחר מכן כיהן שנתיים נוספות (1966-1968) בתפקיד המנהל הכללי של המכון. בשנת 1963 נבחר חבר האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים. בשנת 1965 זכה, יחד עם פרופ' יגאל תלמי יבדל"א, בפרס ישראל למדעים מדויקים על מחקר בנושא "מודל הקליפות בפיזיקה גרעינית" ועל ספרם המשותף בנושא זה. ב-1969 התמנה חבר כבוד של האקדמיה האמריקאית למדעים.

בשנת 1964 התמנה ליו"ר הוועדה לקידום הוראת מדעי הטבע והמתמטיקה, שטח שלו התמסר בשנים האחרונות לחייו. בתחום זה השקיע פרופ' דה-שליט עבודה רבה ומרץ רב. הוא שקד על שינויים בשיטות ההוראה ובתוכניות הלימודים בתחום מדעי הטבע והמתמטיקה בתי-הספר התיכוניים. בשנת 1968 הקים את המחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן ועמד בראשה.

מותו, בגיל 43, הישרה אבל כבד במכון ויצמן ובקרב כל מוקיריו ומכרייו בארץ ובעולם.



100 אבני דרך בחקר הפיזיקה במכון ויצמן למדע



ראש הממשלה

1969

מותר האדם הטעות

מר דוד בן-גוריון היקר

למען הפשטות הייתי חצה להניח שדי, לצורך הדיון שלם, לברר באיזו מידה יכולה מכונה להחליף אדם חושב באחת מהפונקציות שלו בלבד. גוון הפונקציות יכול אולי להתקבל אז, על-ידי ציחוף של מסונות עם מכונה המתאמת בין פעולותיהן.

אני מניח שבשיחתנו התכוונו שנית ליכולתה או אי יכולתה של המכונה להחליף את האדם בשלב עיבוד האינפורמציה בלבד. השלבים של קבלת האינפורמציה ומסירתה הם בעלי אופי טכני בלבד ואינם בעלי חשיבות לעצם הדיון.

הפיסיקה מכירה בגדלים המקבלים משמעות רק כשהמחבר הוא במספר רב של מערכות. הטמפרטורה של גז, למשל, היא גודל האופייני למספר רב של אטומים ביחד, ואין כל משמעות לדבר על הטמפרטורה של "אטום יחיד". אני יכול לתאר לעצמי שבהפעלת המתואמת של מספר רב של מכונות עלולות להתגלות תופעות שאי אפשר ליחסן למכונה זו או אחרת, בדיוק כשם שאי אפשר לייחס את הטמפרטורה לאטום זה או אחר יתכן שמה שאנו קוראים בשם "רוח" זוהי תכונה שכוו, אך אם כך מקורה בכל זאת בתהליכים פיסיים בגוף בדיוק כשם שמקורה של הטמפרטורה בתנועה המכנית של המולקולות.

עמוס דה-שליט

ראש הממשלה

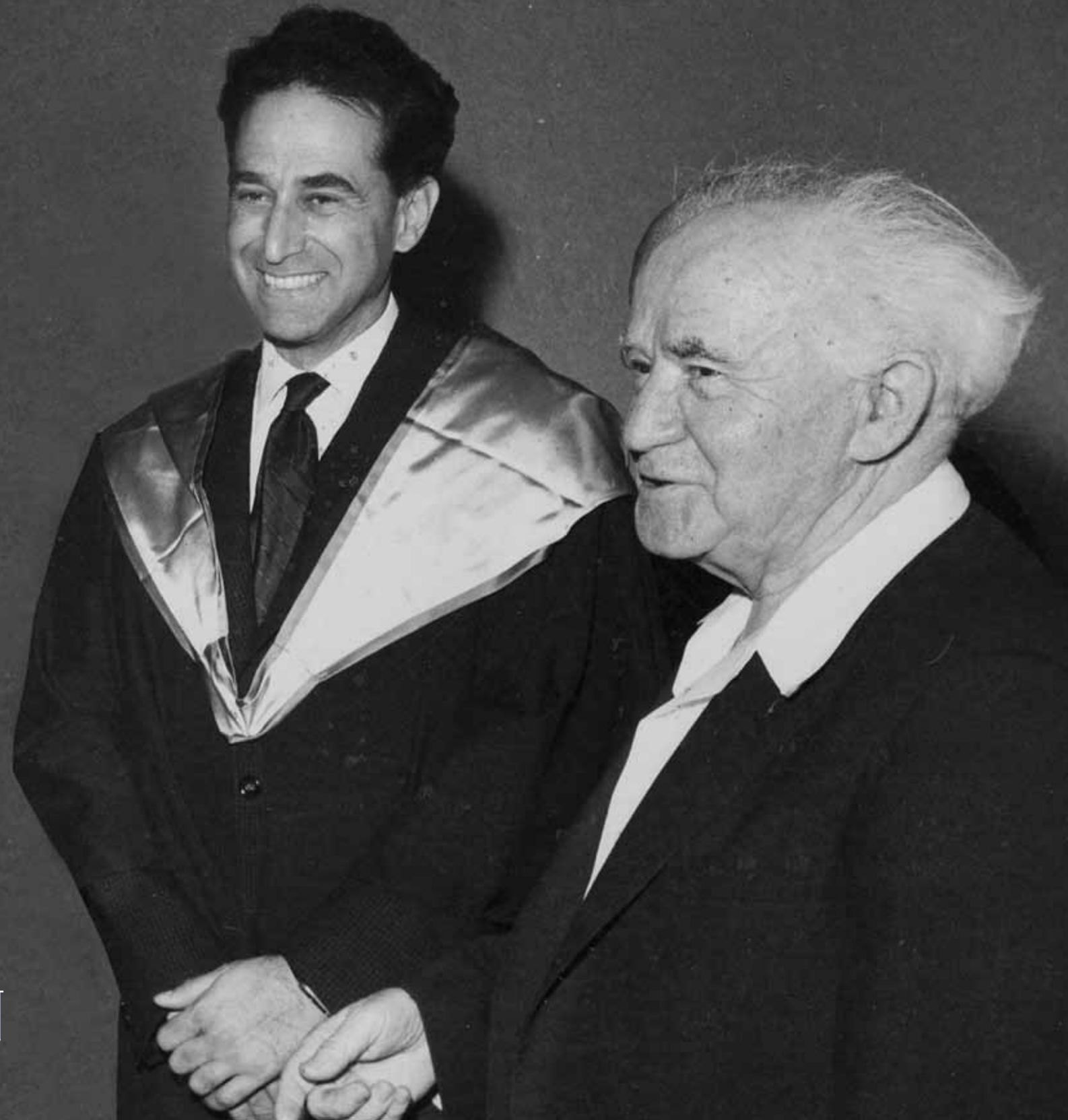
ירושלים, י"א בשבט תשי"ז

13 בינואר 1957

לד"ר עמוס דה-שליט - שלום וברכה,

השיחה הקודמת בינינו לא יוצאת מזיכרוני. מטרידה אותי עמדתך כפיסיקאי בשאלת ההכרה והשכל של בן-האדם. האמנם מתאר אתה לעצמך כי אפשר לעשות שתי מכונות שיחליפו ביניהן מכתבים על ענייני אמנות, פילוסופיה ומדע, כחגמת אגרות שפינוזה, או תיתכן מכונה שבנסיעתה בחלקי עולם שונים, תאסוף המון עובדות מפורטות ותסיק מהן תורתו של דרווין? המתאר אתה לעצמך מכונה שתחבר ספר איוב או "המשתה" של אפלטון או תורת היחסות של איינשטיין?

דוד בן-גוריון
ראש הממשלה



בכבוד רב,

2.3/2.3 - נאור

100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע

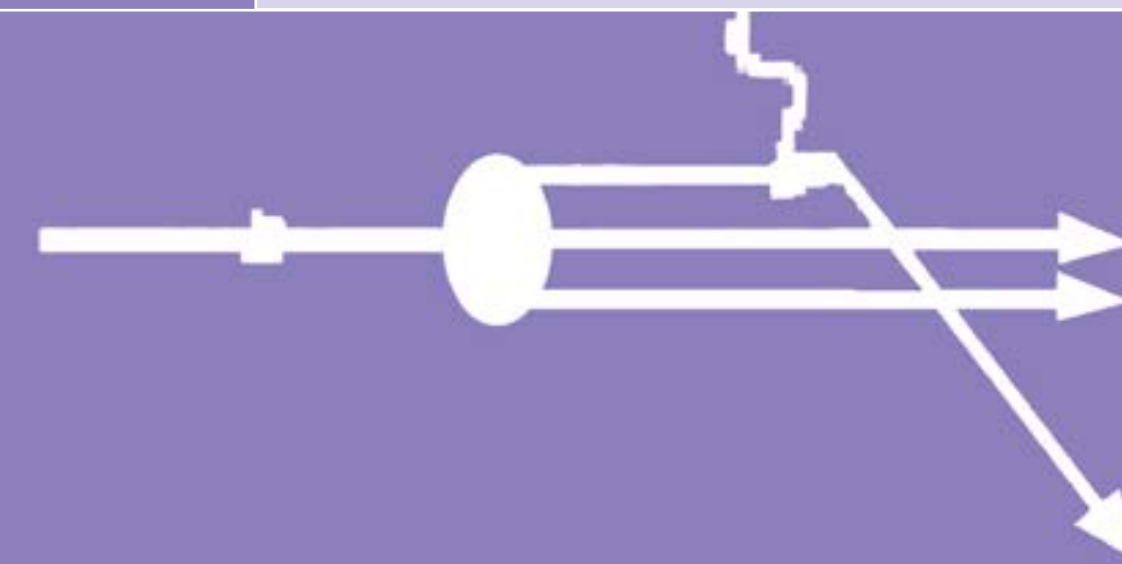
מכפלות זרמים ומבחן סף

מדעני המכון חקרו תורות כיול לא-אביליות לצורך תיאור יחסי גומלין בין חלקיקי חומר שביניהם פועל הכוח החזק, בעוצמות שונות. על בסיס מחקרים אלה הציעו המדענים חוק אשר מתאר התנהגות של מכפלות זרמים ליד קונוס האור, בקשר לניסיונות פיזור של אלקטרונים על גרעינים.

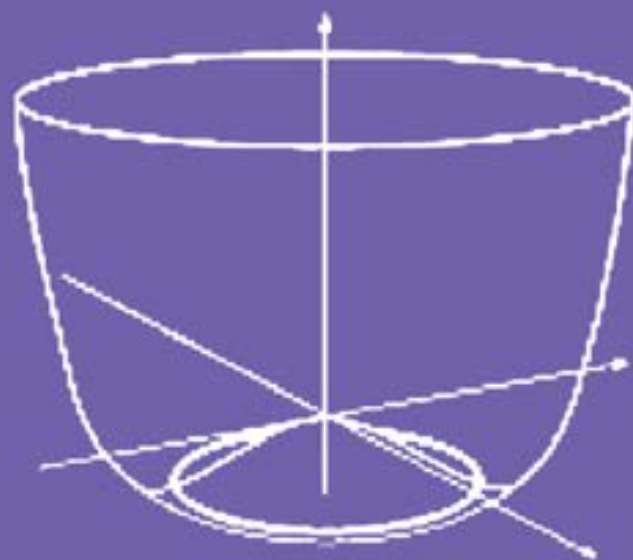
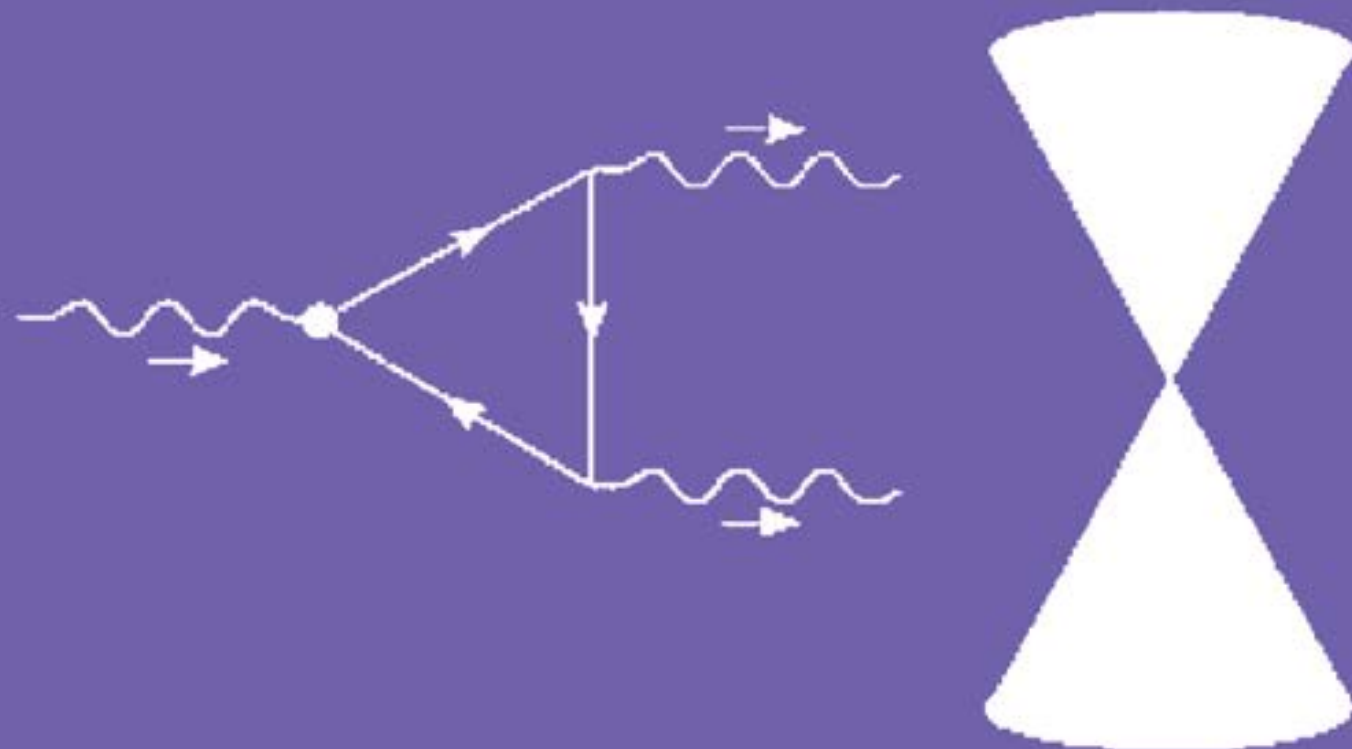
בהמשך מצאו את הביטוי המלא לאנרגיה ולתקיפה במודלים מסוימים, כמכפלה של זרמים. ביטוי זה משמש, בין היתר, לחקר תורות מיתרים.

לעבור שנים אחדות פיתחו המדענים שיטה לבחינת מודלים מוצעים שונים באשר למבנה החומר. שיטה זו - אשר מבוססת על "משוואות האנומליה", המתארות את הקשר שבין תכונותיהם של זרמי הכוח האלקטרו-מגנטי לבין הכוח החלש - משמשת כלי מדעי מרכזי בתחום זה. מודלים מוצעים, שאינם מצליחים לעבור את ה"סף" של שיטת הבחינה של מדעני המכון, נפסלים; ועם זאת, אין במעבר ה"סף" הזה כדי להוכיח את נכונותו של מודל מוצע (לשם כך נחוצות בחינות נוספות).

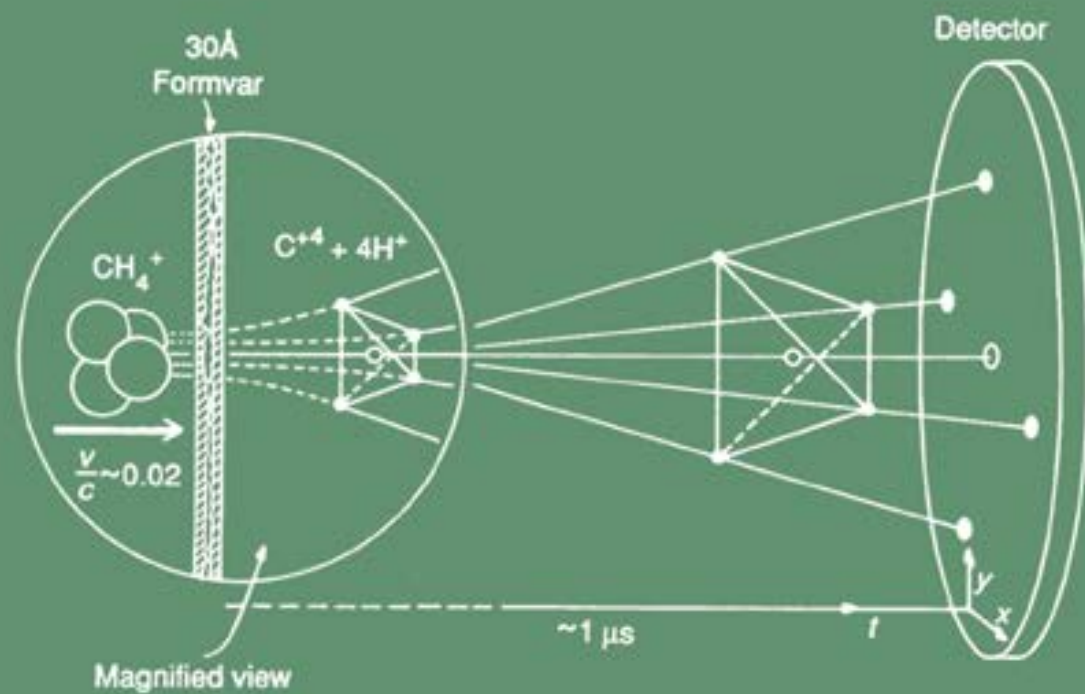
לאחר מכן חישוב המדענים מאסות של מצבים במודלים דו-ממדיים, וכן פיזורים שונים.



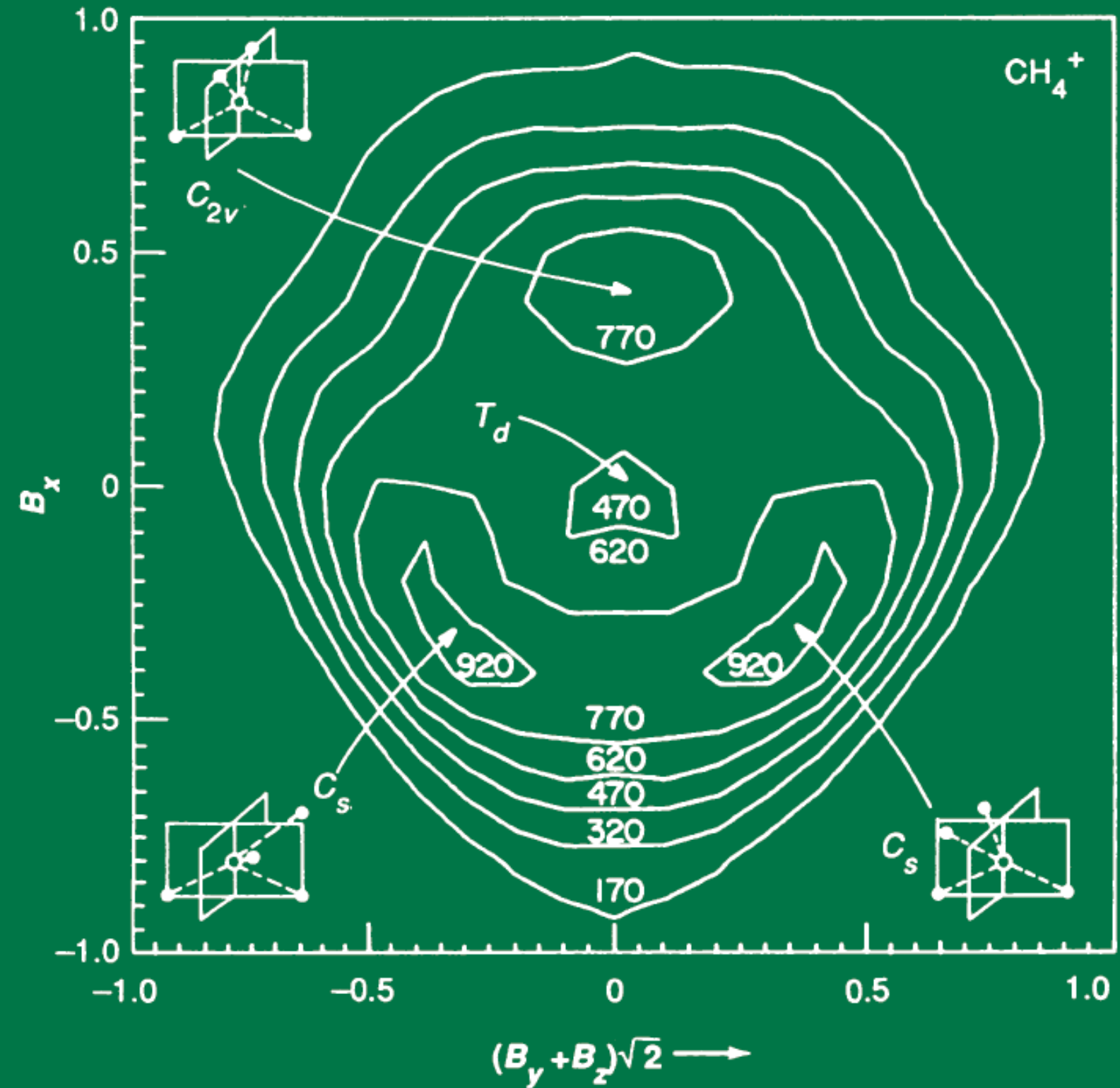
100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע



המבנה המרחבי של מולקולה הוא אחד הגורמים החשובים לדרך התיפקוד (הכימית והפיסיקלית) שלה. מדעני המכון פיתחו שיטת דימות חדשה, המאפשרת לגלות את מבניהן של מולקולות שונות. הטכניקה החדשה מבוססת על תופעה הקרויה התפוצצות קולונית. היא מספקת תמונות גיאומטריות ישירות של מולקולות בודדות, מבלי להזדקק לשום הנחות מוקדמות. טכניקה זו איפשרה קביעה של כמה מבנים מולקולריים. החוקרים השתמשו בשיטה זו גם כדי לבחון את הכיוויות הבורגית של מולקולות, כלומר, אם הן דמויות בורג ימני או בורג שמאלי. לתכונת הכיוויות של מולקולות נודעת חשיבות רבה, הן בתחום התעשייה והן בתחומי מדעי החיים ופיתוח תרופות חדשות.



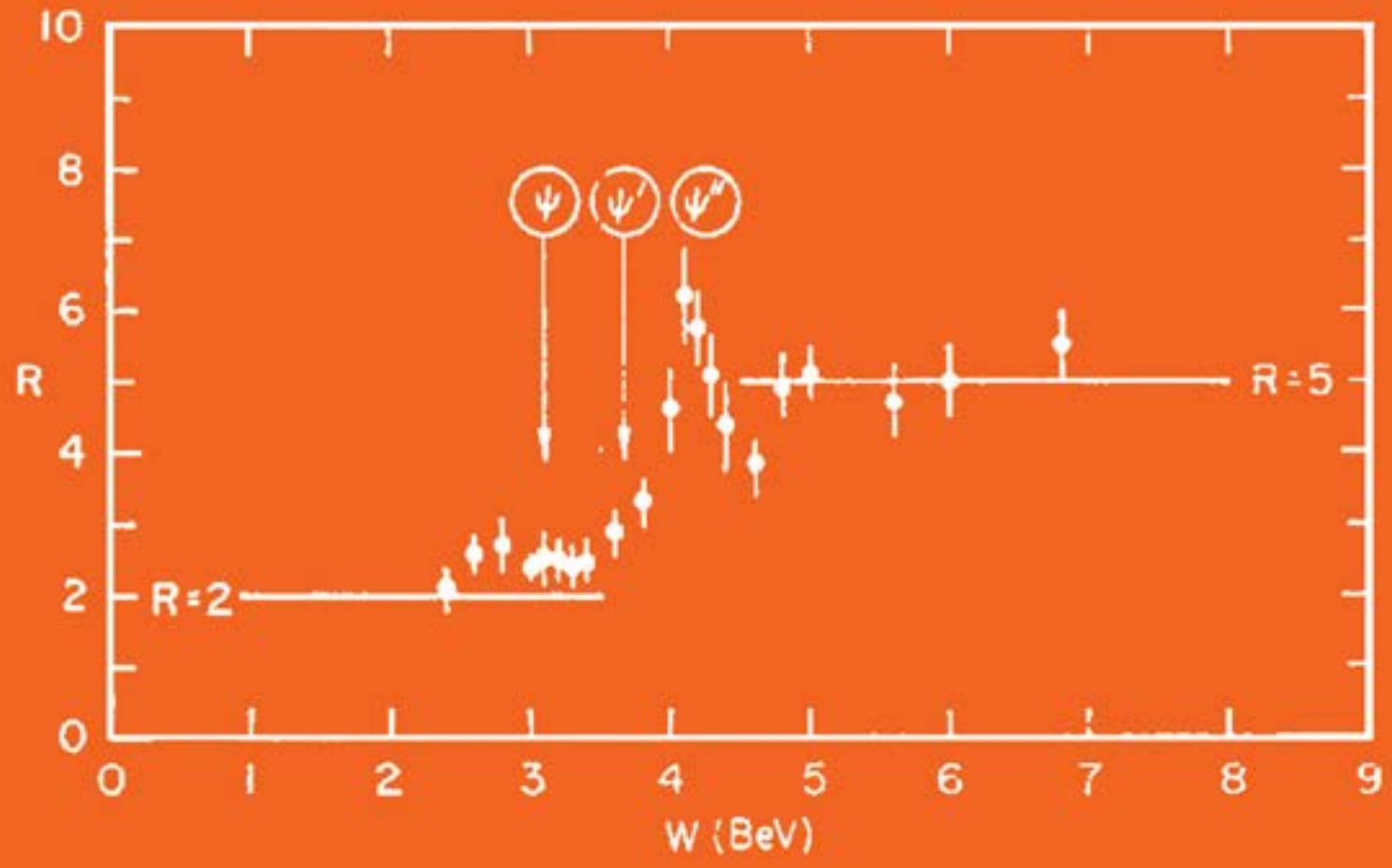
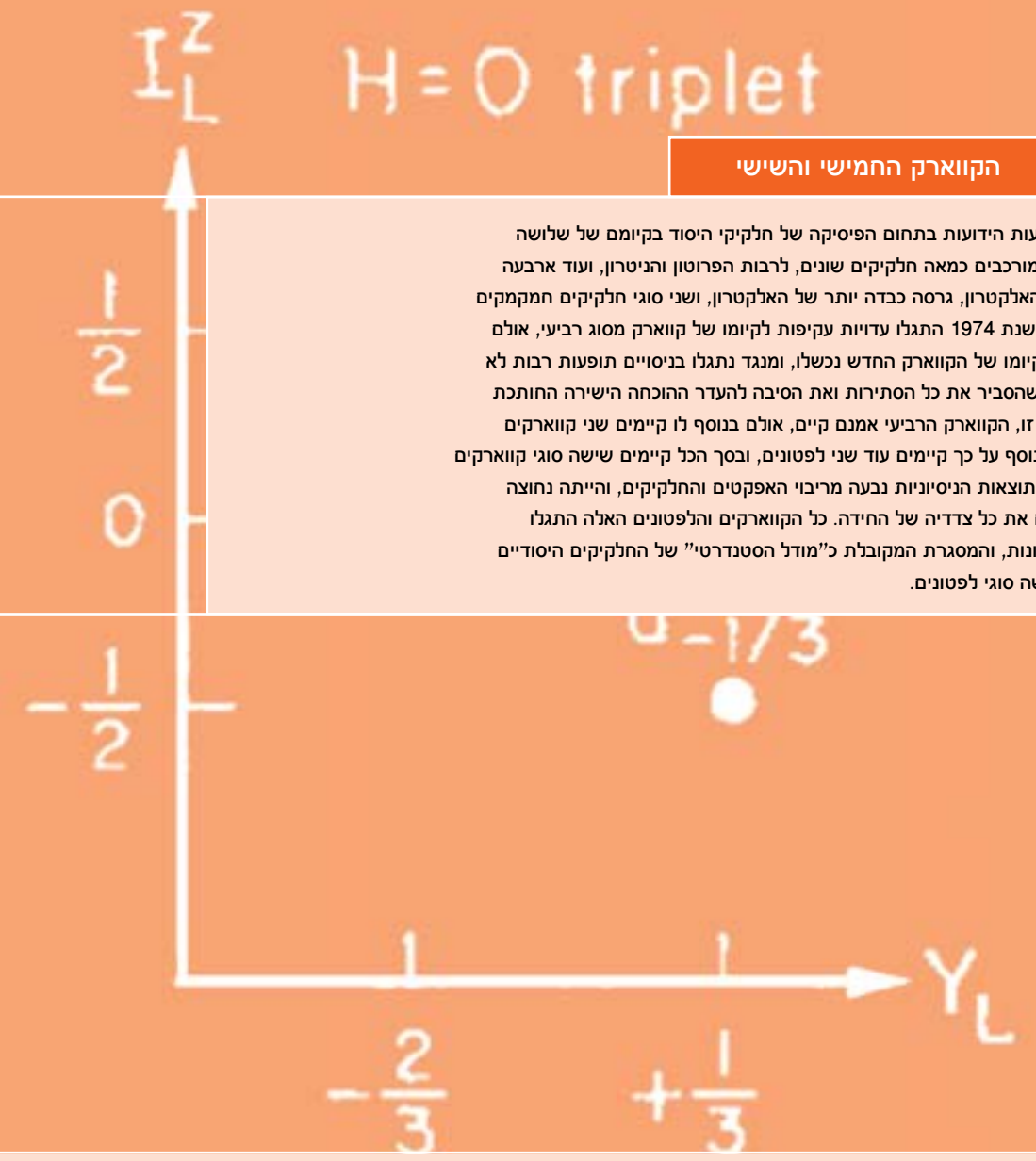
100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע



1975

הקווארק החמישי והשישי

עד שנת 1974 הוסברו כל התופעות הידועות בתחום הפיזיקה של חלקיקי היסוד בקיומם של שלושה חלקיקים הקרויים קווארקים, שמהם מורכבים כמאה חלקיקים שונים, לרבות הפרוטון והניטרון, ועוד ארבעה חלקיקים הקרויים "לפטונים", שהם האלקטרון, גרסה כבדה יותר של האלקטרון, ושני סוגי חלקיקים חלקיקים נייטרליים - חלקיקי הניטרינו. בסוף שנת 1974 התגלו עדויות עקיפות לקיומו של קווארק מסוג רביעי, אולם כל הניסיונות למציאת עדות ישירה לקיומו של הקווארק החדש נכשלו, ומנגד נתגלו בניסויים תופעות רבות לא מוסברות. מדען מהמכון הציע פתרון שהסביר את כל הסתירות ואת הסיבה להעדר ההוכחה הישירה החותכת לקיום הקווארק הרביעי. לפי תיאוריה זו, הקווארק הרביעי אמנם קיים, אולם בנוסף לו קיימים שני קווארקים נוספים המכונים "עליון" ו"תחתון", ונוסף על כך קיימים עוד שני לפטונים, ובסך הכל קיימים שישה סוגי קווארקים ושישה סוגי לפטונים. המבוכה נוכח התוצאות הניסיוניות נבעה מריבוי האפקטים והחלקיקים, והייתה נחוצה מערכת נוספת של ניסויים כדי לפענח את כל צדדיה של החידה. כל הקווארקים והלפטונים האלה התגלו בניסויים במשך עשרות השנים האחרונות, והמסגרת המקובלת כ"מודל הסטנדרטי" של החלקיקים היסודיים אכן כוללת שישה סוגי קווארקים ושישה סוגי לפטונים.



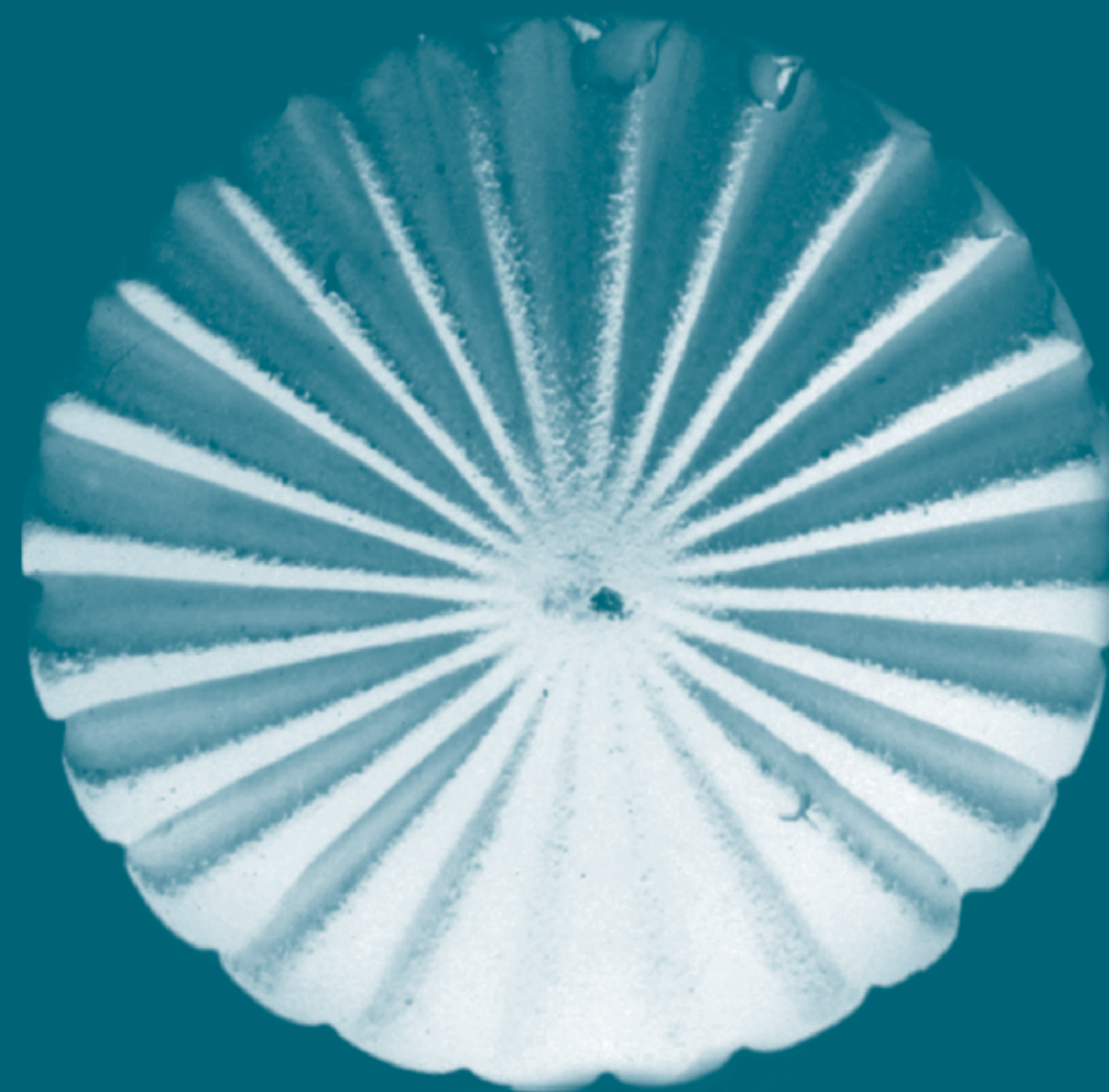
100 אבני דרך בחקר הפיזיקה במכון ויצמן למדע

1975

לא הורסים

מדעני המכון פיתחו מערכת הולוגרפיה לבדיקות ללא הרס, בזמן אמיתי, של מכלולים תעשייתיים כגון חלקים של כלי טיס. הולוגרפיה היא שיטת דימות המבוססת על "הקפאת" דגם ההתאבכות של גלים שמוחזרים מפניו של גוף תלת-ממדי כלשהו. בדרך זו יוצרים מעין תמונה, או העתק תלת-ממדי מדויק מאוד, של העצם אשר ממנו מוחזרים הגלים.

המערכת ההולוגרפית שפיתחו מדעני המכון ממפה בזמן אמיתי ובמדויק את נקודות התורפה בעצם הנבחן. מיפוי זה מבוצע תוך הפעלת לחצים מוגבלים על העצם הנבחן, מבלי לגרום לו נזקים כלשהם.



100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע

1976

המאיץ עלשם קופלר

המאיץ על-שם קופלר תוכנן על-ידי האדריכל משה הראל בשנת 1975, והפך ללא ספק לסימן היכר אדריכלי של מכון ויצמן למדע. המבנה הייחודי משלב שני מגדלים. האחד, דמוי בורג, מתנשא לגובה 57 מטרים. בראש השני, שגובהו 53 מטרים, נבנה מבנה דמוי ביצה שאורכו 22 מטרים ורוחבו 14 מטרים.

המאיץ איפשר למדעני המכון לפעול בחזית המדע העולמית בשנות ה-60 וה-70 של המאה הקודמת, אבל עם הזמן השלים וסיים את תפקידו, עד שבשנת 2010 הוחלט להפסיק את הפעלתו.

עיצוב בניין המאיץ, על הגיאומטריה הפשוטה והמונומנטלית שלו, הוא דוגמה מובהקת לסגנון הפורמליזם צאדריכלות, שאפשר לראותו גם בבניינים חדשים דוגמת בניין תחנת הטלוויזיה הסינית CCTV בשנחאי, בעיצוב ום קולהאוס, או "מגדלי האנטנה" הנבנים במקומות שונים בעולם, דוגמת ברלין, שנחאי, ברצלונה (בתכנון סנטיאגו קלאטראוה) ועוד.

המאיץ "כיכב" גם בסרטו העתידי והאניגמטי של המשורר דוד אבידן, "מסר מן העתיד", שהופק בשנות ה-70 של המאה הקודמת.

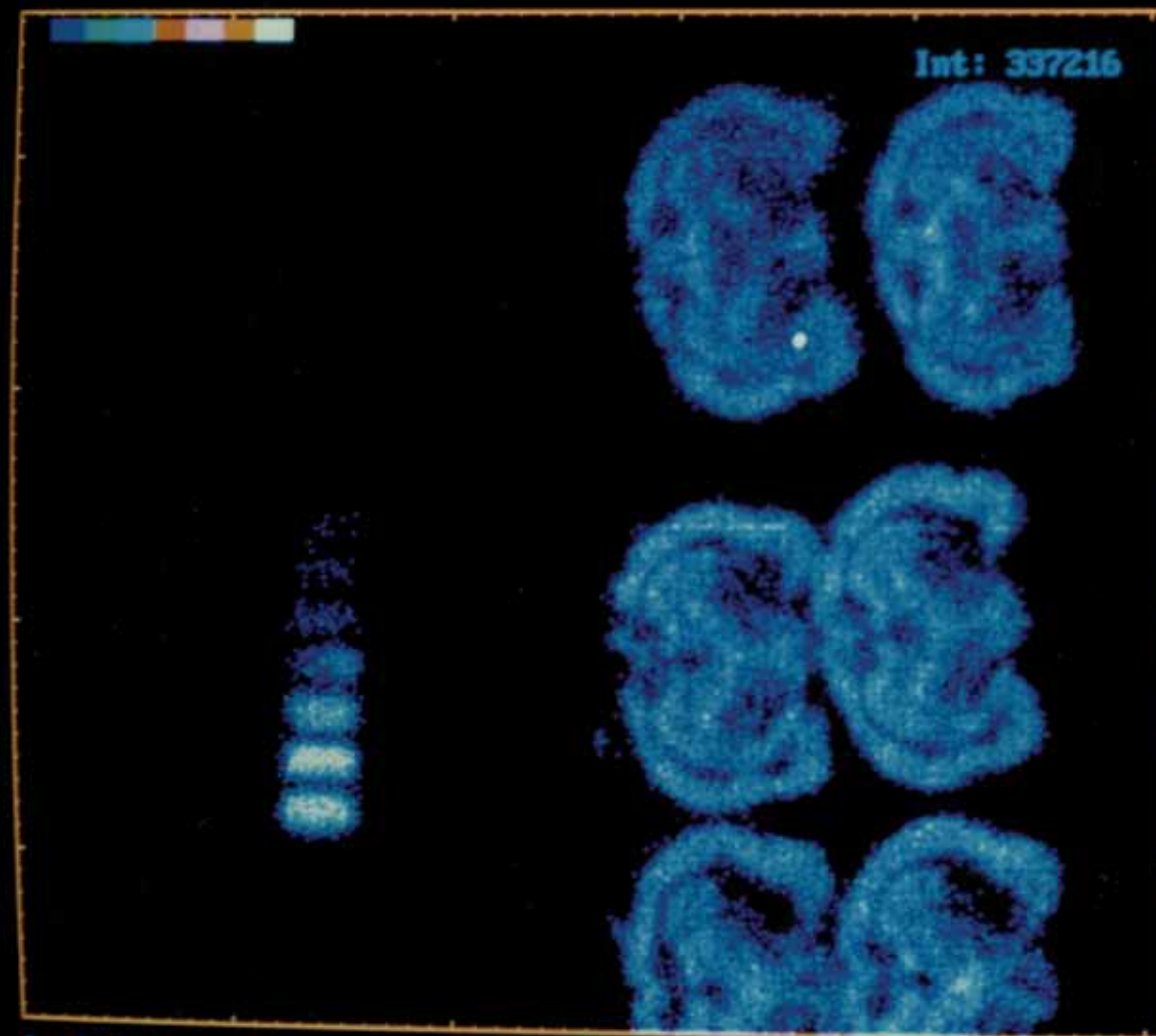


100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע

מדעני המכון פיתחו שורה של גלאי קרינה מתקדמים שהותקנו במאיצי חלקיקים שונים בעולם, ושימשו לחקר תחומים שונים בפיסיקה ובביו-רפואה. גלאים אלה נועדו בין היתר לגילוי חלקיקים טעונים, ניטרונים, קרינת רנטגן ואור. גלאים יחסיים רב-חוטניים, אשר התאפיינו בפעולה מהירה, התאימו במיוחד לפעולה בריק (ואקום), ושימשו במאיצי יונים כבדים ברחבי העולם למחקרים מגוונים בפיסיקה גרעינית.

במסגרת המחקרים האלה הקימו מדעני המכון מערכת מורכבת לחיפוש אחר חומר כבד שמקורו במפץ הגדול, שאינו מצוי כיום על כדור-הארץ. אף שהחומר הכבד לא התגלה, הצליחו המדענים לקבוע סף נמוך לקיומו. גלאי קרינה ייחודיים שפיתחו מדעני המכון שימשו בניסויים המזהים וממפים, למשל, חלקיקי קרינת ביתא (אלקטרונים) הנפלטים מאיזוטופים רדיואקטיביים שנקשרו למולקולות ביולוגיות שונות (למטרות מחקר ביולוגי או רפואי). מפת הפגיעות של חלקיקי הביתא מועברת למחשב כשהיא כבר מסופרתת, כך שיצירת התמונה וחלק ניכר מפיענוחה מבוצעים, למעשה, בזמן אמיתי. משך החשיפה נמדד בדקות, לעומת חשיפה של שעות שנדרשה בשימוש בסרטי צילום. בגלאי מתקדם יותר, שפיתח אותו צוות מחקר, התחוללה - נוסף על הגברת האלקטרונים - פליטה של פוטונים (חלקיקי אור), שלאחר עיבוד נוסף יצרו תמונת קרינה איכותית ממוחשבת.

100 אבני דרך בחקר הפיסיקה במכון ויצמן למדע



DISPLAY
 F1: TDC's
 F2: X,Y
 F3: ADC
 F4: 2D
 +/-: Scale
 a: Auto on/off

ACCUM
 F5: ON/OFF
 F9: Preset T
 F6*2: Clear
 g: E gate
 G: 2D gate
 z/z zoom=2/4

I/O
 F7: Save
 F8: Load
 p: Print

MARKERS
 ↑/+ ↓/+ : Move
 r l u d : Slect
 i : Integrate
 P : Project

F10*2: Quit

Scale: 32 Accum OFF E gate on Time: 2016 sec
 Zoom *4 2D gate off Select: Left

I/O
 F7: Save
 F8: Load
 p: Print

MARKERS
 ↑/+ ↓/+ :
 r l u d :
 i : Integr
 P : Projec

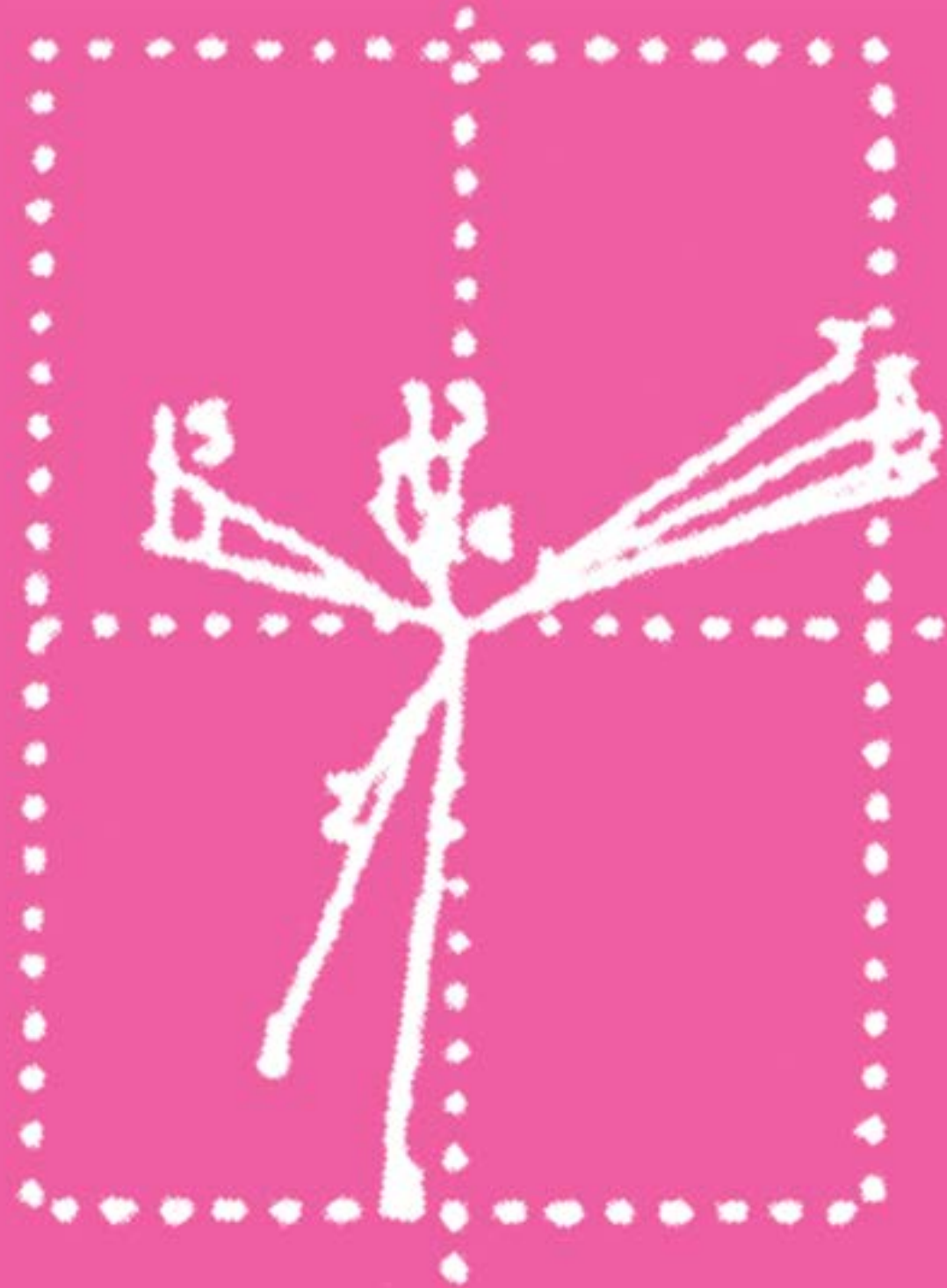
OFF E gate on Time: 1800 sec Preset T: 4200
 2 2D gate on Select: Right

1979

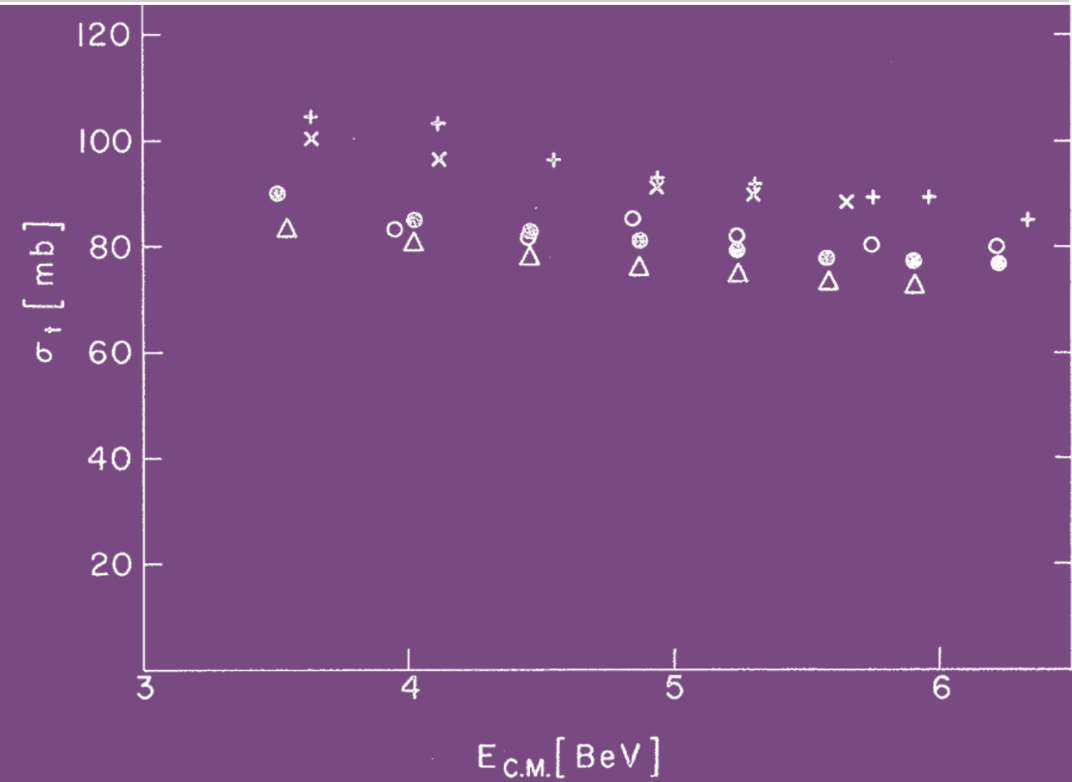
גילוי הגלואון

קבוצת חוקרים מהמכון השתתפה בתכנון ובביצוע הניסוי שבו התגלתה עדות ממשית ראשונה לקיומם של גלואונים, שהם החלקיקים האחראים לפעולתו של הכוח החזק ביותר בטבע - כוח ה"צבע" (שממנו נובע הכוח הגרעיני החזק). כוח זה פועל בין הקווארקים, שהם חלקיקי היסוד המרכיבים את הפרוטונים והניטרונים שבגרעין האטום.

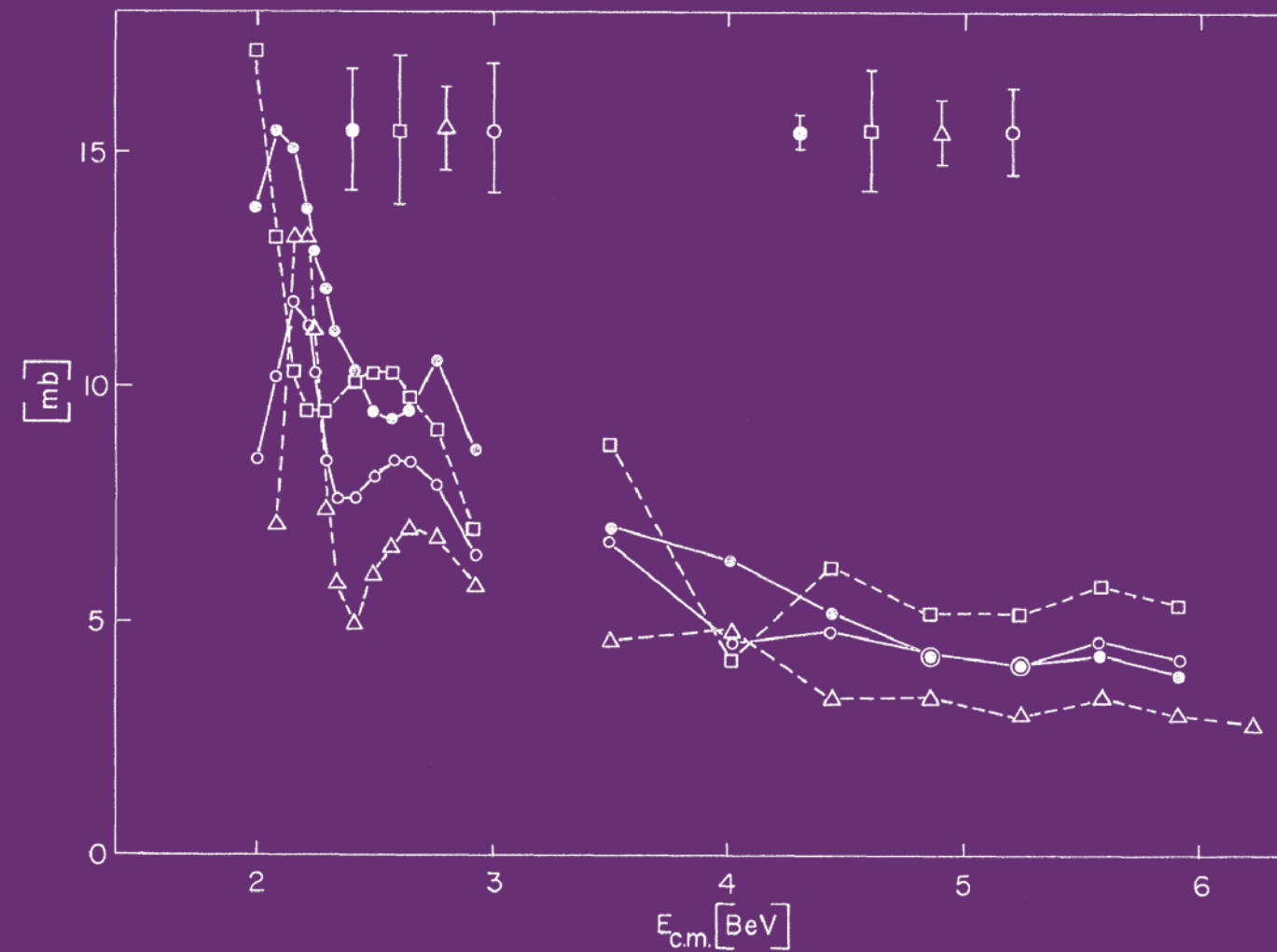
הפיסיקאים שביקשו להוכיח את קיומם של הגלואונים הפעילו לשם כך את מאיץ החלקיקים "פטרה" במעבדות "דייזי" שבהמבורג, גרמניה. מדעני המכון תרמו תרומה חשובה לבניית גלאי החלקיקים שמדדו את תוצרי ההתנגשות בין האלומות אשר הוצאו במאיץ ולניתוח התוצאות שהביאו לגילוי הגלואון.



מדעני המכון פיתחו שיטה מתמטית מקורית לשימוש בחבורות לצורך מיון של חלקיקים לקבוצות ("משפחות") שונות. שיטה זו איפשרה לזהות תכונות משותפות בין חלקיקים שלמראית עין אין ביניהם שום "מכנה משותף". שיוך החלקיקים ל"משפחות" איפשר לחוקרים להכיר ולחזות תכונות שונות של חלקיקים, עוד בטרם נצפו בניסוי. שיטה זו שימשה כלי מרכזי בחקר החלקיקים הבסיסיים של החומר, וסייעה, בין היתר, גם לאישור קיומם של הקווארקים.



100 אבני דרך בחקר הפיזיקה במכון ויצמן למדע



1979

תוהו ובוהו האם יש ראשונים בעולם?

בשנות ה-70 של המאה ה-20 התברר, שכל החלקיקים בטבע מורכבים משישה סוגים של חלקיקים הקרויים קווארקים, ועוד שישה סוגים של חלקיקים הקרויים לפטונים אשר כוללים את האלקטרון. יחסי המטענים החשמליים בין הקווארקים והלפטונים הם שברים פשוטים: $1/3$ ו- $2/3$. אין כל הסבר משכנע לריבוי הסוגים השונים של הקווארקים והלפטונים, לערכים המספריים השונים והמוזרים של מאסות החלקיקים האלה, ולכמה עובדות נוספות הקושרות ביניהם, לרבות יחס המטענים הפשוט. מדען מהמכון הציע תיאוריה, שלפיה הקשרים האלה נובעים מכך שגם הקווארקים והלפטונים אינם יסודיים, והם מורכבים מאבני בניין יסודיות עוד יותר שנקראו "ראשונים". לפי התיאוריה הזאת, קיימים רק שני סוגים של "ראשונים", האחד בעל מטען חשמלי שהוא שלישי ממטען האלקטרון, והשני חסר מטען חשמלי. שני חלקיקים אלה סומנו באותיות V ו-T על שם התוהו ובוהו שבראשית היקום. את כל הקווארקים והלפטונים אפשר להרכיב מצירופים פשוטים של שני סוגי הראשונים, והדבר עשוי להסביר כמה מהסוגיות הלא-פתורות בנושא זה. עד עתה אין עדות ניסויית לקיומם של חלקיקים יסודיים יותר מהאלקטרון והקווארק, אולם גם אין אפשרות לשלול זאת. התיאוריה נשארה, נכון לעכשיו, מעניינת ולא-מוכחת.

והארץ היתה
 תהו ובהו

$$n(V) - n(\bar{V}) = 3Q - 3(B - L),$$