

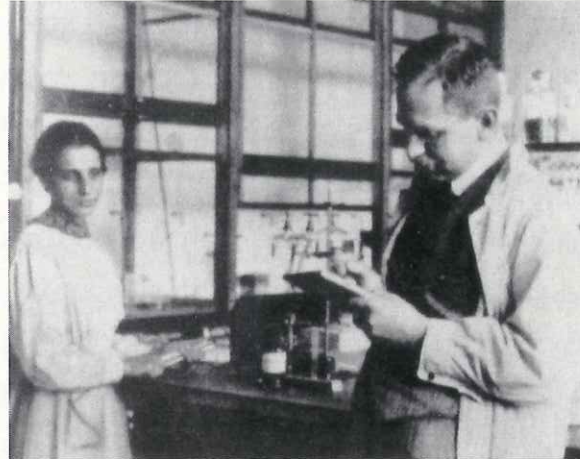


פוליטיקה, כימיה וגילוי הביקוע הגרעיני

מעובד לפי:

1. <http://alsos.wlu.edu>
2. E. Wiesner, F. Settle Jr., Politics, Chemistry, and the Discovery of Nuclear Fission, Journal of Chemical Education, vol. 78 (7) July 2001, pp. 889-895

1938 הייתה שנה חשובה בתולדות המדע. בשנה זו התגלה הביקוע הגרעיני-פרי מאמץ משותף בן ארבע שנים של ליזה מייטנר, אוטו האן ופריץ שטראסמן ששינה את פני העולם. לתגלית זו, שהפכה על פיה את תפיסת גרעין האטום ופתחה תחומי מחקר חדשים, נודעה השפעה חברתית עצומה. נולד מקור אנרגיה חדש ורב עוצמה, שהיה עתיד לשמש למטרות הרס ובנייה גם יחד.



אם הביקוע הוא עדות לכוחה של החקירה המדעית, הרי שהשתלשלות האירועים בדרך אל התגלית ואל ההכרה בה, מדגימים הדגם היטב את חולשתו של האדם. האווירה הפוליטית ששררה בגרמניה הנאצית, הדעות הקדומות של מדענים ועוצמתה של התגלית עצמה - כל אלה הביאו תהילה לאוטו האן, אך דנו את עמיתיו לתגלית לאלמוניות יחסית. בייחוד חושפת ההתעלמות מליזה מייטנר שיפוט לקוי בקהילייה המדעית. אף שהייתה דמות מובילה בפיזיקה גרעינית ומגלי הביקוע, פועלה כמעט שנשכח בנפתולי מלחמת העולם ה-II. פרס נובל בכימיה לשנת 1944 (הוא ניתן בפועל ב- 1945) הוענק לאוטו האן לבדו.

תחילת הדרך של האן ומייטנר בברלין

אוטו האן וליזה מייטנר נפגשו לראשונה בשנת 1907. מייטנר, שאך סיימה את הדוקטורט שלה בפיזיקה באוניברסיטת וינה, הגיעה לברלין כדי לשמוע הרצאות מפי הפיזיקאי הנודע מקס פלאנק. מייטנר מצאה שנתר לה זמן לעסוק גם בעבודה ניסויית, והיא חיפשה שותף. היא מצאה את האן, שקיבל את תואר הדוקטור שלו בכימיה אורגנית שנים מספר קודם לכן מאוניברסיטת מארבורג. האן, לפני שקיבל את משרתו דאז במכון לכימיה באוניברסיטת ברלין, עבד ברדיוכימיה עם אנשי שם כויליאם רמזי בלונדון וארנסט רתרפורד במונטריאל. הבחירה בו הייתה טבעית, לאור העובדה שעיסוקה האחרון של מייטנר היה ברדיואקטיביות, נושא ששילב פיזיקה וכימיה גם יחד.

האן הסכים לעבוד יחד, וכך החל שיתוף הפעולה ביניהם, וגם ידירות ארוכת שנים. מחקריהם הראשונים על פליטת β הניבו את תיאוריית הרתע הרדיואקטיבי¹, רעיון חשוב בפיזיקה של הגרעין. אולם הישגם הגדול ביותר באותה תקופה, בשנת 1918, היה גילוי יסוד חדש, שנקרא פרוטאקטיניום. הצלחות מדעיות אלה ואחרות זיכו את מייטנר והאן בהכרה ובקידום. בשנת 1912, עברו שני המדענים למכון החדש לכימיה, KWI, שהוקם קרוב לברלין. בשנת 1919 כבר היו שניהם פרופסורים (תואר יוקרתי באקדמיה הגרמנית) בעלי שם. בשנת 1917, התבקשה מייטנר להקים מחלקה נפרדת לפיזיקה, ואילו האן עמד בראש מחלקה קטנה ועצמאית לחקר רדיואקטיביות. עכשיו עמדו לרשותם האמצעים המשוכללים של המכון. אף עבודתם המשותפת נשאה פירות נאים, גם האן וגם מייטנר היו מוכנים לצאת איש איש לדרכו.

אף ששיתוף הפעולה בין מייטנר להאן היה פורה ומספק בעבור שניהם, הוא בישר את העוול שעתידי היה להיעשות למייטנר. למרות שקיבלה את ה-Ph.D שלה לפני בואה לאוניברסיטה של ברלין, הדלתות נותרו נעולות בפניה בשל היותה אישה.² את משרתה הראשונה ב-KWI קיבלה רק הודות להשתדלותם של ידידים,³ והיא לא קיבלה קרדיט מלא על תרומותיה המדעיות. האן הופיע ככותב הבכיר בכל המאמרים שפרסמו השניים על הפרוטאקטיניום, אף שמייטנר עשתה את רוב העבודה במשך העדרו במלחמת העולם הראשונה.⁴ האן הוכתר כמגלה היסוד החדש; מייטנר נשארה בצלו.

דרכים מתפצלות

בשנות ה-20 החל הצל נסוג, כאשר התפצלו תחומי העניין שלהם. מייטנר עבדה על אפקט אוז'ה וההסבר לספקטרום פליטת β ועל מעברים לא קרינתיים בין הגרעינים לאלקטרונים, כשהיא מראה כי אלקטרונים הסובבים את הגרעין יכולים לחדור אליו. בין 1920 ל-1933, פרסמה מייטנר 69 מאמרים מדעיים, לבד או עם שותפים. מעגל העמיתים המדעיים שלה היה מרשים, בלט בו במיוחד נילס בוהר. מייטנר הוצעה כמועמדת (יחד עם האן) לפרס נובל בכימיה בשנים 1924, 1925, 1930, 1933 ו-1934. באותה תקופה, היא גם קיבלה פרסים רבים אחרים.

בינתיים זכה האן להצלחות משלו. בשנת 1924, הוא היה לראש ה-KWI והתמקד במציאת שימושים תעשייתיים לרדיוכימיה. הוא גם המשיך בכמה מחקרים שהתחיל עם מייטנר. הוא אפיין את הרדיואקטיביות של איזוטופים של יסודות כבדים מסוימים וגילה את האיזומריה הגרעינית,⁵ מושג שמילא תפקיד חשוב בגילוי הביקוע.

גילוי הנויטרון והמחקר שבעקבותיו

בשנת 1934 קיבלו המאמצים המדעיים גם של מייטנר וגם של האן תפנית חדה בעקבות סדרה של התפתחויות בפיזיקה גרעינית. תחילתה הייתה בשנת 1932, עם גילוי הנויטרון על ידי ג'יימס צ'דוויק. בראשית 1934 דיווחו בני הזוג ז'וליו-קירי, שעבדו בפאריז, על התפתחות משמעותית נוספת: הם הצליחו להכין את החומר הרדיואקטיבי המלאכותי הראשון, זרחן-30, על-ידי הפצצה של אלומיניום בחלקיקי α .

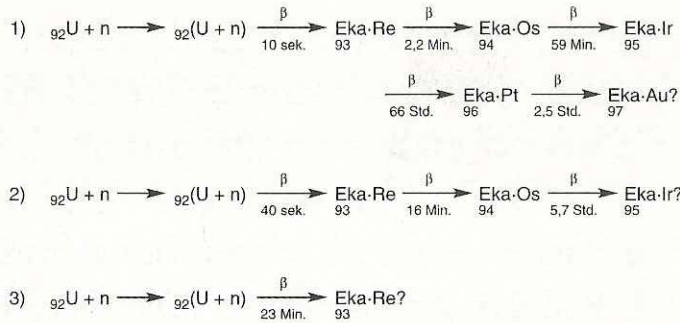
ברומא, אנריקו פרמי הרחיב מייד את עבודתם של צ'דוויק וז'וליו-קירי. הוא הבין, שהניטרון יכול לחדור בנקל אל הגרעין הטעון חיובית.⁶ בחורף 1934, הוא ערך סדרה שיטתית של הפצצה בניטרונים של כל היסודות הידועים, ממימן ואילך. בניסוייו של פרמי נוצרו חומרים חדשים, שריתקו את תשומת לבו של הקהילייה המדעית. תוצאות ההפצצה בניטרונים של היסוד הכבד ביותר, אורניום, עוררה את מרב העניין. אורניום שהופץ בניטרונים פלט קרינת β , אנלוגית לזו שהתקבלה מהפצצה של שכניו הכבדים של היסוד,⁷ והובילה למסקנה שנוצר יסוד חדש, כבד מאורניום. הקבוצה מרומא הביאה, כתימוכין לטענתה זו, את היות הקרינות הרדיואקטיביות של התוצרים - שונות מאלה שנצפו לאחר הפצצת ניטרונים של היסודות הקרובים לאורניום (עופרת עד פרוטאקטיניום).

האן ומייטנר חוברים לשטרסמן

מייטנר, שעקבה אחר התקדמותו של פרמי לאורך הטבלה המחזורית, הסתקרנה מתוצאות הניסויים באורניום. היא הבינה את חשיבות האנליזה הכימית בניסויים אלה, והיה לה ברור שהמשך המחקר אינו עניין לפיזיקאי בלבד.⁷ היא פנתה להאן והציעה לו לחדש את השותפות ביניהם. האן לא התלהב בתחילה, אך מאמר של תלמידו לשעבר, שהעלה את הסברה שהיסוד ה"חדש" של פרמי הוא למעשה פרוטאקטיניום, גירה את התעניינותו. באוקטובר 1934, החלו האן ומייטנר להקרין אורניום בניטרונים. פריץ שטרסמן, שהיה כימאי אנליטי, הצטרף אליהם ב-KWI בתחילת 1935 והוסיף את מיומנותיו לפיזיקה של מייטנר ולרדיוכימיה של האן. הצוות היה כעת שלם. מייטנר, האן ושטרסמן יבלו את ארבע השנים הבאות בניסיון לפענח את התנהגותו של גרעין האורניום.

הקבוצות ברומא, בפריז ובברלין מצאו, שהפצצת גרעיני אורניום בניטרונים מניבה תערובת מורכבת של חומרים רדיואקטיביים וזמני מחצית חיים בהתאם.⁸ כולם החלו בקטלוג זמני מחצית החיים האלה וניסו להסביר את קיומם. הקבוצה מברלין האמינה שהם גילו מערכת של שלוש שרשרות דעיכה (כמוצג להלן), שנובעת מאיזומריה משולשת של אורניום-239. שימו לב, שכל שרשרת תגובות מתחילה בלכידת ניטרון על-ידי גרעין אורניום-238 ויצירת אורניום-239. חשוב גם לשים לב, שאיזומרים אלה מתגלים רק כתוצרים במורד שרשרת הדעיכה של גרעיני המוצא.

ההסבר היה רחוק מלשכנע. הקושי העיקרי היה האיזומריה המשולשת, שהתנגשה עם התיאוריה שרווחה אז וגרסה שקיימים רק שני איזומרים. למרות הקשיים, הצוות מברלין עמד מאחורי התוצאות. גם קהיליית הפיזיקאים, ברובה, קיבלה הסבר זה להתנהגות אורניום מוקרן.⁸ הסברים אפשריים אחרים, כגון דעיכת α נדחו. מדידותיהם המדויקות, שאישו את קיומו של תהליך הדעיכה האחרון, הוכיחו לכאורה את קיומו של יסוד מספר 97, EkaAu.⁹ ניסויי הקבוצה מברלין נבדקו ונמצאו הדירים גם במעבדות אחרות בעולם.¹⁰



המחסום הגדול ביותר היה, שהמדענים פשוט לא יכלו להעלות בדעתם שיש הסבר חלופי להתנהגות האורניום המופצץ בנויטרונים. שתי השערות מבוססות מנעו התקדמות ועיכבו את גילוי הביקוע: האחת הייתה מודל הגרעין שהיה מקובל אז, של אוסף חלקיקים הקשורים יחד בבור פוטנציאל. נויטרון שחודר לתוך הגרעין עשוי לספק את האנרגיה הדרושה לחלקיקים קלים יותר, α ו- β , לברוח מהגרעין. אולם, אנרגיה זו אינה מספיקה כדי לאפשר לחלקיקים כבדים מ- α לברוח. לכן התעלמו המדענים מהאפשרות של התפרקות הגרעין, הן בתיאוריות שלהם והן בפירוש תוצאות הניסויים.¹¹ בשנת 1934, הציעה הכימאית הגרמנית אידה נודאק, שהפצצת אורניום בנויטרונים יכולה לגרום לגרעין האורניום להתפצל לכמה חלקים גדולים, שיהיו איזוטופים של יסודות ידועים, אך לא שכנים של האורניום בטבלה המחזורית. הפיזיקאים דחו את האפשרות מבלי להקדיש לה מחשבה יתירה, ונודאק לא ביססה את השערתה בניסויים חד-משמעיים.

השערה אחרת שהועלתה אז הסיטה אף היא את המדענים מן הדרך. בשנת 1934, הייתה השורה האחרונה של הטבלה המחזורית לא שלמה (איור 2). המדענים האמינו, שכל יסוד חדש ייכנס לשורה זו שהסתיימה אז באורניום. לכן הניחו שהיסוד 93 (שנקרא לזמן קצר אקה-רניום) יגלה התנהגות כימית דומה לזו של רניום, היסוד שמעל למשבצת 93. הימצאותן של העפרות הנדירות (מספרים אטומיים 58-71) בתחתית הטבלה המחזורית הציעה מיקום חלופי לאורניום ולשכניו, שלא נלקח עד אז בחשבון. עם הזמן, עתיד היה להסתבר שתוריום, פרוטאקטיניום, אורניום והיסודות הטרנסאורנייים יוצרים סדרה שנייה של עפרות נדירות, המופיעה בטבלות המחזוריות המודרניות.

במקרה זה, המדענים ראו לא את מה שהיה שם אלא את מה שהם חשבו שהיה שם. מכיוון שבביקוע נוצרים הרבה יסודות שונים קלים יותר, המדענים מצאו חומרים רדיואקטיביים בעלי תכונות כימיות דומות לשל רניום ושל היסודות השכנים במחזור השישי. הרדיואקטיביות של חומרים אלה נמצאה שונה משל היסודות שנמצאים לפני האורניום (מספרים אטומיים 82-91). ליסודות ה"חדשים" נותר אפוא מקום רק אחרי האורניום. החיפוש אחר היסודות הטרנסאורנייים ה"חדשים" גרם לקבוצה מברלין ולאחרות להתעלם מרבים מתוצרי הביקוע האחרים, מכיוון שהם נמצאו במה שנראה כ"פסולת לא חשובה שנשארה לאחר ההפרדה הכימית".

O	I																II	
H																	He	
Li																	Ne	
Be																	Ar	
B																	Kr	
C																	Xe	
N																	Rn	
O																		
F																		
Ne																		
Na																		
Mg																		
Al																		
Si																		
P																		
S																		
Cl																		
Ar																		
K																		
Ca																		
Sc																		
Ti																		
V																		
Cr																		
Mn																		
Fe																		
Cu																		
Zn																		
Ga																		
Ge																		
As																		
Se																		
Br																		
Kr																		
Rb																		
Sr																		
Zr																		
Nb																		
Mo																		
Tc																		
Ru																		
Rh																		
Pd																		
Ag																		
Cd																		
In																		
Sn																		
Sb																		
Te																		
I																		
Xe																		
Cs																		
Ba																		
La																		
Ce																		
Pr																		
Nd																		
Pm																		
Sm																		
Eu																		
Gd																		
Tb																		
Dy																		
Ho																		
Er																		
Tm																		
Yb																		
Lu																		
Hf																		
Ta																		
W																		
Re																		
Os																		
Ir																		
Pt																		
Au																		
Hg																		
Tl																		
Pb																		
Bi																		
Po																		
At																		
Rn																		
Ac																		
Th																		
Pa																		
U																		
Np																		
Pu																		
Am																		
Cm																		
Bk																		
Cf																		
Es																		
Fm																		
Mendelevium																		
O	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Cp	Seltene Erdmetalle					
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71					

איור 2. הטבלה המחזורית כפי שהייתה ידועה ב-1934. פורסמה לראשונה במאמר של לזיה מייטנר ב-Scientia.

מייטנר עוזבת את ברלין

בעוד האן, מייטנר ושטרסמן עוסקים באפיון השגוי של האיזומרים של אורניום, התחולל בפוליטיקה הגרמנית מפנה לרעה. בשנת 1933 השלים היטלר את תפיסת השלטון בגרמניה. אחת מה"רפורמות" הרבות שנעשו באותה שנה הייתה חקיקת החוק להשמה מחדש של אנשים בשירות הציבורי המקצועי. חוק זה העביר את היהודים ממשרותיהם הממשלתיות. התוצאה הייתה התרוקנות כמעט של האקדמיה הגרמנית. לזיה מייטנר, בהיותה רבע יהודייה, נפגעה אף היא מהמדיניות החדשה. כאזרחית אוסטריית, היא זכתה להפוגה זמנית, אך במרץ 1938, כתוצאה מהאנשלוס (סיפוח אוסטריה לגרמניה), הפכה לאזרחית הרייך הגרמני, ועמיתיה החלו לחשוש לביטחונם. ביולי 1938, בעזרת ידידים, נמלטה מייטנר מגרמניה לשטוקהולם שבשוודיה, שם קיבלה משרה במכון מחקר לפיזיקה.

התנהגותו של האן בפרשת בריחתה של מייטנר משקפת את עמדותיו מאוחר יותר כלפי תפקידה בגילוי הביקוע. לאחר האנשלוס, עוררה נוכחותה של מייטנר ב-KWI אי-נחת בהאן. הוא חש מההשלכות שיכולות להיות לכך על המכון. הוא שוחח על המצב עם אחד מפטרוני המכון, וכך הביא את מצבה של מייטנר לידיעת משרד החינוך. ברמה האישית העניק האן למייטנר תמיכה רבה מאוד. כאשר עזבה את גרמניה בחיפזון, לקח על עצמו לדאוג לחפציה ולענייניה האישיים. הוא אמנם דאג לה, אך חסר היה את האומץ ליטול סיכון כלשהו בגינה.

גילוי הביקוע

בעת עזיבתה של מייטנר חלו התפתחויות דרמטיות בחקר האורניום המוקרן. בצרפת, בשנת 1937, שבו אירן קירי ועמיתה פאבל סאביץ' לחקור את האורניום, והתוצאות היו מרעישות. במקום לשקע ולסלק את היסודות החשודים כטרנסאורנייים, כפי שעשתה הקבוצה מברלין, החליטה הקבוצה הצרפתית לחקור את המסה המוקרנת כמכלול. הם מצאו זמן מחצית חיים חדש של 3.5 שעות, שהיה קשור, כך נראה, לאיזוטופ של תוריום. מספרו האטומי של התוריום הוא 90 (קטן בשניים משל אורניום), רמז לכך שהאורניום המוקרן עובר דעיכת α , תגובה שהקבוצה מברלין פסלה. כאשר המדענים מברלין קראו תגר על ממצאים אלה, דיווחה קירי על תוצאות מדהימות עוד יותר; היסוד החדש בעל זמן מחצית החיים של 3.5 שעות היה דומה מבחינה כימית לא לתוריום, אלא ללנתאן, שמספרו האטומי 57, הרחוק מרחק "בלתי אפשרי" מהאורניום! לקירי לא היה שום הסבר תיאורטי, אך היא עמדה מאחורי תוצאות ניסוייה.

תוצאותיה של הקבוצה הצרפתית, גרמו להאן ולשטרסמן שעבדו כעת בלי מייטנר, לבחון מחדש את עבודתם. הם מצאו כמה גרעינים רדיואקטיביים שנעלמו מעינם בעבר, ושקיומם הצריך הסבר מוזר אף יותר מתיאוריית האיזומריה המשולשת שלהם. אחד הגרעינים הללו נראה כאיזוטופ של רדיום (מספר אטומי 88), והם סברו שהוא נוצר מגרעין אורניום מוקרן שפלט שני חלקיקי α . איזוטופ זה של רדיום, בדומה לאורניום-239, הוסבר על-ידי איזומריה משולשת שוב, הסבר שעמד בסתירה לתיאוריית הגרעין המקובלת.

בינתיים, שמרה מייטנר על קשר עם ברלין על-ידי התכתבות קבועה עם האן. אף שלא השתתפה פיזית בעבודה הניסויית ב-KWI, הרי שתפקודה בעבודת הצוות לא השתנה הרבה. מאוחר יותר אמר שטרסמן על מעורבותה של מייטנר בחודשים האחרונים שלפני גילוי הביקוע:

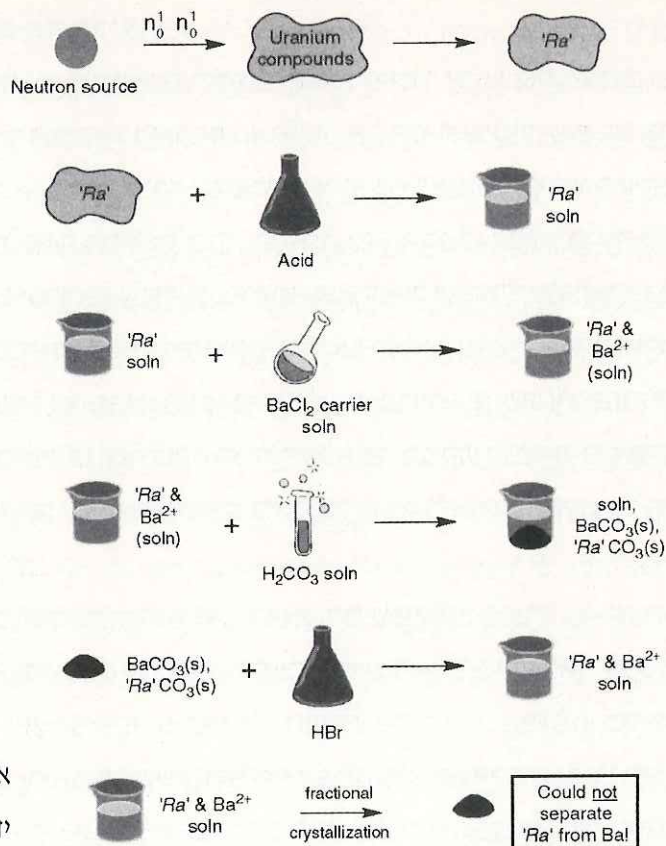
"מה שינתה העובדה שליזה מייטנר לא השתתפה ישירות ב"גילוי"?... היא הייתה קשורה אלינו אינטלקטואלית משוודיה [דרך] התכתבות עם האן... [היא] הייתה המובילה האינטלקטואלית של הצוות".

ורנר הייזנברג, פיזיקאי גרמני מהשורה הראשונה, התייחס מאוחר יותר לתרומתה של מייטנר:

"היא שאלה לא רק "מה" אלא גם "למה". היא רצתה להבין... היא רצתה לגלות את חוקי הטבע הפועלים בתחום החדש. כוחה היה בשאלת השאלות ובפרשנות לניסויים. סביר להניח, שגם בעבודתם המשותפת המאוחרת יותר, הייתה לליזה מייטנר השפעה חזקה על שאלת השאלות, והאן בעיקר חש אחראי ליסודיות ולדיק של הניסויים".

אופייה החקרני של מייטנר ניכר היטב בחליפת המכתבים בין שטוקהולם לברלין. כשקראה על איזומר ה"רדיום" של האן ושטרסמן, הבינה שניטרון אינו מביא עמו מספיק אנרגיה לתוך הגרעין כדי לחולל אופן זה של דעיכה רדיואקטיבית והורתה לעמיתה לבחון את הניסוי שוב. השלושה נפגשו בקופנהגן בתחילת נובמבר 1938, ומייטנר, שקיבלה כעת תמיכה מנילס בוהר, דחקה בהאן לשוב ולבדוק נוכחות רדיום.

בתחילת דצמבר 1938, האן ושטרסמן אכן בדקו שוב את ה"רדיום" שלהם. נראה שתוצאותיהם איששו את מה שראו הזוג ז'וליו-קירי. נראה שאיזוטופים של רדיום, שנוצרו על-ידי ההפצצה ראשונית של האורניום בנויטרונים, עברו דעיכת β לאקטיניום ותוריום.



איור 3. הגילוי הכימי של הביקוע, כפי שנעשה על ידי האן ושטרסמן בברלין, בדצמבר 1938.

כדי להיות בטוחים לגמרי, החליטו האן ושטרסמן לזהות את האיזוטופים של "רדיום" באמצעים כימיים. ההפרדה הכימית מוצגת באיור 3, כאשר הרדיואיזוטופ החשוד כרדיום מסומן ב-'Ra'. מאחר שרדיום ובריום הם יסודות מקבוצה IIA, עם תכונות כימיות דומות, הוסיפו בריום כנשא כדי להקל על הבידוד הכימי של הכמויות הקטנות של הרדיום החשוד. השלב האחרון בבידוד היה גיבוש למקוטעין כדי להפריד את נשא הבריום מן הרדיום הרדיואקטיבי. האן ושטרסמן, רדיוכימאים מנוסים שניהם, לא הצליחו להפריד את ה-'Ra' הרדיואקטיבי מהבריום. האמנם הייתה השערתה של אידה נודאק נכונה? האם גרעיני האורניום מתפצלים לחלקים שווי מסה בערך?

האן ושטרסמן חזרו על הניסוי פעמים רבות, אך לא הצליחו להפריד את ה"רדיום" הרדיואקטיבי מהבריום. וכך דיווחו על תוצאותיהם:

"...ככימאים, עלינו לומר שהחלקיקים החדשים אינם מתנהגים כמו רדיום, אלא כמו בריום; כפיזיקאי גרעין, אין אנו יכולים לאמץ מסקנה זו, המנוגדת לכל הניסיון שיש בפיזיקה הגרעינית".

האן הכימאי לא רצה לצאת נגד הרעיונות של פיזיקאי גרעין מכובדים, למרות הראיה הכימית הברורה לנוכחות בריום. מכיוון שלא היה מסוגל להסביר את נוכחות הבריום, שיגר מכתב אל מייטנר. במכתבו הוא שואל:

"אז תשבי בבקשה אם יש אפשרות כלשהי – אולי איזוטופ של בריום עם מסה אטומית גבוהה הרבה יותר מ-137?".

מייטנר ופריש מסבירים את הביקוע

בעוד האן ושטרסמן מכינים את ממצאיהם לפרסום, חשבה מייטנר על נוכחות הבריום. בתוך זמן קצר, היא מצאה הסבר: ביקוע. מייטנר למדה על ניסוייהם האחרונים של האן ושטרסמן, שאישו את רעיון הבריום, רק בדצמבר 1938. היא הייתה אז בחופשה יחד עם אחיינה אוטו פריש, שהיה אף הוא פיזיקאי. בשותחה עמו על עבודתה, בהתבסס על מודל טיפת הנוזל של בוהר, הבליחה במוחה לפתע תמונה חדשה של גרעיני האורניום.¹² בנסיבות מסוימות, כאשר נויטרון פוגע בגרעין אורניום, הוא יתחיל להתנווד ולהתארך כמו טיפת נוזל. עיוות הצורה עשוי להוריד את עוצמת הכוח הגרעיני החזק שמלכד את הגרעין, ואז כוח הדחייה החשמלית יכול להשתלט ולפרק את הגרעין. על פי מודל זה, חישובו פריש ומייטנר את האנרגיה¹³ שתשתחרר בתהליך כזה, בהתבסס על ההבדלים בין מסת גרעיני האורניום ובין המסה הכוללת של תוצרי הביקוע הצפויים, כגון בריום וקריפטון. זמן לא רב אחר כך, ערכו פריש ואחרים סדרה של ניסויים כדי לקבל את ערכי אנרגיות הרתע של תוצרי הביקוע, ובזאת הוכיחו את תיאוריית הביקוע.

דבר התגלית התפרסם בעולם בתחילת 1939, במאמרים שפורסמו בנפרד על-ידי האן ושטרסמן ועל-ידי מייטנר ופריש. נילס בוהר למד על התגלית מפריש ואימץ אותו מייד. בוהר יצא אישית, עם חדשות מלהיבות אלה, אל קהיליית הפיזיקאים בארצות הברית, שם תרמה התגלית, בסופו של דבר, לפיתוח פצצת האטום בשנת 1945. השימוש שעשתה ארצות הברית בפצצות אלה כנגד יפן הוציא שם רע לפיזיקה הגרעינית. לזיה מייטנר, כבעלת תרומה מרכזית לגילוי הביקוע וכקורבן של השלטון הנאצי, הייתה לאישיות מפורסמת. עיתונאים אחדים תיארו אותה כ"היהודייה הנוודת, המדענית שגנבה את סוד הפצצה מהיטלר והעבירה אותו לבנות הברית".

בכתבה בעיתון Life נכתב:

"נוכחותו של בריום, שהוא יסוד קל הרבה יותר מאורניום, התמיהה את הקבוצה הגרמנית. אחת מהם, ד"ר לזיה מייטנר, אולצה לעזוב את גרמניה בגלל מוצאה היהודי. בקופנהגן, שם עבדה עם ד"ר א.ר. פריש, היא הגיעה למסקנה שהנויטרון אינו יוצר יסוד חדש, אלא מפצל את גרעין האורניום לשניים, כך שנוצרים בריום ויסודות אחרים". לצד אי דיוקים אחרים בכתבה, לא מוזכרת תרומתם של האן ושטרסמן, החברים ה"אריים" בצוות הגרמני.

האן מקבל פרס נובל על הביקוע

בעוד מייטנר מקבלת תשומת לב מהעיתונות וקרדיט על גילוי הביקוע, מצא עצמו אוטו האן במעצר על יד קיימברידג' שבאנגליה. הוא נעצר יחד עם תשעה מדענים גרמניים אחרים שהיו מעורבים בתוכנית האנרגיה האטומית הגרמנית. החדשות על האופן שבו הוצגה מייטנר בעיתונות העולמית הדהימו, בלי ספק, את האן. אך הגלגל היה עתיד להתהפך במהרה. בסוף שנת 1945, למד האן שהוא זה שקיבל את פרס נובל לכימיה לשנת 1944 "על גילוי את הביקוע של גרעינים כבדים". לא מייטנר, לא שטרסמן ולא פריש חלקו אתו את הפרס.

פרס נובל ייחס אפוא את גילוי הביקוע להאן לבדו. תפנית זו באירועים לא שיקפה את מהלך האירועים האמיתית, אלא נבעה מדעות קדומות ומאי הבנה. במובנים רבים, היו כל הסיכויים נגד מייטנר אפילו לפני שוועדת הפרס החלה את דיוניה. תרומותיה לגילוי אמנם היו ממשיות ומכריעות, אך העדרה מברלין בעת הגילוי צייר תמונה שונה. מייטנר עצמה ציינה, כי "ככל שתוצאות אלה [בדבר ביקוע האורניום] משמחות אותי בשביל האן... אנשים רבים כאן [ברלין] חושבים בוודאי שאני לא תרמתי לזה מאומה". בגלל השליטה הנאצית במדע בגרמניה, לא יכלו האן ושטרסמן להודות בשיתוף פעולה עם מדענית יהודייה גולה. במאמר שפרסם בפברואר 1939 על הוכחת היווצרותם של בריום ושל תוצרים רדיואקטיביים נוספים מהקרנת אורניום בנויטרונים, אמנם התייחס האן לפרשנות של מייטנר ופריש לביקוע, אך הוא ניסח זאת באופן שימעיט בחשיבותה.

עם חלוף הזמן, נראה שהאן עצמו שכח את תרומתה של מייטנר. במכתב שכתב אליה מייד לאחר הגילוי הוא טוען, כי "בכל עבודותינו מעולם לא התייחסנו לפיזיקה, רק עשינו הפרדות כימיות פעם אחר פעם. אנחנו יודעים מהם גבולותינו, ואנו יודעים, כמובן, שבמקרה המסוים הזה היה מועיל לעשות רק כימיה". האן היה מסוגל לשכנע את עצמו בנאמר לעיל הן מתוך הגנה עצמית והן מתוך חוסר הבנה. האן חש, ללא ספק, את לחצו של הממסד הנאצי, והייתה לו את היכולת לראות דברים כפי שרצה שיהיו.¹⁴ אף שבאוטוביוגרפיה שלו הוא מכיר בתרומתם של מייטנר ופריש, יש גם רמזים לכך שהוא פשוט לא הבין את תרומותיה התיאורטיות האחרונות של מייטנר ולכן חש שתרומתה לגילוי הייתה זעומה.

אף שהאיום הנאצי חלף עם תום המלחמה, עדיין ניצבו קשיים רבים בפני האן בפרט ובפני המדע הגרמני בכלל. בעודם שוהים באנגליה, הזהיר האן את עמיתיו המדענים הגרמניים כי "הצפי לעתיד קודר מאוד בעבורנו". הוא הבין את גודל המכה שניחתה על המדע הגרמני במהלך שנות המלחמה ואת השפעתה על התפתחותו לאחר המלחמה. האן השתמש בתגלית "שלו" לסייע בכינון מחדש של חשיבות המדע הגרמני. שוב היה אפשר לדחוק את רגליה של מייטנר, כפי שאפשר לראות בהצהרה שהוציאו המדענים הגרמנים שהיו עצורים באנגליה:

"הביקוע של גרעין אטום האורניום התגלה על האן ושטרסמן ב-KWI... תגליתו של האן נבדקה במעבדות רבות, בייחוד בארצות הברית, מיד לאחר הפרסום. חוקרים שונים, מייטנר ופריש היו בוודאי הראשונים, ציינו את האנרגיות העצומות המשתחררות בעת ביקוע אורניום. ואולם, מייטנר עזבה את ברלין שישה חודשים לפני הגילוי ולא הייתה מעורבת בעצמה בגילוי".



הפוליטיקה שמאחורי פרס נובל

הקריירה המדעית של מייטנר סבלה מעצם עזיבתה את ברלין. היא עברה לשטוקהולם כדי לעבוד במכון

מאן זיגבאן החדש לפיזיקה, אך לא הסתדרה עם זיגבאן ולא היו לה אמצעים להמשיך את עבודתה. אף שהעלתה את התיאוריה של הביקוע, לא הייתה לה כל דרך לבצע ניסויים כדי להוכיח את נכונותה. גורמים אלה משתקפים בהחלטות המוקדמות של ועדת פרס נובל. האן ומייטנר היו מועמדים לפרס נובל לפיזיקה בתחילת שנות ה-40, אך הוועדה קבעה שתגלית הביקוע שייכת לתחום הכימיה. בדוחות חברי הוועדה נכתב: "עבודתו של האן נחשבה לחשובה, ואילו עבודתם הניסויית של מייטנר והאן לא הייתה יוצאת דופן, ואם הייתה תרומה תיאורטית משמעותית, הרי שיש לתת לבוהר¹⁵ את הקרדיט". לא הייתה גם שום התחשבות בנסיבות הפוליטיות שכפו על מייטנר לפרוש מקבוצת המחקר, או בהשפעה של המדיניות האנטישמית של הנאצים על מה שפורסם במאמרים-תנאים שהשפיעו על התיאור הלקוי של מהלך התגלית. ועדת הכימיה החליטה להעניק את הפרס להאן לבדו על תגלית הביקוע "שלו". אף שהאקדמיה של פרסי נובל לא קיבלה מייד את המלצת הוועדה, קיבל האן את הפרס בסוף שנת 1945.

ב- 1945 וב-1946 הוצגו מייטנר ופריש כמועמדים לקבלת פרס נובל לפיזיקה על תרומתם לגילוי הביקוע.¹⁶ האדם שנבחר להעריך את המועמדים היה אריק הולתן, תלמידו לשעבר של זיגבאן. בשתי השנים, הוא פסק נגד מייטנר ופריש. אף שאותן התפיסות המוטעות שהנחו את הוועדה לכימיה הופיעו בנימוקיו הוא, גם הפוליטיקה הפנימית של הוועדה לפיזיקה השפיעה על החלטתו.

מאן זיגבאן, מארחה הלא אדיב של מייטנר בשטוקהולם, היה פיזיקאי רב השפעה וחבר בוועדת הפיזיקה. נוסף על כך, ועדת הפיזיקה העדיפה ניסיונאים. הולתן ציין זאת בדוח שלו, והמעייט בערכו של ההסבר התיאורטי משום שלא הייתה לו שום השפעה על הניסוי. גורם נוסף שאולי השפיע על החלטת הוועדה היה נטייתה המסורתית של שוודיה להתייחס אל גרמניה כאל הכוח המוביל במדע. אולם, תיאוריית הביקוע של מייטנר ופריש שימשה בסיס לעבודה מוצלחת בארצות הברית ובבריטניה, ולא בגרמניה. הגורם הישיר היה, ללא ספק, חוות דעתו של הולתן, שאותה ביסס כמעט אך ורק על המאמרים המקוריים שנכתבו על-ידי האן ושטרסמן ועל-ידי מייטנר ופריש. הוא לא התייחס לפרסומים אחרים שסיפקו ראיות לתרומתם המכרעת של מייטנר ופריש. הוא פטר כחסרי חשיבות את הניסויים שערך פריש כדי להוכיח את ההסברים התיאורטיים, ולא מצא שום דבר מיוחד בתיאוריה שפיתחו מייטנר ופריש. הוא סבר שהם הותירו שאלות חשובות ללא מענה, שאלות שבוהר השיב עליהן מאוחר יותר. על כן, סיכם, שכל קרדיט נוסף על גילוי הביקוע יש לתת לבוהר. על בסיס חוות הדעת של הולתן, החליטו ועדות הפרס של 1945 ו-1946 שלא להעניק את פרס נובל למייטנר ולפריש.

לסיכום

תגלית הביקוע מייצגת נקודת שיא בקריירה המדעית הארוכה והמזהירה של לזיה מייטנר ואוטו האן. לרוע המזל, האירועים שהתרחשו בתקופת הגילוי מנעו משני המדענים לקבל הכרה שווה. עם חלוף

הזמן והודות לחקירה היסטורית מעמיקה, שב ומכונן השוויון ביניהם. מעניין לציין את הופעתו של המייטנריום והיעלמותו של ההאהניום כשמות ליסודות טרנסאורניים.¹⁷

הערות

1. רתע רדיואקטיבי מתאר את הרתע של אטום אחרי פליטה של חלקיק בהקשר לחוק שמור התנע. יש כאן אנלוגיה לרתע של רובה אחרי יריה. על ידי למידת הרתע, אפשר להבין טוב יותר את האנרגיות והמסות הקשורות לדעיכה רדיואקטיבית.

2. למייטנר ניתן היתר מיוחד להשתתף בהרצאות של פלאנק, וגם מחקריה הניסויים היו בגדר חריגה מן המקובל. בראשית עבודתה עם האן, היה עליה להסתגר במרתף, למען לא תסתופף בחברתם של הסטודנטים ממין זכר. מאוחר יותר, כשהוסרו הגבלות אלה, הביעו רבים מן האחרונים את מחאתם.

3. מייטנר לא קיבלה שכר עד שפלאנק, שהיה לידיד אישי, מינה אותה לעוזרתו. קידומה למעמד שותפה למחקר במעבדה של האן ב-KWI התרחש, קרוב לוודאי, הודות למאמציו של אמיל פישר, ראש המכון וידיד של מייטנר גם הוא.

4. גם מייטנר שירתה בחזית הרוסית, מאוגוסט 1915 עד אוקטובר 1916, כאחות-טכנאית רנטגן בצבא האוסטרי.

5. איזומריה (גרעינית), על פי המילון, היא היחס בין שני גרעיני אטומים או יותר, שהמספר האטומי ומספר המסה שלהם זהים אך רמות האנרגיה וזמן מחצית החיים שונים. מצב איזומרי הוא מצב מעורר ארך-חיים של גרעין אטום.

6. הזוג ז'וליו-קירי הצליחו לחדור לגרעין האלומיניום עם חלקיק α טעון כי המספר האטומי של האלומיניום נמוך יחסית. התנע של חלקיק α מהיר יכול להתגבר על כח הדחייה החשמלי בינו ובין הגרעין. שיטה זו לא תעבוד עם יסודות כבדים יותר. לנויטרון, לעומת זאת, אין מטען חשמלי שצריך להתגבר עליו.

7. כאשר רדיוכימאים מנסים לזהות גרעין לא ידוע, הם מפרידים אותו מתוצרים ומגיבים אחרים בריאקציה, באמצעות תהליכים כימיים. הזיהוי נעשה על-פי מאפייני קרינה כגון אנרגיה או זמן מחצית החיים, מסה אטומית, או מספר אטומי. כמות החומר הרדיואקטיבי שנוצר בריאקציה גרעינית היא קטנה, בדרך כלל. לדוגמה: המסה של ^{39}Si המייצרת 10^8 התפרקות לשניה, היא רק 1×10^{-7} גרם. על כן אין זה אפשרי לשקול את הגרעינים שבודדו בהפרדה רדיוכימית. בדרך כלל, פיזיקאים מפעילים את

- הריאקציה הגרעינית ומתמקדים במדידות, ואילו כימאים מטפלים בתהליכי ההפרדה והניקוי.
8. אף שהתוצאות מברלין נראו כסותרות את התיאוריה הקיימת של איזומרים גרעיניים, איזומריה עדיין היתה מושג חדש יחסית ובלתי מוסבר ברובו.
9. $EkaAu$ זוהה ע"י מקמילן ואבלסון בשנת 1941, וניתן לו השם נפטוניום.
10. אירן קירי בפריז, פיליפ אבלסון באוניברסיטת קליפורניה בברקלי וקבוצה באוניברסיטה של מישיגן קיבלו, כולם, תוצאות דומות מאורניום מוקרן.
11. תפיסה זו של הגרעין בהחלט הגבילה את ראייתם של המדענים המעורבים. היא גם עיוותה את הניסויים. כדי לבודד פליטות שונות, שמו המדענים יריעת מתכת דקה לפני הגלאים, ובזאת חסמו את תוצרי הביקוע הגדולים.
12. בדגם זה, חלקיקי הגרעין לא תפקדו באופן עצמאי, אלא פעלו יחד כ"נוזל" מלוכד באמצעות כוחות גרעיניים חזקים, בדומה למתח הפנים הטיפת מים.
13. בתחילה הם ניסו לחשוב על גרעין האורניום כמעין טיפת נוזל טעונה, שמטענה הגדול מספיק להתגבר על אפקט מתח הפנים. הגרעין דמה איפוא, בתמונה זו, לטיפה מתנוודדת, לא יציבה, הנכונה להתפרק עם כל התגרות, כגון התנגשות של נויטרון יחיד. שתי הטיפות הקטנות יותר, לאחר הפיצול, ירכשו מהירות גבוהה, הכרוכה באנרגיה כוללת של כ-200 מא"ו. למקור האנרגיה הזאת נחשב הפרש המסות בין המגיבים לתוצרים בריאקציה הגרעינית, והיא נקבעה לפי נוסחתו המפורסמת של איינשטיין $E=mc^2$.
14. בתום מלחמת העולם השנייה, העלים האן עין מזוועות הנאצים והתמקד בסבל שעבר הוא עצמו בגרמניה.
15. בוהר שיכלל את התיאוריה שהציעו מייטנר ופריש. הוא וג'ון ווילר פרסמו מאמר בשם "The Mechanism of Nuclear Fission" בגיליון ספטמבר 1939 של *Physical Review*, ובו טענו ש- ^{235}U הוא כנראה האיזוטופ האחראי לביקוע נויטרון איטי.
16. בוהר היה בין הפיזיקאים המכובדים שהציעו את מועמדותם של מייטנר ופריש ב-1946.
17. ב-1997, ניתן באופן רשמי ליסוד שמספרו האטומי 109, שנתגלה ב-1982, השם מייטנריום. יסוד 105, שהתגלה ב-1967, נקרא באופן לא רשמי בשם האהניום עד 1997, שאז ניתן לו השם הרשמי דובניום, על שם אחת המעבדות שבהן נצפה לראשונה, בדובנה שברוסיה.