



# לצאת מן השיגרה

## בעיקבות המחזה "קופנהגן"

חיים וינשטיין, בית הספר התיכון ליד האוניברסיטה, ירושלים

"כפיסיקאים יש לנו הזכות המוסרית לעבוד על ניצול פרקטי של אנרגיה אטומית?"; "הבנתי, לא סיפרתי לאחרים!"; אך עד 1943 גם הבריטים והאמריקאים עשו טעויות דומות (בהתייחס לערך של המסה הקריטית; "יכולנו לבנות פצצות!"; "...אין לזה שום קשר לאטומים", "...איזה דיליטנט אמריקאי הפיץ בלוף", "...אני לא מאמין לאף מילה", ו"אני חושב שזו פצצת לחץ גבוהה"; "...אני בהחלט סבור שיש להם [לאמריקאים] 10 טון של אורניום מועשר, אבל לא שיש להם 10 טון של  $^{235}\text{U}$  טהור"; "בכנות, מעולם לא חישבתי זאת, משום שמעולם לא האמנתי שניתן לקבל "235" טהור"; "אם [תהליך] ההעשרה של אורניום 235 יצליח, ייצור של  $^{235}_{92}\text{U}$  נקי יוביל לחומר נפץ בעוצמה שלא תתואר".

אות כחולה - ציטוט "חופשי" מ"קופנהגן"; אלג' כג' יב - ציטוט "חופשי" מ"פאלם פא"י ומסמכים אלג'טים.

### מבוא

כשירוד המסך על ההצגה "קופנהגן" נותרת תחושה שרצון טוב של הייזנברג ועמיתיו חסך מהאנושות פצצת אטום נאצית. על פי המחזה, הייזנברג שלט ברזי הפצצה אך נמנע מלמסור חלק מהמידע לשלטון, וכך חיבל בניסיון הגרמני לבנות פצצת פלא שתכריע את המלחמה. האומנם? – במאמר זה אנסה להראות שעדויות היסטוריות מראות שהייזנברג לא הבין כיצד אמורה לפעול פצצת אטום, ולכן לא יכול היה לשמור לעצמו סודות גרעיניים.

המחזה "קופנהגן" הוצג 3 שנים בלונדון, ומועלה עתה בניו-יורק, באירופה, בדרום אפריקה ובתיאטרון הקאמרי. ההצגה עוסקת במפגש, בבירת דנמרק הכבושה בספטמבר 1941, בין **בוהר** (Niels Bohr) הדני, ו**הייזנברג** (Werner Heisenberg) הגרמני, שהניחו במשותף את היסוד לפיסיקת הקוואנטים. הפגישה הקצרה, כשהם משני צידי המתרס, הסתיימה במשבר בחברות פורה של 20 שנה. בוהר, שזעם על מה ששמע מהייזנברג, קטע את הפגישה באָבָה. מה התרחש במפגש בין שני האישים, מפגש שעם הזמן הפך להיות צומת כל כך טעון מבחינה היסטורית? האם הייזנברג התכוון להזהיר את המערב מהפצצה הנאצית? האם ניסה לגייס את בוהר? האם ניסה לדלות מידע על תוכנית האטום האמריקאית? האם ניסה למנוע, בהסכמה הדדית, פיתוח נשק אטומי כלל עולמי? בהיעדר עדות היסטורית בהירה, קודחת היורה הספקולטיבית הזאת זה 60 שנה, ואליה נכנס המחזאי **פריין** (Michael Frayn) עם המחזה "קופנהגן", אשר זכה לתשואות סוערות והוליד מאמרים ותגובות בעיתונות המדעית.

לאור הצלחת המחזה, הוסיף פריין לתמליל ההצגה סוף-דבר הכולל ניתוח היסטורי. כלומר: הצופים נחשפים לא רק לדרמה

אלא גם לטיעון היסטורי. עיקרו של הטיעון: **הייזנברג הבין את פיסיקת הפצצה וראה דרך סלולה לבנייתה; בקופנהגן התכוון להתייעץ עם בוהר ואולי אף להגיע להסכמה כלשהי.**

במאמר זה אנסה להראות שתזת המחזאי היא המשכה של האשלייה שארגו הייזנברג ותומכיו מתום המלחמה ואחריה. הבנתו של חתן פרס נובל המבריק את פיסיקת פצצת האטום לכל אורך מהלך המלחמה, היתה חלקית ומעורפלת. למעשה, **חוסר הבנתו היה הצייר עליו נשבר המנוף הנאצי כולו בניסיון לבנות פצצת אטום.**

### מה קרה?

המחזה אינו מנסה להסיר את העמימות לגבי המתרחש בפגישה. מוצגות בו חמש גירסאות שבהן מנסות שלוש הדמויות - הייזנברג, בוהר ואשתו מרגרט, שנים לאחר המפגש ב-1941, כאשר שלושתם כבר אינם בין החיים, לשחזר לעצמם את מהלך אותו ערב היסטורי של ספטמבר 1941 בקופנהגן הכבושה. על הבמה מוצגות גרסאות למה שעשוי היה להתרחש במכון לפיסיקה תיאורטית, או בגן שמאחורי המכון, ואולי בכלל אחרי ארוחת הערב (שהיתה או לא היתה) בביתו של בוהר. אכן, אפילו לגבי מקום המפגש (בקופנהגן) יש עדויות סותרות. מה שאין לגביו כמעט ספק במחזה, הוא שהייזנברג הבין את פיסיקת הפצצה. "יכולנו לבנות פצצה" אומר הייזנברג כמה פעמים. מעדויות שנתפסו לאחר המלחמה, ושפורסמו רק ב-1992, הסתבר שהייזנברג לא יכול היה לבנות שום פצצה. הוא לא הבין כיצד היא אמורה לפעול, כמה היא המסה הקריטית וכיצד ניתן להפריד אורניום 235 מאורניום טבעי.

עם תחושה מתוקה של ניצחון גרמני קרוב וסוחר, הגיעו הייזנברג ועמיתו **פון וייצקר** (Carl Friedrich von Weizsäcker) לקופנהגן, כדי להרצות על קרינה קוסמית ותהליכים בשמש. הסמינר המלומד זומן ללישכה ליתרבות גרמניה, שלוחת התעמולה של מחלקת התרבות במשרד החוץ הגרמני, שדומות לה הוקמו בחסות גֶּבֶלס (שר התעמולה) בארצות הכיבוש הנאצי. כך, בצינה הדנית הסתווית, יכלו שני הפיסיקאים להרהר על עוד התקדמות סודית: פרויקט ביקוע האורניום.

לאחר שתי שנות מחקר מסווג בחסות חיל החימוש הגרמני, הגיע הייזנברג להערכה ש"נשללה הדרך לפצצת אטום". בניסוי לייפציג 2 (ריאקטור L-2), נצפה גידול של 13% בשטף הנייטרונים, והייזנברג מיהר לדווח שגימלון (הגדלת) הריאקטור יוביל לתגובת שרשרת. האנרגיה העצומה שתשתחרר מתגובה כזו תוכל, כפי שהייזנברג חזה כבר בתחילת המלחמה, לשמש להנעת אוניות וצוללות. ויותר מכך, אם במקום אורניום טבעי יעשה שימוש באורניום 235 בריכוז גבוה יותר (אורניום מועשר), הריאקטור יאפשר לקבל "חומר נפץ בעוצמה שלא תתואר". הצלחת הניסוי בלייפציג נשתלבה עם עבודתם של האן, ויצקר והוטרמנס בברלין, שממנה עלתה האפשרות לקבל יסוד בקיע מלאכותי חדש מריאקטור הפועל ברציפות. לאיזוטופ הבקיע החדש, **פלוטוניום** ( $^{239}_{94}\text{Pu}$ ), יש יתרון בולט בקלות הפרדתו וזיקוקו מהחומר היחיד

האחר שיכול לשמש לבניית פצצת אטום - אורניום 235. ראוי לציין שבמקביל, ובאופן בלתי תלוי, גם בארה"ב נתגלתה האפשרות לעשות שימוש בפלוטוניום כחומר בקיע, למרות שבאותה עת האמריקאים (עדיין) פיגרו במחקר הגרעיני בהשוואה לגרמנים. הריאקטור המפורסם של פרמי וסילרד במרתף הסקווש (squash) באוניברסיטת שיקגו פעל והגיע לרמה קריטית רק בדצמבר 1942 והיה בסופו של דבר הראשון שהצליח ליצור תגובת שרשרת.

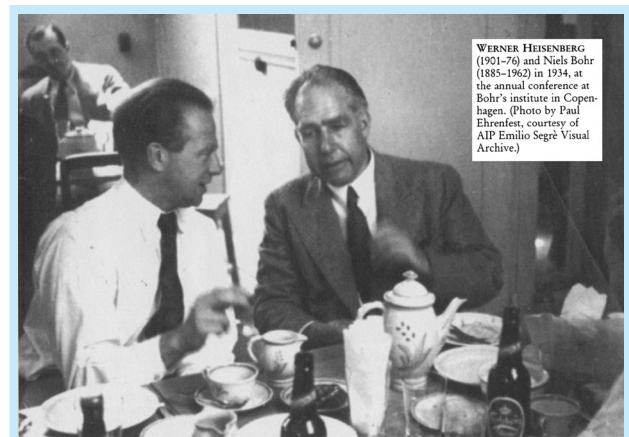
על פי אחת הגרסאות המוצגות במחזה הגיע הייזנברג לבוהר עם התחושה שבאמתחתו ריאקטור שיכול להוביל לפצצה. באותה עת כתב הייזנברג (במכתב תודה על ספר שנשלח אליו) על 'היכולת של בני האדם להשמיד את כדור הארץ לחלוטין'. ניתן להניח שניצוץ מהאופוריה הגרמנית בחזית נשתרגה באופוריה גרעינית. ההחלטה על בניית פצצה מצויה עתה בידי בעלי הידע - הפיסיקאים. הם אלה שיקבלו את ההחלטה, ו"הם שיחליטו מי ימות ומי לא". הם גם אלה שיכולים למנוע את בניית מכונת ההשמדה: מה שעליהם לעשות הוא לתאר, אולי בהגזמה, את הקשיים האדירים שבפרויקט כזה. למה לא להציע לבוהר, בהסכם גינטלמני, ששום צד לא יפתח נשק כלכיה המונית כזו?

הבסיס הקלאסי לפיסיקת הקוואנטים תחילתו במהפכה שהתגבשה ב-1927 בקופנהגן, במכון לפיסיקה תיאורטית שהוקם ונוהל על ידי בוהר. בעשרות שעות של דיאלוגים ביום ובלילה, בפאראקים ובכינוסים, בנו בוהר, הייזנברג ועמיתיהם את "גישת קופנהגן" של תורת הקוואנטים. שיתוף פעולה אינטלקטואלי זה יצר בין השניים ידידות נפש שעלתה על שרטון במפגש בספטמבר 1941.

## הגרסאות ורקע היסטורי

בין הגרסאות השונות המוצגות ב"קופנהגן", ובהעדר עדות היסטורית חד-משמעית, אמורים הצופים לבחור את הגרסה המתאימה מבין התרחישים המוצגים על הבמה.

...שוב פוסע הייזנברג בשביל החצץ המוליך אל בית בוהר, ובלבו אותו 'פחד מוכר' מפני המֶאָסְטְרוֹ. בתיקו הרצאה באסטרופיסיקה, אך בראשו משהו אחר לגמרי... מהו אותו משהו? בשלהי 1941 שלטו הנאצים על רובה של אירופה, ונמצאו בדהירה לקראת מה שנדמה היה כעוד ניצחון בסטלינגרד ובמוסקבה. בריטניה הייתה מבודדת וארה"ב עדיין נייטראלית, ובאופק לא נראה שום כוח שיוכל למנוע את 1000 שנות שלטון הרייך השלישי. מעדויות מהימנות מסתבר, שהכל בגרמניה וגם הייזנברג עצמו היו משוכנעים שהניצחון הגרמני הוא וודאי. ניצחון זה ימנע את הגרוע יותר (לדברי הייזנברג) - שליטת רוסיה והקומוניזם באירופה. לעמיתו הדני **מולר** (Christian Møller) 'הסביר' הייזנברג, בעת ביקורו בקופנהגן, שכיבוש דנמרק, הולנד, בלגיה ונורבגיה 'מצער', אך כיבוש המזרח הוא תהליך חיובי משום שימדינות אלה אינן מסוגלות לשלוט על עצמן'.



תרשים 1: ורנר הייזנברג (שמאל) ונילס בוהר (ימין) בכינוס השנתי ב-1934 במכון בוהר בקופנהגן.  
Photo by Paul Ehrenfest, Jr., courtesy AIP Emilio Segre Visual Archives. We thank the Friends of the Center for History of Physics for their generous support which allowed us to use this photograph. (<http://www.aip.org/history/esva>)

לפי גרסה אחרת אולי התכוון הייזנברג להזהיר את המערב מהפצצה הנמצאת בשלבי בנייה ואולי להרגיע את בוהר, שלמרות ההתקדמות הגרמנית, הוא אינו מתכוון לזום מאמץ מרוכז לבנייתה? הייזנברג, כמו עמיתיו וכמו ראשי המחקר הגרמני הנאצי, סבר שהגרמנים מובילים בתחום הגרעיני. למסר 'מרגיע' כזה יכולה הייתה להיות תרומה במניעת המרוץ להשמדה הדדית. או, אולי בכלל היה בכוונתו של הייזנברג להתייעץ עם המאסטר האם "כפיסיקאים יש לנו הזכות המוסרית לעבוד על ני צול פרקטי של אנרגיה אטומית?". או, לפי גרסה נוספת, שמא מטרתו הייתה בכלל ריגול גרעיני? עיתון שוודי פרסם ב-1941 ידיעה (בזמנה עדיין לא מבוססת), על פיתוח 'נשק גרעיני' באמריקה. לא מן הנמנע שוייצזקר, (אולי בהשפעת אביו ארנסט פון וייצזקר, שכיהן בתפקיד השני הבכיר במיניסטריון החוץ), שיכנע את הייזנברג לנסות לדלות מידע מבוהר על פרויקט ה'אורניום האמריקאי'. חמור מזה, אולי נרקמה מזימה ליגייסי את בוהר למאמץ הגרמני? אם נגזר על דנמרק להיבלע בגרמניה הגדולה, למה לא לחדש את שיתוף הפעולה הפורה בין שני האישים? גירסאות אלה מתרוצצות הלך ושוב על הבמה בשטף רעיוני רגשי ודרמטי סוחף, שהם חלק מקסמו של המחזה. אך לגבי דינדן, הנושא העיקרי הראוי לבחינה בעקבות רוח הגרסאות השונות, היא הבנתו ושליטתו של הייזנברג בפיסיקת הפצצה.

## הייזנברג והפצצה

מה ידע הייזנברג על פצצת אטום? לאחר המלחמה טען שהיה מודע לאפשרות לבנות פצצה, שהבין את הפיסיקה הכרוכה בכך, שהיה בשליטה על הפרויקט ואף חיבל בו במודע, ווידא שהעיסוק הגרעיני יימשך רק בשלב המעבדה, ושהפרויקט כולו לא יעבור לידיים הלא נכונות- לקבוצת דינבר/באגה. במחזה הוא אומר במפורש: "הבנת, לא סיפרתי לאחרים!". אחרי יוני 1942, לאחר הכינוס המכריע בברלין בראשות שר החימוש שפאר (Speer) (במקביל לתבוסה ברוסיה, להתכתשות בשמי בריטניה, וההפצצות המסיביות על ערי גרמניה), 'נחסכה' מהפיסיקאים ההתלבטות: כלכלת 'המלחמה הטוטלית' של היטלר אסרה ממילא פעילות שלא תניב נשק בטווח קצר. פצצת אטום דרשה שנים של מאמץ כלכלי ואנושי שהיה מעבר ליכולתה של גרמניה.

אם הגרמנים לא בנו פצצה ולא היו קרובים לשום דבר דומה, אם הם לא הצליחו לבנות ריאקטור גרעיני ואפילו לא הצליחו להגיע לתגובת שרשרת מעבדתית, מהן העדויות שהייזנברג

'הבין', 'שלט', 'ווידא', כפי שטען בעקשנות לאחר המלחמה? לדעתו של הייזנברג יש עדויות חותכות לכך. כולן הוקלטו בחשאי על ידי הביון הבריטי מיולי ועד דצמבר 1945, עת שהו הייזנברג ותשעה מעמיתיו בכלא מרווח ומבודד שבאחוזה פארס הול (קימברידג', אנגליה). במקביל לשעטת בעלות הברית משלושה כיוונים אל תוך גרמניה בתום המלחמה, ניהלו האמריקאים מרדף ממוקד אחר חברי 'מועדון האורניום' של היטלר. כוח משימה זה המכונה ALSOS הצליח ללכוד לא רק את הבכירים שבמדעני הגרעין הגרמניים, אלא גם חלק ניכר מהאורניום, המים הכבדים, מתקני ההפרדה והמסמכים הסודיים. מבלי שהעלו זאת על דעתם, הוקלטו ותומללו שיחותיהם של המדענים הכלואים במשך כל ששת חודשי שביים. לאחר תירגום לאנגלית נשלחו הדיבובים לגנרל גרובס (Leslie R. Groves) האחראי על פרויקט 'מנהטן'- שהוא בניית פצצת האטום האמריקאית.

העדויות, לדעת המחזאי (והייזנברג) מצויה בהקלטות הללו. מההקלטות עולה שמייד לאחר הידיעה על הטלת הפצצה על הירושימה אמר הייזנברג, וכשבוע לאחר מכן בהרצאה פנימית לכל החבורה, שהוא ידע והבין כיצד אמורה פצצת אטום להיבנות ולפעול. אמנם עשה טעות בחישוב הימסה הקריטית, אך עד 1943 גם הבריטים והאמריקאים עשו טעויות דומות (בהתייחס לערך של המסה הקריטית - טענה זו של הייזנברג נכונה).

האמנם הייזנברג הבין? במחזה הוא אומר במפורש "יכולנו לבנות פצצות!"; לאורך המחזה כולו משודר מסר דומה: הייזנברג הבין הכל. המחזאי איננו בודד בהערכה זו שהתבססה בעיקר על טיעונו של הייזנברג ועמיתיו לאחר המלחמה.

האם העדויות 'חותכות'? בהחלט כן, אך בכיוון ההפוך. ציטטות פארס הול שיובאו להלן, מראות שהייזנברג לא תפס שקיימת אפשרות לבניית פצצה, ולכן לא חישב מהי המסה הקריטית, לא היתה לו כל הערכה כמה היא (בערך) המסה הזו, שהוא לא הבין על בורייה את פיסיקת הפצצה, ובעיקר לא את ההבדל בין פצצה (תגובת שרשרת על-קריטית - נייטרונים מהירים), לבין תגובת שרשרת מבוקרת בריאקטור (הפועל על נייטרונים איטיים). על פי כל העדויות ההיסטוריות והקלטות פארס הול, רעיון הפצצה לא בשל אצל הייזנברג מעולם. יש לייחס את הכישלון הגרעיני הגרמני בעיקר לערפול בהבחנתו של הייזנברג בהבדל בין פצצה לריאקטור, לחוסר הגיונו ההנדסי (בניגוד לגאוניותו התיאורטית), למעמדו הסמכותי - שלא עודד ויכוח מדעי פורה, ולניהול הטכנולוגי/מדעי הכושל שלו.

### מסה קריטית

הידע כמה היא המסה המינימלית של אורניום 235 או של פלוטוניום 239 הנדרשת לפצצה - הוא החשוב ביותר להתקנת פצצות. המאמץ הטכנולוגי העצום הנדרש לקבלת אלפית הגרם של כל אחד משני החומרים הבקיעים הופכת את העניין הכמותי גרידא למהותי. על שלוש פצצות אטום אמריקאיות (אחת אורניום ועוד שתיים פלוטוניום), עבדו כ-100,000 איש במשך כשנתיים (ובהוצאה של כ 2 מיליארד דולר בשווי נוכחי). פצצת האורניום דמוית הסיגר שהחריבה את הירושימה הכילה 56 ק"ג אורניום 235 מועשר ל-89%. פצצת האישי השמני שהוטלה על נגסאקי הכילה 14 ק"ג פלוטוניום. מה ידע הייזנברג על מסה קריטית?

הידיעה על הטלת פצצת האטום על הירושימה הועברה לאסירים בערבו של ה-6 באוגוסט 1945, מפיו של מייג'ור ריטנר, הקצין הבריטי האחראי. הייזנברג ועמיתיו הוכו בהלם ובתדהמה, כפי שמעידים דבריו הספונטניים של הייזנברג:

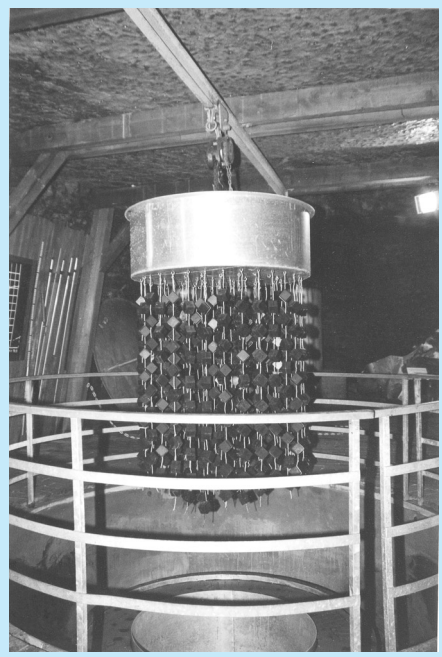
"... אין לזה שום קשר לאטומים", "איזה דיאבול אמריקאי הפיץ באו"ף", "... אני לא מאמין לאף מיזם", "אני חושב שיש פצצת אטום בארץ".

כשהייזנברג התחיל לעכל שמדובר בפצצת אורניום, הוא התייחס ישירות למסה הקריטית:

"... אני בהחלט סבור שיש ארס [לאמריקאים] 40 טון של אוקטיום מוקשר, אבל לא שיש ארס 40 טון של <sup>235</sup>U טהור".

המסה הקריטית, לפי הייזנברג, היא 10 טון של אורניום 235 'טהור'. אם המטען היעיל הוא כ-10 טון, מסת הפצצה ברוטו צריכה להיות כ-100 טון, וזו מסה ששום מטוס אז לא יכול היה לשאת. משהו נראה לא סביר בניתוח הספונטני הזה של הייזנברג, שגם דבריו בהמשך לוקים בחוסר הגיון.

לאחר שמיעת חדשות ה-BBC של 9 בערב מהרדיו שבחדר האוכל, כולל הודעות רשמיות של צ'רצ'יל (באמצעות ראש הממשלה הבריטי, אטלי) וטרומן, כבר לא היה ספק לידיירי פארם הול שפצצה איומה, פצצת-אטום אכן הוטלה. היתרון המדעי (המדומה) שהייזנברג, עמיתיו וממוניו הנאצים חשבו שהיה לזכותם, נמוג יחד עם הפטרייה הענקית מעל הירושימה. עתה נותרה הקושיה: איך עשו זאת האמריקאים? איך הצליחו להפריד אורניום 235 מאורניום טבעי? האם הצליחו לבנות ריאקטור ולהגיע לתגובת שרשרת?



תרשים 2: ריאקטור L-2 (הכור הגרעיני) הגרמני בהייג'רלוק.

האן, מגלה תהליך הביקוע, שלא היה מעורב ישירות במחקר הגרעיני הצבאי וחש אחריות מוסרית להשלכות הגילוי, הזדרז לשאול את הייזנברג מהי מסת האורניום הנדרשת לבניית הפצצה, והייזנברג עונה:

"בכנא, מוקום לא חילבגי זלא, מוקום שמוקום לא פאמני שניגן אקבא "235" טהור".

האם לא עסק הייזנברג בחישוב כזה (כתשובתו להאן), או שהבין ולא גילה לממונים, כדבריו לאחר המלחמה? מתשובתו להאן עולה על הדעת שהייזנברג אכן 'לא האמין' שניתן לקבל אורניום 235 ולכן לא ראה את האפשרות לבניית פצצה, ולכן גם 'לא עסק' בזה. הייזנברג, אגב, לא היה בודד בתפיסה זו. גם נילס בוהר היה משוכנע שלא ניתן להפריד אורניום 235 'אלא אם הופכים את כל ארה"ב לתעשייה אחת גדולה'. הבנתו הלקויה של הייזנברג עולה גם בהמשך. עמוק אל תוך הלילה המוטרף המשיכו האן והייזנברג בניסיון לפענח את סוד הפצצה, תוך שהם משגיחים על עמיתם ואלטר גרלאך, מי שהיה המנהל האחרון של המחקר הגרעיני הגרמני, ונראה היה קרוב לאיבוד עצמו לדעת כנגראל מובס. מתשובותיו של הייזנברג לשאלותיו החוזרות והממוקדות של האן ('כיכוד מוקום פאמני?', 'פאם די כ-30 ק"ג?', וכו'), עולה התמונה שהייזנברג:



תרשים 3: פרויקט "הכור הגרעיני" בהייגרוך בתום המלחמה.

ניסוחים כאלה מופיעים במסמכים משלושת הכינוסים. כך, מתחיל הייזנברג עם ריאקטור שבתנאים מסוימים יהפוך לחומר נפץ. אין אצלו הבחנה חדה וברורה בין שתי הטכנולוגיות השונות כל כך. חומר נפץ לשימוש צבאי מופיע באותו משפט ובאותה פיסקה שמתחילה עם ריאקטור (להפקת חשמל). יש היסטוריונים שחושבים שהייזנברג בכלל חשב על ריאקטור פצצה: הטלת כור גרעיני על לונדון. הנקודה החשובה היא חוסר ההבחנה הברורה בין ריאקטור הפועל עם אורניום טבעי או מועשר (בחלקו) ונייטרונים איטיים, לבין פצצה הפועלת עם אורניום מועשר ביותר ונייטרונים מהירים, ומהירים בלבד. ריאקטור יכול לצאת משליטה ולהתפוצץ, אך הוא כמובן לא פצצה גרעינית: צירנוביל היא דוגמא לכך שריאקטור גדול (כור גרעיני) יכול בהחלט להתפוצץ. האם הייזנברג לא הבין את ההבדל בין שני התהליכים השונים הללו? הייזנברג, כמתועד ברשומות פארם הול, אכן מבין שלפצצה נדרשים נייטרונים מהירים בלבד, והוא אומר זאת במפורש. אולם, במה שנראה כטעות אופיינית, הוא סותר את עצמו ואינו תופס את חוסר ההגיון ההנדסי והצבאי של כמה ענינים, כפי שנראה בהמשך.

מעמדו המדעי הבלתי מעורער של הייזנברג, יחד עם נטייה גרמנית להערצת סמכות, כל סמכות, גרמה לחוסר ביקורתיות מדעית מצד עמיתיו, ולקבלת דבריו כלשונם גם אצל נציגי השלטון הממונים. כך, בדו"ח סודי של הגסטאפו ממאי 1943, העוסק בהפקת אנרגיה מאורניום, מוזכרות שתי אפשרויות:

- טועה בגדלים של קבועים פיסיקלים רלוונטיים (מעיד על כישלון ניהולי מעבדתי),
- אינו מגדיר נכון את התנאי להתפתחות תגובת שרשרת במסה קריטית,
- מבלבל בין מסה מבוקעת (בפועל) ומסה קריטית,
- אינו מתייחס לחימום ההתחלתי העצום (ולכן להפסקת התגובה),
- מתייחס להחזרת נייטרונים מהירים בפצצה כאל נייטרונים איטיים (בריאקטור),
- טועה בחישובים, נטול הגיון הנדסי ולא מאבחן סתירות עצמיות.

אפשר לטעון, כפי שעשו רבים, שיש בדבריו של הייזנברג רק טעויות סמנטיות. שהוא הבין את העיקרון, אך טעה בפרטים בגין סערת הרגשות ומרחק הזמן. השיחות המצוטטות ברשומות של פארם הול התקיימו באוגוסט 1945, והייזנברג עסק (אם בכלל), בתיאוריית הפצצה רק עד אמצע '42, כאשר מהלך המלחמה כבר לא איפשר לגרמנים מאמץ תעשייתי בקנה מידה גדול. נעבור לעדויות אותנטיות מגרמניה האופטימית בתחילת המלחמה. עם הקמת 'מועדון האורניום' האקסקלוסיבי בראשות חיל החימוש הגרמני, פירסם הייזנברג שני מיסמכים סודיים (בדצמבר '39 ובפברואר '40). המסמכים (שנתגלו לאחר המלחמה) התוו את המשך המחקר הגרעיני הגרמני והציבו את הייזנברג כתיאורטיקן המוביל של הפרויקט. גם הרצאותיו של הייזנברג בשלושה כינוסים סודיים וחשובים בפני בכירים נאצים רמי מעלה בברלין הצליחו לשרוד: הראשון, בפברואר 1942, בראשות גנרל שומאן (Erich Schumann, הממונה על 'לשכת המחקר הצבאי'), ושר החינוך והמחקר רוסט (Bernard Rust), השני, ביוני 1942, בראשות שר החימוש והייצור הצבאי שפאר, (Albert Speer), והשלישי, בתחילת '43, במכון האווירונאוטי שבראשות מפקד חיל האוויר גרינג. בחיבוריו המדעיים ובכינוסים עצמם, ניתח הייזנברג את האפשרות להפקת אנרגיה מביקוע של אורניום בריאקטור (Engine, Burner, או Maschine במינוח הגרמני של אז). 'מבער' כזה, על פי הבחנתו (הנכונה), יוכל לפעול עם אורניום טבעי וחומר מאט (moderator) כמו גרפיט או מים כבדים. נפח מתקן כזה צפוי להיות גדול מאד ולא מתאים לשימוש צבאי. אולם, המשיך הייזנברג, אורניום מועשר יאפשר להקטין את נפח הריאקטור, שעתה יוכל לשמש כמנוע למטוסים, אוניות וצוללות, ו'אם [גאולוגיה] פהלשרה של אורניום

מדעי נטול השראה ונטול שיתוף פעולה עם מהנדסים ותעשיינים. גם כשהתעשייה שיתפה פעולה (חברות Auer, I.G. Farben ואחרות) נעשה הדבר רק על בסיס כלכלי וחוזים המבטיחים תמלוגים עתידיים. מעניין לציין לשם השוואה, שברגע שנרתמה חברת Dupont האמריקאית למבצע 'מנהטן', הוסכם שמעבר לכיסוי ההוצאות יסתכם רווח החברה בסכום של דולר אחד.

## מוסר

המחזה רומז על הקבלה מוסרית בין עבודת פיסיקאים משני צידי המתרס, ויותר מכך שבנסיעה לקופנהגן היה מרכיב מוסרי/התייעצותי. אם בוהר לא היה קוטע את השיחה, יתכן שהיה נסגר 'דיל' גרעיני בין בכיר המדענים של גרמניה והמערב. בכלל, המחזאי מאיר את הייזנברג כאופוזיציונר של המשטר הנאצי. לצורך הישרדותו נאלץ הייזנברג לבצע פשרות כואבות – חוסר היכולת להזכיר בהרצאותיו את השם "איינשטיין" היא אחת מהן – אך, בהתנהלותו של הייזנברג, על פי פריין, ניתן להבחין גם בשיקולים מוסריים ששיאן: מניעת מידע מדעי מן השלטון. המשמעות בפועל: הייזנברג חיבל במודע בפרויקט הגרעיני הגרמני. ראוי לציין בהקשר לכך:

המסע לקופנהגן לא היה המסע היחיד של הייזנברג במהלך המלחמה. הוא ערך 10 סיורי חוץ נוספים ברחבי האימפריה הנאצית. אמנם, כל נסיעה היתה קשורה בארוע מדעי, בדרך כלל בעקבות הזמנת המארחים ובאישור ובתיאום עם השלטונות, ודיווח ללישכת התרבות הגרמנית בארץ היעד, לישכה שהיתה סניף תעמולה של משרד החוץ הגרמני, שהזן במדיניות התעמולה של גבלס.

להוציא את סינגורו העצמי של הייזנברג על נסיבות נסיעתו מטעמים מוסריים לקופנהגן, ועל ה'התנגדות האקטיבית' שלו לרוע הנאצי, אין עדויות נוספות התומכות בטעונו לשיקולים מוסריים. הייזנברג נשך שפתיים, והמשיך לשחות עם הזרם הלאומי הגרמני. מה שהניע אותו, במהלך ה'יתקלה' הגרמנית הנאצית היה פטריוטיות גרמנית, דאגה כנה לפיסיקאים, לפיסיקה ולתשתית המדעית שבאחריותו, למשפחתו, ולמעמדו האישי. גם הסקרנות המדעית גרידא לא הרפתה ממנו. גם בעת ה'מלחמה הטוטאלית' עליה ציווה היטלר, המשיך הייזנברג ליהנות מסיוע תקציבי, מתמיכה פוליטית, ומותרות על גיוסם לחזית של חלק מאנשיו. עובדות אלה, יחד עם ניסיונות רפים לסייע למתנגדי משטר ועמיתים בחו"ל, יכולים בהחלט להיחשב כהישג הישרדותי של הייזנברג, מה גם שקשה להעריך

'מנועי' ופצצה. בזו האחרונה, אין לתת לנייטרונים לברוח (נכון!) ויש לגרום להם להאטה, וזה כבר לא נכון, ומעיד על הבילבול שבין שתי הטכנולוגיות. כלומר: גם באמצע 43 סברו הגרמנים שחומר נפץ גרעיני מתקבל מצירוף (מוזר) של אורניום ונייטרונים איטיים. אמנם, יש עדויות שמשלב מסויים הייזנברג הבין שלפצצה נחוצים נייטרונים מהירים בלבד, ובפארם הול הוא אומר זאת באופן חד וברור, אך אין עדות להבחנה ברורה שבין שתי הטכנולוגיות, לפחות לא עד 43.

ממסמכים נוספים שנתפסו לאחר המלחמה עולות עוד שתי טעויות של הייזנברג:

- הסתבר שהייזנברג וחבריו ניצלו רק בנס מקטסטרופה שהביאו על עצמם: ניסויי הריאקטור האחרונים (במרתף יין סלעי ומוגן שבהייגרלוד) תוכננו ובוצעו ללא **מוטות בקרה** פנימיים. מוט בקרה מורכב מחומר בולע נייטרונים כגון קדמיום שבכוחו לעצור תגובה גרעינית העומדת לצאת משליטה. על פי ניתוח (מוטעה) של הייזנברג, תגובת השרשרת בריאקטור אמורה להיעצר מעצמה (בזמן!) עם עליית הטמפרטורה. אמנם העיקרון נכון – עם עליית הטמפרטורה והתפשטות החומר חלה ירידה בקצב הביקועים עקב הגדלת ה'מהלך' החופשי הממוצע לביקועי שעושה נייטרון – אך קצב התפתחות אנרגיית החום עלול להיות קטלני. למזלם הרב לא הגיעו הגרמנים לתגובת שרשרת קריטית. במקום לשלוט במשוואות עם מקדמי ביטחון ראויים (כפי שיודע לעשות כל מהנדס מתחיל), נשלט הייזנברג, אחד מגדולי התיאורטיקנים, על ידי משוואותיו. הייזנברג הפיסיקאי המעולה היה כנראה מהנדס חלש.

- **מים כבדים**: ניסוי רשלני של בותה (Walter Bothe), נסמך על תיאוריה שגויה של הייזנברג ועל אימות (שגוי) של וייצזקר, הוביל להחלטה גרמנית אומללה להתבסס על מים כבדים מנורבגיה הכבושה, ולא על **גרפיט** מגרמניה. בארבע תקיפות (מהקרעק ומהאוויר) הצליחו בעלות הברית בעזרת המחותרת הנורבגית לפגוע במתקן המים הכבדים במפעל Rjukan שבהרי טלמרק המושלגים ולהרוס אותו, ולהותיר את גרמניה עם מלאי מוגבל ביותר של הנוזל. בהיעדר גרפיט באיכות מתאימה, נועד המאמץ הגרמני לכישלון בהתחשב בהיבט זה בלבד. הטעויות הללו הועצמו בעקבות אופיו הסמכותי והבלתי מעורער של הייזנברג, שנשתלב באווירה של מריבות על משאבים, תקציבים והכרה של השלטונות, יחד עם ניהול

את הטירוף והאיום האישי ששררו בגרמניה ואיימו גם על טובי בניה.

על פניו נראה שהייזנברג הצליח לתמרן היטב בכל מהלך המלחמה בין שתי נקודות קיצון. מחד, הצבעתו על הפוטנציאל האנרגטי הקיים בגרעין האורניום ורמיזותיו לינשק פלאי - אלה הבטיחו קצה חוט של תמיכה שלטונית קריטית ותקציבי פיתוח. ומנגד, יכולתו למנוע את ההנחייה המפורשת לבנות פצצה, מה שהיה מעמיד את הייזנברג ועמיתיו בפני דרך ללא מוצא: כישלון בבנייה היה נתפס כבגידה, והצלחה (השמדת לונדון ומוסקבה) היתה עלולה לעגן את הנאציזם לעוד 1000 שנים. היכולת לאחוז את מוט האורניום בשני קצותיו בולטת בדבריו של הייזנברג לאחר המלחמה, וב'קופנהגן': הוא שלט בעניינים והוליך את הנאצים בנתיב שלו, ולא 'שלהם' או של דיבנר: "מה שעובד - עובד!" במסמכים שנתפסו לאחר המלחמה אין עדויות התומכות בגישה חוץ עניינית של מי שניהל מדעית את פרויקט האורניום הגרמני, והחל מאמצע 1942 ניהל את מכון קיזר וילהלם לפיסיקה ושרת כפרופסור באוניברסיטת ברלין. גישתו של הייזנברג נגזרה מתפיסתו שרק בשיתוף פעולה (מסוייג) ניתן ל'התנגד' לרוע הנאצי. כל פעולה חריגה הרי תוביל למאסר או תלייה. מבחינתו של הייזנברג פשרה והישרדות היו שם המשחק, לא מוסר.

אליזבט, אשתו המסורה ואם שבעת ילדיו של הייזנברג, היטיבה לתאר את הבועה שיצר הייזנברג סביבו כדי לשרוד את התקופה הנאצית, בספרה 'גלות פנימית'.

## סיכום

השאלה מה קרה בקופנהגן נותרת פתוחה גם בתום המחזה המעולה הזה. אולם, על פי פריין, ביסודו של הביקור עומדת ההנחה שהייזנברג הבין את פיסיקת הפצצה, ומרגע שהבין ב-1941 שינסללה הדרך לפצצת אטום, החליט להתייעץ עם מורו ורבו, נציג מדעני המערב. התייעצות כזו יכולה היתה לאפשר מניעה הודדית של פיתוח פצצות אטום. המפגש עצמו התפוצץ, אך הייזנברג מצידו מנע במודע את פיתוח הפצצה בגרמניה הנאצית, תוך שהוא מצליח לשמור על שליטה והכוונה של הפרויקט הגרעיני לבל יפול לידיים נאציות לא אחראיות, ושיוותר בשלב המעבדתי בלבד. עמדות דומות לתיזה של "קופנהגן" הציגו במשך 50 שנים היסטוריונים ועיתונאים רבים שקיבלו כפשוטם את טיעונו של הייזנברג עצמו.

השאלה מה התרחש בפועל במהלך המפגש חשובה פחות משתי שאלות עקרוניות: מה ידע הייזנברג על פיסיקת הפצצה, והאם אכן ניסה למנוע במודע פצצת אטום מהיטלר. לפי פריין, הבין הייזנברג את רזי הפיסיקה ובמעשיו ומחדליו הבטיח שלגרמניה לא יהיה נשק ליום הדין. הייזנברג הצליח לתמרן את פרויקט האורניום כך שהשליטה במתרחש היתה בידי ולא הועברה לפיסיקאים מיליטנטיים כמו דיבנר. וכמו שהייזנברג אומר במחזה - "זה פשוט עבד!" כל דרך אחרת - התנגדות אקטיבית - היתה מובילה לאבדן השליטה שלו בפרויקט, ואולי לחיסולו הפיזי. עד כאן התיזה המובילה של "קופנהגן". ניסיתי להראות, על בסיס הקלטות פארם הול וציטוטים אותנטיים, שהבנתו של הייזנברג את פיסיקת הפצצה היתה לקויה, ויחד עם הניהול המדעי הכושל נועד הפרויקט לכישלון מעצמו. **אין עדויות התומכות לחבלה מכוונת של הייזנברג.**

הייזנברג פשוט לא תפס שקיימת אפשרות ריאלית של בניית הפצצה בזמן סביר. בכל מקרה החל מ-1942, כבר לא היתה לגרמנים אופציה מערכתית למבצע רחב היקף כזה. מובן, שהייזנברג לא ערך מעולם חישוב של המסה הקריטית הנדרשת לבניית הפצצה. העניין הוא, שבשעה שהוא ערך חישוב כזה, אל מול מיקרופונים סמויים בפארם הול, לא רק שהוא טעה באריתמטיקה, אלה שגה בכל תהליך החשיבה והפיתוח. הייזנברג היה פיסיקאי גדול, ענק, אחד מהבולטים בגלריית הפיסיקאים במאה ה-20. ברם, ביצועיו כפיסיקאי ניסויי היו נטולי הגיון הנדסי. זה עיקר ההבדל בינו ובין אופנהיימר ופרמי. יהירות עצמית מופרזת המטופחת על ידי חוסר ביקורתיות של עמיתיו הקרובים, חוסר שיתוף פעולה עם מהנדסים וטכנאים, מאבקים עם קבוצות מתחרות על משאבים מוגבלים ודיכוי חופש החשיבה הם חלק מהסיבות לכישלון הגרמני.

לגבי מהלך המפגש עצמו, ובעיקר לגבי יחסו המפורש של בוהר למתרחש בו, הוסר לאחרונה מעט מהערפל שעטה את ההתרחשות הטעונה הזאת. לאחרונה נתגלו מכתבים בכתב ידו של בוהר, והותרו לפרסום על ידי בני משפחתו. המכתבים דנים בפגישת בוהר והייזנברג בקופנהגן 1941, ואחד מהם נתגלה בספרייה האישית של בוהר, בתוך ספרו של ר. יונק, *Brighter than a thousand suns*. יונק מתאר את שליחותו של הייזנברג כמסע רצון טוב של פיסיקאי שגם הבין את רזי הפיסיקה, גם שלט במצב ובעיקר גילה גישה מוסרית עליונה.

בראש המירוץ לפצצה. הציטוטים לקוחים מתוך מסמך של הייזנברג לחיל החימוש הגרמני מה-29 לפברואר 1940.

- רשימה נבחרת של הבולטים מבין המצדדים בדעה של הייזנברג בדבר היכולת של גרמניה לבנות את פצצת האטום מובאת ברשימה לקריאה נוספת (מספרים 2,3,4,5).

תודתי נתונה ליצחק גרטי שקרא את כתב היד והעיר הערות חשובות.

### לקריאה נוספת:

1. Frayn, Michael, Copenhagen., Methuen Publishing, London 1998.
2. Powers, Thomas, Heisenberg's War: The Secret History of the German Atomic Bomb, Jonathan Cape, London 1993; book review in : Science **259**, 26.03. 1993.
3. Walker, Mark, Nazi Science: Myth, Truth and the German Atomic Bomb, Plenum, New York, 1995.
4. יונק, רוברט, שבעתיים כאור החמה, מחברות לספרות, 1960.
5. Irving, David, The German Atomic Bomb: The History of Nuclear Research in Nazi Germany, DaCapo, New York n.d.1982
6. Goudsmit, Samuel A., ALSOS, Henry Schuman, New York 1947; with a new introduction by David Cassidy, American Institute of Physics, New York 1995.
7. Bernstein, Jeremy, Hitler's Uranium Club; The Secret Recordings at Farm Hall, introduction by D. Cassidy, AIP Press, Woodbury New York 1996.
8. Heisenberg, E., Inner Exile: Recollections of a life with Werner Heisenberg, Birkhauser, Boston 1984.
9. Heisenberg, W., The Theoretical Foundations for Obtaining Energy from Fission of Uranium, מאמר זה מופיע כנספח בספרו של ברנשטיין (7) וניתן במקורו כהוצאה במכון הגרמני למחקר ב-26.2.42
10. Bethe, H.A., The German Uranium Project, Physics Today, **53**, (7), July 2000, pp. 34-36.
11. <http://www.nbi.dk/NBA/papers/docs/d01tra.htm> המקור למכתב של בוהר בעקבות קריאת הספר של ר. יונק (4).

בוהר, כנראה בעקבות קריאת הספר, החליט להכין מכתב נזעם להייזנברג. לבסוף החליט לא לשלחו, והטיטה נותרה מיותרת. תצלום המכתב, יחד עם תרגום לאנגלית נמצא באינטרנט באתר:

<http://www.nbi.dk/NBA/papers/docs/d01tra.htm>

המכתב הזה של בוהר, יחד עם עוד כמה מסמכים שלא פורסמו, תומכים בעדויות של מרגרט (אשתו של בוהר), סטפן רוזנטל (עוזרו של בוהר), ובעיקר של Åge (בנו של בוהר): בוהר נותר כועס ונסער מהפגישה העיונית עם הייזנברג.

לסיום, נחזור אל האמנות שבמחזה המופלא הזה. מהו סוד הקסם במחזה? המלצתי היא לראות את ההצגה. תפאורה דלה, אקורדי מוסיקה בודדים וכמה רגעים גדולים בפיסיקה גרעינית, התבוננות אנושית עמוקה ועושר של רעיונות, הם חלק מסוד קסמו של המחזה. לטעמי תרומתו של פריין לעניין בהיסטוריית הפיסיקה הגרעינית רבה מתרומתם של ספרי לימוד רבים.

### הערות:

- הבית ניתן לבוהר ב-1931 כהערכה של העם הדני. משפחת בוהר על חמשת ילדיה גרה בבית המרווח עד למותו של נילס בוהר ב-1968. הבית שנתרם על ידי מבשלת השיכר 'קרלסברג', נמצא סמוך אליה. ניתן לראות היום את הבית, במהלך סיור הפתוח לציבור, במוזיאון קרלסברג (קופנהגן).
- תשע קבוצות מחקר היו מעורבות ב-Uranprojekt הגרמני, ביניהן: **בברלין** במכון קייזר ווילהלם לפיסיקה: הייזנברג, וייצקר ווירץ; **במעבדות משרד הדואר**: הוטרמנס ופון ארדן; **בחיל החימוש**: דיבנר ובאגה; **בהייזלברג**: בותה; **במינכן**: גרלאך; **בהמבורג**: פאול הארטק; ובעיקר **בלייפציג**: הייזנברג והזוג דופל. פיצול זה לא הוסיף חיות לפרויקט.
- הריאקטור L-2 הכיל לראשונה **מים כבדים** (בשתי מעטפות כדוריות מאלומיניום), לסירוגין עם תחמוצת אבקתית של **אורניום טבעי**. הכפלת הנייטרונים – גידול של 13% של שטף הנייטרונים היווה שיא עולמי לזמנו והציב את הגרמנים