

# קרינת סינכרוטרון

יצחק שטיינברגר, מכון רקח לפיסיקה, האוניברסיטה העברית, ירושלים.  
ועדה יזנת, ביולוגיה מיבנית, מכון ויצמן למדע, רחובות

**תקציר:** המקורות להפקת קרינה אלקטרומגנטית בעוצמה הגבוהה ביותר כיום בתחום קרני-X ואולטרא-סגול הוואקואום הם המקורות לקרינת הסינכרוטרון. קרינה זו מתקבלת מאלקטרונים בעלי מהירויות קרובות מאוד למהירות האור, הנעים במסלולים סגורים. היא מהווה משאב מחקר ייחודי בגלל עוצמתה, הספקטרום הרציף הרחב שלה, מיקודה וקיטובה. על קיומה מבססים כיום אלפי מדענים, כולל פיזיקאים, כימאים, ביולוגים ואחרים את מחקריהם. במאמר מתוארות תכונות הקרינה, עקרונות מאיצי האלקטרונים אשר מהם היא מופקת, וכן תחומי מחקר ויישום אחדים המתנהלים באמצעותה.

**מילות מפתח:** סינכרוטרון, טבעת אגירה, ויגלר (wiggler), אונדולטור (undulator), ספקטרוסקופיה של פוטואלקטרונים, עקיפת קרני-X מגבישים ובמיוחד ביולוגיים, טופוגרפיה של גבישים, אקסאפס (EXAFS), פעילות ביולוגית בזמן אמת.

## 1. הקדמה

הכוללים פיזיקאים, כימאים, ביולוגים, חוקרי חומרים ואחרים מערכות ניסוייות מורכבות ומעבירים אותן - לתקופות מוגבלות - למתקנים מרוחקים אלה, ומדוע מחפשים את הפתרונות במקום, שבו האור - הקרינה האלקטרומגנטית - מתאים.

## 2. העיקרון

ידוע כי מטען חשמלי מואץ, למשל באנטנה, משדר גלים אלקטרומגנטיים. אם תנועת המטען היא הרמונית, מתקבלת קרינת דיפול: הגלים מתפשטים למעשה לכל הכיוונים, פרט לכיוון התנועה עצמה. תדר הגלים שווה לתדר התנועה שיצרה אותם. אם המטען נע במסלול מעגלי במהירות שגודלה קבוע, מתקבלת קרינה בתדר התנועה הסיבובית, בפריסה המרחבית המתוארת בתרשים 1א.

תנאי יסודי, שאינו מודגש תמיד, לנכונות השיקולים דלעיל הוא, שמהירות המטען הנע קטנה מאד בהשוואה עם מהירות האור  $c$ . לא כן, אם מהירות המטען מתקרבת ל  $c$ , התמונה תשתנה והשינויים מפליגים. חישובים, המתבססים על תורת היחסות הפרטית מראים, שמטען חשמלי נקודתי הנע על פני מעגל במהירות הקרובה למהירות האור ישדר גלים אלקטרומגנטיים עם המאפיינים הבאים:

1. התפלגות מרחבית. הקרינה אשר מתפשטת, אם מהירות המטען נמוכה, כמעט לכל הכיוונים (תרשים 1א), מתרכזת עתה בכיוון המשיק למעגל בלבד, בחרוט צר מאד (תרשים 1ב). אנלוגיה יום-יומית פשטנית היא אלומת האור שיוצר פנס הדרך של אופנוע הנע בלילה במסלול מעגלי.

2. התפלגות ספקטרלית. שדה הקרינה מכיל לא רק גלים בתדר התנועה המעגלית, אלא גם בכפולות שלמות רבות של תדר זה (תדרים עיליים הרמוניים). לשם המחשה, אם מהירות האלקטרון על המסלול המעגלי קרובה דייה למהירות האור,

בדיחה ירושלמית ישנה מספרת על אדם שבאחד הערבים חיפש במרכז העיר מטבע שאבדה לו. עובר אורח מנסה לעזור לו, אך ללא הצלחה. לבסוף הוא שואל "איפה בדיוק איבדת את הכסף?". "בשכונת בית ישראל, אבל התאורה כאן הרבה יותר טובה".

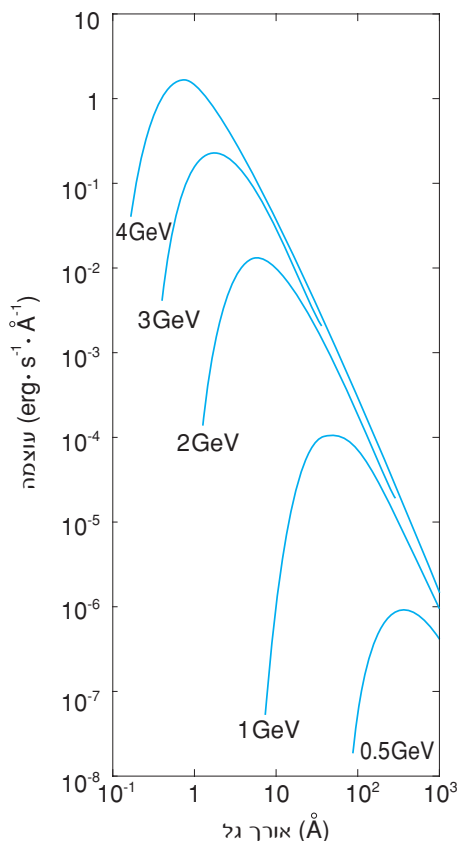
זה עשרות רבות של שנים משמש אור, וקרינה אלקטרומגנטית בכלל, במחקרים רבים ושוניים במדעי הטבע. פיתוח מקורות קרינה חדשים הוביל מאז ומתמיד הן לתחומי-מחקר חדשים, והן ליישומים חשובים. גילוי קרני-X איפשר את קביעת סידור מערך האטומים באין ספור חומרים ומערכות, ובעיקר בגבישים. קרני-X מהוות, כמעט מאז גילויו, כלי מרכזי באבחון הרפואי. באמצעות לייזרים נחקרות מגוון רב של תופעות, ביניהן, למשל, תופעות לא-ליניאריות ותהליכים מהירים מאד; משתמשים בלייזרים ברפואה, בתעשייה ואנו נעזרים בלייזר כששומעים מוסיקה מתקליטור. גלי מיקרו מאפשרים, בין היתר, חקר תופעות תהודה אלקטרומגנטית למיניהן, ומנוצלים ניצול נרחב בתקשורת האלקטרונית, ונכנסו גם למטבח המודרני. מקור לקרינת סינכרוטרון הוא מתקן גדול ויקר, שבו מתקבלת קרינה אלקטרומגנטית מאלקטרונים הנעים במסלולים סגורים במהירות קרובה מאוד למהירות האור. ספקטרום הקרינה רציף ורחב, משתרע מתחום האינפרא-אדום עד תחום קרני ה-X ועד בכלל, בעוצמה העולה בסדרי גודל רבים על זו של כל מקור מעבדתי רציף, והוא חיוני לביצוע מחקרים בנושאים רבים ושוניים. במאמר זה נתאר את מאפייני קרינת הסינכרוטרון, נציג את עקרונות הפעולה של המקורות, כלומר של מאיצי האלקטרונים המיוחדים, שמהם מופקת הקרינה, נתאר תחומי-מחקר אחדים מיני הרבים, המבוססים על הקרינה, וגם קצת מיישומיה. נשאף לספר, למה אורזים מדענים רבים,

- א. הספקטרא (העקומות **בתרשים 2**) עבור ערכים שונים של  $E$  זהים זה לזה, פרט להזזות בכיוון אופקי ואנכי.  
 ב. העקומות מועתקות כלפי מעלה עם עליית  $E$  - העוצמה הכוללת עולה עם עליית  $E$ . התיאוריה מראה, כי מטען נקודתי  $e$  בעל אנרגיה  $E$  הנע במהירות הקרובה מאוד למהירות האור  $c$ , לאורך מסלול מעגלי בעל רדיוס  $R$  ישדר קרינה אלקטרומגנטית בעוצמה כוללת  $I$  הניתנת על ידי הנוסחה:

$$I = \frac{2e^2c}{3R^2} \left( \frac{E}{m_0c^2} \right)^4$$

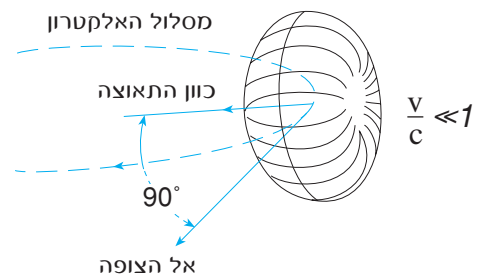
- $m_0$  היא מסת המנוחה של המטען.  
 ג. עם עליית  $E$  הספקטרא מועתקים לאורכי גל קצרים יותר, כלומר אנרגיית הפוטונים שבקרינה גדלה. תלות  $\lambda_p$ , אורך הגל של שיאי העקומות, ב-  $E$  ניתנת על ידי הנוסחה:  

$$\lambda_p = \text{const} \cdot R/E^3$$
  
 ד. באורכי-גל ארוכים (ראה **תרשים 2**) ההתפלגויות עבור ערכי  $E$  שונים שואפות לאותה עקומה.

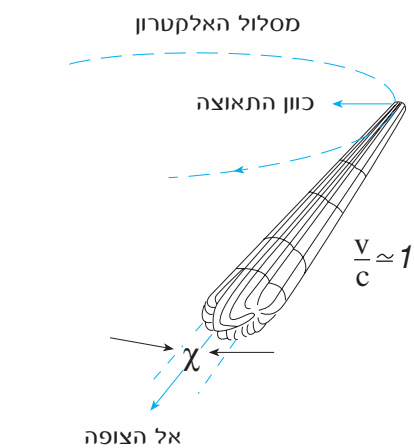


תרשים 2: עוצמת הקרינה הכוללת המחושבת המוקרנת על ידי אלקטרון הנע במסלול מעגלי של 20.77 מטר, כפונקציה של אורך הגל, לאנרגיות שונות של האלקטרון.

- ותדר תנועתו תדר רדיו, כ- $10^6$  הרץ, ישודרו גלים בעוצמה רבה אפילו בתדרים מסדר-גודל של  $10^{18}$  הרץ - תחום של קרני-X. למעשה במקורות סינכרוטרון התדרים העיליים מתמזגים **לספקטרום רציף רחב מאוד**, המשתרע על פני סדרי-גודל רבים. לשם השוואה נזכיר, שנורות להט למיניהן מספקות רצף בעל עוצמה ניכרת בתחום של פחות משני סדרי-גודל של תדרים, ושפופרות של קרני-X בפחות מסדר-גודל אחד.  
 3. **קיטוב**. הקרינה המשודרת במישור המסלול הסגור של תנועת המטען מקוטבת קיטוב ליניארי במישור התנועה.  
 4. **תזמון**. הקרינה נפלטת בפולסים קצרים מאוד, עם הפרשי זמן קבועים ביניהם. תכונה זו קשורה במבנה מקורות הקרינה כפי שיוסבר להלן.



תרשים א1

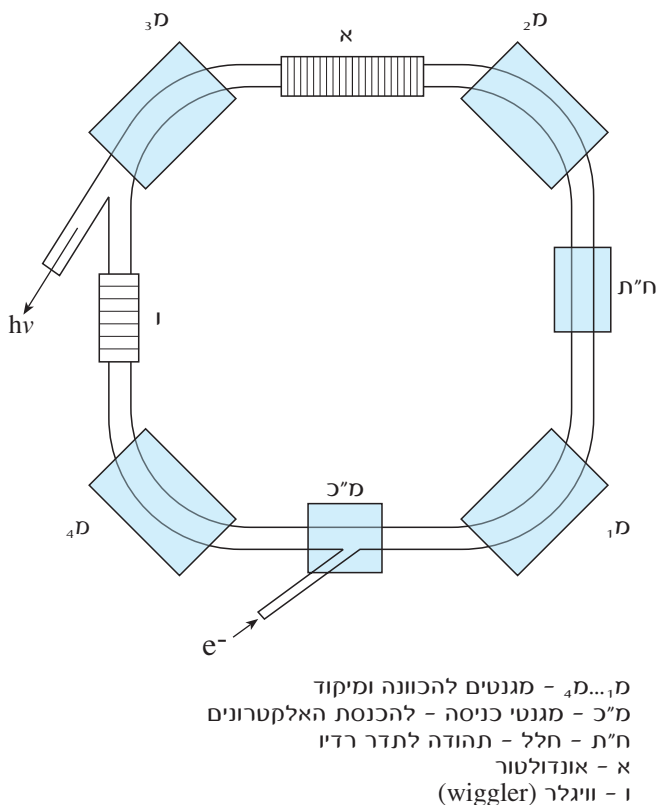


תרשים ב1

תרשים 1: שדה הקרינה של מטען חשמלי הנע על מסלול מעגלי.  
 א - כאשר מהירות המטען קטנה מאד ביחס למהירות האור;  
 ב- כאשר מהירות המטען קרובה מאד למהירות האור. (זווית הפתיחה של החרוט היא  $\chi$ )

**תרשים 2** מתאר את ההתפלגות הספקטרלית של הקרינה עבור ערכים שונים של האנרגיה  $E$  של האלקטרון. ואלה הן תכונות הספקטרא:

גבוה מאד, לחץ של  $10^{-10}$  טור או פחות. זה מבטיח שהאלקטרונים שהוכנסו לטבעת יתנגשו רק לעתים רחוקות יחסית עם שארית הגזים, ורובם ימשיכו לשוב, ללא הסחה ממסלולם או לכידה על ידי שאריות הגזים, במשך שעות רבות. תאור סכימטי של מבנה טיפוסי של טבעת אגירה מופיע **בתרשים 3**. רואים שהטבעת מורכבת מקטעים ישרים וכפופים לסירוגין. מסביב לקטעים המכופפים נמצאים מגנטים הגורמים להטיית האלקטרונים בכיוון הכיפוף ולשמירתם במסלול יציב ומדויק. מהאזורים הכפופים מתקבלת קרינת סינכרוטרון, אותה מוציאים אל הניסויים באמצעות צינורות בכיווני המשיקים (קווי אלומה - beam lines).



תרשים 3: תאור סכימטי של טבעת אגירה. מ<sub>1</sub>...מ<sub>4</sub> - מגנטים להכוונה ולמיקוד; מ"כ - מגנטי כניסה - להכנסת האלקטרונים; ח"ת - חלל תהודה לתדר רדיו; א - אונדולטור; ו - ויגלר.

אך מה תפקיד הקטעים הישרים? הרי מהם לכאורה (ראה משוואה 1) אי אפשר להפיק קרינה? ראשית, באחד הקטעים הישרים נמצא חלל תהודה לתדר רדיו (מסדר גודל של  $10^6$  הרץ), שבו שדות חשמליים המתנוודים בתדר זה מבטיחים להחזיר לאלקטרונים את האנרגיה שהפסידו על ידי הקרינה. התדר נקבע על ידי זמן

כל תכונות הקרינה שפורטו לעיל מנוצלות במחקרים מדעיים ועל כן יסופר בהמשך. נדגיש, כי התכונות מתייחסות לאלקטרון שהאנרגיה שלו בתחום הרלטיביסטי המובהק, מסדר גודל של  $10^9$  אלקטרון וולט. מאידך מסת המנוחה  $m_0$  של האלקטרון מתאימה, לפי הנוסחה  $E_0=m_0c^2$ , לאנרגיה  $E_0$  של כחצי מיליון אלקטרון וולט בלבד. כלומר, האנרגיה, או המסה, של האלקטרון שבו מדובר, גדולה אפוא פי אלף ויותר מזו של אלקטרון במנוחה. במונחי המהירות  $v$  של אלקטרון פרוש הדבר ש  $v$ -קטנה ממהירות האור בפחות ממאה מטרים לשניה;  $v \sim 0.9999999c$ .

### 3. מקורות לקרינת סינכרוטרון

חלקיקים בעלי מטען חשמלי המואצים לאנרגיה גבוהה משמשים זה עשרות רבות של שנים לחקר גרעיני אטומים וחלקיקים אלמנטריים. הסינכרוטרון הוא אחד ממאיצי החלקיקים. צורתו טבעת חלולה (אבוב), בעלת קוטר של מטרים או עשרות מטרים, מרוקנת מאוויר. בתוך הטבעת פועלים שדות חשמליים לשם האצת החלקיקים, ושדות מגנטיים לשם החזקתם במסלול מעגלי ומניעת התבדרותם לאורך המסלול. בסינכרוטרון מואצים חלקיקים (בקבוצות - קבוצות) על ידי העלאה הדרגתית של השדות. כאשר אנרגיית החלקיקים מתאימה, מכוונים אותם אל המטרה.

המשתמשים הראשונים בקרינת סינכרוטרון הפיקו את הקרינה מסינכרוטרון קיים, על ידי הוספת צינור (שגם בו שרר ואקוואום) בכיוון המשיק. בקצה הצינור הציבו את מערכת הניסוי. אולם עוד בשנות השבעים החל השימוש **בטבעות אגירה - storage rings** כמקורות קרינה במקום סינכרוטרונים. גם בהתקנים אלה סובבות קבוצות אלקטרונים במסלולים סגורים בתוך צינור; האלקטרונים מגיעים לתוכו כבר באנרגיה המבוקשת, ממאיץ סינכרוטרון צמוד. היות שהאלקטרונים בסינכרוטרון מואצים קבוצות-קבוצות, גם האור מטבעת האגירה מופיע בפולסים. היתרונות העיקריים של טבעות האגירה לעומת סינכרוטרון כמקור קרינה, הם **אנרגיה קבועה** של האלקטרונים, ולכן גם ספקטרום קבוע וכן יציבות הרבה יותר גבוהה של מיקום מסלול האלקטרונים בתוך הטבעת. כיום כמעט כל מקורות קרינת הסינכרוטרון הפעילים הם טבעות אגירה; רובן נבנו לשם **הפקת הקרינה בלבד**, ואינן משמשות לניסויים באמצעות האלקטרונים עצמם. היקפן של הטבעות השונות הוא של עשרות ואף מאות מטרים. זרם האלקטרונים מגיע במקורות מסוימים עד אמפר אחד. בטבעות שורר ואקוואום

אולם מספר המגנטים יותר גדול (עשרות אחדות) וקוטבי המגנטים קטנים בהרבה. במסלול האלקטרון הנכנס לאזור האונדולטור יהיו פיתולים, כמו במקרה של הוויגלר (תרשים 4), אולם צפיפותם הגדולה של הפיתולים מאפשרת **התאבכות** בין הקרינה היוצאת מהפיתולים השונים: מתוך הספקטרום הרחב (תרשים 2) אורכי גל מסוימים יתאבכו התאבכות בונה, אחרים התאבכות הורסת. באורכי הגל שבהם ההתאבכות בונה (מסדר ראשון ומסדרים גבוהים יותר) עוצמת הקרינה המופקת תהיה גדולה בסדרי גודל אחדים מזאת, המופקת מאזורי הכיפוף. העוצמות המתקבלות מאונדולטורים הן הגבוהות ביותר שניתנות להפקה ממקורות סינכרוטרון, אולם ספקטרום הקרינה אינו רציף. הוא מכסה תחומים מצומצמים יותר מאשר הספקטרום מאזורי הכיפוף או מוויגלרים.

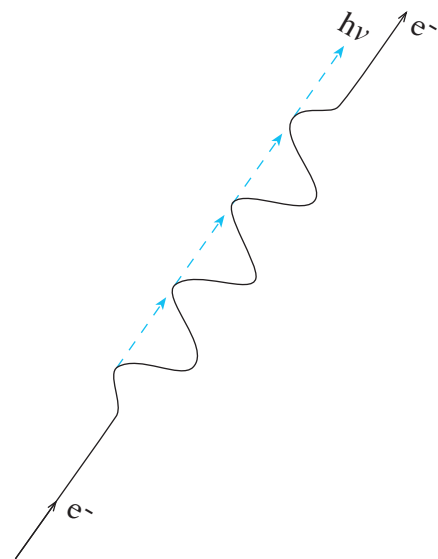
כיום פועלים בעולם מעל ארבעים מקורות סינכרוטרון המיועדים למחקר, וכתריסר נוספים נמצאים בשלבי תכנון או בניה שונים. לשם השוואה נציין, כי לפני עשרים שנה פעלו רק כתריסר מקורות. בנוסף, קיימים גם מספר מקורות קטנים, המשמשים את התעשייה (ראה להלן). ניתן לחלק את המקורות לשתי קבוצות, בהתאם לתחום הספקטראלי שלו הם מותאמים במיוחד:

1. טבעות-אגירה המיועדות לתחום אולטרא-סגול הוואקואום (VUV, vacuum ultraviolet), התחום, שבו הקרינה נבלעת חזק על ידי האטמוספירה (מ-6.8 עד 100 אלקטרון-וולט, או מ-182 עד 12 נאנומטר), וקרני ה-X הרכות (מ-100 עד 600 אלקטרון וולט, או מ-12 עד 2 נאנומטר). אנרגיית האלקטרונים E במתקנים אלה אינה עולה בדרך כלל על גיגא-אלקטרון-וולט אחד ( $10^9 = 1\text{GeV}$  אלקטרון וולט).

2. טבעות-אגירה המיועדות בעיקר לתחום קרני ה-X הקשות, כלומר להפקת פוטונים באנרגיות מעל 600 אלקטרון וולט (אורכי גל מתחת ל-1.2 נאנומטר). E במתקנים אלה מגיע ל-6 עד 8 גיגא-אלקטרון-וולט. עבור אורכי גל ארוכים מ-180 נאנומטר השימוש במקורות סינכרוטרון נדיר, היות שבתחום זה, של האולטרא-סגול הקרוב יותר, הנראה והאינפרא-אדום קיימים מקורות אור מעבדתיים מצוינים.

נציין, שקרינת סינכרוטרון נוצרת גם ללא טבעות-אגירה וללא מעבדה כלשהי. קרינה כזאת זוהתה גם מגרמי שמיים, שבהם שורר שדה מגנטי גבוה ושב חלקיקים טעונים נעים במסלולים מעוקמים במהירויות רלטיביסטיות, למשל, בשאריות של סופר-נובה.

ההקפה, אשר שווה, בקירוב מצוין, לאורך של מסלול סגור אחד מחולק במהירות האור. שנית, קיום מרווח בין האזורים הכפופים מאפשר להציב ניסויים ללא צפיפות גדולה מדי. שלישית, גם את הקטעים הישרים מנצלים להפקת קרינה, וזאת באמצעות התקנים מיוחדים, שאחד מהם הוא הוויגלר (wiggler). הוויגלר מורכב ממערך של מגנטים זהים אחדים, סמוכים זה לזה, היוצרים שדות מגנטיים ניצבים למישור מסלול האלקטרונים. השדות שווים זה לזה בגודלם אך מגמותיהם מתהפכות לסירוגין. השדות המתהפכים גורמים לאלקטרון העובר בין הקטבים לסטות שמאלה, אחר כך ימינה וחוזר חלילה (תרשים 4). לכל אחד מהפיתולים רדיוס עקמומיות R קטן בהרבה מאשר לקטעים הכפופים של הטבעת. לפיכך, בהתאם למשוואות 1 ו-2, תגדל העוצמה הכוללת I של הקרינה, וכל הספקטרום יוזז לאורכי גל קצרים יותר. נציין, כי צורכי מחקרים שונים דוחפים את מתכנני מקורות הסינכרוטרון לבנות מקורות עם עוצמות הולכות וגדלות ועם ספקטרא הכוללים תחום גדול יותר של קרני X. הוויגלר משיג מטרות אלה ללא הגדלת E וללא בניית טבעת גדולה, מסובכת ויקרה יותר.



תרשים 4: עקרון הוויגלר. על האלקטרון  $e^-$  הנע במישור הנייר פועלים שדות מגנטיים בניצב לנייר, המתהפכים בכיוונום לסירוגין. קרינת סינכרוטרון נפלטת מכל פיתולי המסלול. באונדולטור יש התאבכות בין הקרינה הנפלטת מהפיתולים השונים.

התקן אחר, שמוכנס במקרים רבים לקטעים הישרים הוא ה**אונדולטור** (undulator). בדומה לוויגלר, גם בהתקן זה פועלים על האלקטרון שדות מגנטיים במגמות מתהפכות,

#### 4. מחקרים באמצעות קרינת סינכרוטרון

מספר החוקרים בעולם, מתחומים מדעיים שונים, המנצלים או ניצלו בעבר את תכונותיה המיוחדות של קרינת הסינכרוטרון נמנה בעשרות אלפים. בסקירה הנוכחית אי אפשר אפילו להזכיר את רוב שטחי המחקר. בחרנו מספר קטן של נושאים מעוררי עניין ממגוון תחומים, המבליטים את התפקיד הייחודי של הקרינה.

#### 4.4. ספקטרוסקופיה פוטואלקטרונית

##### Photoelectron Spectroscopy

הספקטרוסקופיה פוטואלקטרונית היא אחת השיטות הניסיוניות העיקריות כיום לקביעת רמות האנרגיה בדגם כלשהו של חומר: גז, נוזל או מוצק. מידע זה הוא אמצעי חשוב מאוד להכרת תכונותיו. העיקרון היסודי פשוט: מקרינים את הדגם בפוטונים בעלי אנרגיה  $h\nu$  (v התדר; h הקבוע של פלנק) ונוכחים לדעת, שנפלטו ממנו (פוטו)אלקטרונים בעלי האנרגיה  $E_p$ . מסיקים מכך, שאנרגיית האלקטרון בדגם היתה  $h\nu - E_p$ . כדי לשחרר אלקטרונים מקליפות חיצוניות של אטום, די בפוטונים בעלי אנרגיה נמוכה יחסית, בתחום הנראה או האולטרא-סגול (הקרוב יותר או אולטרא-סגול הואקואום), אך ככל שהאטום כבד יותר והקליפה פנימית יותר יש צורך בפוטונים אנרגטיים יותר, עד תחום קרני ה-X הקשות. השיטה נעשתה מקובלת מאד בעשורים האחרונים עם התפתחות ספקטרומטרים מתקדמים למדידת אנרגיות של אלקטרונים, וטכניקות נוחות להשגת וואקואום גבוה מאד. השימוש בקרינת סינכרוטרון מאפשר לבחור באופן חופשי מתוך הספקטרום הרציף הרחב של קרינה זאת את האנרגיה  $h\nu$  של הפוטונים הפוגעים, ואף לסרוק את  $h\nu$  ועל-ידי כך למדוד באופן שיטתי את אנרגיות הקשר השונות במערכת רב-אלקטרונית. יתר על כן, עוצמת קרינת הסינכרוטרון מספקת גם לשם ביצוע **מדידות התלויות בזווית**. במדידות אלה בודקים את התכונות של אותם הפוטואלקטרוניים בלבד, מסך כל האלקטרונים שנפלטו, שיצאו בכיוון אחד נתון (כיוון הגילוי) בתוך תחום זוויתי מצומצם, והמהווים קבוצה קטנה מתוך כלל הפוטואלקטרוניים. הספקטרום הרחב, העוצמה הרבה, הכיווניות והקיטוב – כל התכונות הללו של קרינת הסינכרוטרון הכרחיות להצלחת הניסויים. תוצאותיהם מספקות נתונים ניסיוניים מפורטים ומדויקים לבחינת תיאוריות מתוחכמות שונות, למשל כאלה, הדנות באלקטרונים פנימיים באטום, המושפעים מאד גם מאלקטרונים פנימיים אחרים.

לתכונות האלקטרוניות של **גבישים** יש השלכות יישומיות

וטכניות נרחבות ביותר בתחום מדע החומרים, האלקטרוניקה, אלקטרו-אופטיקה, לייזרים מוצקים, ועוד. מדידות ספקטרוסקופיות התלויות בזווית מספקות מידע יסודי וחשוב על תכונות אלה. נזכיר, כי רמות האנרגיה במוצק שונות מאלה שבגז המתאים, וזאת בגלל הצפיפות הגדולה של האטומים בו. רמות האנרגיה הבדידות של האטומים מתרחבות, בגלל האינטראקציה, **לפסי-אנרגיה** בגביש. במילים אחרות, אלקטרון שהייתה לו אנרגיה מוגדרת בקליפה חיצונית של אחד האטומים יהיה שייך לגביש כולו, והאנרגיה שלו תוכל לקבל ערכים שונים בתחום הפס. אולם אלקטרון בפס אנרגיה אינו אלקטרון חופשי ממש, בגלל הכוחות שמפעילים האלקטרונים האחרים שבסביבתו. האינטראקציות הללו תלויות בכיוון, כי בכיוונים קריסטלוגרפיים שונים המרחקים בין האטומים שונים, וגם צפיפות האלקטרונים שונה. תורת הפסים מסכמת השפעות אלה על ידי קביעת התלות של אנרגיית האלקטרון E בווקטור הגל  $\vec{k}$  שלו (הכיוון של  $\vec{k}$  שווה לכיוון התקדמות הגל וגודלו מקיים  $k=2\pi/\lambda$ ). הספקטרוסקופיה של פוטואלקטרונים ותלותה בזווית, מאפשרת ל"מפות" את הפסים, כלומר לקבוע את E(k) כשהמקור לפוטונים הפוגעים הוא קרינת סינכרוטרון. מידע זה חיוני, בין היתר, לתיכונן התקנים אלקטרוניים המושתתים על גביש.

#### 4.4.4. עקיפה של קרני ה-X מגבישים

##### X-Ray Diffraction from Crystals

קרוב לתשעים שנה עברו מאז התגלתה תופעת העקיפה של קרני-X ובמשך השנים הרבות הללו פותחו שיטות מחקר מתוחכמות שונות, המבוססות על התופעה. קביעת המבנה של גבישים הפך לעניין שגרתי כמעט. אולם בעקבות השימוש בקרינת סינכרוטרון, בעיקר בזכות התחום הספקטראלי הרחב והעוצמה האדירה, הייתה למחקר הקריסטלוגרפי באמצעות קרני-X עדנה. מותקפות ונפתרות בעיית, שבמקורות רגילים אינן נגישות כלל.

כידוע, גבישים מהווים סריג אופטי תלת מימדי עבור קרני-X. מתבנית ההתאבכות של הקרניים, המפוזרות מאטומי הגביש, אפשר לעמוד על תכונות הסריג. בסידור המקובל של הניסוי מקרינים את הדגם בקרני-X וקולטים את תבנית-העקיפה באמצעות לוח צילום, גלאי או מערך גלאים. מגביש אחיד מקבלים על לוח צילום מערך כתמים בודדים ('נקודות' או 'החזרות'). מהסימטריה של תבנית הנקודות לומדים על הסימטריה של הגביש, ומהמרחקים שבין הנקודות מחשבים

את המימדים של תא היחידה, כלומר את מימדי המקבילון האופייני המהווה כעין לִבְנָה במבנה הגביש. כדי למצוא את מקומות האטומים בתוך תא היחידה מנתחים את התפלגות **עוצמות** הנקודות, אך לשם פיענוח מלא יש צורך, בדרך כלל, גם במידע משלים, באשר עוצמות הנקודות אינן מספקות מידע **ישיר** על **הפאזות** של הגלים שיצרו את תבנית העקיפה.

### בעיית הפאזה בקריסטלוגרפיה של קרני X.

כיצד נקבע מקום האטומים וטיבם מהתפלגות העוצמות של "ההחזרות"? תאי היחידה של גביש פועלים כמו הקווים של סריג אופטי רגיל (חד ממדי), ולפיכך גודלם וצורתם קובעים את מיקום ה"החזרות" בתבנית העקיפה. התהליך הראשוני במקרה הנוכחי הוא פיזור הקרניים הפוגעות על ידי האלקטרונים הקשורים לאטומים אשר בתאים. הדרך האופטית של קרן מהמקור עד לוח הגילוי תלויה בכך, **איזה אטום** בתוך התא גורם לפיזור. מכאן, **שהפאזות** של הגלים (הקרניים) המגיעים אל לוח הגילוי, תלויות במיקום האטומים שבתא היחידה. ההתאבכות בין הגלים המגיעים בפאזות שונות קובעת את **התפלגות העוצמות** של ה"החזרות" שבתבנית. עקרונית, מדידת העוצמות של מספר מספיק של "החזרות" מאפשרת את חישוב מיקום האטומים וטיבם בתא היחידה. אולם זוהי משימה קשה ומייעגת. אם תא היחידה מכיל עשרות אלפים או יותר אטומים, היא הופכת לאפשרית רק אם נעזרים במידע נוסף כגון זה המתקבל בשיטת ה-MAD (ראה להלן).

### ביוכימיה וקריסטלוגרפיה

החשיבות של קרינת הסינכרוטרון במחקר ביולוגי-ביוכימי הלכה והתעצמה במשך השנים. לפני עשרים שנה החוקרים בתחומים אלה היוו כ- 5% ממספר כלל המשתמשים בקרינת סינכרוטרון. כיום הם מהווים 30% בערך מתוך מספר גדול בהרבה של משתמשים. המטרה המרכזית במחקריהם היא פיענוח המבנה המרחבי והכימי המפורט של דגמים של חומרים, הבנויים מאטומים רבים מאד, מסדר גודל של עשרות אלפים או יותר. דגמים כאלה כוללים החל ממאקרומולקולות כגון אנזימים וחלבונים, וכלה בצברים, אברונים תוך תאיים ועוד. התוכנית לקביעת המבנה של דגם ביולוגי מורכבת משלושה

שלבים עיקריים: א. ייצור ("גידול") גביש של הדגם; ב. ניסויי-עקיפה בקרני-X; ג. פיענוח תבניות העקיפה ופירושו לשם קביעת המבנה.

מה הם הקשיים בביצוע תכנית כזאת וכיצד מאפשרת קרינת הסינכרוטרון להתגבר עליהם?

כל יחידה (המאקרומולקולה, הצבר, האברון וכו'), של הדגם הביולוגי מכילה מספר רב מאד של אטומים, ולכן יש צורך בנתונים ניסיוניים מפורטים ורבים כדי למצוא את המבנה. במלים אחרות, המפענח צריך להתבסס על מספר רב מאד של 'החזרות' ברורות וחזקות.

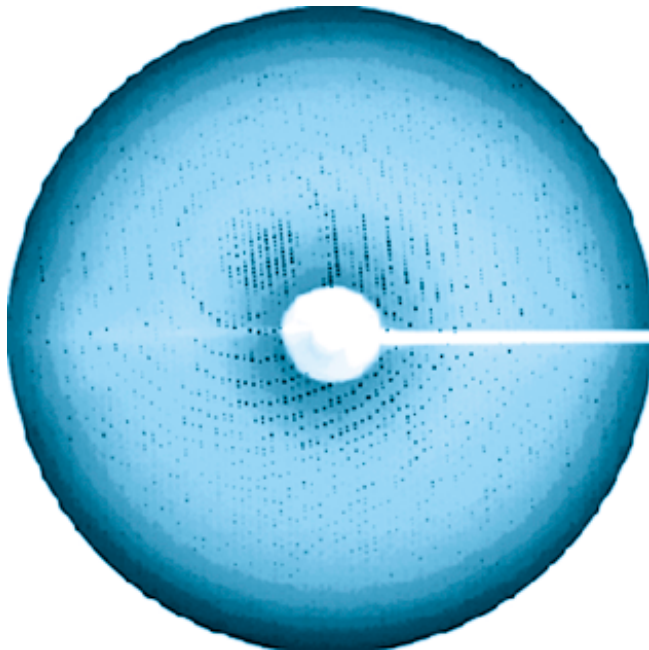
אולם רוב האטומים בדגמים ביולוגיים הם אטומים קלים, ובתור שכאלה מפזרים את הקרינה רק במידה חלשה: רוב הקרינה הפוגעת עוברת אותם ללא פיזור, ואינה תורמת לתבנית העקיפה. כדי להתגבר על קושי זה, משתדל החוקר לגדל גביש גדול ככל האפשר, באופן שתתקבל תרומה מיחידות רבות, ותבנית העקיפה תהיה יותר ברורה וחדה. אולם הוא נאלץ להסתפק בדרך כלל בגביש הקטן מראש סיכה. בגלל היות הדגם מורכב מיחידות גדולות מאד, שצורתן אינה רגולרית, גידול הגבישים הנה מטלה קשה ביותר. העוצמה הרבה של קרינת הסינכרוטרון פותרת את בעיית הפיזור החלש, כי אפילו אם רק חלק קטן מעוצמתה יתרום לתבנית העקיפה, זה יספיק לקבל תבנית ברורה ומובהקת אף מגביש קטן מאד.

צויין לעיל, שבגלל המספר הרב של האטומים בתא היחידה יש צורך לקבל תבניות עקיפה רבות ושונות. בניסוי יוצרים תבניות שונות על-ידי שינוי האוריינטציה של הדגם ביחס לקרן הפוגעת. אך רבים מהגבישים אינם יציבים: עקב ההקרנה נוצרים בהם רדיקלים חופשיים ולכן המבנה הכימי שלהם משתנה, ועוצמת ההחזרות מהם דועכת עם הזמן. לרוע המזל דווקא החומרים המסובכים והמעניינים ביותר הם גם הרגישים ביותר להשפעה ההרסנית של הקרינה. לפיכך כל אחת מהתבניות חייבת להיווצר תוך זמן קצר מאד. באמצעות קרינת הסינכרוטרון מקצרים זמן זה לעשרות שניות או אף לפחות. נציין, שבמקרים מסוימים ניתן לעקוב **בזמן אמת** אחרי תהליכים ביולוגיים באמצעות שינויים המתחוללים בתבניות העקיפה.

הגודל העצום של תא היחידה המהווה את אבן הבניין של הגביש והסטיות ממבנה גביש אידיאלי של גבישי החומרים הביולוגיים המסובכים, גורמים לכך שתבנית העקיפה מורכבת מ"נקודות" רחבות יחסית וצפופות ביותר. כדי להפריד ביניהן בבירור, צריכה האלומה הפוגעת להיות יציבה מאד במיקומה,



הצופן הגנטי (הריבוזומים), מאגרי הצופן הגנטי (הכרומוזומים), החלבונים המרכיבים את השריר, שהוא מערכת מסובכת מאוד, ועוד. מחקרים אלה מאפשרים התקדמות משמעותית בהבנת תהליכים ביולוגיים, בפיתוח תרופות ובאיפיון גנטי.



תרשים 5: תבנית עקיפה בקרני-X של יחידת משנה של ריבוזום.

**תרשים 5** הוא תמונה של תבנית עקיפה בקרני-X מגביש של חלקיק, שהוא יחידת המשנה הקטנה והחכמה של הריבוזום, האברון התוך תאי המתרגם את הצופן הגנטי לחלבונים. יחידה זו מכילה למעלה מ-100,000 אטומים לצורך הפעילות הביולוגית. החלקיק גמיש עד מאוד ודינמי ביותר גם בהיותו מגובש. תנועותיו מתאפשרות היות שלמעלה ממחצית נפח הגבישים מורכב מתמיסת הגיבוש. כתוצאה מכך כושר הפיזור של הגביש נמוך ביותר ומבנהו המחזורי רחוק משלמות. קרינת הסינכרוטרון הכרחית למדידות אלה בגלל עוצמתה ומיקודה. המדידה בוצעה בקרן מונוכרומטית בעלת אורך גל של 0.1 נאנומטר, כאשר הגביש (שאורכו פחות ממחצית המילימטר ורוחבו פחות מעשירית המילימטר ונפחו כ- $10^{-4}$  מ"מ<sup>3</sup>) מוחזק בטמפרטורה קריוגנית של 90K כדי למנוע את הריסתו המהירה בגלל הקרינה. התמונה היא אחת מתוך כ-10,000, שהיו דרושות להשגת נתונים במספר מספיק לשם פענוח המבנה.

מקבילה מאד ובעלת חתך צר ביותר (ממוקדת). במקורות סינכרוטרון שונים, ובמיוחד בחדישים ביותר, כגון ה-ESRF (ראה להלן), מתקיימות דרישות אלה בצורתן המחמירה ביותר.

### שיטת MAD

גם לספקטרום הרחב של קרינת הסינכרוטרון תפקיד חשוב במחקרים הביולוגיים – קריסטלוגרפיים. הזכרנו לעיל, שלשם קביעה מפורטת ומדויקת של המבנה יש לפתור את בעיית הפאזה. לשם כך נעזרים בעובדה, שהן כושר הפיזור של אטום, והן הפאזה בה הוא מפזר, משתנים שינוי חריף, כשעוברים סף בליעה. החוקר מנצל תופעה זו ביחס לאטום, המכיל אלקטרונים רבים ('אטום כבד'), כי הפיזור מאטומים כאלה חזק במיוחד. במקרים מסוימים החומר עצמו מכיל אטומים מתאימים, במקרים אחרים מכניסים אותם על-ידי התמרה כימית. רוסמים תבניות עקיפה **בקרינה מונוכרומטית באורכי גל אחדים בסביבה המיידית של סף הבליעה של האטום הכבד**, ותבנית נוספת **באורך גל רחוק מהסף**, ששם ההשפעה של אותו אטום מבוטלת. ההתפלגויות בעוצמות תהיינה שונות בתבניות השונות. ניתוח התוצאות מאפשר פתרון מלא לבעיית הפאזה. שיטת מחקר זו, הנקראת "נפיצה אנומלית באורכי גל שונים" (**MAD-Multiple wavelength Anomalous Dispersion**) היא אחת החשובות והמרכזיות ביותר בזיהוי ההרכב והמבנה של דגמים ביולוגיים מורכבים. **רק בקרינת סינכרוטרון אפשר לבצע ניסויים כאלה, כי רק לה ספקטרום רחב דיו לבחירה חופשית מספקת של אורכי הגל. ביצוע פרויקט הגנום האנושי מן ההיבט המבני התאפשר תודות לשיטה זאת.**

באמצעות קרינת הסינכרוטרון ניתן כיום לאסוף נתונים קריסטלוגרפיים מדויקים אף מגבישים בעלי תאי יחידה גדולים ביותר וכושר פיזור נמוך. קשה ביותר, וברוב המקרים אי אפשר בכלל, לחקור גבישים כאלה באמצעות מקורות קרני-X מקובלים, אפילו בעזרת המכשור המתקדם והמשוכלל ביותר.

במרכזי קרינת סינכרוטרון חקרו וחוקרים וירוסים, את מרכיבי דפנות התא: הקולטנים, מתמירי האנרגיה, תעלות המעבר של היונים וכו' וכן את הצברים והאברונים הנמצאים בתוכם: את 'בתי החרושת' התאיים לייצור חלבונים על פי

הפלוארסנטיות ועל מסכי הטלויזיה והמחשב, נקבע צבע הזהירה ומשך דעיכתה על ידי ריכוזים נמוכים מאד של אטומים זרים. חקר הסביבה המיידית של המאלח באמצעות אקסאפס (שיוסבר להלן) יכול לספק מידע חשוב המאפשר שיפור ופיתוח.

ההתקנים האלקטרוניים החדשים בנויים למעשה אזורים – אזורים, עשויים מחומרים שונים: מוליכים למחצה עם ריכוזים שונים של אטומים זרים, מתכות לשם יצירת מגע חשמלי ותחמוצות לבידוד חשמלי. טיב שטח החיבור (interface) בין האזורים השונים משפיע השפעה ניכרת וישירה על תפקוד ההתקן. חשוב לדעת, אם המעבר חד או הדרגתי (למשל, בגלל חלחול של חומר מאזור נתון אל סביבתו), באם נוצרים קשרים כימיים או נוצר מְסָג (alloy) בגבול וכו'. נזכיר, שפיסה (chip), המהווה רכיב מרכזי של מכשירים אלקטרוניים רבים, למשל מחשבים, מכילה מאות אלפים ואף יותר של דיודות, טרנזיסטורים, קבלים וחיבורים ביניהם. אי-תפקוד של יחידה אחת, בגלל היווצרות שטח חיבור פגום, עלול לגרום לכך, שכל הפיסה תיפסל. באמצעות אקסאפס ניתן לבחון בחינה יסודית את הסביבה המיידית של אטום מסוג נבחר הן על פני שטח חיבורי של הדגם והן בתוכו. מעקב צמוד אחרי פיתוח תהליכי ייצור על ידי אקסאפס מהווה אמצעי חיוני להבנת התלות של תפקוד ההתקן בטיב שטח החיבור.

### שיטת האקסאפס

בספקטרא של קרני-X קיימים ספי-בליעה חדים וברורים: אם האנרגיה של פוטון ה-X מגיעה לזאת הדרושה לשחרור אלקטרון מאחת הקליפות האטומיות הפנימיות, גדלה הבליעה באופן תלול (סף בליעה). האנרגיות הפוטוניות בהן מופיעים הסיפים מזהות את סוג האטום, שבו נבלע הפוטון. הבליעה הולכת ונחלשת באופן הדרגתי מעבר לסף. ירידה זו של כושר הבליעה היא מונוטונית בעיקרה, אך כמעט בכל מקרה מורכבים עליה מאקסימא ומינימא קטנים: העקומה חלקה ממש רק במקרה שהדגם הוא גז חד-אטומי (ראה **תרשים 6**). עוד בשנות השלושים של המאה העשרים מצאו החוקרים שהצורה המדויקת של המבנה הדק הזה תלויה בטיב הסביבה, בה נמצא האטום שבלע את הפוטון. אולם רק בשנות השבעים, במקביל להתפתחות הסינכרוטרון, הושגה הבנה מעמיקה וכמותית של התופעה, שאיפשרה את חקירתה הניסויית המפורטת והמדויקת. התיאוריה מייחסת את התופעה להתאבכות בין גל האלקטרון היוצא מהאטום שבו פגע הפוטון, לבין גל האלקטרון המוחזר אל אותו אטום כתוצאה

התרשים שעל השער הקדמי של חוברת זו מתאר את המבנה הפנימי, כפי שנקבע בהפרדה של 0.33 נאנומטר, של יחידת המשנה הקטנה של הריבזום. תבנית העקיפה של יחידת המשנה של הריבזום מופיעה בתרשים 5 בעמ' 11. הסלילים הכפולים הנם חלקים מהשרשרת של חומצות הגרעין (RNA) ממנה בנוי החלקיק. שרשרת זו מכילה 1518 בסיסים. החלקים המוארכים והמסולסלים הם חלבונים שאף הם מצויים בתוך החלקיק. בסך הכל יש בו עשרים חלבונים שונים. לשם קבלת רושם על גודל החלקיק יש לדעת כי משקלו המולקולרי מתקרב למיליון ואורך צירו הראשי הוא כעשרים נאנומטר. כל חלבון בתרשים נצבע בצבע אחר, וחומצת הגרעין בכתום.

### טופוגרפיה של גבישים

עקרונות העקיפה של קרני-X בגבישים מאפשרים לא רק את קביעת המבנה התלת-ממדי המחזורי של גביש מושלם, אלא גם את הגילוי והאפיון של פגמים מסוימים, המהווים סטיות מהמבנה האידיאלי. פגמים כאלה עלולים לפגוע בהתאמת הגביש לייעודו. למשל, הם עלולים לחבל בתפקוד ההתקן האלקטרוני הבנוי על גבישים של סיליקון, גרמניום ואחרים, מפחיתים בערך של היהלום המשמש כתכשיט ועוד. **נקעים** – **dislocations** (פגמים חד-ממדיים) קובעים למעשה את החוזק המכאני של חומרים רבים. הפגמים המתגלים באמצעות הטופוגרפיה בקרני-X הם פגמים נסתרים, הקשים מאד לגילוי באמצעים אחרים. שיטת הבדיקה היא בלתי הורסת, נוחה, פשוטה ומהירה מאד בקרינת הסינכרוטרון. השימוש בקרינת הסינכרוטרון במקום בשפופרת קרני-X מקצר את הזמן הדרוש לקבלת טופוגרף משעות לשניות, ומפשט מאוד את המיחשוב הנלווה הדרוש.

### ג.4 אקסאפס - מבנה דק מעבר לסף הבליעה של קרני-X

**EXAFS, Extended X-Ray Absorption Fine Structure**  
ריכוז קטן מאד של אטומים זרים ('אילוחים' impurities) משפיע במידה ניכרת על התכונות האלקטרוניות, האופטיות ואחרות של חומרים רבים. במוליכים למחצה Si, Ge, GaAs ועוד קובעים האילוחים את ריכוזי האלקטרוניים והחורים החופשיים, אשר בהם תלויים תפקודי התקנים למיניהם – דיודות, טרנזיסטורים, גלאים ועוד. בדומה לכך, בחומרים זוהרים, אותם אנו פוגשים בחיי יום - יום, לדוגמה בנורות



המבנה. גילוי קשר כזה במערכות ביולוגיות שונות הוא עד היום אחת המטרות המרכזיות במחקרים באקסאפס. לשם חקירה באמצעות אקסאפס אין צורך לעבור את השלב הקשה של גידול גביש, והדגם הביולוגי יכול להיבדק בצורתו ובסביבתו הטבעית. זהו יתרון משמעותי, כי התפקוד עלול במחקרים מסוימים להשתנות עם ההתגבשות. אולם יש לזכור, כי באמצעות אקסאפס אי אפשר לקבוע את המבנה הכללי – דבר זה מתבצע, כפי שצויין, בשיטות קריסטלוגרפיות.

## 5. יישומים

### 5א. יישומים תעשייתיים.

בעיות שונות של פיתוח וייצור תעשייתיים נחקרות באמצעות קרינת סינכרוטרון. המובילות בתחום הן התעשייה האלקטרונית והתעשייה הכימית. קיימים בעולם מרכזי סינכרוטרון, שנועדו מראש לשמש את התעשייה בלבד. במרכזי סינכרוטרון אחרים ישנן עמדות-ניסויים המושכרות לחברות תעשייתיות, או לחברות המבצעות עבור התעשייה מחקרים הניתנים ליישום קרוב. המטרה היא בכל מקרה לאפשר ביצוע מהיר ויעיל של מחקרים כאלה, שאולי אינם תורמים תרומה מדעית כללית משמעותית, והתעשיין גם אינו מעוניין לפרסם את תוצאותיהם, אך הם חשובים מאד כדי לפקח על איכותו של מוצר, כדי לשפר את טיבו, וכדי לפתח מוצרים חדשים.

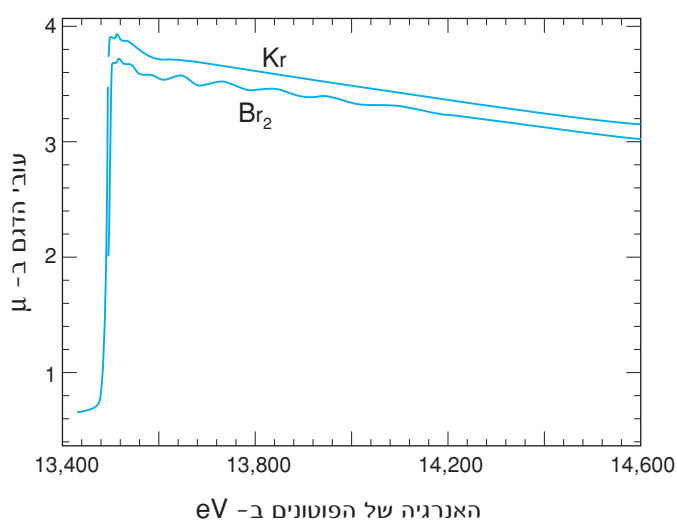
לשיטות המחקר השונות שהזכרנו במאמר זה, כגון ספקטרוסקופיה בפרטואלקטרוניים, קריסטלוגרפיה בקרני-X, טופוגרפיה של גבישים ואקסאפס השלכות מעשיות-יישומיות ישירות, שאת חלקן ציינו.

אחת המטרות של התעשיית האלקטרונית, שאליה הן שואפות - בהצלחה רבה מאד - זה שנים רבות, ושלשמן משתמשים גם במחקר באמצעות קרינת סינכרוטרון, היא מזעור הרכיבים האלקטרוניים. מזעור מאפשר דחיסת מספר גדל והולך של רכיבים בנפח נתון, והודות לכך, למשל, ייצור מחשבים יותר מהירים ובעלי זיכרון יותר גדול. התעשייה הכימית מעוניינת בקרינת סינכרוטרון בעיקר למחקרים של שטחי פנים, שהם חשובים ביותר לפתירת בעיות קורוזיה וקטליזה.

### 5ב. יישומים רפואיים.

לרבים מהמחקרים הביולוגיים המבוצעים בקרינת סינכרוטרון יש הקשר רפואי ברור. נזכיר כאן נושא רפואי מובהק אחד, שבו עוסקים זה שנים רבות במרכזי סינכרוטרון שונים.

מפיזור מאטומים שכנים. באמצעותה ניתן לקבוע מהניסוי את המרחקים אל האטומים השכנים הצמודים, ובמקרים רבים גם אל שכנים רחוקים יותר, וכן את זהות השכנים. המידע הזה חשוב במיוחד, אם הדגם מכיל מספר קטן של אטומים מסוג שונה מאלה, שמהם בנוי הדגם. כדי לחקור את הסביבה המיידית של אטום שבמיעוט יש לרשום את הספקטרום באזור אחד מספי הבליעה שלו: **הסף ועיקר הירידה האיטית נקבעים על ידי האטום שבמיעוט, והמבנה העדין תלוי בסביבה של אטום זה.** הודות לעוצמה הרבה של מקורות הסינכרוטרון אפשר לקבל בדיוק רב את המבנה העדין ולהבחין בינו לבין הרעש.



תרשים 6. השוואת אזור סף בליעה של גז מונאטומי (Kr) עם זה של גז מולקולרי (Br<sub>2</sub>). על העקומה של הברום מופיעים מאקסימא וומינימא קטנים.

מחקרים באמצעות אקסאפס תרמו ותורמים להבנה מעמיקה של הקשר בין נתונים מסוימים למבנה של עצמים ביולוגיים שונים ובין פעילותם. יש מקרים שבהם הדגם הביולוגי מכיל אטומים כבדים אחדים בין אלפים או עשרות אלפים של אטומים קלים יותר, ולאטומים הכבדים חשיבות מרכזית בתפקוד הדגם. לדוגמה, החלבון המוגלובין, הרכיב העיקרי של כדוריות הדם האדומות, מורכב מכ-12000 אטומים מסוגים שונים, וביניהם ארבעה אטומים (למעשה יונים) של ברזל. יכולת המולקולה לספח חמצן או חד-תחמוצת הפחמן ועל ידי כך לספק לגוף את החמצן ולהעביר לריאות את התחמוצת, תלויה בעיקר בברזל. אחת ההצלחות החשובות הראשונות של המחקר באקסאפס הייתה קביעה מדויקת של מיקום אטומי הברזל ביחס לסביבתם במולקולה לפני ואחרי החמצון, ועל ידי כך מציאת קשר בין התפקוד ובין

**אנגיוגרפיה (angiography).** כשרופא מומחה רוצה לראות כלי דם תוך כדי פעולתם, הוא משתמש בתמיסה המכילה יוד, אותה הוא מזריק לתוך הווריד או העורק. היוד, בהיותו יסוד כבד יחסית, בולע יותר את קרני ה-X מאשר רקמות הגוף, ולפיכך שיקוף בקרני-X יכול להראות את הדם הזורם באזור הנבדק. אך לקרני ה-X מהמכשירים הרפואיים יש ספקטרום רציף, וחלק משמעותי מאד של הקרינה, באורכי גל רחוקים מסף הבליעה של היוד, אינה נבלעת למעשה ביד ואינה תורמת להדמיית כלי הדם. מאותה סיבה - שרוב הקרינה אינה מנוצלת - נאלץ הרופא להזריק תמיסת יוד בריכוז גבוה. ברור, שלא החשיפה המיותרת לקרינה ולא הריכוז הגבוה של היוד רצויים מבחינה בריאותית. אם הבדיקה צריכה להיעשות על עורק המספק דם לשרירי הלב (coronary artery), אז מתווסף סיכון נוסף, מידי ומשמעותי: במקרה זה מוכרחים להכניס את התמיסה, בעזרת קאתטר (catheter), עד הלב.

אם קרני ה-X הם ממקור סינכרוטרון, האנגיוגרפיה אפשרית ללא הקרנה מיותרת, בריכוזי יוד נמוכים ובלי קאתטר. באמצעות מונוכרומוטורים מפרידים מהרצף אורך גל קצת מתחת לסף הבליעה העיקרי של היוד, ואורך גל שני קצת מעל הסף ומצלמים בו זמנית שני צילומים בשני אורכי הגל. תמונת כלי הדם מתקבלת על ידי השמטת הפרטים המשותפים לשני הצילומים, באמצעות מחשוב. העוצמה האדירה של המקור מאפשרת קבלת צילומים מצוינים תוך כדי מילישניות אחדות, כך שנמנעים מטשטוש התמונה בגלל פעולת הלב. במרכזי סינכרוטרון שונים בעולם נעשו ניסויים קליניים נרחבים בשיטה, שהלכה והשתכללה. קיימות הצעות שונות לבניית מקורות סינכרוטרון קטנים יחסית, המיועדים במיוחד לאנגיוגרפיה.

### קרינת סינכרוטרון וישראל

כבר לפני יותר משלושים שנה, כאשר ברוב הגדול של הקהילה המדעית בעולם טרם הייתה מודעות לאפשרויות הטמונות במחקר באמצעות קרינת הסינכרוטרון, והמקורות עצמם היו בראשית התפתחותם, החלו חוקרים ישראלים לבצע מחקרים במקורות סינכרוטרון. רוב החוקרים הישראלים מגיעים למרכזי סינכרוטרון שונים בעולם תוך כדי שיתוף פעולה עם חוקרים המועסקים ישירות על ידי המרכז או חוקרים אחרים בחוץ לארץ.

האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים עוקבת זה שנים רבות אחרי הפעילות הישראלית במרכזי סינכרוטרון ומעודדת

אותה בדרכים שונות. נציין, כי כלל לא נראה מעשי להקים מרכז סינכרוטרון בישראל. עלות הקמת מרכז מהגדולים והמתקדמים ביותר מגיעה למאות רבות של מיליוני דולרים, והפעלתו השנתית נמדדת בעשרות מיליונים. מרכז קטן ניתן לבנות ולהפעיל בכעשירית מכך, אולם מרכז כזה לא יוכל לספק קרני-X קשות, ההכרחיות, למשל, לקריסטלוגרפיה, והמבוקשות מאד בשנים האחרונות.

ישראל הצטרפה בשנת 1998 לאחד משלושת מרכזי הסינכרוטרון המתקדמים ביותר בעולם, האסר"פ (ESRF, European Synchrotron Radiation Facility), הפועל מאז 1994 בגרנובל, צרפת (צילום אוויר שלו מופיע על שער החוברת). השניים האחרים נמצאים בארה"ב וביפן. האסר"פ הינו מתקן שבהקמתו והחזקתו משתתפות רוב ארצות אירופה. הוא מיועד בעיקר לניסויים בקרני-X קשות, ומצטיין בעוצמות גבוהות במיוחד באורכי גל קצרים מאד, ובמיקוד עדין ביותר. 52 קווי אלומה מהמקור משרתים את החוקרים. מאז תחילת פעולתו בוצעו באסר"פ ניסויים יחודיים, שלא היה אפשר לבצעם במקורות סינכרוטרון אחרים. דוגמאות אחדות: תבנית עקיפה מחוט בודד של כור עכביש, או מסיב אחד של פולימר, ומציאת מבניהם של החוט ושל הסיב; ביצוע ניסויים בפולסים של קרני-X קצרים מאד, לשם מעקב אחרי תהליכים מולקולריים מהירים המתרחשים בזמנים מסדר גודל של נאנושניות ( $10^{-9}$  ש"י); פיתוח שיטות-הדמייה חדישות באמצעות קרני-X ועוד. השתתפות ישראל בהוצאות הפעלת האסר"פ מאפשרת למדענים ישראלים להתחרות ישירות על זמני מדידה ואפשרות זאת אכן מנוצלת במלואה.

בשנת 1997 הועלה רעיון להקים מרכז סינכרוטרון במזרח התיכון. הוגי הרעיון של סיאמי -

SESAME (Synchrotron Light for Experimental Science and Applications in the Middle East)

הוגי רעיון זה - פרופ' ה. וויניק (H. Winick) מארה"ב ופרופ' ג. א. פוס (G. A. Voss) מגרמניה, בעלי ניסיון רב בתכנון, הפעלה וניהול של מרכזים כאלה, הציעו שהמרכז יהיה מבוסס על טבעת האגירה לאלקטרונים BESSY1 בברלין, אשר עמדה לפני סגירה לאור בניית טבעת אגירה חדשה BESSY2 הנמצאת באותה עיר, והגדולה בהרבה מקודמתה ומתאימה במיוחד להפקת קרני-X קשות. המטלה קיבלה עידוד ותמיכה כספית מאונסק"ו, וממשלת גרמניה הסכימה לתרום לה, ללא תמורה ניכרת, את BESSY1. מדינות מערביות אחדות תומכות כספית בתוכנית. 11 מדינות מהמזרח התיכון, כולל ישראל, הביעו בה עניין ושלחו נציגים-מדענים לוועדות שדנו בתוכניות

ביו עמי האזור. ימים יגידו, האם משאלתם תתממש או האם המטלה לא תקרום עור וגידים בגלל ניגודים ואיבה עמוקים ומושרשים.

### לקריאה נוספת

H. Winick, Synchrotron Radiation, Scientific American, Nov. 1987, p. 72.

R. F. Service, Brightness Speeds Search for Structure, Great and Small Science 277, 1217, 1997.

<http://www.sesame.org.jo>

<http://www.esrf.fr>

תהודה

המפורסות. הוחלט, בין היתר, לשדרג את BESSY1 על ידי הגדלת היקפו לשם הכנסת וויגלר מיוחד. מהוויגלר יתקבלו פוטונים עם ספקטרום בתחום קרני-X קשות. BESSY1 אכן פורק וחלקיו נארזו למשלוח. המועצה הזמנית של המתקן בחרה, בסוף חודש יוני 2000, בירדן כארץ המועדפת לאתר המתקן, ואת ארמניה בתור ברירה שניה. מדינות האזור, פרט לירדן, טרם התחייבו להשתתף בהוצאות הרבות הכרוכות בהקמת המקור המשודרג והפעלתו השוטפת. אין עדיין ביסוס תקציבי להקמת המתקן והפעלתו. נציין עוד שהוגי רעיון סיאמי, והתומכים הרבים בו הונעו ומונעים על ידי התקווה, שמרכז מדעי אזורי ראשון זה יתרום לקידום השלום וההבנה

### אל מגישי/מגישות מאמרים לפרסום ב"תהודה"

על מנת להקל על המערכת ולזרז את קצב הדפסת מאמר המוצע לפרסום ב"תהודה" נא למלא אחר ההנחיות הבאות:

1. לשלוח את המאמר כשהוא מודפס על מחשב PC כקבץ WORD בפורמט DOC. עדיף לשלוח את המאמר בדאר האלקטרוני כ-attachment לפי הכתובת: [hanna.goldring@weizmann.ac.il](mailto:hanna.goldring@weizmann.ac.il), בצרוף עתק מודפס של המאמר. אם הדבר אינו אפשרי, יכולים לשלוח דיסקט + עתק מודפס לפי הכתובת: חנה גולדרינג ורחל ברדה, מערכת "תהודה", המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות 76100.

2. סרטוטים ותצלומים המצורפים למאמרים.

#### א. סרטוטים

רצוי שהסרטוטים יהיו "שתולים" כתמונות בטקסט המאמר. אם אפשר כדאי להכין את הסרטוטים ב-paintshop pro-3 בפורמט tif ולשלוח אותם על דיסקט נפרד. אם הדבר אינו באפשרותכם, אנו שלחו לנו סרטוט ברור ונקי.

#### ב. תצלומים

רצוי לשלוח תשליל (נגטיב) של התצלום. רצוי ל"שתול" גם את התצלומים בטקסט המאמר. אם אין בידכם תשליל, אנא שלחו תצלום באיכות טובה. כל סרטוט וכל תצלום יש למספר לפי הופעתו במאמר (תרשים 1, תרשים 2 וכו').

כל מאמר שישלח אלינו לפרסום, יוגש לבדיקה למורי פיזיקה ו/או מדענים מומחים בתחום בו עוסק המאמר. המערכת שומרת לעצמה את הזכות לבקש מהכותב שינויים ו/או הבהרות במאמר בהתאם להמלצות הבודקים. מאמרים שלא יתקבלו לפרסום, יוחזרו לכותבים.

בשאלות וביירוורים נא לפנות לחנה או לרחל, בטלפון 08-9342981, או בפקס: 08-9344174. בכל דבר דואר שישלח בפקס נא להוסיף עבור "מערכת תהודה".