

פרופ' דן שכטמן חתן פרס נובל בכימיה לשנת 2011

"אין חיה כזאת" הלקחים מתוך תגלית מדעית - מזווית אישית

מאת **פרופ' אישטוון הרגיטאי** István Hargittai

על סימטרייה. השגת ההכרה בתגלית לא הייתה קלה, והיא חייבה כושר עמידה מצדו של שכטמן. הסיפור על אודות גילוי הגביש הקוואזי-מחזורי מכיל מקבץ לקחים שיש בהם כדי להועיל, אם רק נזכור אותם במצבים דומים בעתיד.

גילויים של גבישים קוואזי-מחזוריים על ידי דן שכטמן בתחילת שנות השמונים היה אירוע בולט במדע החומרים לא רק משום שהוביל ליצירת שלל חומרים חדשניים אלא גם משום שסימל דחיקתה של מערכת עקרונית בתחום המדע של חומרים במצב מוצק שעניינה היה הגבלות



איור 1. דגימת גבישים קוואזי-מחזוריים איקוסהדרליים דמויי-פרח בדגימת חמרן-מנגן שהתמצקה במהירות. את הגבישים יצרו אגנס קסנדי (Csanady) מבודפשט והנס אודה ניסן מציריך. התצלום באדיבות אגנס קסנדי¹.

במצב המוצק הזכירה לי את האמירה המיוחסת לרמב"ם: "אל תתייחסו אל זה כאל הוכחה רק משום שכך כתוב בספרים..."

במשך זמן רב מדענים ואמנים דגולים כדוגמת יוהאנס קפלר ואלברכט דירר ניסו ליצור דפוסים שבהם מחומשים משוכללים מכסים משטח מבלי שיתהוו פערים או מרווחים ביניהם, אולם הם לא הצליחו בכך. לאחר מכן יצר המתמטיקאי הבריטי רוג'ר פנרוז דפוס שבו מחומש היה מוקף בחמישה מחומשים אחרים בתוככי מחומש גדול יותר, והדפוס נמשך באמצעות מחומשים גדולים יותר ויותר. פנרוז השתמש לא רק במכלול המחומשים אלא גם בחלק מהם, ויצר דפוס מרהיב אשר הצליח לכסות את המשטח באמצעות מחומשים משוכללים שגודלם משתנה בהדרגה (איור 2).

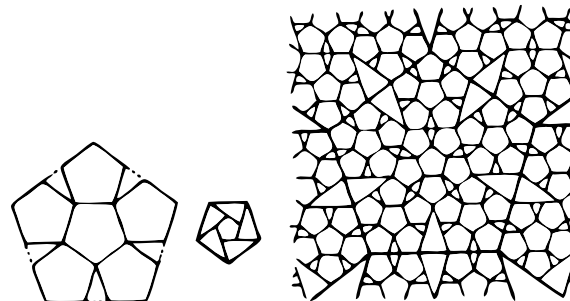
"אל תתייחסו אל זה כאל הוכחה רק מפני שכך כתוב בספרים"

גבישים קוואזי-מחזוריים הם תגלית חשובה למדע. זאת ואף זאת: הם גם מרהיבים ביופיים! (איור 1) סיפור גילום על ידי דן שכטמן מספק לנו הזדמנות להרהר בטיבן של תגליות מדעיות.

האטומים בגבישים קוואזי-מחזוריים מסודרים באופן לא מחזורי. לפיכך הם שונים מגבישים רגילים, המקיימים הן סדר והן מחזוריות, ומחומרים אמורפיים (חסרי סדר, למשל זכוכית), הנעדרים את שתי התכונות גם יחד. אשר על כן גבישים קוואזי-מחזוריים נמצאים בדיוק בין שני סוגי החומרים הללו – גבישים וחומרים אמורפיים – הידועים זה זמן רב. אולם החומרים המכונים כיום "גבישים קוואזי-מחזוריים" נחשבו בלתי אפשריים עד לניסוייו של שכטמן. אין צריך לומר ששכטמן גילה את הגבישים הקוואזי-מחזוריים; הוא לא המציא אותם – הם כמובן תמיד היו בסביבתנו מבלי שנהיה מודעים להם.

התאריך הרשמי של גילוי הגבישים הקוואזי-מחזוריים נקבע על פי מועד פרסום מאמרם של שכטמן ועמיתיו בכתב העת המדעי *Physical Review Letters* בשלהי 1984². אולם יום הגילוי עצמו היה השמונה באפריל 1982 כאשר שכטמן הבחין כי אחת מתבניות דיפרקציית האלקטרונים של סגסוגת החמרן-מנגן הפגינה סימטרייה סיבובית מסדר 10 (סיבוב התמונה בעשירית המעגל – 36 מעלות – יביא לקבלת תמונה זהה). הוא ידע כי ממצא זה "אינו אפשרי" – הרי שנים רבות קודם לכן בעת לימודיו באוניברסיטה הוא הצליח בבחינה שהוכיחה שאין הדבר אפשרי... את חוסר האמון שלו ביטא במילים: "אין חיה כזאת": על פי הכללים הקלסיים של הקריסטלוגרפיה (תורת חקר הגבישים) סימטריות מסדר 5, 7, 8 וכו' אינן מתקיימות במצב המוצק! מה שהתרחש היה הביטוי המוצלח ביותר לאמירתו של לואי פסטר: "המזל אינו מחייך אלא למי שמוכנים היטב לבואו". שכטמן היה יכול לפטור את התוצאה המקרית כממצא שווא, אך הוא לא נהג כך. זאת למרות הלחץ מצד עמיתים שבא בדמות עצה ידידותית ואף כלעג לא ידידותי כלל, אך שכטמן התעקש על נכונות תגליתו. הליכתו של שכטמן נגד מערכת העקרונות שהייתה נהוגה באשר להגבלות הסימטרייה

מי שחבר לשכטמן כדי להסביר את המבנה הקוואזי-מחזורי היה אילן בלך מהטכניון, שהכין מודל והראה באמצעות מחשב שמודל זה נותן נקודות דיפרקצייה חדות בדומה לדיפרקציות של שכטמן. השניים החלו להכין מודלים שהיו עשויים ליצור את דפוס הדיפרקצייה שבו צפה שכטמן. באותה עת נעשה מחקר בנושא קרוב במחלקה לפיזיקה שבאוניברסיטת פנסילוניה. את המחקר עשה דב לוי במסגרת עבודת הדוקטור שלו, בהנחייתו של פרופסור פול שטיינהארט. עבודת הדוקטור הניבה מודל תאורטי שבאותה נקודת זמן הוכח כמתאים במיוחד לביאור התצפית הניסיונית של שכטמן. לוי השתוקק לפרסם את ממצאיו, אולם המנחה שלו נרתע מלעשות כן, קרוב לוודאי בשל החשש מהתגובה לטענתם שמערכת עקרונות מבוססת בספרות ובעולם המדע אינה תקפה.



איור 2. ריצוף באמצעות מחומשים משוכללים בעלי גדלים משתנים על פי אלן מקיי.³

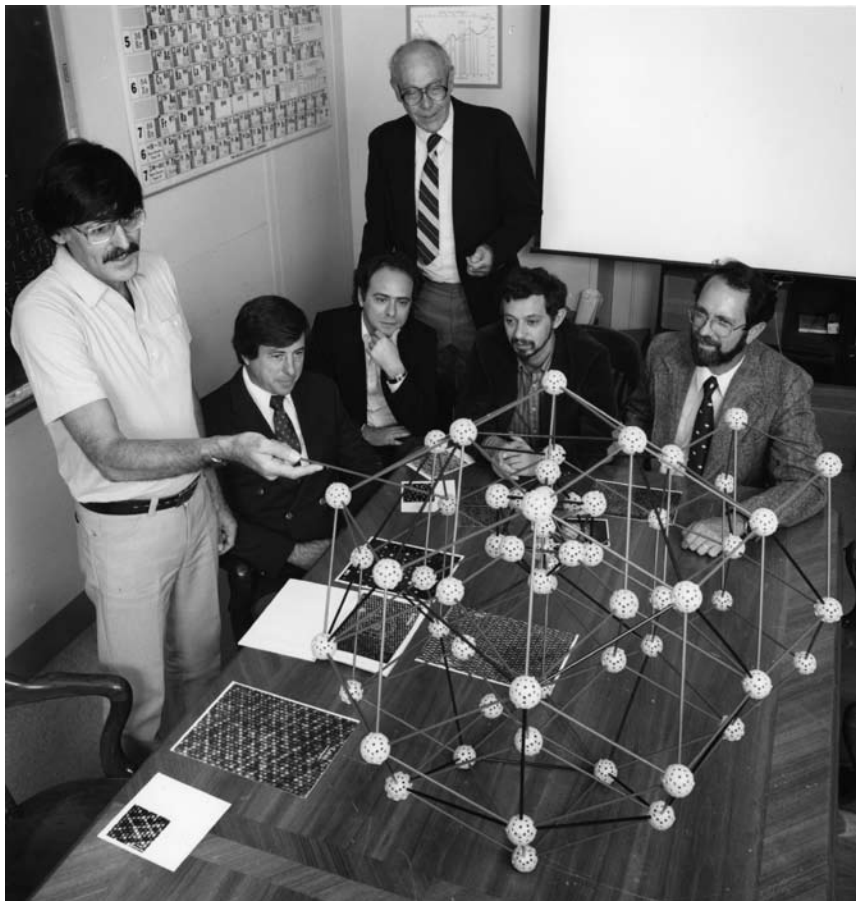
מדען בריטי אחר, הקריסטלוגרף אלן מקיי, התעניין באריחי פנרוז (המכונים גם "ריצוף פנרוז") והראה שאפשר לקבל מהם דיפרקצייה אופטית של נקודות חדות. הוא סבר שהדבר יהיה אפשרי אפילו ממבנים תלת-ממדיים. כאשר בסתיו של שנת 1982 סיפר מקיי על אודות ההדמיה שלו, שכטמן כבר ביצע את הניסוי המכריע שלו, אולם עמיתיו לא ידעו על כך. שכטמן, אשר קיבל את התארים הראשון, השני והשלישי שלו ממוסד הטכניון, היה מדען אורח במכון התקנים הלאומי של ארצות הברית (NBS) ועשה ניסויים בסגסוגות חמרון-מנגן. זה היה השלב שבו עשה את הניסוי שהדהים אותו ואשר ידהים שנתיים (!) לאחר מכן את קהיליית המדע בתחום החומרים המוצקים. מהרגע שבו סיים שכטמן את הניסוי שלו, הוא הפך לאדם בודד מאוד, כפי שקורה לכל מדען האחראי לתגלית מהפכנית: המגלה יודע דבר-מה שלא ידוע לאיש מלבדו. בזמן הניסוי המכריע שלו היה שכטמן לבדו במעבדה. עם הגילוי יצא נרגש למסדרון וחיפש מישהו לחלוק עמו את התרגשותו הרבה, אולם לא היה שם איש. הוא חזר למיקרוסקופ האלקטרוני שלו וערך סדרת ניסויים נוספים. מדענים אחרים, בכללם לואי פסטר, תיארו התרגשות דומה וצורך דומה לחלוק את הידע החדש שהשיגו ברגע הגילוי ממש.

מיד לאחר הניסוי החל שכטמן לברר מה חושבים אחרים על תקפות גילוי. למרבה הצער, מדענים שנחשבו בני-סמכא בתחומו – שעדיין לא קנה בו את שמו – דחו את טענותיו. אולי היה בזה מן החיוב מאחר שאיש לא ניסה להפקיע ממנו את הגילוי.

פרופ' דן שכטמן:

"תחום הקריסטלוגרפיה קיבל כעת תאוצה לאחר שקיבל את ההכרה שהיה זקוק לה. פרס נובל הוא בוודאי ההכרה האולטימטיבית בכל תחום במדע. אני אמנם מקבל את הפרס, אבל אני חוד חנית, ולצדי יש אלפי מדענים שעוסקים בנושא. מאז התגלית נכתבו מאמרים רבים בתחום. אלפי אנשים עבדו, וימשיכו לעבוד, בו ולפתחו. אני מבקש לציין במיוחד כמה אנשים שאני חב להם ומצטער שהם אינם שותפים לפרס אתי: הפרופסורים אילן בלך, ג'ון כהאן ודניס גרטיאס, שעמם כתבתי את המאמרים הראשונים, והם עזרו לי להניח את ההסבר המתמטי והפיזיקלי לתופעה.

שכטמן לא מיהר לפרסם את ממצאיו. לו כבר היה מדען בר-סמכא היה ודאי מזדרז לפרסם ממצאים כגון אלו כדי להנציח את תאריך הגילוי. מנגד מדען בר-סמכא עשוי להיות דווקא זהיר מאוד בפרסום תגלית שמדענים אחרים סבורים שהיא בלתי אפשרית. שכטמן היה משוכנע כי בידי תגלית חדשנית, אולם הוא היה מוטרד מאי-יכולתו להציע הסבר



פרופ' דן שכטמן מציג בשנת 1985 בפני עמיתיו את הסידור האטומי המפתיע של הקוואזי-גביש שגילה בפגישה ב-NIST (המכון הלאומי האמריקאי לתקנים וטכנולוגיה) לאחר שפרסם את תגליתו. Photo: H. Mark Helfer - INST

אמין לתגלית, ולכן נמנע מלנסות ולפרסם אותה.

דרכו של שכטמן עד לפרסום תגליתו במסגרת של מאמר מדעי הייתה לא קלה. כאשר כבר החליט להגיש לפרסום מאמר שבו הוא ובלך תיארו את הניסוי שלו, הכתוב היה הססני-משהו. המידע היה שם, אולם קורא בלתי מיומן היה עלול שלא להבחין בו כלל מאחר שהיה טמון מתחת להררי מידע על סגסוגות. המאמר נוסח כדוח בתחום המטלורגיה (תורת המתכות), אולם הוגש לפרסום בכתב עת מדעי בתחום הפיזיקה בכלל - *Journal of Applied Physics*. עורך כתב העת דחה את המאמר בטענה כי המידע המתואר בו אינו מתאים לכתב העת המסוים הזה - והוא לא יעניין פיזיקאים. אין זה נדיר שקשה לפרסם תגלית מקורית העשויה להשפיע על העתיד. מאמרים רבים נדחים ואינם מתפרסמים. למותר לציין שזה גורלם של מאמרים גרועים,

את דעתו. כהאן צירף עוד כותב למאמר - דניס גריאס - קריסטלוגרף מתמטי צרפתי צעיר, שסייע בניסוח החלק המתמטי של המאמר. שכטמן מצדו הוסיף את שמו של בלך מתוך נאמנות מקצועית, ומכאן ארבעת שמות הכותבים של המאמר.²

הם שלחו את המאמר החדש לכתב העת המדעי היוקרתי *Physical Review Letters*. המאמר הגיע למערכת כתב העת בתאריך: תשעה באוקטובר 1984. המאמר התקבל לפרסום ללא כל דיחוי והופיע - תחת כותרת בלתי מלהיבה בעליל: "מצב מתכתי בעל סדר כיווני ארוך-טווח הנעדר סימטריית העתקה"² - בגיליון שיצא ביום השנים-עשר בנובמבר 1984.

אולם לעתים זה גורלו גם של מאמר המדווח על ממצאים חדשניים. מאחר שמאמרו של שכטמן-בלך היה דוח בתחום המטלורגיה יותר משהיה בפיזיקה, הם הגישו אותו בסופו של דבר לכתב עת העוסק בתחום זה (*Metallurgical Transactions*), והוא אכן הופיע בו.⁴

שכטמן הבין כי עליו לשפר את ההצגה של תגליתו שיפור ניכר. הוא פנה לעזרה לחוקר ג'ון כהאן, שהיה מדען מנוסה במכון התקנים הלאומי של ארצות הברית, באותה מחלקה שבה עבד שכטמן בעבר. שכטמן הזמין את כהאן להיות כותב-שותף של המאמר בהיותו אסיר תודה לו על שלאחר שנתיים שלמות שבהן לא האמין כהאן בתגליתו הוא שינה

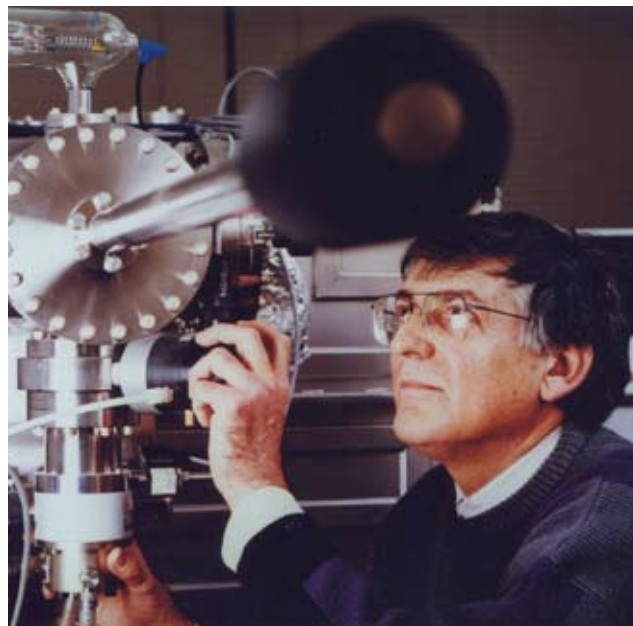
הבלבדית של אדם מסוים. ובכל זאת התגלית היא המשפיעה על המדע ועל יישום פרי פיתוחה ולא שמה.

תגליתו של שכטמן שנויה במחלוקת. סלע המחלוקת הוא באיזו מידה ממצאיו צריכים להיחשב תגלית ממשית. חוקרים אחדים טוענים כי הגילוי של גבישים קוואזי-מחזוריים הוא לא יותר מתיקון הגדרתם הבלתי מדויקת של גבישים. על טענה זו אנו נשיב: אם אכן היה זה לא יותר מתיקון הגדרה, מדוע אף מדען אחד לא הצליח לעשות כן לפני שכטמן? הלכה למעשה תגלית זו הביאה להרחבת הבנתנו באשר לחומרים באמצעות הוספת משפחה חדשה לחלוטין שלהם. היא הובילה לשינוי במערכת העקרונות המדעיים. אכן היו ניסיונות בעבר לאתגר את מערכת העקרונות הקיימת, אולם כל ניסוי "מפריע" הותאם למערכת העקרונות, וכך היה אפשר לשמר אותה.

הביקורת העיקרית לרעיון הגבישים הקוואזי-מחזוריים הייתה של הכימאי הדגול לינוס פאולינג. הוא מיצב את עצמו לא רק כבעל ידע יוצא דופן בתחום המבנים של חומרים אלא גם כאחראי לתגליות יסודיות שהביאו לקריסתן של מערכות עקרונות קודמות. דחיית התגלית של שכטמן על ידי פאולינג הפכה את טיעוניו של שכטמן לבעייתיים עוד יותר מאחר שנשמעה מפי מדען בעל שיעור קומה כפאולינג. אולם למרות הביקורת ממדען כה דגול התמיד שכטמן באמונתו. פאולינג הלך לעולמו בשנת 1994 מבלי לקבל את תגליתו של שכטמן. לחסידיו של פאולינג היה קל יותר לקבל את הרעיון החדש של שכטמן לאחר מותו של פאולינג. המסלול שעברו עד להכרה זו מחזק את אמירותיו של מקס פלנק המופיעות בביוגרפיה המדעית שלו: "אמיתה מדעית חדשה אינה הופכת לשלטת באמצעות שכנוע היריבים שלה והובלתם 'לראות את האור' אלא משום שיריביה מתים לבסוף, וגדל דור חדש המכיר בה".⁶

להלן לקחים כלליים שהופקו מתגלית הגבישים הקוואזי-מחזוריים על ידי שכטמן:

- ◆ התחל בבעיה מעשית. במקרה דנן היה זה החיפוש אחר סגסוגות בעלות תכונות מיוחדות.
- ◆ "שחק עם הבעיה". במקרה דנן שכטמן לא הגביל את עצמו רק לחקירת הרכבי סגסוגות שהיו אמורים להתפתח ליישומים מעשיים.



דן שכטמן במעבדתו בשנות התשעים בפקולטה להנדסת חומרים. צילום: מיקי קורן; באדיבות הטכניון.

השפעתו של המאמר הייתה עצומה, כמו נפרץ סכר והשטף סחף עמו רבים. מדענים, בעיקר תאורטיקנים, עבדו על סוגיות דומות, והמומחים בתחום יכלו לקשור בקלות את המחקר שלהם לדפוס פנרוז, להדמיית תרשים הדיפרקצייה של מקיי ולתגליתו של שכטמן.

המאמר התאורטי הטהור של דב לויז ושל פול שטיינהארט הופיע בגיליון התוכף של אותו כתב עת. המאמר שלהם הגיע למערכת כתב העת בתאריך שניים בנובמבר 1984, כלומר פחות משבועיים לפני פרסום מאמרו של שכטמן, והדבר לא היה בגדר צירוף מקרים. הם שמעו על מאמרו של שכטמן עוד בחודש אוקטובר מפרופסור בהרוורד שכהאן שלח אליו עותק של המאמר. למאמר של לויז-שטיינהארט הייתה כותרת אלגנטית: "גבישים קוואזי-מחזוריים: משפחה חדשה של מבנים מסודרים", וכך הם נתנו לראשונה שם למבנים החדשים.⁵ השם היה פשוט לזכירה, הוא ביטא כהלכה את מהות החומרים החדשים ודבק בהם מאז. יש הטוענים כי הענקת שם לתגלית עשויה להיות חשובה כמו הגילוי עצמו, שהרי תגלית מדעית נגלית בכל מקרה, במוקדם או במאוחר, על ידי מדען זה או אחר, אולם הענקת שם היא פעולתו



העיצוב.⁸ התגלית פתחה צוהר לעולם של "מבנים שמעבר לגבישים".⁹ היום שכטמן ידוע כמגלה הבלתי מעורער של הגבישים הקוואזי-מחזוריים, והוא מוכר כזה לא רק בזכות תבונתו אלא גם בזכות כישורי הסבולת וההתמדה שלו.¹⁰ התגלית הובילה לשינוי במערכת העקרונות בפיזיקה, כימיה, קריסטלוגרפיה ומדע החומרים, והיא זכאית להכרה הגבוהה מכולן.

ביבליוגרפיה

1. Csanády A, Papp K, Dobosy M, Bauer M (1990) *Symmetry* 1: 75–79.
2. Shechtman D, Blech I, Gratias D, Cahn JW (1984) *Phys Rev Lett* 53: 1951–1953.
3. Mackay AL (1981) *Kristallografiya* 26:910–919
4. Shechtman D, Blech I (1985) *Metall Trans* 16A:1005–1012.
5. Levine D, Steinhardt PJ (1984) *Phys Rev Lett* 53:2477–2480.
6. From Max Planck (1984) *A Scientific Autobiography*, quoted in WF Bynum, R Porter, eds, *Oxford Dictionary of Scientific Quotations*. OUP, Oxford, UK, 2005, p 494.
7. Hargittai M, Hargittai I (2009; 2010) *Symmetry through the eyes of a chemist*, 3rd edn. Springer.
8. Hargittai I, Hargittai M (2000) *In Our Own Image: Personal Symmetry in Discovery*. Kluwer, NY.
9. Hargittai I (2010) *J Mol Struct* 976:81–86.
10. Hargittai I (2011) *Drive and curiosity: What fuels the passion for science*. Prometheus, Amherst, NY.

הכותב הוא חבר האקדמיה ההונגרית למדעים, פרופסור לכימיה באוניברסיטת בודפשט לטכנולוגיה וכלכלה.

המאמר מובא מתוך דברים שנאמרו לכבוד יום הולדתו השבעים של דן שכטמן, ב־12 בינואר 2011, בטכניון בחיפה, ואשר פורסמו בחלקם בכתב העת המדעי *Structural Chemistry* (2011) 22: 745–748.

בתרגומו של ד"ר משה נחמני, באדיבות אתר "הידען".



פרופ' דן שכטמן עם פרופ' רות ארנון, נשיאת האקדמיה (מימין), וגב' אלינור המרשלד, שגרירת שוודיה בישראל, בקבלת פנים בבית השגרירה לכבודו, נובמבר 2011.

♦ אל תבטל את הבלתי צפוי. כאשר אנו מקבלים את מה שציפינו לו, זו אינה תגלית; זו מתרחשת דווקא כאשר אנו מקבלים תוצאות בלתי צפויות. שכטמן – בבירור – לא ביטל את הבלתי צפוי.

♦ חשוף את ממצאיך לביקורת נרחבת. זאת עשה שכטמן באופן מושלם.

♦ הענק לתגלית שם. גם במקרה זה כונתה התגלית בשם, אם כי לא על ידי המגלה עצמו.

♦ פרסם אותה באופן בולט. במקרה זה פרסום כזה לא התרחש באופן מדי, אלא רק לאחר זמן.

♦ שוחח על התגלית עם כל מי שמוכן לשמוע על אודותיה ואל תבודד עצמך בעניינה. יחסי ציבור גם הם חשובים בעולם המדע.

♦ החזק את התגלית שלך קרוב ללבך כל עוד היא מייצרת ידע חדש, אך באותה המידה עזוב אותה לנפשה כאשר היא הופכת לשגרתית. במקרה זה שכטמן היה יכול להישאר עמה מעט יותר זמן אף על פי שבהמשך חזר אליה.

הסיפור על אודות גילוי הגבישים הקוואזי-מחזוריים הוא דוגמה לתפקיד הייחודי של שיקולי סימטריה בתגליות מדעיות רבות.⁷ השימוש בהשפעות החזותיות של הגבישים הקוואזי-מחזוריים הוא שהוביל להשפעותיהם של הגבישים לא רק במדע אלא גם באמנות החזותית ובתחום