

האבולוציה של חיידקים יכולה לייצר יצורי כימרה אמיתיים: המקרה של אַזוֹטוֹבַקְטֵר וינְלַנְדִי (*AZOTOBACTER*) (*VINELANDII*)

Gloria Soberón-Chávez*

המחלקה לביולוגיה מולקולרית ובוטניקה, המכון לחקר ביו-רפואה, האוניברסיטה הלאומית האוטונומית של מקסיקו, אוניברסיטת Ciudad, מקסיקו סיטי, מקסיקו

סוקר צעיר

DIEGO

גיל: 11



חלבונים (Proteins)

מולקולות גדולות ומורכבות שמבצעות הרבה תפקידים חשובים בגוף. חלבונים מבצעים את מרבית עבודתם בתאים, והם נדרשים עבור המבנה של רקמות ואיברי הגוף, תפקודם וויסותם.

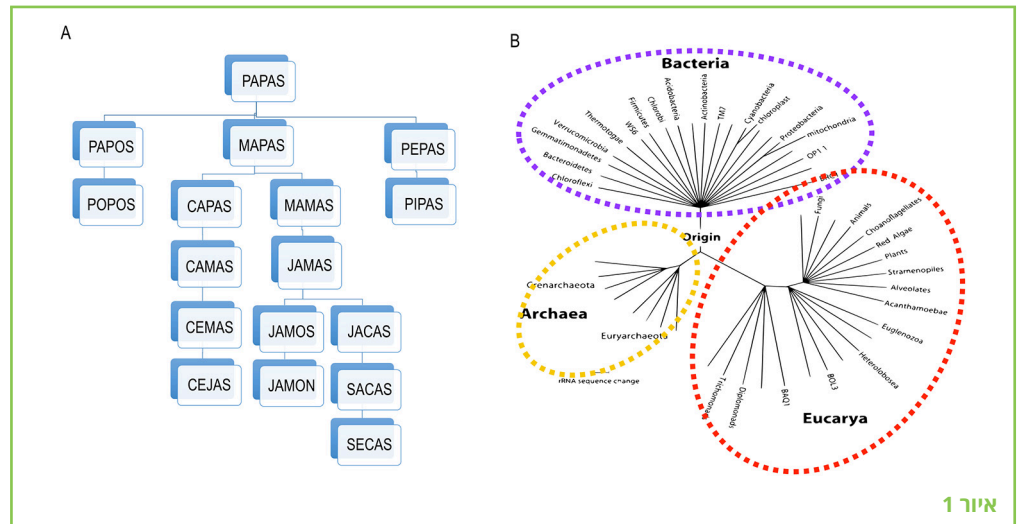
האבולוציה של חיידקים שונה מאבולוציה של אורגניזמים אחרים. בעוד שאנו מקבלים את המידע הגנטי שלנו רק מההורים שלנו, חיידקים יכולים לקבל חלק מהמידע הגנטי שלהם ממקורות אחרים. במאמר זה אנו מתארים את אחד מחיידקי הכימרה האלה, *Azotobacter vinelandii*, וחוקרים כיצד צורתו הרדומה, דמויית הזרע, השפיעה על האבולוציה שלו.

הקדמה

התא החי הראשון בכדור הארץ הופיע לפני כארבעה מיליארד שנים. אנו קוראים לו LUCA, קיצור של last universal common ancestor שמשמעותו האב הקדמון האוניברסלי המשותף האחרון. איננו יודעים הרבה על LUCA, אולם כל צמח, כל חיה, וכל אחד מאיתנו התפתח מ-LUCA. אנו יודעים זאת הודות למחקרים עם **חלבונים** מיוחדים שנמצאים בתאים של צאצאים של LUCA. חלבונים הם יקרי ערך עבור כל היצורים החיים, מאחר שהם מולקולות

איור 1

(A) בניית עצים פילוגניים. דוגמה לאופן שבו עצים פילוגניים בנויים, באמצעות מילים בנות חמש אותיות. בדוגמה הזו, כל שינוי באות מייצג יחידה אחת של מרחק, כך שכל שתי מילים שמפורדות באות/ צעד אחד בעץ דומות מאוד זו לזו, בעוד שהמילים שמפורדות על-ידי יותר אותיות / צעדים (כמו "secas" מ-"secas", שנמצאות תשעה צעדים זו מזו), הן פחות קשורות. אתם יכולים לראות שהאב הקדמון האחרון של כל שתי מילים ממוקם במקום שבו המסלולים של המילים מתכנסים ("mapas") במקרה של "cejas" ו-"secas". (B) דיאגרמה של עץ החיים שבנויה באמצעות הרצף הגנטי של הריבוזום, עבור מינים ששייכים לשלוש מחלקות של חיים: חיידקים, ארכאות (שהם גם אורגניזמים חד-תאיים מיקרוסקופיים), ואיקריוטים (שכוללים את כל החיות והצמחים). מאחר שכל האורגניזמים החיים נכללים בעץ הפילוגנטי הזה, הוא נקרא "עץ החיים האוניברסלי" (האיור הזה הוא מודיפיקציה של דיאגרמה ממאמרו של Pace בשנת 2009 [1]).



שעושות דברים ששומרים על היצורים בחיים. כל התהליכים הביולוגיים שהכרחיים לחיים כמו נשימה, עיכול, או התרבות, מערבים חלבונים בדרך כלשהי. בעוד שהתהליכים האלה, והחלבונים שקשורים אליהם, משתנים בין אורגניזמים – לדוגמה, חלבוני הנשימה של דגים שונים מאוד מאלה של פילים – חלבונים מסוימים הם כל כך חשובים שכולם צריכים לייצר אותם. אחד מהתפקודים האלה, שהכרחי לחיים, הוא המנגנון המשמש ליצירת חלבונים, אשר מתבצע על-ידי אסופת חלבונים שמצומדים למולקולות אחרות הנקראות ריבוזום. הריבוזום כל כך קריטי שהוא לא כל כך השתנה מאז ש-LUCA היה בסביבה. איתור שינויים קטנים בדנ"א שיוצר את הריבוזום, אֶפְשָׁר לנו להציף להיסטוריה האבולוציונית של אורגניזמים חיים, ולעקוב אחרי הקשרים ביניהם.

עץ החיים האוניברסלי

מאחר שכל האורגניזמים הגיעו מ-LUCA, ולכולם יש **ריבוזומים**, אפשר לבנות "עצי משפחה" שמראים לנו את הקישוריות בין אורגניזמים שונים באמצעות מעקב אחרי השינויים הקטנים שהתרחשו בריבוזומים שלהם. במשפחת העצים הזו, שכולם נקראים פילוגנטיים בפי מדענים, כל מין ממוקם בקצה של העלים, כשגודלם של הענפים בין שתי נקודות מצביע על מידת הדמיון בין האורגניזמים שנמצאים בקצות העלים. לכן, לדוגמה, הענפים שמפרידים בין חתולים, אריות וטיגריסים יהיו קטנים יותר מהענפים שמפרידים בין החיות האלה ובין לווייתנים. לכן, בפילוגניה של יונקים, כל צורות החתולים יוצרות קבוצה צפופה של ענפים, שמסתעפים בבסיס מהענף של הלווייתנים. אתם יכולים להבין כיצד פילוגניה בנויה באמצעות מילים, כפי שמתואר באיור 1A. אם נגדיל את גודל העץ הפילוגנטי על-ידי הוספת כל יצור חי על גביו, נסיים עם עץ החיים האוניברסלי (UTL), שבו אנו יכולים לראות את הקשרים שבין כל היצורים החיים [1] (איור 1B).

בדוגמה שמוצגת באיור 1A אנו משתמשים במילים בנות חמש אותיות, אולם אתם יכולים לדמיין שאם נשתמש במילים ארוכות יותר, אתם תהיו מסוגלים למדוד מרחקים גדולים יותר. האורך המלא של גן בריבוזום של חיידקים הוא בסביבות 1,500 "אותיות", לכן חישוב הקשרים בין אורגניזמים באמצעות הריבוזום רגיש מאוד, ולכן כל האורגניזמים יכולים להיכלל בעץ החיים האוניברסלי.

ריבוזומים (Ribosomes)

ריבוזומים הם מבנים מורכבים שנוצרים מחלבונים וממולקולות אחרות. המולקולות האלה נמצאות בכל תא, והן האתר שבו חלבונים מיוצרים.

הנתיב שנוצר מתחתית העץ ועד לקצות הענפים מייצג את המסלול האבולוציוני שהוביל את המין לאותו הקצה. החברים של אותו המין, שעברו את אותו המסלול המסוים, איבדו את יכולתם להזדווג ולהוליד צאצאים עם חברים של מינים אחרים, שהתקדמו במסלולי אבולוציה אחרים.

חיידקים לא תמיד יורשים את הגנים שלהם מההורים

כל מין יורש את הדנ"א, או החומר מידע גנטי שלו, ישירות מהאבות הקדמונים שלו. האבות הקדמונים האלה קיבלו את הדנ"א שלהם מהדור שהגיע לפנייהם, וכך הלאה אחורה לאורך המסלול האבולוציוני, עד שהעץ מגיע כל הדרך חזרה ל-LUCA. מאחר שהמידע הגנטי של כל מין הוא ייחודי לאותו המין, הוא יכול להיחלק רק עם החברים של אותו המין, ולזרום מההורים לצאצאים שלהם. זה נכון, אלא אם כן אנו מדברים על חיידקים. למיני חיידקים יש יכולת לחלוק חלקים מהמידע הגנטי שלהם עם מיני חיידקים אחרים שלא התקדמו באותו מסלול אבולוציוני; חיידקים יורשים את הדנ"א שלהם מחיידקים אחרים שאינם קשורים אליהם בכל דרך. התנועה הזו של מידע גנטי נקראת **העברה גנטית אופקית**, מאחר שהעברה הזו של מידע גנטי מתרחשת באופן אופקי, בין חיידקים באותו הדור, במקום אנכית, בין ההורים לצאצאים.

מאפיין מעניין אחר של חיידקים הוא שחלק מהם יכולים לפתח צורות רדומות שדומות לזרעים של צמחים. הצורות הרדומות האלה יכולות להתקיים במשך זמן רב ללא התרבות (איור 2). הצורות הרדומות האלה הן כמו מאגר עתיק של מידע גנטי, שבתיאוריה יכול להיות מנוצל על-ידי אורגניזמים אחרים [2]. המידע הגנטי של הצורות הרדומות נשמר במשך שנים רבות ללא שינוי, ויכול להשתלב בחיידקים אחרים באמצעות העברה גנטית אופקית.

האם חיידקים מסוגלים ליצור כימרות?

כדי לקבל תמונה ברורה יותר של האופן שבו צורות רדומות של חיידקים יכולות להשפיע על אבולוציה של חיידקים, בואו נדמין שדינוזאורים יכולים ליצור ביצים שיכולות להישאר בסביבה במשך עשרות מיליוני שנים. במקרה כזה, פעם בכמה זמן היינו נתקלים בתינוק של דינוזאור, אשר מכיל גנים שאינם נמצאים באף אורגניזם אחר שחי כיום, והוא יתקיים במקביל לחיות מודרניות. בואו נדמין עוד שהדינוזאור התינוק הזה יכול להזדווג עם חיות אחרות. במקרה כזה, אפשר היה ליצור חיות כִּימְרִיות, שהן חיות שמכילות מידע גנטי, ולכן מאפיינים פיזיים, של מינים שונים. בתרחיש הזה, יכלה להתקיים חיה כימרית עם איברים של ציפורים, דינוזאורים ויונקים!

חשבנו שיכולתם של חיידקים לקבל בתורשה דנ"א באמצעות העברה גנטית אופקית, ויכולתם להישאר רדומים במשך תקופות זמן ארוכות, יאפשרו היווצרות של חיידקים **כימרים**, ממש כמו בדוגמה של תינוק הדינוזאור. זו השאלה שהנחתה את המחקר שלנו [2].

החיפוש אחר חיידקים כימרים: המקרה של *AZOTOBACTER VINELANDII*

התעניינו למצוא אם הצורות הרדומות של חיידקים יכולות ליצור חיידק כימרי, באמצעות יכולתן להעביר מידע גנטי בדרך של העברה גנטית אופקית. כדי לראות אם זה יכול להתרחש, הסתכלנו על הגנום של *Azotobacter vinelandii*, שהוא חיידק שמסוגל ליצור צורות רדומות

מידע גנטי (Genetic Information)

הדנ"א בכל אורגניזם, שבו מאוחסן המידע שדרוש ליצירת חלבונים ורכיבים תאיים אחרים. דנ"א מועבר מדור אחד לדור הבא דרך תורשה.

העברה גנטית אופקית (Horizontal Gene Transfer - HGT)

תהליך של הורשת מידע גנטי ממין לא קשור. מנגנון התורשה הזה אינו שכיח, מאחר שאורגניזמים בדרך כלל יורשים את המידע הגנטי שלהם מההורים שלהם, שהם חברים באותו המין כמו הצאצאים שלהם.

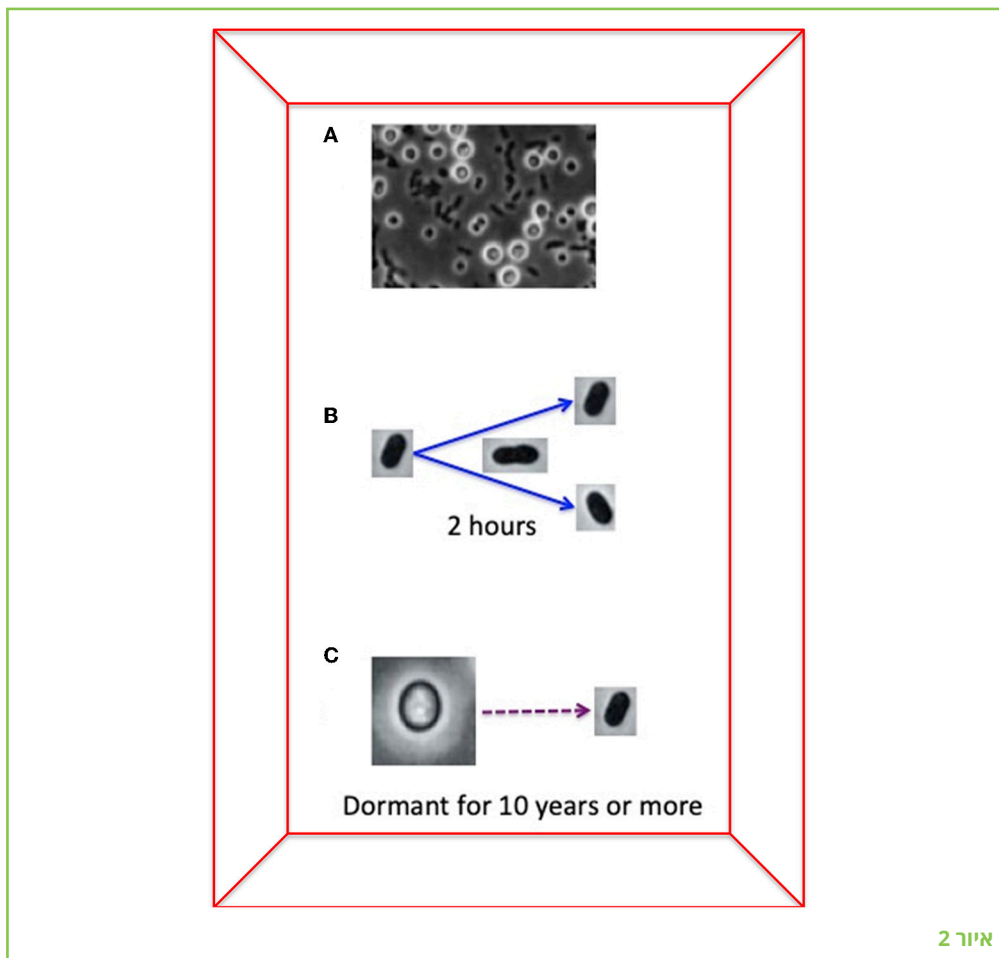
כימרה (Chimera)

חיה אגדית שנוצרה מחלקים של חיות שונות. המונח הזה משמש בביולוגיה לתאר אורגניזם שמכיל תערובת של רקמות שונות גנטיות. במאמר זה אנו משתמשים במונח הזה כדי לתאר חיידקים עם מידע גנטי שנורש מאורגניזמים שונים, שחלקם אינם האבות הקדמונים שלהם.

איור 2

לחיידק הכימרי *Azotobacter vinelandii* יש שתי צורות של התרבות: התרבות באמצעות חלוקה תאית אורכת שעתים, בעוד שמבנים רדומים, דמויי-זרע, יכולים לחיות ללא התרבות במשך יותר מ-10 שנים. (A) תמונה (שצולמה באמצעות מיקרוסקופ אור) של תאי חיידק ושל הצורה הרדומה, דמויית הזרע. אתם יכולים להשוות את הגודל והצורה דמויית הזרע הרבה יותר גדולה, בעוד שתאי החיידק הרגילים קטנים וכהים. (B) לוקח לחיידק

Azotobacter vinelandii שעתים להתרבות באמצעות חלוקה תאית. (C) הצורה הרדומה, דמויית הזרע, של *Azotobacter vinelandii* יכולה להישאר במצב יבש במשך 10 שנים, ויותר. לכן, "זרעי" *Azotobacter vinelandii* נשארים רדומים במשך זמן ארוך פי 44,000 ממה שלוקח לתא להתחלק באמצעות חלוקה תאית! ייתכן שהמידע הגנטי בצורות הרדומות גורם למאגר של גנים שיכולים להשתלב בחיידקים חיים מחיידקים מרוחקים מהם באבולוציה, באמצעות העברה גנטית אופקית.



איור 2

שנקראות "chists" (איור 2), והוא קשור באופן קרוב לחיידק אחר שנקרא *Pseudomonas aeruginosa* [3]. למען האמת, זה קצת מפתיע שהאורגניזמים האלה קשורים זה לזה, מאחר ששני מיני החיידקים האלה שונים מאוד זה מזה! חקרנו את העובדה המעניינת הזו, ומצאנו שהאורגניזמים האלה קשורים בעץ החיים מאחר שכמעט מחצית מהמידע הגנטי של *Azotobacter vinelandii*, כולל חלק מההוראות ליצירת ריבוזומים, קשורים מאוד לזה של *Pseudomonas* [4], בעוד ששאר המידע משמש ליצירת חלבונים שנותנים ל-*Azotobacter* את המאפיינים הייחודיים שלו. זה לא היה מספיק עבורנו, ורצינו גם למצוא את המידע הגנטי שלא הגיע מ-*Pseudomonas* אלא עבר בתורשה ממיני חיידקים לא קשורים אחרים [2]. במילים אחרות, המידע הגנטי הבסיסי של *Azotobacter vinelandii* הגיע מאב קדמון משותף של *Azotobacter* ו-*Pseudomonas*, אולם במהלך מסלול האבולוציה המסוים שלו, *Azotobacter* רכש מידע גנטי נוסף שהפך אותו להיות שונה מאוד מ"בן דוד" שלו *Pseudomonas*, או מכל אורגניזם אחר למעשה, מאחר ש-*Azotobacter* הוא כימרה.

עד כמה חיידקי כימרה שכיחים?

בעוד שקשה לדעת אם אורגניזמים כימרים שכיחים, קיומו של *Azotobacter* מהווה ראיה חזקה לכך שחיידקים כימרים עשויים שלא להיות כה נדירים. ישנם לפחות שני מקרים מתועדים של מיני חיידקים שנראה שהגיעו מקבוצת חיידקים שנקראת *Firmicutes*, והם

מכילים גם פיסות של מידע גנטי שהגיעו מאורגניזמים אחרים. חיידקי הכימרה האלה נקראים *Thematogales*, אורגניזמים שרכשו גנים שאפשרו להם לחיות בטמפרטורות גבוהות, ו-*Fusobacterium nucleatum*, חיידק שנמצא בפֶּלֶק של השיניים שרכש גנים מחיידקים שכנים. גם *Thermatogales* וגם *Fusobacterium nucleatum* לא יוצרים צורות רדומות דמויות זרע, אולם המידע שהם רכשו באמצעות העברה גנטית אופקית יכל להגיע מחיידק עתיק שכן הייתה לו היכולת לייצר צורות רדומות. עדיין איננו יודעים, אבל אולי יום אחד נדע.

תודות

אני רוצה להוקיר את הדיונים הנלהבים והפורים עם Karla Galaviz, Adrián Ximena Martínez, Inés González-Casanova, González-Casanova, de la Escalera.

מאמר המקור

González-Casanova, A., Aguirre-von-Wobeser, E., Espín, G., Servín-González, L., Kurt, N., Spanò, D., et al. 2014. Strong seed-bank effects in bacterial evolution. *J. Theor. Biol.* 356:62–70. doi: 10.1016/j.jtbi.2014.04.009

מקורות

1. Pace, N. 2009. Mapping the tree of life: progress and prospects. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 73:565–76. doi: 10.1128/MMBR.00033-09
2. González-Casanova, A., Aguirre-von-Wobeser, E., Espín, G., Servín-González, L., Kurt, N., Spanò, D., et al. 2014. Strong seed-bank effects in bacterial evolution. *J. Theor. Biol.* 356:62–70. doi: 10.1016/j.jtbi.2014.04.009
3. Rediers, H., Vanderleyden, J., and De Mot, R. 2004. *Azotobacter vinelandii*: a *Pseudomonas* in disguise? *Microbiology* 150:1117–9. doi: 10.1099/mic.0.27096-0
4. Martínez-Carranza, E., Ponce-Soto, G. Y., Servín-González, L., Alcaraz, L. D., and Soberón-Chávez, G. 2019. The evolution of bacteria seen through their essential genes: the case of *Pseudomonas aeruginosa* and *Azotobacter vinelandii*. *Microbiology* 165:976–84. doi: 10.1099/mic.0.000833

פורסם אונליין: 30 בדצמבר 2021

נערך על ידי: Francisco Barona-Gomez

ציטוט: Soberón-Chávez G (2021) האבולוציה של חיידקים יכולה לייצר יצורי כימרה אמיתיים: המקרה של אֶזוֹטוֹבַקְטֵר וִינְלַנְדִי (*Azotobacter vinelandii*). *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2019.00135-he

Soberón-Chávez G (2019) The Evolution of Bacteria Can Produce Chimeric Creatures: The Case of *Azotobacter vinelandii*. *Front. Young Minds* 7:135
doi: 10.3389/frym.2019.00135

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

COPYRIGHT © 2019 © Soberón-Chávez 2021. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים (המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה). השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקר צעיר

DIEGO, גיל: 11

הדבר שאני הכי אוהב לעשות הוא לקרוא, ואני יכול לקרוא ספר שלם בתוך כמה שעות בלבד. אני גם אוהב לשחק במשחקי וידאו. אני טוב במתמטיקה ובאנגלית, ואני תמיד מקבל ציונים טובים בבית הספר. אני מתאמן בכדורגל. כשאנדל, אני רוצה להיות הנשיא של המדינה שלי, מאחר שאני רוצה להפסיק את חוסר הצדק וחוסר השוויון שיש במקסיקו.

הכותבת

GLORIA SOBERÓN-CHÁVEZ

Gloria Soberón-Chávez היא מדענית מקסיקנית שעשתה תואר ראשון ודוקטורט במחקר ביו-רפואה באוניברסיטה הלאומית האוטונומית של מקסיקו (UNAM), שם היא עבדה כל חייה (39 שנים מתוך 62 שנותיה). תחום המחקר העיקרי שלה הוא גנטיקה מולקולרית של חיידקים, בפרט *Pseudomonas aeruginosa*. היא נהנית מאוד מעבודה ב-UNAM, ומלבד עריכת המחקר היא מעורבת בעבודות אדמיניסטרטיביות, כמו למשל ראש המכון למחקר ביו-רפואי בלימודי פוסט-דוקטורט של UNAM. היא אוהבת מוזיקה, היא שרה במקלה ששייכת לתוכנית השירה של UNAM, והיא נהנית ממזון מכל רחבי העולם, ומקריאת נובלות. *gloria@biomedicas.unam.mx



מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים (נ.ר.)
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת גרסה עברית
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK