frontiers FOR YOUNG MINDS

التنوع الحيوي
نُشر على الإنترنت بتاريخ: 10 ديسمبر 2021
doi: 10.3389/frym.2018.00050-ar

# الأبطال الخارقون وحلفاؤهم: ثلاث قصص مذهلة عن التكافل الميكروبي!

***Cassie L. Ettinger[1*], Laetitia G. E. Wilkins[2], Katherine E. Dahlhausen[1], Sonia L. Ghose[3], Daniel Oberbauer[1], Jonathan A. Eisen[1,3,4] and David A. Coil[1]***

*[1]Genome Center, University of California, Davis, Davis, CA, United States*
*[2]Department of Environmental Sciences, Policy & Management, University of California, Berkeley, Berkeley, CA, United States*
*[3]Department of Evolution and Ecology, University of California, Davis, Davis, CA, United States*
*[4]Department of Medical Microbiology and Immunology, University of California, Davis, Davis, CA, United States*

المراجعون الصغار:

**SHUBHAANGI**
العمر:10

إذا نظرت إلى إحدى المدن المكتظة بالسكان، أو إلى صحراء نائية، أو إذا نظرت بعيدًا في قاع المحيط، فستجد كائنات حية تتفاعل مع بعضها البعض. وإذا استمر التفاعل لفترة زمنية طويلة، فإنه يطلق عليه التكافل أو التعايش. ونحن نستكشف هنا ثلاثة أمثلة مختلفة على التكافل نرويها على ألسنة أبطال خارقين! سنغوص أولًا في أعماق المحيط ونخبركم بقصة الحبار الذي يمتلك قدرة خارقة على أن يضئ ويتوهج على غرار مصباح يدوي يضيء الظلام الحالك. ثم سنسافر بعدها إلى أعلى، وبالتحديد إلى أشجار أستراليا، حيث سنلتقي بالصديق الحميم أو البطل الخارق الذي يساعد أصدقائه من دببة الكوالا ذات الفراء على هضم السم. وفي النهاية، تأهب واستعد، حيث سنأخذك للقاء شرير يهدد حياة الضفادع حول العالم. إن ما يجعل هذه الأمثلة مميزة هو أن أحد الكائنات الحية في كل حالة من حالات التكافل يكون صغيرًا جدًا لدرجة أننا لا يمكن أن نراه بدون مجهر! تتمتع هذه الكائنات الحية الدقيقة، والتي تعرف بالميكروبات، بنفس الدرجة من الأهمية التي تتمتع بها الحيوانات والنباتات التي نراها بأعيننا المجردة.

**التكافل**
**(SYMBIOSIS)**

علاقة وثيقة وطويلة الأمد بين كائنين أو أكثر من الكائنات الحية.

**تبادل المنفعة**
**(MUTUALISM)**

نوع من أنواع التكافل يستفيد فيه طرفا العلاقة من التفاعل فيها.

**التطاعم أو المعايشة**
**(COMMENSALISM)**

نوع من التكافل يستفيد منه أحد الكائنات الحية، بينما لا يتأثر الآخر من هذا التفاعل.

**التطفل**
**(PARASITISM)**

نوع من التكافل يستفيد منه أحد الكائنات الحية، بينما يتضرر الآخر من هذا التفاعل.

**الميكروبات**
**(MICROBES)**

كائنات حية، مثل البكتيريا والفطريات، غير مرئية لعين الإنسان المجردة.

## الأبطال الخارقون والأصدقاء الأوفياء والأعداء الأشرار

تخيل أنك تريد أن تكتب قصة هزلية عن أحد الأبطال الخارقين. من الواضح أنك تريد أن يكون هذا البطل الخارق هو نجم هذا العرض. ولكن، ما الذي تحتاجه أيضًا؟ ماذا عن صديق حميم، أي شخص ما يساعد البطل؟ ماذا عن الناس الذين سينقذهم؟ ربما يكون هناك شرير ليحاربه؟

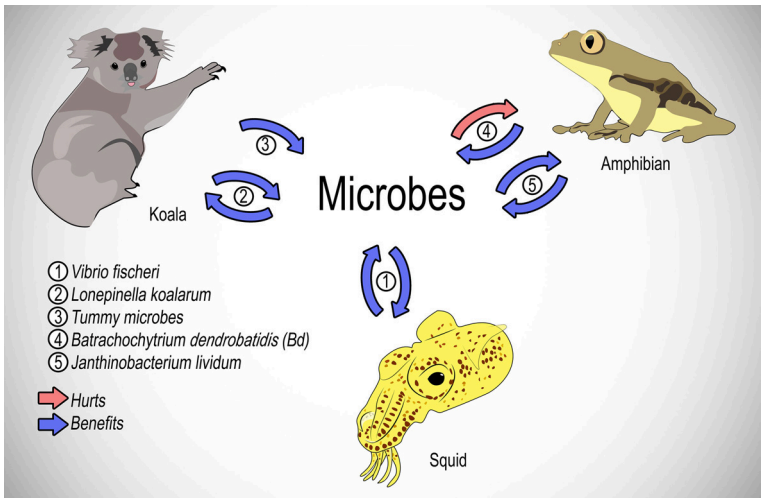
في علم الأحياء، تعرف العلاقة بين كل من الأبطال الخارقين وكلٍ من هذه الشخصيات (الصديق الحميم، والأشخاص الذين سيتم إنقاذهم، والشرير) باسم ``التكافل''. تعج الحياة على سطح الأرض بأنواع مختلفة من صور التكافل، ويمكننا رؤيتها في أي مكان. هل يمكنك أن تفكر في أي من هذه العلاقات الآن؟ نطلق على هذه العلاقة من **التكافل** بين البطل الخارق والصديق الوفي والتي يحمي فيها كل منهما ظهر الآخر ``**تبادل المنفعة''**، وهي طريقة رائعة لوصف عبارة ``يمد كل منهما يد العون لصاحبه''. أما عندما ينقذ البطل شخصًا ما من ورطة، فإن هذا النوع من التكافل يعرف باسم ``**المعايشة أو التطاعم''**، وفيه يستفيد أحد الطرفين، دون الآخر. أما عندما يؤذي الأشرار الأشخاص الآخرين بينما يساعدون أنفسهم فقط، فإن هذا النوع من التكافل يعرف باسم ``**التطفل''.**

إننا نتفاعل دومًا مع الكائنات الحية. وتشمل هذه التفاعلات عائلاتنا ومدرسينا وأصدقائنا وحيواناتنا الأليفة. كما تشمل أيضًا تريلونات الكائنات الحية غير المرئية التي تعرف باسم **الميكروبات،** والتي تعيش في أجسامنا وعليها. نحن لا نلاحظ أبدًا معظم هذه الميكروبات، لكنها تعيش على جميع الأسطح من حولنا. ومن شأن بعض هذه الميكروبات أن تجعل حياتنا أسهل (الأصدقاء الأوفياء)، بينما بإمكان بعضها الآخر أن يمرضنا (الأشرار).

وسنقدم لكم الآن الأبطال الثلاثة الخارقين ونستكشف العلاقة بينهم وبين الميكروبات من حولنا (الشكل 1). يصف المثال الأول علاقة تبادل منفعة مثيرة للاهتمام، حيث يُكوّن كل من الأبطال الخارقين وأصدقائهم فريقًا ليصبحوا مشاعل تبدد الظلام. ثم، سنعرض عليك مثالًا لميكروبات تعيش داخل حيوان أسترالي بديع -- وهو دب الكوالا. معظم ميكروبات المعدة تقطن في موضعها هناك ولا يلاحظ أحد أيًّا من ذلك. يمثل هذا حالة معتادة من التطاعم، ولكننا سنقدم لكم أيضًا ميكروبًا صغيرًا يعيش في معدة دبب الكوالا، ويساعدها على أكل السم! أما مثالنا عن التطفل، فهو عن ميكروب رهيب يسبح في المياه العذبة لقتل الضفادع؛ وستصيبك القشعريرة فور معرفة قصته. ولكن لا تقلق، فهناك صديق وفيّ جديد على الساحة بإمكانه مساعدة الضفادع على هزيمة هذا العدو الشرير.

## هل تخشى الظلام الحالك؟ الحبار يخشاه كذلك!

تخيل أنك تمتلك مصباحًا يدويًّا يمكنك أن تشغله عندما تكون خائفًا. هذه هي حياة حبار هاواي قصير الذيل، *Euprymna scolopes*. وبدلًا من المصباح اليدوي، يمتلك الحبار عضوًا على بطنه يعتبر موئلًا لميكروب مضيء يعرف باسم *Vibrio fischeri* [1]. ويمكن للحبار أن يخبر هذا الميكروب الموجود في العضو أن يضيء، تمامًا مثل الضغط على زر تشغيل المصباح اليدوي. هل تفكر في سبب جيد وراء إقدام الحبار على هذا الفعل؟ لقد اكتشف العلماء أن الحبار يفعل هذا ليتجنب أن يصبح وجبة سائغة تلتهمها الأسماك في منتصف الليل!




**شكل 1**

حالات التكافل للأبطال الثلاثة. يمكننا هنا رؤية أبطالنا الثلاثة (الحبار، ودبة الكوالا والضفادع) يتفاعلون مع أصدقائهم من الميكروبات والأعداء (المشار إليهم آنفًا). تشير الأسهم الزرقاء إلى الكائن الحي الذي يستفيد من علاقة التكافل (تطاعم أو تبادل منفعة)، بينما تشير الأسهم الحمراء إلى الكائن الحي الشرير (التطفل).

عندما يشغل الحبار المصباح المثبت على بطنه، تعتقد الكائنات البحرية الضخمة الجائعة والتي تنظر لأعلى من الأعماق أن ضوء الحبار ليس إلا ضوء القمر المنبثق من السماء، بينما لن ترى المخلوقات الجائعة التي تنظر من أعلى لأسفل أي شيء، حيث يتسبب الضوء الصادر من هذا الميكروب في عدم وجود أي ظل للحبار. وبتوهجه مثل المصباح، يمنح ميكروب *Vibrio* الحبار القوة التي تجعله غير مرئي! وهذه العلاقة بين الحبار وميكروب *Vibrio* المشع هي ما يسميه العلماء "تبادل المنفعة"، والتي هي طريقة أخرى لوصف الحياة الحقيقية للأبطال والأصدقاء الأوفياء. لقد عقد كل من الحبار و*Vibrio* صفقة تعود بالنفع على كليهما! إذ أصبح لدى الحبار الآن القدرة على التخفي من الكائنات المخيفة التي تريد التهامه، بينما حصل *Vibrio* على مكان مريح للعيش والحصول على جميع الطعام الذي يريده داخل عضو الضوء في الحبار.

ربما تتساءل: كيف أصبح *Vibrio* الصديق الوفي للحبار في المقام الأول؟ لا يولد الحبار مزودًا بأصدقائه الأوفياء، ولذا فعليه أن يبحث عن صديقه في جميع ميكروبات البحر المحيطة. ومن ثم، فهو يمسك بـ *Vibrio* في فخٍّ يشبه المخاط على الجزء الخارجي من بطنه، والذي يعمل أيضًا على إبقاء الميكروبات الأخرى التي ربما تكون ضارة بعيدًا عنه. وبمجرد أن يعثر الحبار على صديقه الوفي، ينتقل *Vibrio* المشع من الفخ المخاطي إلى عضو الضوء في بطن الحبار، حيث يساعد على إبقاء الحبار غير مرئي في أنظار الكائنات الشريرة المتربصة له في الأعماق.

## أتريد سمًا على العشاء؟ أجل، رجاءً

هل يمكنك أن تتخيل أنك تأكل نفس الطعام طوال حياتك؟ يا له من شيء ممل! تخيل الآن إذا كان هذا الطعام سامًا؟ شيء مقزز، أليس كذلك! هذا هو بالضبط ما تفعله دببة الكوالا، حيث تأكل أوراق شجرة تعرف باسم الكافور (*Eucalyptus*) كل يوم. وتحتوي أوراق هذه الأشجار على سم، وهو ما يمنع معظم الحيوانات - بخلاف دببة الكوالا - من التهامها! حسنًا، هذه سمة رائعة لهذا البطل الخارق! ولكن، كيف تستطيع هذه الدببة أن تقتات فقط على هذه الأوراق السامة؟ حسنًا، اتضح أن هناك ميكروبات خاصة في أمعاء الكوالا تعمل بجد على تكسير الأجزاء السامة من الأوراق إلى أخرى أصغر بحيث لا تستطيع أن تؤذي الكوالا. وتتسكع معظم هذه الميكروبات في أمعاء الكوالا، وهو ما يعد مثالًا جيدًا على علاقة التطاعم. ويعني هذا أن هذه الميكروبات لا

تعمل فقط على تكسير هذه السموم، ولكنها لا تؤذي الكوالا أيضًا. يعرف أحد الميكروبات الذي لديه القدرة على تكسير الأوراق باسم *Lonepinella koalarum*، وهو صديق وفيّ مهم في محاربة السم، ويشكل علاقة تبادل منفعة مع دببة الكوالا [2]. ولا يزال العلماء يكتشفون المزيد عن هذه الميكروبات التي تعد بمثابة الصديق الوفيّ للأبطال من دببة الكوالا.

*Lonepinella* وغيره من الميكروبات المحاربة للسموم التي تعيش في معدة الكوالا مهمة جدًا لإبقاء الكوالا على قيد الحياة؛ لدرجة أن الكوالا تنقل هذه الميكروبات لأطفالها. لكن كيف يتم ذلك؟ نعم، لقد خمنتها! تأكل صغار الدببة البراز! أمممم، شيء مقزز! يحدث هذا عندما لا يزال صغير الكوالا صغيرًا جدًا ويعيش داخل جراب الأم. يزحف صغير الكوالا خارج كيس الأم لتناول وجبة خاصة من البراز. يعتقد العلماء أن السبب وراء قيام صغار الكوالا بهذا الفعل هو الحصول على جميع الأصدقاء الذين لهم القدرة على محاربة السموم من براز الأم. ومن ثم، تنتقل هذه الميكروبات من براز الأمهات إلى أمعاء الصغار، حيث تبني بيتًا بداخلها، وعليه تكون على أهبة الاستعداد للعمل!

## هل يختبيء أحد الأشرار في بركة مياه بالقرب منك؟

هل تعرضت لعدوى جراء جرحٍ في جلدك من قبل؟ تبدأ العدوى على جلدك عندما تقرر ميكروبات معينة أن تنمو على جسمك وألا تسمح له بالشفاء! وعلى الرغم من أن غالبية الميكروبات لا تسبب أي مشكلات للحيوانات والنباتات، فإن بعضًا منها يتصرف في الطبيعة مثل الأشرار. والمثال على ذلك هو أحد الميكروبات التي تهاجم **الكائنات البرمائية** على جلودها، ومن ثم تتسبب في إمراضها. ويسبب الميكروب الشرير في هذه العلاقة، والذي يعرف أيضًا باسم *Batrachochytrium dendrobatidis* (يرمز له اختصارًا بـ *BD*) في البحيرات والتيارات المائية حتى يجد ضفدعًا أو قنفذًا بحريًا فيلتصق بجلده. ويوضح هذا المثال علاقة التطفل، حيث يصاب الكائن البرمائي بالأذى، بينما ينمو الميكروب الشرير ويتكاثر. تستخدم الكائنات البرمائية جلدها للتنفس وامتصاص المواد الغذائية، ولذا عندما ينمو ميكروب *BD* فوق جلدها، فإنه يتسبب في إضعاف الحيوان ويبدأ الحيوان في الاختناق. وسيحاول الحيوان حينها أن يدافع عن نفسه بتمزيق جلده وإطلاق مواد في الطبقة المخاطية على الجلد، إلا إن هذا ليس كافيًا للتخلص من الميكروب الضار [3].

**الكائنات البرمائية (AMPHIBIANS)**

مجموعة من الحيوانات مثل الضفادع وقنفذ البحر والتي تقضي، في المعتاد، جزءًا من حياتها في المياه وجزءًا آخر على اليابسة.

قتل المرض الذي يتسبب فيه ميكروب *BD* أطنانًا من الكائنات البرمائية حول العالم، مع التأكيد على أن هلاك هذه الكائنات يؤثر علينا جميعًا. فإذا اختفت جميع الضفادع والقنافذ البحرية، فستكون الأرض حينها في ورطة كبيرة. فعلى سبيل المثال، تأكل الكائنات البرمائية الكثير من الحشرات؛ مثل الناموس المزعج الذي قد يسبب مشكلة حقيقية حال وُجِدَت أعداد كثيرة منه. وهذا سبب واحد فقط وراء محاولات العلماء لاكتشاف طرق لمساعدة الكائنات البرمائية قبل أن يتسبب ميكروب *BD* في اختفاء المزيد من الضفادع.

## حشد حلفاء جدد للمعركة القادمة

ساعدنا البحث العلمي في التعرف على الميكروبات التي يمكنها أن تعمل كأصدقاء لحمايتنا من الأشرار. فعلى سبيل المثال، ساعد الميكروب المعروف بـ *Janthinobacterium lividum* على حماية البرمائيات من ميكروب *BD*. تستخدم البرمائيات مواد على جلدها لإبعاد ميكروبات معينة عنها ولتعزيز نمو الأصدقاء الأوفياء مثل *J. lividum*، وهو ما يمنح ميكروب *J. lividum* موئلًا لطيفًا وغنيًا بالغذاء للعيش فيه. وفي المقابل، يمكن أن يقدم *J. lividum* منافع للكائن البرمائي. وإحدى

هذه الفوائد هي أنه عندما يتقاتل مع ميكروب *BD* على جلد الكائن البرمائي، فإنه يقتل *BD* وينقذ الحيوان من المرض [4]. فهل يمكننا إنقاذ البرمائيات من خلال إضافة المزيد من الأصدقاء والحلفاء الأوفياء لجلود هذه الكائنات؟ ربما! يوجد الكثير من العلماء الذين يحاولون اكتشاف هذا الأمر الآن من خلال دراسة المعارك بين الأبطال والأشرار والدور المهم الذي يلعبه الأصدقاء والحلفاء الأوفياء. ويمكن للعلماء استخدام هذه المعرفة حول التكافل للمساعدة في الحفاظ على صحة النباتات والحيوانات (وكذلك صحتنا نحن!).

## المراجع


1. McFall-Ngai M., and Ruby E. 1991. Symbiont recognition and subsequent morphogenesis as early events in an animal-bacterial mutualism. *Science* 254:1491–4. doi: 10.1126/science.1962208
2. Goel G., Puniya A. K., and Singh K. 2007. Phenotypic characterization of tannin–protein complex degrading bacteria from faeces of goat. *Small Rumin. Res.* 69:217–20. doi: 10.1016/j.smallrumres.2005.12.015
3. Rollins-Smith L. A., Ramsey J. P., Pask J. D., Reinert L. K., and Woodhams D. C. 2011. Amphibian immune defenses against chytridiomycosis: impacts of changing environments. *Integr. Comp. Biol.* 51:552–62. doi: 10.1093/icb/icr095
4. Becker M. H., Brucker R. M., Schwantes C. R., Harris R. N., and Minbiole K. P. C. 2009. The bacterially produced metabolite violacein is associated with survival of amphibians infected with a lethal fungus. *Appl. Environ. Microbiol.* 75:6635–8. doi: 10.1128/AEM.01294-09


**نُشر على الإنترنت بتاريخ:** 10 ديسمبر 2021

**حرره:** Martha Helena Ramírez-Bahena, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Spain

**الاقتباس:** Ettinger CL, Wilkins LGE, Dahlhausen KE, Ghose SL, Oberbauer D, Eisen JA and Coil DA (2021) الأبطال الخارقون وحلفاؤهم: ثلاث قصص مذهلة عن التكافل الميكروبي! Front. Young Minds doi: 10.3389/frym.2018.00050-ar

**مُترجَم ومقتبس من:** Ettinger CL, Wilkins LGE, Dahlhausen KE, Ghose SL, Oberbauer D, Eisen JA and Coil DA (2018) Even Superheroes Need Help Sometimes: Three Incredible Tales of Microbial Symbiosis. Front. Young Minds 6:50. doi: 10.3389/frym.2018.00050

**إقرار تضارب المصالح:** يعلن المؤلفون أن البحث قد أُجري في غياب أي علاقات تجارية أو مالية يمكن تفسيرها على أنها تضارب محتمل في المصالح.

**COPYRIGHT** © 2018 Ettinger, Wilkins, Dahlhausen, Ghose, 2021 © Oberbauer, Eisen and Coil. هذا مقال مفتوح الوصول يتم توزيعه بموجب شروط ترخيص المشاركة الإبداعية Creative Commons Attribution License (CC BY). يُسمح بالاستخدام أو التوزيع أو الاستنساخ في منتديات أخرى، شريطة أن يكون المؤلف (المؤلفون) الأصلي أو مالك (مالكو) حقوق النشر مقيدًا وأن يتم الرجوع إلى المنشور الأصلي في هذه المجلة وفقًا للممارسات الأكاديمية المقبولة. لا يُسمح بأي استخدام أو توزيع أو إعادة إنتاج لا يتوافق مع هذه الشروط.

## المراجعون الصغار

**SHUBHAANGI**، العمر: **10**
أحب فعل الأشياء بالاشتراك مع أعضاء العائلة. أنا نشط في الرياضة وأمارس رياضة الكاراتيه منذ سن السادسة. وأحب العلوم.

## المؤلفون

**CASSIE L. ETTINGER**
طالبة دكتوراة في Integrative Genetics and Genomics في دافيس، University of California في مختبر Jonathan Eisen. حصلت على درجة البكالوريوس في علم الأحياء الجزيئي والخلوي، مع إشادة في الهندسة الوراثية والجينوم والتطور من بيركيلي، University of California في عام 2013، حيث عملت في مختبر الدكتورة/ Ellen Simms حول التكافل بين النباتات والميكروبات. ويركز بحثها لنيل درجة الدكتوراة على العلاقة بين الميكروبات والنباتات البحرية التي تعرف بأعشاب البحر. (http://seagrassmicrobiome.org/) *clettinger@ucdavis.edu

**LAETITIA G. E. WILKINS**
Laetitia Wilkins باحثة من سويسرا. وهي مهتمة بدراسة العلاقة بين الحيوانات والميكروبات، حيث تريد أن تعرف كيف تساعد الميكروبات الحيوانات المضيفة لها على البقاء على قيد الحياة. وتزور Wilkins البرية للصيد والغطس، كما قد تمضي أيضًا أسابيع في الثلاجة لإجراء بعض التجارب. وعادة ما يصاحبها كل من زوجها وطفليها خلال مغامراتها. وتهتم Wilkins بالتنوع والتفكير النقدي، كما أنها تساعد الباحثين أرباب العائلات على الازدهار في المجتمع الأكاديمي.

**KATHERINE E. DAHLHAUSEN**
تخرجت من Lewis and Clark College في بورتلاند، أوريغون بتخصصين عامين في الفيزياء وعلم الأحياء. ثم انتقلت إلى كاليفورنيا لتشرع في أبحاث الدكتوراة في دافيس University of California، حيث عملت في مختبر رئيسها الرائع الدكتور/ Jonathan Eisen. تجري سلسلة كبيرة من الأبحاث والمهام التعليمية، ولكن بحثها الرئيسي يقوم على فهم كيفية تغيير الأدوية للمجموعات الميكروبية في دببة الكوالا. ثم انتقلت للعيش في أستراليا لأشهر قليلة لجمع براز دببة الكوالا حديث الإخراج لإجراء أحد أبحاثها عليه.

**SONIA L. GHOSE**
طالبة دكتوراة في مجال علم أحياء المجموعات في دافيس، University of California، في مختبر د/ Jonathan Eisen تخرجت Sonia من Occidental College بدرجة البكالوريوس في علم الأحياء في 2010. ثم عملت بعد ذلك على مشاريع بحثية متعلقة بالبرمائيات لمدة ثلاث سنوات في California Academy of Sciences في سان فرانسيسكو. وتدرس Sonia حاليًا الميكروبات التي تعيش على جلد البرمائيات، وكيف يتفاعل ميكروب *Batrachochytrium dendrobatidis* مع الميكروبات الأخرى على الجلد. وهي مهتمة بدراسة كيفية المحافظة على البرمائيات، وتقوم ببحث رائع في سييرا نيفادا.

**DANIEL OBERBAUER**

طالب جامعي يدرس علم الأحياء المجهرية في دافيس، University of California. ويعمل Daniel على زراعة الميكروبات من الطيور الطنانة في مختبر الدكتور/ Jonathan Eisen، وهو مهتم بالأمراض المعدية ويأمل أن يعمل مع مراكز مكافحة الأمراض والوقاية منها (CDC) لمنع انتشار الأمراض السارية والمعدية. يأمل Daniel أن يعمل يومًا ما في الأمم المتحدة، وأن يساعد في إبقاء العالم آمنًا وخاليًا من الأسلحة البيولوجية والكيميائية والنووية.

**JONATHAN A. EISEN**

يعمل أستاذًا جامعيًا في دافيس، University of California، ويسيطر كل شيء مرتبط بالميكروبات على فكره تقريبًا. وأثناء دراسته الجامعية، درس Jonathan الميكروبات في Harvard College (بشأن الكائنات المتكافلة المفيدة للرخويات والديدان الأنبوبية). وأثناء دراسته للدكتوراة في Stanford University، ركز على تطور الميكروبات (لا سيما تلك الموجودة في البيئات القاسية)، بينما تركز أبحاثه الحالية ومهامه العلمية الجامعية الماضية (على مجتمعات الميكروبات وكيفية تفاعلها مع بعضها البعض ومع مضيفها وطرق دراسة هذه المجتمعات). وهو أيضًا عضو فاعل في المدونات، وأحيانًا يفوز بجوائز منها، فضلًا عن كونه ناقلًا للعلوم.

**DAVID A. COIL**

يدرس الميكروبات في دافيس، University of California في مختبر الدكتور/ Jonathan Eisen. حصل على درجة الدكتوراة في عام 2005، والتي ركز فيها حول كيفية دخول الفيروسات للخلية. ومذ ذلك الحين، عمل على البكتيريا الضارة بالإضافة إلى سلسلة عريضة من الميكروبات المثيرة للاهتمام والتي تعيش في أماكن مذهلة؛ مثل مؤخرات القطط والطيور الطنانة والأعشاب البحرية ومحطات الفضاء. وهو مهتم جدًا بالتعليم ونقل العلوم للعامة.

**النسخة العربية مقدمة من**
Arabic version provided by

جامعة الملك عبدالله للعلوم والتقنية
King Abdullah University of Science and Technology