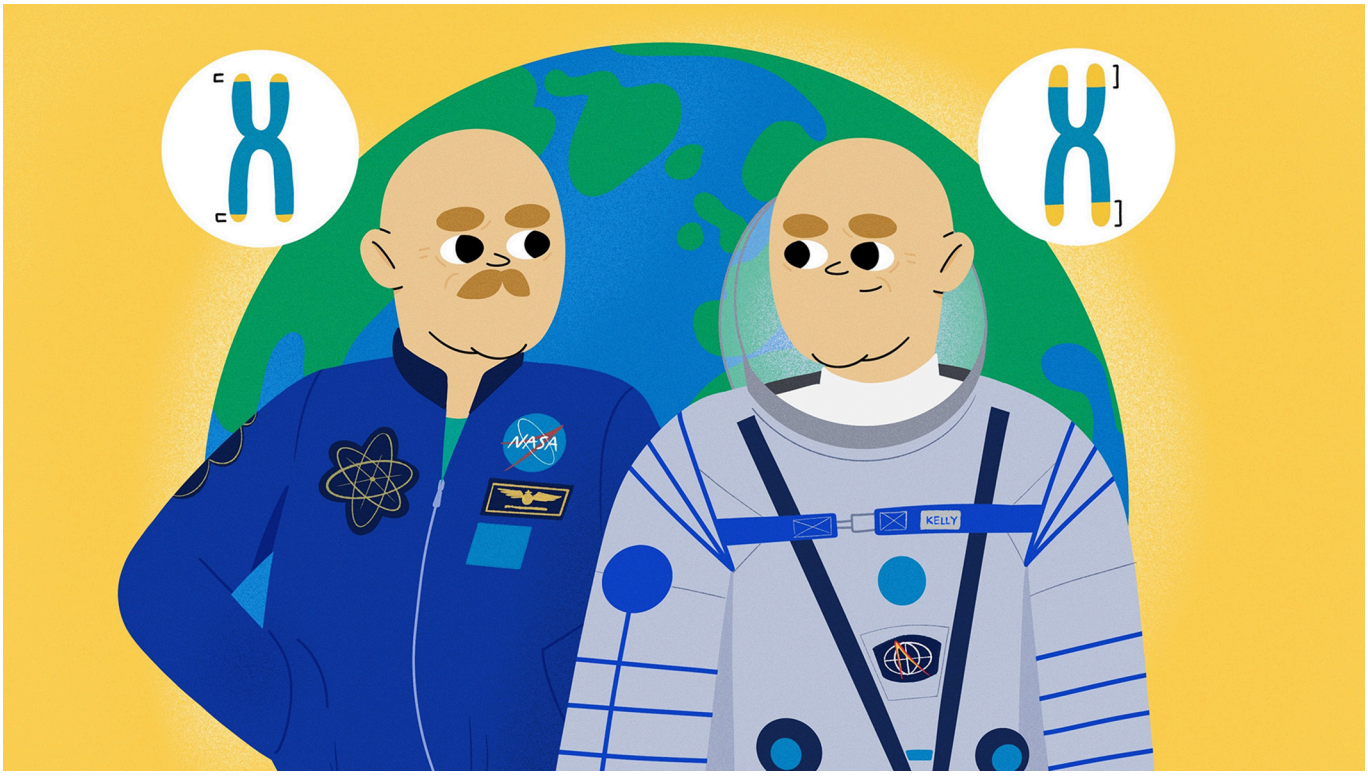
علم الفلك والفيزياء
نُشر على الإنترنت بتاريخ: 31 ديسمبر 2025
doi: 10.3389/frym.2024.1191969-ar



التوائم والتيلوميرات في الفضاء!

Susan M. Bailey*
قسم علوم الصحة البيئية والإشعاعية، جامعة كولورادو الحكومية، فورت كولنز، كولورادو، الولايات المتحدة الأمريكية

في إطار دراسة توأمي ناسا، تطرقت أبحاثنا إلى دراسة التيلوميرات والاستجابات لتلف الحمض النووي الرِيبي منقوص الأكسجين (استقرار الجينوم) أثناء الرحلات الفضائية طويلة الأمد، لما لذلك من تداعيات مهمة على صحة رواد الفضاء المشاركين في مهام الاستكشاف وأدائهم، بالإضافة إلى تأثيراتها على الشيخوخة والإصابة بالأمراض على المدى البعيد. وستساهم النتائج التي توصلت إليها أبحاثنا وكذلك الأبحاث الأخرى التي انطوت عليها دراسة التوأمين، في توجيه الدراسات المستقبلية وتطوير نُهج الطب الشخصي لتقييم الآثار الصحية على كل رائد فضاء على حدة، بينما نستعد للعودة إلى القمر والانطلاق إلى عوالم أبعد. ومع ازدياد عدد المسافرين إلى الفضاء -وحتى السياح الفضائيين- وتنوعهم خلال السنوات القادمة، تصبح معرفة الفروقات الفردية في الاستجابة للبيئة القاسية والتجارب والتعرض المزمن المرتبط بالسفر إلى الفضاء واستكشافه -بل وحتى العيش على كواكب أخرى يومًا ما- خطوة محورية قادمة في سعينا نحو ضمان أداء صحي وفعّال لرواد الفضاء

المراجعون الصغار

BRAYDON
العمر: 13

ELLOUISE
العمر: 12

KAJ
العمر: 10

في المستقبل أثناء تلك المهمات، ولتحسين مسار الأمراض والشيخوخة بعدها، حتى نتمكن من الانطلاق في رحلتنا *إلى النجوم!*

السفر إلى الفضاء محفوف بالصعاب!

في صيف عام 1969، انطلقت المركبة أبولو 11 حاملة رواد الفضاء الأمريكيين نحو القمر، وفي العشرين من يوليو تسمَّر العالم في مكانه وهو يراقب نيل أرمسترونغ يخطو أولى خطواته على سطح القمر. وبعد مرور ما يقرب من 50 عامًا، أمضى رائدا الفضاء التابعان لوكالة ناسا سكوت كيلي وكريستينا كوتش حوالي عام كامل في الفضاء على متن محطة الفضاء الدولية. وفي عام 2020، وفي خطوة شكلّت بداية عصر جديد لاستكشاف الفضاء البشري، أطلقت شركة سبيس إكس أول صاروخ تجاري من طراز فالكون 9 حاملًا رواد فضاء تابعين لوكالة ناسا من الأراضي الأمريكية على متن المركبة الفضائية كرو دراغون إنديفور إلى محطة الفضاء الدولية. وتعمل ناسا وشركاؤها التجاريون على تطوير تقنيات فضائية مبتكرة بوتيرة سريعة، وفي ظل الاستعانة ببرنامج أرتيميس (الذي سُمي باسم أخت أبولو التوأم) ورواد الفضاء، تخطط الوكالة لإرسال أول امرأة والرجل التالي إلى القمر قبل نهاية هذا العِقد. وستكون البشرية حينها مستعدة لاتخاذ الخطوة العملاقة التالية، وهي ريادة استكشاف البشر للمريخ.

وعلى مدى أكثر من عشرين عامًا، تدعم محطة الفضاء الدولية وجودًا بشريًا مستمرًا في المدار الأرضي المنخفض، ورغم أن الحياة على متن محطة الفضاء الدولية مثيرة، وتمنح رواد الفضاء منظورًا فريدًا «من خارج هذا العالم» ورؤية مدهشة لكوكبنا كفيلة بتغيير حياة المرء ولا يحظى بها سوى قلة قليلة منا (شاهِد الفيديو: العودة إلى الأرض: من منظور رائد الفضاء)، فإنها أيضًا مليئة بالتحديات والضغوط. فعلى سبيل المثال، يُسافر «منزلهم» في الفضاء بسرعة تتجاوز 17,000 ميل في الساعة، على ارتفاع يقارب 250 ميلًا (حوالي 400 كيلومتر) فوق سطح الأرض، حيث يختبر رواد الفضاء انعدام الجاذبية والتعرّض للإشعاع الفضائي و16 دورة من الضوء والظلام خلال كل 24 ساعة، كل ذلك وهم معزولون عن العائلة والأصدقاء، ويطفون داخل مركبة فضائية بحجم ملعب كرة قدم، مع مجموعة صغيرة من الأشخاص يعتمدون عليهم للبقاء على قيد الحياة يوميًا. إذا بدا لك هذا صعبًا، فهو كذلك حقًا! ومن خلال أول مهمة مدتها عام كامل على محطة الفضاء الدولية (2015–2016)، سعت وكالة ناسا إلى التعمق في فهم تأثير الرحلات الفضائية الطويلة على صحة الإنسان وطريقة تقدّمه في العمر أثناء وجوده في الفضاء.

الإشعاع الفضائي (SPACE RADIATION)

بمجرد الخروج من الغلاف الجوي الواقي للأرض، يتعرض رواد الفضاء لمستويات أعلى من الإشعاعات الأكثر ضررًا، وهي جسيمات نشطة قادمة من الشمس والكون، وتتسبب في تلف الحمض النووي الرِيبي منقوص الأكسجين.

دراسة توأمي ناسا.. الأولى من نوعها لرواد الفضاء

بمحض الصدفة والحظ، كان رائد الفضاء الذي اختارته ناسا لأول مهمة تستمر لعام كامل -وهو سكوت كيلي- له توأم متطابق يُدعى مارك كيلي، وكان هو الآخر رائد فضاء وطيار اختبار سابق في البحرية الأمريكية. وقد مهّدت هذه المصادفة المذهلة

الطريق لتجربة مثالية، فهما توأمان متطابقان من حيث الطبيعة والتنشئة، يقضي أحدهما عامًا في الفضاء («توأم الفضاء»)، بينما يبقى الآخر على الأرض («توأم الأرض»). أطلقت هذه التجربة أعمق دراسة أُجريت على الإطلاق حول استجابة جسم الإنسان لرحلات الفضاء، وقد وقع الاختيار على عشر دراسات من مختلف أنحاء البلاد لتشكّل ما عُرف لاحقًا باسم دراسة توأمي ناسا (الشكل 1). وقد مثّلت هذه الدراسة العديد من الإنجازات غير المسبوقة في برنامج الفضاء، إذ شملت مجموعة من الدراسات المعتمدة على «التحليل الجينومي» [مثل الجينوميات (الحمض النووي الرِيبي منقوص الأكسجين)، وعلم النسخ الجيني (الحمض النووي الريبي)، وعلم البروتينات (البروتينات)، وعلم الأيض (المستقلبات)]، إلى جانب أول اختبار للقاح (لقاح الإنفلونزا) في الفضاء، وكذلك أول تقييمات للميكروبيوم الفضائي ولمؤشر حيوي للشيخوخة وهو التيلوميرات.

شكل 1

أثارت دراسة توأمي ناسا اهتمامًا عالميًا واسعًا وجددت الحماس تجاه استكشاف الفضاء، وكان أحد الأسئلة التي طُرحت كثيرًا على سكوت هو ما إذا كان سيعود من الفضاء أصغر سنًا من شقيقه مارك، وغالبًا ما كان يُطرح هذا السؤال في سياق فيلم «إنترستيلار» أو تجربة آينشتاين الفكرية المعروفة بـ«مفارقة التوأم» وعلى الرغم من أن قضاء عام على متن محطة الفضاء الدولية لا ينتج عنه سوى فرق في العمر يبلغ نحو مللي ثانية واحدة (جزء من الألف من الثانية)، فإن مسألة الشيخوخة المرتبطة برحلات الفضاء طويلة الأمد، واحتمال زيادة خطر الإصابة بالأمراض المرتبطة بالتقدم في العمر مثل الوهن، والخرف، وأمراض القلب، والسرطان، هي مسألة مهمة وقد سعينا إلى التطرق إليها كجزء من دراسة التوأمين. وفي هذا المقال، أسلط الضوء على نتائج أبحاثنا وأقترح الآليات المحتملة الكامنة وراء التعرض المزمن للإشعاع الفضائي، الذي قد يفسّر التغيّرات التي تطرأ على ديناميكيات طول التيلوميرات (أي التغيّرات

الحمض النووي الرِيبي منقوص الأكسجين (DNA)

هو المادة الوراثية التي تحمل المعلومات الجينية أو شفرة الحياة، وهي التي تجعلك على الصورة التي أنت عليها الآن.

التيلوميرات (TELOMERES)

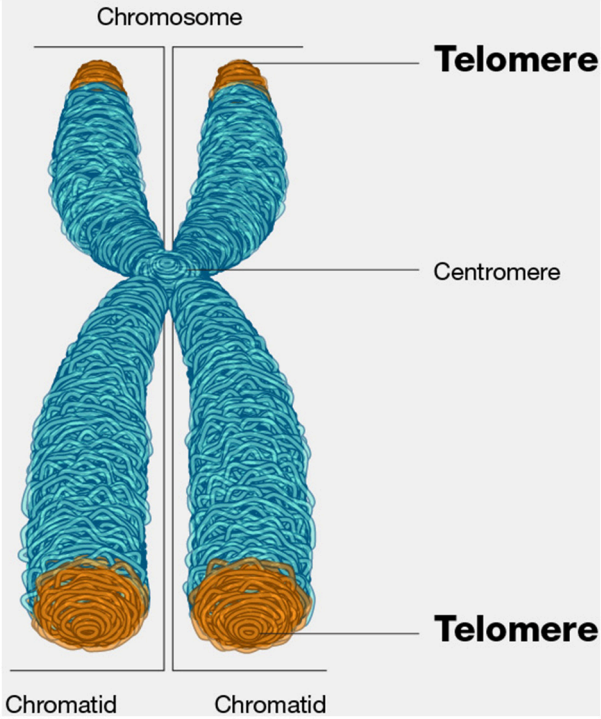
هي «أغطية» واقية توجد في أطراف الكروموسومات، تشبه إلى حد كبير القطعة البلاستيكية الموجودة في طرف رباط الحذاء، والتي تقصر مع انقسام الخلايا وتوفر مؤشرًا لتقدم العمر.

شكل 1

شارة دراسة توأمي ناسا يظهر فيها التوأمان، أحدهما في الفضاء والآخر على الأرض، وهما يمسكان بجزيء الحمض النووي الرِيبي منقوص الأكسجين. يمثّل هذا الجزيء تركيز الدراسة على الجينومات، وهو أمر يُعد الأول من نوعه فيما يخص رواد الفضاء.

بمرور الوقت)، والاستجابات لتلف الحمض النووي المستمرة والمرتبطة برحلات الفضاء طويلة الأمد.

التيلوميرات هي «أغطية» واقية موجودة في الأطراف الفعلية للكروموسومات، تعمل على حمايتها من التلف ومنعها من «التآكل»، تمامًا كما تحافظ القطعة البلاستيكية الصغيرة في طرف رباط الحذاء عليه من الاهتراء (انظر الشكل 2). ولذلك، تُعدّ التيلوميرات السليمة ضرورية للحفاظ على سلامة الجينوم واستقراره. إلا أنّ التيلوميرات تقصر مع التقدّم في العمر (نتيجة لانقسام الخلايا الطبيعي)، وكذلك بسبب مجموعة من العوامل المتعلقة بنمط الحياة (مثل التغذية والنشاط البدني والضغوط النفسية)، إضافةً إلى التعرض البيئي (لعوامل مثل تلوث الهواء، والأشعة فوق البنفسجية، والإشعاع الفضائي).



شكل 2

لقد افترضنا أن الضغوط الفريدة والتعرّضات المزمنة التي يواجهها رواد الفضاء أثناء إقامتهم في الفضاء قد تُسرّع من تقصير التيلوميرات خلال فترة الرحلة الفضائية (أي أن التيلوميرات ستقصر بوتيرة أسرع في الفضاء). بمعنى آخر، فإن العوامل الوراثية لرائد الفضاء، إلى جانب تعرّضه للظروف القاسية في الفضاء (مثل انعدام الجاذبية، والإشعاعات الفضائية، والتغيّرات في الغلاف الجوي)، إضافةً إلى العديد من الضغوط الأخرى (مثل الانغلاق والعزلة، والبيئة المغلقة والمُعادية من الناحية البيولوجية) [1]، جميعها تنعكس في تغيّرات طول التيلومير بمرور الوقت. ولاختبار هذه الفرضية، قِسنا طول التيلوميرات في عينات دم أُخذت من سكوت ومارك كيلي قبل المهمة

الاستجابة لتلف الحمض النووي (DNA DAMAGE RESPONSE (DDR))

هي مسارات إشارات معقدة داخل الخلايا تعمل على اكتشاف التلف في الحمض النووي الريبي منقوص الأكسجين وإصلاحه، وذلك للحفاظ على سلامته وضمان استقرار الجينوم.

الكروموسوم (CHROMOSOME)

هو جزيئات طويلة وملفوفة بإحكام من الحمض النووي الريبي منقوص الأكسجين داخل نواة معظم الخلايا الحية، تحمل المعلومات الوراثية على شكل جينات.

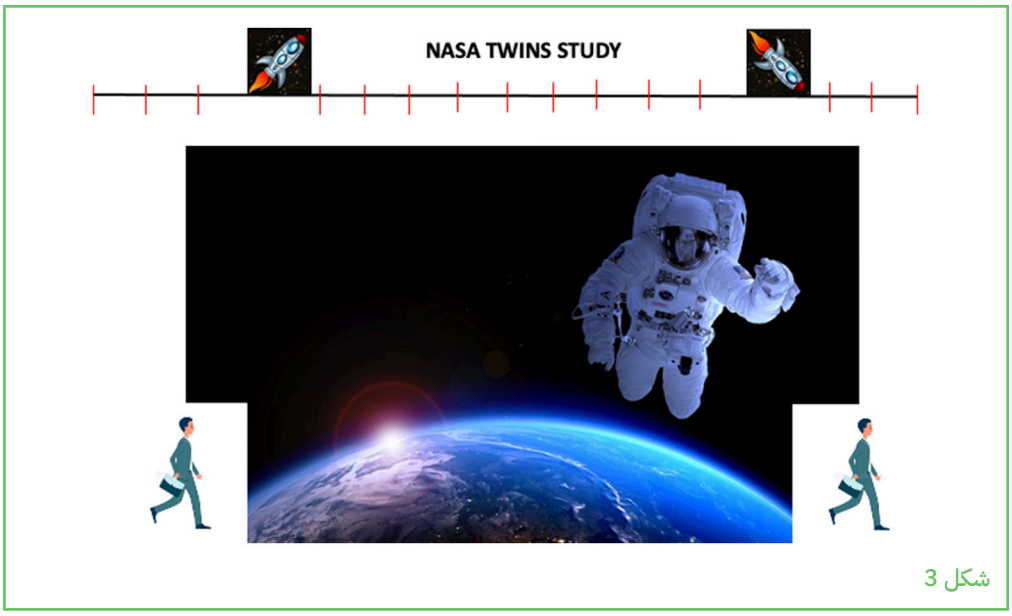
شكل 2

التيلوميرات هي «الأطراف النهائية» من الكروموسومات الخطية، التي تعمل على حمايتها من التلف أو الفقدان، كما تمنعها من الاندماج مع تيلوميرات أخرى أو مع نهايات الحمض النووي الريبي منقوص الأكسجين المتكسّرة فعليًا. متاح على الإنترنت عبر الرابط: https://www.genome.gov/genetics-glossary/Telomere.

الفضائية التي استمرت عامًا كاملًا على متن محطة الفضاء الدولية وأثناءها وبعدها [2] (انظر الشكل 3).

نتائج غير متوقعة!

ظل طول التيلوميرات لدى توأم الأرض مستقرًا نسبيًا طوال فترة الدراسة، في حين كانت المفاجأة الكبرى أن تيلوميرات توأم الفضاء كانت *أطول* عند كل نقطة زمنية اختبرناها خلال الرحلة الفضائية، وهو عكس ما توقعناه تمامًا! كما لاحظنا نتائج مشابهة في دراسة منفصلة شملت عشرة رواد فضاء غير مرتبطين ببعضهم البعض في بعثات أقصر على متن محطة الفضاء الدولية (مدتها حوالي ٦ أشهر)، مقارنةً بأشخاص أصحاء متطابقين في العمر والجنس على الأرض [3, 4]. وتفاجئنا بنتيجة أخرى غير متوقعة هي أن طول التيلوميرات لدى رواد الفضاء قصر بسرعة كبيرة عند عودتهم إلى الأرض، وكان لدى رواد الفضاء عمومًا تيلوميرات أقصر بكثير *بعد* الرحلة الفضائية مقارنةً بما كان لديهم قبلها.



شكل 3

في دراسة توأمي ناسا، جُمعت عينات الدم من «توأم الفضاء» و«توأم الأرض» في نقاط زمنية مختلفة (الأشرطة الحمراء على الخط الزمني) قبل المهمة التي استمرت لسنة واحدة على متن محطة الفضاء الدولية وأثناءها وبعدها.

وبالتوافق مع التعرّض المزمن (كل يوم وكل ساعة) لإشعاعات الفضاء، لاحظنا أيضًا تلفًا في الحمض النووي الرِيبي منقوص الأكسجين على شكل إعادة ترتيب للكروموسومات. وإلى جانب النتائج الأخرى المُستخلصة من دراسة التوأمين، لدينا دلائل مهمة ستوجّه مسار الدراسات المستقبلية، بالإضافة إلى أدلة على وجود اختلافات في الاستجابات الفردية التي تحتاج إلى مزيد من الدراسة [5].

إلى النجوم!

إنها فترة مثيرة لبرنامج الفضاء، حيث تعمل ناسا وشركاؤها التجاريون على تطوير تقنيات فضائية مبتكرة وتقديمها بوتيرة أسرع من أي وقت مضى. وقد بدأ هذا العِقد

بعهد جديد لاستكشاف الفضاء البشري، حيث أطلقت شركة سبيس إكس أول صاروخ تجاري من طراز فالكون 9 حاملًا رائدي فضاء ناسا روبرت بينكن ودوغلاس هيرلي من الأراضي الأمريكية على متن المركبة الفضائية كرو دراغون إلى محطة الفضاء الدولية. كما شهدنا أول طاقم مدني بالكامل يدور حول الأرض (لمدة حوالي3 أيام) كجزء من مهمة سبيس إكس إنسبيريشن 4، وكان يضم أصغر رائدة فضاء ناجية من سرطان الطفولة في أوائل العشرينات من عمرها. ورأينا ويليام شاتنر ينطلق على صاروخ بلو أوريجين، حيث سجّل «كابتن كيرك» -وهو الشخصية التي أداها ويليام في سلسلة *ستار تريك*- الذي يبلغ من العمر 90 عامًا رقمًا قياسيًا كأكبر شخص سنًا يطير إلى الفضاء (لمدة حوالي3 دقائق). وقد مثّلت مهمة أرتيميس 1 غير المأهولة الناجحة (في أواخر عام 2022) أول خطوة للعودة إلى القمر، ومن المقرر أن تدور مهمة أرتيميس 2 المأهولة حول القمر في أواخر عام 2024. وتُخطط وكالة ناسا لإعادة البشر إلى القمر للإقامة هناك قبل نهاية العِقد، وربما تكون أنت واحدًا منهم!

ومع تزايد عدد مسافري الفضاء -وحتى السياح الفضائيين- وتنوعهم في السنوات القادمة، سنتعمق في فهم كيفية تأثير الرحلات الفضائية طويلة المدة على صحة الإنسان.

ومن المؤكد أن استجابة الأشخاص للرحلات الفضائية ستكون مختلفة، ومن الضروري أن نحيط بها علمًا لكي نتمكن من وضع استراتيجيات الطب الشخصي وضمان أداء رواد الفضاء وصحتهم في المستقبل أثناء مهام الاستكشاف المستقبلية وتحسين مسار الأمراض والشيخوخة بعدها.

شُكر وتقدير

لقد كان من دواعي سروري وشرف لي أن أكون جزءًا من هذه الدراسات الرائدة، وأعبّر عن امتناني العميق لجهود جميع المشاركين ومساهماتهم، وللتمويل الذي قدمته وكالة ناسا (NNX14AB02G، NNX14AH51G، و80NSSC19K0434).

مقال المصدر الأصلي

Garrett-Bakelman, F. E., Darshi, M., Green, S. J., Gur, R. C., Lin, L., Macias, B. R., et al. 2019. دراسة توأمي ناسا: تحليل متعدد الأبعاد لرحلة فضائية بشرية استمرت عامًا كاملًا. *Science* 364:eaau8650. doi: 10.1126/science.aau8650

إفصاح أدوات الذكاء الاصطناعي

تم إنشاء النص البديل (alt text) المرفق بالأشكال في هذه المقالة بواسطة "فرونتيرز" (Frontiers) وبدعم من الذكاء الاصطناعي، مع بذل جهود معقولة لضمان دقته، بما

يشمل مراجعته من قبل المؤلفين حيثما كان ذلك ممكناً. في حال تحديدكم لأي خطأ، نرجو منكم التواصل معنا.

المراجع

1. Afshinnekoo, E., Scott, R. T., MacKay, M. J., Pariset, E., Cekanaviciute, E., Barker, R., et al. 2020. Fundamental biological features of spaceflight: advancing the field to enable deep-space exploration. *Cell.* 183:1162–84. doi: 10.1016/j.cell.2020.10.050
2. Garrett-Bakelman, F. E., Darshi, M., Green, S. J., Gur, R. C., Lin, L., Macias, B. R., et al. 2019. The NASA twins study: a multidimensional analysis of a year-long human spaceflight. *Science* 364:8650. doi: 10.1126/science.aau8650
3. Luxton, J. J., McKenna, M. J., Taylor, L. E., George, K. A., Zwart, S. R., Crucian, B. E., et al. 2020. Temporal telomere and DNA damage responses in the space radiation environment. *Cell Rep.* 2020:108435. doi: 10.1016/j.celrep.2020.108435
4. Luxton, J. J., McKenna, M. J., Lewis, A., Taylor, L. E., George, K. A., Dixit, S. M., et al. 2020. Telomere length dynamics and DNA damage responses associated with long-duration spaceflight. *Cell Rep.* 2020:108457. doi: 10.1016/j.celrep.2020.108457
5. Bailey, S. M., Luxton, J. J., McKenna, M. J., Taylor, L. E., George, K. A., Jhavar, S. G., et al. 2022. Ad Astra - telomeres in space! *Int J Radiat Biol.* 98:395–403. doi: 10.1080/09553002.2021.1956010

نُشر على الإنترنت بتاريخ: 31 ديسمبر 2025

المحرر: Janice L. Huff

مرشدو العلوم: Klavdja Annabel Fignole و Tony Slaba

الاقتباس: Bailey SM (2025) التوائم والتيلوميرات في الفضاء! Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2024.1191969-ar

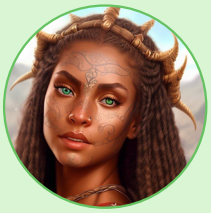
مُترجَم ومقتبس من: Bailey SM (2024) Twins And Telomeres-In Space! Front. Young Minds 12:1191969. doi: 10.3389/frym.2024.1191969

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

حقوق الطبع والنشر © 2024 © 2025 Bailey. 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

BRAYDON، العمر: 13
Braydon طالب متميز في المدرسة الإعدادية ومادة الرياضيات هي المفضلة لديه، وهو يستمتع بقضاء الوقت مع عائلته وأصدقائه، وبالمشاركة في خدمة كنيسته وفي الأنشطة الرياضية. ويلعب كرة القدم وكرة السلة، ويشارك في سباقات الضاحية لفِرق الناشئين في مدرسته.



ELLOUISE، العمر: 12
تلعب Ellouise كرة الطائرة والشطرنج، وهي قارئة وكاتبة شغوفة، وللمحادثات أهمية كبيرة جدًا بالنسبة لها. وهي تحب الموسيقى حبًا جمًا وتقدِّر مختلف الأنواع الموسيقية. كما أنها تحب اللازانيا كثيرًا، على الرغم من أنها تعاني من حساسية تجاه اللاكتوز.

KAJ، العمر: 10
هو ولد مرح يحب لعب الشطرنج وكرة القدم، ويعشق ألعاب الفيديو والممثل المفضل لديه هو كيفن هارت، كما أنه يستمتع بالطعام كثيرًا ويحب الطهي.

المؤلفون

SUSAN M. BAILEY
Susan M. Bailey، حاصلة على درجة الدكتوراه، وهي أستاذة بيولوجيا الإشعاع والسرطان في قسم علوم الصحة البيئية والإشعاعية في جامعة كولورادو الحكومية في فورت كولينز، كولورادو. وهي زميلة ورئيسة سابقة لجمعية أبحاث الإشعاع، وتشارك في العديد من اللجان الوطنية والدولية. وبصفتها واحدة من الباحثين الذين وقع عليهم الاختيار للمشاركة في دراسة توأمي ناسا، يسعى برنامجها البحثي إلى فهم تأثير الرحلات الفضائية طويلة المدة على صحة الإنسان والشيخوخة، وكيف يمكن استخدام هذه المعلومات -في نهاية المطاف- لتحسين فترة التمتع بالصحة الجيدة لدى رواد الفضاء وسكان الأرض. للاطلاع على مثال، انظر: https://www.allure.com/story/astronaut-health-problems-space-body-skin-effects.
*Susan.Bailey@ColoState.EDU

النسخة العربية مقدمة من
Arabic version provided by

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