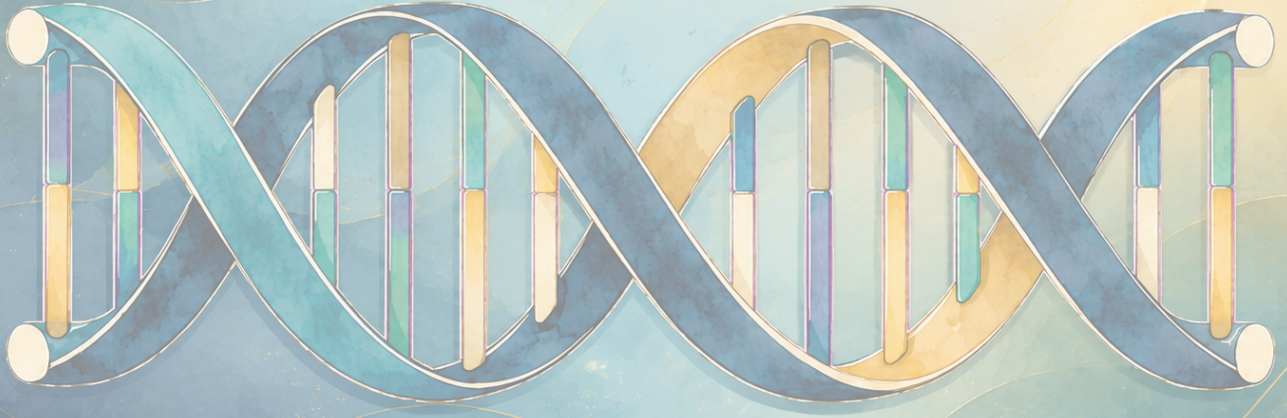




## The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

### — عائلة جديدة من أنظمة استهداف DNA الموجهة بال RNA — متميزة عن CRISPR، وليست بعد أداة لتحرير الجينات

بتنقيب الجينومات الميكروبية، وجد الباحثون *TIGR-Tas* وهي عائلة لم تكن معروفة من قبل من الأنظمة الموجهة بال RNA التي تقطع DNA — باستخدام دليل ذي جزأين ومن دون موقع هبوط، «PAM» على خلاف CRISPR. أظهروا أن نسخة واحدة يمكن برمجتها لتحرير خلايا بشرية، لكن بكفاءة منخفضة فقط، وتتبعوا الروابط التطورية العميقة للعائلة مع آلات أخرى موجهة بال RNA. إنه توسع حقيقي في معرفتنا ببيولوجيا الأنظمة الموجهة بال RNA، وربما نقطة بداية جديدة لأدوات مستقبلية — اكتشاف علم أساسي وإثبات مفهوم، لا محرر جينات ناخب ولا علاج.

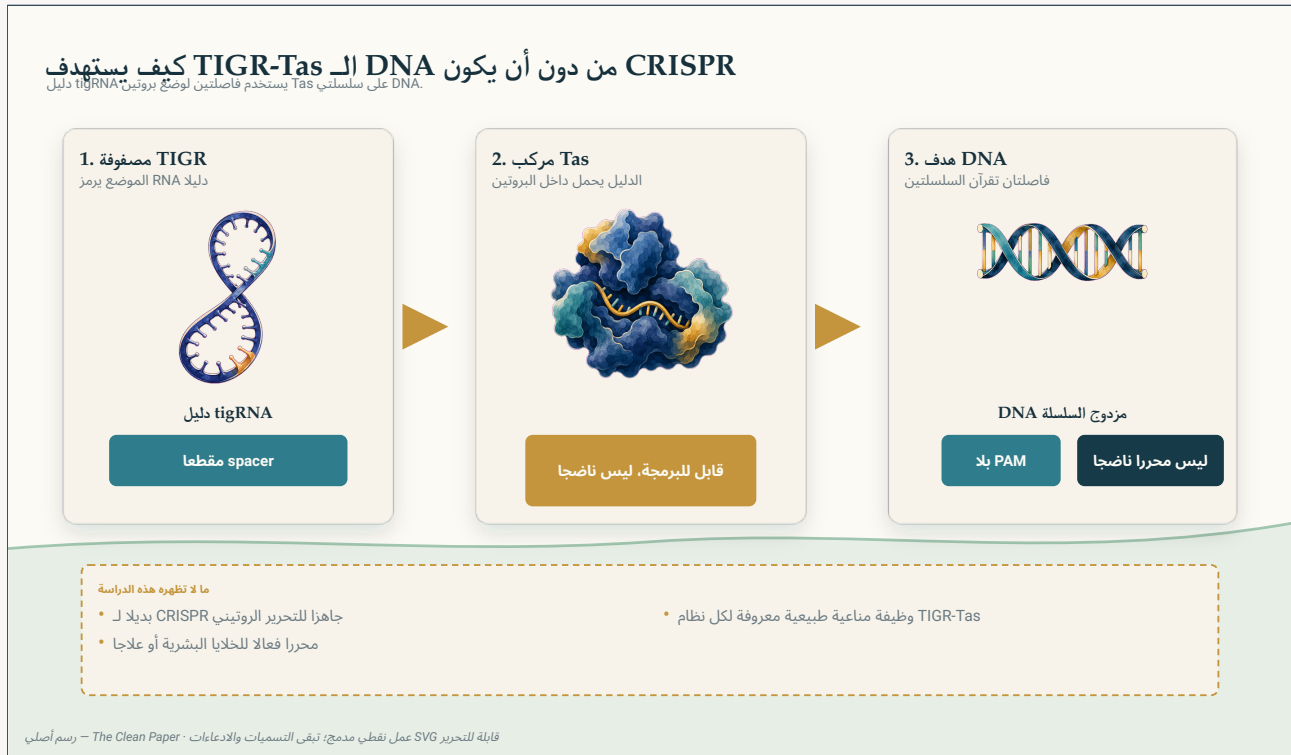
Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Laura Nesso · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *TIGR-Tas: A Family of Modular RNA-Guided DNA-Targeting Systems in Prokaryotes and Their Viruses*, Guilhem Faure, Makoto Saito, Max E. Wilkinson et al.; Feng Zhang (corresponding author), Science, 388, 6746 eadv9789 (2025) · DOI: science.adv9789/1126.10

## فرع جديد في شجرة الآلات الموجهة بال RNA

من حين إلى آخر تصل ورقة في علم الأحياء وهي تحمل عنوانا لم تطلبه. عنوان هذه كان CRISPR «جديد». العمل الذي وراءه أمتع من ذلك — وكالعادة، أكثر تواضعا.

ابداً بما جعل CRISPR مشهوراً: نظام موجه بال RNA. الحيلة أن البروتين لا يحتاج إلى أن يكون موصولاً مسبقاً بهدف واحد. بدلاً من ذلك يحمل قطعة قصيرة من RNA — دليلاً — ويذهب حيث يطابق تسلسل ذلك الدليل. غير الدليل، يتغير الهدف. هذه القابلية للبرمجة هي السبب كله في أن CRISPR أصبح أداة. لكن CRISPR ليس النظام الوحيد الموجه بال RNA في الطبيعة، والسؤال الذي تطرحه هذه الورقة هو السؤال الصبور: كم نوعاً آخر موجوداً هناك، وماذا يمكن أن يعلننا؟



يستخدم TIGR-Tas دليلاً ذا فاصلتين لقراءة سلسلتين متقابلتين من DNA. هذه بنية جديدة، وليست محرر جينات جاهزاً.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 0.4

للبحث، لم يفتش المؤلفون عن تسلسلات جينية متطابقة — فهي تنجرف كثيراً عبر الزمن التطوري بحيث لا تكشف الأقارب البعيدين. فتشوا عن الأشكال. بدأوا من الجزء في بروتين Cas9 الخاص بـ CRISPR الذي يمسك دليل RNA، ثم بحثوا في قواعد بيانات البنى البروتينية المتوقعة عن أي شيء مبني بالطريقة نفسها. قادهم ذلك المسار — عبر «جين قافز» بكتيري وقطعة من آلة تستخدمها الخلايا العادية لتعديل RNA الخاص بها كيميائياً — إلى شيء جديد حقاً.

## ماذا فعل المؤلفون

كشف البحث البنيوي عائلة بروتينات لم تكن معروفة سابقاً، مشفرة في معظمها داخل العاثيات، أي الفيروسات التي تصيب البكتيريا، وفي فيروسات العتائق، وفي بكتيريا طفيلية دقيقة. كل واحدة منها تقع بجوار مقطع DNA مميز: مصفوفة طويلة ومتكررة سماها المؤلفون TIGR

**array**، اختصاراً لـ RNA. Guide Interspaced Tandem، وتسمى البروتينات **Tas**، أي TIGR-associated. بعض بروتينات Tas لا يملك سوى جزء الإمساك بالـ RNA وبعضها الآخر يحمل أداة لقطع DNA — واحداً من نوعين من «المقصات» الجزيئية، يدعى RuvC أو HNH — مثبتة عليه.

بعد العثور على العائلة في قاعدة البيانات، أخذوها إلى المختبر: عبّروا عن هذه الأنظمة في *E. coli* وسلسلوا جزيئات RNA الصغيرة التي تصنعها، واستخرجوا القواعد التي تجعل تلك الجزيئات تجد هدفاً في DNA واختبروا هل النسخ القاطعة تقطع فعلاً، وحاولوا برمجياً نسخة منها لتحرير خلايا بشرية، ثم جهدوا مركباً عاملاً وصوروا بنيتها بدقة شبه ذرية.

## ماذا وجدوا

الدليل يأتي في قطعتين. تعالج مصفوفة TIGR إلى جزيئات RNA قصيرة، طول كل منها نحو 36 حرفاً، ويحمل كل واحد منها مقطعين منفصلين للاستهداف. مقطع يقرأ إحدى سلسلتي DNA الهدف، والمقطع الآخر يقرأ السلسلة المقابلة. يعمل الاثنان معاً لتثبيت الموقع. هذا خروج آلي حقيقي عن CRISPR حيث يطابق الدليل سلسلة واحدة في امتداد متصل.

ولا يحتاج إلى «منصة هبوط». كثير من نوكليازات CRISPR لا تستطيع القطع إلا بجوار نط DNA قصير ومحدد، يعرف باسم «PAM» يقع إلى جانب الهدف — وهو قيد يحد المواضيع التي يمكن توجيهها إليها. أنظمة TIGR لم تظهر مثل هذا الشرط: اعتمدت على تسلسل الهدف وحده. النظام الذي لا يحتاج إلى PAM يمكن، من حيث المبدأ، توجيهه إلى مواضيع أكثر.

النسخ القاطعة تقطع بدقة. بتوجيه من RNA الصغير، صنعت بروتينات Tas الحاملة لـ RuvC و HNH كسورا نظيفة وخاصة بالتسلسل في DNA — ولم تفعل شيئاً من دون الدليل.

نسخة واحدة أمكن برمجتها لتحرير خلايا بشرية — بالكاد. عندما نقل بروتين Tas إلى خلايا بشرية في طبق ووجه إلى ستة جينات مختلفة، أحدث تعديلات فعلاً، مؤكداً أن النظام قابل للبرمجة في خلايانا أيضاً. لكن الكفاءة كانت منخفضة: في أفضل الحالات بضعة في المئة من الخلايا. وللمقارنة، أدوات CRISPR المحسنة اليوم تعدل عادة جزءاً كبيراً من الخلايا التي توضع فيها. هذا برهان على أنه يمكن أن يعمل، لا أداة تعمل جيداً.

البنية فسرت الآلية — ولحّت إلى أصولها. المركب المصور زوج متناظر مرآوياً من البروتينات يمسك RNA دليلاً على شكل رقم ثمانية، بينما يخفي DNA الهدف بحدة. والافت أن هذه البنية تشبه كثيراً آلة موجودة في أقارب خلايانا — snoRNP C/D box — التي توجه تعديلات كيميائية في RNA بدلاً من قطع DNA.

وظيفته الطبيعية غير واضحة. عندما عبّر المؤلفون عن أحد الأنظمة في *E. coli*، لم يصد الفيروسات أو البلازميدات الغازية — الوظيفة اليومية لـ CRISPR بدلاً من ذلك، أزال تدريجياً بلازميداً مستهدفاً عبر أجيال كثيرة، ما يلح إلى أن دوره الحقيقي قد يكون في منافسة بطيئة بين قطع DNA المتنقلة، لا في دفاع مناعي أمني. لكن هذا كان إعداداً مستعاراً واصطناعياً، والجواب الصادق أن أحداً لا يعرف بعد ماذا تفعل هذه الأنظمة في البرية.

## ماذا يعني هذا على الأرجح

شيئان، لكن بدرجتين مختلفتين من الثقة.

الأول الصلب: العالم المعروف للأنظمة الموجهة بالـ RNA أكبر وأكثر تنوعاً من CRISPR وأقربائه المكتشفين حديثاً. TIGR-Tas فرع متميز حقاً، له طريقته الخاصة ذات الجزأين والخالية من PAM للتعرف إلى DNA. هذه إضافة حقيقية إلى الخريطة.

والثاني أعمق وأكثر تعقيداً: لأن آلة TIGR مبنية مثل snoRNP الذي يحرق RNA في خلايا مثل خلايانا، ومثل «جين قافر» معروف، فقد تمثل رابطاً تطورياً بين أنظمة موجهة بال RNA تعدل RNA وأنظمة موجهة بال RNA تستهدف DNA — قطعة محتملة مفقودة في قصة نشوء أدلة RNA القابلة للبرمجة عبر الحياة.

## ما الذي لا يثبت هذا

- إنه ليس أداة جاهزة لتحرير الجينات. أظهر التحرير في الخلايا البشرية، لكنه كان ضعيفاً — بضعة في المئة في أفضل الأحوال. هذا برهان على القابلية للبرمجة، لا محرر ناخب، وهو بعيد جداً عن أي شيء سريري.
- إنه ليس CRISPR «0.2». إذا قيس كأداة اليوم، فإن CRISPR-Cas9 يتفوق عليه كثيراً في التحرير. TIGR-Tas بنية جديدة في مرحلة إثبات المفهوم، لا نسخة أفضل من منتج قائم.
- دوره البيولوجي مجهول. لم يتصرف كنظام مناعة مضاد للفيروسات في الاختبار الوحيد لهذه الفكرة؛ لذلك فقول «نظام مناعي بكتيري جديد» غير مثبت.
- كثير من الآلية الأساسية لا يزال مفتوحاً — بما في ذلك كيف يقطع دليل RNA إلى طوله النهائي، وما الذي تستهدفه هذه الأنظمة فعلاً في الطبيعة، إذ يعيش معظمها في ميكروبات بالكاد نستطيع زرعها.
- لا يوجد شيء علاجي هنا. هذا اكتشاف وتوصيف في ميكروبات وزراعة خلوية — لا مرض، لا علاج، لا مريض.

## ما مدى قوة الدليل؟

الاكتشاف نفسه يقف على أرض صلبة، وبصورة مكتملة على غير العادة: يستند إلى تنقيب بنيوي واسع النطاق، ثم تأكيد مختبري لكيفية صنع RNA وكيف يجد DNA ويقطعه، ثم بنية شبه ذرية للمركب أثناء العمل، إضافة إلى اختبار الخلايا البشرية. الادعاء بأن «هذه عائلة جديدة ومتميزة من أنظمة استهداف DNA الموجهة بال RNA مدعوم جيداً من عدة اتجاهات في الوقت نفسه.

ما لا يزال مبكراً هو كل ما يتعلق بالفائدة: التحرير يعمل لكن بالكاد، وكل التحسين الذي حول CRISPR من فضول إلى أداة لا يزال، بالنسبة إلى TIGR، آمناً. وما هو استدلاله هو بقية القصة — الدور الطبيعي تخمين معقول من تجربة اصطناعية، والرابط التطوري، رغم أناقته، حجة من بنية مشتركة لا تاريخ محسوم. الورقة حذرة في تمييز هذا عن ذلك.

## لماذا يهم

دفعت عدة توسعات سابقة في فهرس الأنظمة الموجهة بال RNA ثمارها في النهاية. الأنظمة التي تقف خلف أدوات اليوم — Cas9 و Cas12 و Cas13، ومؤخراً بروتينات IscB/OMEGA الأصغر وبروتينات Fanzor حقيقية النوى — كانت كلها، في البداية، بيولوجياً موصوفة حديثاً لا أكثر. لم يصل أي منها كأداة منتهية. نظام بدليل ذي جزأين ولا يحتاج إلى PAM نقطة بداية مختلفة حقاً، والاستهداف الخالي من PAM هو بالضبط نوع المرونة الذي يقدره بناء الأدوات.

لكن النتيجة الأهدأ قد تكون أهم من احتمال الأداة. يربط نظام يقطع DNA بالآلة snoRNP التي تعدل RNA وبجين قافر، يرسم العمل خيطاً محتملاً يصل أنظمة موجهة بال RNA شديدة الاختلاف عبر شجرة الحياة. هذا من نوع النتائج التي تعيد تنظيم فهم مجال كامل لمصدر أدواته — وهو، على المدى الطويل، أكثر قيمة من عنوان آخر عن المقصات.

## الخلاصة الصافية

بالبحث عن أشكال البروتينات بدلا من تسلسلاتها، اكتشف الباحثون TIGR-Tas عائلة لم تكن معروفة من قبل من أنظمة استهداف DNA الموجهة بال RNA، توجد غالبا في فيروسات بكتيرية وبكتيريا طفيلية. دليل RNA فيها غير عادي — نحو 36 حرفا يحمل مقطعين منفصلين للاستهداف يقرآن سلسلتين متقابلتين من DNA — وعلى خلاف CRISPR لا يحتاج إلى نمط «PAM» مجاور. الأعضاء القاطعون لـ DNA يقطعون بدقة، ويمكن برمجة نسخة واحدة لتحرير خلايا بشرية، وإن بكفاءة لا تتجاوز بضعة في المئة؛ كما كشفت بنية شبه ذرية مركبا مبنيا مثل آلة snoRNP التي تعدل RNA في خلايانا، مشيرة إلى رابط تطوري عميق بين أنظمة موجهة بال RNA تعدل RNA وأخرى تستهدف DNA. إنه توسع حقيقي في بيولوجيا الأنظمة الموجهة بال RNA، وربما هيكل جديد لأدوات مستقبلية — اكتشاف علم أساسي وإثبات مفهوم، وليس محرر جينات ناخب، ولا CRISPR «0.2»، ولا علاجا. وظيفته الطبيعية في البرية لا تزال مجهولة.

## فص بلا مجاملة

ما تظهره الورقة: عائلة جديدة ومتميزة من أنظمة استهداف DNA الموجهة بال RNA، هي TIGR-Tas في بدائيات النوى وفيروساتها، وجدت عبر تنقيب بنيوي؛ ودليل RNA ذا مقطعين، خاليا من PAM بطول يقارب 36 nt، يستهدف سلسلتي DNA معا؛ وقطعا دقيقا موجها بال RNA لأعضاء العائلة الحاملة للنوكلياز، وتحريرا قابلا للبرمجة في خلايا بشرية بكفاءة منخفضة، تصل إلى بضعة في المئة؛ وبنية cryo-EM شبه ذرية؛ وروابط بنيوية وتطورية مع transposons، IS110 و snoRNPs C/D box.

ما هو معقول لكنه غير مثبت: الدور البيولوجي الطبيعي لهذه الأنظمة، إذ توجي تجربة اصطناعية واحدة بدور غير دفاعي في منافسة العناصر المتنقلة؛ والجسر التطوري المقترح بين أنظمة موجهة بال RNA تعدل RNA وأخرى تستهدف DNA، وهو حجة بنيوية.

ما لا تظهره: أداة تحرير جيني ناخبة أو عالية الكفاءة؛ تفوقا على CRISPR كأداة؛ وظيفة طبيعية مؤكدة؛ كيفية نضج دليل RNA أو أي تطبيق علاجي.

القيود الرئيسية: كفاءة التحرير في الخلايا البشرية منخفضة، وهي إثبات مفهوم فقط؛ معظم الأنظمة تعيش في ميتاجينومات صعبة الدراسة، لذلك تبقى الأهداف الطبيعية مجهولة إلى حد كبير؛ ادعاءات الدور البيولوجي والأصل التطوري استدلالية؛ والتوصيف في ميكروبات وزراعة خلوية، لا في سياق مرضي.

ما مقدار الثقة المناسب للقارئ العام؟ ثقة عالية بأن هذه عائلة جديدة ومتميزة حقا من أنظمة استهداف DNA الموجهة بال RNA بآلية جديدة ذات جزأين وخالية من PAM، وبأن الرؤى البنيوية والتطورية حقيقية. وثقة عالية بأنها ليست أداة جاهزة لتحرير الجينات، ولا CRISPR «0.2»، ولا علاجا. وثقة منخفضة بشأن دورها الطبيعي ومدى ما يمكن أن تبلغه كأداة. الموقف المناسب: حماس حقيقي لبيولوجيا جديدة وقطعة تطورية محتملة مفقودة — وصبر على التطبيقات، التي لا تزال في بدايتها تماما.

## المصادر

Science 388, eadv9789 (2025)

<https://doi.org/10.1126/science.adv9789>

Central PubMed (PMC12045711)

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC12045711/>