12.25

Spektrum
der Wissenschaft

Dunkle Energie

Wachsende Zweifel am kosmologischen Standardmodell

Nobelpreise 2025

KREBSMEDIZIN **Der Körper als Wirkstofffabrik**

QUANTENTHEORIE DER GRAVITATION **Vom Dilemma zum Experiment**

PANGENOMIK **Die genetische Vielfalt nutzbar machen**

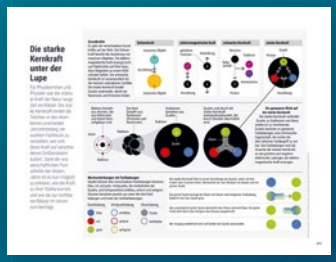
Spektrum.de 12.25

(D) 9,80 EUR · (A/L) 9,80 EUR · (CH) 14,80 CHF

D6179E · Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum der Wissenschaft **KOMPAKT**

Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum** KOMPAKT-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download, optimiert für Tablets, zur Verfügung.
Wählen Sie unter mehr als 400 verschiedenen Ausgaben und Themen.



Ausgewählte **Spektrum** KOMPAKT gibt es auch im Printformat!

Hier bestellen:
E-Mail: service@spektrum.de
Spektrum.de/aktion/kompakt

Unter Dinosauriern

Mike Zeitz
Redaktionsleiter
Physical Sciences

Vor einigen Monaten meldete sich das Organisationsteam eines besonderen Festivals: Ob jemand aus der Redaktion Lust hätte, mit unserem Spektrum-Podcast auf die Bühne zu kommen und vor Publikum live eine Folge aufzuzeichnen – nachts im Museum für Naturkunde Berlin, im berühmten Sauriersaal. Sofort habe ich zugesagt. Was für eine Gelegenheit!

Im Spektrum-Podcast sprechen unsere Redakteurinnen und Redakteure jede Woche – normalerweise von unseren Büros aus – über Erkenntnisse aus der Wissenschaft, zu denen sie gerade recherchiert haben. Mittlerweile gibt es mehr als 250 Folgen. Welches Thema sollten wir für diesen außergewöhnlichen Anlass wählen?

Für das 20-Minuten-Zeitfenster schwebte mir nicht weniger vor als die größte Frage der Kosmologie. Astronomie ist ein dankbares Gebiet, um damit Menschen zu begeistern, und ich hatte schon in diversen Folgen des Spektrum-Podcasts etwa über Schwarze Löcher oder Asteroiden gesprochen. Oder eben über Dunkle Energie, die ich mir nun als Faszinosum für Berlin herausgepickt hatte.

Der Grund für meine Entscheidung: Das Konzept der Dunklen Energie, eine entscheidende Zutat in der modernen Kosmologie, geriet zuletzt vermehrt in die Kritik. Diese seltsame, alles beschleunigende Kraft wurde erst vor einem Vierteljahrhundert entdeckt und soll rund 70 Prozent der Energie des Universums ausmachen. Aber niemand kennt ihren Ursprung. Wir messen nur ihre Wirkung anhand von Strukturen im Weltall. Doch manche neuen Beobachtungen passen nicht zu diesem Standardmodell.

Die Kontroverse schien ideal für ein kurzweiliges Gespräch mit dem Moderator Marc Zimmer unseres Podcast-Partners detektor.fm. Allerdings hatte ich in der Redaktion zuletzt keinen Artikel dazu bearbeitet, sodass ich bei der Vorbereitung auf den Podcast nicht einfach von ohnehin angefallener Recherche profitieren konnte – unser übliches Vorgehen. Somit lief es dieses Mal umgekehrt: Ich habe Material von Grund auf neu zusammengetragen und meine Erkenntnisse aufgeschrieben. Auf die Weise entstand der Artikel in diesem Heft.

Schließlich saßen wir beim Podcast-Festival im September vor einer mit neugierigen Menschen gefüllten Halle unter dem stimmungsvoll beleuchteten Berliner *Brachiosaurus*, dem höchsten aufgestellten Dinosaurierskelett der Welt. Die erfolgreiche Veranstaltung habe ich genossen. Nun hoffe ich, dass es Ihnen mit dem Artikel ebenso geht.

Auf dem Festival war Spektrum sogar noch ein zweites Mal vertreten, und zwar mit einem brandneuen Podcast-Format, bei dem Katharina Menne und Carsten Könneker von »Spektrum« mit Fachleuten über »Die großen Fragen der Wissenschaft« sprechen. An jenem Abend fragten sie die Informatikerin Katharina Zweig, ob künstliche Intelligenz uns alle überflügeln wird. Ich greife nicht zu viel vorweg, wenn ich verrate: Es ist kompliziert. Ähnlich verhält es sich hinsichtlich meiner Frage, ob die Dunkle Energie ein Trugbild ist. Die interessanten Probleme haben leider selten eine einfache Lösung.

Bleiben Sie mit uns dran, Ihr

In dieser Ausgabe

LUIZA PUIU

Seit mehr als einem Jahrhundert versuchen Fachleute, die Gravitation in die Quantentheorie zu integrieren. **Markus Aspelmeyer,** wissenschaftlicher Direktor am Institut für Quantenoptik und Quanteninformation in Wien, erläutert, wie neue Experimente eine Lösung voranbringen könnten.

LEIBNIZ-INSTITUT IPK

Das Erbgut eines Individuums zeigt stets nur einen kleinen Ausschnitt der genetischen Vielfalt innerhalb einer Art. Deshalb setzen Forschende vermehrt auf Pangenomik, also den Vergleich mehrerer Genome einer Spezies. Welche Chancen daraus für die Pflanzenzucht entstehen, beschreibt **Martin Mascher** vom Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung Gatersleben.

INHALT

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

TITELTHEMA

12 **Trugbild Dunkle Energie?**
Neue Vermessungen der Strukturen des Universums befeuern Zweifel am kosmologischen Standardmodell, laut dem eine geheimnisvolle Kraft alles auseinandertreibt.
Von Mike Zeitz

SPEZIAL NOBELPREISE 2025

22 **Wächter des Immunsystems**
Die Entdeckung regulatorischer T-Zellen revolutionierte die Sicht auf Autoimmunerkrankungen.

26 **Quantenphysik auf einen Chip gebannt**
Die Nobelpreisträger wiesen Quantenphänomene auf makroskopischer Ebene nach und ebneten so den Weg für moderne Quantencomputer.

30 **Wie die Chemie die dritte Dimension entdeckte**
Die drei geehrten Forscher erschufen Gerüstverbindungen – und in ihnen eine Nanowelt aus Höhlen und Kanälen.

36 **Die Schattenseiten großer Entdeckungen**
Der Nobelpreis feiert den wissenschaftlichen Triumph, doch er wirft auch Fragen nach Verantwortung und den teils unvorhersehbaren Folgen von Forschung auf.

PFLANZENZUCHT

40 **Ein Genom reicht nicht**
SERIE: NUTZPFLANZEN DER ZUKUNFT Vergleicht man das Erbgut zahlreicher Individuen, ist die gesamte genetische Vielfalt einer Art erfassbar – mit weitreichenden Folgen für die Züchtung.
Von Martin Mascher

SCHLICHTING!

48 **Ein Antrieb aus Wunderkerzen**

QUANTENPHYSIK UND GRAVITATION

50 **Was wiegt ein Quant?**
Neue Experimente an der Schnittstelle zwischen Quantenphänomenen und Schwerkraft sollen Raum und Zeit vermessen.
Von Markus Aspelmeyer

SPRINGERS EINWÜRFE

59 **In brennender Sorge**

QUANTENPHYSIK

60 **»Wir müssen anders denken«**
SERIE: QUANTENPHYSIK NEU GEDACHT Im Interview spricht der vielfach ausgezeichnete theoretische Physiker Gerard 't Hooft über die Zukunft der Quantenmechanik.
Von Lee Billings

FREISTETTERS FORMELWELT

65 **Mathematisch perfektes Zwiebelschneiden**

KREBSMEDIZIN

66 **Zelltherapie von innen**
Neue medizinische Verfahren erlauben es, Immunzellen direkt in unserem Körper so zu manipulieren, dass sie Krebszellen attackieren.
Von Cassandra Willyard

EINE PRISE CHEMIE

72 **Was Karamell unwiderstehlich macht**
Zucker besteht nur aus einer Molekülsorte, die nach nichts riecht; doch dank Hitze wird daraus eine duftende Masse mit tausenden Substanzen.
Von Verena Tang

74 IMPRESSUM

75 LESERBRIEFE

76 REZENSIONEN

80 FUTUR III

82 VORSCHAU

TITELBILD:
TONADECH / STOCK.ADOBE.COM (ERSTELLT MIT KI);
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

12 **Trugbild Dunkle Energie?**

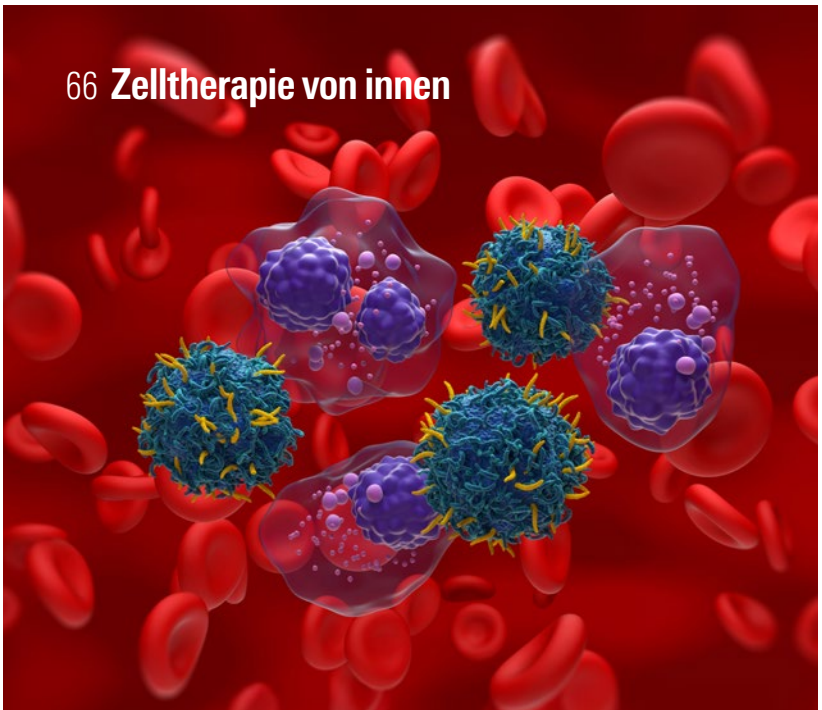
NATALYA_YUDINA / GETTY IMAGES / ISTOCK

40 **Ein Genom reicht nicht**

LEIBNIZ-INSTITUT FÜR PFLANZENGENETIK UND KULTURPFLANZENFORSCHUNG (IPK) / THORSTEN SCHNURBUSCH

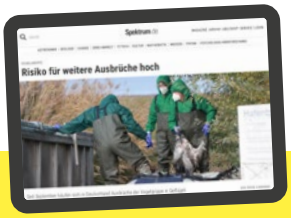
50 **Was wiegt ein Quant?**

IMIAGINIMA / GETTY IMAGES / ISTOCK



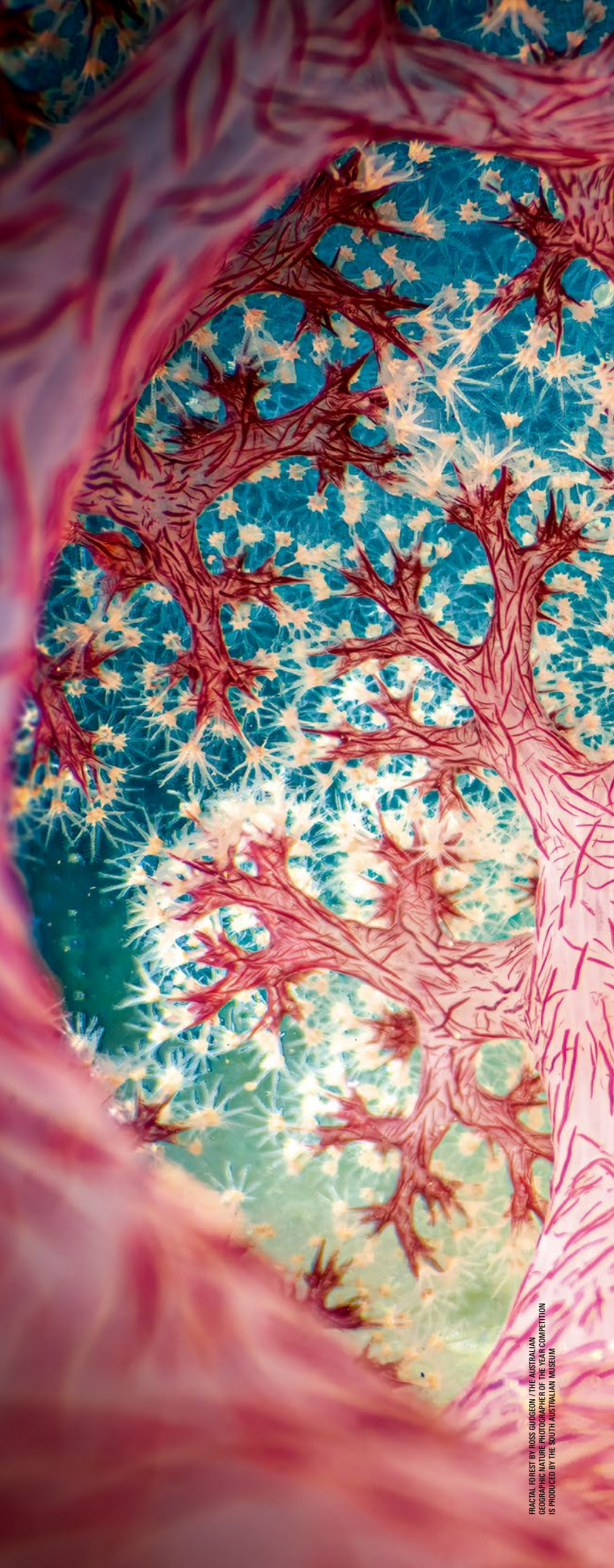
66 **Zelltherapie von innen**

LASZLO / STOCK.ADOBE.COM



Alle Artikel auch digital auf **Spektrum**.de

Auf »Spektrum.de« berichtet unsere Redaktion täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.



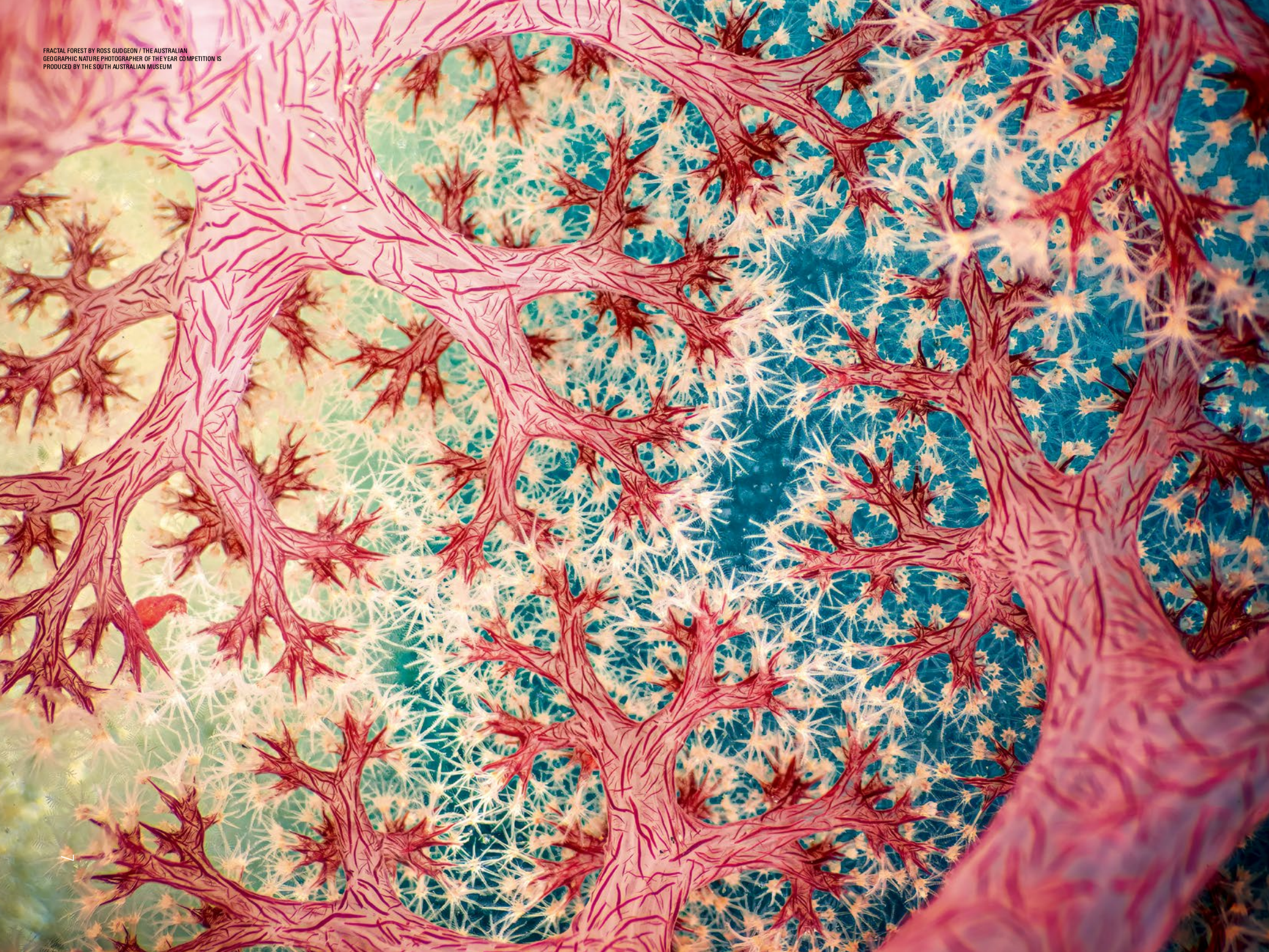
Fraktale Schönheit unter Wasser

Von außen betrachtet gehört diese bäumchenartig verzweigte Weichkoralle (englisch: Cauliflower soft coral) nicht unbedingt zu den spektakulärsten, sie ähnelt ein bisschen einem rosafarbenen Blumenkohl. Doch in ihrem Inneren bietet sie einen fantastischer Anblick.

Der australische Unterwasserfotograf Ross Gudgeon konnte diese einzigartige Perspektive mithilfe eines speziellen Makrosondenobjektivs einfangen, das er vorsichtig in die Kolonie einschleuste. Den Weichkorallen-Kolonien fehlt das typische Kalkskelett der Hartkorallen, stattdessen finden sich verteilte Kalknadeln. Die einzelnen Polypen besitzen genau acht weißliche Tentakel.

Mit dem Foto, aufgenommen in den Gewässern der Lembeh-Straße vor Nordsulawesi in Indonesien, gewann Gudgeon den Wettbewerb »Australian Geographic Nature Photographer of the Year 2025«.

FRACTAL FOREST BY ROSS GUDGEON / THE AUSTRALIAN GEOGRAPHIC NATURE PHOTOGRAPHER OF THE YEAR COMPETITION IS PRODUCED BY THE SOUTH AUSTRALIAN MUSEUM



FRACTAL FOREST BY ROSS GUDGEON / THE AUSTRALIAN GEOGRAPHIC NATURE PHOTOGRAPHER OF THE YEAR COMPETITION IS PRODUCED BY THE SOUTH AUSTRALIAN MUSEUM