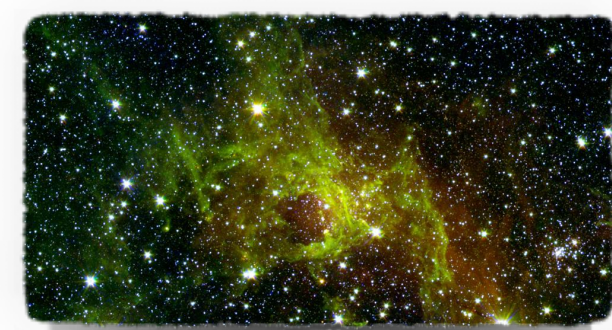


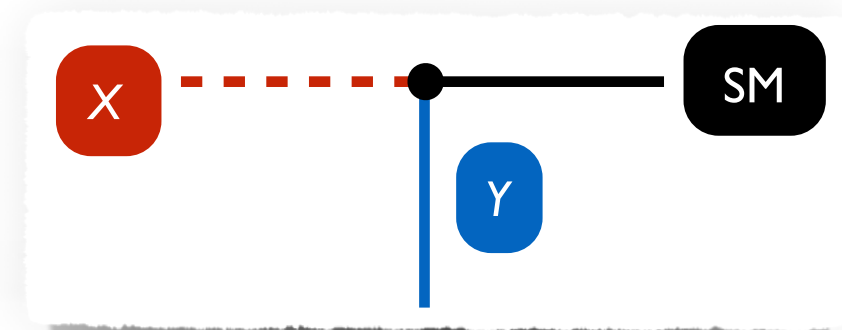
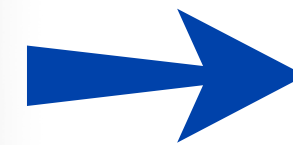
De la question à la publi

Comment fabrique-t-on une connaissance scientifique ?

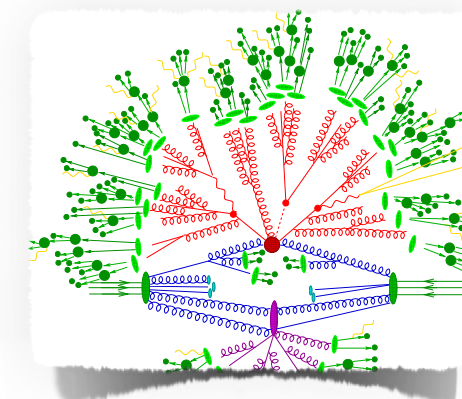
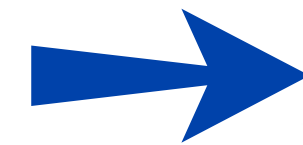
Faire de la recherche, c'est transformer une question en preuve



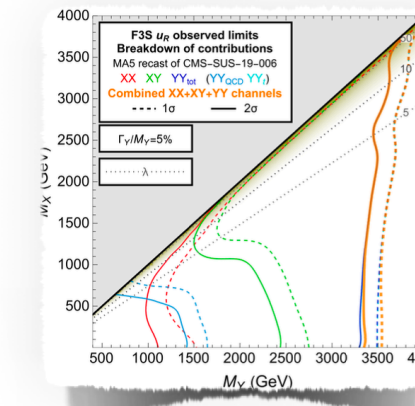
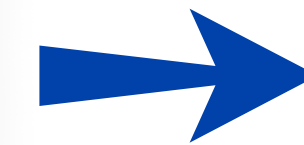
Question



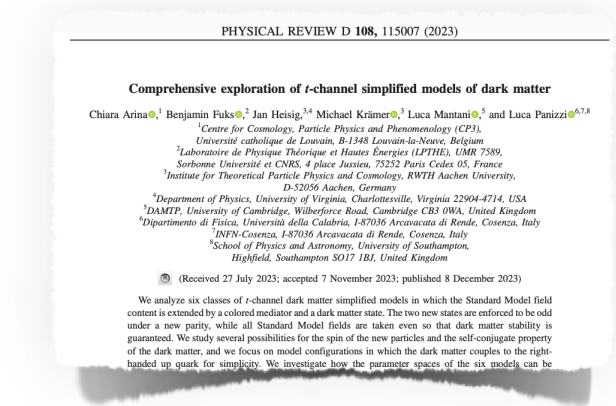
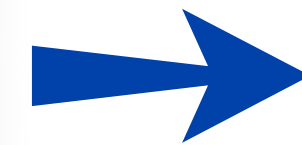
Modèle



Simulations



Résultats



Article

Benjamin Fuks

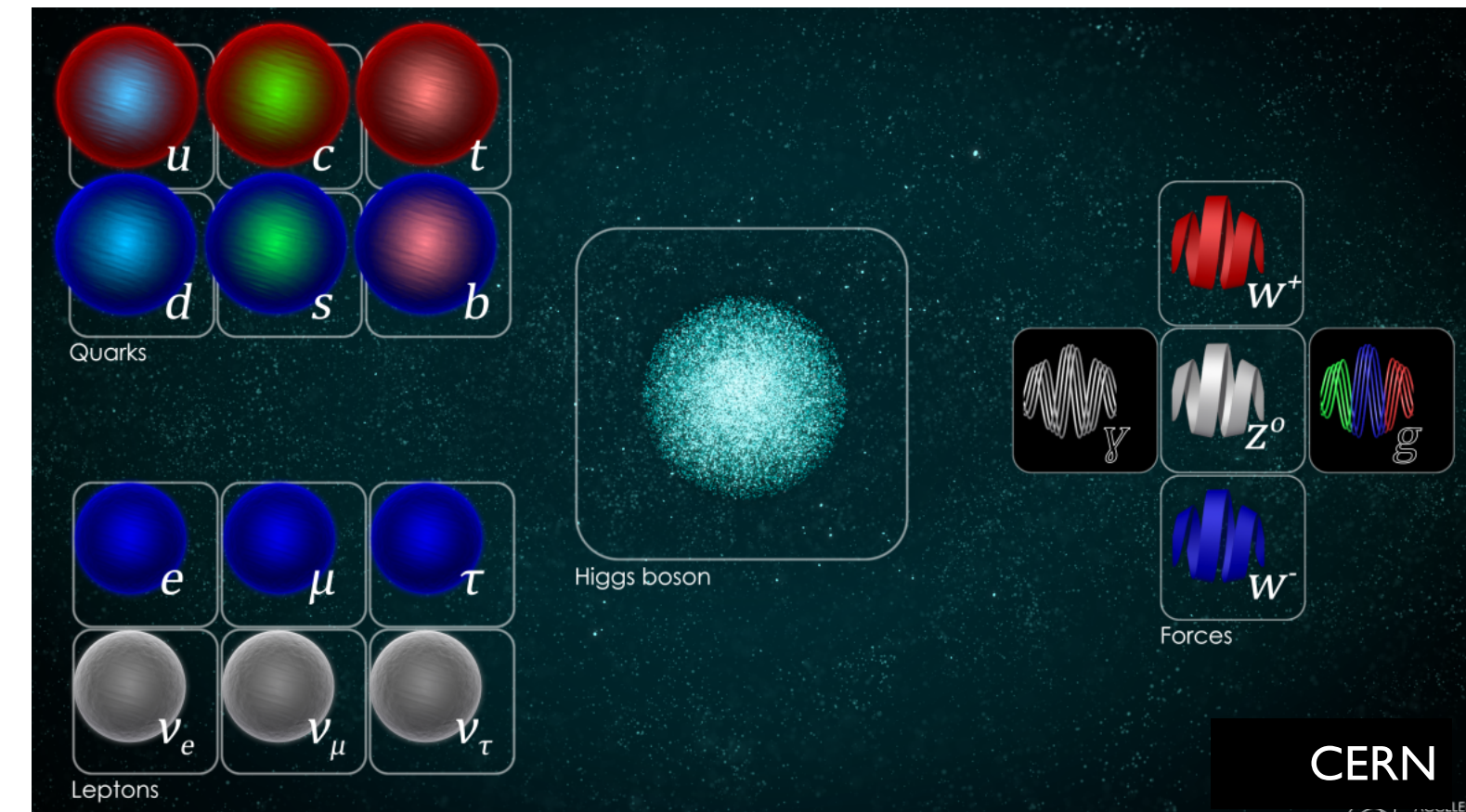
LPTHE / Sorbonne Université

SPRINT Summer Camp 2026 – 19 juin 2026

Du 'presque' à la preuve

Mercredi : ce que l'on cherche

- Une carte précise... mais incomplète
- Des mystères : matière noire, neutrinos, Higgs, gravité, etc.



Aujourd'hui : comment on le cherche

- Comment naît une idée scientifique ?
- Comment la teste-t-on ?
- Comment devient-elle une publication ?

Mon rôle

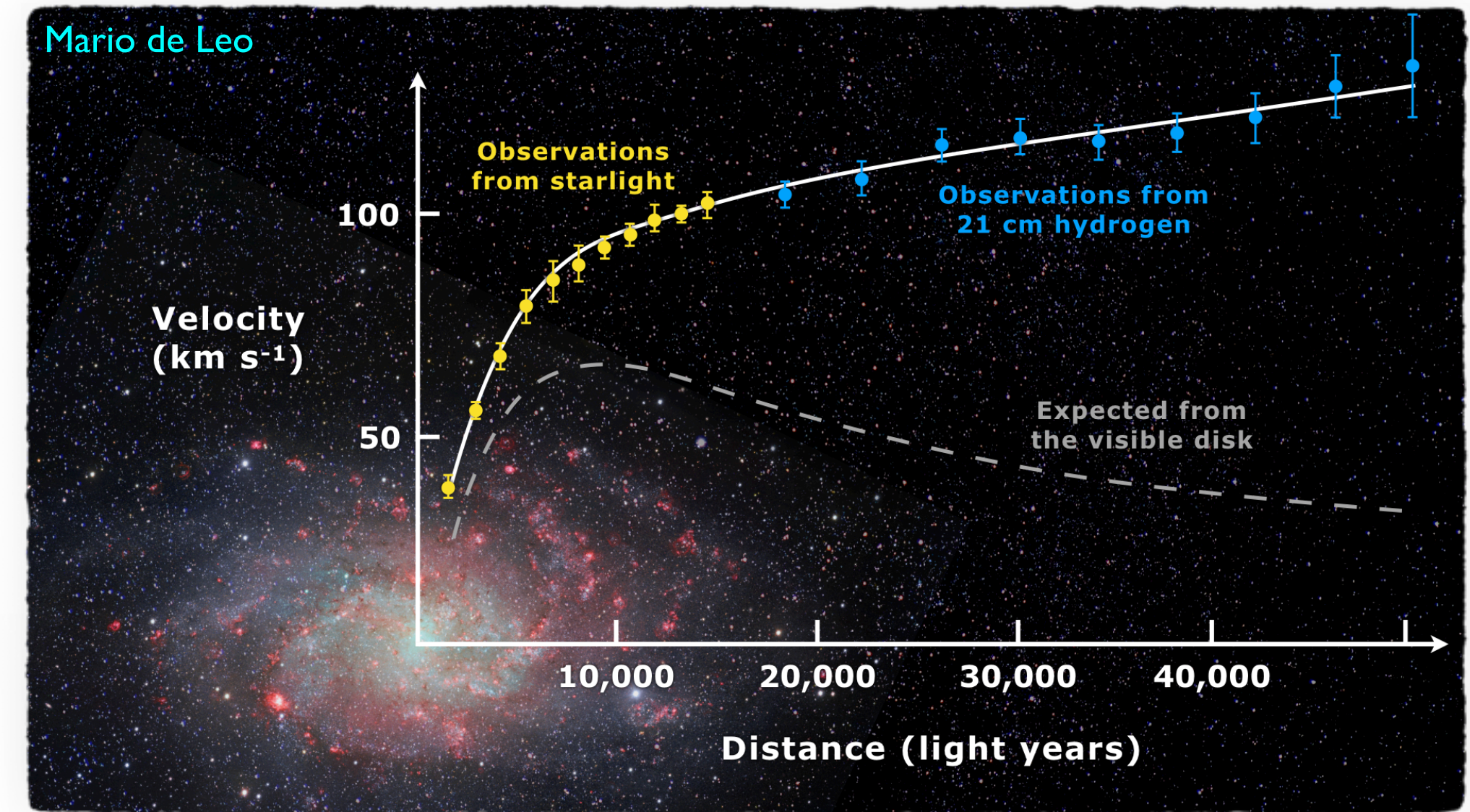
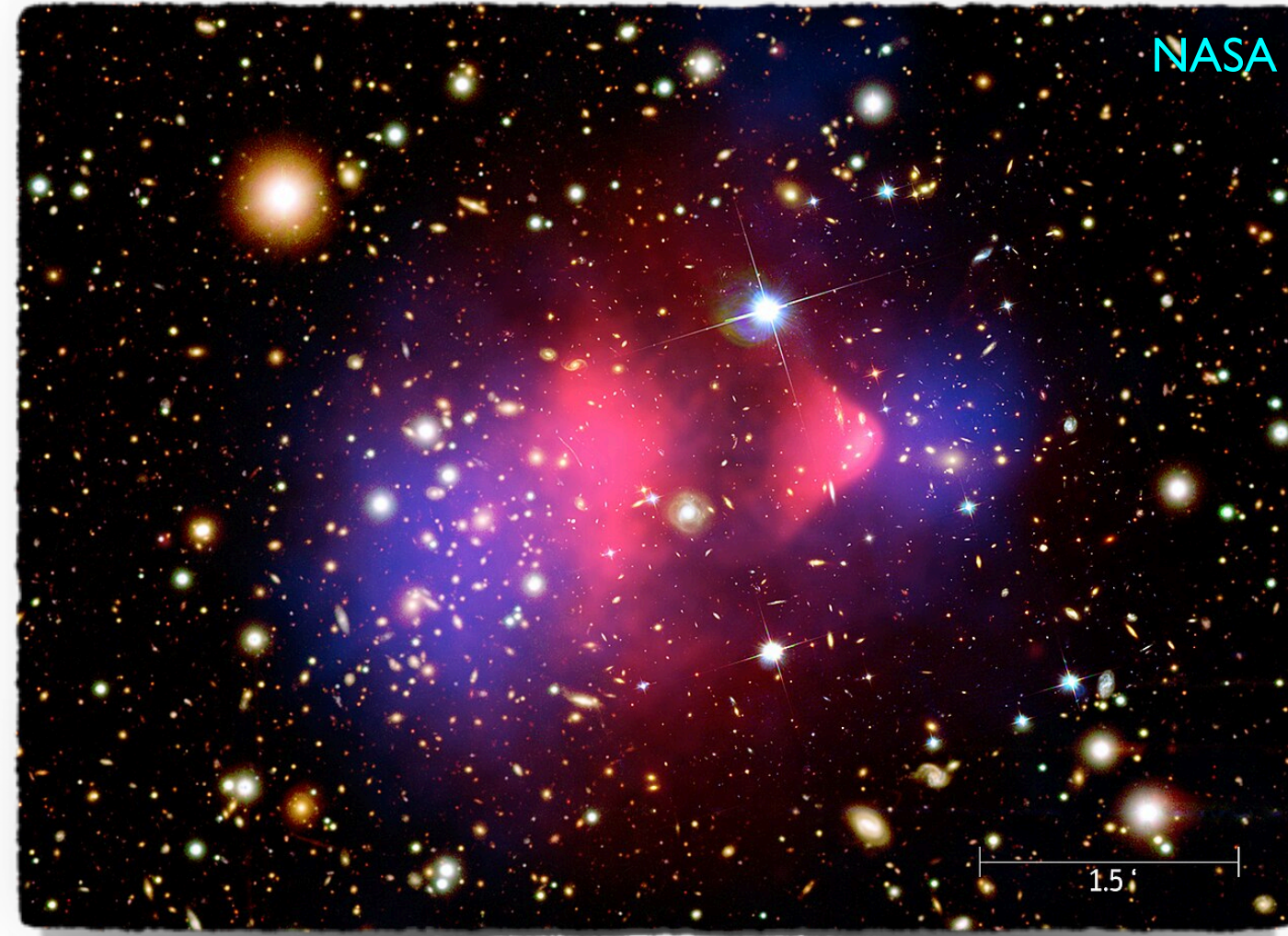
- Imaginer de nouvelles cartes possibles
- Prédire leurs traces
- Chercher ces traces dans les données

Une idée ne devient science que si elle résiste aux tests

La matière noire : le mystère de départ

Un nouveau type de matière

- On ne la voit pas directement
- On observe ses effets gravitationnels
 - Les étoiles tournent trop vite loin des centres galactiques
- Elle semble plus abondante que la matière ordinaire
- Le Modèle Standard ne contient pas de bon candidat



Question de recherche

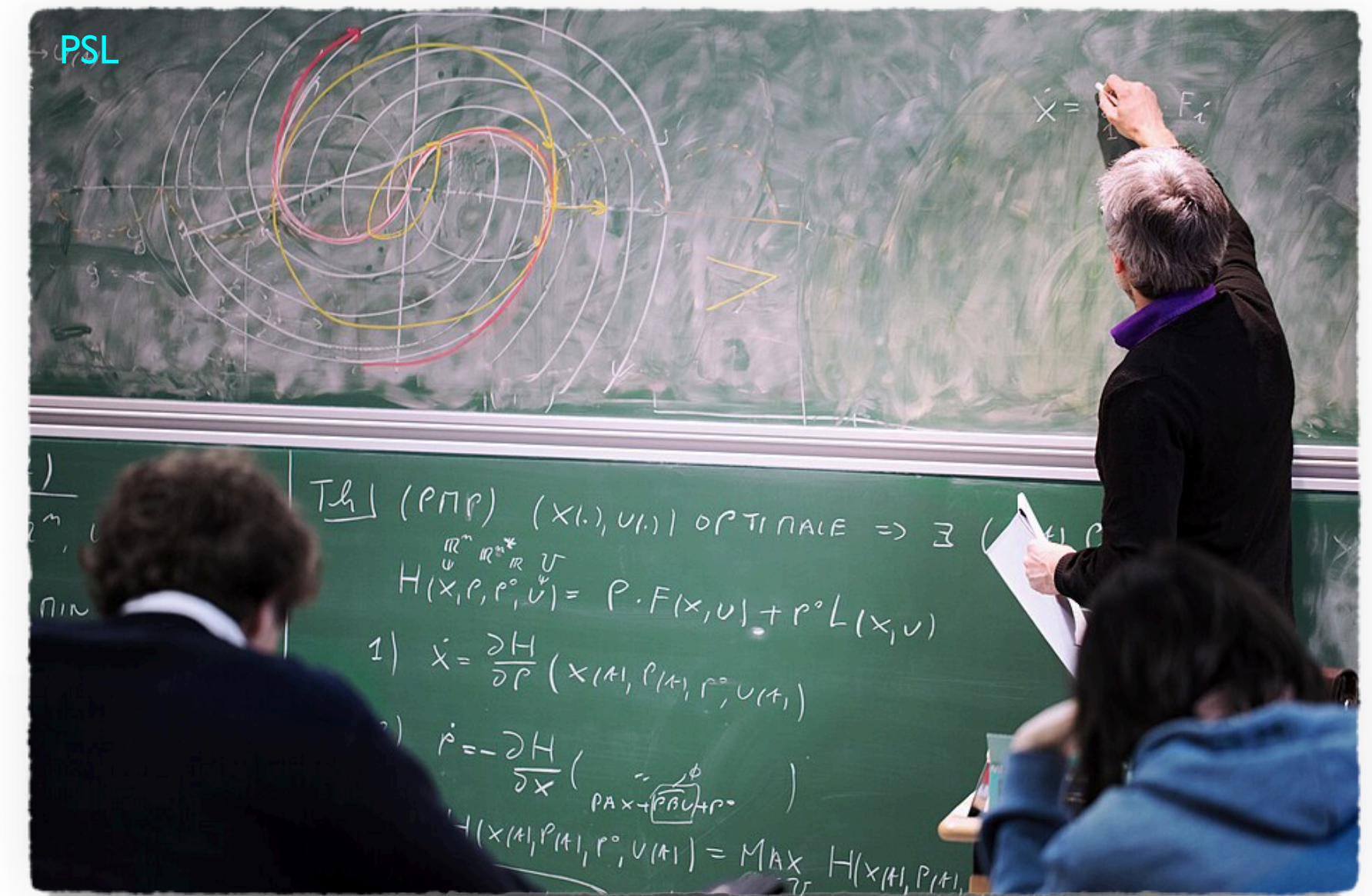
- Et si la matière noire était une **nouvelle particule** ?
- Comment pourrait-elle **communiquer** avec la matière ordinaire ?
- Peut-on la **tester** avec les données existantes ?

Notre enquête commence ici : transformer un mystère cosmique en une hypothèse testable

Mais d'où viennent ces questions ?

Pas seulement sous la douche...

- Lire ce que les autres ont trouvé
- Repérer ce qui manque ou ce qui **surprend**
- Discuter, **douter**, reformuler
- Transformer une intuition en question **testable**



(souvent un tableau, du café et beaucoup de questions)

Now I can move on to $h_{12} = -+$ case: 26/04/23 - 2 (17)

$(3,107) |0, \bar{0}\rangle_{-+} = N \{ \hat{M}_{-+}^{++} |++\rangle + \hat{M}_{-+}^{--} |--\rangle + \hat{M}_{-+}^{+-} |+-\rangle + \hat{M}_{-+}^{-+} |-+\rangle \}$

It's spin state

$$= \frac{\sin \theta^*}{\sqrt{2}} (|++\rangle - |--\rangle) + \frac{\cos \theta^* - 1}{2} |+-\rangle + \frac{\cos \theta^* + 1}{2} |-+\rangle \quad \leftarrow (12) (3.59-64)$$

$$= \frac{\sin \theta^*}{2} (|+-\rangle - |-+\rangle) + \frac{\cos \theta^* - 1}{2} |++\rangle - \frac{\cos \theta^* + 1}{2} |--\rangle$$

$$= - \left(\frac{\sin \theta^*}{\sqrt{2}} \frac{|+-\rangle + |-+\rangle}{\sqrt{2}} + \frac{1 - \cos \theta^*}{2} |++\rangle + \frac{1 + \cos \theta^*}{2} |--\rangle \right)$$

$$= - \left(\frac{\sin \theta^*}{\sqrt{2}} |1, 0\rangle_{z'} + \frac{1 - \cos \theta^*}{2} |1, 1\rangle_{z'} + \frac{1 + \cos \theta^*}{2} |1, -1\rangle_{z'} \right)$$

$\theta^* \rightarrow 0$
 $\Rightarrow -|1, -1\rangle_z$

Une bonne question naît souvent d'un doute bien formulé

Étape I : imaginer une hypothèse testable

Question de départ

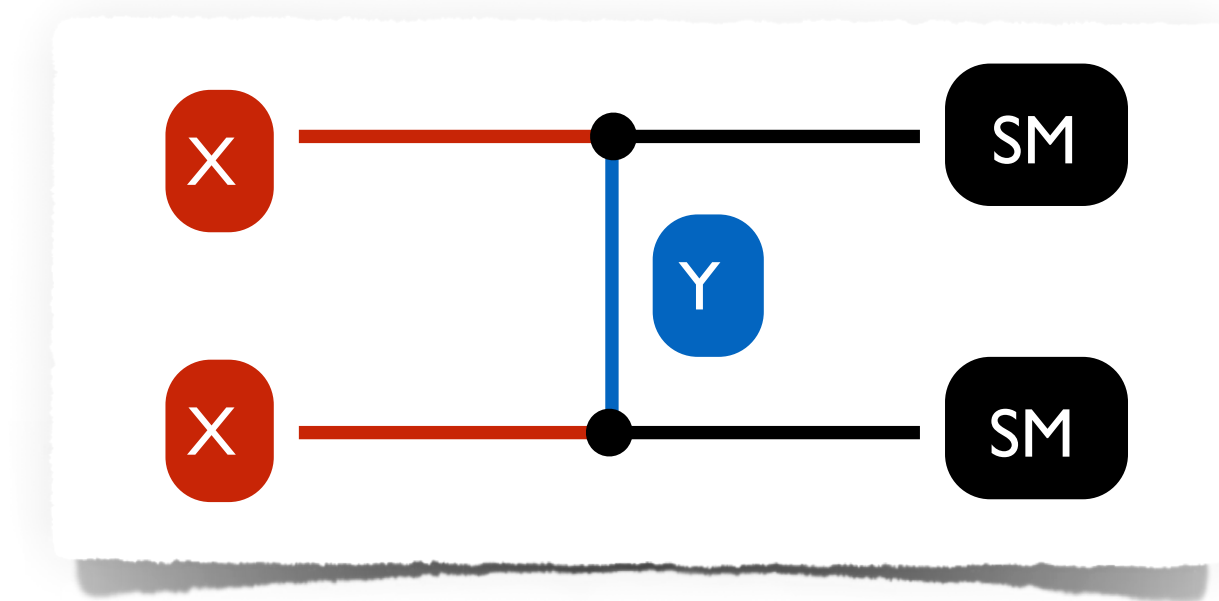
- Et si la matière noire était une particule ?
- Il existe beaucoup d'idées possibles : laquelle tester ?

Hypothèse simple

- Une particule invisible X
- Une particule messagère Y
- Y permet à X de communiquer avec la matière ordinaire

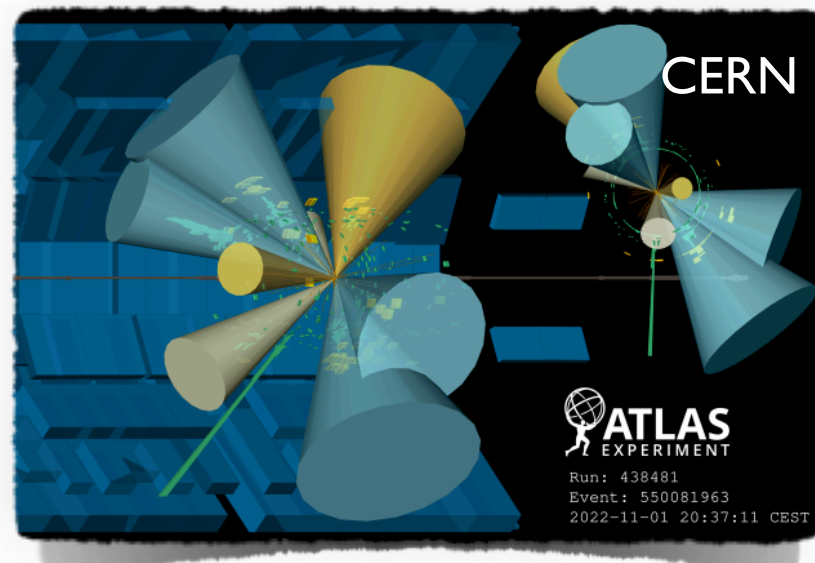
Pourquoi faire simple ?

- Plus facile à tester
- Une conclusion utile pour beaucoup de modèles



Un modèle n'est pas la vérité, mais une idée assez précise pour être testée

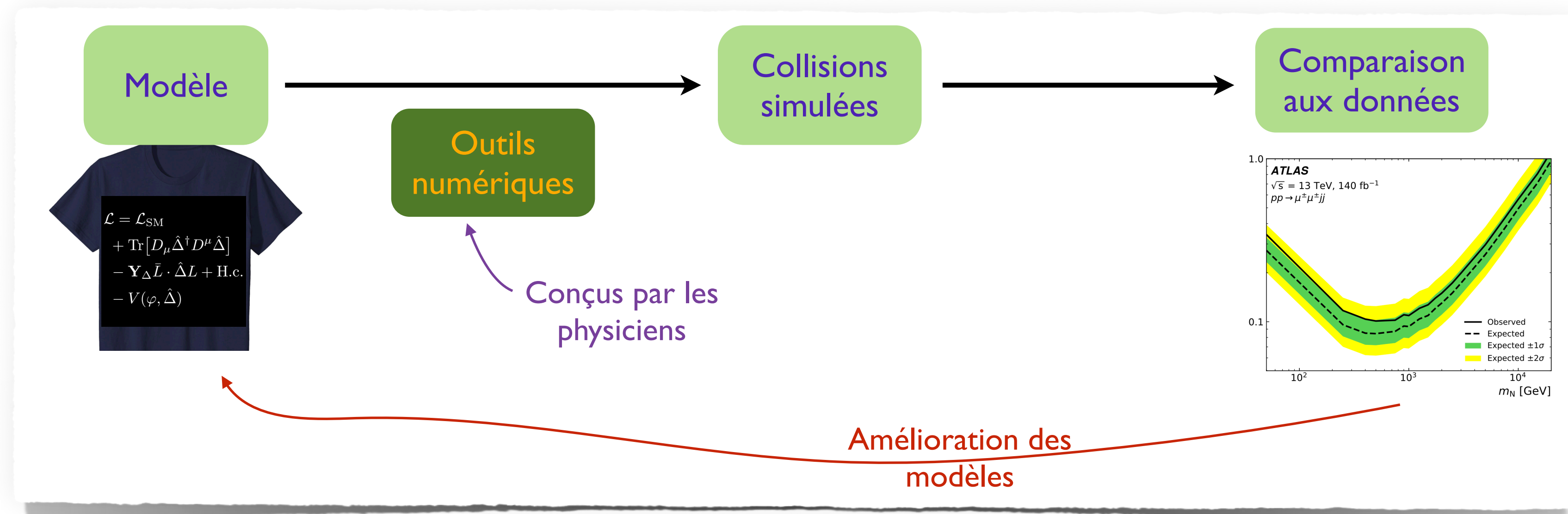
Étape 2 : prédire les traces



Notre modèle doit devenir une prédiction concrète

- Que peut produire une collision au LHC ?
- Quelles traces seraient visibles dans un détecteur ?
- Comment **distinguer le signal des phénomènes déjà connus** ?

Outils numériques : simuler le signal, les phénomènes connus et comparer aux données



Les simulations font le pont entre une idée théorique et l'expérience

Étape 3 : confronter aux données

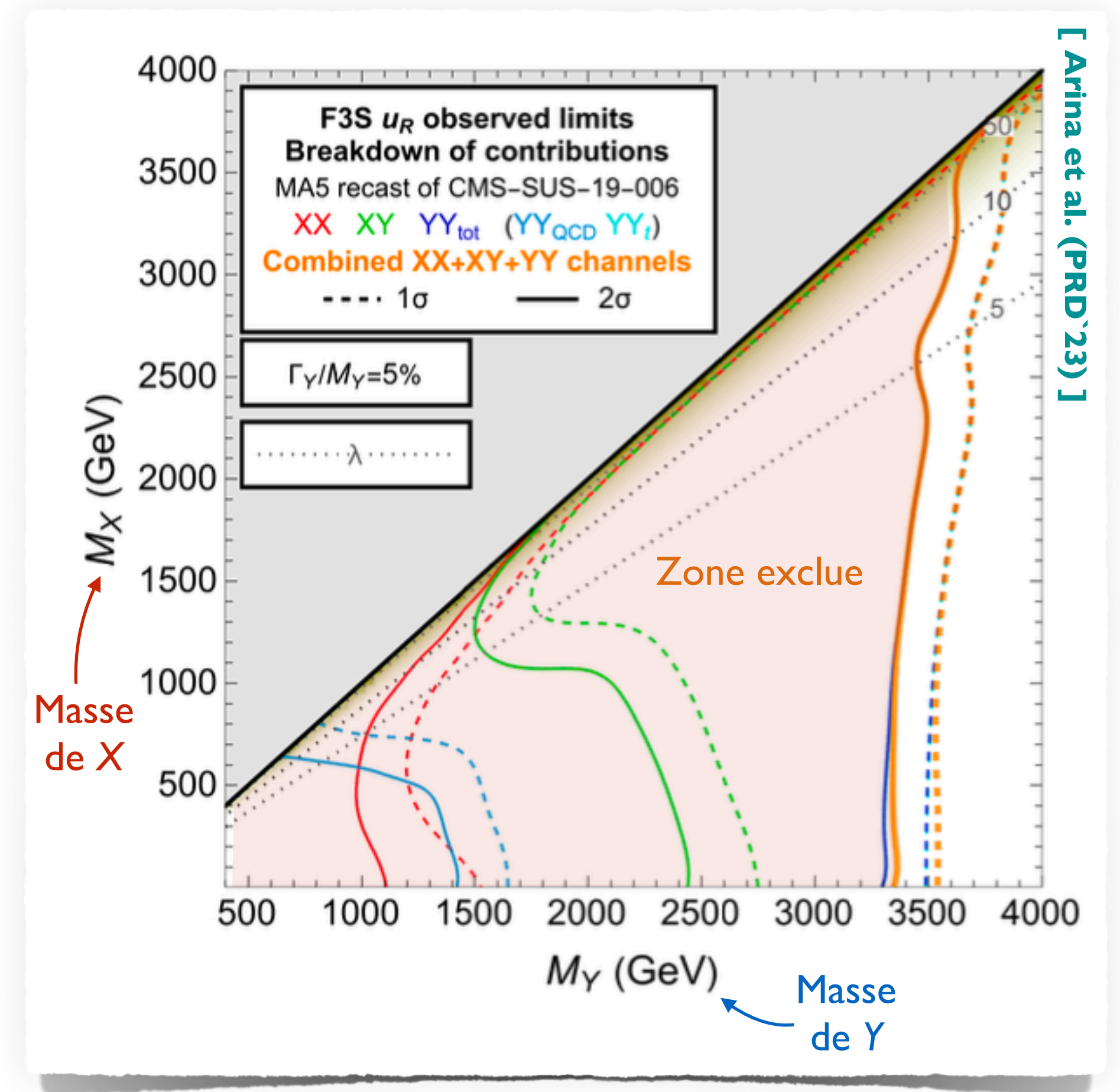
Une fois la prédiction obtenue

- Les expériences analysent les **données réelles**
- On compare...
 - Ce que **prédit le modèle**
 - Les phénomènes déjà connus
 - Ce que le détecteur a observé

Deux possibilités

- Un excès apparaît → indice potentiel de nouvelle physique
- Pas d'excès visible → on exclut certaines hypothèses

Rien ne voir n'est pas un échec :
cela réduit le champ des possibles



Étape 4 : partager et faire vérifier

PHYSICAL REVIEW D **108**, 115007 (2023)

Comprehensive exploration of t -channel simplified models of dark matter

Chiara Arina¹, Benjamin Fuks², Jan Heisig^{3,4}, Michael Krämer³, Luca Mantani⁵ and Luca Panizzi^{6,7,8}

¹Centre for Cosmology, Particle Physics and Phenomenology (CP3),
Université catholique de Louvain, B-1348 Louvain-la-Neuve, Belgium

²Laboratoire de Physique Théorique et Hautes Énergies (LPTHE), UMR 7589,
Sorbonne Université et CNRS, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France

³Institute for Theoretical Particle Physics and Cosmology, RWTH Aachen University,
D-52056 Aachen, Germany

⁴Department of Physics, University of Virginia, Charlottesville, Virginia 22904-4714, USA

⁵DAMTP, University of Cambridge, Wilberforce Road, Cambridge CB3 0WA, United Kingdom

⁶Dipartimento di Fisica, Università della Calabria, I-87036 Arcavacata di Rende, Cosenza, Italy

⁷INFN-Cosenza, I-87036 Arcavacata di Rende, Cosenza, Italy

⁸School of Physics and Astronomy, University of Southampton,
Highfield, Southampton SO17 1BJ, United Kingdom

 (Received 27 July 2023; accepted 7 November 2023; published 8 December 2023)

We analyze six classes of t -channel dark matter simplified models in which the Standard Model field content is extended by a colored mediator and a dark matter state. The two new states are enforced to be odd under a new parity, while all Standard Model fields are taken even so that dark matter stability is guaranteed. We study several possibilities for the spin of the new particles and the self-conjugate property of the dark matter, and we focus on model configurations in which the dark matter couples to the right-handed up quark for simplicity. We investigate how the parameter spaces of the six models can be constrained by current and future cosmological, astrophysical and collider searches, and we highlight the strong complementary between those probes. Our results demonstrate that scenarios featuring a complex (non self-conjugate) dark matter field are excluded by cosmology and astrophysics alone, the only possibility to avoid these bounds being to invoke very weak couplings and mechanisms such as conversion-driven freeze-out. For models with self-conjugate dark matter, mediator and dark matter masses are pushed deep into the TeV regime, with the lower limits on the mediator mass reaching 3 to 4 TeV and those on the dark matter mass 1 to 2 TeV. In large parts of the parameter space these strong bounds are driven by same-sign mediator pair production, a channel so far not considered in the experimental analyses embedding t -channel dark matter model interpretations.

DOI: [10.1103/PhysRevD.108.115007](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.108.115007)

Un résultat seul ne suffit pas...

- Il faut expliquer la question et la méthode
- Il faut montrer les résultats
- Il faut discuter les limites

Avant publication

- Des experts (les pairs) relisent
- Ils critiquent, questionnent, demandent des corrections et des clarifications
- Le résultat devient plus solide

Après publication

- Les autres chercheurs peuvent vérifier
- On peut réutiliser les résultats pour avancer

Une connaissance scientifique est une idée
qui a survécu aux tests... et aux critiques

À quoi ça sert : la science continue après l'article

PHYSICAL REVIEW D **108**, 115007 (2023)

Comprehensive exploration of t -channel simplified models of dark matter

Chiara Arina¹, Benjamin Fuks², Jan Heisig^{3,4}, Michael Krämer⁵, Luca Mantani⁶, and Luca Panizzi^{6,7,8}

¹Centre for Cosmology, Particle Physics and Phenomenology (CP3),
Université catholique de Louvain, B-1348 Louvain-la-Neuve, Belgium

²Laboratoire de Physique Théorique et Hautes Énergies (LPTHE), UMR 7589,
Sorbonne Université et CNRS, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France

³Institute for Theoretical Particle Physics and Cosmology, RWTH Aachen University,
D-52056 Aachen, Germany

⁴Department of Physics, University of Virginia, Charlottesville, Virginia 22904-4714, USA

⁵DAMTP, University of Cambridge, Wilberforce Road, Cambridge CB3 0WA, United Kingdom

⁶Dipartimento di Fisica, Università della Calabria, I-87036 Arcavacata di Rende, Cosenza, Italy

⁷INFN-Cosenza, I-87036 Arcavacata di Rende, Cosenza, Italy

⁸School of Physics and Astronomy, University of Southampton,
Highfield, Southampton SO17 1BJ, United Kingdom

(Received 27 July 2023; accepted 7 November 2023; published 8 December 2023)

We analyze six classes of t -channel dark matter simplified models in which the Standard Model field content is extended by a colored mediator and a dark matter state. The two new states are enforced to be odd under a new parity, while all Standard Model fields are taken even so that dark matter stability is guaranteed. We study several possibilities for the spin of the new particles and the self-conjugate property of the dark matter, and we focus on model configurations in which the dark matter couples to the right-handed up quark for simplicity. We investigate how the parameter spaces of the six models can be constrained by current and future cosmological, astrophysical and collider searches, and we highlight the strong complementarity between those probes. Our results demonstrate that scenarios featuring a complex (non self-conjugate) dark matter field are excluded by cosmology and astrophysics alone, the only possibility to avoid these bounds being to invoke very weak couplings and mechanisms such as conversion-driven freeze-out. For models with self-conjugate dark matter, mediator and dark matter masses are pushed deep into the TeV regime, with the lower limits on the mediator mass reaching 3 to 4 TeV and those on the dark matter mass 1 to 2 TeV. In large parts of the parameter space these strong bounds are driven by same-sign mediator pair production, a channel so far not considered in the experimental analyses embedding t -channel dark matter model interpretations.

DOI: 10.1103/PhysRevD.108.115007

La science avance aussi en organisant
les prochaines questions

Eur. Phys. J. C (2025) 85:975
https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-025-14635-7

THE EUROPEAN
PHYSICAL JOURNAL C



Regular Article - Theoretical Physics

t -channel dark matter models – a whitepaper

Chiara Arina¹, Benjamin Fuks^{2,a}, Luca Panizzi^{3,4}, Michael J. Baker⁵, Alan S. Cornell⁶, Jan Heisig⁷, Benedikt Maier⁸, Rute Pedro⁹, Dominique Trischuk¹⁰, Diyar Agin², Alexandre Arbey¹¹, Giorgio Arcadi^{12,13}, Emanuele Bagnaschi¹⁴, Kehang Bai¹⁵, Disha Bhatia¹⁶, Mathias Becker^{17,18,19}, Alexander Belyaev^{20,21}, Ferdinand Benoit², Monika Blanke^{22,23}, Jackson Burzynski²⁴, Jonathan M. Butterworth²⁵, Antimo Cagnotta²⁶, Lorenzo Calibbi²⁷, Linda M. Carpenter²⁸, Xabier Cid Vidal²⁹, Emanuele Copello¹⁷, Louie Corpe³⁰, Francesco D'Eramo^{18,19}, Aldo Deandrea^{6,11}, Aman Desai³¹, Caterina Doglioni³², Sunil M. Dogra³³, Mathias Garny³⁴, Mark D. Goodsell², Sohaib Hassan³⁵, Philip Coleman Harris³⁶, Julia Harz¹⁷, Alejandro Ibarra³⁴, Alberto Orso Maria Iorio^{37,38}, Felix Kahlhoefer²², Deepak Kar^{39,40}, Shaaban Khalil⁴¹, Valery Khoze⁴², Pyungwon Ko⁴³, Sabine Kraml⁴⁴, Greg Landsberg⁴⁵, Andre Lessa⁴⁶, Laura Lopez-Honorez^{47,48}, Alberto Mariotti^{48,49}, Vasiliki A. Mitsou⁵⁰, Kirtimaan Mohan⁵¹, Chang-Seong Moon³³, Alexander Moreno Briceno⁵², Maria Moreno Llacer⁵⁰, Leandre Munoz-Aillaud², Taylor Murphy^{2,53}, Anele M. Ncube⁶, Wandile Nzuza³⁹, Clarisse Prat³⁹, Lena Rathmann⁷, Thobani Sangweni⁵⁴, Dipan Sengupta⁵⁵, William Shepherd⁵⁶, Sukanya Sinha³², Tim M. P. Tait⁵⁷, Andrea Thamm⁵, Michel H. G. Tytgat⁴⁷, Zirui Wang⁵⁸, David Yu⁵⁹, Shin-Shan Yu⁶⁰

¹ Centre for Cosmology, Particle Physics and Phenomenology (CP3), Université catholique de Louvain, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgium
² Laboratoire de Physique Théorique et Hautes Énergies (LPTHE), UMR 7589, Sorbonne Université & CNRS, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France

³ Dipartimento di Fisica, Università della Calabria, 87036 Arcavacata di Rende, Cosenza, Italy

⁴ INFN-Cosenza, 87036 Arcavacata di Rende, Cosenza, Italy

⁵ Department of Physics, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003, USA

⁶ Department of Physics, University of Johannesburg, PO Box 524, Auckland Park 2006, South Africa

⁷ Institute for Theoretical Particle Physics and Cosmology, RWTH Aachen University, Sommerfeldstr. 16, 52074 Aachen, Germany

⁸ Imperial College, London SW7 2AZ, UK

⁹ Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas, Lisbon, Portugal

¹⁰ Department of Physics, Brandeis University, Waltham, MA, USA

¹¹ Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS/IN2P3, IP2I UMR 5822, 4 rue Enrico Fermi, 69100 Villeurbanne, France

¹² Dipartimento di Scienze Matematiche e Informatiche, Scienze Fisiche e Scienze della Terra, Università degli Studi di Messina, Via Ferdinando Stagno d'Alcontres 31, 98166 Messina, Italy

¹³ INFN Sezione di Catania, Via Santa Sofia 64, 95123 Catania, Italy

¹⁴ INFN, Laboratori Nazionali di Frascati, Via E. Fermi 40, 00044 Frascati, RM, Italy

¹⁵ University of Oregon, 1585 E 13th Ave, Eugene, OR 97403, USA

¹⁶ Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil

¹⁷ PRISMA+ Cluster of Excellence & Mainz Institute for Theoretical Physics, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 55099 Mainz, Germany

¹⁸ Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università degli Studi di Padova, Via Marzolo 8, 35131 Padua, Italy

¹⁹ INFN, Sezione di Padova, Via Marzolo 8, 35131 Padua, Italy

²⁰ School of Physics and Astronomy, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, UK

²¹ Particle Physics Department, Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Didcot, Oxon OX11 0QX, UK

²² Institut für Astroteilchenphysik, Karlsruhe Institute of Technology, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Germany

²³ Institut für Theoretische Teilchenphysik, Karlsruhe Institute of Technology, Engesserstraße 7, 76128 Karlsruhe, Germany

²⁴ Simon Fraser University, 8888 University Dr W, Burnaby V5A 1S6, Canada

²⁵ Department of Physics and Astronomy, University College London, London, UK

²⁶ Texas A&M University, College Station, USA

²⁷ School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China

²⁸ Department of Physics, The Ohio State University, Columbus, OH 43210, USA

²⁹ Instituto Galego de Física de Altas Enerxías (IGFAE), Universidade de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, Spain

³⁰ Université Clermont Auvergne, CNRS/IN2P3, LPCA, 63000 Clermont-Ferrand, France

³¹ Department of Physics, The University of Adelaide, Adelaide, SA 5005, Australia

Published online: 12 September 2025

Springer

Un article...

- Répond à une question précise
- Explique une méthode
- Donne des **résultats réutilisables**

Puis la recherche continue

- D'autres équipes vérifient et comparent
- **De nouvelles analyses apparaissent**
- Les idées sont regroupées dans des synthèses

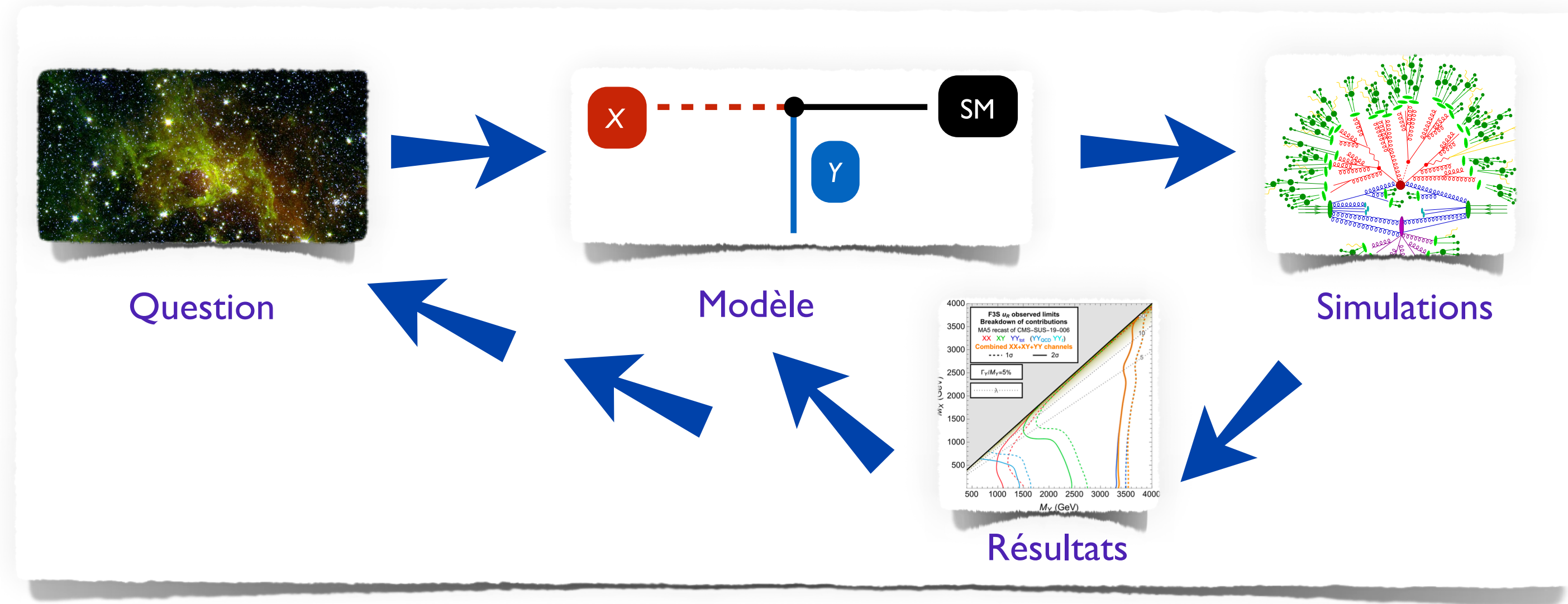
Exemple : un *whitepaper* (une synthèse collective)

- Bilan des connaissances actuelles
- Questions ouvertes
- **Pistes pour le futur**

Spoiler : ça ne marche presque jamais du premier coup

Tout avait l'air linéaire...

- Question → modèle → calculs → données → article



En réalité...

- Les données peuvent contredire l'idée
- Les calculs peuvent être améliorés
- Les modèles peuvent être reformulés
- Les questions changent en cours de route

Chercher, c'est souvent revenir en arrière...
mais avec plus d'informations qu'avant

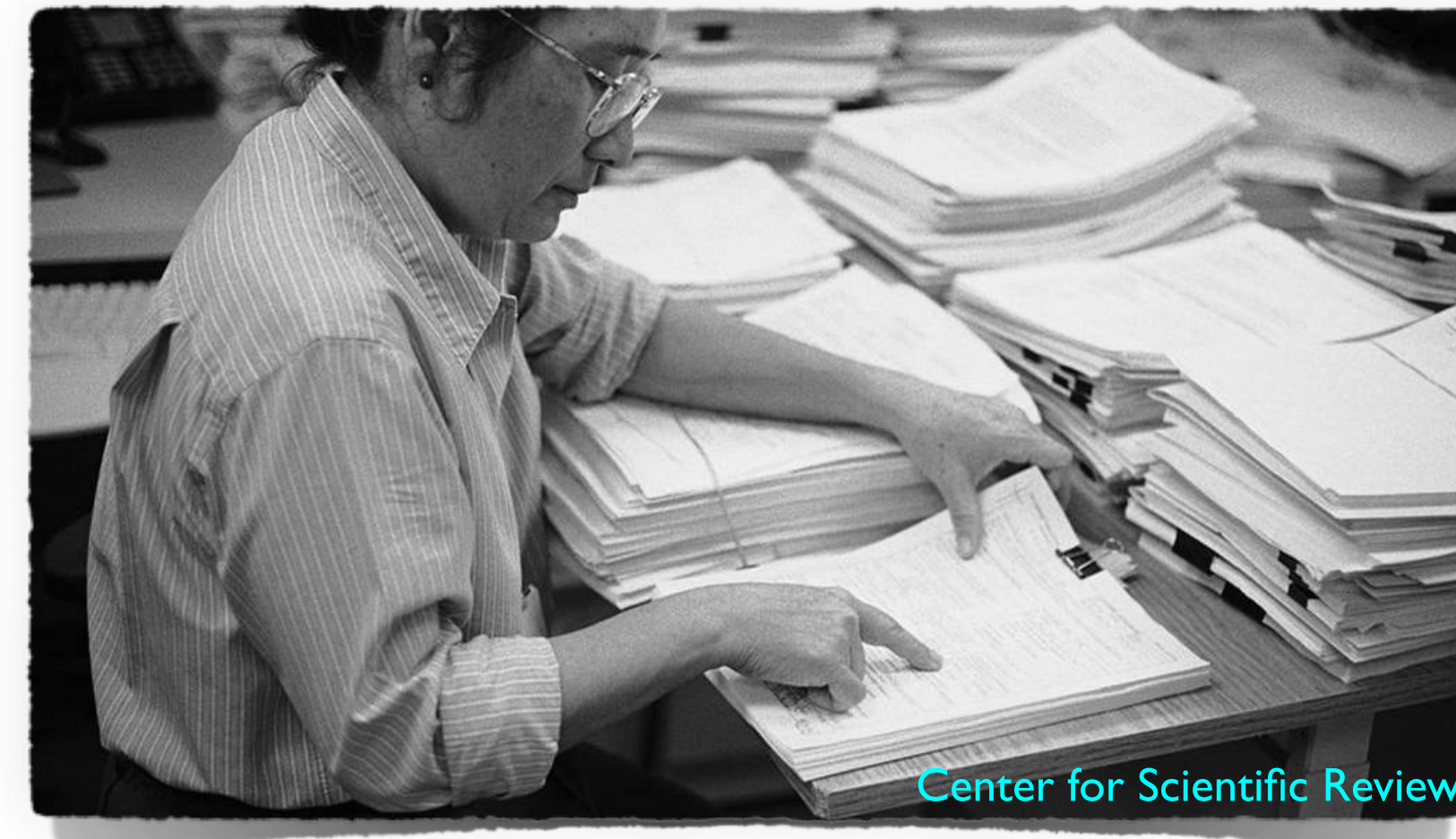
La science a prévu qu'on puisse se tromper

Se tromper fait partie du processus

- Une hypothèse peut être fausse
- Un calcul peut contenir une erreur
- Une mesure peut être mal comprise

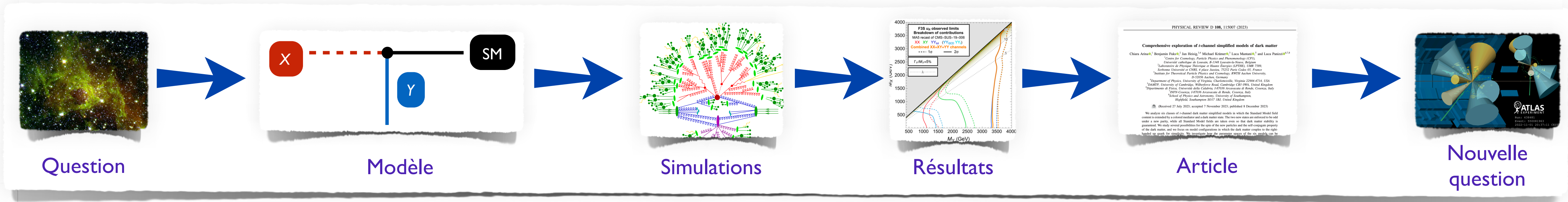
Pour limiter les erreurs

- Comparer plusieurs méthodes
- Vérifier les calculs
- Tester avec différents jeux de données
- Faire relire par des experts
- Permettre à d'autres équipes de refaire l'analyse



La force de la science n'est pas de ne jamais se tromper :
c'est d'organiser la correction des erreurs

De la question à la connaissance



Faire de la recherche, c'est transformer une question en preuve

- Formuler clairement une idée
- En faire une hypothèse testable
- Prédire ses traces
- Confronter les prédictions aux données
- Partager les résultats pour que d'autres **les critiquent et les réutilisent**

La science n'est pas un livre fermé :
c'est une enquête collective