

**On sait de quoi vous êtes faits  
Enfin... *presque***

I siècle de découvertes en physique des particules...  
et encore tellement à apprendre

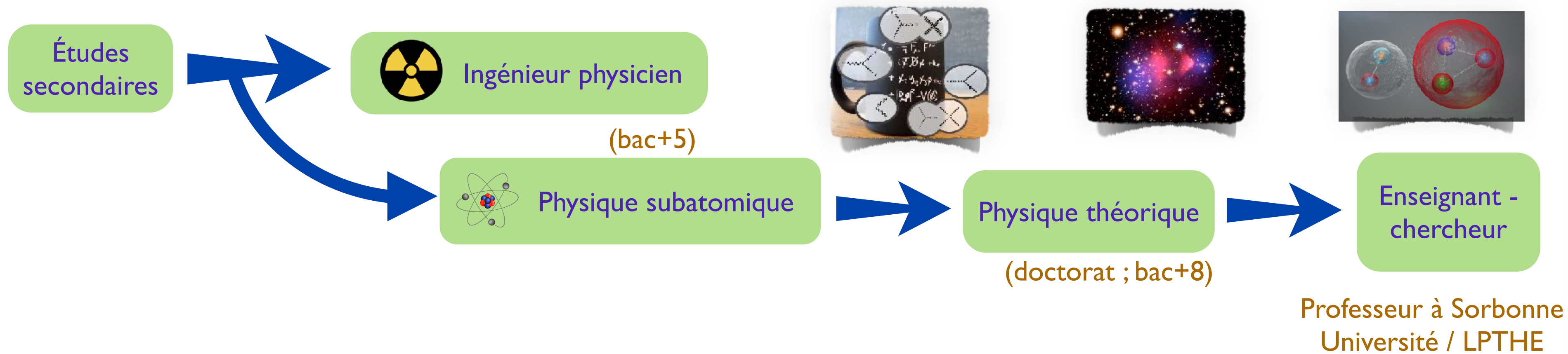
**Benjamin Fuks**

**LPTHE / Sorbonne Université**

**SPRINT Summer Camp 2026 – 17 juin 2026**

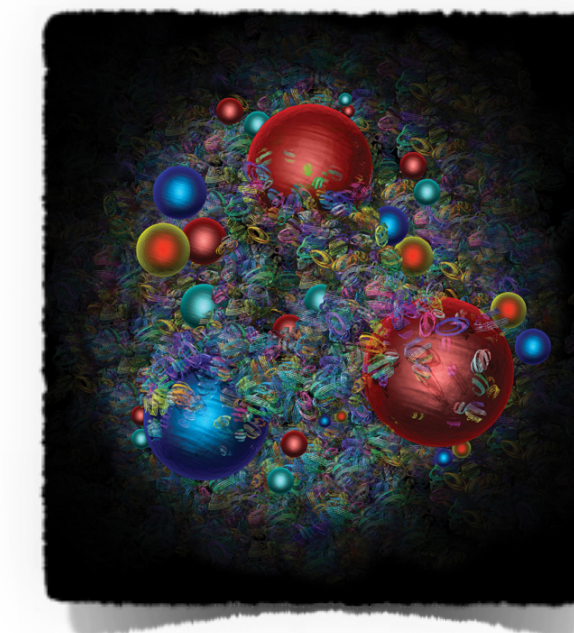
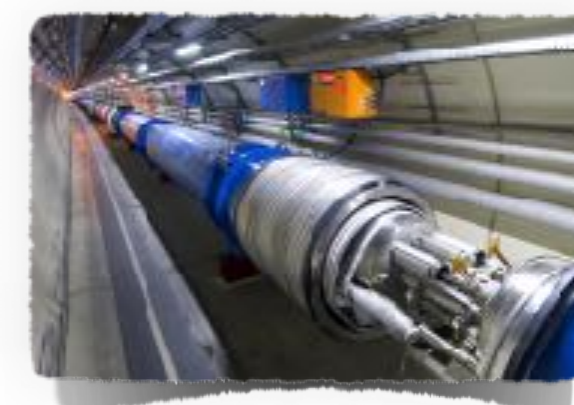
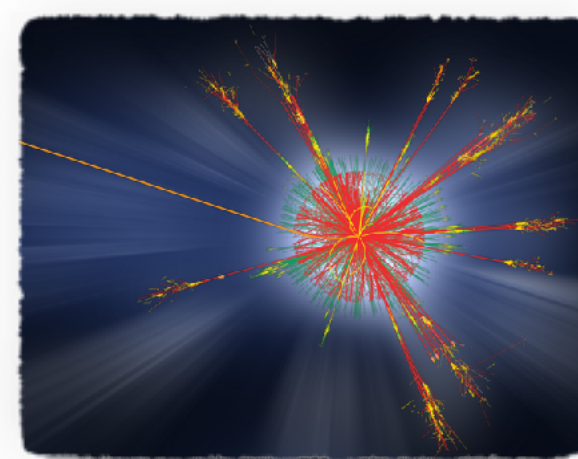
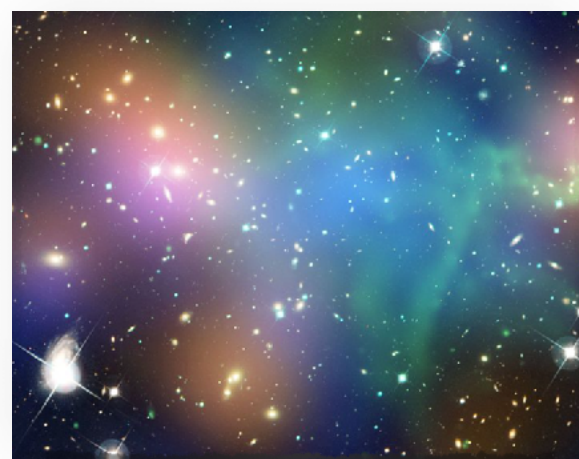
# Mon métier : explorer le 'presque'

## Un parcours non linéaire



## Recherche en physique des particules théorique

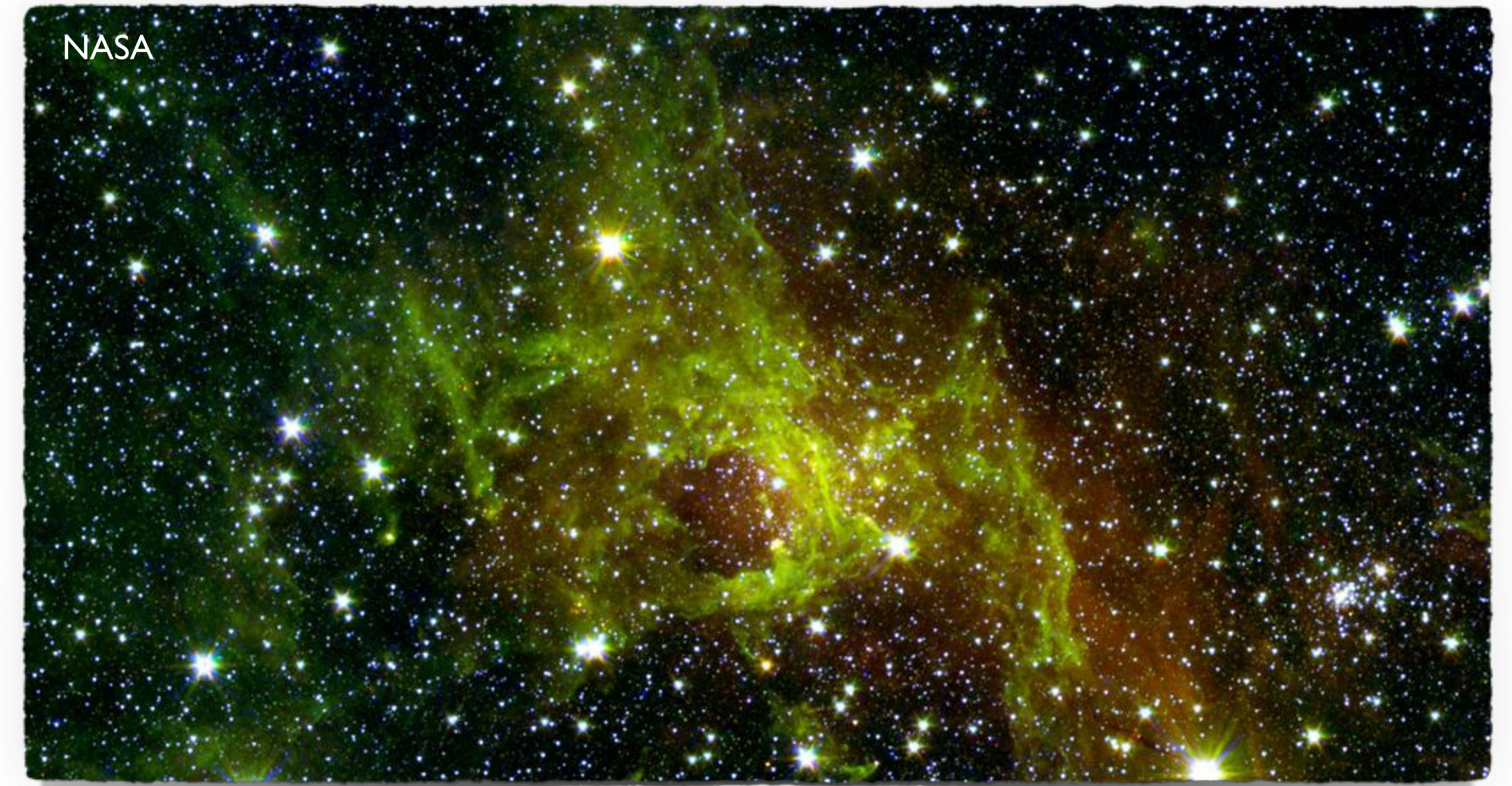
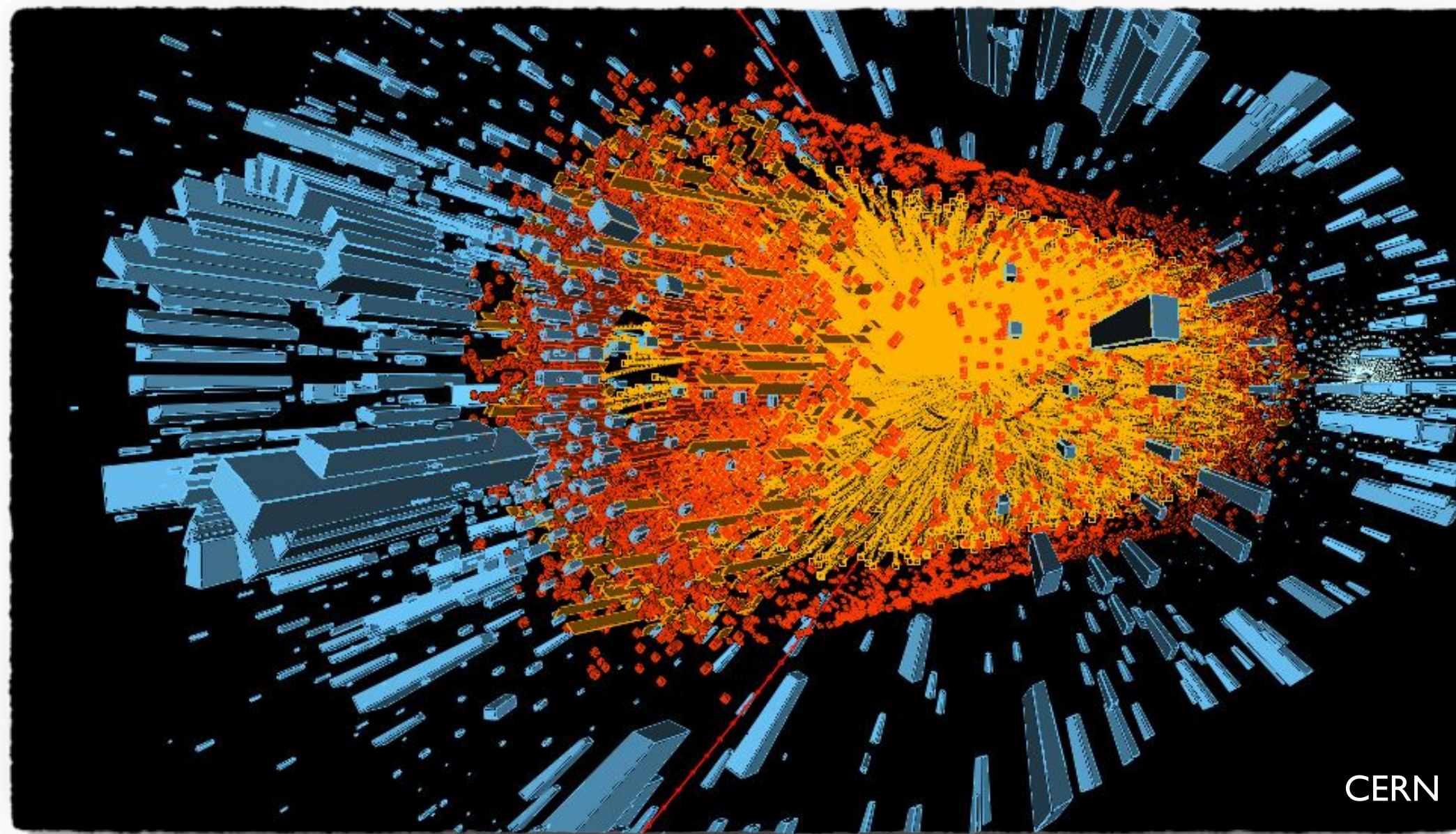
- Imaginer, calculer et tester des idées
- Comprendre les briques élémentaires de l'Univers
- Relier ce que l'on sait à ce qui reste mystérieux
  - **Que manque-t-il à notre carte de l'Univers ?**



# De quoi est faite la matière ?

## Des particules minuscules...

- Comprendre la matière
- Raconter **l'histoire de l'Univers**



## Deux questions

- De quelles briques sommes-nous faits ?
- Quelles règles les font agir entre elles ?

Objectif : comprendre les règles du jeu

# 118 briques pour tout construire ?

## Le tableau périodique

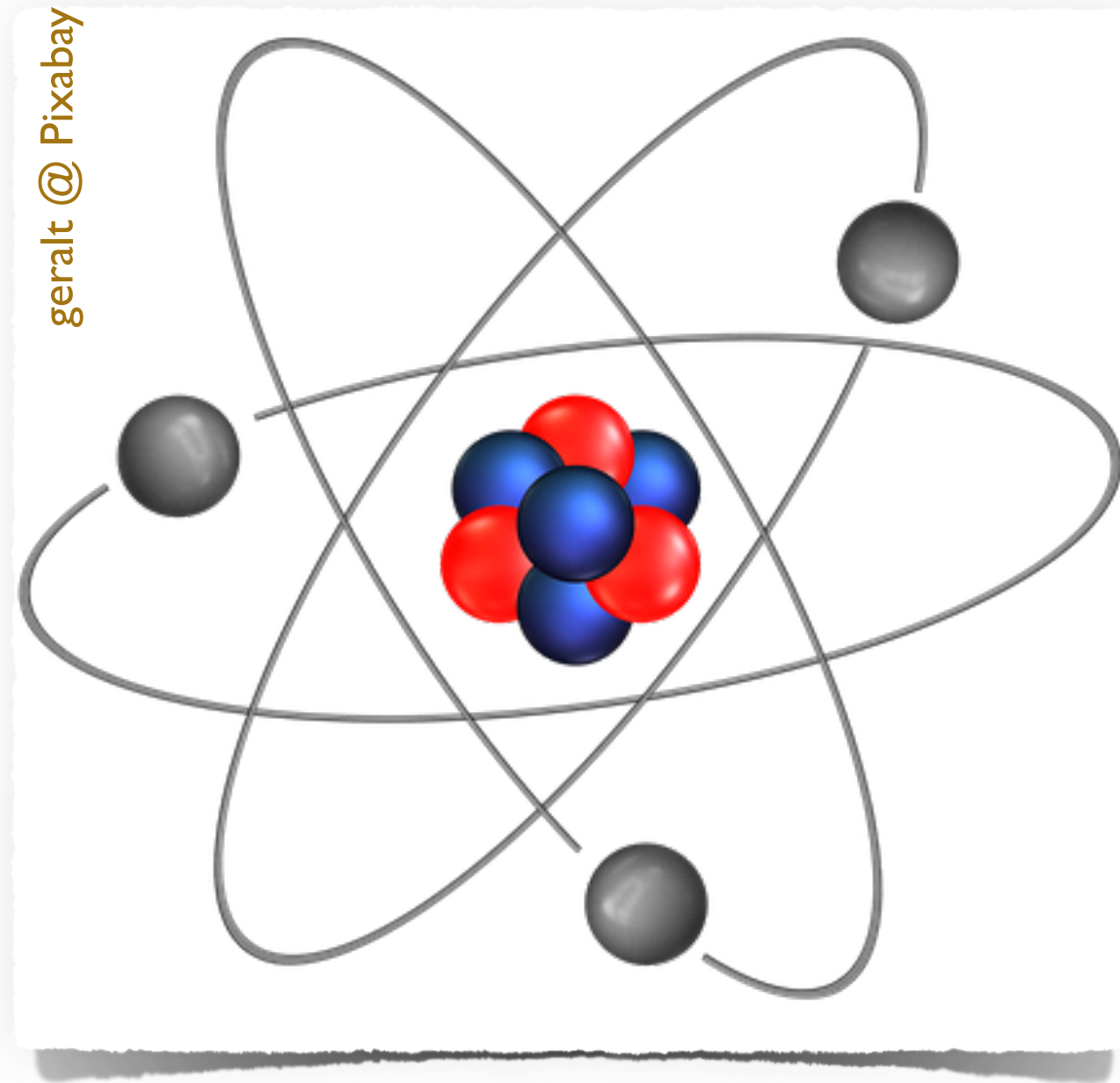
- 118 éléments connus
  - Hydrogène, carbone, oxygène, fer, etc.
- Carte incroyablement utile de la matière
  - Toute la matière semble s'y retrouver
- Mais... est-ce que ce sont vraiment les briques de base ?
  - Un atome est-il élémentaire ?

Surprise : ouvrons l'atome...

ExplorersInternational @ Pixabay

Group→	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
↓Period																		
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
Lanthanides				57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
Actinides				89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

# L'atome : presque vide, mais pas simple



Le modèle de Rutherford (1911) → les atomes ont une structure

- Un noyau chargé positivement au centre
- Des électrons chargés négativement autour
- Beaucoup de vide...

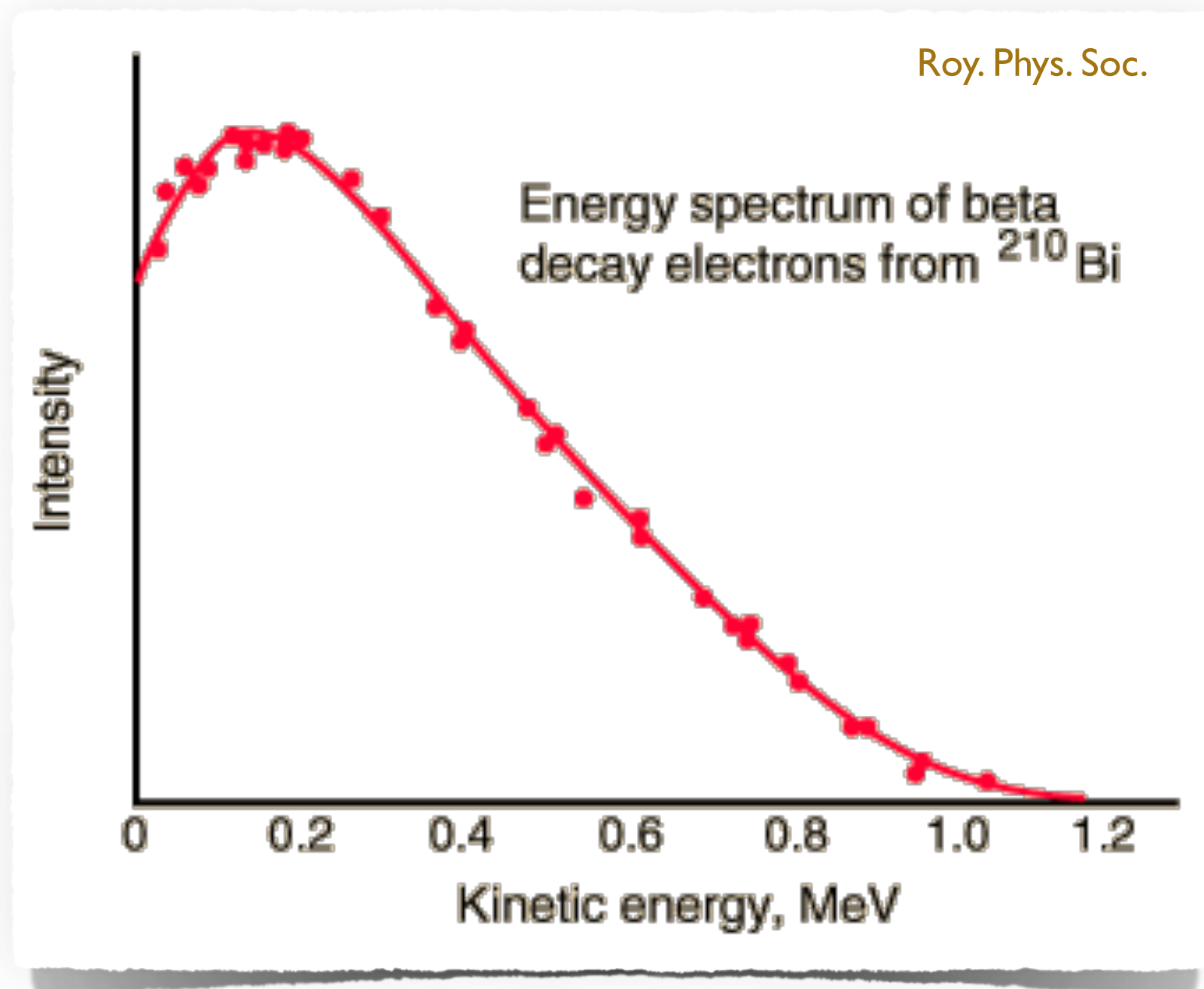
Atome = noyau + électrons

La structure du noyau

- Des **protons** chargés positivement
- Des **neutrons** (Chadwick, 1932)

Noyau = protons + neutrons

# La radioactivité : une particule fantôme 🧛

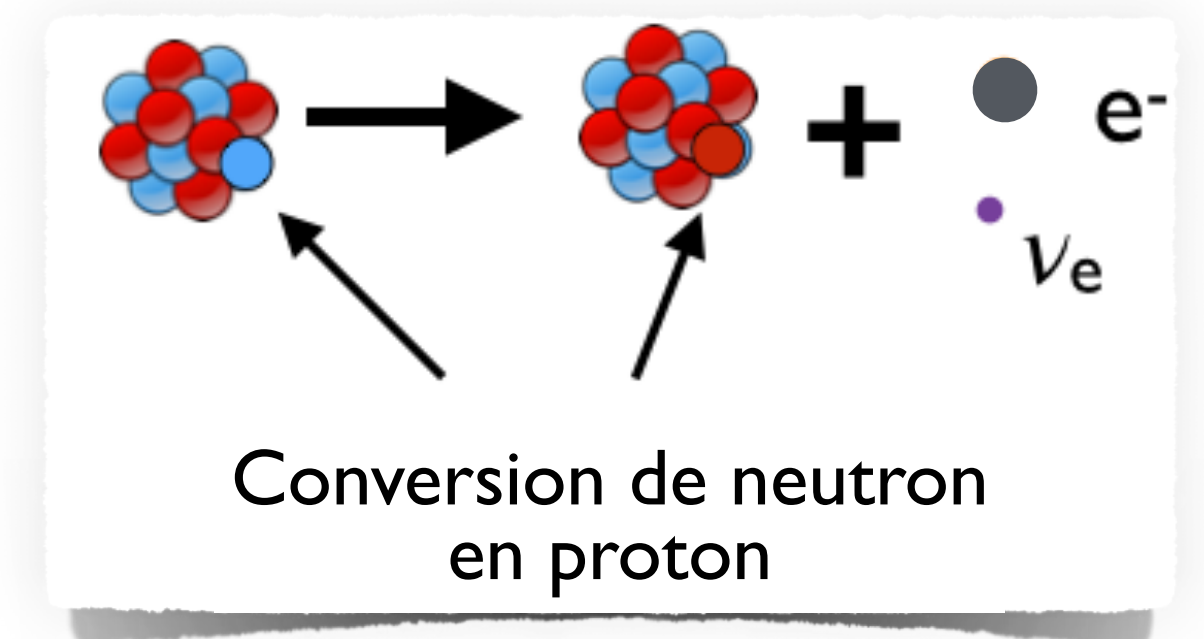


## Instabilité de certains noyaux atomiques

- Un noyau peut se transformer
  - Un **neutron** peut devenir un **proton** en émettant un électron
- Une partie de **l'énergie semble disparaître**
  - $n \rightarrow p + e^- + ?$

## Hypothèse : une particule invisible emporte l'énergie manquante

- Solution : le **neutrino**
- Particule quasi invisible
  - traverse presque toute la matière

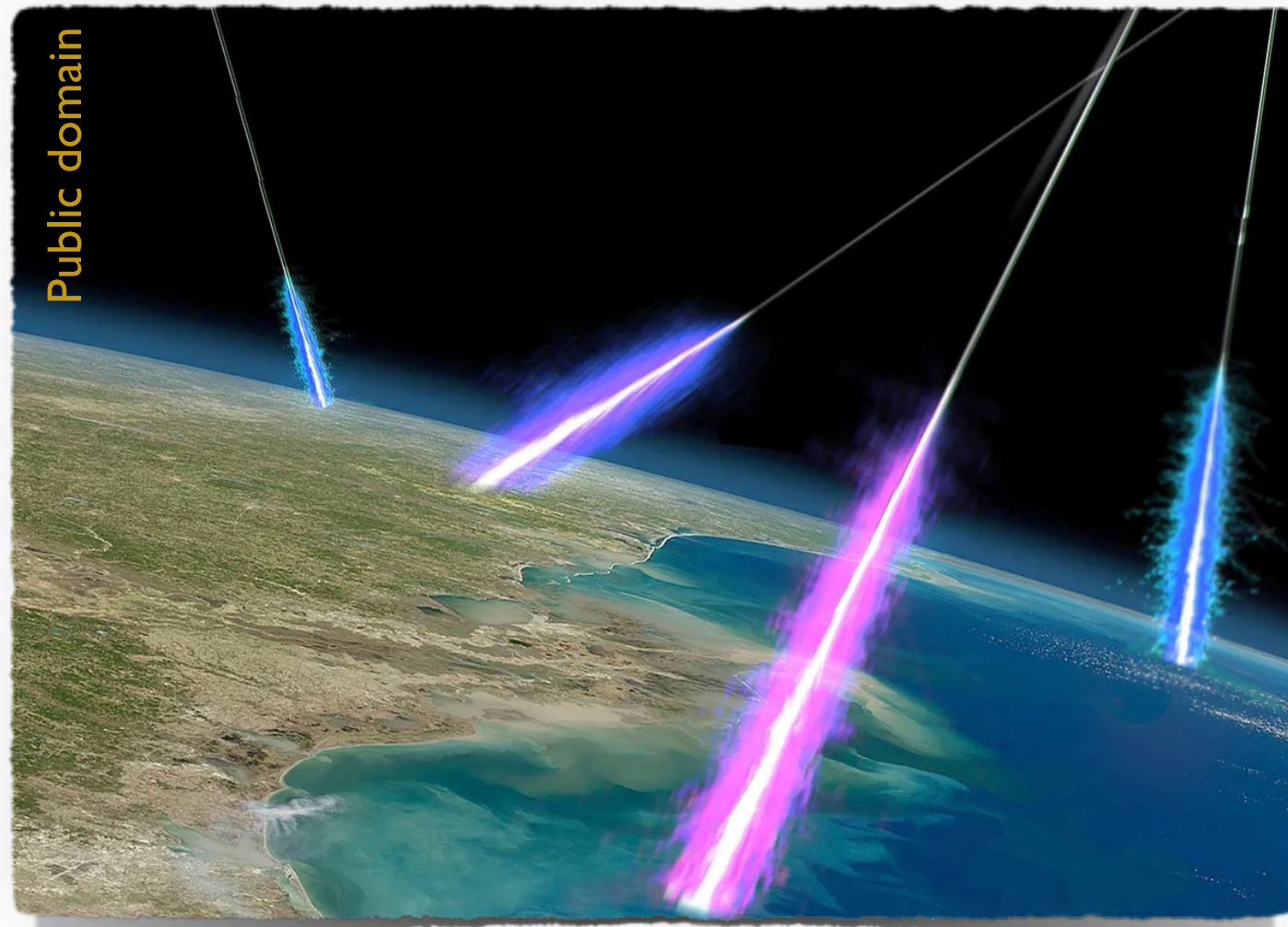


Bilan provisoire : 4 briques pour comprendre la matière  
**proton** + électron + **neutron** + **neutrino**

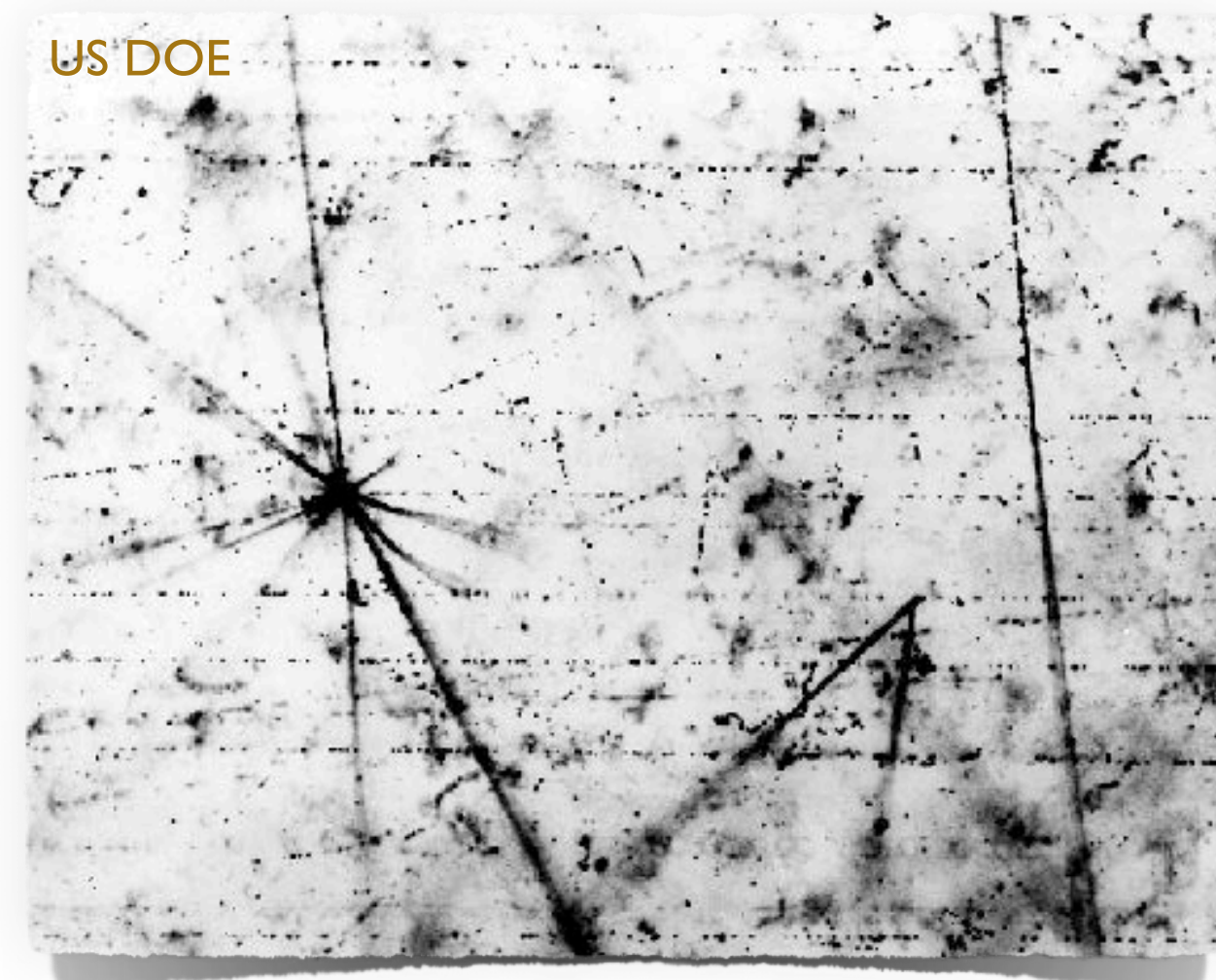
# Des collisions pour explorer la matière

## Accélérateurs naturels : les rayons cosmiques

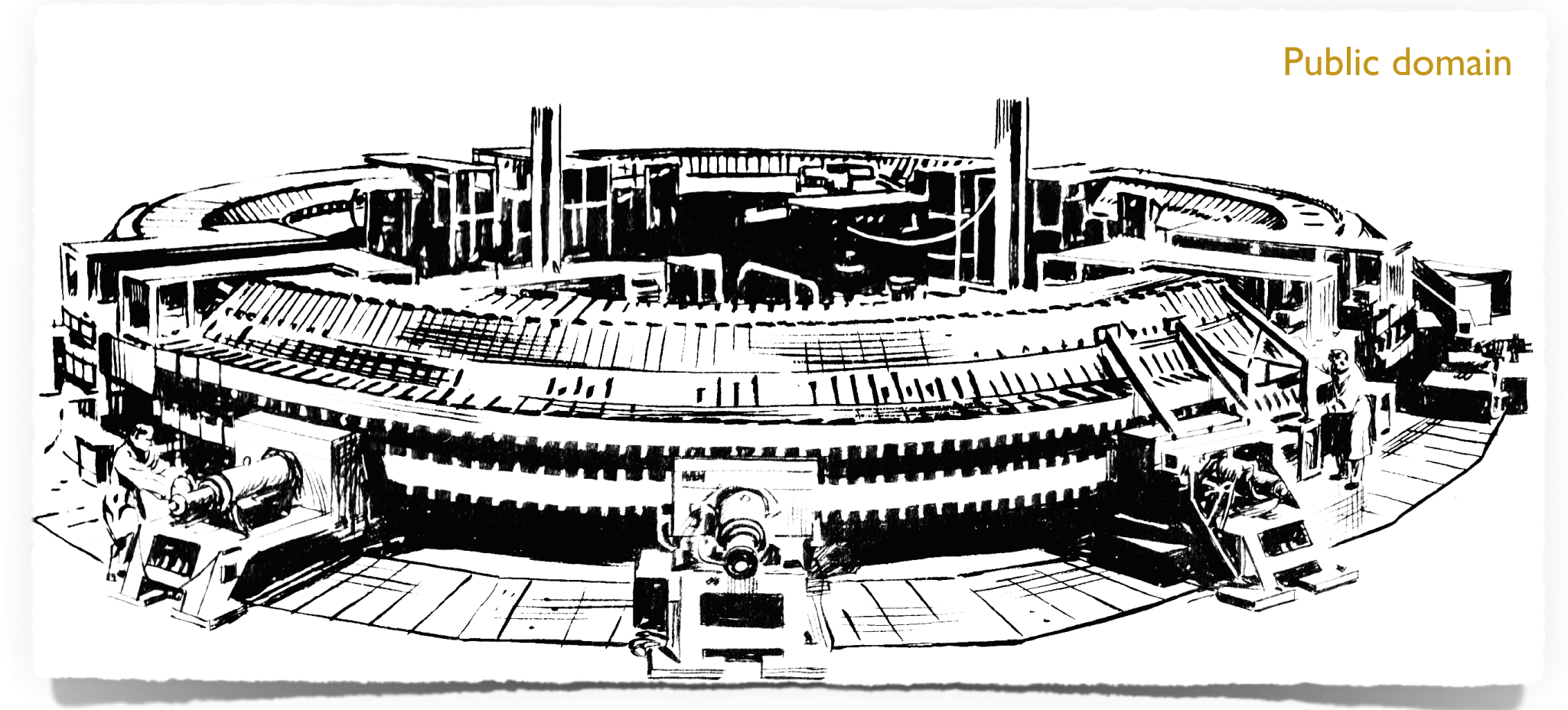
- Particules énergétiques venant de l'espace
- **Collisions dans l'atmosphère**
- Traces dans les détecteurs (émulsions photographiques)
- Beaucoup d'énergie, mais peu de contrôle



Public domain



US DOE



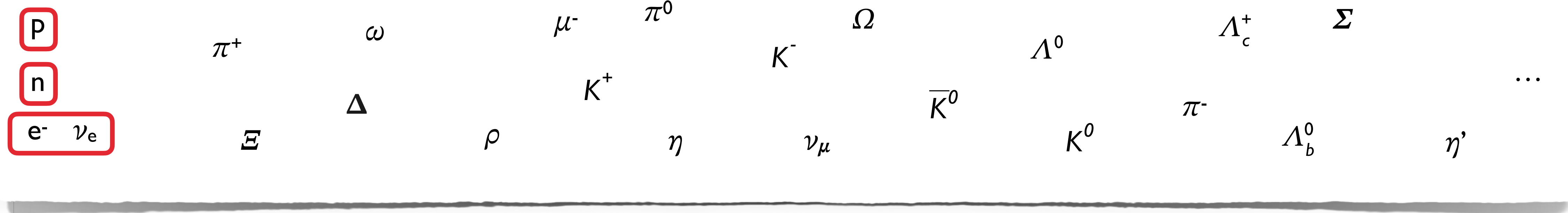
Public domain

## Accélérateurs humains : les collisionneurs

- Particules accélérées par des **champs électriques**
- Trajectoires guidées par des **aimants**
- Collisions contrôlées

Collisions + énergie → nouvelles particules  
Plus d'énergie → explorer plus petit

# Le 'zoo' des particules



## Les collisions révèlent de nombreuses particules

- Certaines vivent très peu de temps
- Toutes ne semblent pas fondamentales
- Y a-t-il un **ordre caché** ?

Chercher les briques derrière le zoo...

# Le grand rangement : les quarks

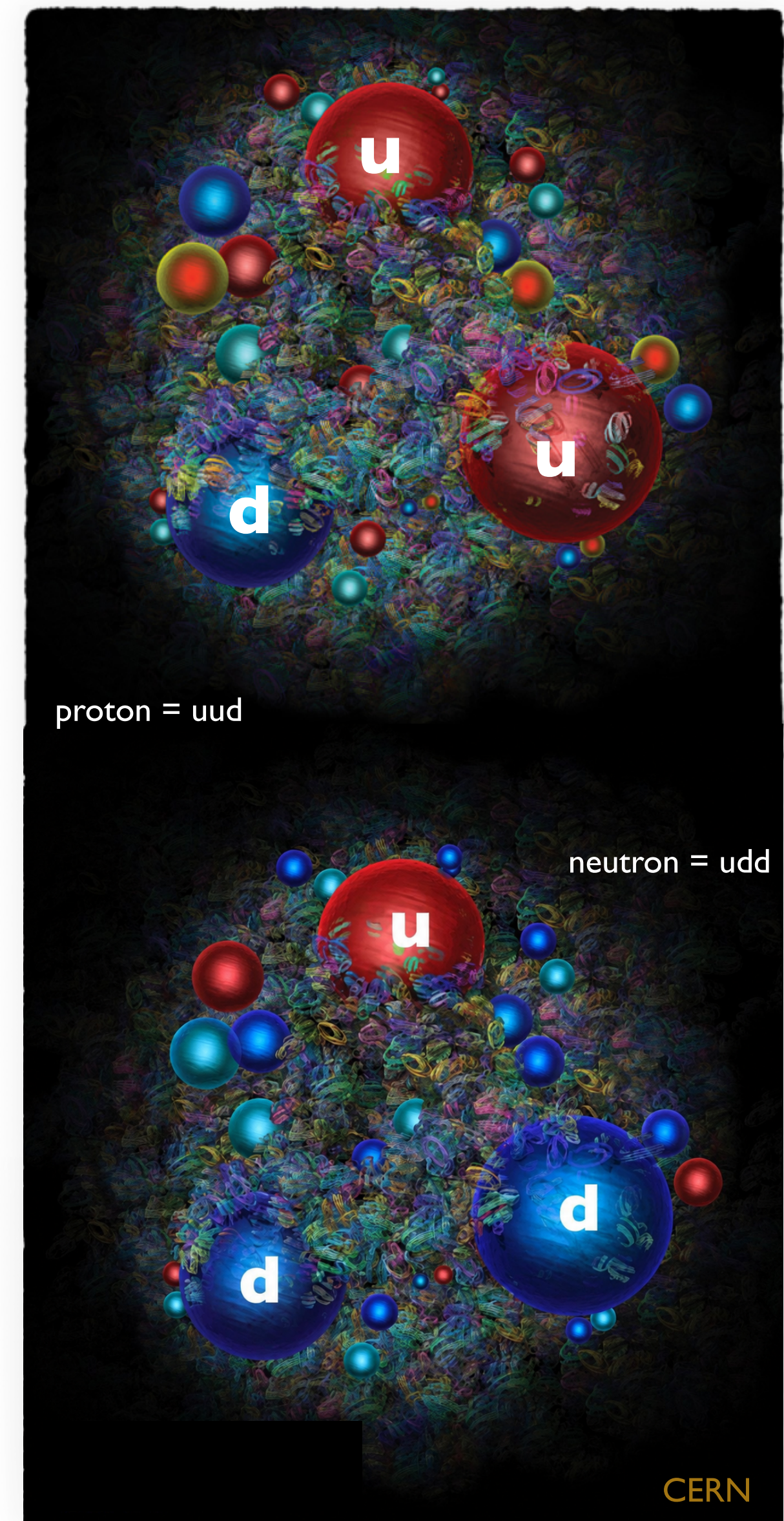
Beaucoup de particules du 'zoo' ne sont pas fondamentales

- Assemblages de briques plus petites : les quarks
  - Proton = up + up + down
  - Neutron = up + down + down
- Les quarks sont parmi les briques les plus fondamentales connues

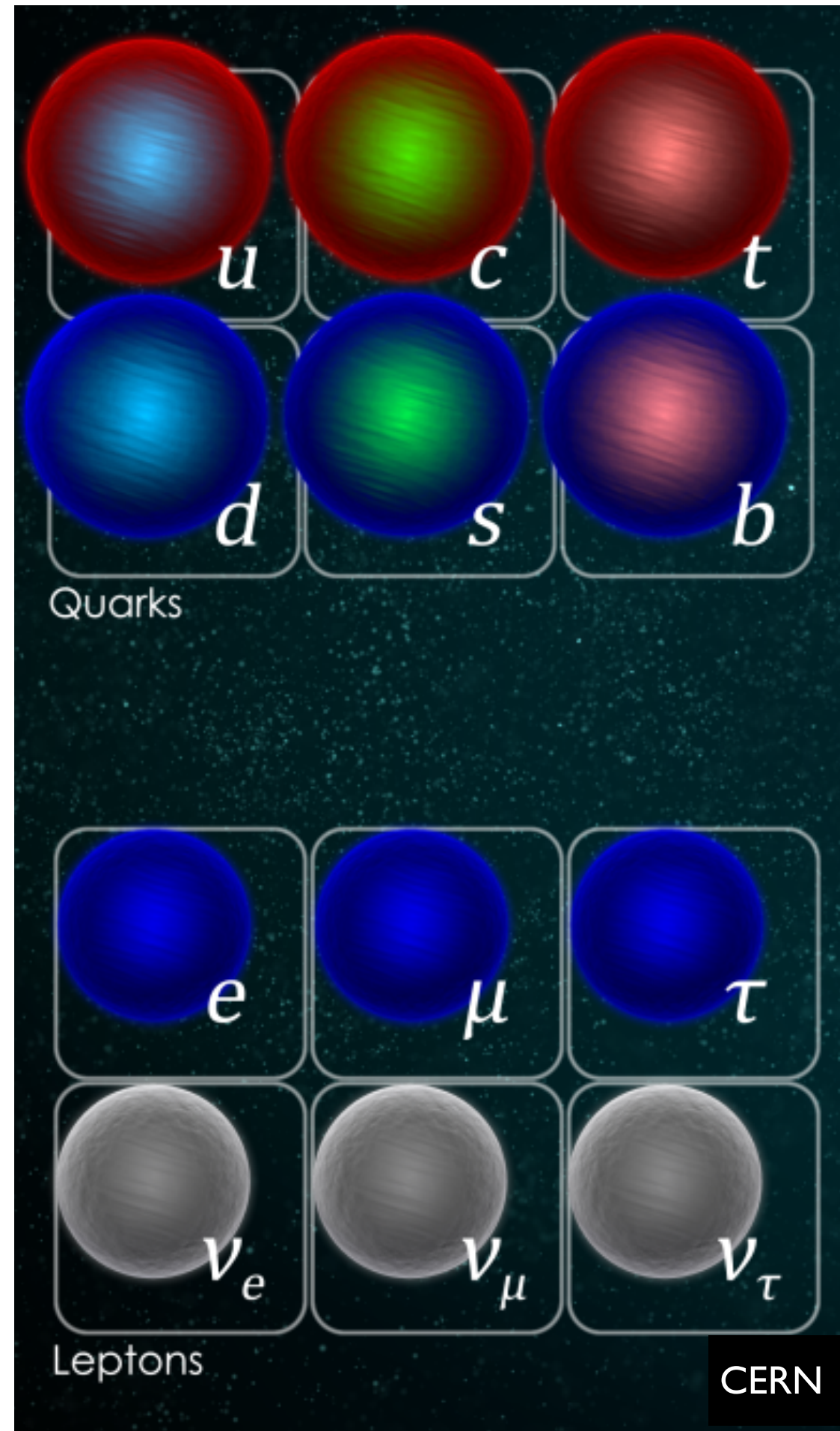
Mais les quarks ne sont pas seuls...

- Où replacer l'électron, les neutrinos et leurs cousins ?

Le zoo commence à s'organiser...



# Trois familles de particules de matière



## Deux types de briques

- Quarks : forment les protons, neutrons et de nombreuses particules du zoo
- Leptons : électrons, muons, taus et neutrinos

## 1<sup>ère</sup> famille

- Quarks up et down
- Électron et neutrino électronique
- Suffit pour construire la **matière ordinaire**

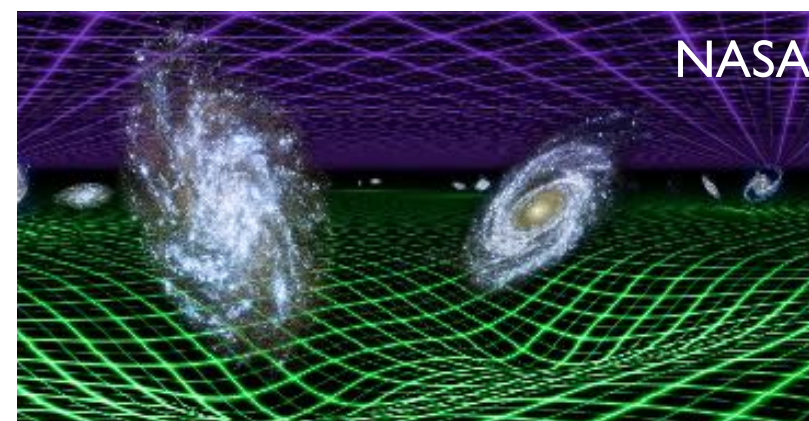
## 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> familles

- Plus lourdes et instables
- **Même motif répété trois fois**
- Observées dans les collisions à haute énergie

# Les règles du jeu : les interactions

## Gravitation 🍏

- Hors Modèle Standard
- À grande échelle
  - Planètes, étoiles, galaxies



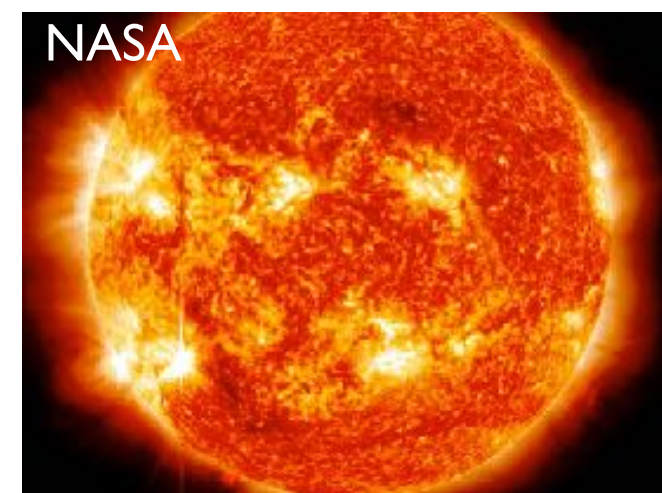
## Électromagnétisme ⚡

- Particules chargées
- Atomes, lumière, chimie
- Messenger : photon



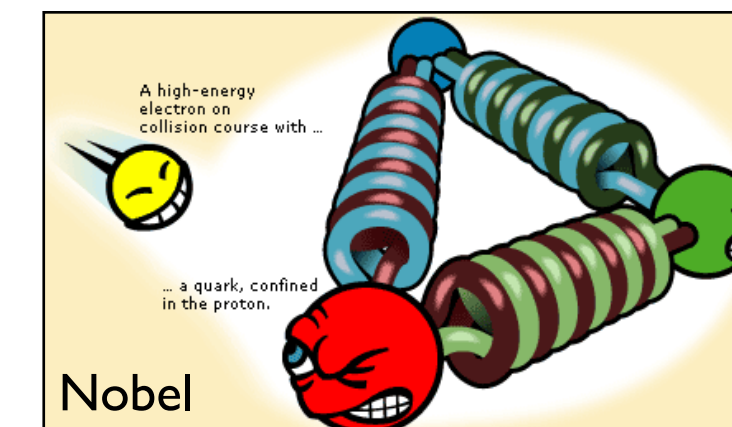
## Interaction faible ☢️

- Transforme les particules
- Radioactivité, neutrinos, étoiles
- Messagers : bosons W et Z



## Interaction forte 🌀

- 'Colle' les quarks
- Protons, neutrons, noyaux
- Messagers : gluons



Briques de matière + messagers des interactions  
= Modèle Standard

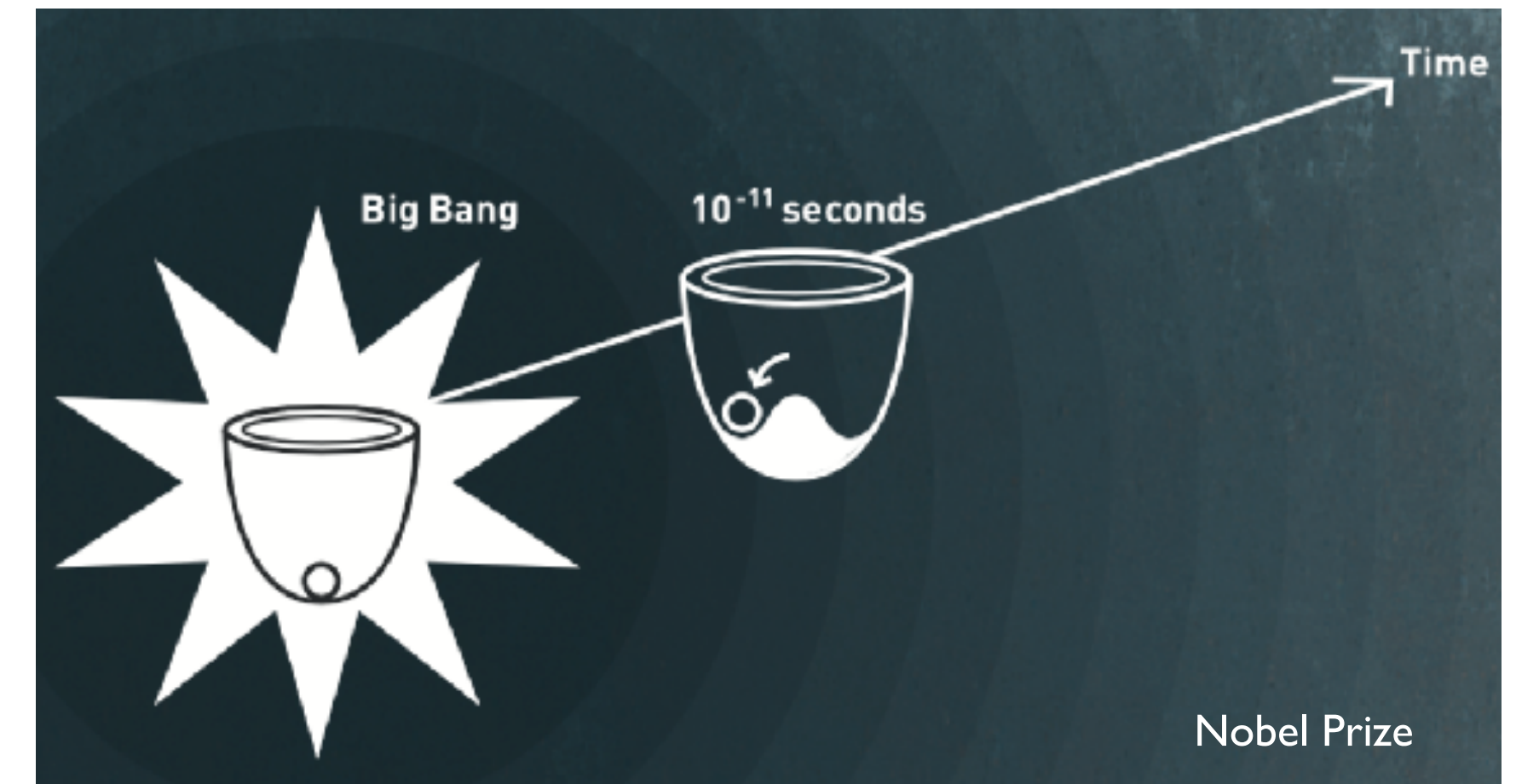
# La masse : une symétrie cachée

## Le Modèle Standard, une théorie très symétrique

- Interactions très bien décrites
- Problème : certaines particules devraient être **sans masse**
  - Mais les leptons chargés, les quarks et les bosons W et Z ont une masse

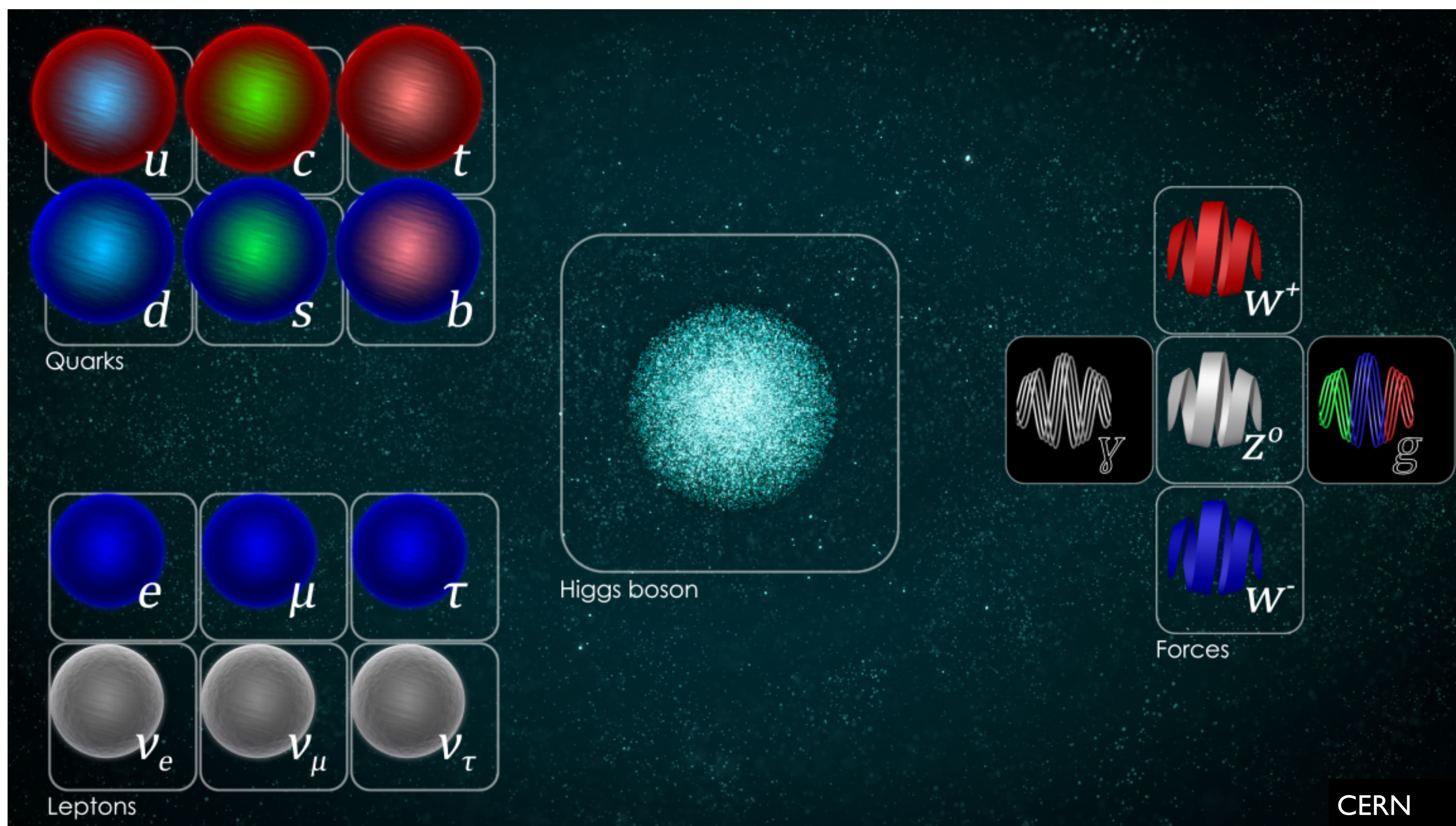
## Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

- Cache une partie de la symétrie
- Permet à certaines particules d'**acquérir une masse**
- Implique une nouvelle particule : le **boson de Higgs**



2012 : observation du boson de Higgs au LHC

# Le Modèle Standard : la carte actuelle de l'infiniment petit



## Le Modèle Standard en 3 lignes

- Les particules de matière : quarks et leptons
- Les messagers des interactions : photon, gluons, W et Z
- Le boson de Higgs : lié à la masse des particules

## Derrière la carte : des outils théoriques puissants

- Mécanique quantique
- Relativité restreinte
- Théorie des champs

Une carte testée avec une précision extraordinaire...  
Mais qui ne raconte pas toute l'histoire

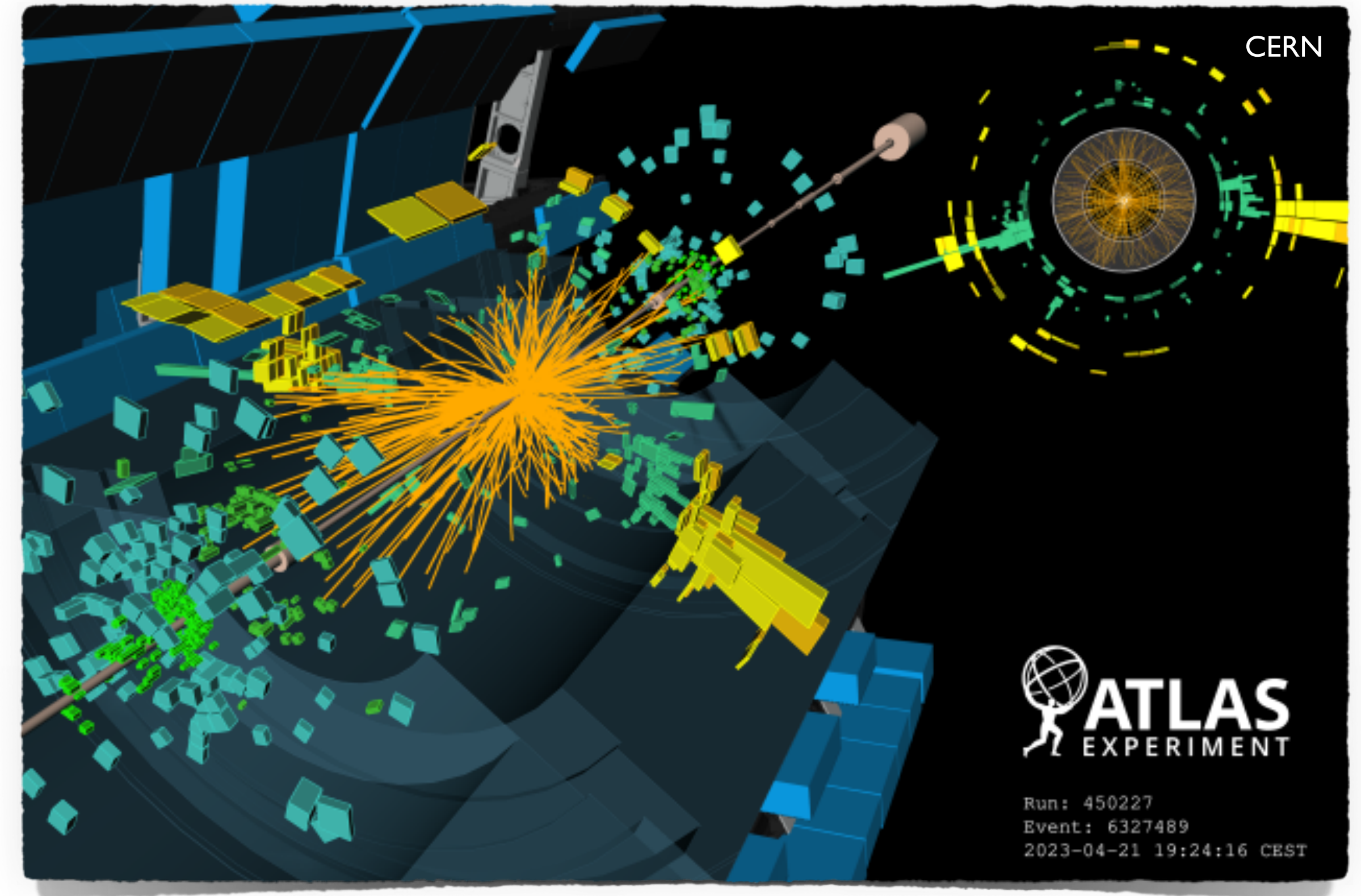
# Comment tester la carte ?

## Tests du Modèle Standard

- Prédire ce que les **collisionneurs** doivent produire
- Observer les traces dans les **détecteurs**
- Comparer **théorie et données**

## Des outils hors norme

- Accélérateurs géants
- Détecteurs ultra-précis
- Informatique et données massives
- Collaborations internationales
- **Retombées parfois inattendues**



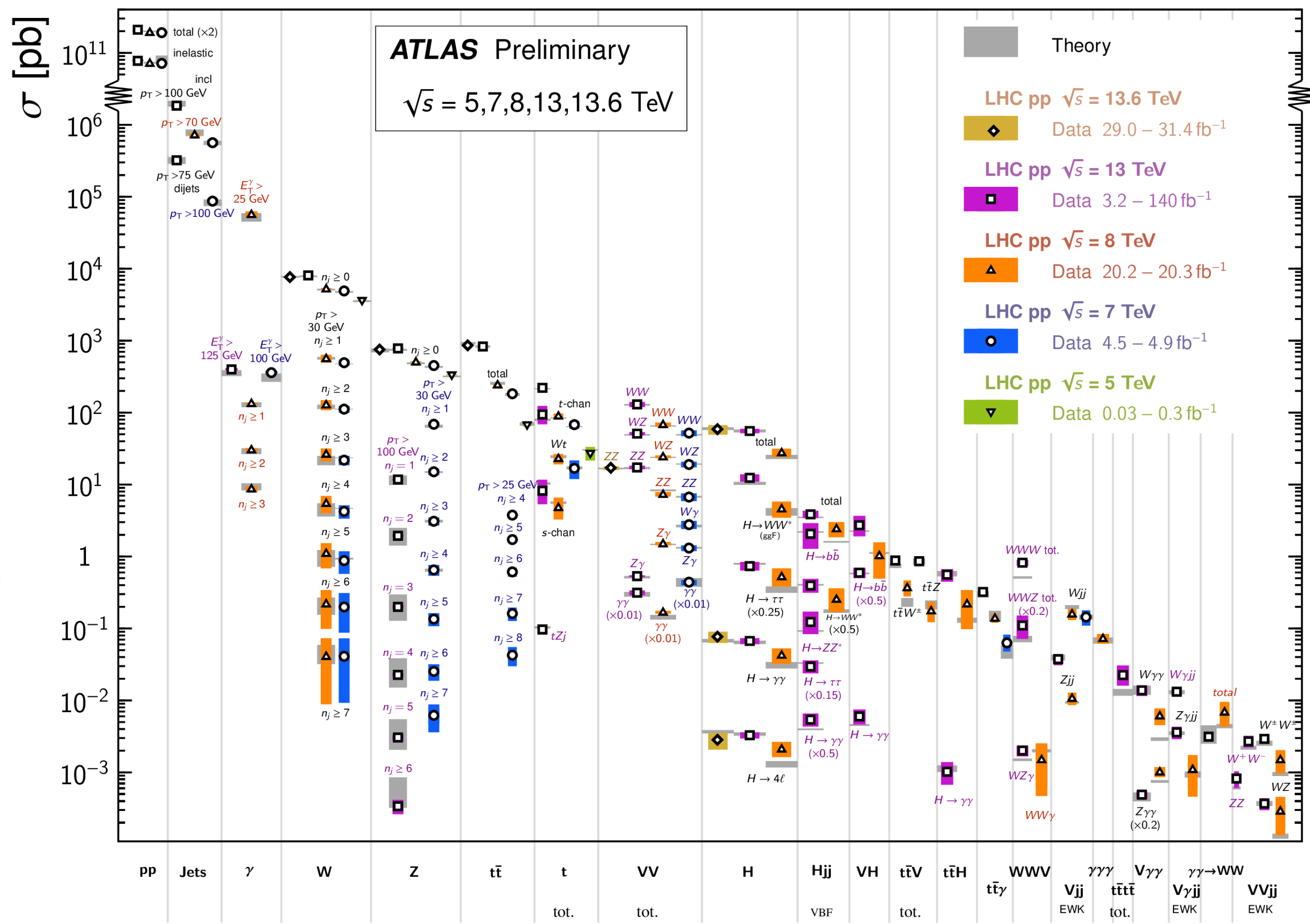
Si la carte est fautive ou incomplète, les données peuvent laisser des indices

# Une carte redoutablement efficace

Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: June 2024

[ATLAS-PHYS-PUB-2024-011]



Des milliers de mesures comparées aux prédictions

- On 'voit' les particules
- On mesure leurs propriétés **précisément**
- Accord spectaculaire !

Différents processus mesurés au LHC par ATLAS

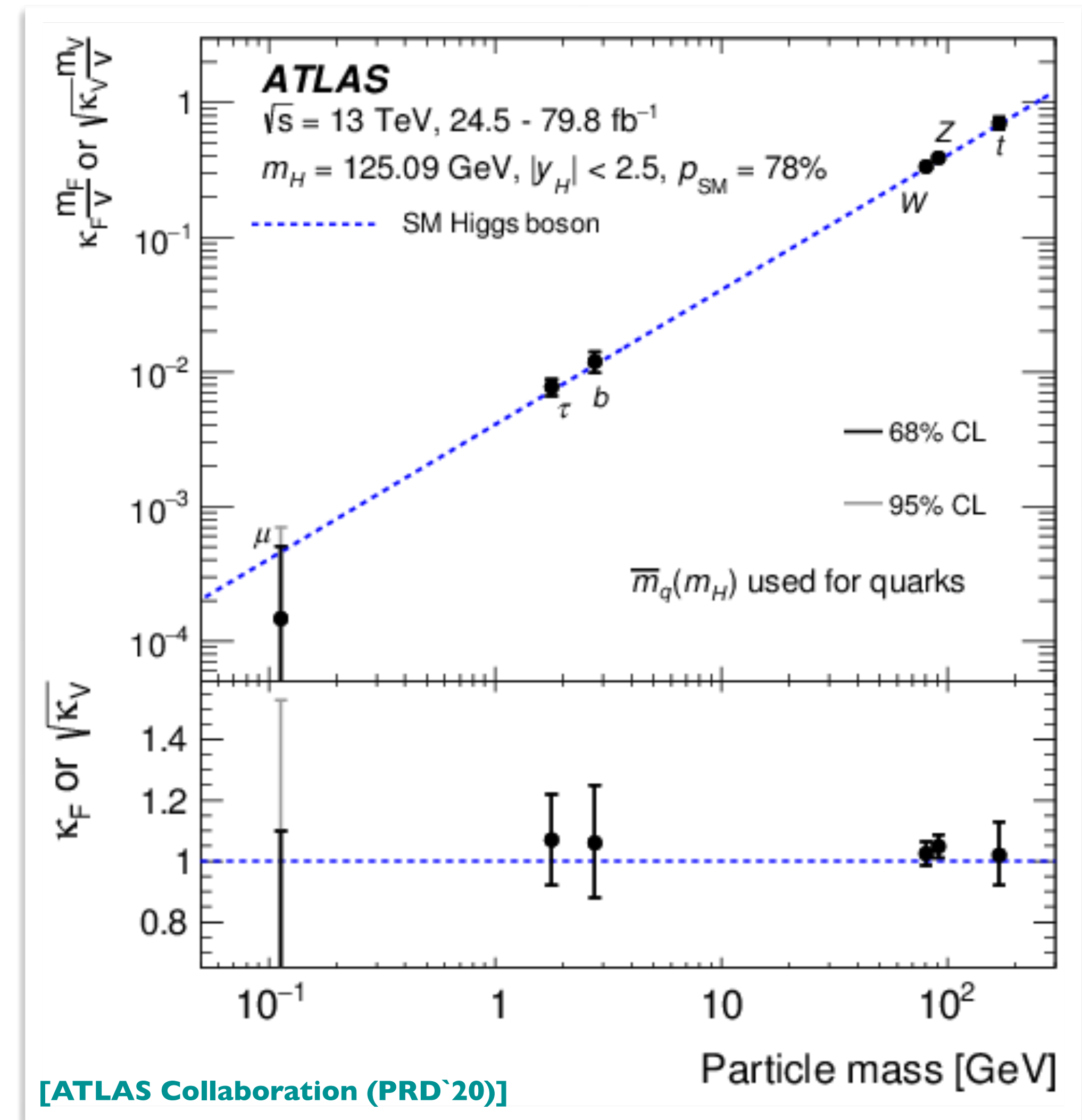
- Un point = une mesure
- Les bandes = les prédictions

# Le Higgs : la dernière grande pièce confirmée

## Une prédiction du Modèle Standard devenue réalité

- Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs implique une nouvelle particule
- **Observation au LHC en 2012**
- Depuis : mesure de ses propriétés
  - ➔ Plus une particule est massive, plus elle interagit fortement avec le Higgs

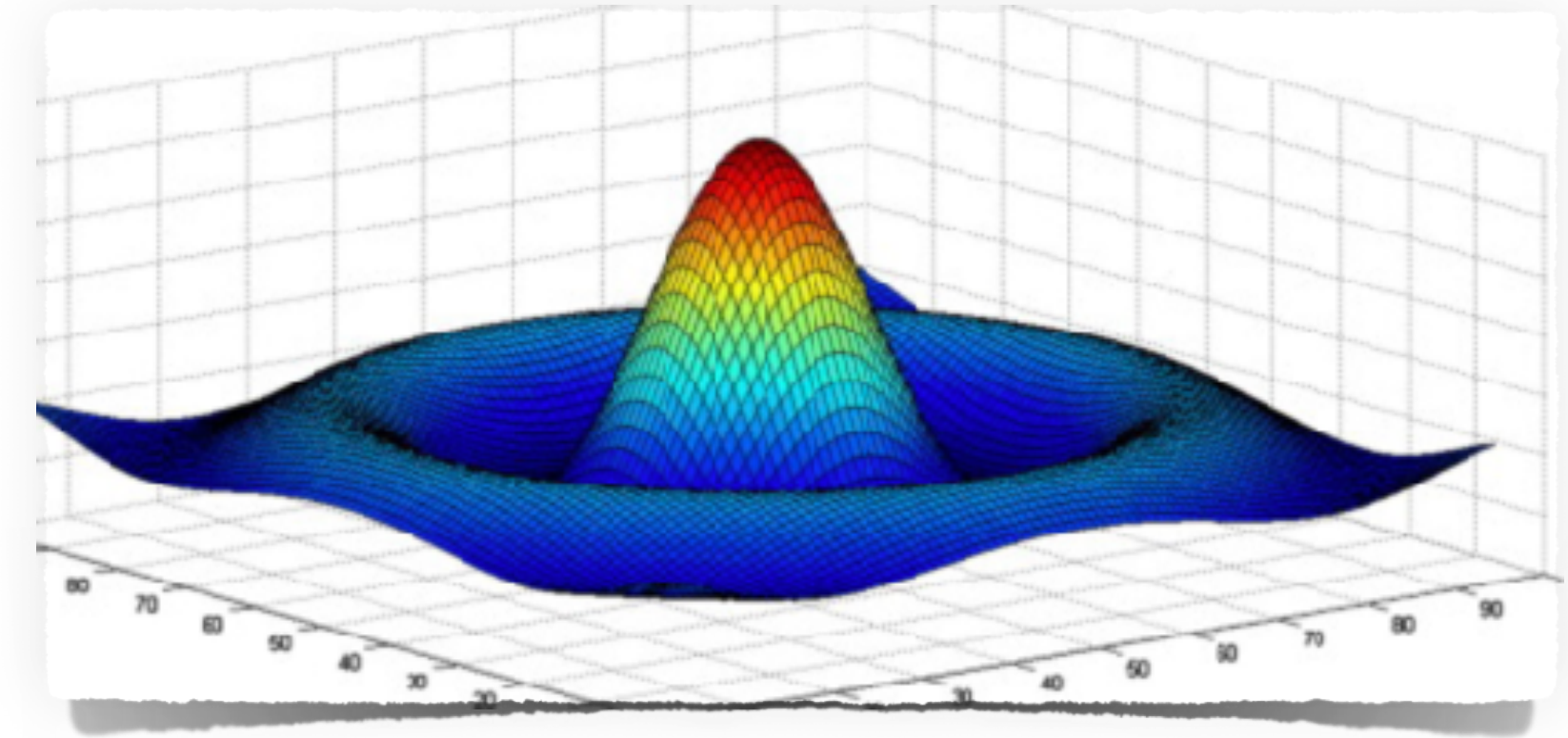
Le Higgs se comporte comme prévu par le Modèle Standard



# Une carte précise... mais incomplète

Le Modèle Standard explique énormément de choses

- Particules de matière
- Interactions fondamentales
- Higgs et masses



Beaucoup de grandes questions ouvertes

- De quoi est faite la matière noire ?
- Pourquoi les neutrinos ont-ils une masse ?
- Comment intégrer la gravité
- Pourquoi l'Univers contient-il si peu d'antimatière ?

Un modèle peut être extraordinairement efficace... et pourtant incomplet

# Comment chercher ce qui manque ?

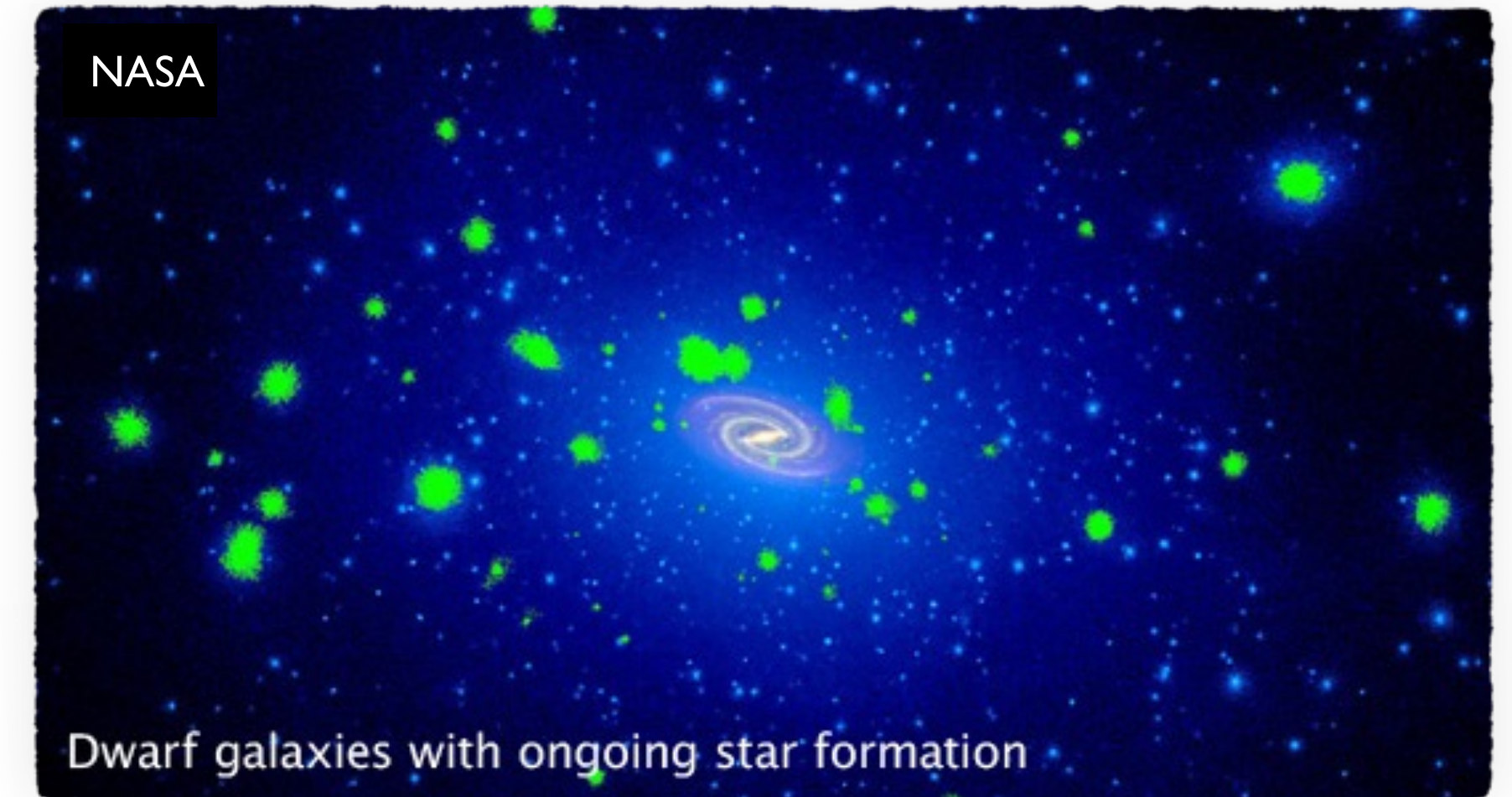
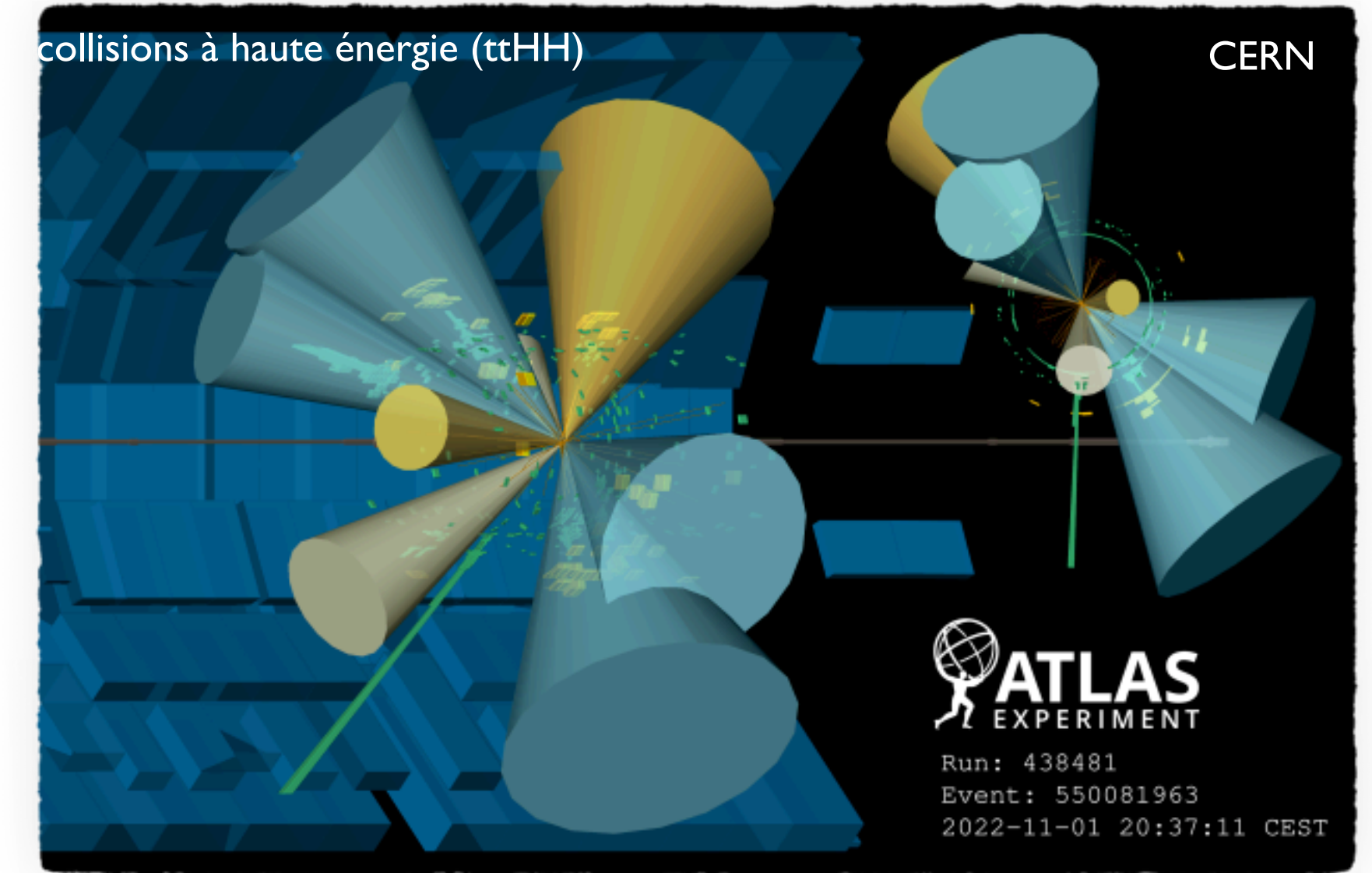
## Pourquoi aller au-delà du Modèle Standard ?

- Questions ouvertes
- Limites conceptuelles
- Anomalies dans les données

## Stratégies expérimentales

- Chercher de nouvelles particules (collisions à haute énergie)
- Mesurer très précisément (petits écarts théorie/données)
- Écouter l'Univers (matière noire, neutrinos, gravité)

La nouvelle physique peut être directe  
ou cachée dans de petits indices



# Les neutrinos : le retour de la particule fantôme 🧛 🧛 🧛

## Les neutrinos : des fantômes pas si simples

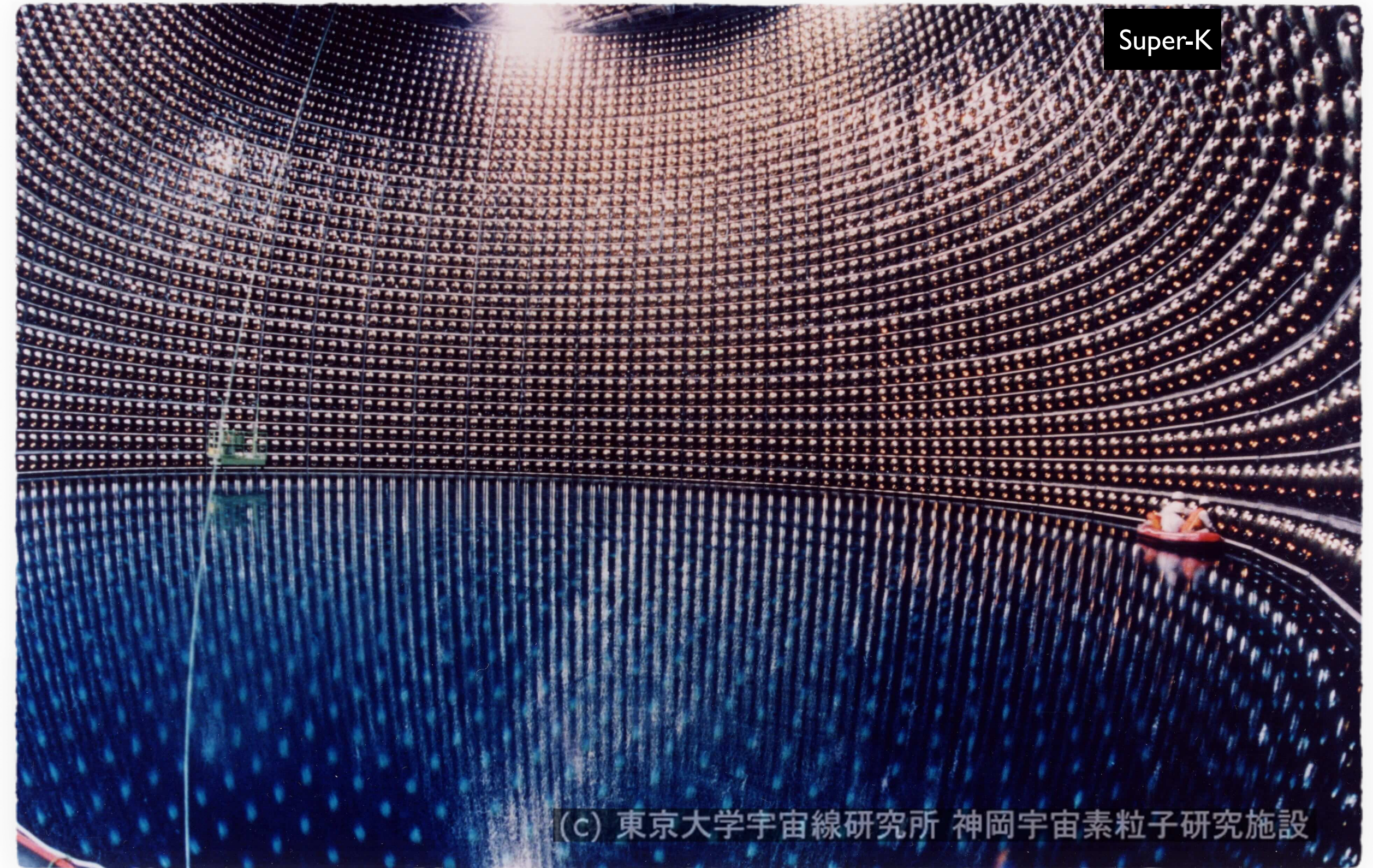
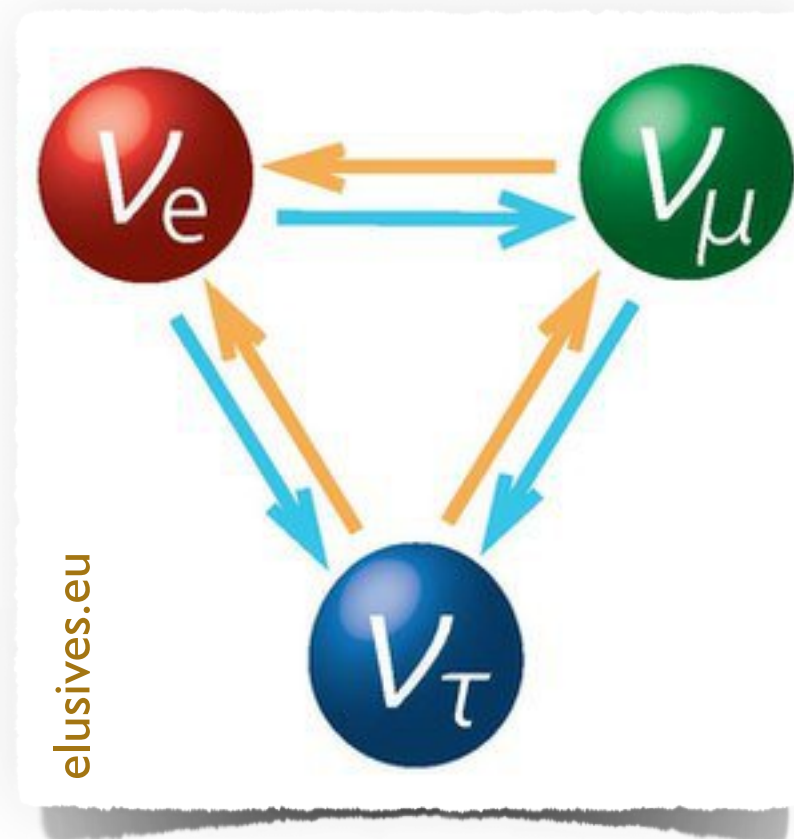
- Ils traversent presque toute la matière
- Il en existe trois types :  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$
- En voyageant, ils peuvent **changer de type**

## Conséquences

- Les neutrinos ont une masse
- **Le Modèle Standard minimal ne l'explique pas**

## Expliquer la masse des neutrinos

- Il faut **étendre le Modèle Standard**
- Avec de nouvelles particules & nouveaux phénomènes ?

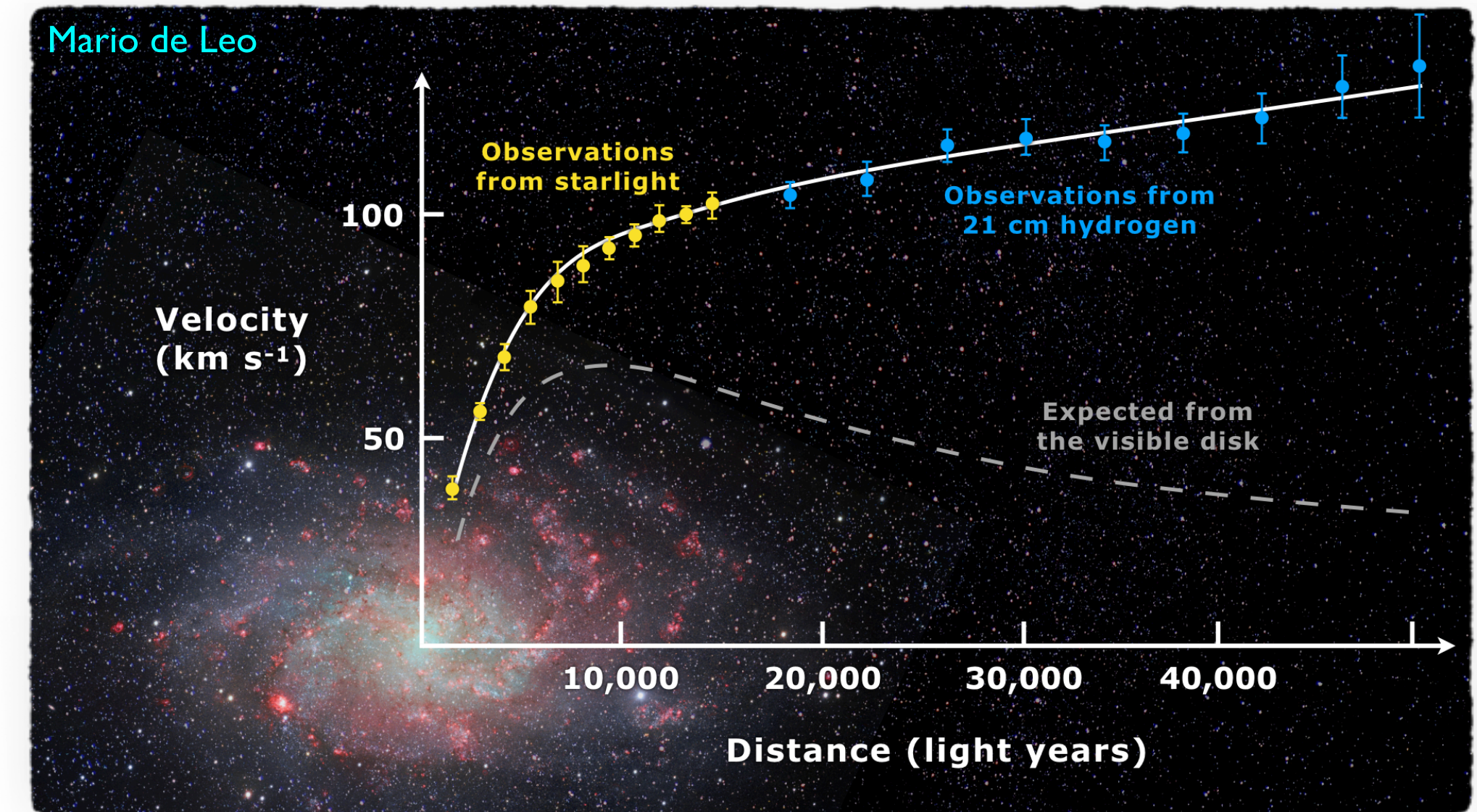
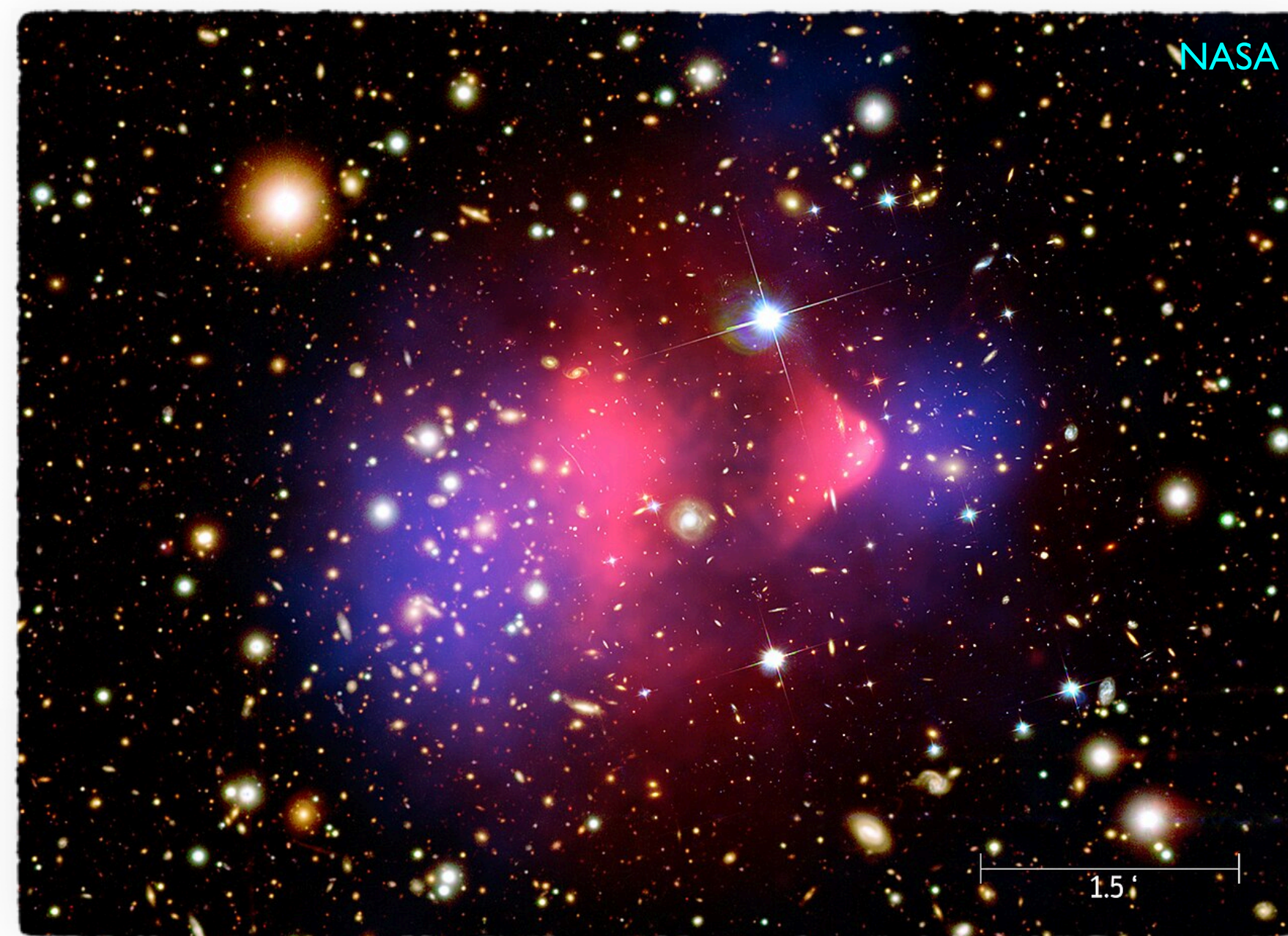


Une particule presque invisible  
Un indice très visible d'une carte des particules incomplète

# La matière noire : un indice venu de l'univers

## 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



## Hypothèses 'physique des particules'

- Une nouvelle particule ?
  - **Particule de matière noire absente du Modèle Standard**
- À chercher par ses interactions avec la matière ordinaire

Un indice cosmique d'une physique au-delà du Modèle Standard

# Le boson de Higgs : une masse trop bien réglée ?

## Qu'est-ce qui protège la masse du Higgs ?

- Mesure de la masse du boson de Higgs : 125 fois la masse d'un proton
- Le boson de Higgs est **relativement léger**

## Calculs dans le Modèle Standard

- **Compensation** entre d'énormes corrections positives et négatives
  - On pourrait s'attendre à une masse du Higgs beaucoup plus grande
  - La masse observée est relativement petite

## Des idées pour compléter notre carte des particules

- Nouvelles particules
- Nouvelles symétries
- Nouvelles interactions
- Mesures de précision pour dénicher de nouveaux indices

Nikodem Nijaki

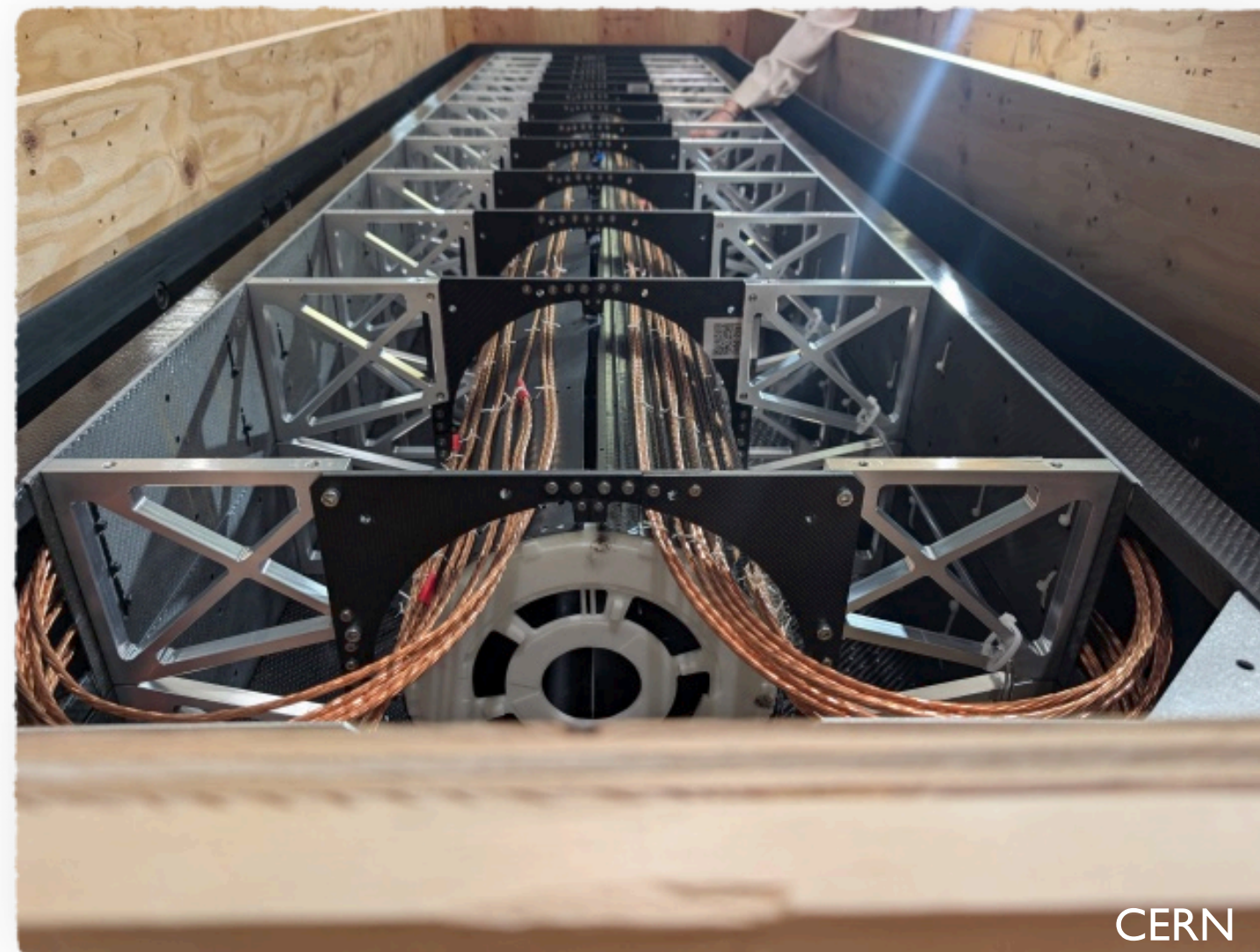
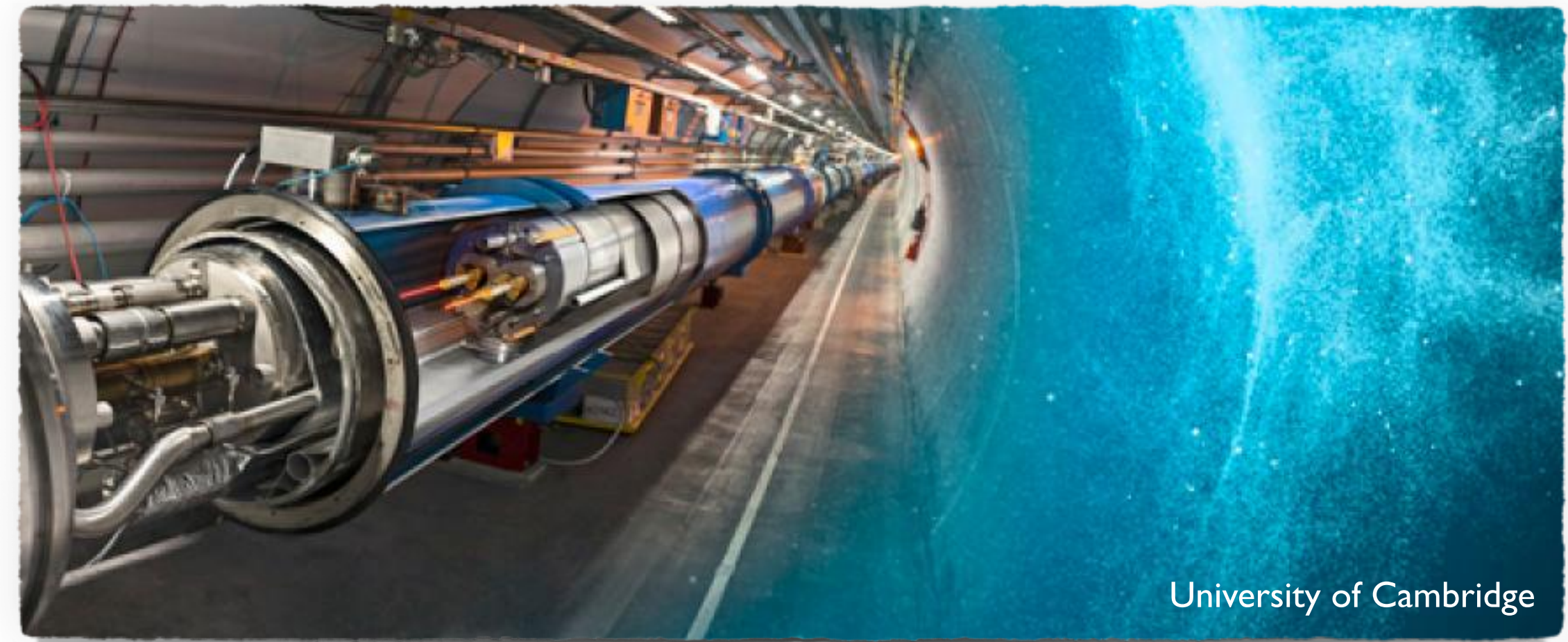


Un réglage trop parfait peut être l'indice d'un mécanisme caché

# Aujourd'hui : traquer les indices du 'presque'

## Trois stratégies

- Production de nouvelles particules
  - Collisions à haute énergie
- Mesures de précision extrême
  - Petits écarts entre théorie et données
- Observer l'Univers
  - Matière noire, neutrinos, gravité



## Mon métier

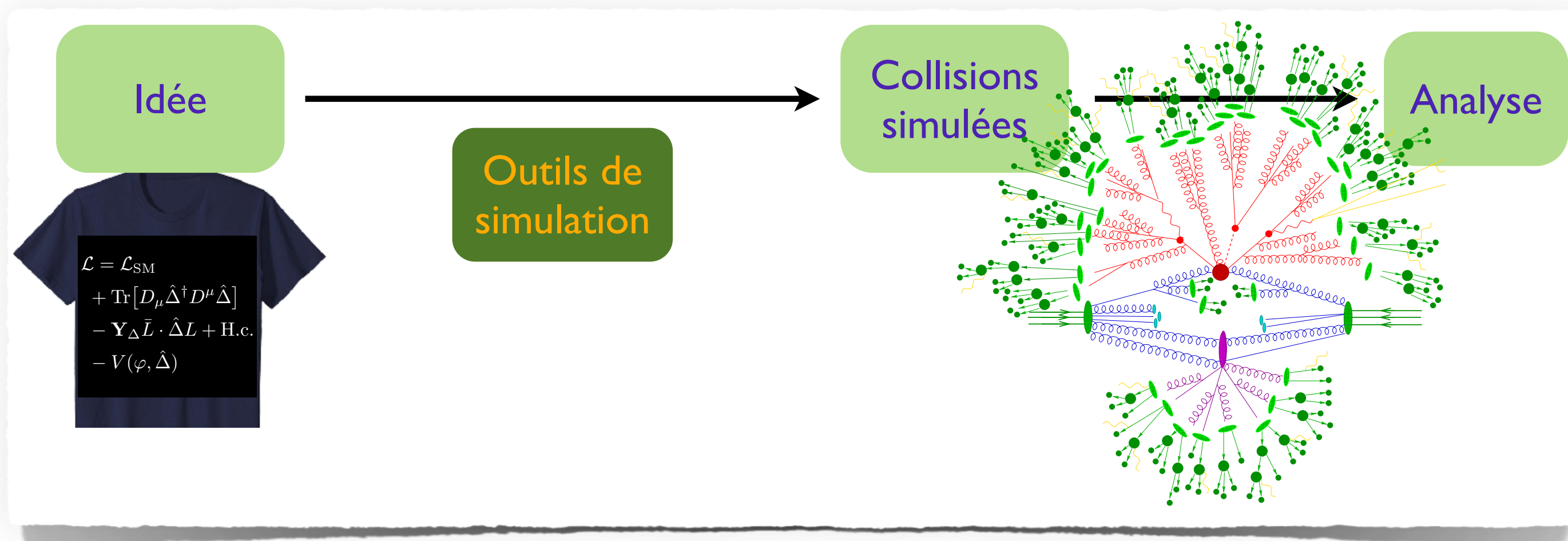
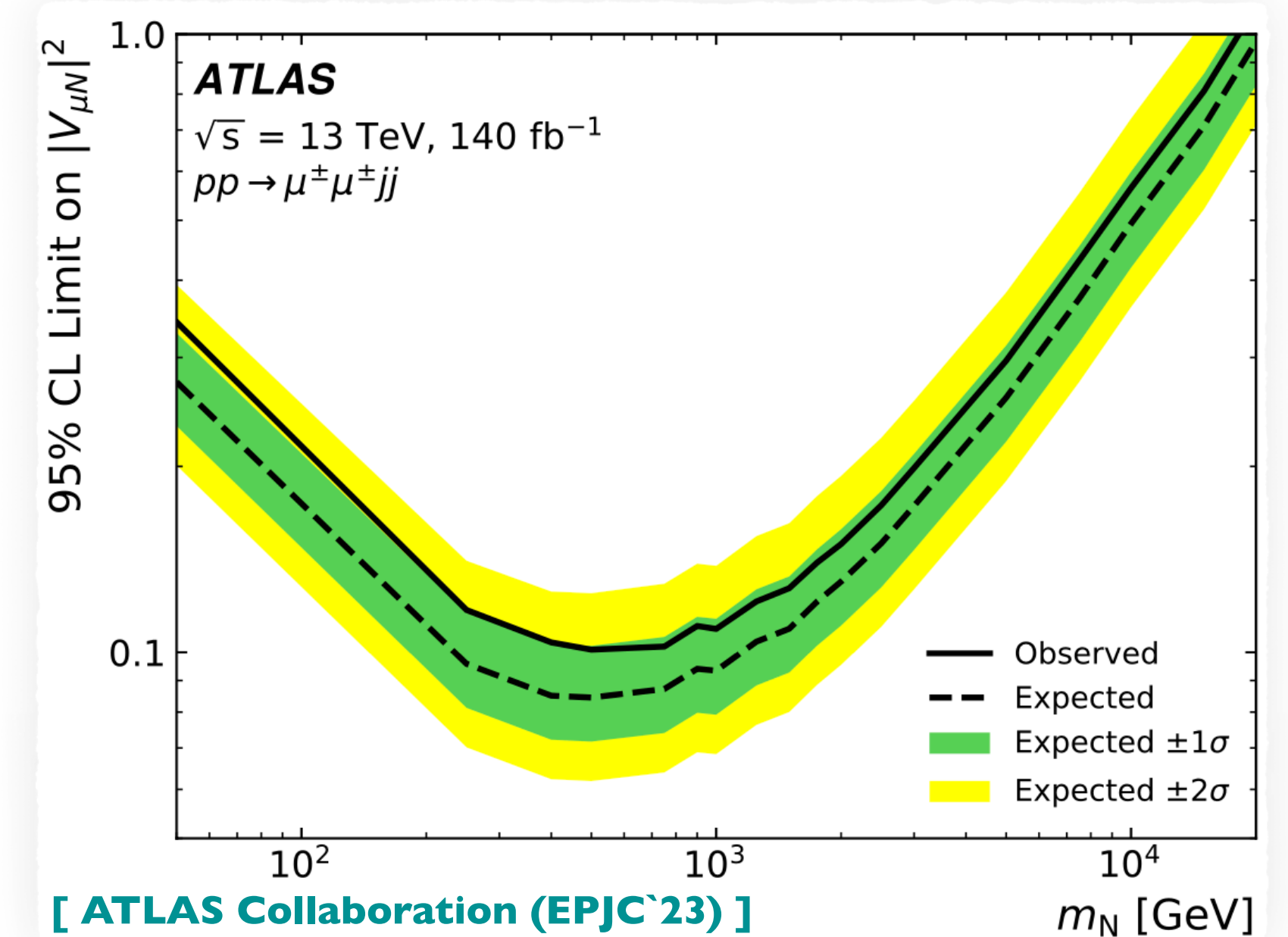
- Imaginer des cartes possibles au-delà du Modèle Standard
- Chercher leurs traces dans les données des collisions et de l'Univers

Transformer les mystères en  
prédictions testables

# Un exemple réel : traquer une particule presque invisible

## De l'idée vers la mesure

- Point de départ : les neutrinos ont une masse
  - Peut-être grâce à de nouveaux **neutrinos lourds**
- Une prédiction
  - Ils pourraient être produits au LHC
  - Ils laisseraient une signature visible dans les détecteurs
- Une recherche concrète (**théorie et expérience**)
  - Simulations numériques du signal et du bruit de fond
  - Travaux théoriques : guider les expériences
  - Comparaison aux données réelles par ATLAS et CMS



Mon métier : transformer une idée théorique en une signature testable

# On sait de quoi vous êtes faits... enfin *presque*

## Le Modèle Standard

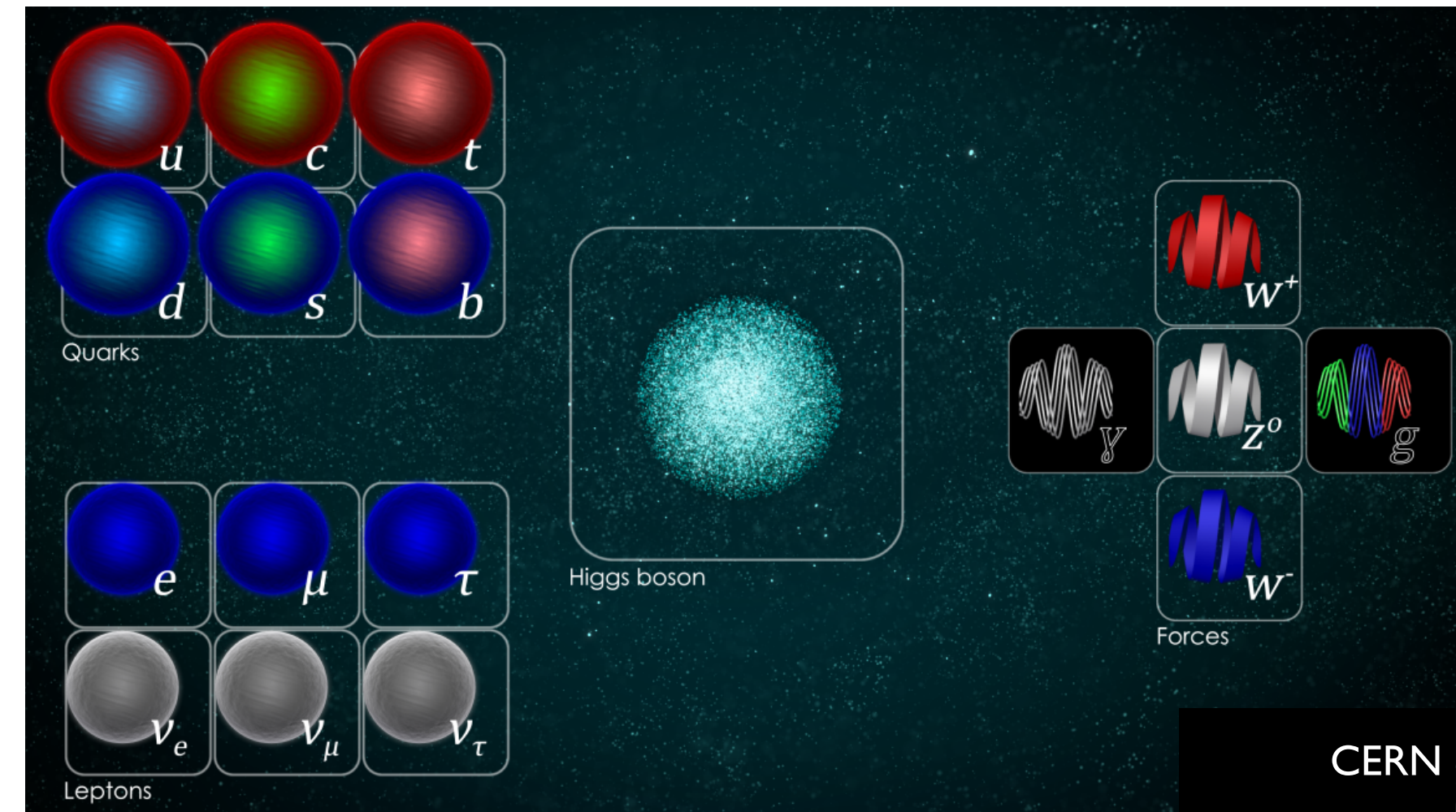
- Une carte incroyablement précise de l'infiniment petit
- Particules de matière + interactions + Higgs

## Une carte incomplète...

- Matière noire, neutrinos, masse du Higgs, gravité, etc.

## La recherche actuelle

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



## Et demain ?

- LHC haute luminosité
- Futurs collisionneurs
- Nouveaux outils (technologies, big data, IA, etc.)

Le 'presque' n'est pas un détail : c'est là que tout commence !