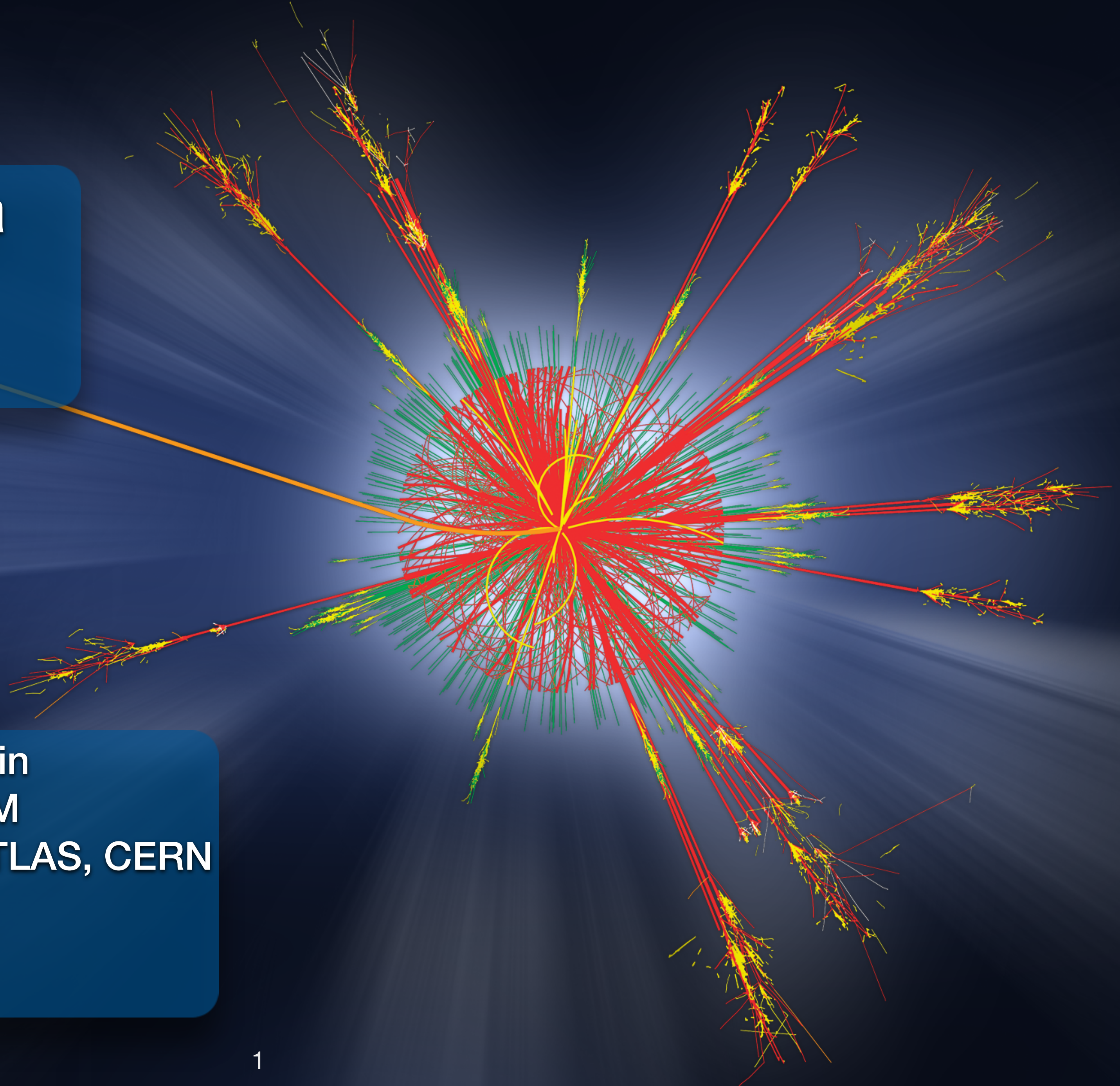


Introduction à la physique des collisionneurs

Jean-François Arguin
Professeur à l'UdeM
et chercheur à l'expérience ATLAS, CERN

JIRP 2019



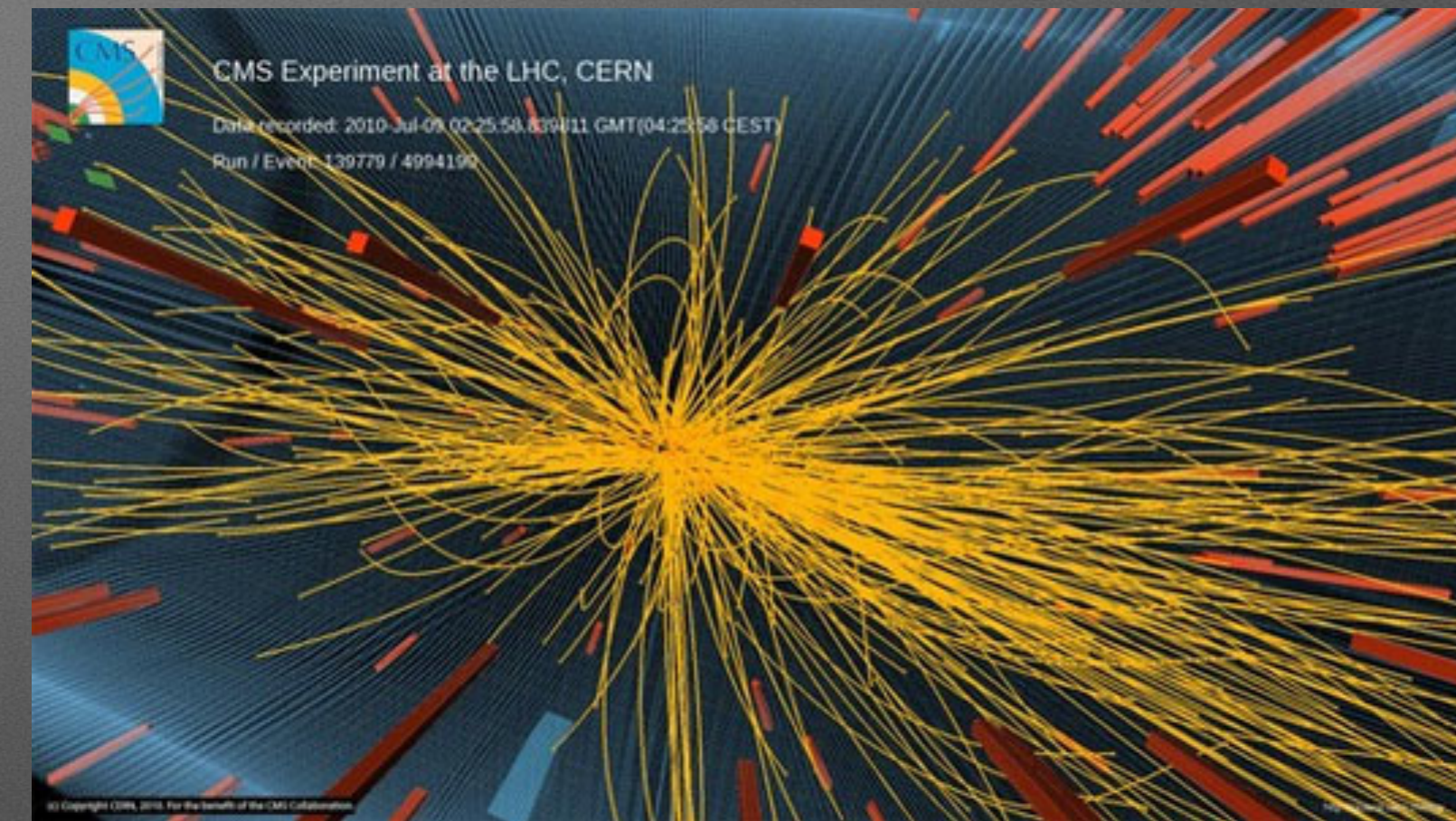
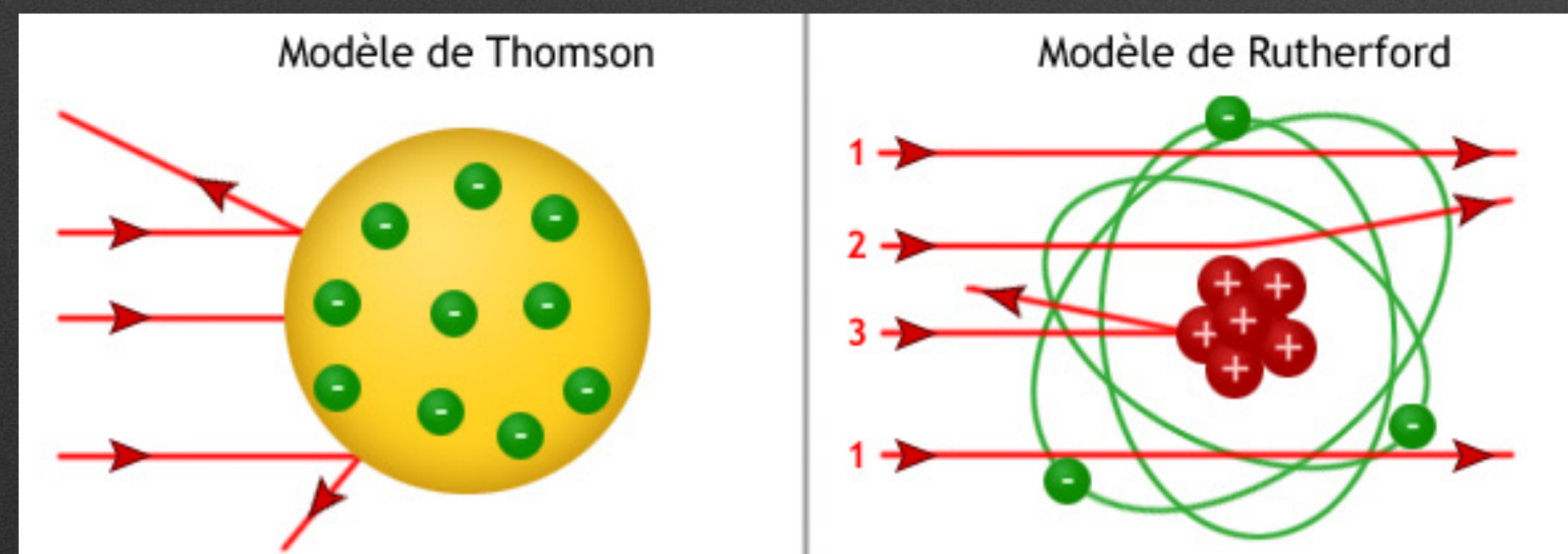
Aperçu de la présentation

- Comment en a t-on appris autant sur l'infiniment petit?
 - Le LHC et l'expérience ATLAS: comment ça fonctionne
 - La science du LHC
- Que nous reste t-il à apprendre?
- Le futur de ce champs de recherche

**Mais comment a t-on appris
tout ce qu'on sait de l'Univers??**

Une des méthodes les plus efficaces: les collisionneurs!

- Envoyer des particules dans la matière nous permet de voir à l'intérieur
- À des énergies assez haute, on peut même créer de nouvelles particules très massives
 - Par $E = mc^2$
 - C'est le principe du LHC, et comment on a pu créer le boson de Higgs!



Le Grand collisionneur de hadrons (LHC)

Lake of Geneva



CMS

LHCb

ALICE

ATLAS

Airport

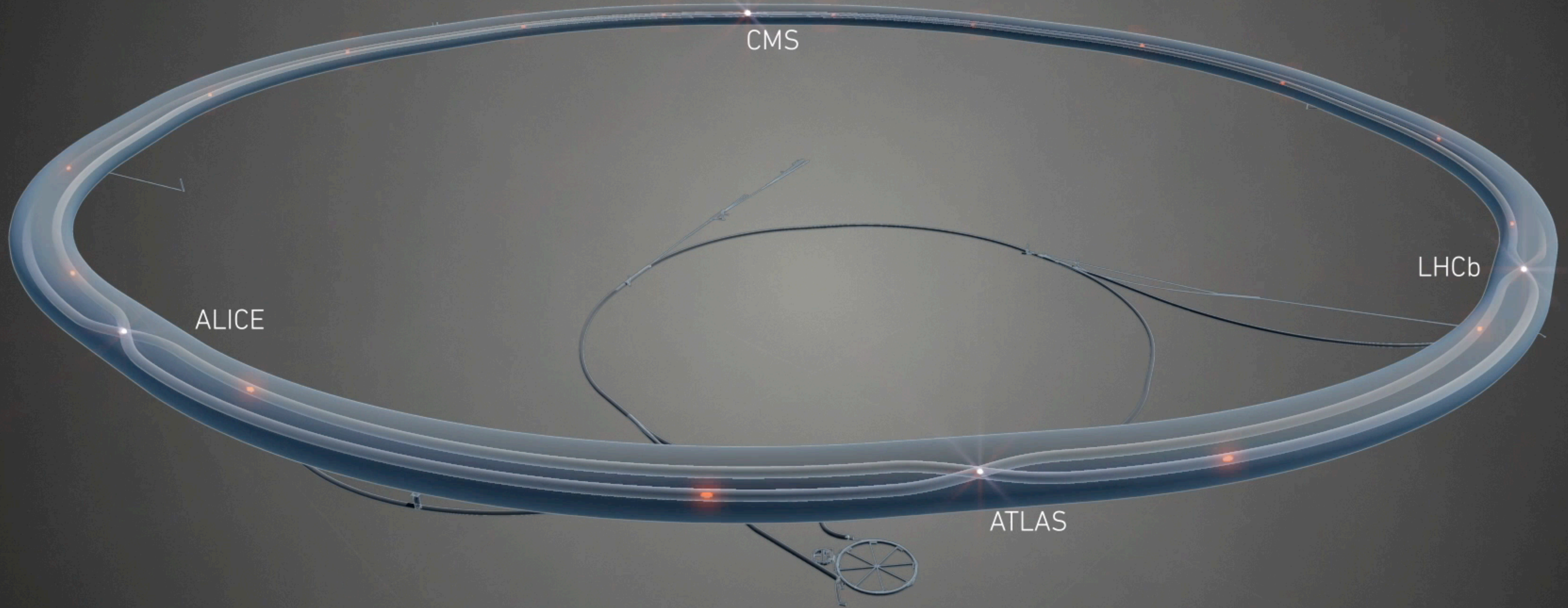
- ◆ Collisions proton-proton
- ◆ Énergie: 7 à 14 TeV
- ◆ Circonférence: 27 km

- ◆ 100 m sous terre
- ◆ 9,600 aimants superconducteurs (1.9K)



Accélérateur de science

LHC [Large Hadron Collider]



CMS

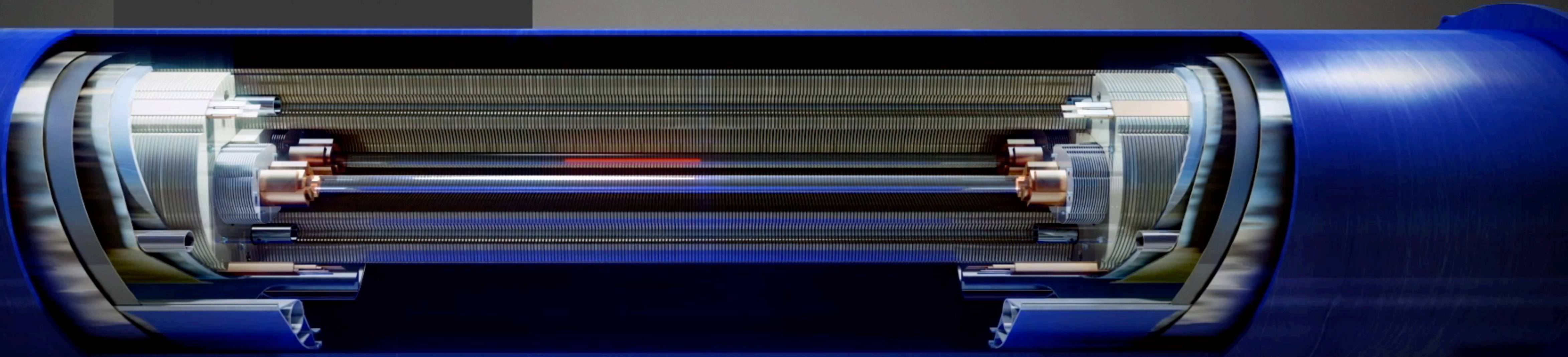
LHCb

ALICE

ATLAS

LHC Beams

Faisceaux du LHC



2808 bunches
2808 Paquets

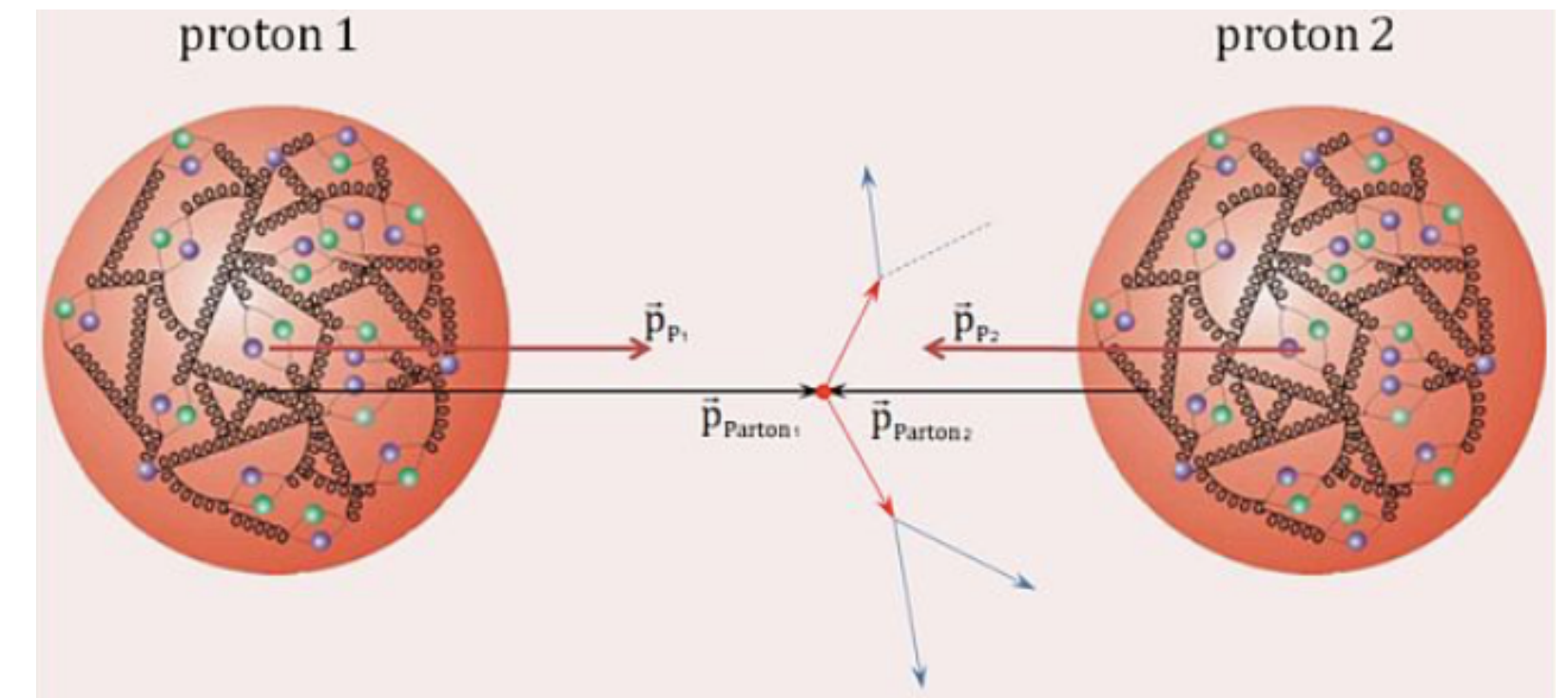
100 billion protons / bunch
100 milliards de protons / paquet

99.9999991% Speed of Light
99.9999991% de la vitesse de la lumière

Beam size 1mm
Diametre du faisceau 1 mm

La science du LHC

Les protons se collisionnent avec un énergie de 13 TeV



Les quarks et gluons vont interagir ensemble via l'une des **3 forces connues de l'Univers** (autre que la gravité). En ordre décroissant de magnitude:

- L'interaction forte : particule associée \rightarrow gluon (g). Magnitude relative = 1
- L'interaction électromagnétique : particule associée \rightarrow photon (γ). Magnitude relative = 10^{-3}
- L'interaction faible : particules associées \rightarrow bosons W^\pm et Z^0 . Magnitude relative = 10^{-8}

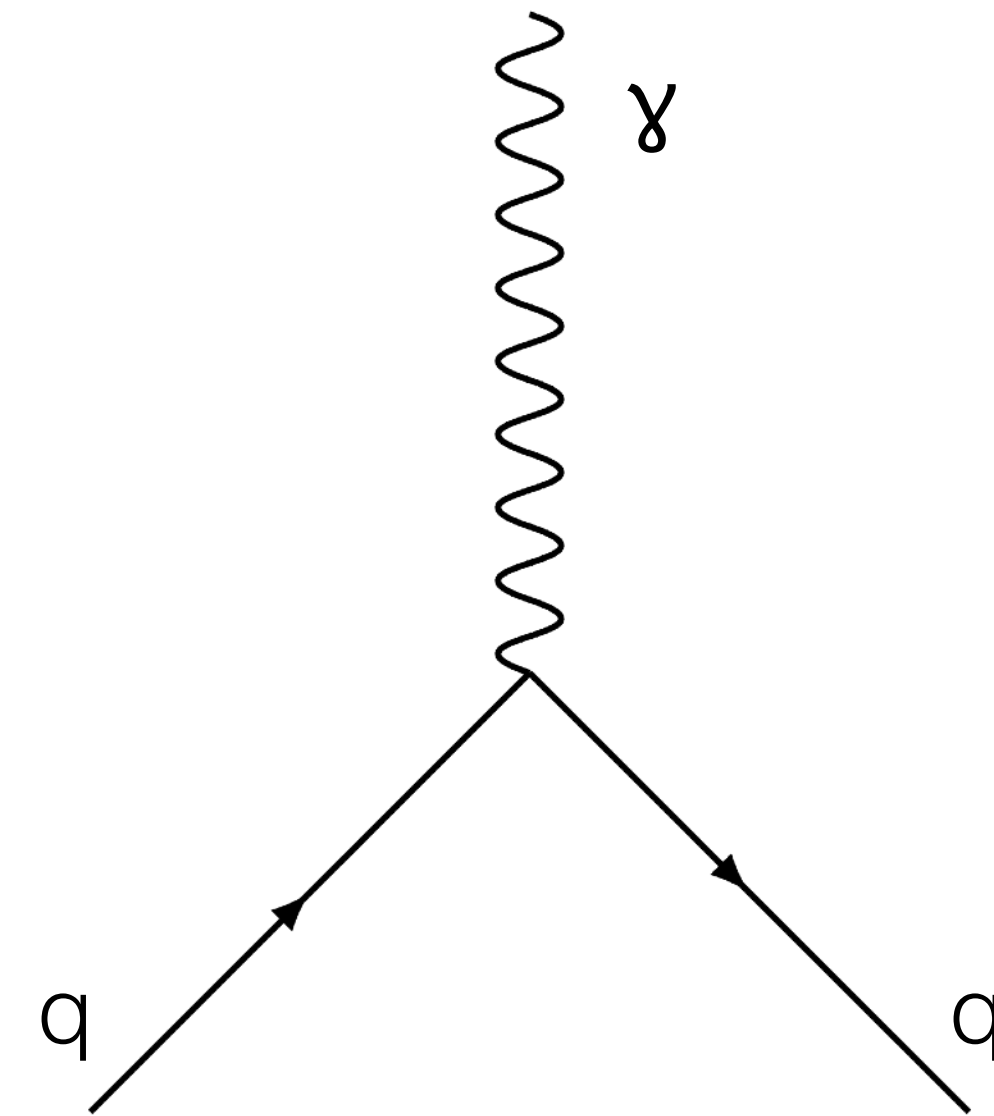
Tous les processus en physique des particules, comme les collisions du LHC, peuvent être illustrés par les **diagrammes de Feynman**

Les diagrammes de Feynman

- Chaque type d'interaction a un ou des vertex primaires
- Ces vertex sont comme des “blocs LEGO” qu'on peut rotationner et joindre ensemble
- Le temps s'écoule vers la droite
 - Une particule “à l'envers” représente une anti-particule
- Tous les processus qui peuvent être dessinés vont exister dans la nature

Exemple 1: interaction É.M.

Un seul type de vertex primaire

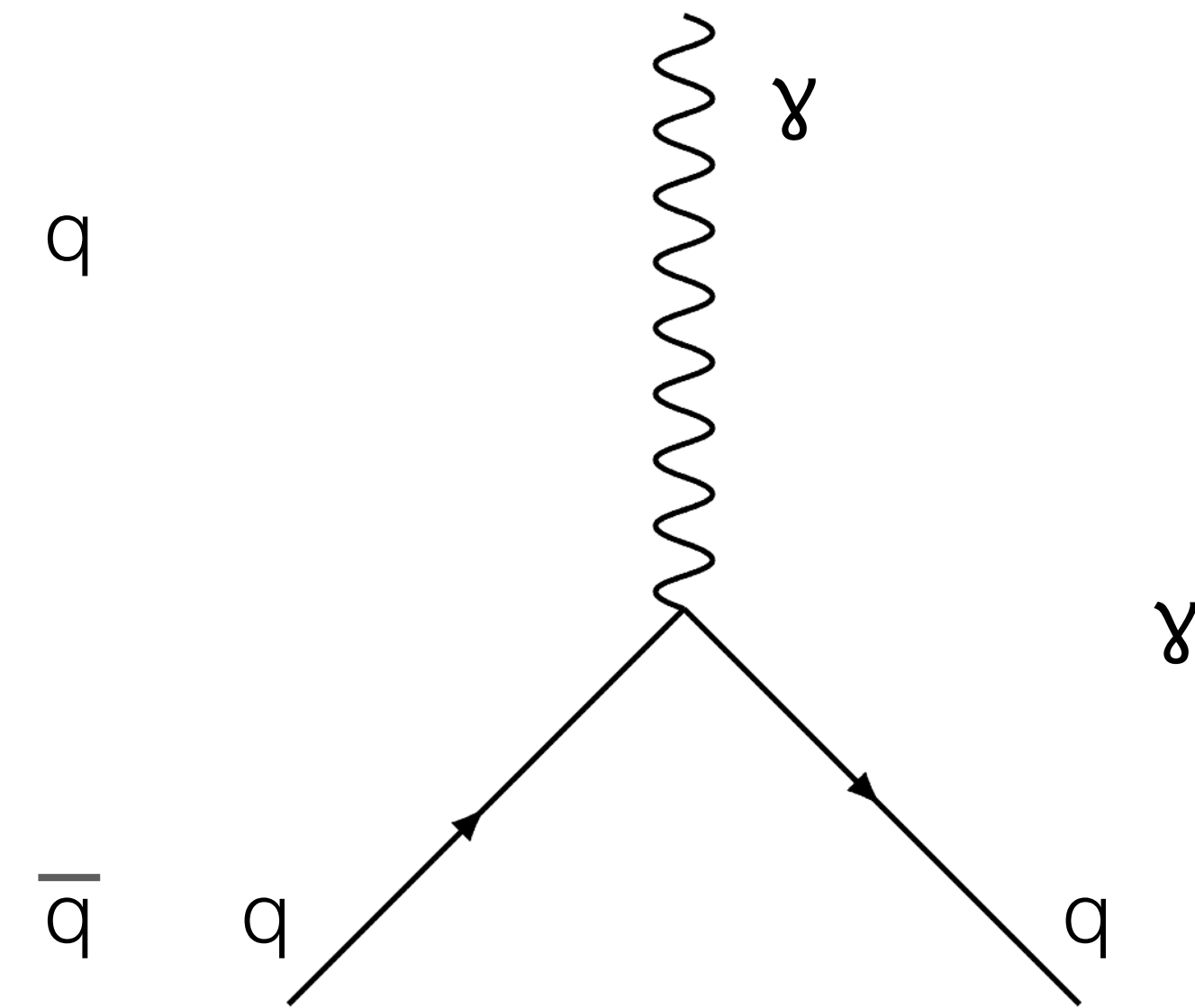


Les diagrammes de Feynman

- Chaque type d'interaction a un ou des vertex primaires
- Ces vertex sont comme des “blocs LEGO” qu'on peut rotationner et joindre ensemble
- Le temps s'écoule vers la droite
 - Une particule “à l'envers” représente une anti-particule
- Tous les processus qui peuvent être dessinés vont exister dans la nature

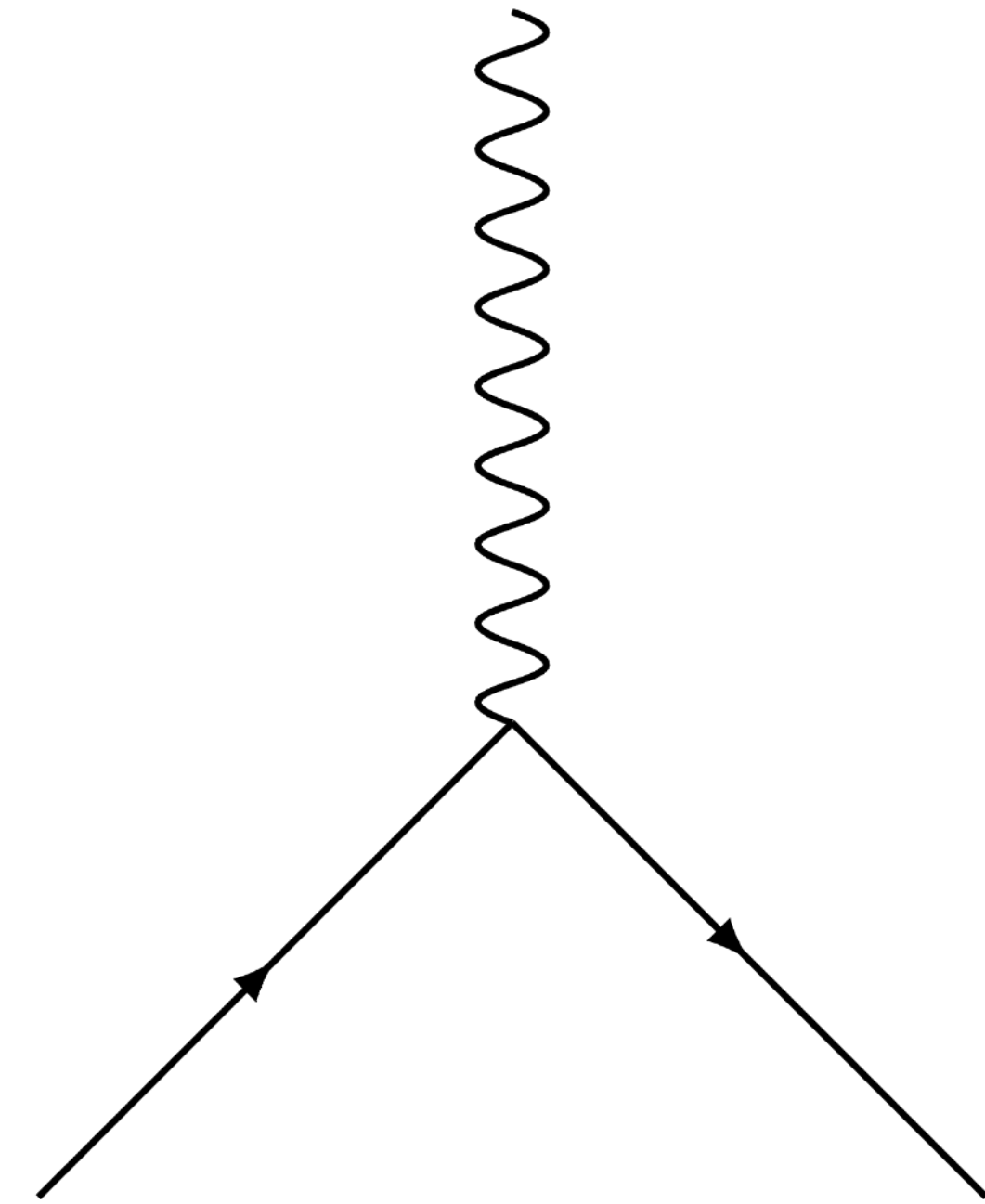
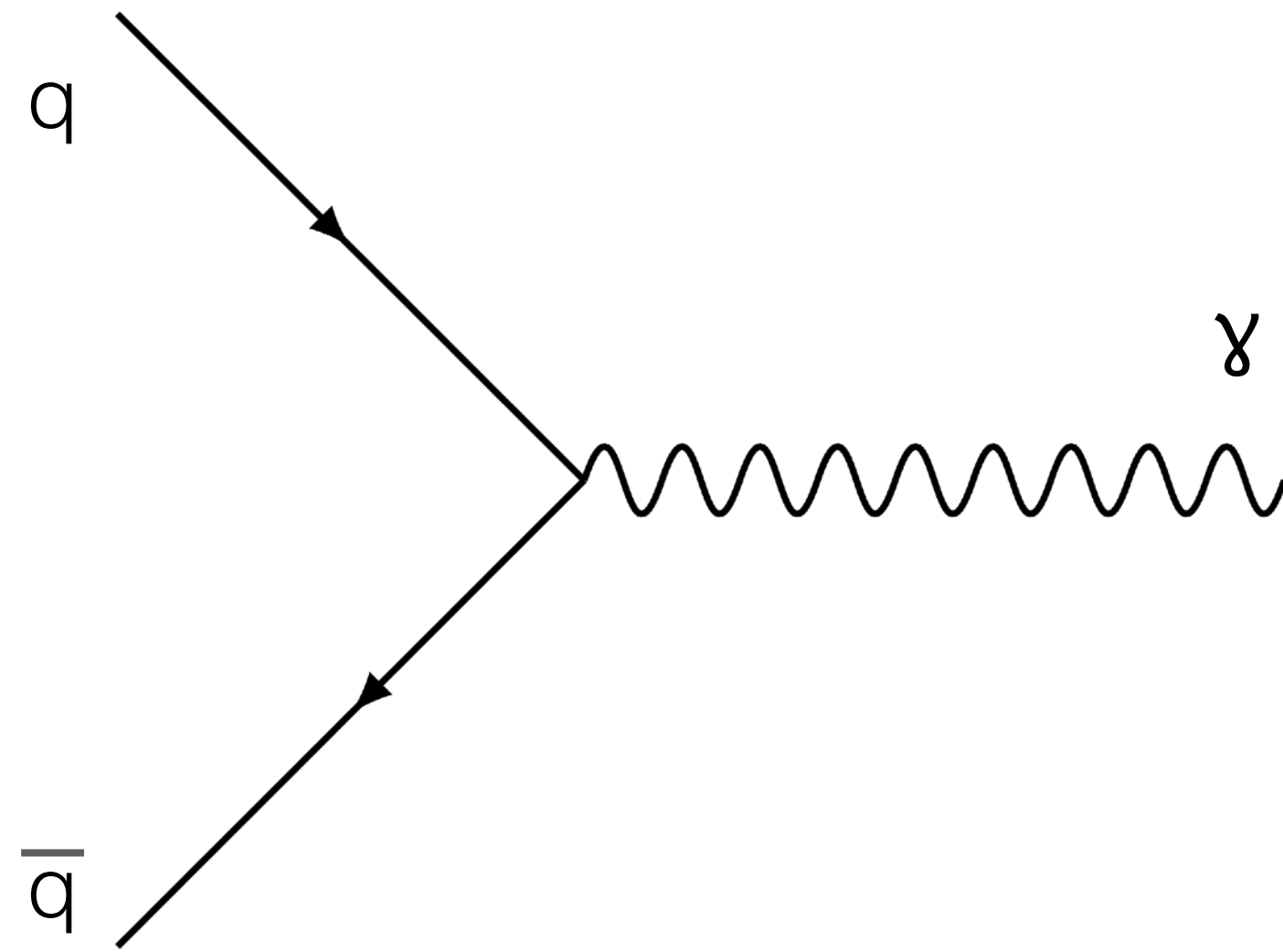
Exemple 1: interaction É.M.

On peut rotationner le vertex, le joindre à un autre pour former une diffusion quark-antiquark \rightarrow quark-antiquark



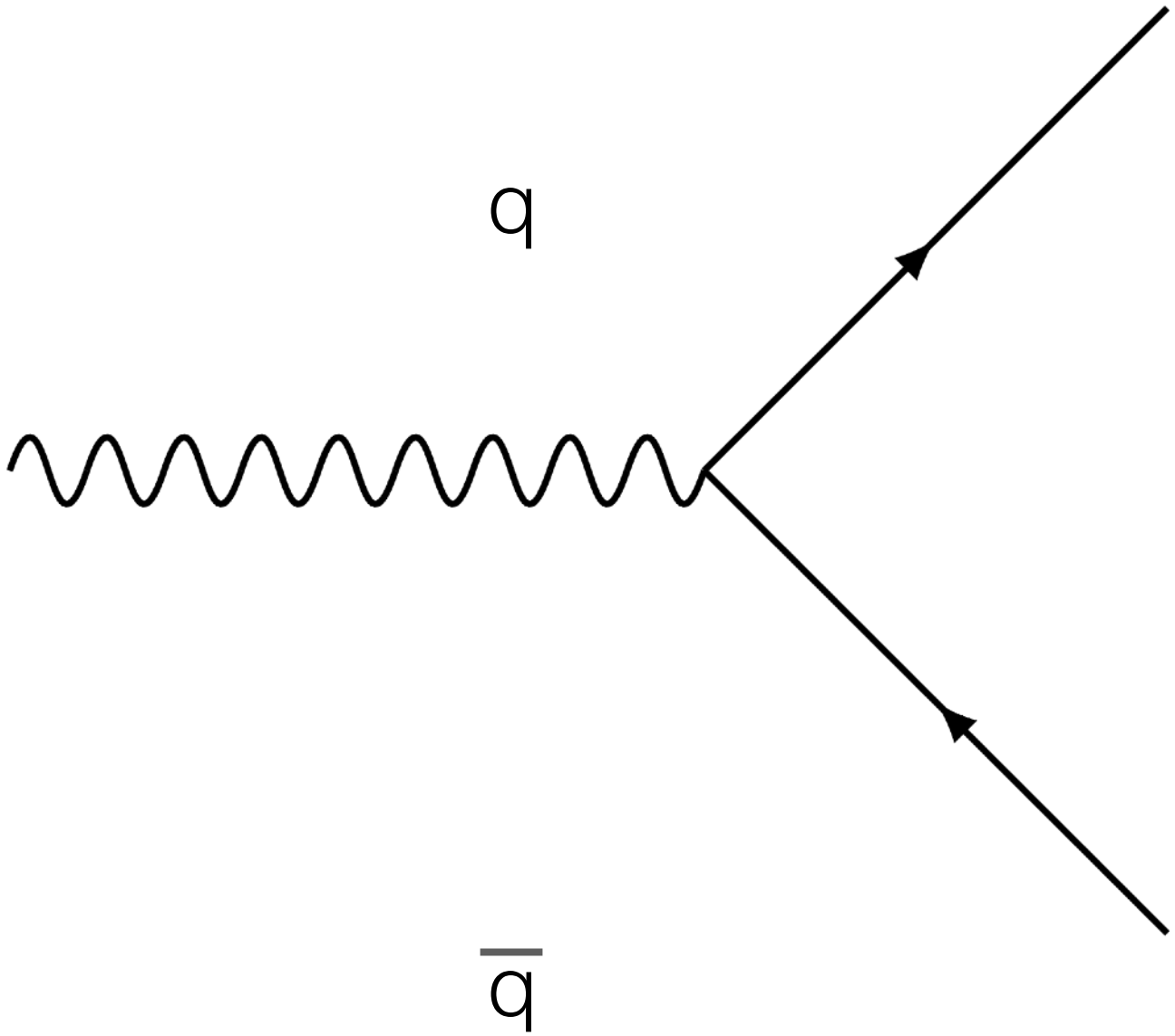
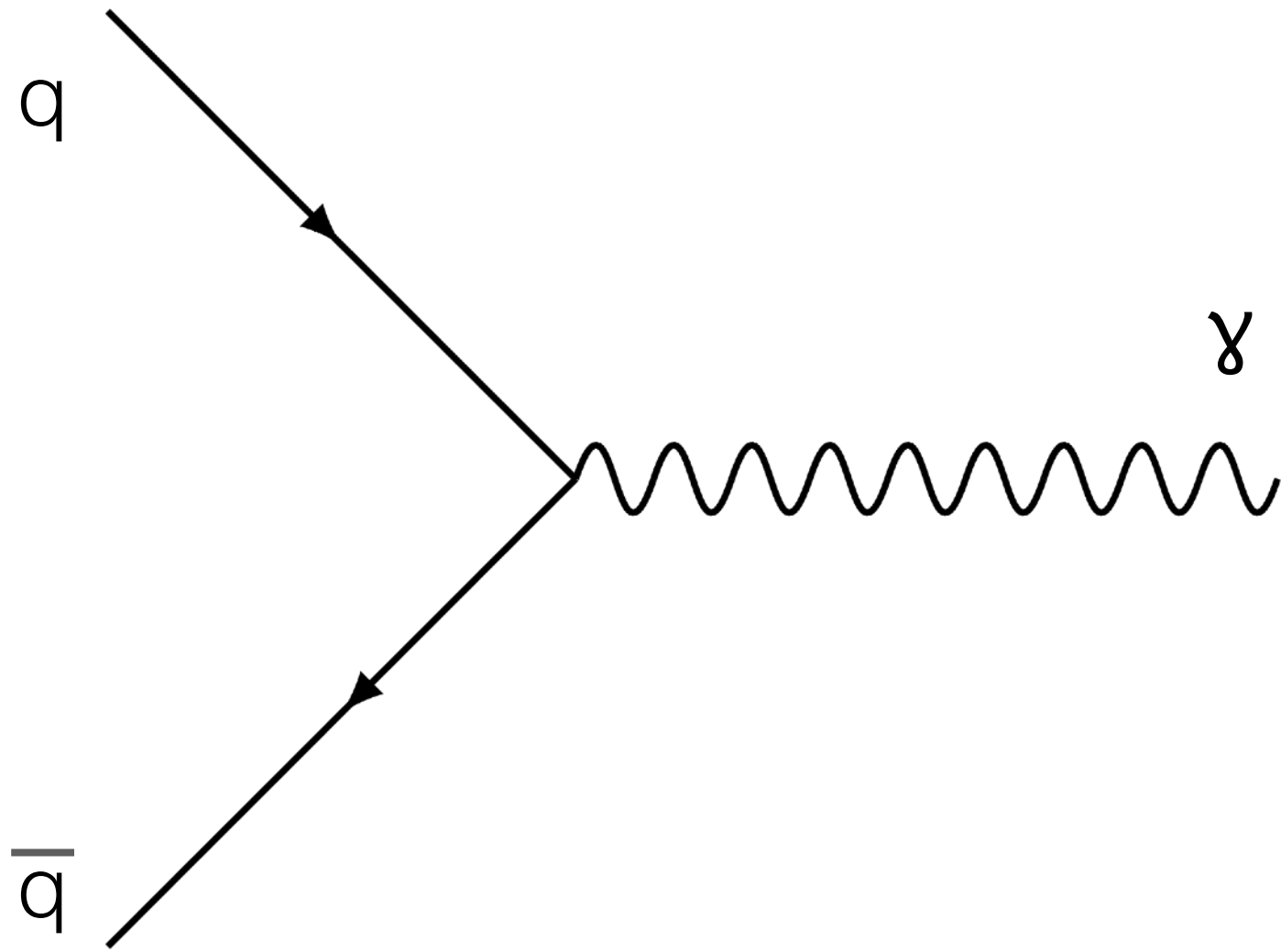
Les diagrammes de Feynman | Exemple 1: interaction É.M.

On peut rotationner le vertex, le joindre à un autre pour former une diffusion quark-antiquark \rightarrow quark-antiquark



Les diagrammes de Feynman | Exemple 1: interaction É.M.

On peut rotationner le vertex, le joindre à un autre
popoforfoemenere **diffusion quark-antiquark \rightarrow quark-antiquark**



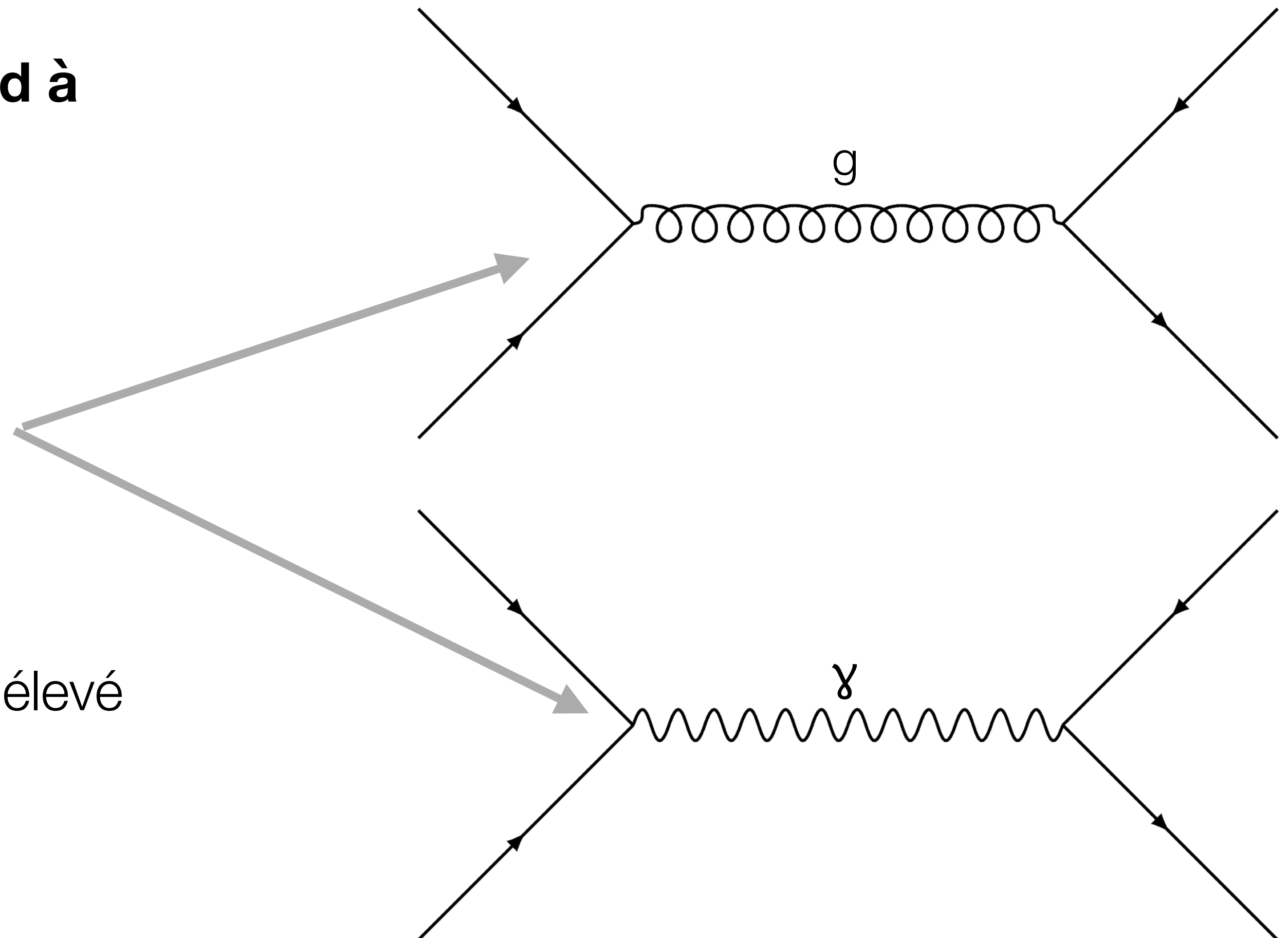
Les diagrammes de Feynman | Exemple 2: interaction É.M. vs interaction forte

Une diffusion quark-antiquark \rightarrow quark-antiquark peut aussi survenir via l'interaction forte

Un **diagramme de Feynman correspond à une équation** qu'on peut résoudre pour déterminer les propriétés du processus

La probabilité qu'un processus survienne dépend du **couplage** entre les particules

Couplage de l'interaction forte $\sim 10^3$ x plus élevé que le couplage É.M.

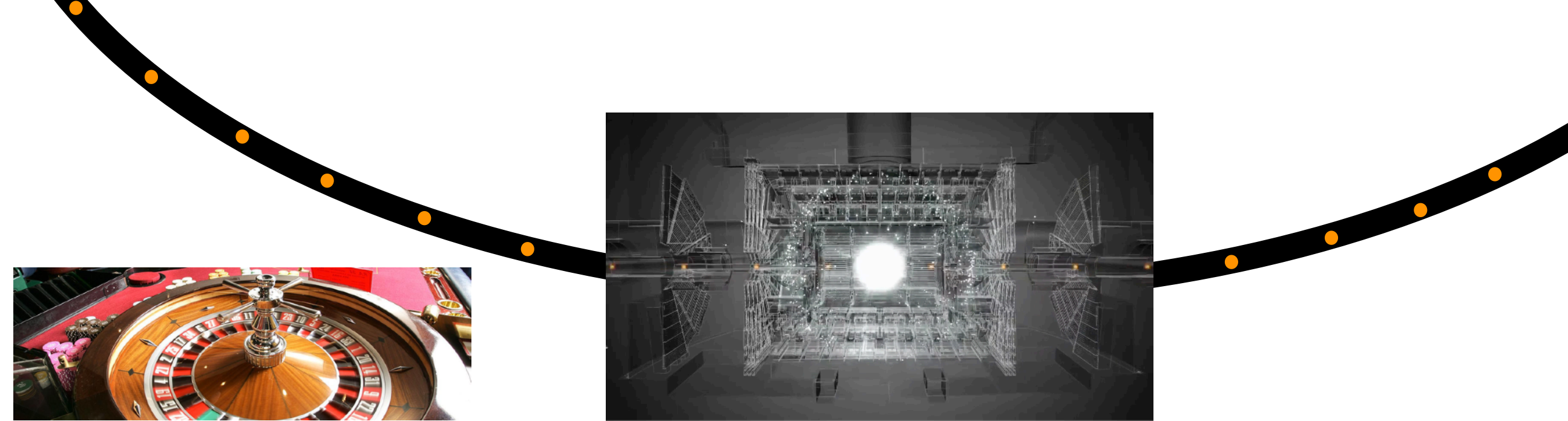
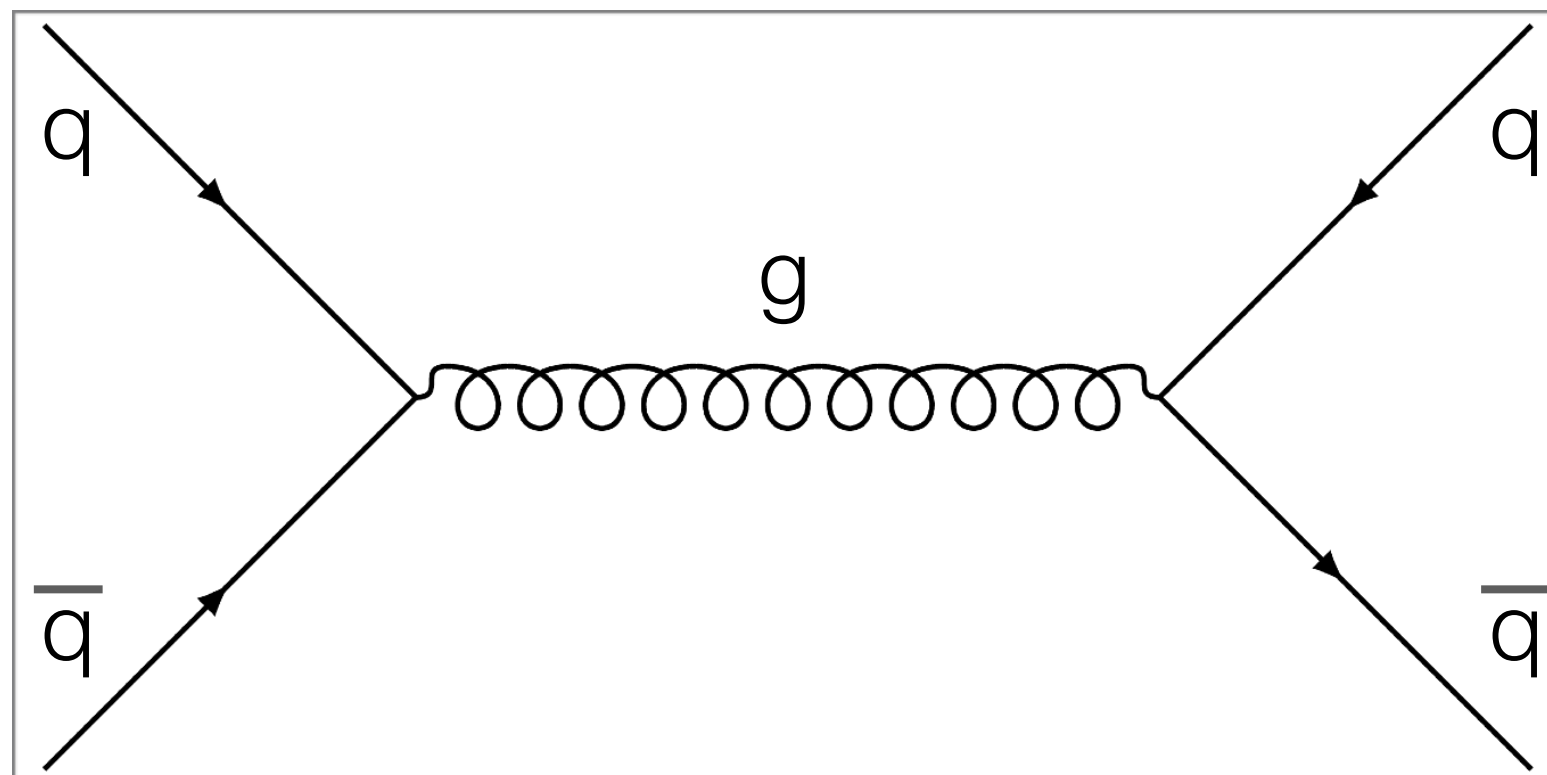


Le LHC: un casino quantique

Les résultats possibles sont: $pp \rightarrow ?$

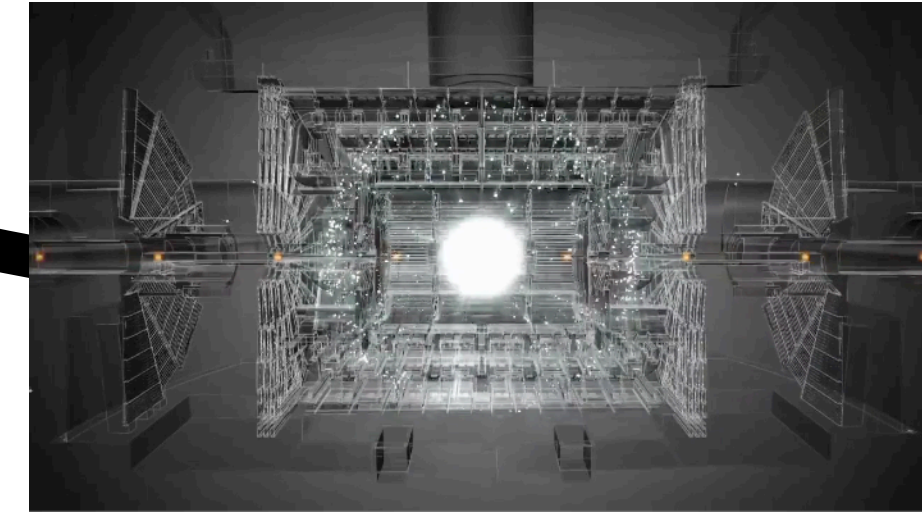
Faites vos jeux!

Probabilité pour $pp \rightarrow$ quarks ou gluons?



♣ $P(pp \rightarrow \text{quarks ou gluons}) = 99.9997\%$!

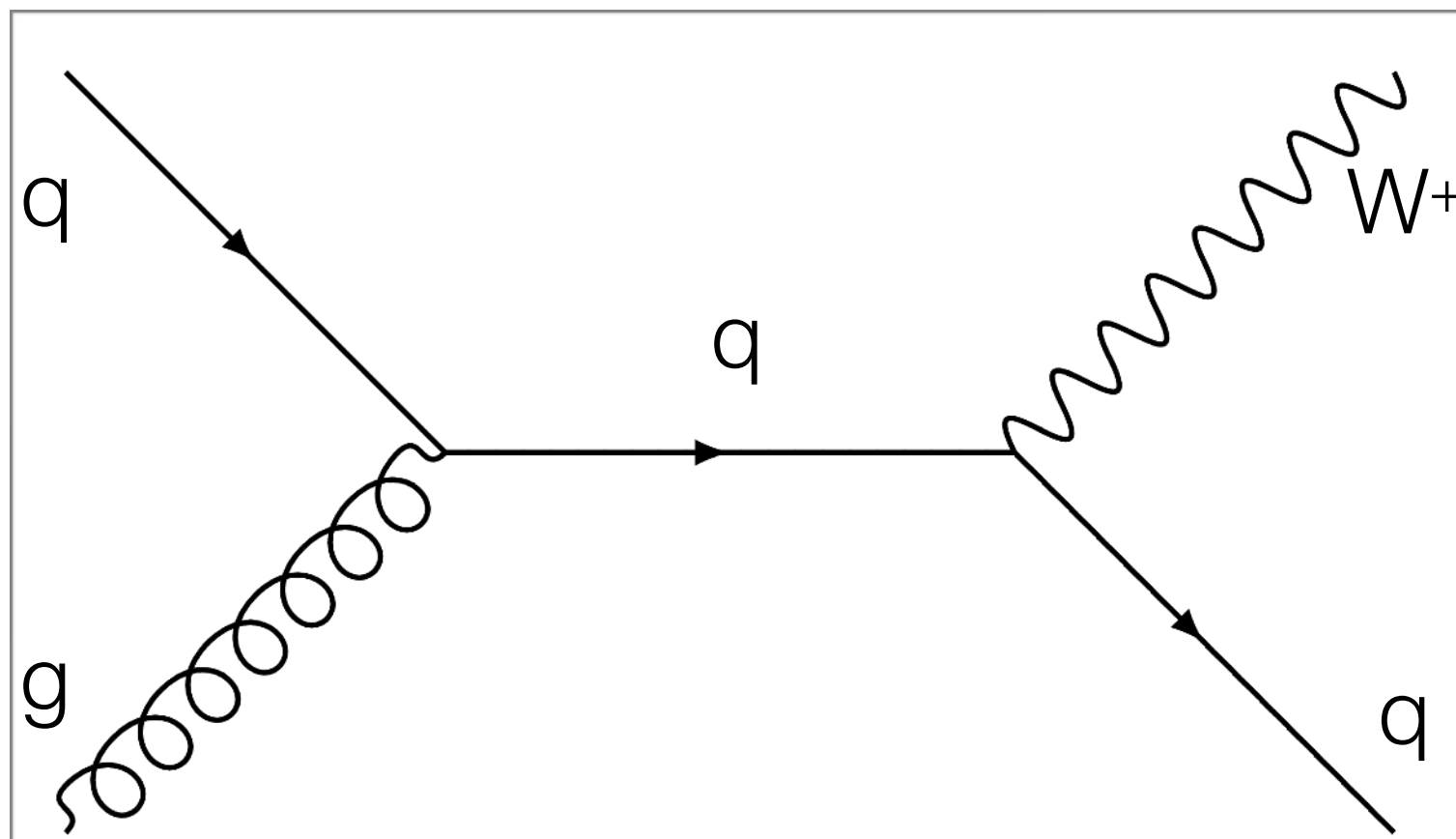
Le LHC: un casino quantique



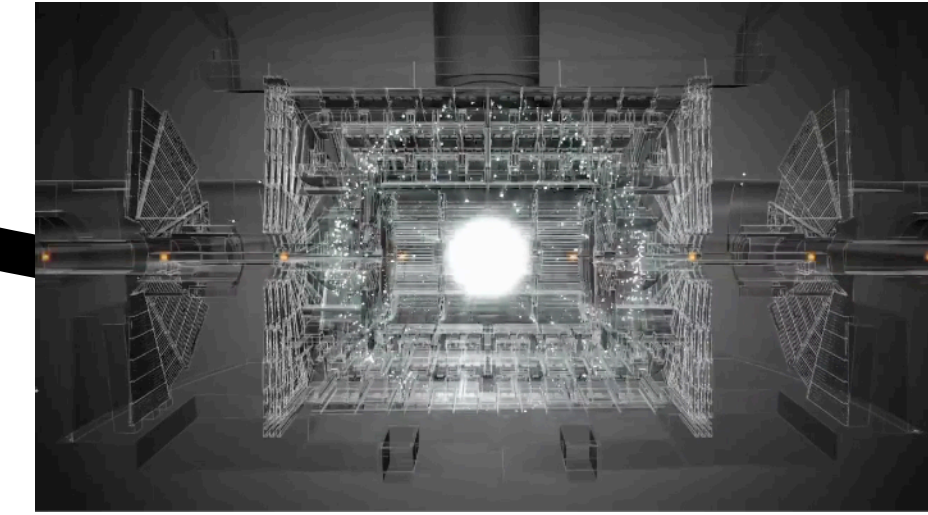
Faites vos jeux!

Probabilité pour **pp** → **boson W^\pm** ?
(Indice: interaction faible)

- ♣ $P(pp \rightarrow \text{quarks ou gluons}) = 99.9997\%$
- ♣ $P(pp \rightarrow \text{boson } W^\pm) = 10^{-5}$

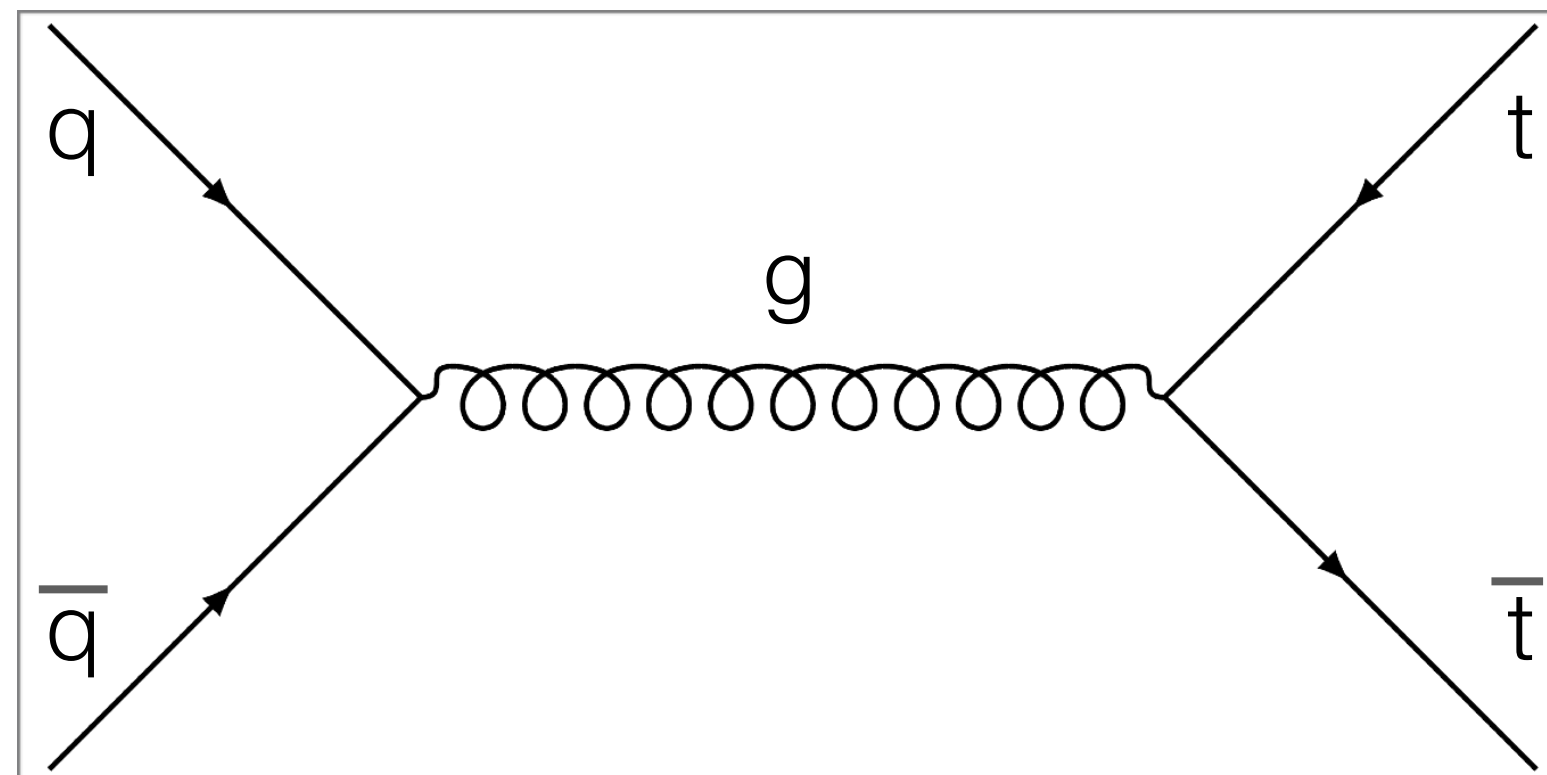


Le LHC: un casino quantique



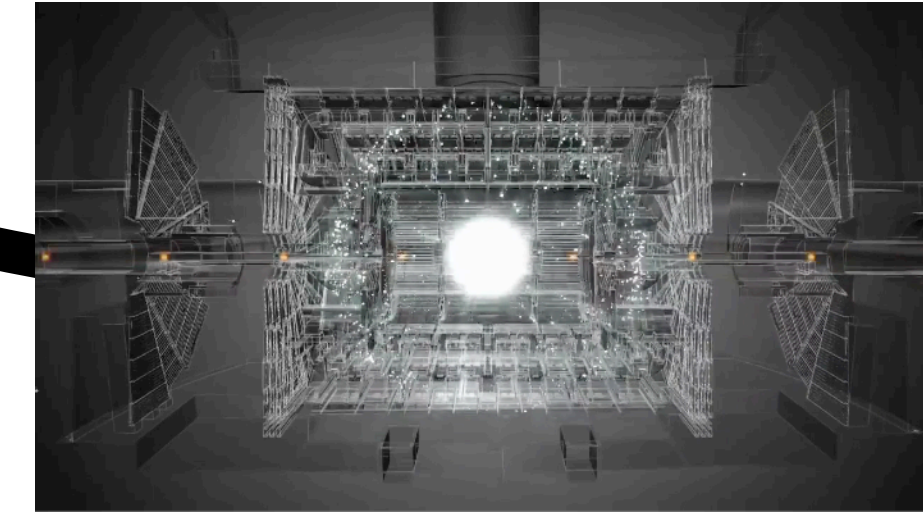
Faites vos jeux!

Probabilité pour **pp** → **quarks top + antitop**?
(Indice: le quark top est très, très massif)



- ❖ $P(pp \rightarrow \text{quarks ou gluons}) = 99.9997\%$
- ❖ $P(pp \rightarrow \text{boson } W^\pm) = 10^{-5}$
- ❖ $P(pp \rightarrow \text{top} + \text{antitop}) = 10^{-8}$

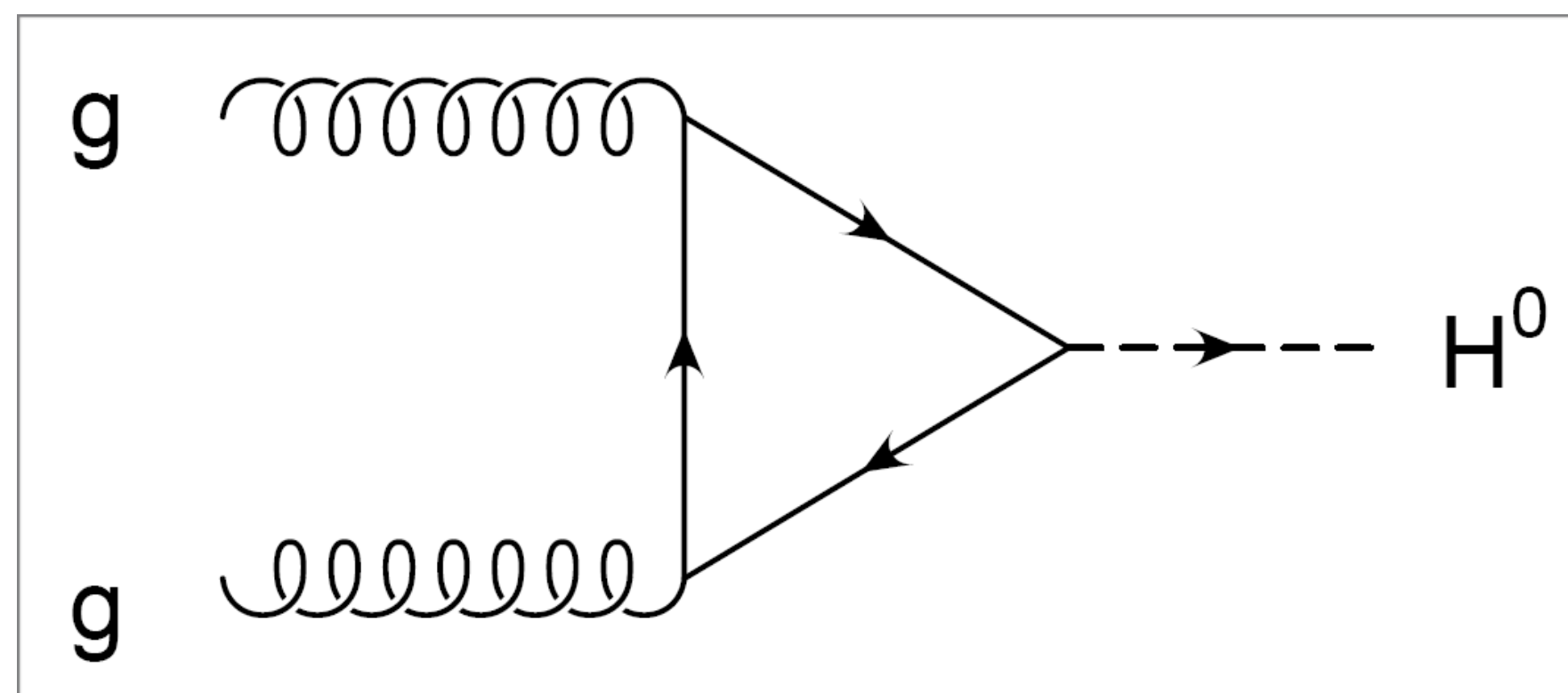
Le LHC: un casino quantique



Faites vos jeux!

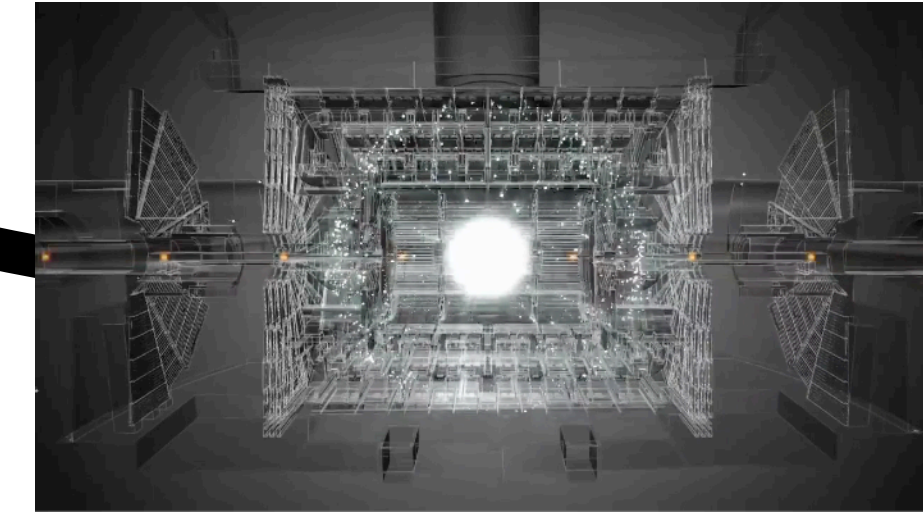
Probabilité pour **pp** → **Higgs**?

(Indice: le Higgs est massif et son couplage avec la “matière ordinaire” est faible)



- ♣ $P(pp \rightarrow \text{quarks ou gluons}) = 99.9997\%$
- ♣ $P(pp \rightarrow \text{boson } W^\pm) = 10^{-5}$
- ♣ $P(pp \rightarrow \text{top} + \text{antitop}) = 10^{-8}$
- ♣ $P(pp \rightarrow \text{Higgs}) = 10^{-9}$

Le LHC: un casino quantique

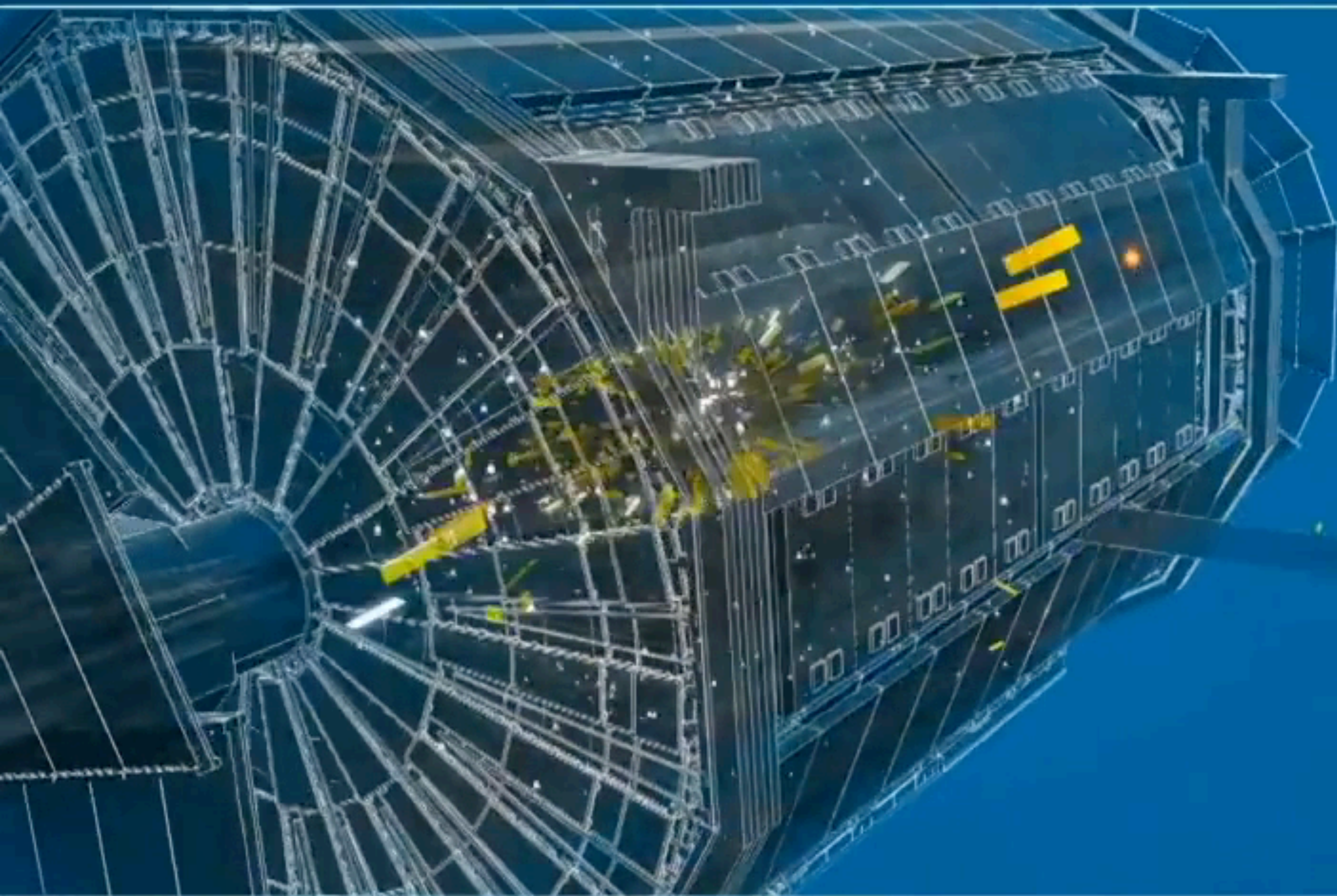


Le faisceau du LHC à une très haute intensité (aka luminosité)

Et on prend des données, si possible
“tout le temps”

Résultats: nous avons de **grands échantillons** même pour les particules comme le quark top et le boson de Higgs!

- ♣ Nombre total de quarks ou gluons produits: on a arrêté de compter!
- ♣ Nombre de boson W^\pm produits: $\sim 2 \times 10^{10}$
- ♣ Nombre de quarks top produits: $\sim 7 \times 10^7$
- ♣ Nombre de boson de Higgs produits: $\sim 4 \times 10^6$



^s ^{ms} ^{μs} ^{ns}
0.000 000 081 s

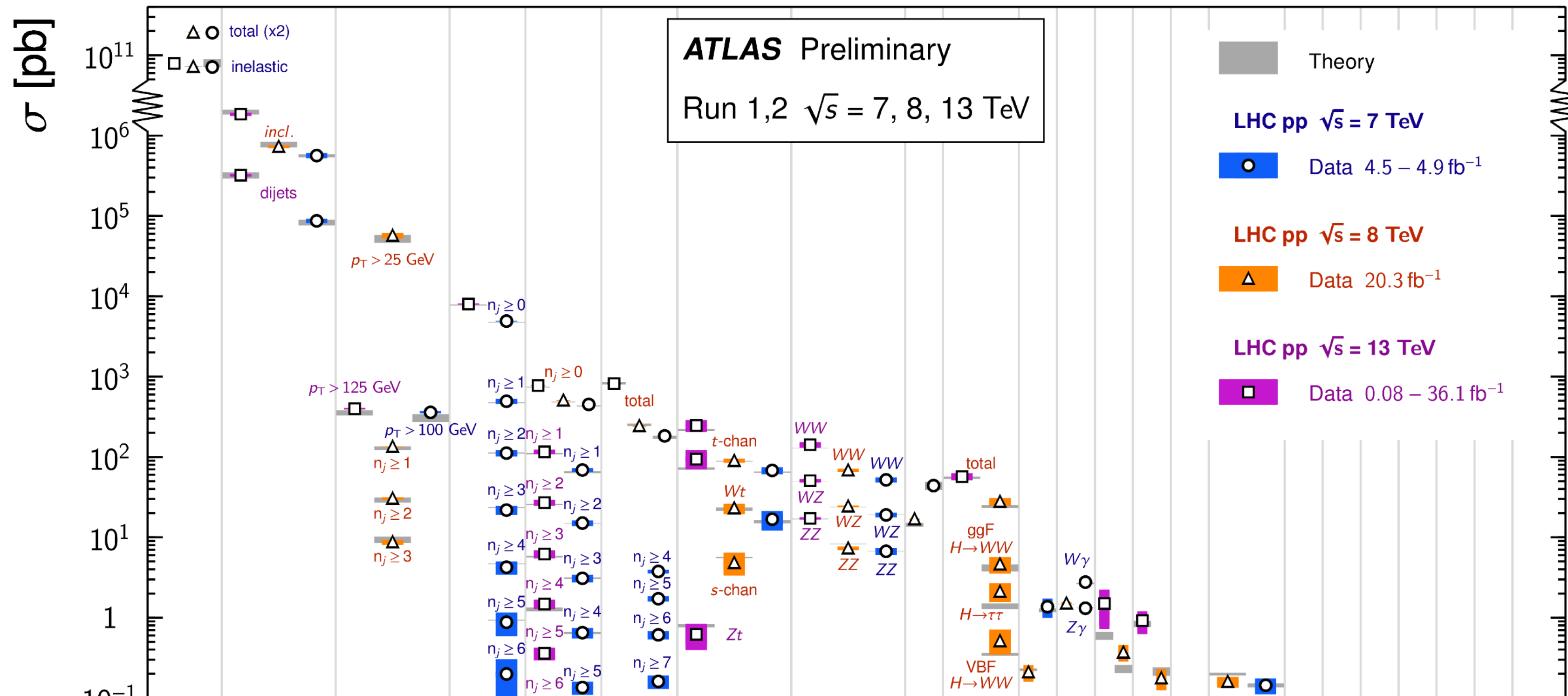
1 collision every 25 nanoseconds
1 collision toutes les 25 nanosecondes



Conséquence: Le LHC est capable de produire de grands échantillons de particules du MS!

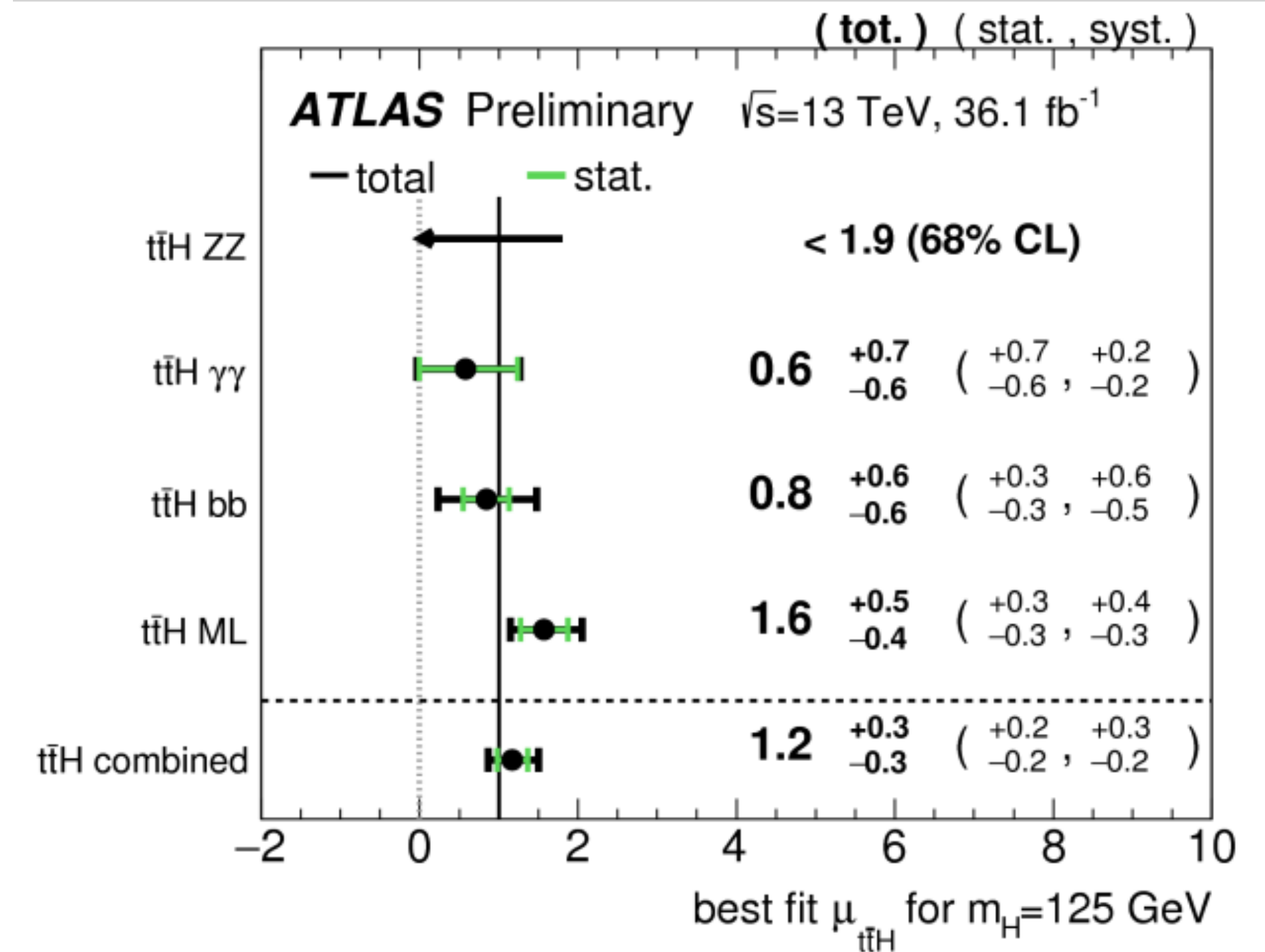
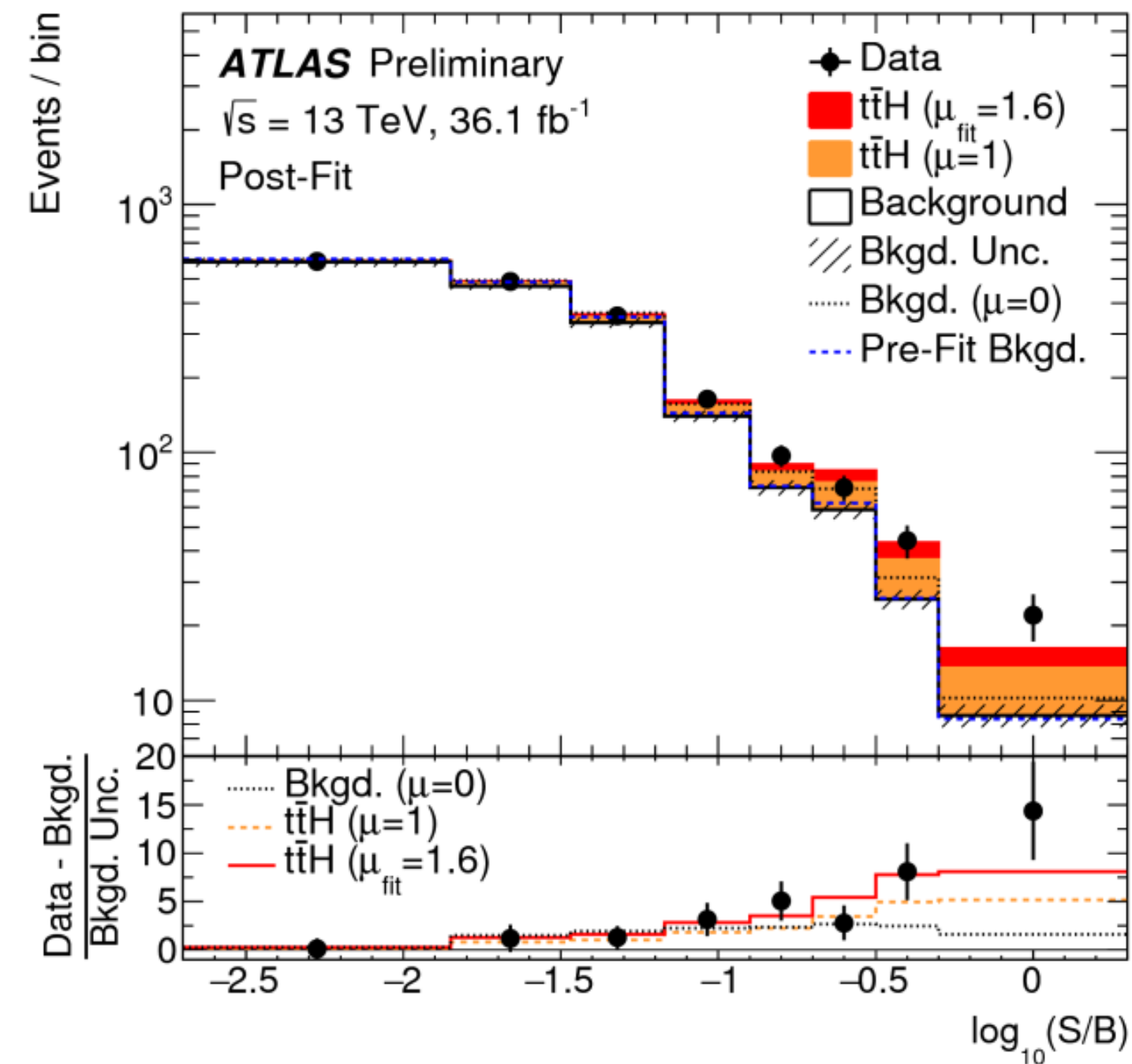
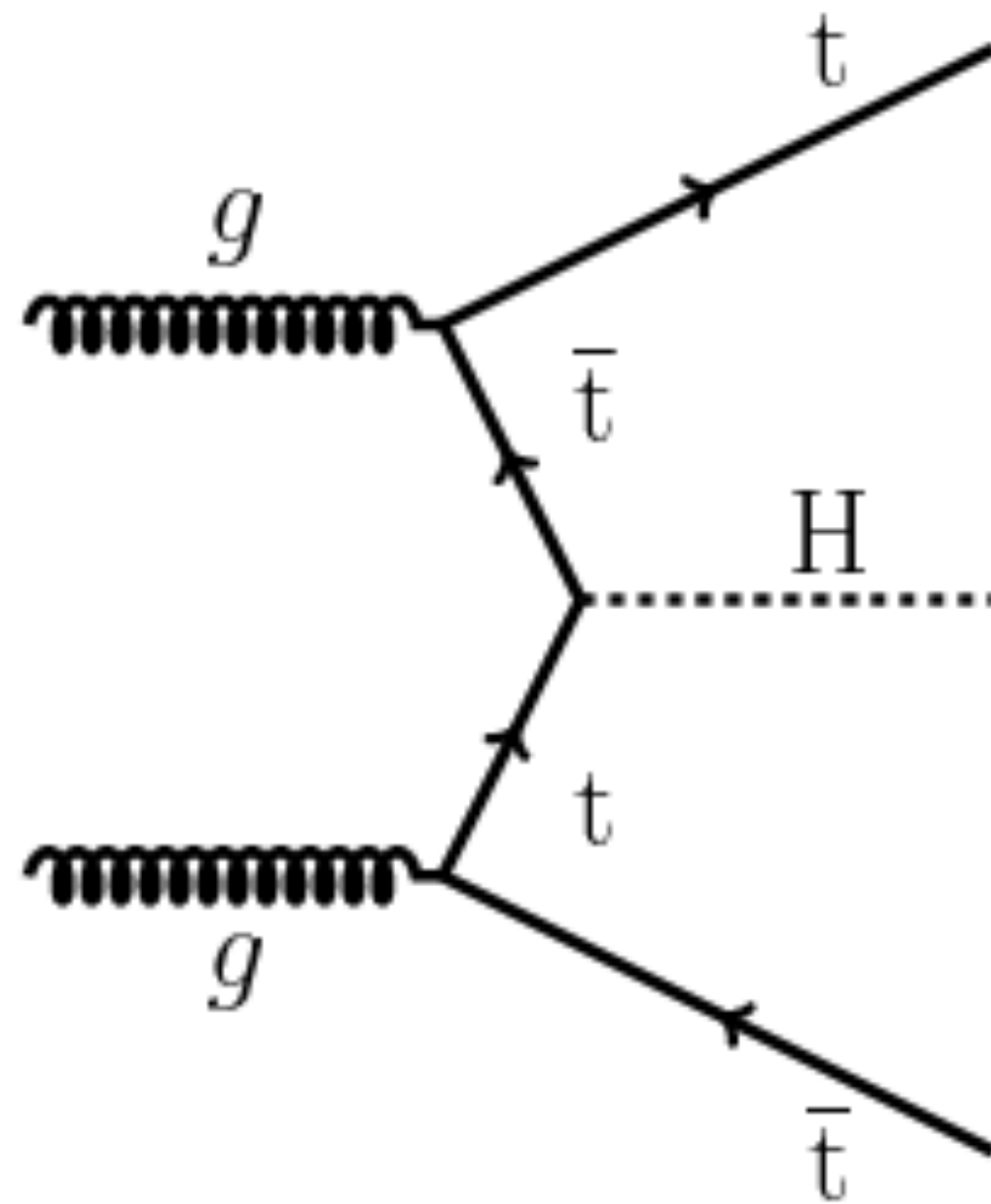
Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: July 2017



Idéal pour l'étude de la physique des particules, 800+ articles soumis par l'expérience ATLAS depuis 2010!

Découvert récemment: production simultanée de quarks top et boson de Higgs $t\bar{t}H$



Un processus intrigant qui pourrait nous permettre de mieux comprendre l'origine de la masse

Évaluation du Modèle Standard

Succès face aux tests expérimentaux:



The Standard Model and the Higgs boson

	Fermions			Bosons	
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon	Force carriers
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson	
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon	
				Higgs boson	

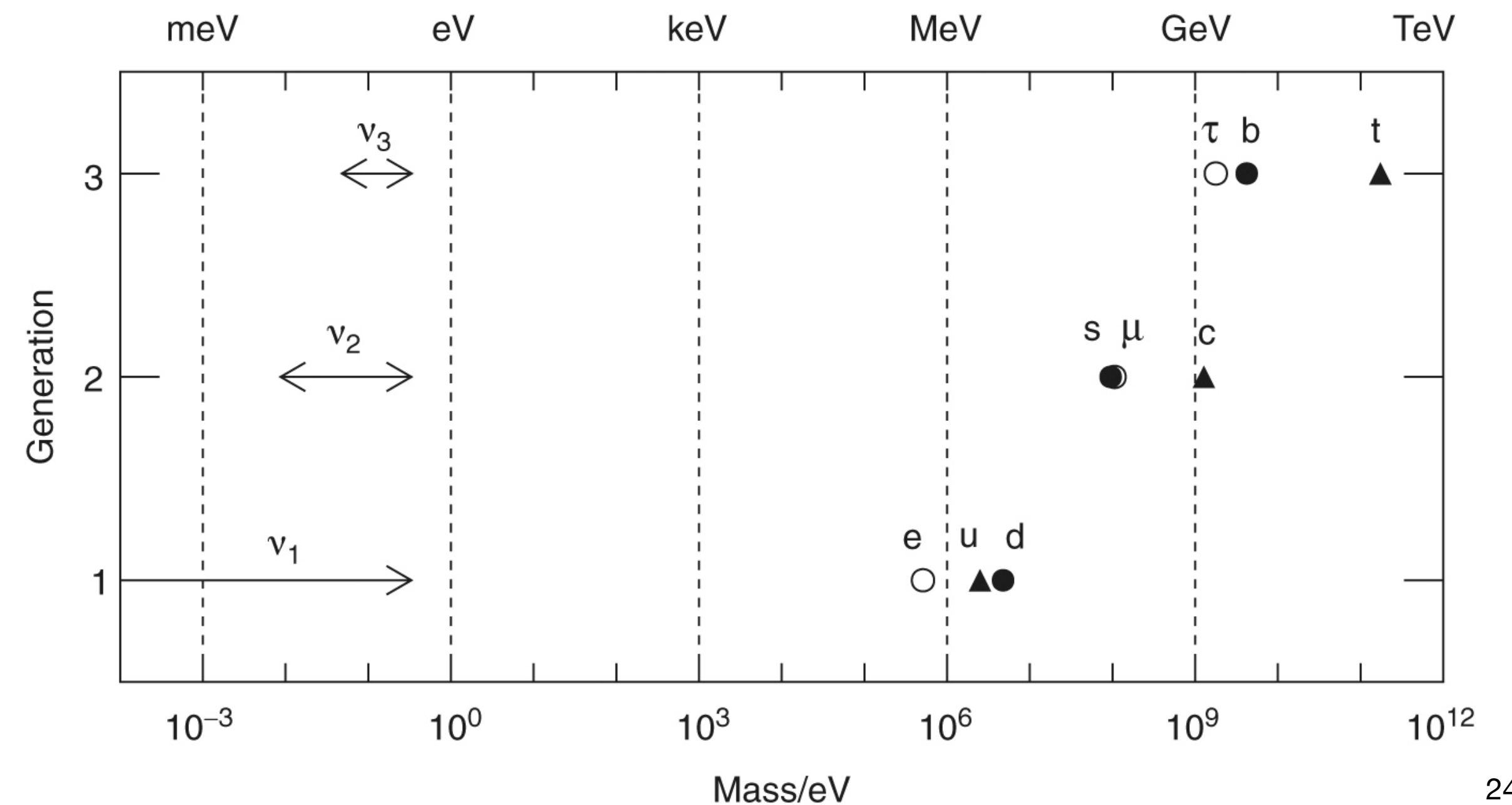
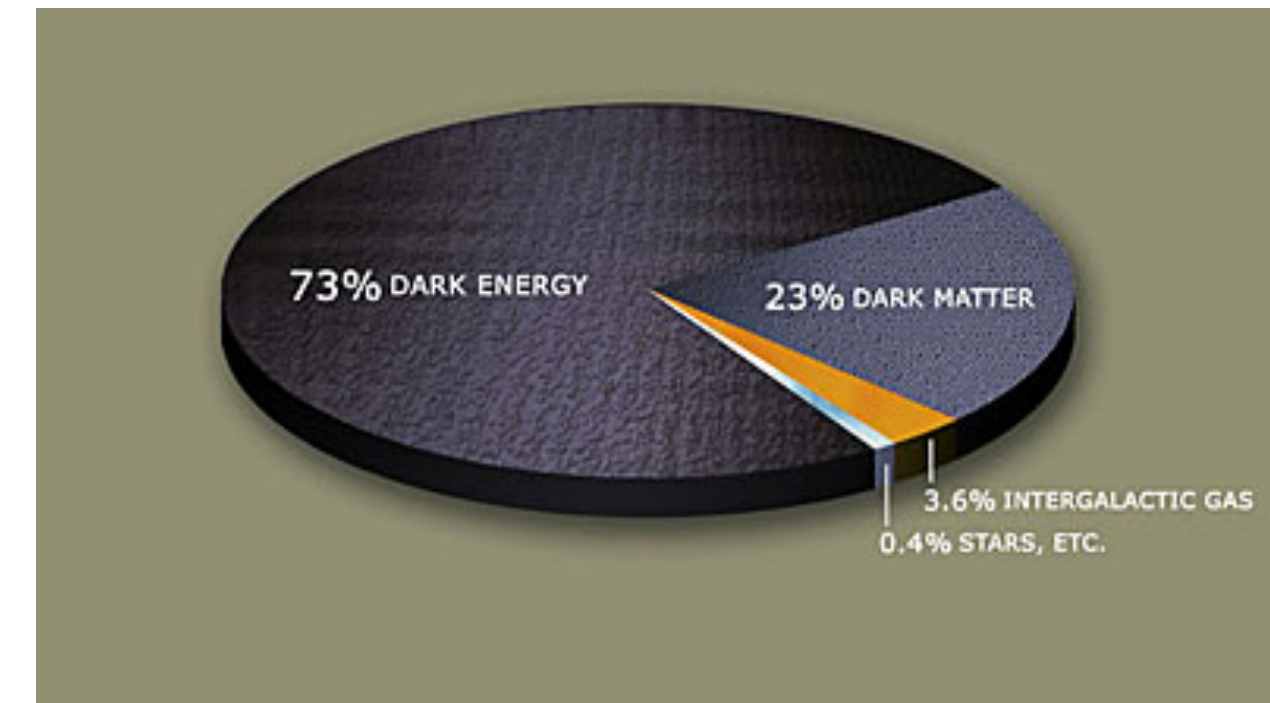
Source: AAAS

Capacité à expliquer l'Univers en entier



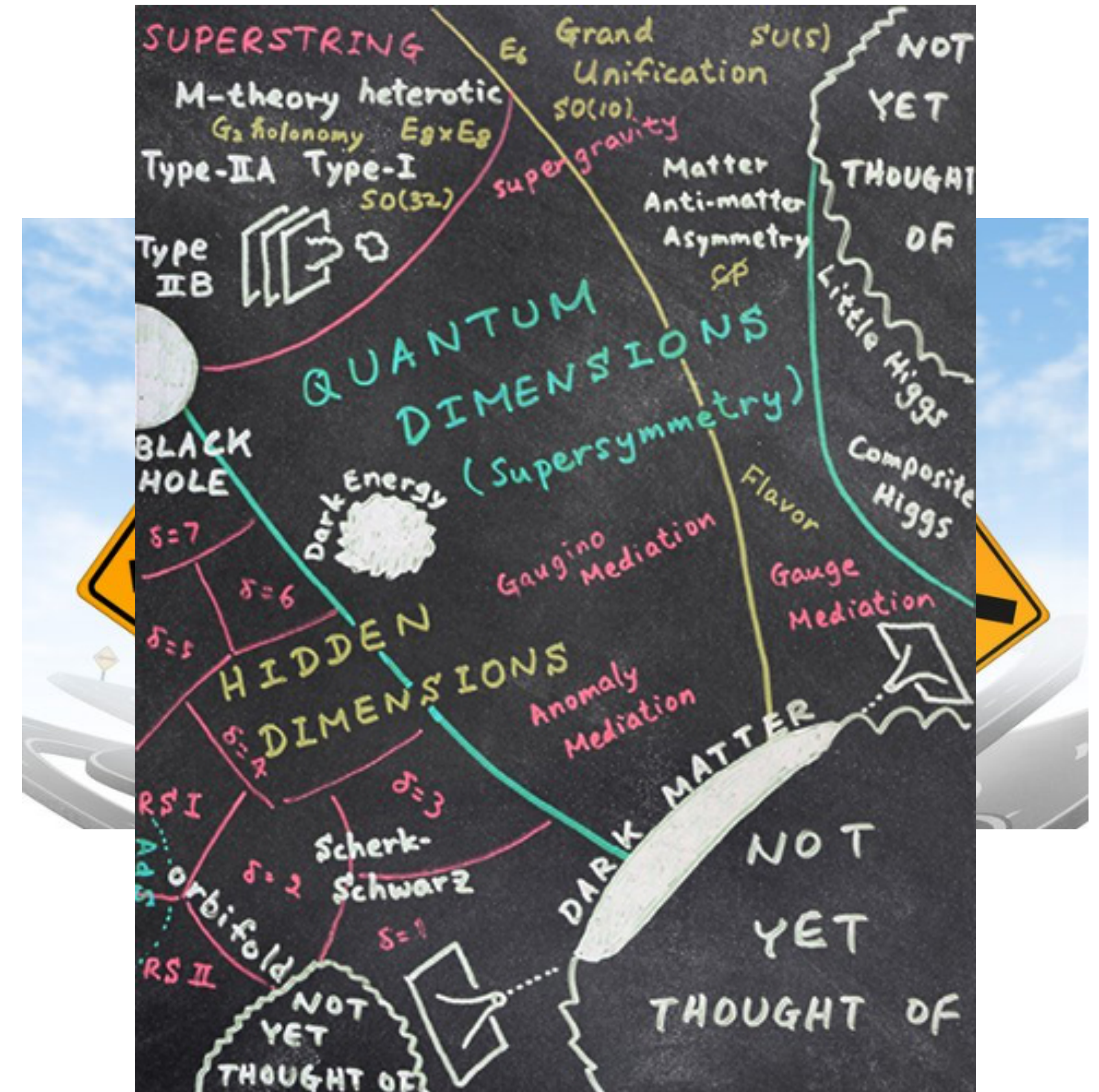
Le Modèle Standard est définitivement incomplet

- N'explique que 4% de l'Univers...
 - Matière sombre, énergie sombre
- Trop de paramètres libres (26)
- N'inclut pas la gravité
- Asymétrie entre la matière et l'antimatière
- L'origine de la masse est encore problématique
- etc



La physique au-delà du Modèle Standard

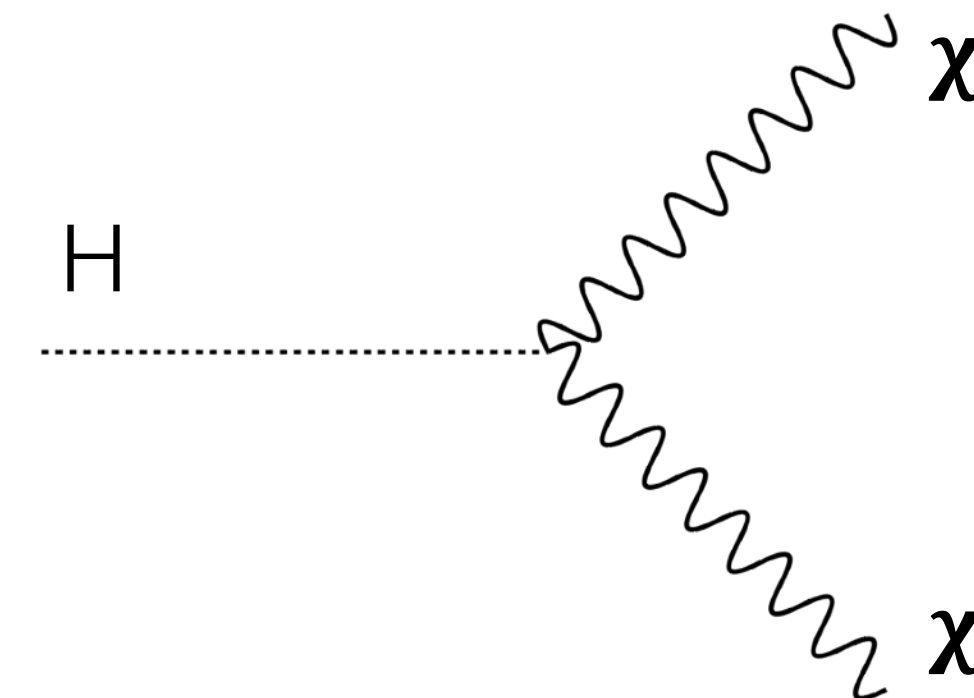
- Pas de direction claire comme pour la découverte du boson de Higgs
- Il y a donc tout un éventail de théories au-delà du MS...
- ... avec de nouvelles particules ou interactions
- Si ces **nouvelles particules/interactions** ont une connexion (i.e. couplage) avec les particules du MS, elles pourraient être **produites au LHC!**



Exemple de portail vers la nouvelles physique: boson de higgs

- Le Higgs donne la masse aux particules du MS...
- Pourquoi ne donnerait-il pas la masse aux particules au-delà du MS??
- Ceci impliquerait un couplage entre le Higgs et particules au-delà du MS
- Quelle est la seule particule au-delà du MS dont on est sûr qu'elle existe?

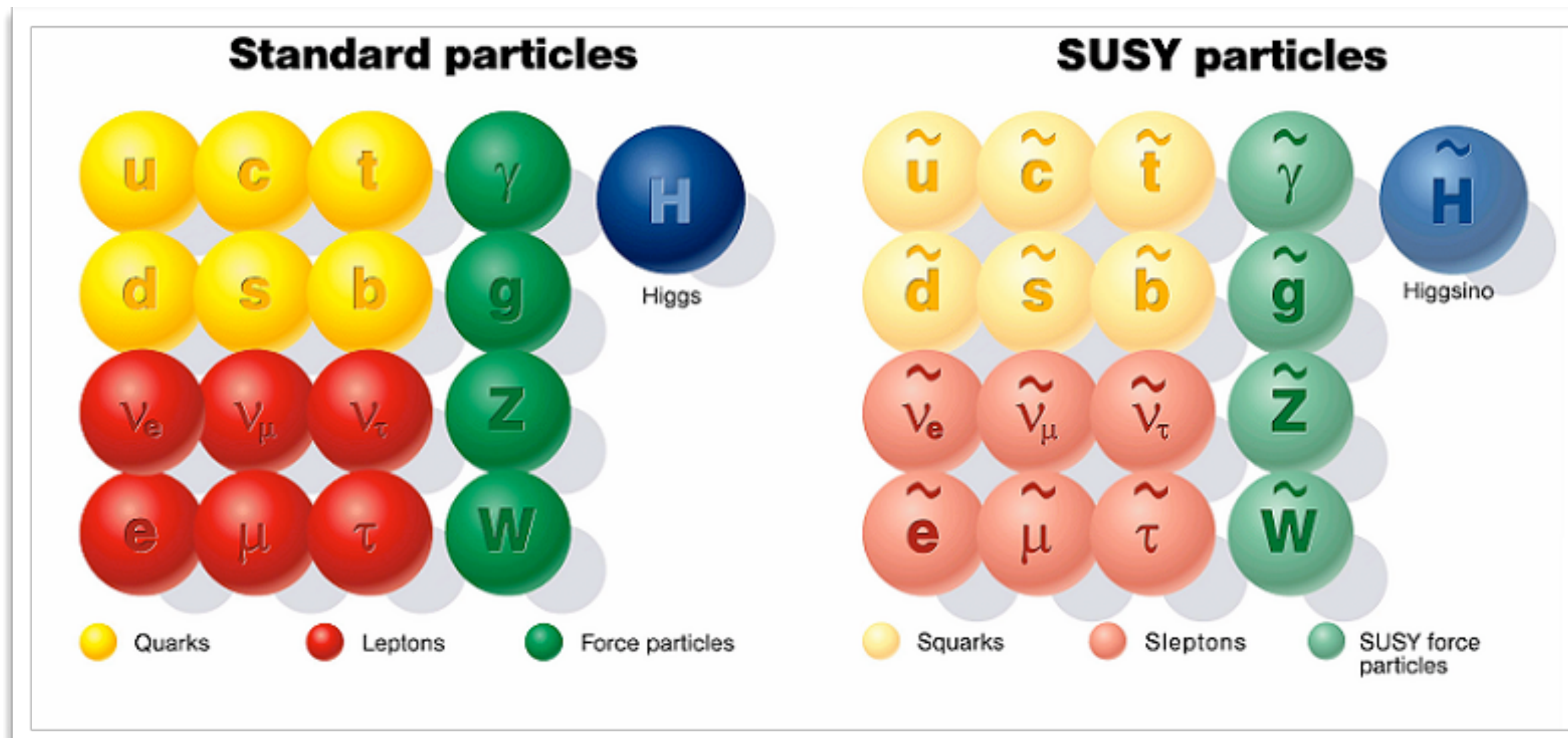
La matière sombre! (χ)



On cherche des désintégrations
“invisibles” du Higgs au LHC
Limite actuelle: $B(H \rightarrow \chi\chi) < 32\%$
(95%CL)

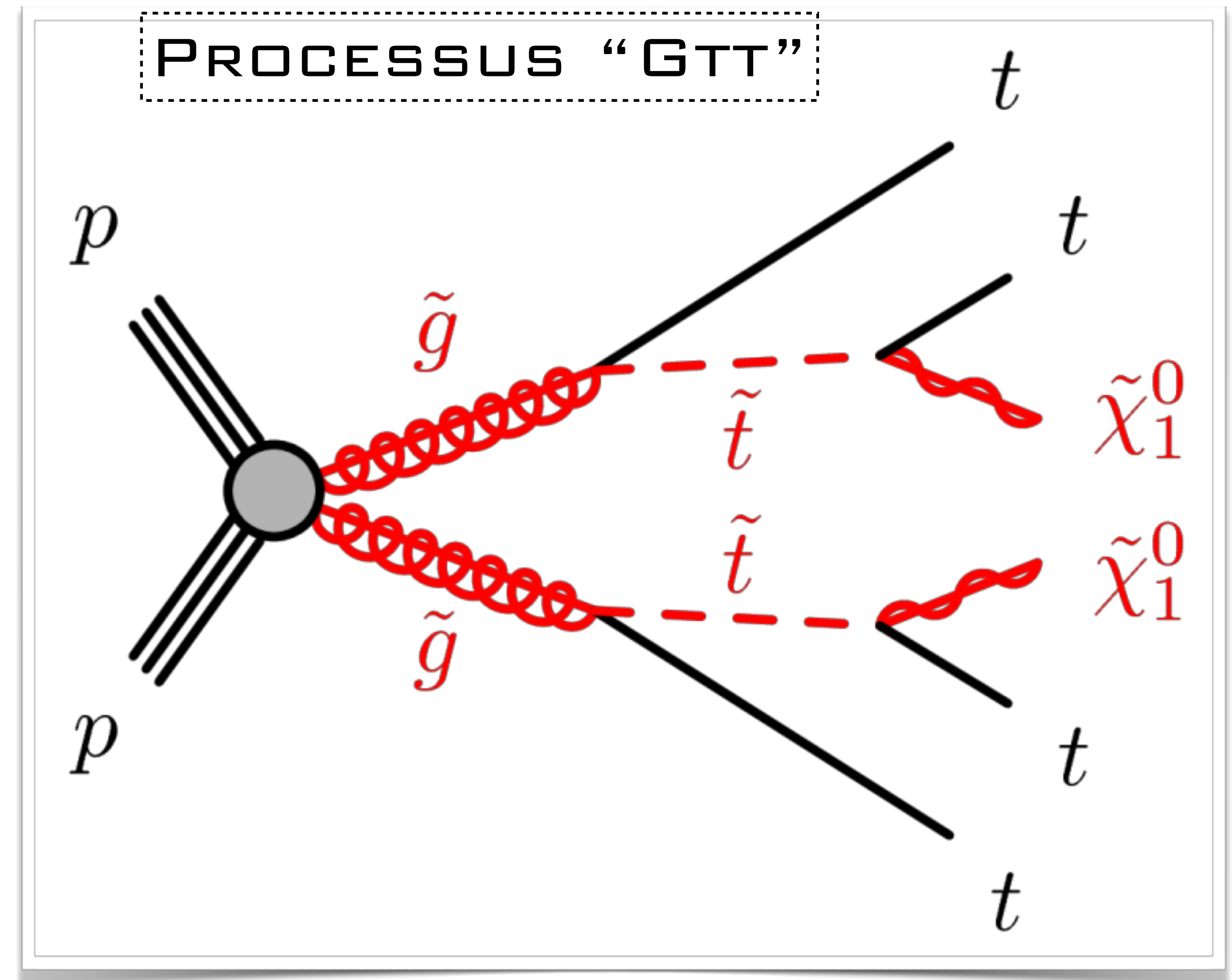
La Supersymétrie (SUSY) à la rescousse du MS

- Symétrie entre bosons (force) et fermions (matière)
 - “Superpartenaire(s)” pour chaque particules du MS avec spin différent par $\frac{1}{2}$
- Règle plusieurs des problèmes du MS d’un coup!
 - Candidat à la MS
 - Explique la légèreté du boson de Higgs
 - Peut expliquer l’asymétrie matière-antimatière
 - Procure un cadre vers une grande théorie unifiée de l’Univers



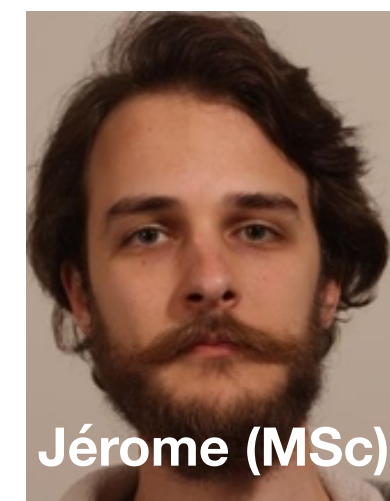
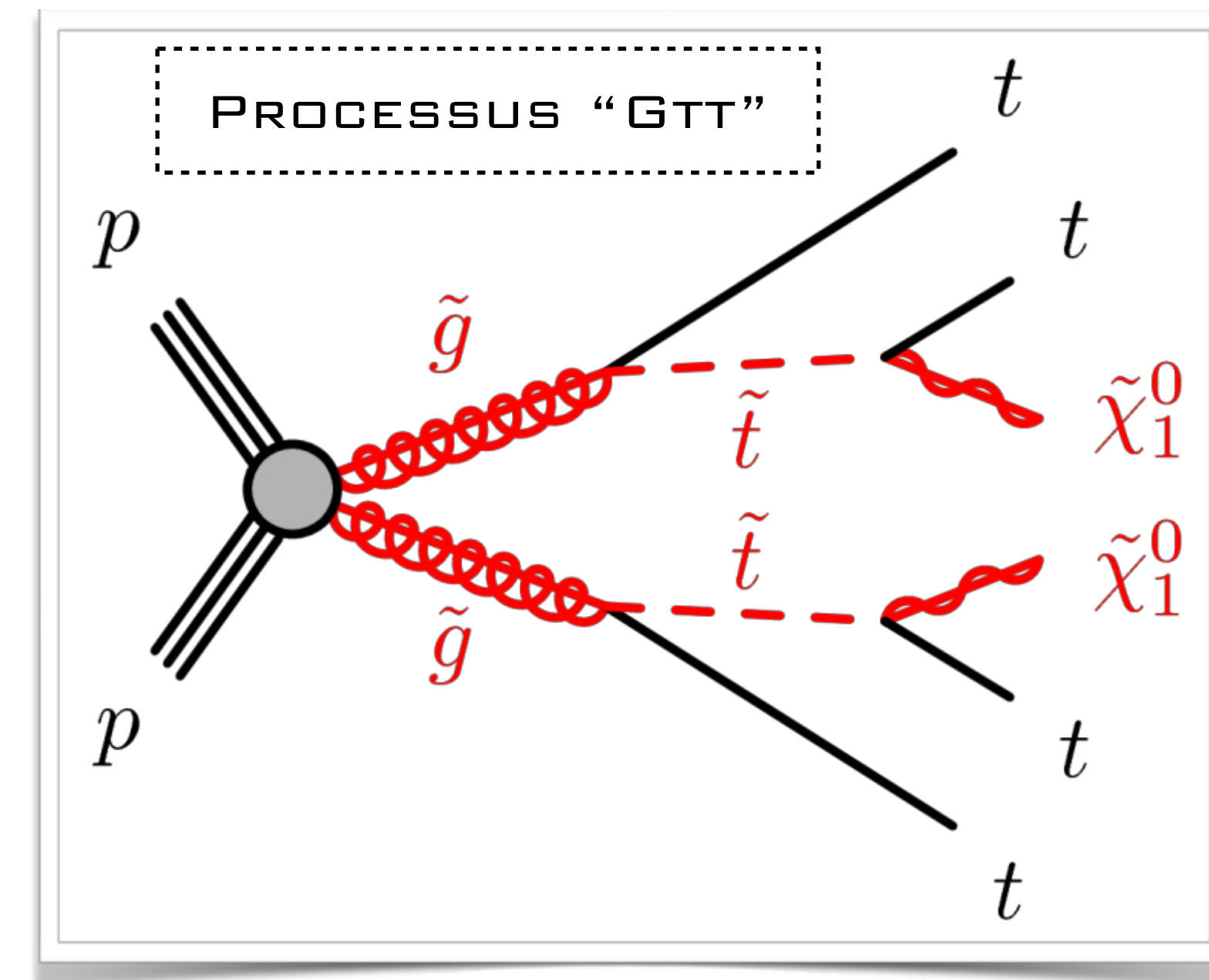
Un processus SUSY particulièrement intéressant!

- Les 3 superpartenaires les plus légers devraient être (ordre décroissant)
 1. Gluinos
 2. Stop
 3. Neutralino (i.e. higgsino)
- La chaîne de désintégration gluino \rightarrow stop \rightarrow matière sombre est particulièrement bien motivée!

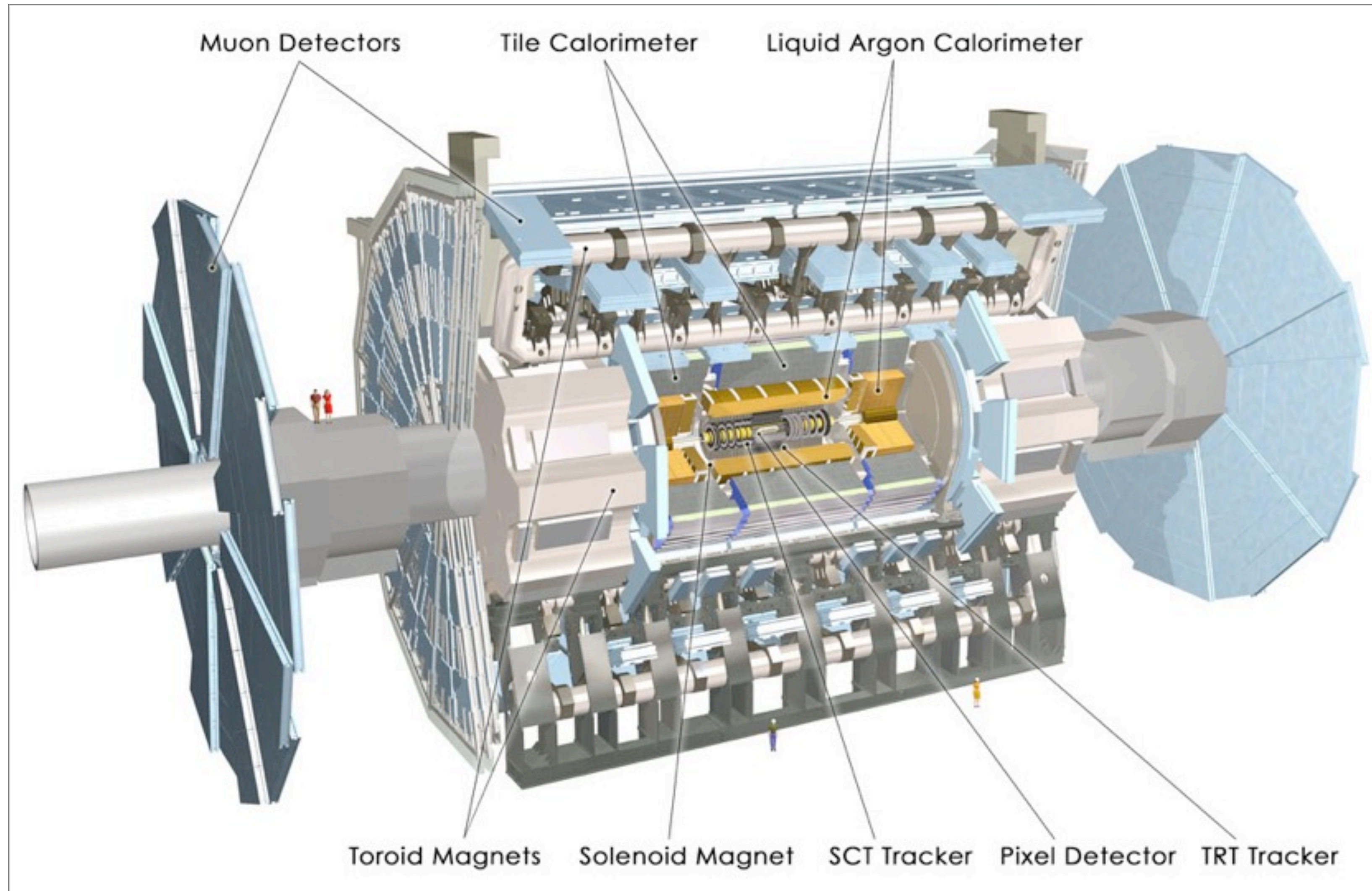


Équipe de recherche de physique au-delà du MS à l'UdeM

- Beaucoup d'effort pour trouver ce processus, et chercher SUSY en général, à l'UdeM
 - Équipe "multi-b jets"
 - Équipe "multi-leptons"
- On recherche aussi d'autre type de physique au-delà du MS
 - Nouvelles particules se désintégrant en paires de boson W^\pm et/ou Z



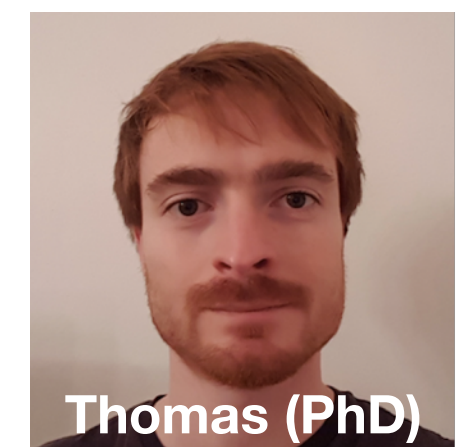
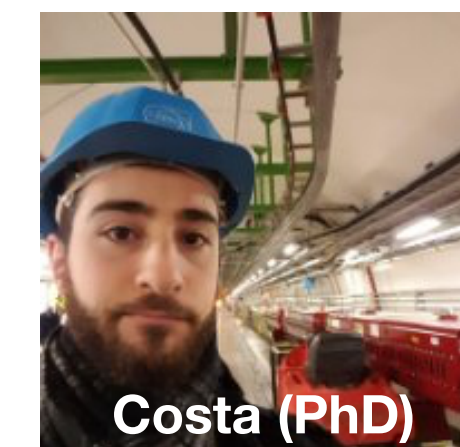
Le détecteur ATLAS



7,000 tonnes, 44x25m, 10^8
canaux électroniques

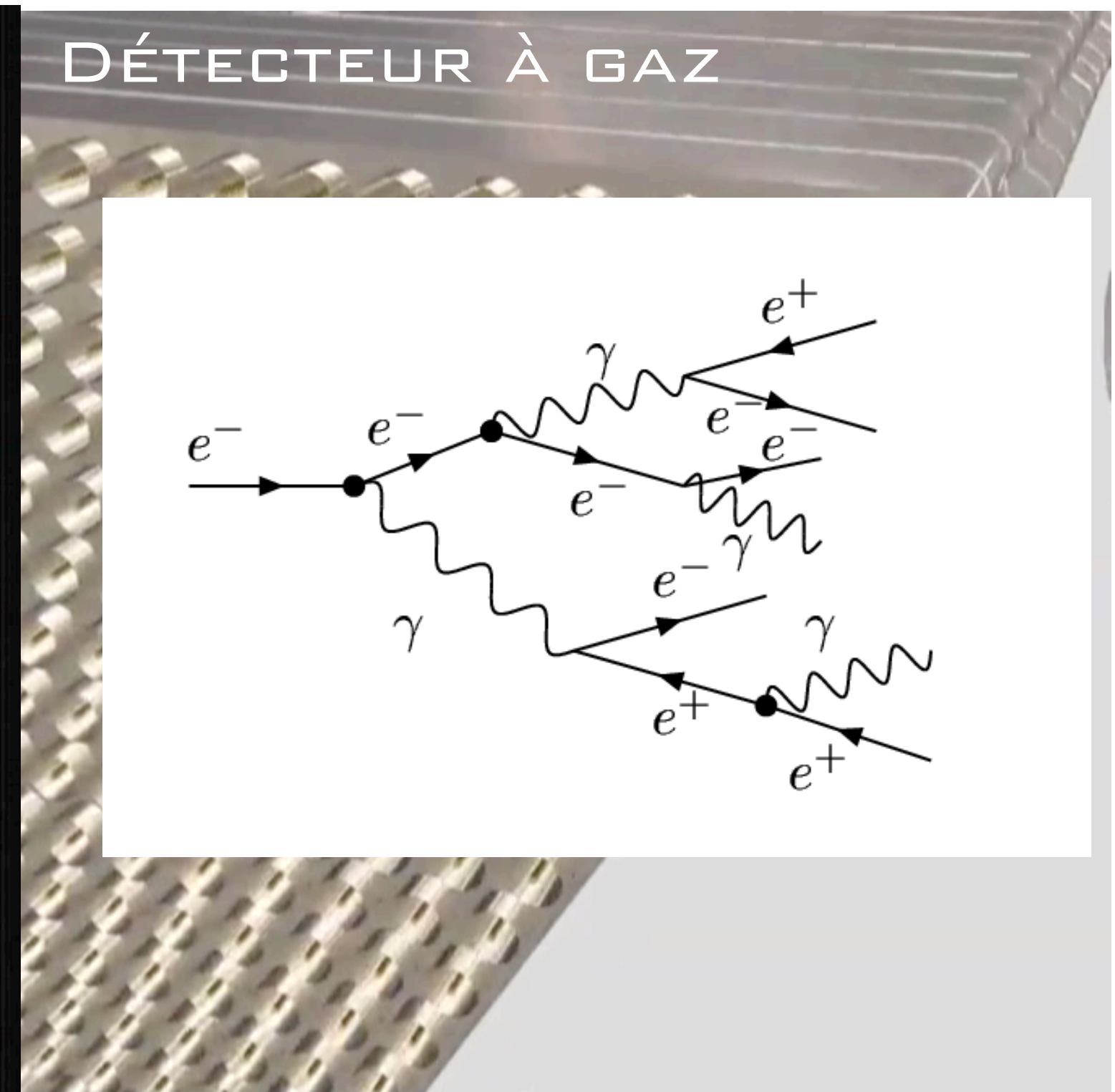
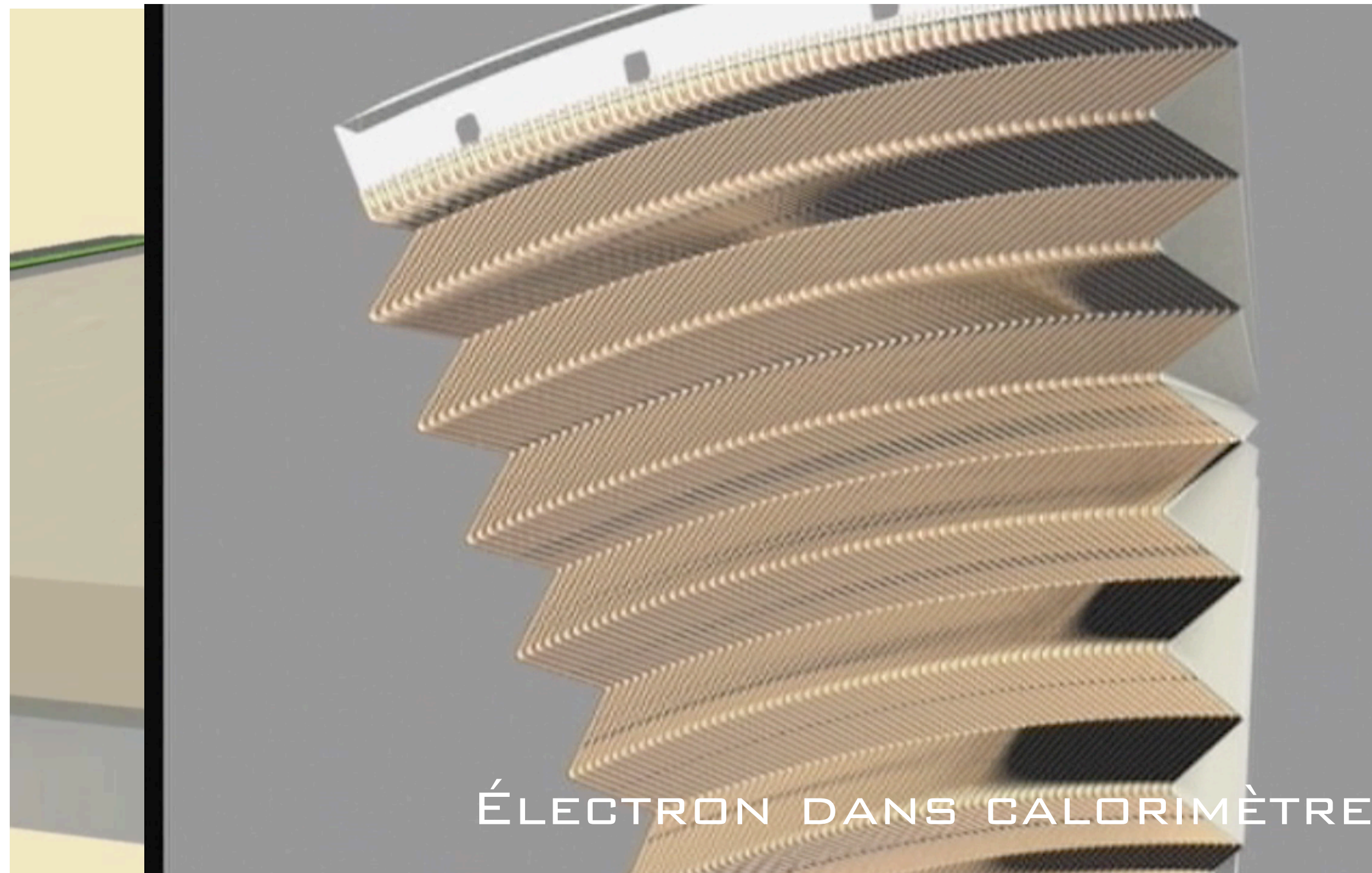
Collaboration: ~3000
physiciens, 38 pays

DES DÉTECTEURS "TIMEPIX"
SONT LOCALISÉES DANS LA
CAVERNE POUR MESURER LE
CHAMP DE RADIATION



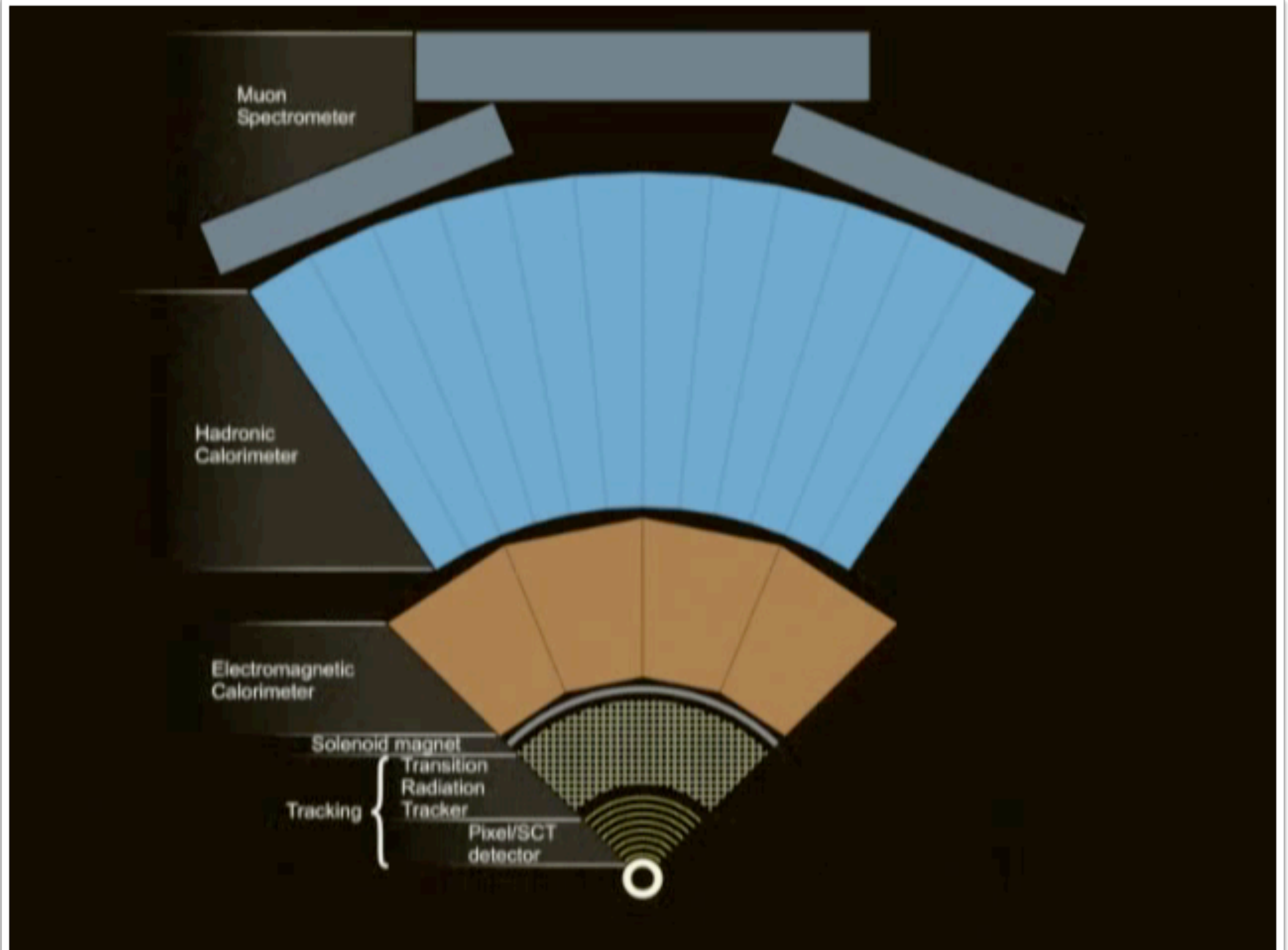
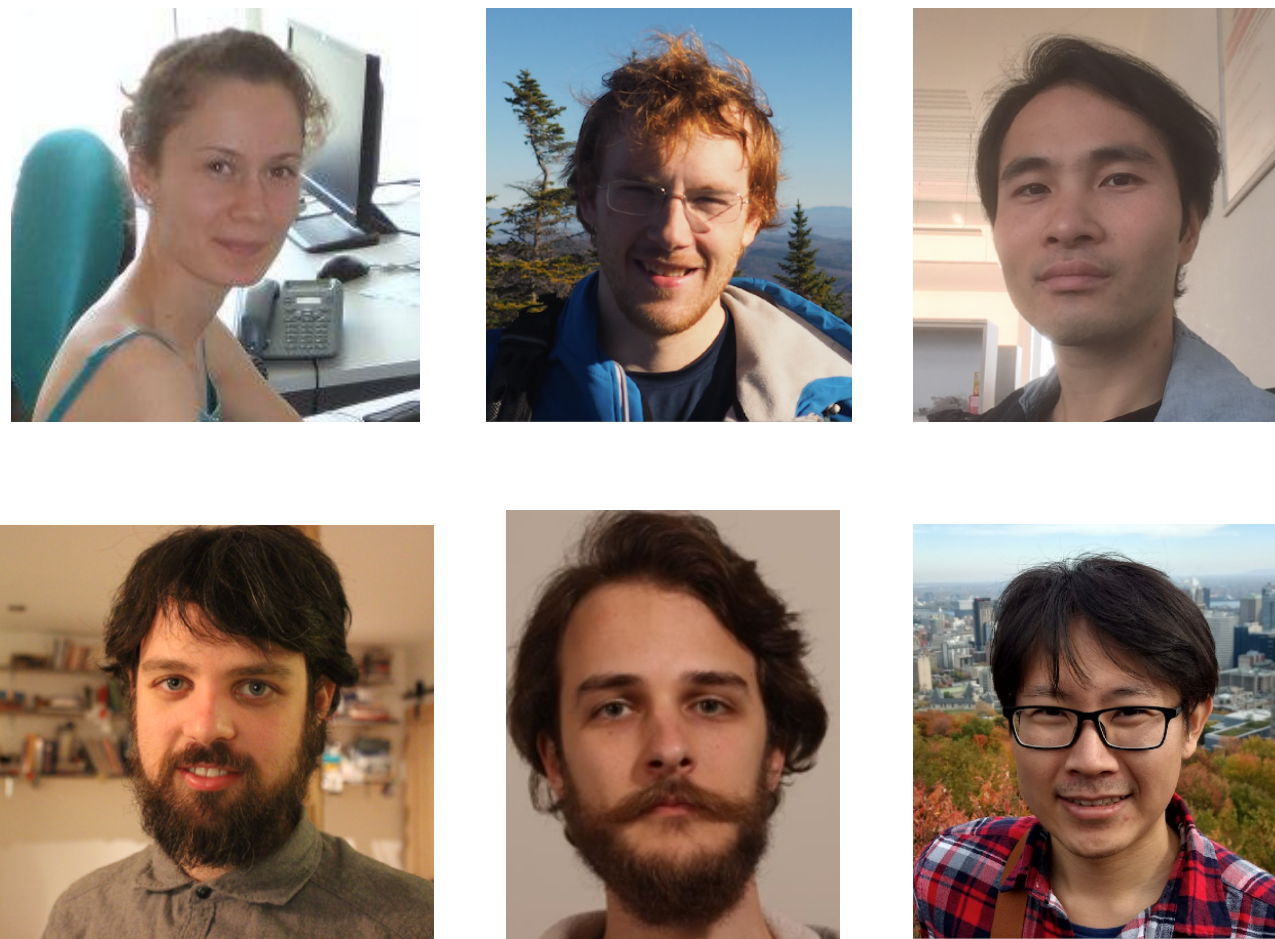
Mais comment peut-on voir des particules infiniment petites?

- Seules quelques particules ont un temps de vie assez long pour interagir avec le détecteur ATLAS
 - $e, \mu, p, n, \nu, \gamma, \dots$
- ATLAS n'a besoin d'être sensible qu'à ces particules!
- 2 grandes techniques de détections: (1) **Trajectométrie** et (2) **Calorimétrie**



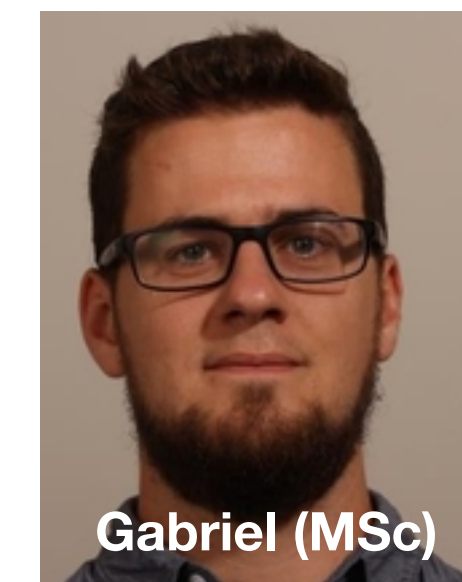
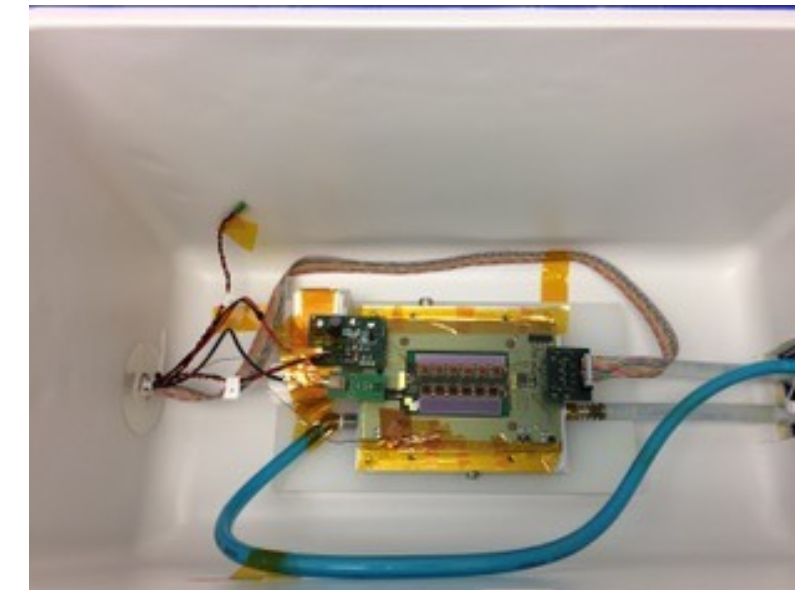
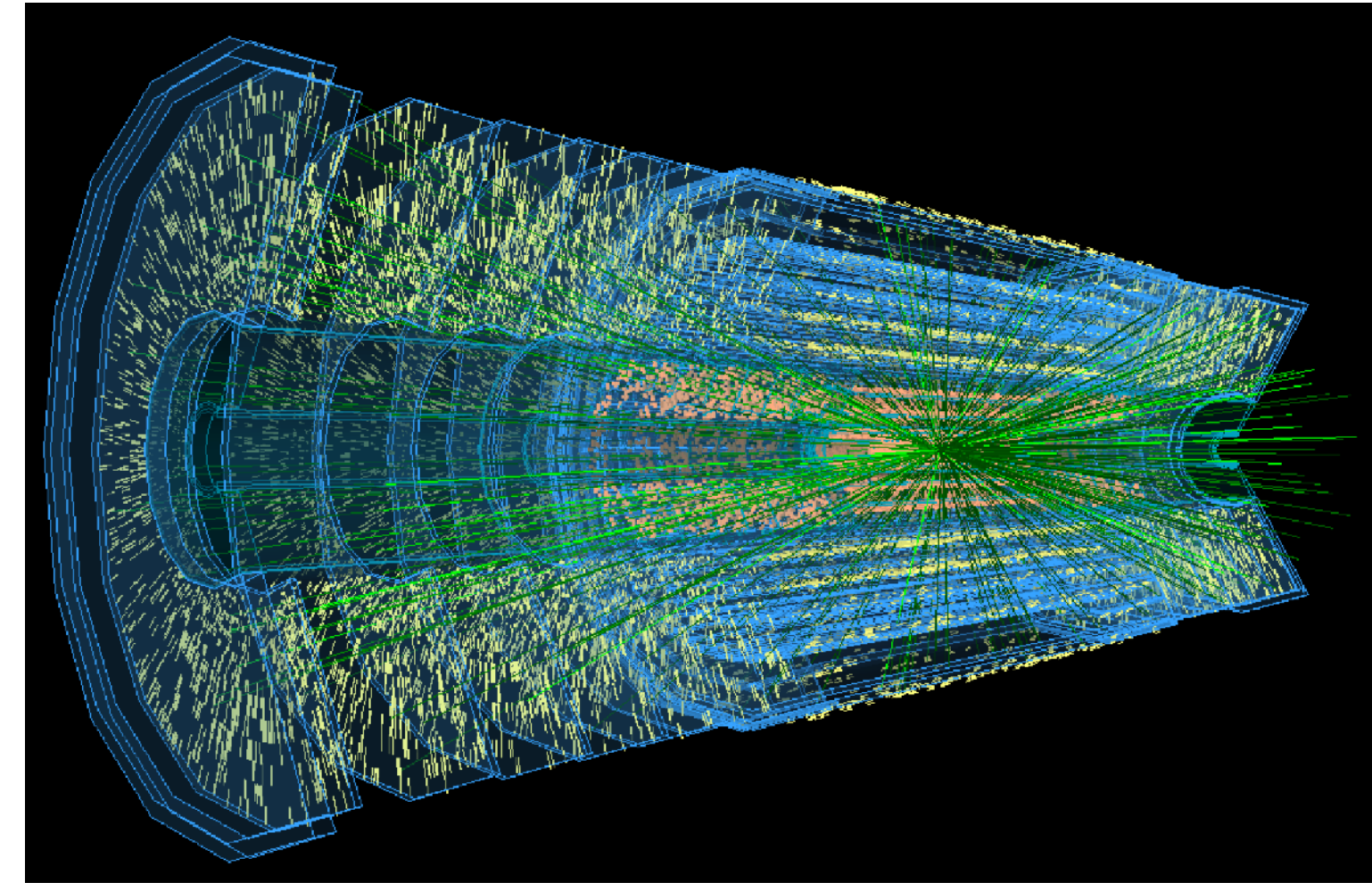
La reconstruction et l'identification des particules individuelles

- En combinant l'info de plusieurs sous-détecteurs, on peut identifier chaque particule
- À l'UdeM on travaille sur la trajectométrie et l'identification des e^\pm



Le futur du LHC et ATLAS

- Intensité du faisceau du LHC augmentée par un facteur $\sim x10$ en 2026: **High-Luminosity LHC**
- $\sim 100x$ plus de données seront récoltées d'ici à ~ 2035 !
- Le trajectomètre d'ATLAS devra être complètement remplacé en 2025
- Subvention de 29M\$ pour construire une partie de ces détecteurs au Canada
 - 1.8M\$ à l'UdeM pour développer un lab de tests de ces détecteurs (campus MIL)



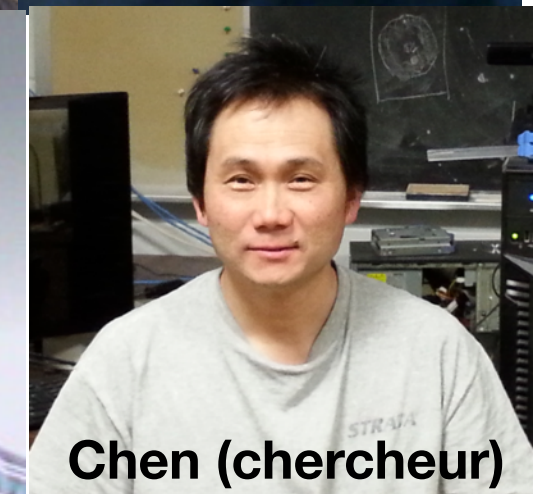
Gabriel (MSc)



Nick (chercheur)



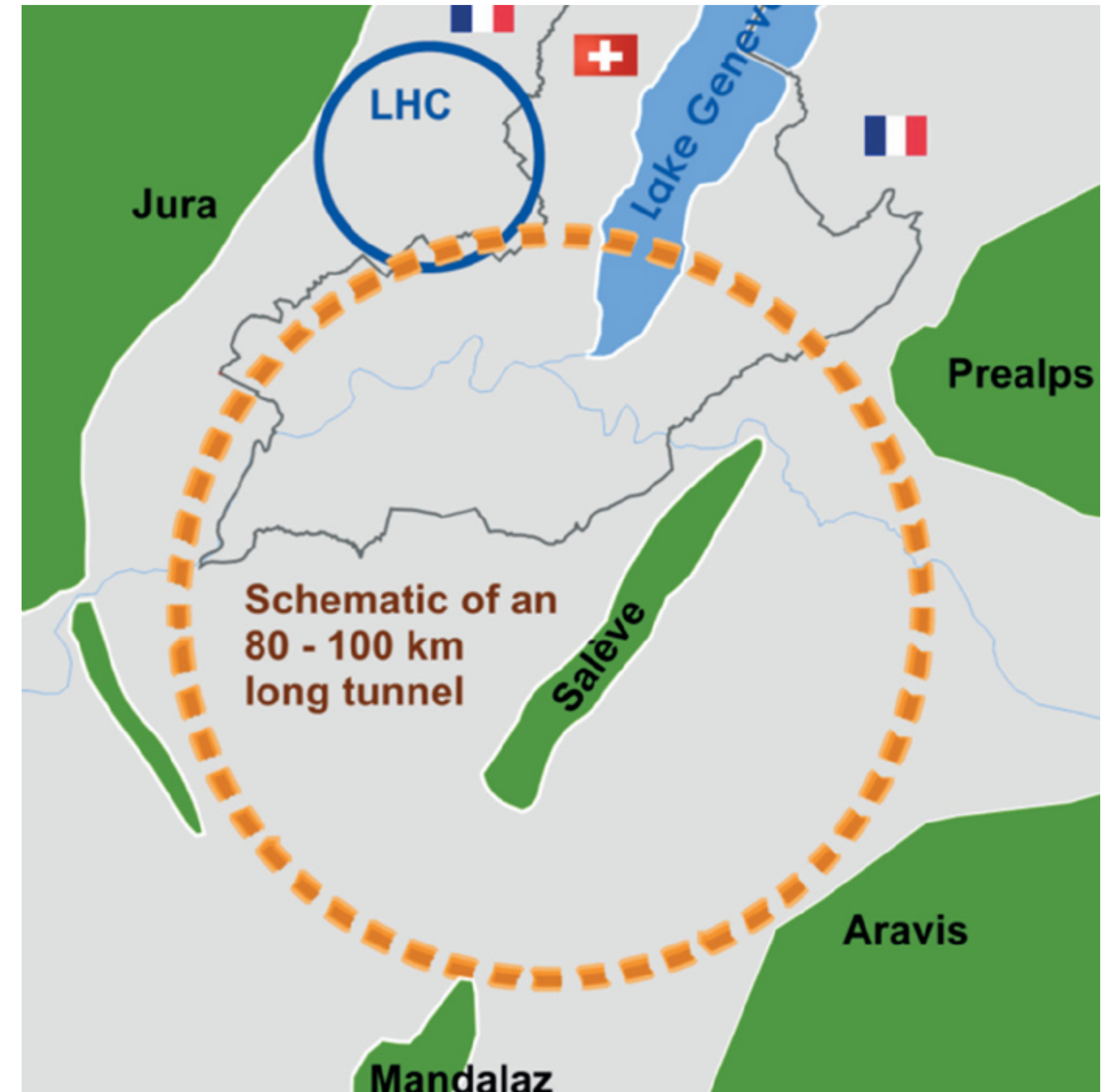
Jean-Pierre (chercheur)



Chen (chercheur)

Et plus loin encore, le “Future Circular Collider” (FCC)

- Collisions pp avec $\sqrt{s} = 100$ TeV!
- Grande conférence internationale la a eu lieu à Ottawa en octobre pour discuter du futur de la physique des particules

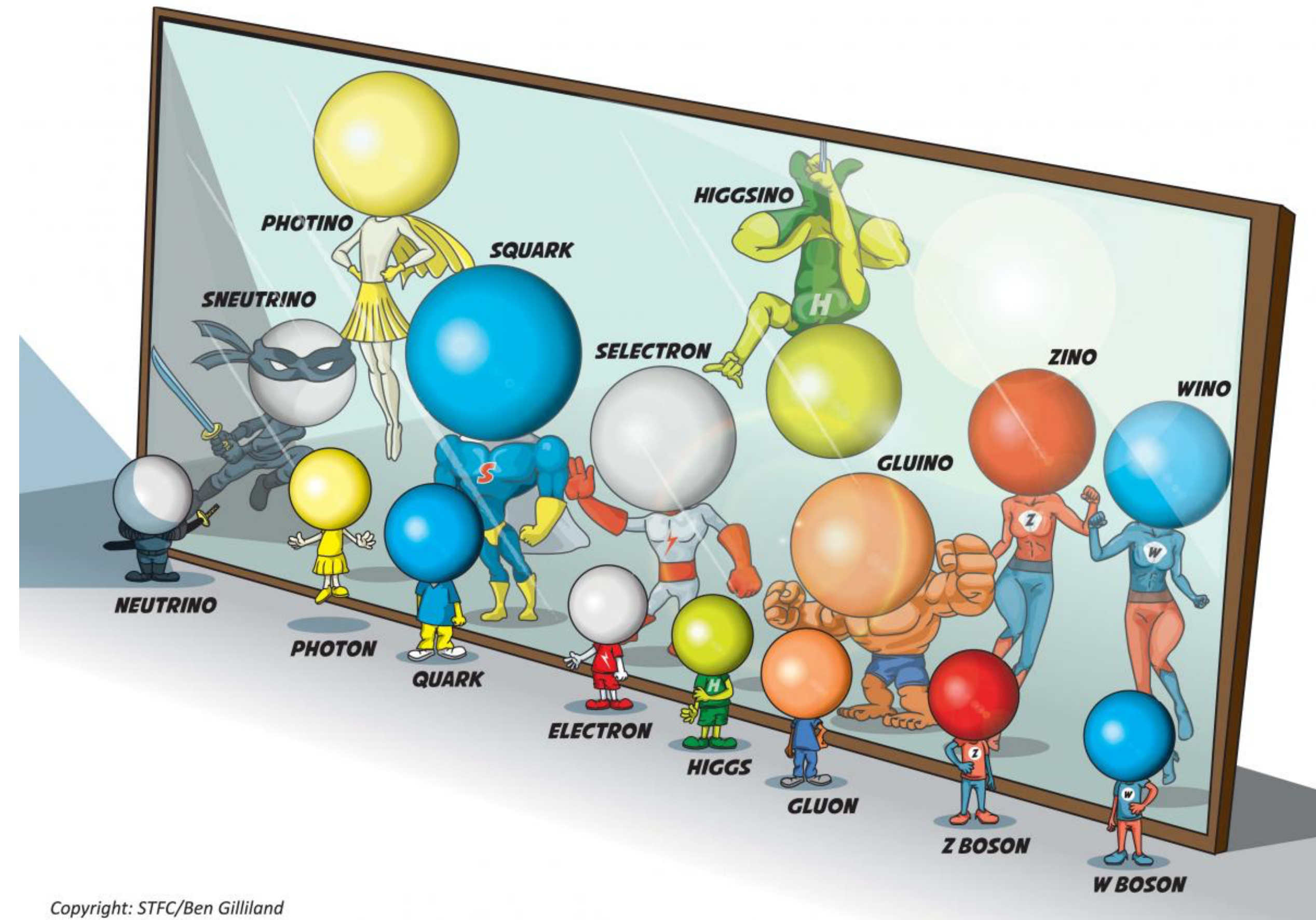


En résumé

- La physique des particules tente de comprendre l'infiniment petit au niveau le plus fondamental possible
- LHC et ATLAS sont des outils idéaux pour cette quête
 - Peuvent produire toutes les particules du MS
 - + potentiellement les particules au-delà du MS
- D'autres expériences, comme celle recherchant les particules de matière sombre, jouent aussi un rôle crucial!
- Pas encore de signe de physique au-delà du MS, mais il reste encore beaucoup à explorer!

La Supersymétrie doit être brisée!

- Superpartenaires doivent être très massifs!
 - Sinon ils auraient déjà été observés
- Pour résoudre les problèmes du MS, certains superpartenaires devraient être relativement légers
 - **Et donc être potentiellement produits au LHC!**



La phénoménologie de SUSY

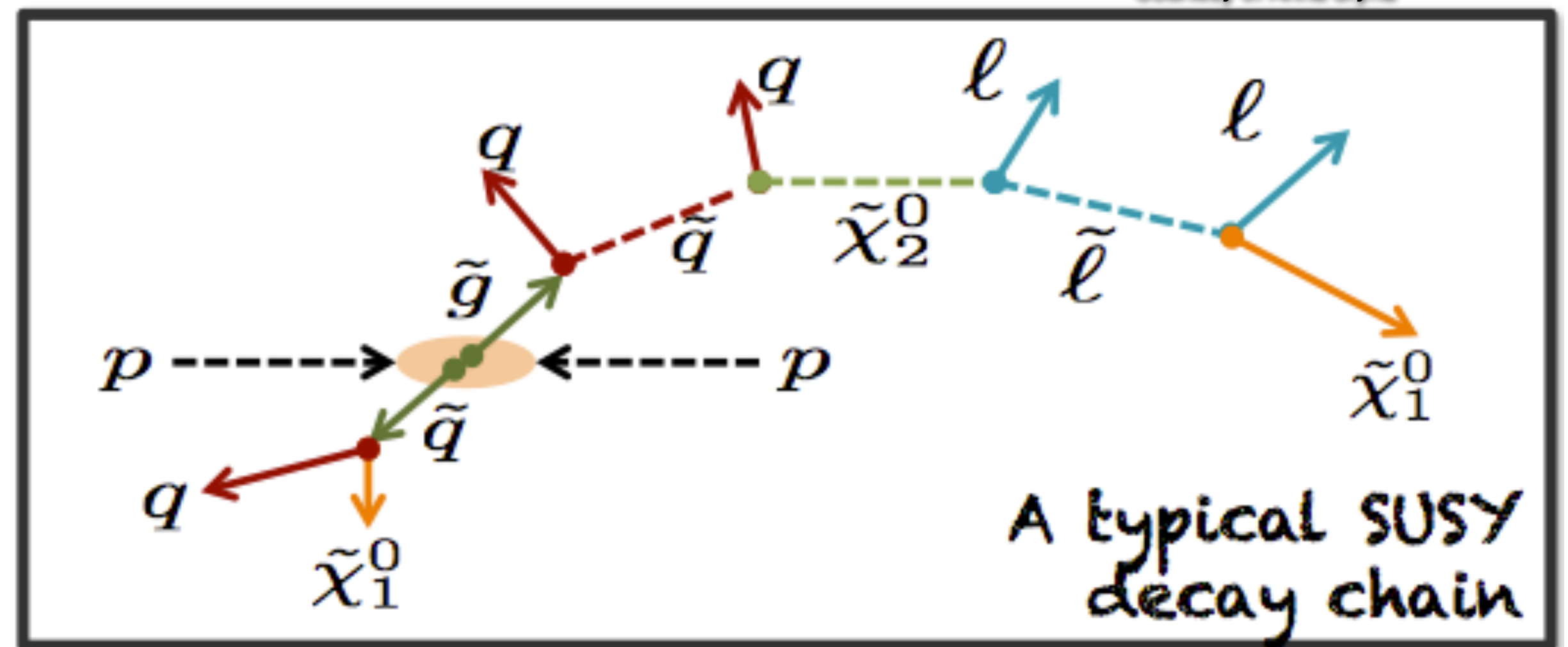
- Les particules SUSY interagissant via l'interaction forte vont être plus facile à produire

- **Squarks et gluinos**

- Les particules SUSY de désintègrent instantanément

- S'ensuit une **chaîne de désintégration**

Courtesy of Anna Sfyria



- La **particule SUSY la plus légère** est protégée par une symétrie → **stable**
 - Candidat **matière sombre!**
 - Typiquement le neutralino $\tilde{\chi}_1^0$