

Dévoiler les saveurs de l'univers: Petites particules, grandes questions

Dorothea vom Bruch

dorothea.vom.bruch@cern.ch

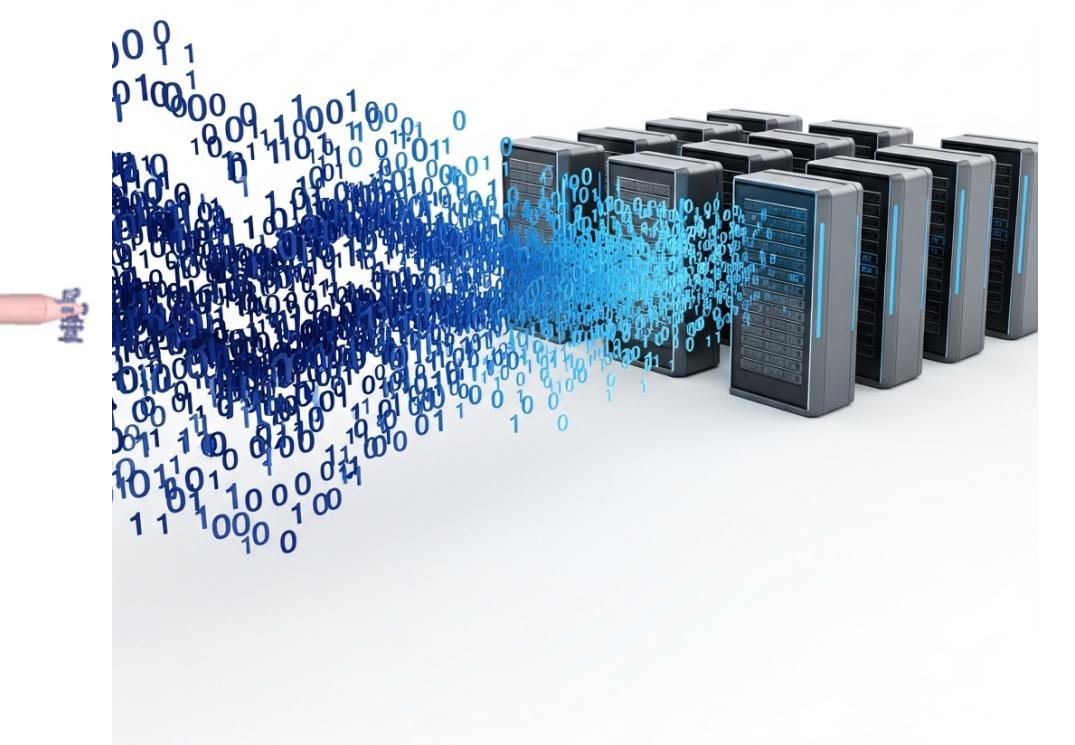
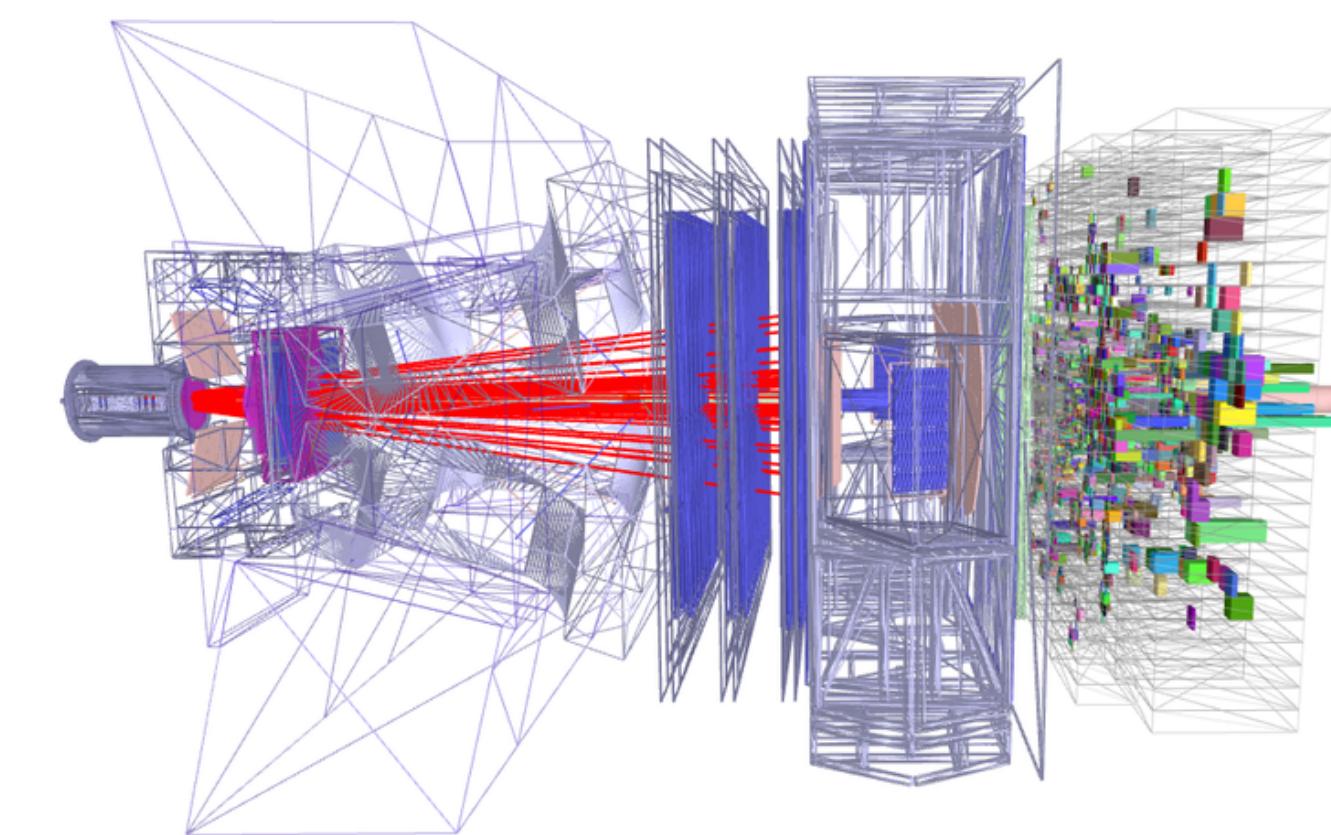
CPPM, Aix-Marseille Université, Marseille, CNRS/IN2P3

Cycle de conférences du CPPM

20 Septembre 2025

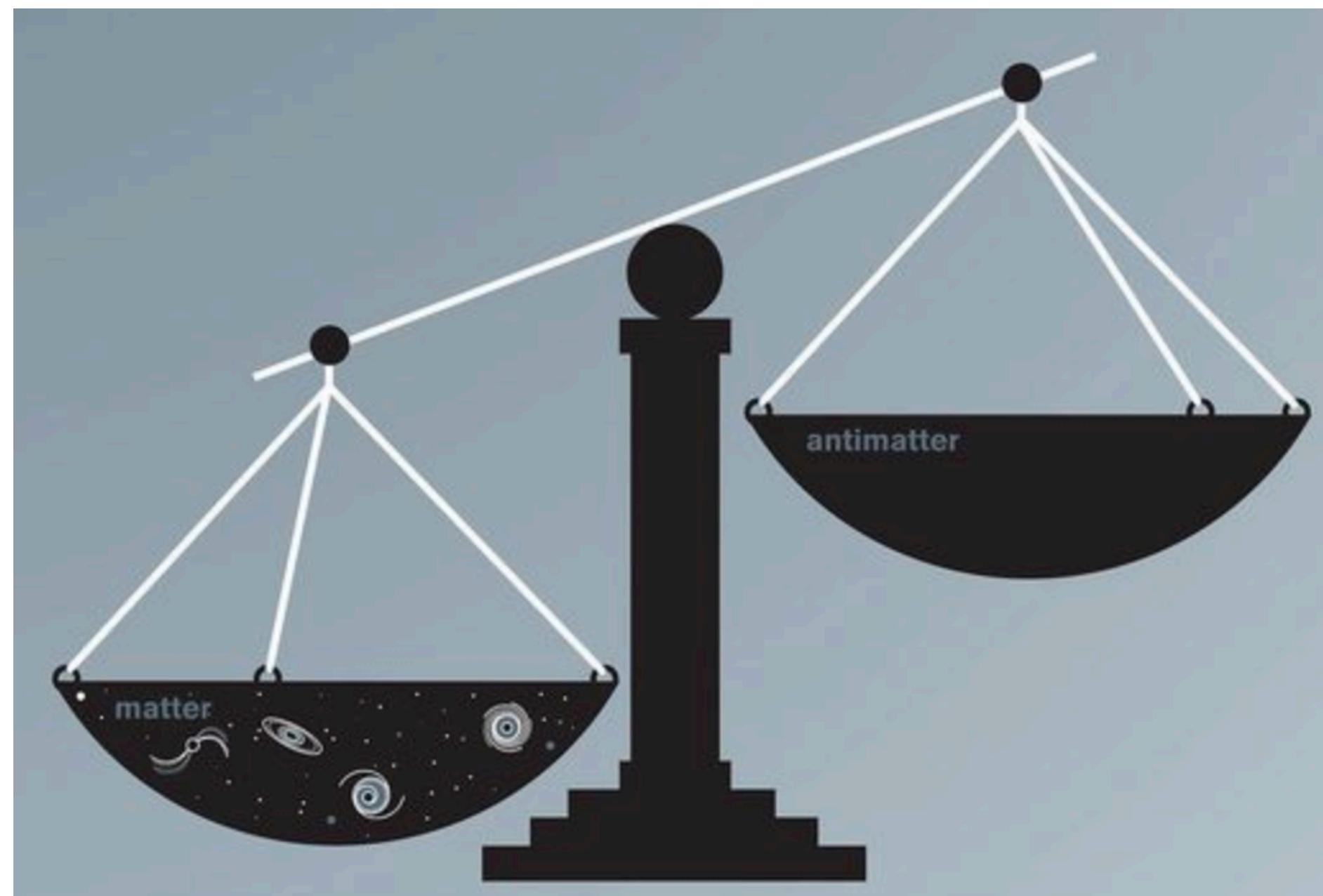


amU
Aix Marseille
Université



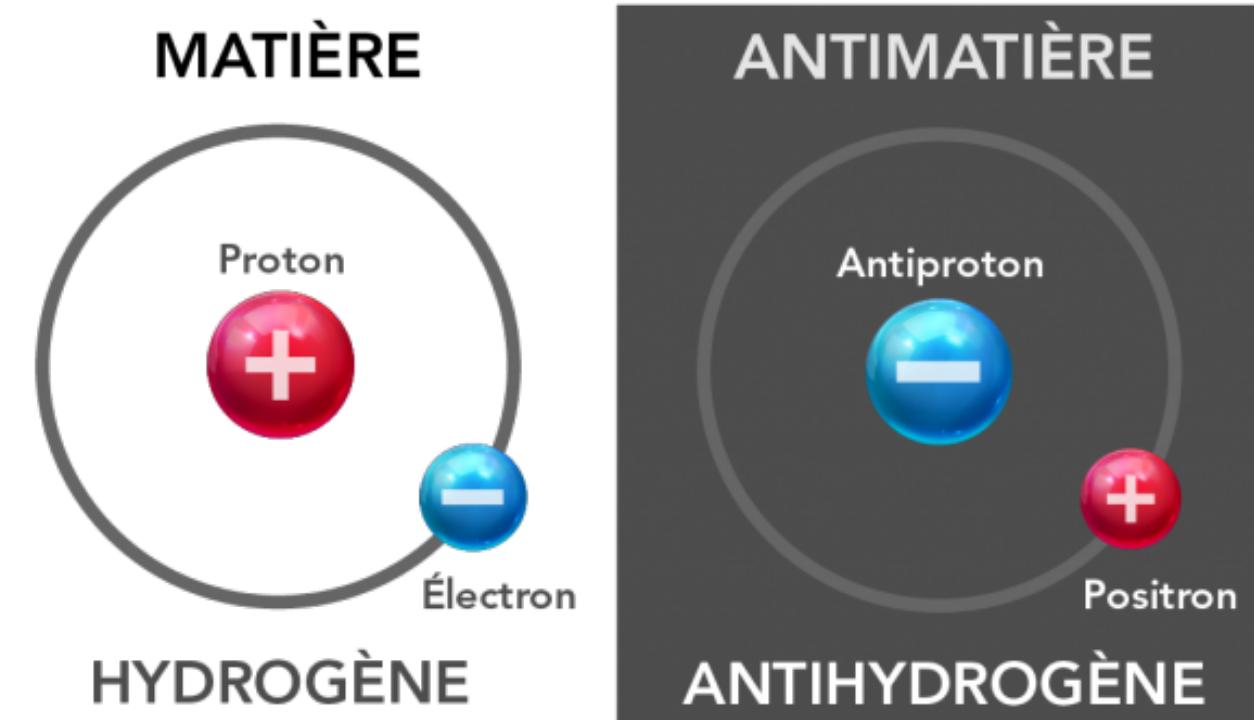
Grandes questions:

Pourquoi y-a-t'il plus de matière que d'anti-matière dans notre univers?



<https://legend-exp.org/science/neutrinoless-bb-decay/the-matter-antimatter-asymmetry>

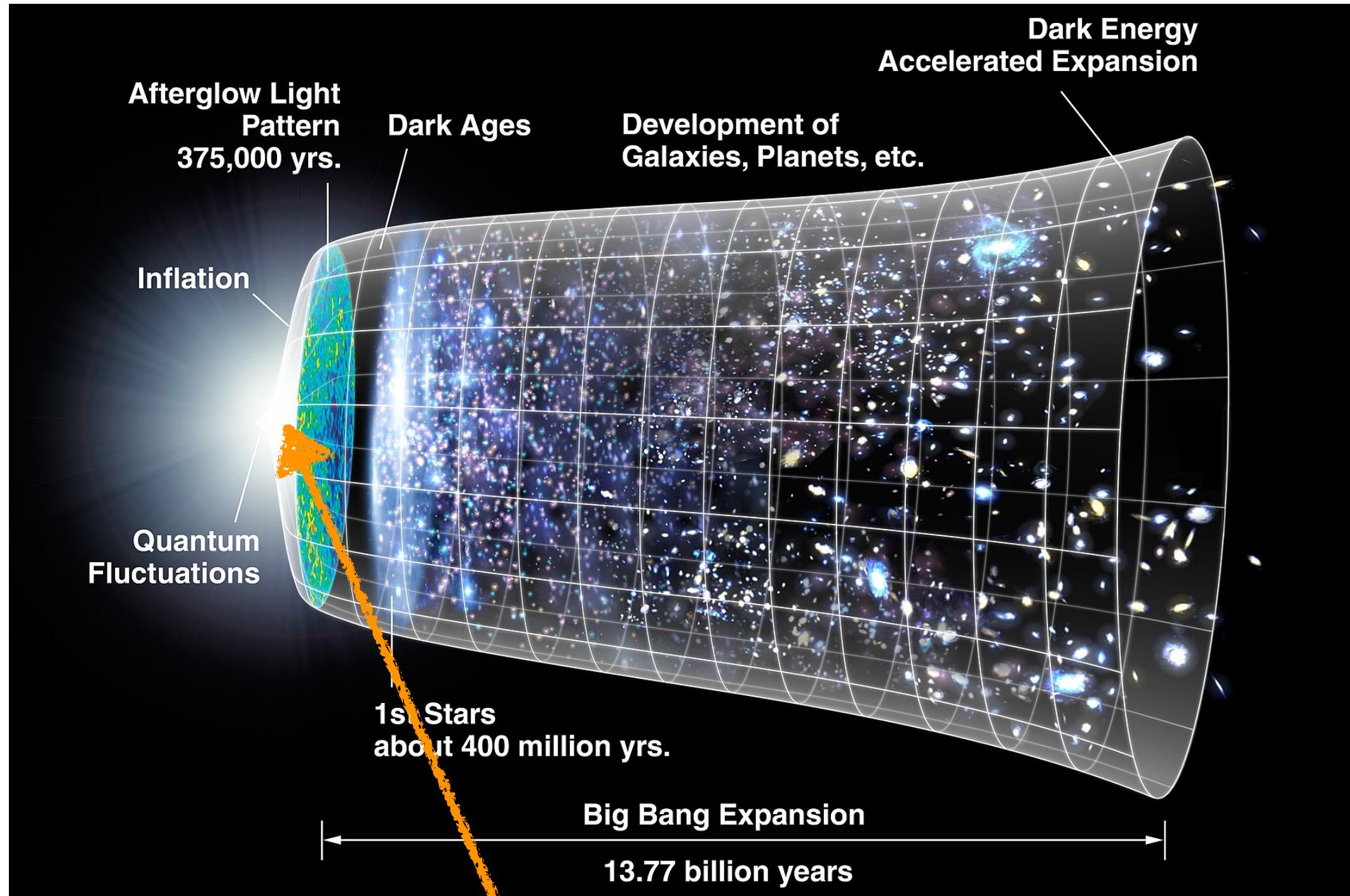
Antimatière: même propriétés que la matière,
mais avec une charge opposée



<https://parlonsciences.ca/ressources-pedagogiques/les-stim-expliques/quest-ce-que-lantimatiere-et-quel-en-est-linteret>

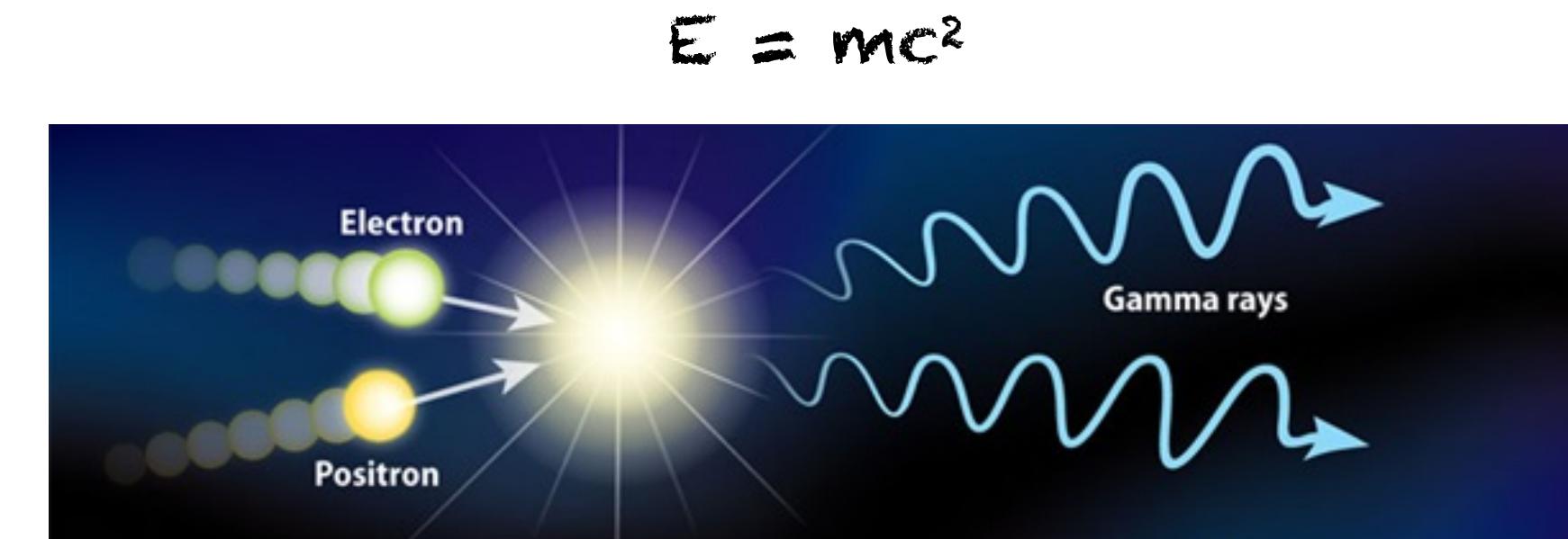
Grandes questions:

Pourquoi y-a-t'il plus de matière que d'anti-matière dans notre univers?



https://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang

En théorie, des quantités égales de matière et d'antimatière ont été créée pendant le big bang

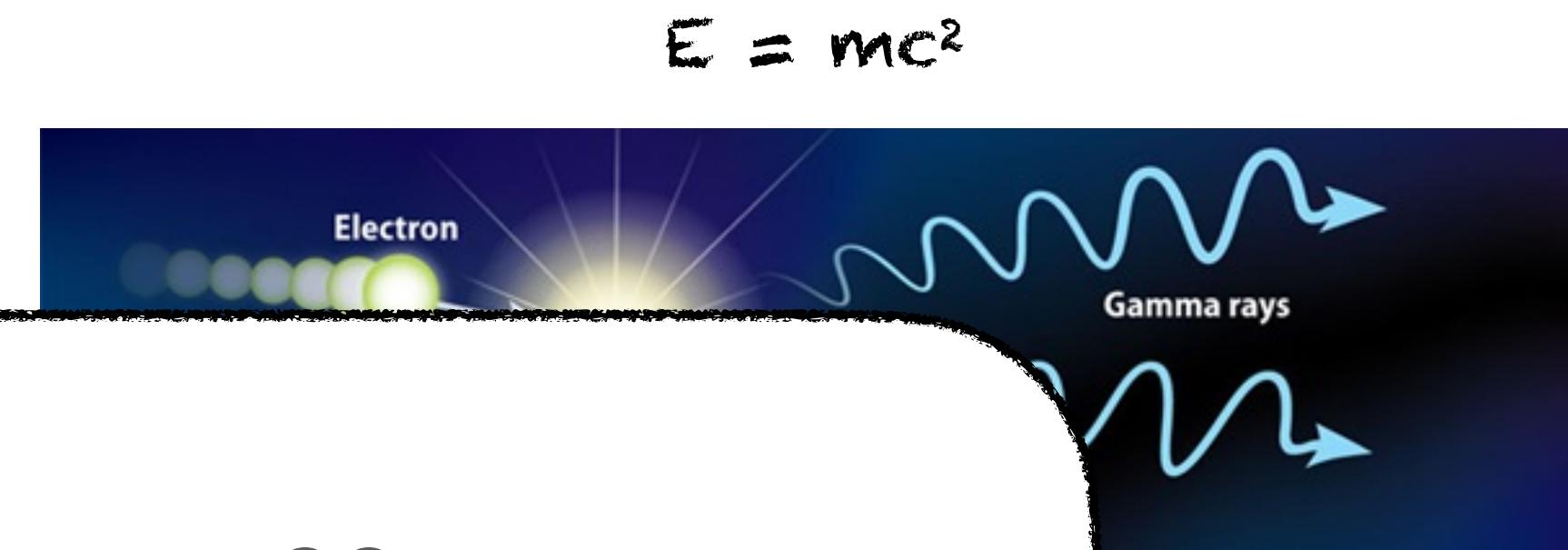
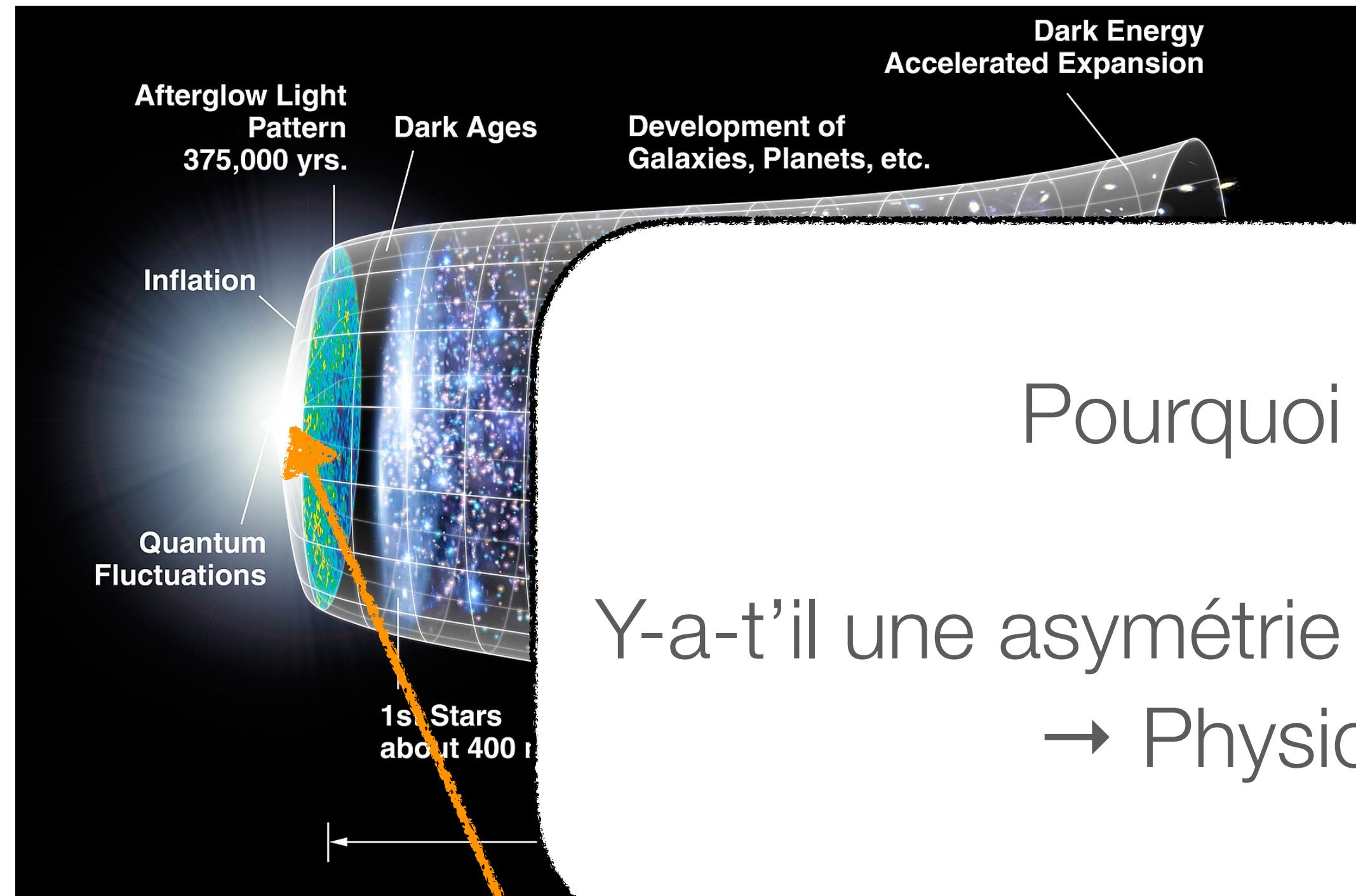


<https://www.astronomy.com/science/when-matter-and-antimatter-annihilate-each-other/>

Particule + Antiparticule
=
Energie
(Plus de matière)

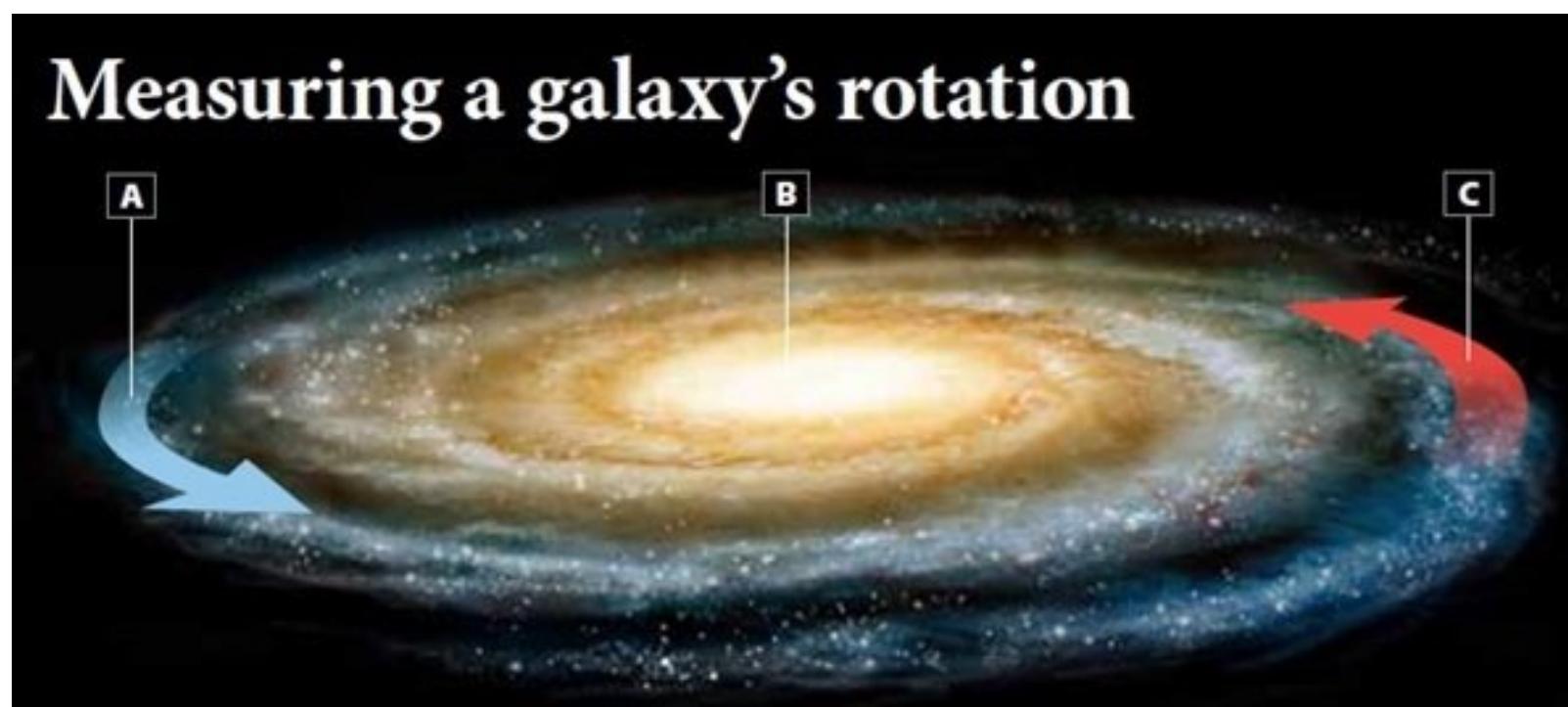
Grandes questions:

Pourquoi y-a-t'il plus de matière que d'anti-matière dans notre univers?

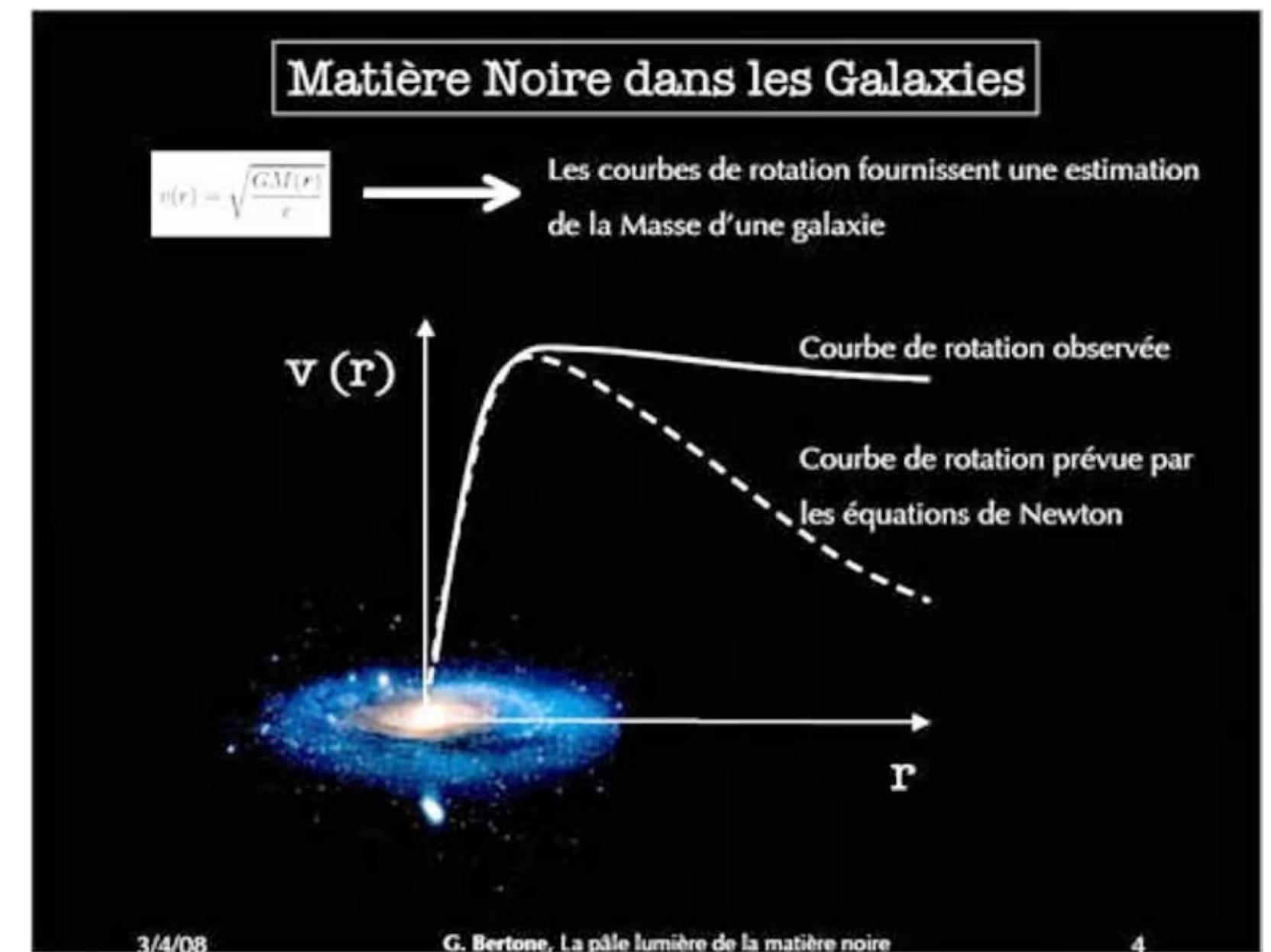


En théorie, des quantités égales de matière et d'antimatière ont été créée pendant le big bang

Grandes questions: C'est quoi la matière noire?

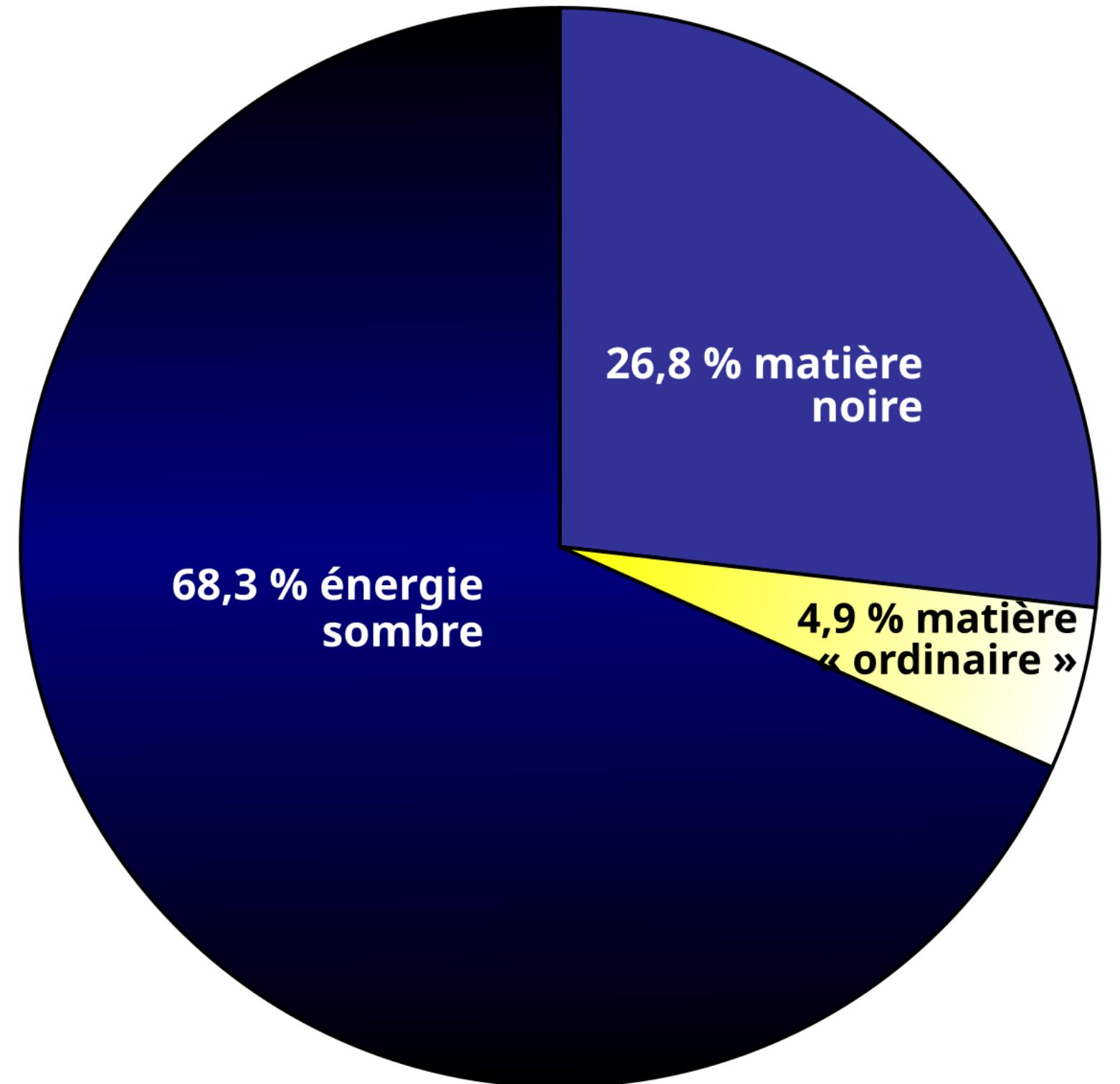


<https://physicsopenlab.org/2020/09/08/measurement-of-the-milky-way-rotation/>



Il existe une matière sombre (« noire ») qui interagit par sa gravité, mais pas (ou très peu) avec la matière ordinaire, ni avec les photons (lumière)

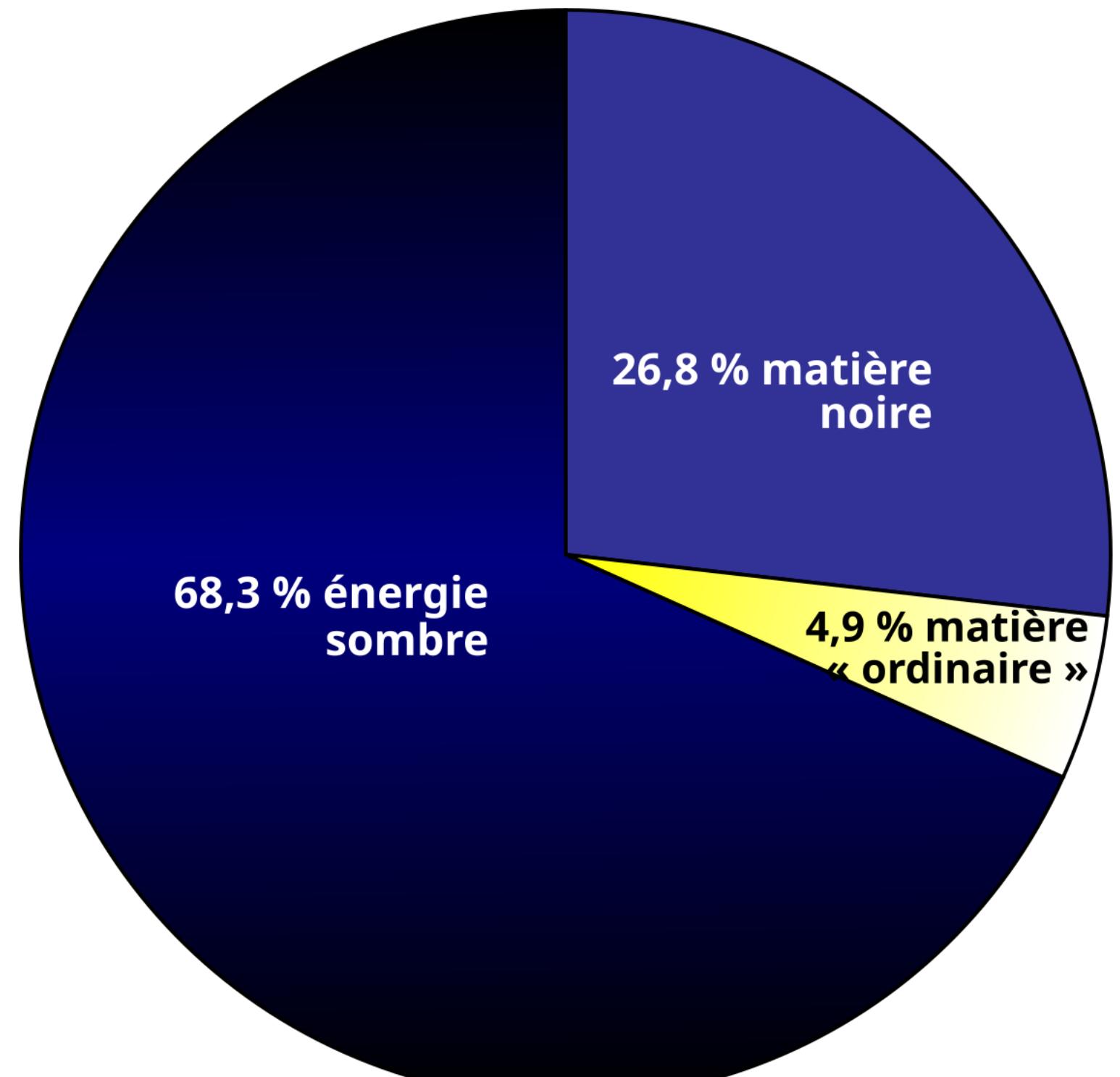
Grandes questions: C'est quoi la matière noire?



https://fr.wikipedia.org/wiki/Mati%C3%A8re_noire

C'est quoi la matière noire?
→ Physique des saveurs!

Grandes questions: C'est quoi la matière noire?



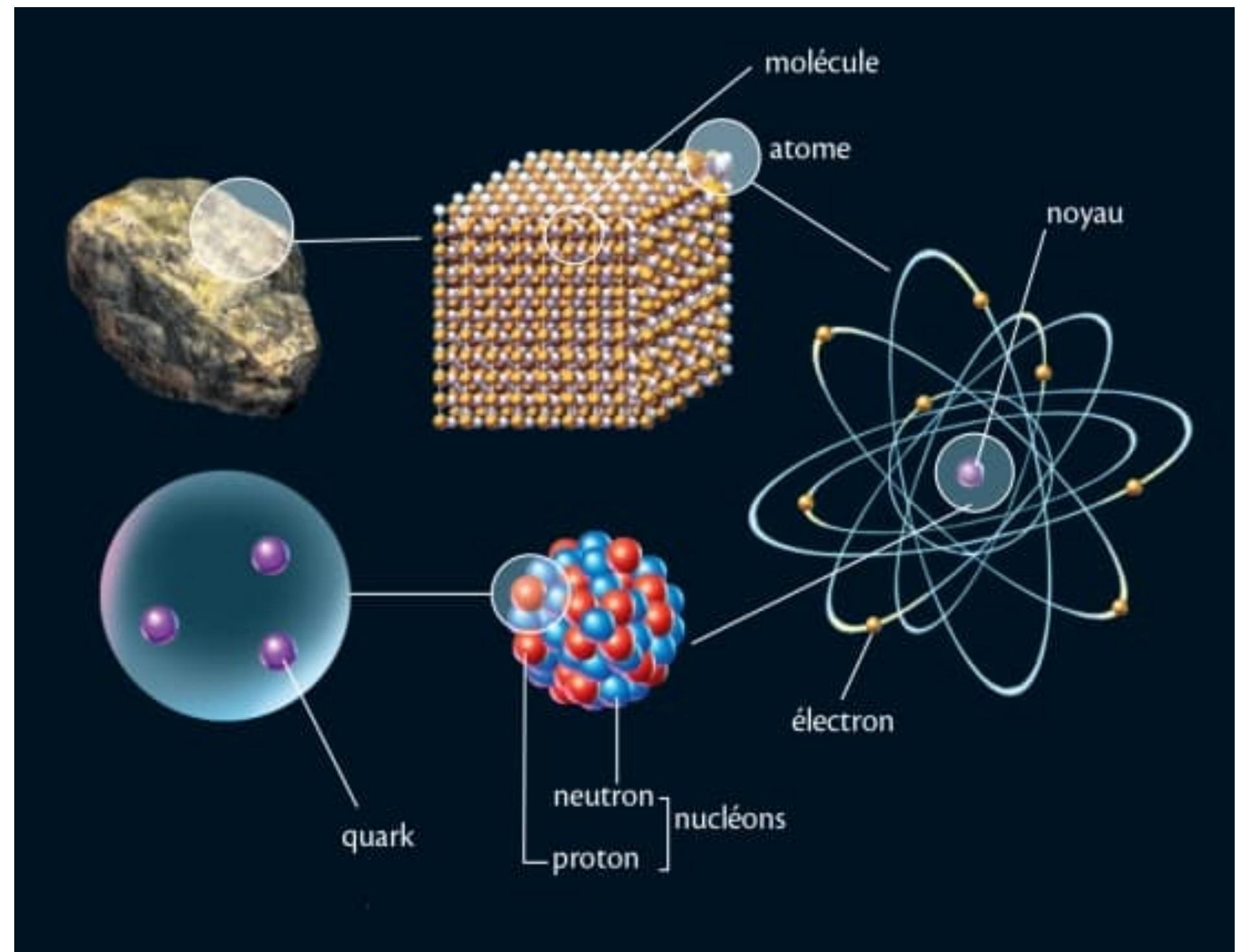
https://fr.wikipedia.org/wiki/Mati%C3%A8re_noire

C'est quoi la matière noire?
→ Physique des saveurs!



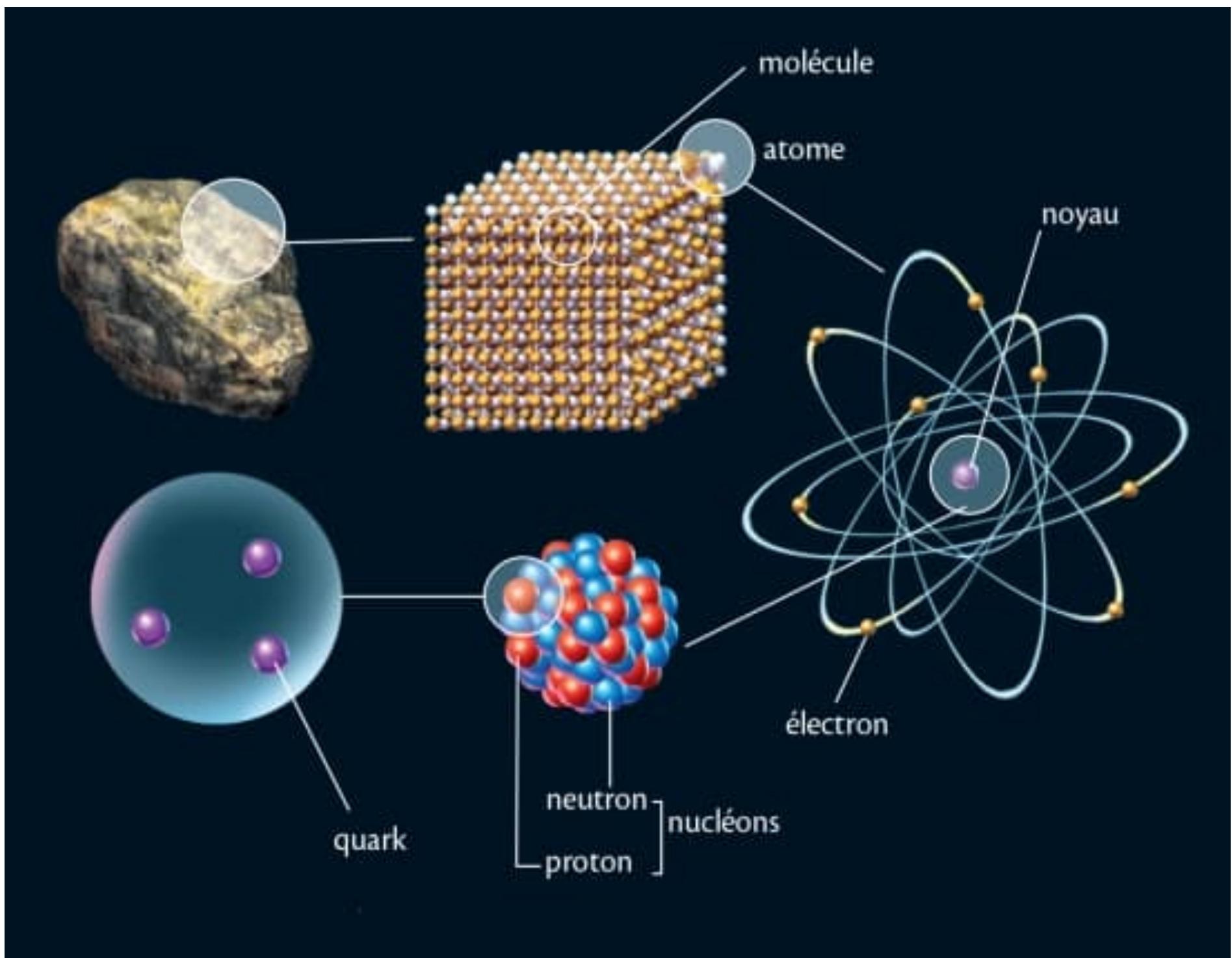
Pas ça...

Comprendons mieux la matière ordinaire...



https://www.larousse.fr/encyclopédie/images/Les_composants_de_la_matière/1314215

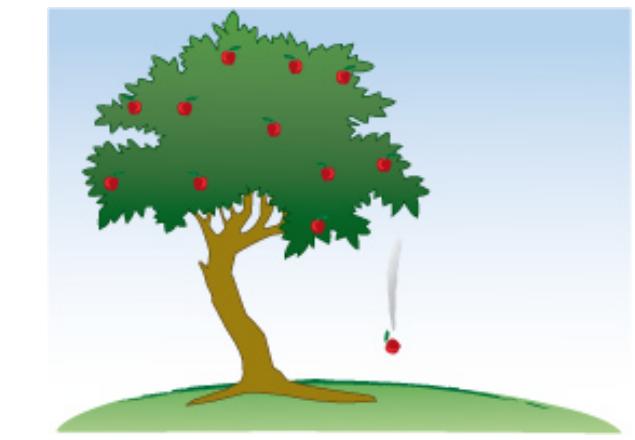
Comprendons mieux la matière ordinaire...



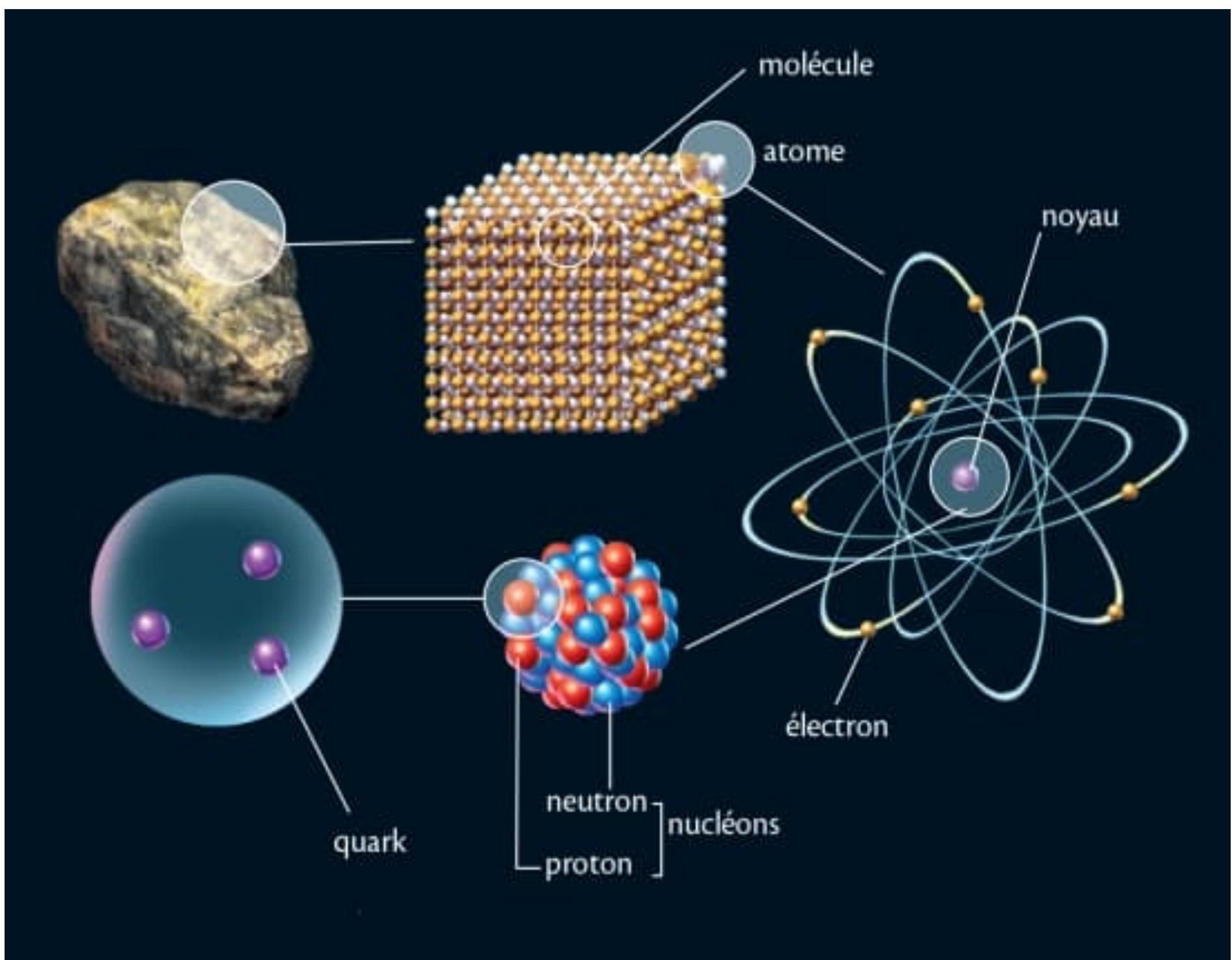
https://www.larousse.fr/encyclopédie/images/Les_composants_de_la_mati%C3%A8re/1314215

... et ses interactions

- La gravitation
 - Attraction entre les corps massifs



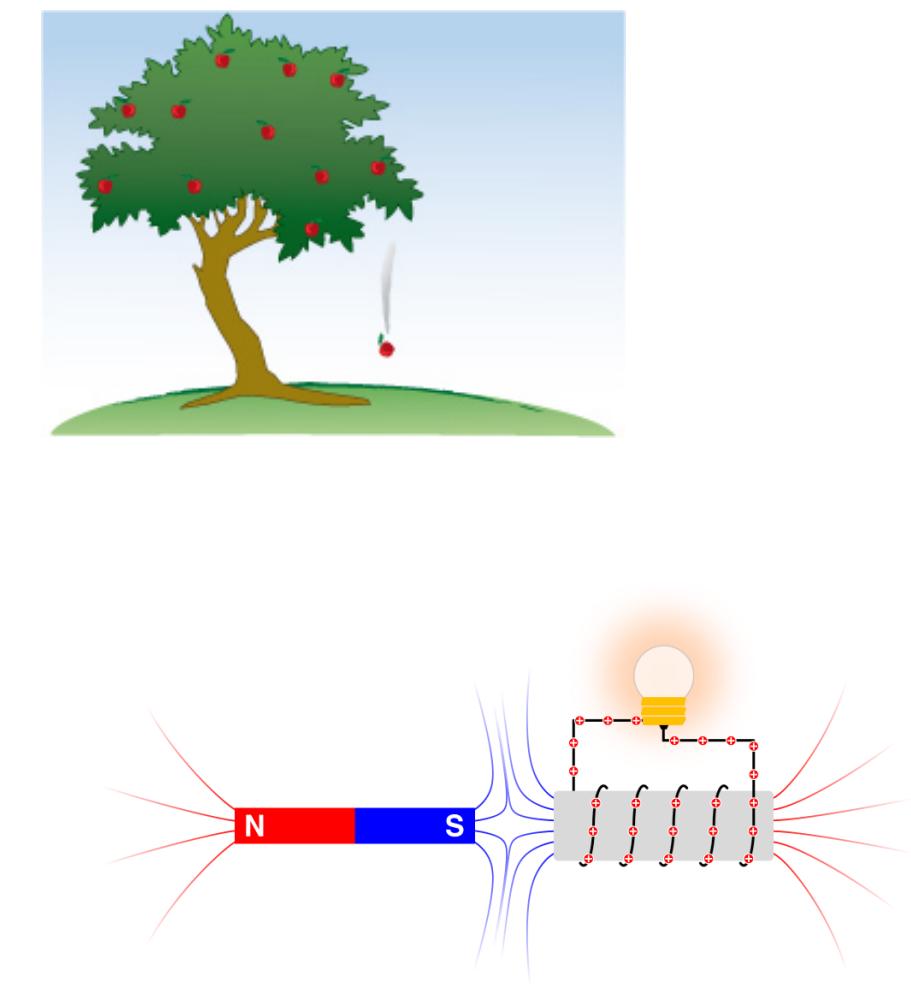
Comprendons mieux la matière ordinaire...



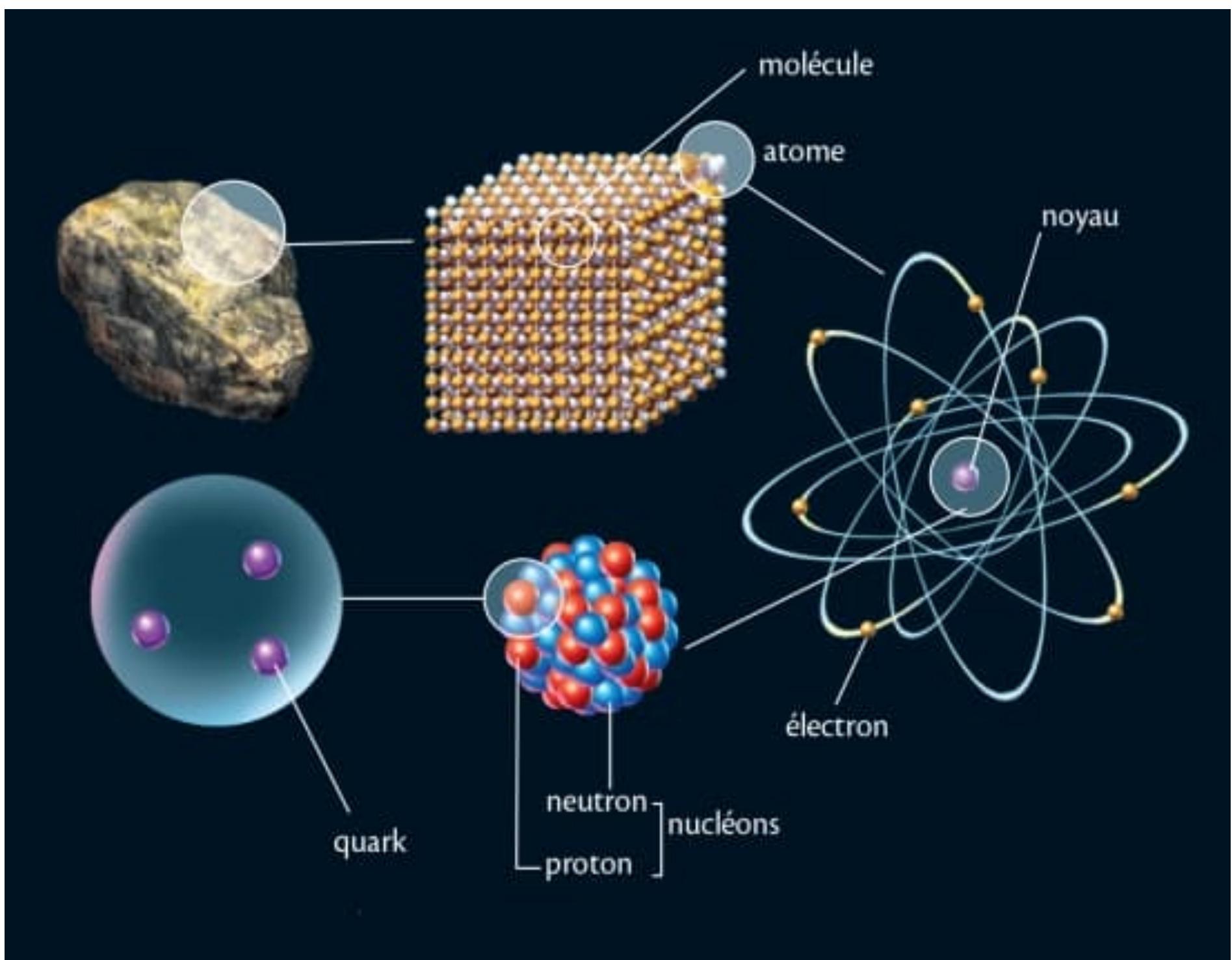
https://www.larousse.fr/encyclopédie/images/Les_composants_de_la_mati%C3%A8re/1314215

... et ses interactions

- La gravitation
 - Attraction entre les corps massifs
- L'interaction électromagnétique
 - Attraction / répulsion entre particules chargées



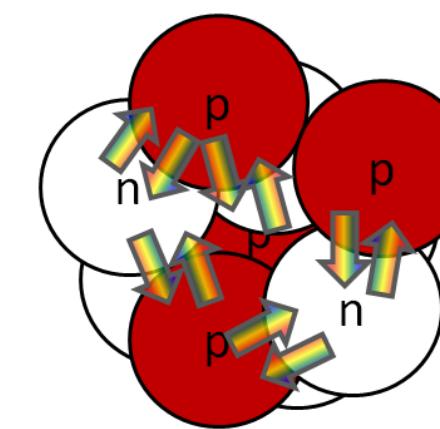
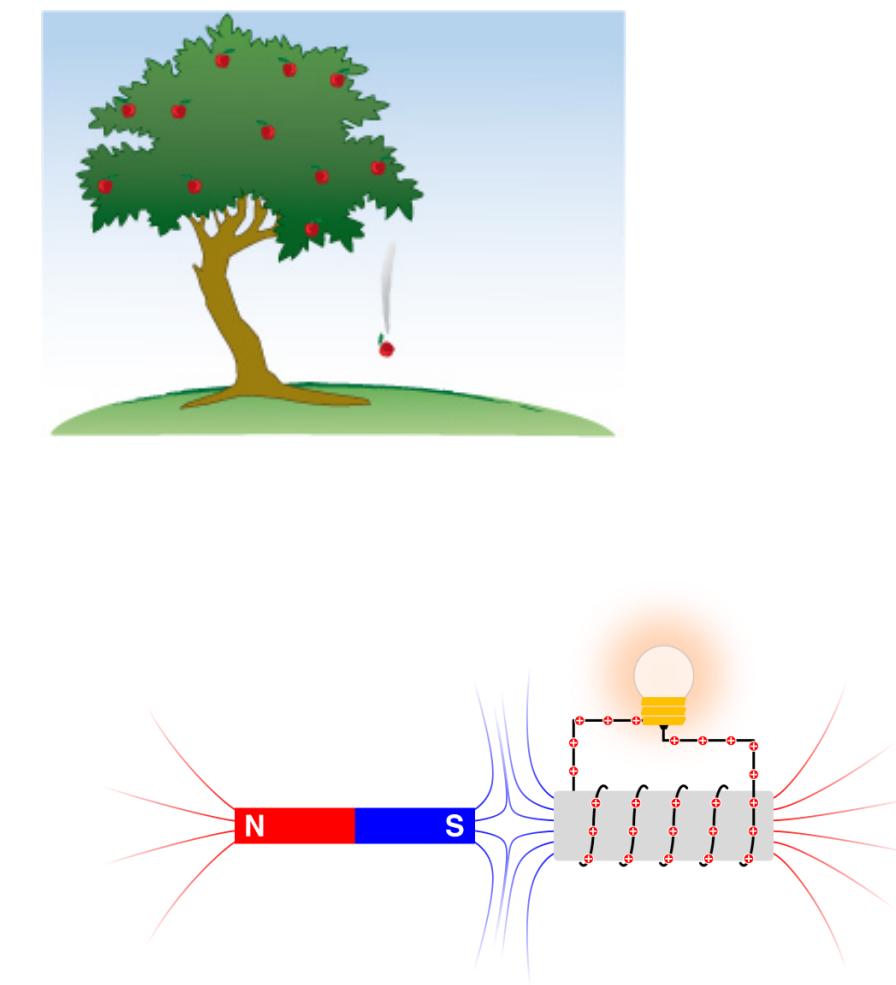
Comprendons mieux la matière ordinaire...



https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Les_composants_de_la_mati%C3%A8re/1314215

... et ses interactions

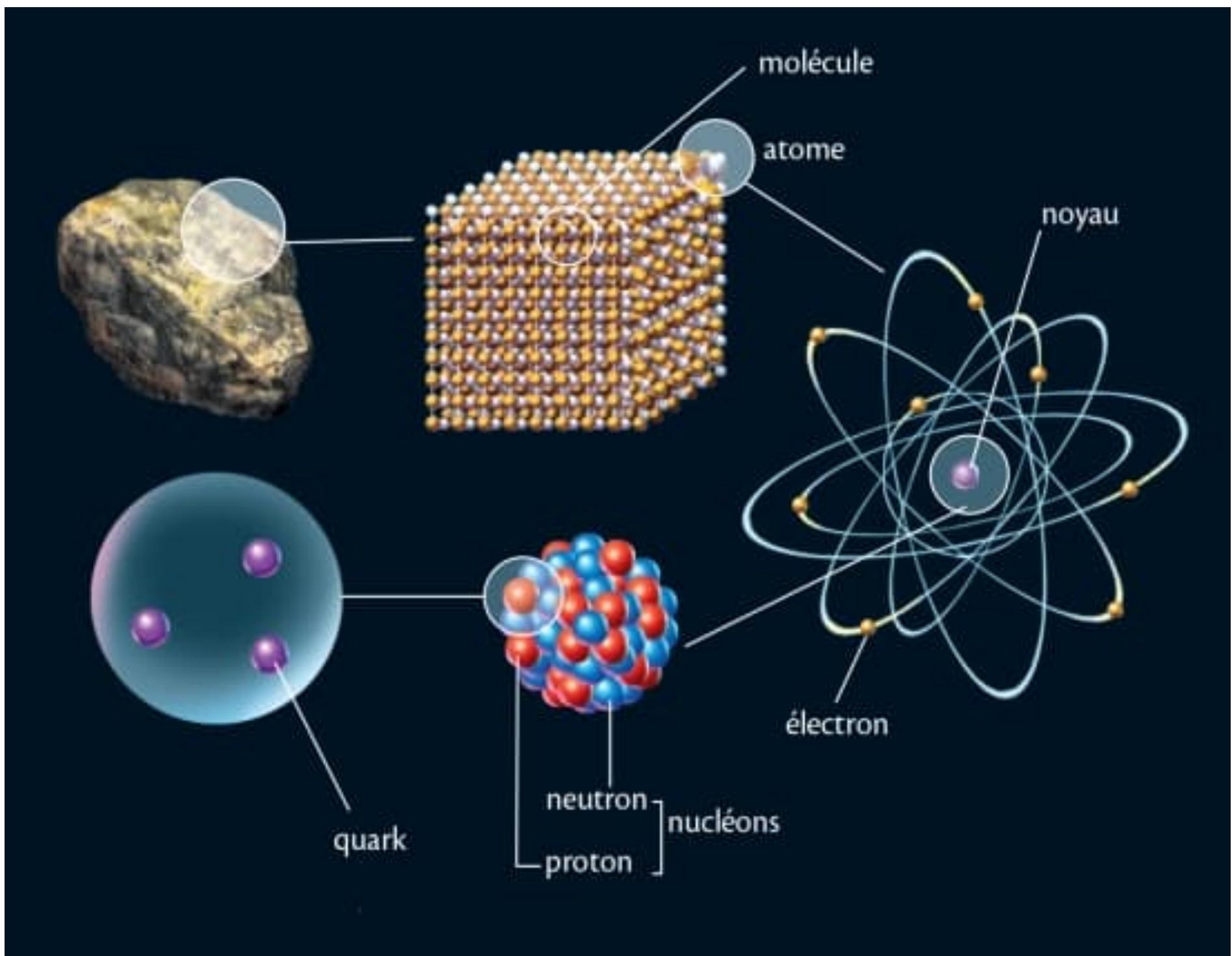
- La gravitation
 - Attraction entre les corps massifs
- L'interaction électromagnétique
 - Attraction / répulsion entre particules chargées
- L'interaction nucléaire forte
 - Cohésion du noyau atomique



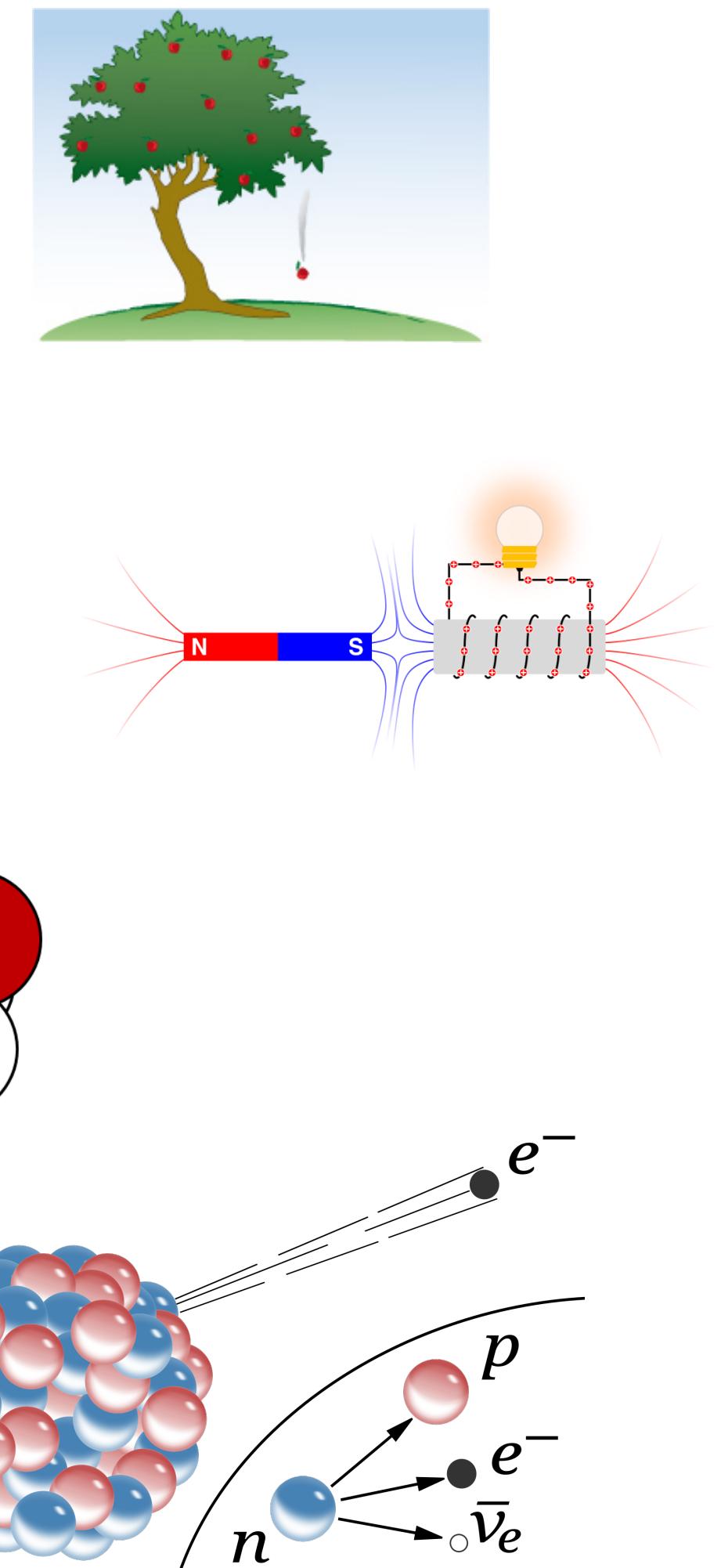
Comprendons mieux la matière ordinaire...

... et ses interactions

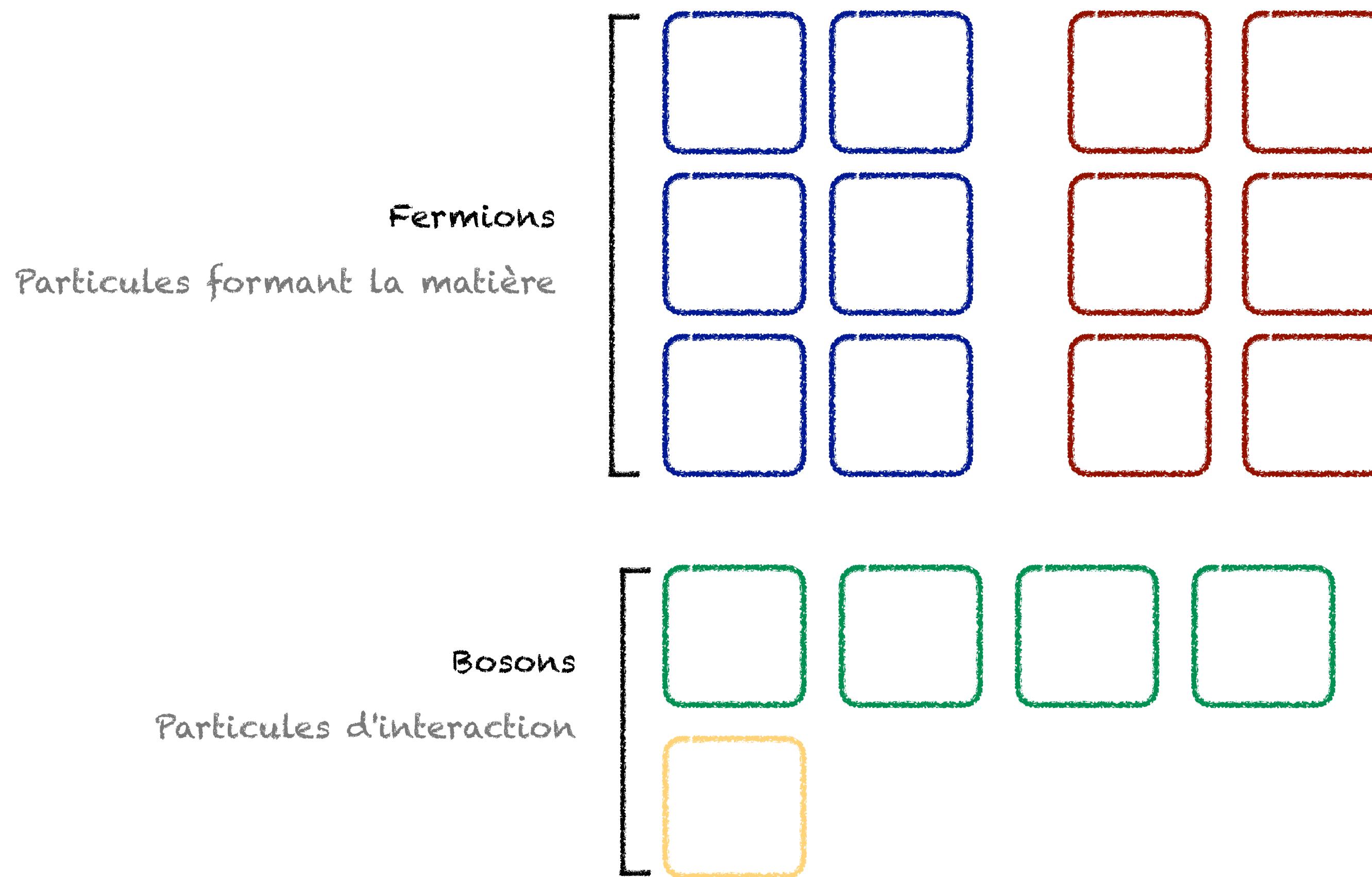
- La gravitation
 - Attraction entre les corps massifs
- L'interaction électromagnétique
 - Attraction / répulsion entre particules chargées
- L'interaction nucléaire forte
 - Cohésion du noyau atomique
- L'interaction nucléaire faible
 - Transformation des particules



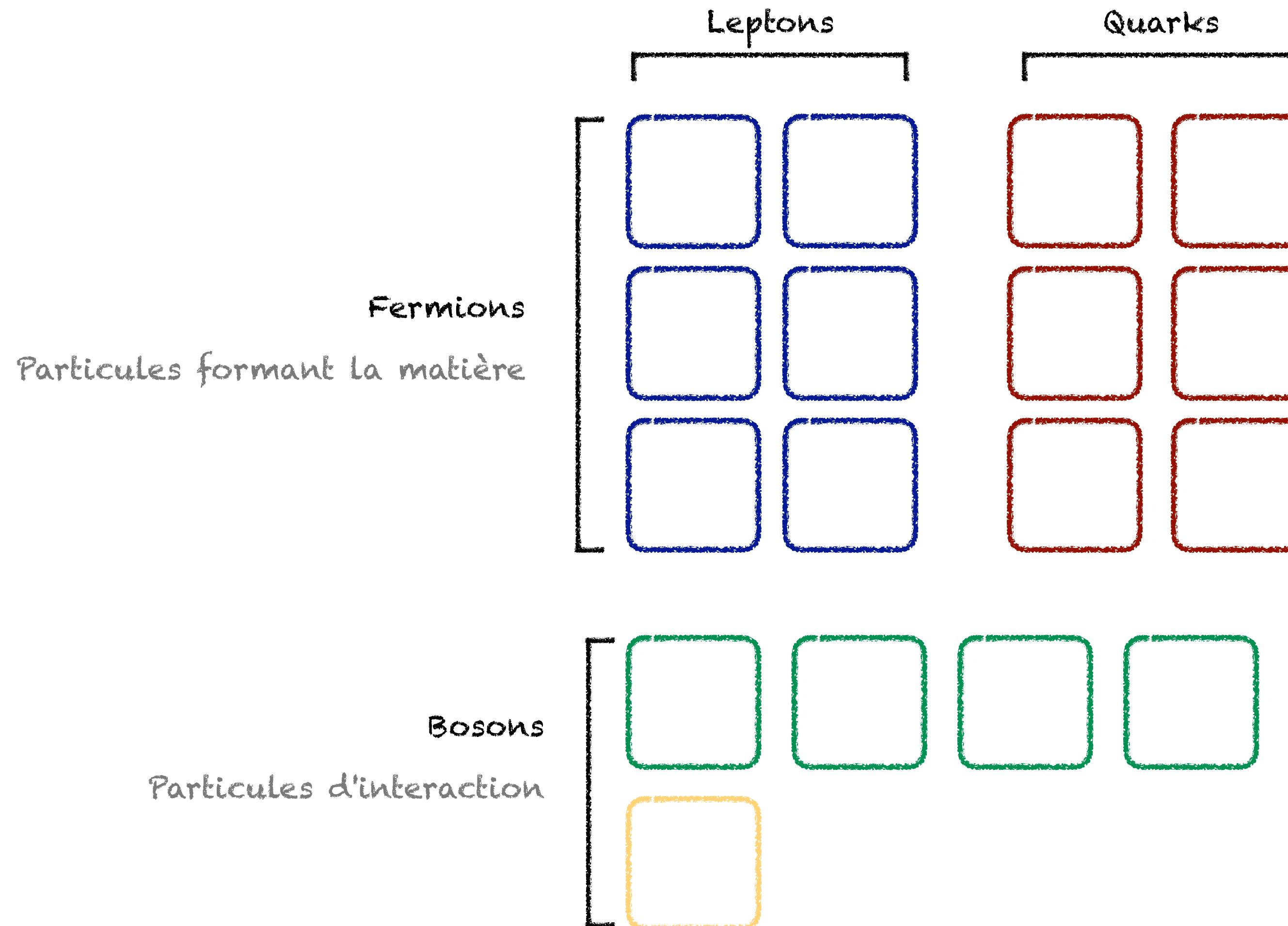
https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Les_composants_de_la_mati%C3%A8re/1314215



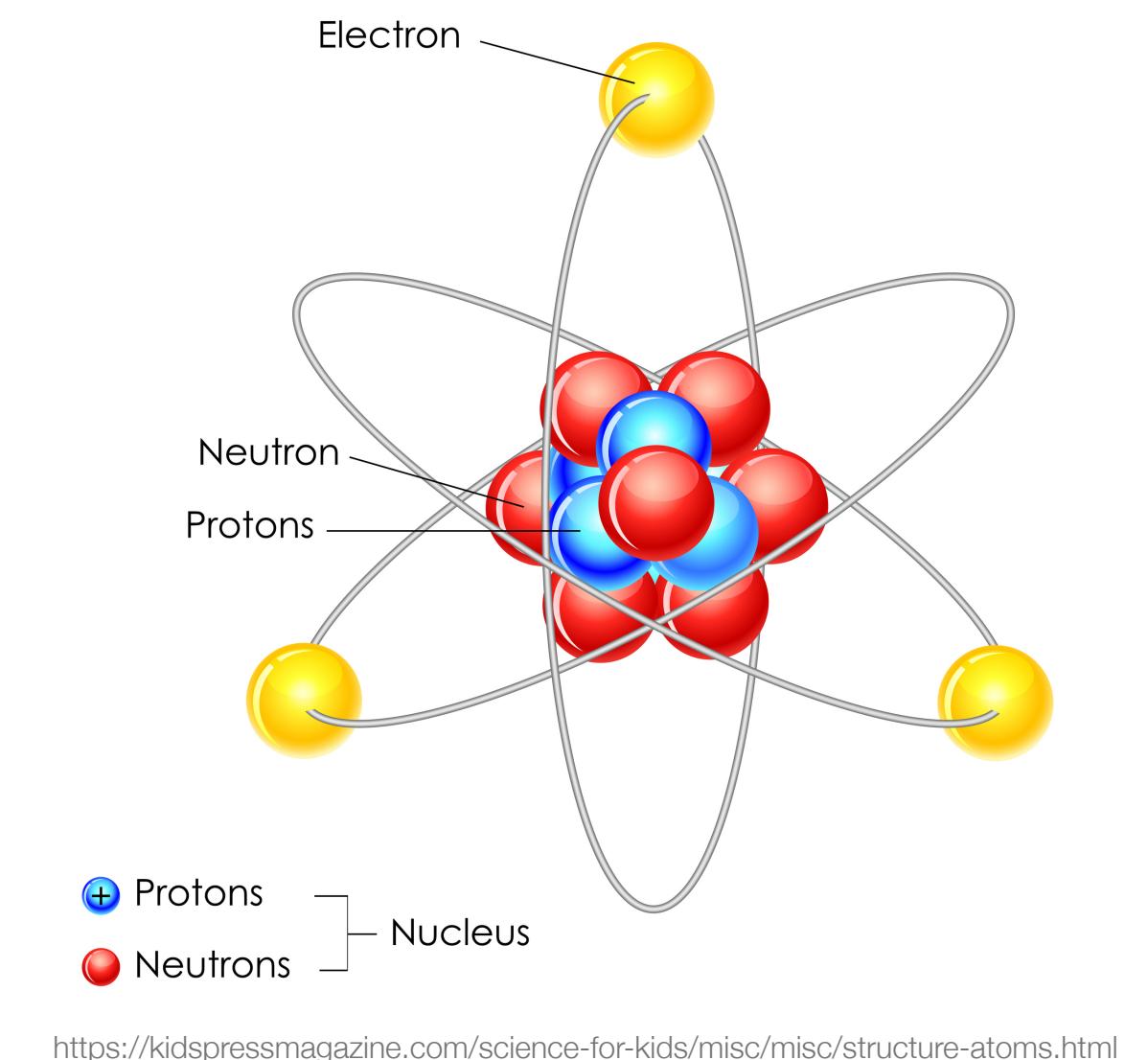
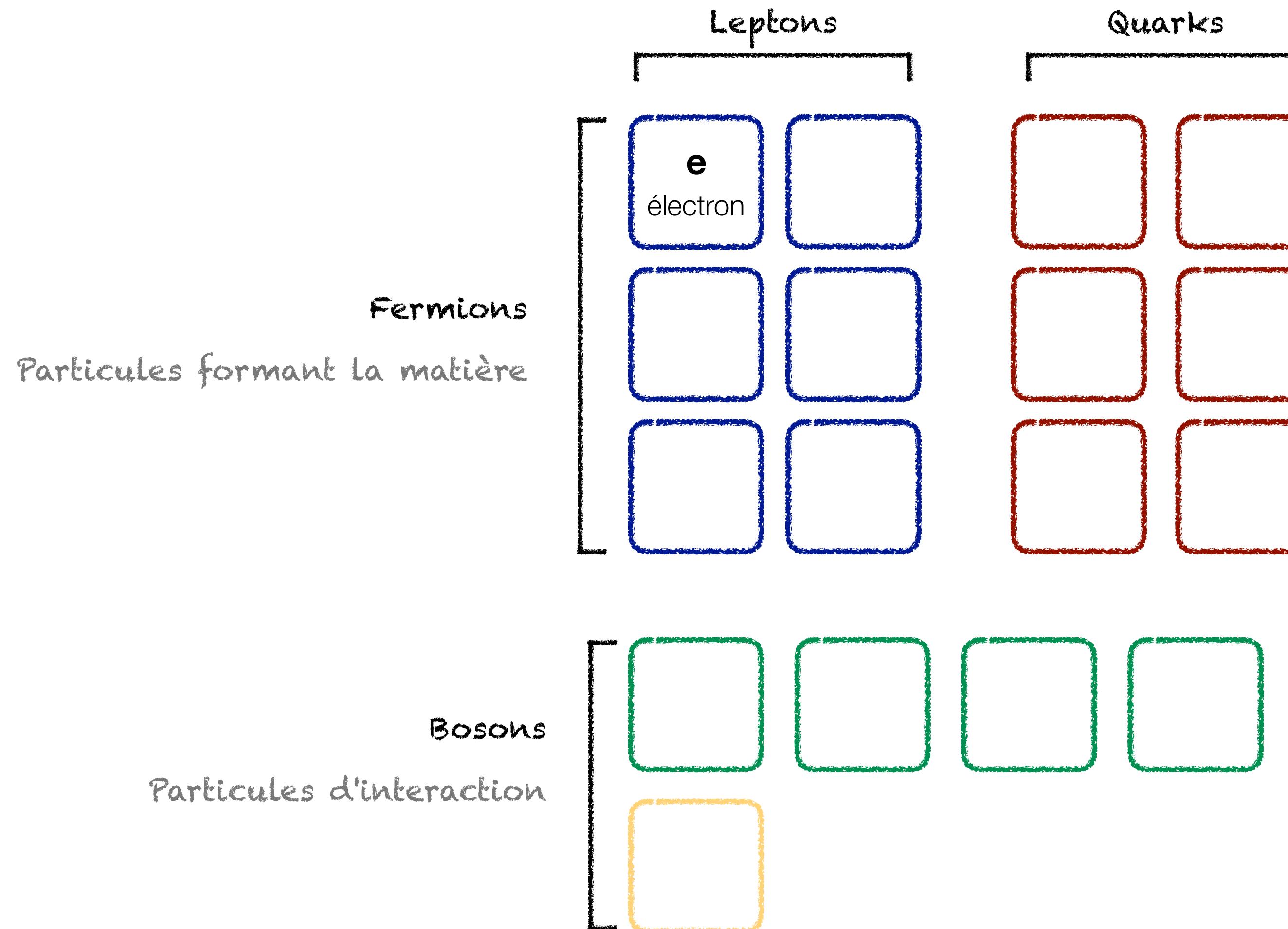
Petites particules: Catégorisation dans le « modèle standard »



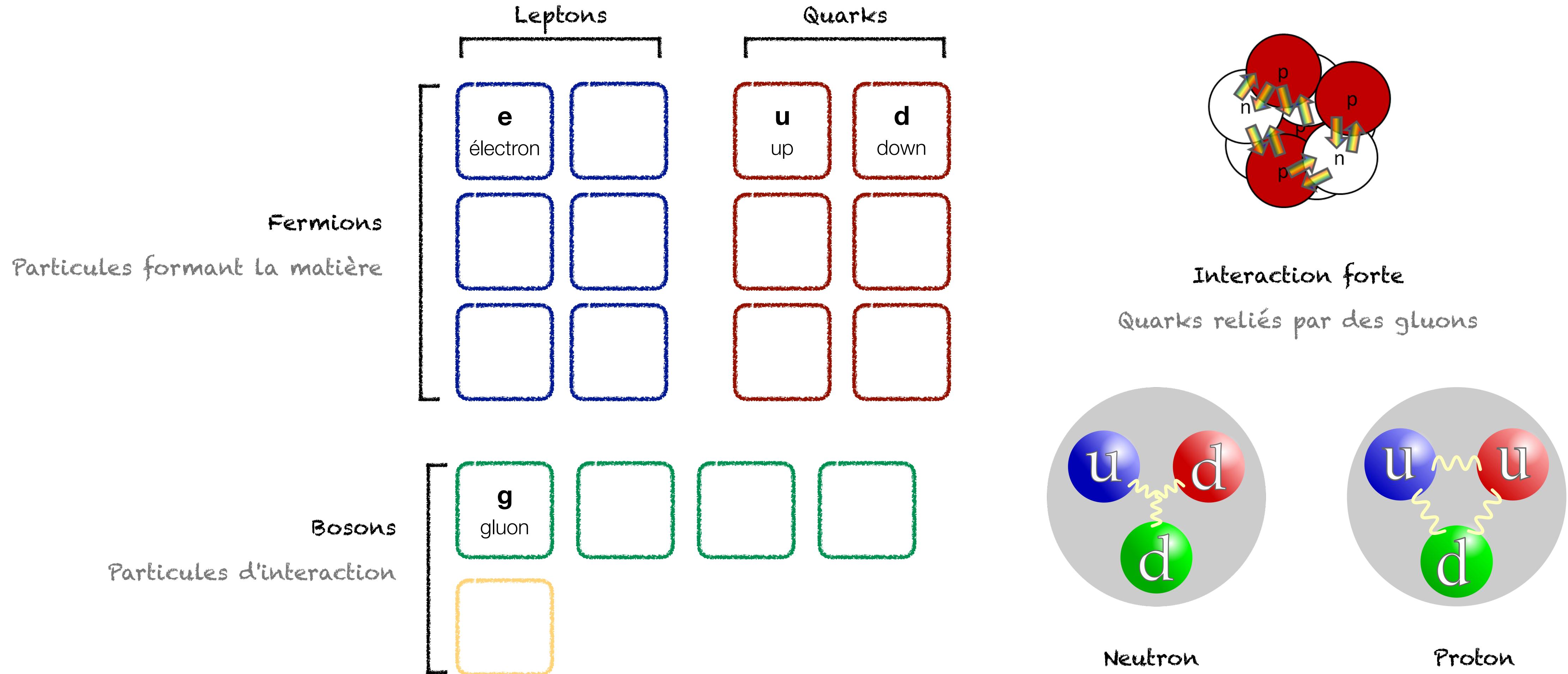
Petites particules: Catégorisation dans le « modèle standard »



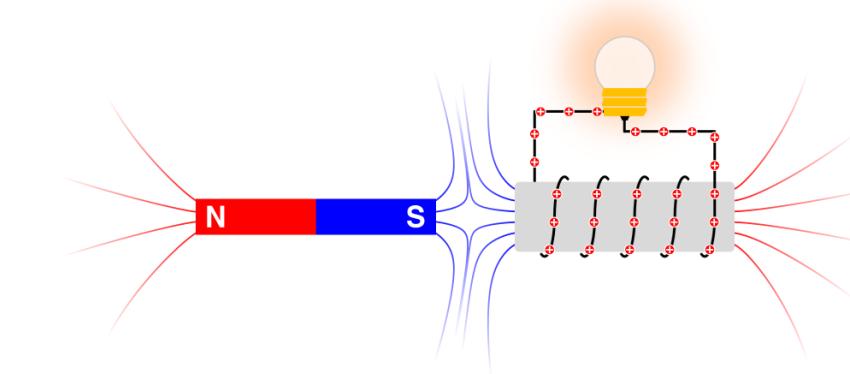
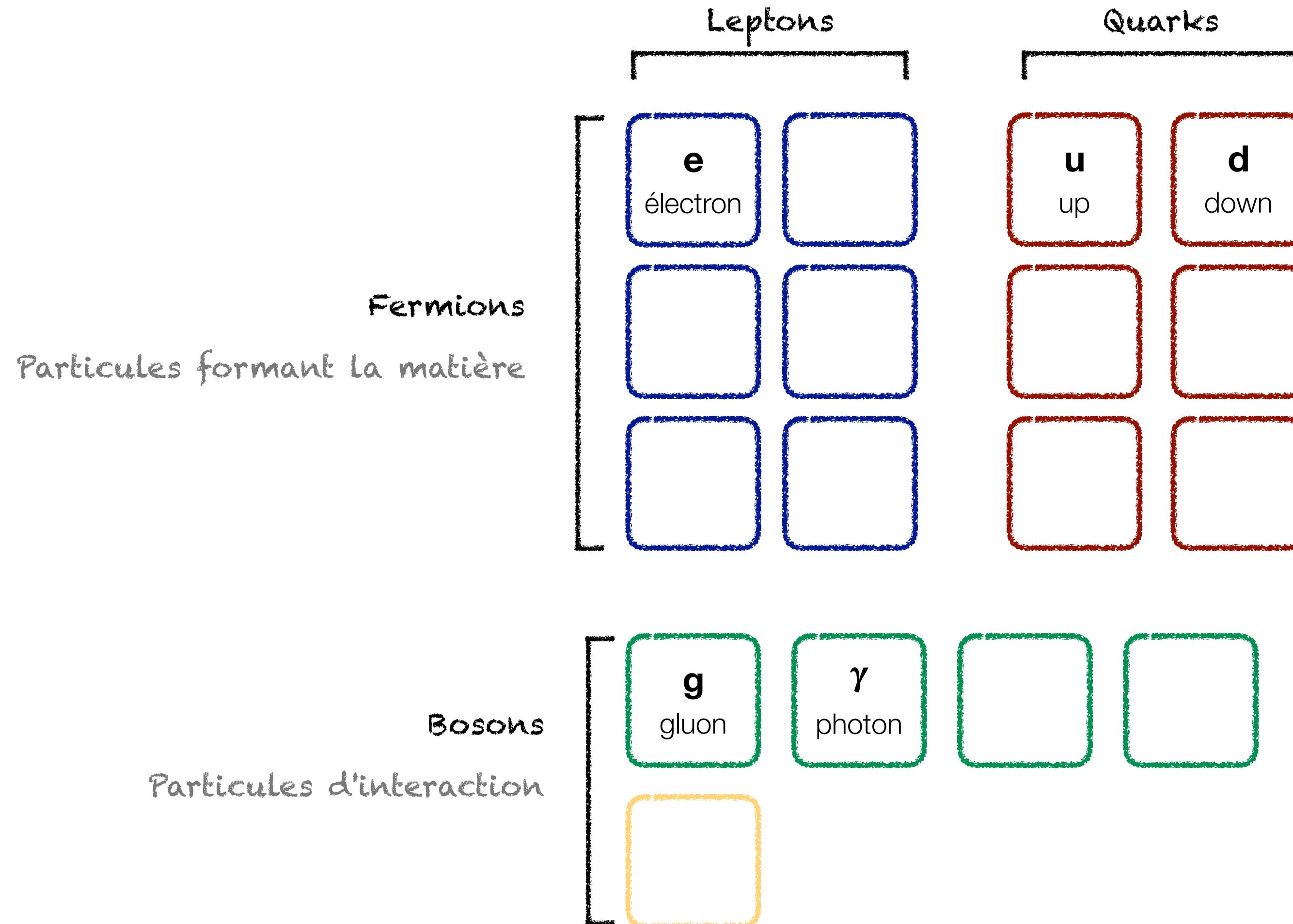
Petites particules: Catégorisation dans le « modèle standard »



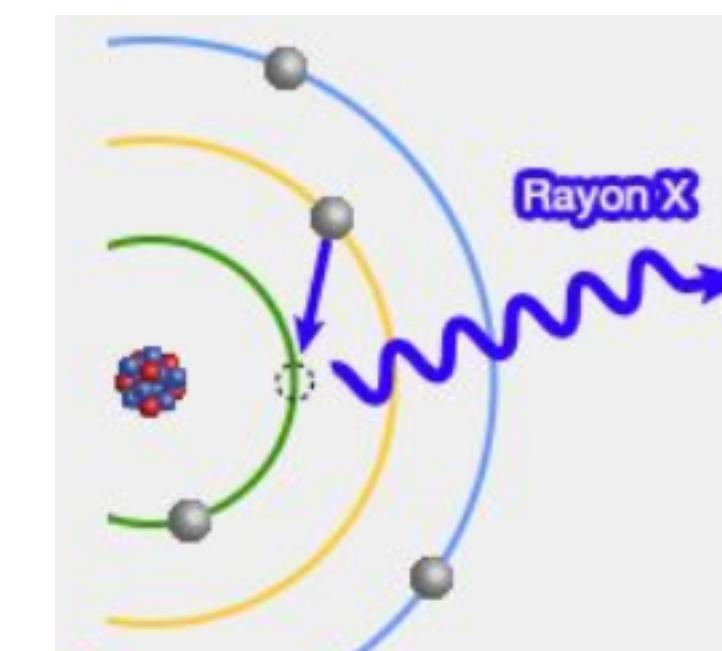
Petites particules: Catégorisation dans le « modèle standard »



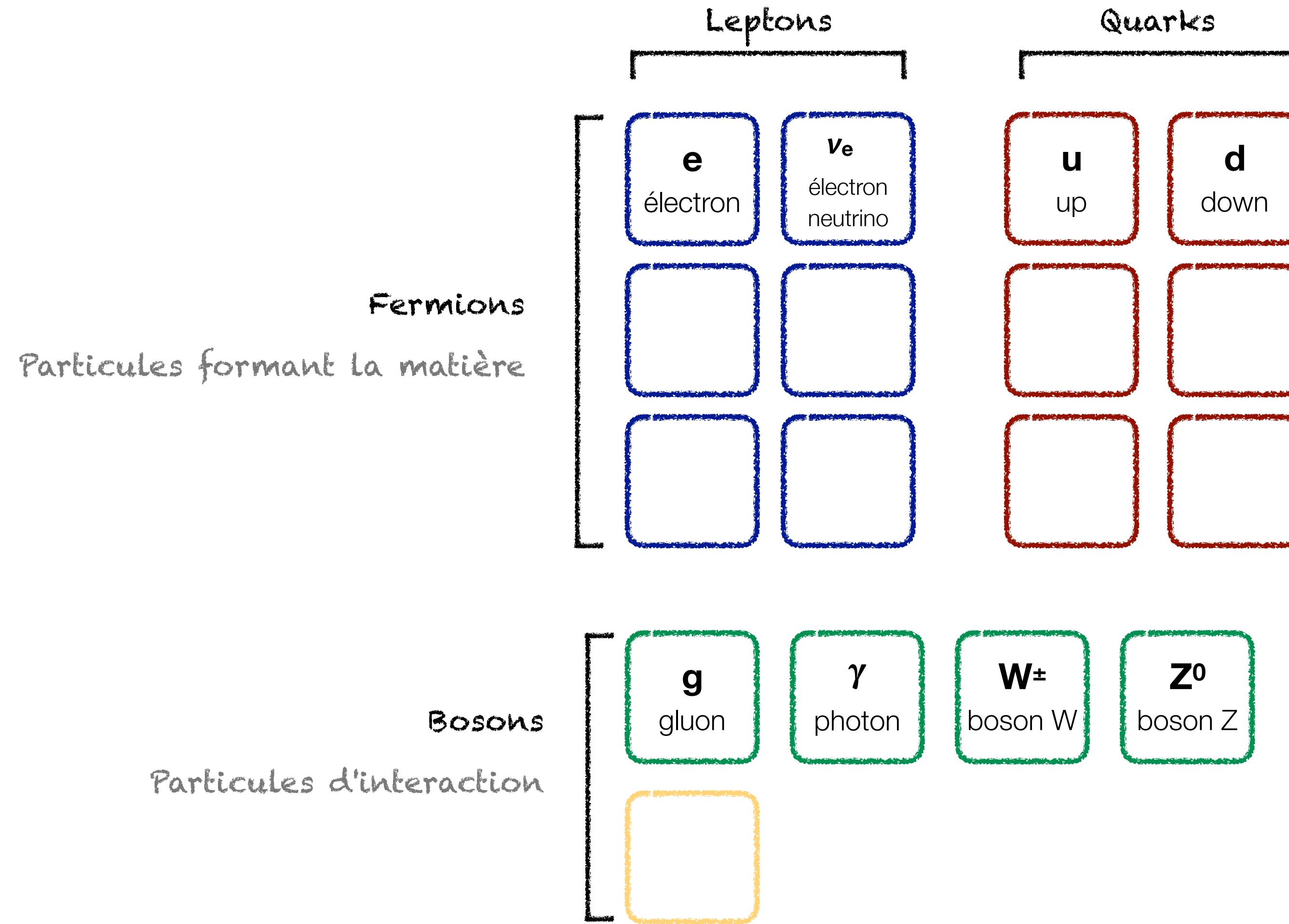
Petites particules: Catégorisation dans le « modèle standard »



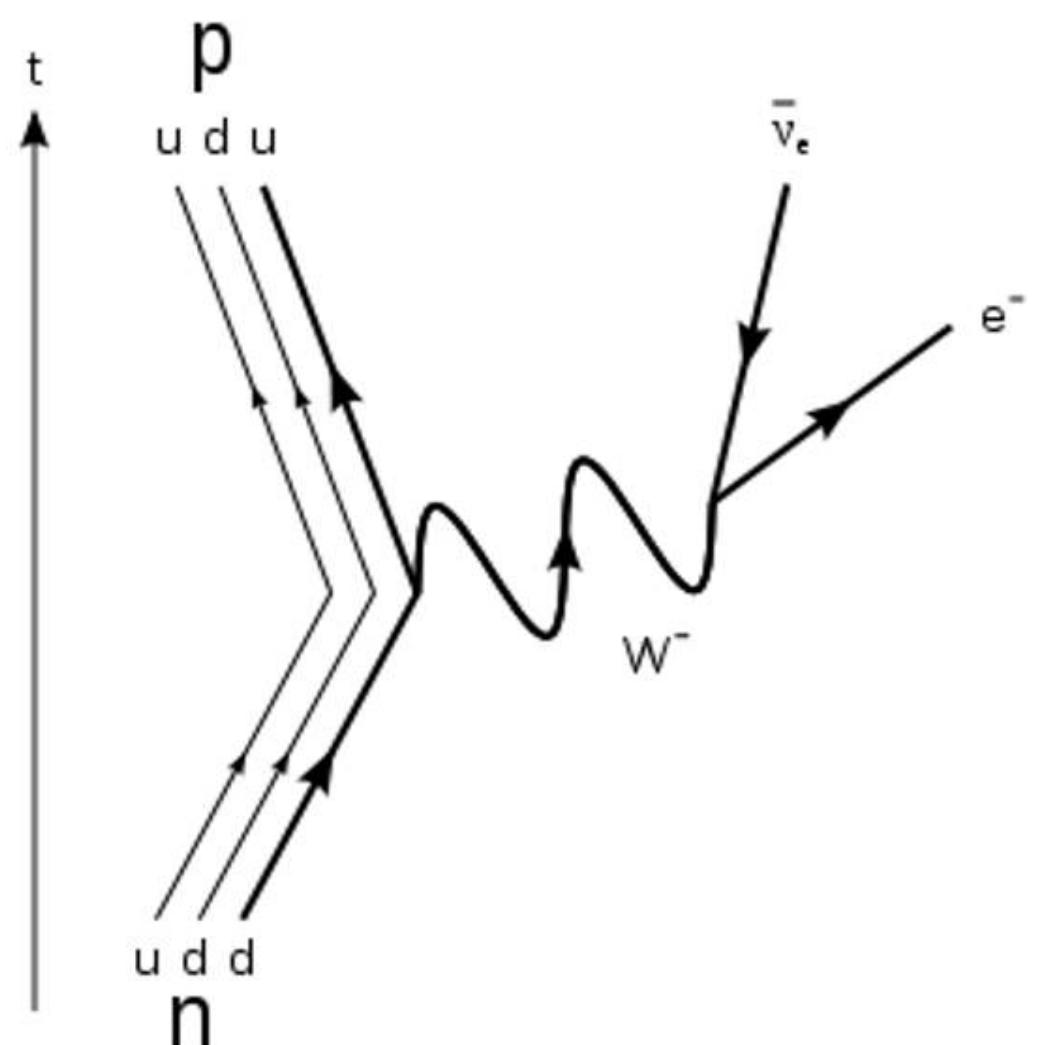
Interaction électromagnétique
Particules chargées électriquement
s'échangent des photons



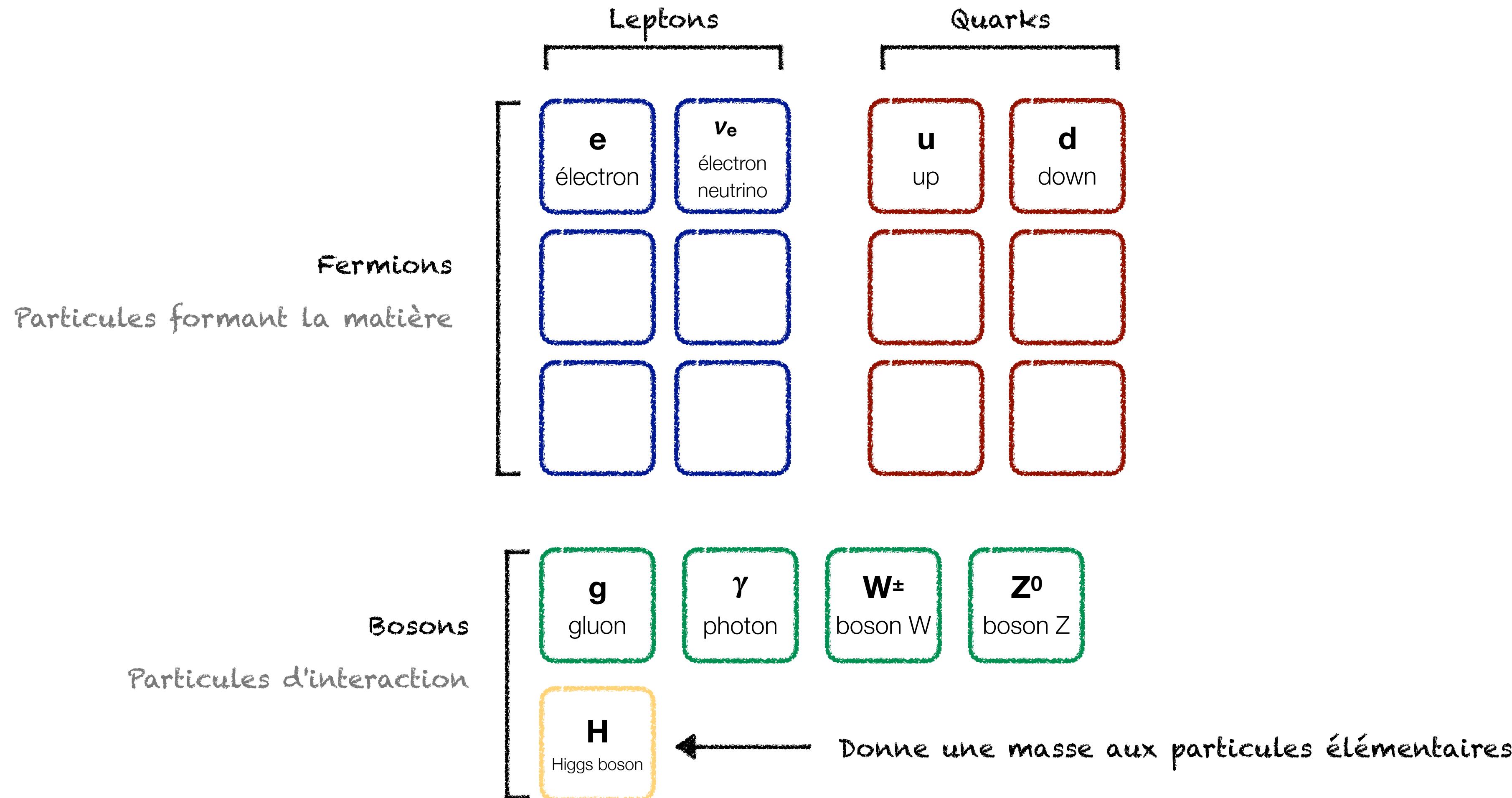
Petites particules: Catégorisation dans le « modèle standard »



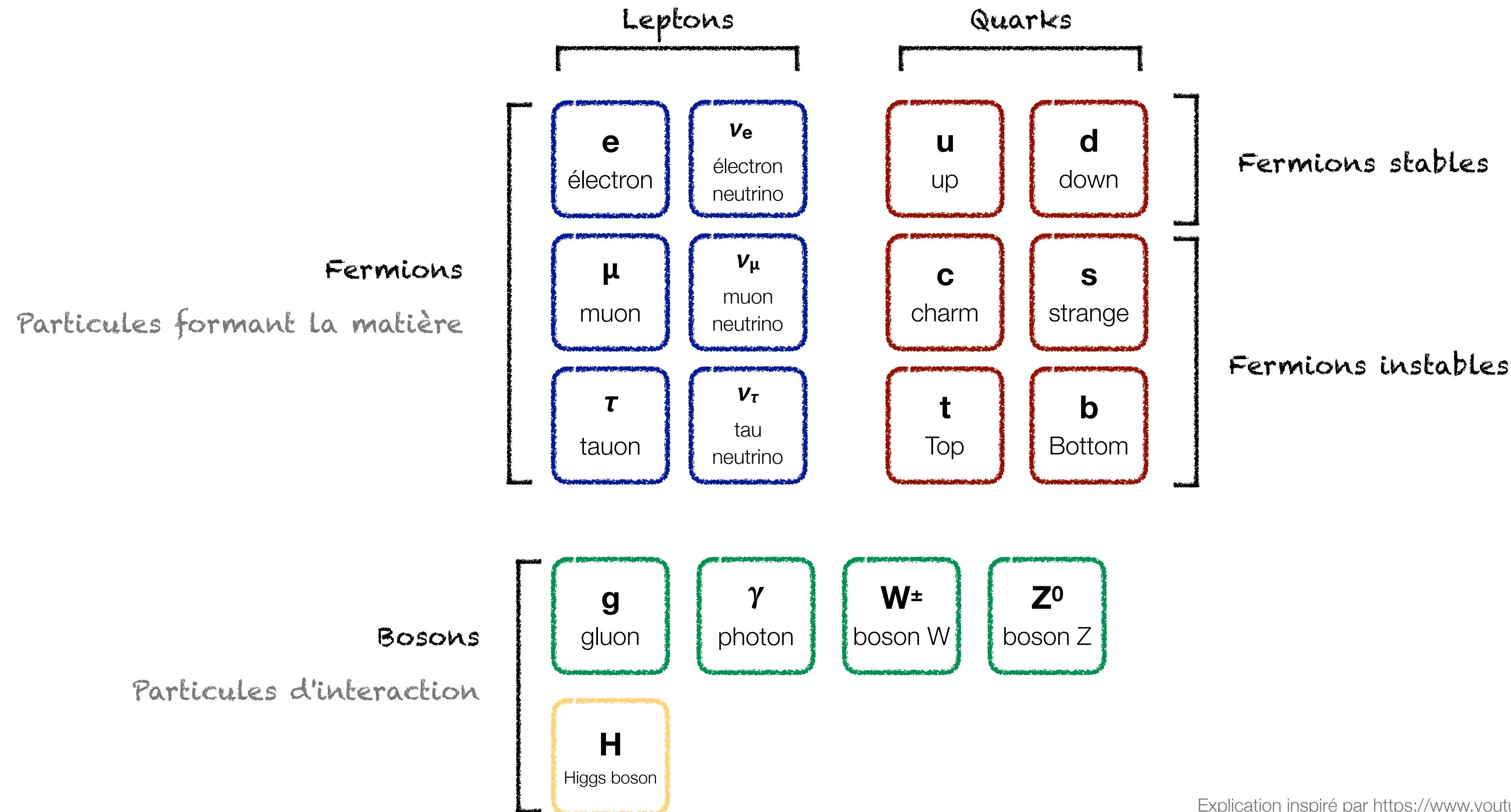
Interaction faible
Modifie la nature des particules
Échange de masse ou charge entre fermions



Petites particules: Catégorisation dans le « modèle standard »



Petites particules: Catégorisation dans le « modèle standard »



Explication inspiré par <https://www.youtube.com/watch?v=NimzDLjZsko>

Petites particules: Catégorisation dans le « modèle standard »

Leptons		Quarks	
e électron	ν_e électron neutrino	u up	d down
μ muon	ν_μ muon neutrino	c charm	s strange
τ tauon	ν_τ tau neutrino	t Top	b Bottom

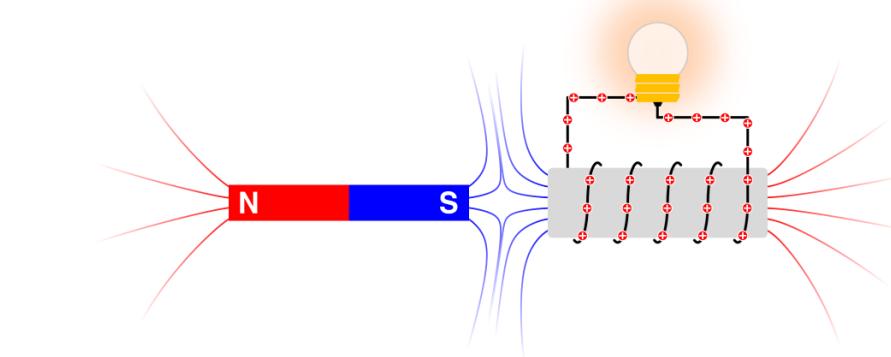
Fermions stables

Fermions instables

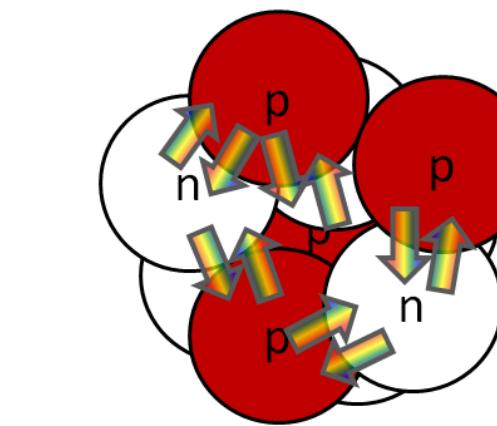
g gluon	γ photon	W^\pm boson W	Z^0 boson Z
H Higgs boson			

Trois interactions inclus dans le modèle standard
Mais pas la gravitation...

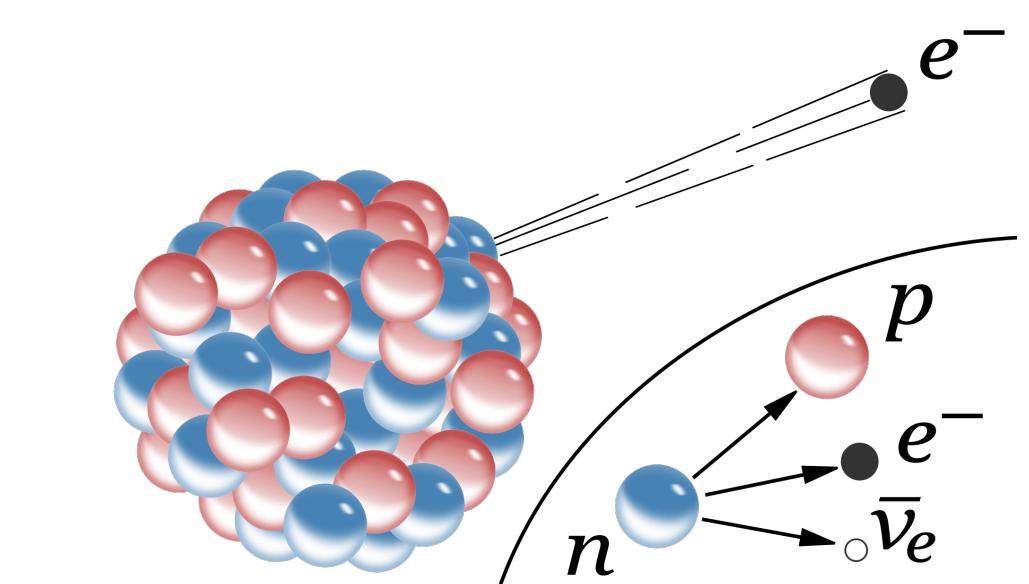
Interaction électromagnétique



Interaction forte

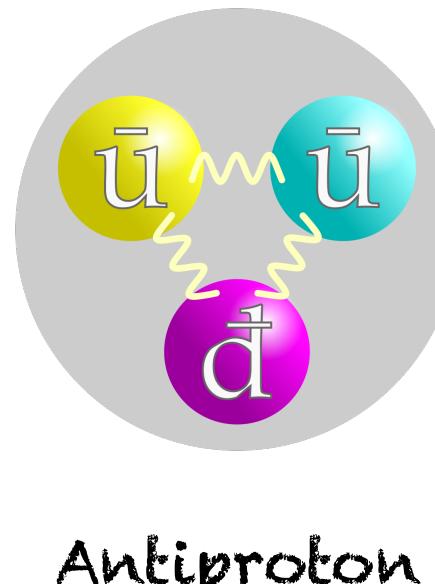
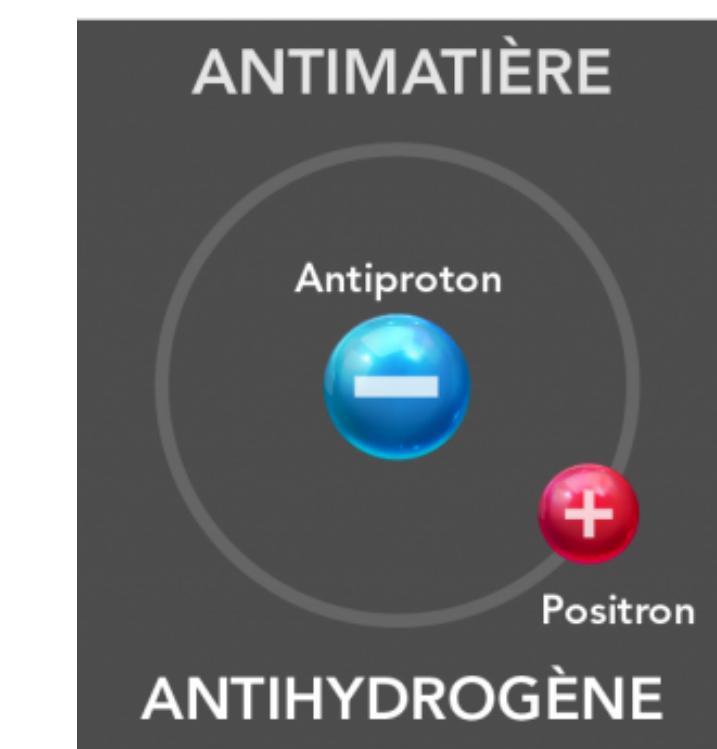
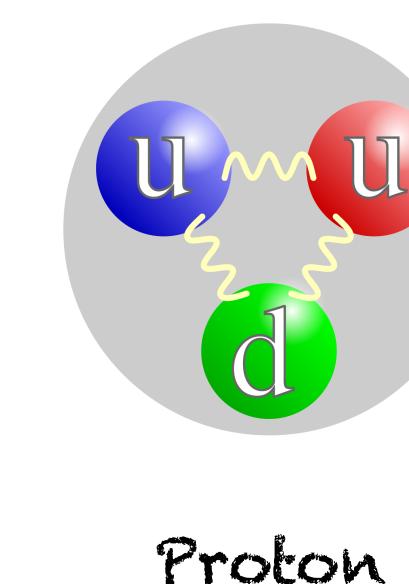


Interaction faible



C'était quoi l'antimatière?

	Leptons	Quarks	Antileptons	Antiquarks
Fermions				
Particules formant la matière	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid blue; padding: 5px; text-align: center;"> e^- électron </div> <div style="border: 1px solid blue; padding: 5px; text-align: center;"> ν_e électron neutrino </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid blue; padding: 5px; text-align: center;"> μ^- muon </div> <div style="border: 1px solid blue; padding: 5px; text-align: center;"> ν_μ muon neutrino </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid blue; padding: 5px; text-align: center;"> τ^- tauon </div> <div style="border: 1px solid blue; padding: 5px; text-align: center;"> ν_τ tau neutrino </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; text-align: center;"> u up </div> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; text-align: center;"> d down </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; text-align: center;"> c charm </div> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; text-align: center;"> s strange </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; text-align: center;"> t Top </div> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; text-align: center;"> b Bottom </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid blue; padding: 5px; text-align: center;"> e^+ positron </div> <div style="border: 1px solid blue; padding: 5px; text-align: center;"> $\bar{\nu}_e$ électron antineutrino </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid blue; padding: 5px; text-align: center;"> μ^+ antimuon </div> <div style="border: 1px solid blue; padding: 5px; text-align: center;"> $\bar{\nu}_\mu$ muon neutrino </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid blue; padding: 5px; text-align: center;"> τ^+ antitauon </div> <div style="border: 1px solid blue; padding: 5px; text-align: center;"> $\bar{\nu}_\tau$ tau neutrino </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; text-align: center;"> \bar{u} up </div> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; text-align: center;"> \bar{d} down </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; text-align: center;"> \bar{c} charm </div> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; text-align: center;"> \bar{s} strange </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; text-align: center;"> \bar{t} Top </div> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; text-align: center;"> \bar{b} Bottom </div> </div>



Et quand parle-t-on de saveurs?

Leptons

e électron	ν_e électron neutrino
μ muon	ν_μ muon neutrino
τ tauon	ν_τ tau neutrino

Trois saveurs de leptons



Six saveurs de quarks



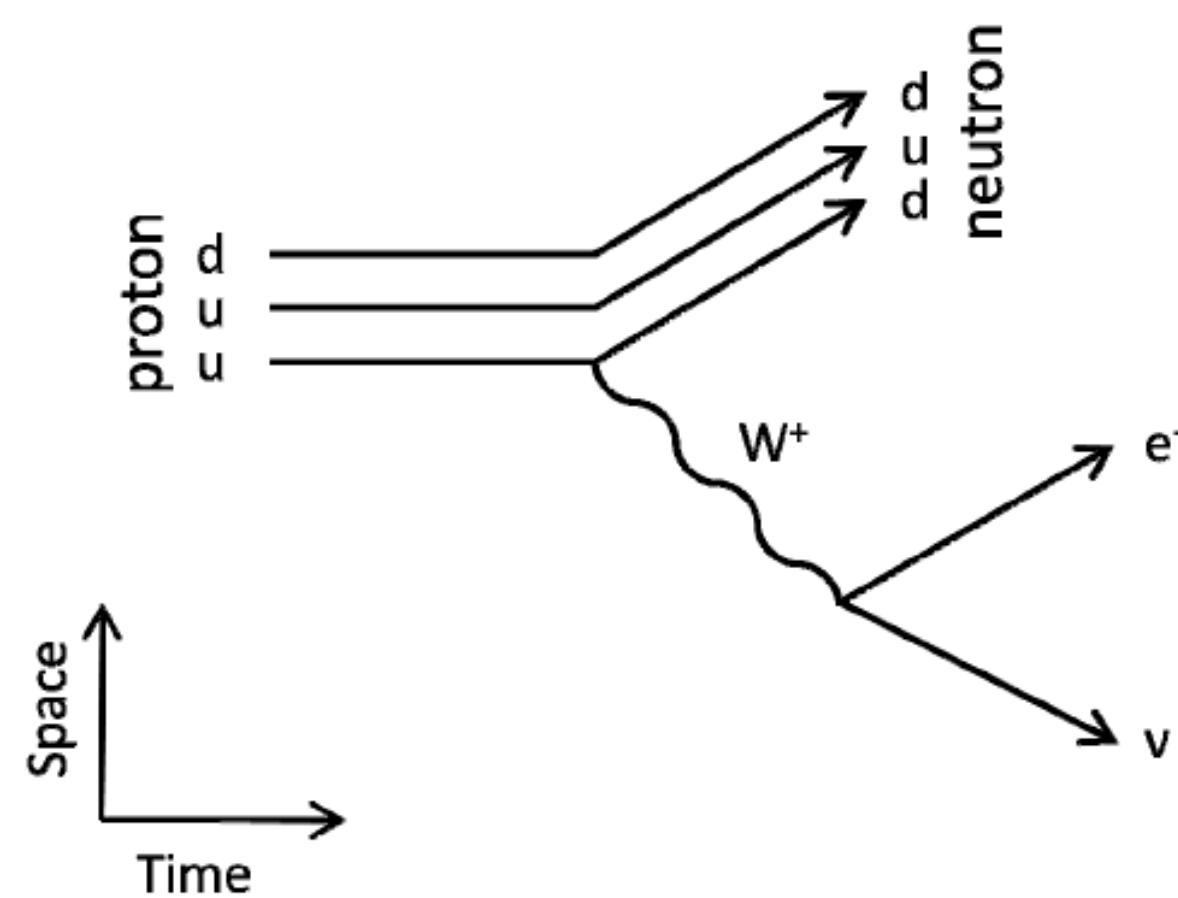
Quarks

u up	d down
c charm	s strange
t Top	b Bottom

Le succès du modèle standard: Prédiction du boson Z

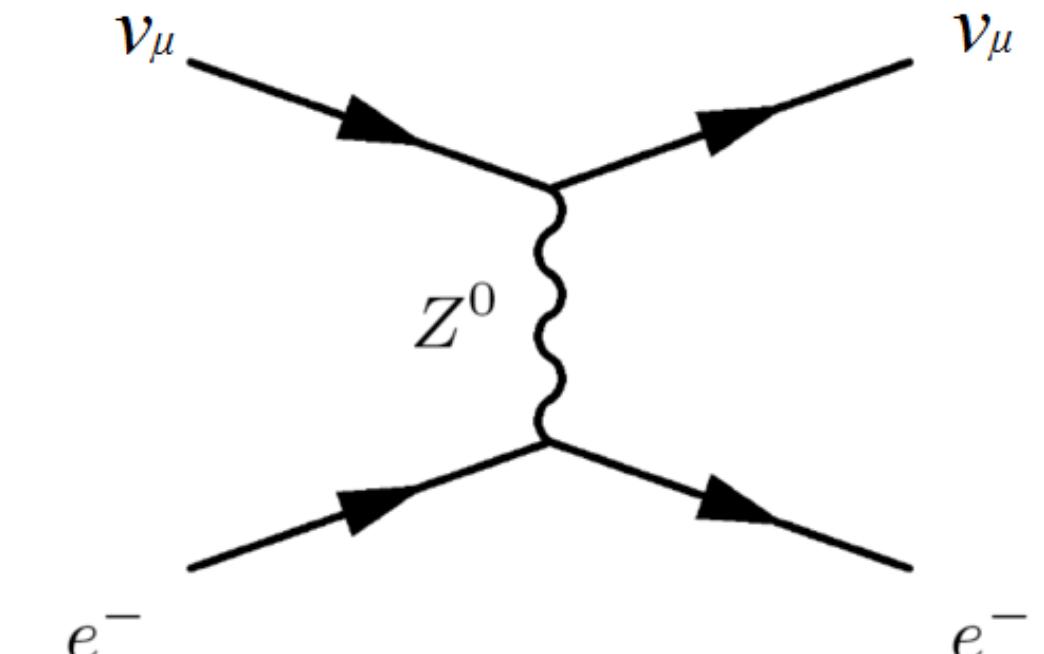
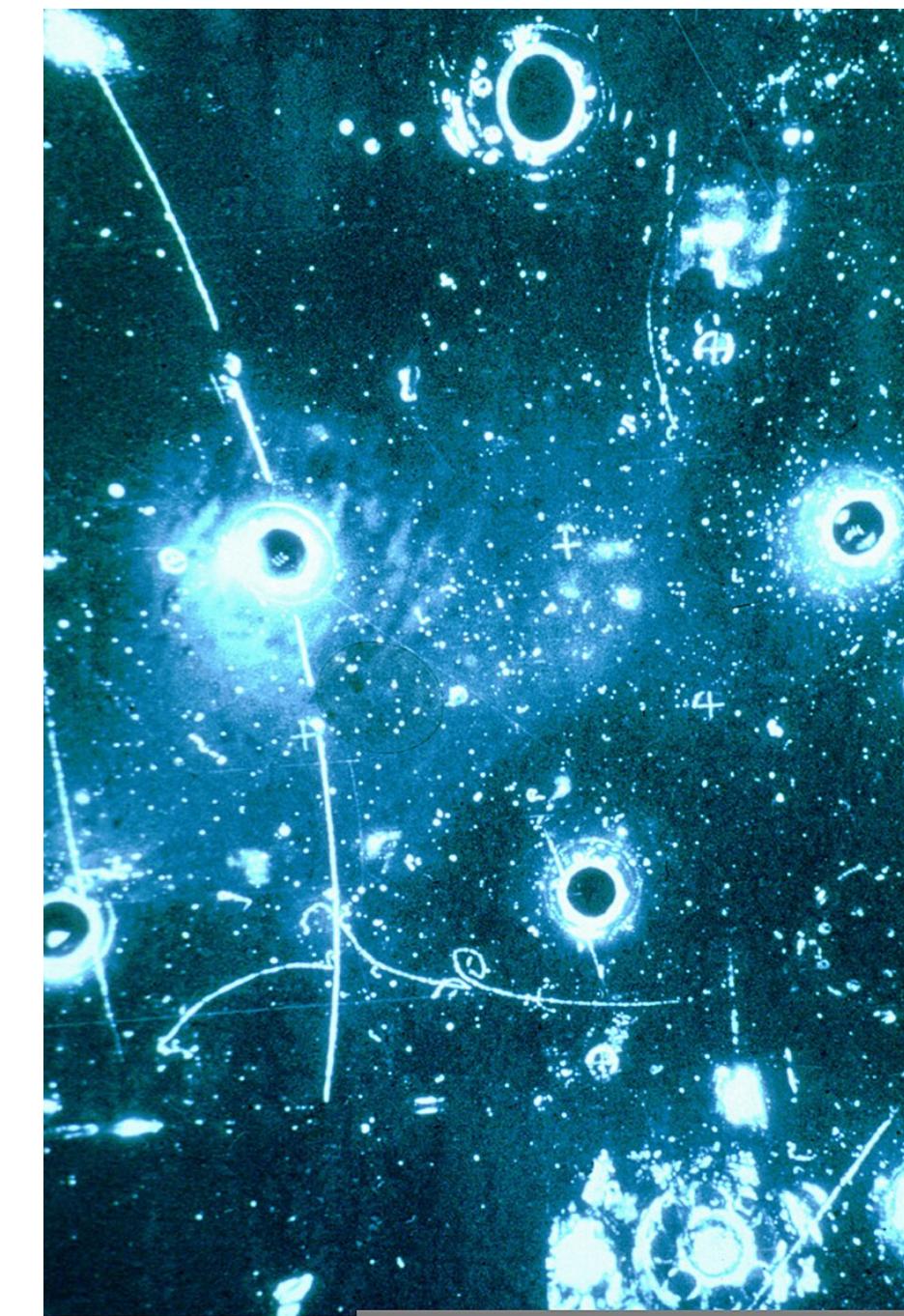
W[±]
boson W

Expliquait déjà les désintégrations
de la radioactivité



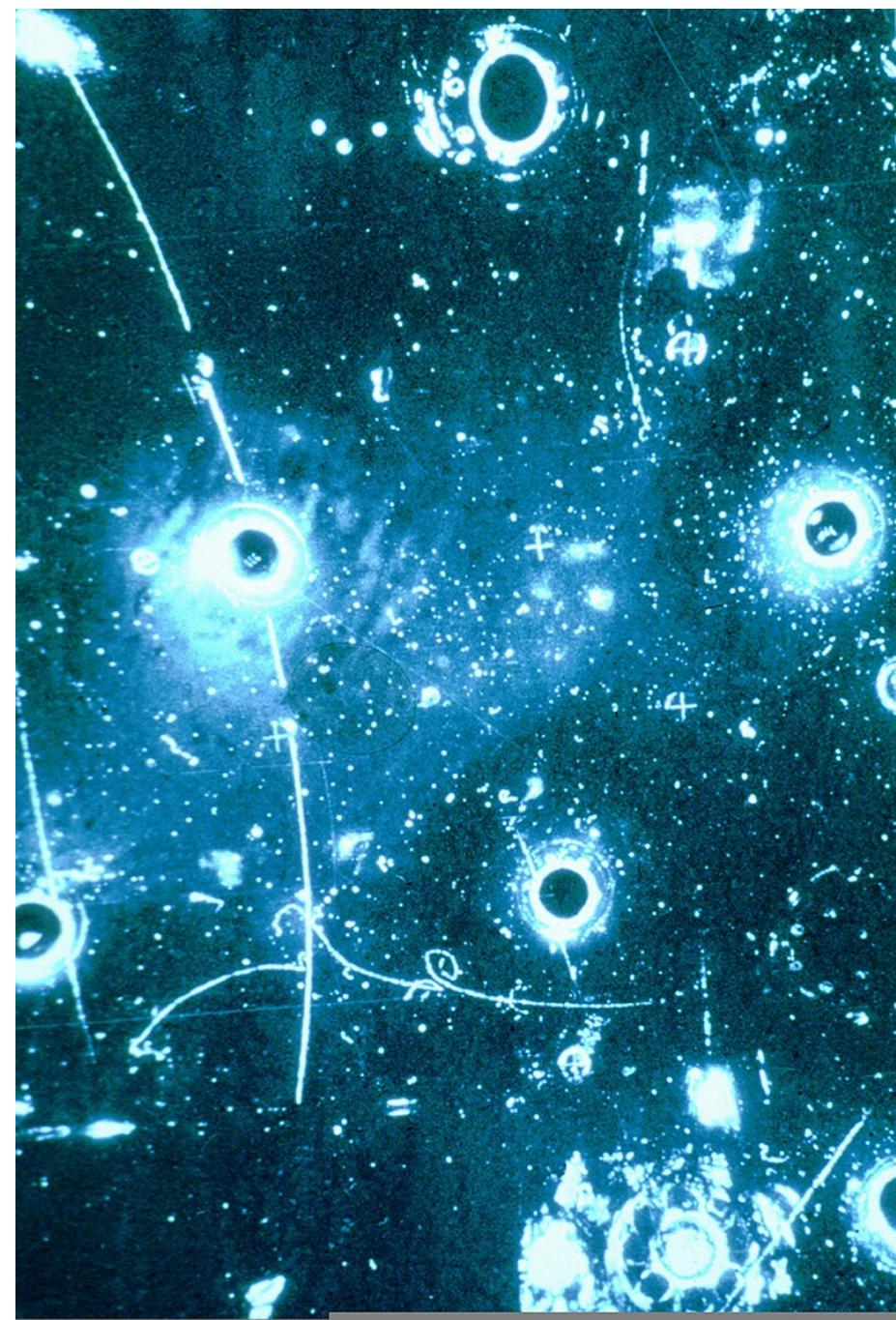
Z⁰
boson Z

L'effet du Z n'était pas encore observé jusqu'en 1973
Première indication de son existence: interaction entre neutrinos
et électrons dans la chambre à bulles « Gargamelle »

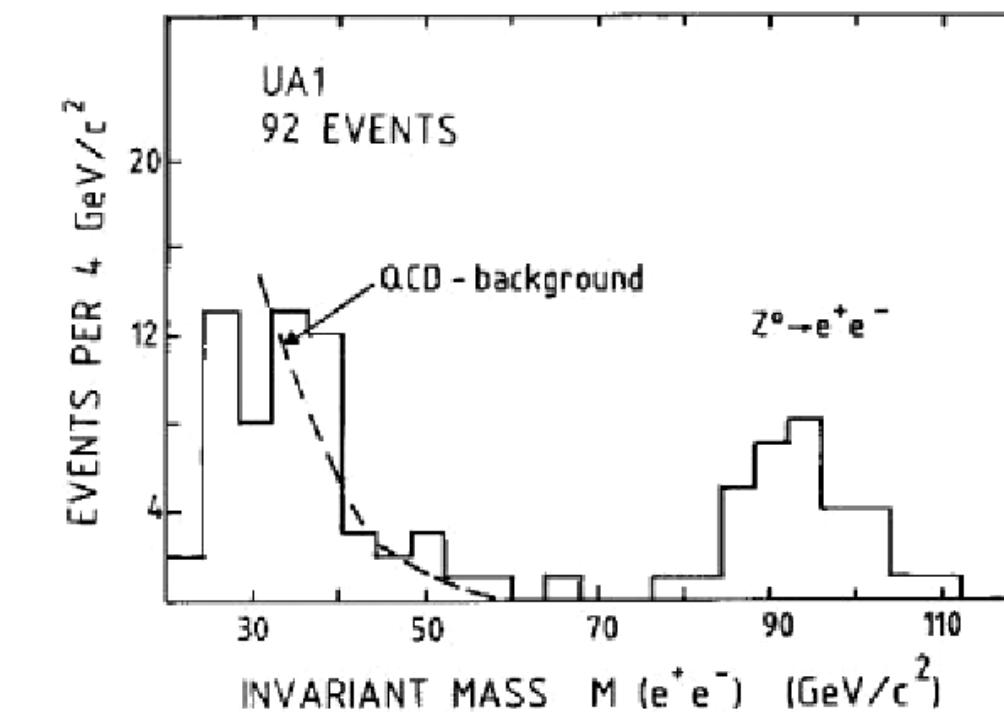
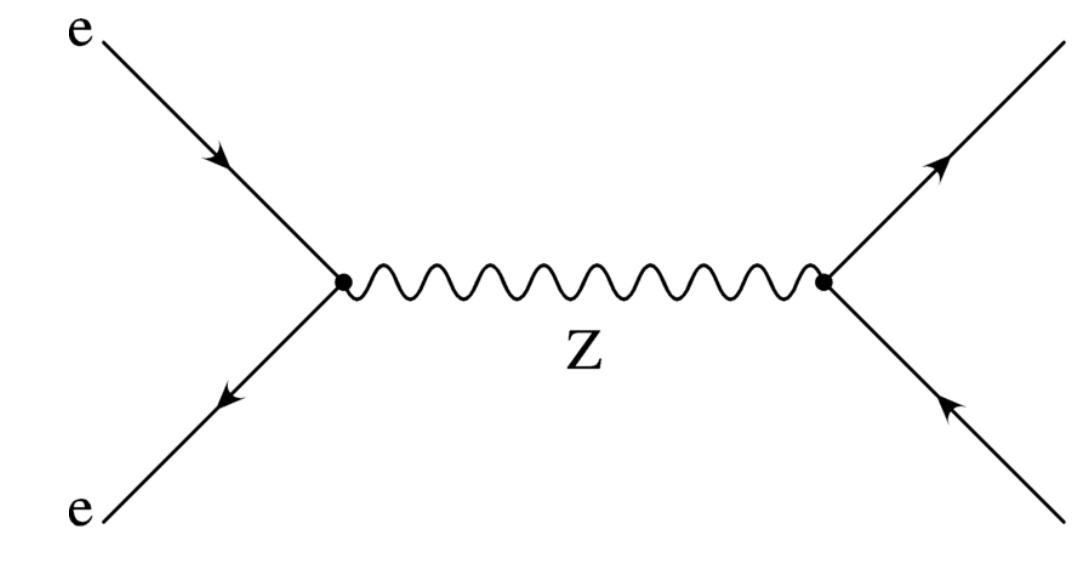


La découverte: D'abord indirecte, puis directe

Découverte indirecte du Z en 1973



Découverte directe du Z en 1983

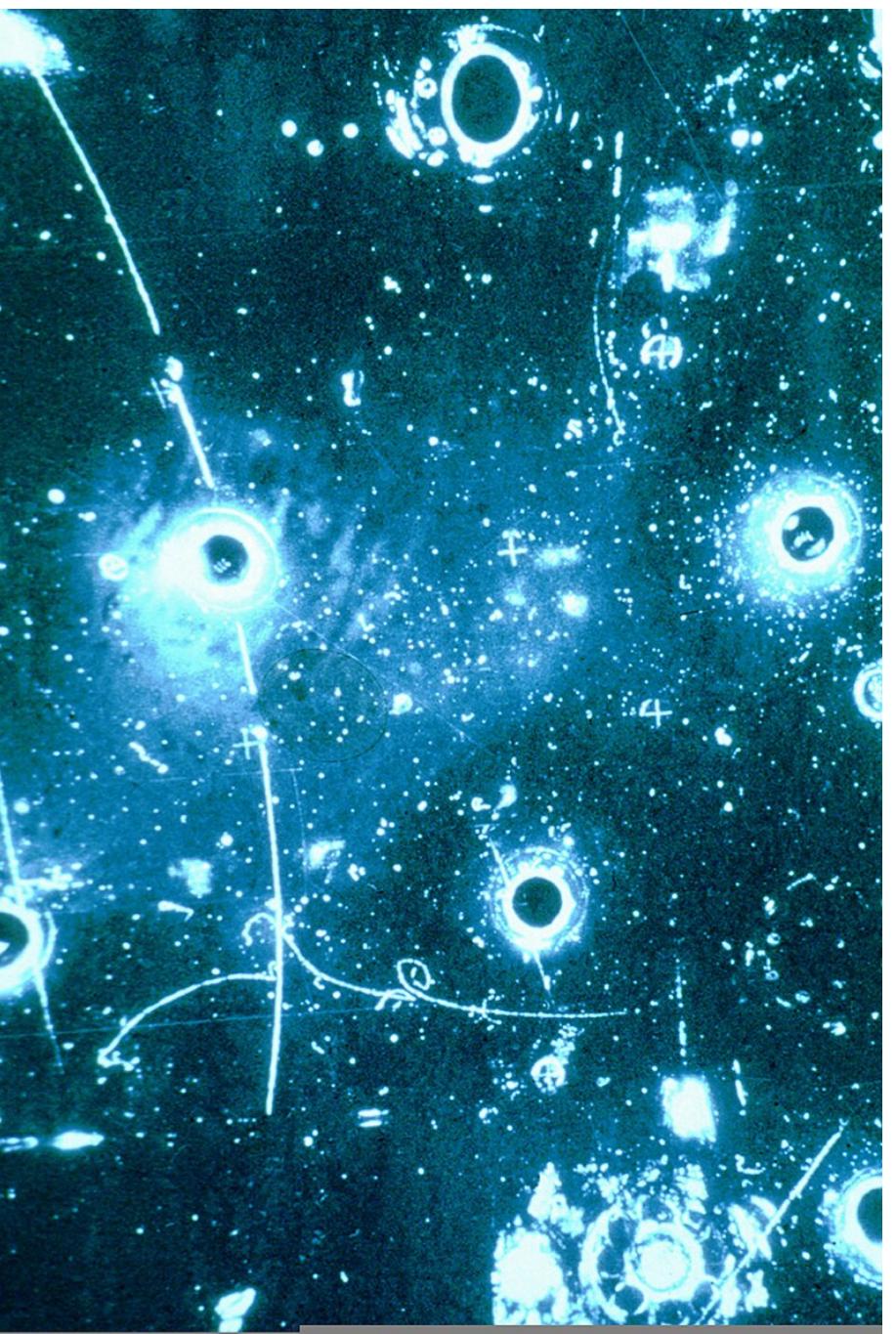


https://cds.cern.ch/record/2103277/files/9789814644150_0006.pdf

Observations directes et indirectes

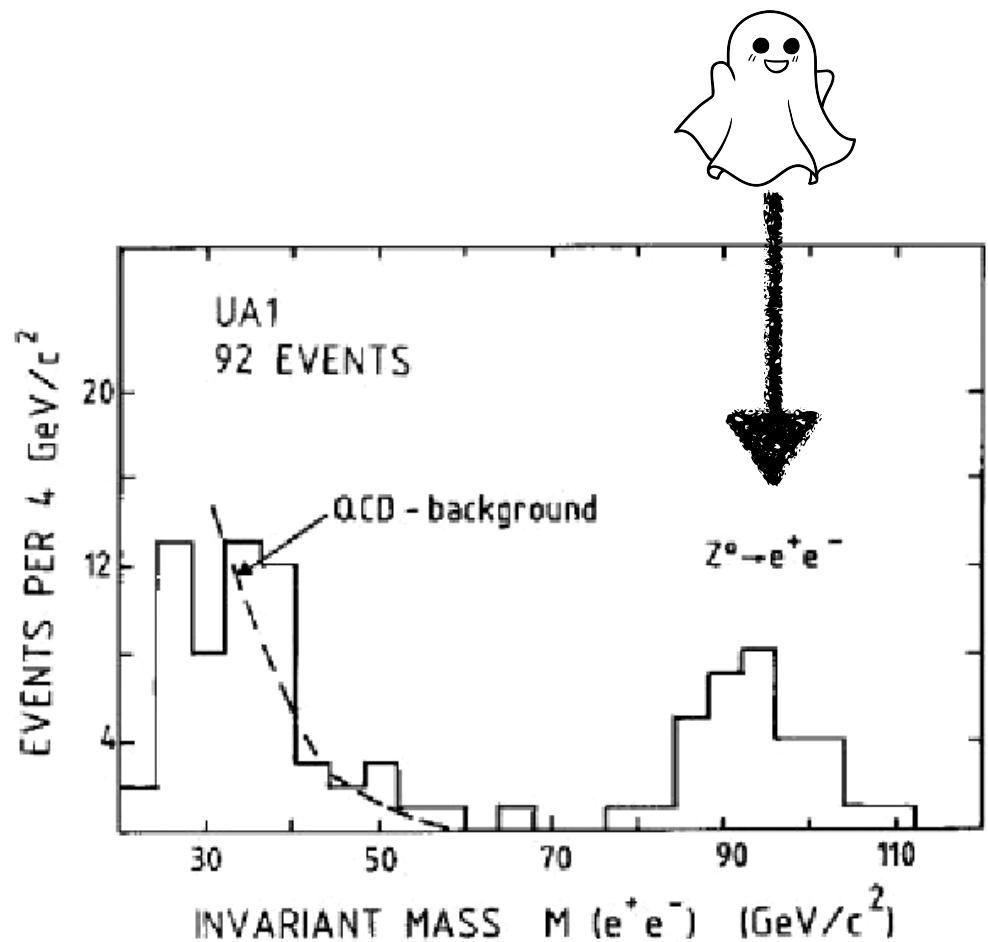
Observation indirecte

Effet indirect de quelque chose invisible



Observation directe

Mesurer directement les propriétés d'une particule



La recherche pour la « Nouvelle Physique »

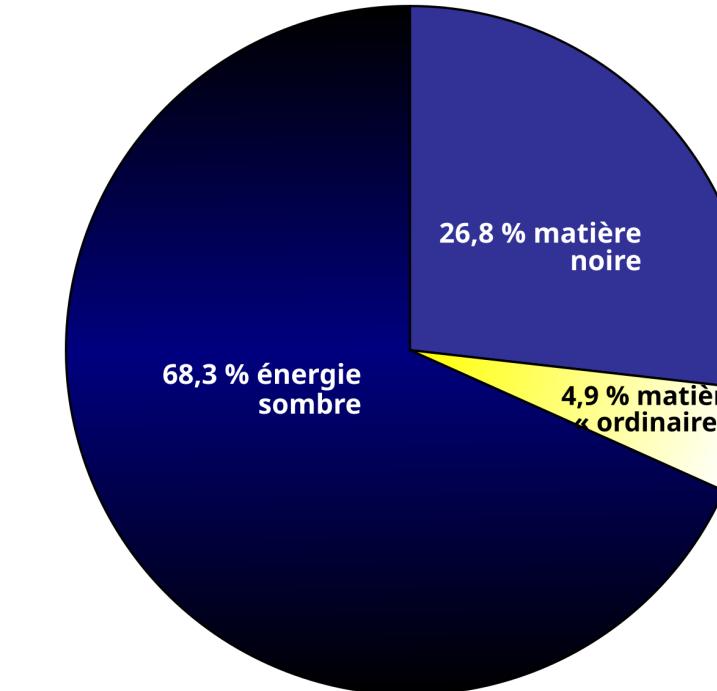
Le modèle standard

e électron	ν_e électron neutrino
μ muon	ν_μ muon neutrino
τ tauon	ν_τ tau neutrino

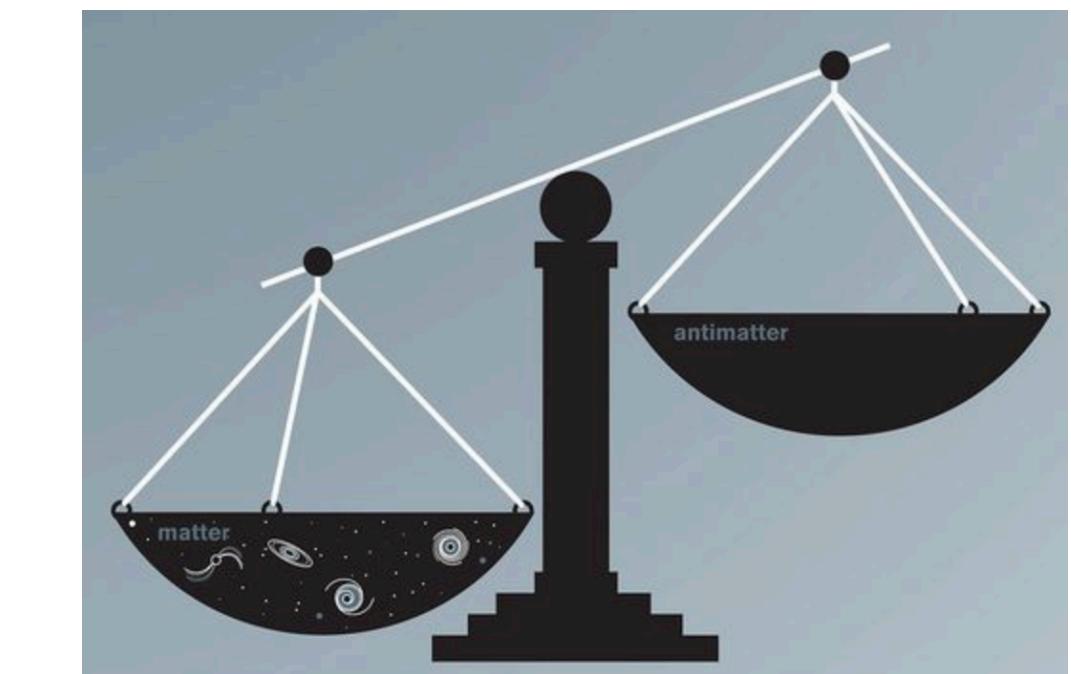
u up	d down
c charm	s strange
t Top	b Bottom

Sans explication →

Matière noire



Asymétrie entre matière et anti-matière



g gluon	γ photon	W^\pm boson W	Z^0 boson Z
-------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	------------------------------------

H Higgs boson

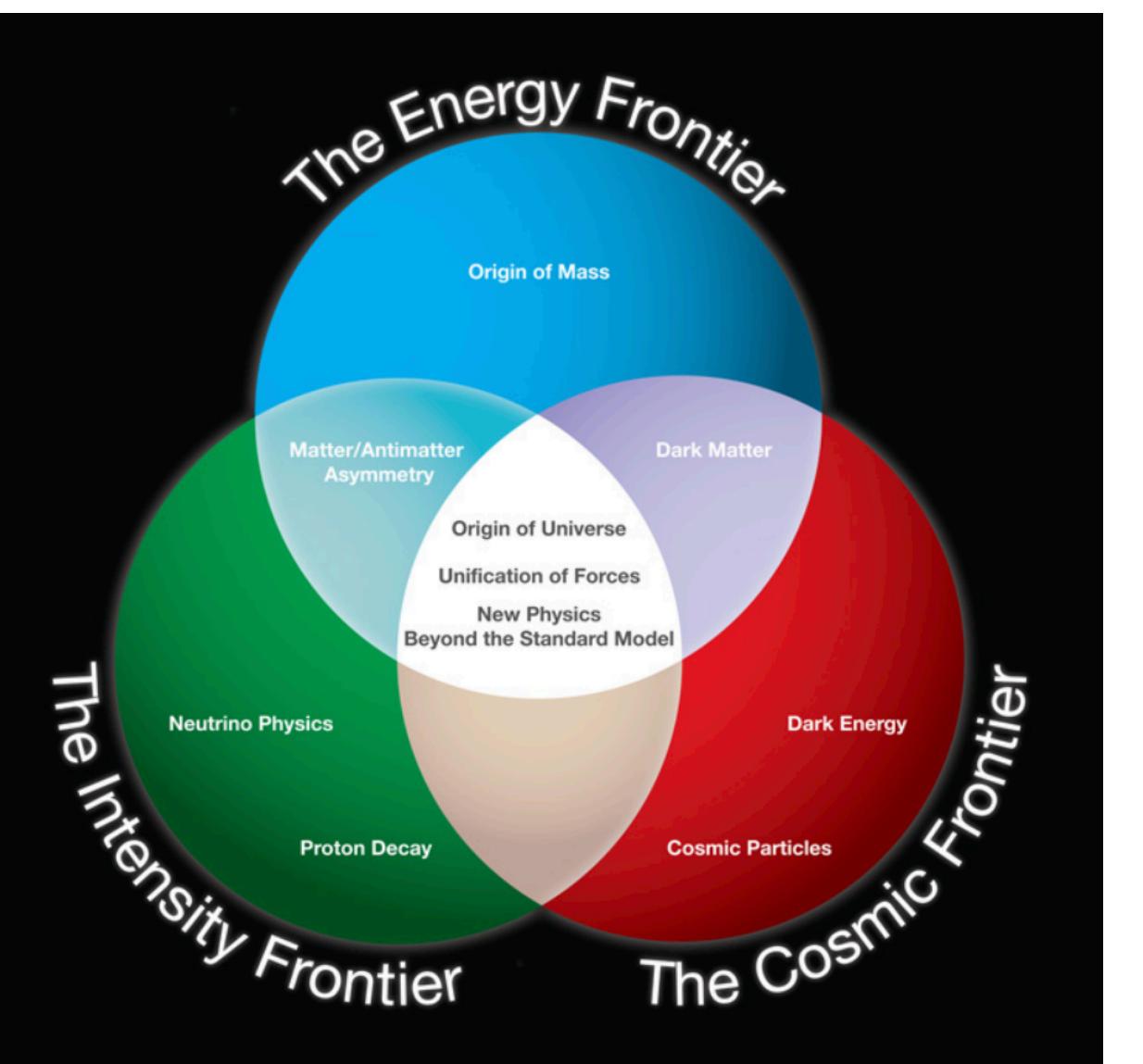
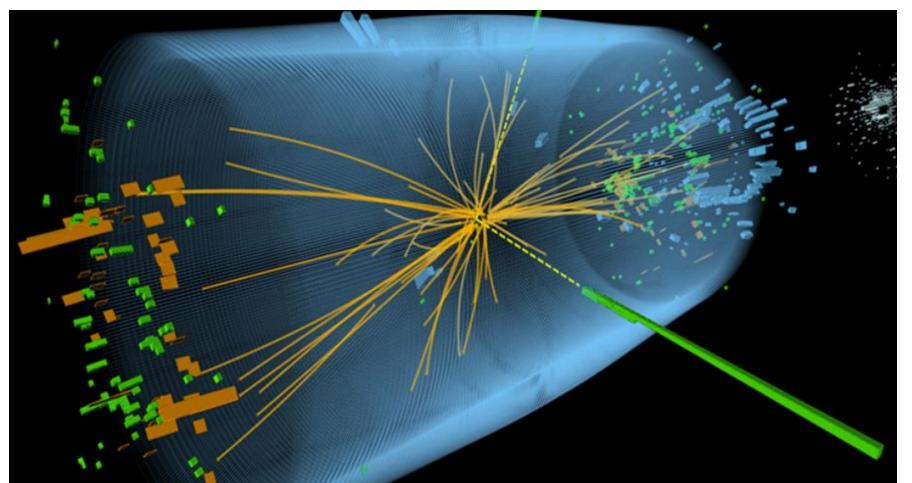
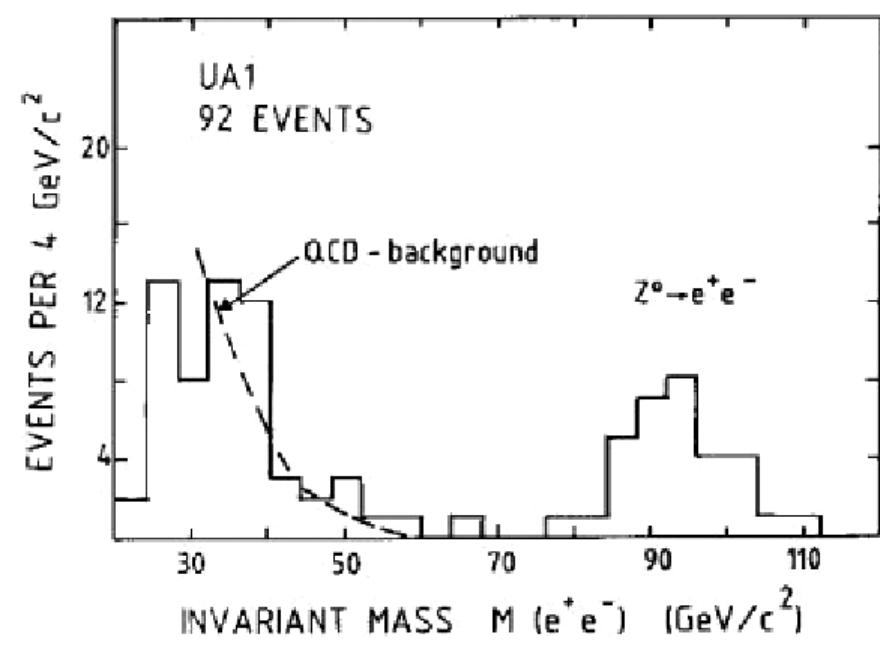
On cherche de nouvelles particules
et / ou d'interactions modifiées
qui peuvent expliquer les observations

Deux axes pour explorer de la Nouvelle Physique

Frontière énergétique

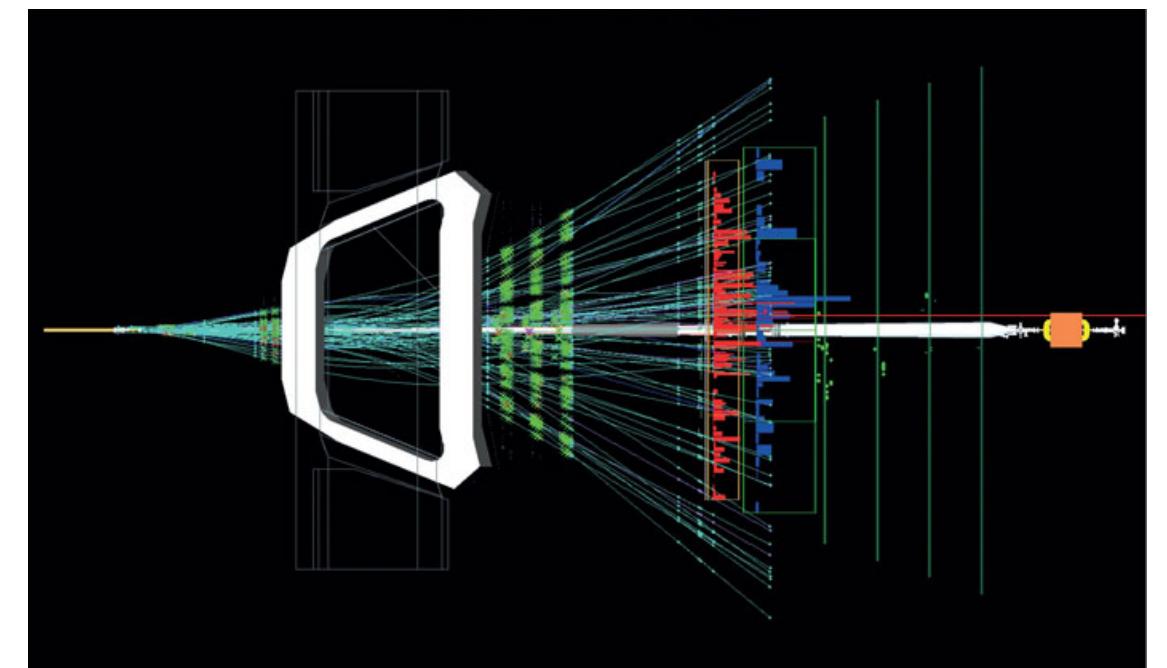
Produire de nouvelles particules dans les collisions de particules

$$E = mc^2$$



Frontière d'intensité

Mesures précises de propriétés de particules connues
Des déviations peuvent mener à une observation indirecte

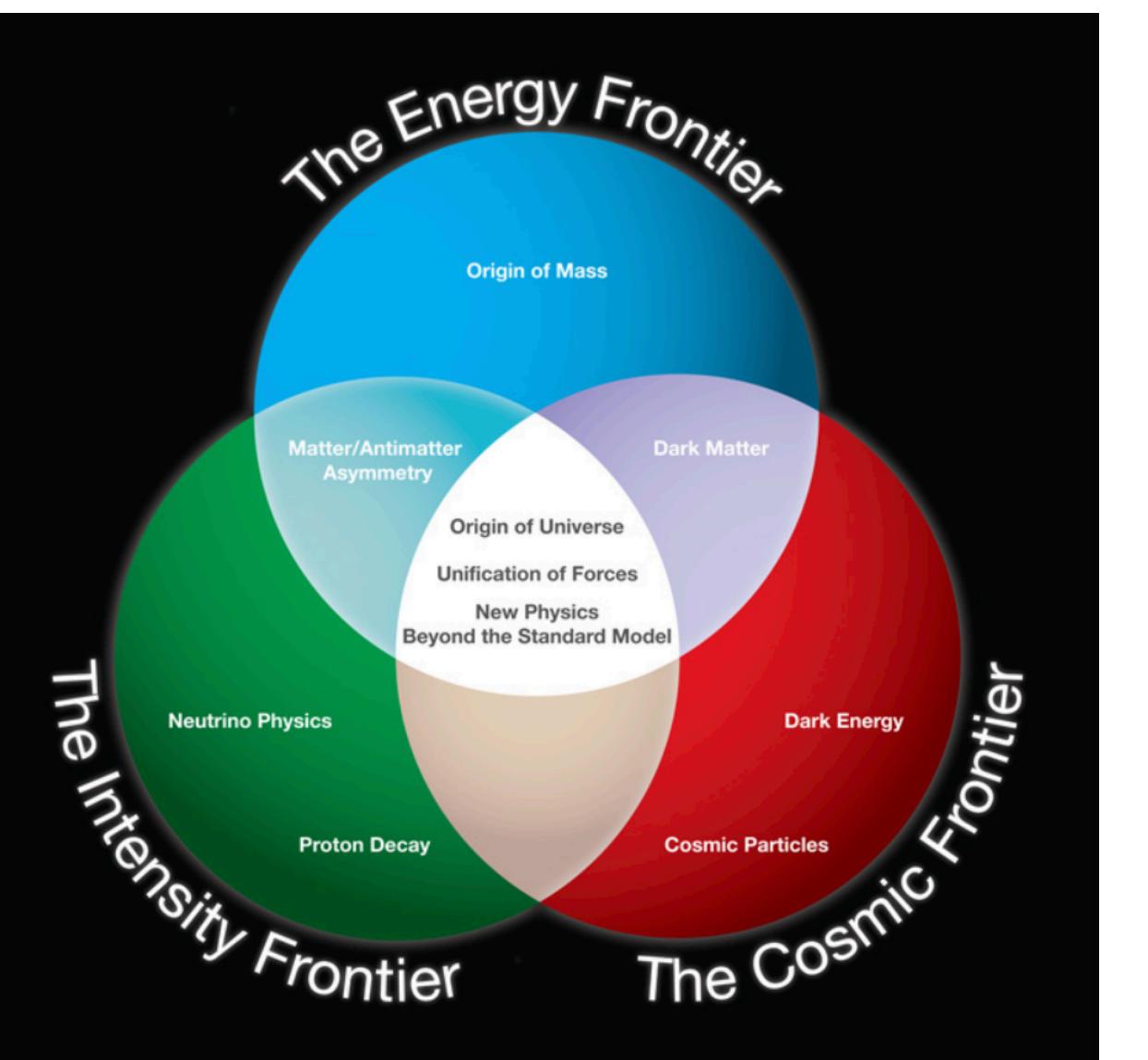
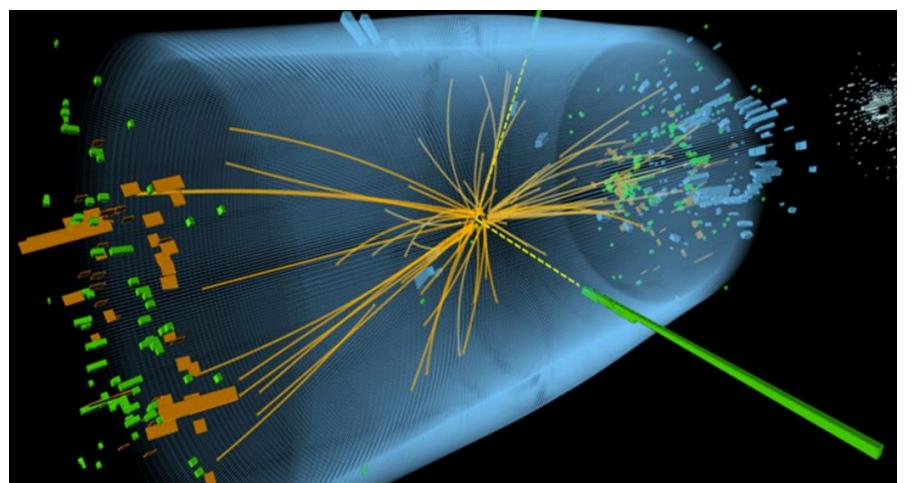
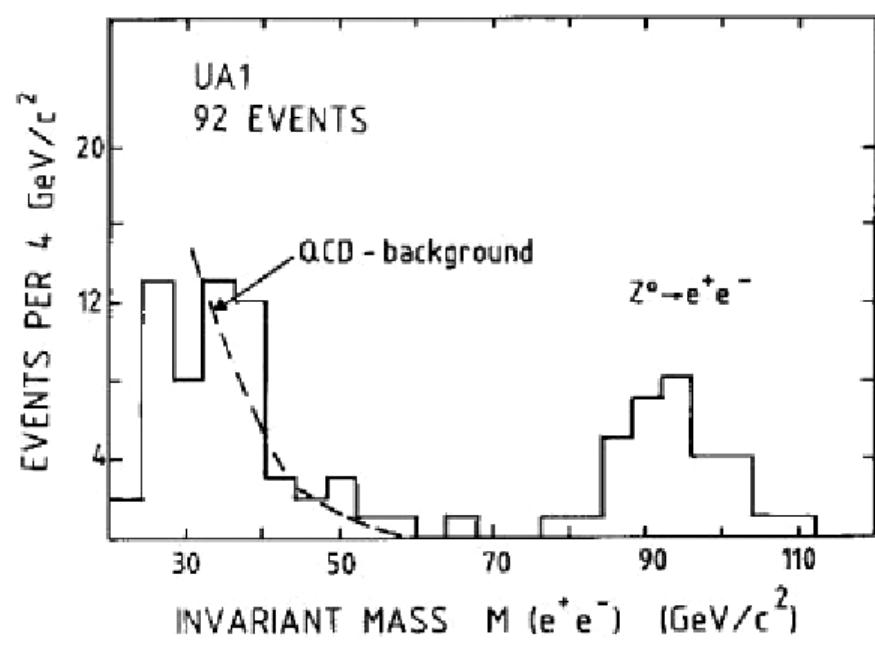


Deux axes pour explorer de la Nouvelle Physique

Frontière énergétique

Produire de nouvelles particules dans les collisions de particules

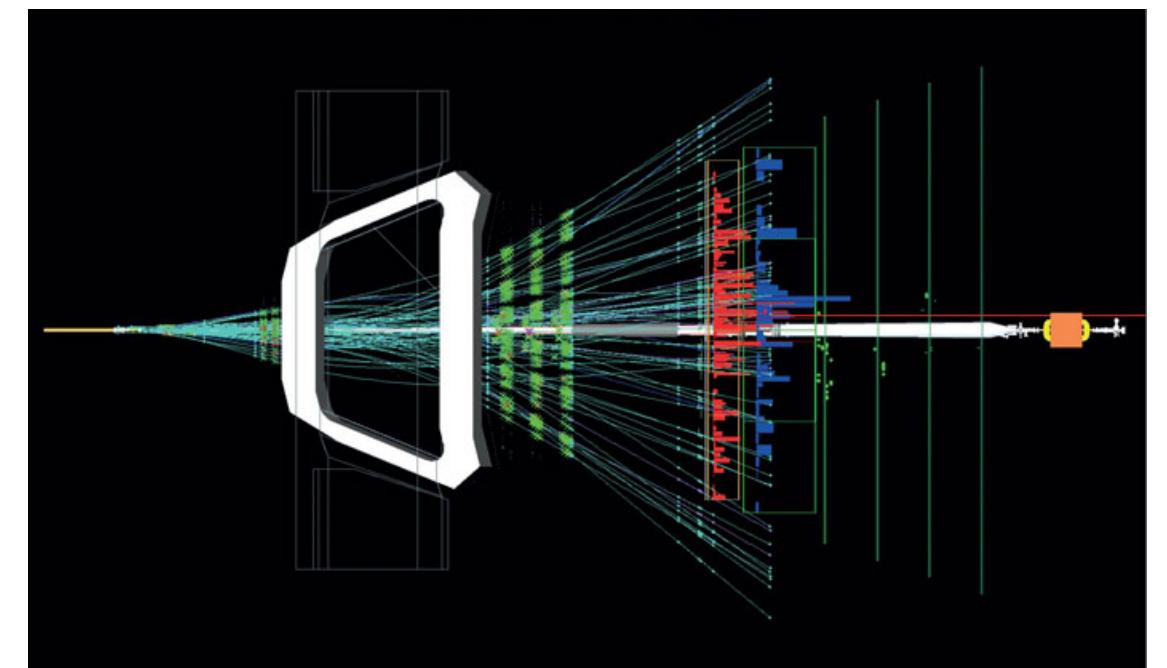
$$E = mc^2$$



Physique des saveurs

Frontière d'intensité

Mesures précises de propriétés de particules connues
Des déviations peuvent mener à une observation indirecte



Des déviations observées dans les dernières années

Théorie

« Universalité leptונית » dans le Modèle Standard

Différentes masses

e électron

μ muon

τ tauon

Mêmes interactions via la force faible

W^\pm boson W

Z^0 boson Z

La probabilité de désintégrations avec des leptons chargés devrait seulement dépendre de leur masse



Des déviations observées dans les dernières années

Théorie

« Universalité leptונית » dans le Modèle Standard

Différentes masses

e
électron



μ
muon



τ
tauon



Mêmes interactions
via la force faible

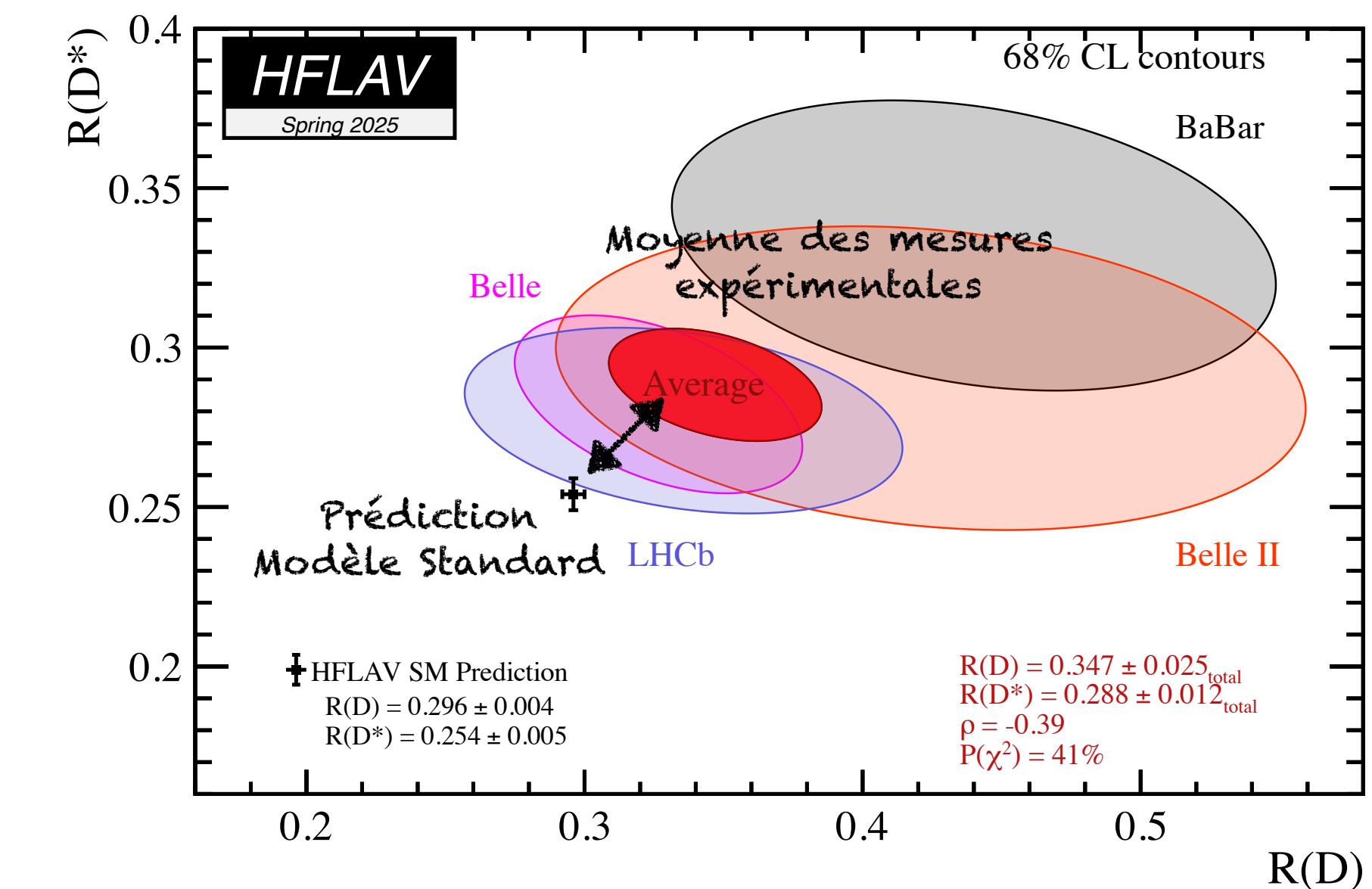
W[±]
boson W

Z⁰
boson Z

La probabilité de désintégrations avec des leptons chargés
devrait seulement dépendre de leur masse

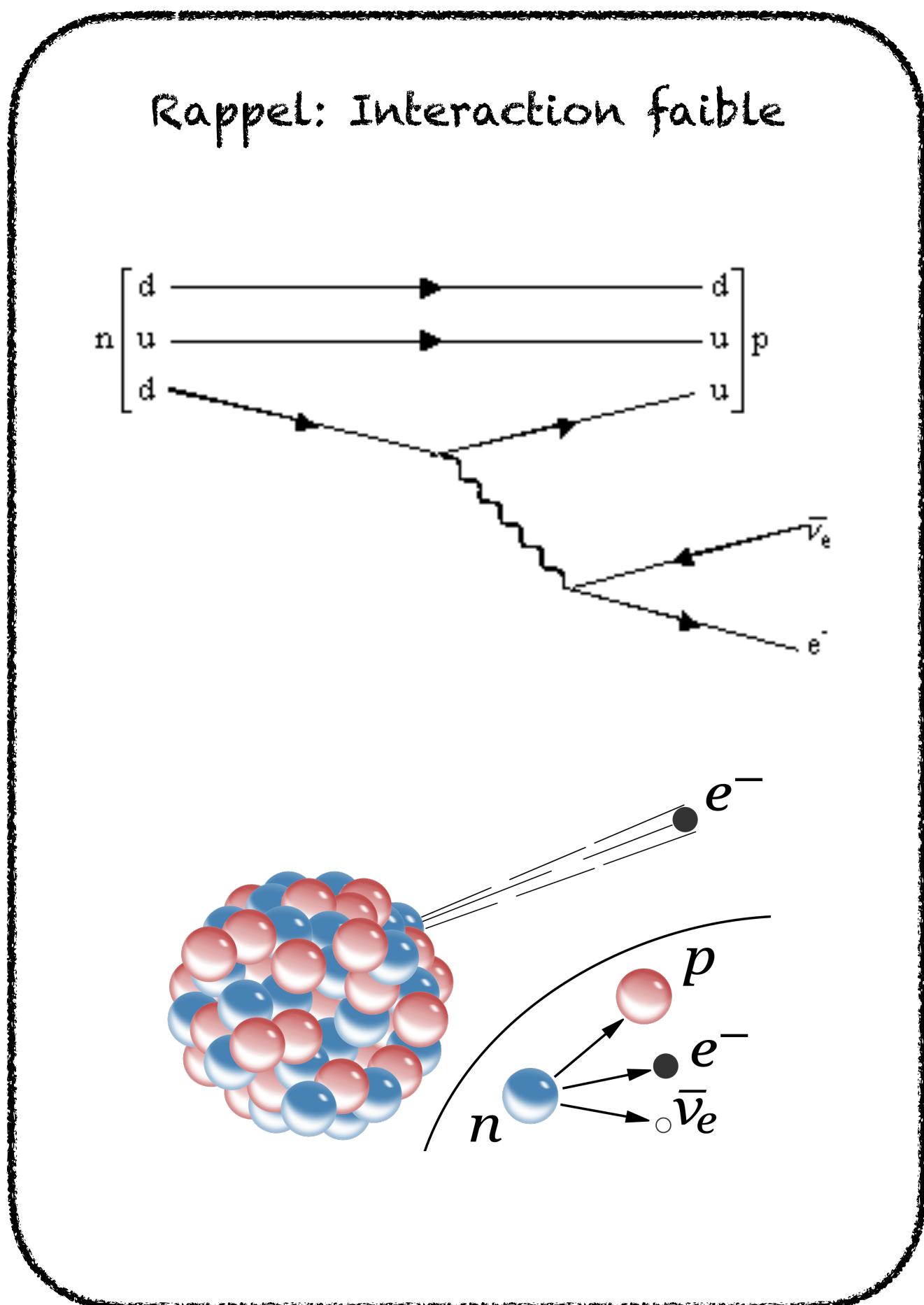
Observation

Déviation de l'universalité leptונית

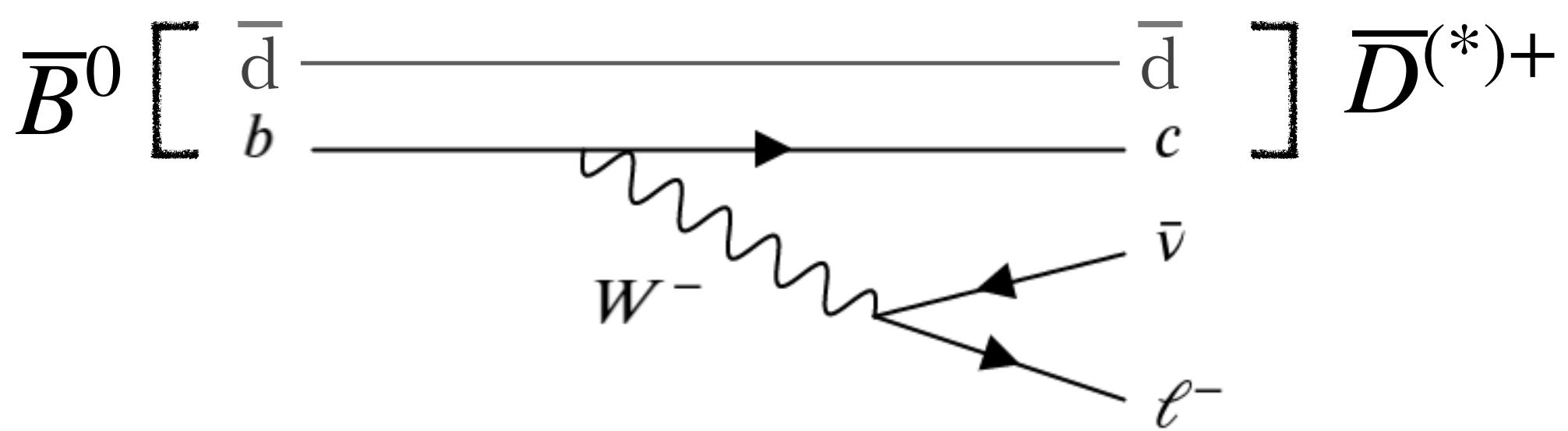


<https://hflav-eos.web.cern.ch/hflav-eos/semi/spring25/html/RDsDsstar/RDRDs.html>

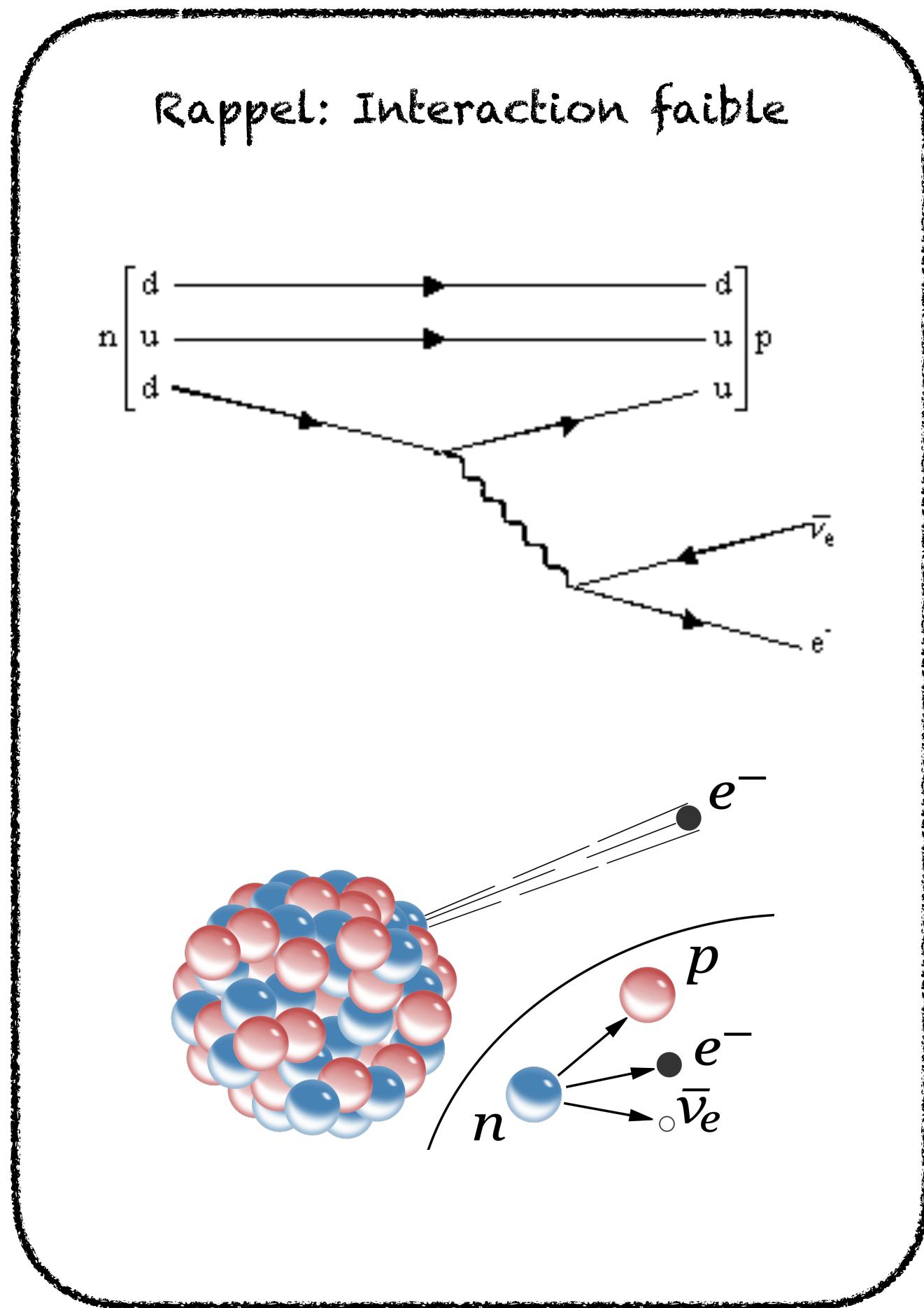
Mesurer l'universalité leptonique



Probabilité de désintégrations de « mesons » B



Mesurer l'universalité leptonique



Probabilité de désintégrations de « mesons » \mathcal{B}

$$\bar{B}^0 \left[\begin{array}{c} \bar{d} \\ b \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \bar{d} \\ c \end{array} \right] \bar{D}^{(*)+}$$



$$\mathcal{R}(D^{(*)})^{l\bar{l}} = \frac{\mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow D^{(*)+} \tau^- \bar{\nu}_\tau)}{\mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow D^{(*)+} l^- \bar{\nu}_l)}, l = e, \mu$$



« Probabilité de désintégration »

e
électron

μ
muon

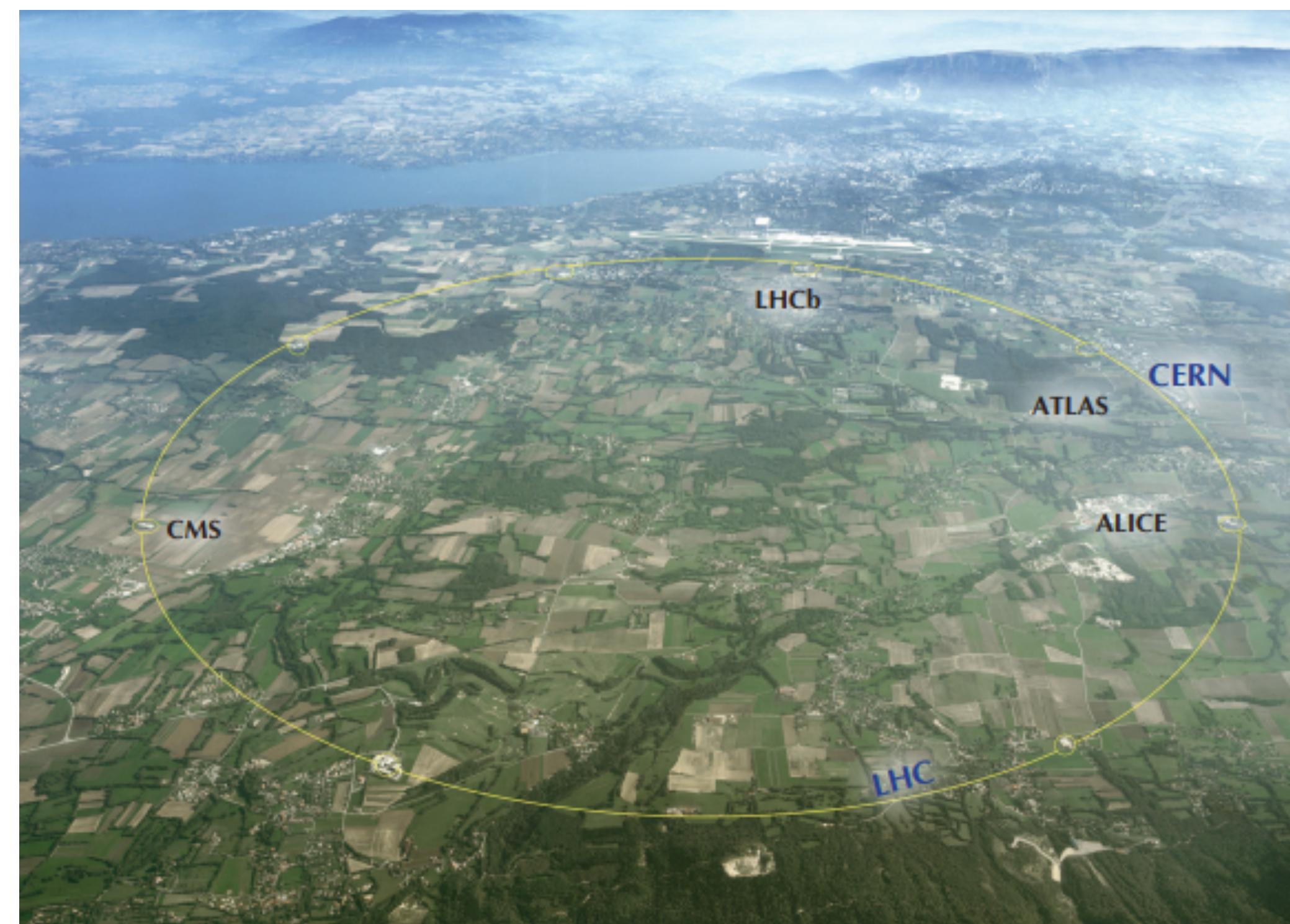
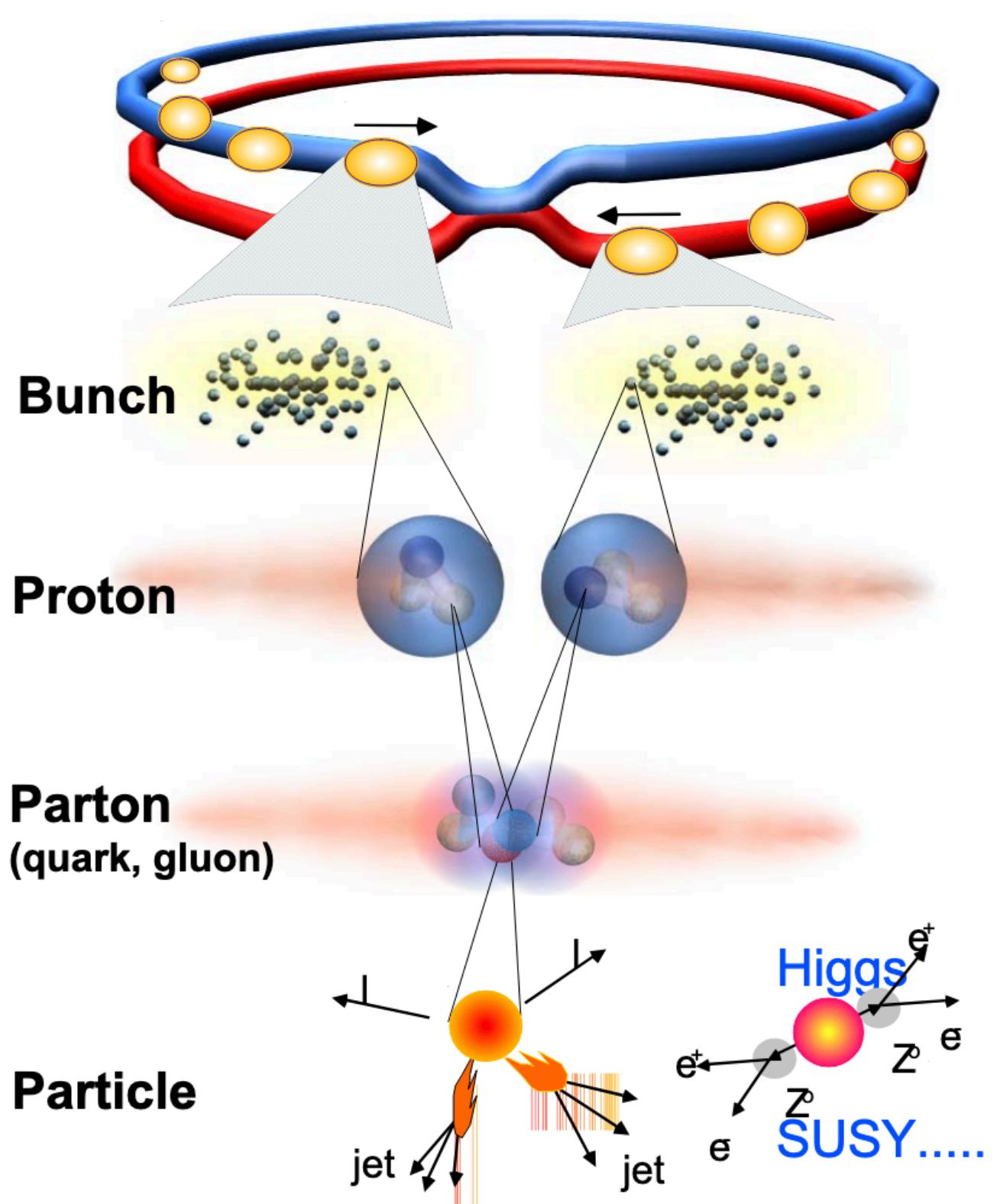
τ
tauon

Comment produire les mesons B?

Plus grand collisionneur de particules du monde:

« Large Hadron Collider » (LHC) à Genève

30 millions de collisions de protons par seconde!



Les quatres grandes expériences du LHC

ALICE

Dédié aux collisions d'ions lourds

Étude du plasma quark-gluon

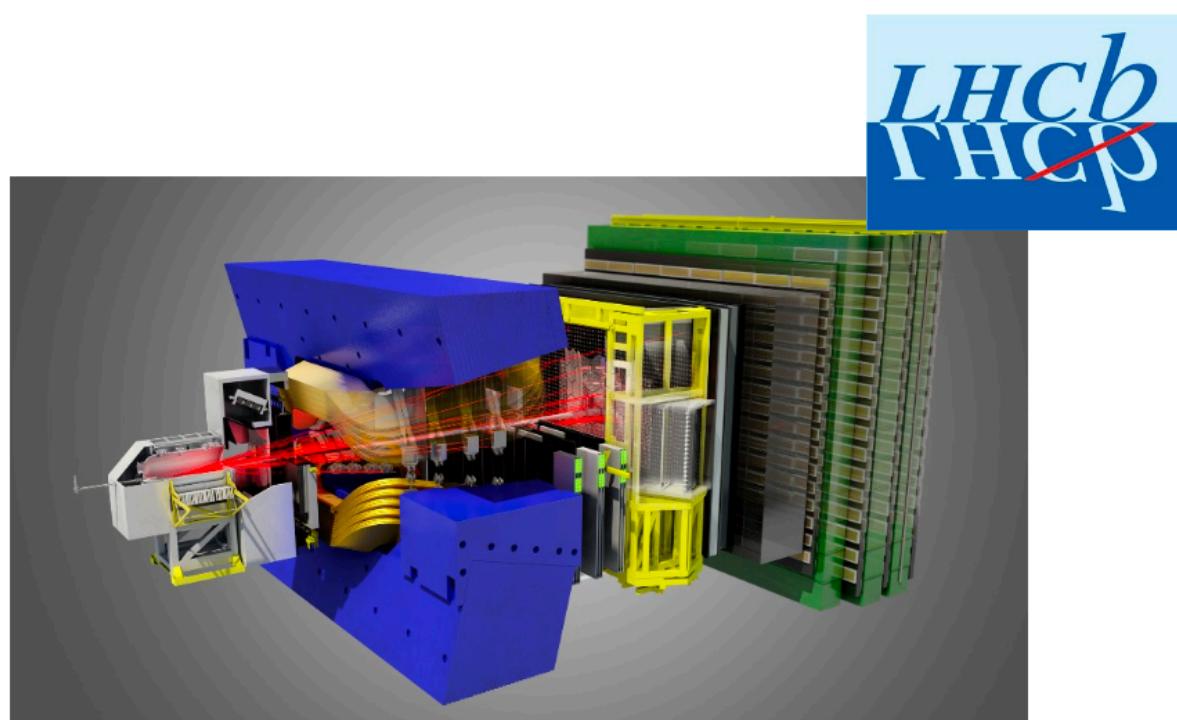


Frontière d'intensité

LHCb

Dédié aux hadrons contenant des quarks b et c

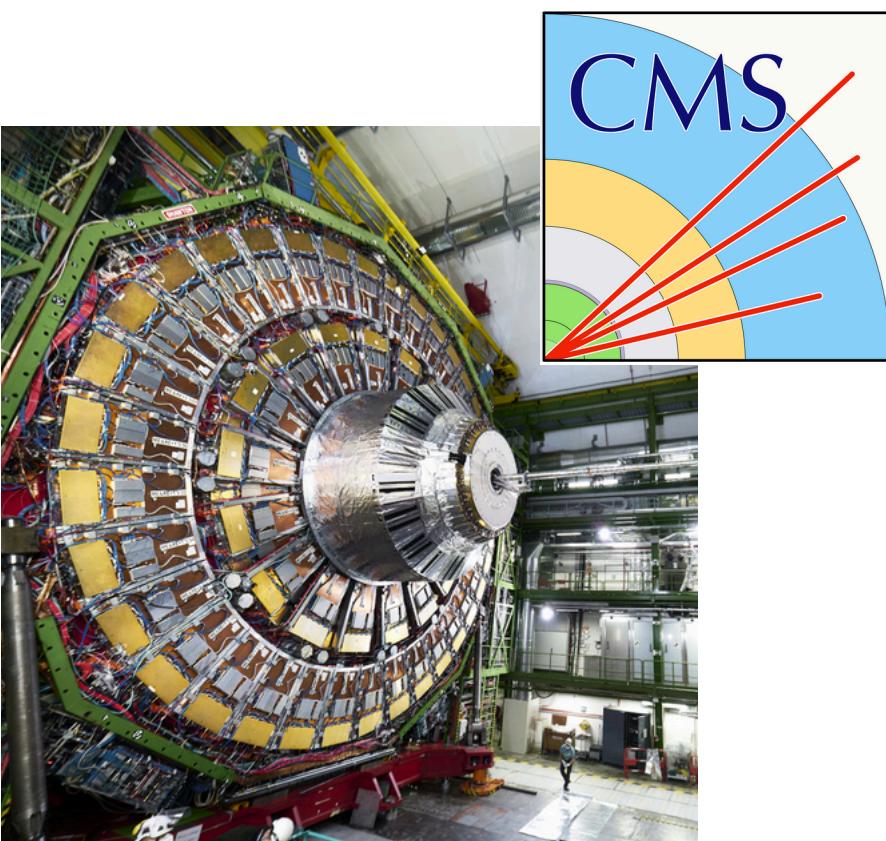
Mesures de précision



ATLAS & CMS

Détecteurs à usage général

Dédiés à la recherche de nouvelles particules produites directement



Frontière énergétique



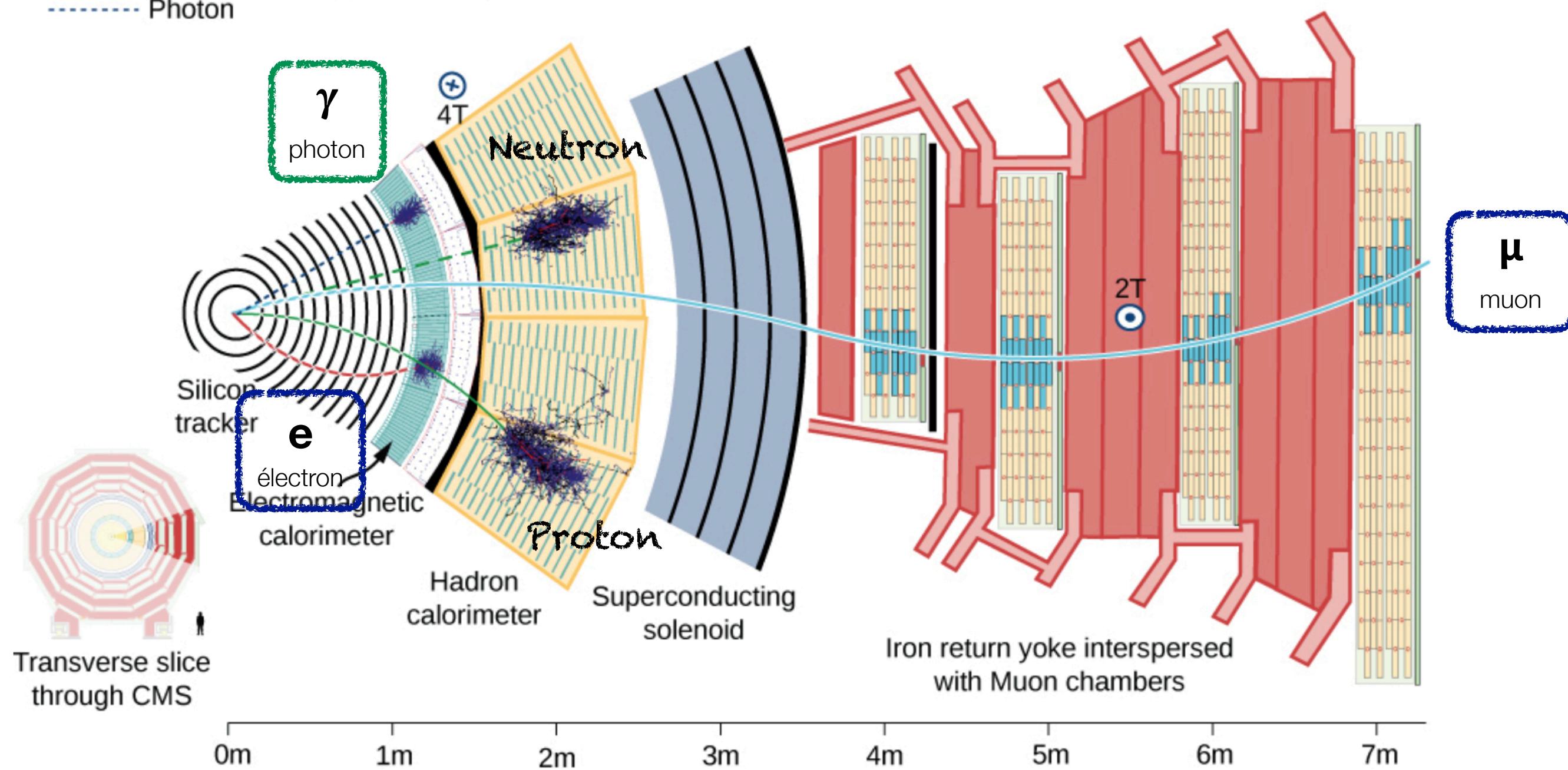
Comment « voir » les particules?

Mesurer

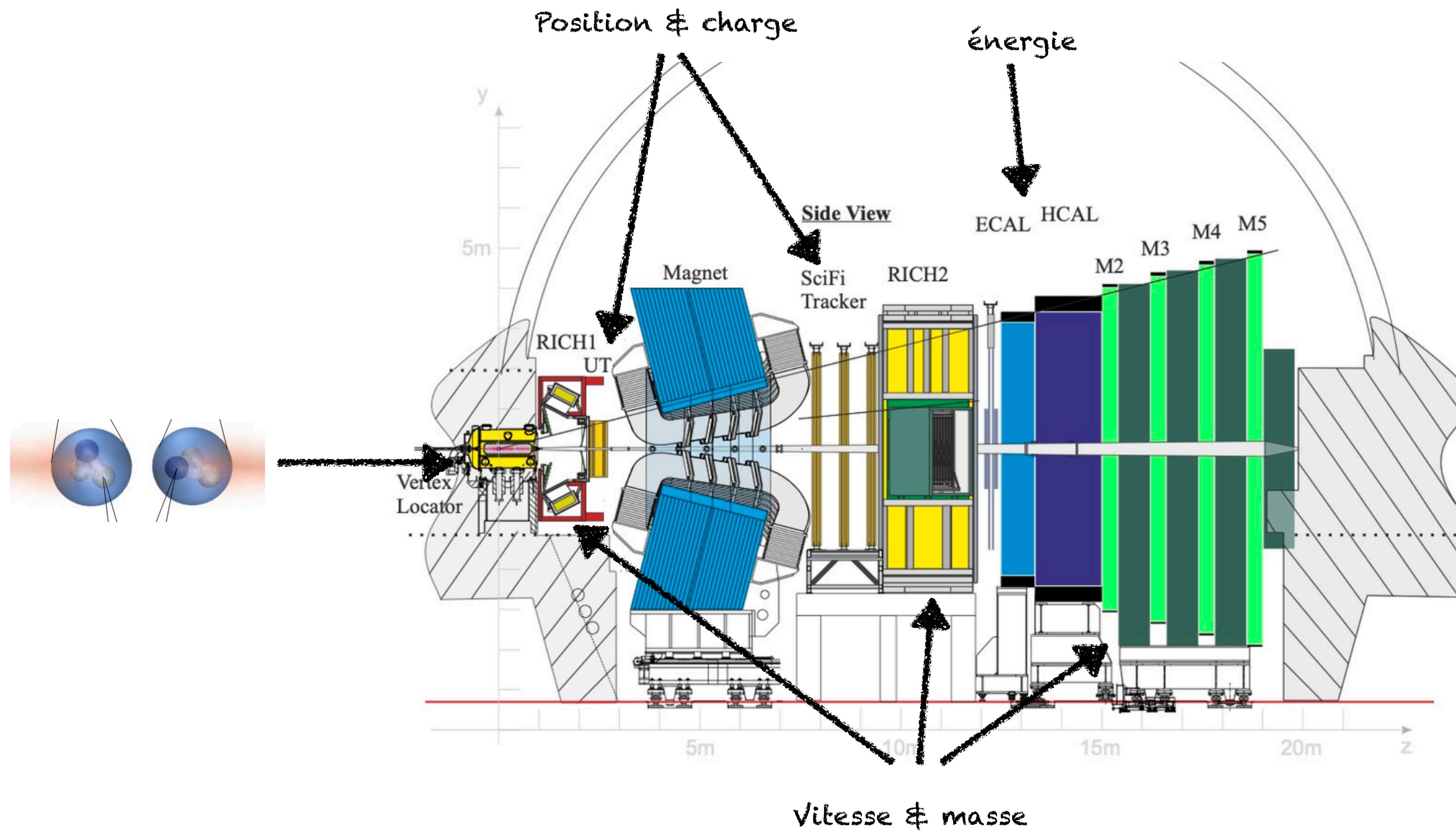
Position dans l'espace, charge, vitesse, masse, énergie

Key:

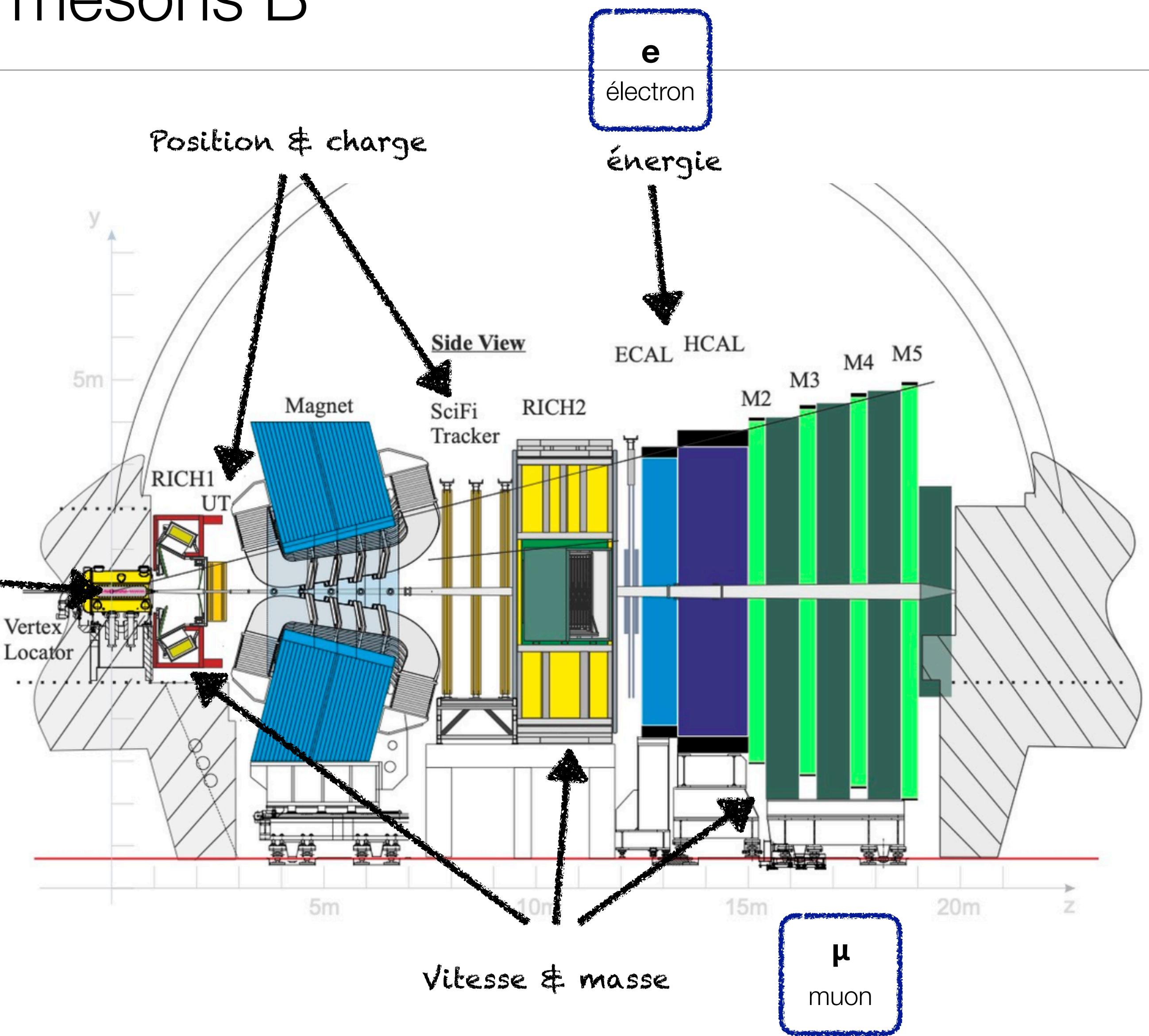
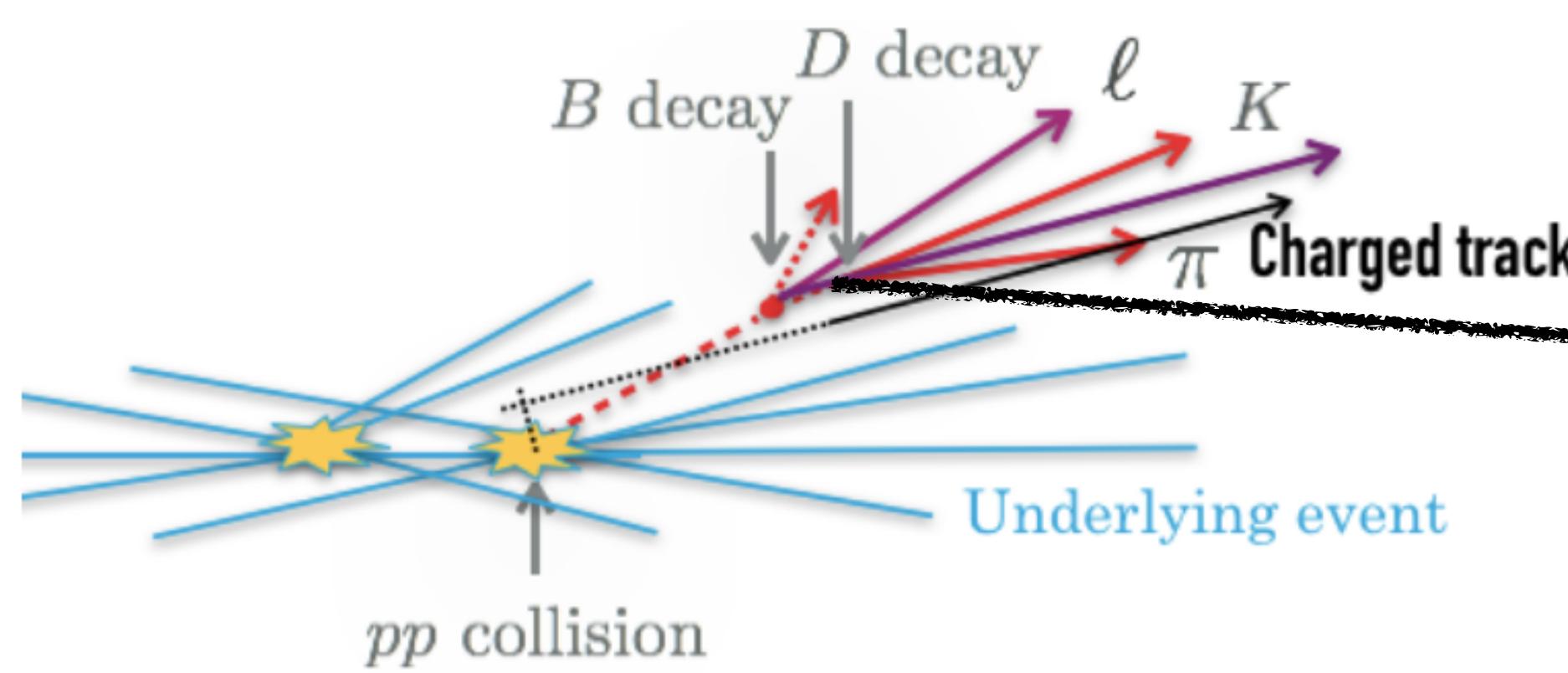
- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- Photon



L'expérience LHCb



Mesurer les désintégrations de mesons B

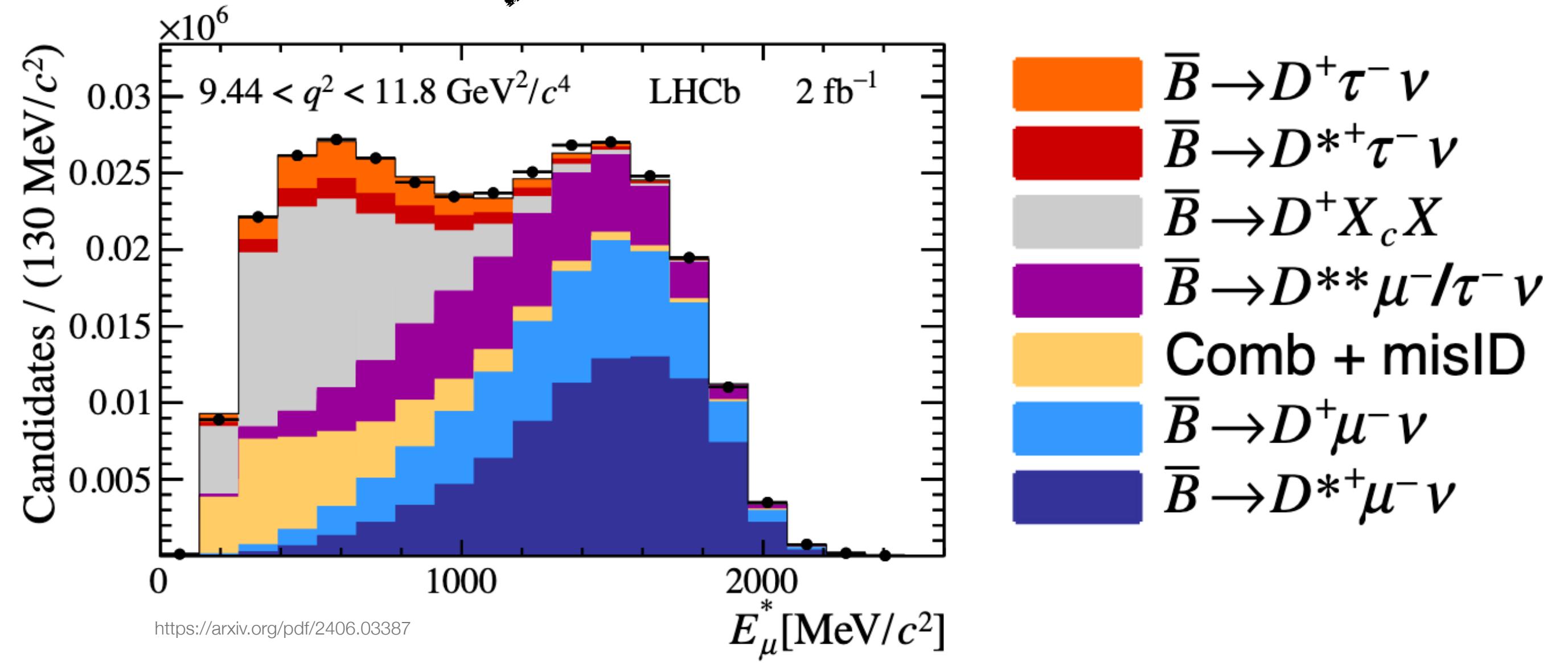


Analyser les données

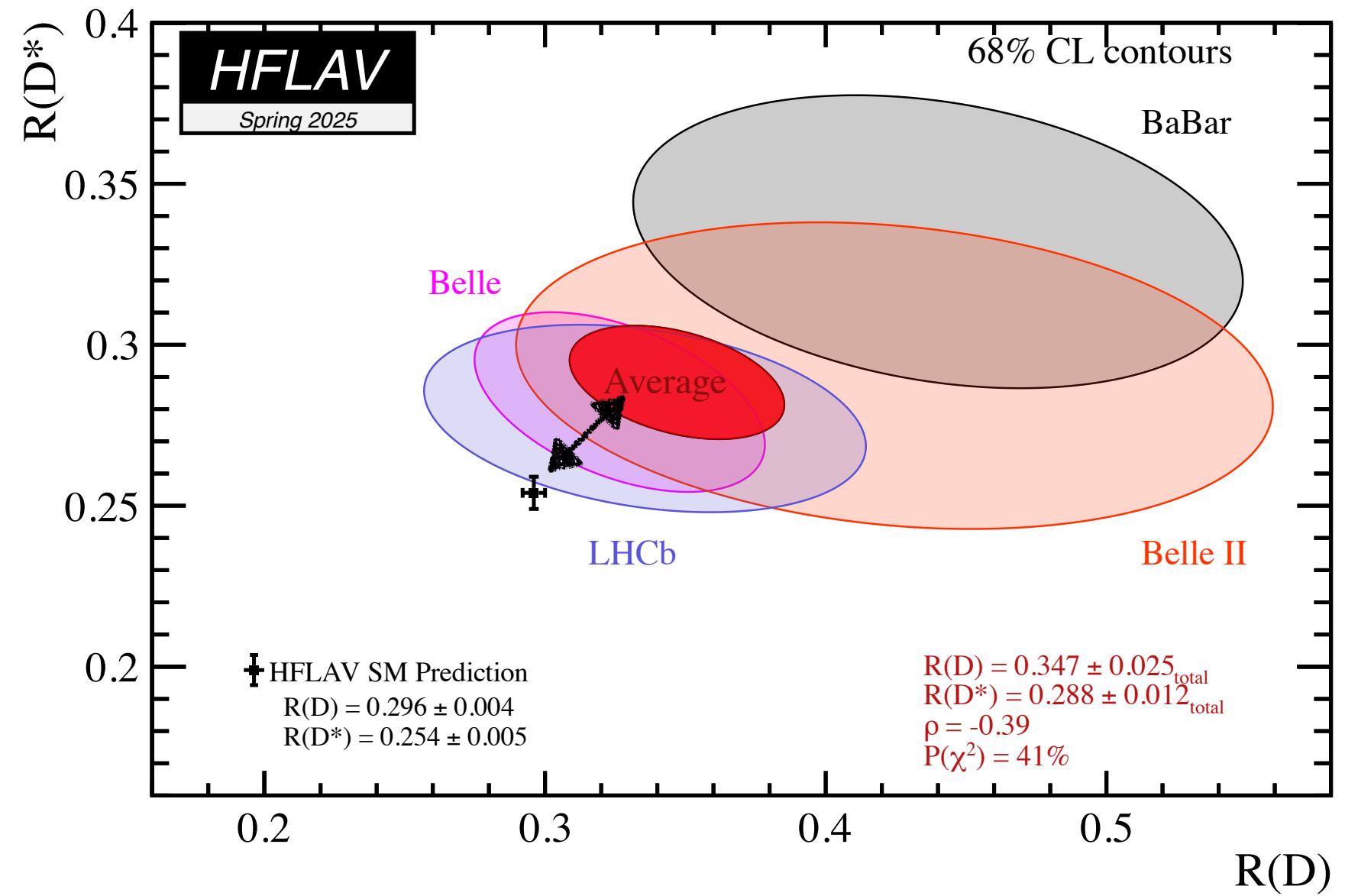
→

Défis

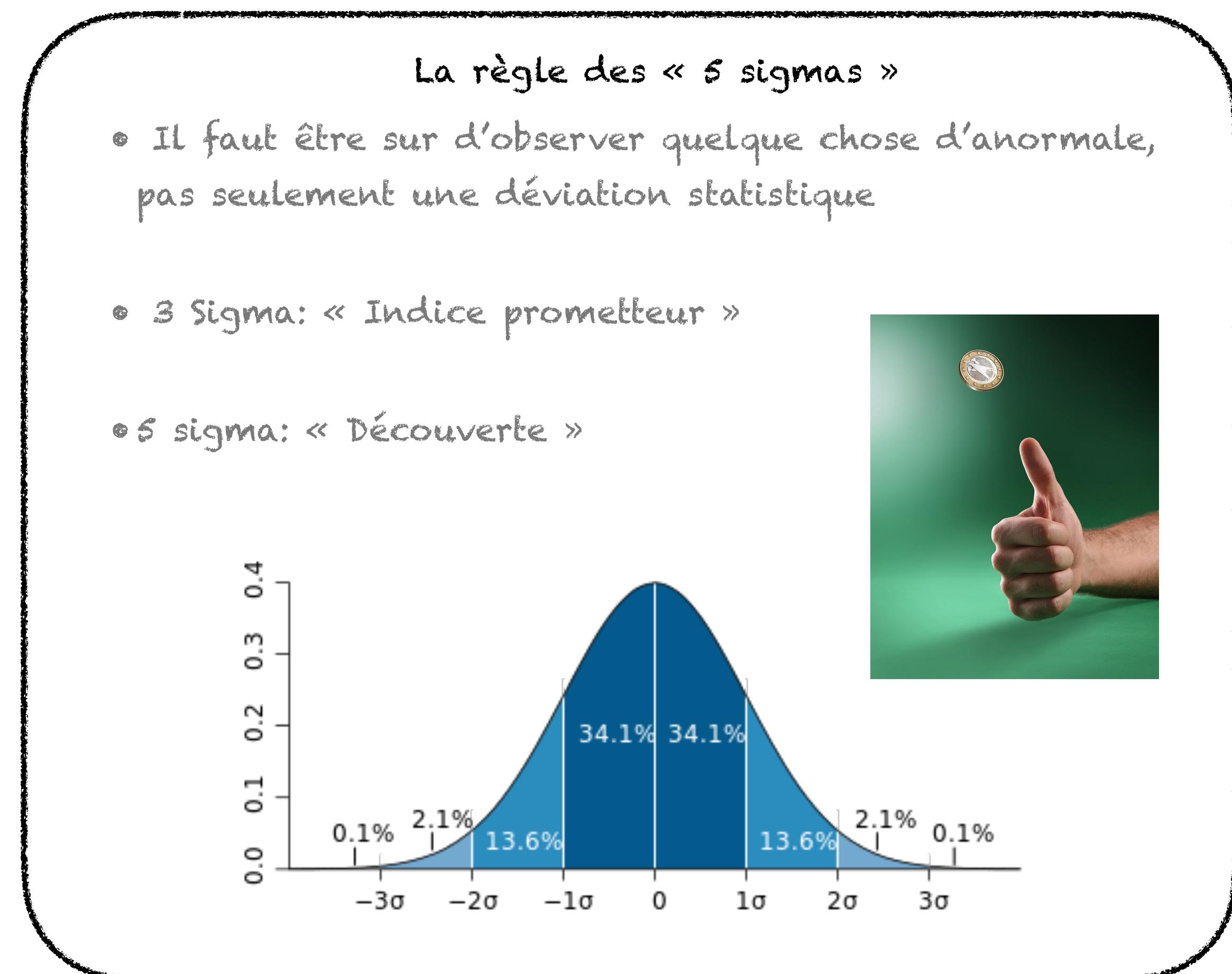
- On ne voit pas les neutrinos dans le détecteur
- D'autres désintégrations ont des traces très similaires dans le détecteur
- Les taus ont une durée de vie très courte et sont observés par une désintégration



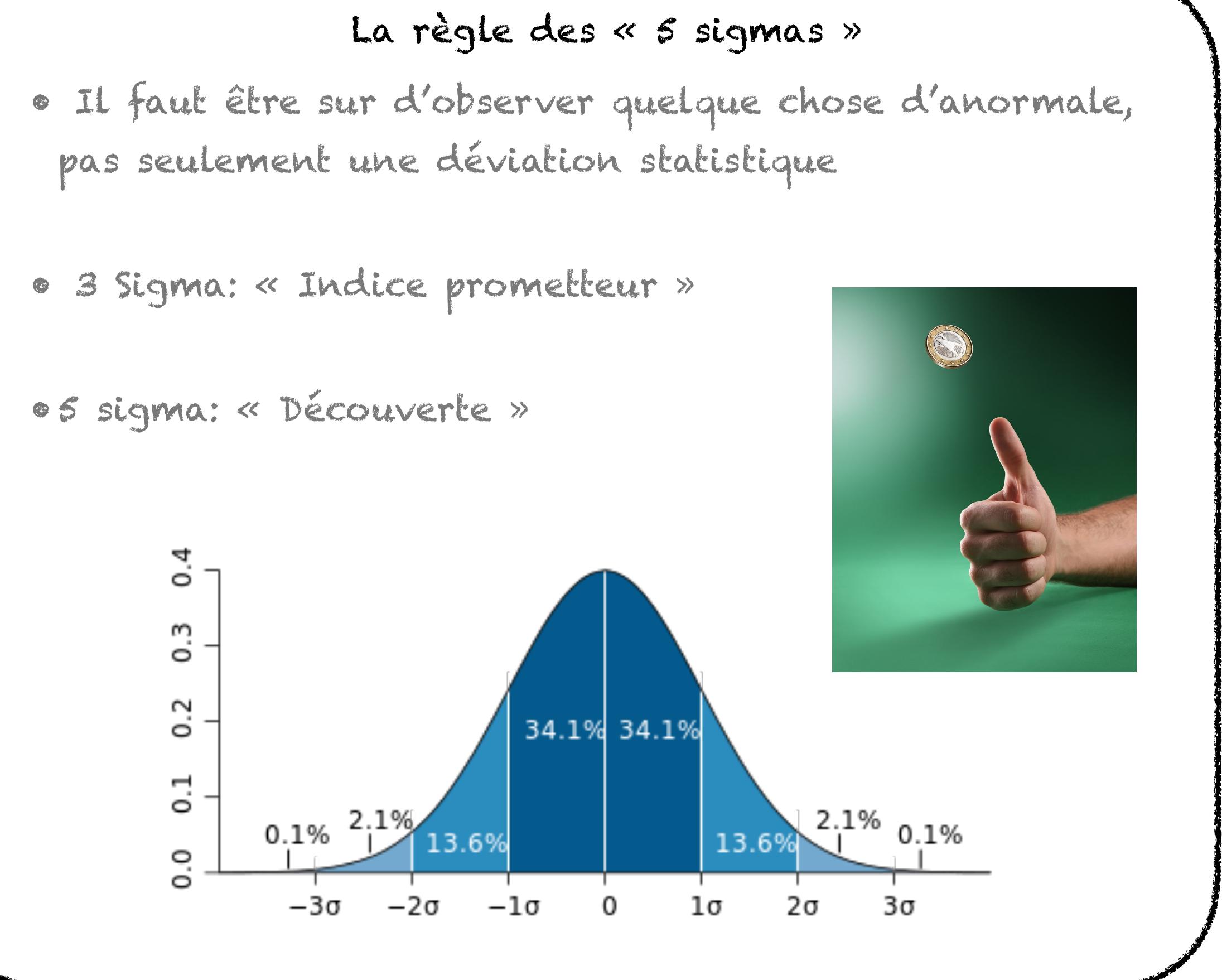
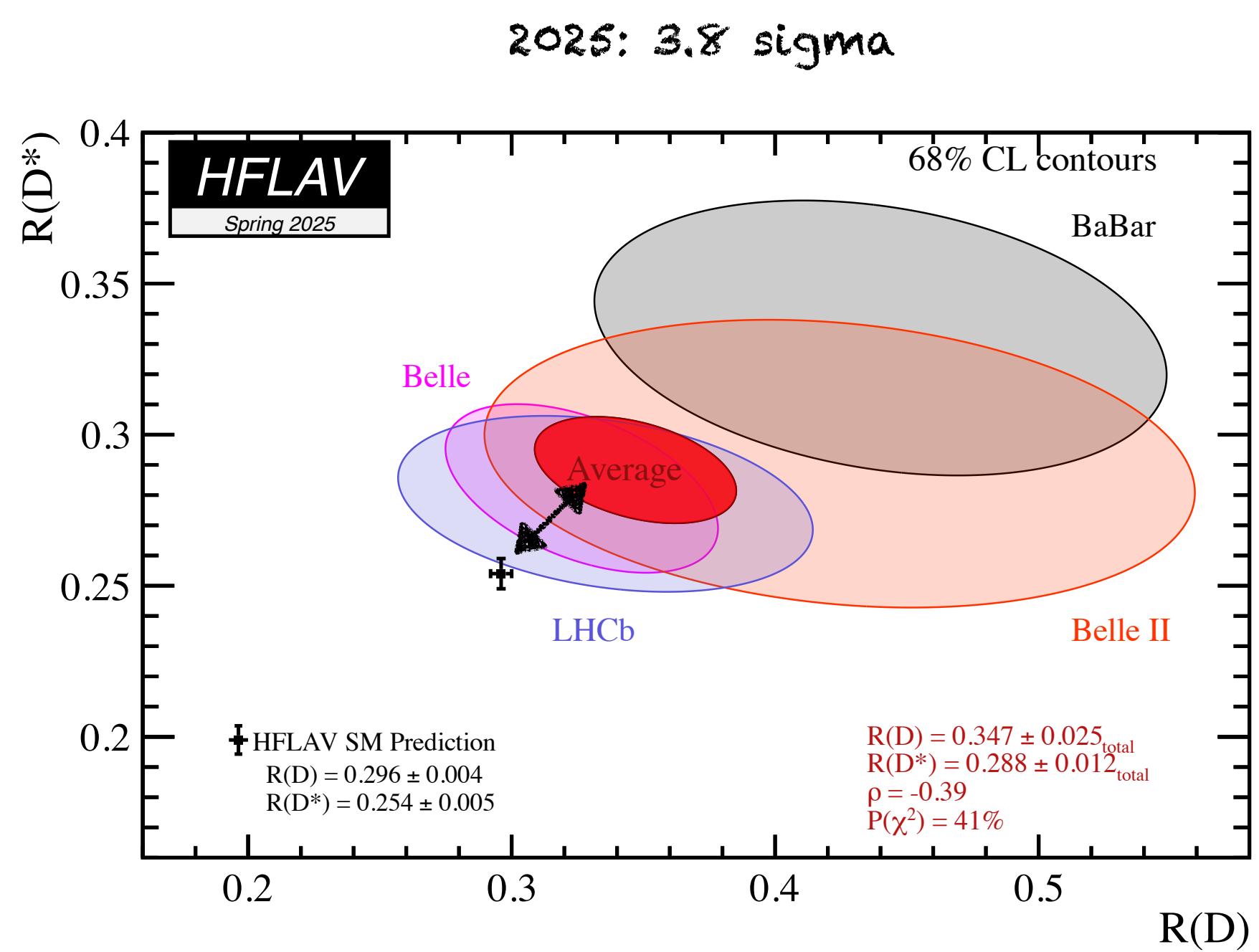
Quelle précision faut-il pour une découverte?



<https://hflav-eos.web.cern.ch/hflav-eos/semi/spring25/html/RDsDsstar/RDRDs.html>

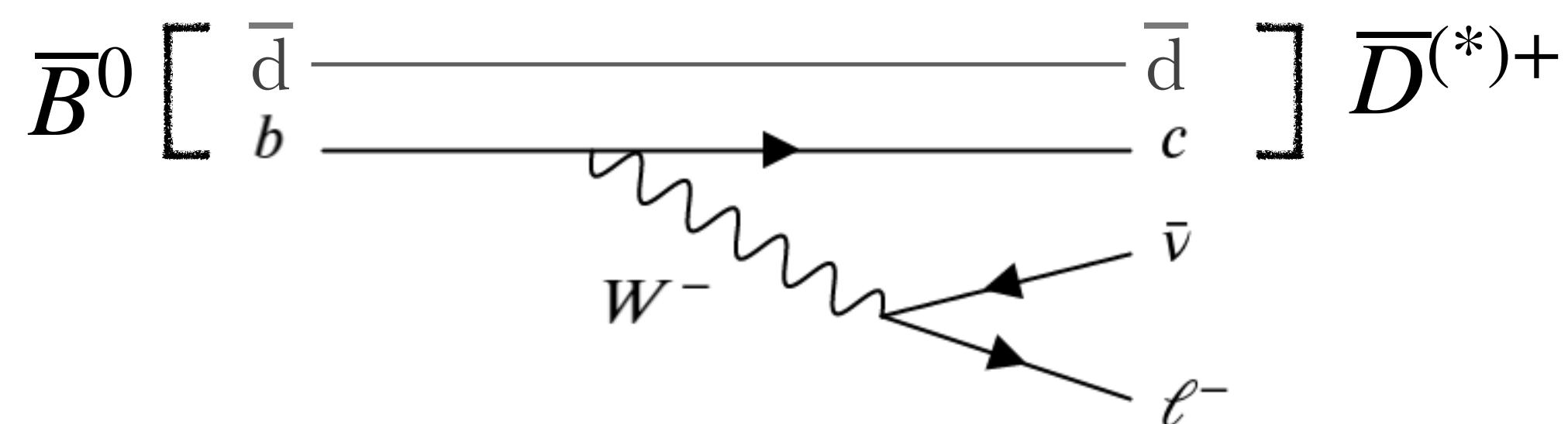


Quelle précision faut-il pour une découverte?

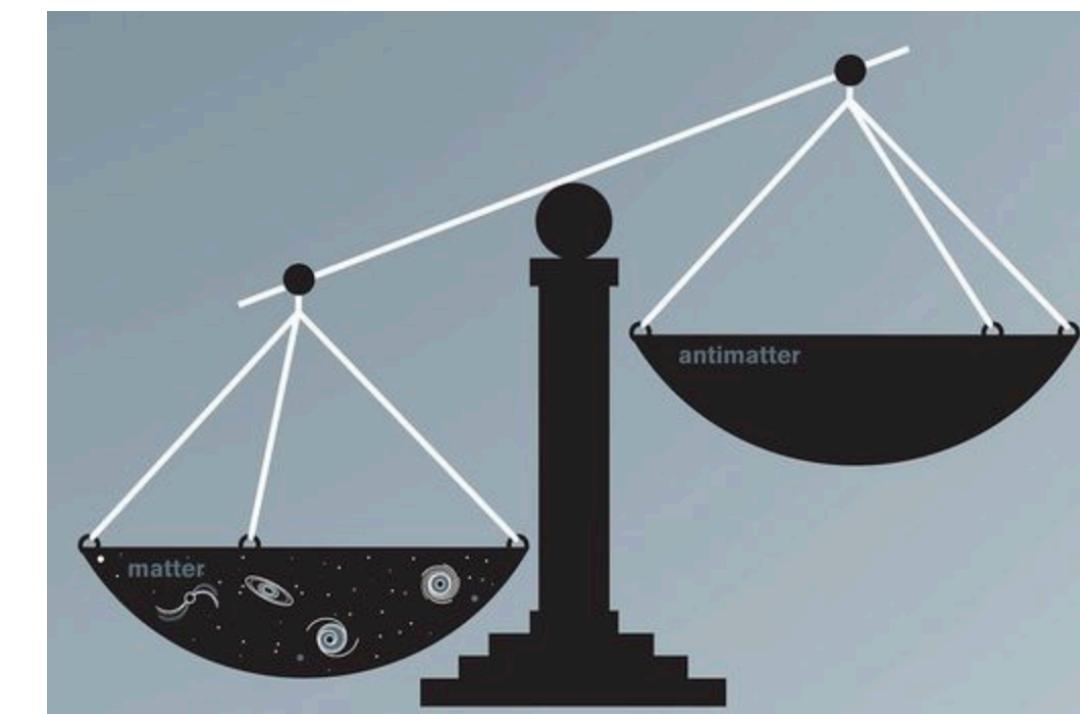
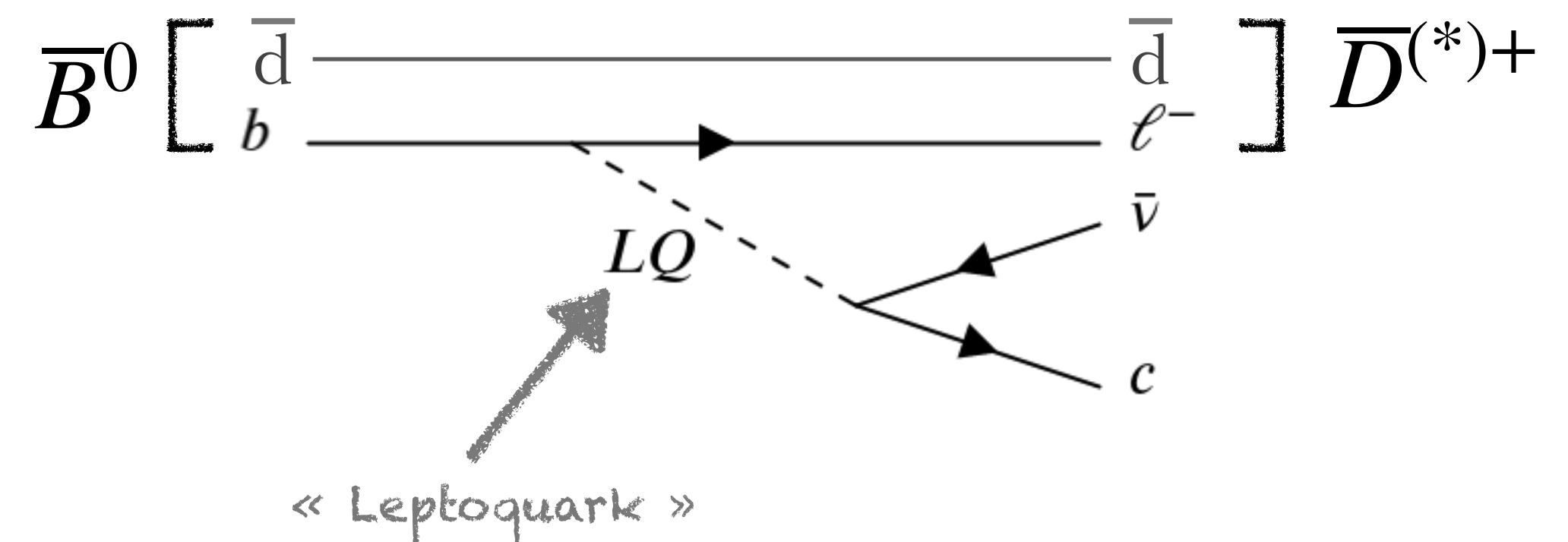


Déjà des interpretations de Nouvelle Physique?

Dans le Modèle Standard:



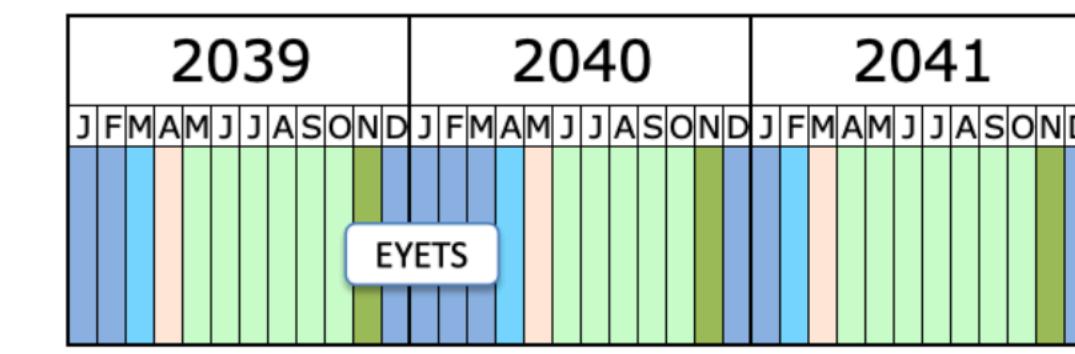
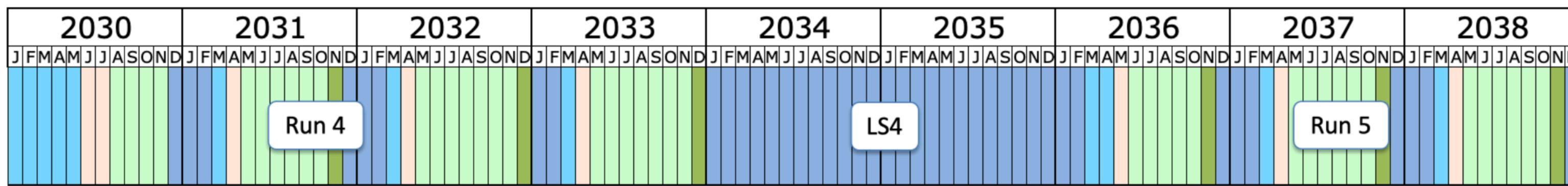
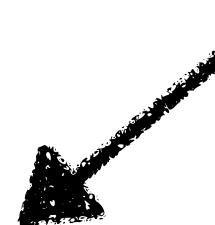
Proposition de « Nouvelle Physique »



Lien potentiel avec l'asymétrie entre matière et anti-matière

Plus de données nécessaires pour plus de précision

1ère mise à jour de l'expérience LHCb pour observer 5x plus de collisions par seconde



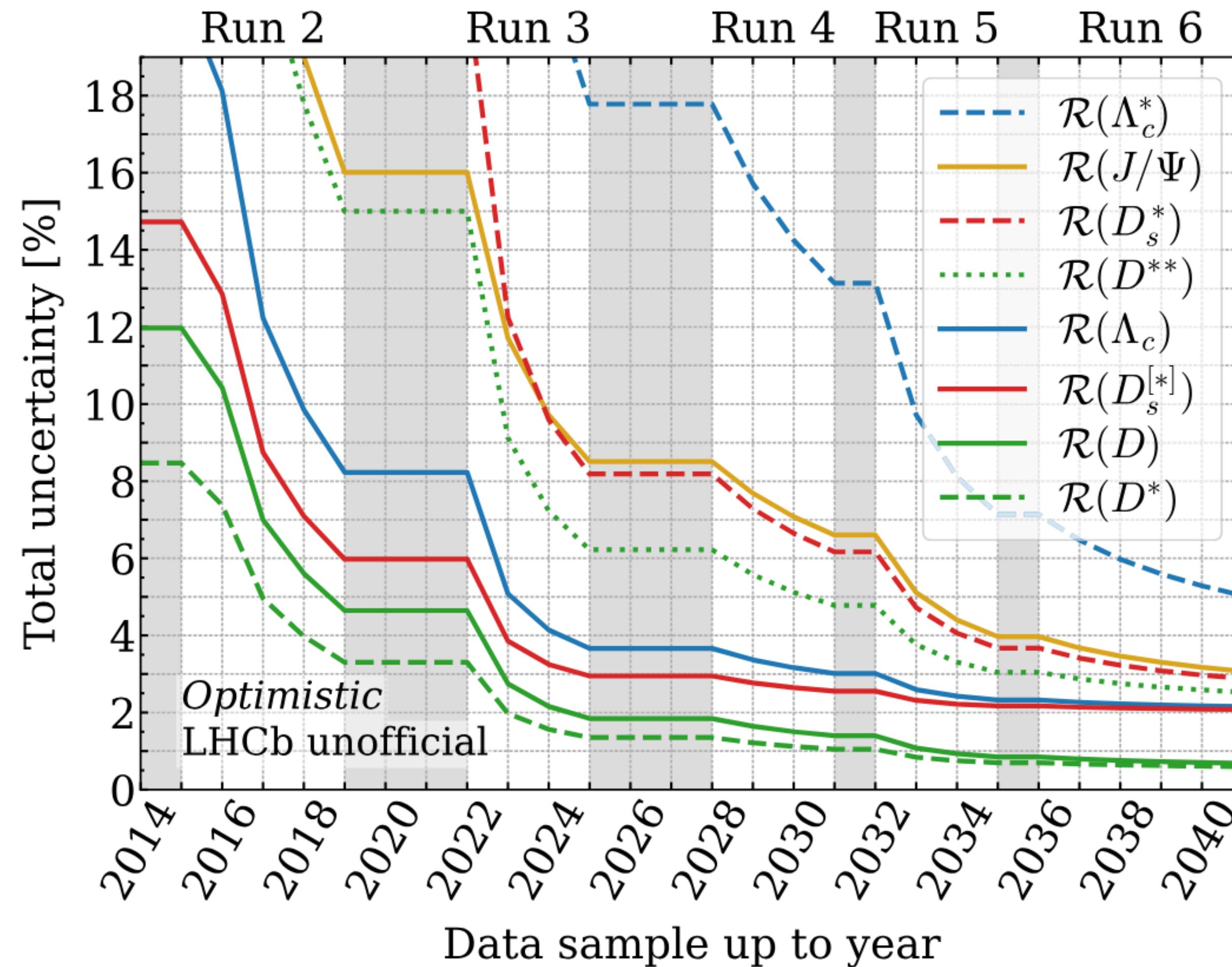
Shutdown/Technical stop
Protons physics
Ions
Commissioning with beam
Hardware commissioning

High Luminosity LHC (HL-LHC)



2ème mise à jour de l'expérience LHCb pour observer 5x plus de collisions par seconde

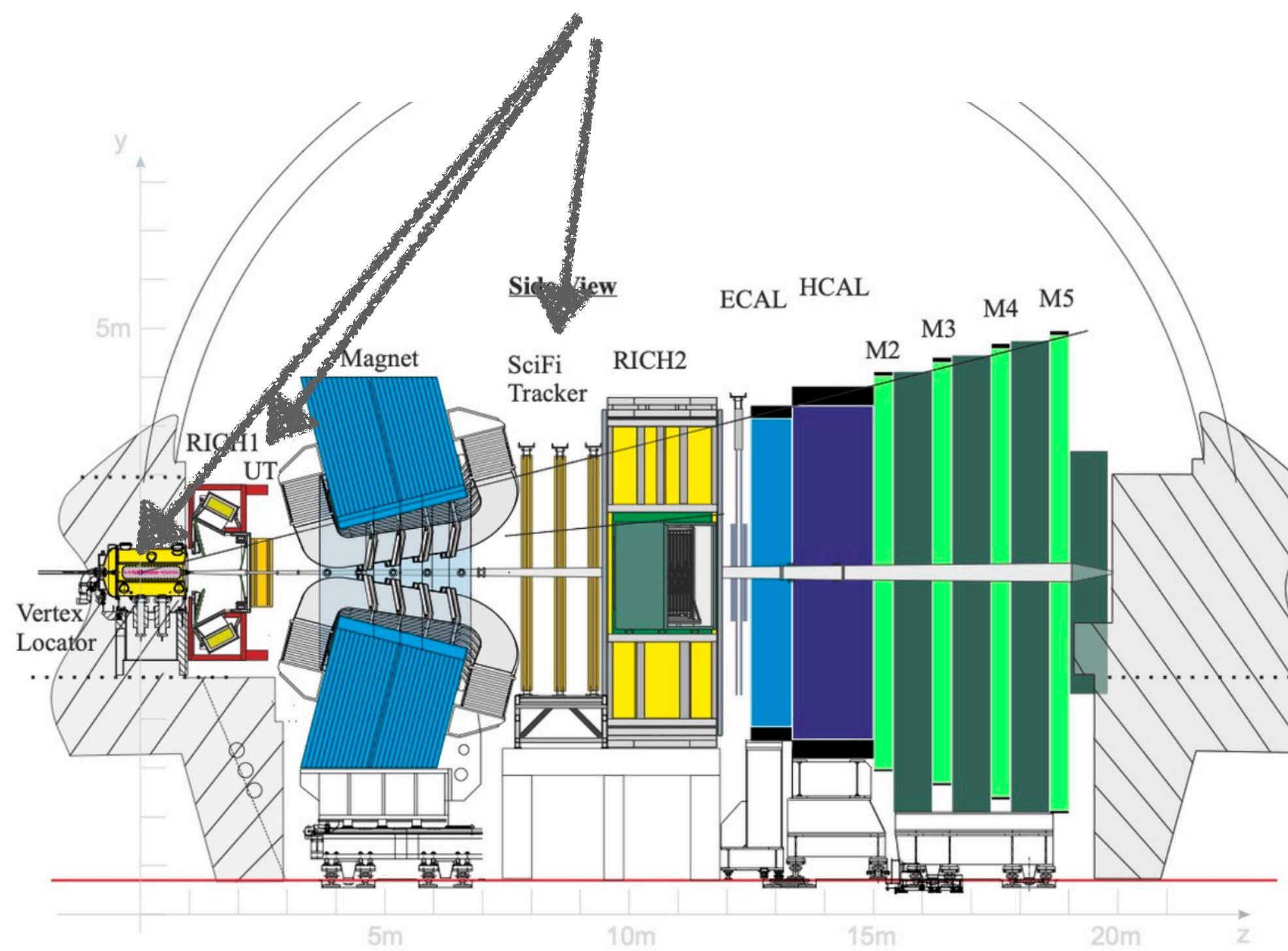
Plus de données nécessaires pour plus de précision



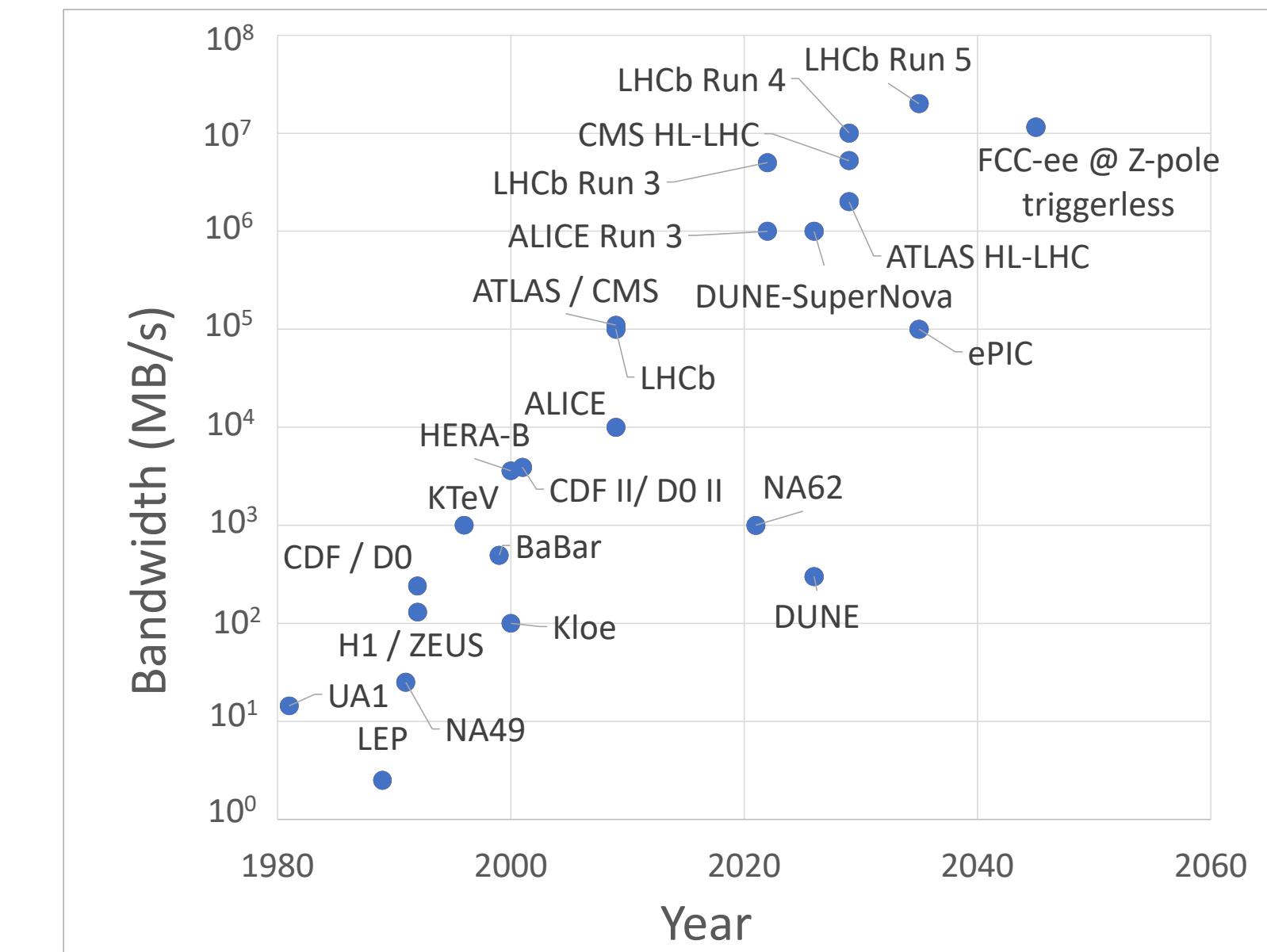
1ère mise à jour de l'expérience LHCb

But: Garder les mêmes performances qu'avant, avec plus de collisions par seconde

Remplacement des détecteurs à trajectoire

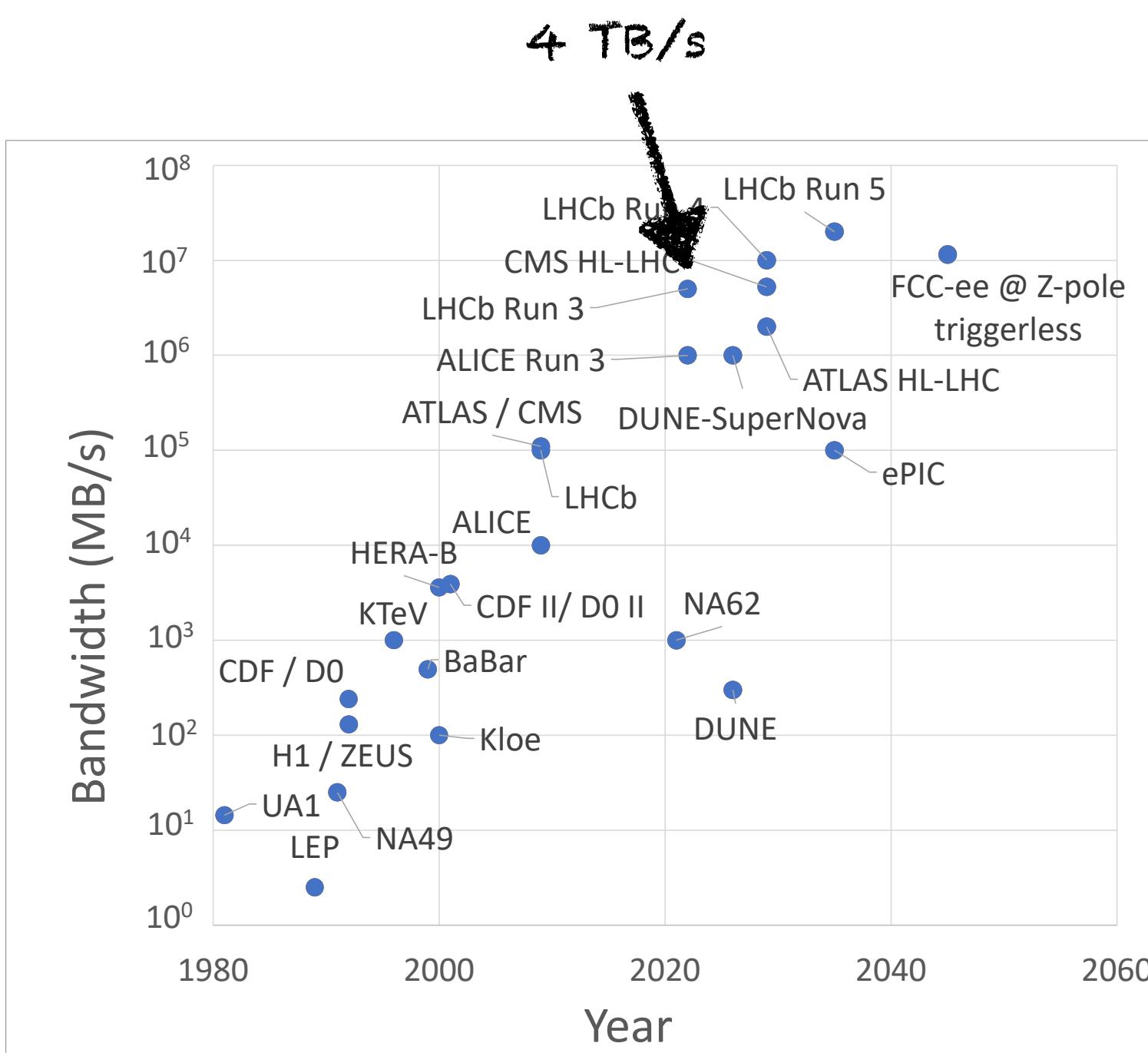


Lecture de toutes les données produites par l'expérience
1ère fois en physique des particules



Le défit en temps réel de LHCb

Volume de données traité par seconde:



Plus grands points d'échange d'internet

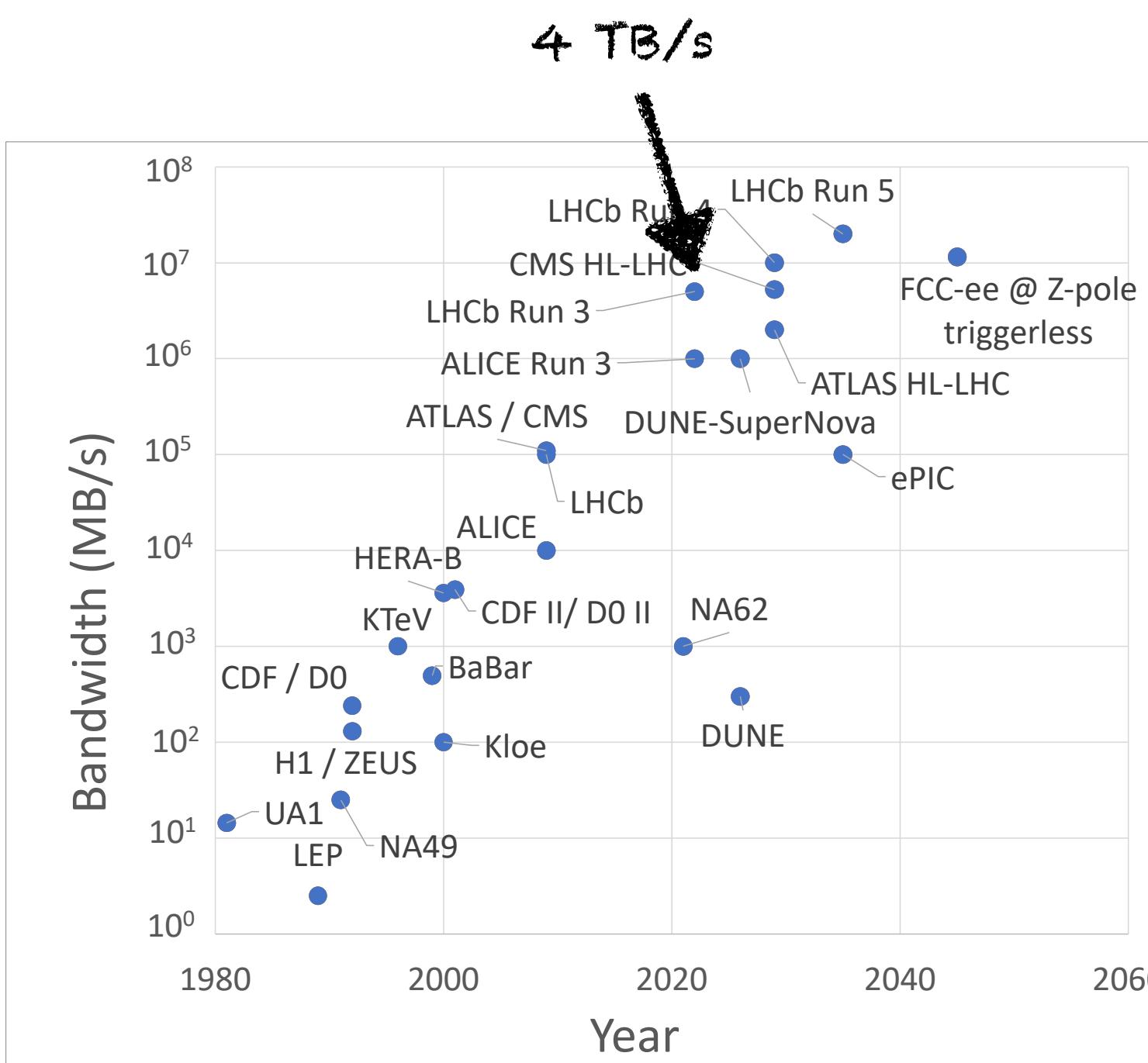
- IX.br (Brésil): 4 TB/s

- DE-CIX (Allemagne): 2 TB/s



Le défit en temps réel de LHCb

Volume de données traité par seconde:



Plus grands point d'échange d'internet

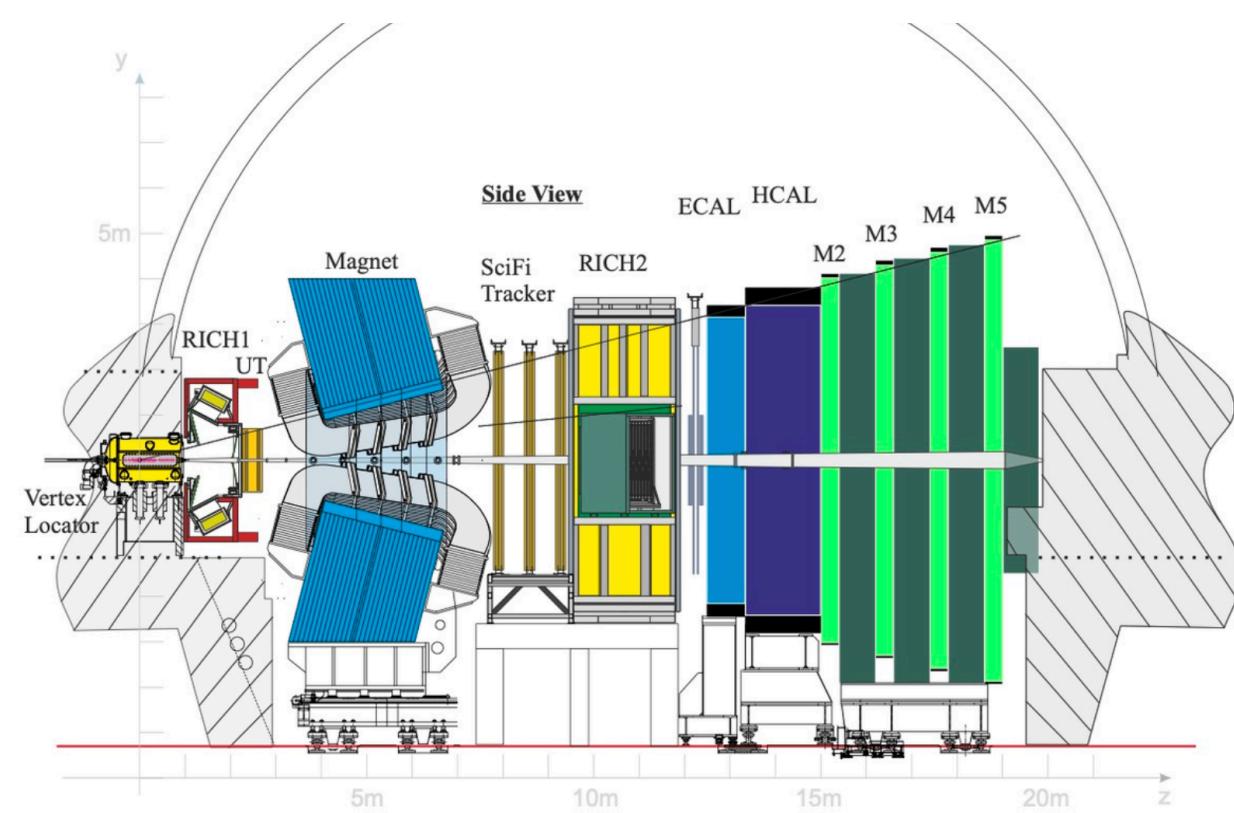
- IX.br (Brésil): 4 TB/s

- DE-CIX (Allemagne): 2 TB/s

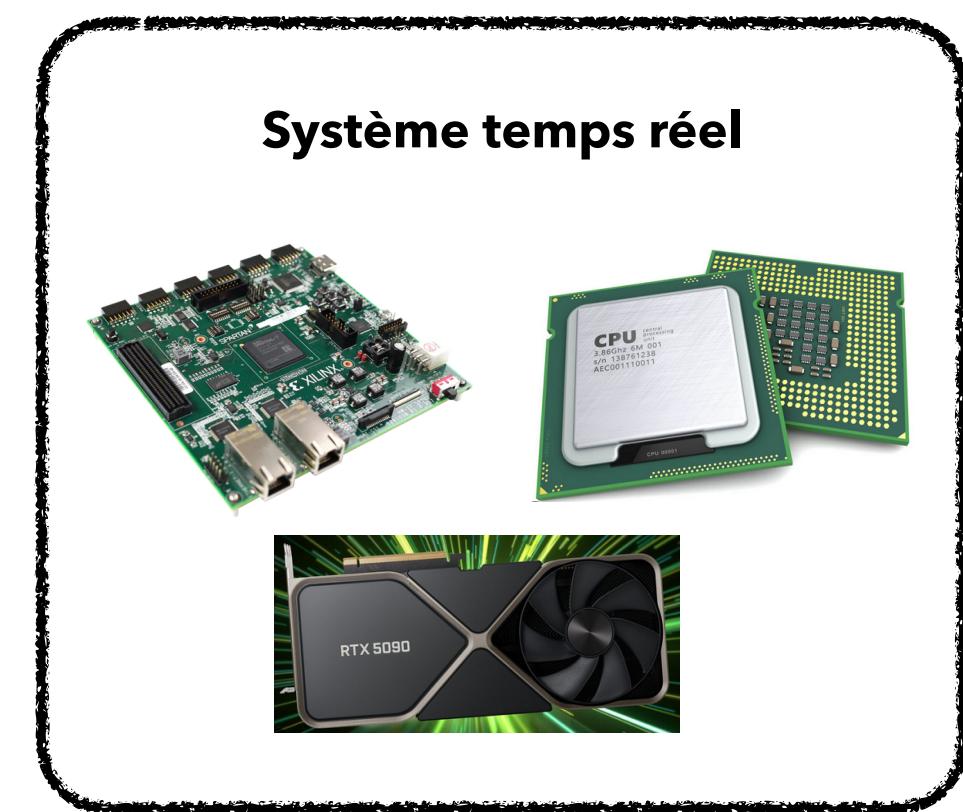


Il faut sélectionner les données en temps réel,
en gardant les informations importantes pour les analyses

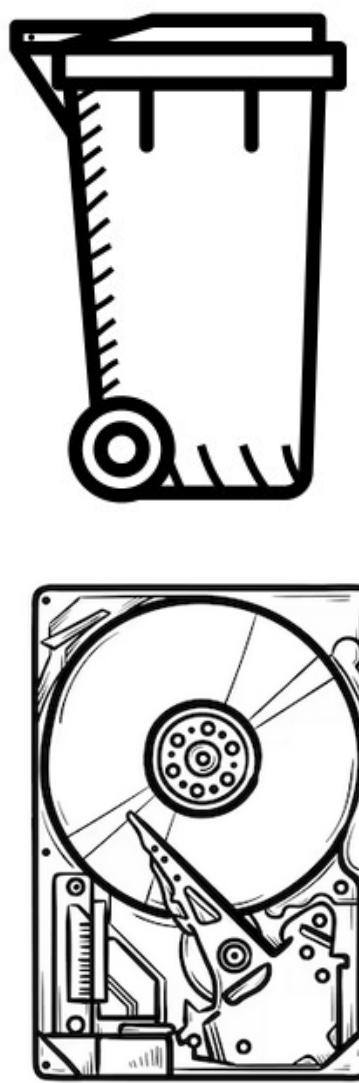
L'analyse des données en temps réel



Données brutes



Données rejetées



Parenthèse: Étudier des oiseaux



- Y a-t-il un type d'oiseau inattendu dans le groupe ?
- De quel type d'oiseau s'agit-il ? Comment se comporte-t-il ?

Parenthèse : Identification des oiseaux à partir de critères simples



Etourneau sansonnet?



Choucador de Hildebrandt?



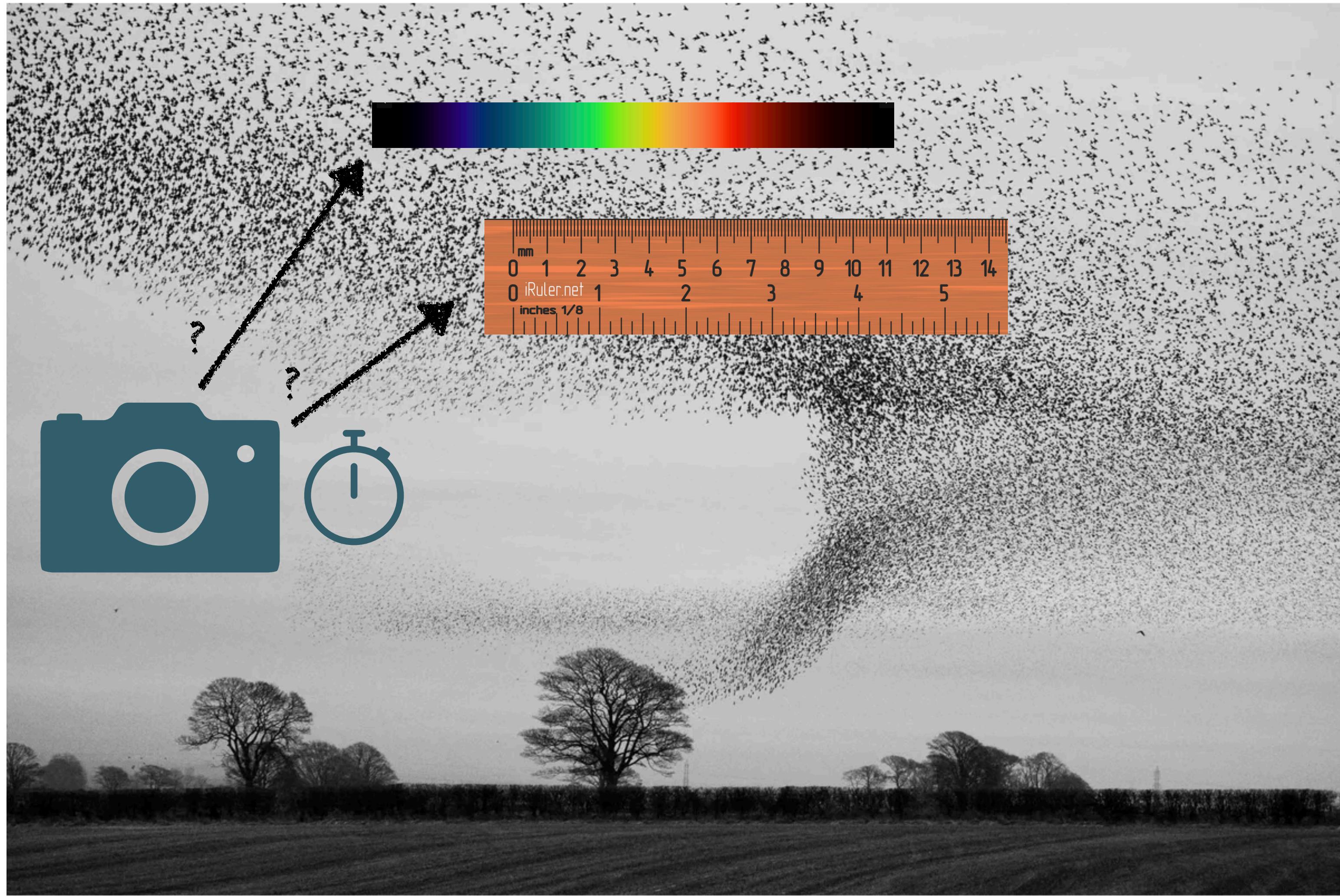
Déterminer la couleur

Quelque chose plus grand?

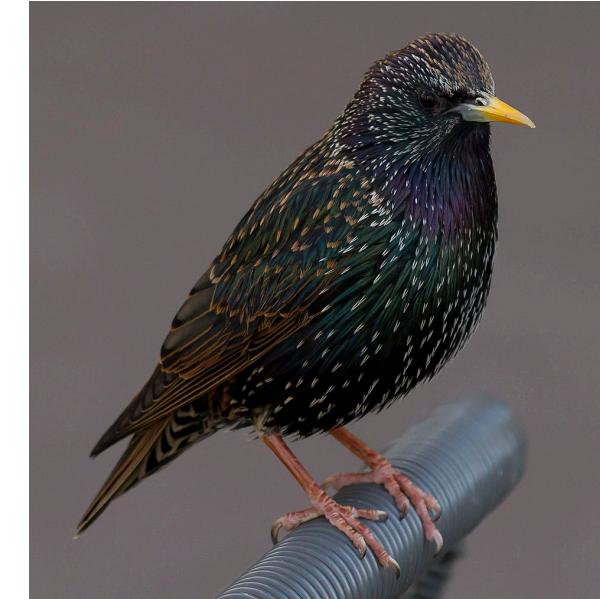


Déterminer la taille

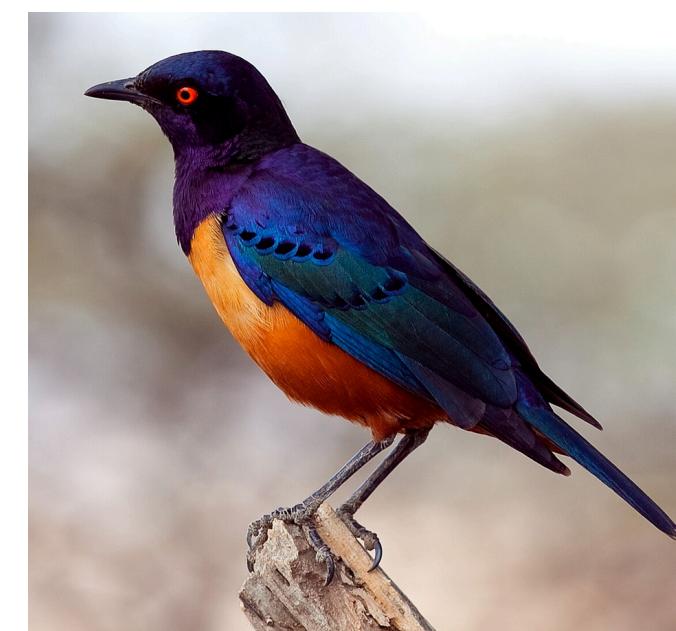
Parenthèse : Identification des oiseaux à partir de critères simples



Etourneau sansonnet?



Choucador de Hildebrandt?



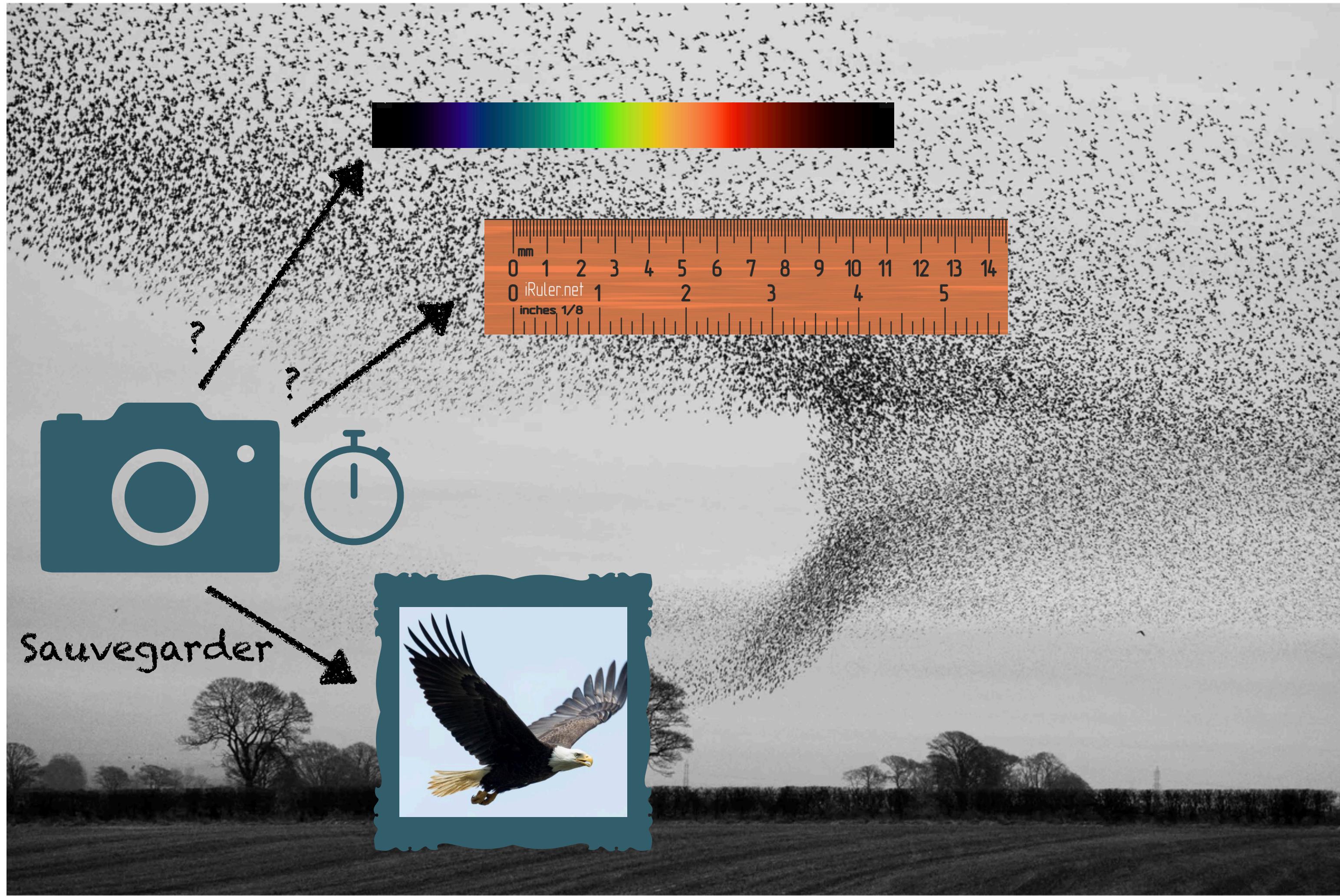
Déterminer la couleur

Quelque chose plus grand?

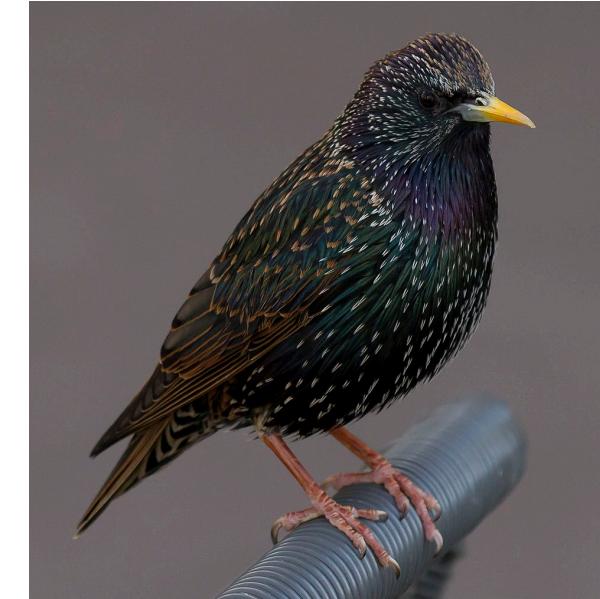


Déterminer la taille

Parenthèse : Identification des oiseaux à partir de critères simples



Etourneau sansonnet?



Choucador de Hildebrandt?



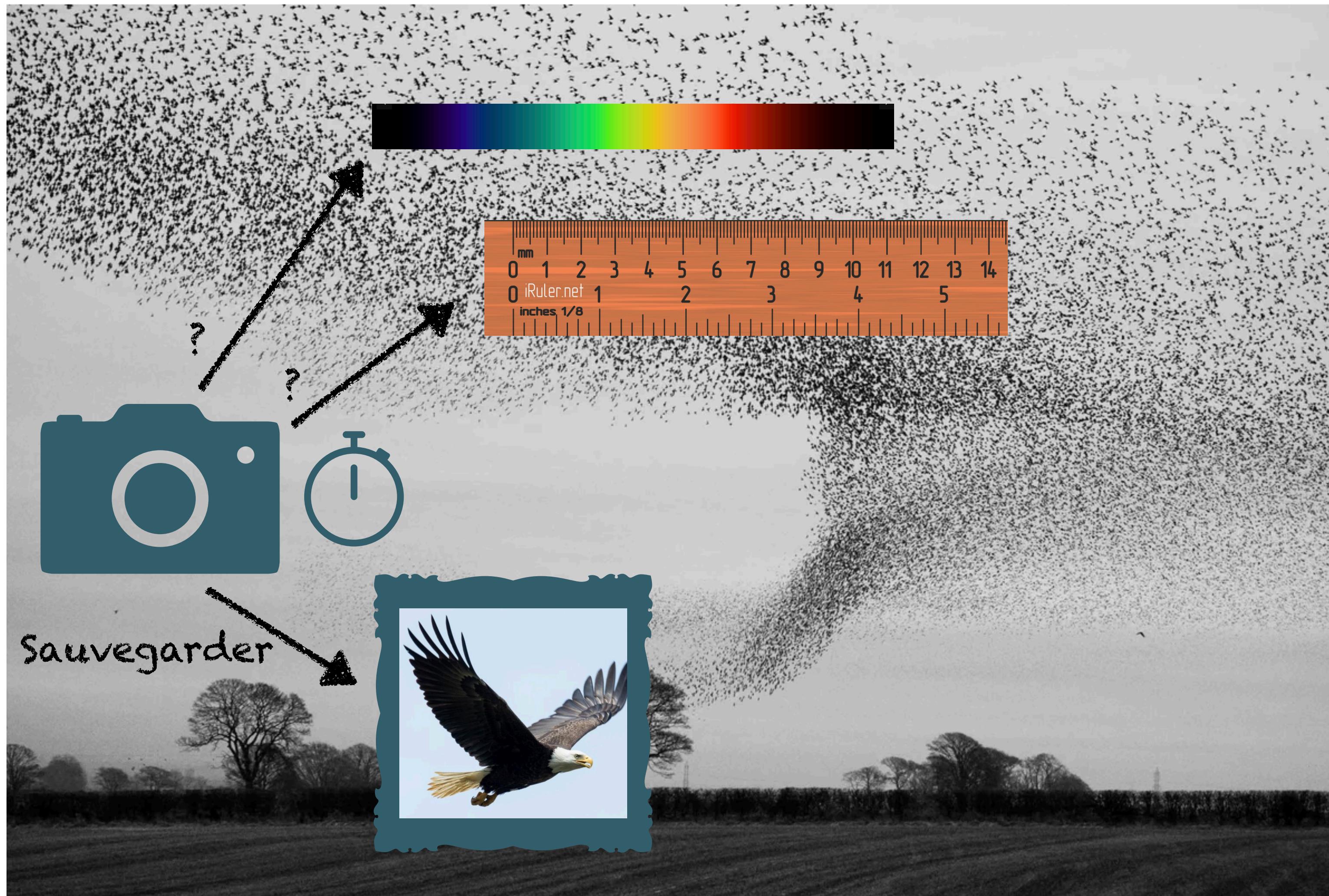
Déterminer la couleur

Quelque chose plus grand?



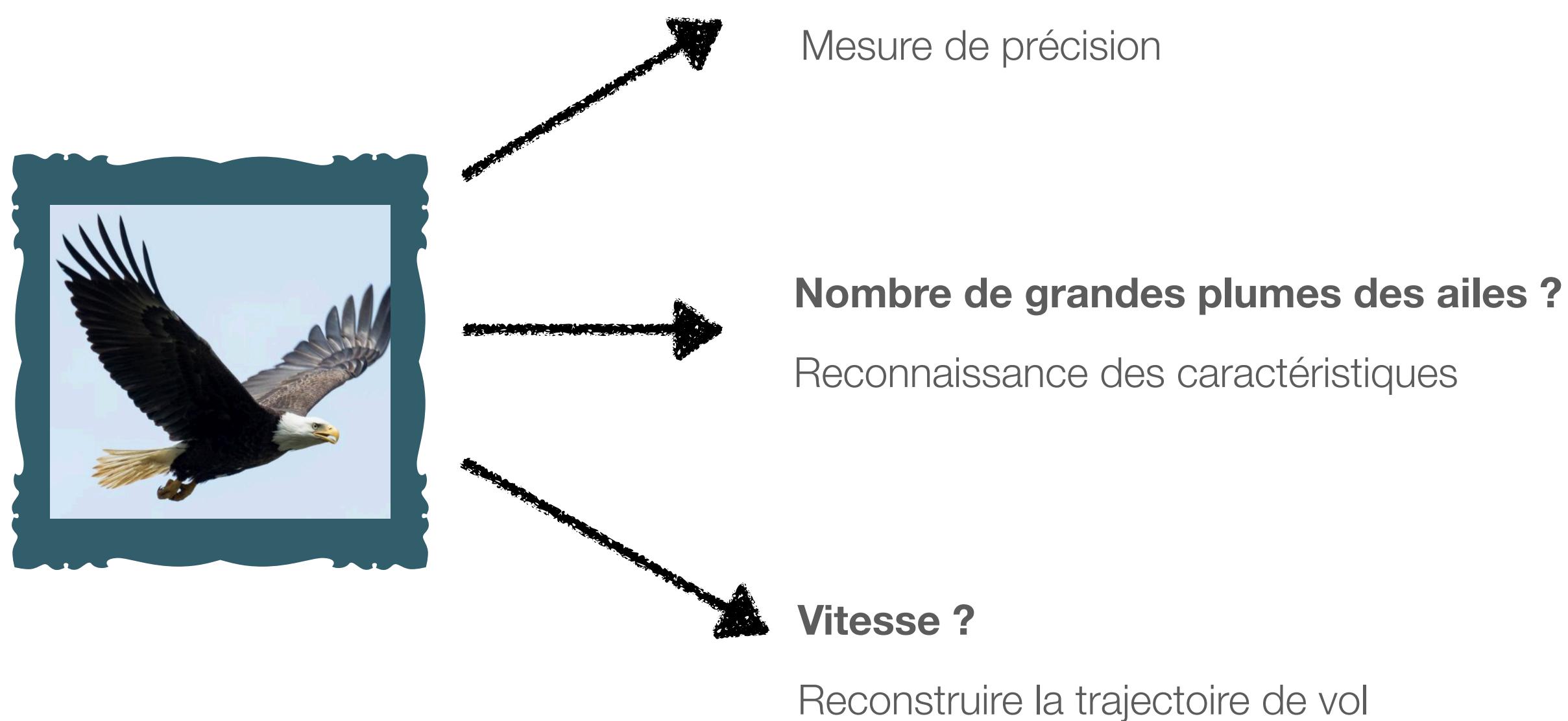
Déterminer la taille

Parenthèse : Identification des oiseaux à partir de critères simples



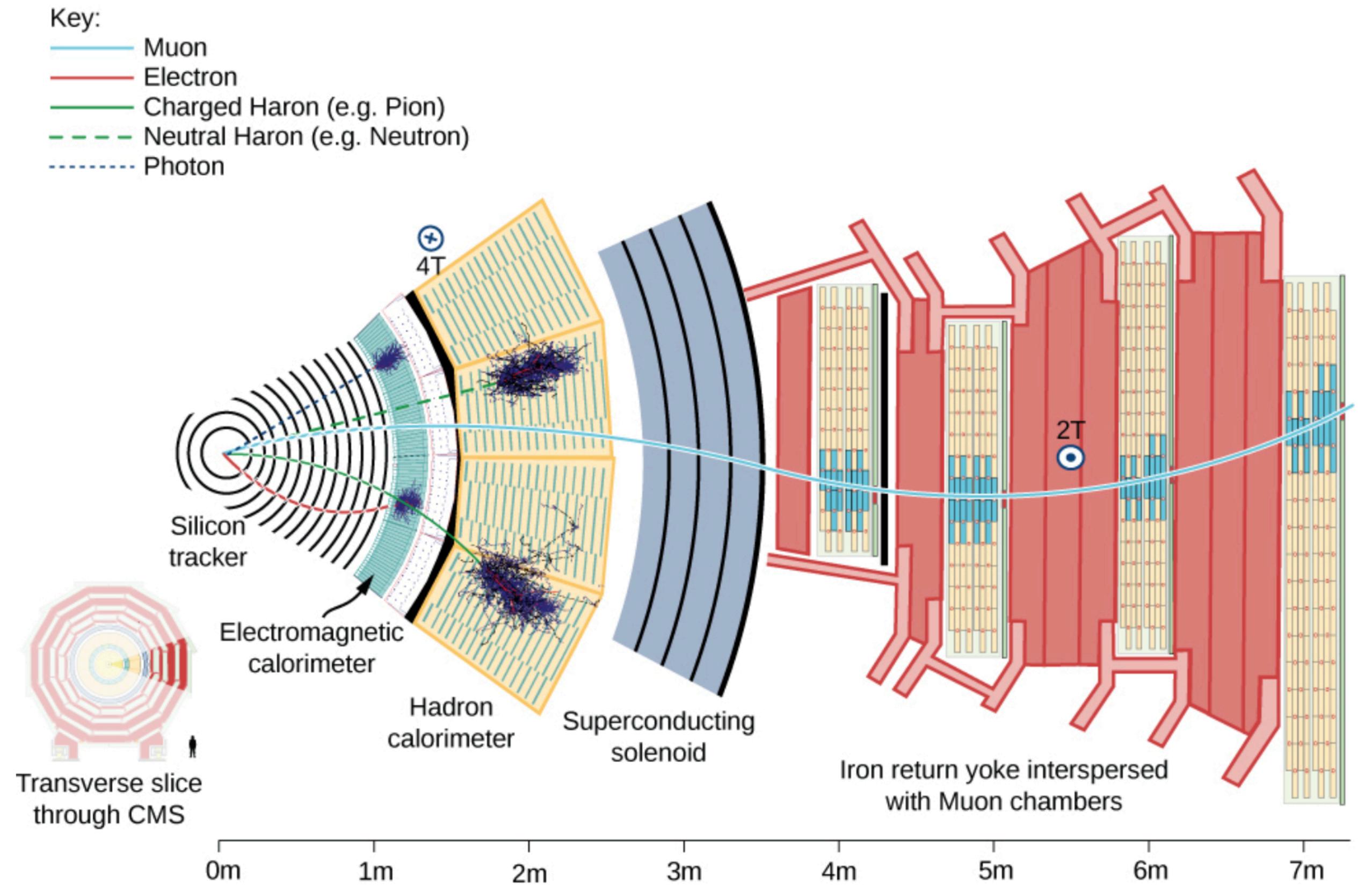
- Décision automatique rapide
- Analyser une partie de l'image
- Utiliser des informations simples
- Décider quelle image enregistrer

Parenthèse : Caractérisation d'oiseaux sélectionnés sur la base de critères complexes

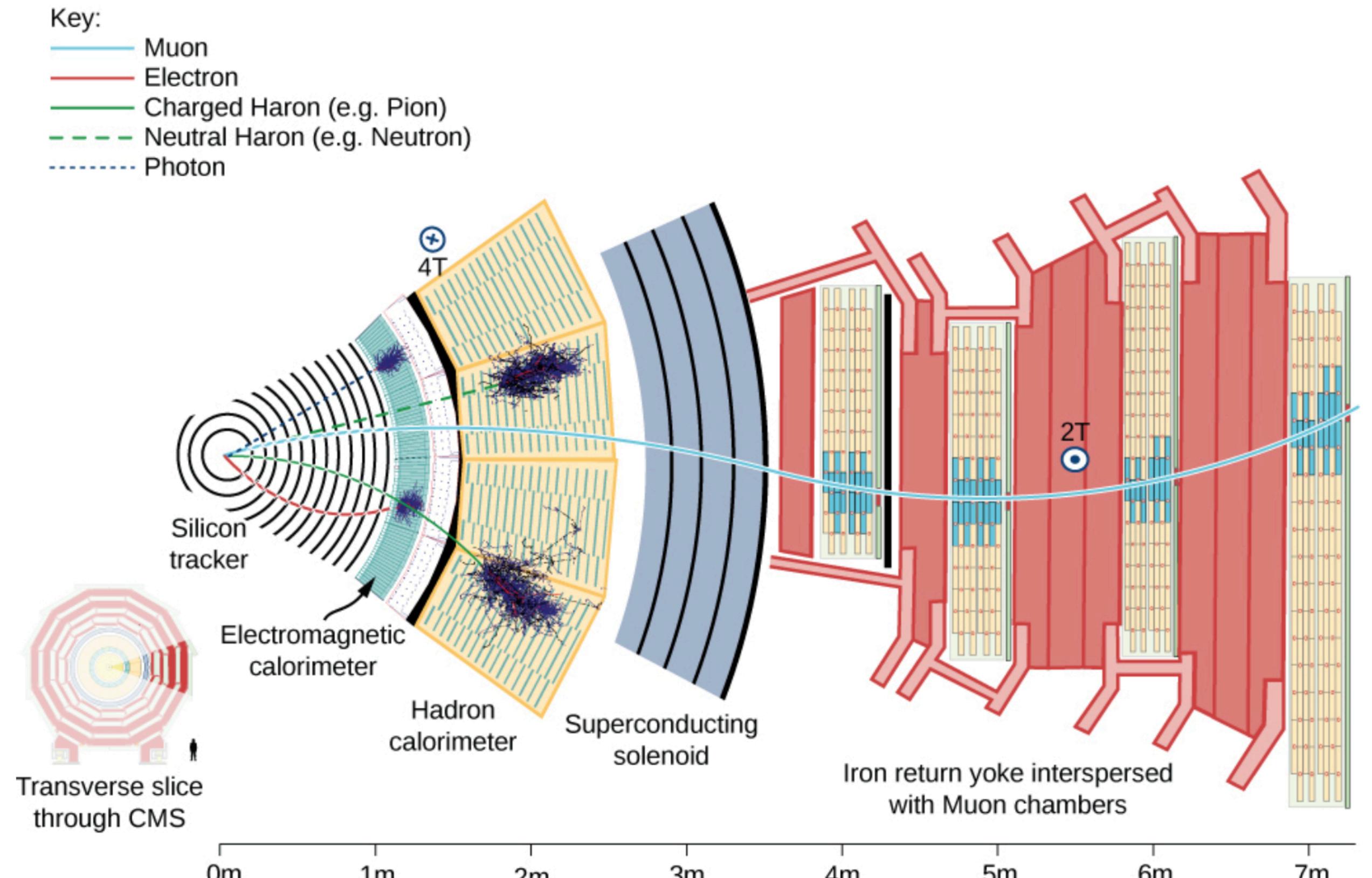


- Utilisez toutes les informations contenues dans l'image
- Effectuez des mesures précises
- Vérifiez les motifs et les caractéristiques
- Si l'oiseau présente un comportement vraiment intéressant, enregistrez l'image de manière permanente dans votre espace de stockage

Des oiseaux aux expériences de physique des particules



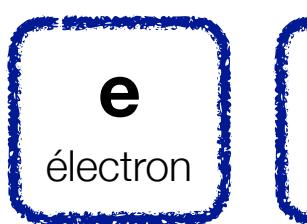
Des oiseaux aux expériences de physique des particules



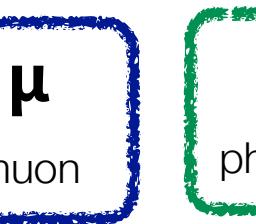
Données brutes du détecteur



Identification d'une particule



e
électron

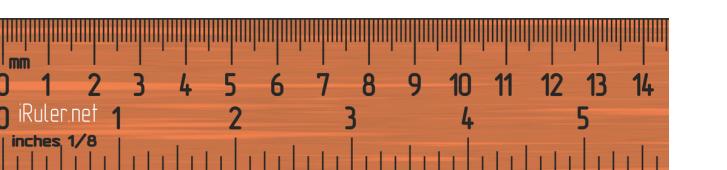


μ
muon



γ
photon

Proton
Neutron



Mesurer la quantité de mouvement



Mesurer la masse

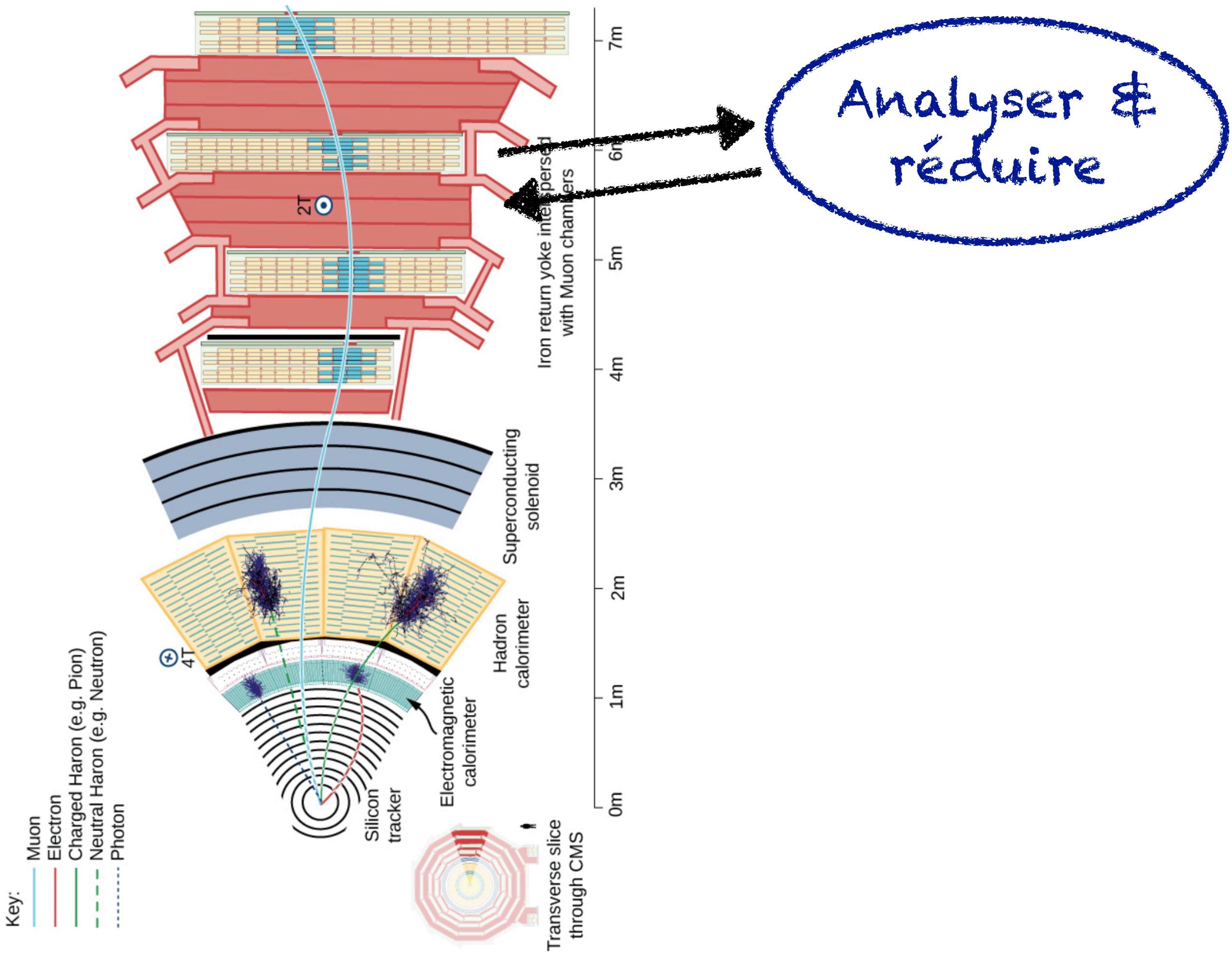
Nombre de grandes plumes des ailes ?



Nombre de collisions de particules

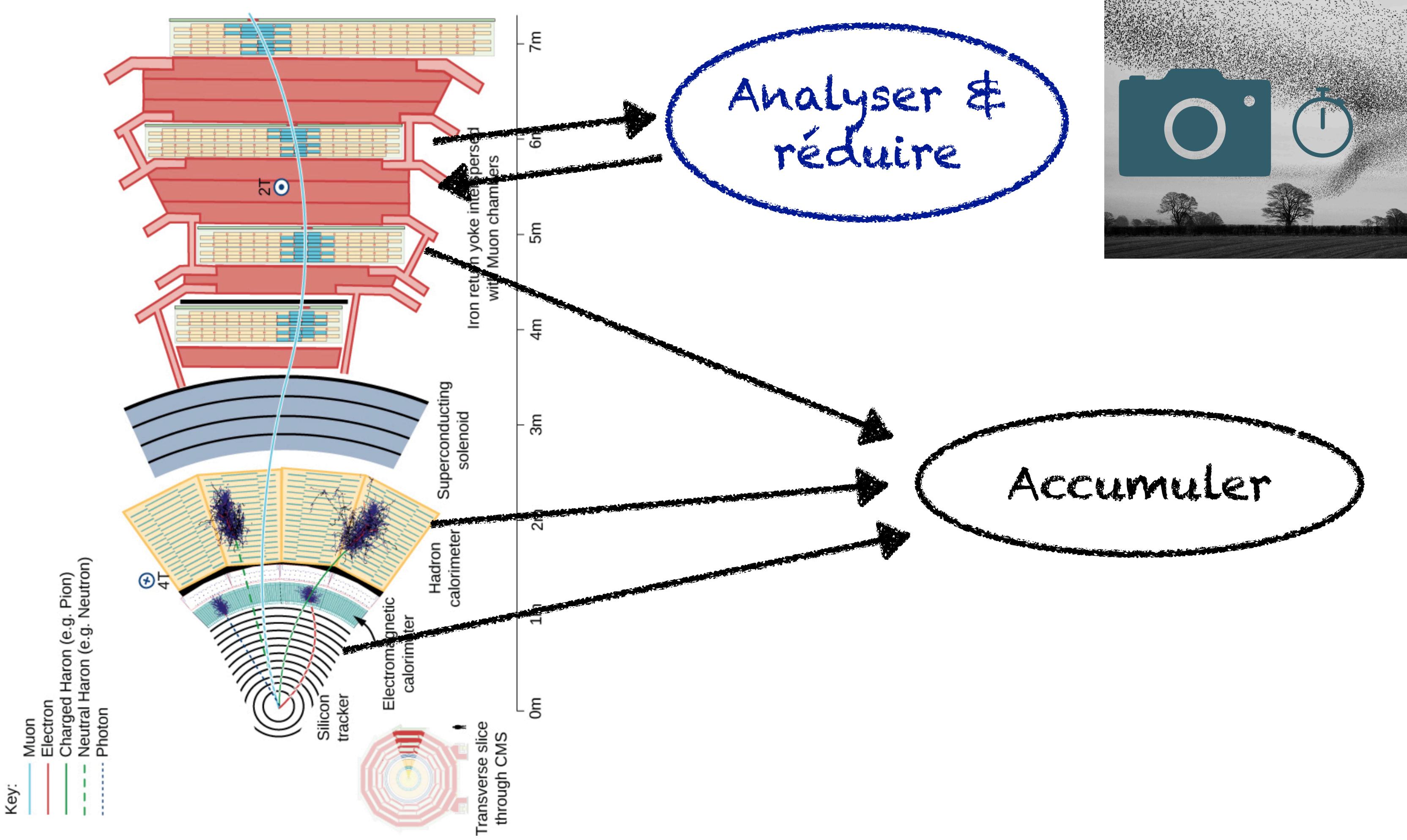


« Trigger »: Analyse et réduction des données en temps réel



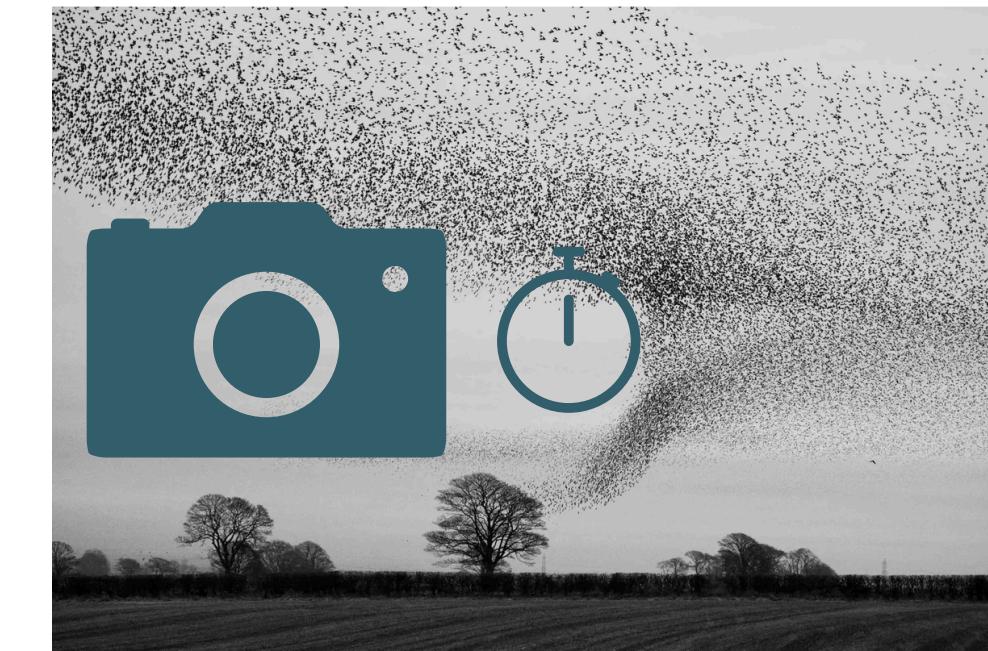
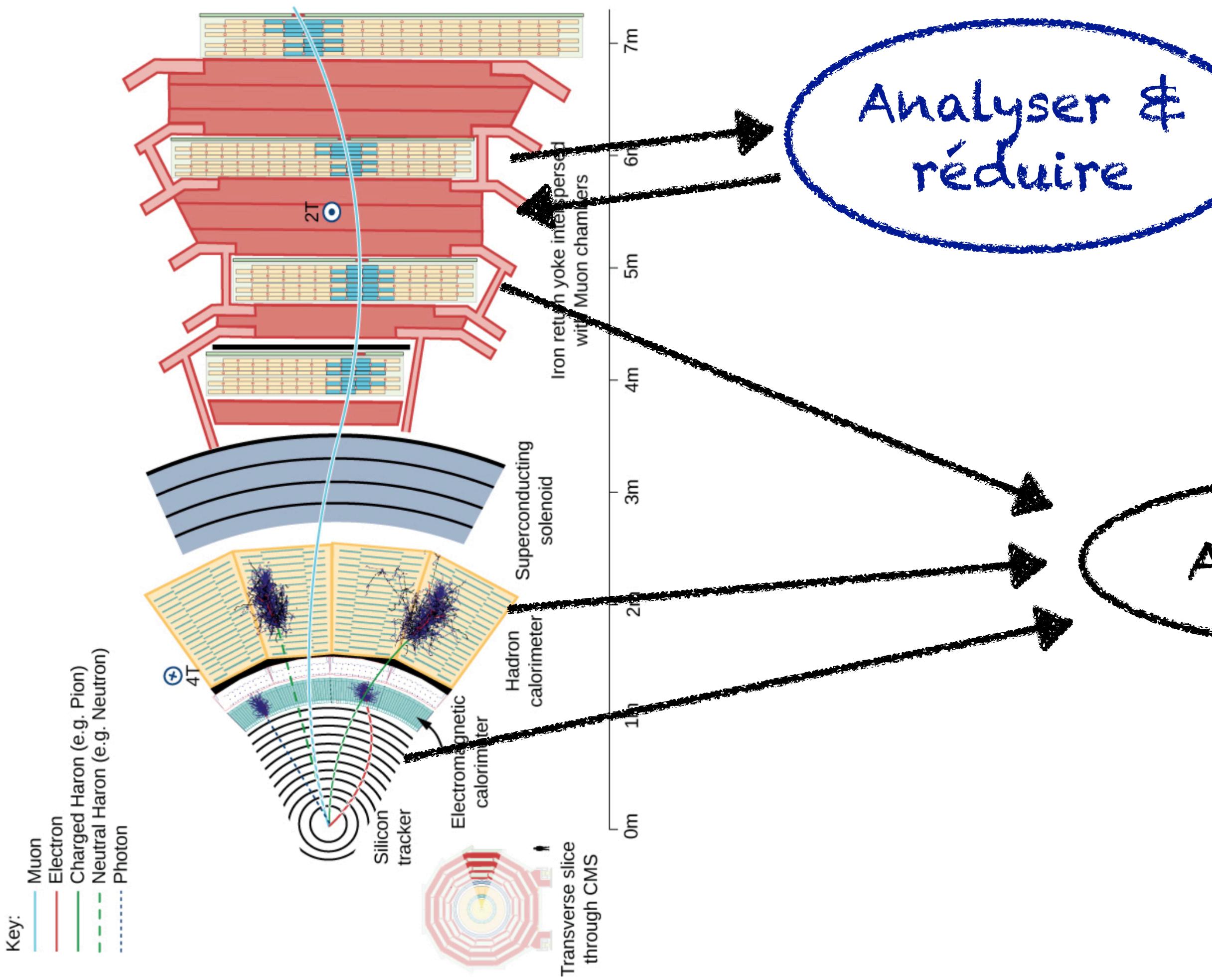
- Données toujours présentes sur le détecteur
- Décision prise avec une faible latence
- Basée sur les informations locales provenant d'un sous-détecteur

« Trigger »: Analyse et réduction des données en temps réel



- Données toujours présentes sur le détecteur
- Décision prise avec une faible latence
- Basée sur les informations locales provenant d'un sous-détecteur

« Trigger »: Analyse et réduction des données en temps réel



- Données toujours présentes sur le détecteur
- Décision prise avec une faible latence
- Basée sur les informations locales provenant d'un sous-détecteur



- Données transférées vers une ferme de serveurs
- Décision prise avec une latence moyenne
- Informations provenant de tous les sous-détecteurs disponibles

Mapping aux architectures informatiques



« Hardware trigger »

- Données toujours présentes sur le détecteur
- Décision prise avec une faible latence
- Basée sur les informations locales provenant d'un sous-détecteur

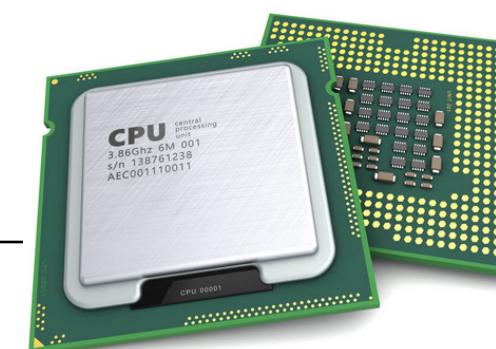


« Software trigger »

- Données transférées vers une ferme de serveurs
- Décision prise avec une latence moyenne
- Informations provenant de tous les sous-détecteurs disponibles

Quelle est l'architecture informatique la mieux adaptée à l'analyse en temps réel ?

Comparaison de processeurs

			
CPU	CPU	Cartes graphiques	FPGA
Latence	$O(10) \mu s$	$O(100) \mu s$	$O(10) ns$
Entrée / Sortie	Ethernet, USB, PCIe	PCIe, Nvlink	Toute source de données via un circuit imprimé (PCB)
Coût d'ingénierie	Niveau d'entrée bas (Python, C++, etc.)	Niveau d'entrée bas (CUDA, OpenCL,...)	Niveau d'entrée élevé Langages de description du matériel traditionnels
Mémoire	$O(100) GB$	$O(10) GB$	$O(10) MB$

Comparaison de processeurs

<i>« Software trigger »</i>			
	CPU	Cartes graphiques	FPGA
Latence	$O(10) \mu s$	$O(100) \mu s$	$O(10) ns$
Entrée / Sortie	Ethernet, USB, PCIe	PCIe, Nvlink	Toute source de données via un circuit imprimé (PCB)
Coût d'ingénierie	Niveau d'entrée bas (Python, C++, etc.)	Niveau d'entrée bas (CUDA, OpenCL,...)	Niveau d'entrée élevé Langages de description du matériel traditionnels
Mémoire	$O(100) GB$	$O(10) GB$	$O(10) MB$

Les quatres grandes expériences du LHC

« Software trigger » depuis 2022

ALICE

Dédié aux collisions d'ions lourds

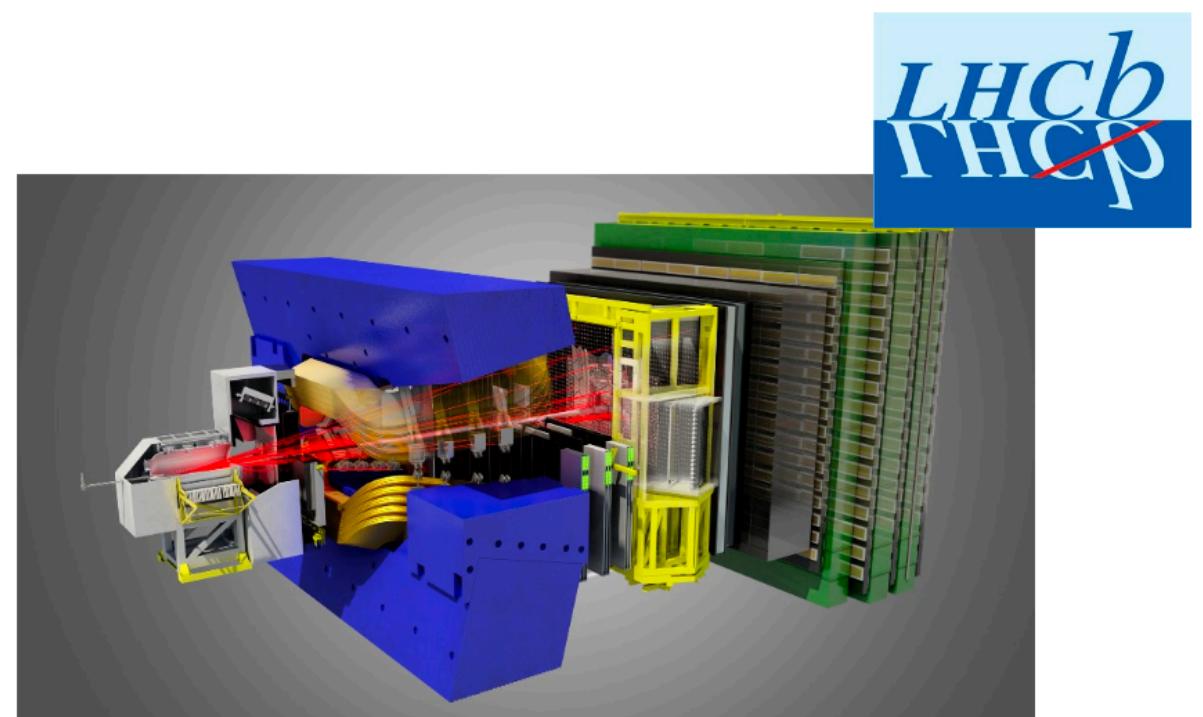
Étude du plasma quark-gluon



LHCb

Dédié aux hadrons contenant des quarks b et c

Mesures de précision

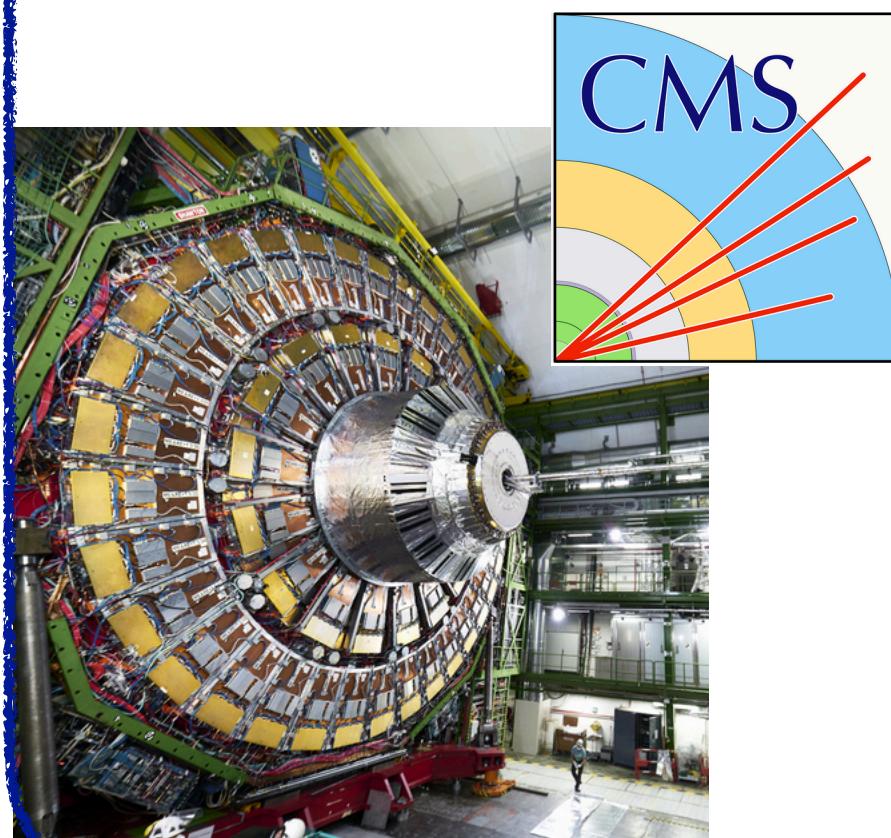


« Hardware trigger »

ATLAS & CMS

Détecteurs à usage général

Dédiés à la recherche de nouvelles particules produites directement



Frontière d'intensité

Frontière énergétique

Changement dans le paradigme de trigger pour LHCb en 2022

Avant 2022



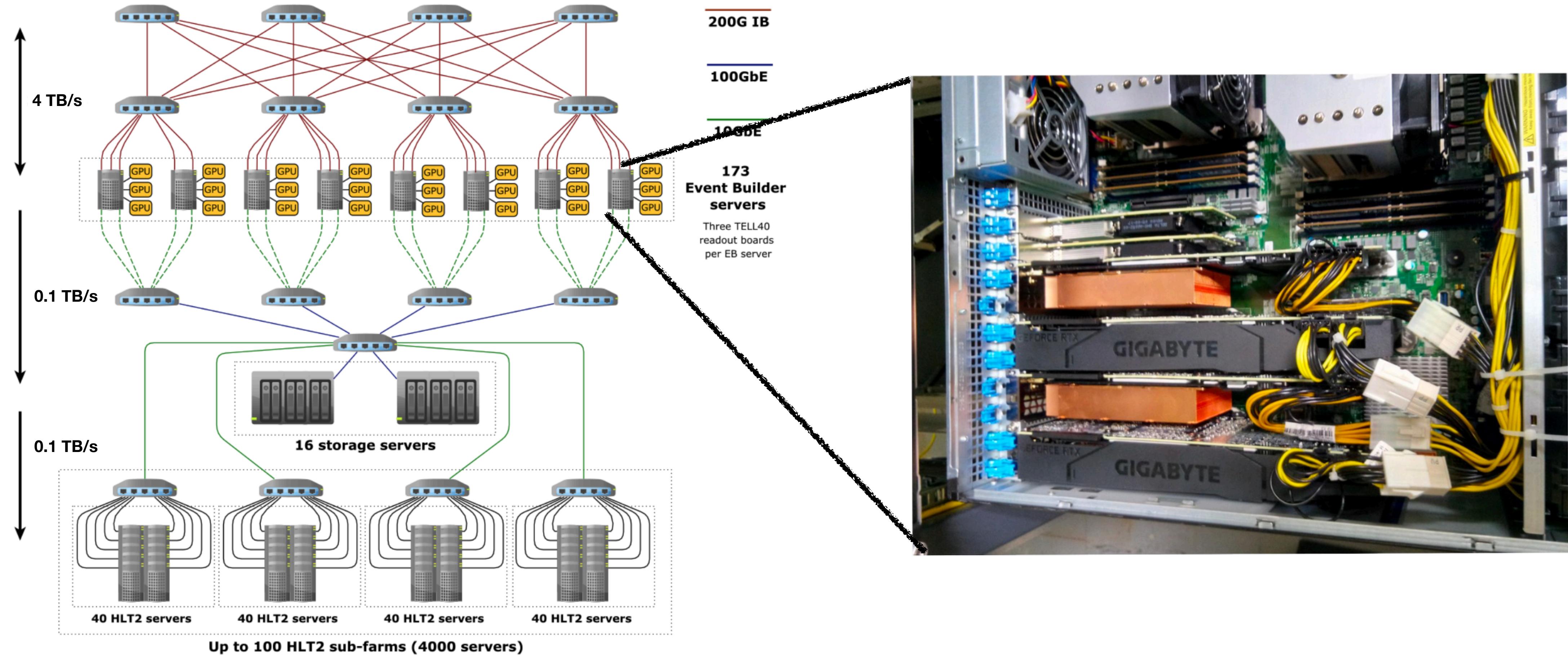
« Hardware trigger »

Depuis 2022

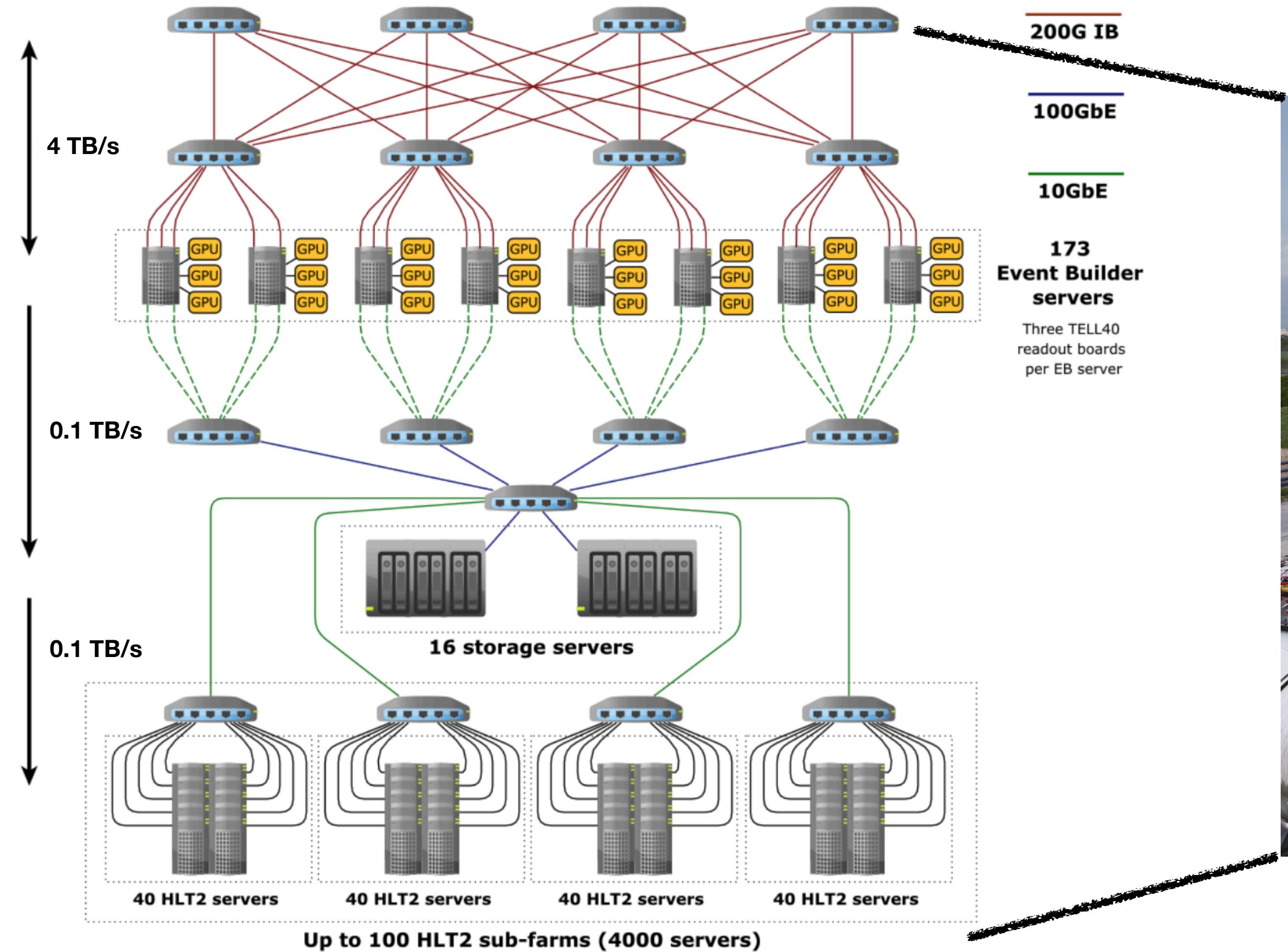


« Software trigger »

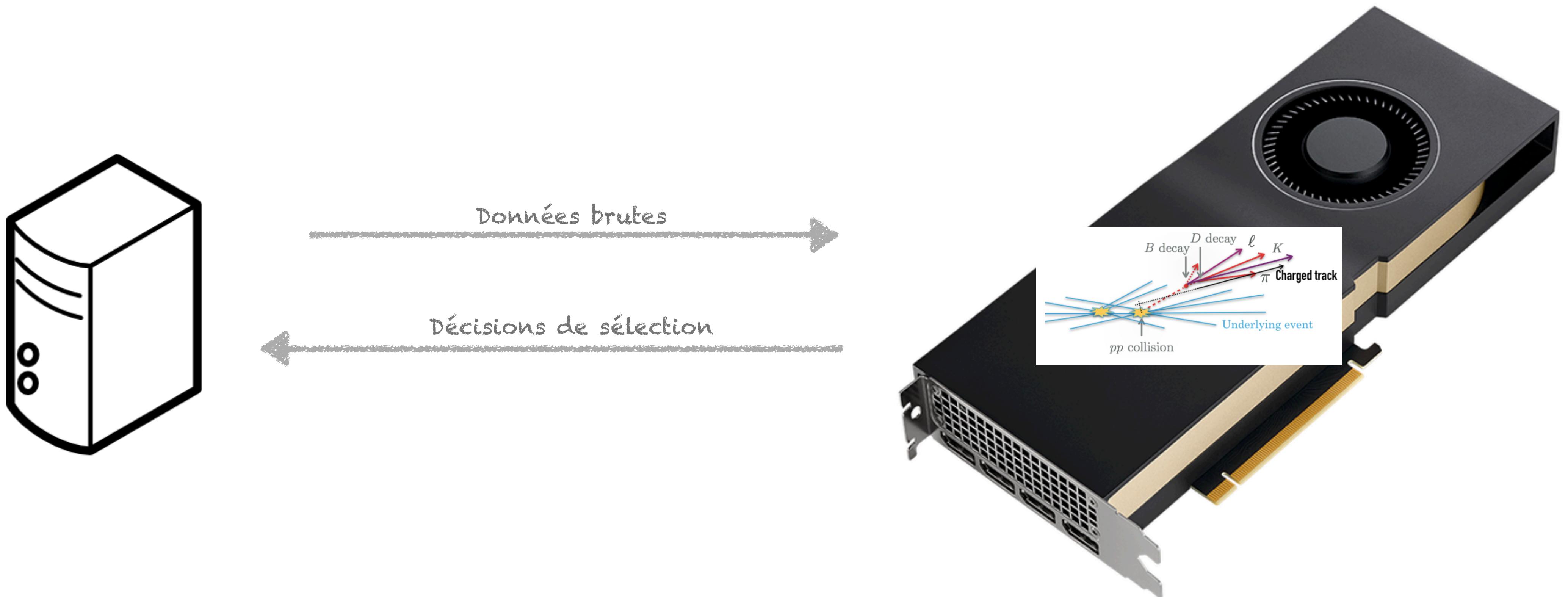
Première étape de reconstruction & sélection sur cartes graphiques



Première étape de reconstruction & sélection sur cartes graphiques



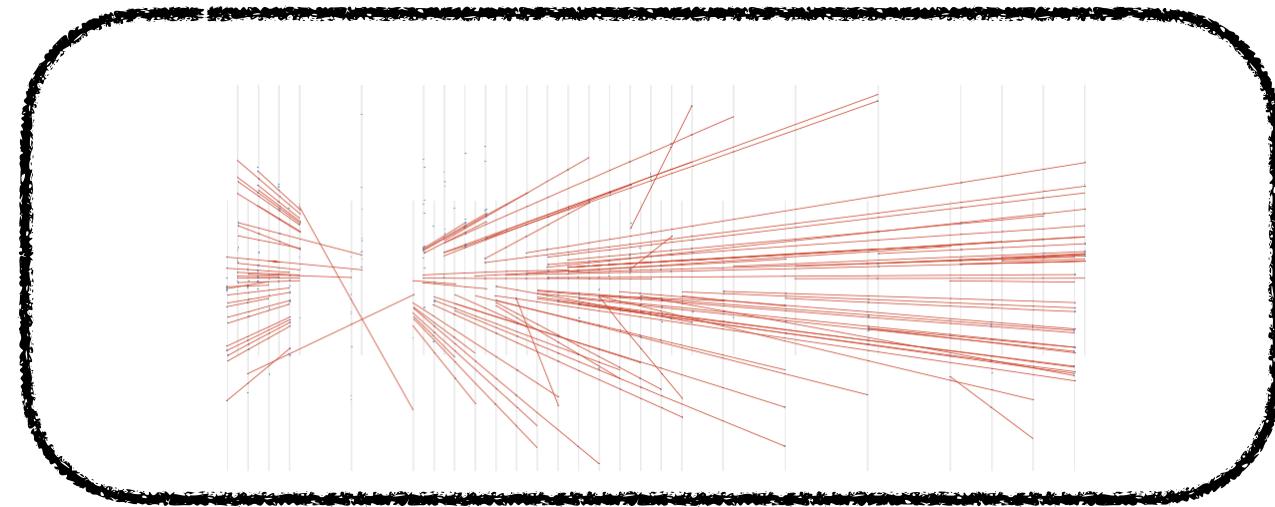
Conception du logiciel pour carte graphiques



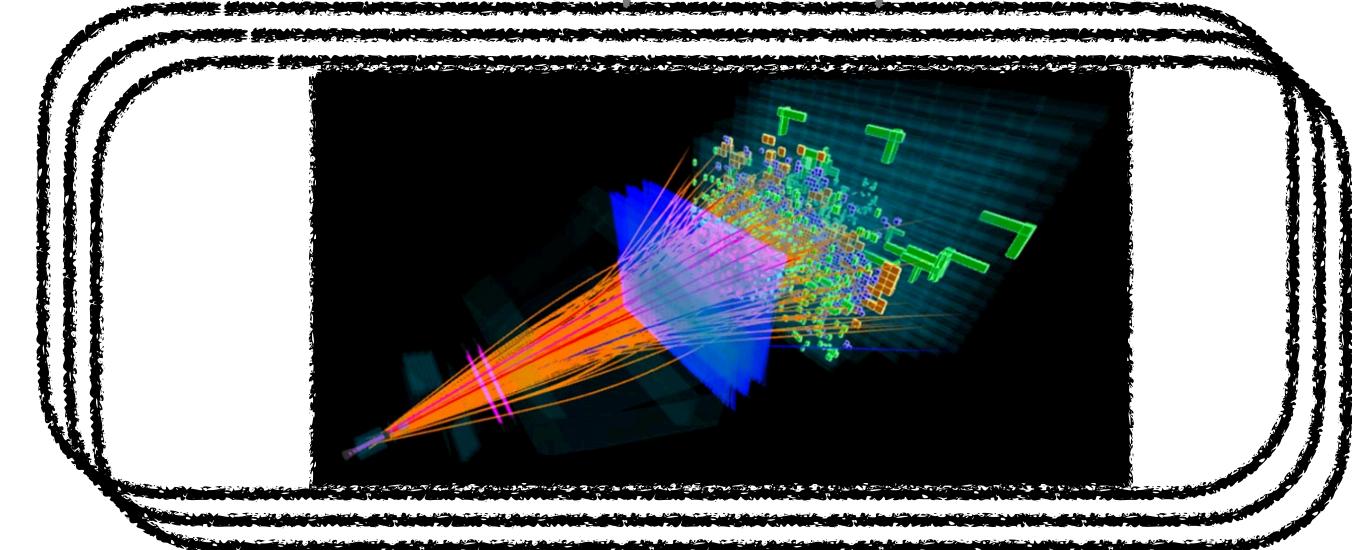
Conception du logiciel pour carte graphiques

Parallelisation sur plusieurs échelles pour efficacement utiliser les processeurs

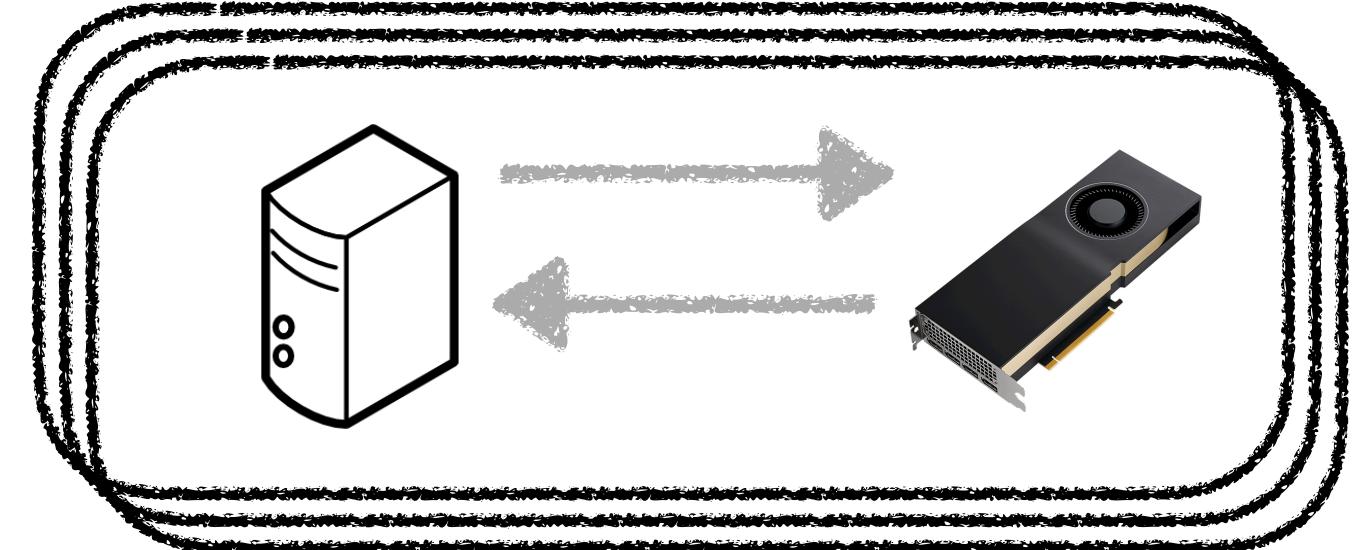
Dans une collision: trajectoires, ...



Collisions proton-proton



Lots de collision



Les grands projets - c'est toujours un travail en équipe

30 MHz à l'entrée

1 MHz en sortie

LHCb: TOP

Object: EB_SAE05

Sub-System State

EB_SAE05_Controller RUNNING ✓

RU (2) EBMBM EBAdder

BU (2)

Events_0 Events_1

Allen

Output EBStorage EBSender

Messages

Close

Eric Page1 Fill: 7920 E: 5876 GeV 05-07-22 16:21:18

PROTON PHYSICS: RAMP

Energy: 5876 GeV IB1: 2.42e+11 IB2: 2.46e+11

Beta* IP1: 1.55 m Beta* IP5: 1.55 m Beta* IP2: 10.00 m Beta* IP8: 2.00 m

FBCT Intensity and Beam Energy

Intensity

Updated: 16:21:17

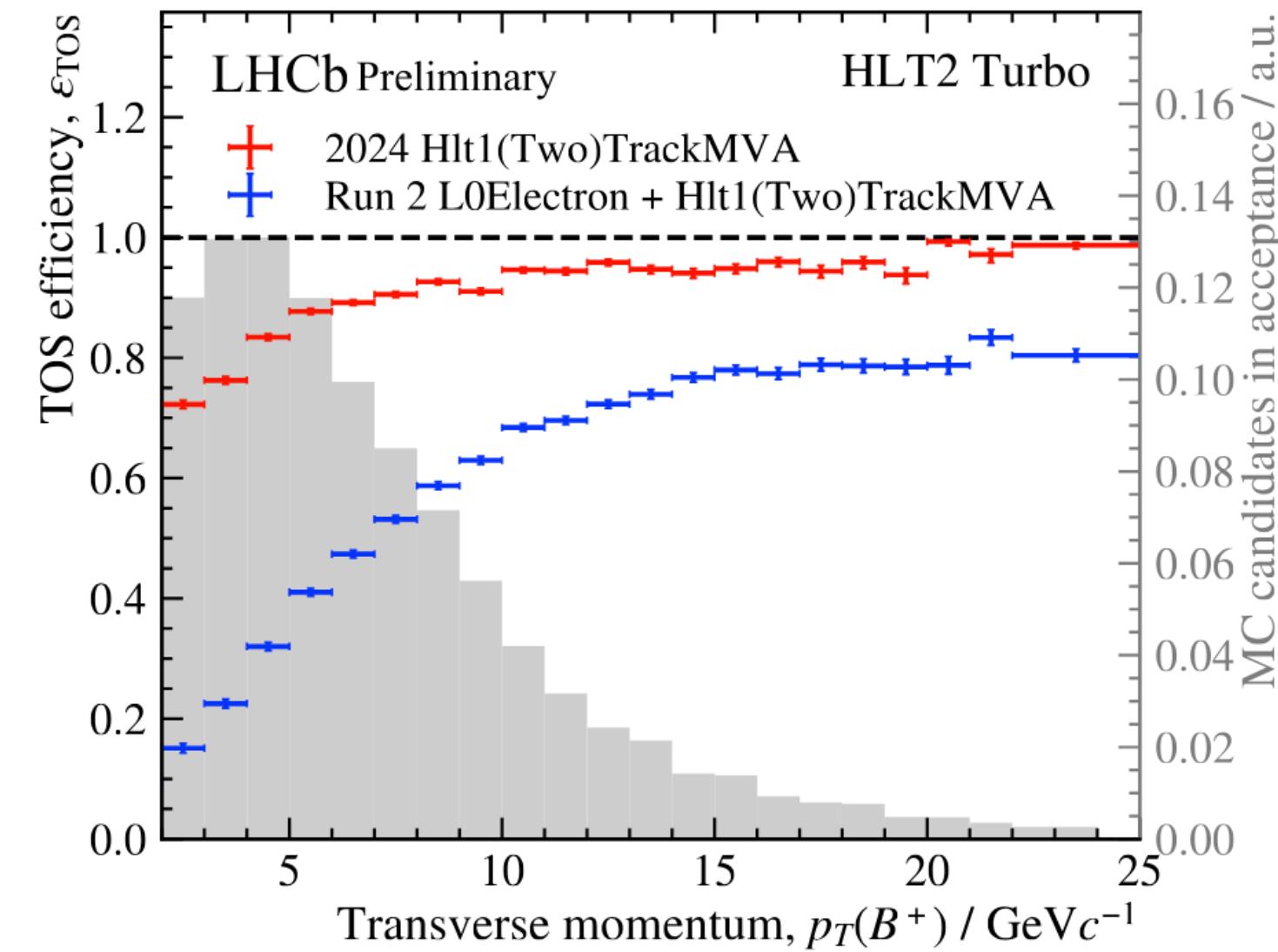
09-Jun-2022 17:17:39 - INFO - Stopping Run LHCb_TFC

09-Jun-2022 17:17:39 - INFO - Stopping Run LHCb_TFC

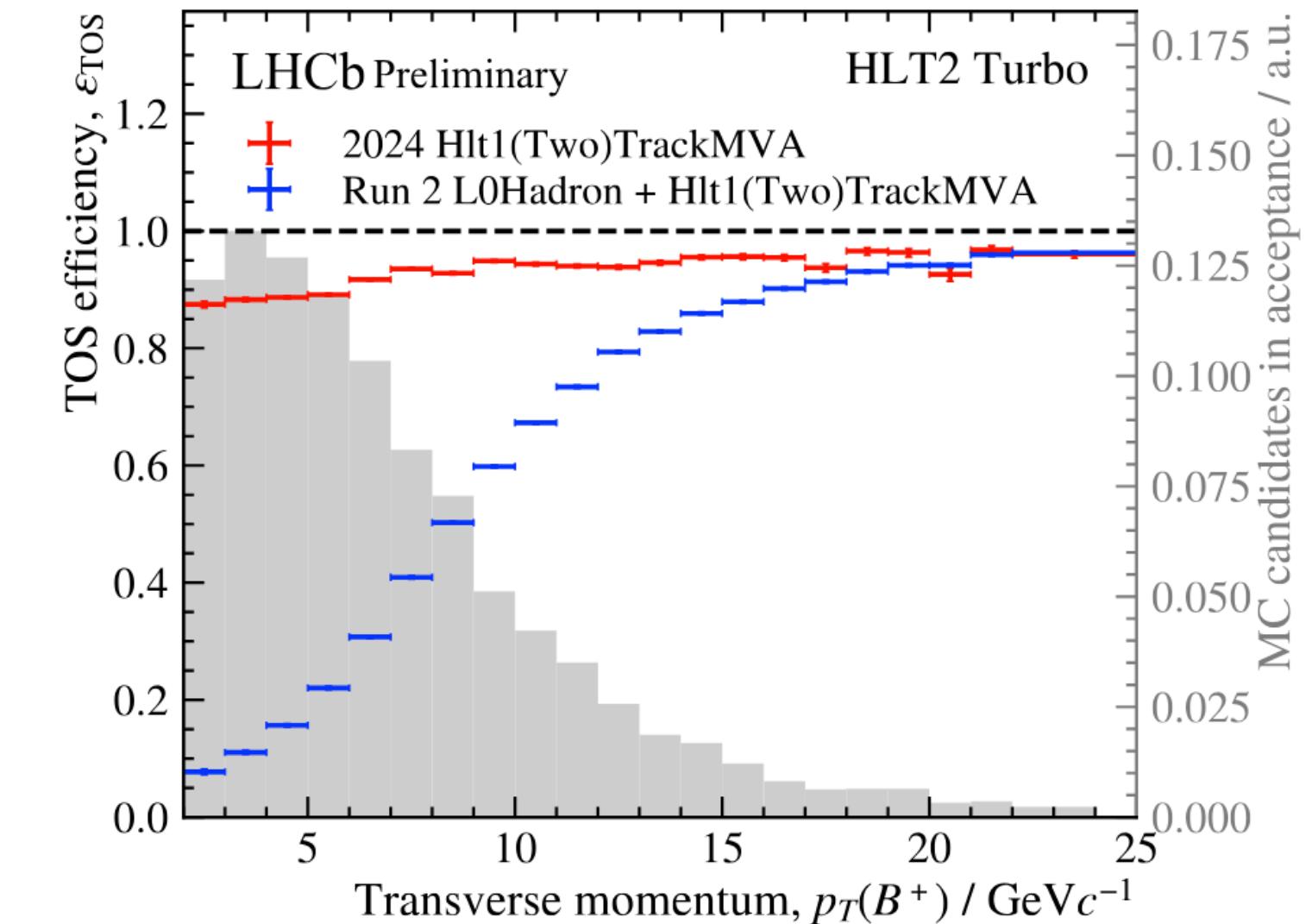
09-Jun-2022 17:17:39 - INFO - Stopping Run LHCb_TFC



Performance du système en temps réel en 2024



(a) TOS efficiencies in $B^+ \rightarrow J/\psi (e^+e^-) K^+$.



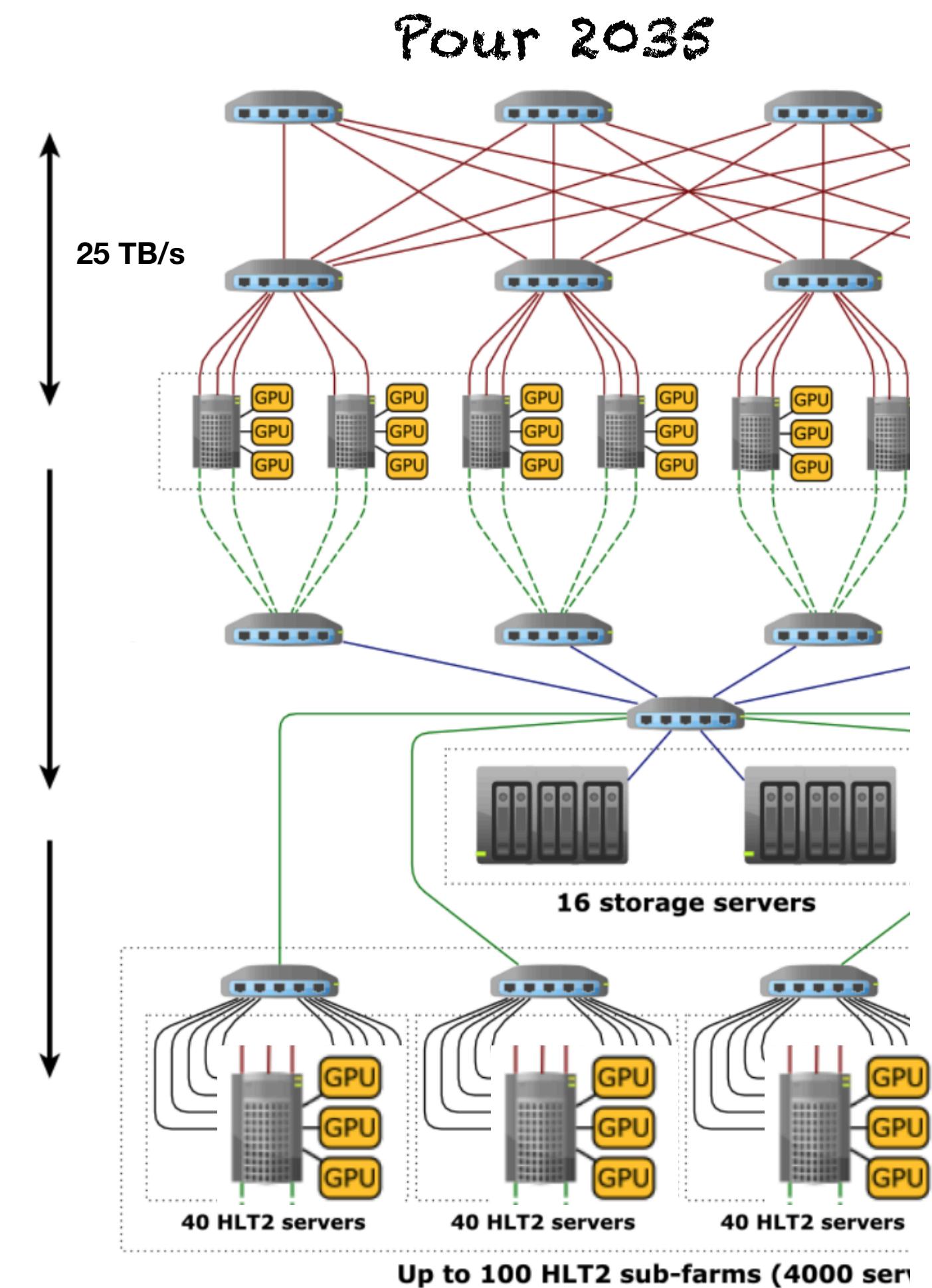
(a) TOS efficiencies in $B^+ \rightarrow \bar{D}^0 (K^+\pi^-) \pi^+$.

LHCb-FIGURE-2024-030

Le système en temps réel sur cartes graphiques marche très bien

Conclusions

- Beaucoup de questions ouvertes pour expliquer les observations dans notre univers
- Modèle théorique de la physique des particules très puissant jusqu'à aujourd'hui
 - Mais il faut trouver de la « Nouvelle Physique » pour expliquer tous les phénomènes observés
- Quelques indications de déviations entre mesures de haute précision et prédictions dans le domaine de la physique des saveurs
- Plus de données nécessaires pour confirmer ou falsifier ces indications
- Mise à jour des expériences auprès des collisionneurs de particules pour observer plus de particules
- Grands défis technologiques, par exemple dans le traitement des données
 - Solutions innovantes avec des processeurs de pointe sont requis pour faire face aux défis
- Les prochaines années vont être décisifs pour comprendre les déviations observées
- Encore plus de défis technologiques dans le futur: 25 TB/s au lieu de 5 TB/s

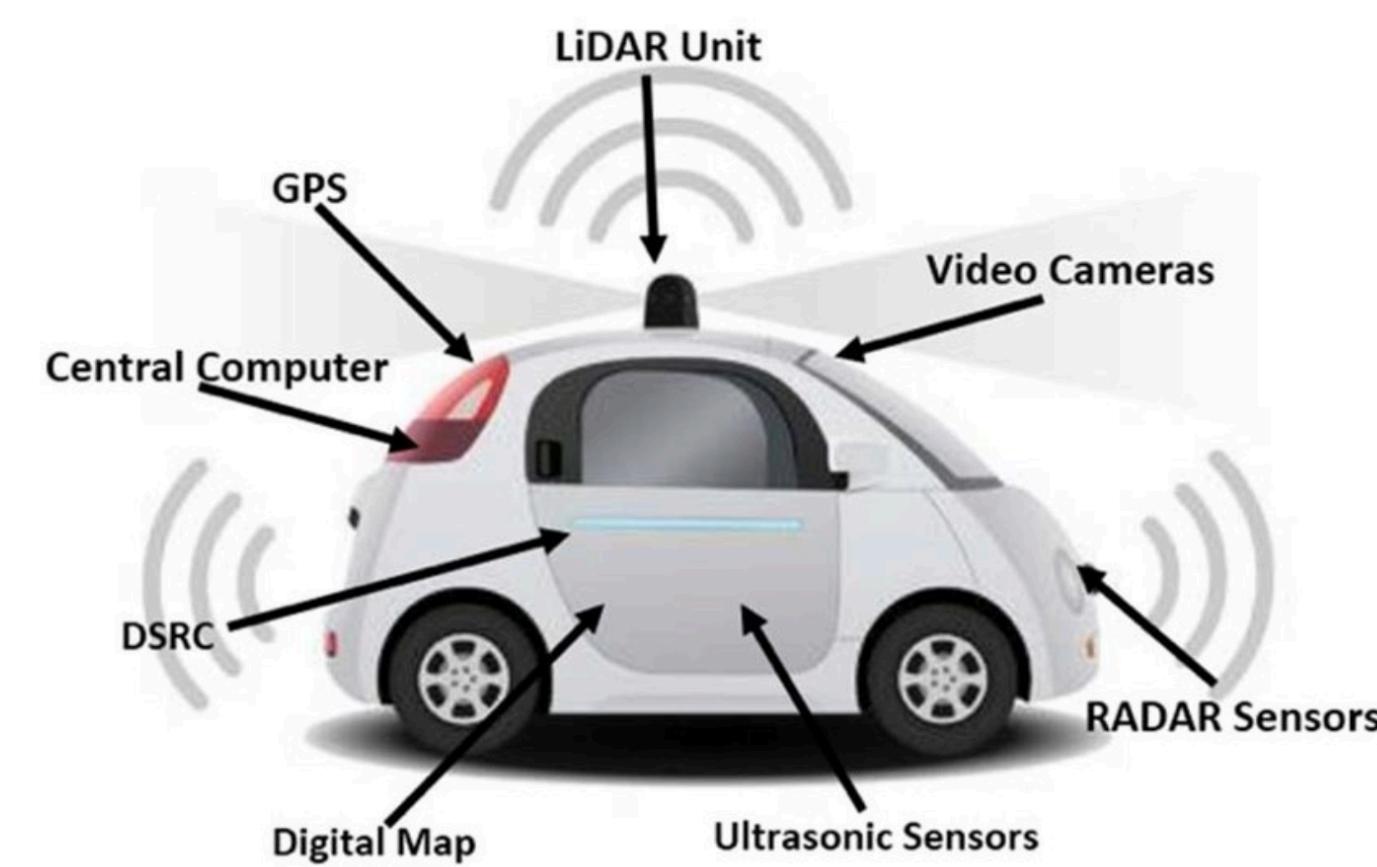
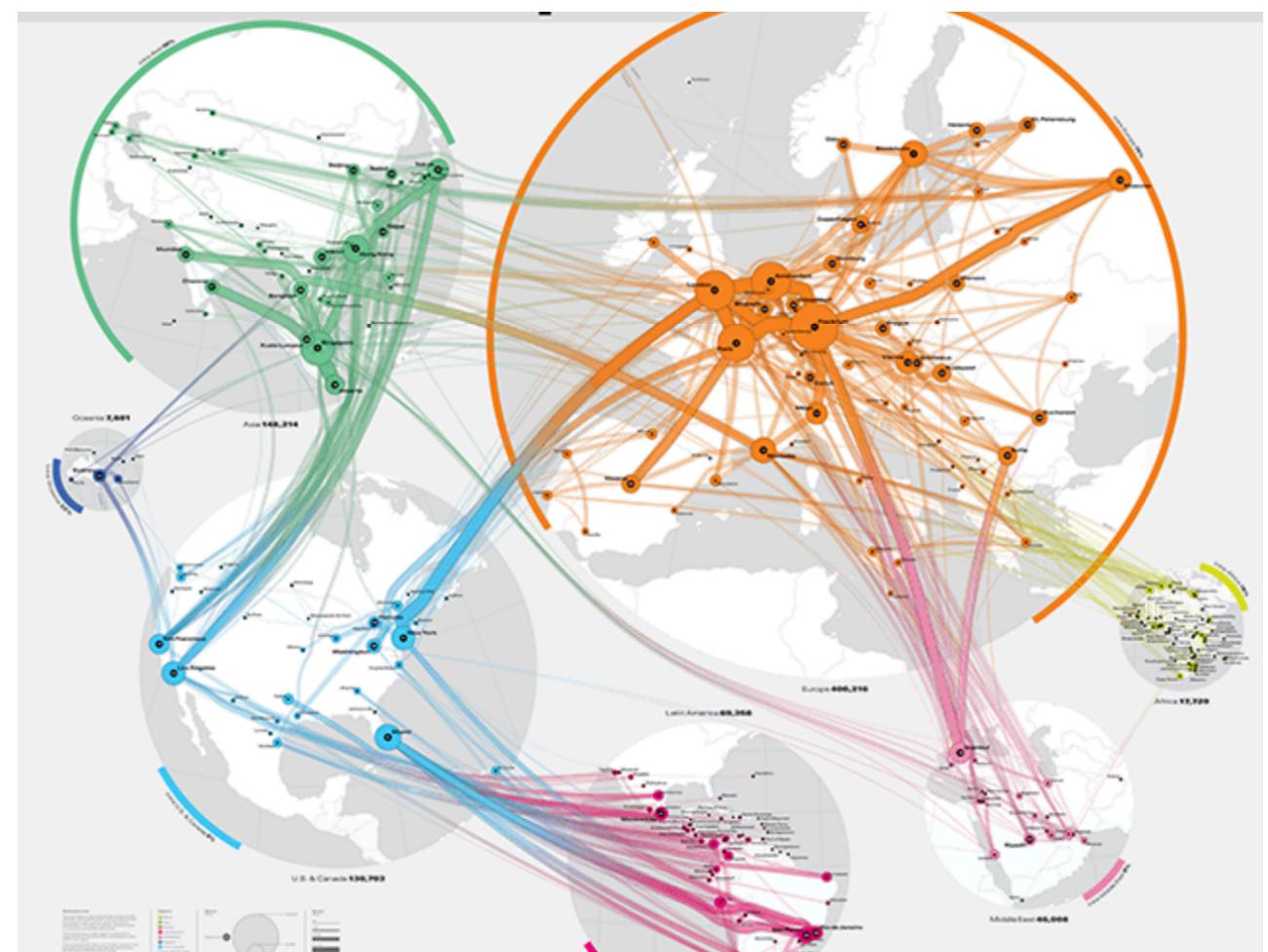


Backup

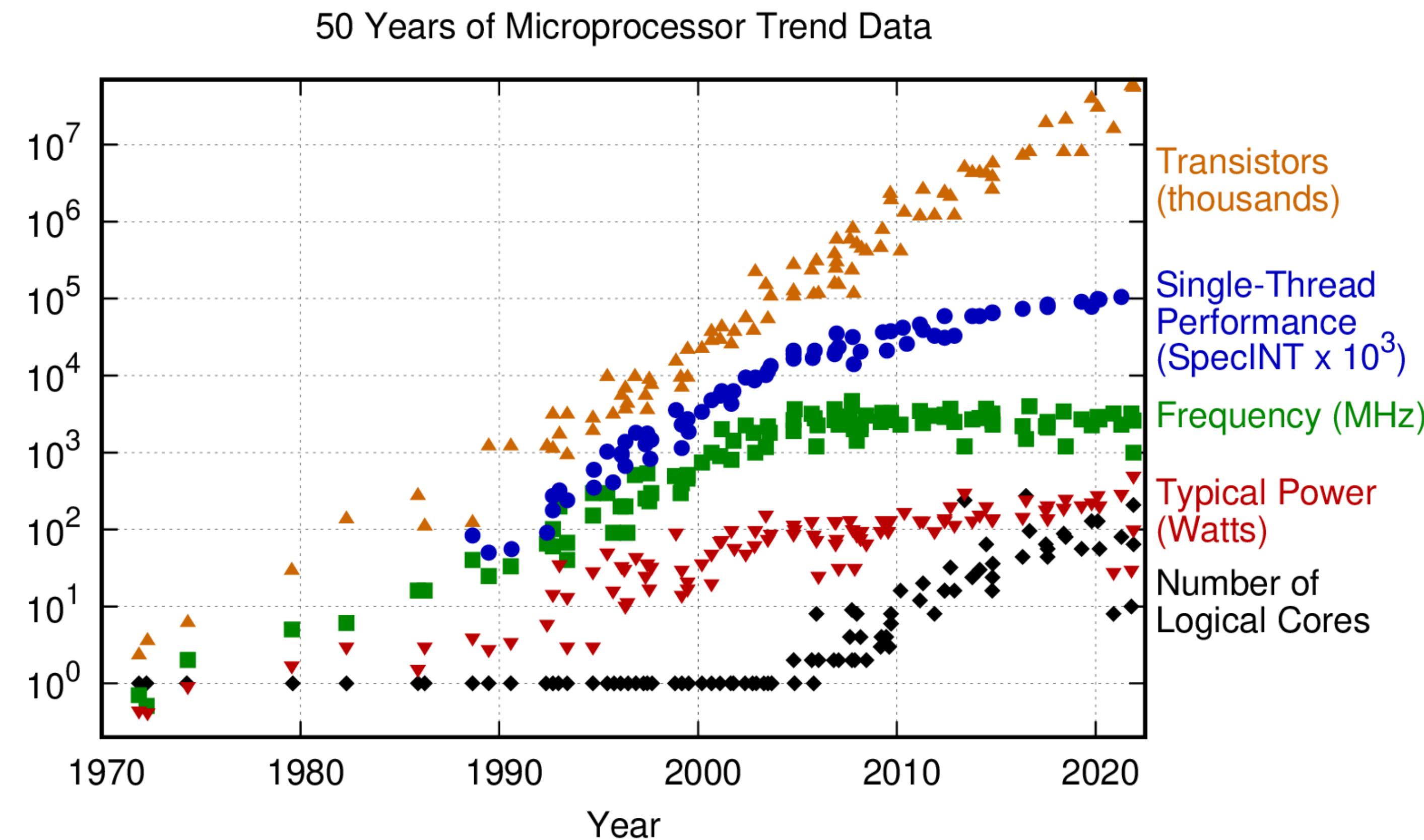
How does the LHC challenge compare to other domains?

LHCb Run 5 data rate (25 TB/s) corresponds to

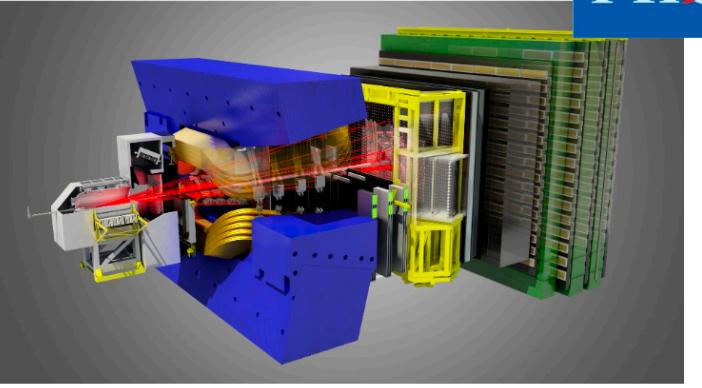
- 8.3 million video streams in parallel (4k)
- 10-25 x global peak internet traffic (as of today)
- 5k - 25k autonomous vehicles
- 12.5k imaging satellites



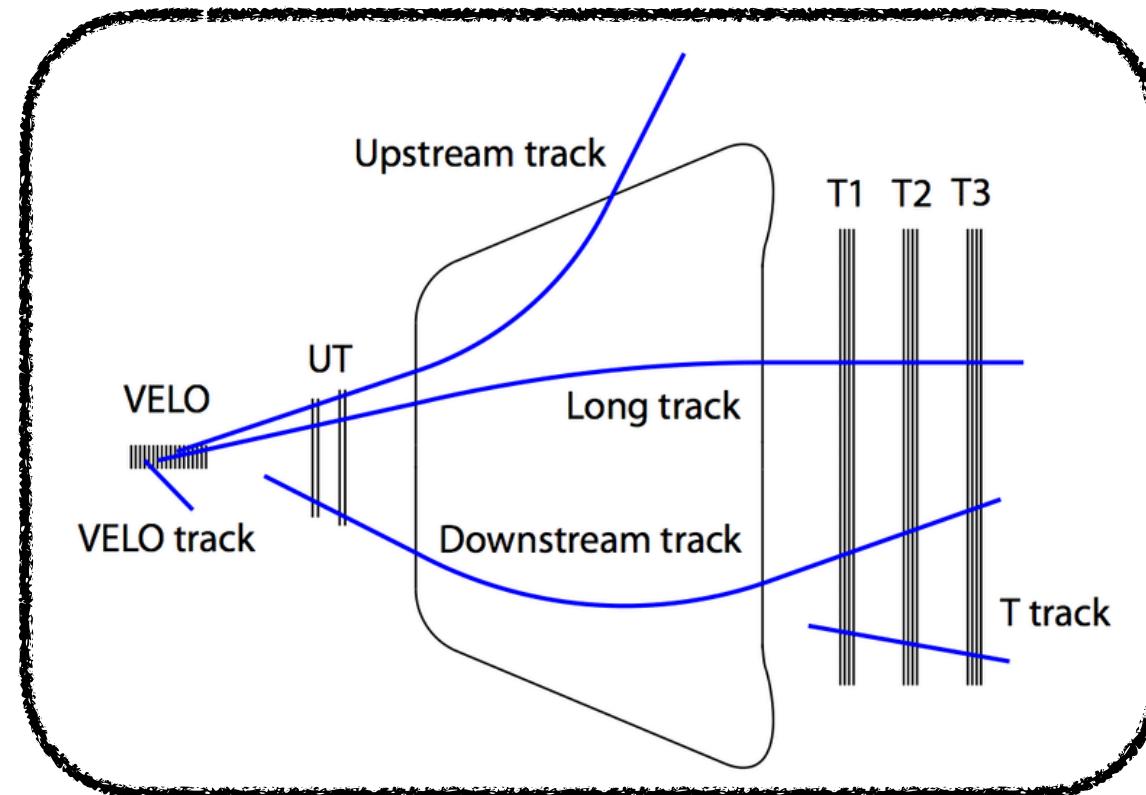
Microprocessor trend



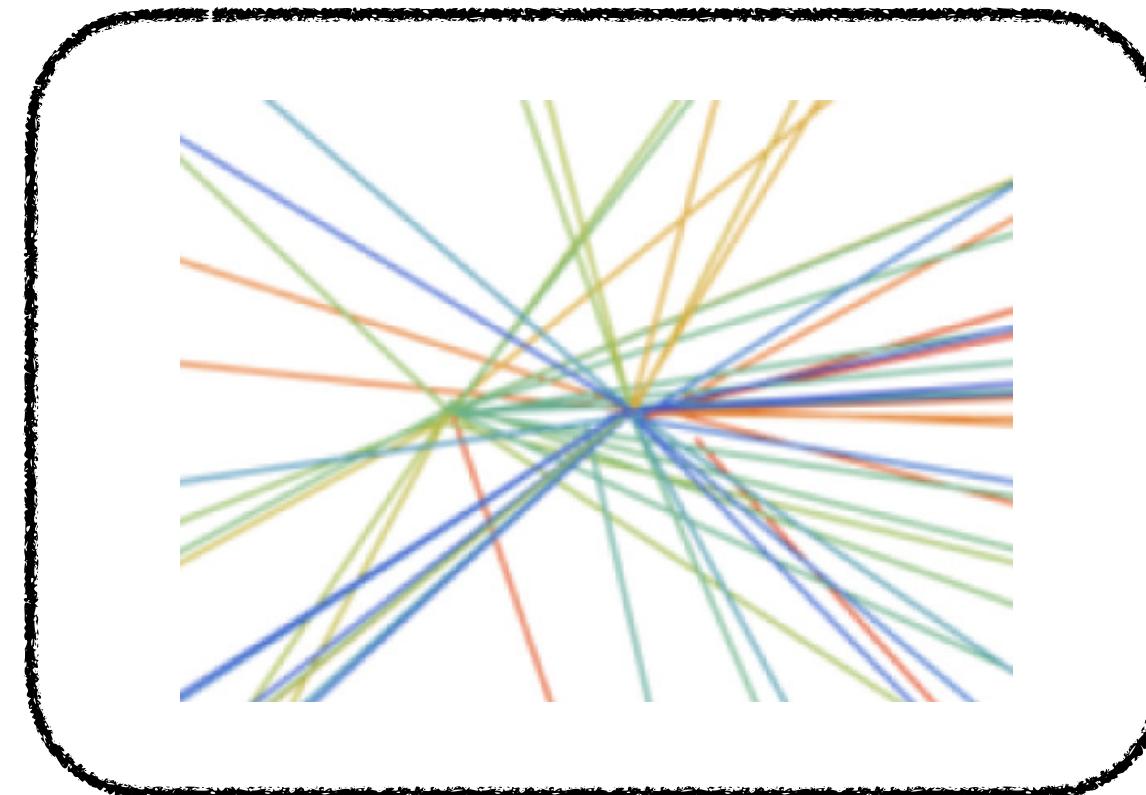
What do we reconstruct in the High Level Trigger (HLT)?



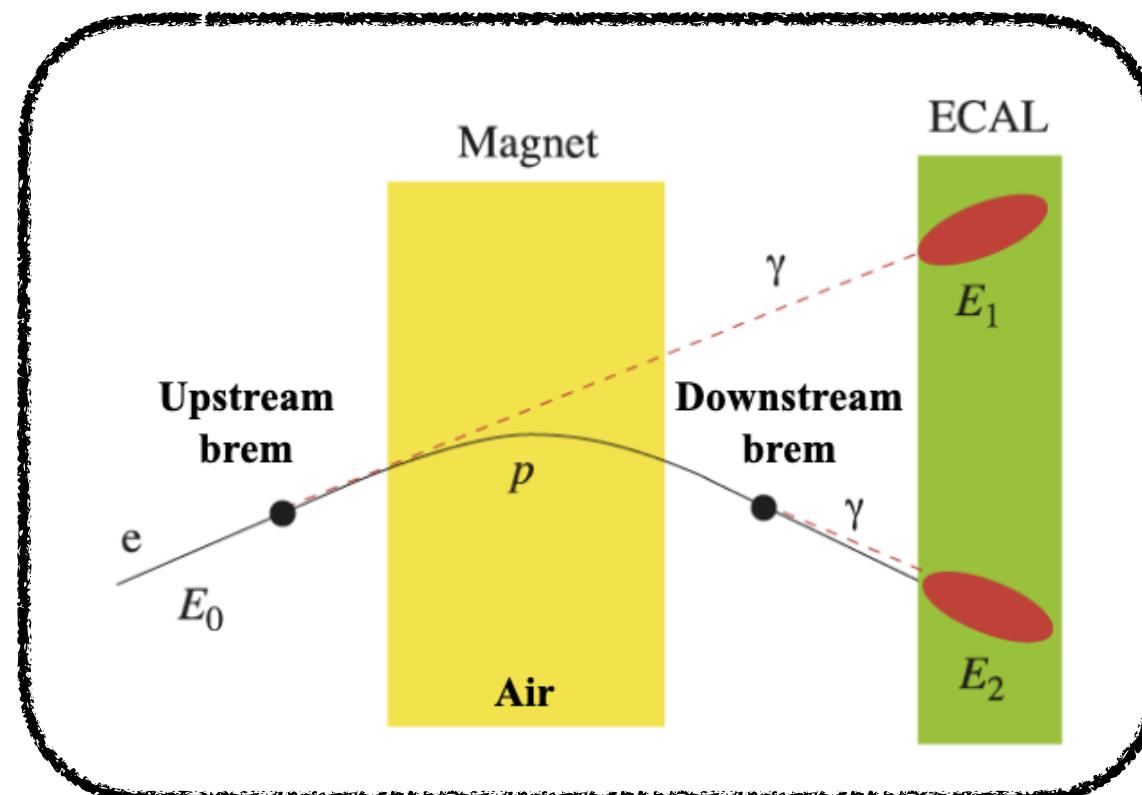
Tracks



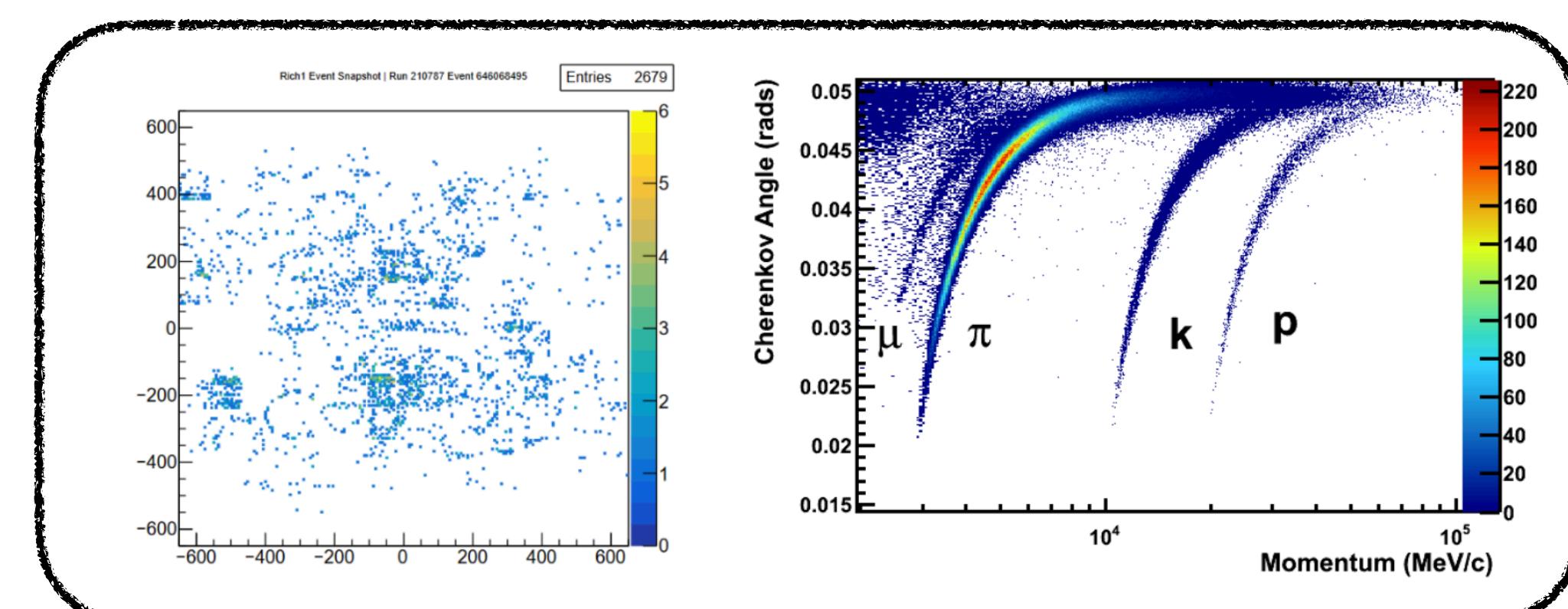
Vertices



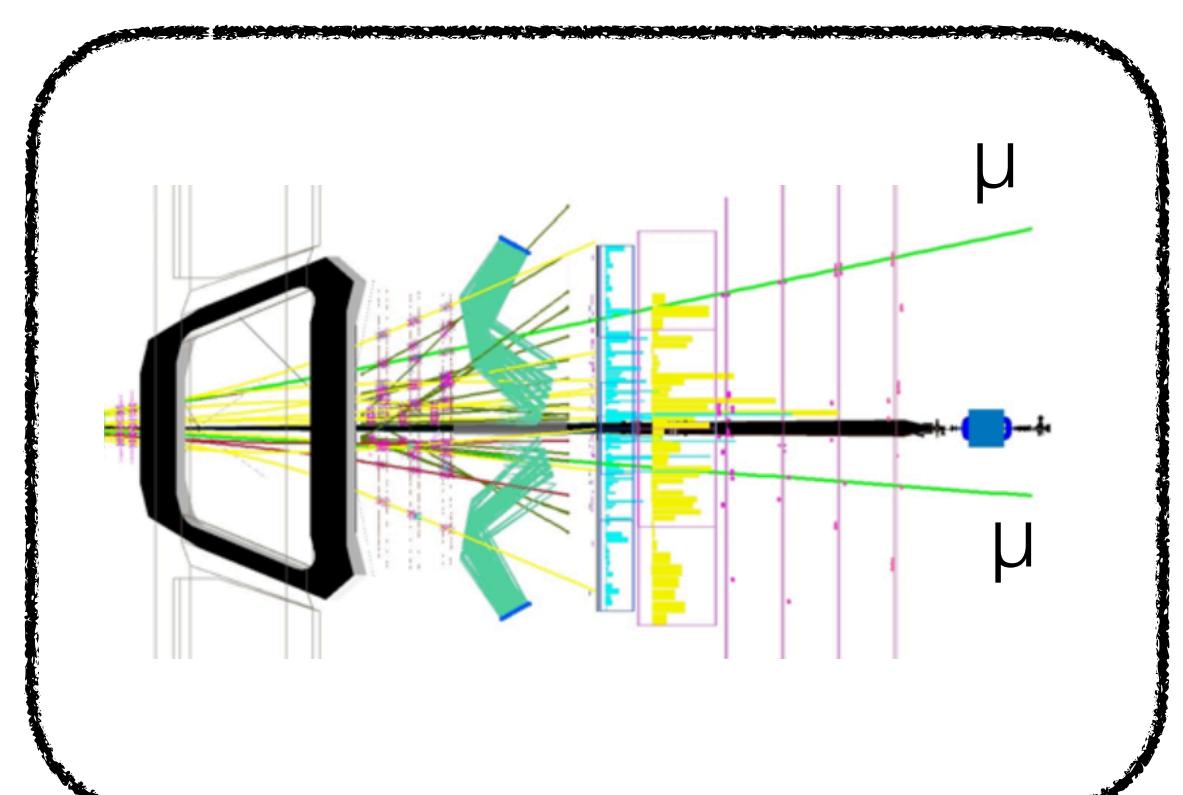
Calorimeter objects



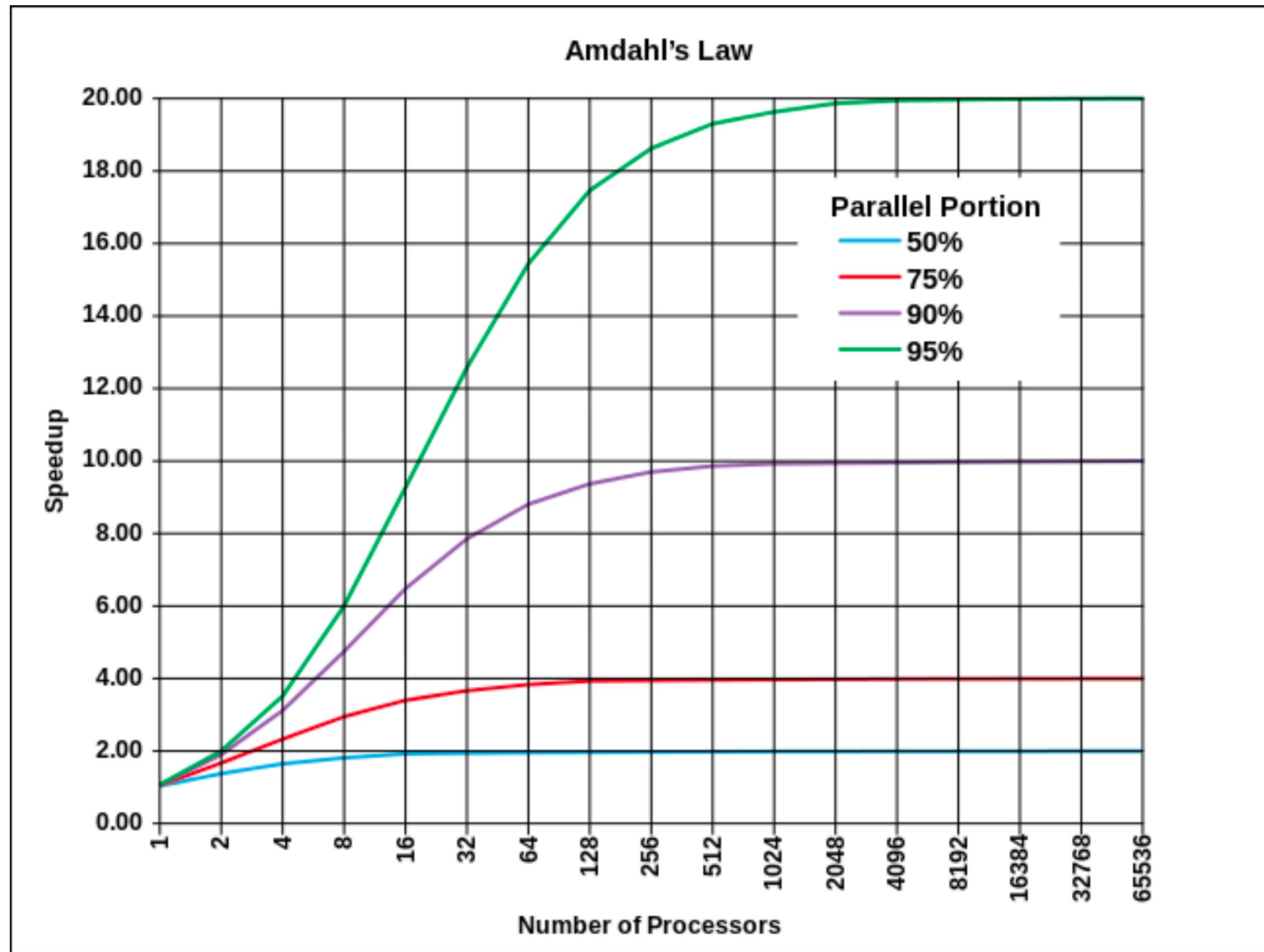
Cherenkov rings



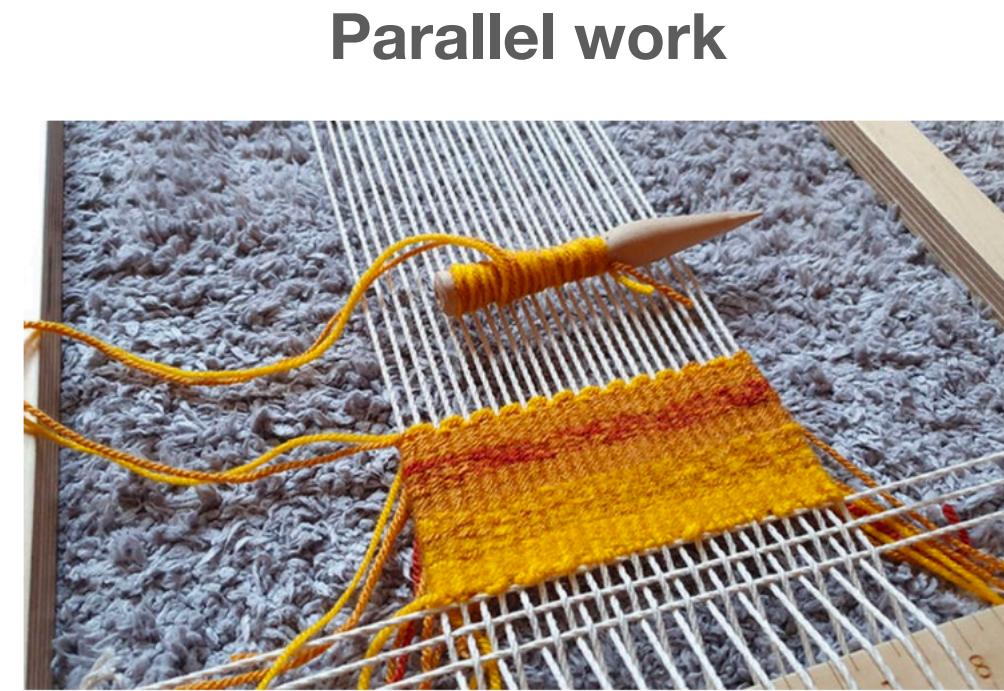
Muon hits



How to use parallel processors



- Speedup in latency = $1 / (S + P/N)$
 - S: sequential part of problem
 - P: parallel part of problem
 - N: number of processors



Hardware in today's High Performance Computing (HPC) Centres

Top 5 of the TOP500 HPC list

Rank	System	Cores	Rmax (PFlop/s)	Rpeak (PFlop/s)	Power (kW)
1	El Capitan - HPE Cray EX255a, AMD 4th Gen EPYC 24C 1.8GHz, AMD Instinct MI300A, Slingshot-11, TOSS, HPE DOE/NNSA/LLNL United States	11,039,616	1,742.00	2,746.38	29,581
2	Frontier - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE Cray OS, HPE DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	9,066,176	1,353.00	2,055.72	24,607
3	Aurora - HPE Cray EX - Intel Exascale Compute Blade, Xeon CPU Max 9470 52C 2.4GHz, Intel Data Center GPU Max, Slingshot-11, Intel DOE/SC/Argonne National Laboratory United States	9,264,128	1,012.00	1,980.01	38,698
4	Eagle - Microsoft NDv5, Xeon Platinum 8480C 48C 2GHz, NVIDIA H100, NVIDIA Infiniband NDR, Microsoft Azure Microsoft Azure United States	2,073,600	561.20	846.84	
5	HPC6 - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, RHEL 8.9, HPE Eni S.p.A. Italy	3,143,520	477.90	606.97	8,461

Today's computing performance achieved from combination of Central Processing Units (CPUs) and Graphics Processing Units (GPUs)