

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

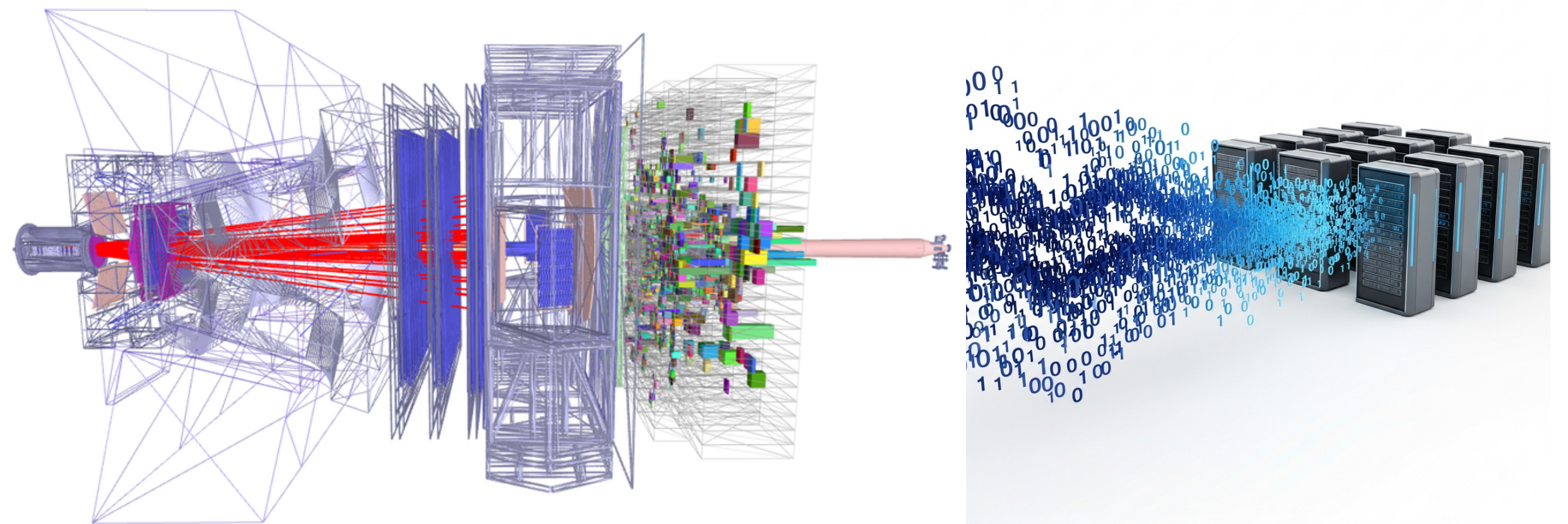
Dorothea vom Bruch

dorothea.vom.bruch@cern.ch

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

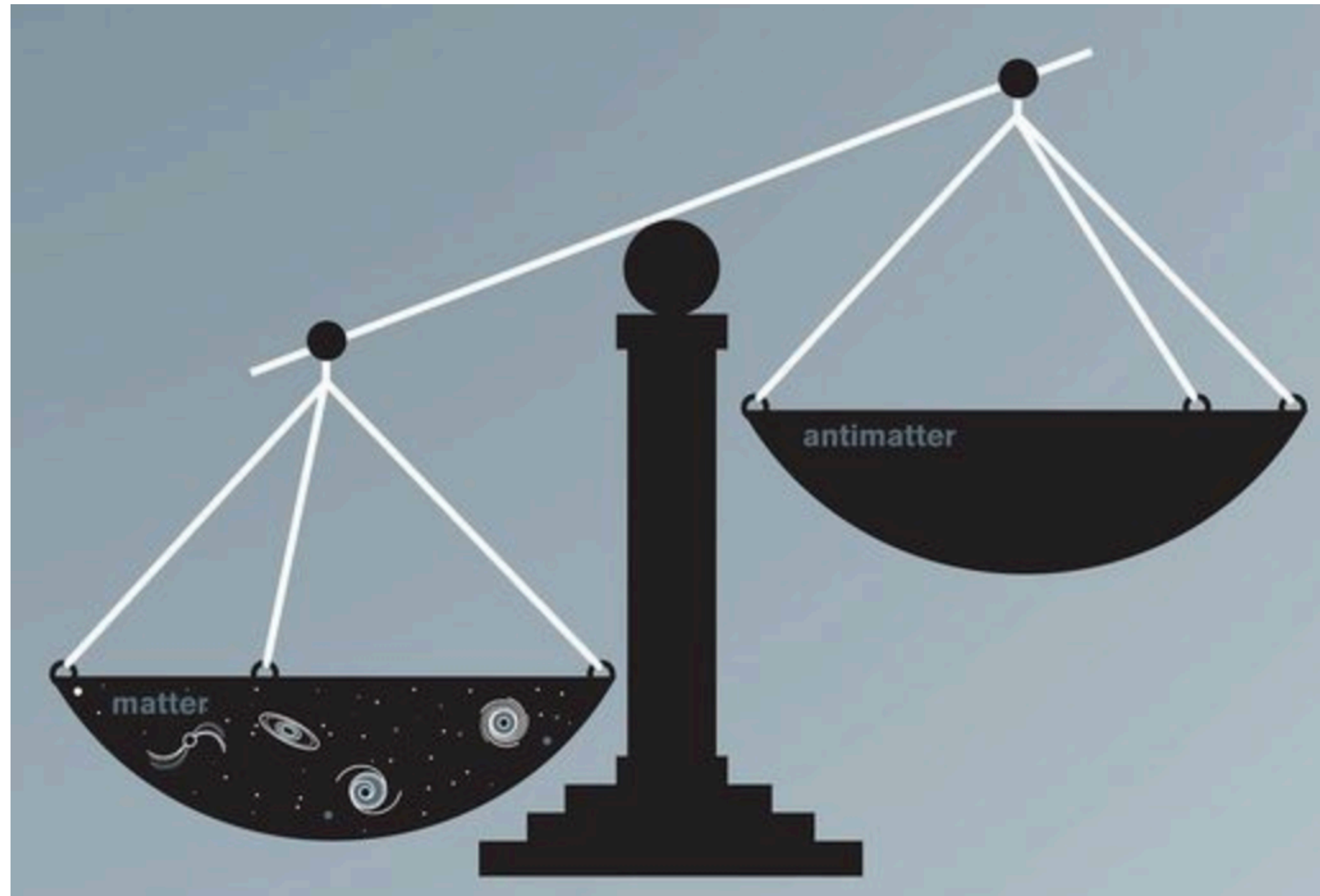
Cycle de conférences du CPPM

20 Septembre 2025



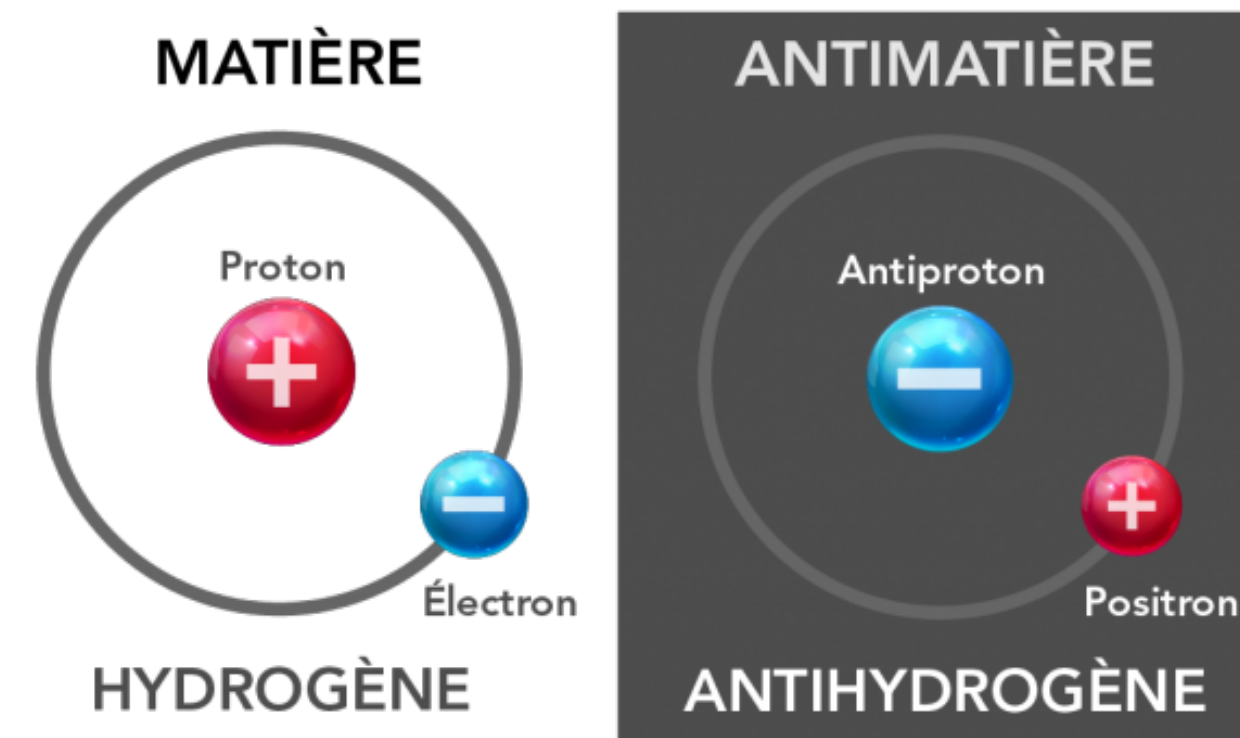
Grandes questions:

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-asymetry>

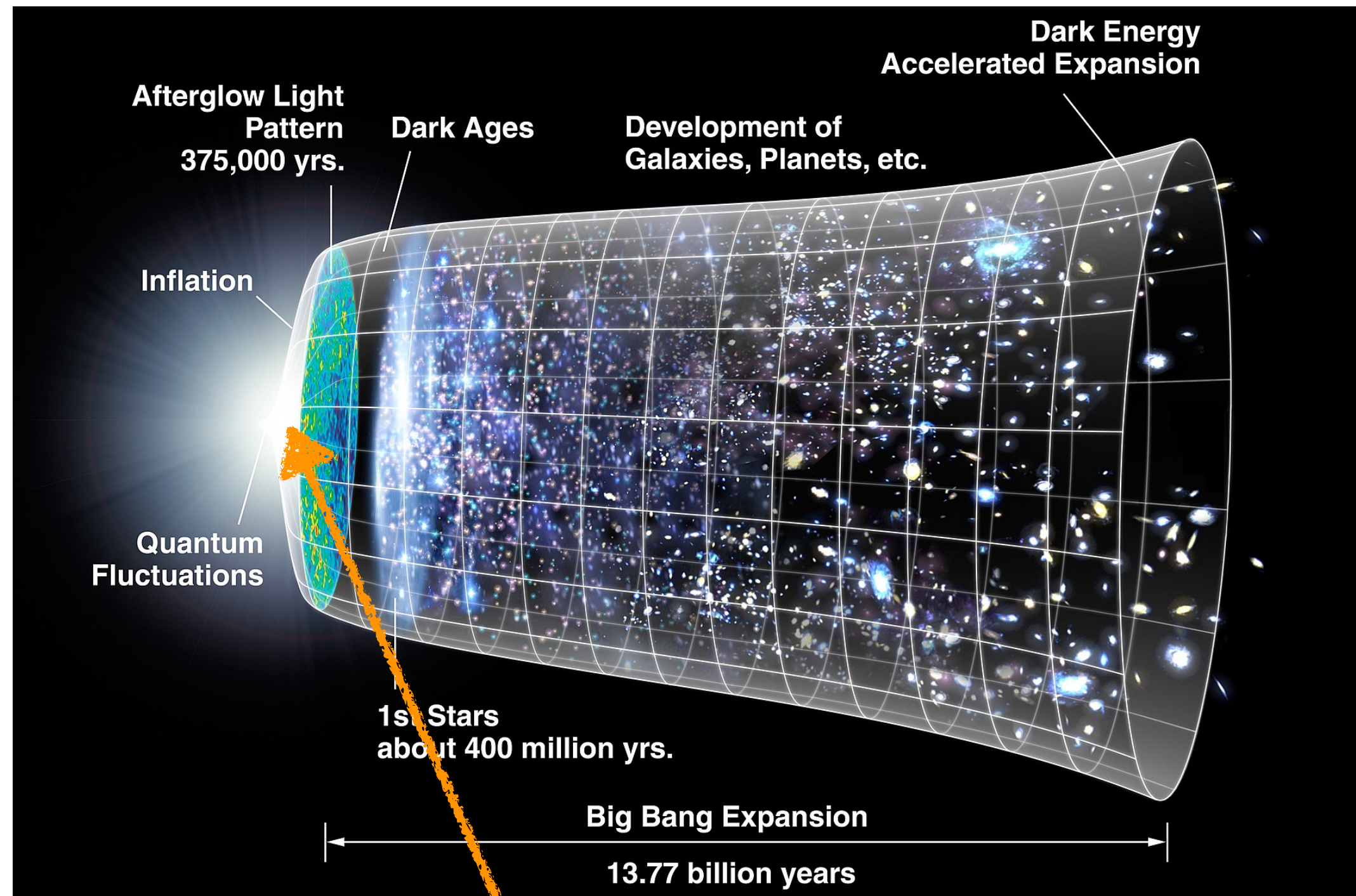
Antimatière: même propriétés que la matière,
mais avec une charge opposée



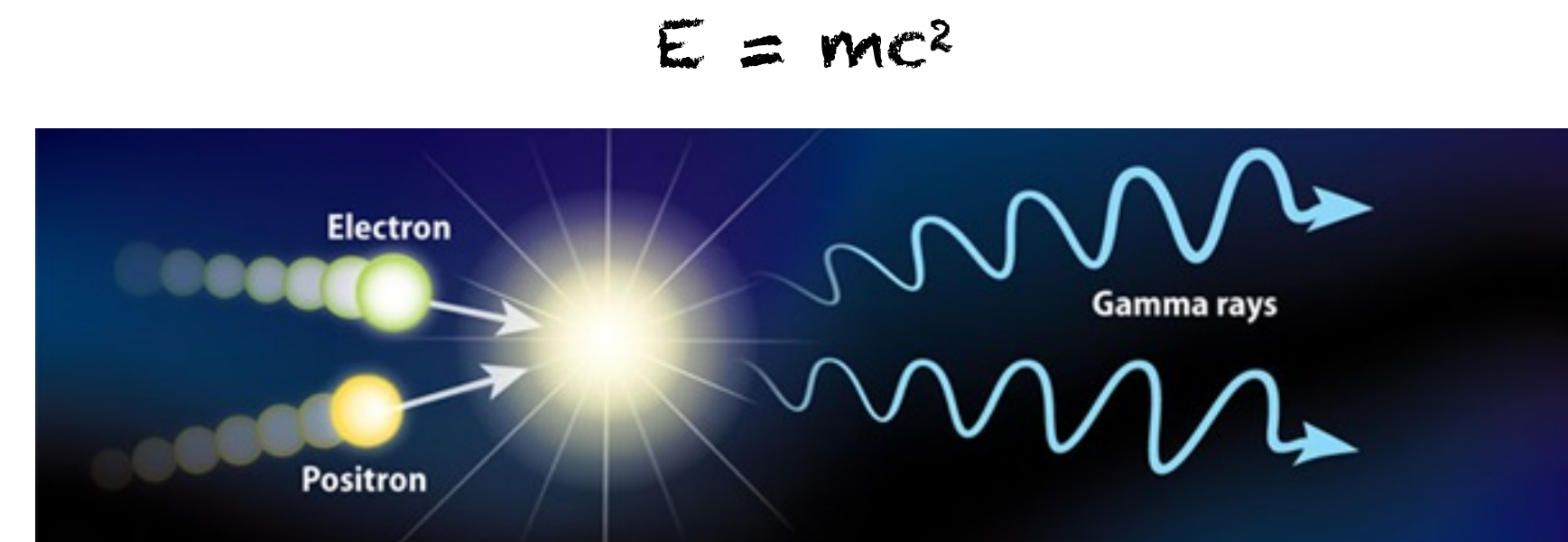
<https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/les-stim-expliquees/quest-ce-que-lantimatiere-et-quel-en-est-linteret>

Grandes questions:

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



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



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

Particule + Antiparticule

=

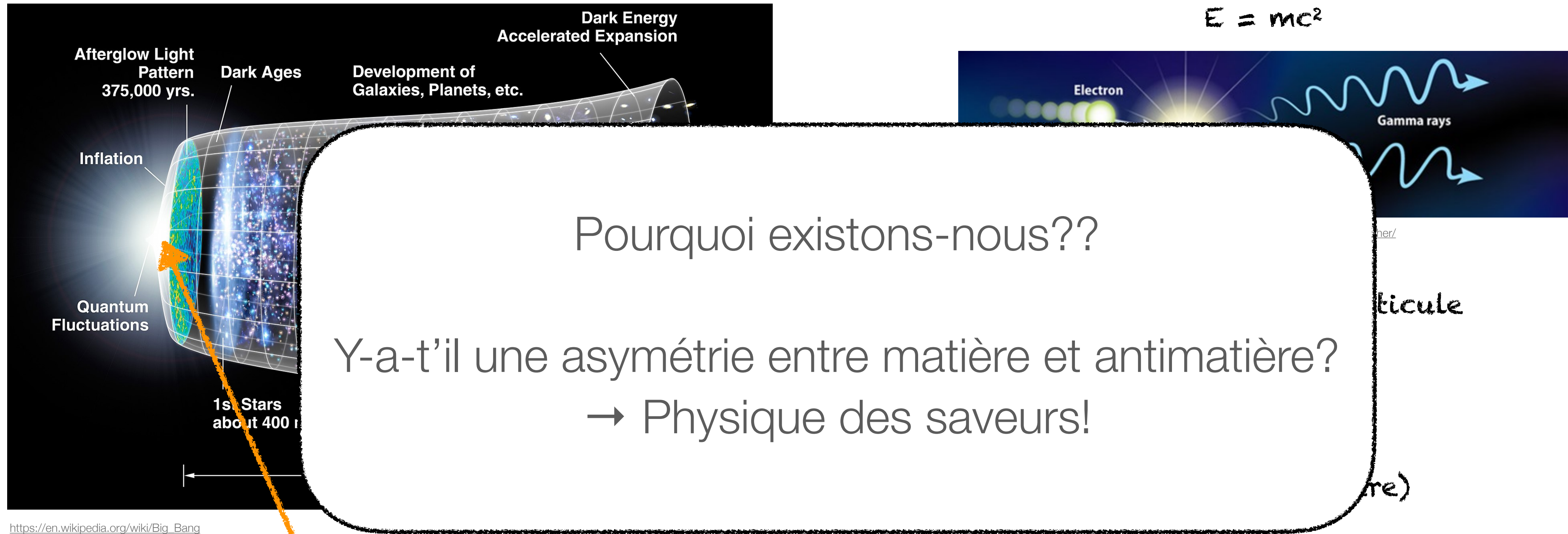
Energie

(Plus de matière)

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

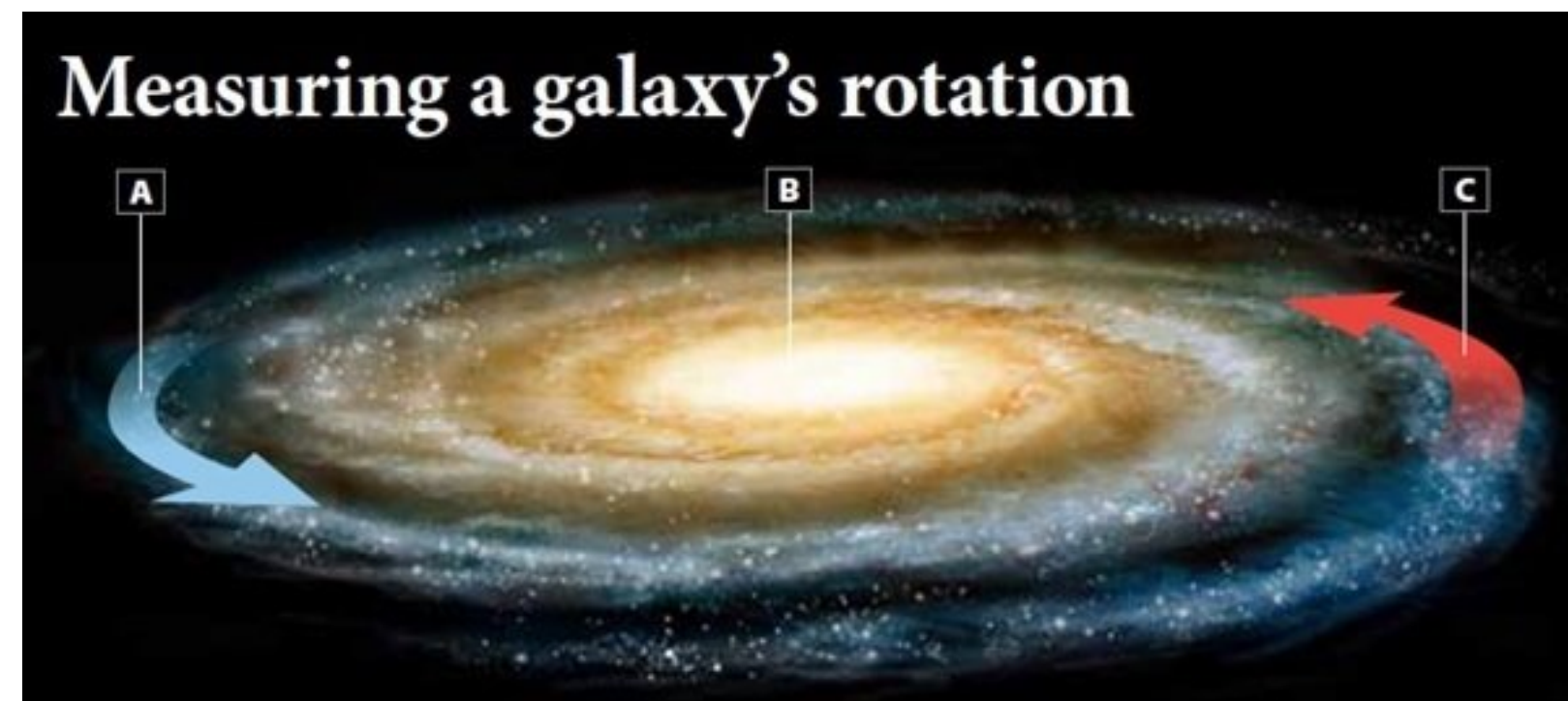
Grandes questions:

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

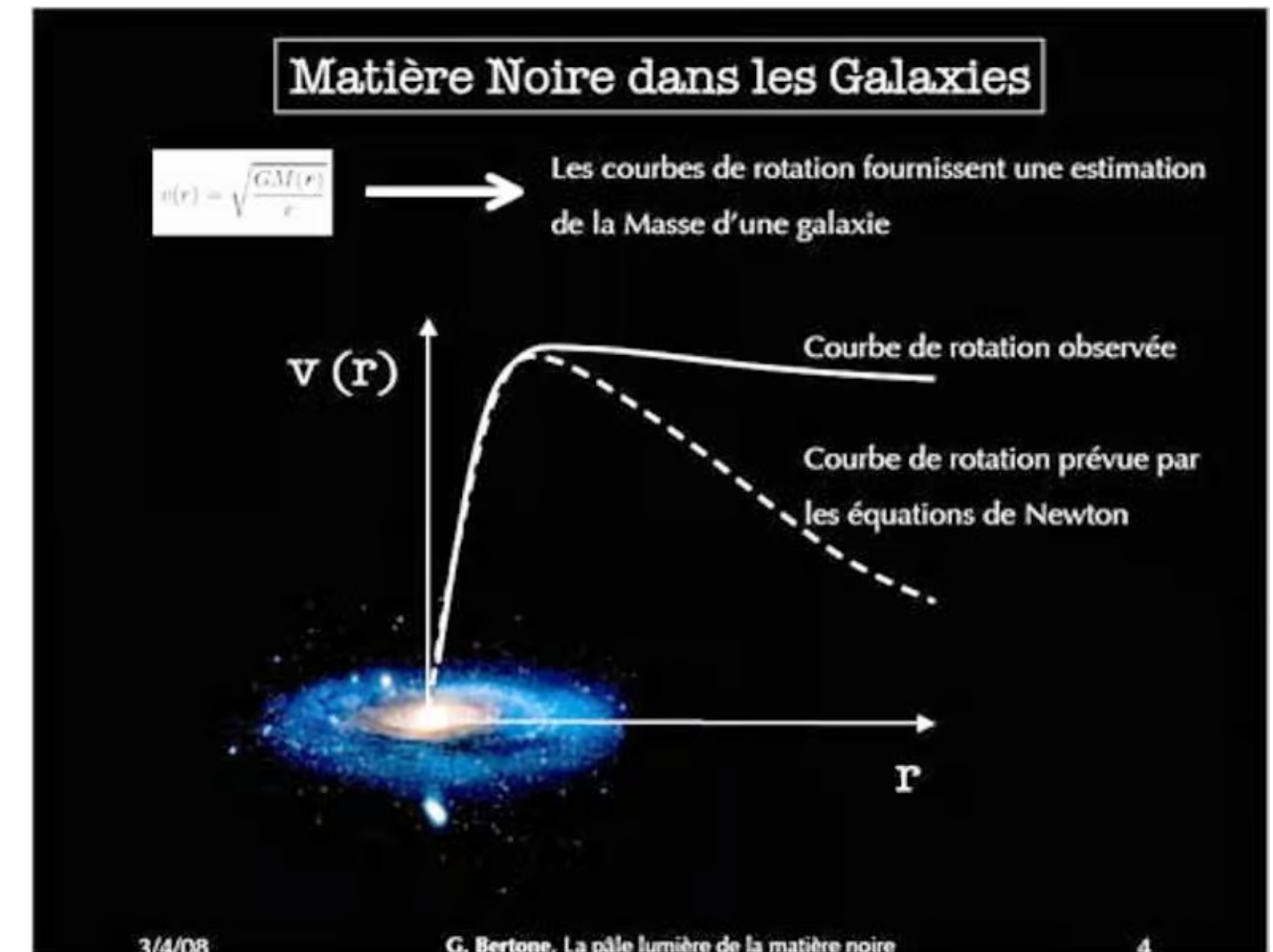


En théorie, des quantités égales de matière et d'antimatière ont été créées pendant le big bang

Grandes questions: C'est quoi la matière noire?



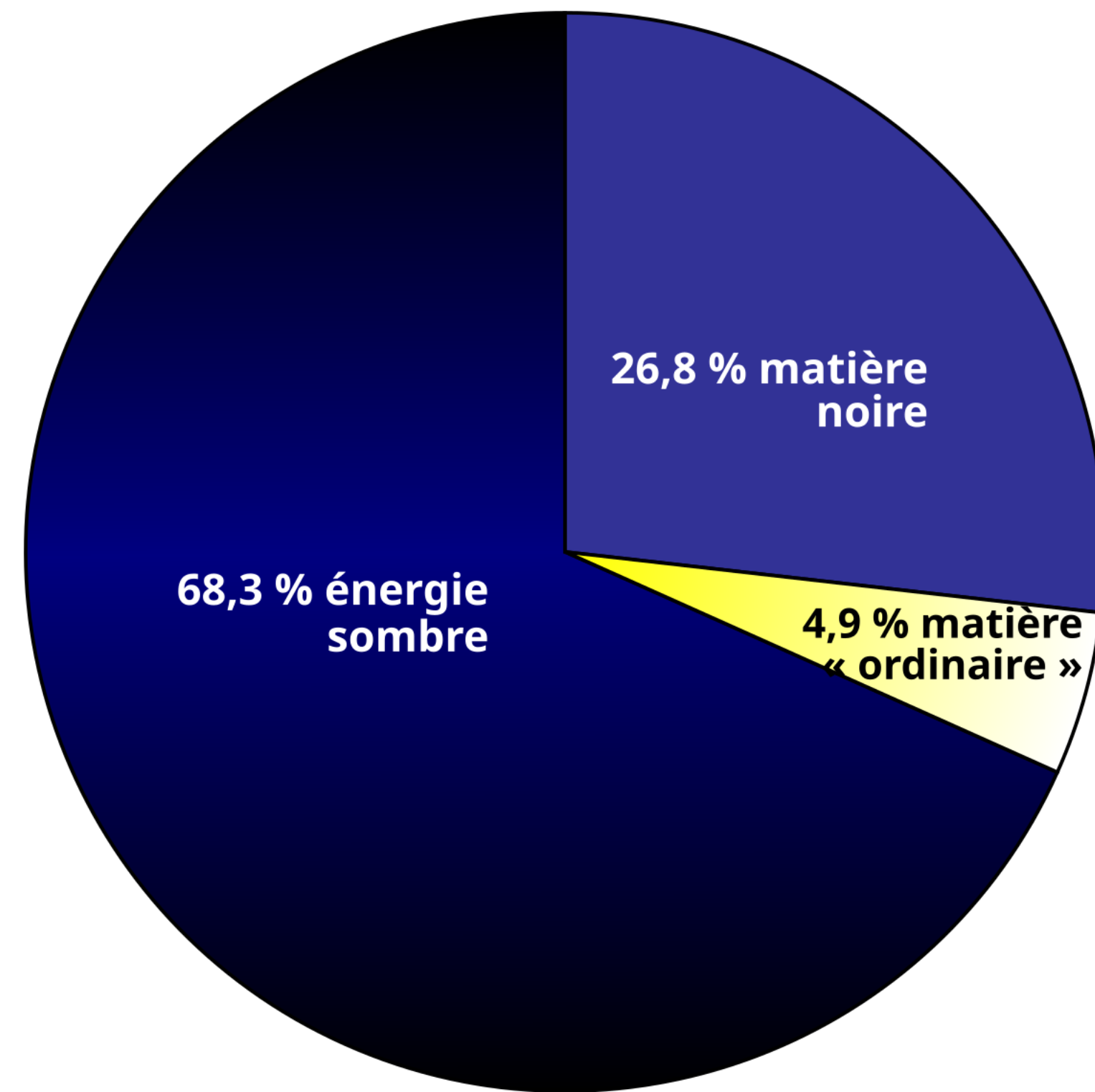
<https://physicsopenlab.org/2020/09/08/measurement-of-the-milky-way-rotation/>



<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-matiere-sombre-46/>

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)

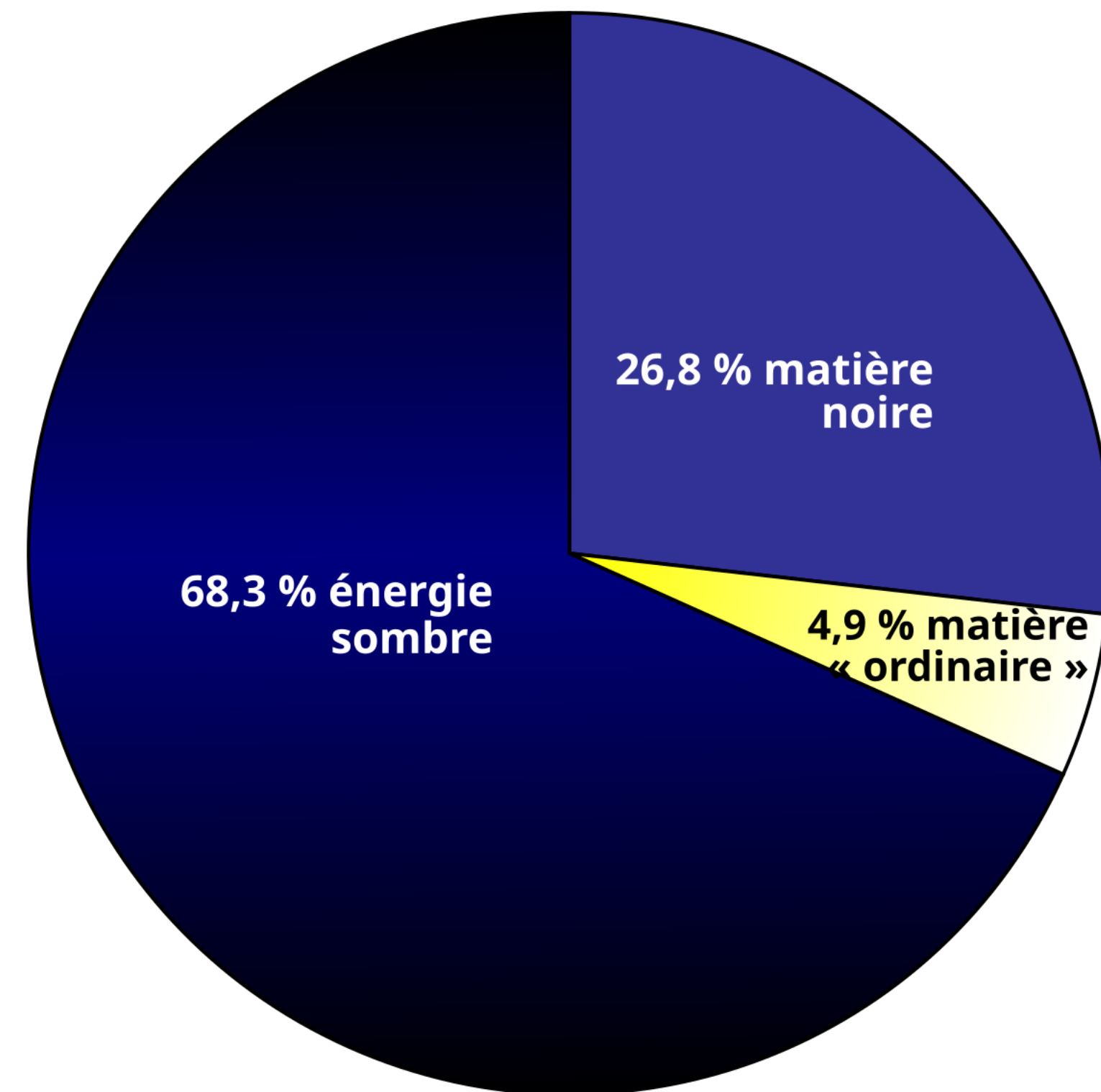
Grandes questions: C'est quoi la matière noire?



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

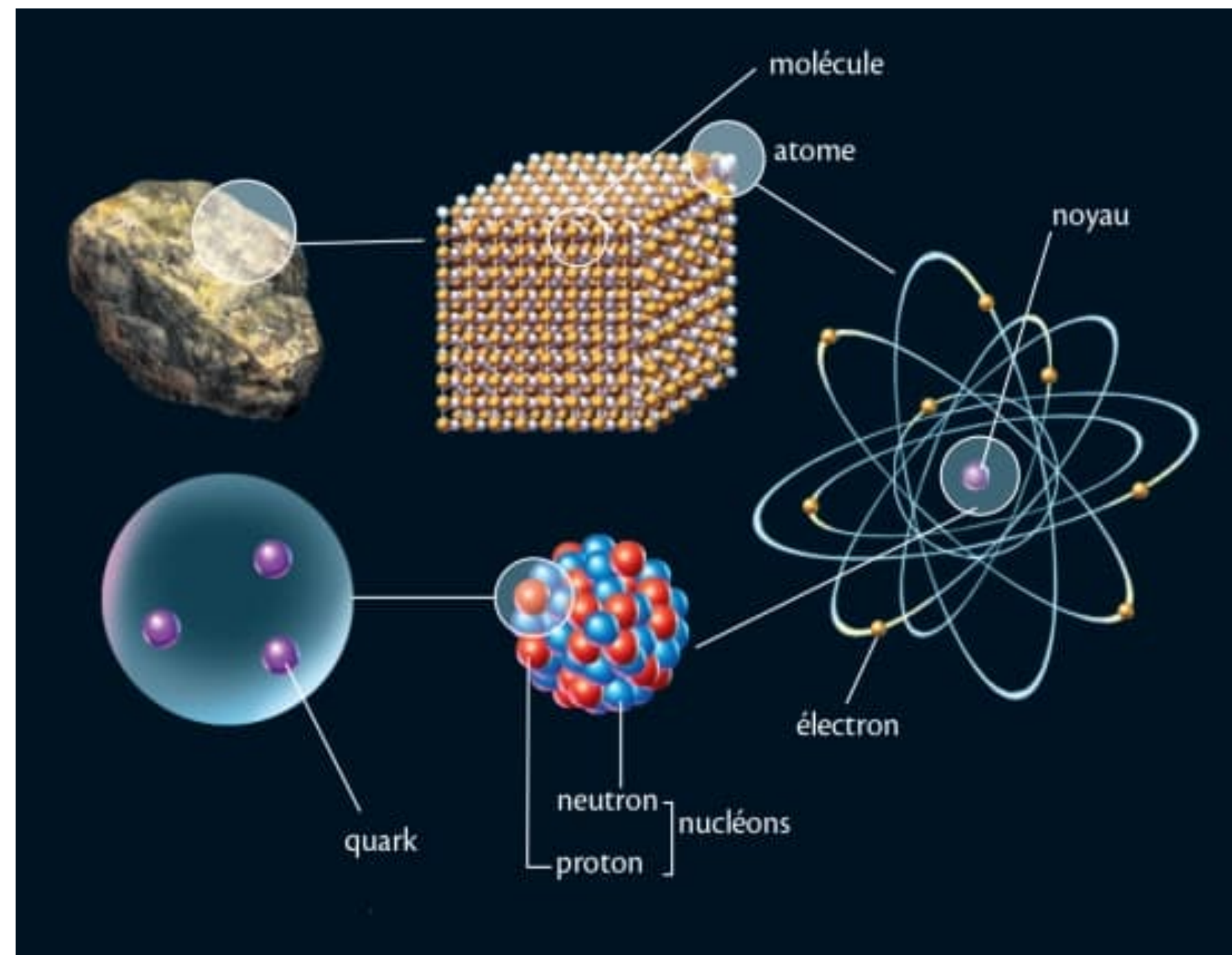
C'est quoi la matière noire?
→ Physique des saveurs!



Pas ça...

<https://fr.louisvuitton.com/fra-fr/produits/parfum-matiere-noire-014421/LP0011>

Comprenons mieux la matière ordinaire...

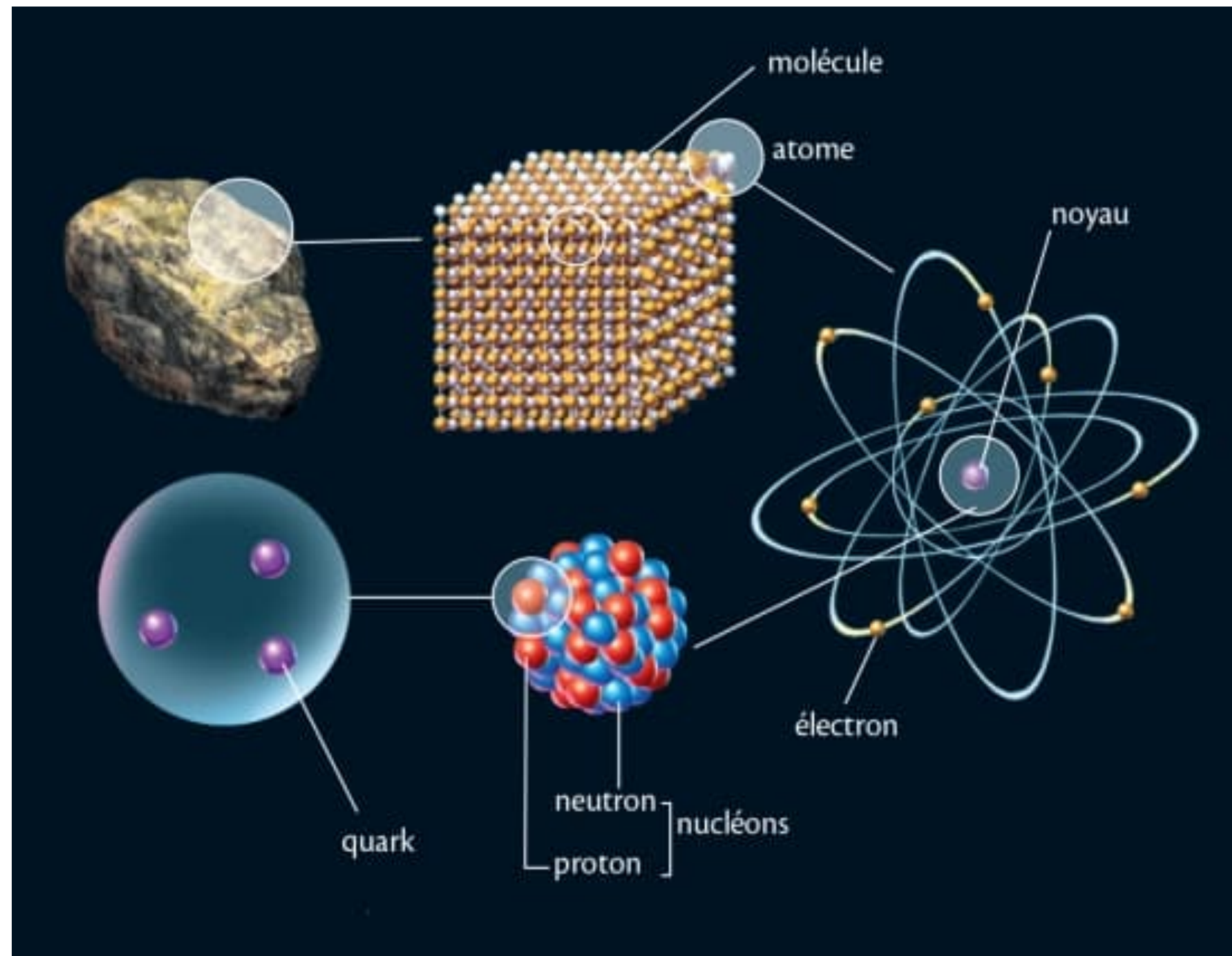
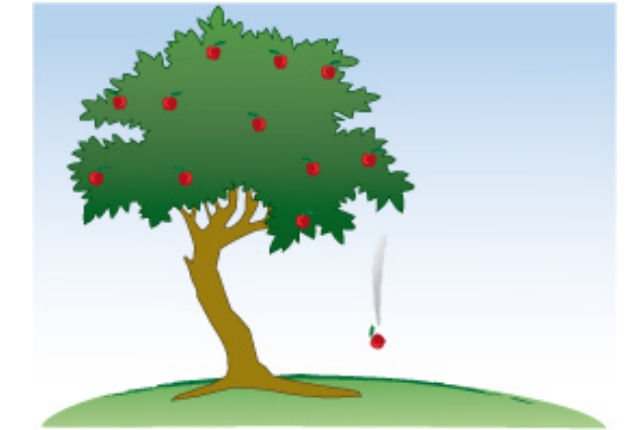


https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Les_composants_de_la_mati%C3%A8re/1314215

Comprenons mieux la matière ordinaire...

... et ses interactions

- La gravitation
 - Attraction entre les corps massifs

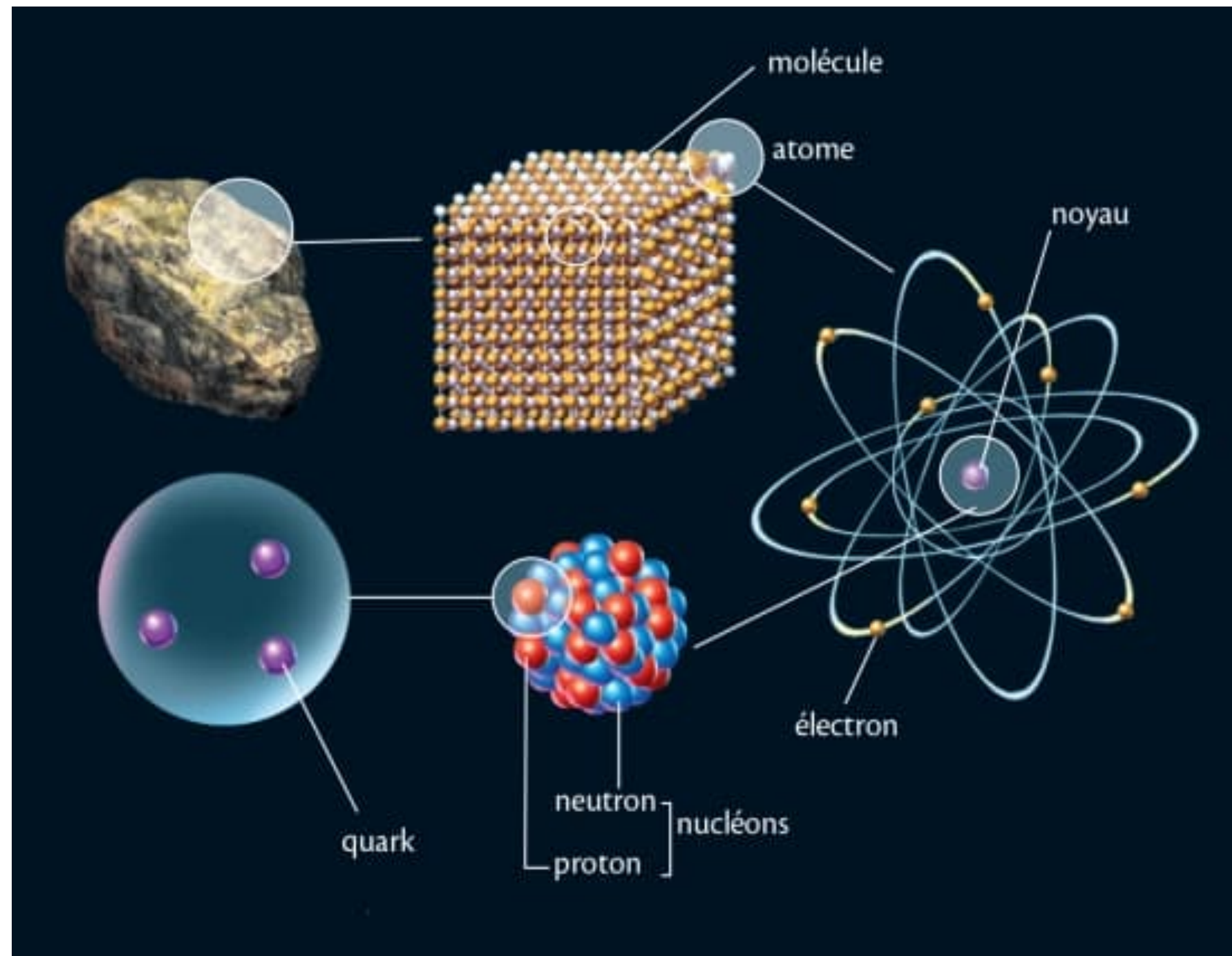
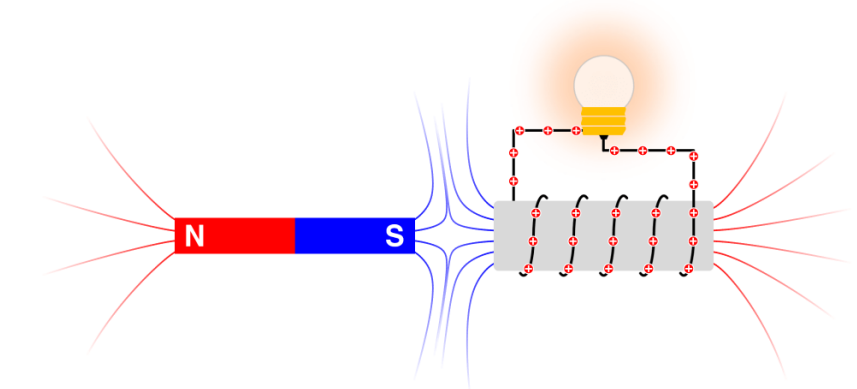
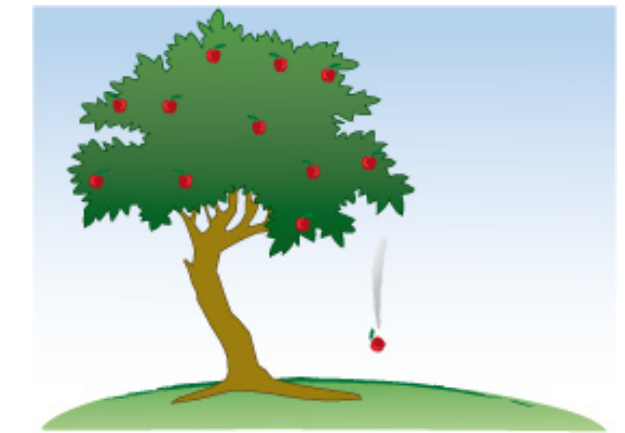


https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Les_composants_de_la_mati%C3%A8re/1314215

Comprenons mieux la matière ordinaire...

... et ses interactions

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

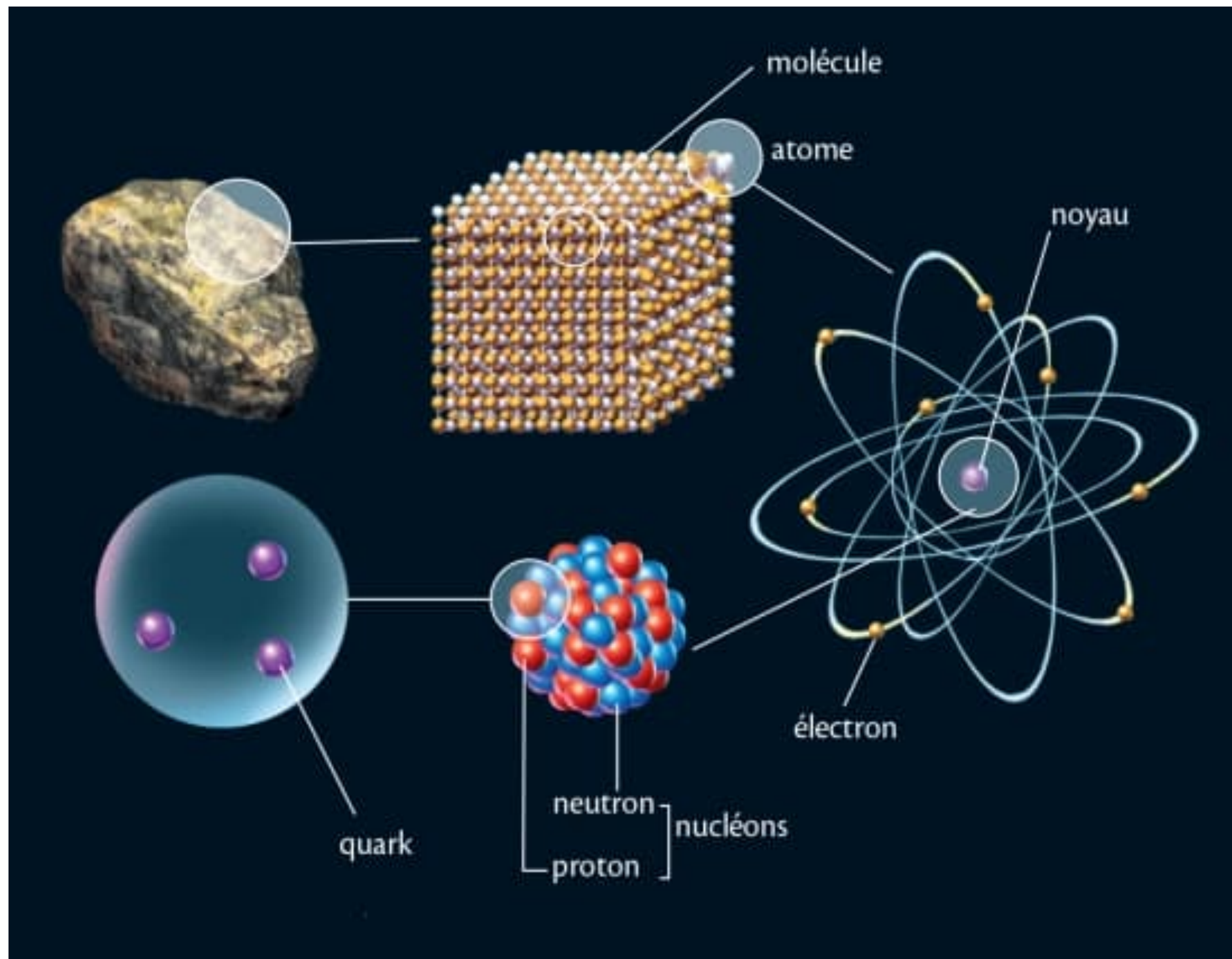
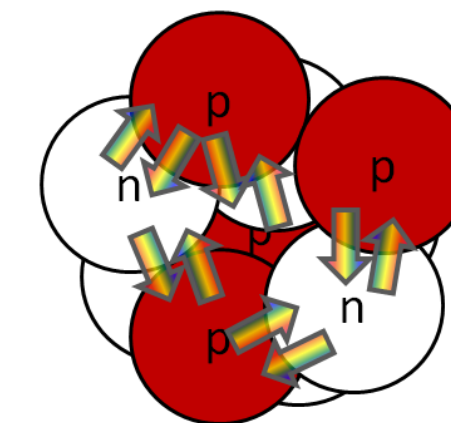
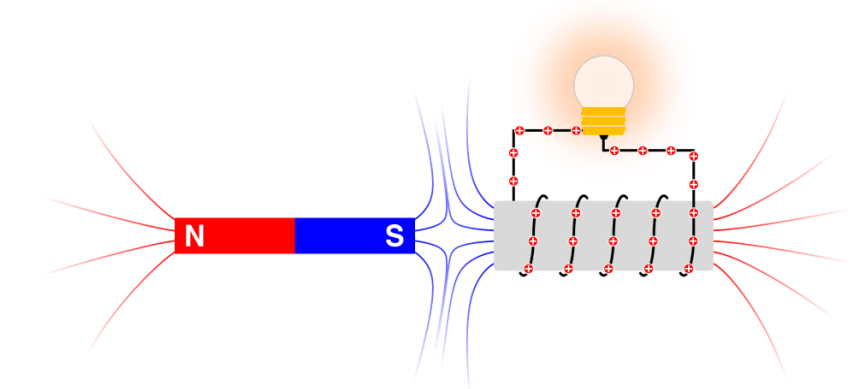
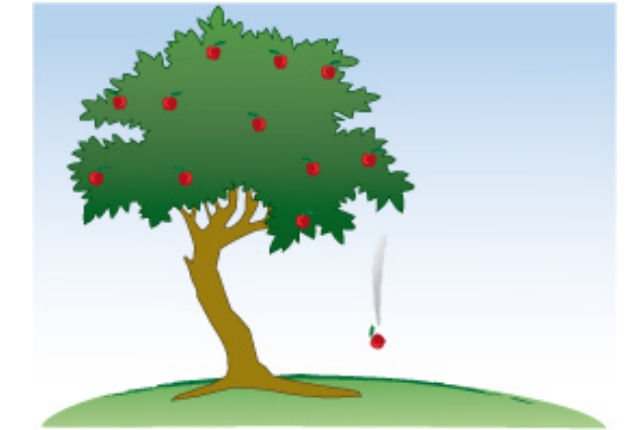


https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Les_composants_de_la_mati%C3%A8re/1314215

Comprenons mieux la matière ordinaire...

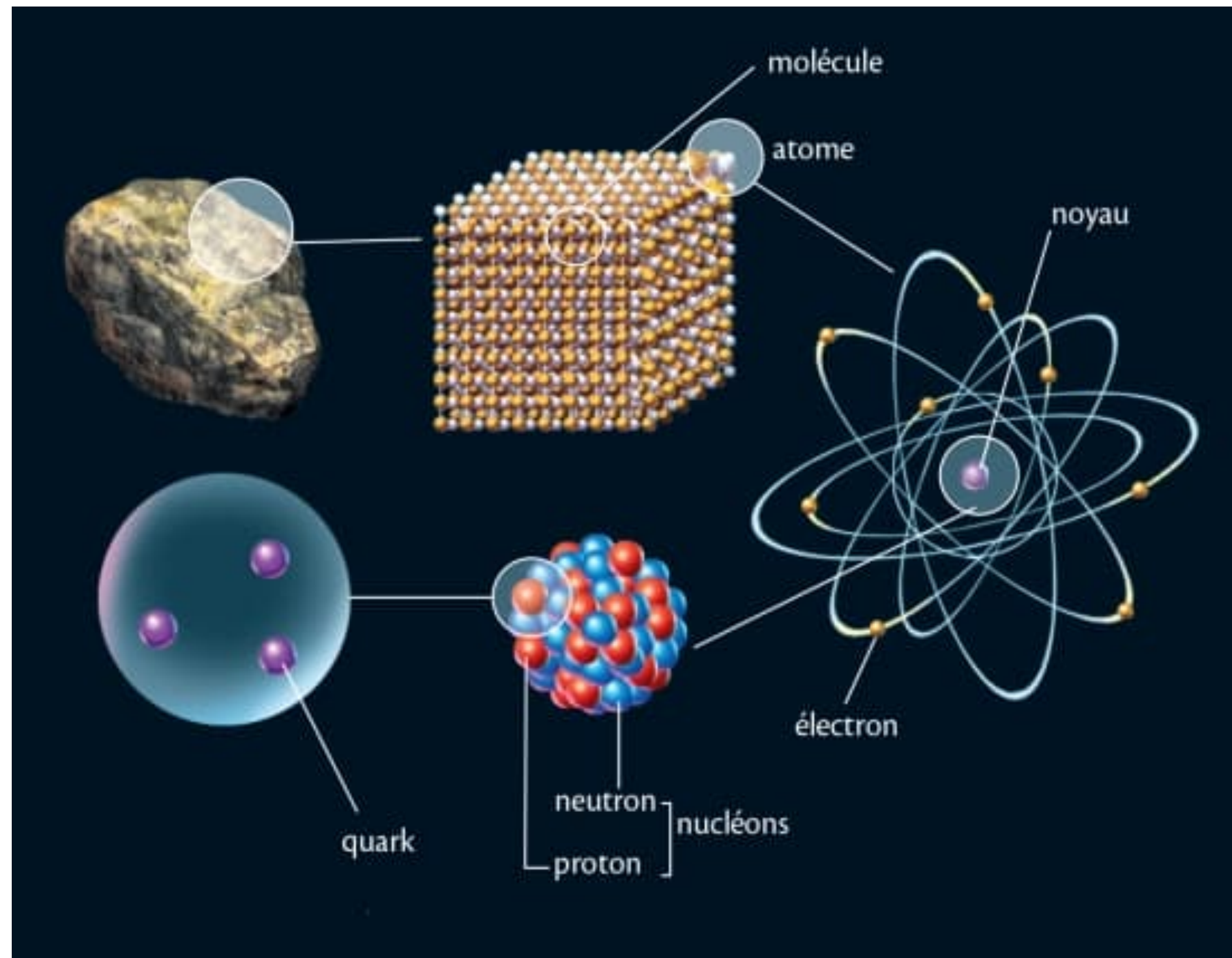
... et ses interactions

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



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

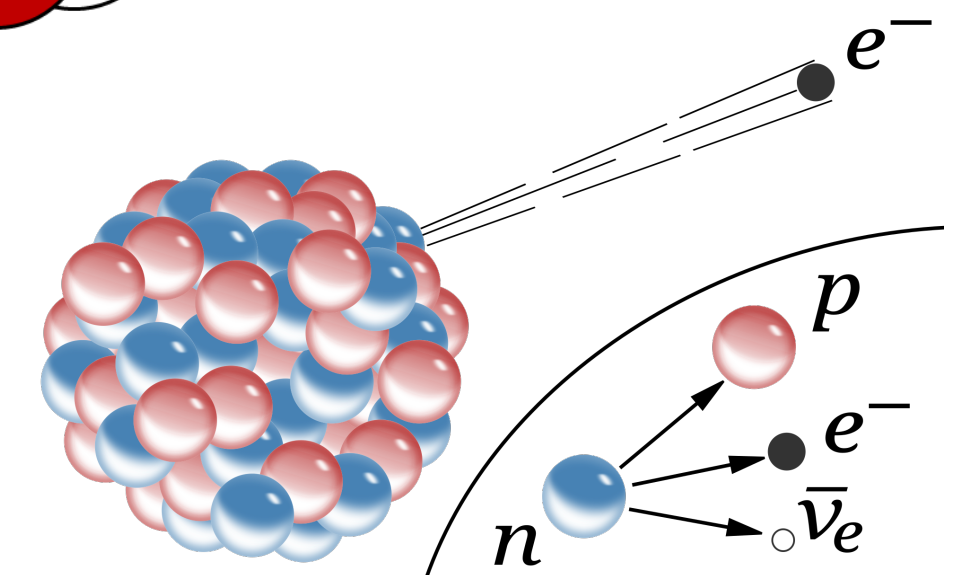
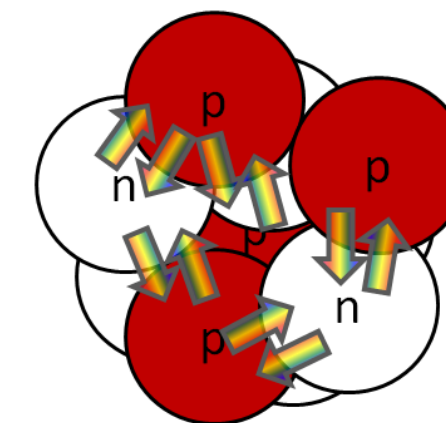
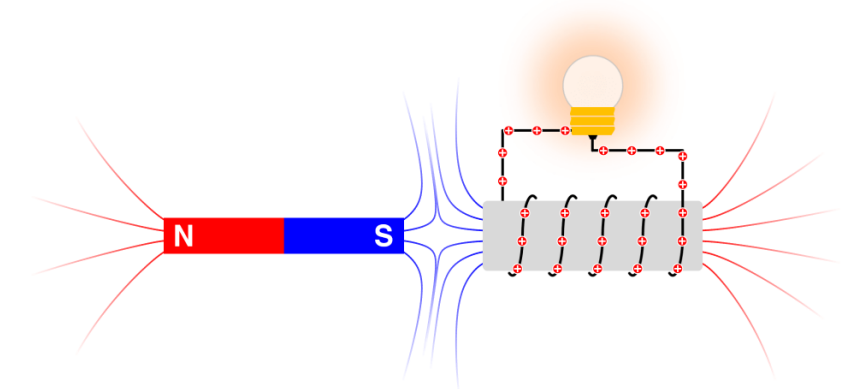
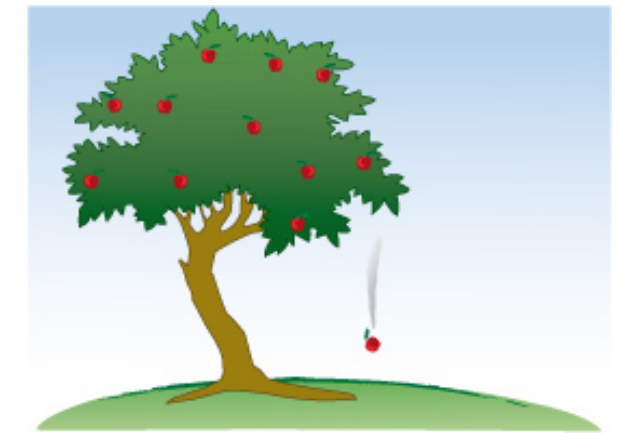
Comprenons mieux la matière ordinaire...



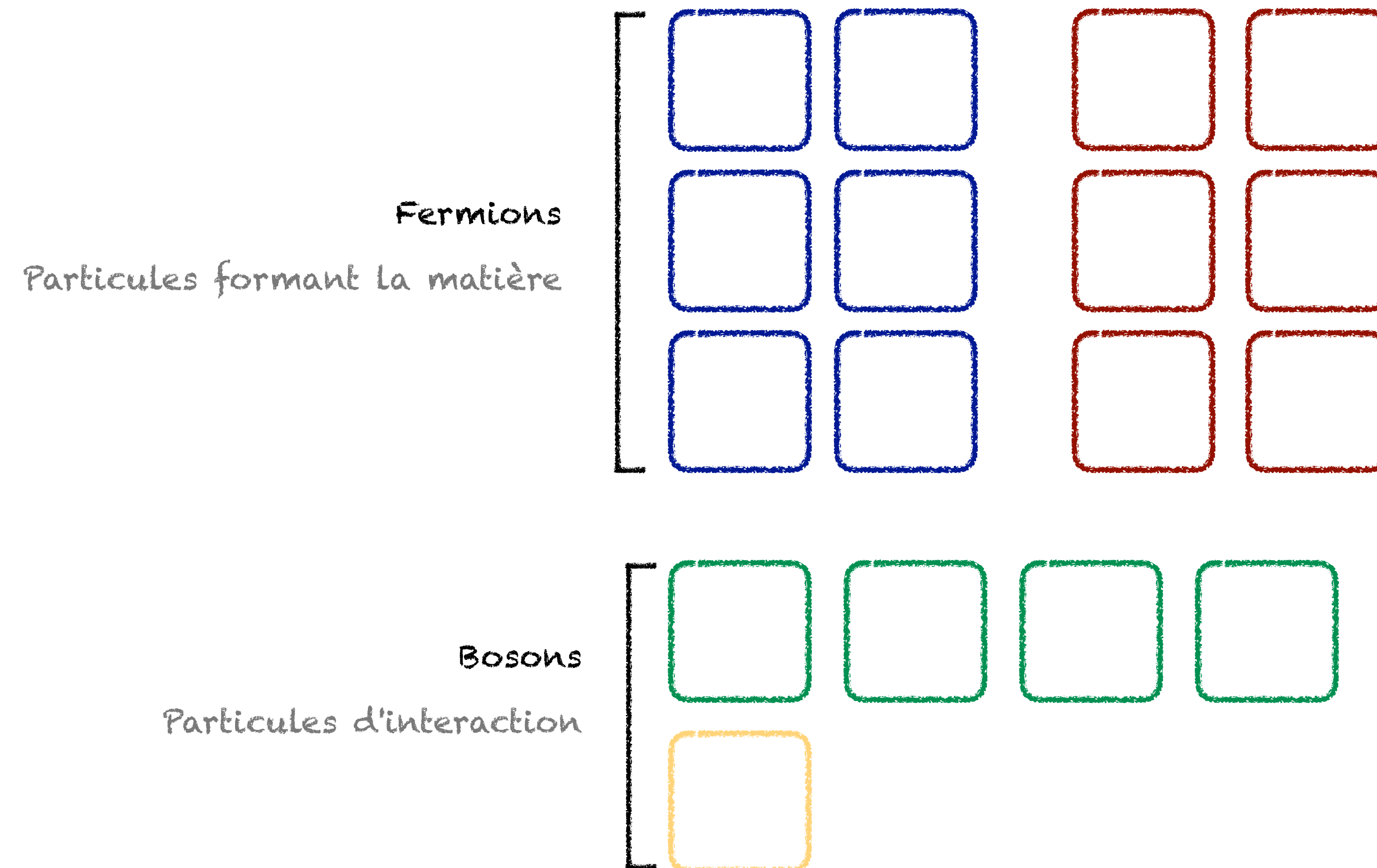
https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Les_composants_de_la_mati%C3%A8re/1314215

... et ses interactions

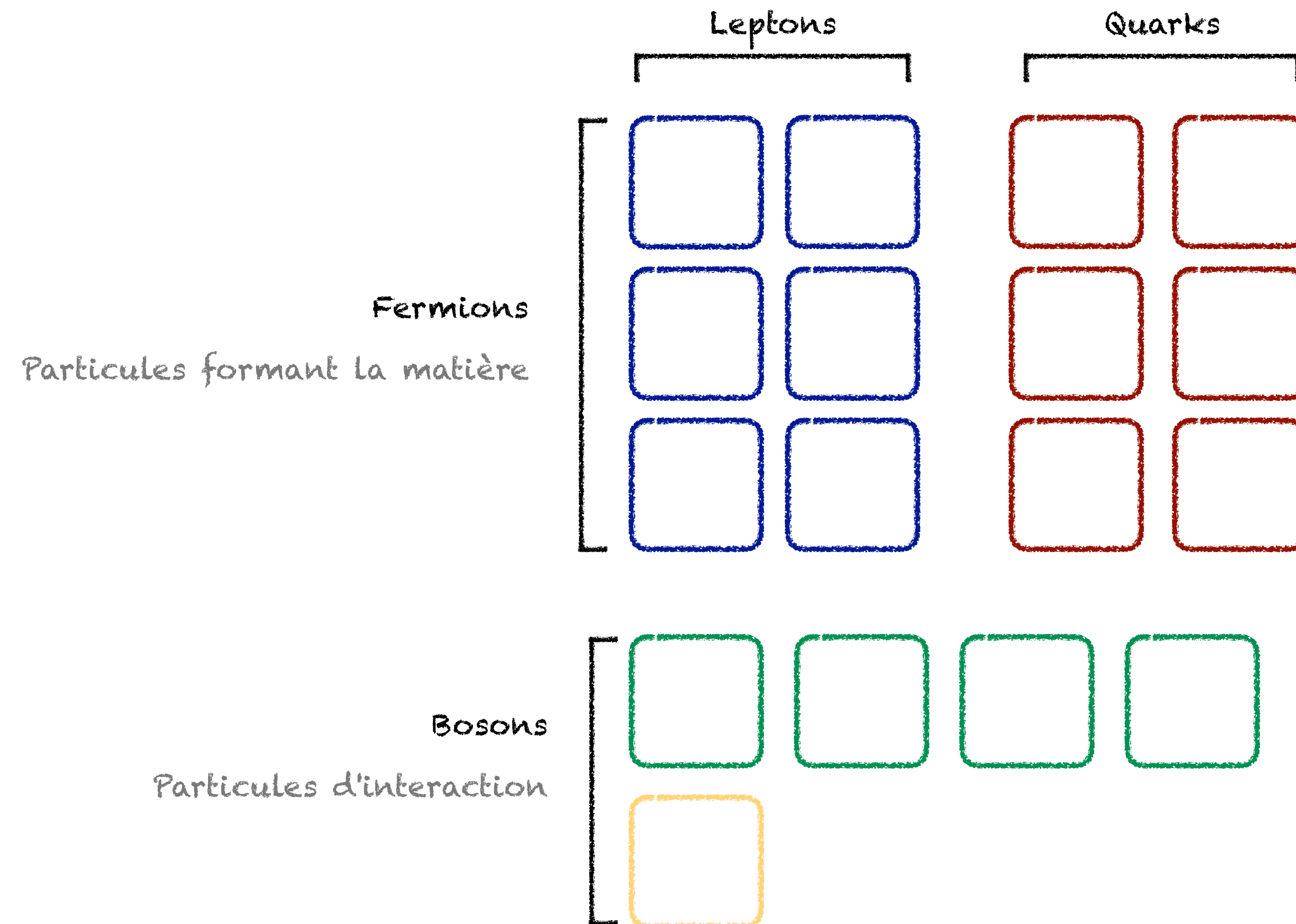
- La gravitation
 - Attraction entre les corps massifs
- L'interaction électromagnétique
 - Attraction / répulsion entre particules chargées
- L'interaction nucléaire forte
 - Cohésion du noyau atomique
- L'interaction nucléaire faible
 - Transformation des particules



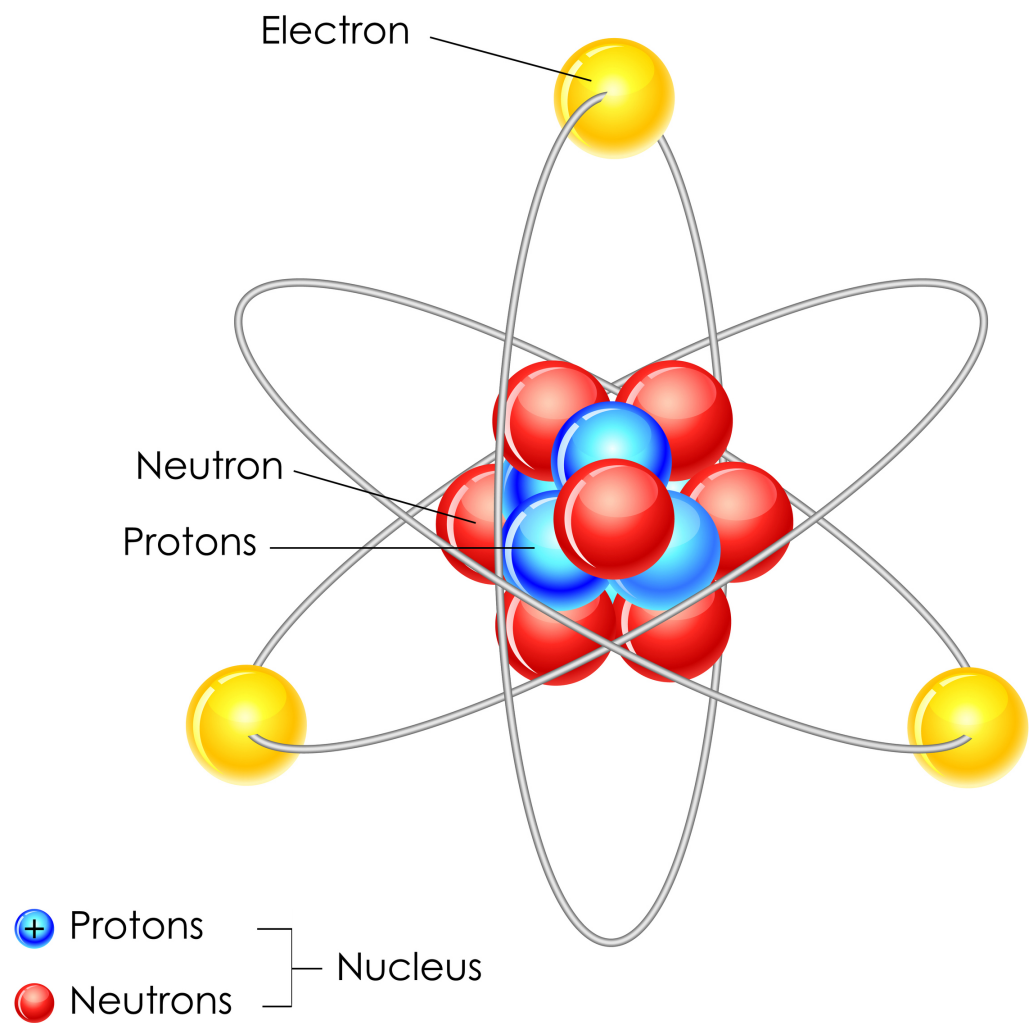
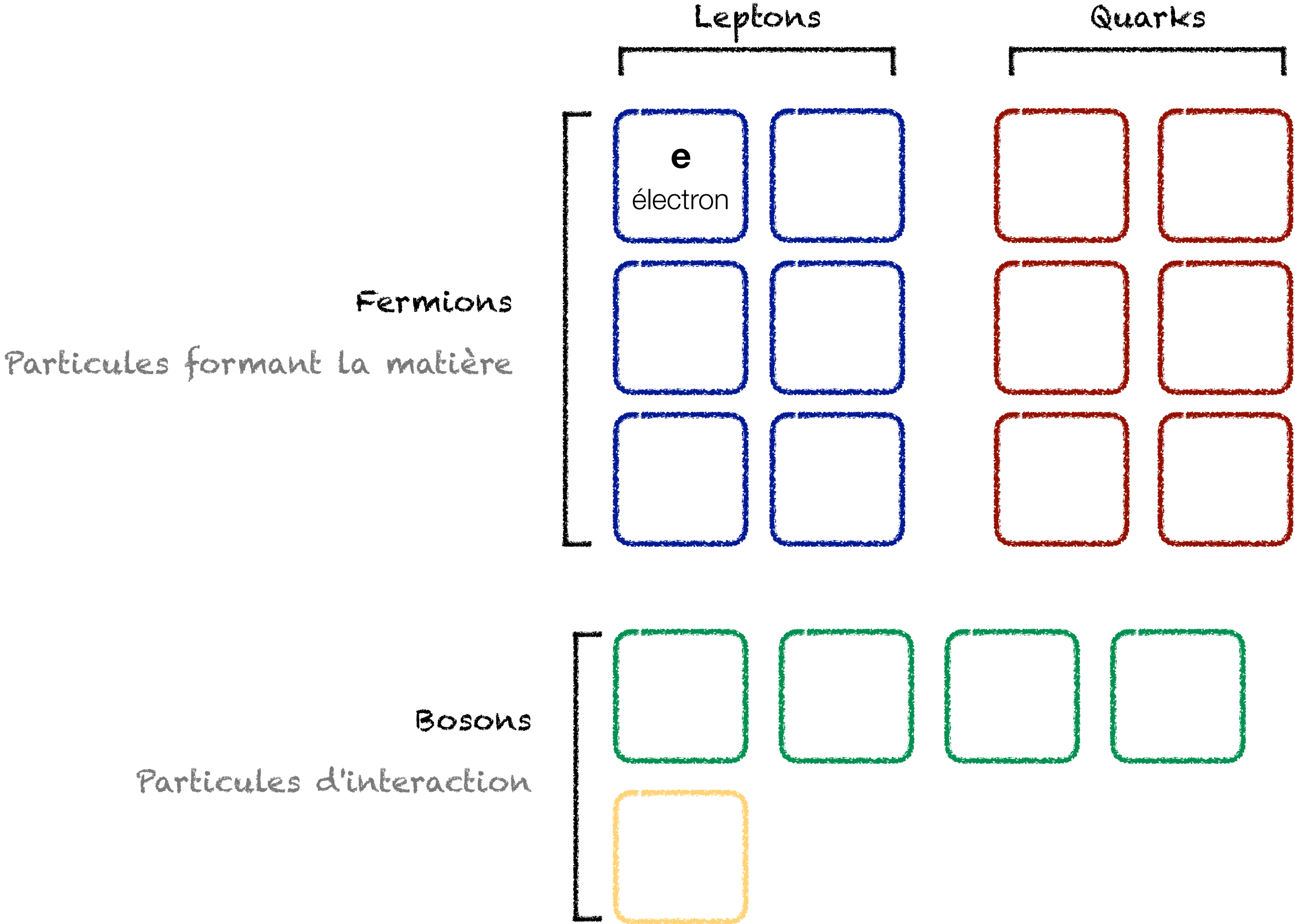
Petites particules: Catégorisation dans le « modèle standard »



Petites particules: Catégorisation dans le « modèle standard »

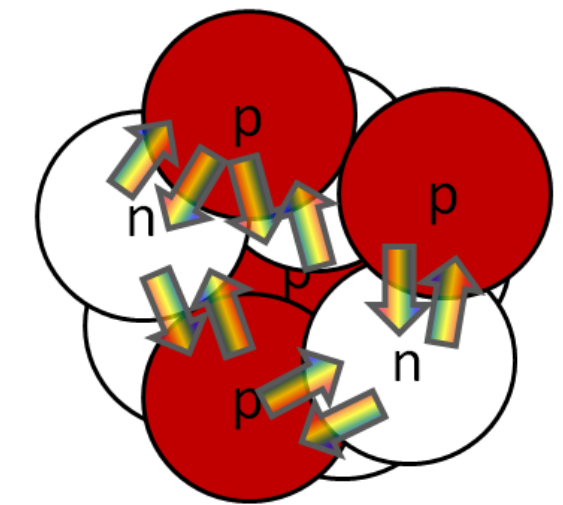
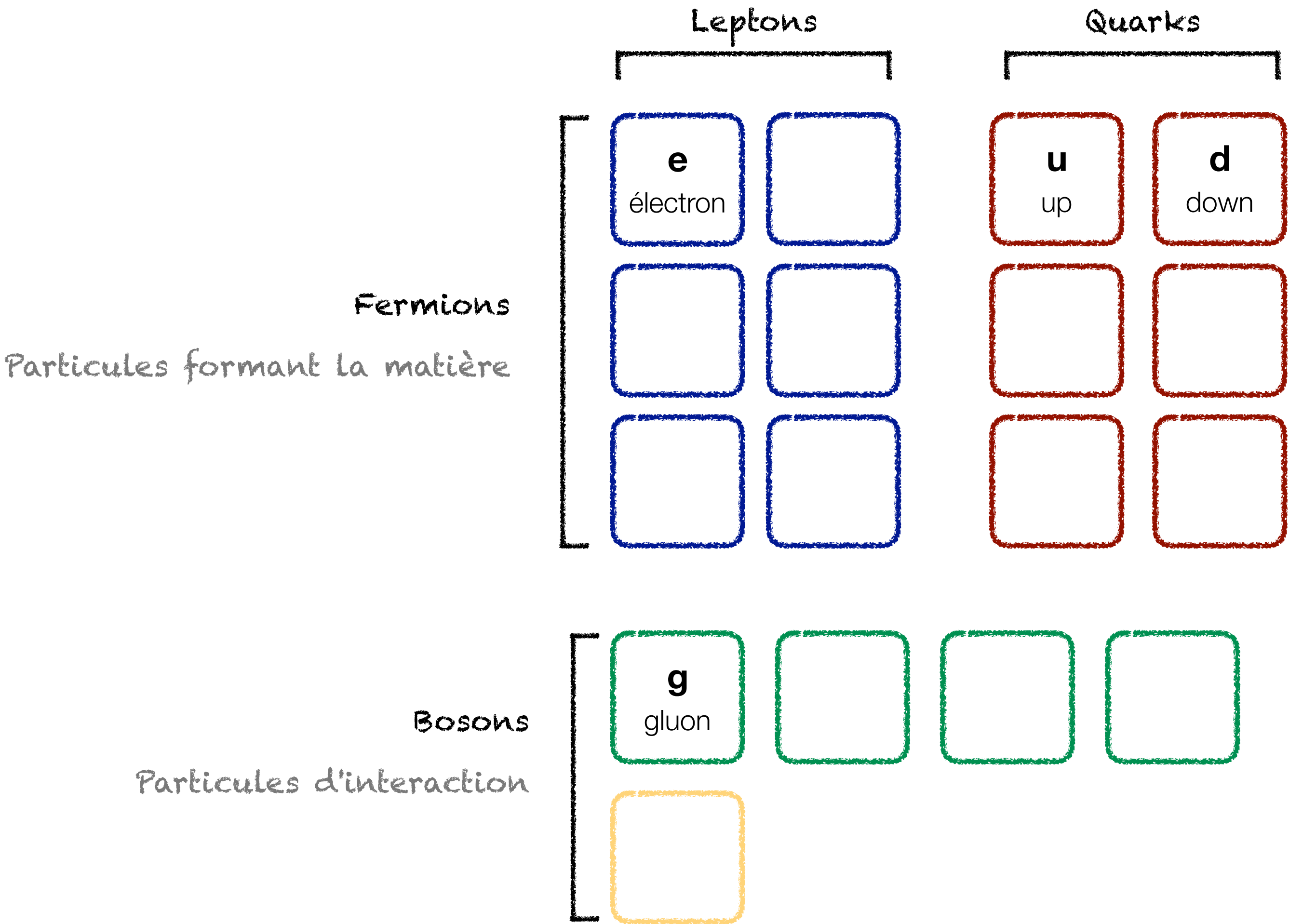


Petites particules: Catégorisation dans le « modèle standard »

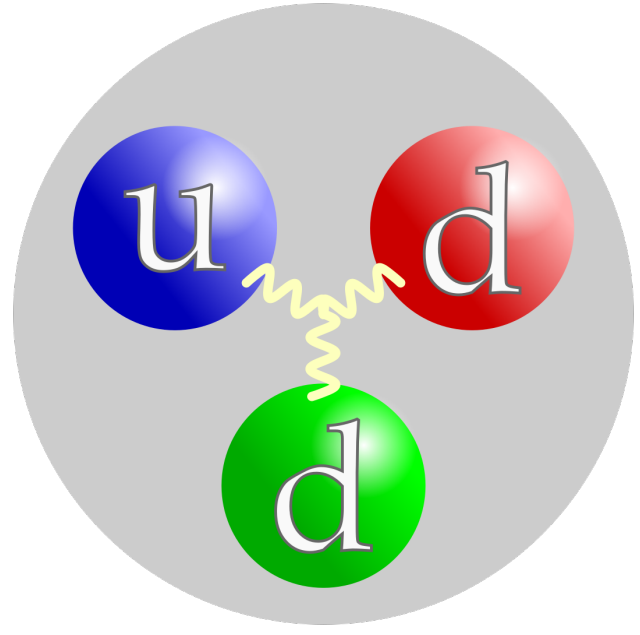


<https://kidspressmagazine.com/science-for-kids/misc/misc/structure-atoms.html>

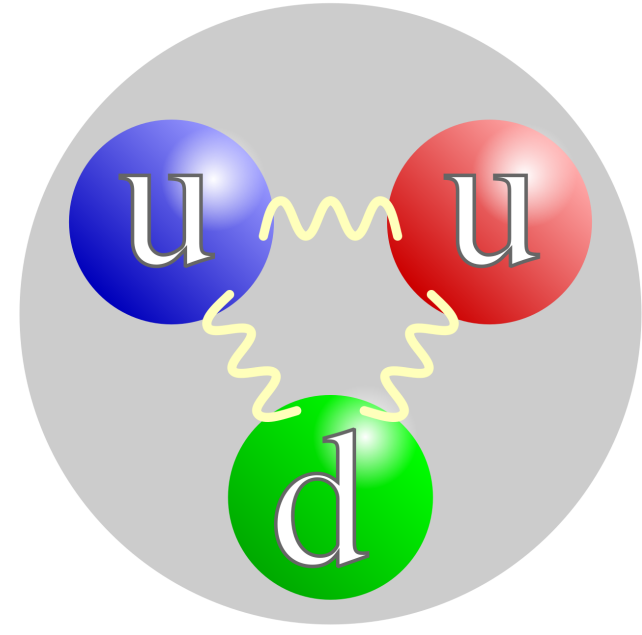
Petites particules: Catégorisation dans le « modèle standard »



Interaction forte
Quarks reliés par des gluons

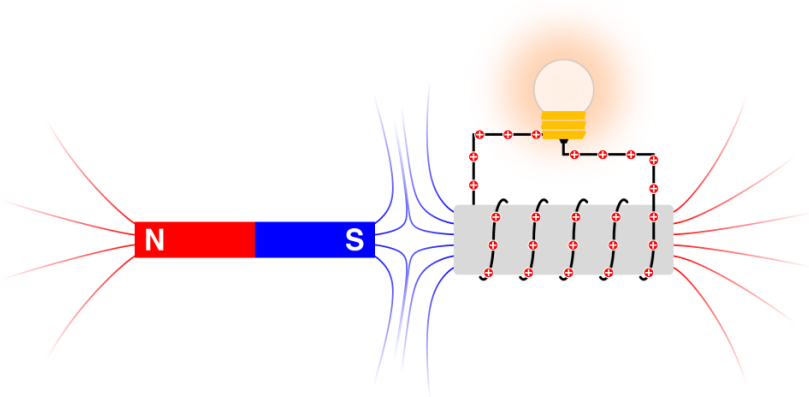
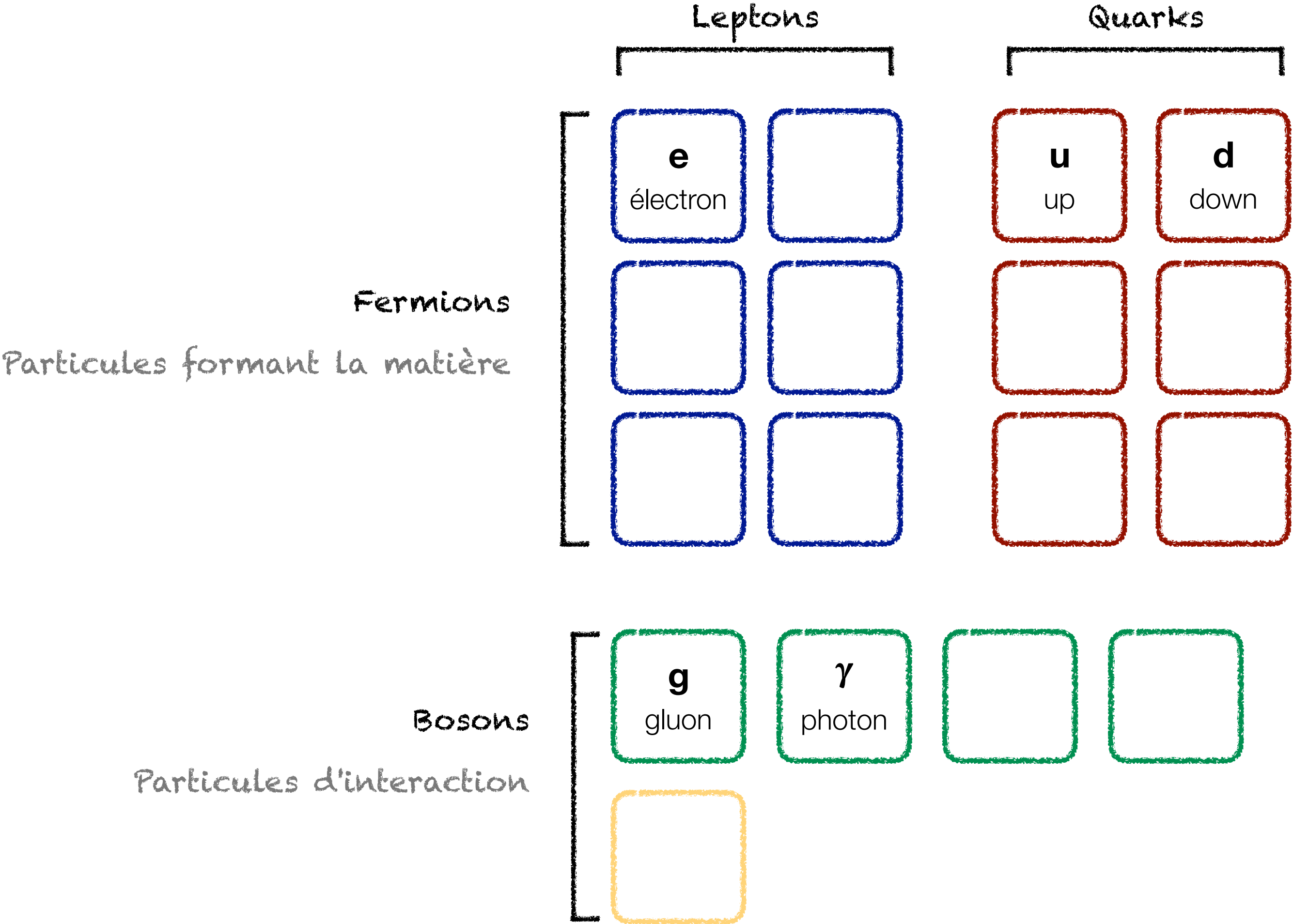


Neutron

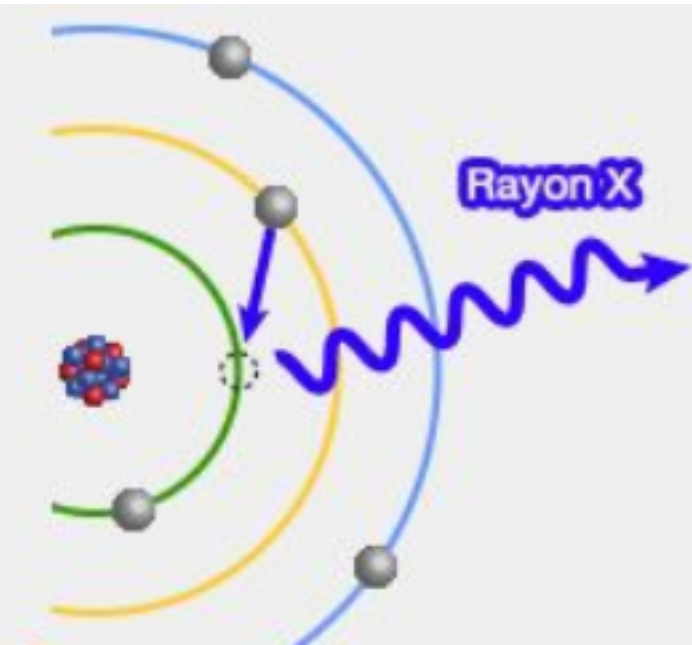


Proton

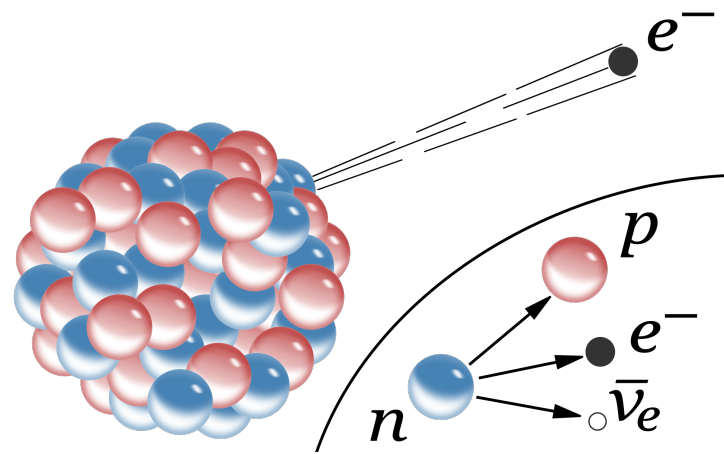
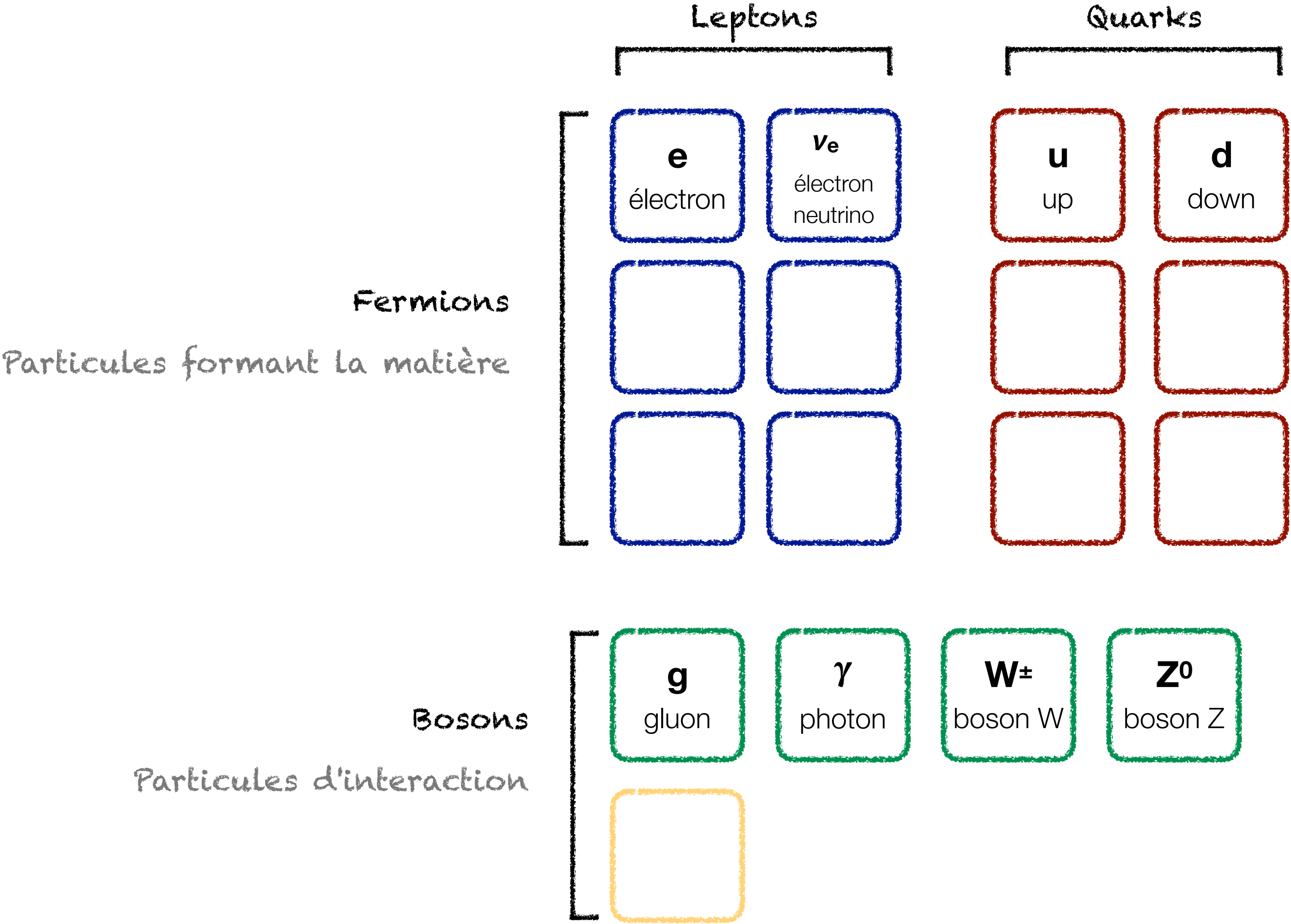
Petites particules: Catégorisation dans le « modèle standard »



Interaction électromagnétique
Particules chargées électriquement
s'échangent des photons

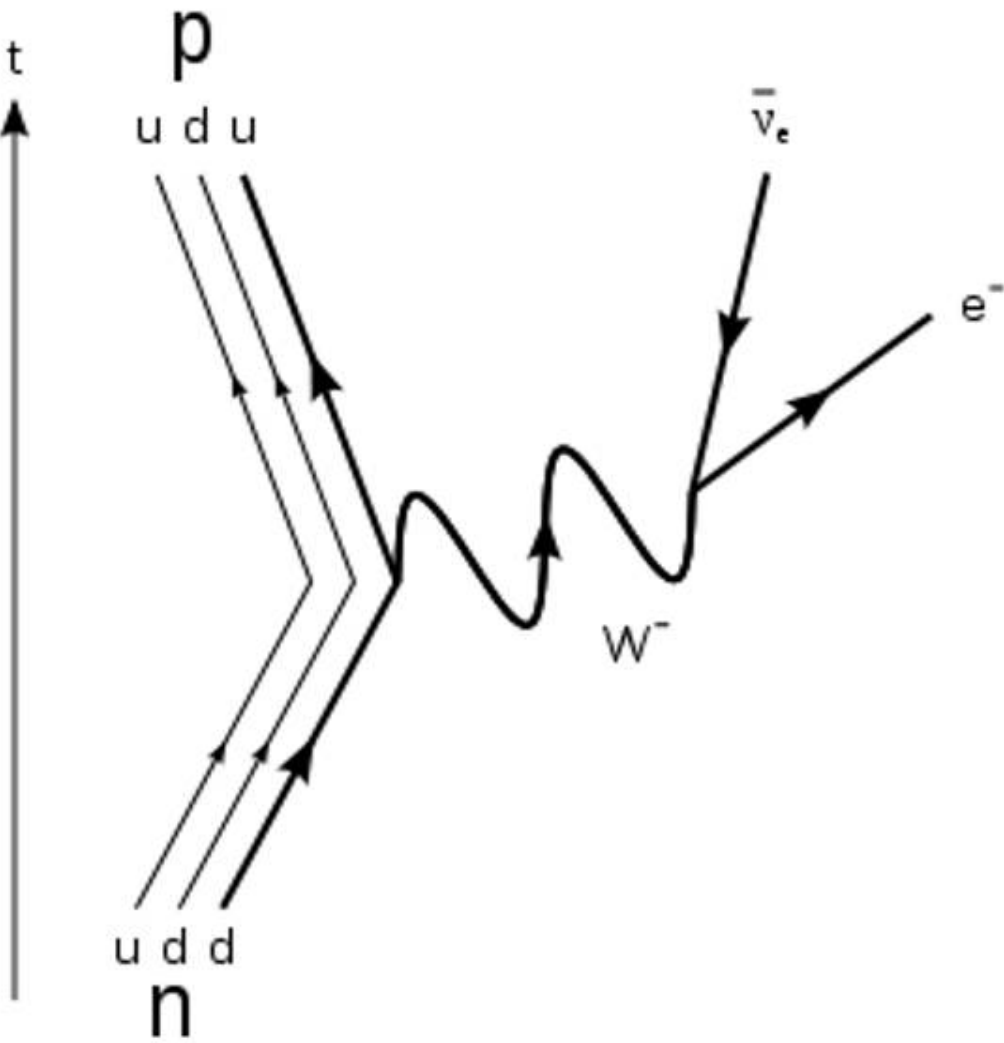


Petites particules: Catégorisation dans le « modèle standard »

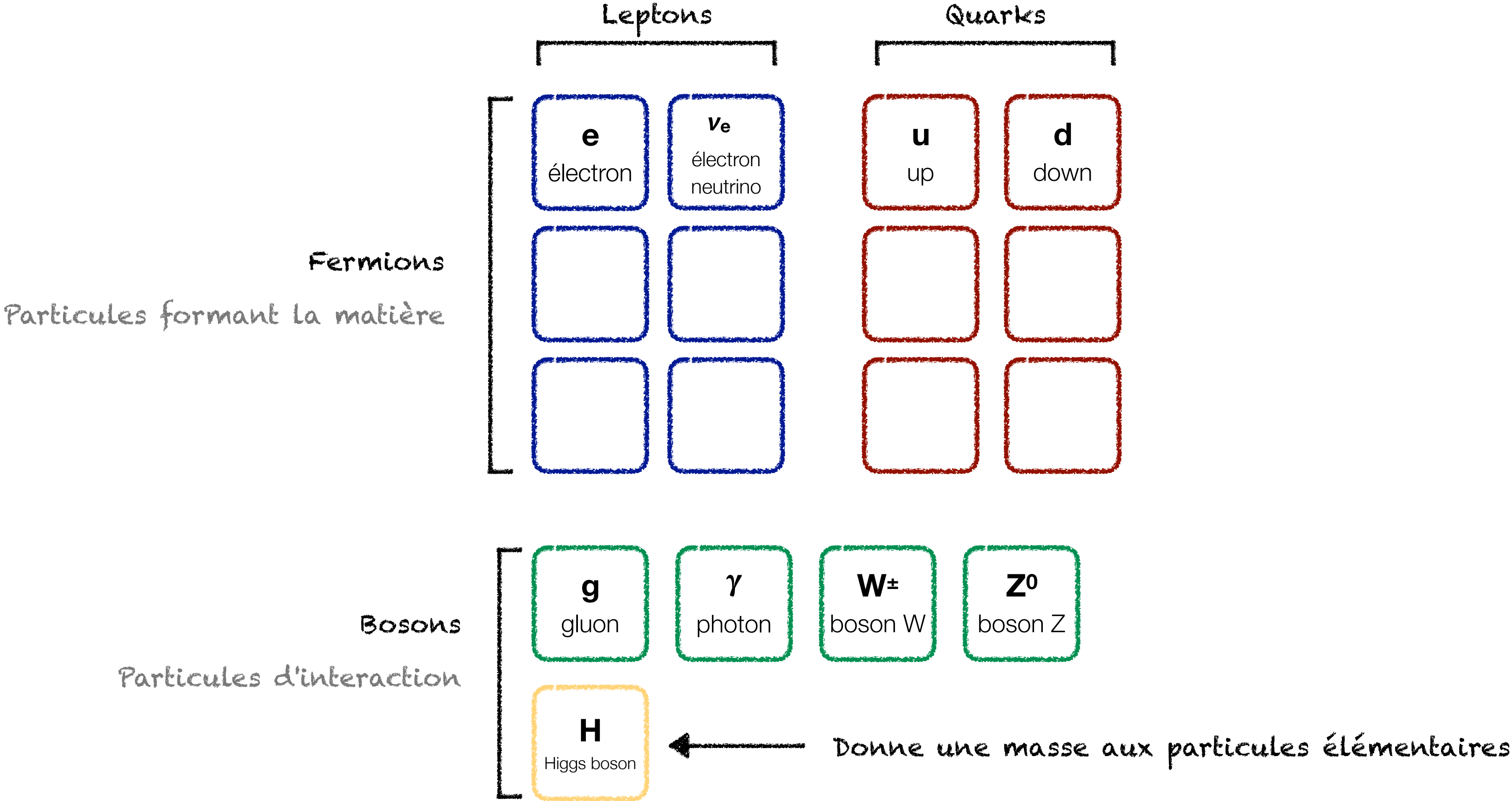


Interaction faible

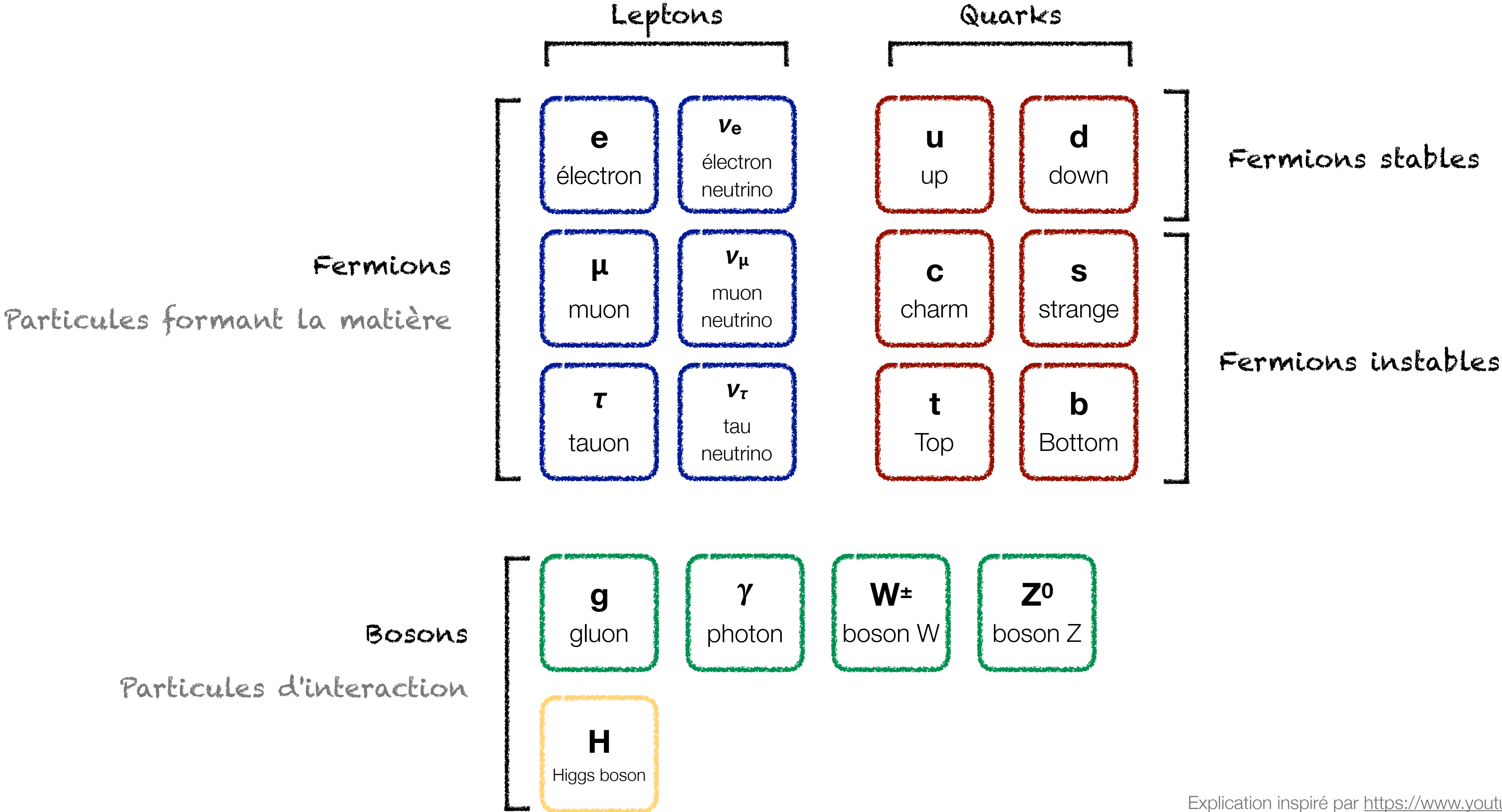
Modifie la nature des particules
Échange de masse ou charge entre fermions



Petites particules: Catégorisation dans le « modèle standard »

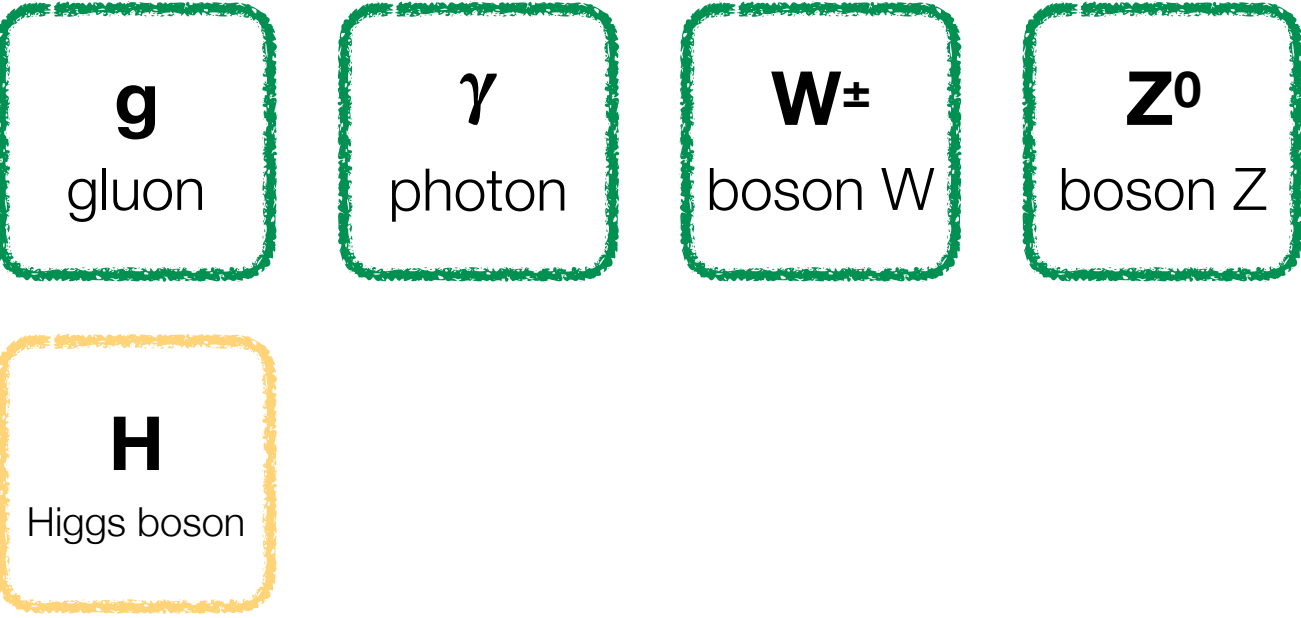
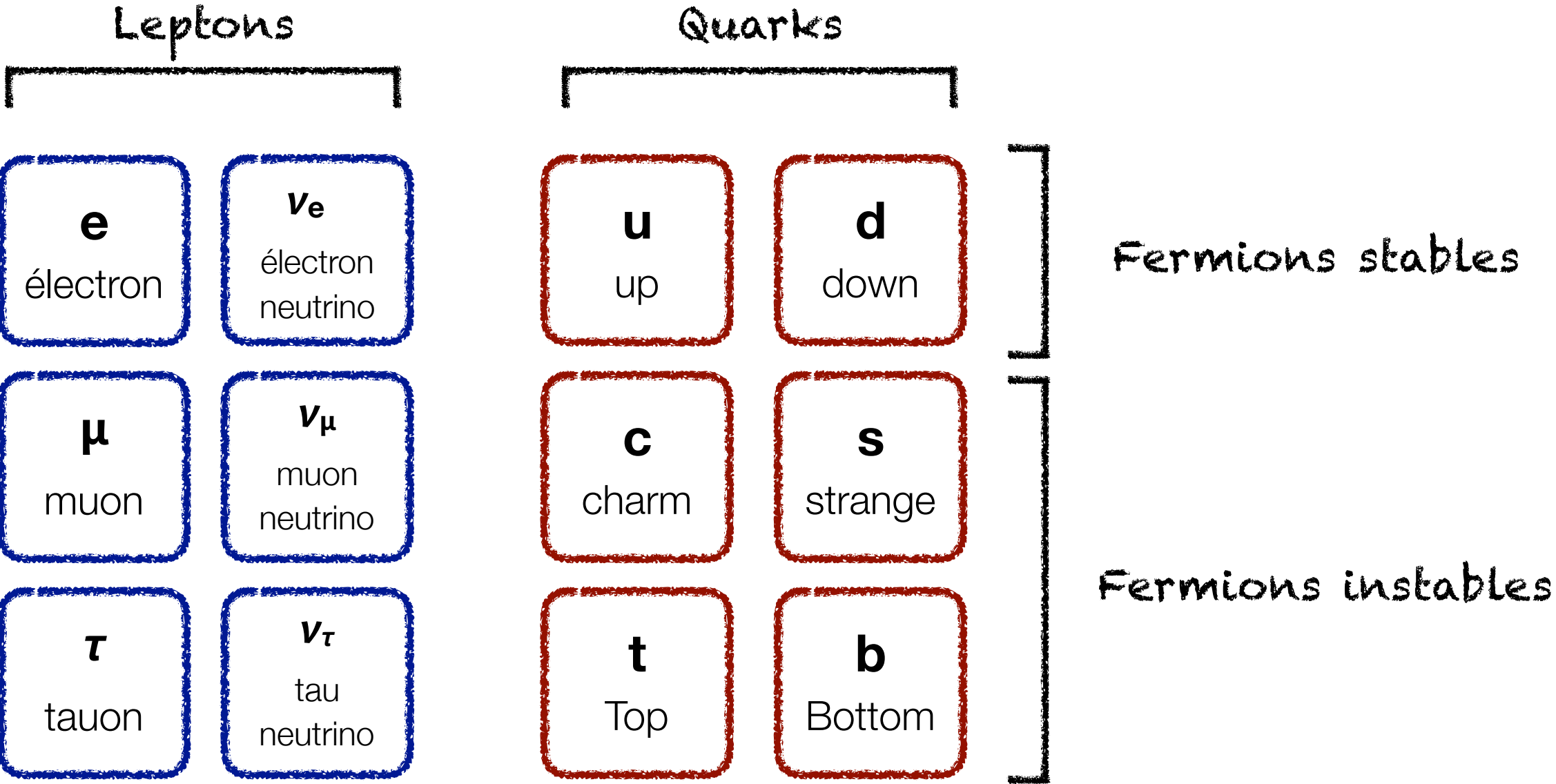


Petites particules: Catégorisation dans le « modèle standard »



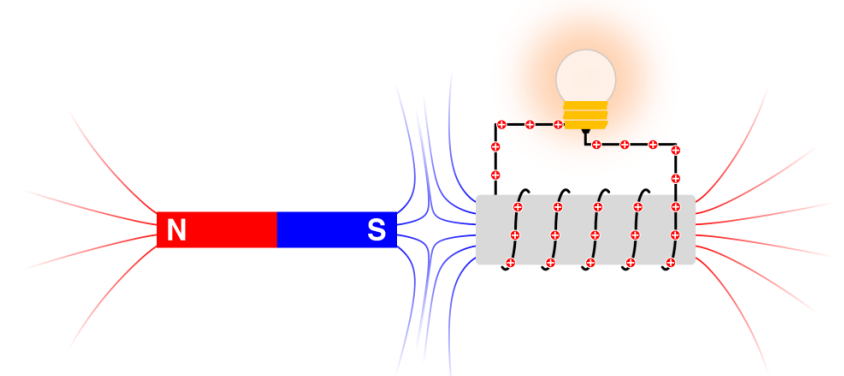
Explication inspiré par <https://www.youtube.com/watch?v=NimzDLjZsko>

Petites particules: Catégorisation dans le « modèle standard »

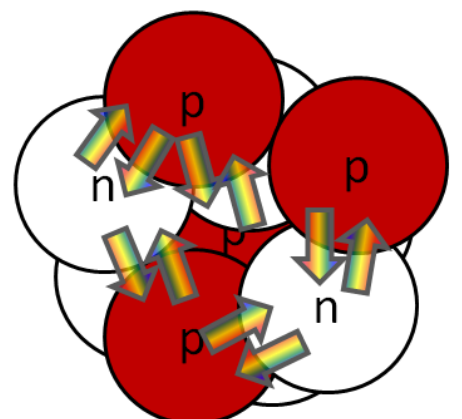


Trois interactions inclus dans le modèle standard
Mais pas la gravitation...

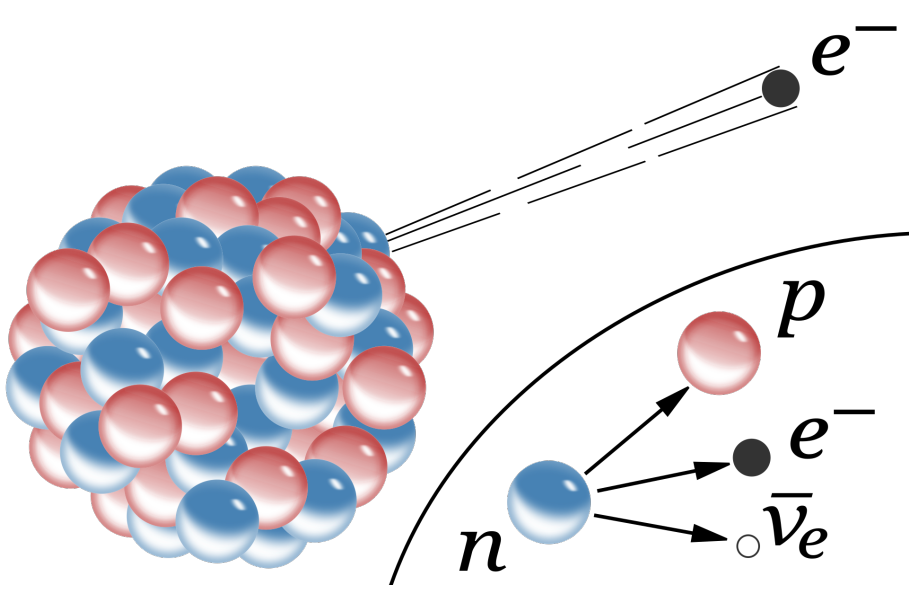
Interaction électromagnétique



Interaction forte



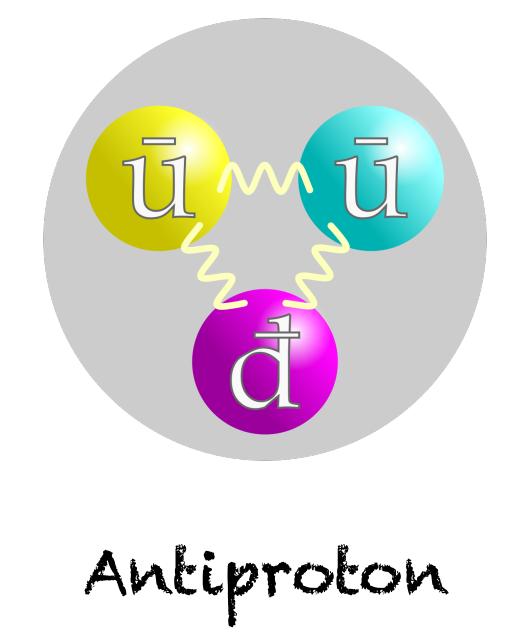
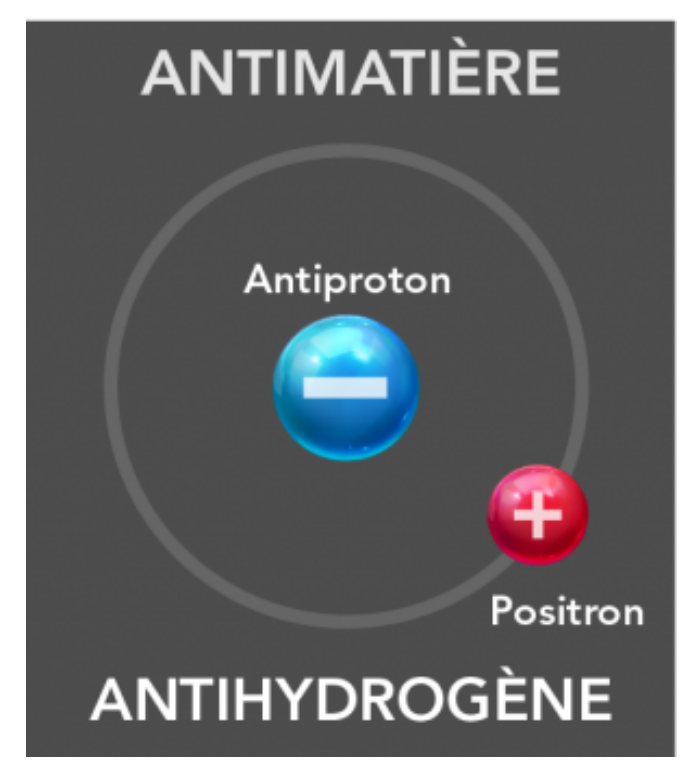
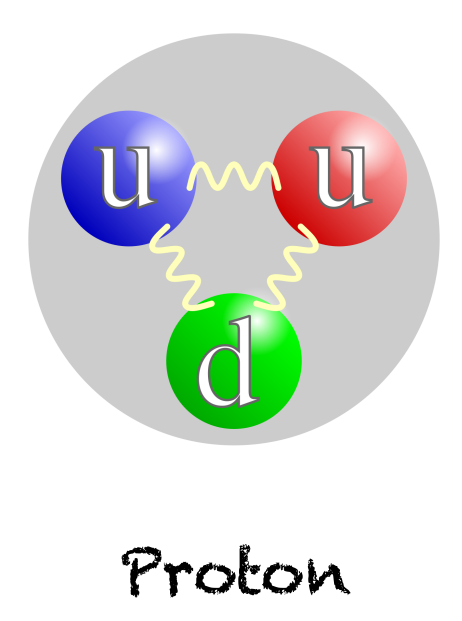
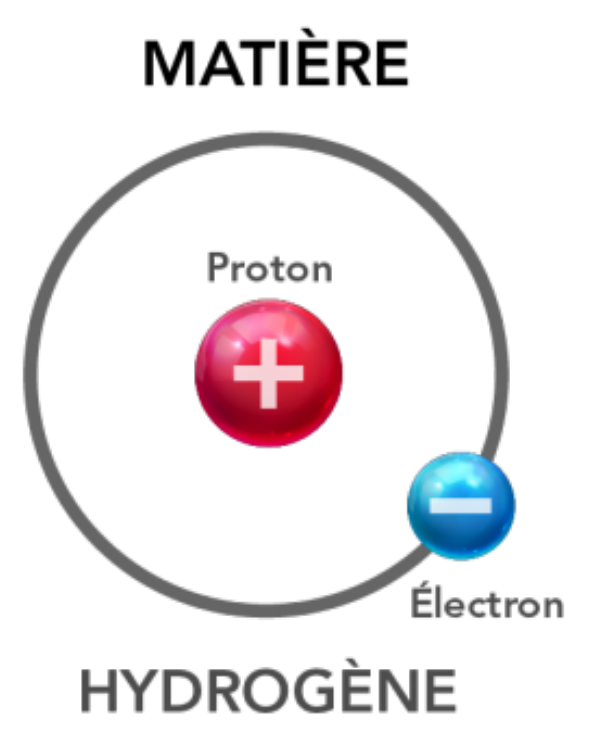
Interaction faible



C'était quoi l'antimatière?

Fermions
Particules formant la matière

Leptons		Quarks		Antileptons		Antiquarks	
e^- électron	ν_e électron neutrino	u up	d down	e^+ positron	$\bar{\nu}_e$ électron antineutrino	\bar{u} up	\bar{d} down
μ^- muon	ν_μ muon neutrino	c charm	s strange	μ^+ antimuo	$\bar{\nu}_\mu$ muon neutrino	\bar{c} charm	\bar{s} strange
τ^- tauon	ν_τ tau neutrino	t Top	b Bottom	τ^+ antitauon	$\bar{\nu}_\tau$ tau neutrino	\bar{t} Top	\bar{b} Bottom



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



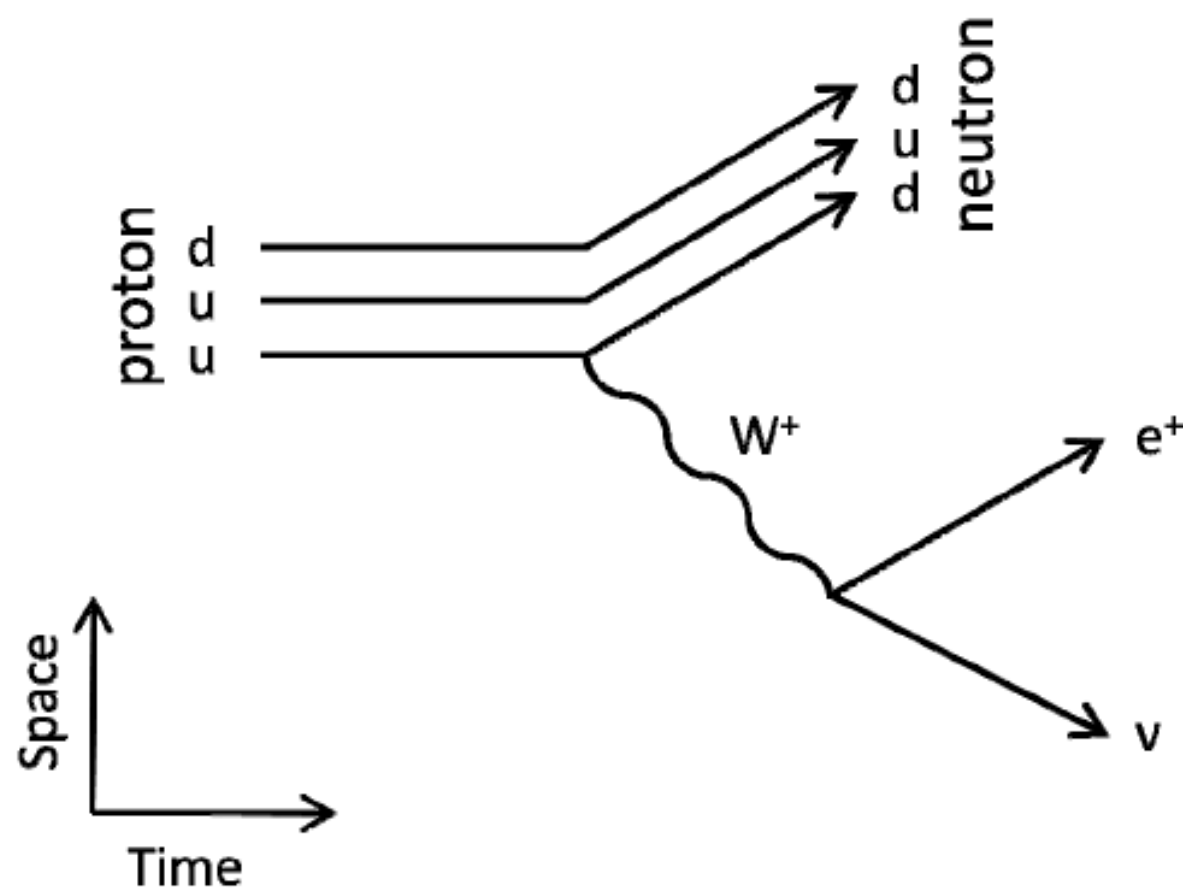
Quarks

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

Le succès du modèle standard: Prédiction du boson Z

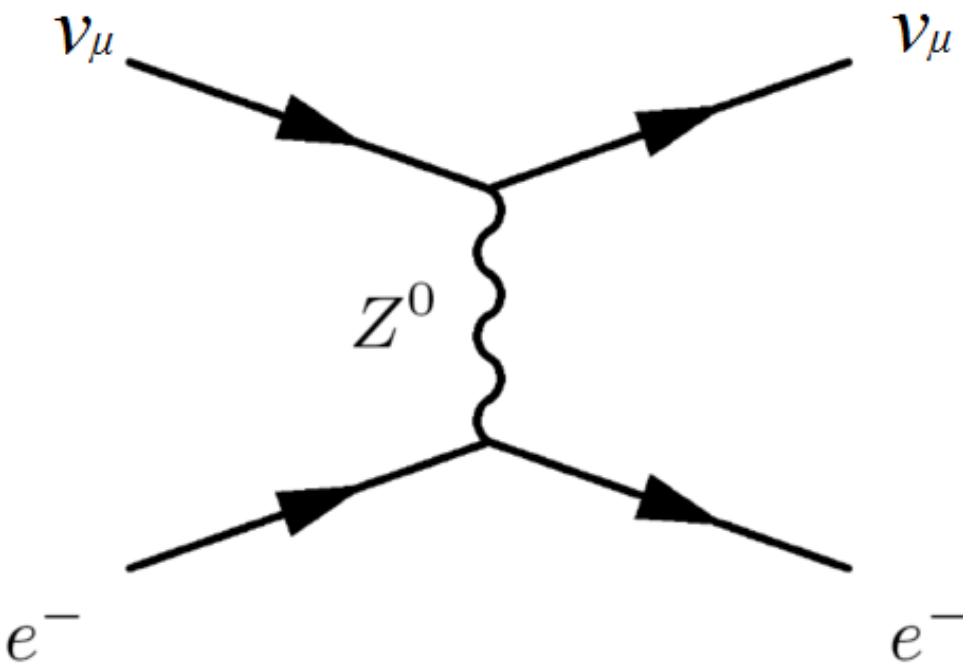
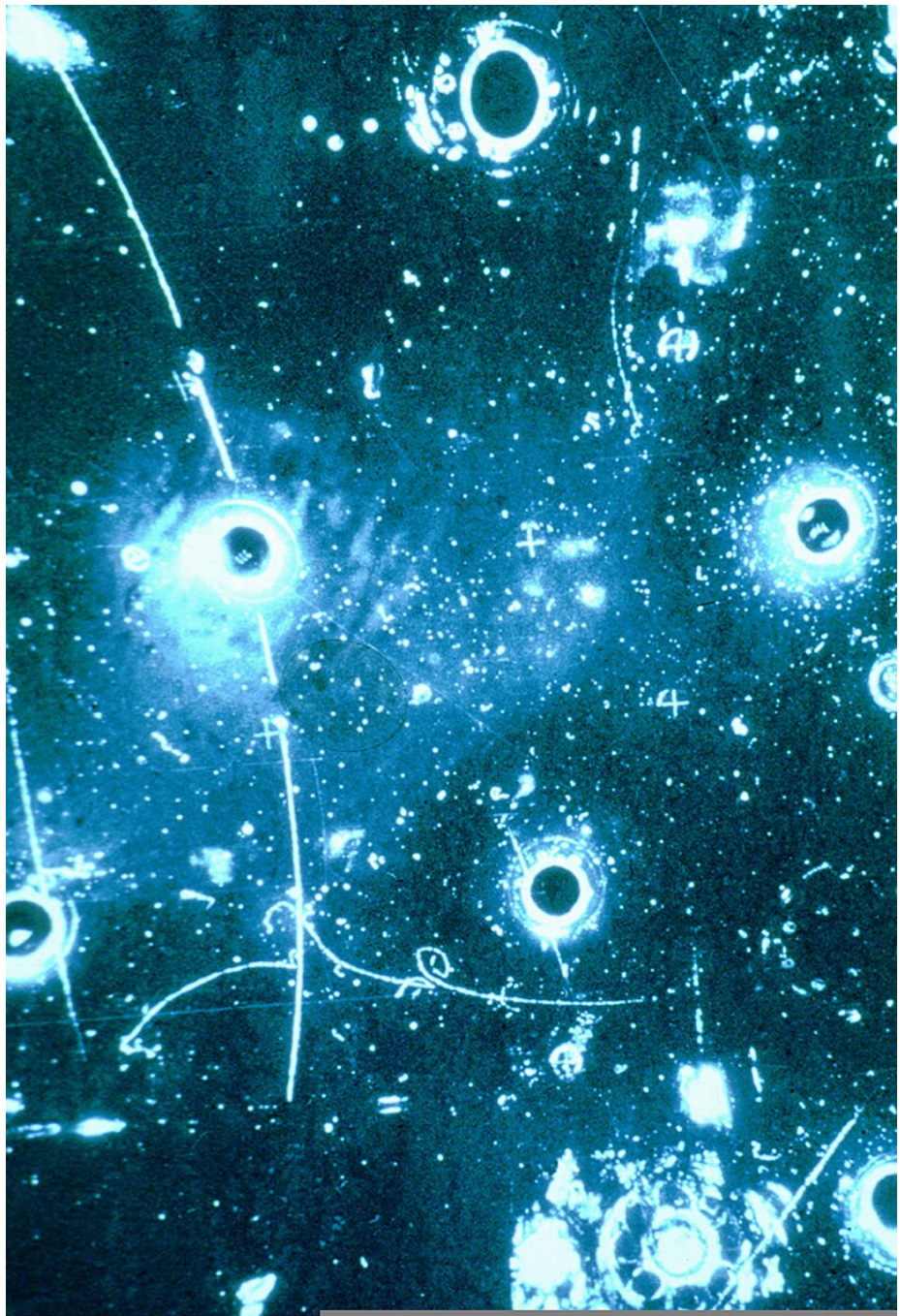
W^\pm
boson W

Expliquait déjà les désintégrations
de la radioactivité



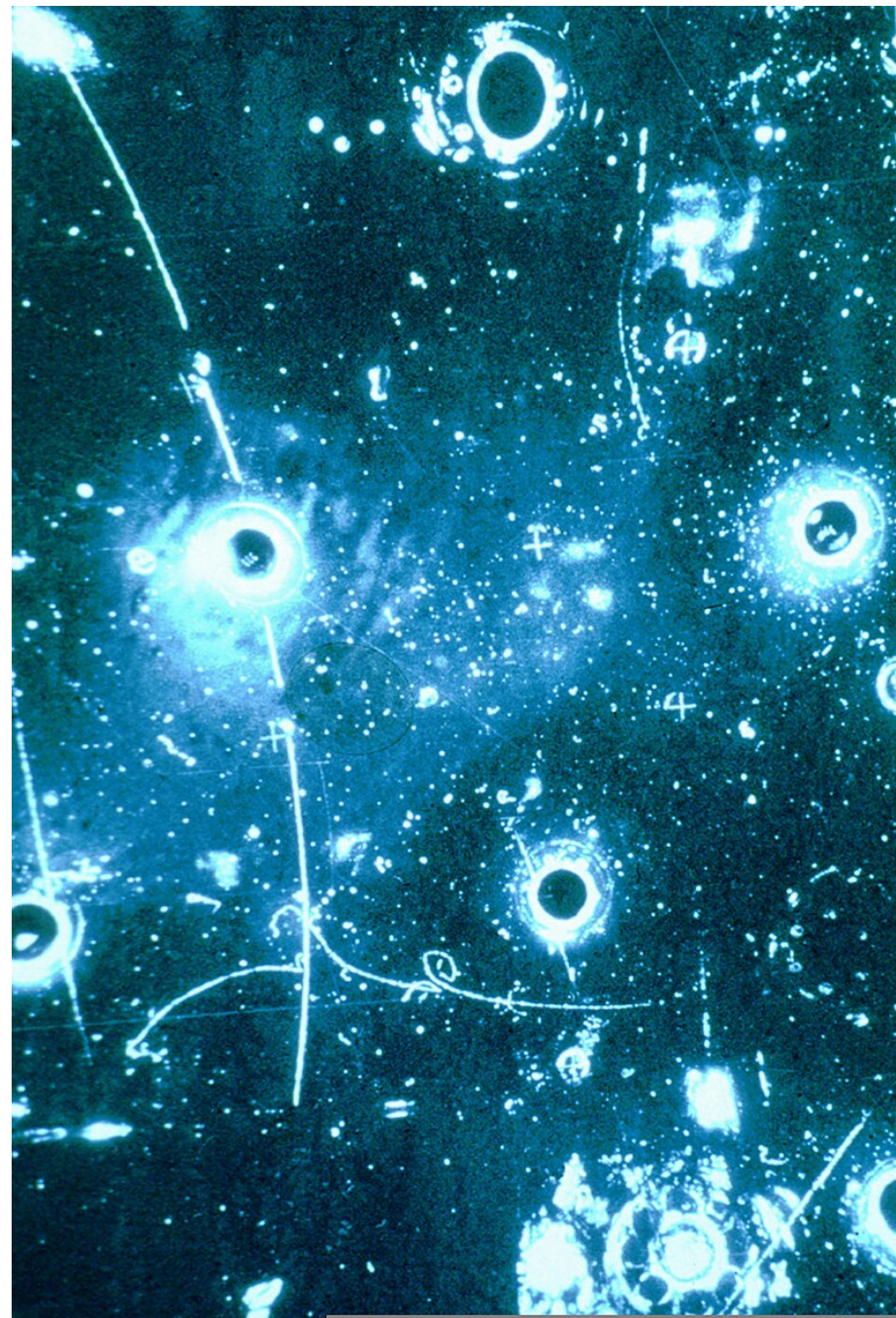
Z^0
boson Z

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 »

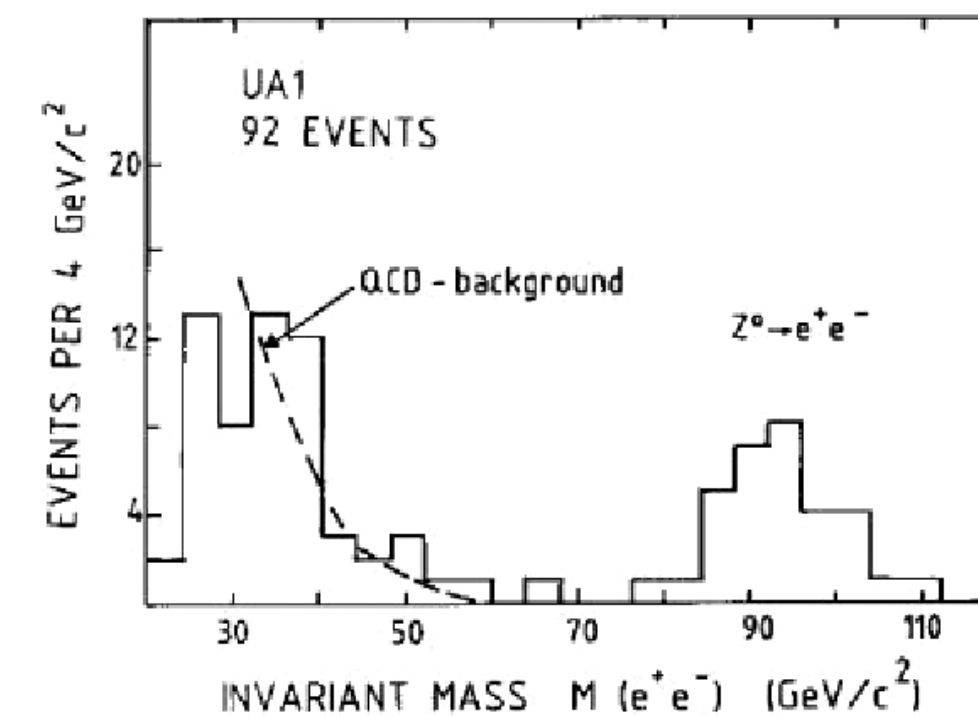
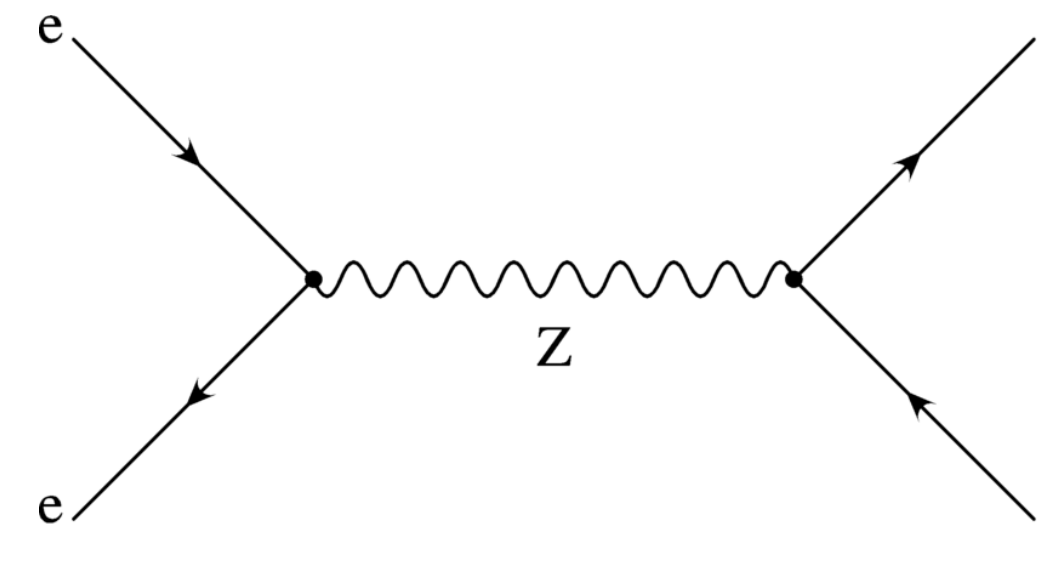


La découverte: D'abord indirecte, puis directe

Découverte indirecte du Z en 1973



Découverte directe du Z en 1983

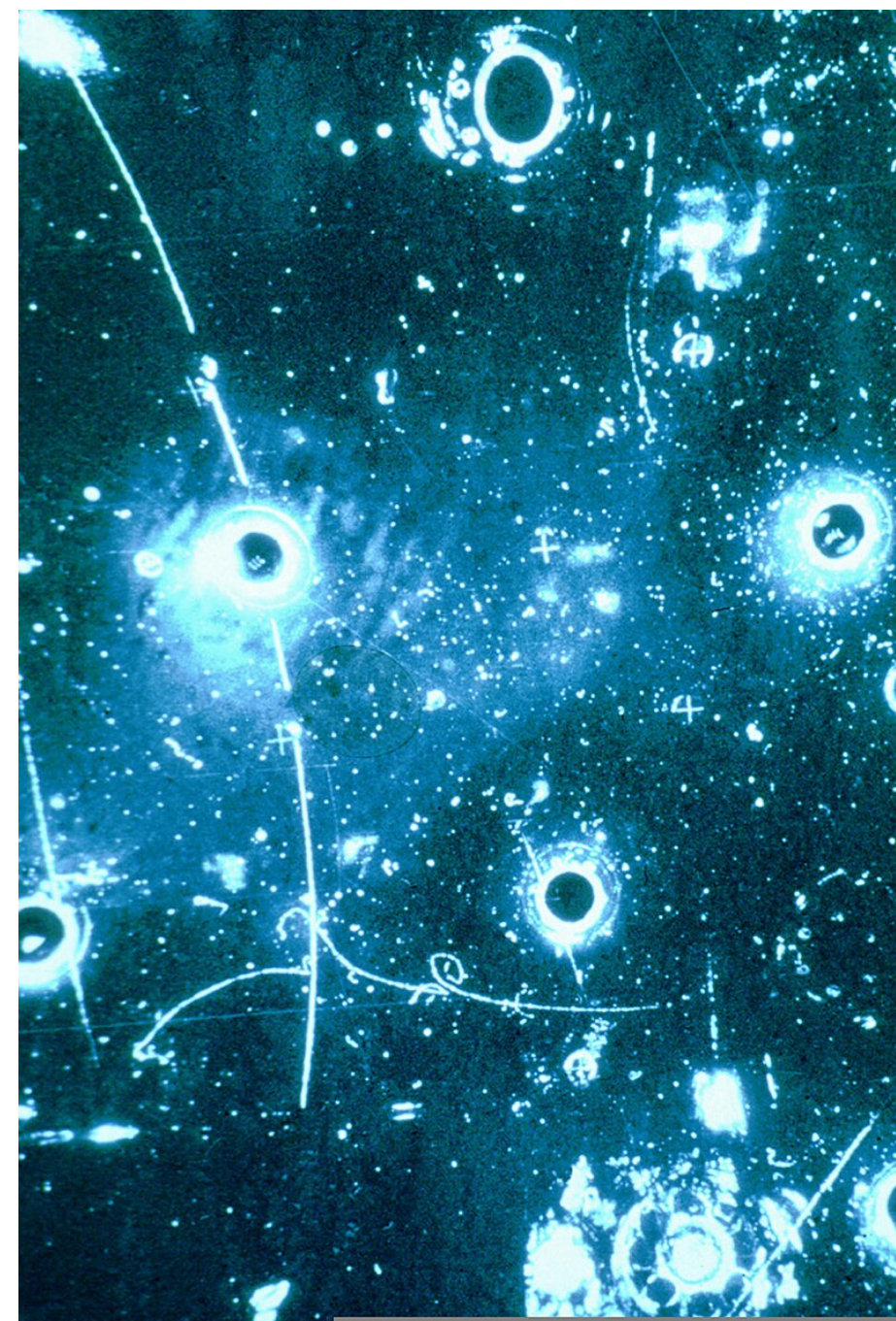


https://cds.cern.ch/record/2103277/files/9789814644150_0006.pdf

Observations directes et indirectes

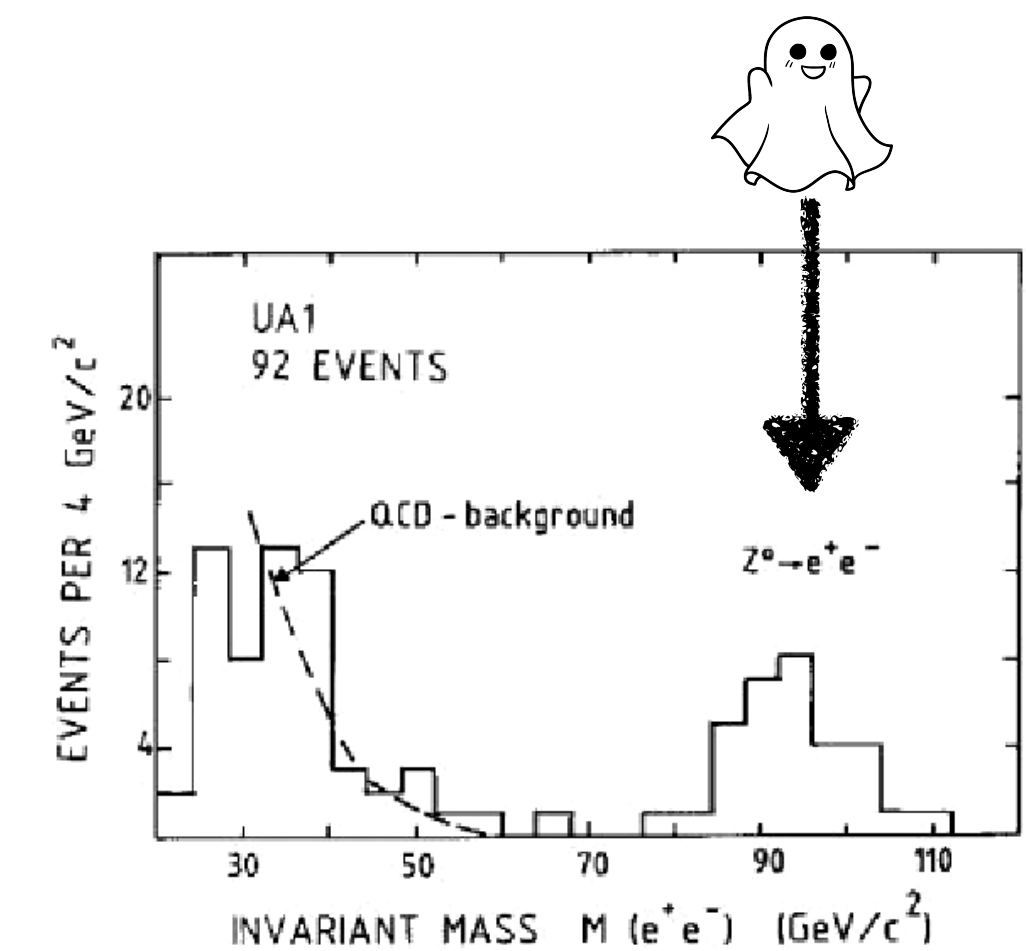
Observation indirecte

Effet indirect de quelque chose invisible



Observation directe

Mesurer directement les propriétés d'une particule



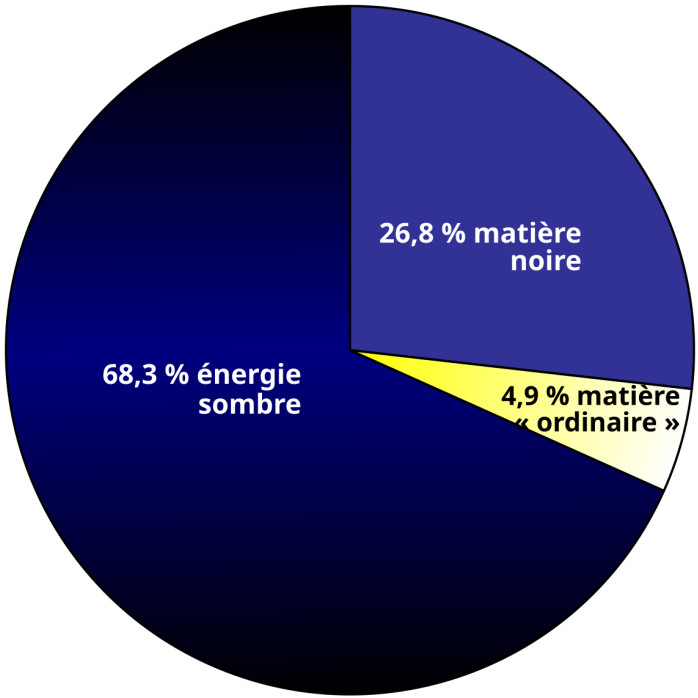
La recherche pour la « Nouvelle Physique »

Le modèle standard

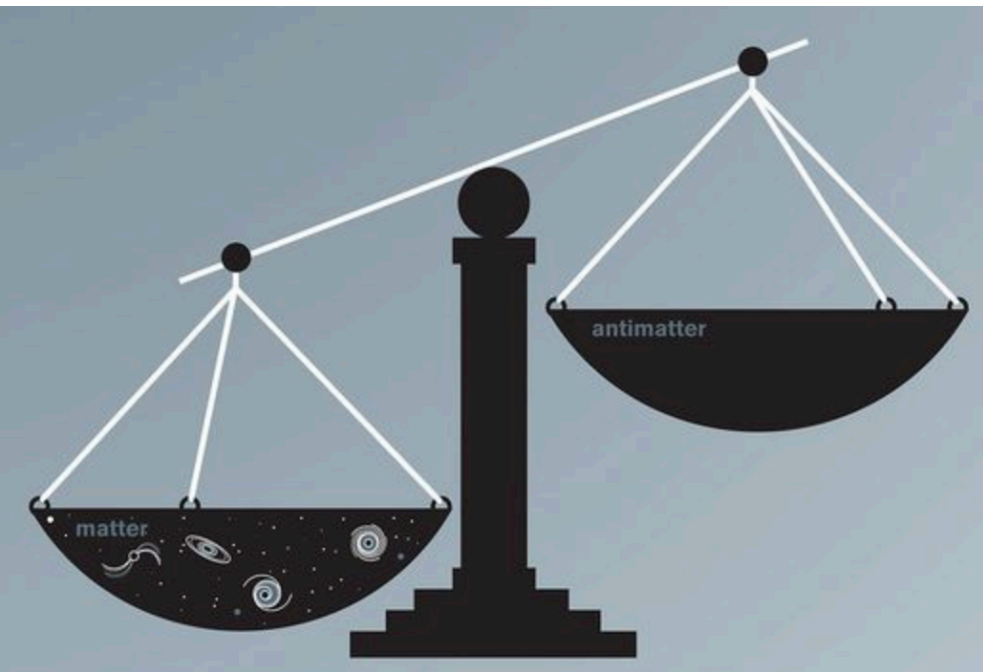
e électron	ν_e électron neutrino	u up	d down
μ muon	ν_μ muon neutrino	c charm	s strange
τ tauon	ν_τ tau neutrino	t Top	b Bottom
g gluon	γ photon	W^\pm boson W	Z^0 boson Z
H Higgs boson			

Sans explication

Matière noire



Asymétrie entre matière et anti-matière



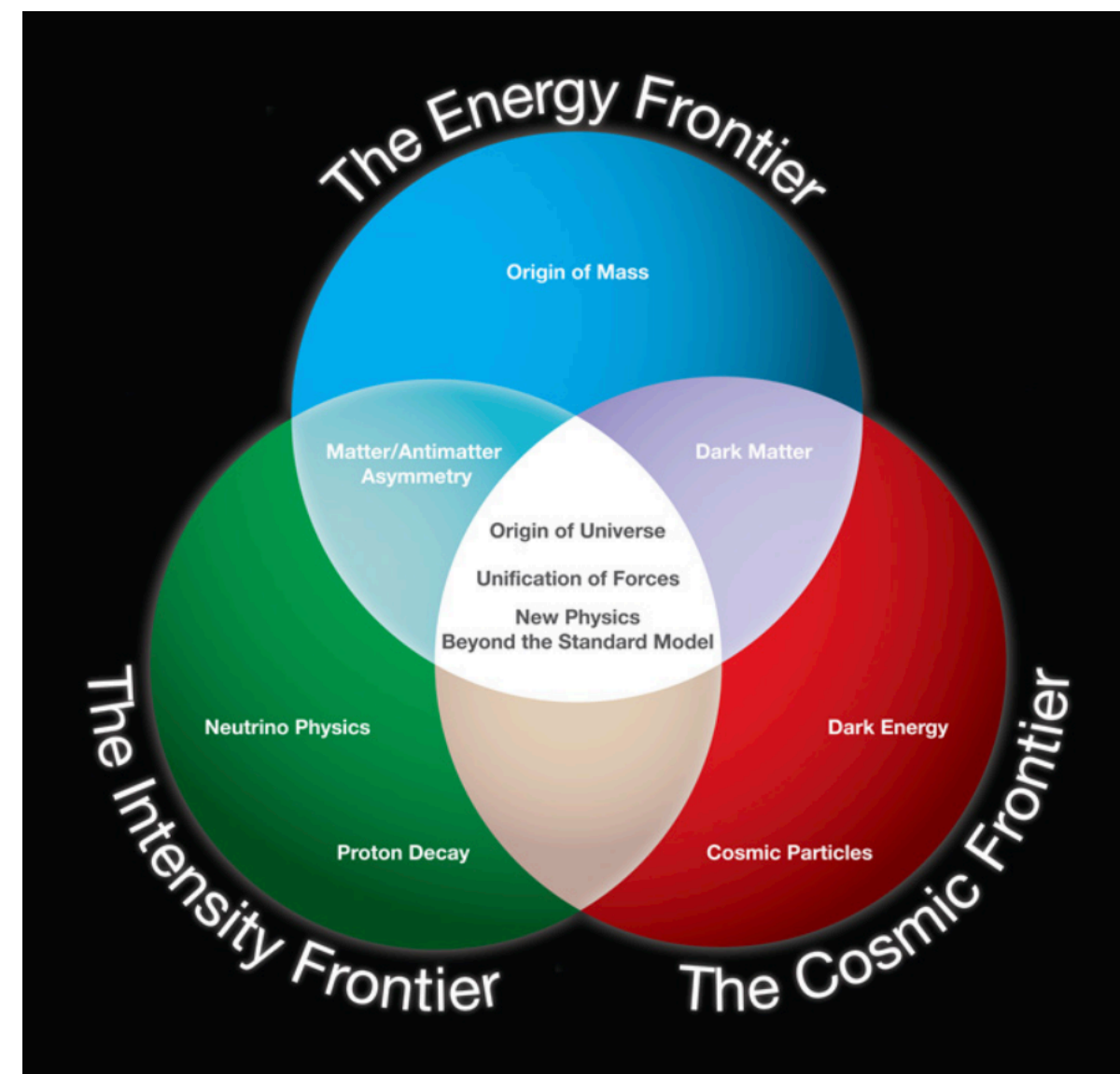
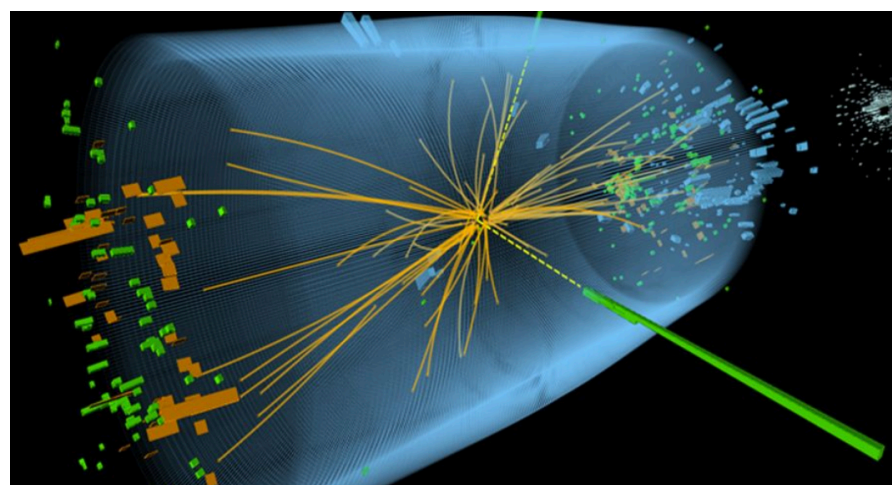
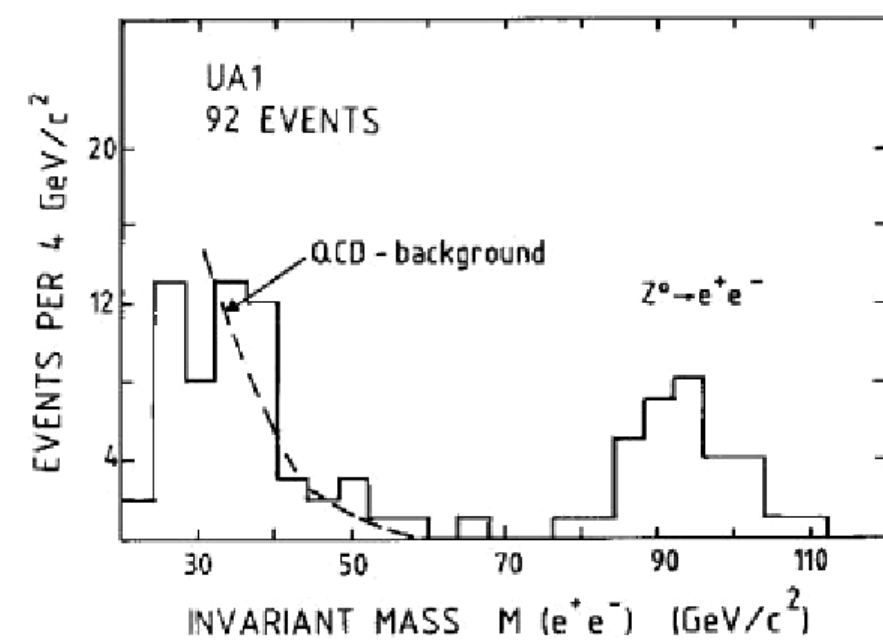
On cherche de nouvelles particules
et / ou d'interactions modifiées
qui peuvent expliquer les observations

Deux axes pour explorer de la Nouvelle Physique

Frontière énergétique

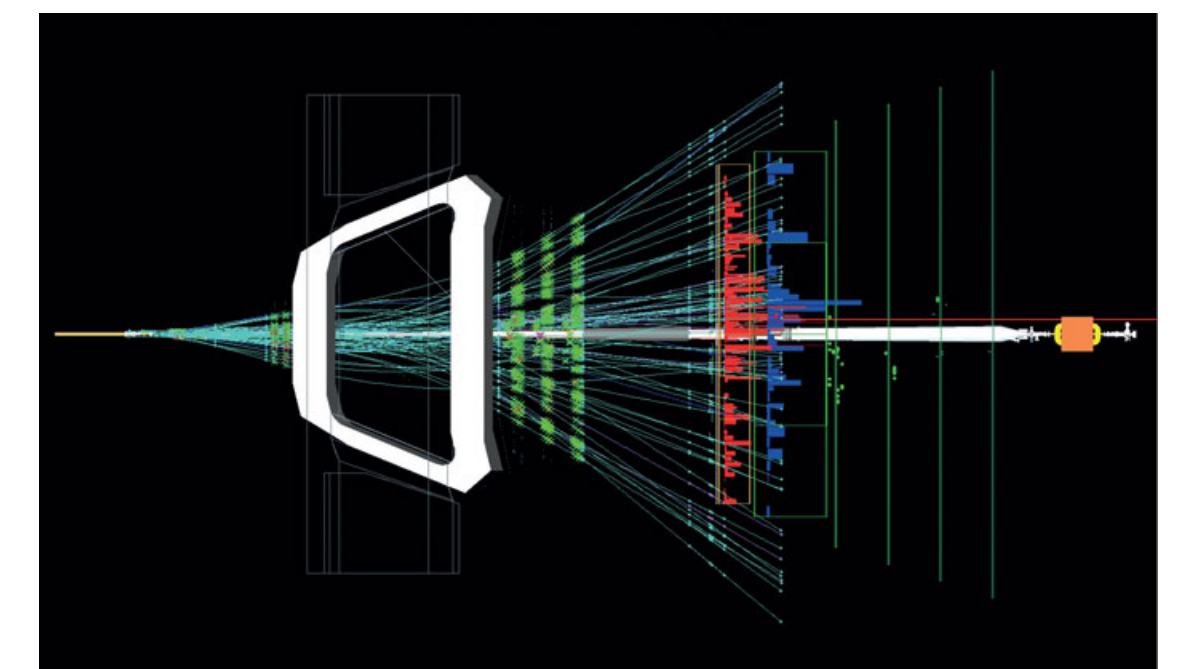
Produire de nouvelles particules dans les collisions de particules

$$E = mc^2$$



Frontière d'intensité

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

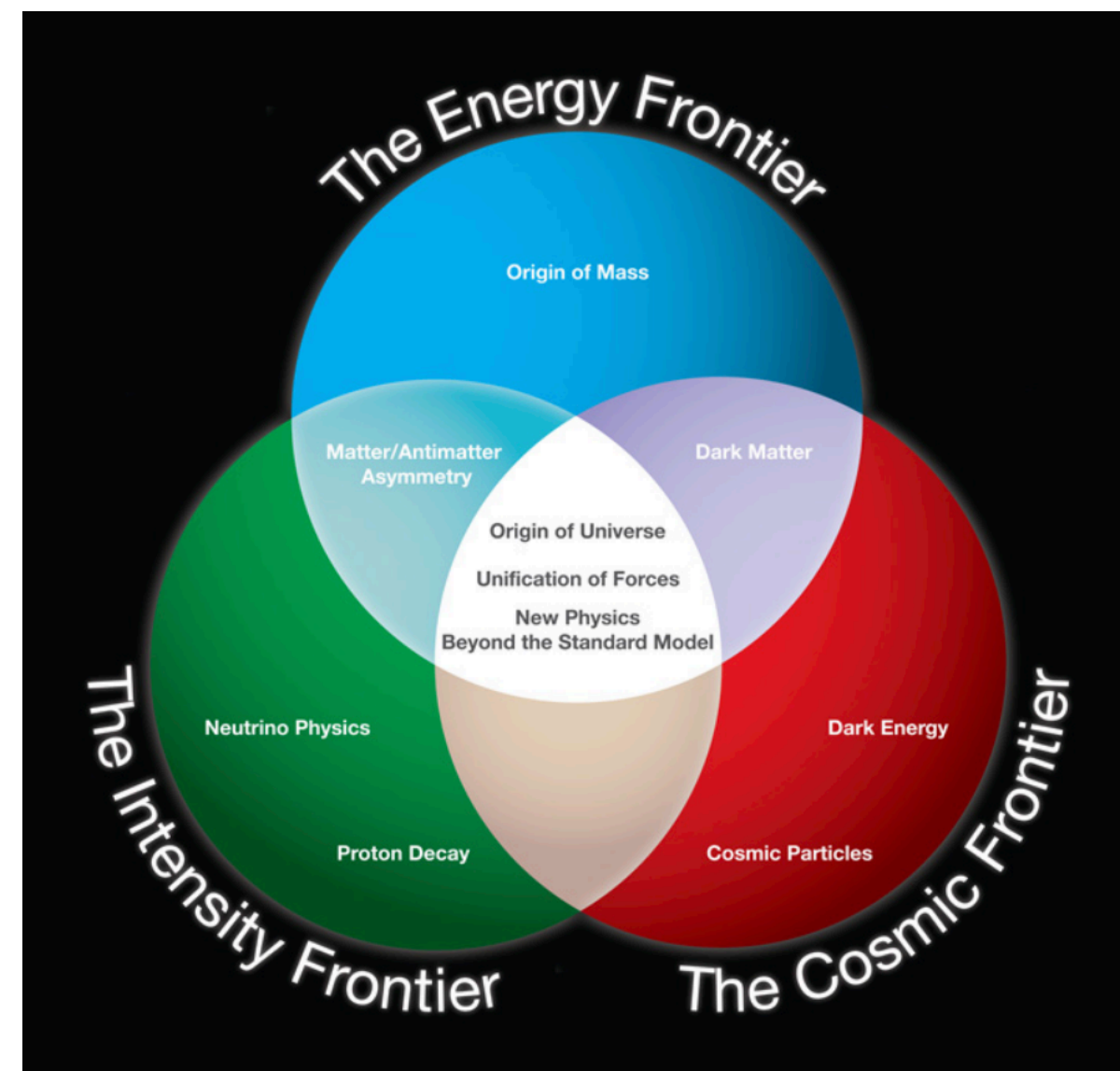
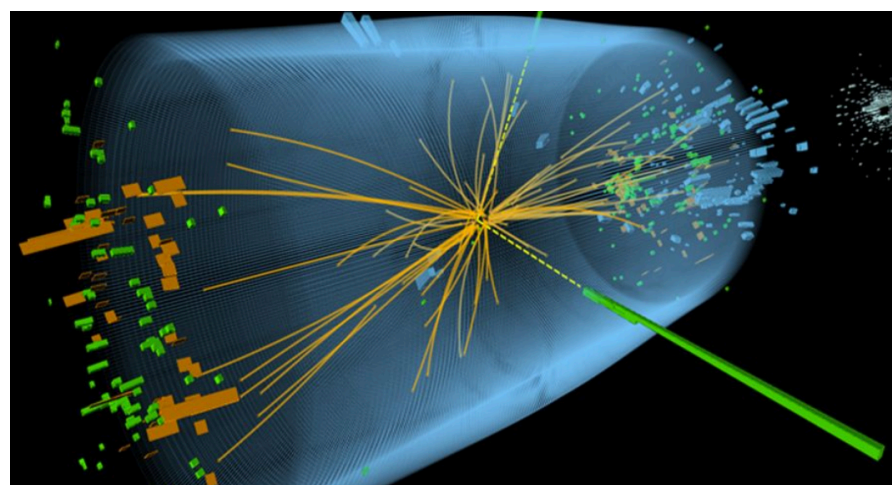
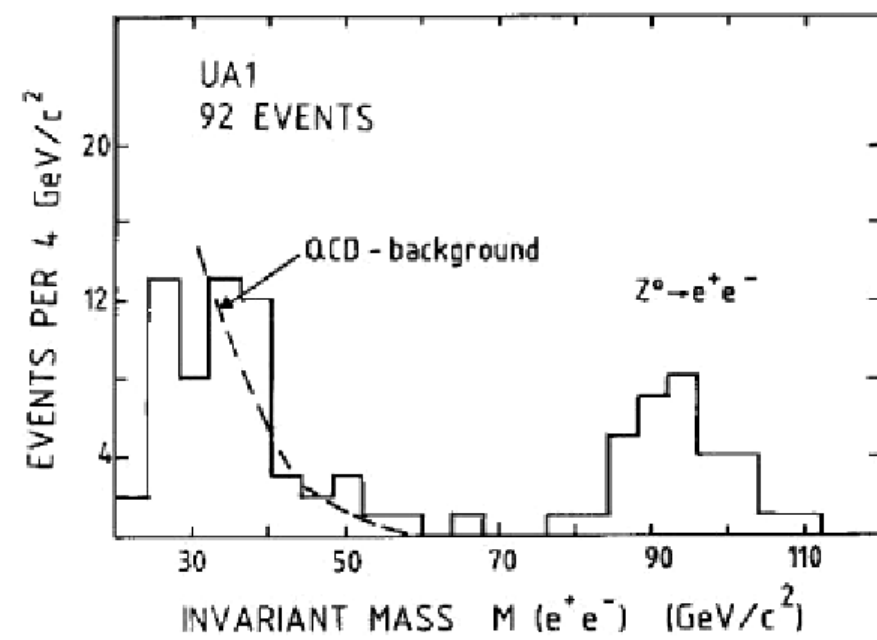


Deux axes pour explorer de la Nouvelle Physique

Frontière énergétique

Produire de nouvelles particules dans les collisions de particules

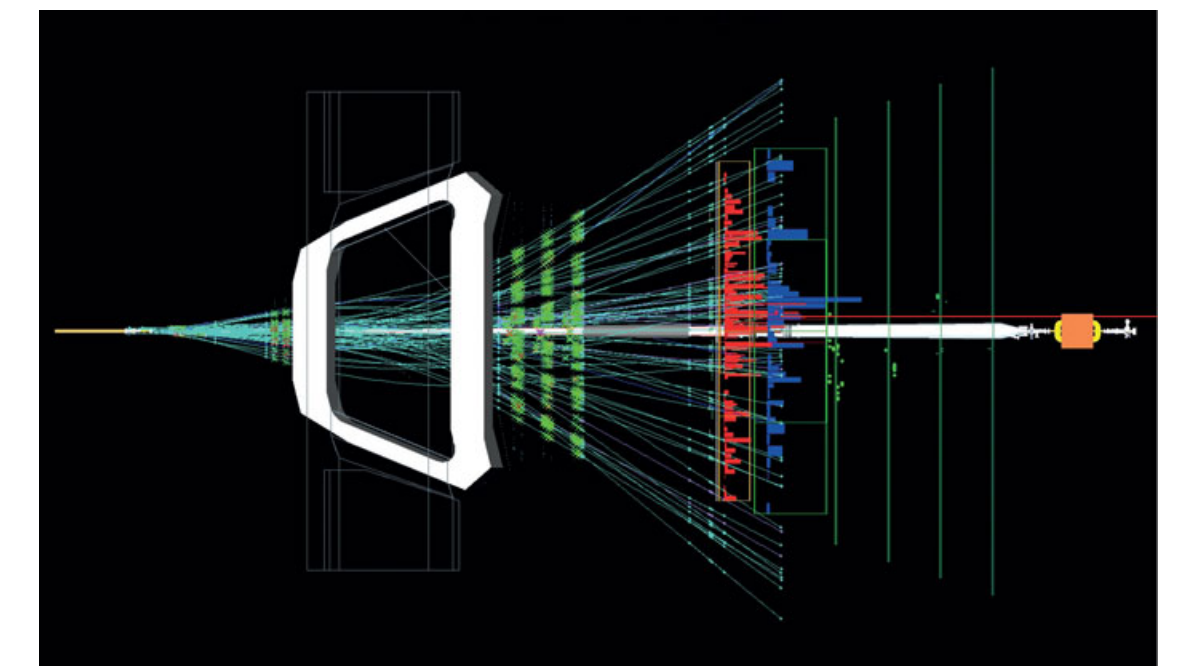
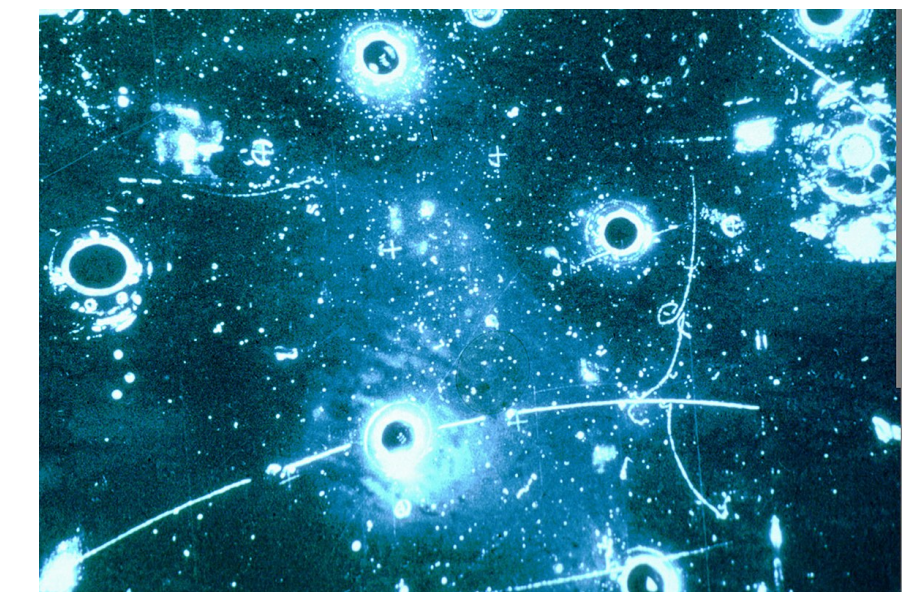
$$E = mc^2$$



Physique des saveurs

Frontière d'intensité

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



Des déviations observés dans les dernières années

Théorie

« Universalité leptonique » 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



Des déviations observés dans les dernières années

Théorie

« Universalité leptonique » dans le Modèle Standard

Différentes masses

e
électron



μ
muon



τ
tauon



Mêmes interactions
via la force faible

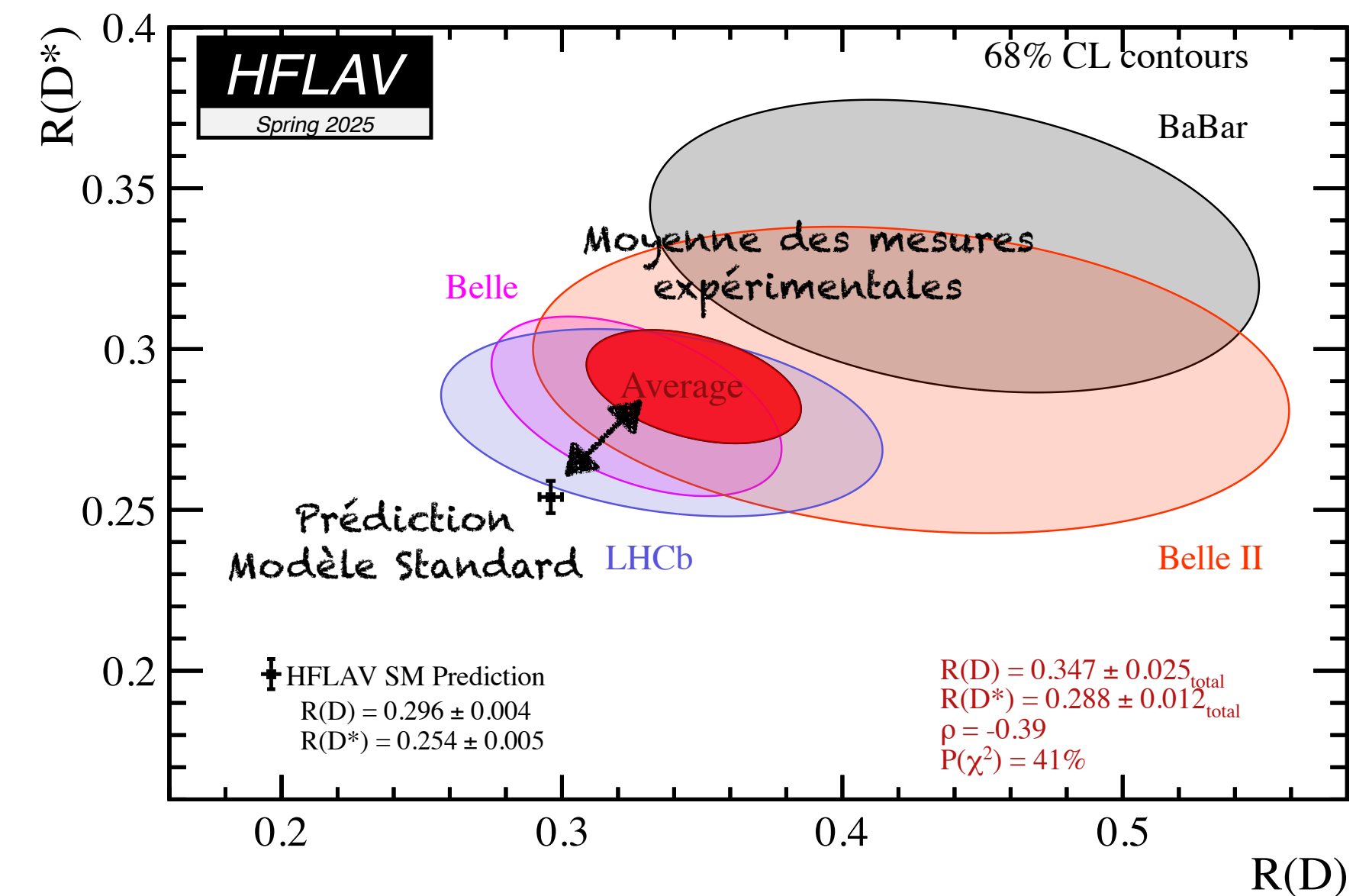
W[±]
boson W

Z⁰
boson Z

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

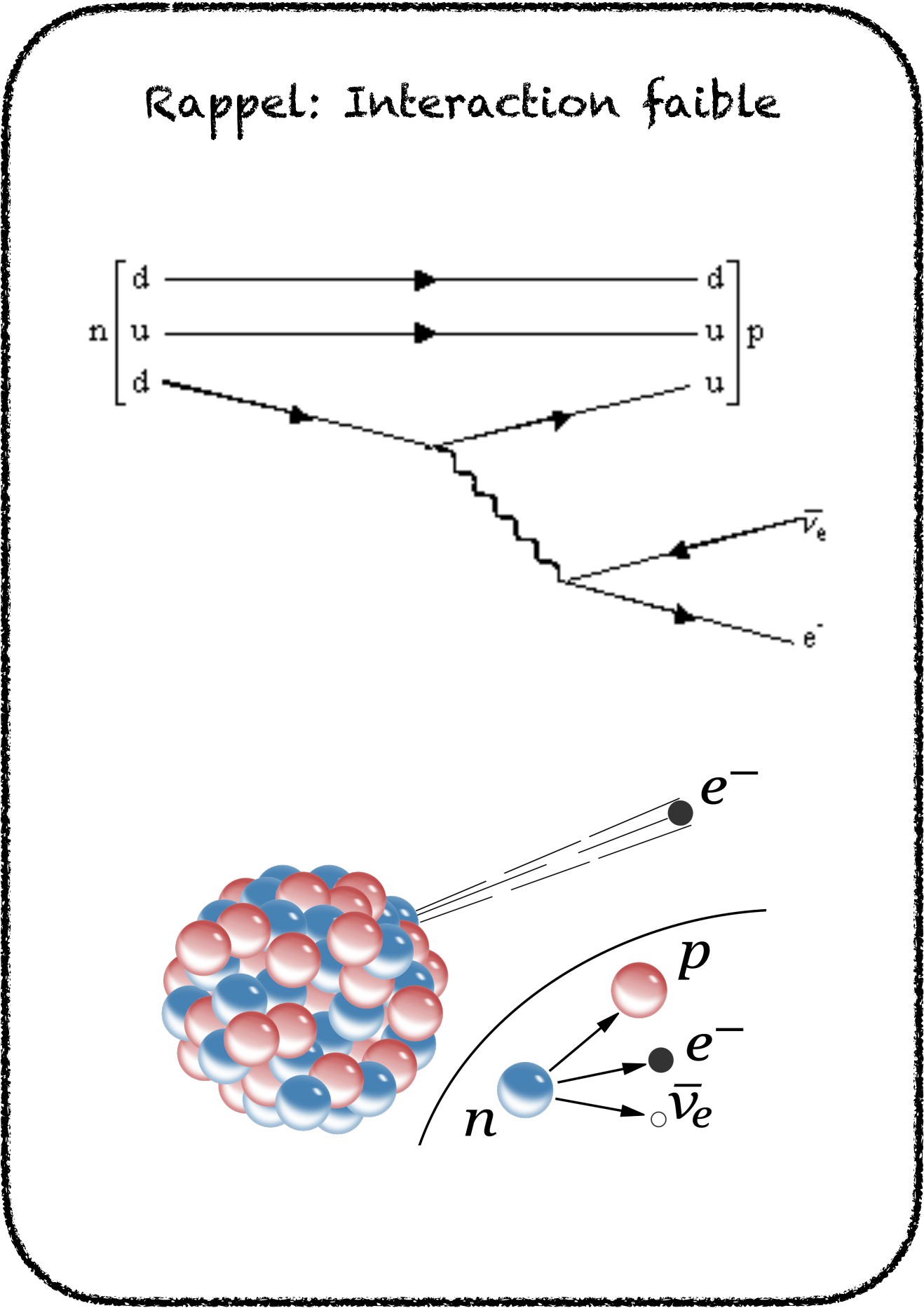
Observation

Déviations de l'universalité leptonique

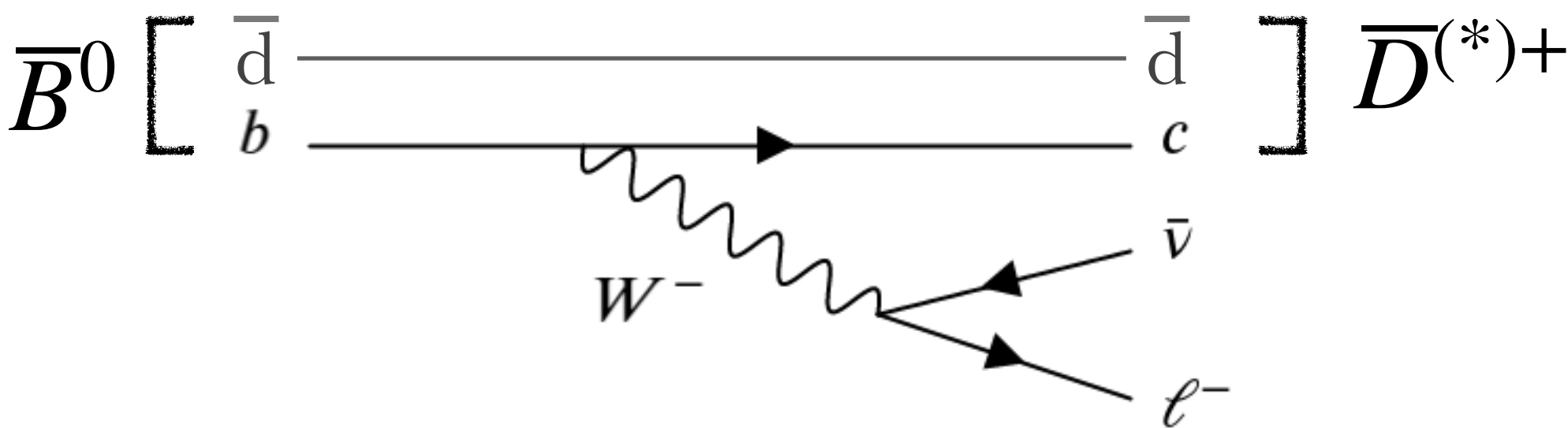


<https://hflav-eos.web.cern.ch/hflav-eos/semi/spring25/html/RDsDsstar/RDRDs.html>

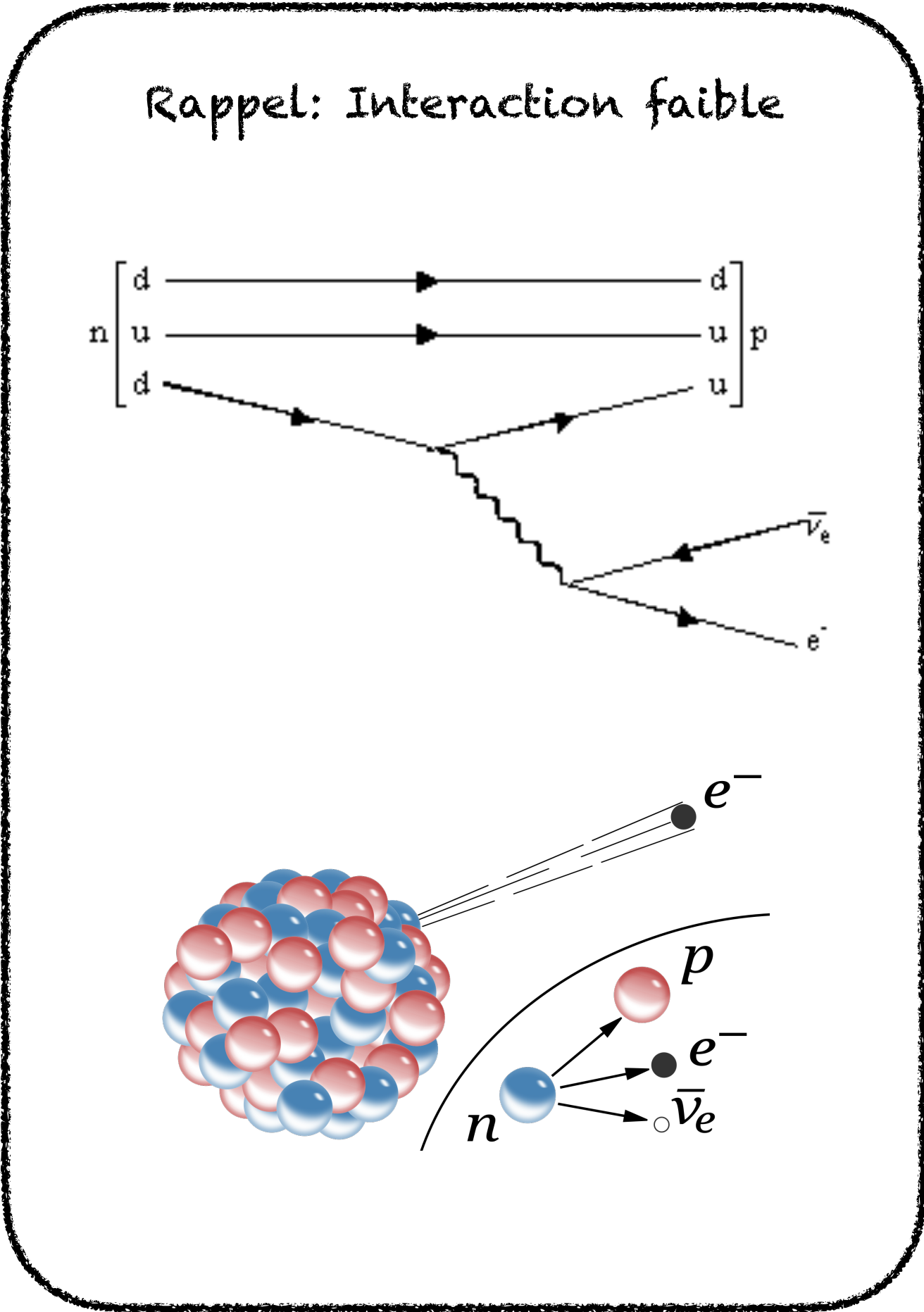
Mesurer l'universalité leptonique



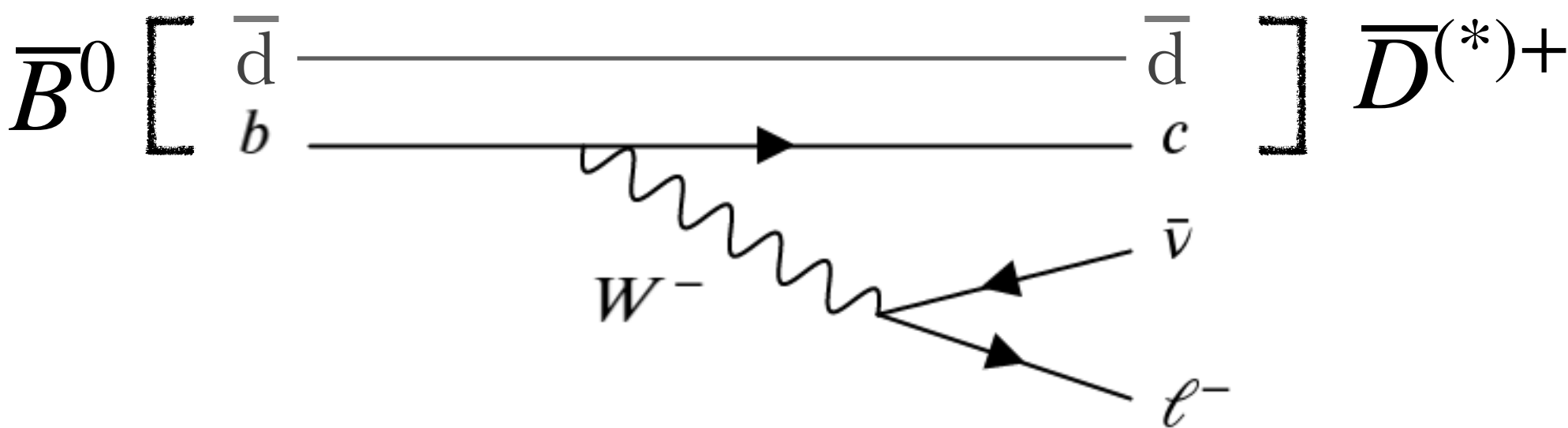
Probabilité de désintégrations de « mesons » B



Mesurer l'universalité leptonique



Probabilité de désintégrations de « mesons » B



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

« Probabilité de désintégration »

e
électron

μ
muon

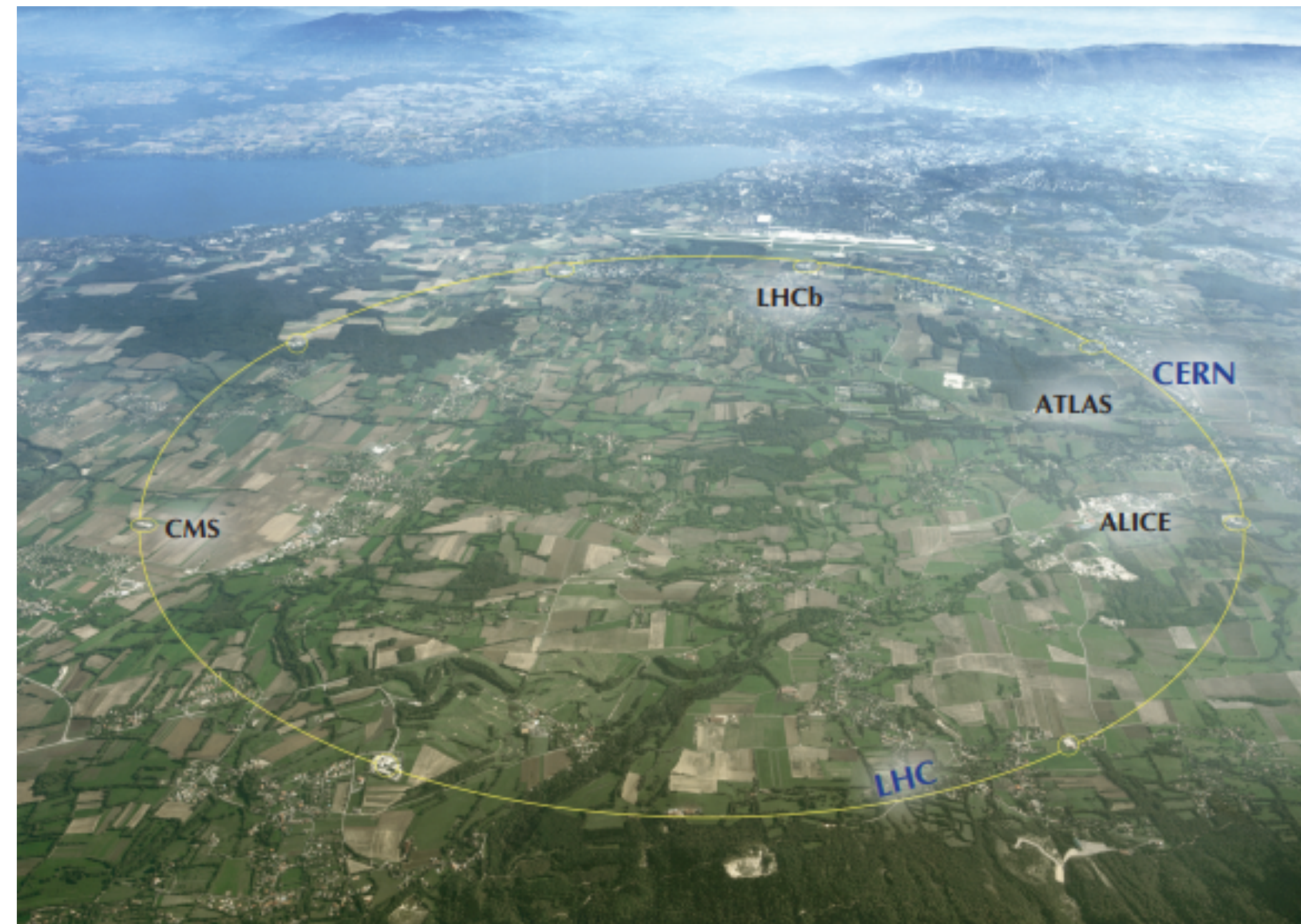
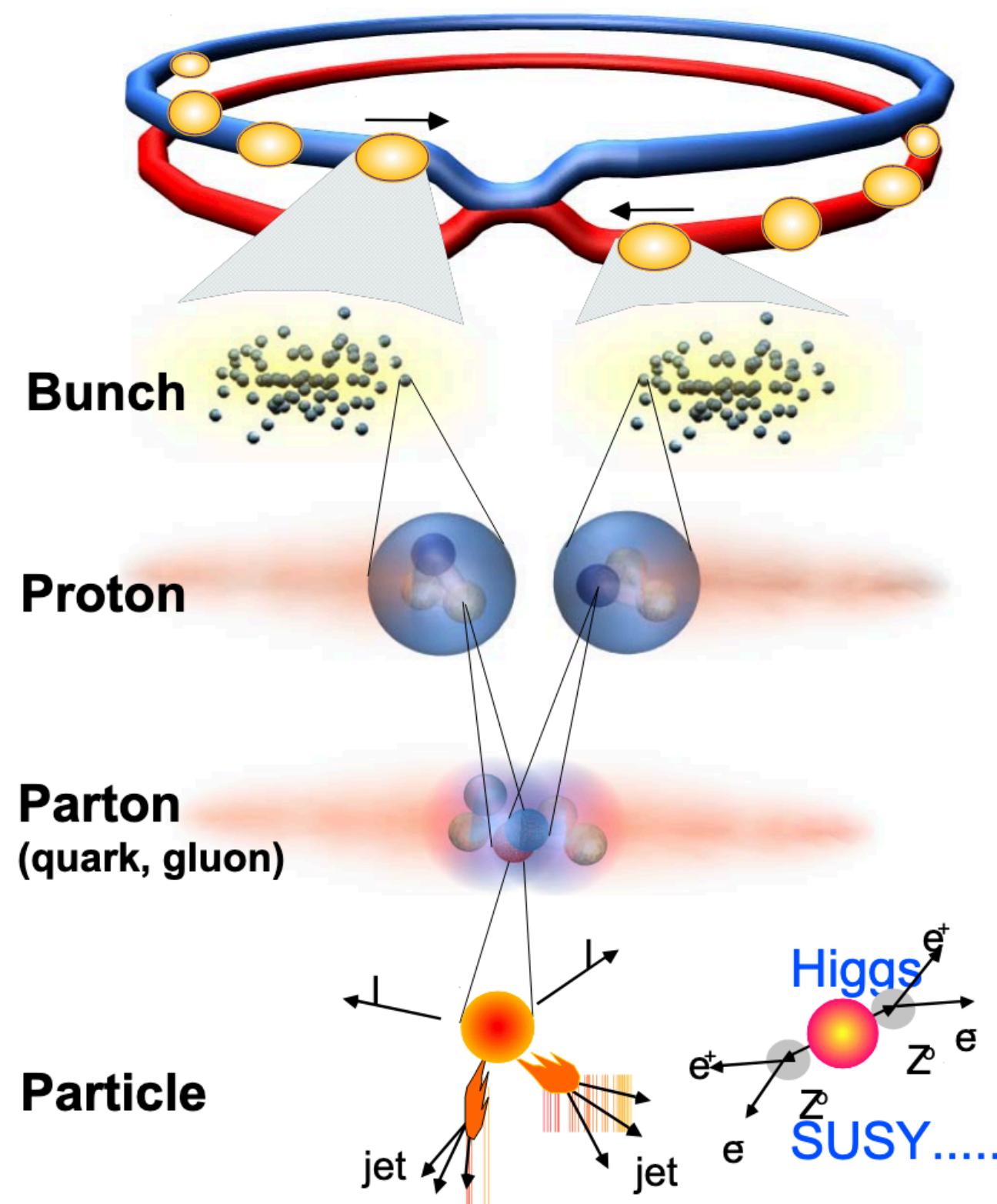
τ
tauon

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 quatre grandes expériences du LHC

ALICE

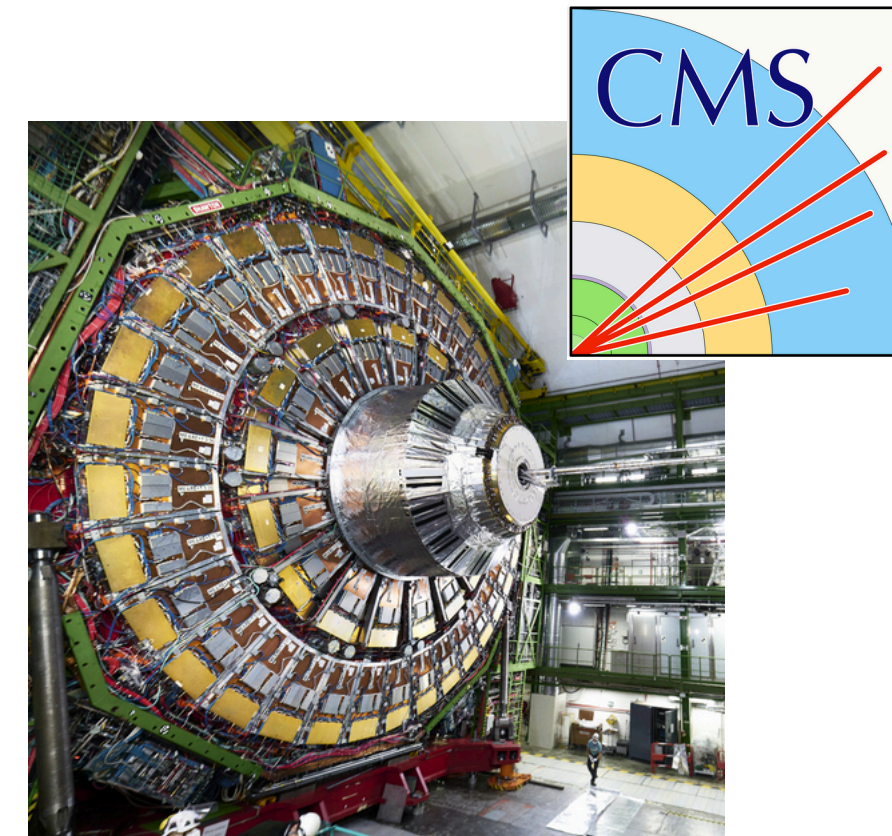
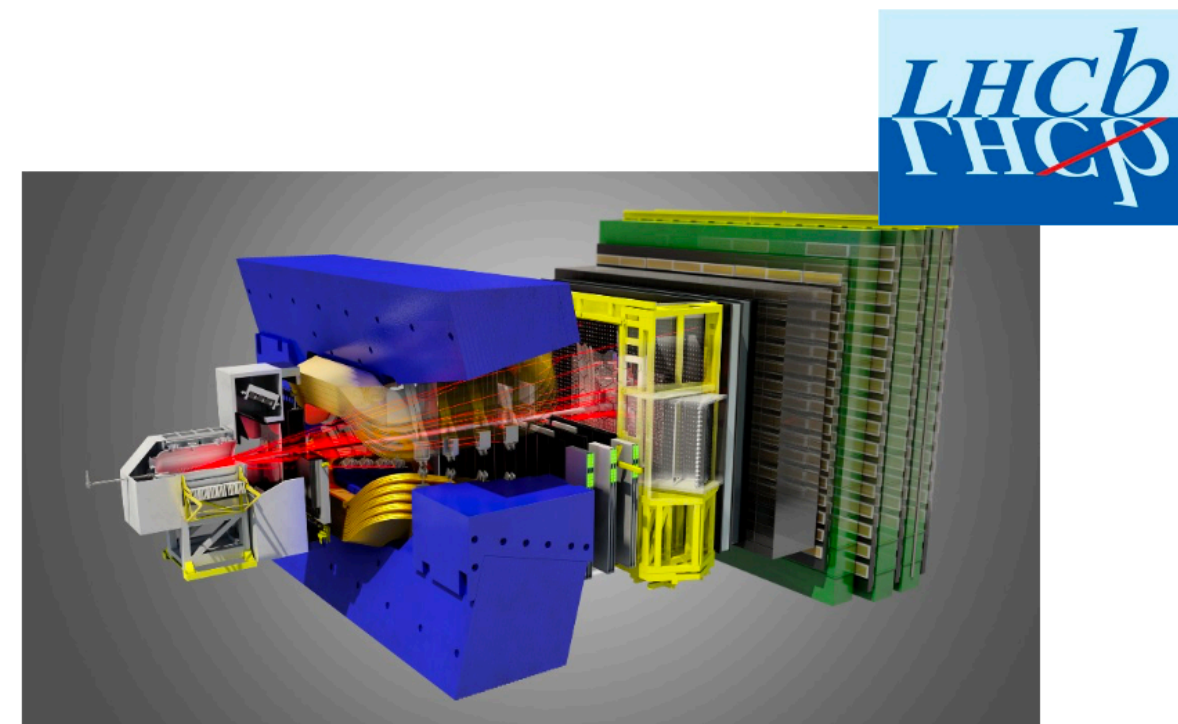
Dédié aux collisions d'ions lourds
Étude du plasma quark-gluon

LHCb

Dédié aux hadrons contenant des quarks b et c
Mesures de précision

ATLAS & CMS

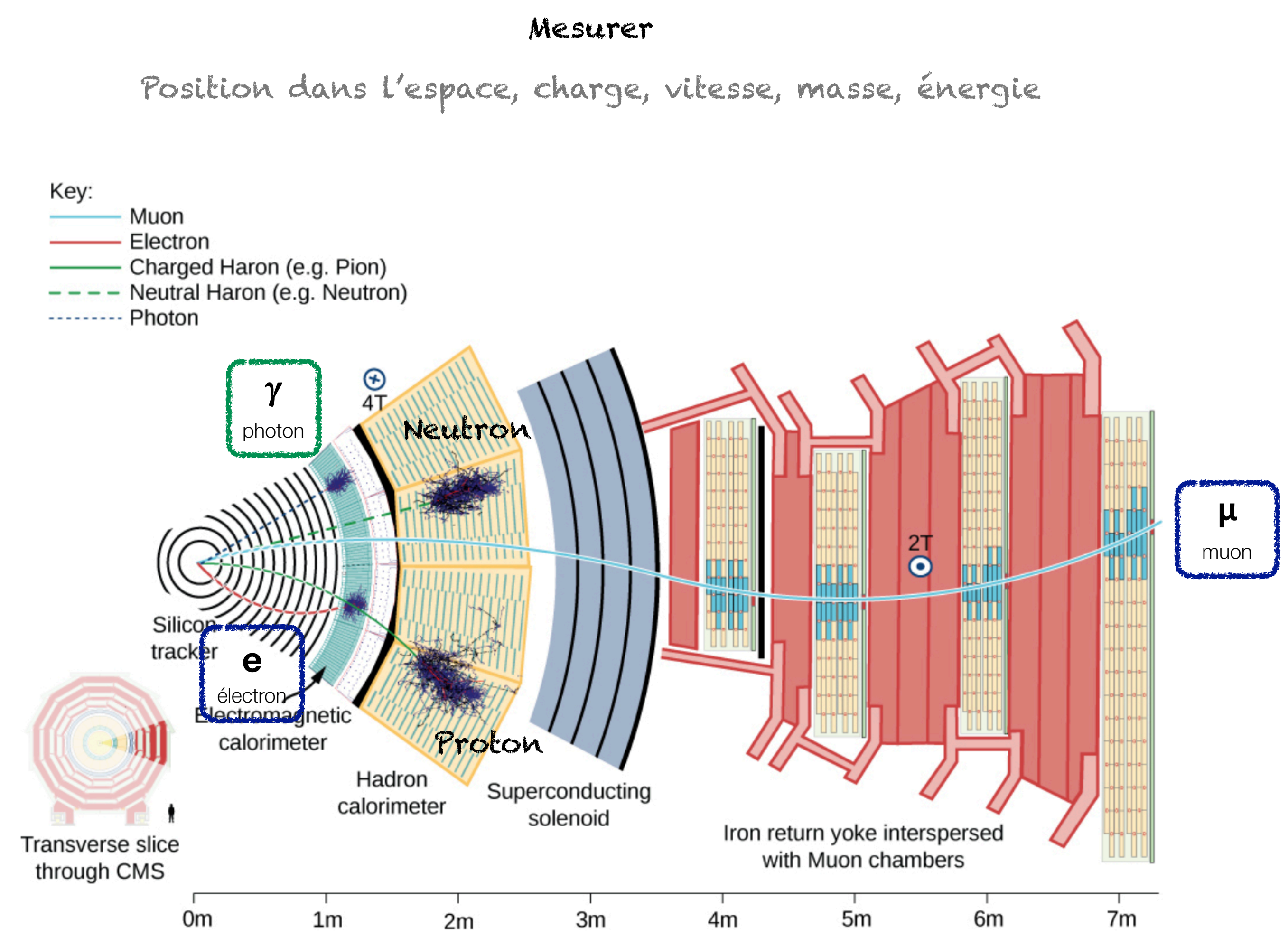
Détecteurs à usage général
Dédiés à la recherche de nouvelles particules produites directement



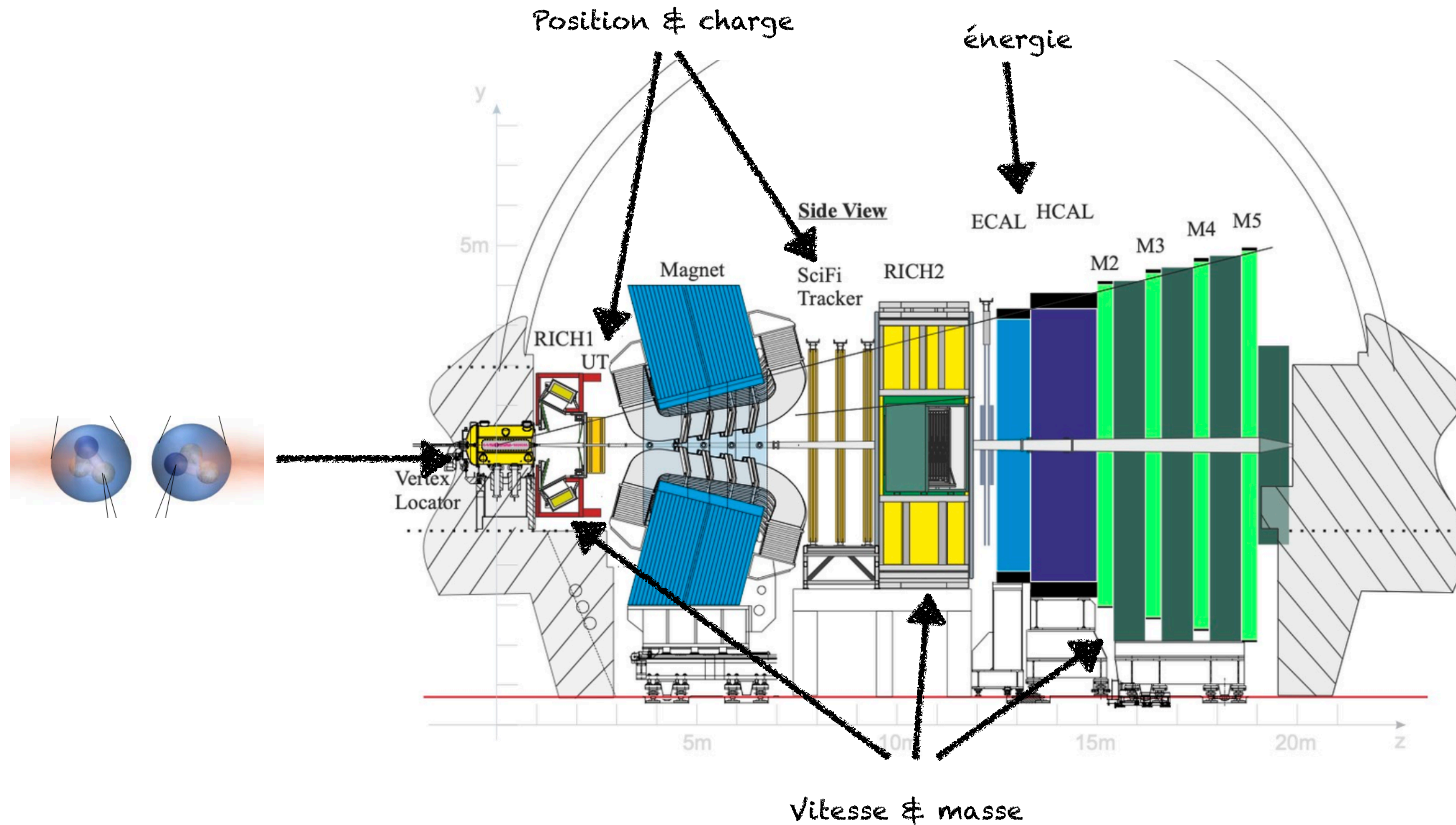
↑
↑
Frontière d'intensité

↑
↑
Frontière énergétique

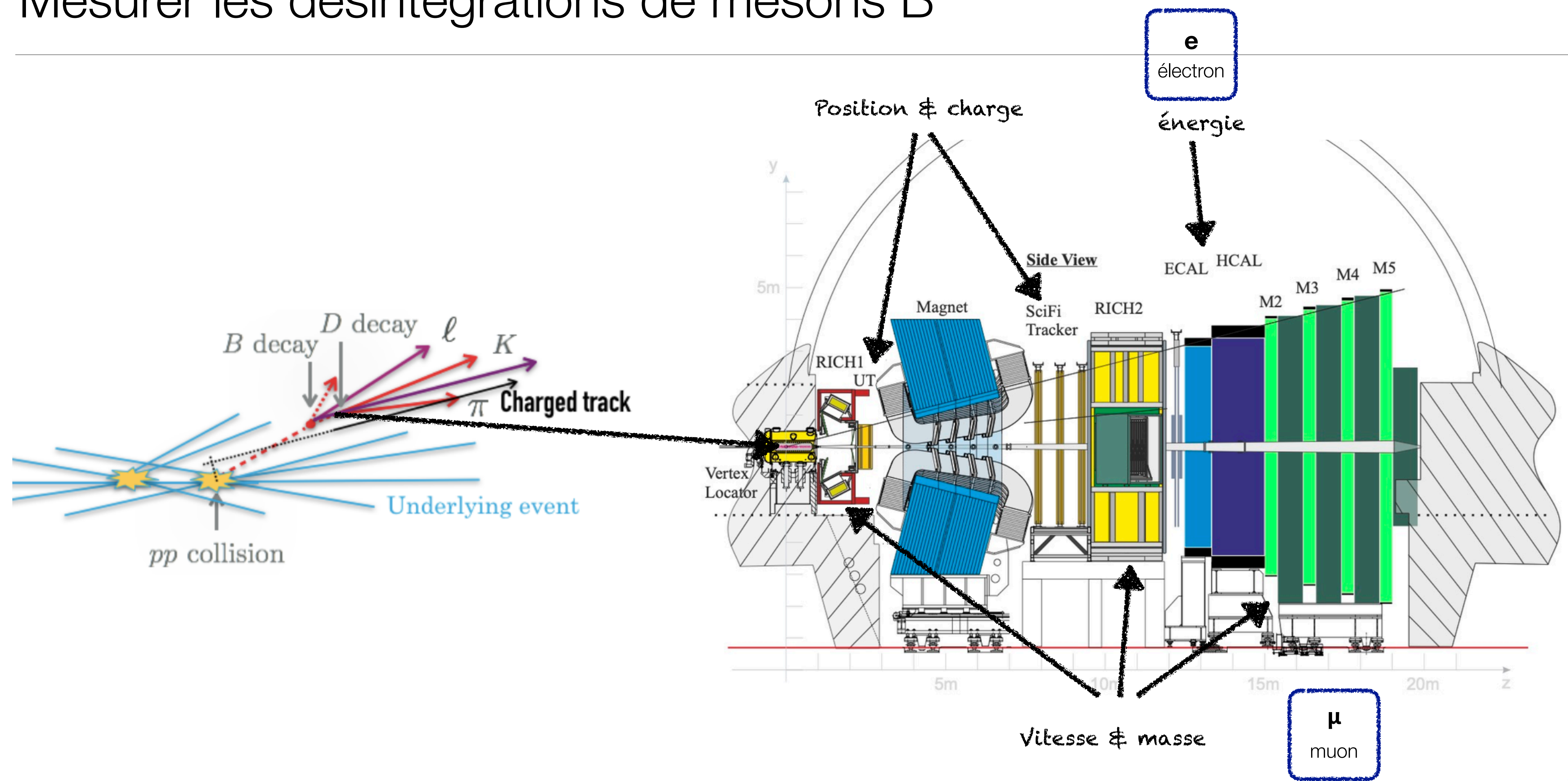
Comment « voir » les particules?



L'expérience LHCb



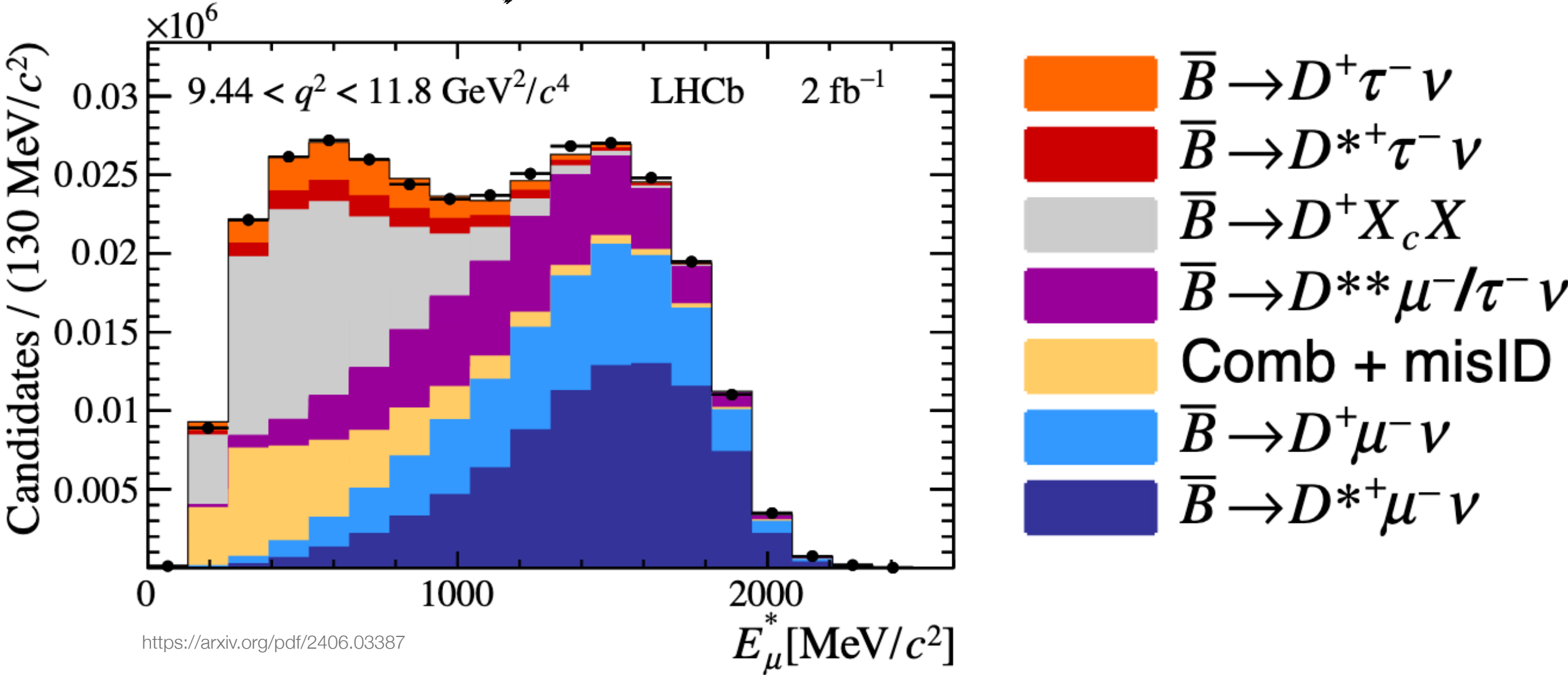
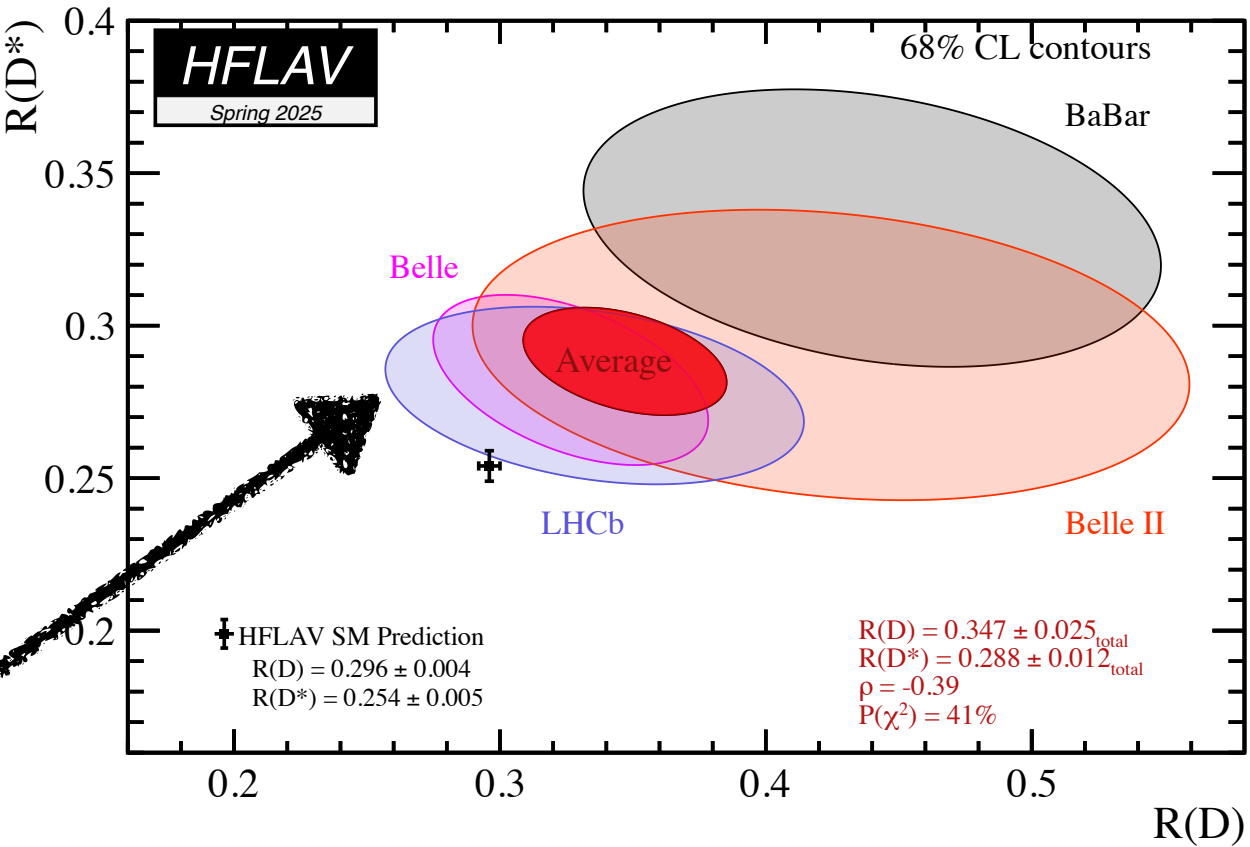
Mesurer les désintégrations de mesons B



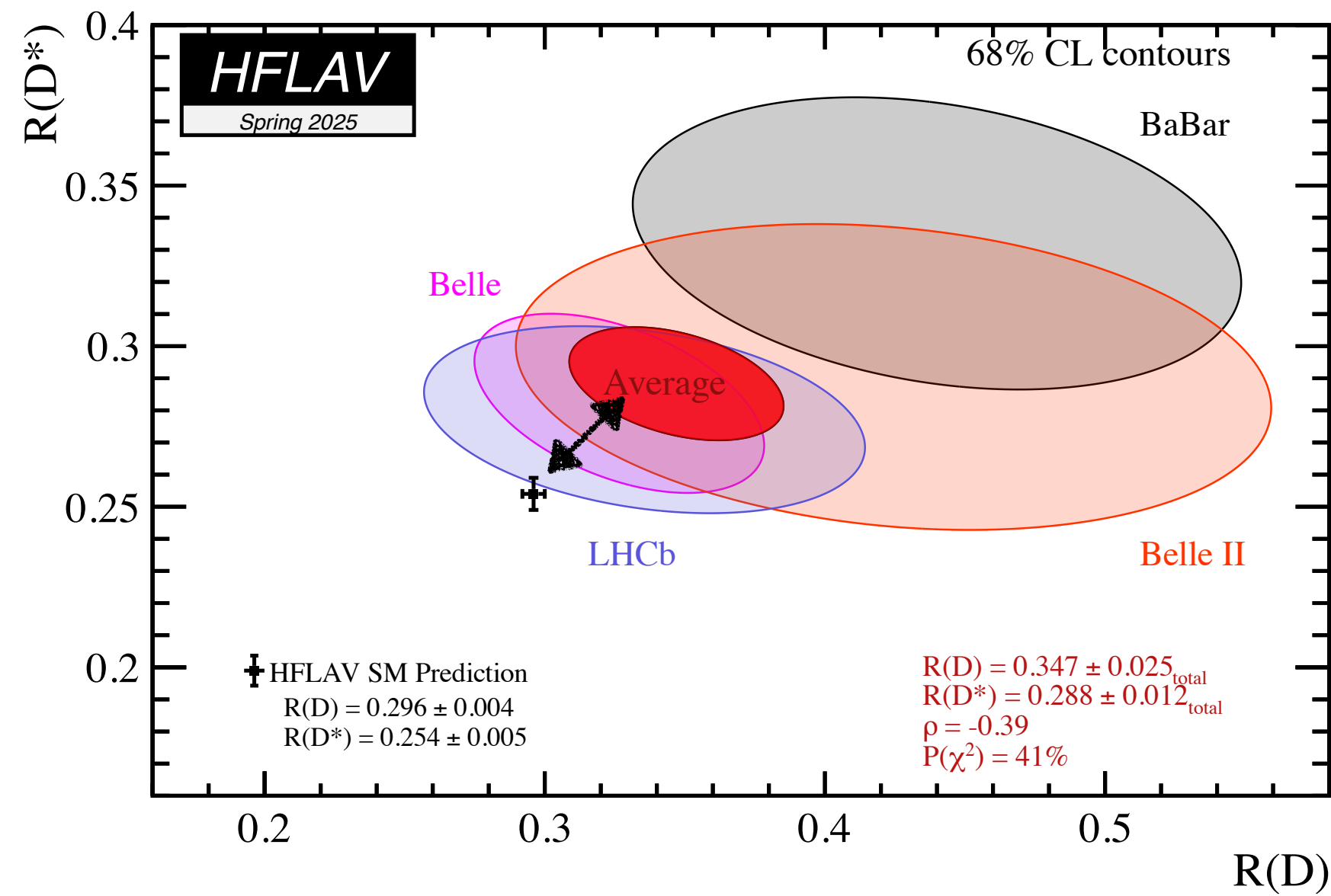
Analyser les données

Déficits

- 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



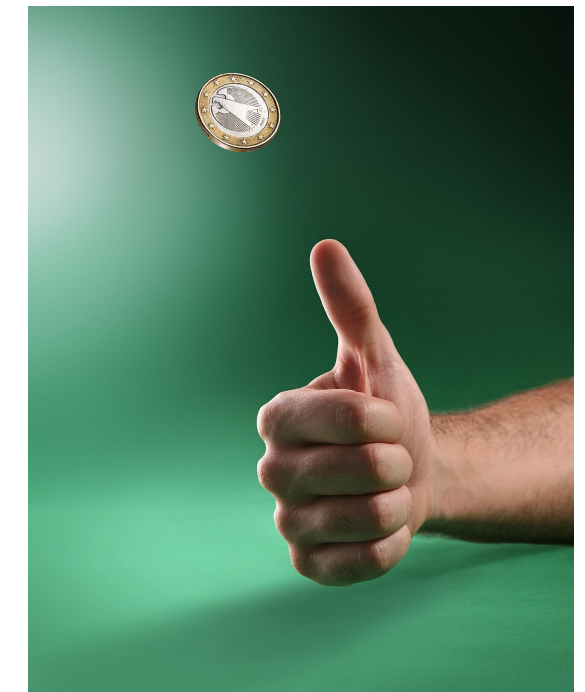
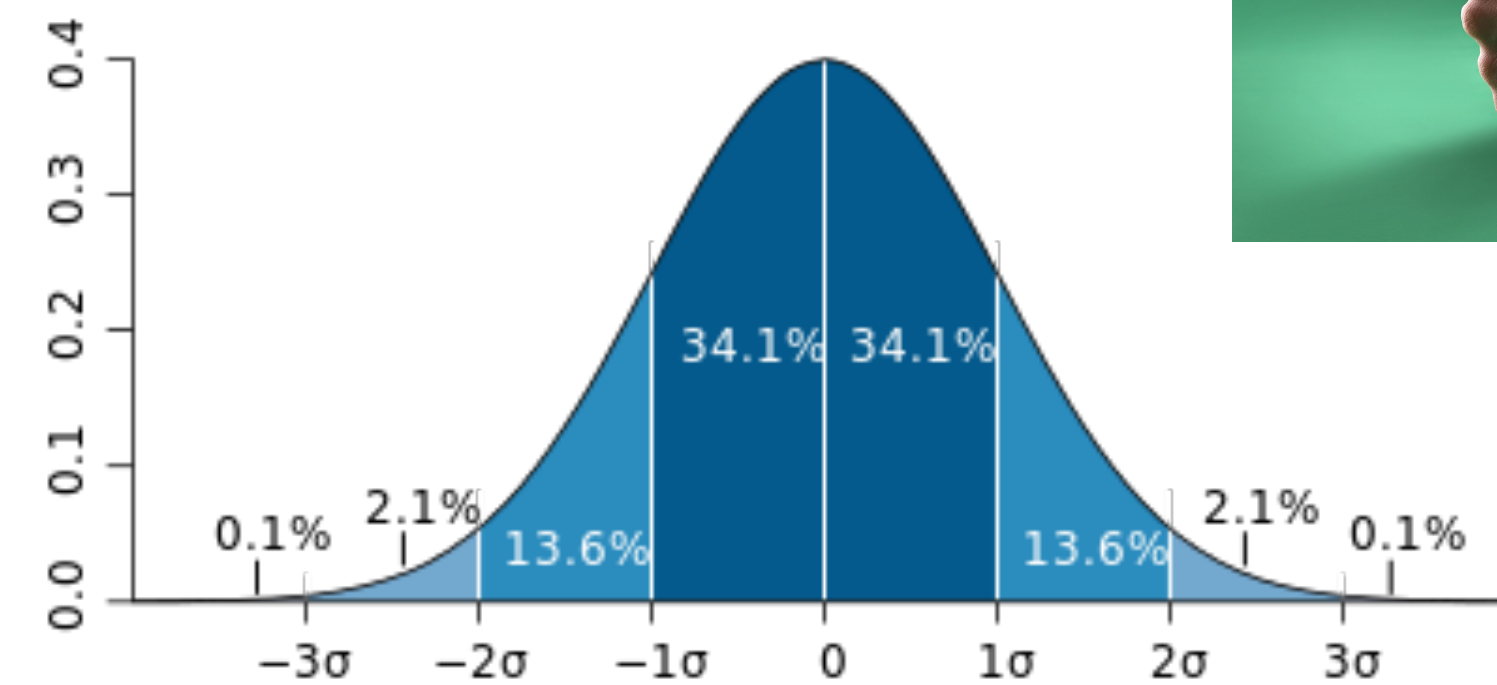
Quelle précision faut-il pour une découverte?



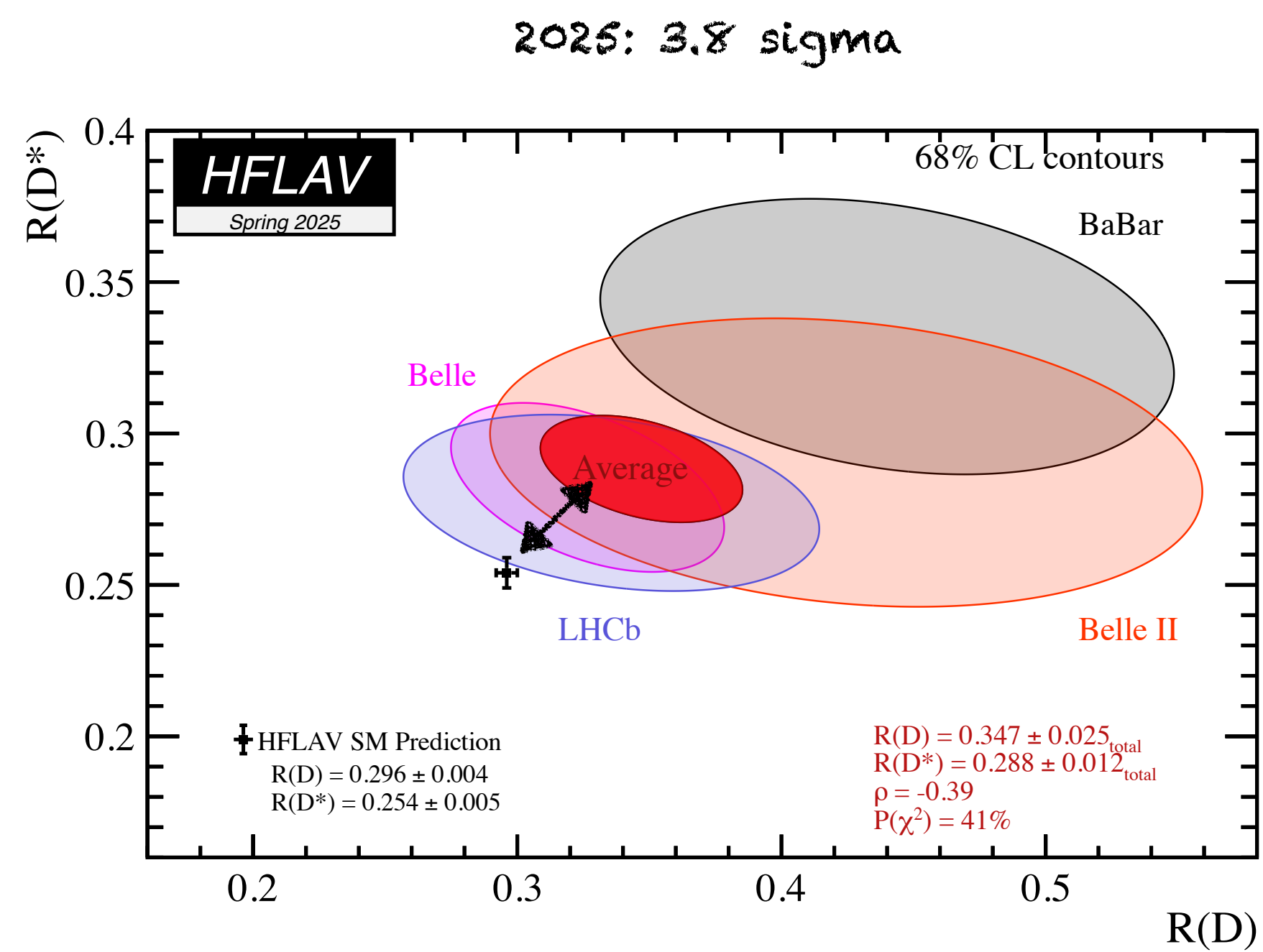
<https://hflav-eos.web.cern.ch/hflav-eos/semi/spring25/html/RDsDsstar/RDRDs.html>

La règle des « 5 sigmas »

- Il faut être sûr d'observer quelque chose d'anormale, pas seulement une déviation statistique
- 3 Sigma: « Indice prometteur »
- 5 sigma: « Découverte »



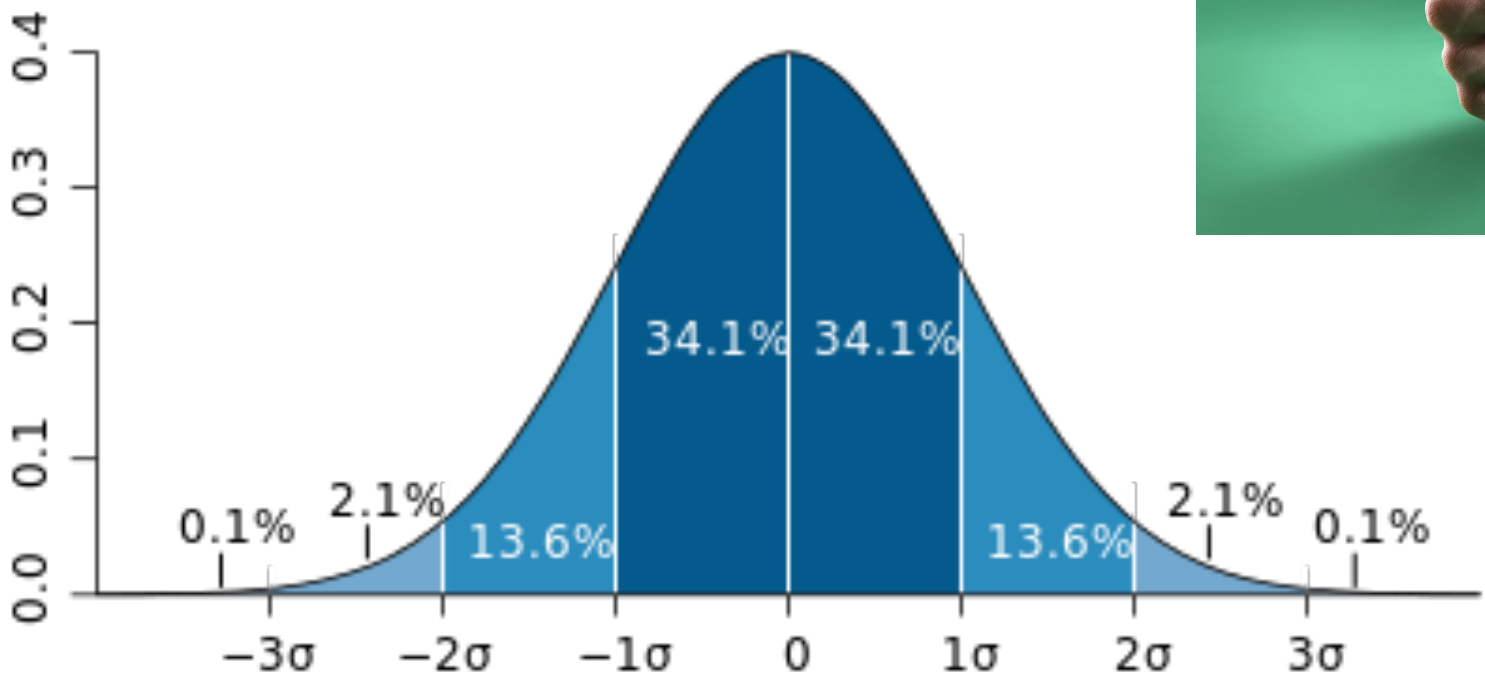
Quelle précision faut-il pour une découverte?



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

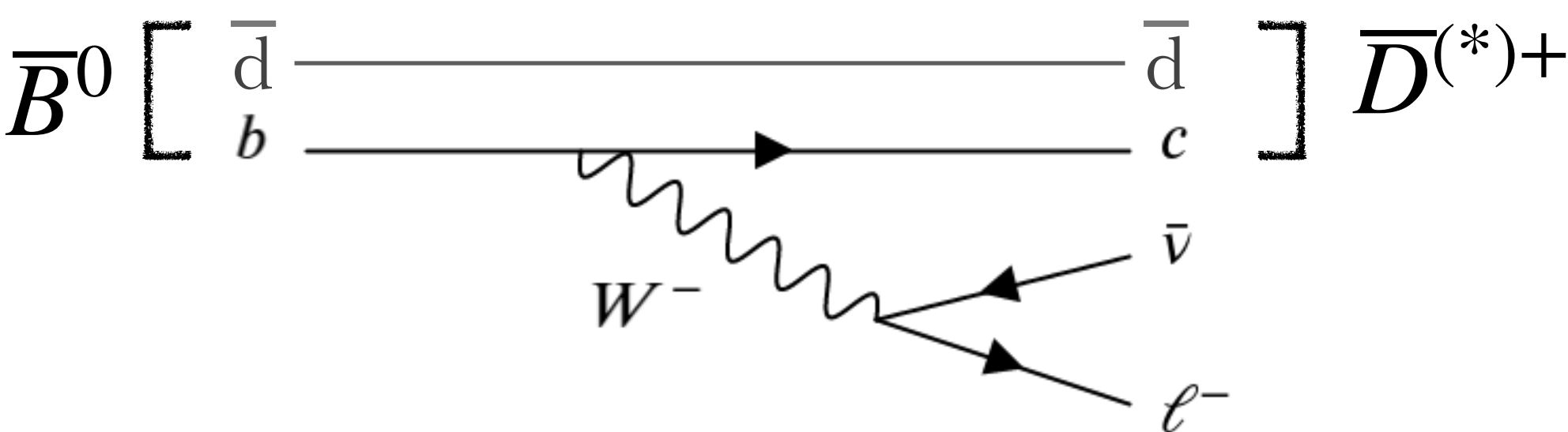
La règle des « 5 sigmas »

- Il faut être sûr d'observer quelque chose d'anormale, pas seulement une déviation statistique
- 3 Sigma: « Indice prometteur »
- 5 sigma: « Découverte »

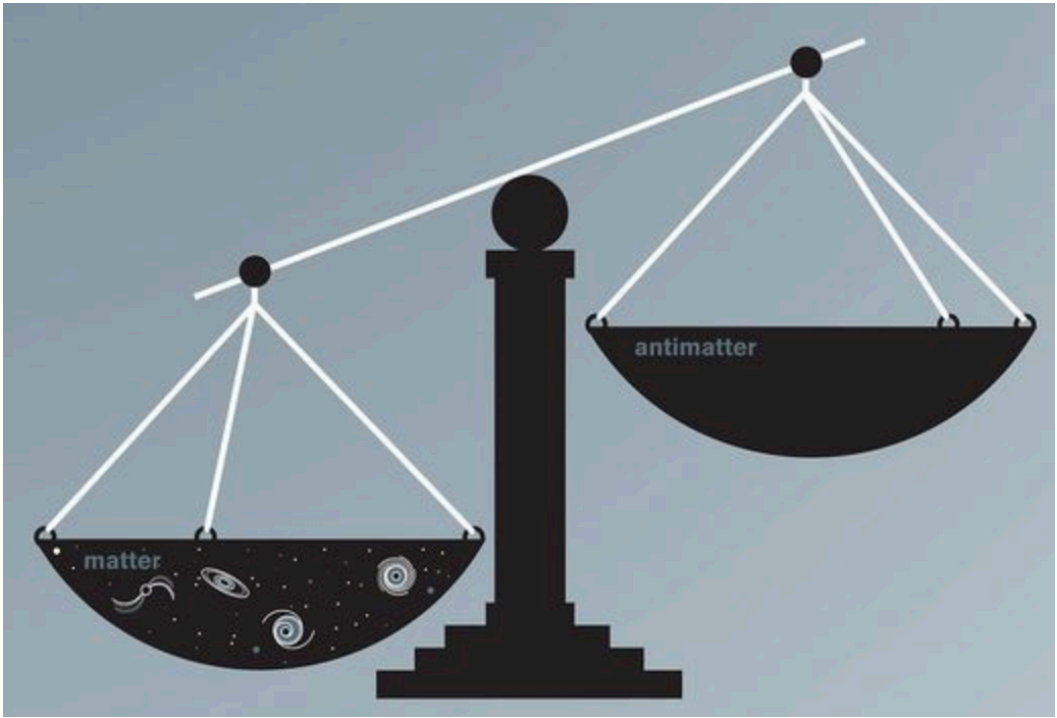
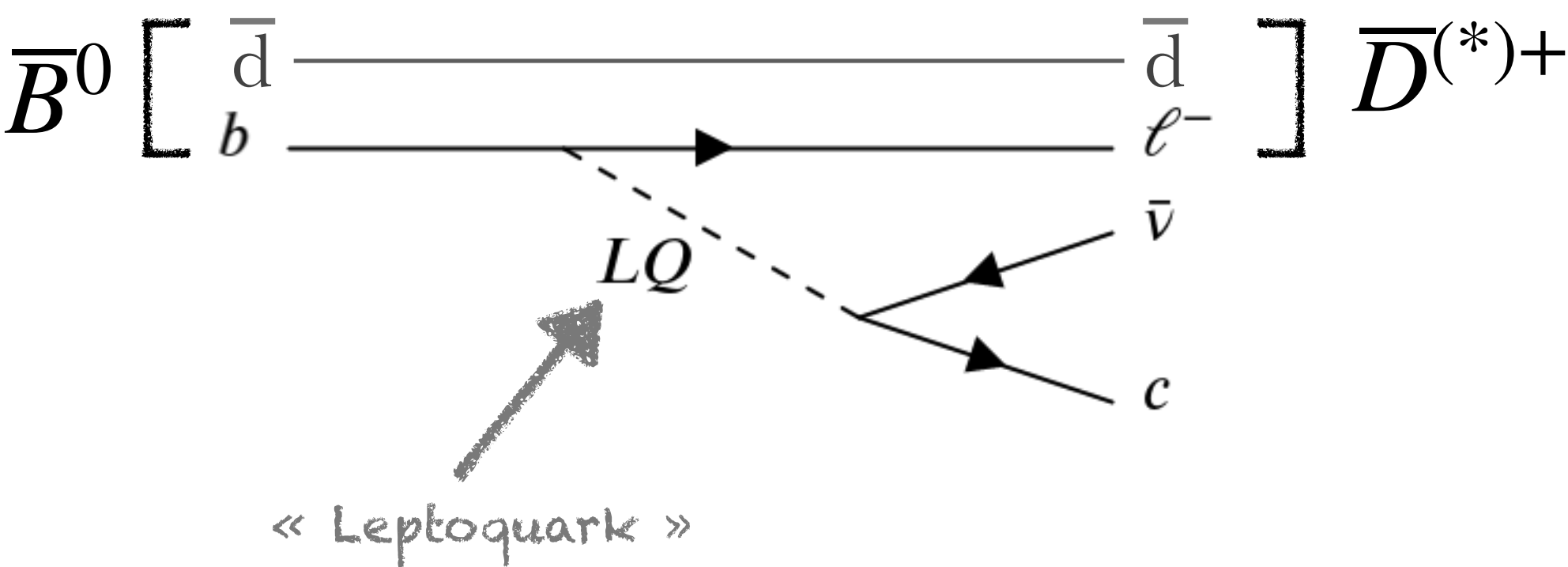


Déjà des interpretations de Nouvelle Physique?

Dans le Modèle Standard:



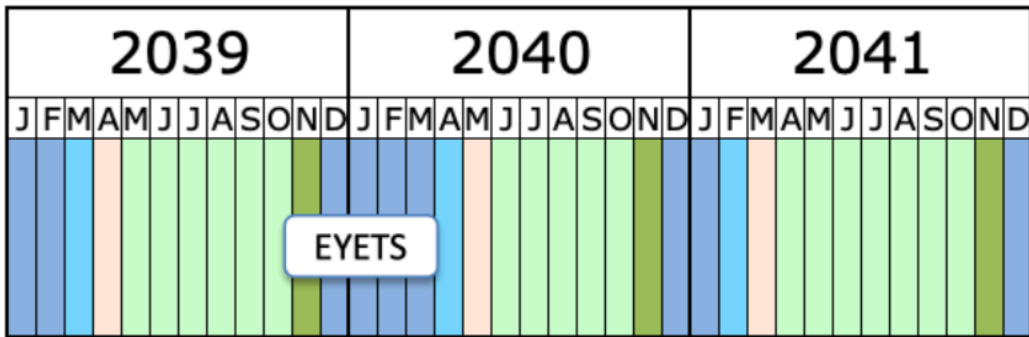
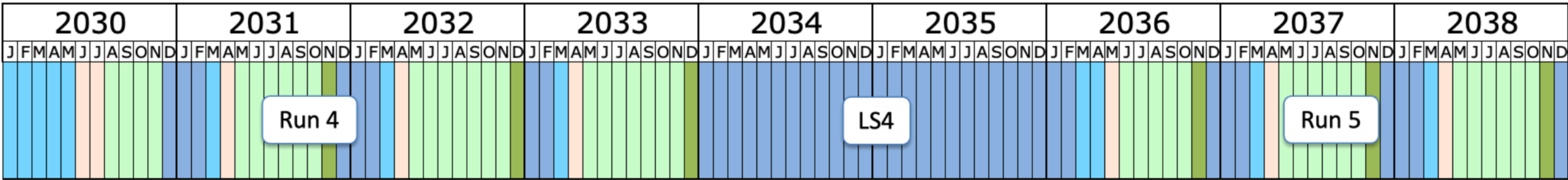
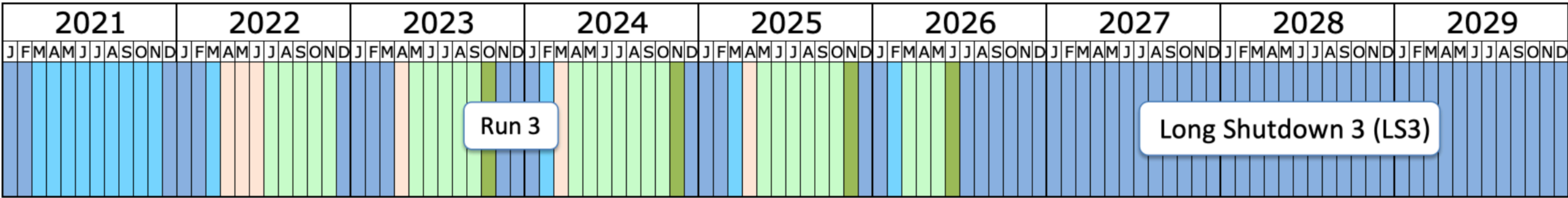
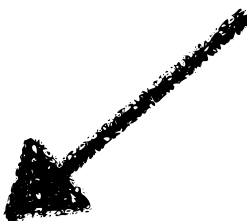
Proposition de « Nouvelle Physique »



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



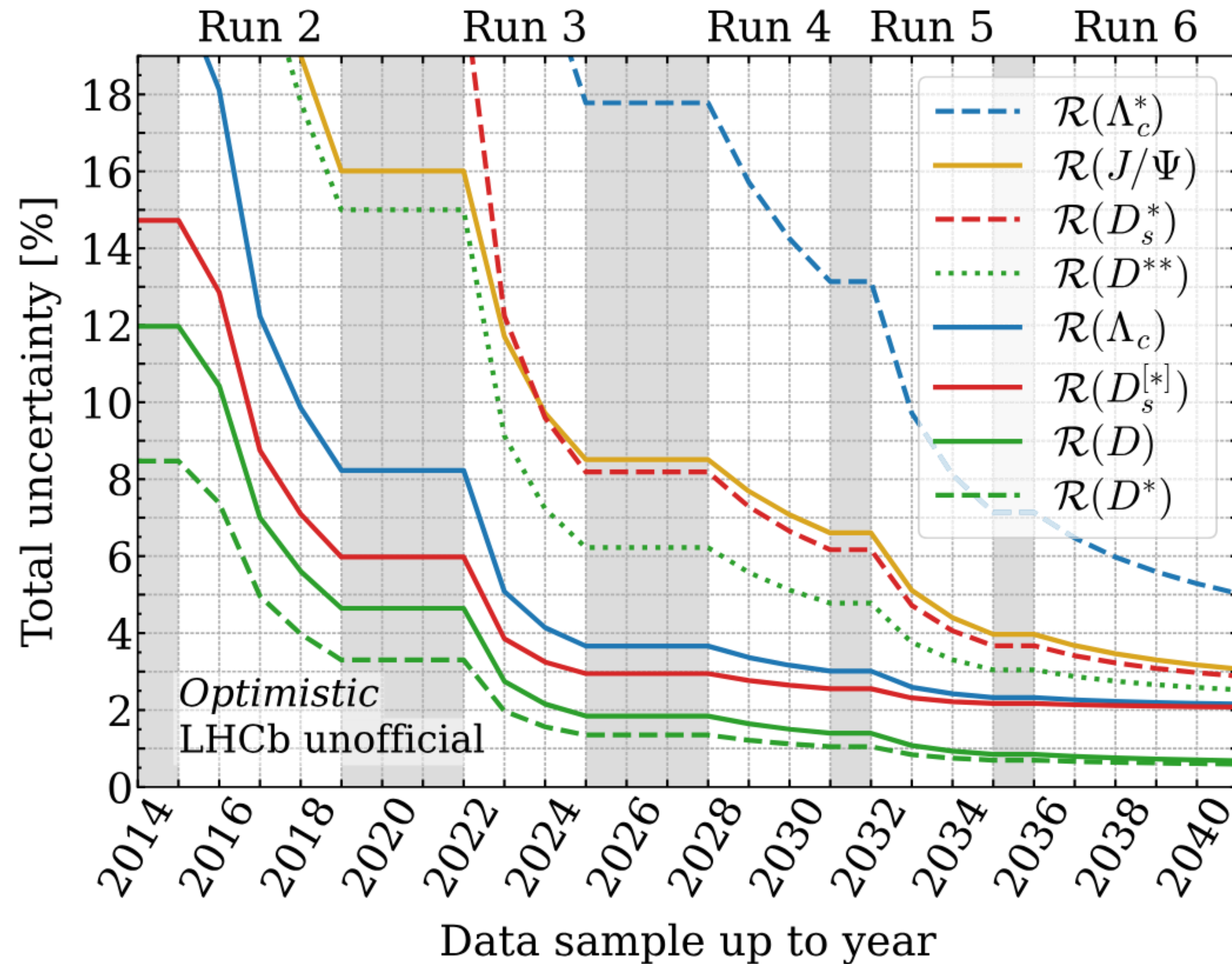
- Shutdown/Technical stop
- Protons physics
- Ions
- Commissioning with beam
- Hardware commissioning

High Luminosity LHC (HL-LHC)



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

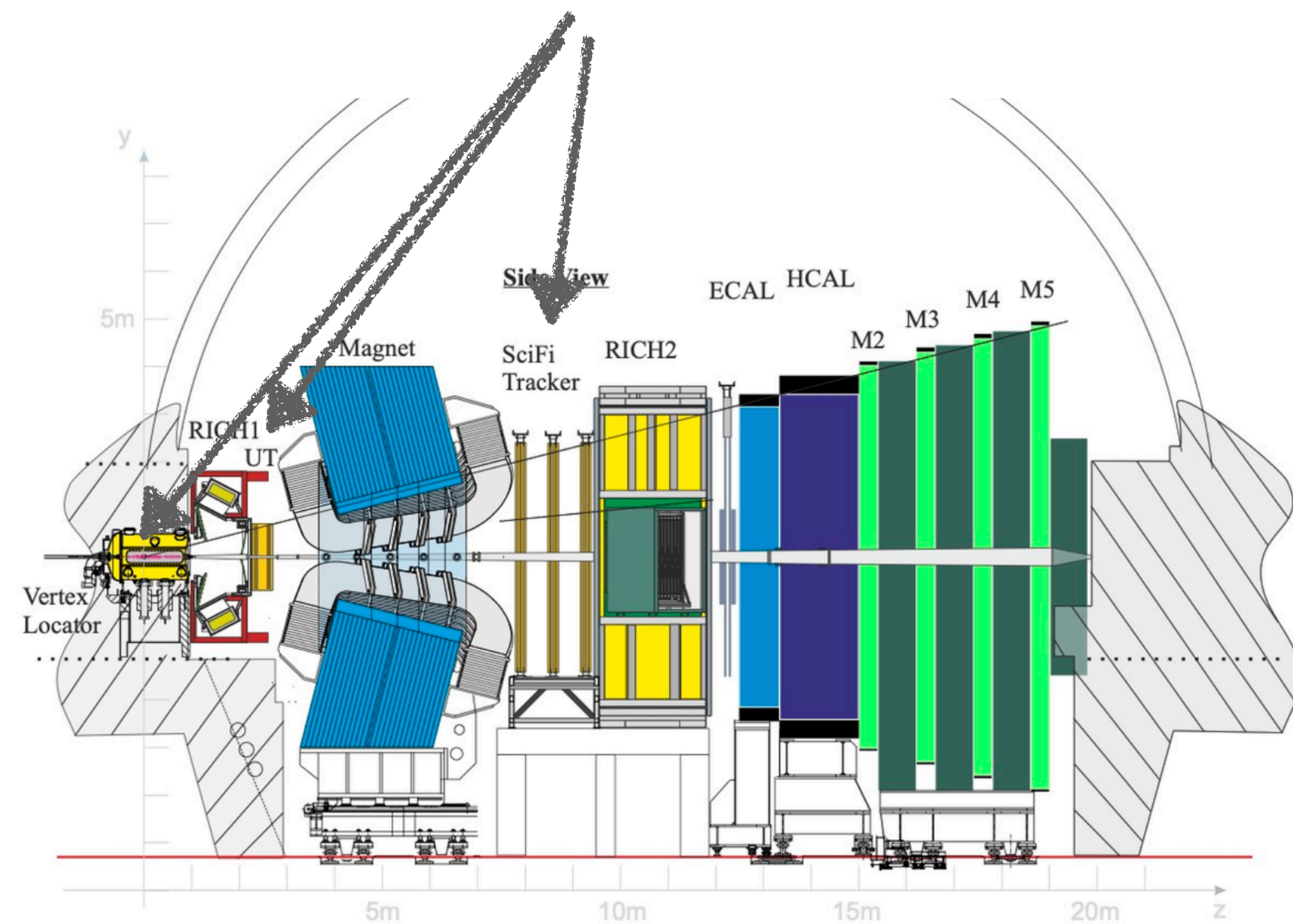
Plus de données nécessaires pour plus de précision



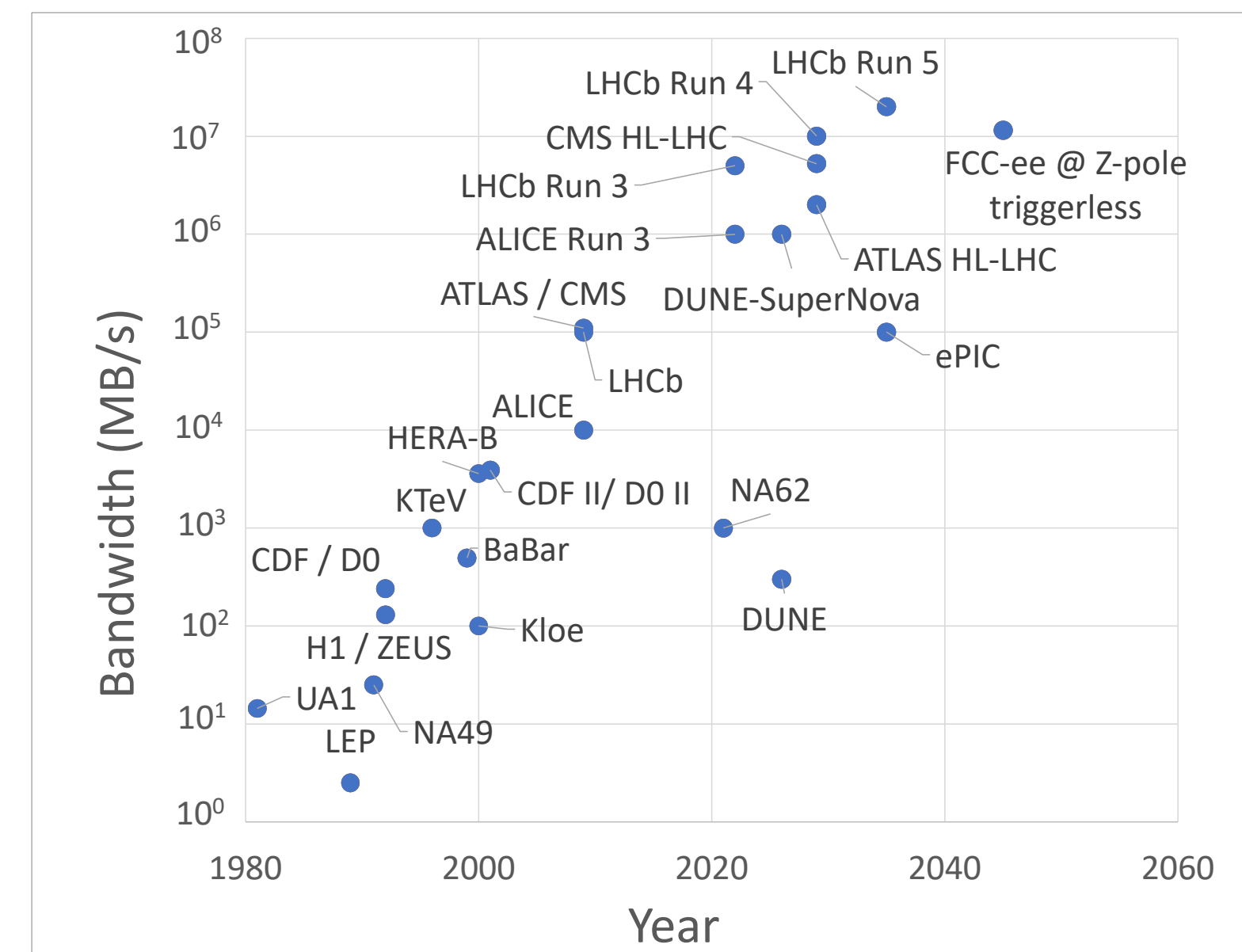
1ère mise à jour de l'expérience LHCb

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

Remplacement des détecteurs à trajectoire



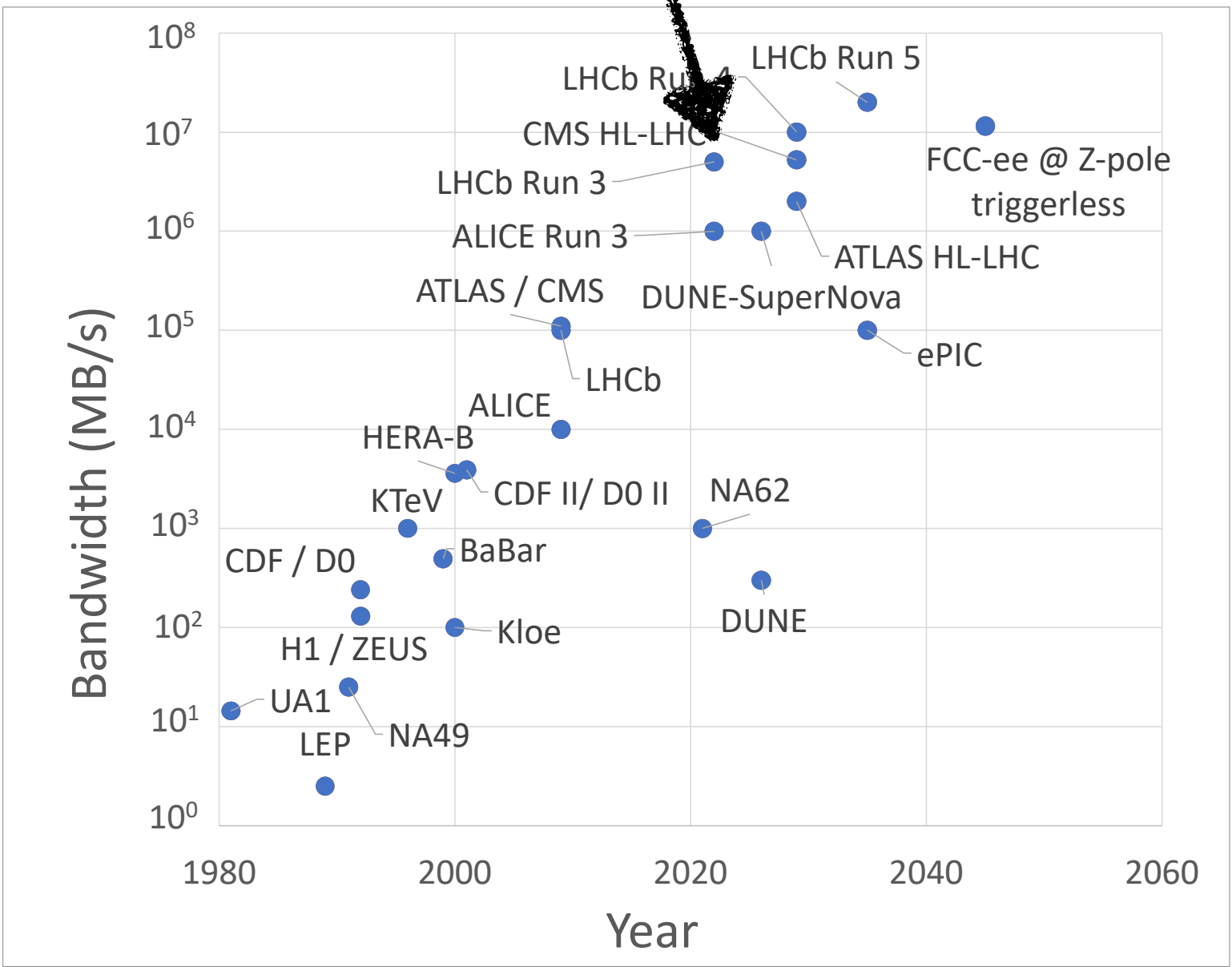
Lecture de toutes les données produites par l'expérience
1ère fois en physique des particules



Le déficit en temps réel de LHCb

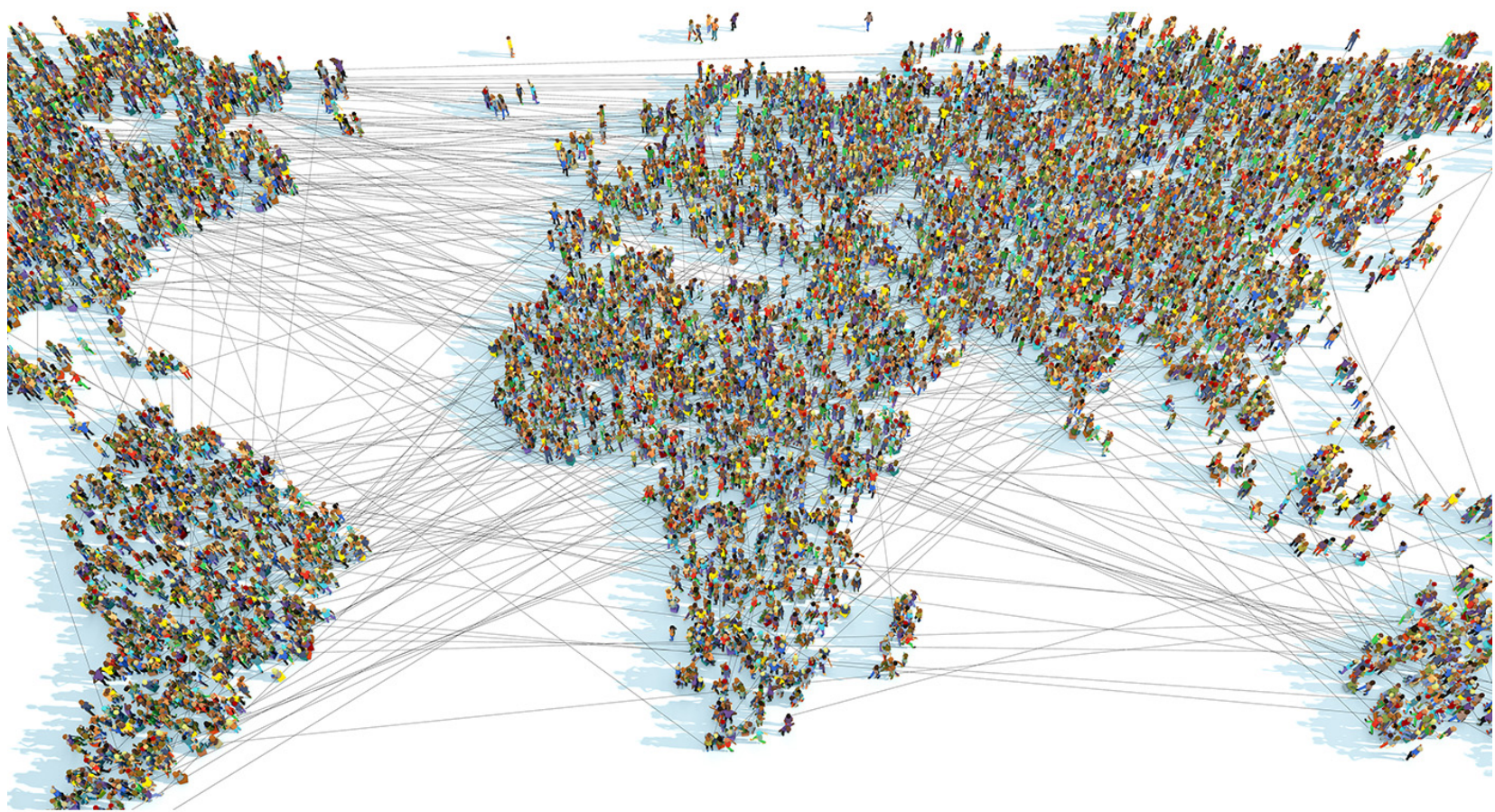
Volume de données traité par seconde:

4 TB/s



Plus grands points d'échange d'internet

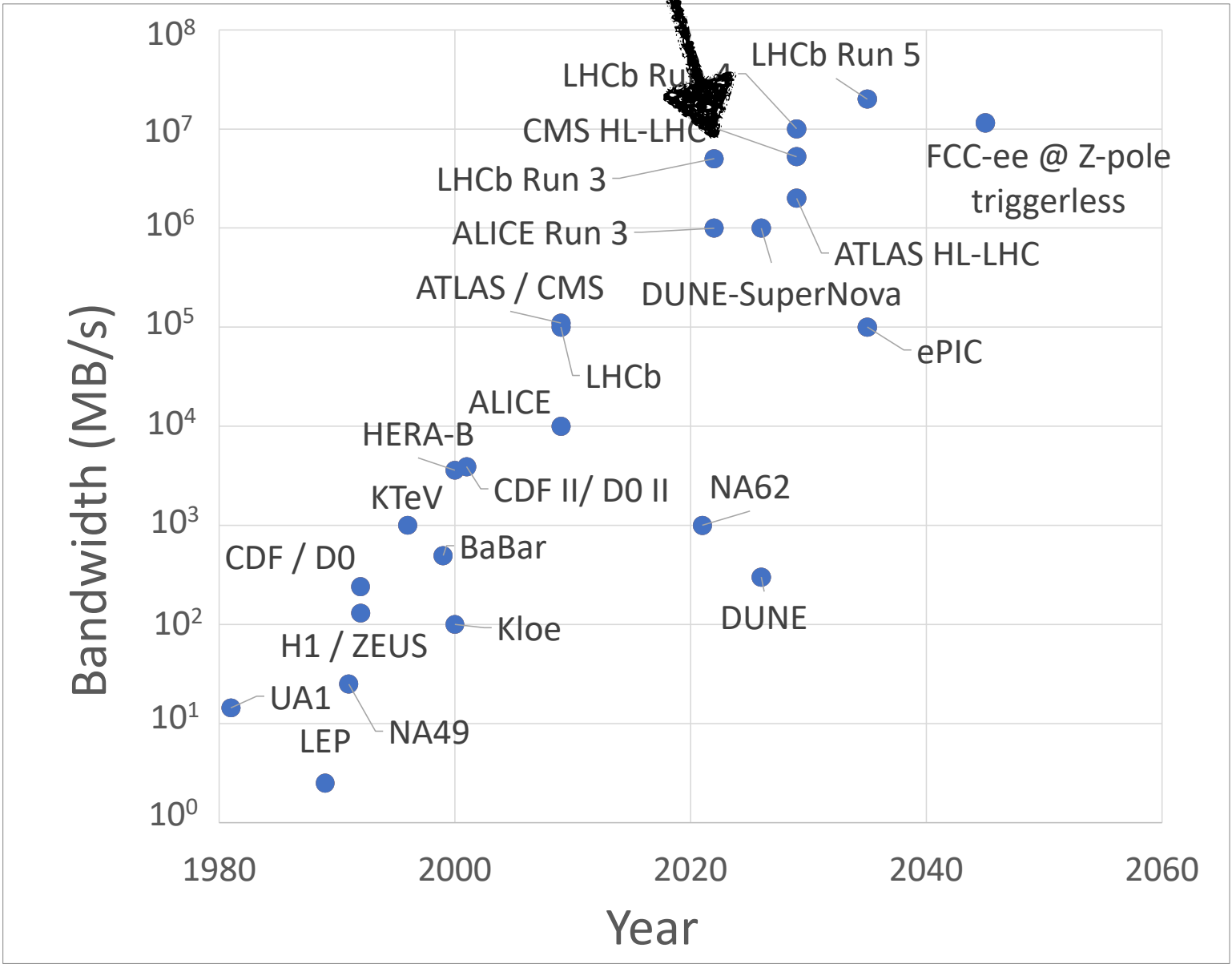
- IX.br (Brésil): 4 TB/s
- DE-CIX (Allemagne): 2 TB/s



Le déficit en temps réel de LHCb

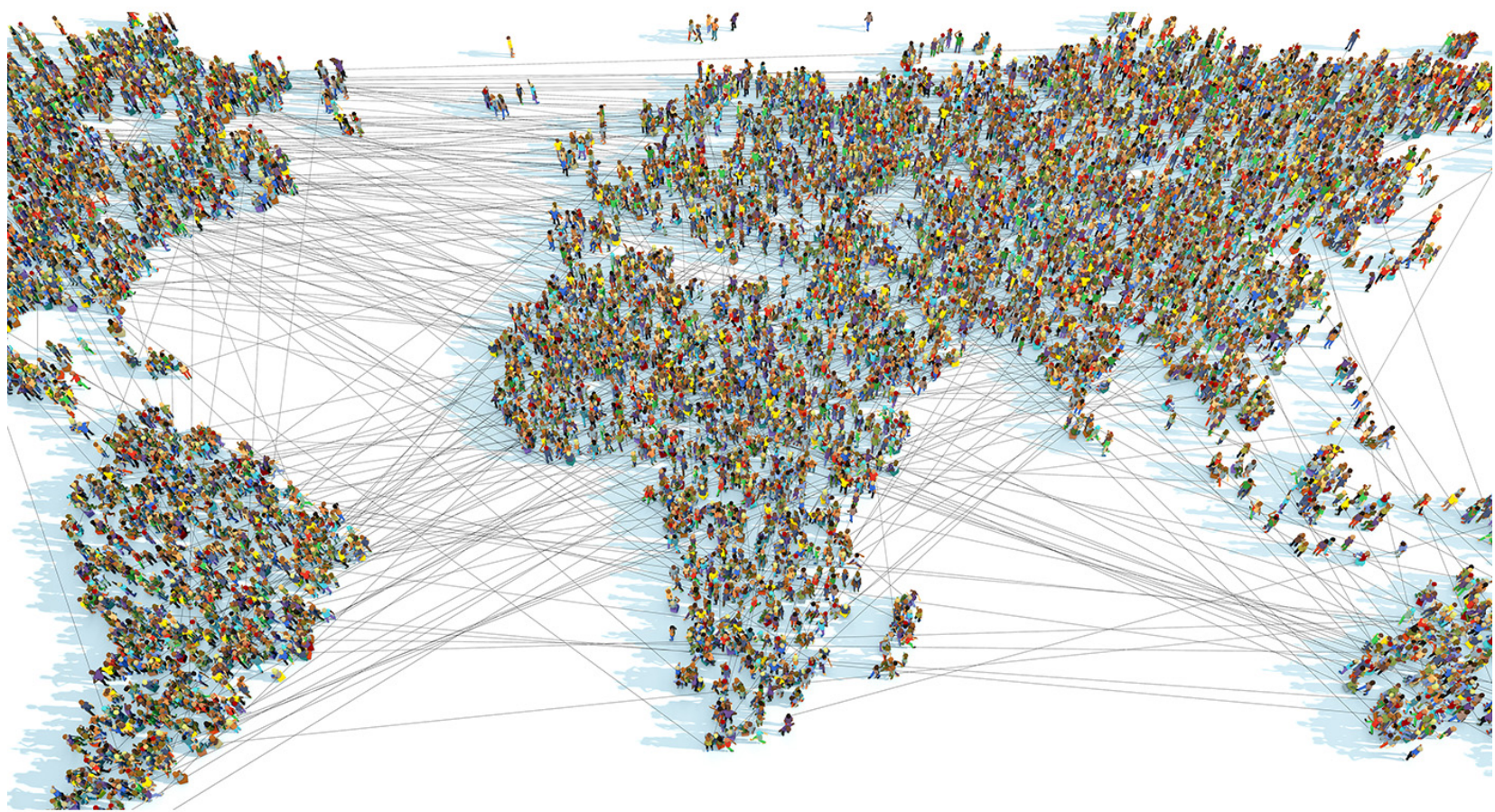
Volume de données traité par seconde:

4 TB/s



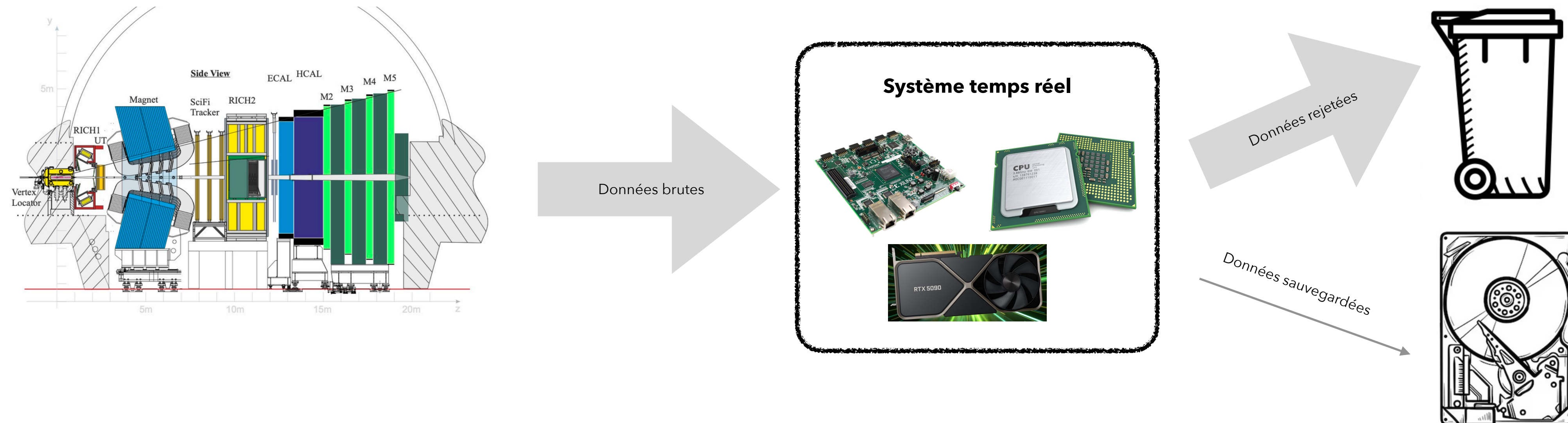
Plus grands point d'échange d'internet

- 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



Parenthèse: Étudier des oiseaux

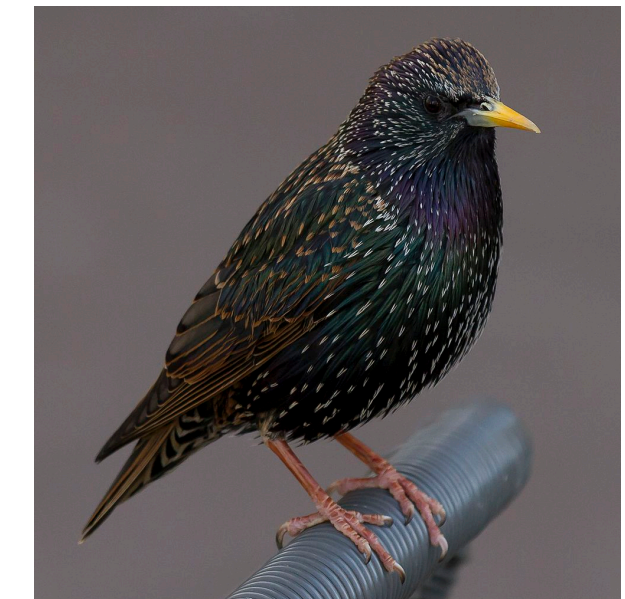


- Y a-t-il un type d'oiseau inattendu dans le groupe ?
- De quel type d'oiseau s'agit-il ? Comment se comporte-t-il ?

Parenthèse : Identification des oiseaux à partir de critères simples



Etourneau sansonnet?



Choucador de Hildebrandt?



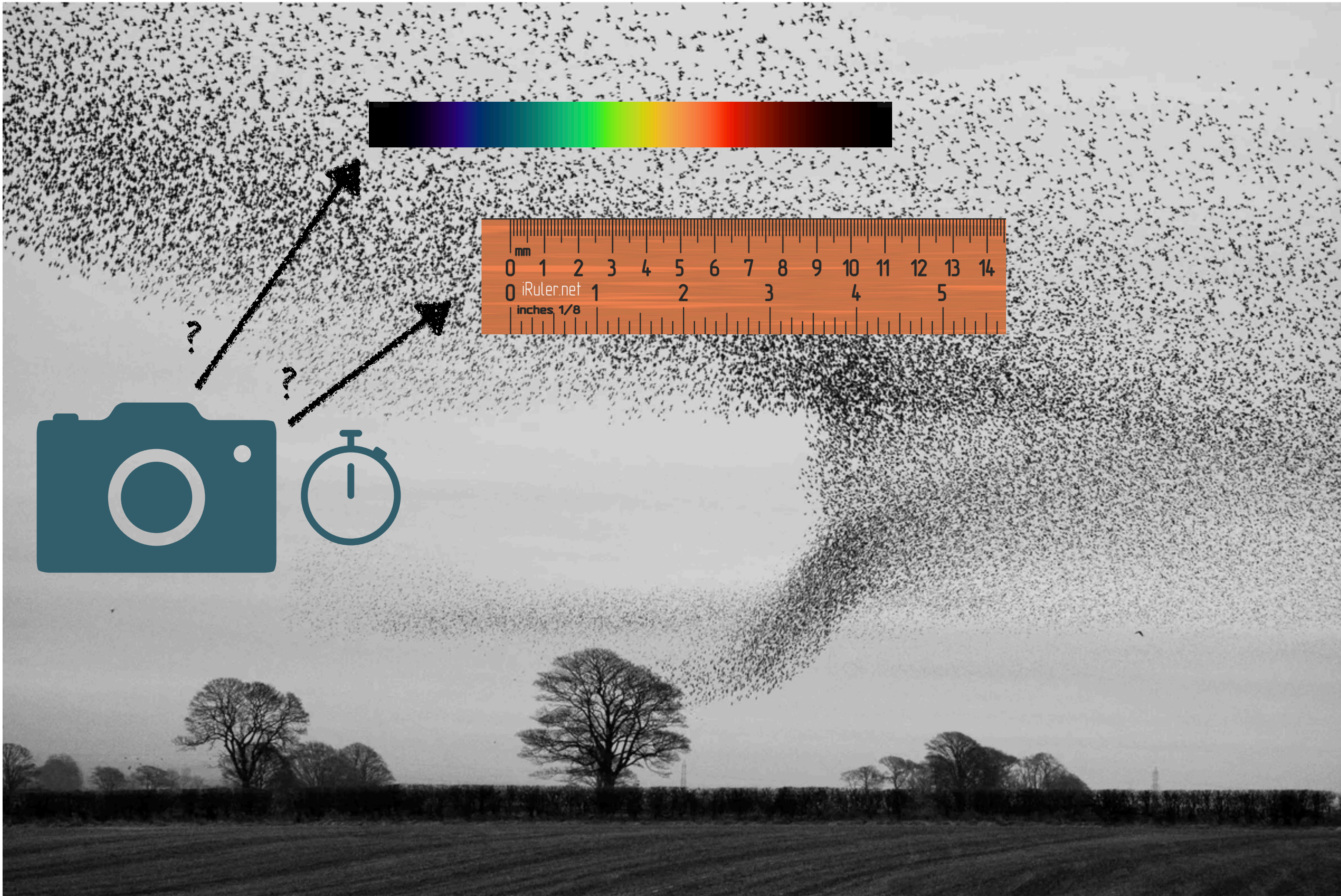
Déterminer la couleur

Quelque chose plus grand?



Déterminer la taille

Parenthèse : Identification des oiseaux à partir de critères simples



Etourneau sansonnet?



Choucador de Hildebrandt?



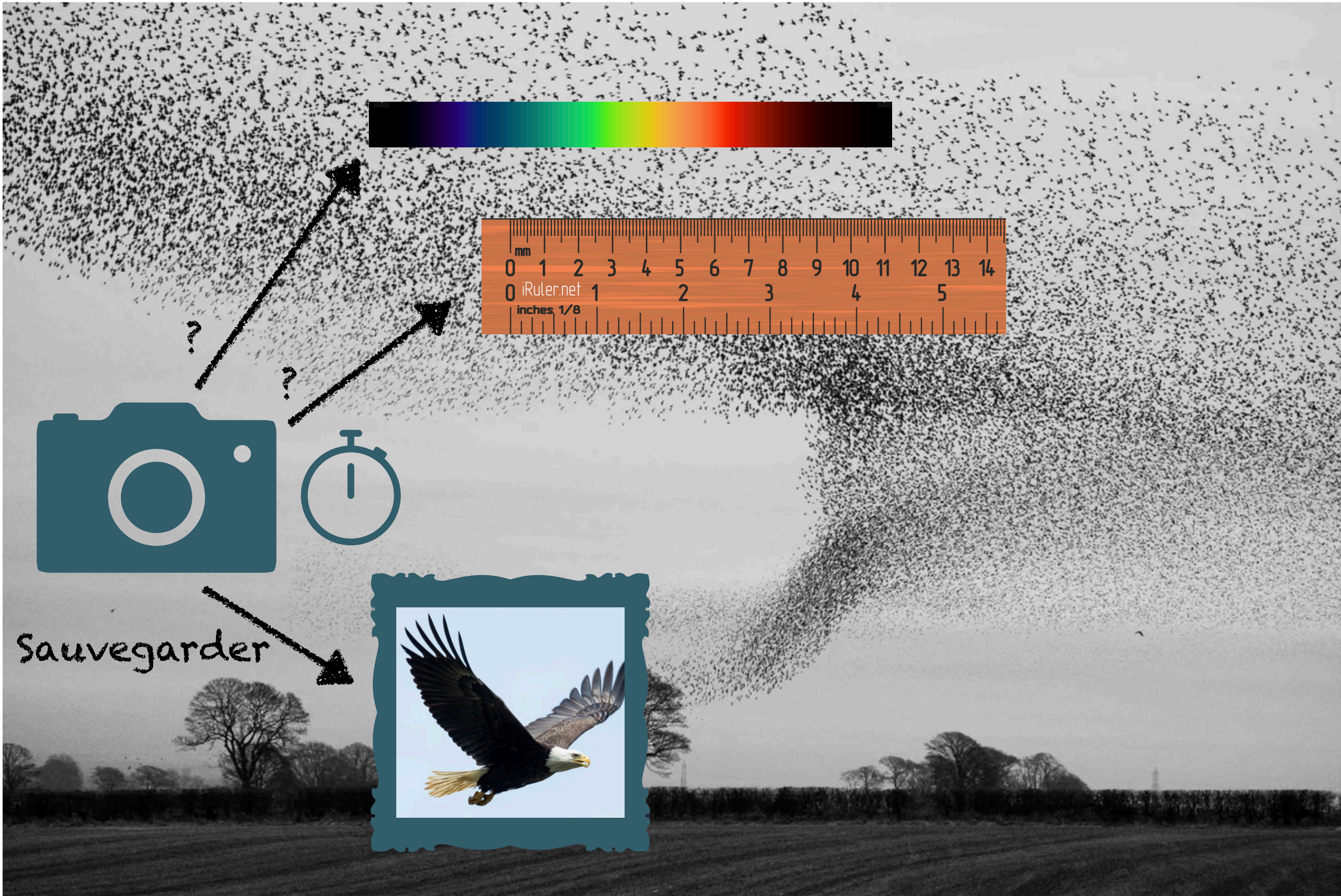
Déterminer la couleur

Quelque chose plus grand?



Déterminer la taille

Parenthèse : Identification des oiseaux à partir de critères simples



Etourneau sansonnet?



Choucador de Hildebrandt?



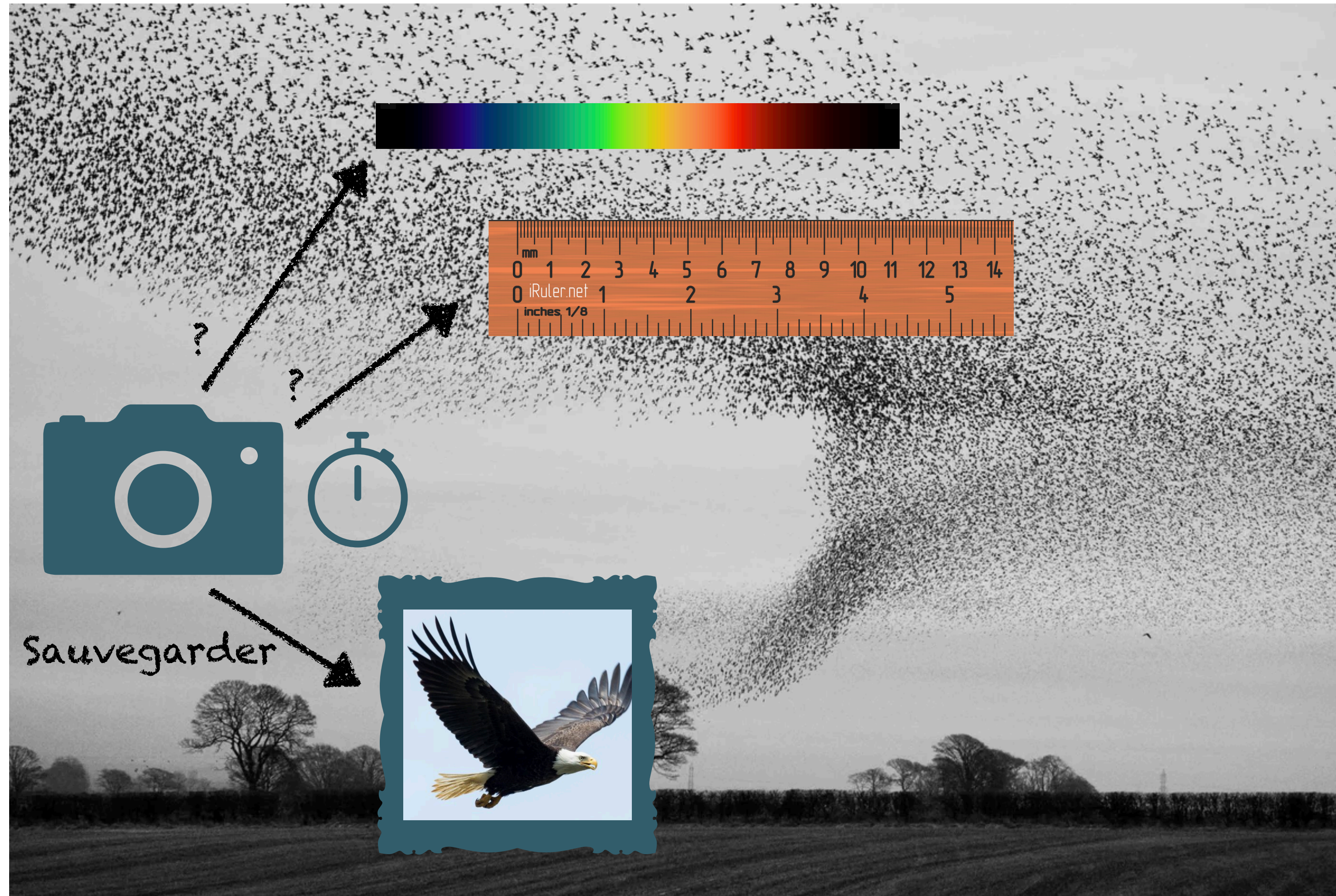
Quelque chose plus grand?



Déterminer la couleur

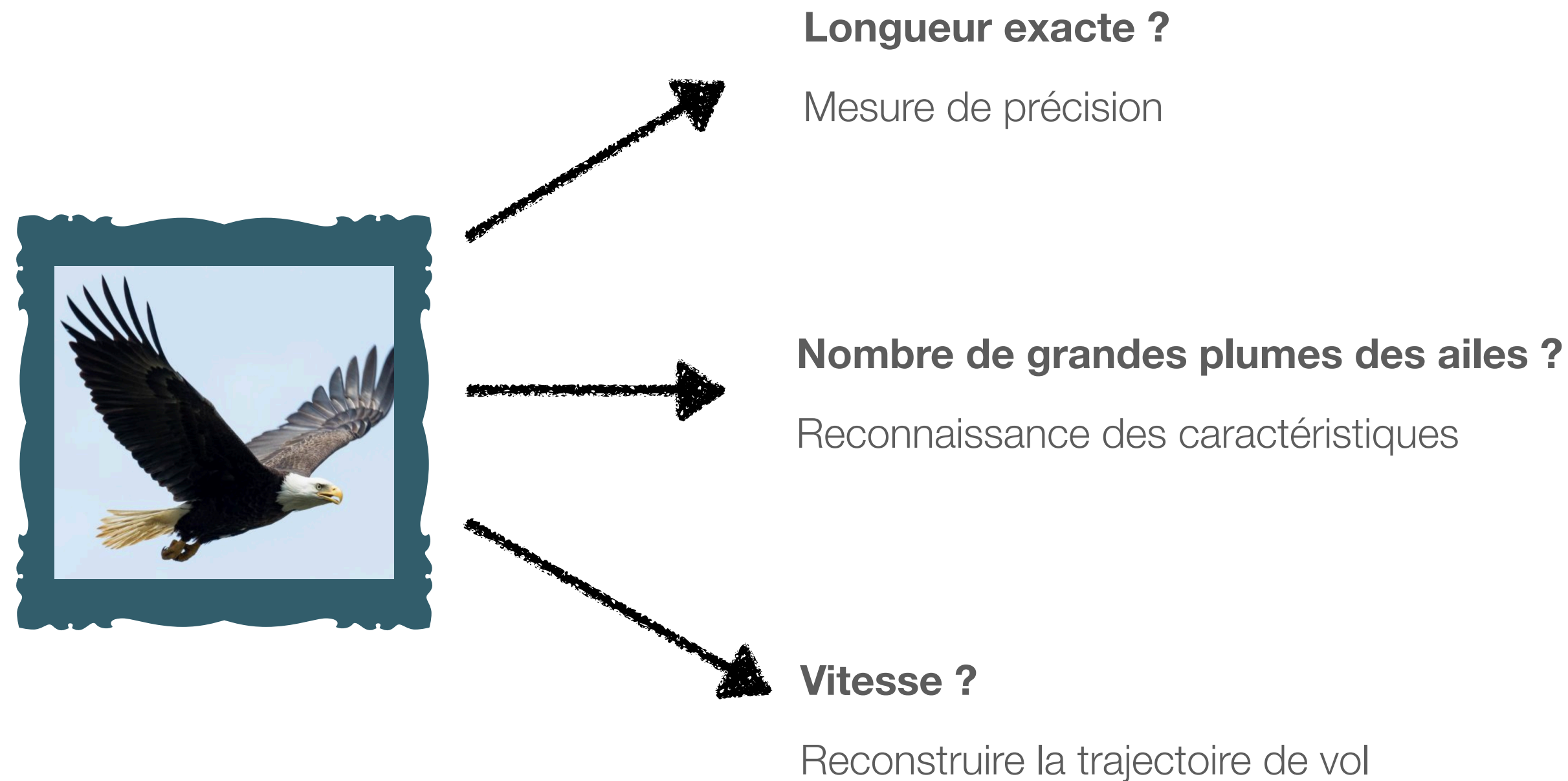
Déterminer la taille

Parenthèse : Identification des oiseaux à partir de critères simples



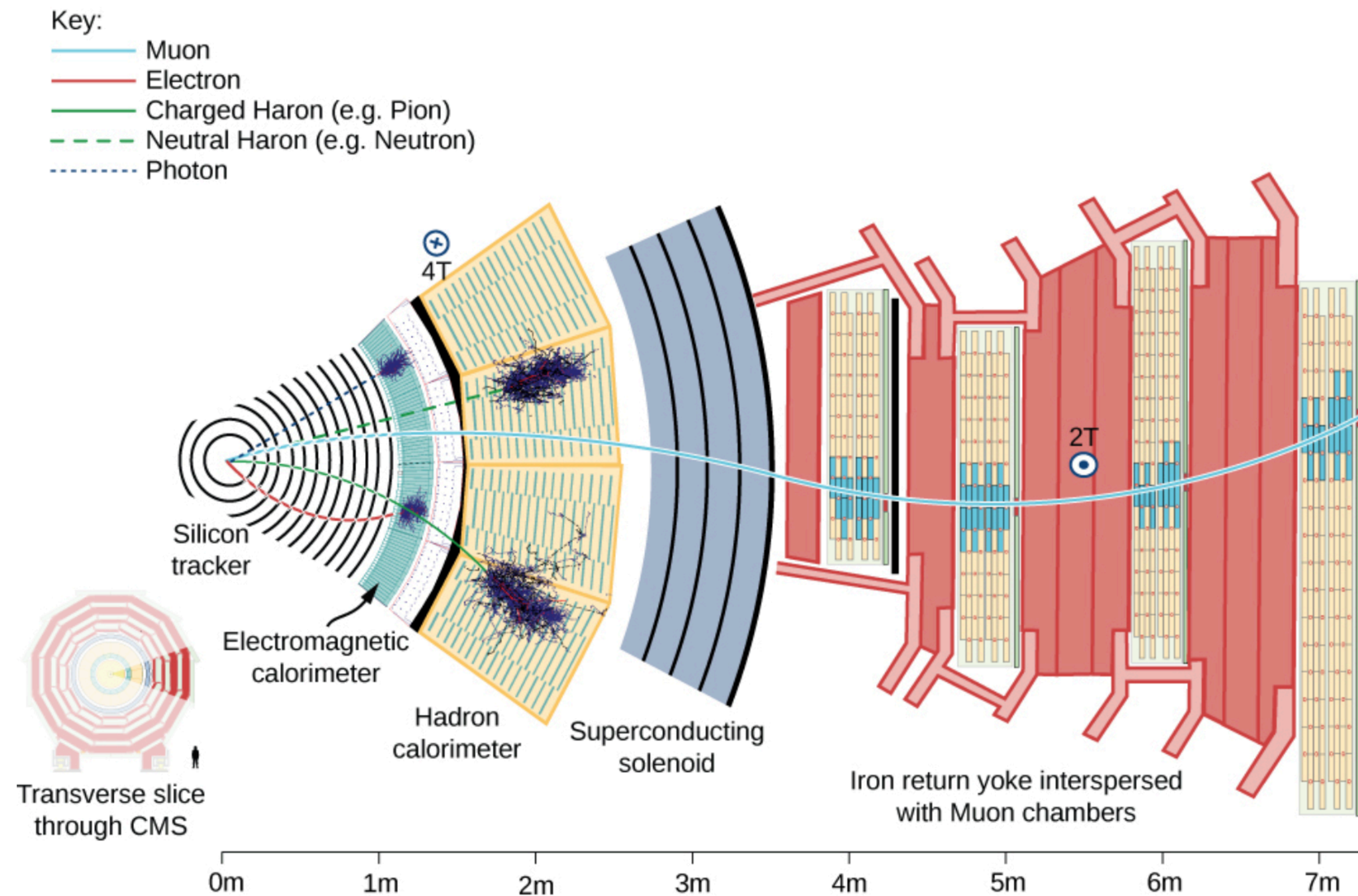
- Décision automatique rapide
- Analyser une partie de l'image
- Utiliser des informations simples
- Décider quelle image enregistrer

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

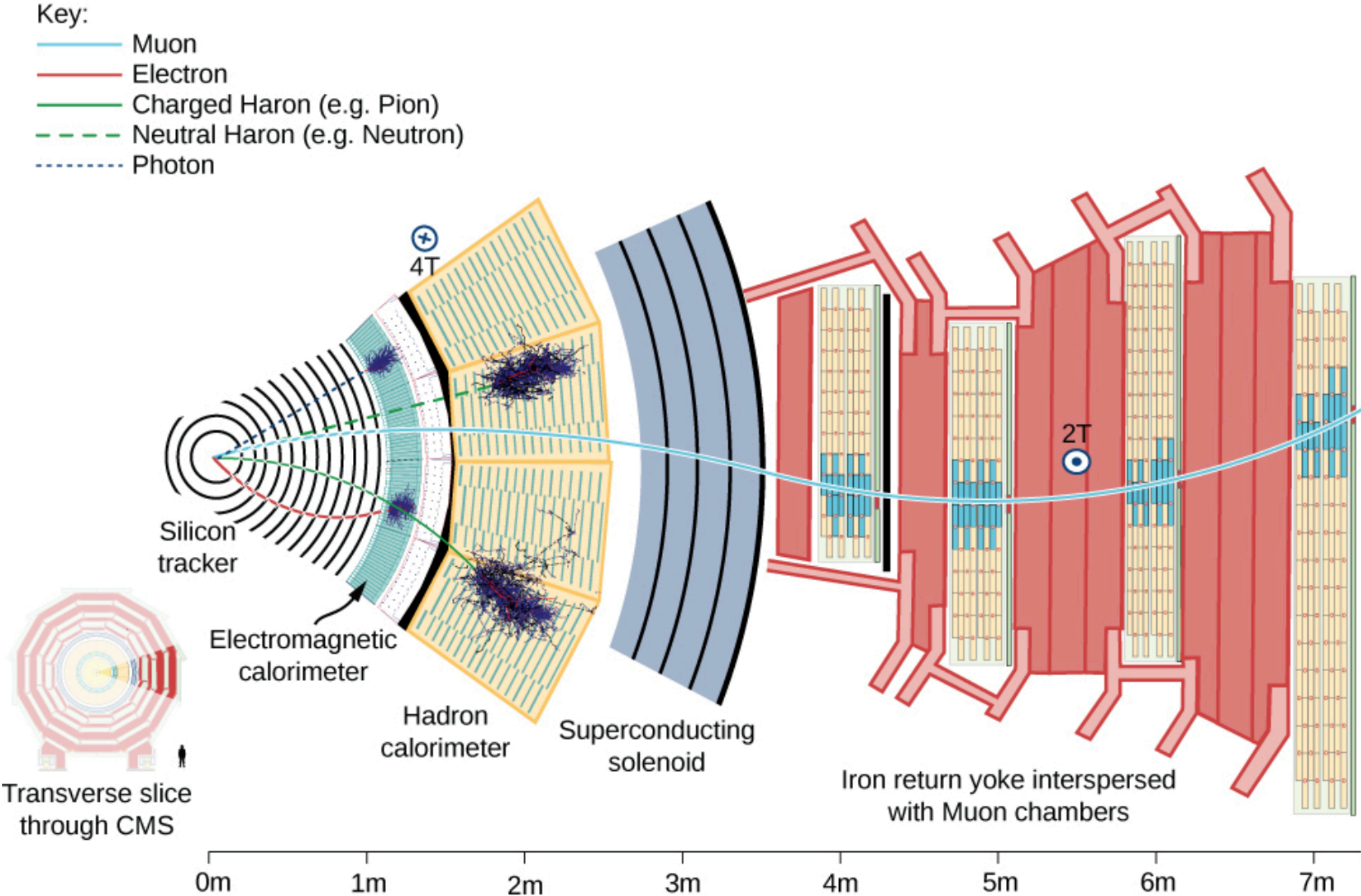


- Utilisez toutes les informations contenues dans l'image
- Effectuez des mesures précises
- Vérifiez les motifs et les caractéristiques
- Si l'oiseau présente un comportement vraiment intéressant, enregistrez l'image de manière permanente dans votre espace de stockage

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

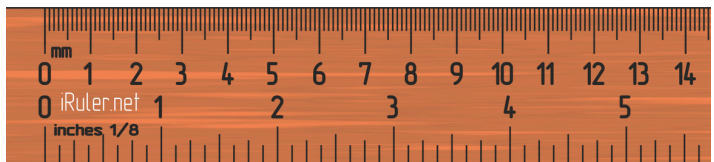
μ
muon

γ
photon

Proton
Neutron

Vitesse?

Mesurer la quantité de mouvement



Mesurer la masse

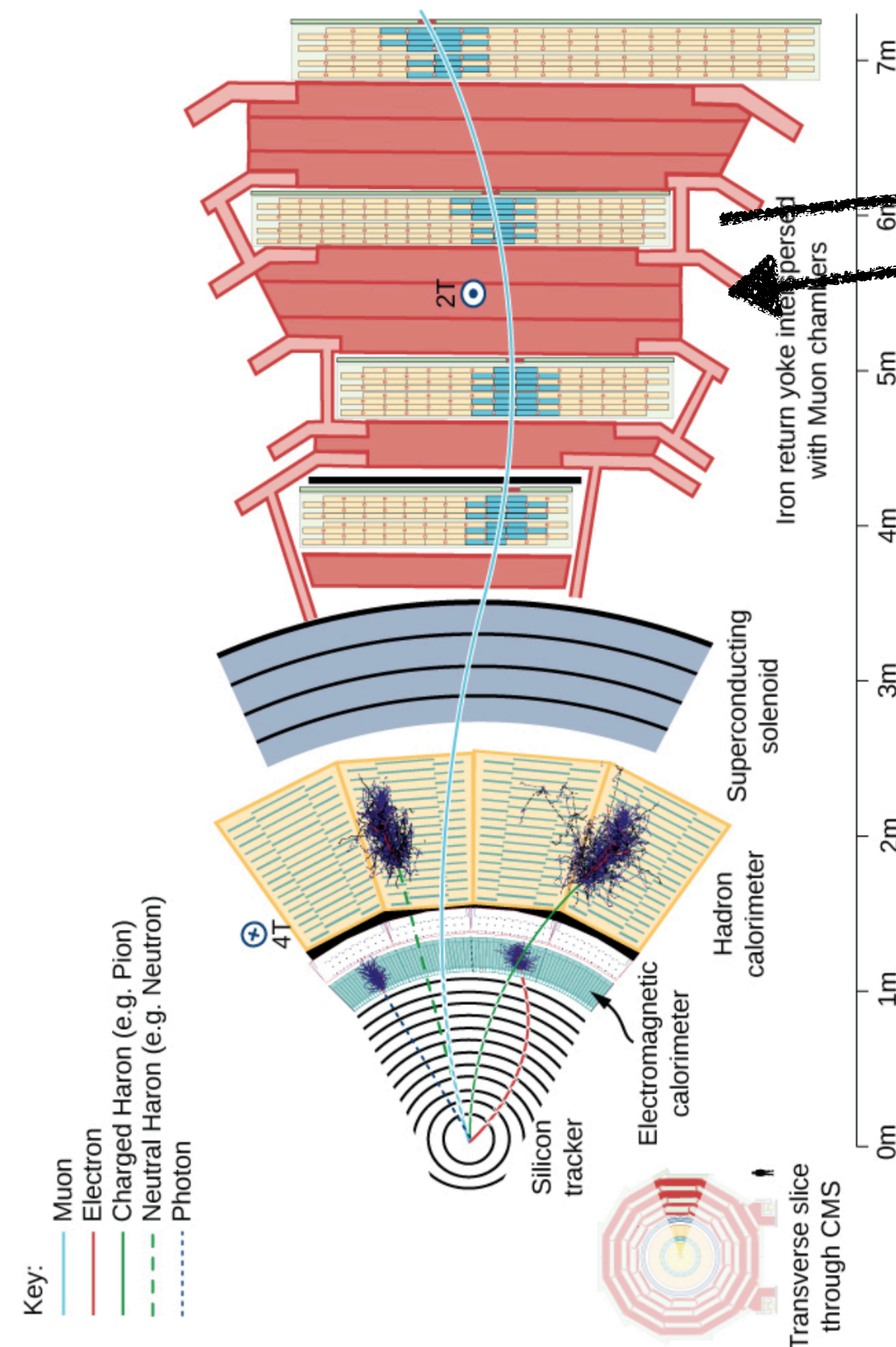


Nombre de grandes
plumes des ailes ?

Nombre de collisions de particules



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

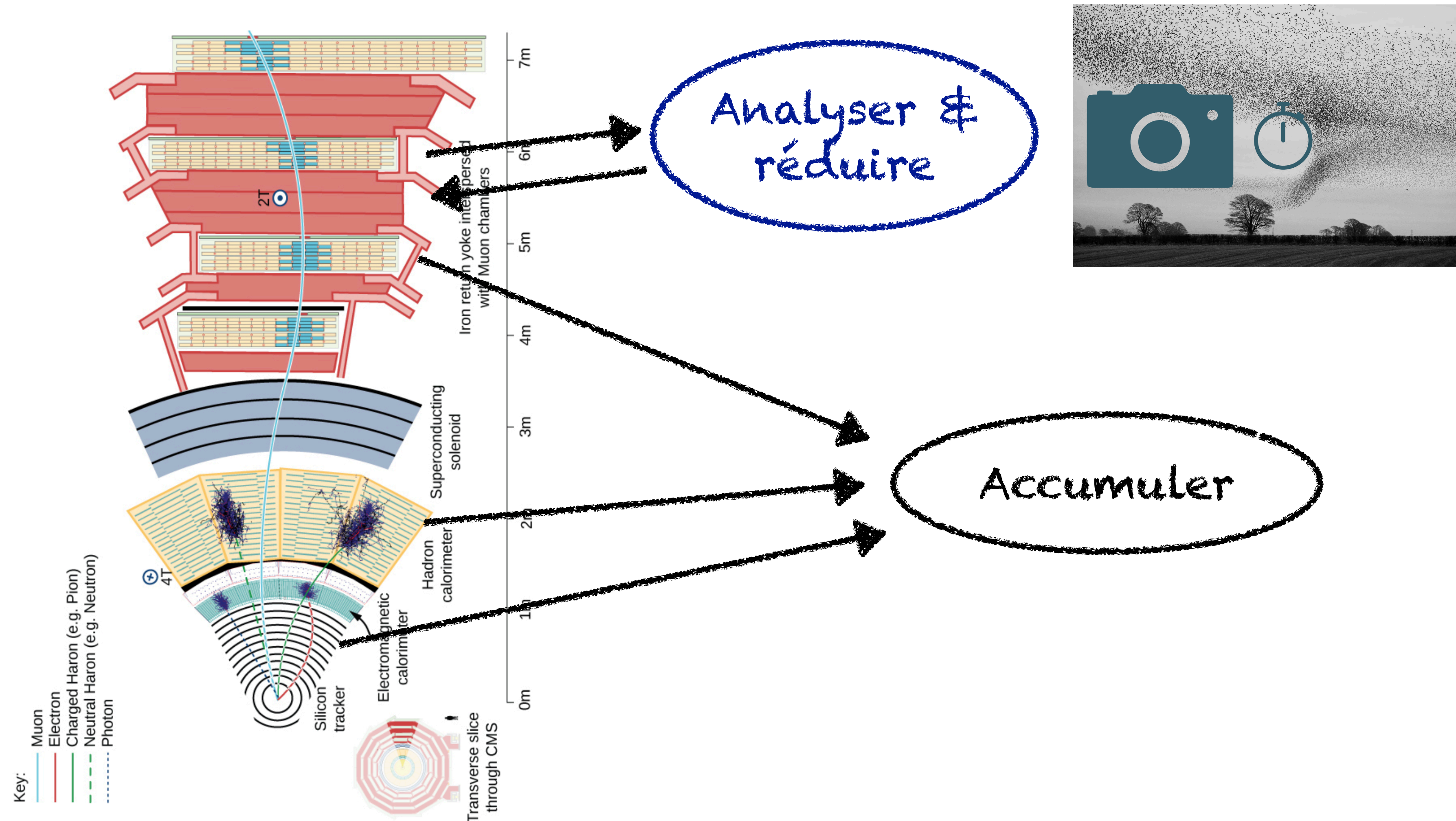


Analyser & réduire



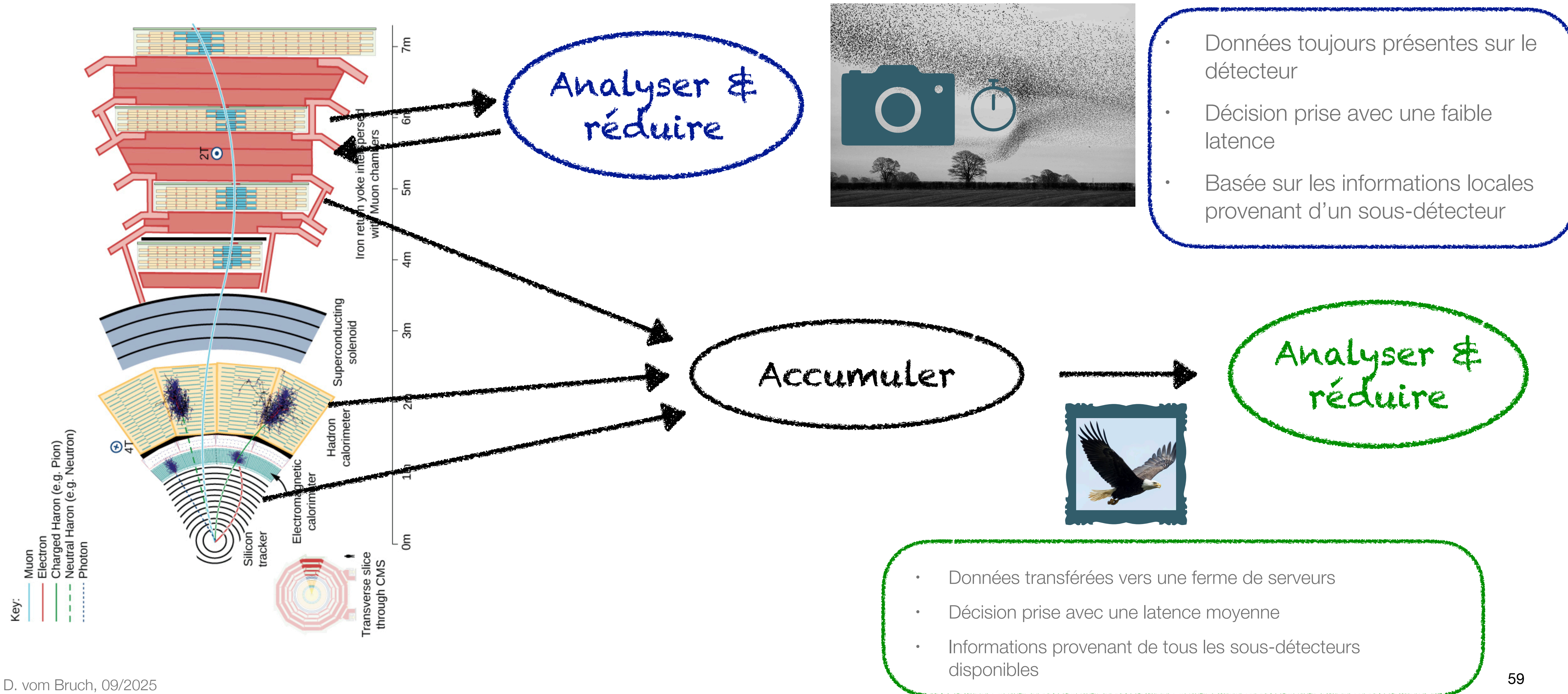
- Données toujours présentes sur le détecteur
- Décision prise avec une faible latence
- Basée sur les informations locales provenant d'un sous-détecteur

« 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



Mapping aux architectures informatiques



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

« Hardware trigger »

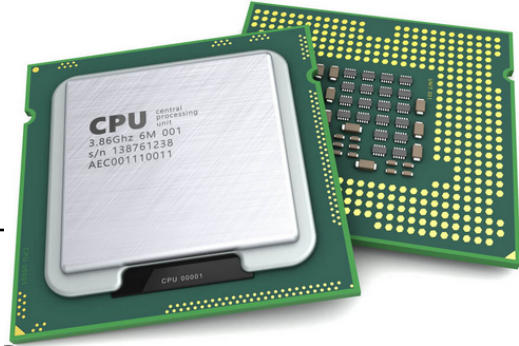

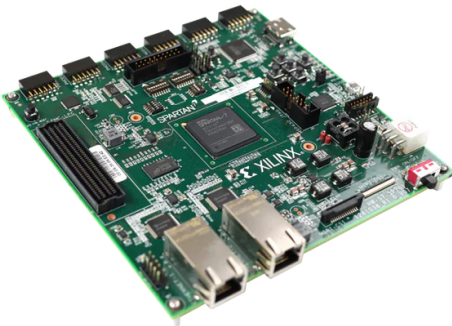


- Données transférées vers une ferme de serveurs
- Décision prise avec une latence moyenne
- Informations provenant de tous les sous-détecteurs disponibles

« Software trigger »

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

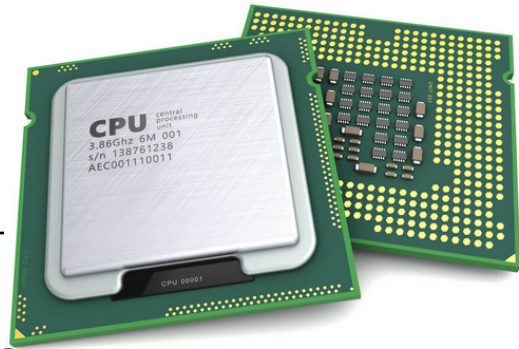
Comparaison de processeurs

	 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

« Software trigger »

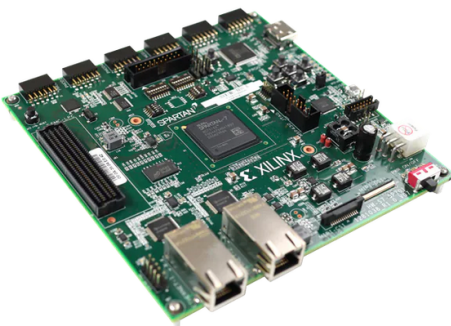
« Hardware trigger »



CPU



Cartes graphiques



FPGA

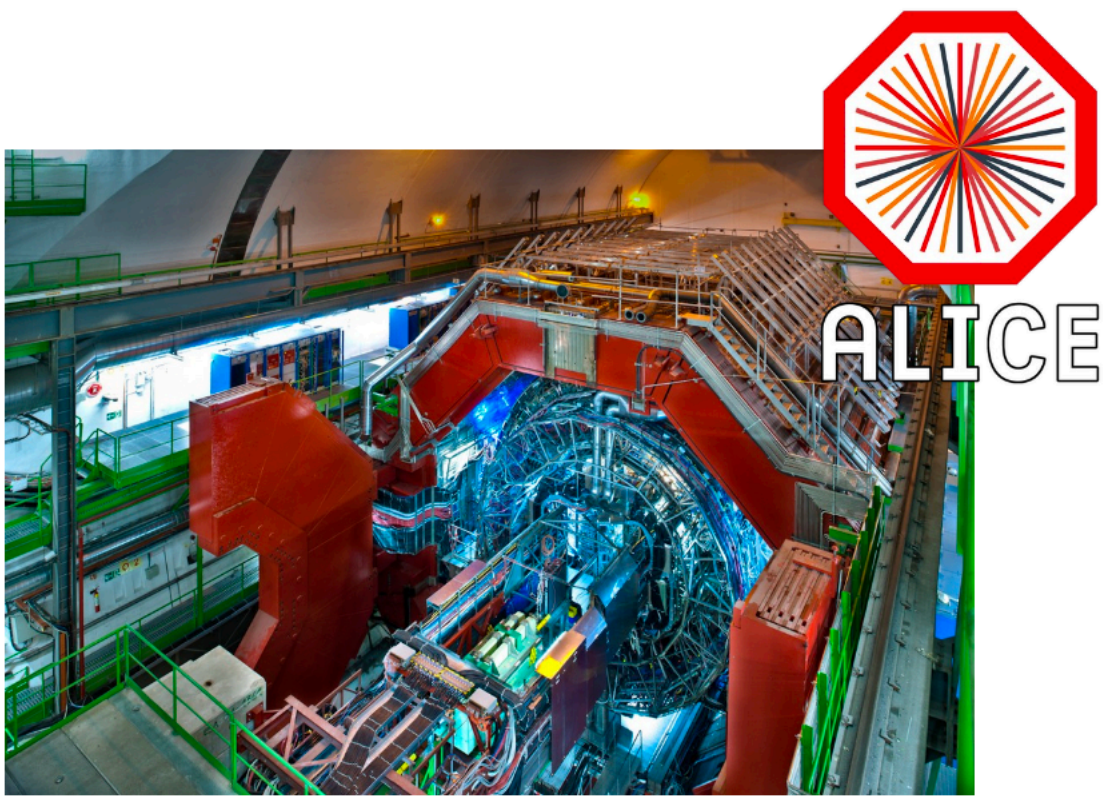
	CPU	Cartes graphiques	FPGA
Latence	O(10) μ s	O(100) μ s	O(10) ns
Entrée / Sortie	Ethernet, USB, PCIe	PCIe, Nvlink	Toute source de données via un circuit imprimé (PCB)
Coût d'ingénierie	Niveau d'entrée bas (Python, C++, etc.)	Niveau d'entrée bas (CUDA, OpenCL,...)	Niveau d'entrée élevé Langages de description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

Les quatres grandes expériences du LHC

« Software trigger » depuis 2022

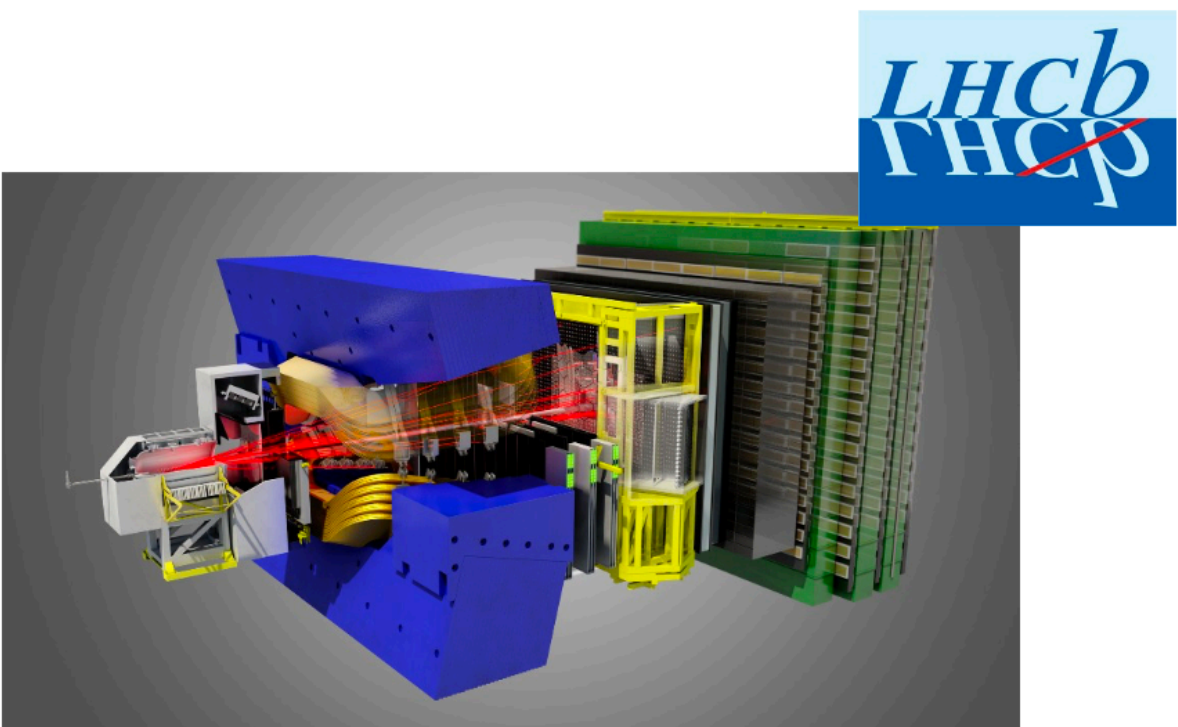
ALICE

Dédié aux collisions d'ions lourds
Étude du plasma quark-gluon



LHCb

Dédié aux hadrons contenant des quarks b et c
Mesures de précision

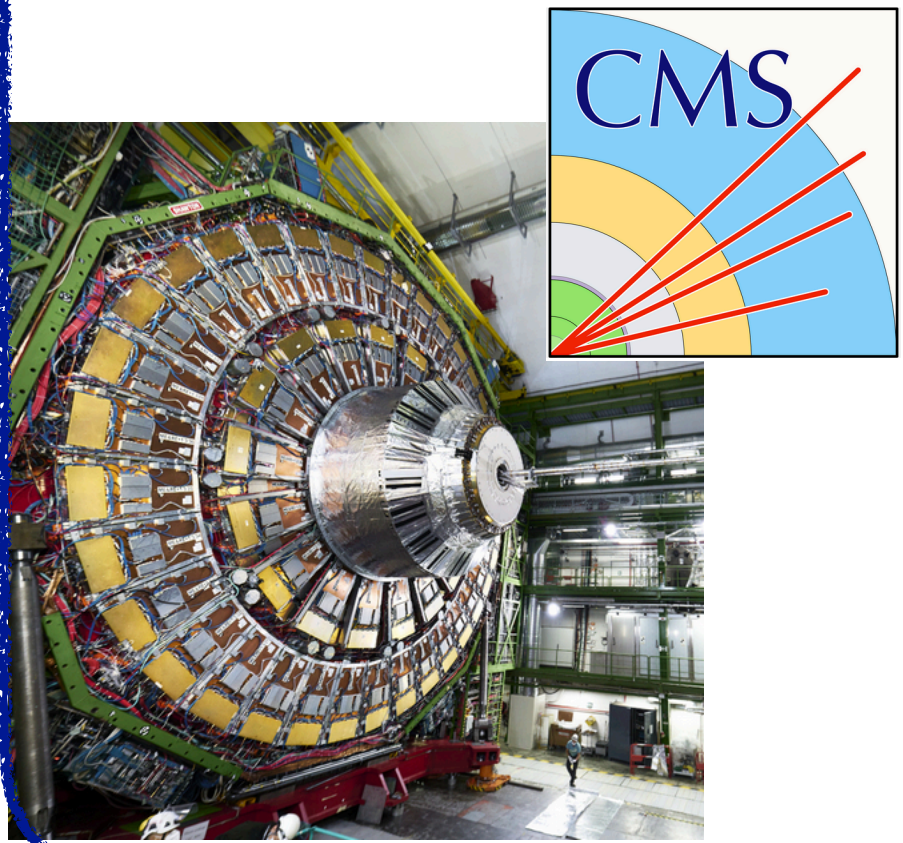


Frontière d'intensité

« Hardware trigger »

ATLAS & CMS

Détecteurs à usage général
Dédiés à la recherche de nouvelles particules produites directement



Frontière énergétique

Changement dans le paradigme de trigger pour LHCb en 2022

Avant 2022



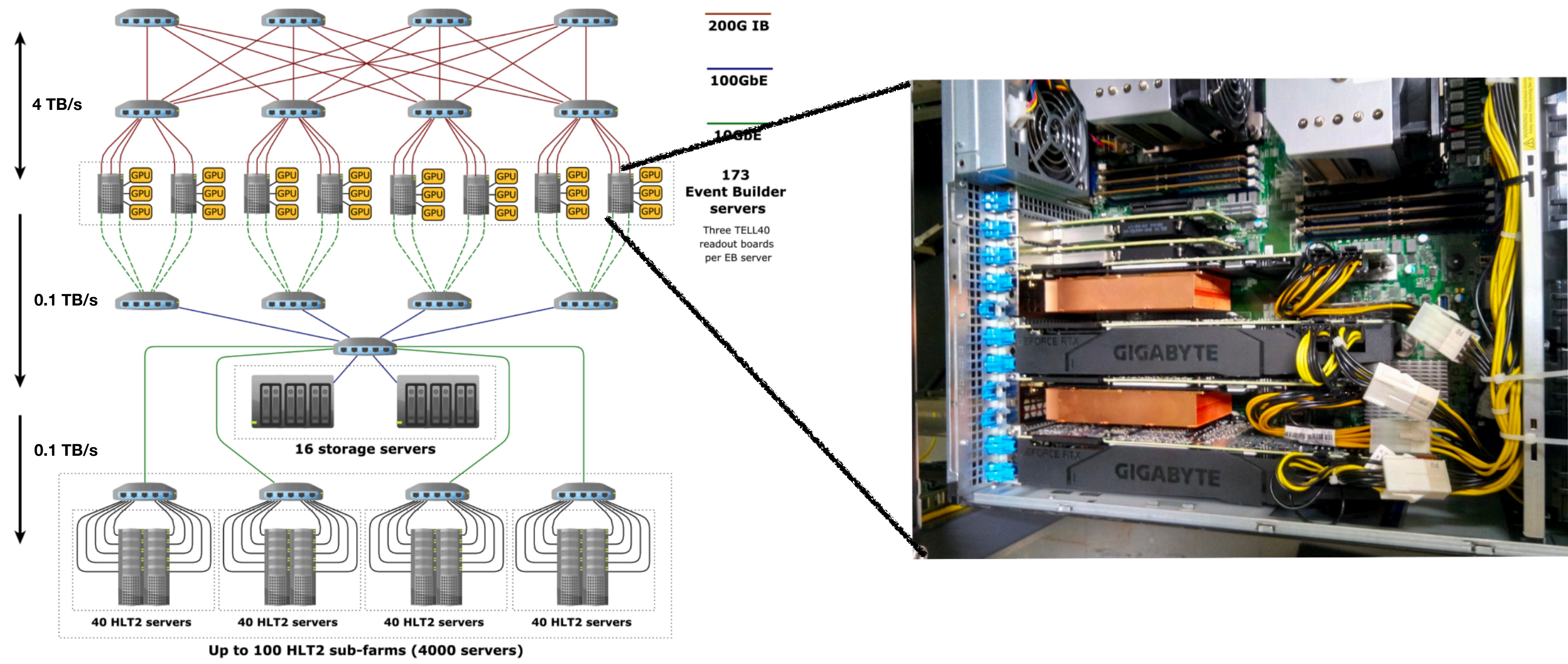
« Hardware trigger »

Depuis 2022



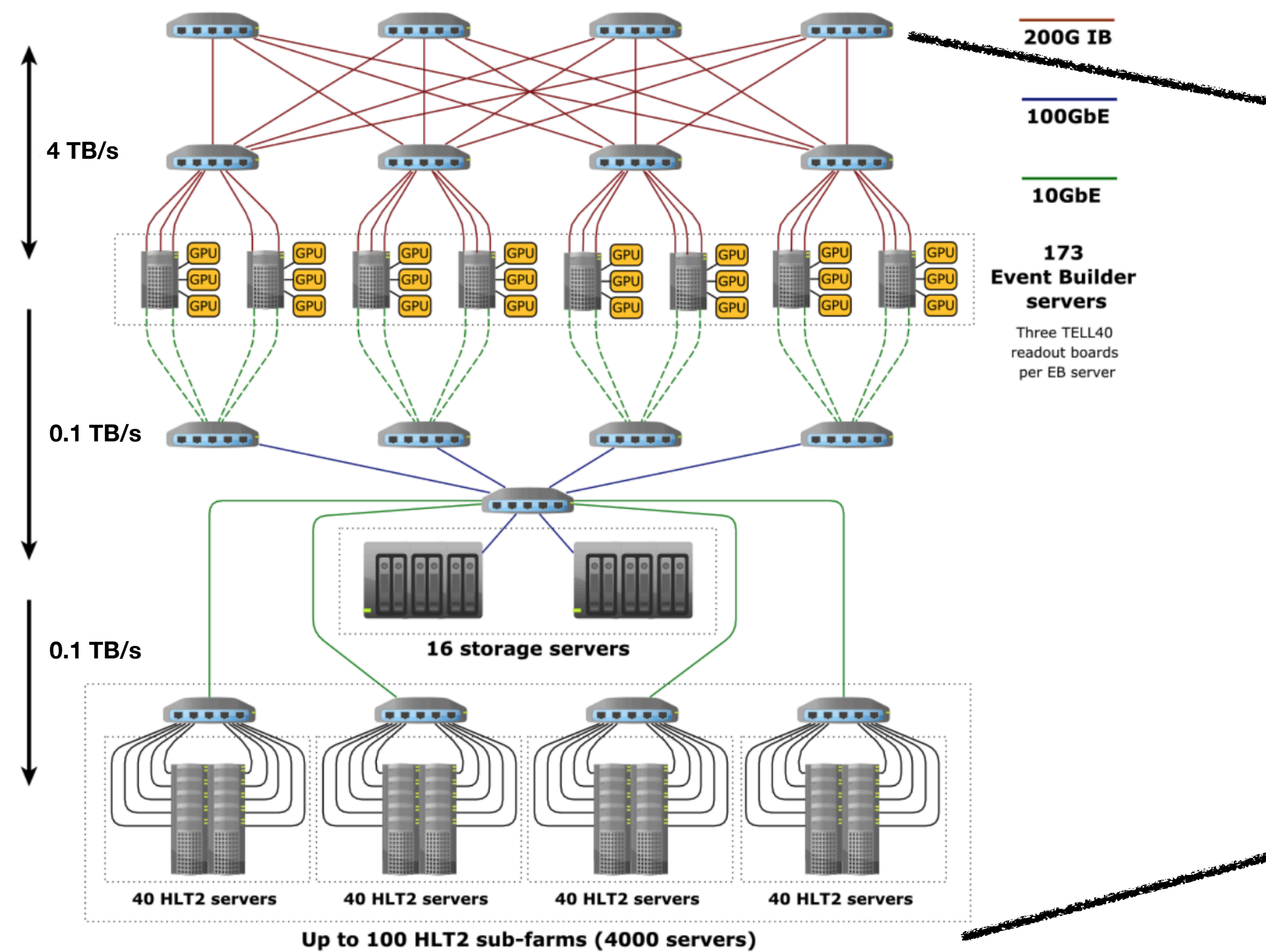
« Software trigger »

Première étape de reconstruction & sélection sur cartes graphiques



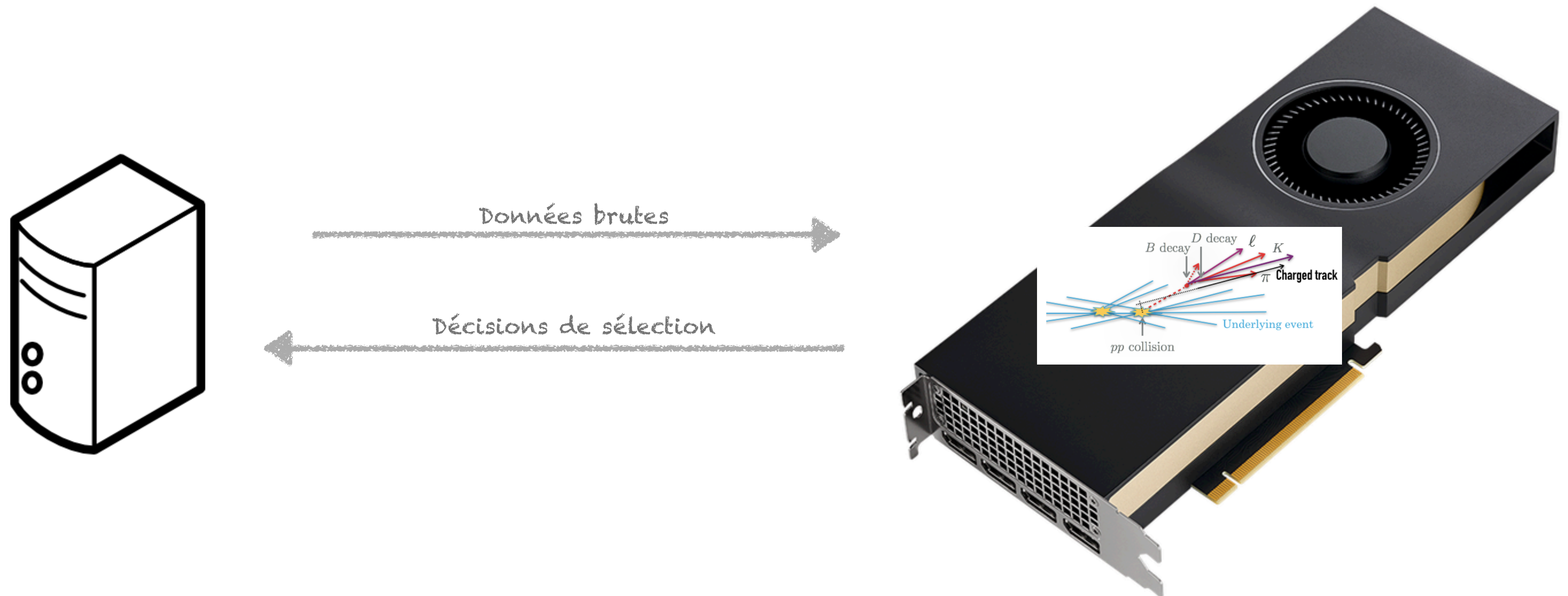
Comp. Soft for Big Science 6, 1 (2022)

Première étape de reconstruction & sélection sur cartes graphiques



Comp. Soft for Big Science 6, 1 (2022)

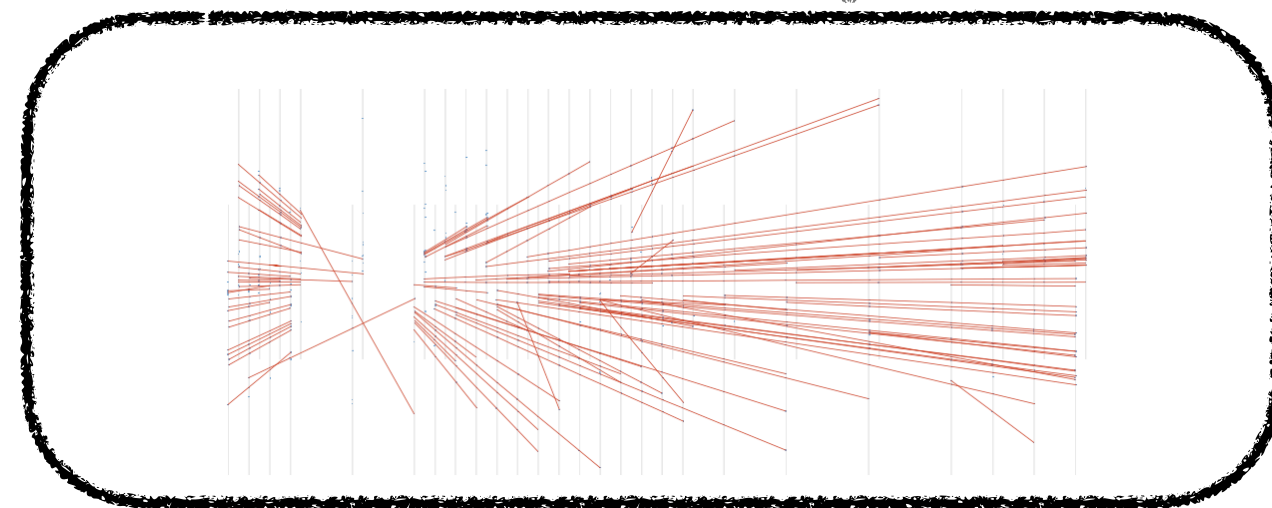
Conception du logiciel pour carte graphiques



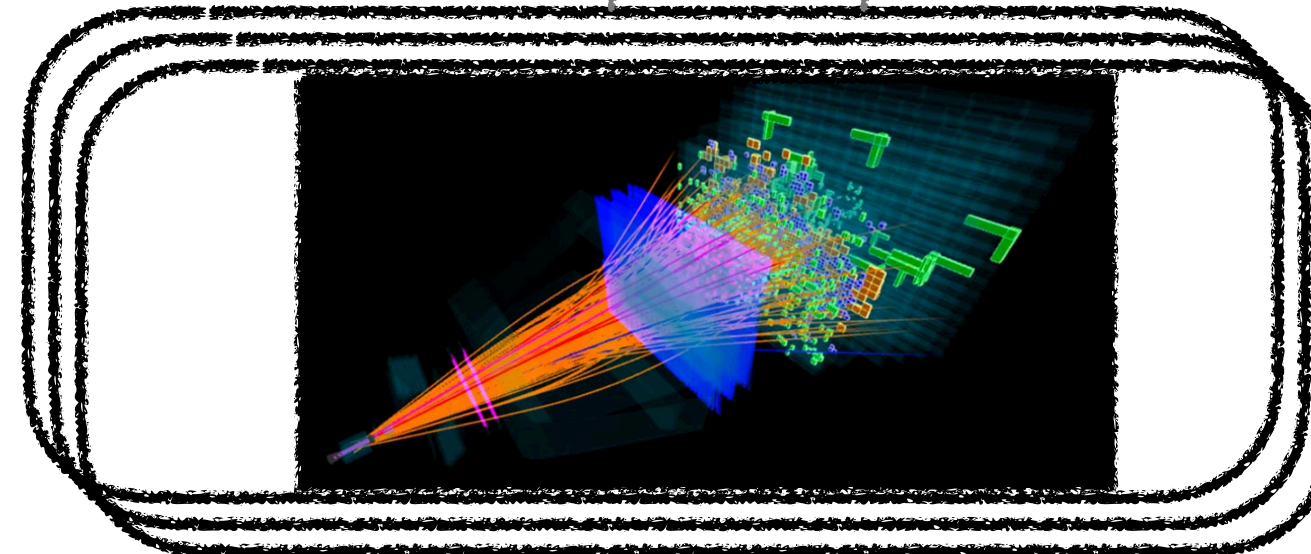
Conception du logiciel pour carte graphiques

Parallelisation sur plusieurs échelles pour efficacement utiliser les processeurs

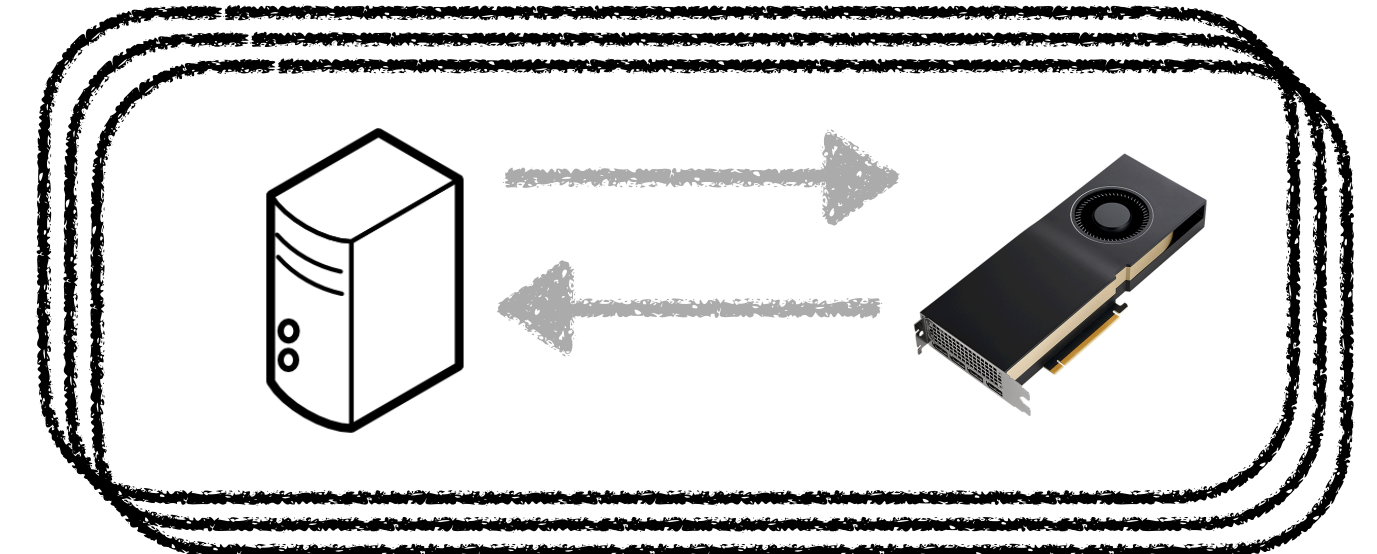
Dans une collision: trajectoires, ...



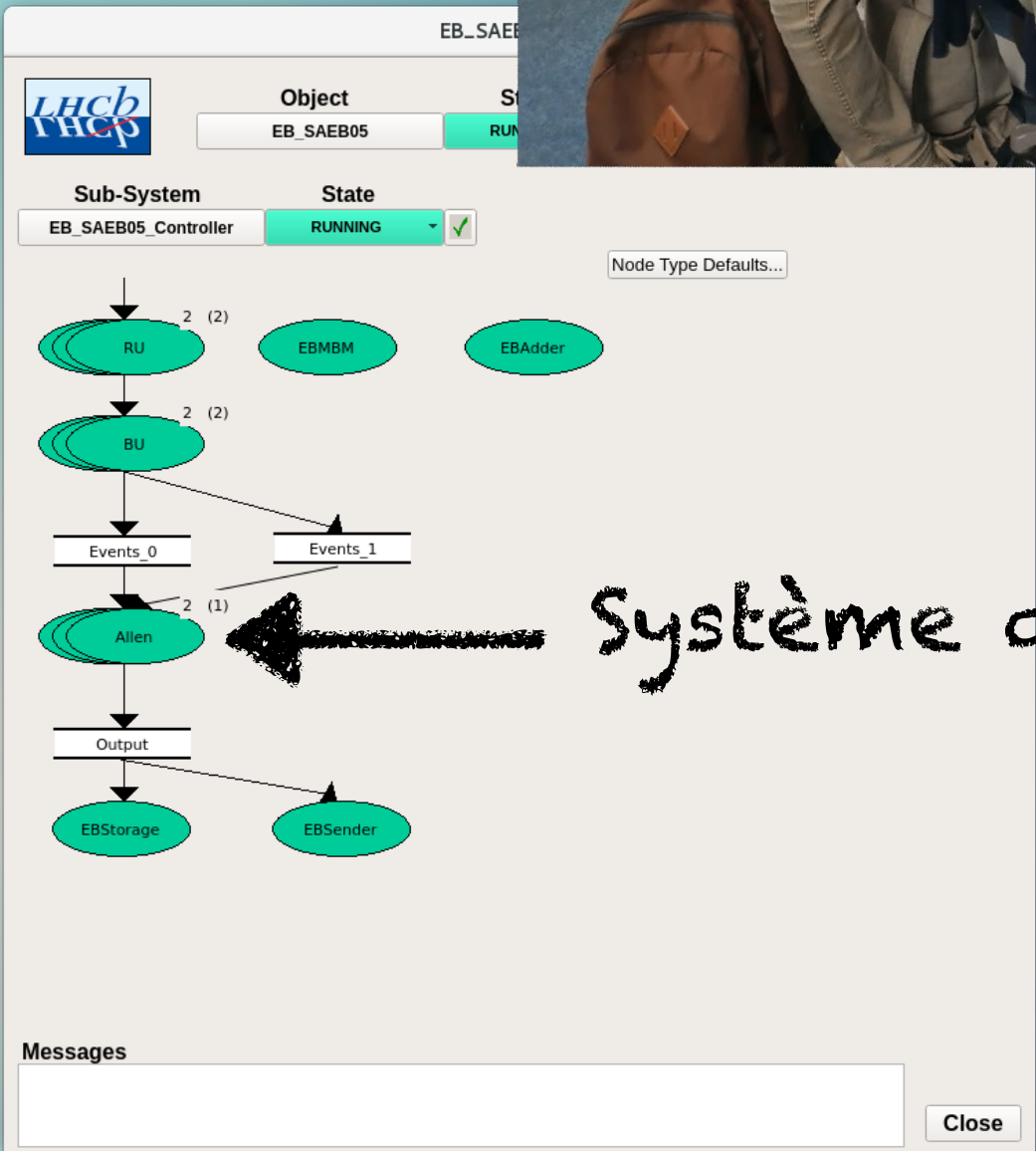
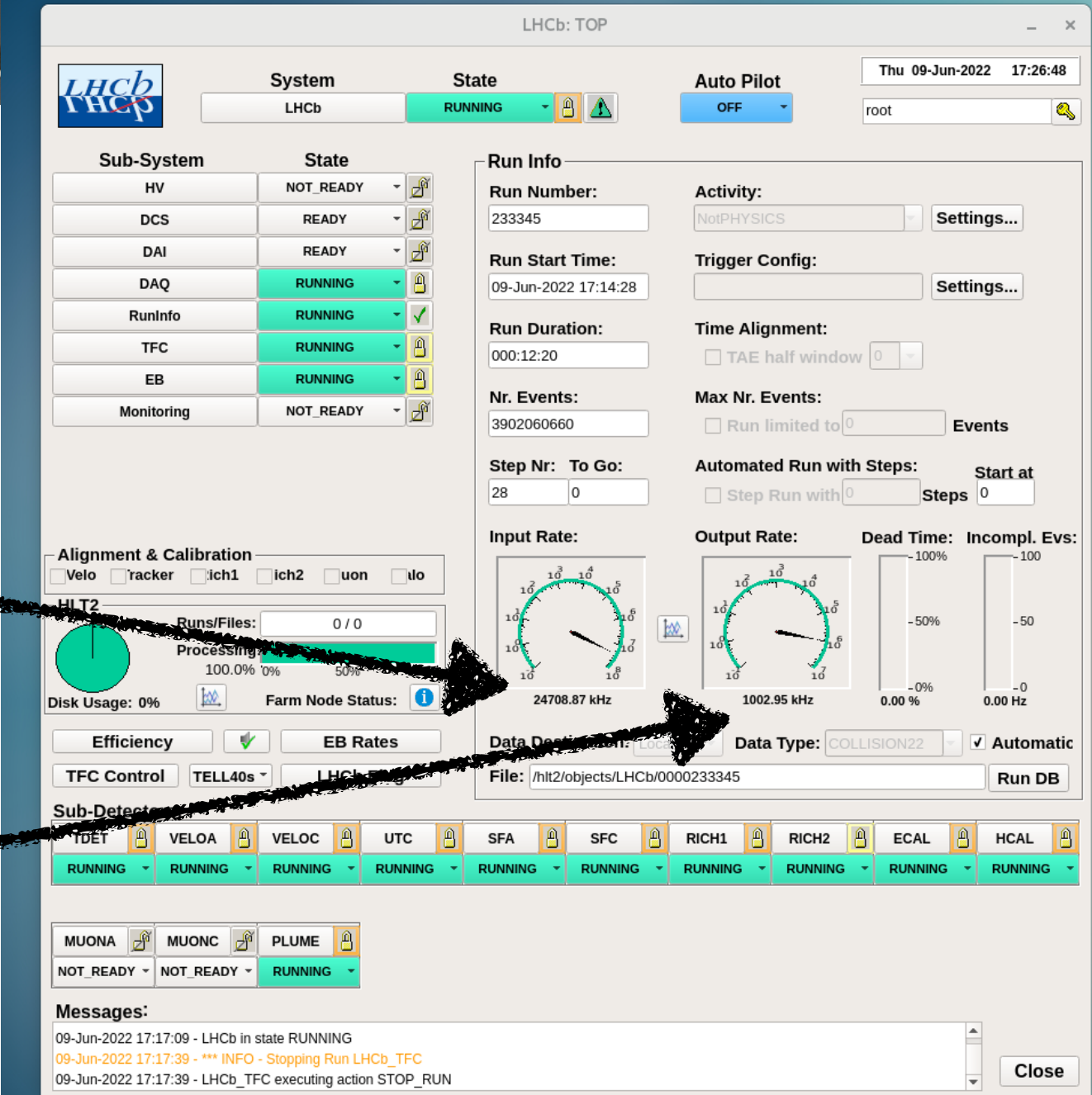
Collisions proton-proton



Lots de collision



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

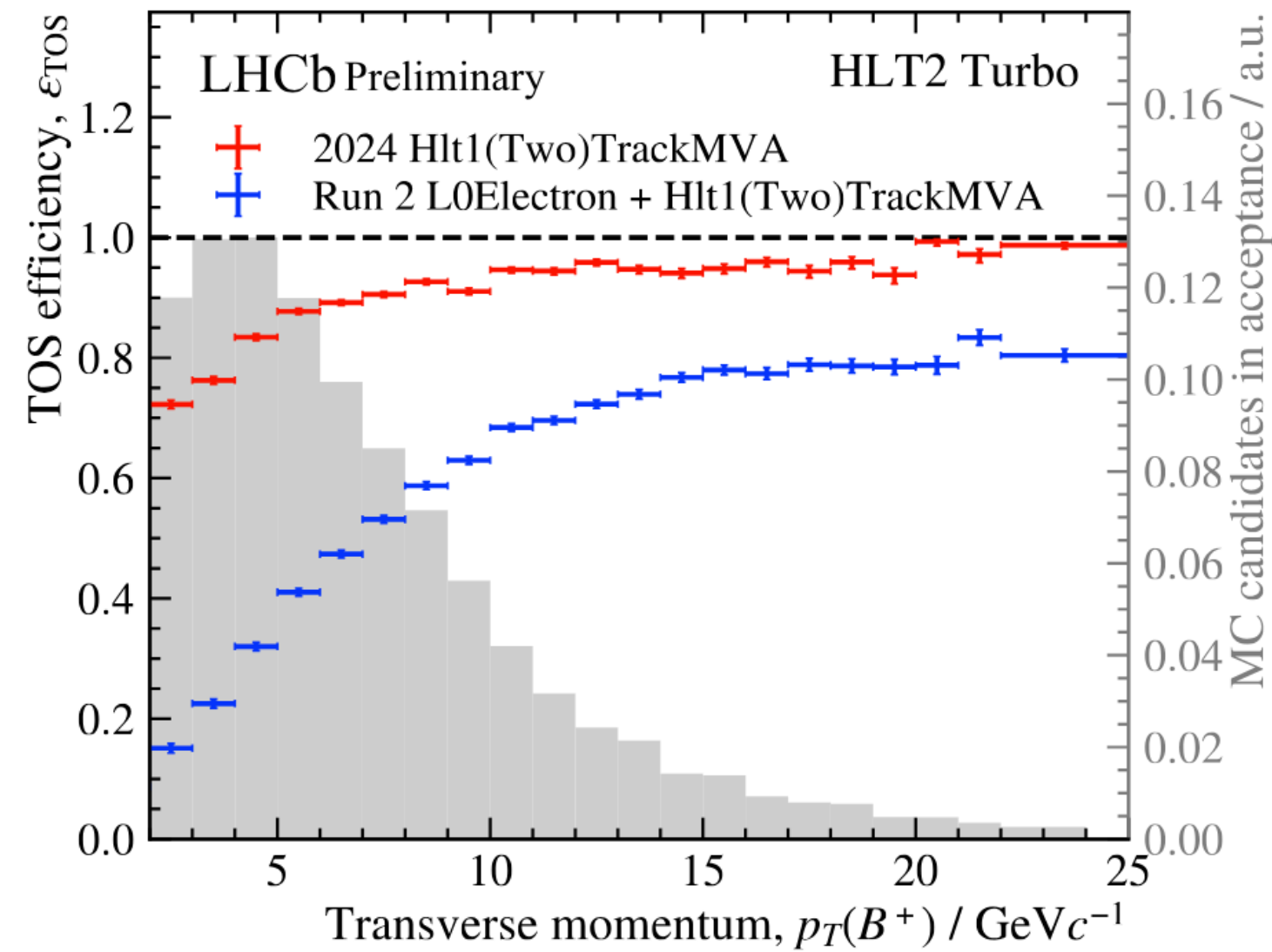


30 MHz à l'entrée

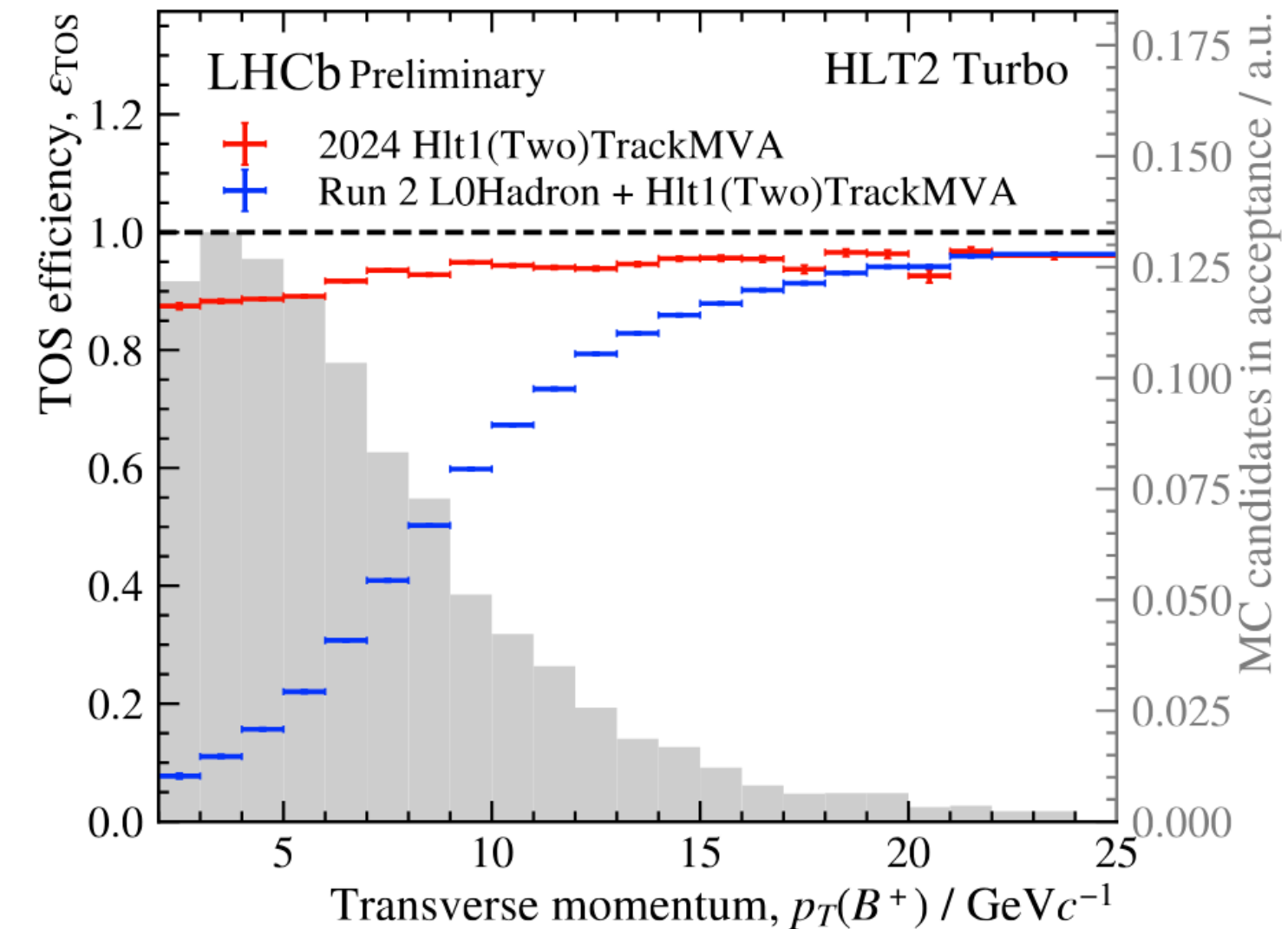
1 MHz en sortie

Systeme de cartes graphiques

Performance du système en temps réel en 2024



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



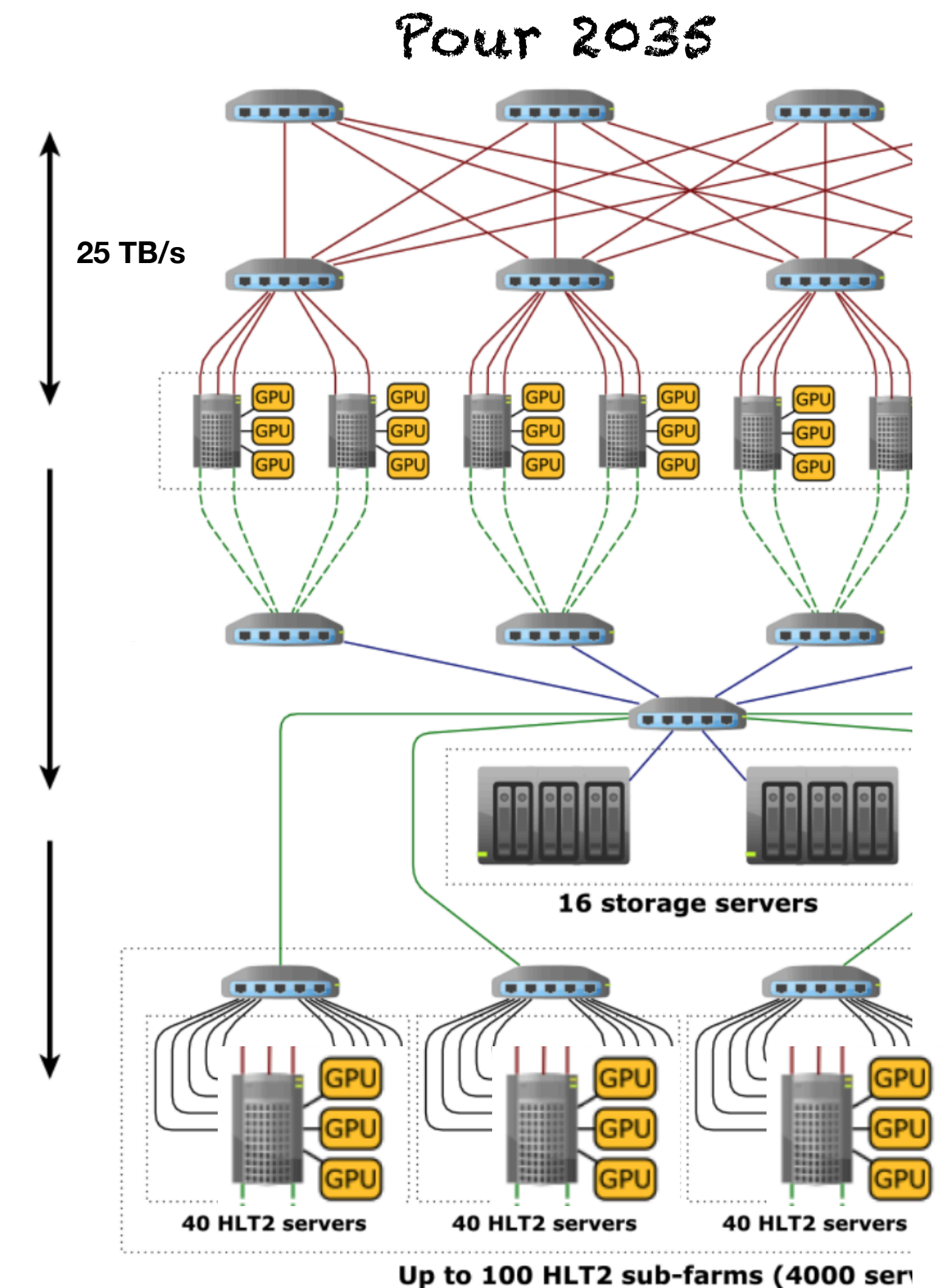
(a) TOS efficiencies in $B^+ \rightarrow \bar{D}^0(K^+\pi^-)\pi^+$.

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 pointes 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

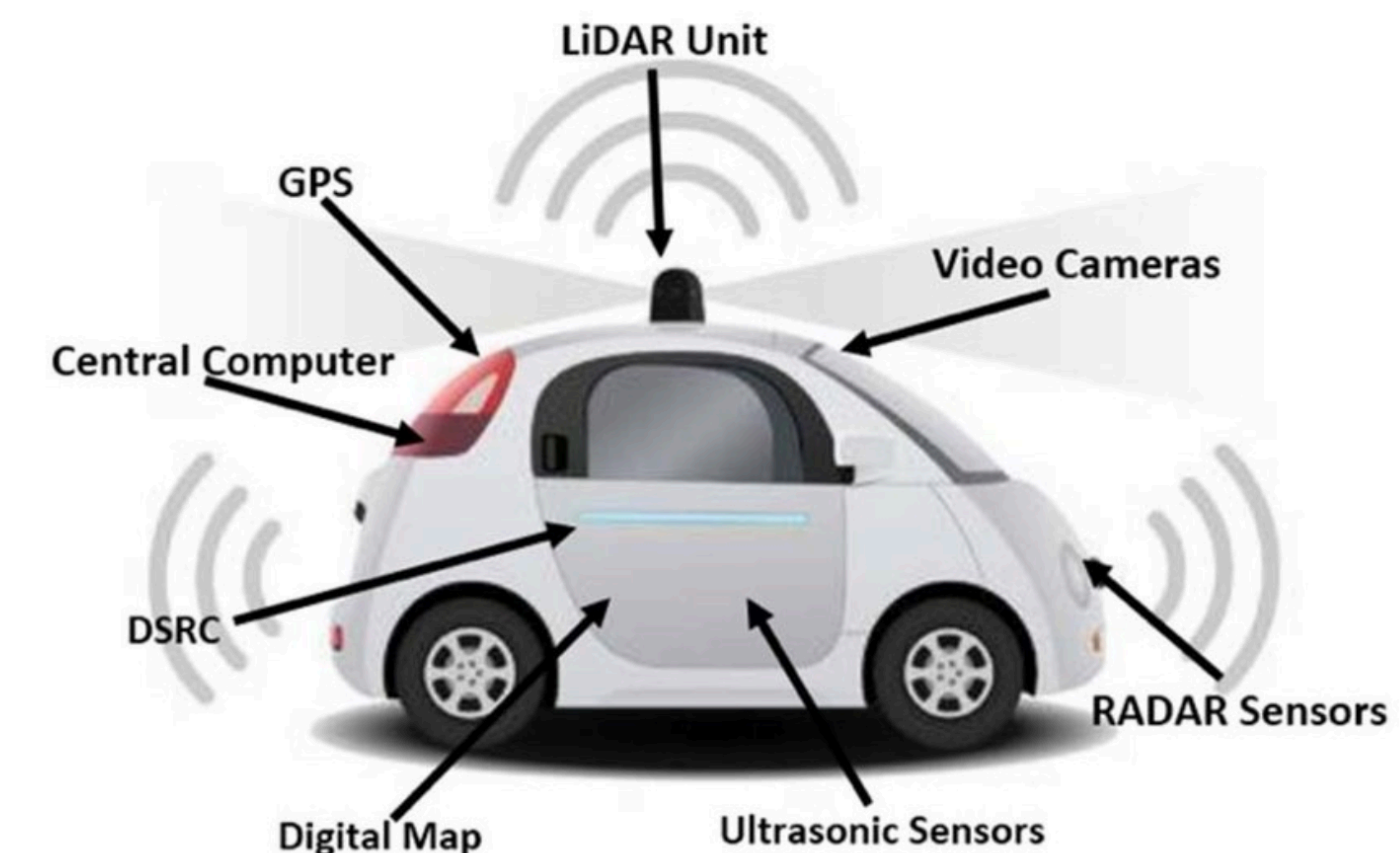
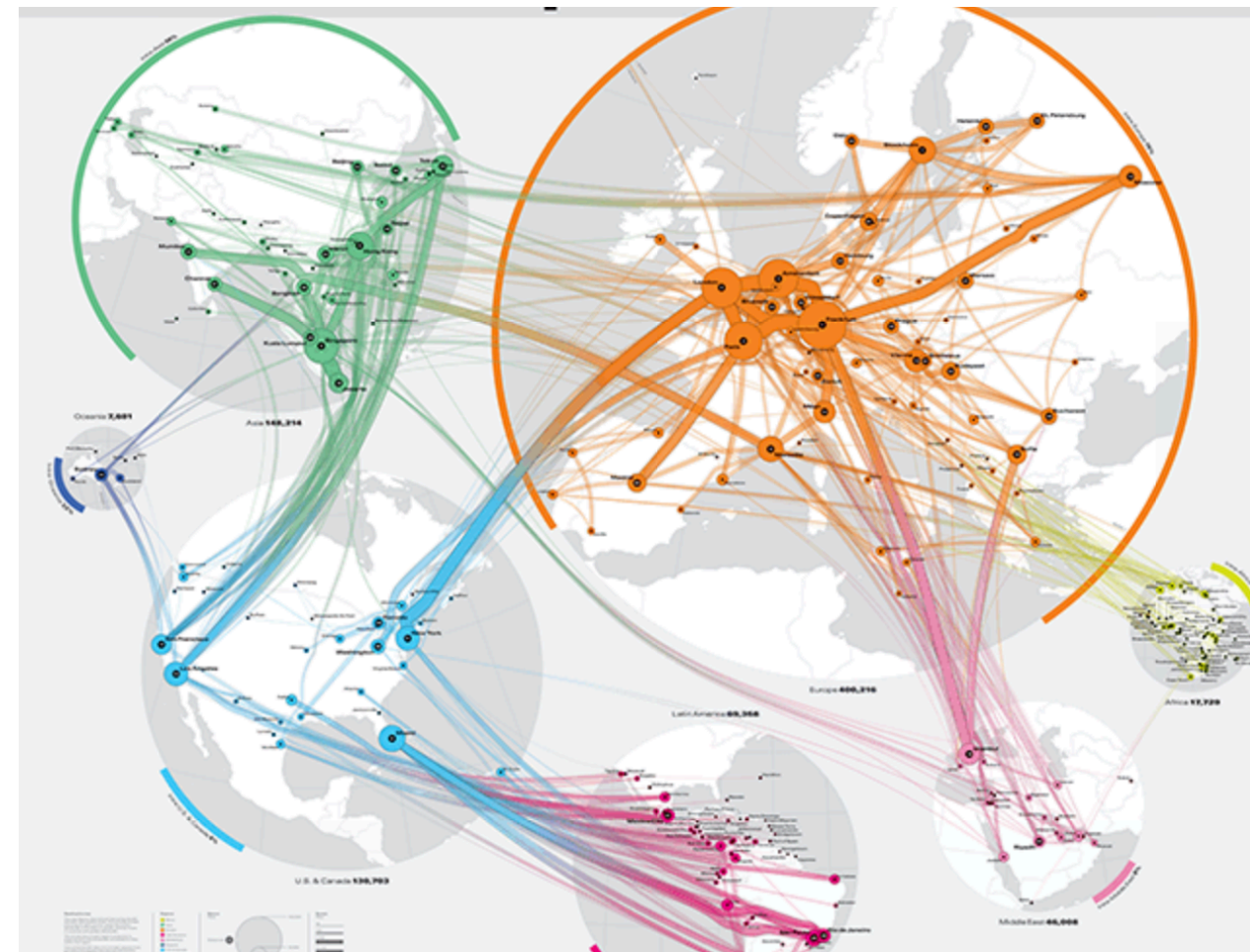


Backup

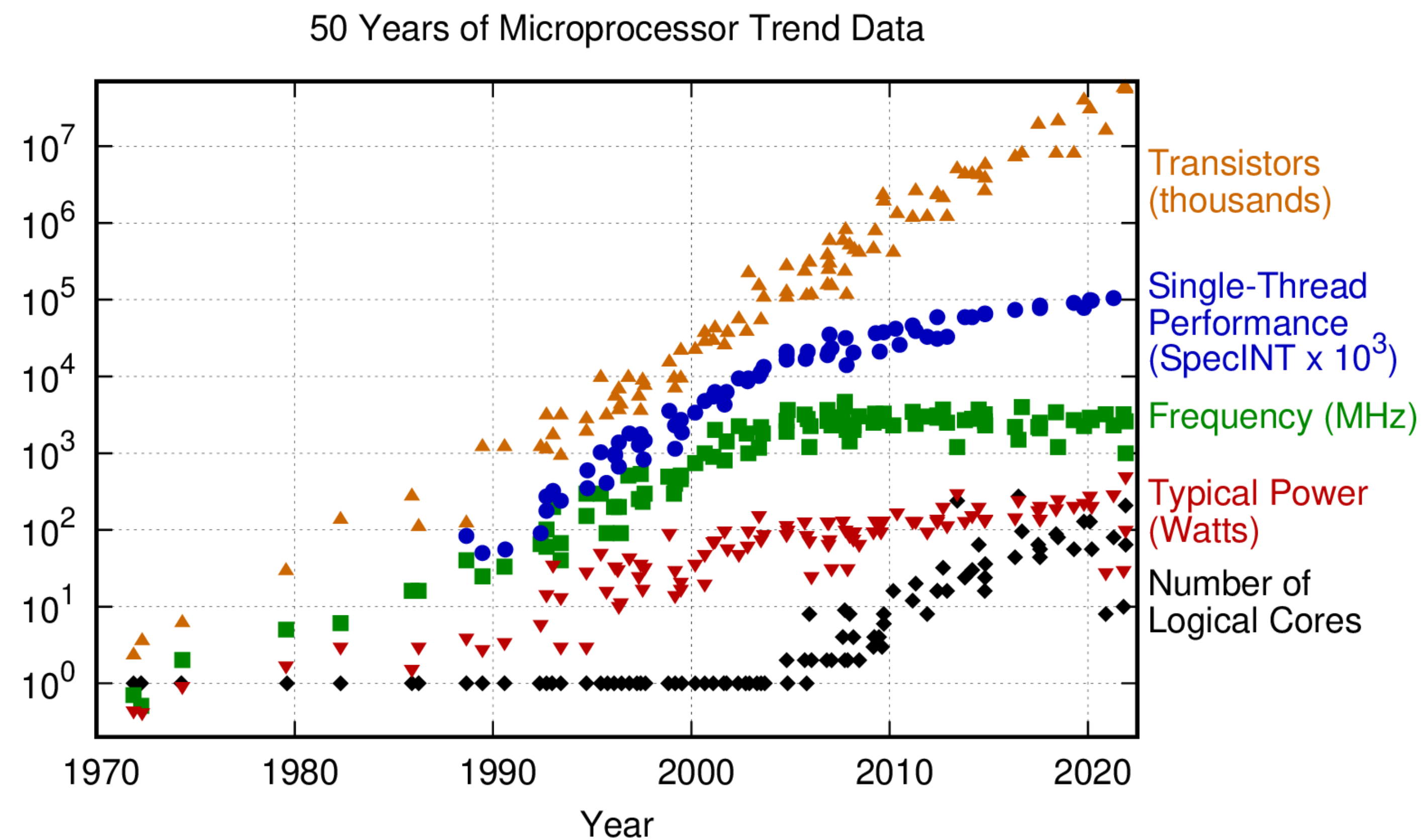
How does the LHC challenge compare to other domains?

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

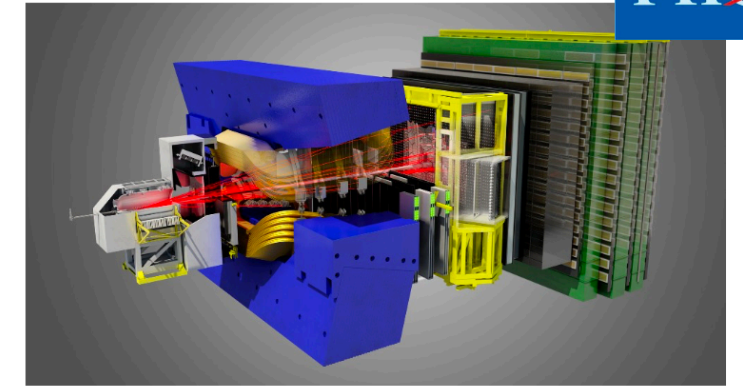
- 8.3 million video streams in parallel (4k)
- 10-25 x global peak internet traffic (as of today)
- 5k - 25k autonomous vehicles
- 12.5k imaging satellites



Microprocessor trend

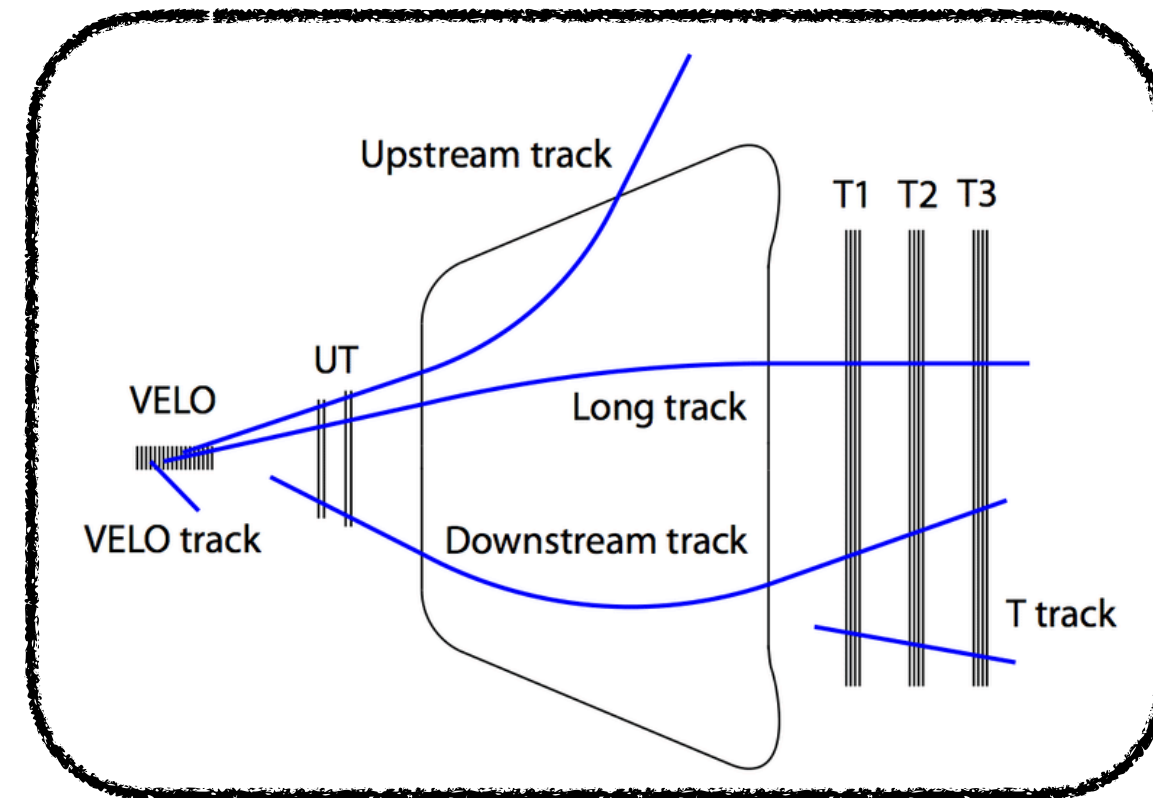


Original data up to the year 2010 collected and plotted by M. Horowitz, F. Labonte, O. Shacham, K. Olukotun, L. Hammond, and C. Batten
New plot and data collected for 2010-2021 by K. Rupp

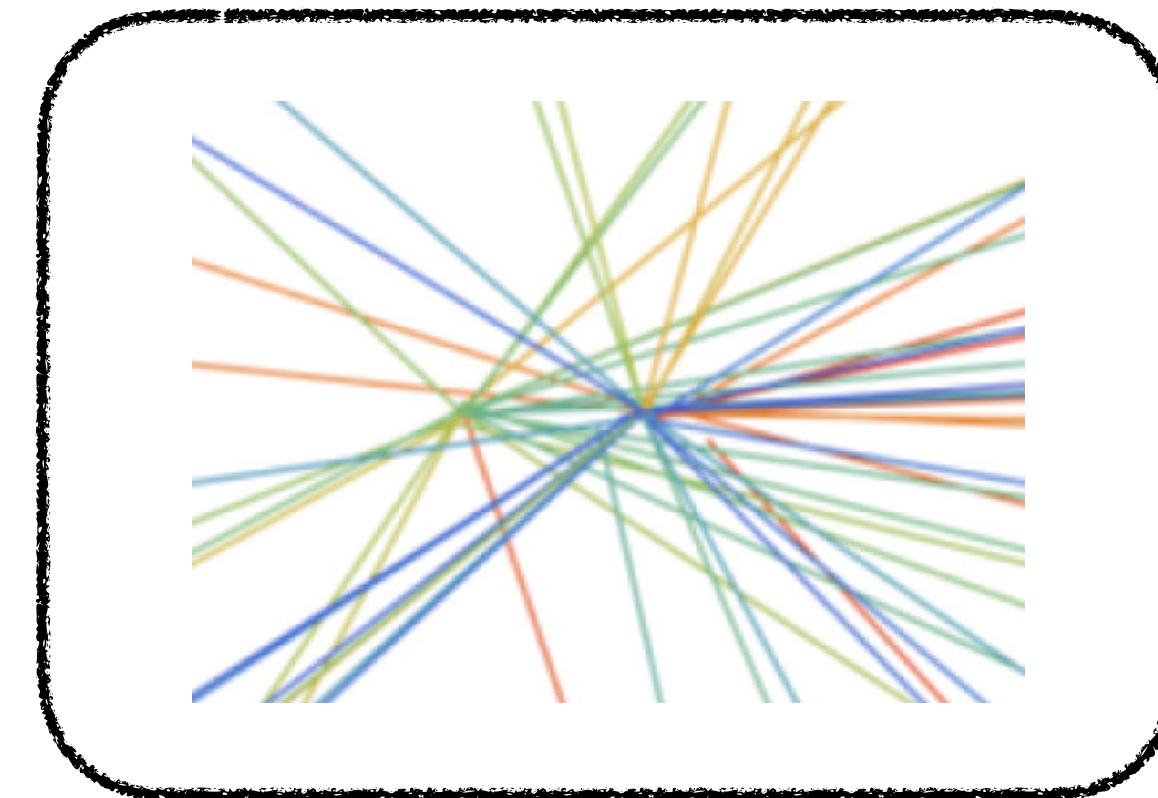


What do we reconstruct in the High Level Trigger (HLT)?

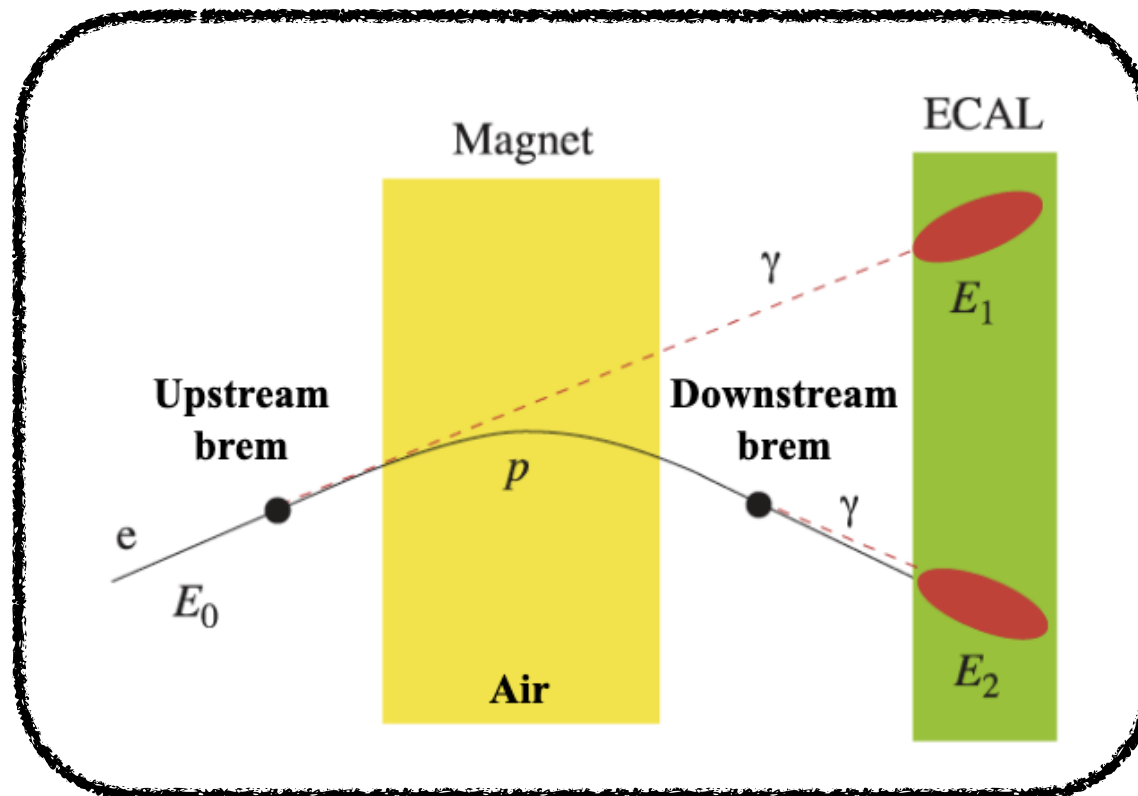
Tracks



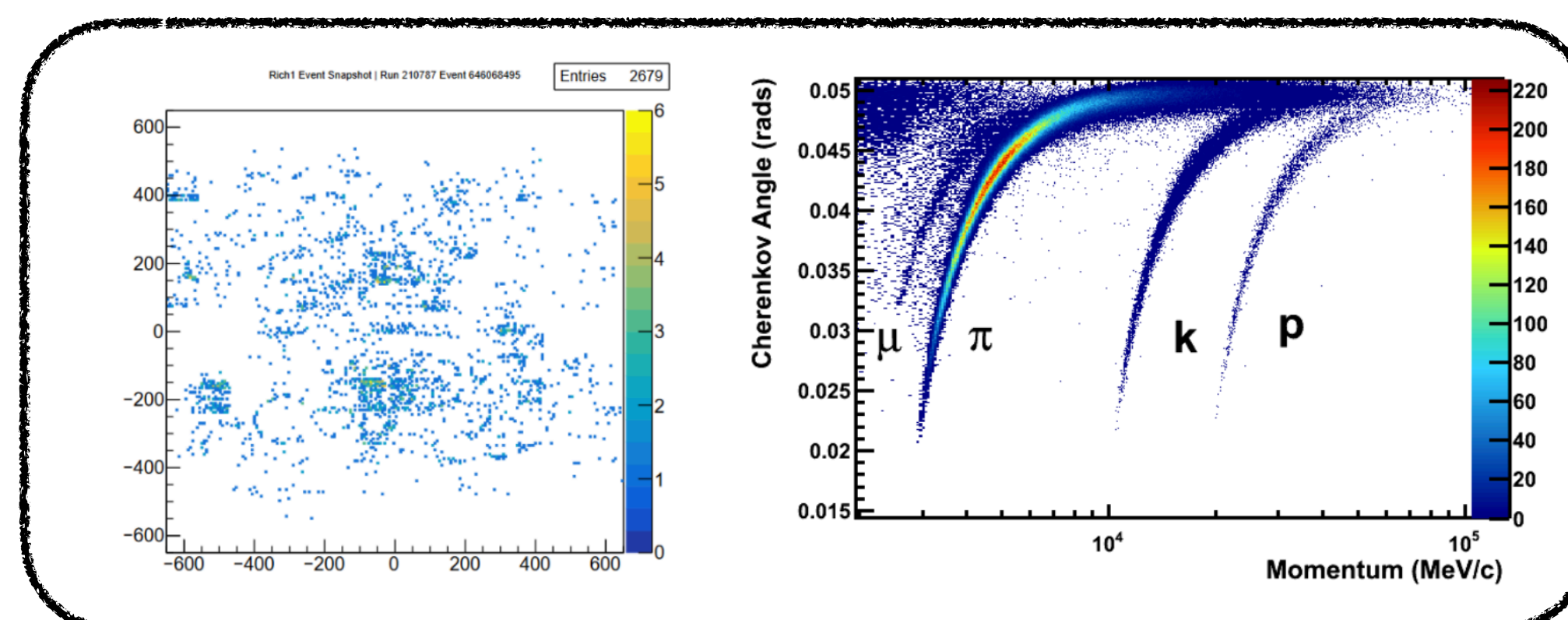
Vertices



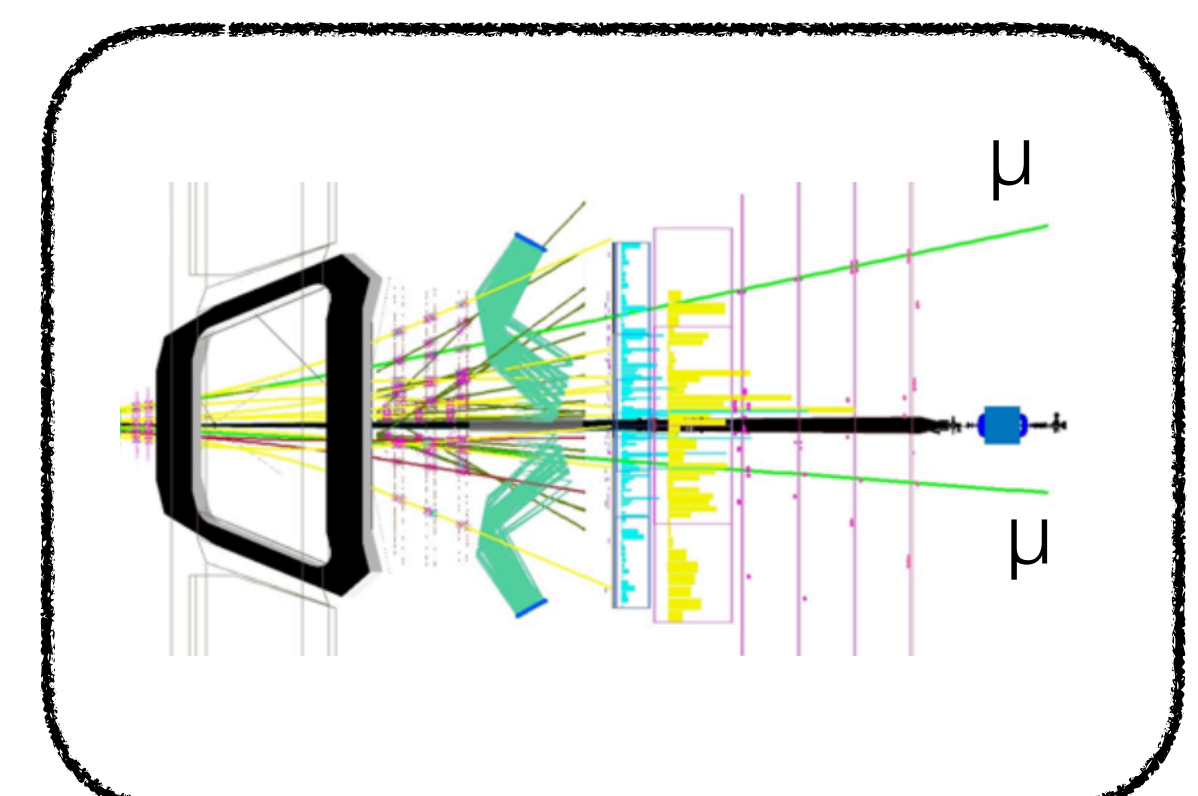
Calorimeter objects



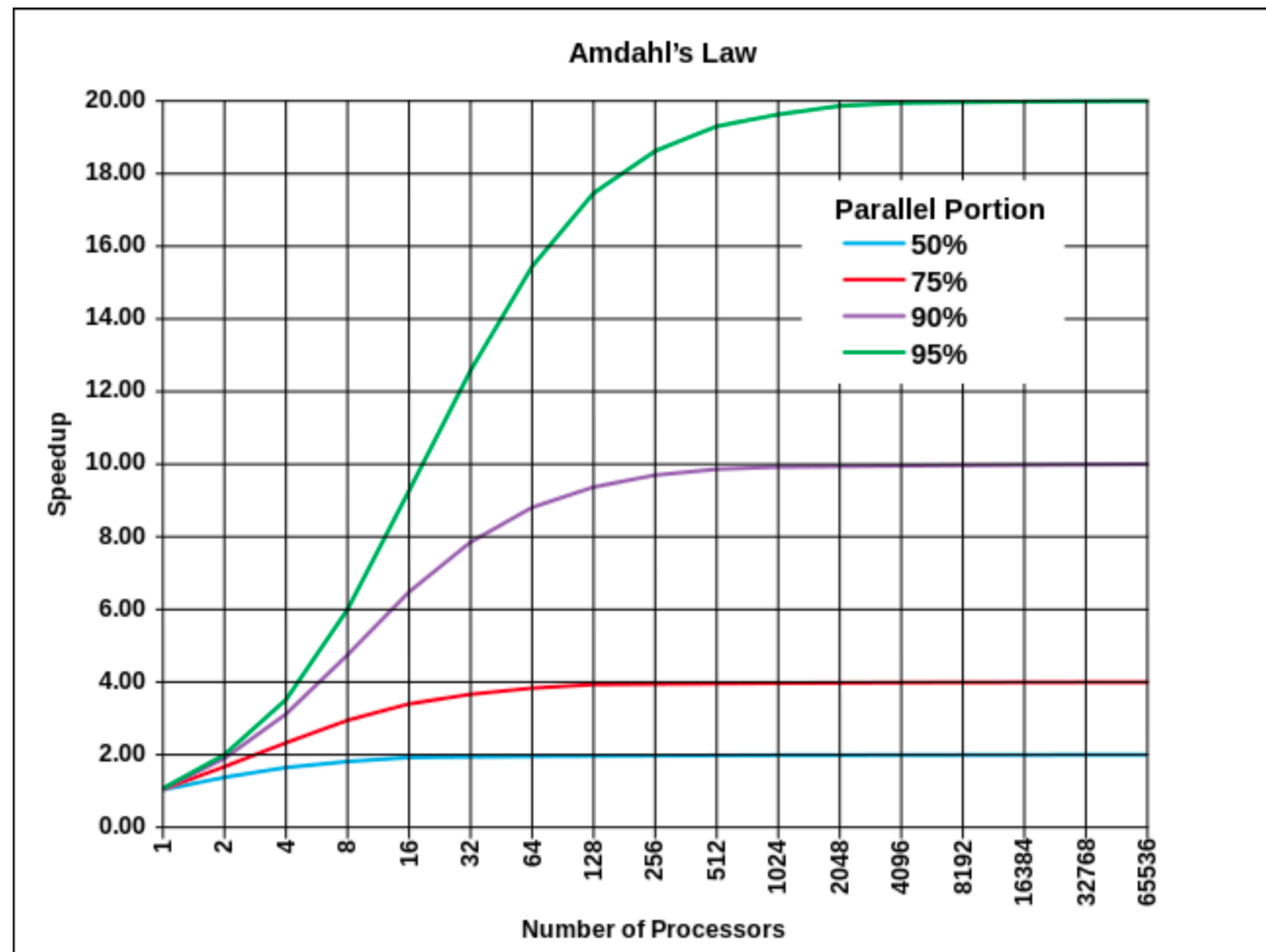
Cherenkov rings



Muon hits

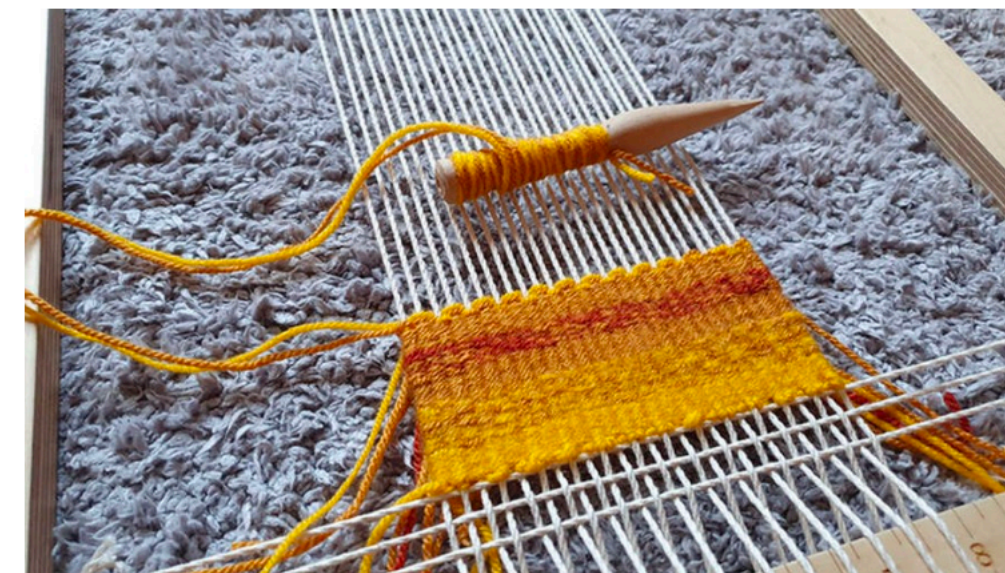


How to use parallel processors



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

Parallel work



Sequential work



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 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)