

ALICE Master Classe

Exercice

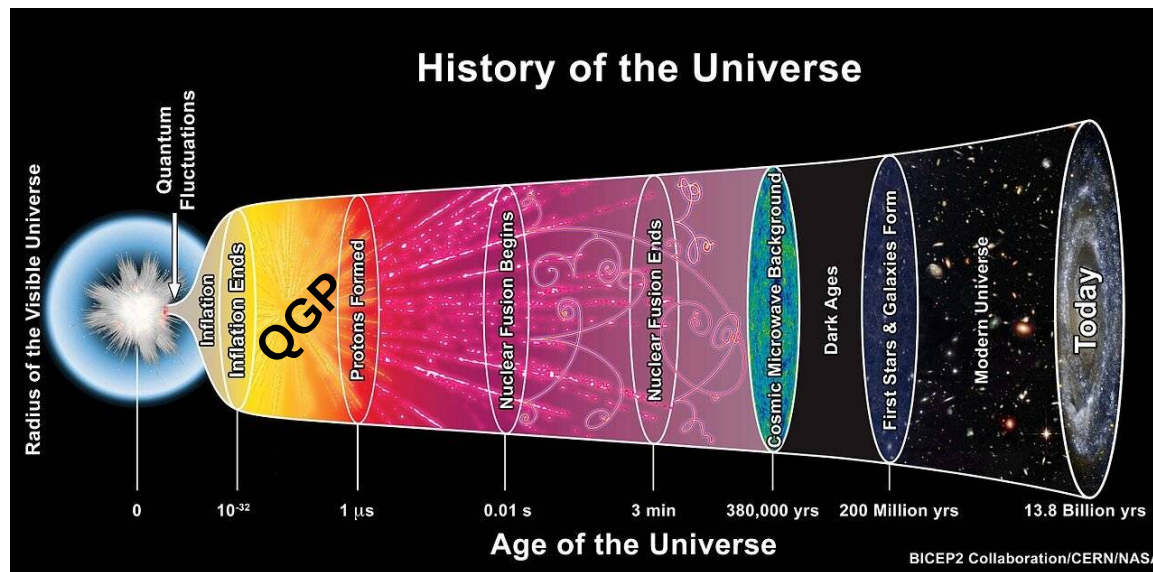
Christophe Suire

Laboratoire de Physique des 2 infinis Irène Joliot-Curie – IJCLab

Université Paris-Saclay – CNRS/IN2P3

Objectifs

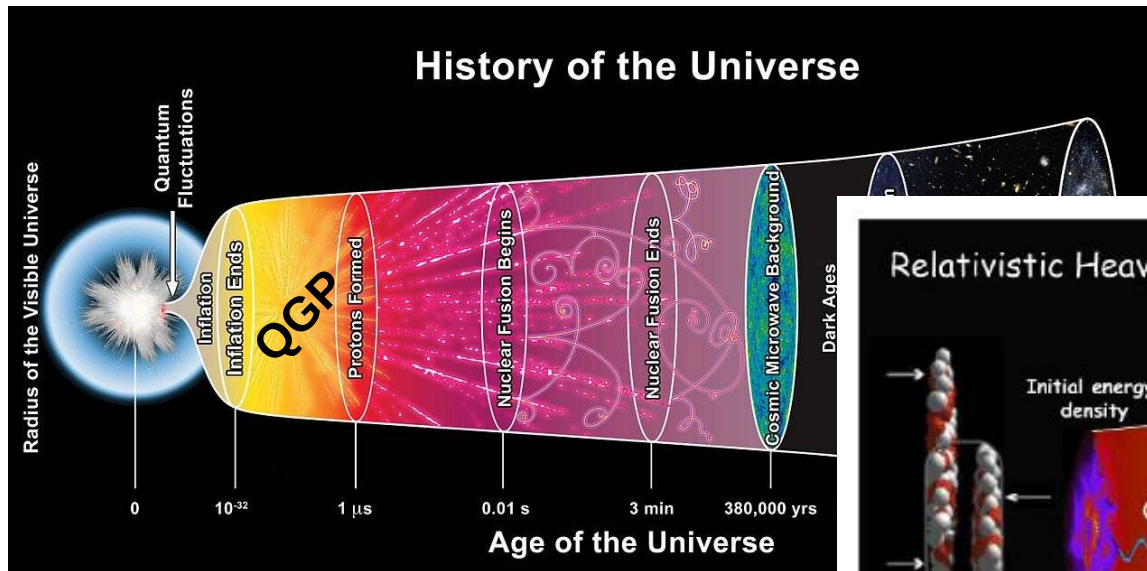
Dans le cadre de l'étude du **Plasma de Quarks et de Gluons (QGP)** produit dans les collisions Pb-Pb au LHC, nous allons étudier la production de particules "**étranges**" (qui contiennent au moins un **quark étrange s**)



Peu après la naissance de l'Univers, les quarks and gluons étaient "libres" dans un état de plasma. L'Univers se refroidissant, ils se sont confinés dans les hadrons pour toujours ?

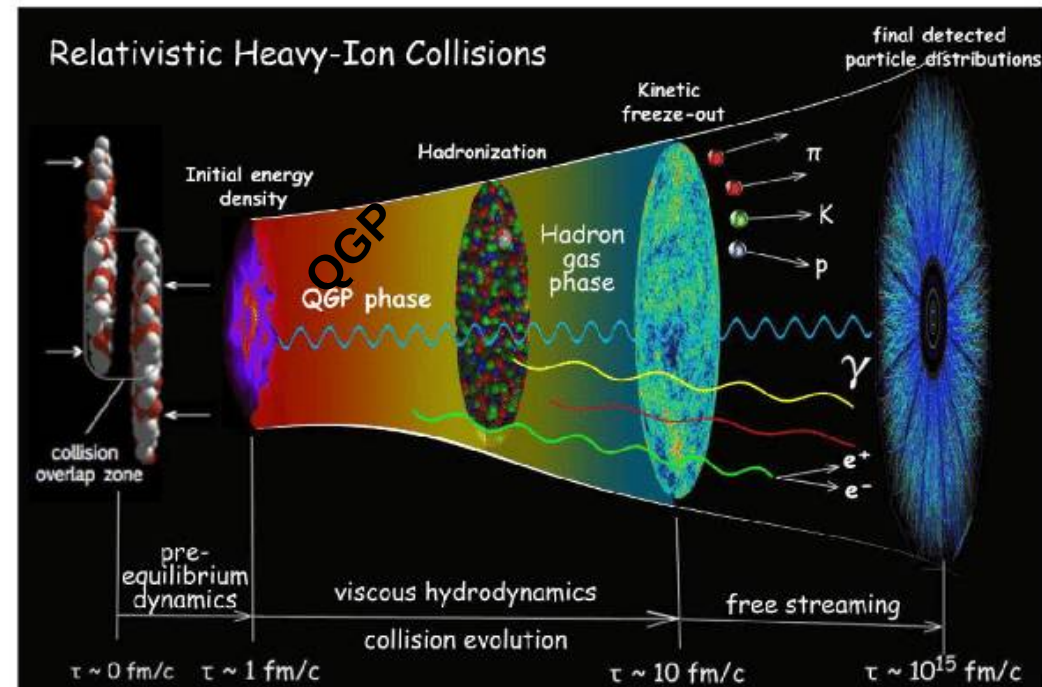
Objectifs

Dans le cadre de l'étude du **Plasma de Quarks et de Gluons (QGP)** produit dans les collisions Pb-Pb au LHC, nous allons étudier la production de particules "**étranges**" (qui contiennent au moins un **quark étrange s**)



... confinés pour toujours ?

sauf si les physiciens
decident de tester
cette théorie
→ heavy-ions collisions





Posons nous quelques questions

1) Pourquoi le PQG est-il intéressant à étudier ?

→ test du scénario du Big Bang, test de la théorie de l'interaction forte (QCD). Dans un PQG, l'interaction forte est supposée « faible » et laisse les quarks quasi-libres, déconfinés !

2) Si un PQG a été créé lors de la formation de l'Univers, fabriquons nous vraiment la même chose avec des collisions d'ions lourds

→ aux énergies du LHC quasiment, cependant le PQG issu d'une collision d'ions lourds est « petit » et se refroidit très vite (i.e. impossible à étudier de manière directe...).

3) Pourquoi étudier les particules étranges

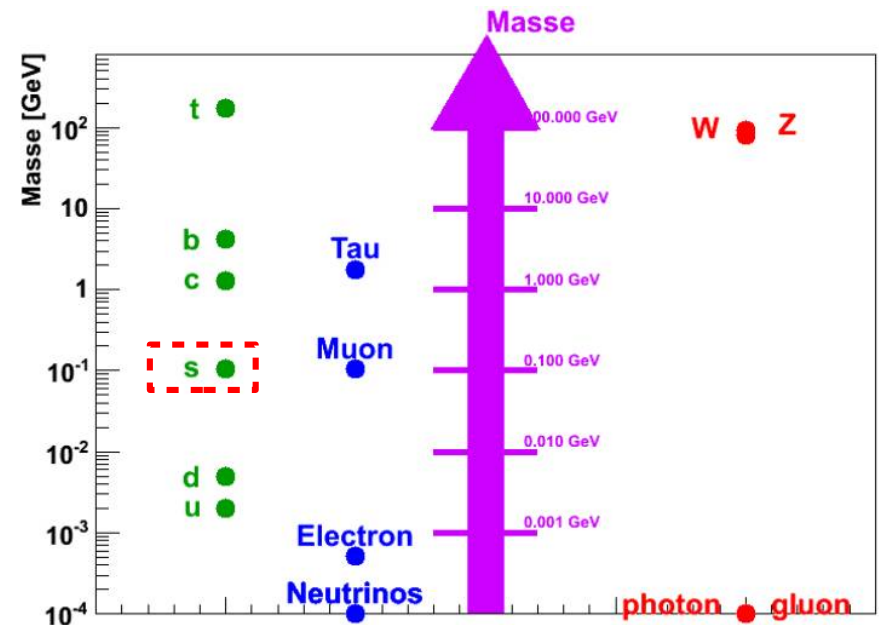
→ elles sont une empreinte de la création du PQG. Notons les paires de quarks s et $\bar{s}$ sont très « faciles » à créer dans ce magma à $\sim 1.5 \cdot 10^{12}$ K ($T_{\odot} \sim 15 \cdot 10^6$ K).

4) Peut-on produire des particules étranges sans PQG

→ oui, les quarks s et $\bar{s}$ apparaissent dans les collisions pp (ou même dans des collisions des noyaux légers) si il y a suffisamment d'énergie disponible.

Le quark étrange et les autres...

masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H boson de Higgs
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
LEPTONS	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e électron	μ muon	τ tau	Z^0 boson Z^0	
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tauique	$W^\pm$ boson $W^\pm$	



Le quark étrange et les autres...

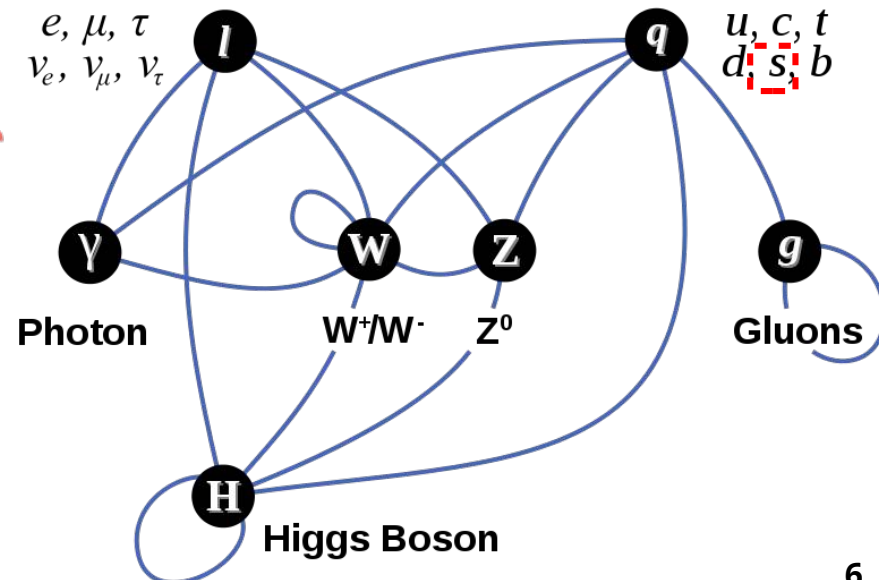
masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H boson de Higgs
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e électron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ tau	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z^0 boson Z^0	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_e neutrino électronique	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_μ neutrino muonique	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_τ neutrino tauique	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 $W^\pm$ boson $W^\pm$	
				BOSONS DE JAUGE	

Leptons

e, μ, τ
 ν_e, ν_μ, ν_τ

Quarks

u, c, t
 d, s, b



Dans le cadre de l'étude du **Plasma de Quarks et de Gluons (QGP)** produit dans les collisions Pb-Pb au LHC, nous allons étudier la production de particules "**étranges**" (qui contiennent au moins un **quark étrange s**)

Ces particules étranges sont créées lors des collisions ; leur taux de production est proposé comme une signature, l'empreinte, de la formation du PQG en collisions Plomb-Plomb (Pb-Pb).

(1) Nous étudierons les collisions proton-proton (pp) qui permettent de servir de **référence** pour l'étude de processus de production des particules étranges (collisions les plus simples).

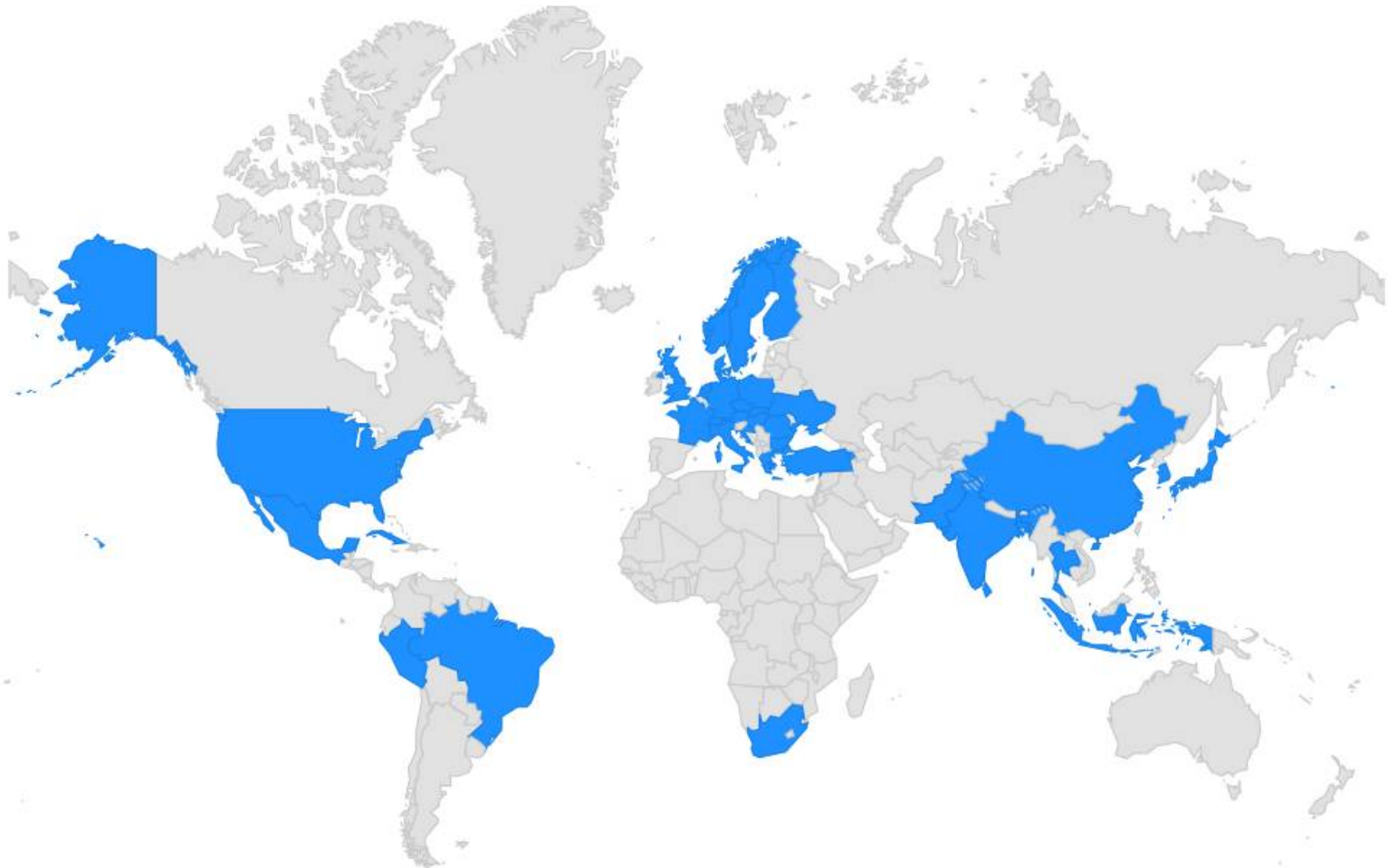
(2) Nous étudierons ensuite la production de particules étranges en collisions Plomb-Plomb (Pb-Pb) dans lesquelles peut être formé le **PQG**.

→ nous allons **comparer les résultats** afin de chercher une différence, modulo la différence intrinsèque entre un noyau de **plomb ($A=208$)** et un **proton ($A=1$)**.



L'expérience ALICE (née en 1995)

ALICE est l'expérience du LHC dédiée à la **Physique des ions lourds**
→ collaboration 38 pays, 167 instituts, 1878 personnes (19/3/2026)



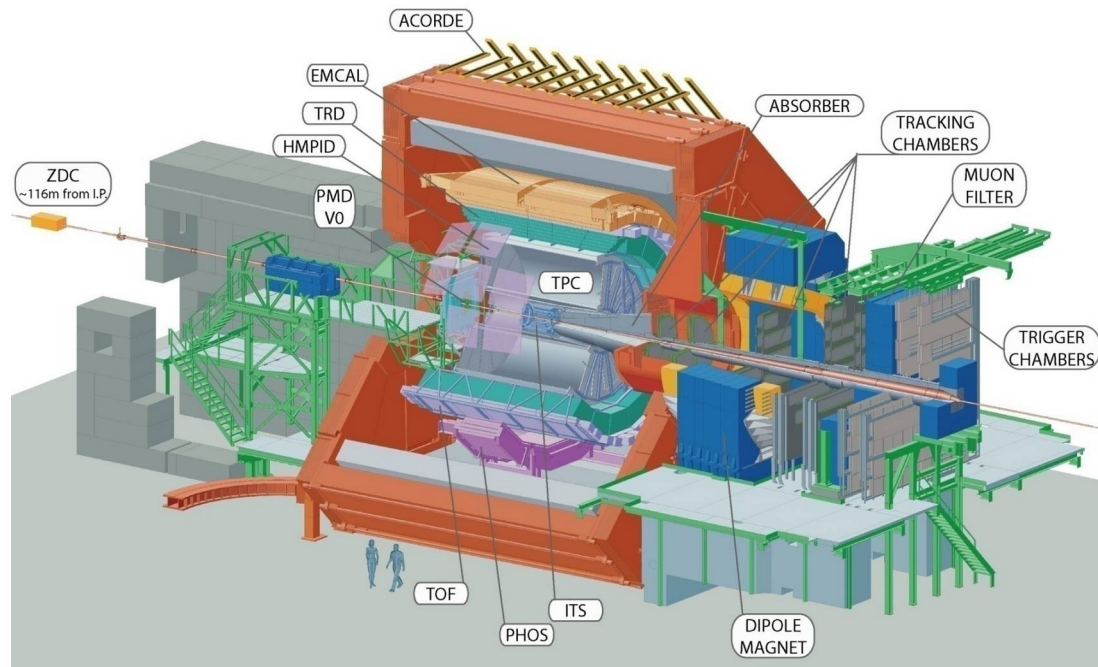


L'expérience ALICE (née en 1995)

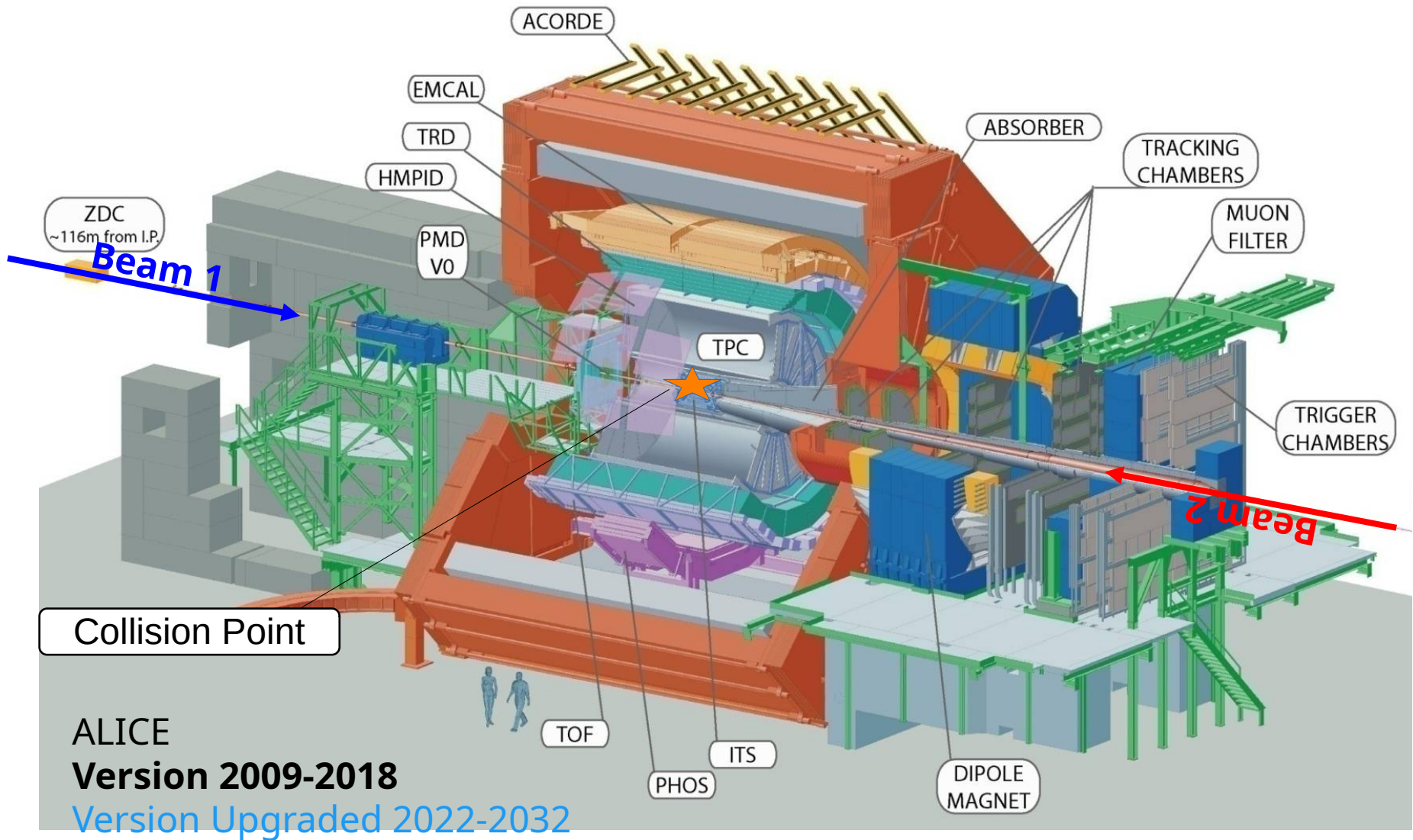
ALICE est l'expérience du LHC dédiée à la **Physique des ions lourds**

→ collaboration 38 pays, 167 instituts, 1878 personnes (19/3/2026)

ALICE c'est un **appareil photo digital de 16x26 mètres de $600 \cdot 10^6$ "pixels"** capable de prendre ~ **1000 photos par seconde...**

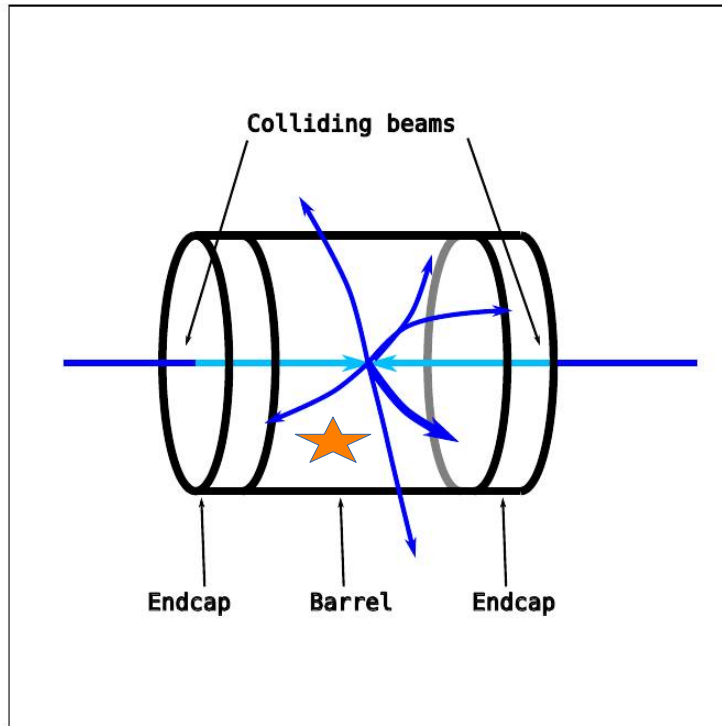


L'expérience ALICE (née en 1995)

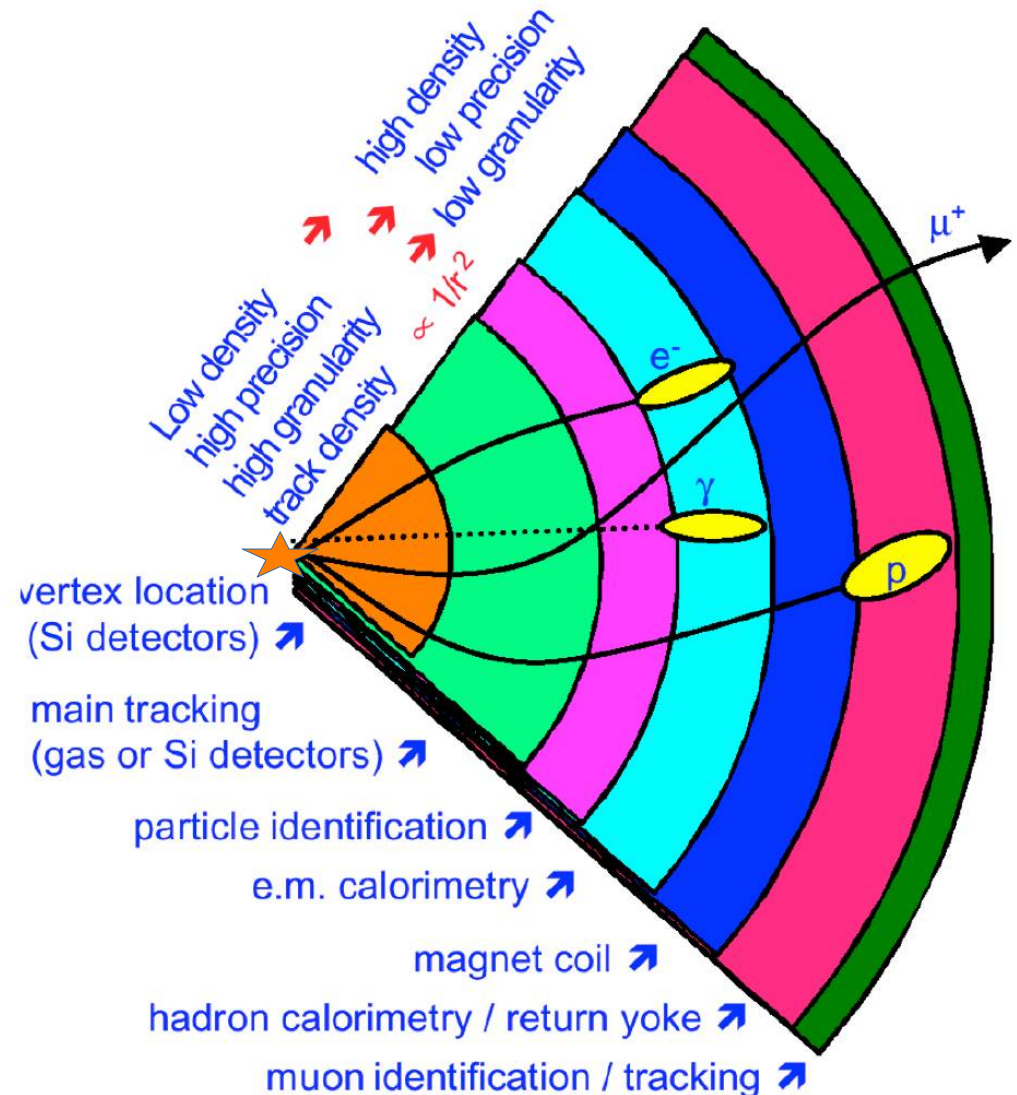


Principe généraux d'un détecteur

Collider geometry
"4 π hermetic – multi-purpose"



Mesurer les caractéristiques des particules (trajectoire, énergie, charge, ...) sans les perturber (ou le moins possible)





L'expérience ALICE

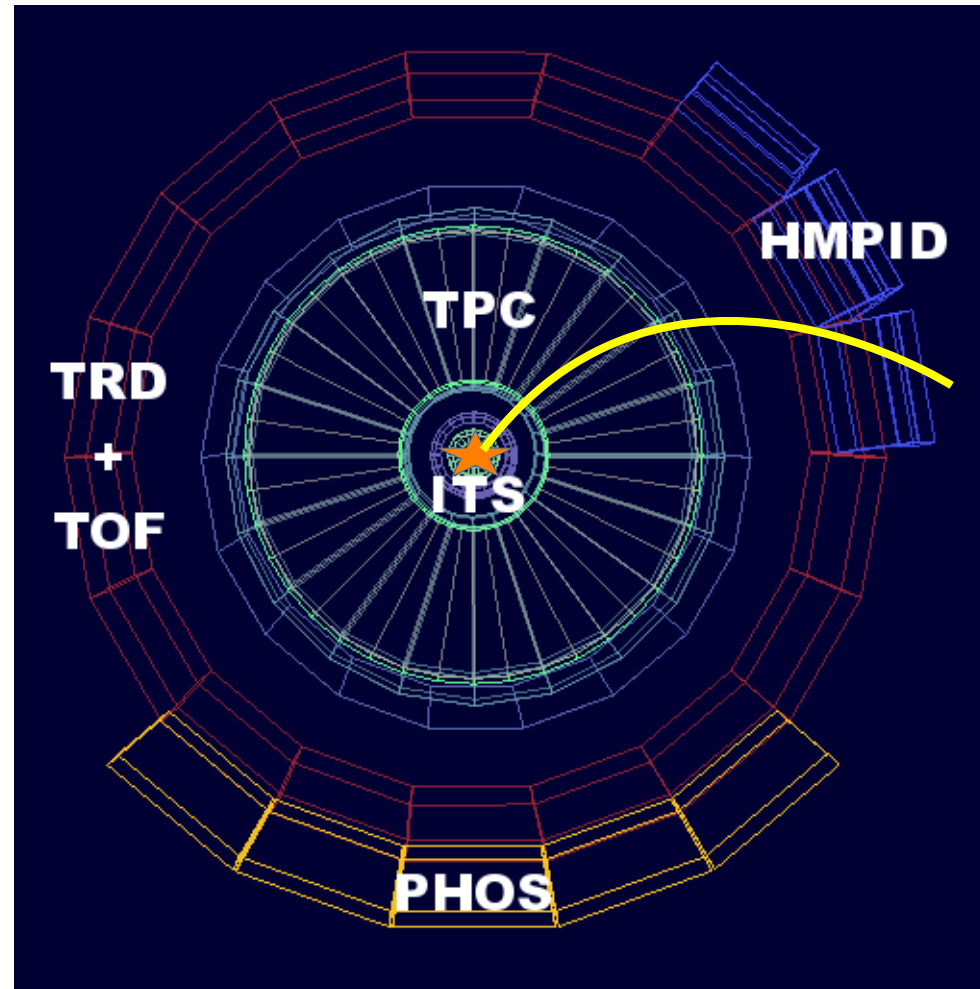
Structure en couches cylindriques successives qui entourent le plus hermétiquement possible le point de collision ★

1) détecteurs les plus précis et avec le moins de matière (pixels/silicium) au plus proche de la collision.

2) détecteurs de grand volumes (gazeux, faible densité) pour reconstruire les traces.

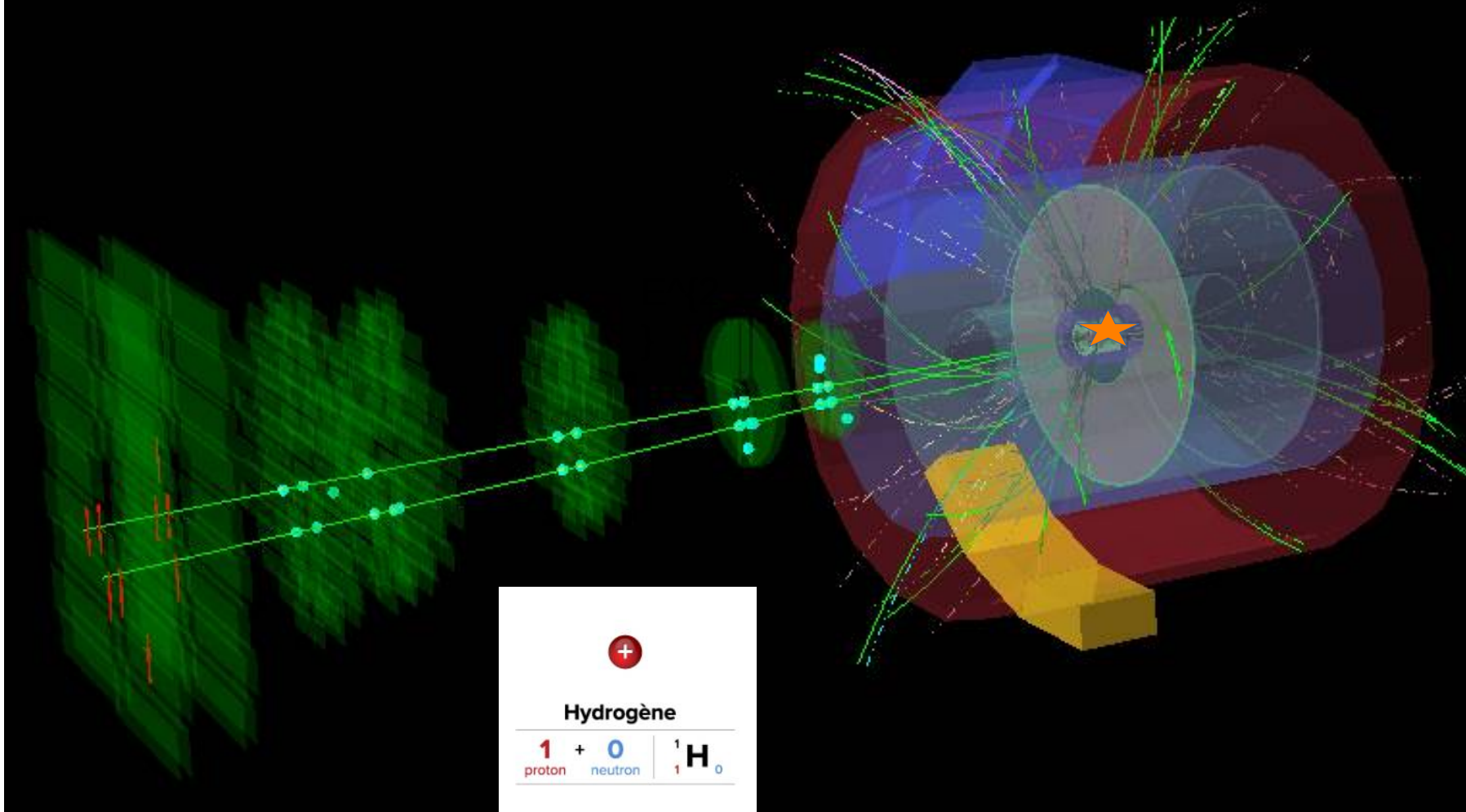
3) détecteurs de temps de vol et calorimétrie qui peuvent compléter l'identification des particules.

Détecteur baigne dans un champ magnétique afin de courber la trajectoire des particules (force de Lorentz)



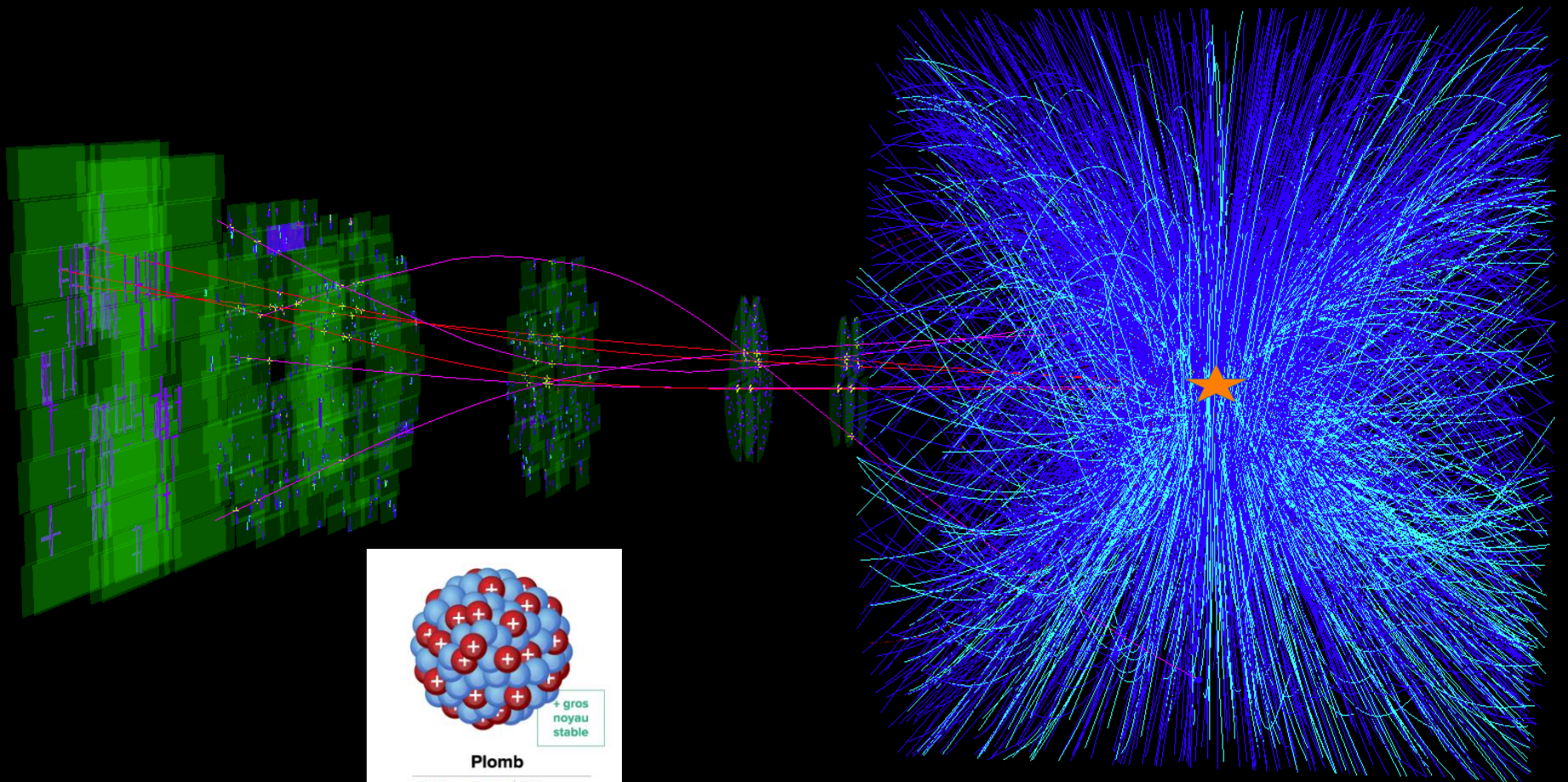
L'expérience ALICE

Collision p+p $\sqrt{s} = 7$ TeV



L'expérience ALICE

Collision Pb+Pb, $\sqrt{s} = 2.76$ TeV





Identification des particules

Comment reconnaît-on une particule ?

courbure de la trajectoire dans un champ magnétique

⇒ impulsion **p** et charge **Z**

calorimètre, **perte d'énergie**

⇒ énergie (**E**)

Relativité Restreinte permet de calculer la masse

$$\Rightarrow \mathbf{m}^2 \mathbf{c}^4 = \mathbf{E}^2 - \mathbf{p}^2 \mathbf{c}^2$$

On identifie ensuite la particule avec sa masse **m et sa charge **Z**.**

Par exemple $m=139$ et $Z=-1$

Liste (partielle) de particules **directement mesurables** :

électron e^- / positron e^+ $m_e = 511 \text{ keV}/c^2$

muons $\mu^\pm$ $m_\mu = 106 \text{ MeV}/c^2$

pions $\pi^\pm$ $m_\pi = 139 \text{ MeV}/c^2$

(anti)-proton $p^{+(-)}$ $m_p = 938 \text{ MeV}/c^2$

[Rappel $1000 \text{ MeV}/c^2 = 1 \text{ GeV}/c^2 \sim 1.8 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$]

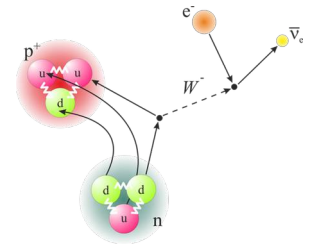


ALICE

Particules étranges

La matière que nous connaissons est **uniquement constituée de protons et de neutrons (quarks u et d)** :

- proton : uud , stable $> 3.6 \cdot 10^{29}$ années
- neutron : udd, instable 900 secondes mais stable si lié à un proton.



Les quarks :

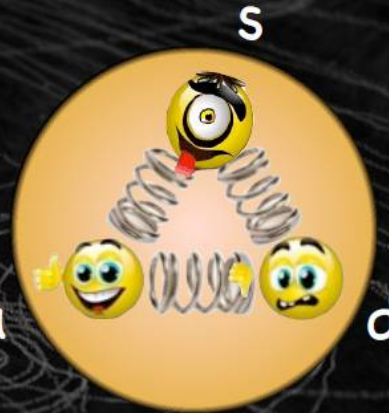


$+\frac{2}{3}e$

$-\frac{1}{3}e$

masse →

(anti)-Lambda : Λ^0



u

d

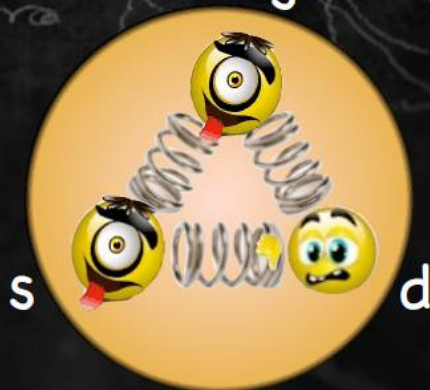
Kaon neutre : K^0



d

s

Xi : Ξ^-



s

d

Exemple de
particules
étranges :
- le Kaon
- le Lambda
- le Xi



Nom, prénom, age...

Kaon (K) : état lié quark-antiquark $\bar{d} - s$, temps de vie entre 10^{-10} et 10^{-8} s.

Découvert en 1947.

[K-meson $\rightarrow$ Kaon ; Pi-meson $\rightarrow$ Pion (π)]

Lambda (Λ) : état lié de trois quark $s - u - d$, temps de vie $\sim 10^{-10}$ s.

Découvert en 1950.

[anti-Lambda ou $\bar{\Lambda}$ trois quark $\bar{s} - \bar{u} - \bar{d}$]

Xi (Ξ) : état lié de trois quark $s - s - d$, temps de vie $\sim 10^{-10}$ s. Découvert en 1952.

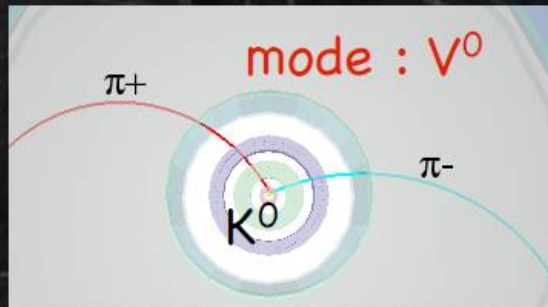
De nombreuses particules sont nommées par une lettre grecque... Les physiciens découvrant de plus en plus de particules, il fallait trouver une solution « simple » : l'alphabet grec.

Désintégration des particules étranges

Kaon neutre : K^0

$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

$$m_{K^0} = 0,497 \text{ GeV}/c^2$$

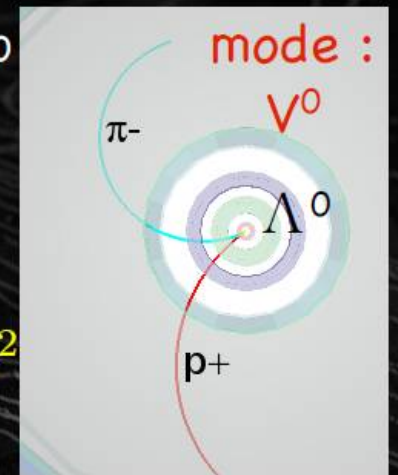


(anti)-Lambda : Λ^0

$$\Lambda^0 \rightarrow p^+ + \pi^-$$

$$\bar{\Lambda}^0 \rightarrow p^- + \pi^+$$

$$m_{\Lambda^0} = 1,115 \text{ GeV}/c^2$$

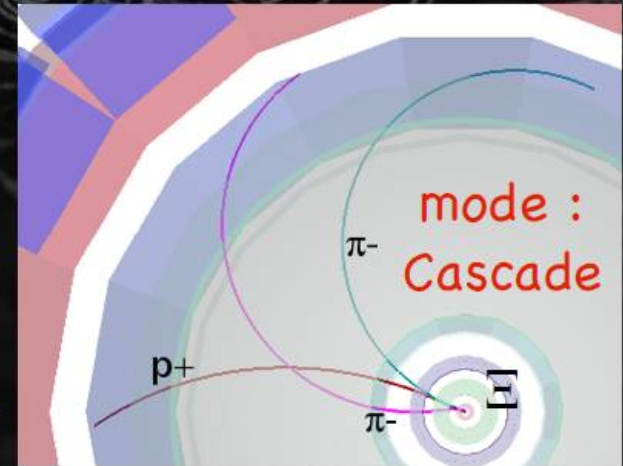


Xi : Ξ^-

$$\Xi \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$$

$$\hookrightarrow p^+ + \pi^-$$

$$m_{\Xi} = 1,321 \text{ GeV}/c^2$$



Les particules neutres ne laissent pas de traces dans les détecteurs.
Les particules neutres sont détectées et identifiées par leur produits de désintégrations (particules chargées).



Mesurer les propriétés de la particule « mère » dans une désintégration

Désintégration des particules : $A \rightarrow B + C$

Conservation de l'énergie (E), la quantité de mouvement (P) et de la charge (Z) :

$$E_A = E_B + E_C$$

$$P_A = P_B + P_C$$

$$Z_A = Z_B + Z_C$$

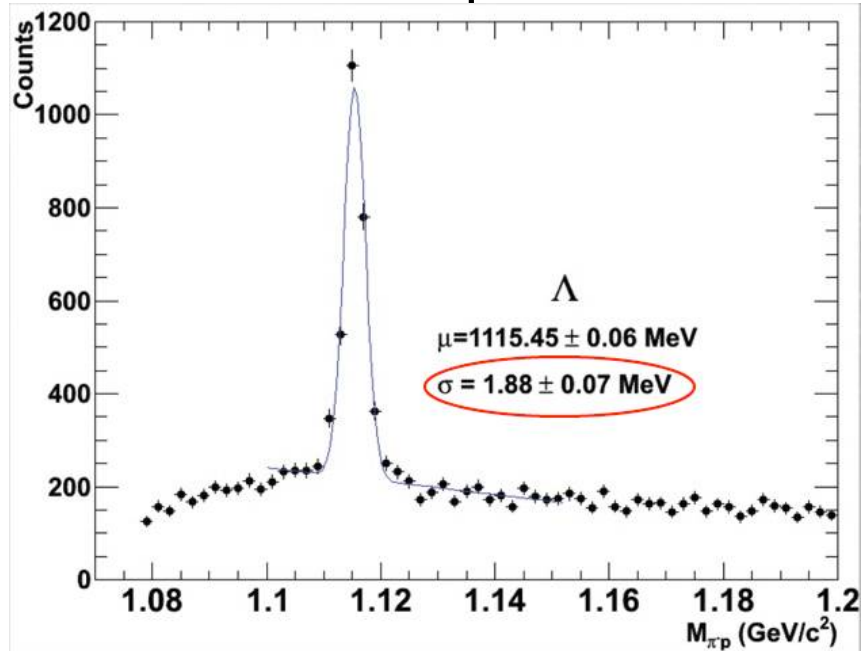
On en déduit donc la masse et la charge de A par les mesures des masses et charges de B et C.

On peut relier la masse invariante de la particule A à la masse, l'impulsion et l'énergie des particules B et C selon la formule suivante :

$$M_A^2 = m_B^2 + m_C^2 + 2 E_B E_C - 2 (p_{xB} p_{xC} + p_{yB} p_{yC} + p_{zB} p_{zC})$$

Incertitudes sur les mesures

Toute mesure expérimentale est entachée d'une incertitude

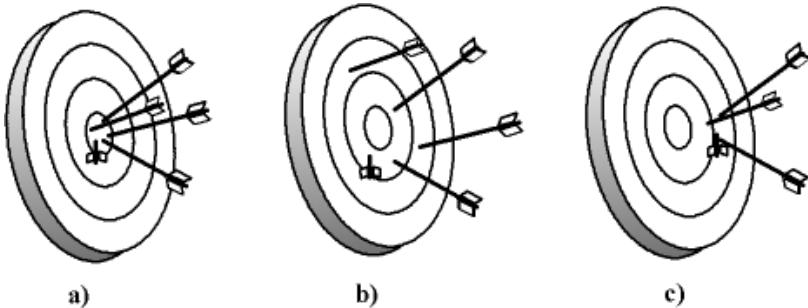


Cette incertitude inclut :

- la résolution de l'instrument
- les fluctuations statistiques
- les incertitudes quantiques

Masse du Lambda obtenue à partir de mesures de précision

$$m_{\Lambda} = 1115.683 \pm 0.006 \text{ MeV/c}^2$$



- a) la dispersion statistique et l'erreur systématique sont faibles ;
- b) la dispersion statistique est forte mais l'erreur systématique est faible ;
- c) la dispersion statistique est faible mais l'erreur systématique est forte.

Incertitudes sur les mesures

Les mesures de la masse des particules vont donc fluctuer.

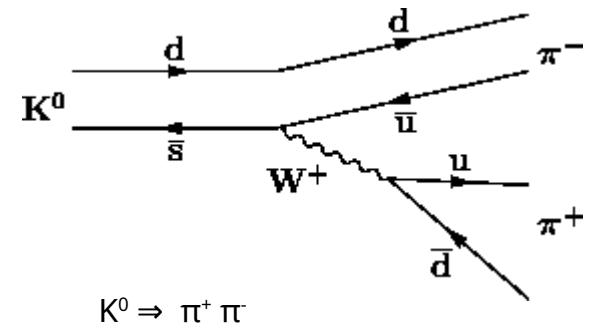
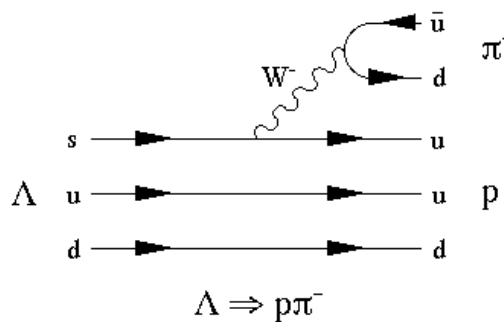
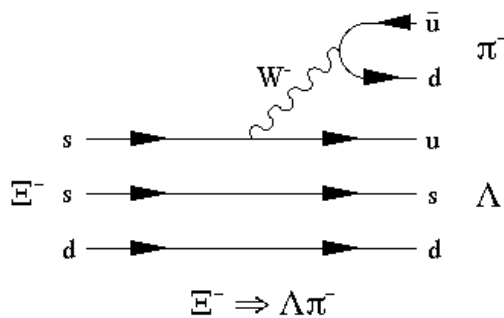
La masse du $K_0 = 497 \pm 13 \text{ MeV} \rightarrow$ on pourra considérer que l'on a mesuré un K_0 si la masse reconstruite est comprise dans l'**intervalle** $[484 ; 510] \text{ MeV}/c^2$

La masse du $\Lambda = 1115 \pm 10 \text{ MeV} \rightarrow$ **intervalle** $[1105 ; 1125] \text{ MeV}/c^2$ (attention vous devrez faire la **distinction entre Λ et anti- Λ**)

$$\Lambda \rightarrow p^+ + \pi^-$$

$$\bar{\Lambda} \rightarrow p^- + \pi^+$$

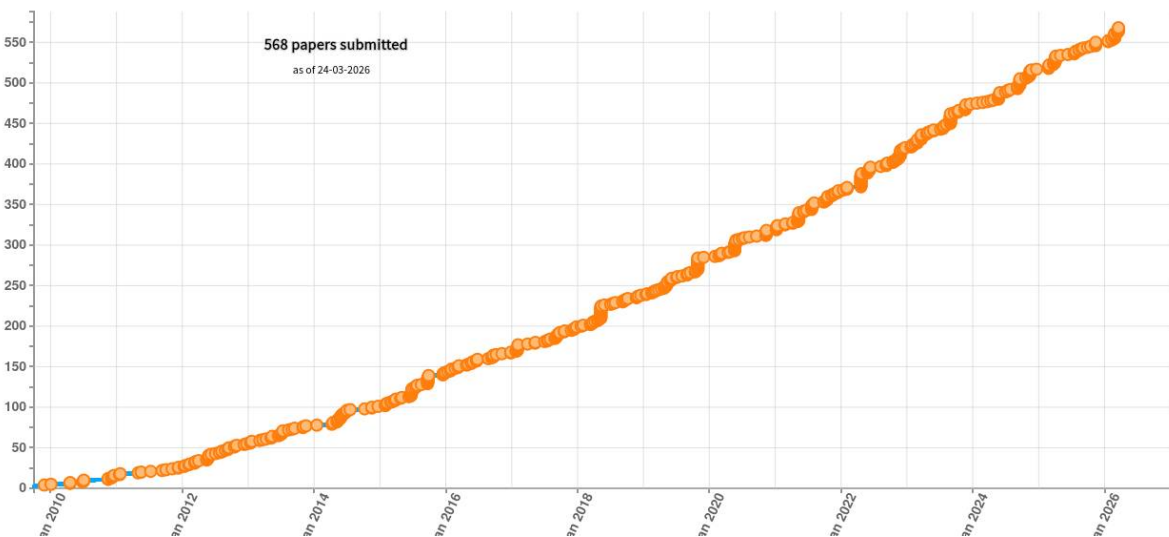
La masse du $\Xi^- = 1321 \pm 10 \text{ MeV} \rightarrow$ **intervalle** $[1311 ; 1331] \text{ MeV}/c^2$



L'expérience ALICE

Analyse des données, estimation des incertitudes, vérifications, comparaisons aux modèles théoriques et aux autres expériences, interprétations, conclusions (si possible)

⇒ **Publications**



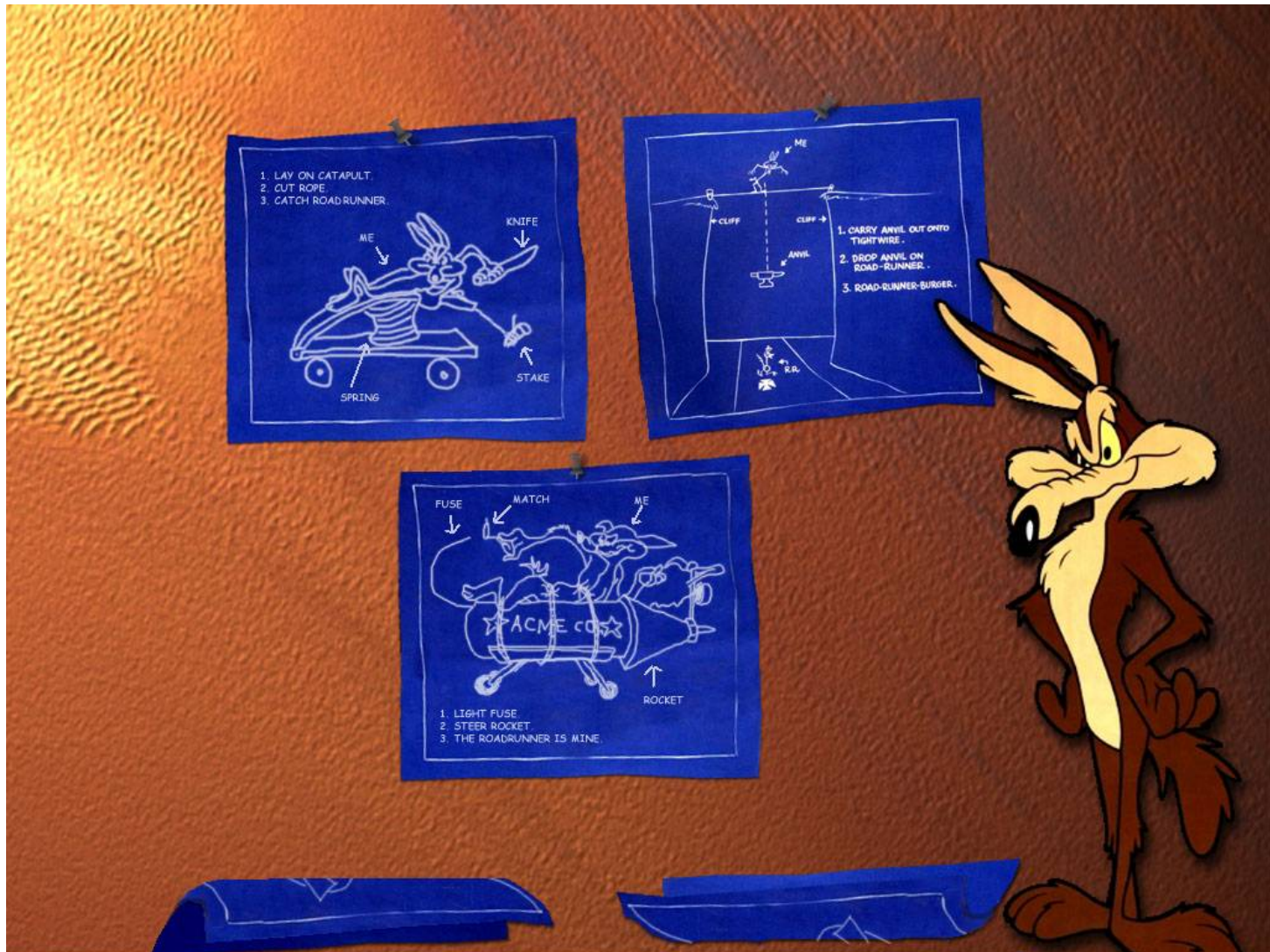
Données analysées au cours des années 2009-2018:

- proton-proton à 2.76, 5, 7,8, 13 TeV
- proton-plomb à 5, 7, 8 TeV
- Xenon-xenon 5.4 TeV
- plomb-plomb à 2.76, 5 TeV

+ Run 3 (en cours) depuis 2022
avec une version améliorée (haute intensité) du détecteur

- p-p 5.36, 13.6 TeV
- PbPb 5.36 TeV
- OO 5.36 TeV
- pO 6.8 TeV
- NeNe 5.36 TeV

De la théorie à la pratique





Connexion et lancement des programmes

Ouvrir une session :

Login : **imcxx**

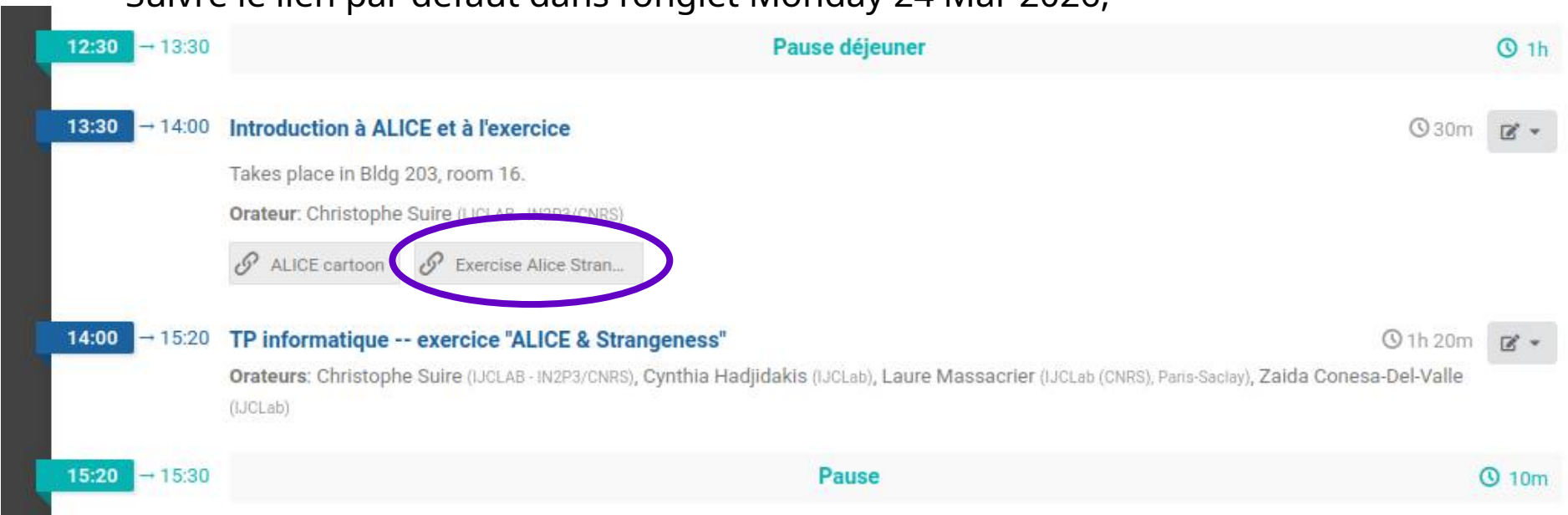
mot de passe : **imcxx\$**

xx est votre numéro de poste (étiquette sur le pc : LD-ENS**XX**)

Ouvrir un web browser :

Firefox 

Suivre le lien par défaut dans l'onglet Monday 24 Mar 2026,



Time	Activity	Duration	Details
12:30 → 13:30	Pause déjeuner	1h	
13:30 → 14:00	Introduction à ALICE et à l'exercice	30m	Takes place in Bldg 203, room 16. Orateur: Christophe Suire (IJCLAB - IN2P3/CNRS) ALICE cartoon Exercise Alice Stran...
14:00 → 15:20	TP informatique -- exercice "ALICE & Strangeness"	1h 20m	Orateurs: Christophe Suire (IJCLAB - IN2P3/CNRS), Cynthia Hadjidakis (IJCLab), Laure Massacrier (IJCLab (CNRS), Paris-Saclay), Zaida Conesa-Del-Valle (IJCLab)
15:20 → 15:30	Pause	10m	

ou taper l'adresse : <https://alice-web-masterclass.app.cern.ch/home>

Connexion et lancement des programmes

<https://alice-web-masterclass.app.cern.ch/home>

CERN Accelerating science

≡ ALICE Masterclass



ALICE

Welcome to the ALICE Masterclass!

The ALICE Collaboration has built a dedicated detector to exploit the unique physics potential of nucleus-nucleus collisions at LHC energies. Our aim is to study the physics of strongly interacting matter at the highest energy densities reached so far in the laboratory. In such condition, an extreme phase of matter - called the quark-gluon plasma - is formed.

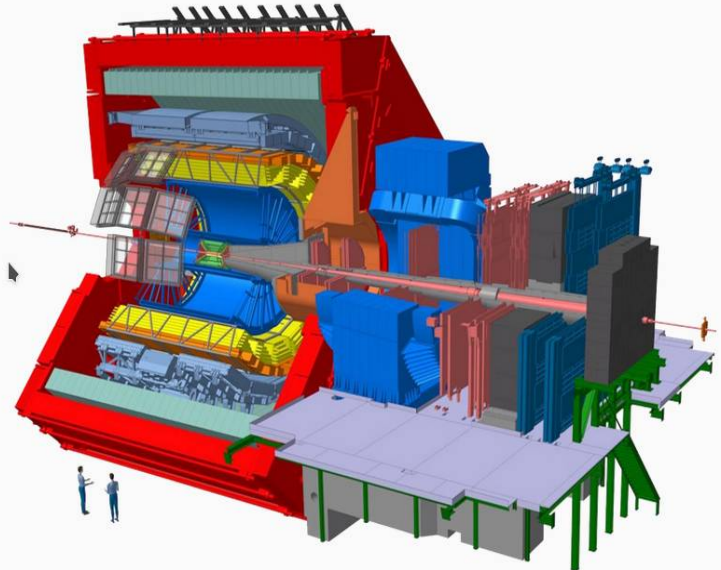
Our universe is thought to have been in such a primordial state for the first few millionths of a second after the Big Bang. The properties of such a phase are key issues for Quantum Chromo Dynamics, the understanding of confinement-deconfinement and chiral phase transitions.

For this purpose, we are carrying out a comprehensive study of the hadrons, electrons, muons and photons produced in the collisions of heavy nuclei. ALICE is also studying proton-proton and proton-nucleus collisions both as a comparison with nucleus-nucleus collisions and in their own right.

If you wish, you can download and use a desktop version of the Masterclass:









European Funds
Knowledge Education Development



Republic of Poland

Warsaw University of Technology



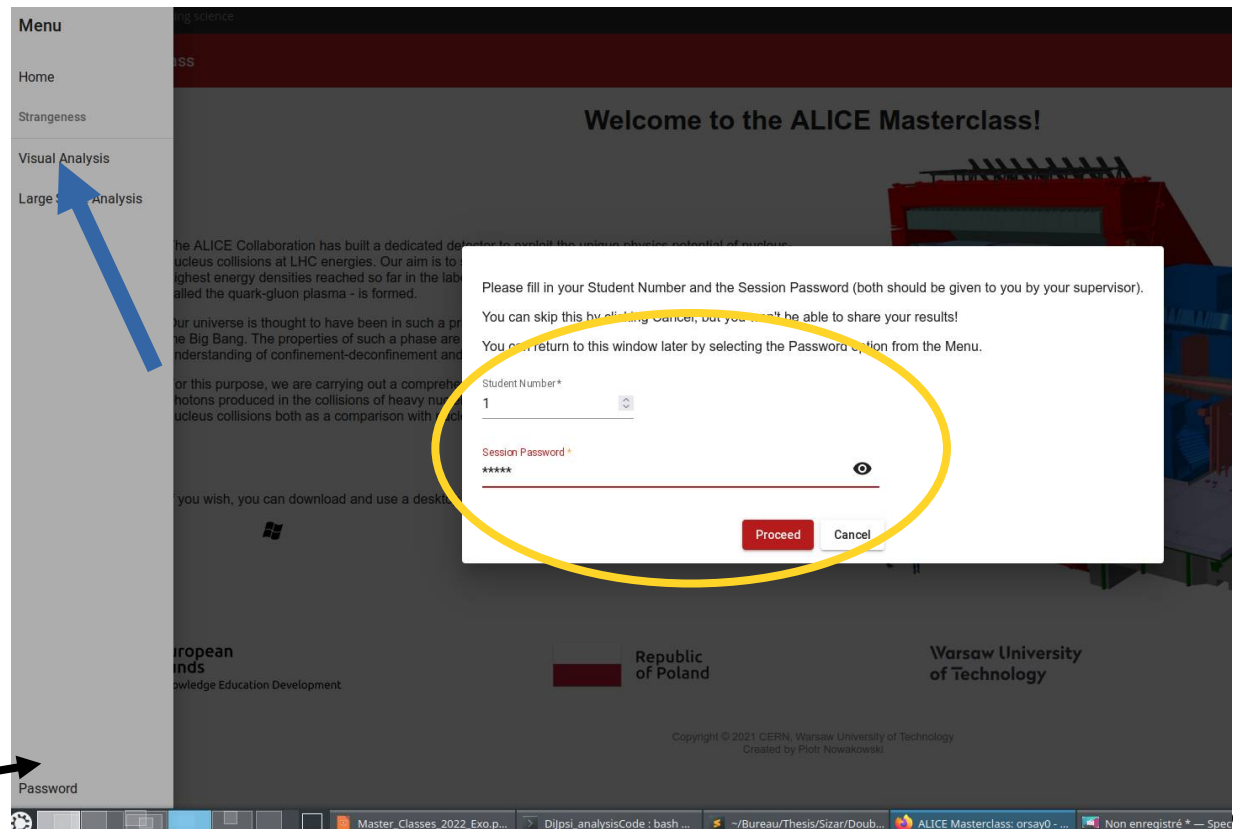
European Union
European Social Fund

Copyright © 2021 CERN, Warsaw University of Technology
Created by Piotr Nowakowski

Connexion et lancement des programmes

Se connecter

- 1) Student number : votre numero de poste [1-20]
- 2) Session password : **mardi230326**
- 3) [**Proceed**]



Menu

Home

Strangeness

Visual Analysis

Large Scale Analysis

Welcome to the ALICE Masterclass!

Please fill in your Student Number and the Session Password (both should be given to you by your supervisor).

You can skip this by clicking Cancel, but you won't be able to share your results!

You can return to this window later by selecting the Password option from the Menu.

Student Number *

1

Session Password *

Proceed Cancel

European
Union
Knowledge Education Development

Republic
of Poland

Warsaw University
of Technology

Copyright © 2021 CERN, Warsaw University of Technology
Created by Piotr Nowakowski

Master_Classes_2022.Exo.p... Dilps_analysisCode : bash ... ~/Bureau/Thesis/Sizar/Doub ALICE Masterclass: orsay0 - ... Non enregistré * - Speed

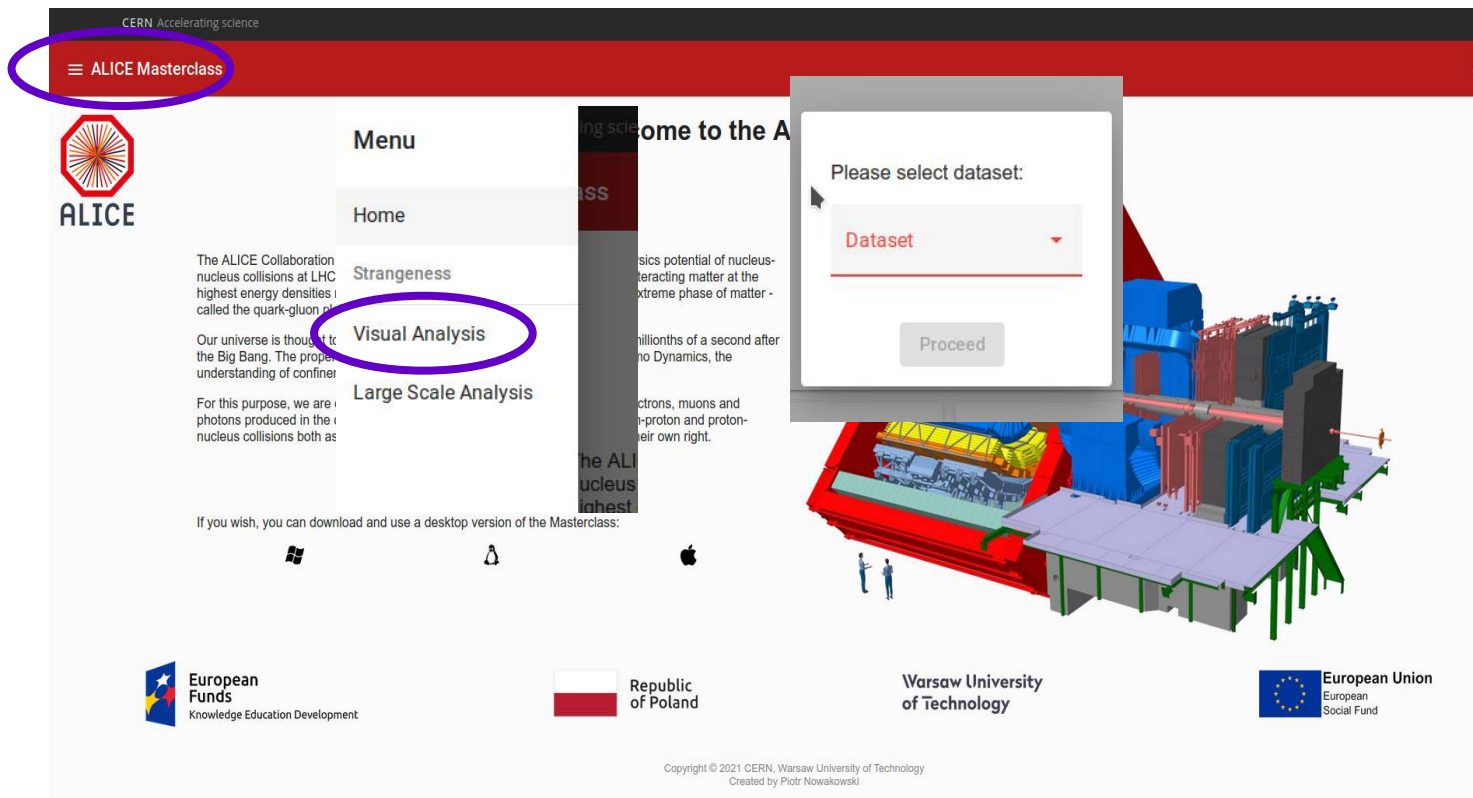
Si la fenetre de
connexion
n'apparait pas,
cliquez sur
[Password]

Exercise : Visual Analysis

Choisir :

ALICE Masterclass

Visual Analysis



CERN Accelerating science

ALICE Masterclass

Menu

- Home
- Strangeness
- Visual Analysis
- Large Scale Analysis

Please select dataset:

Dataset

Proceed

European Funds Knowledge Education Development

Republic of Poland

Warsaw University of Technology

European Union European Social Fund

Copyright © 2021 CERN, Warsaw University of Technology
Created by Piotr Nowakowski



Exercice d'initiation

Objectif :

Montrer comment sont détectés les particules étranges

- 1) sélection de traces candidates
 - 2) calcul de masse invariante
 - 3) conclure....
-
- 1) Choisir un dataset 1-18
→ prendre le dataset de votre numéro de pc.
 - 2) Analyser les événements en **choisissant les traces colorées** (rouge et verte) correspondant à une désintégration
 - 3) Elles sont reportées directement dans le **calculator** et une **masse invariante** est calculée
 - 4) Déterminer le type de la **particule mère** en fonction de la masse invariante reconstruite
 - 5) **Cliquer sur « Add »** et la particule est reportée dans l'histogramme correspondant
 - 6) Cliquer sur la petite flèche pour passer à l'**événement suivant**
 - 7) **Visualiser le spectre en masse invariante** des particules identifiées
 - 8) Essayer Pb-Pb quand vous avez fini...

Exercice d'initiation

CERN Accelerating science

ALICE Masterclass

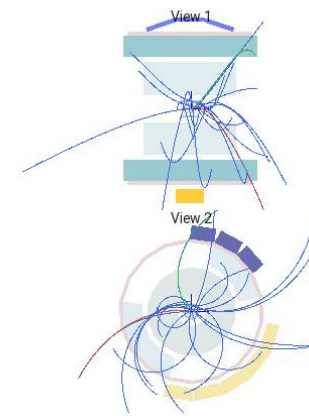
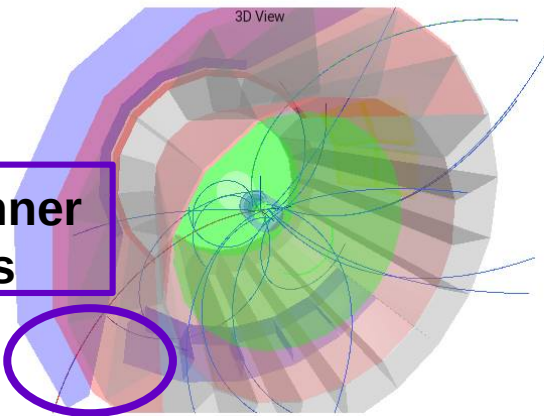
EN

Event

Événement suivant [>]

Menu

Sélectionner les traces



Visibility

- ☒ Side Views
- ☒ Detector
- ☒ Axes
- ☒ Tracks
- ☒ Decays

Track Width

- ☒ S
- ☐ M
- ☐ L

Activer Decay !
et tester les autres options

Calculator

Charge p_x (GeV/c) p_y (GeV/c) p_z (GeV/c) mass (GeV/c²)

(+)

(-)

(b)

Select particle type

Add

Particles

Type	mass (GeV/c ²)
e^-, e^+	0.0005
π^-, π^+	0.1396
K_S^0	0.4976
$p, \bar{p}$	0.9383
$\Lambda, \bar{\Lambda}$	1.1157

Exercice d'initiation

CERN Accelerating science

ALICE Masterclass

EN

(1) les traces sélectionnées apparaissent dans la calculatrice

Transmettre à la fin de l'exercice

Calculator

Charge	p_x (GeV/c)	p_y (GeV/c)	p_z (GeV/c)	mass (GeV/c ²)
(+)	-0.719	0.088	0.227	0.140
(-)	-0.232	0.250	0.259	0.140
(b)				
Total				0.489

Select particle type
Kaon

Add

(2) une masse est calculée

Particles

Type	mass (GeV/c ²)
e^-, e^+	0.0005
π^-, π^+	0.1396
K_S^0	0.4976
$p, \bar{p}$	0.9383
$\Lambda, \bar{\Lambda}$	1.1157
$\Xi, \bar{\Xi}$	1.3217

Histograms

Counts

Invariant Mass (GeV/c²)

K_S^0

Λ

$\bar{\Lambda}$

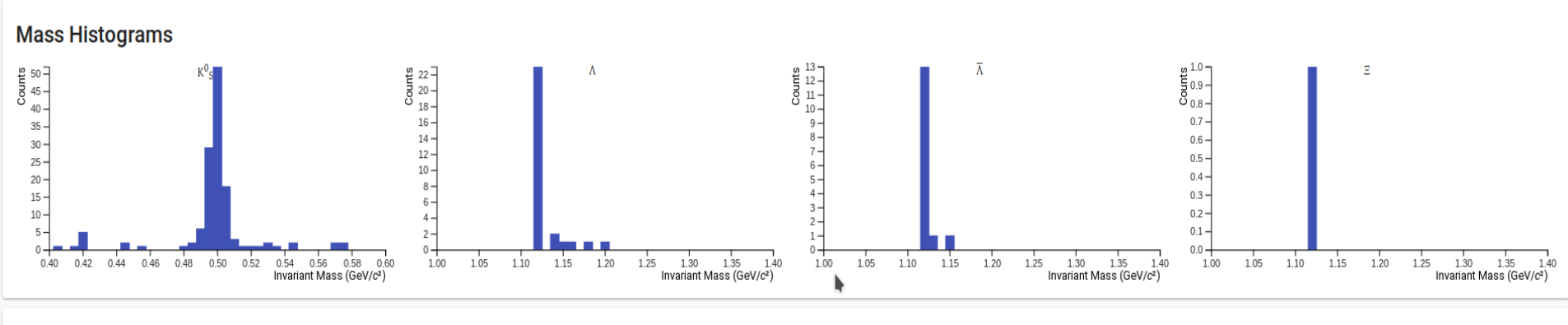
Ξ

C'est à vous



Exercice d'initiation

ALICE Masterclass Teacher



Bravo : vous venez d'analyser ~ **300 collisions proton-proton** enregistrées par l'expérience ALICE.

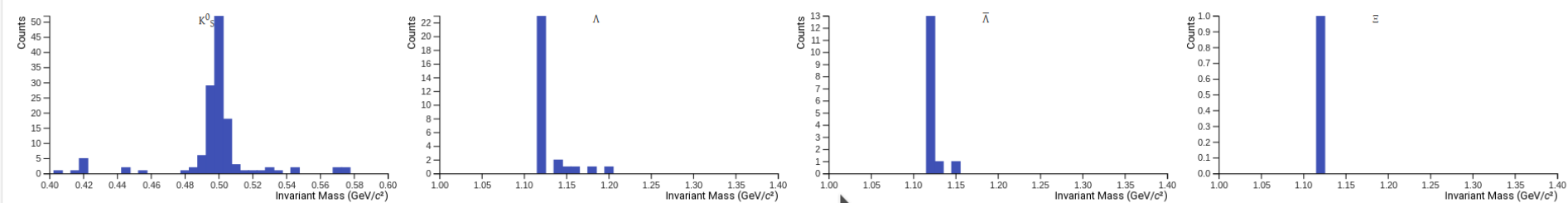
Cette méthode est **fastidieuse et inapplicable** pour analyser des millions d'événements. Dans une publication récente, nous analysons 24 pb⁻¹ soit environ **1 440 000 millions de collisions proton-proton**

Résultats des IMC précédentes

Résultats Masterclass Orsay-31March2022

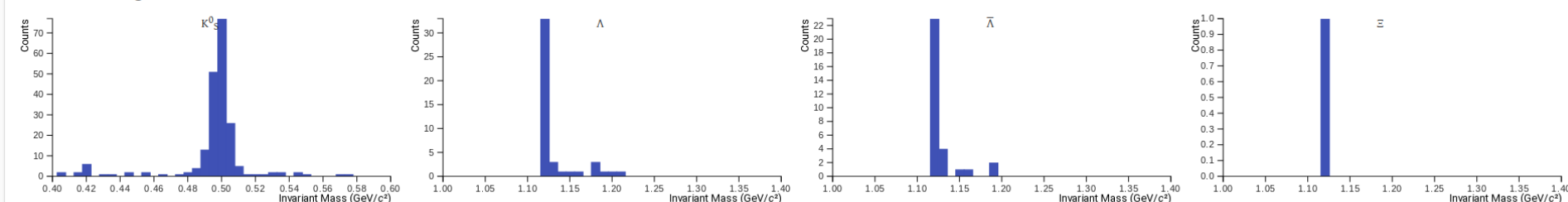
ALICE Masterclass Teacher

Mass Histograms



Résultats Masterclass Orsay-30March2023

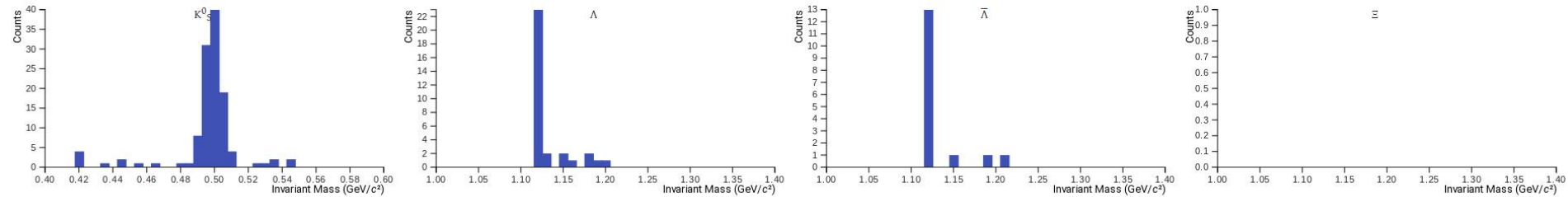
Mass Histograms



Résultats des IMC précédentes

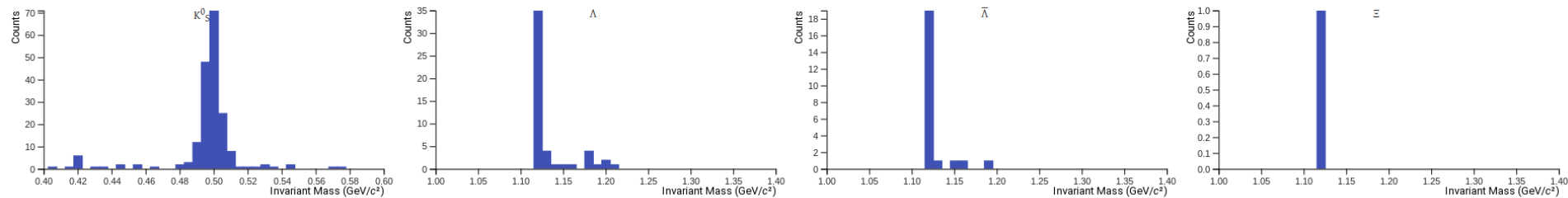
Résultats Masterclass Orsay-25March2024

Mass Histograms



Résultats Masterclass Orsay 3 March 2025

Mass Histograms



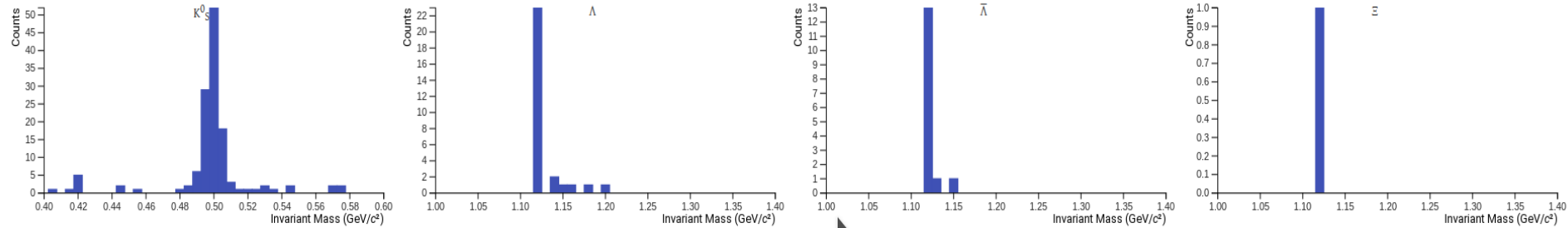


ALICE

ALICE Masterclass Teacher

Remarques et questions

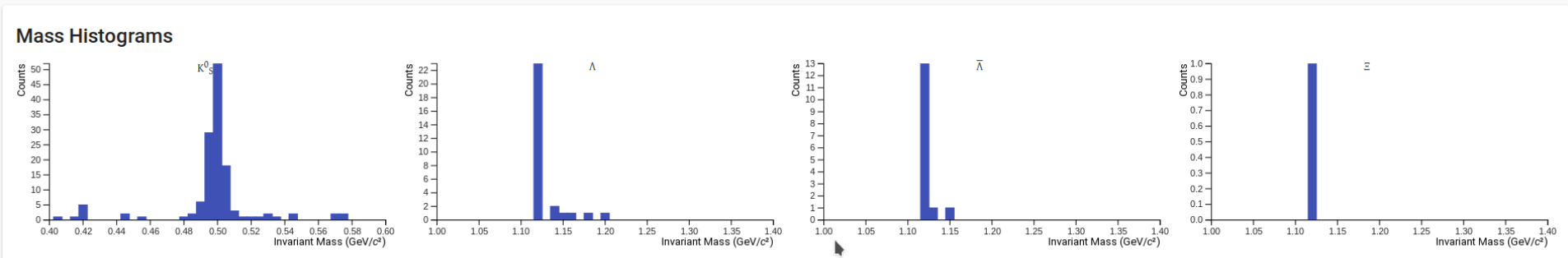
Mass Histograms



1) ...

2) ...

Remarques et questions



1) $N \text{ Kaons} > N \text{ Lambda} > N \text{ anti-Lambda} > N \text{ Xi}$

2) inversement proportionnel au nombre de quarks étranges contenus dans la particule

Dans l'exercice, vous aviez la possibilité de «surligner» les traces provenant de la décroissance d'un kaon ou d'un lambda.
Comment faire sans cela ?



Exercice d'analyse de données

Problématique

- l'analyse en sélectionnant les **bonnes traces** («à la main ») permet d'obtenir un joli pic contenant la particule recherchée : impossible à mettre en œuvre pour un nombre élevé de collisions

→ analyse statistique (algorithme) qui sélectionne **les bonnes traces** et effectue toutes les combinaisons possibles : **apparition du bruit de fond combinatoire** en plus du **pic de la particule mère reconstruite**

Quelles sont les bonnes traces pour :

K^0

Λ

$\bar{\Lambda}$

Ξ^-



Exercice d'analyse de données

Problématique

- l'analyse en sélectionnant les **bonnes traces** («à la main ») permet d'obtenir un joli pic contenant la particule recherchée : impossible à mettre en œuvre pour un nombre élevé de collisions

→ analyse statistique (algorithmique) qui sélectionne **les bonnes traces** et effectue toutes les combinaisons possibles : **apparition du bruit de fond combinatoire** en plus du **pic de la particule mère reconstruite**

Quelles sont les bonnes traces pour :

$$K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$$

$$\Lambda \rightarrow p^+ \pi^-$$

$$\bar{\Lambda} \rightarrow \pi^+ p^-$$

$$\Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$$

↘

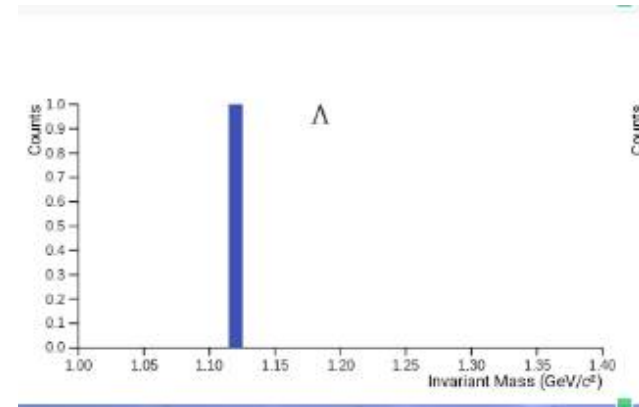
$$p^+ \pi^-$$

Exercice d'analyse de données

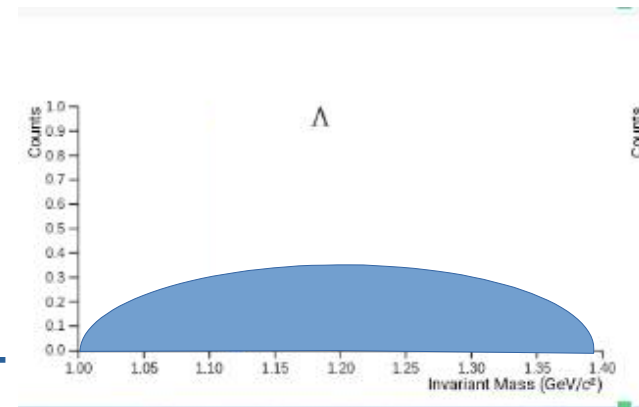
→ analyse statistique (algorithme) qui sélectionne **les bonnes traces** et effectue toutes les combinaisons possibles : **apparition du bruit de fond combinatoire** en plus du **pic de la particule mère reconstruite**



Si vous combinez **le bon proton+** et **le bon pion-**



Si vous combinez des **protons+** et des **pions-**

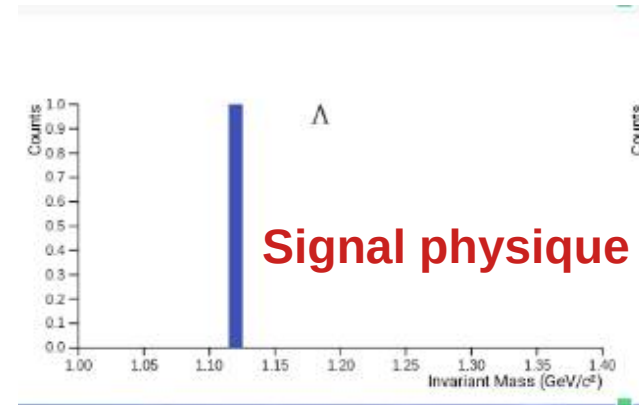


Exercice d'analyse de données

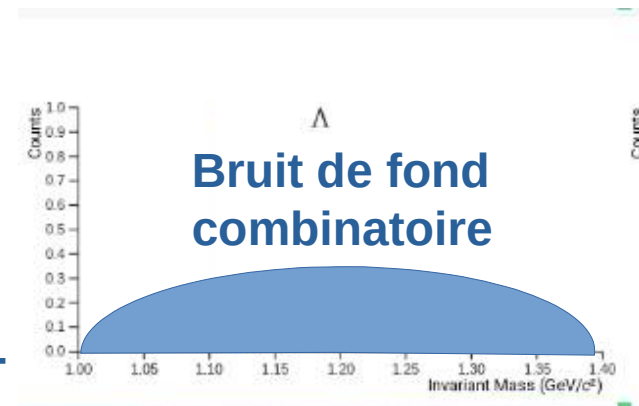
→ analyse statistique (algorithme) qui sélectionne **les bonnes traces** et effectue toutes les combinaisons possibles : **apparition du bruit de fond combinatoire** en plus du **pic de la particule mère reconstruite**



Si vous combinez **le bon proton+** et **le bon pion-**



Si vous combinez des **protons+** et des **pions-**

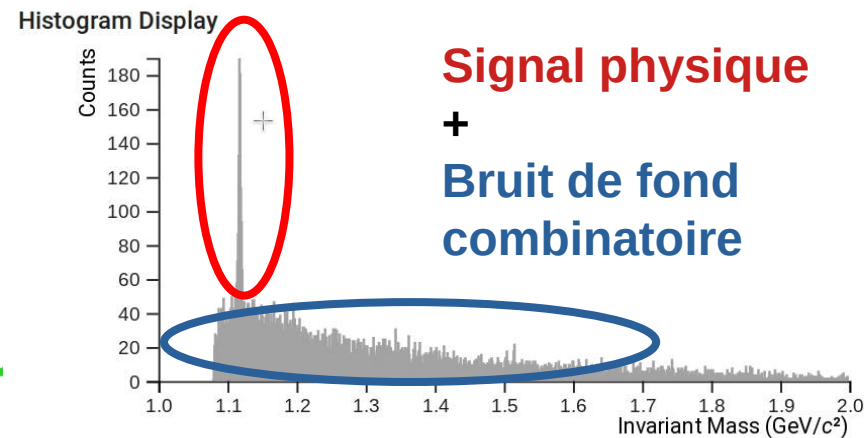


Exercice d'analyse de données

→ analyse statistique (algorithme) qui sélectionne **les bonnes traces** et effectue toutes les combinaisons possibles : **apparition du bruit de fond combinatoire** en plus du **pic de la particule mère reconstruite**



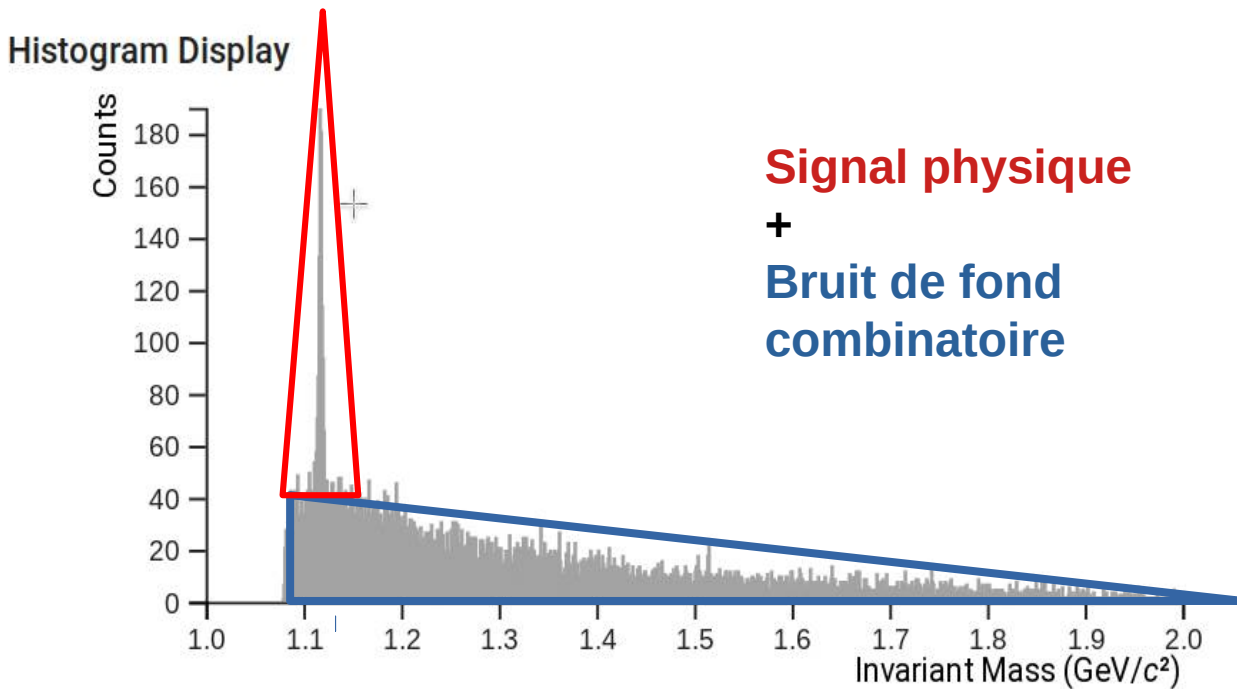
Si vous combinez **le bon proton+** et **le bon pion-**



Si vous combinez des **protons+** et des **pions-**

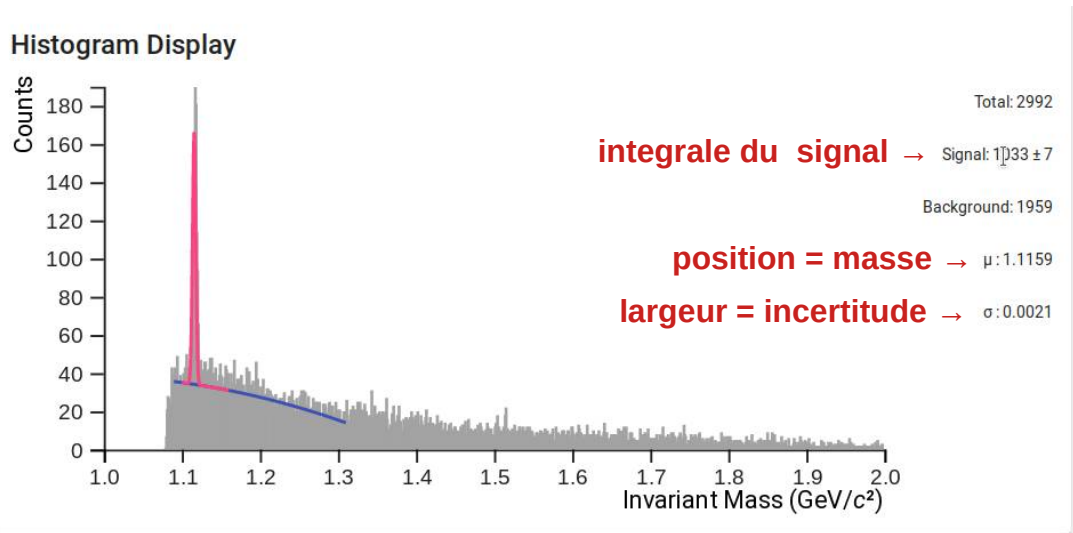
Exercice d'analyse de données

→ analyse statistique (algorithme) qui sélectionne **les bonnes traces** et effectue toutes les combinaisons possibles : **apparition du bruit de fond combinatoire** en plus du **pic de la particule mère reconstruite**



Exercice d'analyse de données

→ Compter le nombre d'entrées dans le **pic de la particule mère reconstruite** sans prendre en compte **le bruit de fond combinatoire** : utilisation d'un **fit ou ajustement par une fonction**.

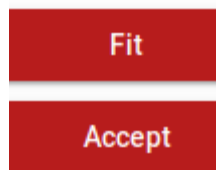


Utilisation de **fonctions mathématiques** qui reproduisent la **forme du signal** et celle du **bruit de fond**.

L'intégrale des fonctions permet d'extraire le **nombre de particules dans le pic** ainsi que la position et la largeur du pic.

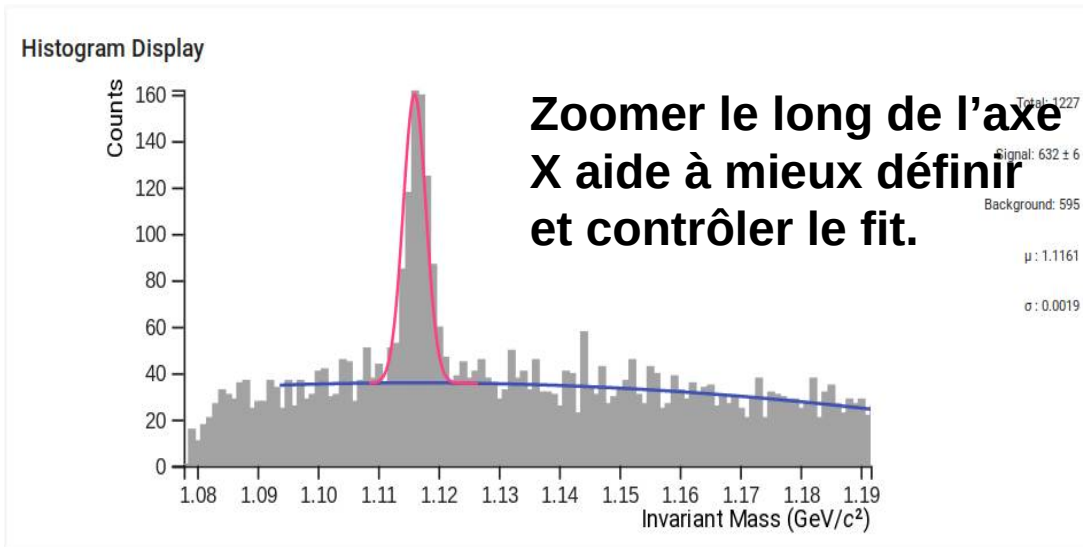
Pour cela il faut :

- 1) **ajuster les intervalles** dans le Fit Selector
- 2) Cliquer sur « **Fit** »
- 3) Si le resultat semble **OK**, « **Accept** »



Exercice d'analyse de données

→ Compter le nombre d'entrées dans le **pic de la particule mère reconstruite** sans prendre en compte **le bruit de fond combinatoire** : utilisation d'un **fit ou ajustement par une fonction**.

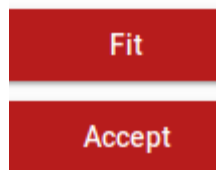


Utilisation de **fonctions mathématiques** qui reproduisent la **forme du signal** et celle du **bruit de fond**.

L'intégrale des fonctions permet d'extraire le **nombre de particules dans le pic** ainsi que la position et la largeur du pic

Pour cela il faut :

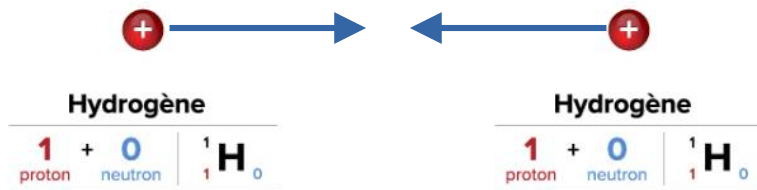
- 1) **ajuster les intervalles** dans le Fit Selector
- 2) Cliquer sur « **Fit** »
- 3) Si le resultat semble **OK**, « **Accept** »



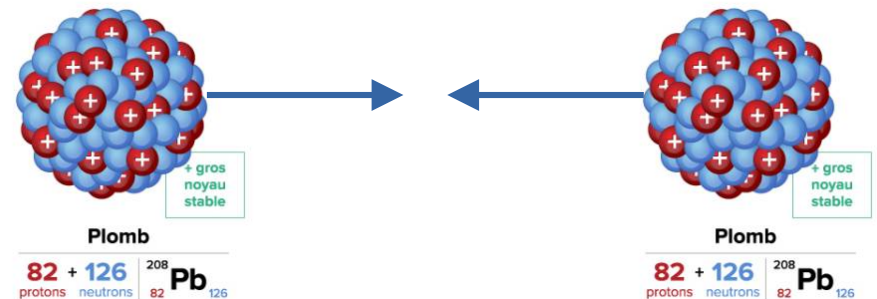
La centralité en collision Pb-Pb

→ Difficulté supplémentaire dans les collisions Plomb Plomb, il faut prendre en compte le paramètre de centralité

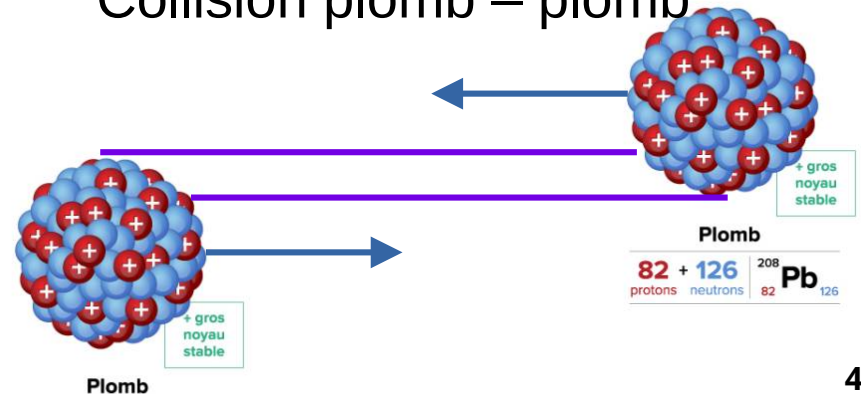
Collision proton – proton



Collision plomb – plomb



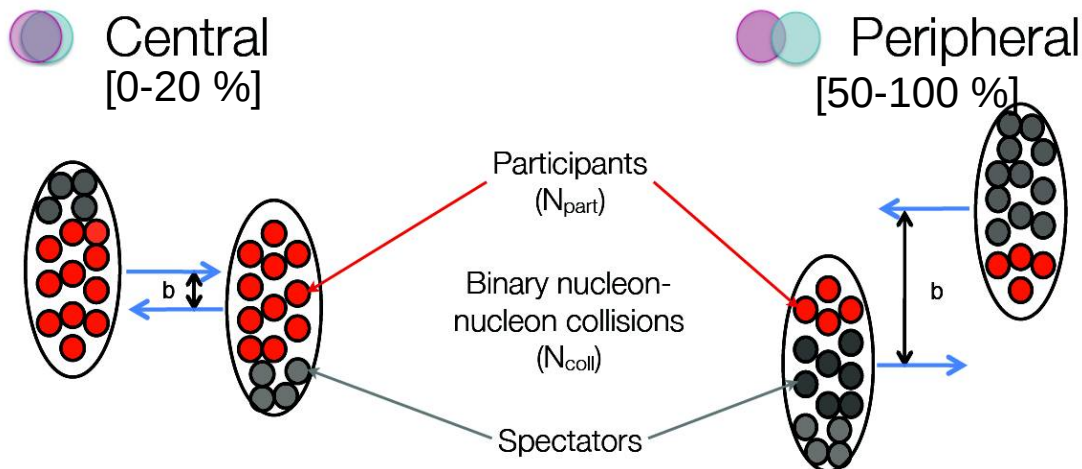
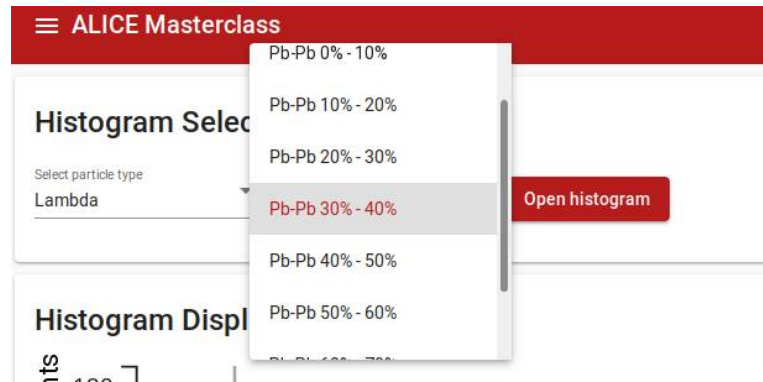
Collision plomb – plomb



La centralité quantifie, au niveau expérimental, quel proportion des noyaux entrent en collisions et elle s'exprime en pourcentage.

La centralité en collision Pb-Pb

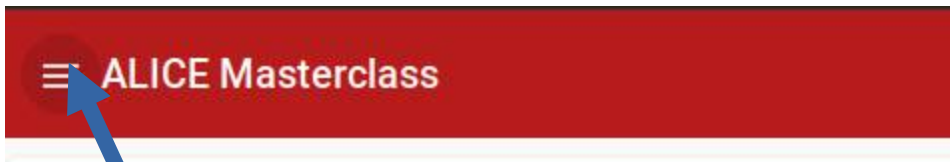
→ Difficulté supplémentaire dans les collisions Plomb Plomb, il faut prendre en compte le paramètre de centralité



	$N_{part} = 2$	$N_{coll} = 1$
	$N_{part} = 5$	$N_{coll} = 6$
Pb-Pb cent.	$N_{part} = 360$	$N_{coll} = 1500$
p-Pb cent.	$N_{part} = 16$	$N_{coll} = 15$

Exercice d'analyse de données

Ouvrir le Menu (1), puis choisir « Large Scale Analysis » (2), puis le type de particule (3), puis le type de collision (4), et obtenir l'histogramme (5).



(1)

Menu

Home

Strangeness

Visual Analysis

Large Scale Analysis

(2)

Histogram Selector

Select particle type

(3)

K^0

Λ

$\bar{\Lambda}$

Select collision & centrality

(4)

pp

Pb-Pb 0%-10 %

Pb-Pb 10%-20 %

Pb-Pb 20%-30 %

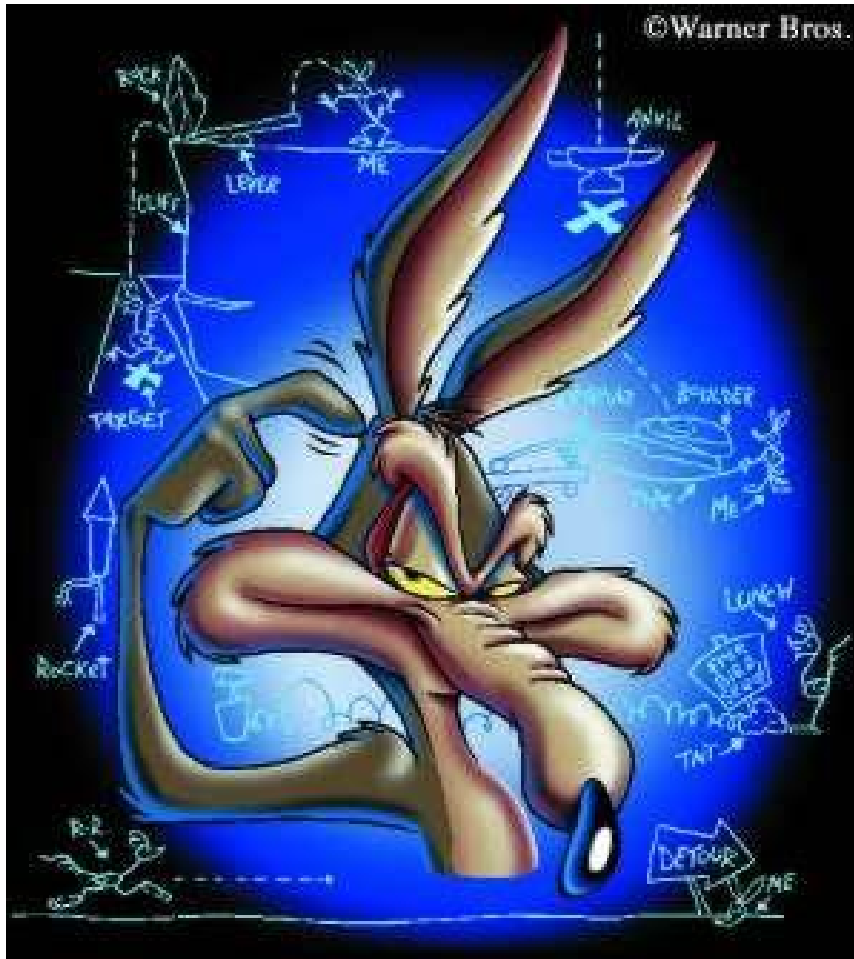
....

Pb-Pb 80%-90 %

Open histogram

(5)

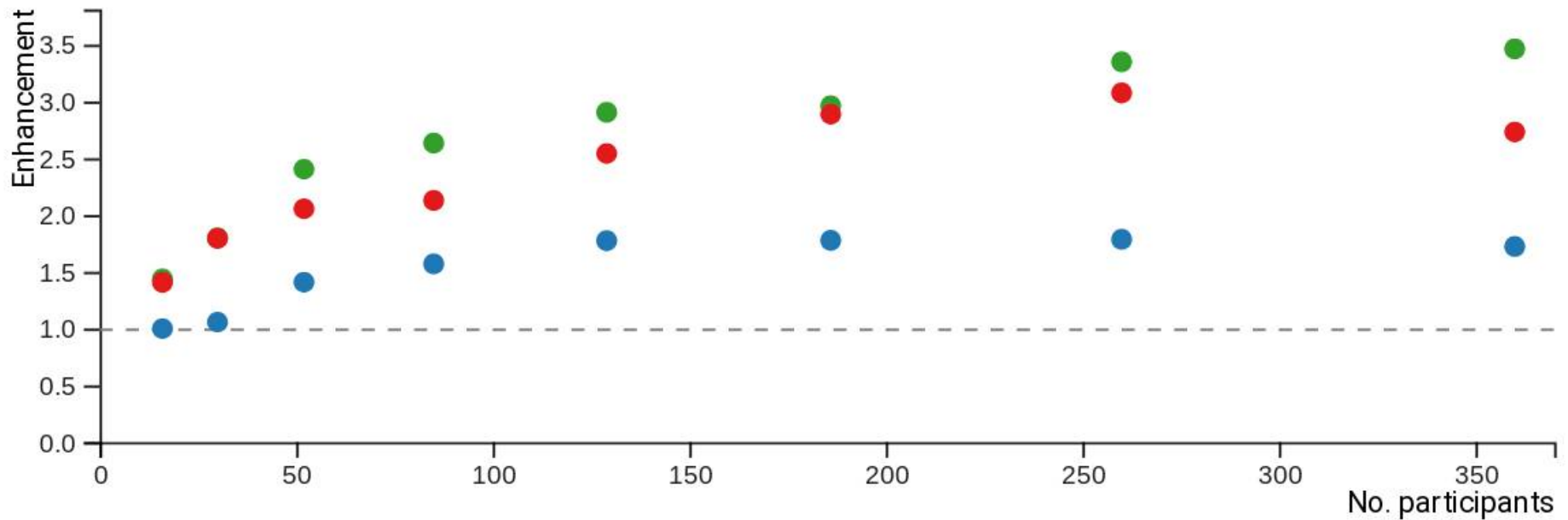
C'est à vous



Analysez le maximum de spectres (particules et centralités)

N'hésitez à nous poser des questions.

Enhancement en fonction No. participants ?



Kaons ●
Lambda ●
anti-Lambda ●

IJCLab, Orsay, 24 mars 2026



ALICE

C'est le nombre de nucleons (proton ou neutron) qui **participent dans la collision = un participant subit au moins une collision.**

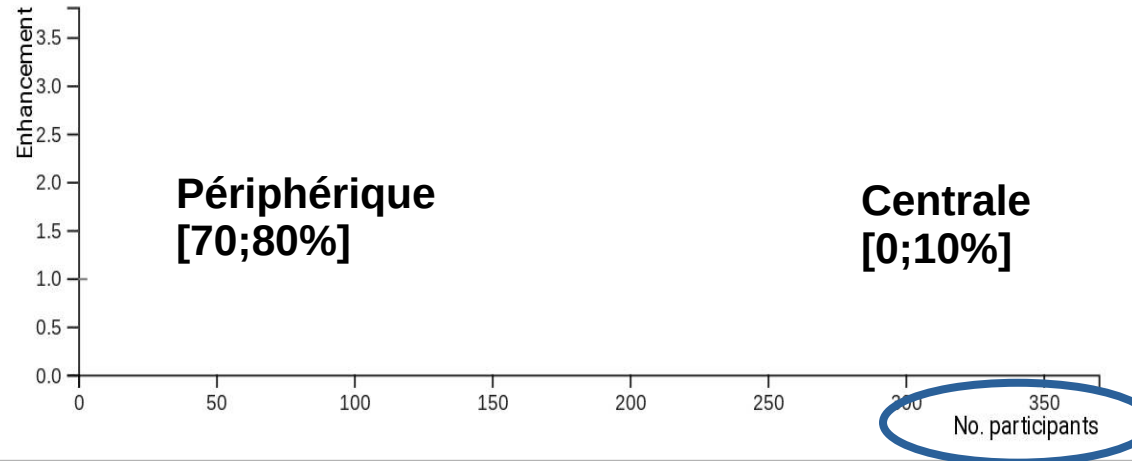
Plus il y a de participants plus la collision est dite **centrale**.

Plus une collision est **centrale**, plus il y a de probabilité de créer un **Plasma de Quarks et de Gluons**



Central

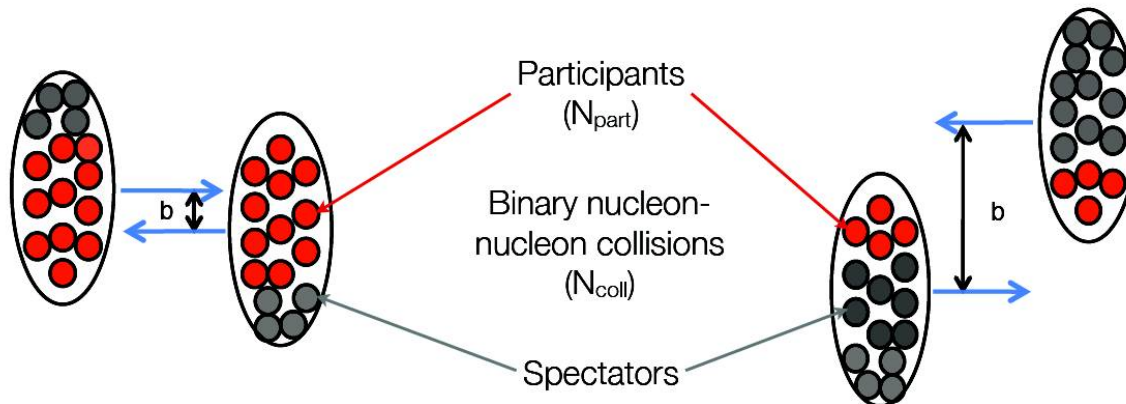
No participants = Npart



Plus une collision est périphérique, plus elle ressemble à une superposition de collision proton- proton ~~Plasma de Quarks et de Gluons~~



Peripheral



	$N_{\text{part}} = 2$	$N_{\text{coll}} = 1$
	$N_{\text{part}} = 5$	$N_{\text{coll}} = 6$
Pb-Pb cent.	$N_{\text{part}} = 360$	$N_{\text{coll}} = 1500$
p-Pb cent.	$N_{\text{part}} = 16$	$N_{\text{coll}} = 15$

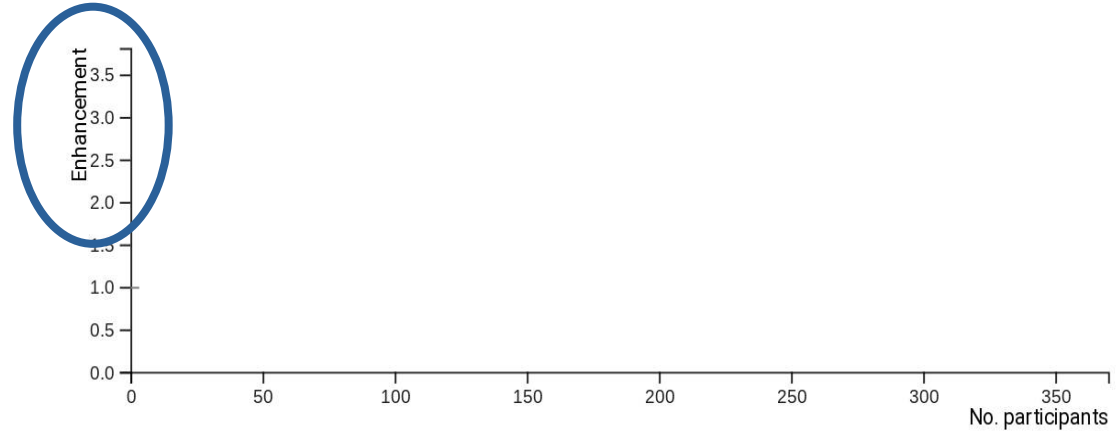


ALICE

**Qui peut me donner une
traduction en français de**

ENHANCEMENT

Enhancement ?

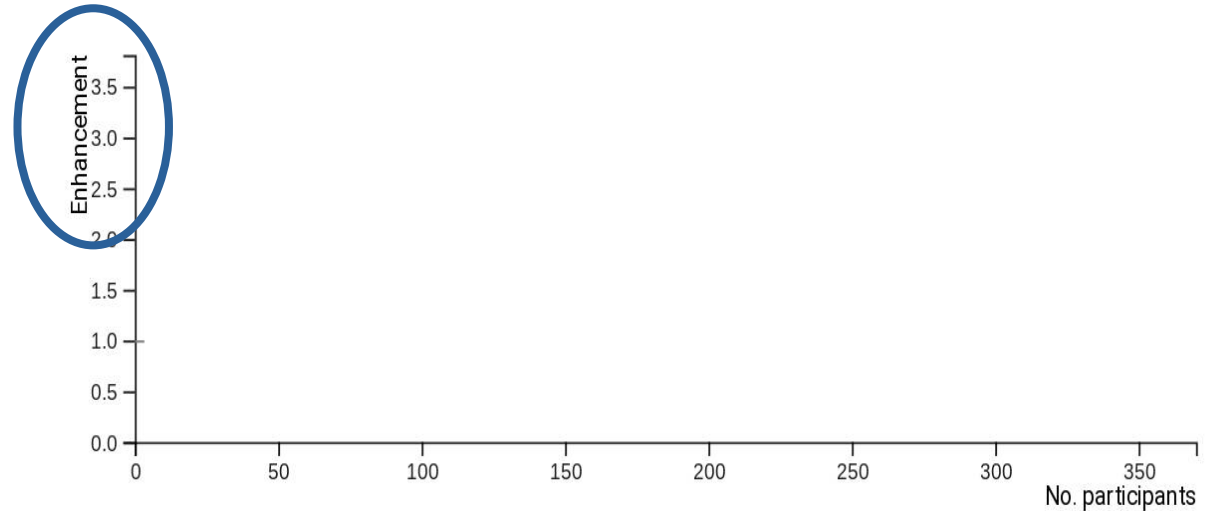




ALICE

Enhancement :
accroissement,
amélioration, etc...

Donc un accroissement
de l'étrangeté **mais** par
rapport à quoi ?



**Nous avons cherché un « Accroissement » de la production
d'étrangeté dans les collisions PbPb par-rapport aux collisions pp.**

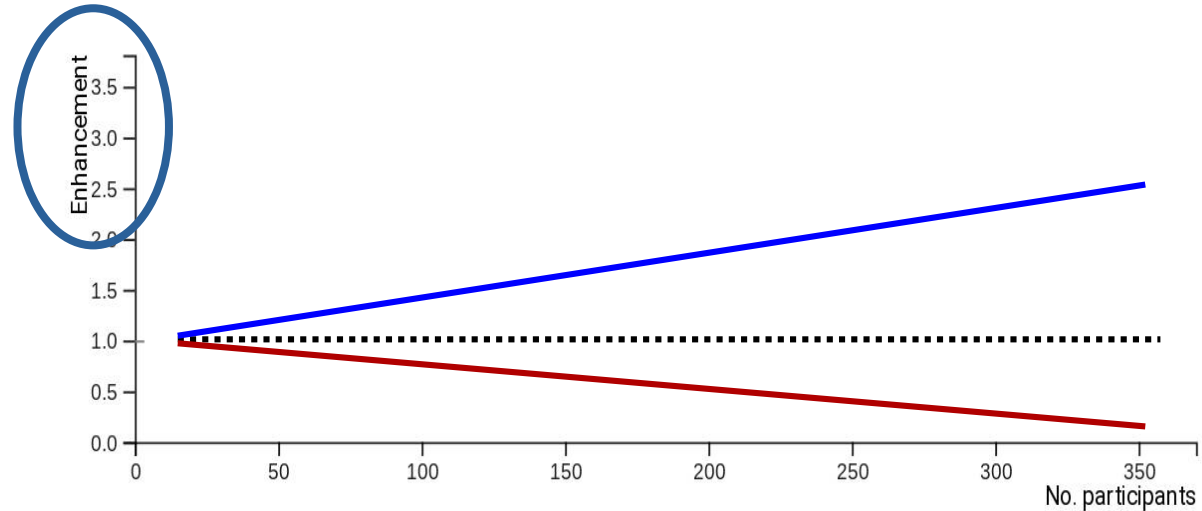


ALICE

Enhancement ?

Enhancement :
accroissement,
amélioration, etc...

Donc un accroissement
de l'étrangeté **mais** par
rapport à quoi ?



Nous avons cherché un « accroissement » de la production
d'étrangeté dans les collisions PbPb par-rapport aux collisions pp.

Si rien ne se passe (par-rapport aux collisions pp), alors

Si « enhancement », alors _____

Si suppression , alors _____

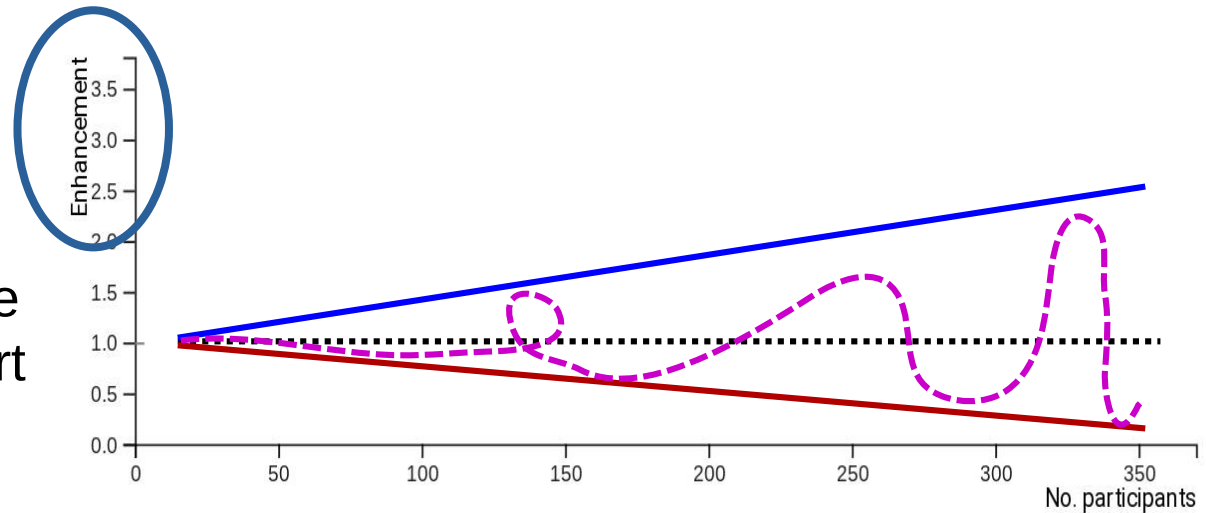


ALICE

Enhancement ?

Enhancement :
accroissement,
amélioration, etc...

Donc un accroissement de
l'étrangeté **mais** par rapport
à quoi ?



Nous avons cherché un « accroissement » de la production
d'étrangeté dans les collisions PbPb par-rapport aux collisions pp.

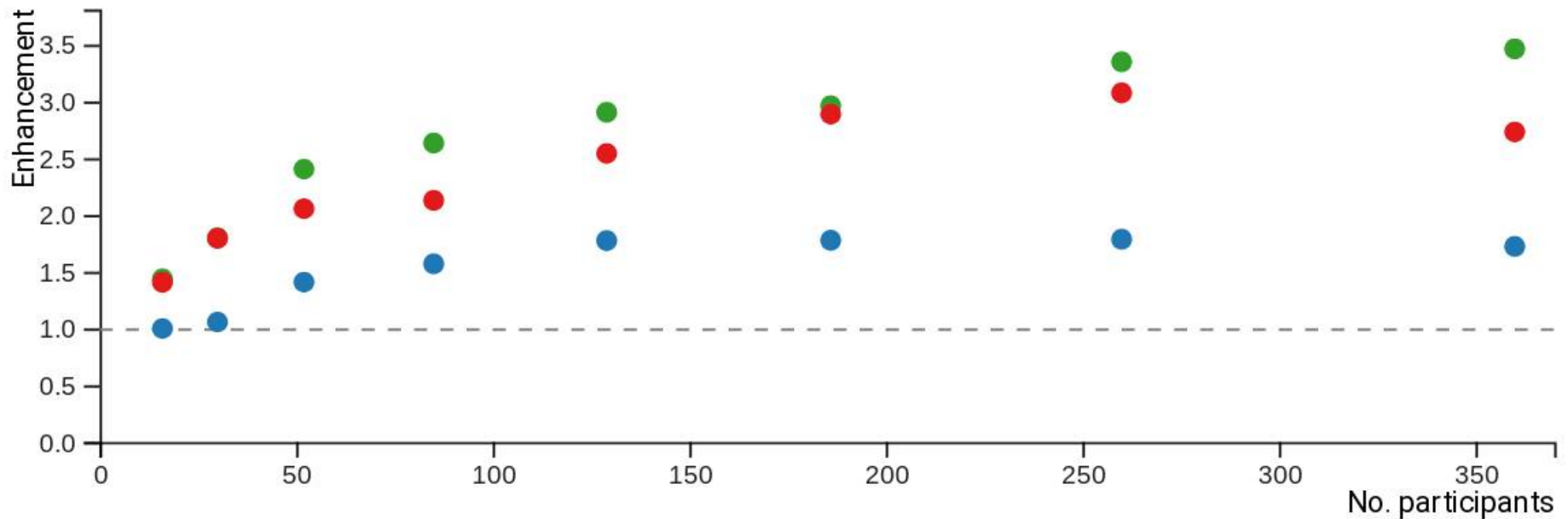
Si rien ne se passe, alors

Si « enhancement », alors _____

Si diminution, alors _____

Si _____, alors on a probablement fait une erreur....

Enhancement en fonction No. participants ?

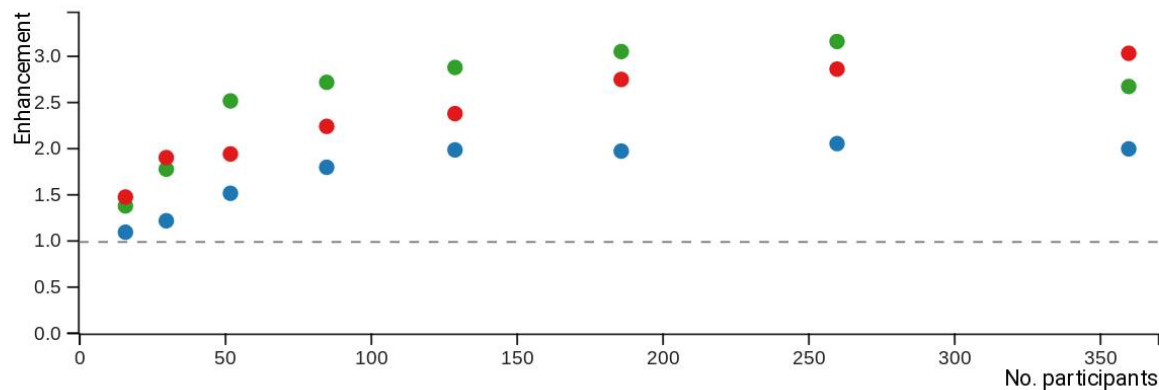


Kaons ●
Lambda ●
anti-Lambda ●

IJCLab, Orsay, 24 mars 2026

Résultats Masterclass : Orsay- 31 March 2022

Plot



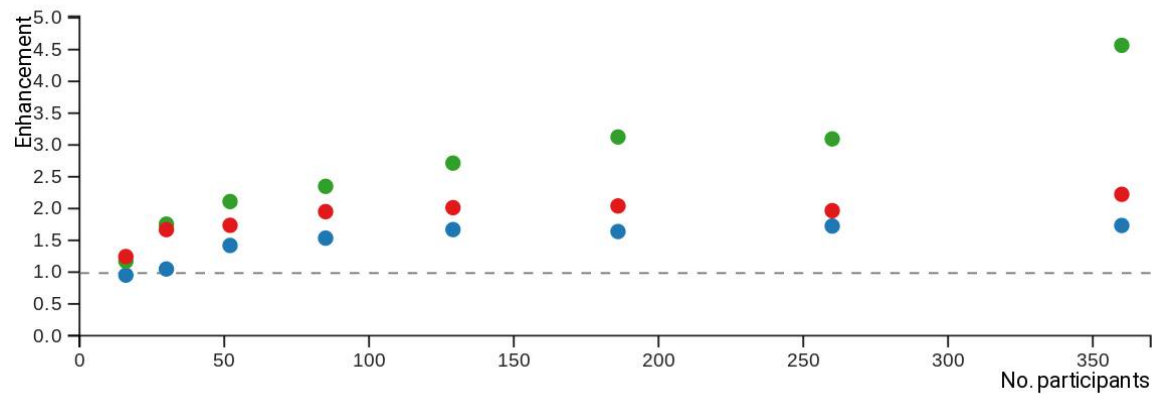
Results

Centrality	No. participants	No. events	No. K	Efficiency K	Yield K	Enhancement K ●	No. L	Efficiency L	Yield L	Enhancement L ●	No. AL	Efficiency AL	Yield AL	Enhancement AL ●
0 - 10%	360	213	4,867.2	0.260	87.887	1.953	1,192.3	0.200	27.987	2.520	1,435.3	0.200	33.691	3.034
10 - 20%	260	290	4,900.8	0.260	64.997	2.000	1,786.8	0.210	29.340	3.658	1,417.8	0.210	23.280	2.902
20 - 30%	186	302	4,019.0	0.290	45.889	1.974	1,163.7	0.220	17.515	3.052	1,048.5	0.220	15.781	2.750
30 - 40%	129	310	2,897.3	0.290	32.227	1.999	926.0	0.220	13.578	3.412	830.7	0.220	12.180	3.061
40 - 50%	85	302	1,654.8	0.290	18.894	1.778	470.8	0.220	7.085	2.702	391.3	0.220	5.890	2.246
50 - 60%	52	300	880.5	0.290	10.121	1.557	248.3	0.200	4.138	2.579	208.3	0.200	3.472	2.164
60 - 70%	30	315	500.4	0.350	4.539	1.210	108.3	0.200	1.718	1.857	110.0	0.200	1.746	1.887
70 - 80%	16	350	199.3	0.260	2.190	1.095	47.7	0.200	0.681	1.380	51.0	0.200	0.729	1.476



Résultats Masterclass : Orsay- 30March2023

Plot



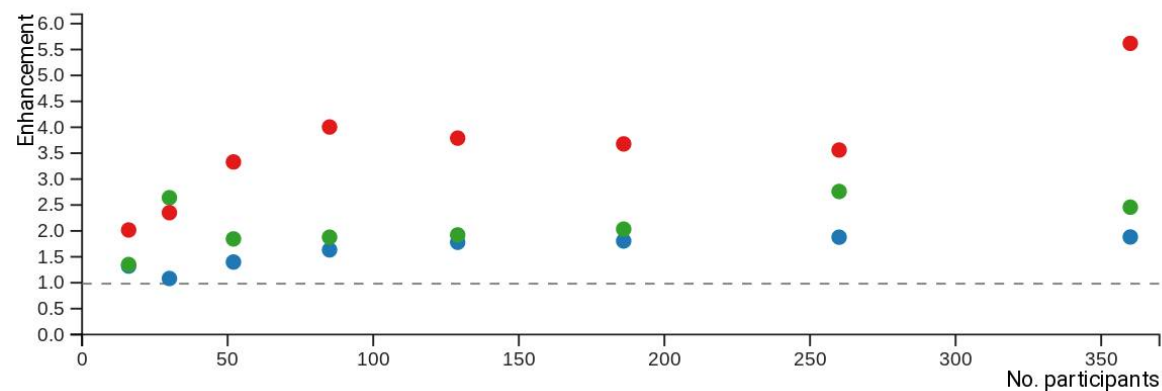
Results

Centrality	No. participants	No. events	: No.	Kaons Efficie.	Yield	Enhanc.	: No.	Lambdas Efficie.	Yield	Enhanc.	: No.	AntiLambda Efficie.	Yield	Enhanc.
0 - 10%	360	213	4,320.9	0.260	78.023	1.734	2,161.1	0.200	50.730	4.568	1,052.0	0.200	24.695	2.224
10 - 20%	260	290	4,227.5	0.260	56.068	1.725	1,512.0	0.210	24.828	3.095	960.6	0.210	15.774	1.967
20 - 30%	186	302	3,337.2	0.290	38.104	1.639	1,191.7	0.220	17.936	3.126	778.1	0.220	11.711	2.041
30 - 40%	129	310	2,419.3	0.290	26.911	1.669	736.8	0.220	10.803	2.715	546.6	0.220	8.015	2.014
40 - 50%	85	302	1,428.2	0.290	16.308	1.535	409.3	0.220	6.160	2.349	340.0	0.220	5.117	1.952
50 - 60%	52	300	802.9	0.290	9.229	1.420	203.1	0.200	3.385	2.110	167.1	0.200	2.785	1.736
60 - 70%	30	315	433.9	0.350	3.936	1.050	102.3	0.200	1.624	1.755	97.3	0.200	1.544	1.668
70 - 80%	16	350	173.4	0.260	1.906	0.953	40.5	0.200	0.579	1.172	43.0	0.200	0.614	1.245



Résultats Masterclass : Orsay- 25March2024

Plot



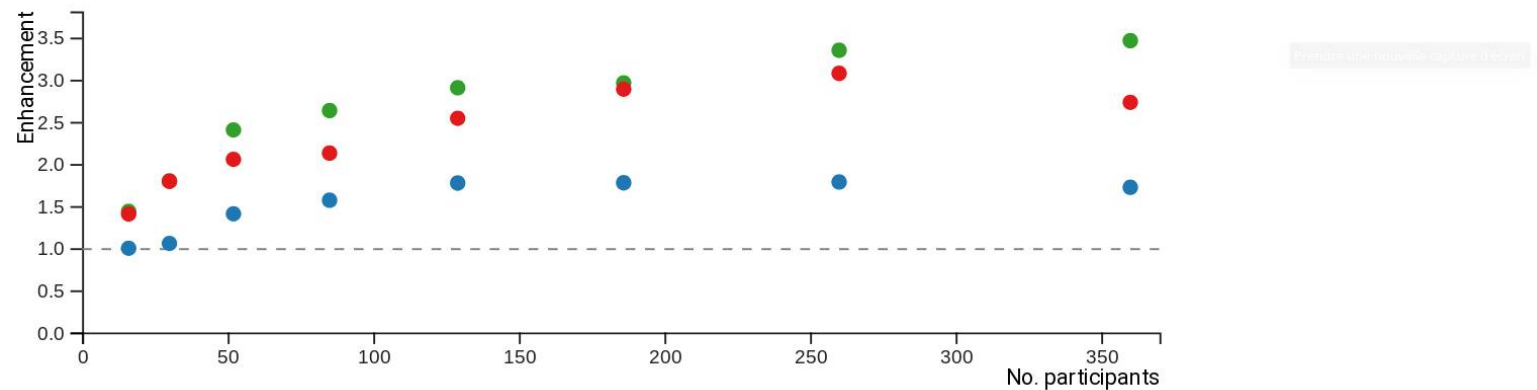
Results

Centrality	No. parti- cipants	No. events	 : No.	Kaons Efficie.	● Yield	Enhanc.	 : No.	Lambdas Efficie.	● Yield	Enhanc.	 : No.	AntiLambda Efficie.	● Yield	Enhanc.
0 - 10%	360	213	4,690.7	0.260	84.700	1.882	1,162.7	0.200	27.293	2.457	2,658.6	0.200	62.407	5.619
10 - 20%	260	290	4,604.5	0.260	61.068	1.879	1,348.7	0.210	22.146	2.761	1,738.9	0.210	28.553	3.560
20 - 30%	186	302	3,678.0	0.290	41.996	1.806	775.7	0.220	11.675	2.035	1,402.6	0.220	21.110	3.679
30 - 40%	129	310	2,581.3	0.290	28.713	1.781	522.0	0.220	7.654	1.923	1,028.8	0.220	15.084	3.790
40 - 50%	85	302	1,520.0	0.290	17.356	1.633	327.3	0.220	4.927	1.879	697.7	0.220	10.501	4.004
50 - 60%	52	300	791.0	0.290	9.092	1.399	177.7	0.200	2.961	1.846	320.6	0.200	5.343	3.331
60 - 70%	30	315	447.3	0.350	4.057	1.082	154.0	0.200	2.444	2.641	137.1	0.200	2.177	2.352
70 - 80%	16	350	240.5	0.260	2.643	1.321	46.7	0.200	0.667	1.351	69.7	0.200	0.996	2.018



Résultats Masterclass : Orsay 3 March 2025

Plot



Results

Centrality	No. parti- cipants	No. events												
			No.	Efficie.	Yield	Enhanc.	No.	Efficie.	Yield	Enhanc.	No.	Efficie.	Yield	Enhanc.
0 - 10%	360	213	4,292.6	0.260	77.511	1.722	1,638.7	0.200	38.467	3.464	1,291.9	0.200	30.326	2.731
10 - 20%	260	290	4,376.0	0.260	58.037	1.786	1,636.0	0.210	26.864	3.349	1,502.1	0.210	24.665	3.075
20 - 30%	186	302	3,615.3	0.290	41.280	1.775	1,129.3	0.220	16.997	2.962	1,100.8	0.220	16.569	2.887
30 - 40%	129	310	2,570.3	0.290	28.590	1.773	788.3	0.220	11.559	2.905	689.7	0.220	10.113	2.541
40 - 50%	85	302	1,460.7	0.290	16.678	1.570	458.7	0.220	6.903	2.633	370.8	0.220	5.581	2.128
50 - 60%	52	300	796.1	0.290	9.151	1.408	231.3	0.200	3.856	2.403	197.7	0.200	3.295	2.054
60 - 70%	30	315	436.5	0.350	3.959	1.056	104.8	0.200	1.664	1.798	104.6	0.200	1.660	1.794
70 - 80%	16	350	181.8	0.260	1.998	0.999	49.7	0.200	0.710	1.437	48.6	0.200	0.694	1.407

Exercice d'analyse de données : discussion des résultats

De l'analyse des données à la publication dans un journal scientifique...

Physics Letters B 728 (2014) 216–227



Contents lists available at ScienceDirect

Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb



Multi-strange baryon production at mid-rapidity in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV

ALICE Collaboration*



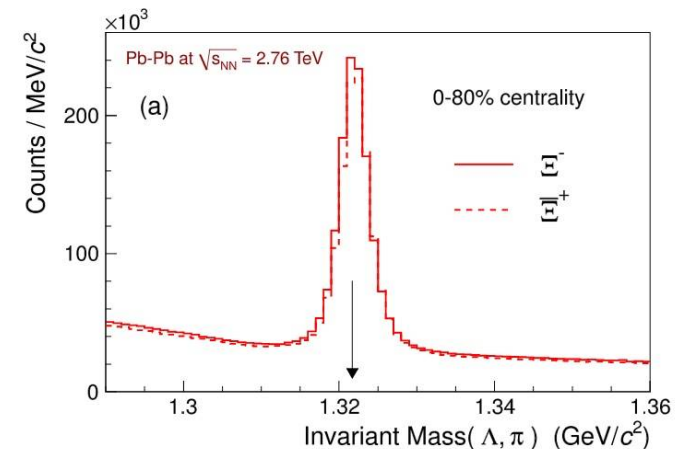
ARTICLE INFO

Article history:
Received 16 September 2013
Received in revised form 18 November 2013
Accepted 21 November 2013
Available online 26 November 2013
Editor: L. Rolandi

ABSTRACT

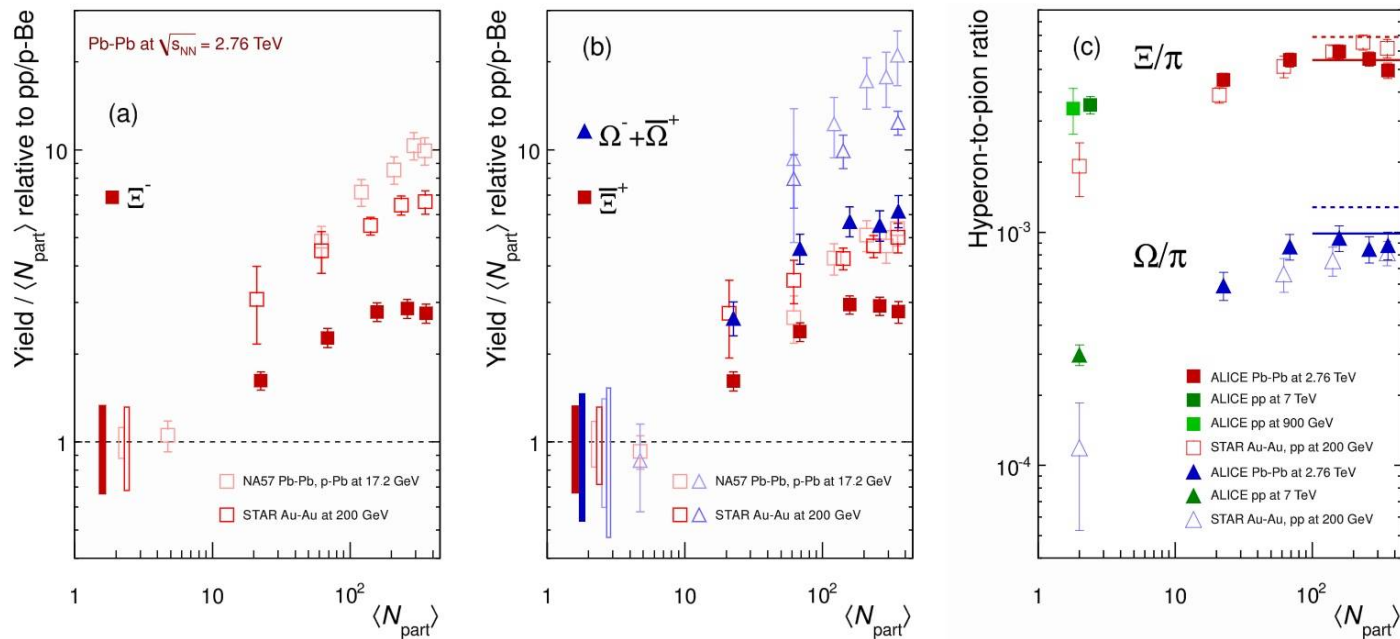
The production of Ξ^- and Ω^- baryons and their anti-particles in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV has been measured using the ALICE detector. The transverse momentum spectra at mid-rapidity ($|y| < 0.5$) for charged Ξ and Ω hyperons have been studied in the range $0.6 < p_T < 8.0$ GeV/c and $1.2 < p_T < 7.0$ GeV/c, respectively, and in several centrality intervals (from the most central 0–10% to the most peripheral 60–80% collisions). These spectra have been compared with the predictions of recent hydrodynamic models. In particular, the Kraków and EPOS models give a satisfactory description of the data, with the latter covering a wider p_T range. Mid-rapidity yields, integrated over p_T , have been determined. The hyperon-to-pion ratios are similar to those at RHIC: they rise smoothly with centrality up to $\langle N_{part} \rangle \sim 150$ and saturate thereafter. The enhancements (yields per participant nucleon relative to those in pp collisions) increase both with the strangeness content of the baryon and with centrality, but are less pronounced than at lower energies.

© 2013 The Authors. Published by Elsevier B.V. Open access under [CC BY license](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



Exercice d'analyse de données : discussion des résultats

...contenant les résultats finaux avec **leurs incertitudes associées** ainsi que leur interprétation et la comparaison aux modèles théoriques



Augmentation du taux de production des baryons étranges en collisions Pb-Pb par rapport aux collisions pp (axe y > 1 dans les collisions centrales)

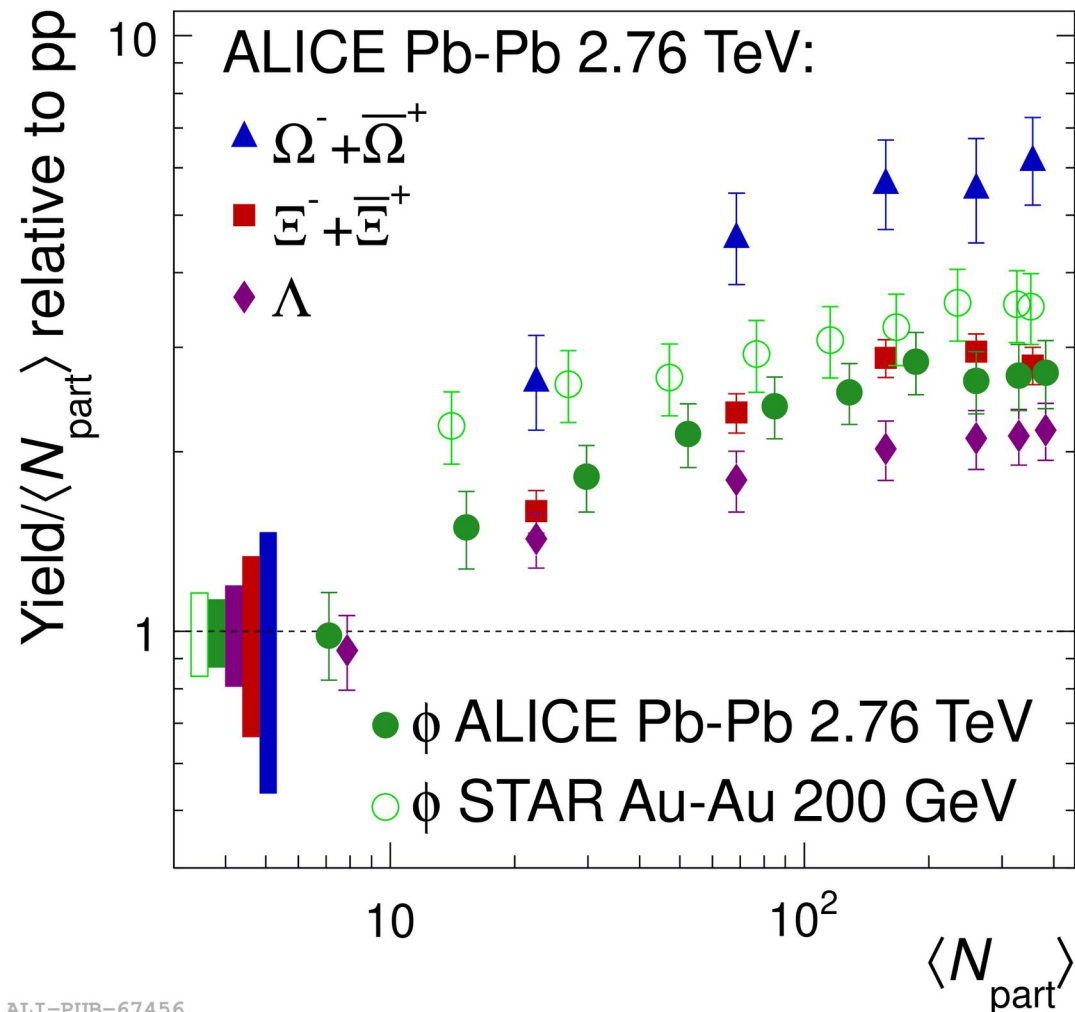
Mise en évidence d'une hiérarchie (plus le contenu en quarks étranges est important plus le rapport augmente)

→ En accord avec l'image de production d'étrangeté dans un milieu dense et chaud déconfiné

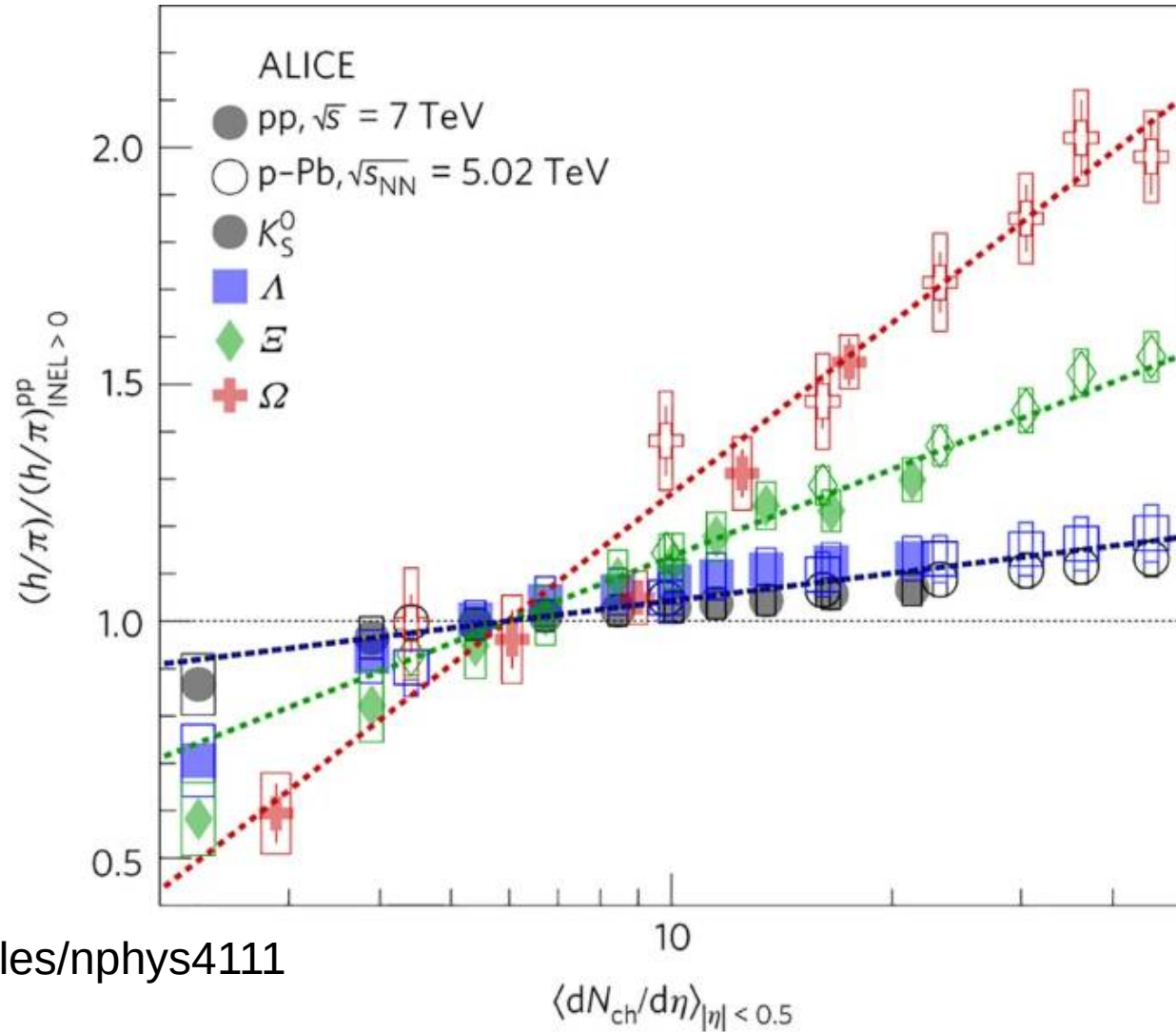
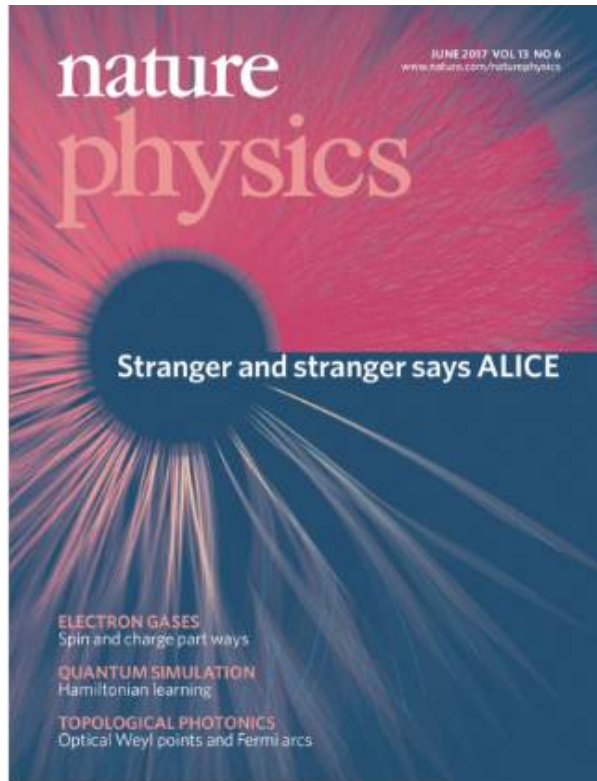
Exercice d'analyse de données : discussion des résultats

Λ : 1 quark étrange (s,u,d)
 Ξ : 2 quark étrange (s,s,u)
 Ω : 3 quark étrange (s,s,s)
 Φ : paire quark-antiquark étrange (s,s)

Plus il y a de quarks s dans la particule, plus son taux de production croît avec $\langle N_{\text{part}} \rangle$



Exercice d'analyse de données : discussion des résultats



<https://www.nature.com/articles/nphys4111>



**Merci de votre attention et
de votre participation**