



Master Classes

Exercice

Bruno Espagnon, Cynthia Hadjidakis, Christophe Suire
Laboratoire de Physique des 2 infinis Irène Joliot-Curie –
IJCLab

Université Paris-Saclay – CNRS/IN2P3



Objectif

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

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

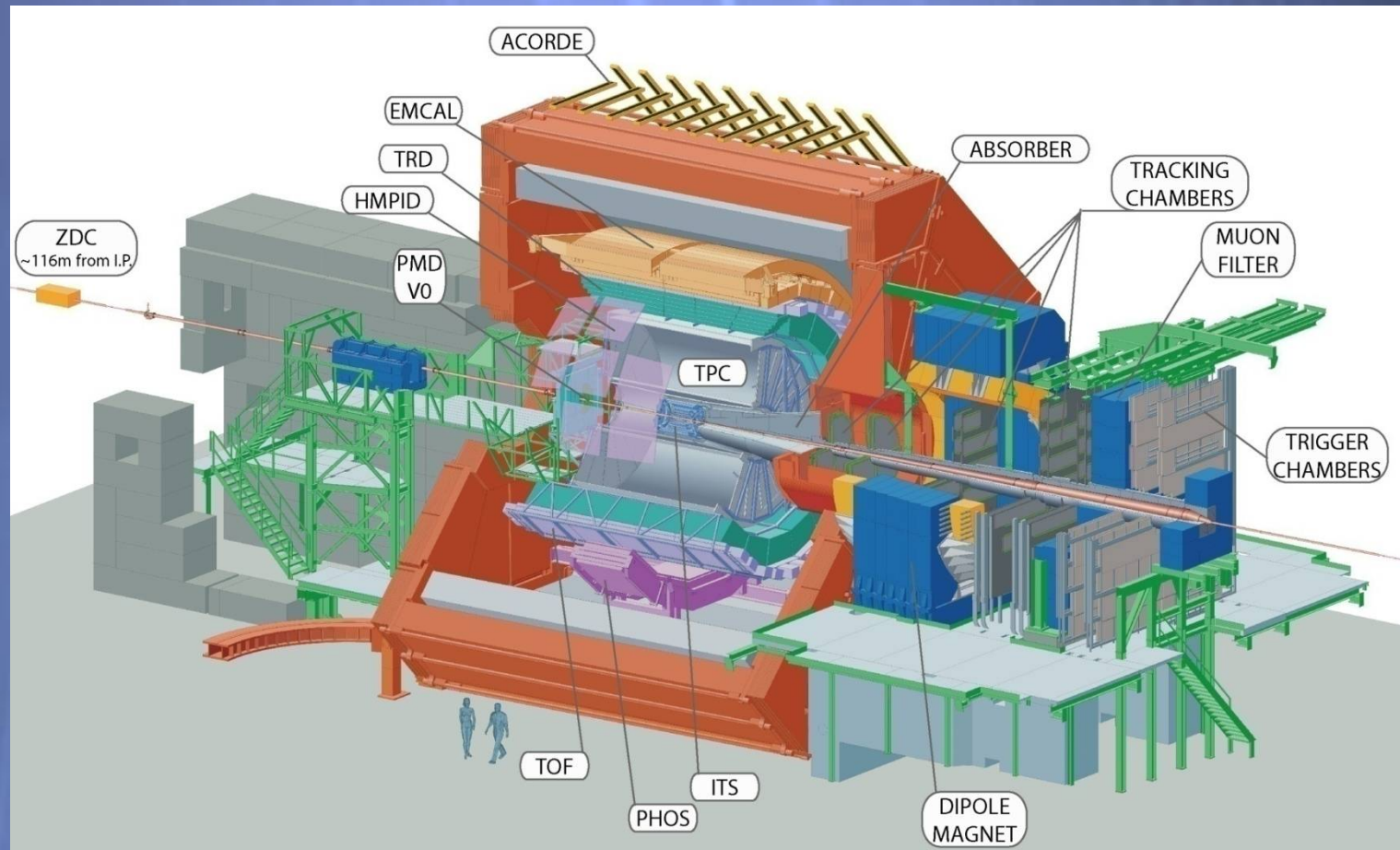
(1) Nous étudierons les collisions proton-proton (pp) qui permettent de servir de référence pour l'étude de processus de production des particules étranges (collisions les plus simples).

(2) Nous étudierons ensuite la production de particules étranges en collisions Pb-Pb où doit être formé le PQG.

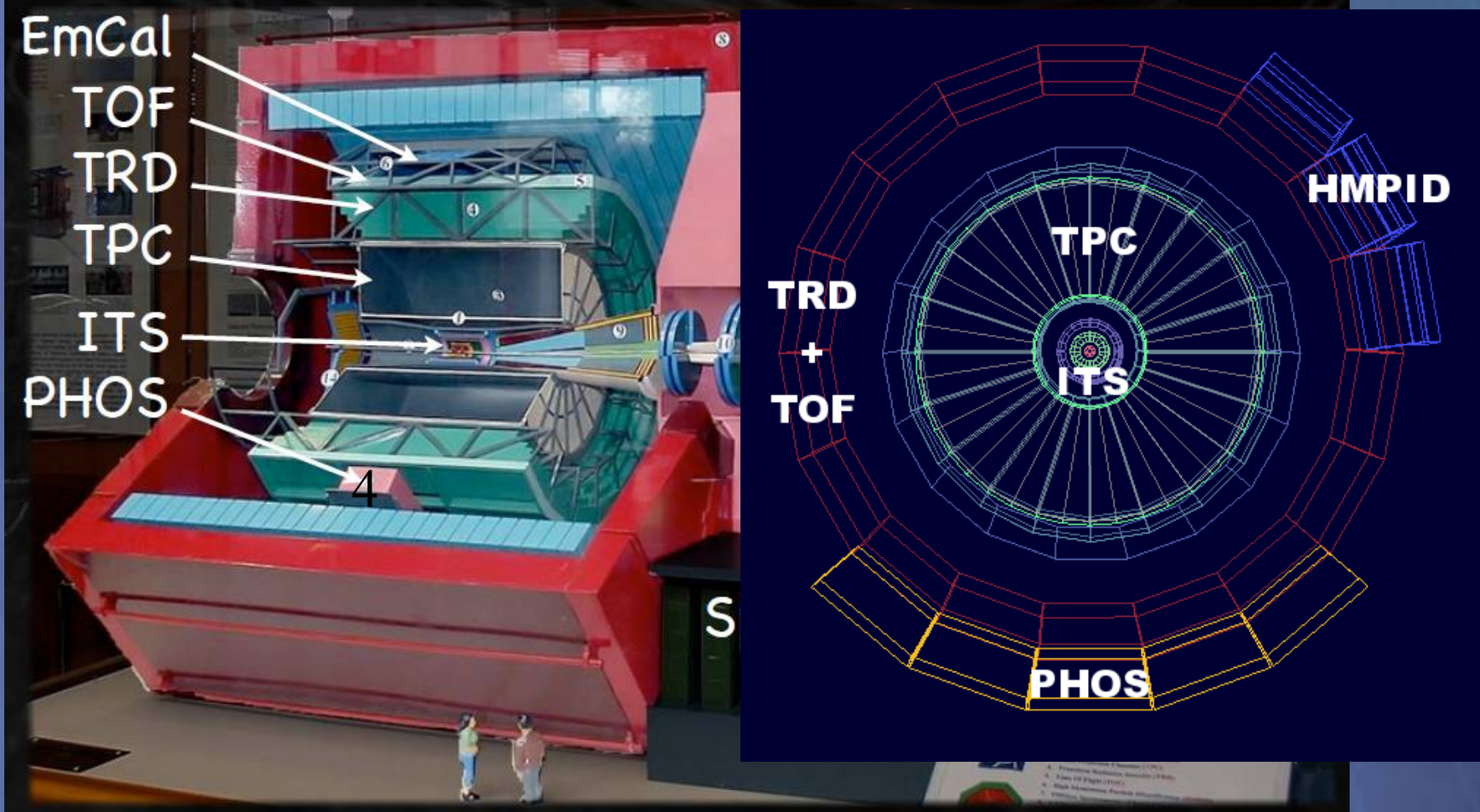
→ nous allons comparer les résultats afin de chercher une différence, modulo la différence intrinsèque entre un noyau de plomb ($A=208$) et un proton ($A=1$) .

L'expérience ALICE (née en 1995)

- ALICE est l'expérience du LHC dédiée à la Physique des ions lourds
- → collaboration 40 pays, 171 instituts, 1999 personnes (30/3/2023)
- ALICE c'est un appareil photo digital de 16x26 mètres de $600 \cdot 10^6$ "pixels" capable de prendre ~ 1000 photos par seconde...



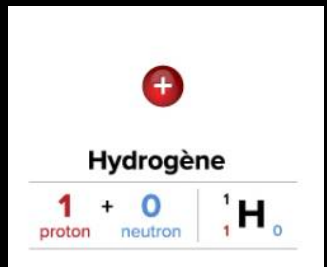
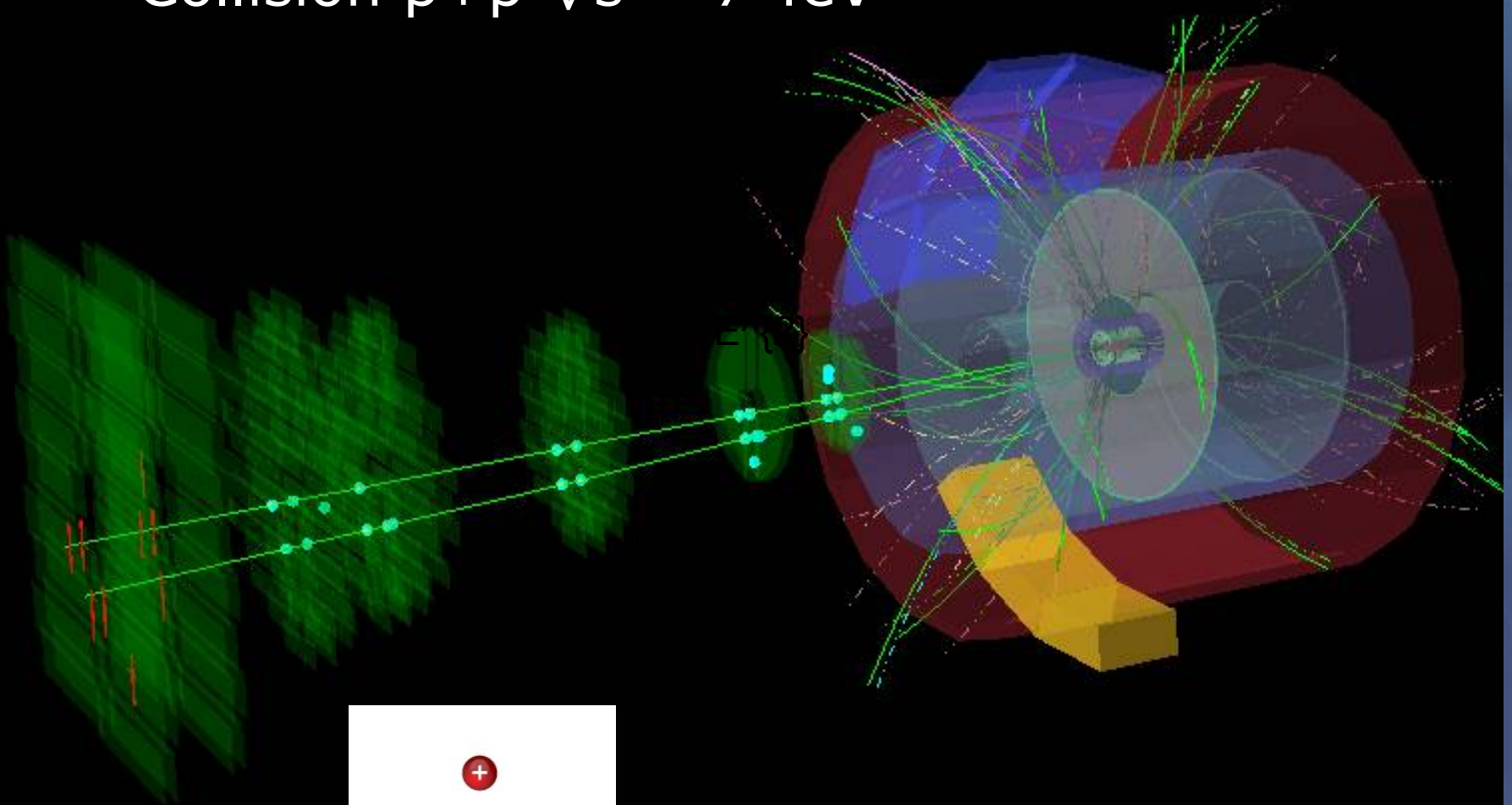
L'expérience ALICE



Données analysées :
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

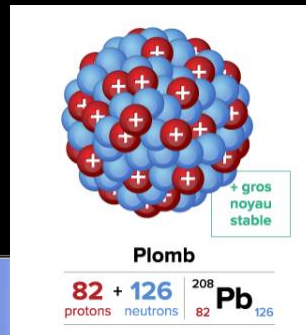
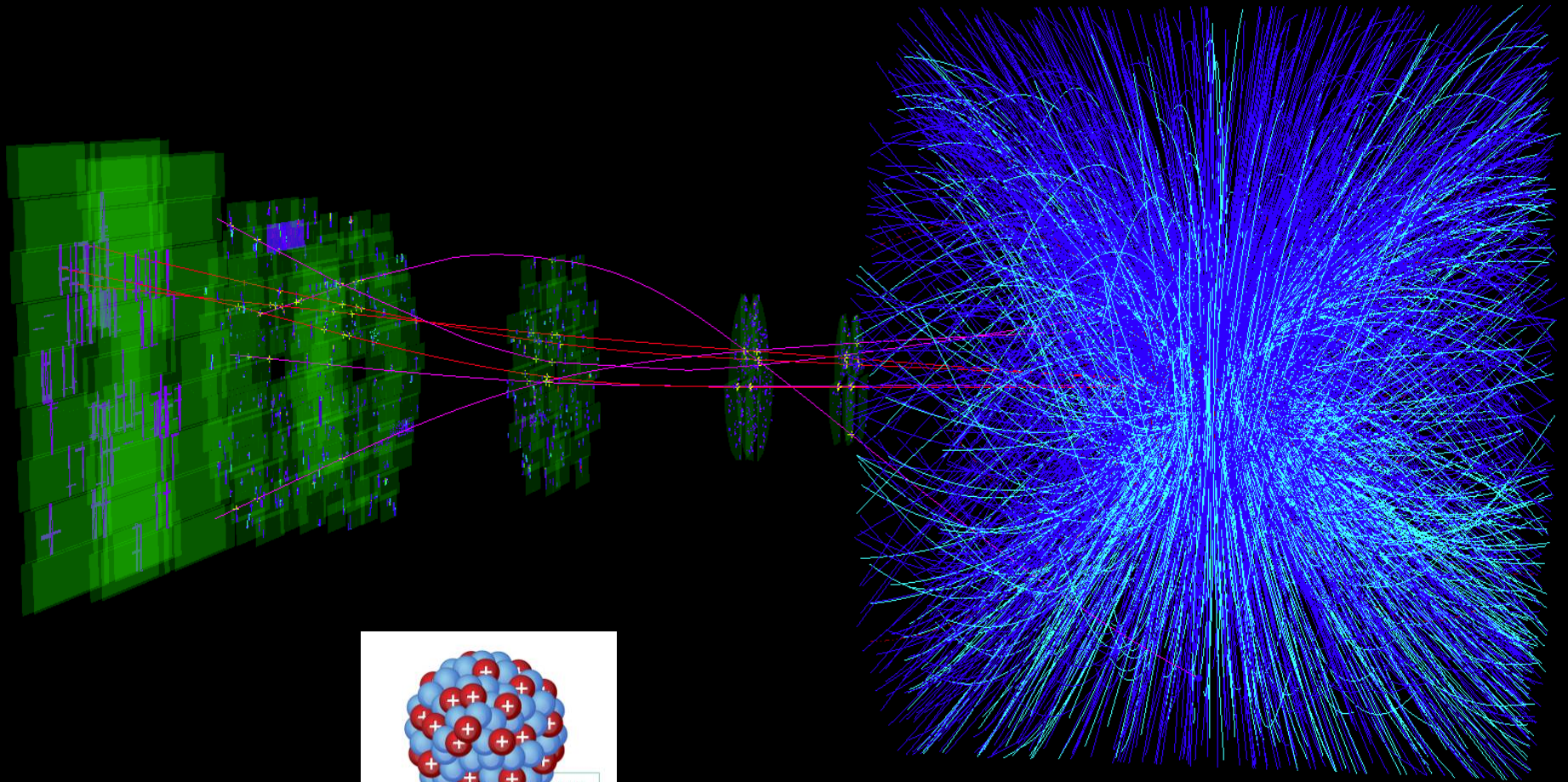
L'expérience ALICE

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



L'expérience ALICE

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



Identification des particules

Listes des particules **directement mesurables** :

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

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

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

(anti)-proton $p^{+(-)}$ $m_p = 938 \text{ MeV}/c^2$ ($1 \text{ GeV}/c^2 \sim 1.8 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$)

Comment reconnaît-on une particule ?

courbure de la trajectoire dans un champ magnétique

⇒ impulsion et charge Z

calorimètre, **perte d'énergie**

⇒ énergie (E)

Relativité Restreinte

⇒ $m^2c^4 = E^2 - p^2c^2$

On identifie ensuite la particule avec sa masse et sa charge.

Particules étranges

Les quarks :

Up	Charm	Top
Down	Strange	Beauty

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

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

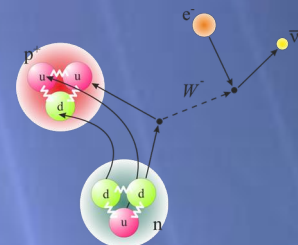
masse →

(anti)-Lambda : Λ^0

Kaon neutre : K^0

Xi : Ξ^-

La matière que nous connaissons est uniquement constituée de protons et de neutrons
 proton : uud , stable $> 3.6 \cdot 10^{29}$ années
 neutron : udd, instable 900 secondes mais stable si lié à un proton.

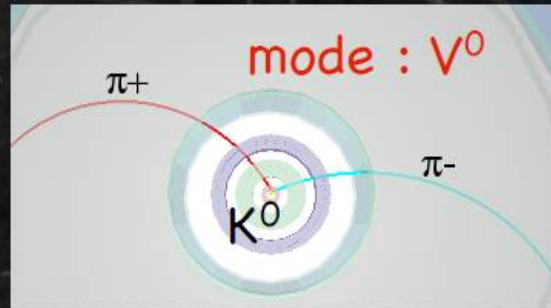


Désintégration des particules étranges

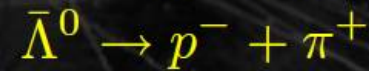
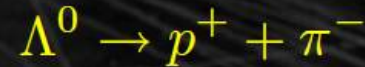
Kaon neutre : K^0



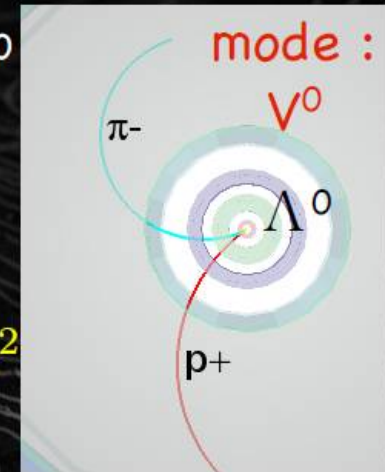
$$m_{K^0} = 0,497 \text{ GeV}/c^2$$



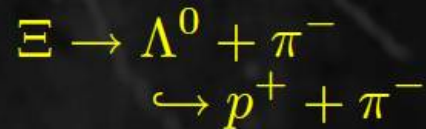
(anti)-Lambda : Λ^0



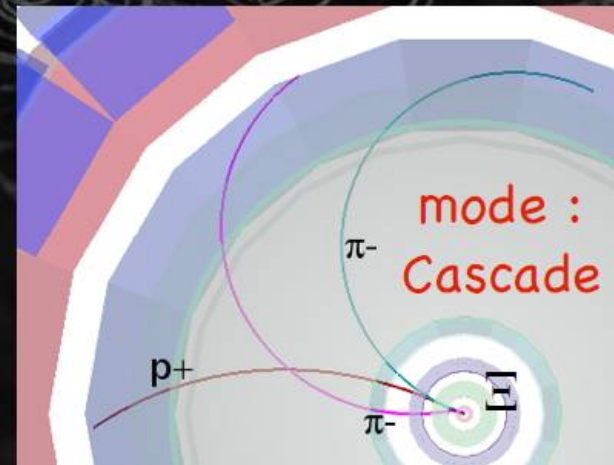
$$m_{\Lambda^0} = 1,115 \text{ GeV}/c^2$$



Xi : Ξ^-



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



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 »

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

Conservation de l'énergie, la quantité de mouvement et de la charge :

$$\begin{aligned}E_A &= E_B + E_C \\ \vec{P}_A &= \vec{P}_B + \vec{P}_C \\ Z_A &= Z_B + Z_C\end{aligned}$$

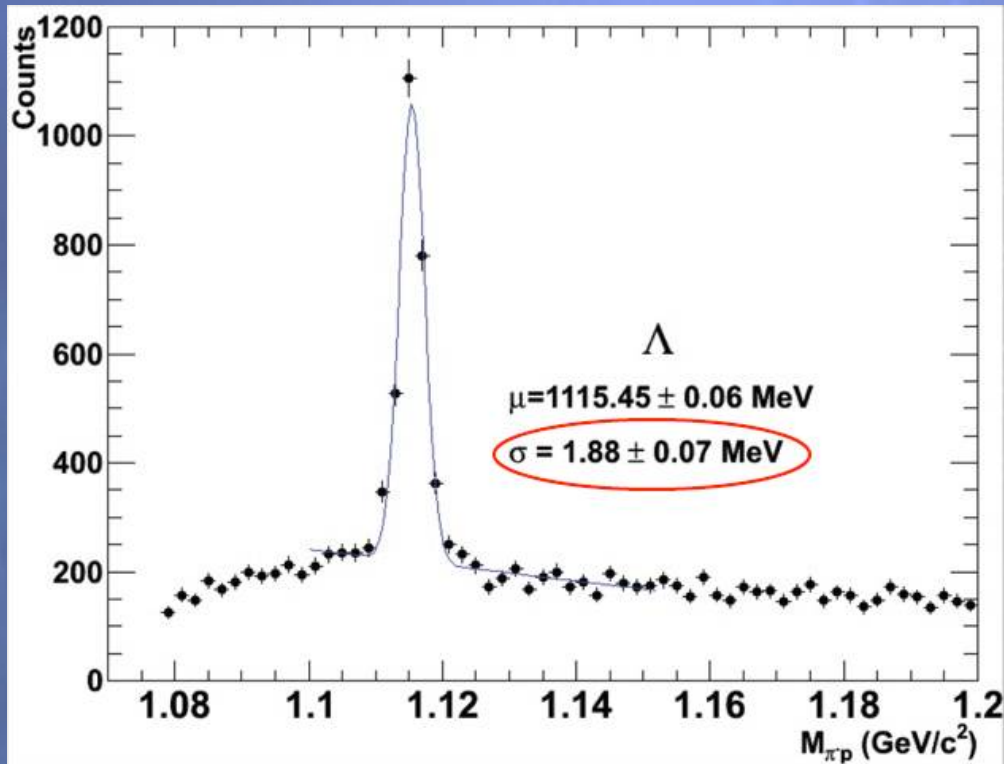
On en déduit donc la masse et la charge de A par les mesures des masses et charges de B et C.

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

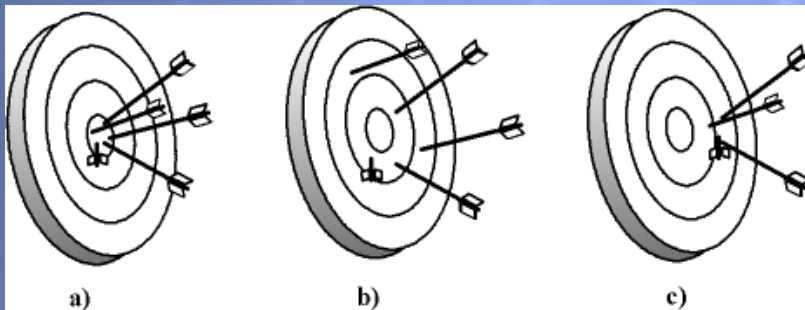


Cette incertitude inclut :

- La résolution de l'instrument
- Les fluctuations statistiques
- Les incertitudes quantiques

Λ masse obtenue à partir de mesures de précision

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



- 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 masse des particules vont donc fluctuer.

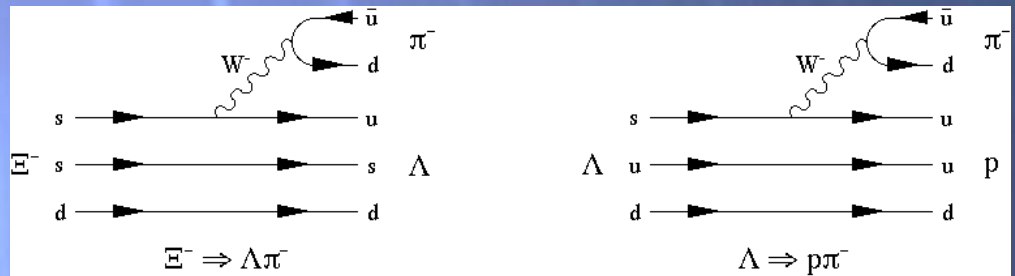
La masse du $K_0 = 497 \pm 13$ MeV \rightarrow on pourra considérer que l'on a mesuré un K_0 si la masse reconstruite est comprise dans l'intervalle [484 ; 510] MeV/c²

La masse du $\Lambda = 1115 \pm 10$ MeV \rightarrow intervalle [1105 ; 1125] MeV/c² (attention vous devrez faire la distinction entre Λ et anti- Λ)

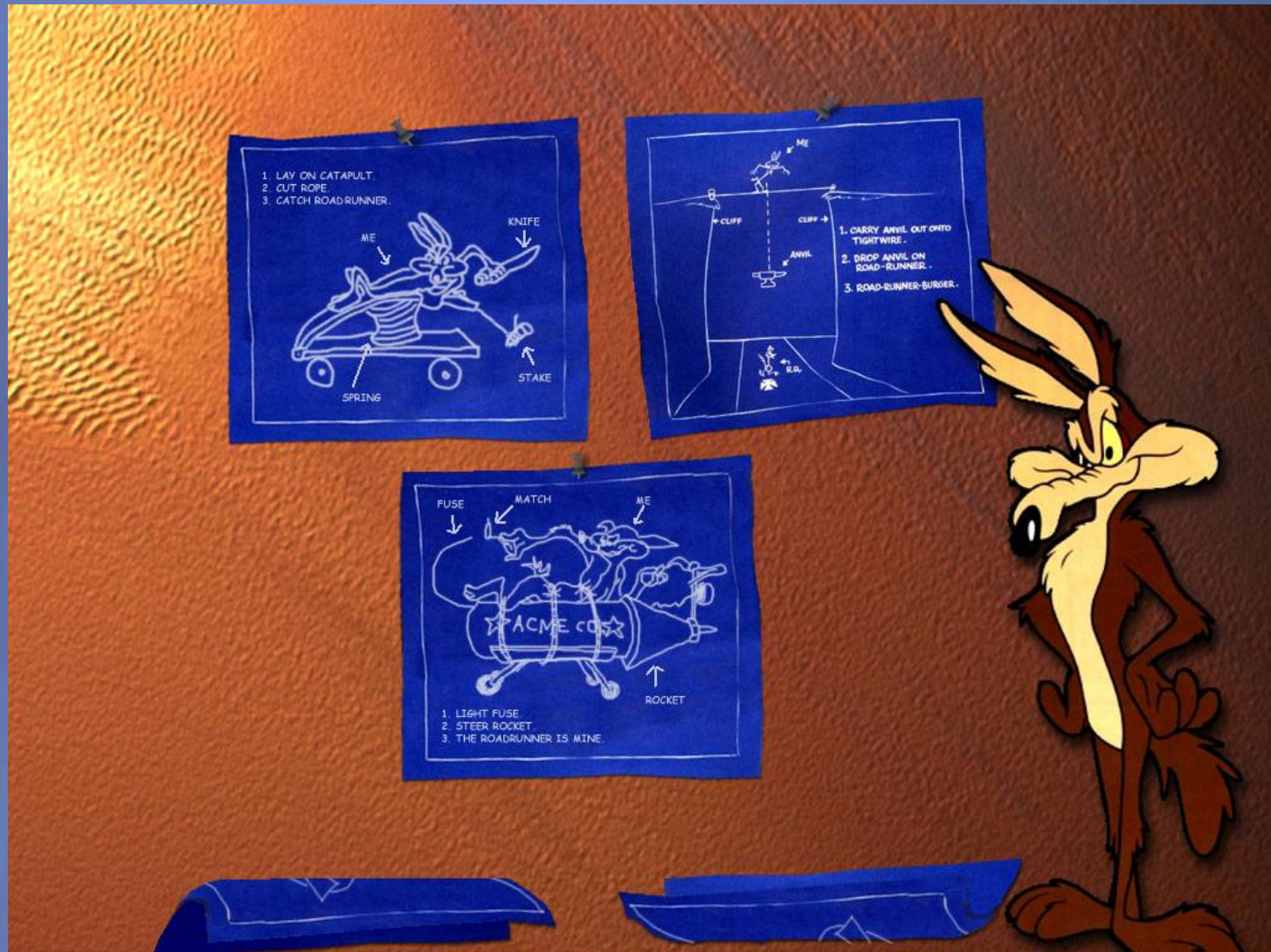
$$\Lambda \rightarrow p^+ + \pi^-$$

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

La masse du $\Xi^- = 1321 \pm 10$ MeV \rightarrow intervalle [1311 ; 1331] MeV/c²

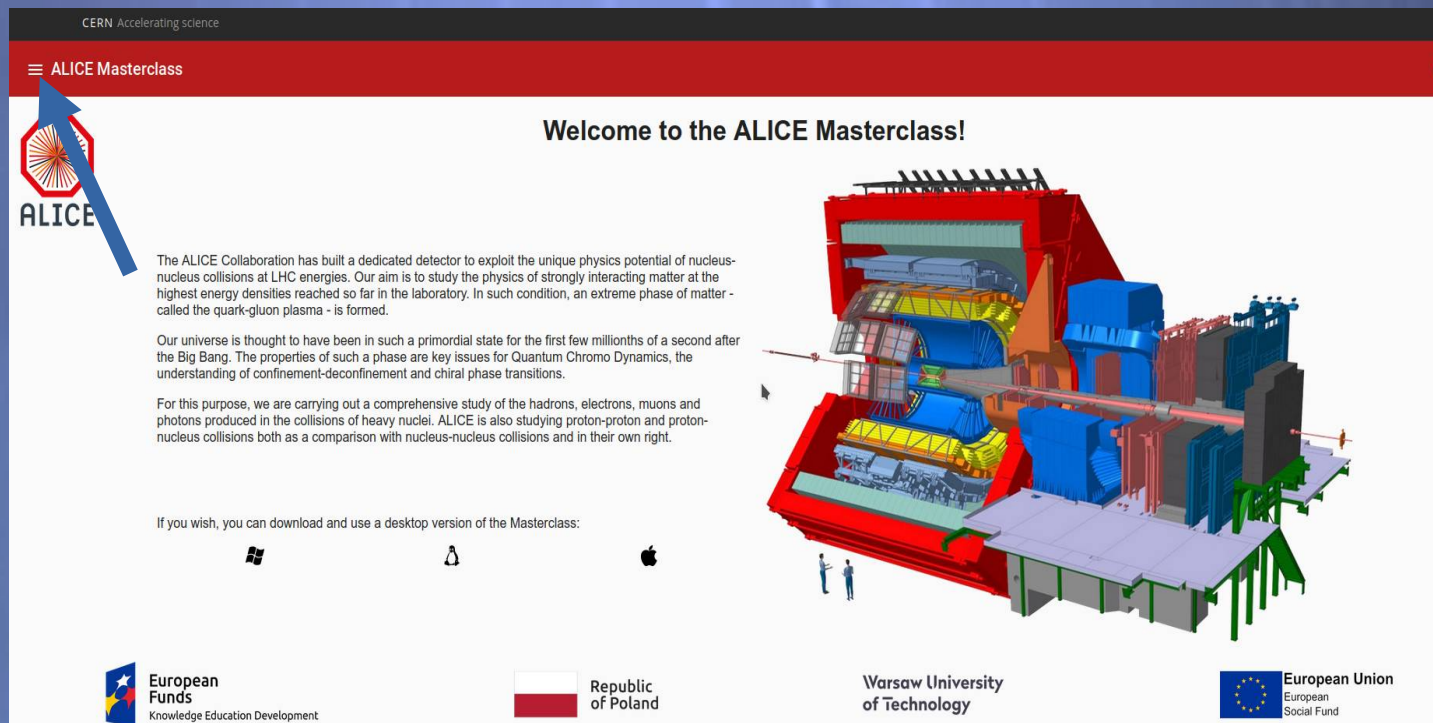


De la théorie à la pratique...



Connexion et lancement des programmes

- ✓ Ouvrir une session :
Login : imcxx
mot de passe : imcxx\$
xx est votre numéro de poste (étiquette sur le pc)
- ✓ Ouvrir un web browser :
Firefox
Suivre le lien par défaut ou <https://alice-web-masterclass.app.cern.ch/home>



The screenshot shows the ALICE Masterclass website. At the top, there is a navigation bar with the text "ALICE Masterclass" and a hamburger menu icon. Below the navigation bar, the main content area features a large 3D cutaway diagram of the ALICE detector, which is a complex structure with various colored components (red, blue, yellow, green) and a central beam pipe. To the left of the diagram, there is a text block with the heading "Welcome to the ALICE Masterclass!" and three paragraphs of introductory text. Below the text, there are icons for Windows, Linux, and Apple, indicating that a desktop version of the Masterclass is available for download. At the bottom of the page, there are logos for the European Funds, the Republic of Poland, Warsaw University of Technology, and the European Union.

CERN Accelerating science

ALICE Masterclass

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

Exercice d'initiation (30 minutes)

Se connecter

- 1) Student number : votre numero de poste [1-20]
- 2) Session password : **Jeudi2023**
- 3) [Proceed]

The screenshot shows the ALICE Masterclass login page. A modal window is displayed with the following text:

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.

The modal contains two input fields: "Student Number *" with the value "1" and "Session Password *" with masked characters "*****". There are "Proceed" and "Cancel" buttons at the bottom of the modal.

In the background, the page has a "Welcome to the ALICE Masterclass!" header and a navigation menu on the left with items: Menu, Home, Strangeness, Visual Analysis, and Large Scale Analysis. The footer includes logos for European Union, Republic of Poland, and Warsaw University of Technology, along with copyright information.

A blue arrow points to the "Visual Analysis" menu item. A black arrow points to the "Password" label in the bottom left corner of the page.

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

Exercice d'initiation

Objectif :

Montrer comment sont détectés les particules étranges

- 1) sélection de traces candidates
- 2) calcul de masse invariante
- 3) conclure....

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

Exercice d'initiation

Objectif :

Montrer comment sont détectés les particules étranges

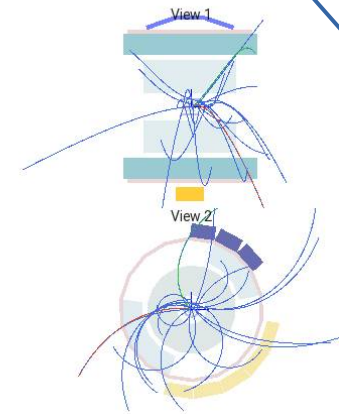
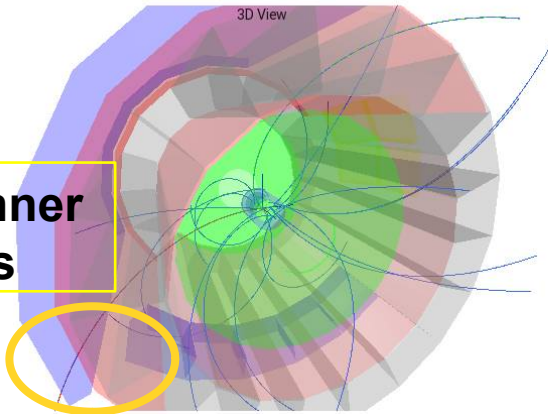
- 1) sélection de traces candidates
 - 2) calcul de masse invariante
 - 3) conclure....
-
- 1) Choisir un dataset 1-18
 - → prendre le dataset de votre numéro de pc.
 - 2) Analyser les événements en choisissant les traces colorées (rouge et verte) correspondant à une désintégration
 - 3) Elles sont reportées 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

Événement suivant [>]

Menu

Sélectionner les traces



Visibility

- Side Views
- Detector
- Axes
- Tracks
- Decays

Track Width

S M L

Activer Decay

Calculator

Charge	p_x (GeV/c)	p_y (GeV/c)	p_z (GeV/c)	mass (GeV/c ²)
(+)				
(-)				
(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

(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

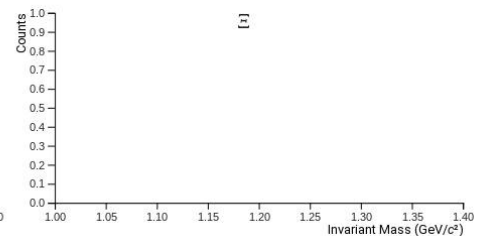
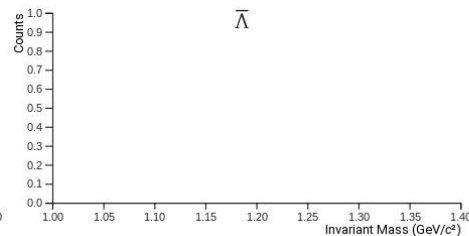
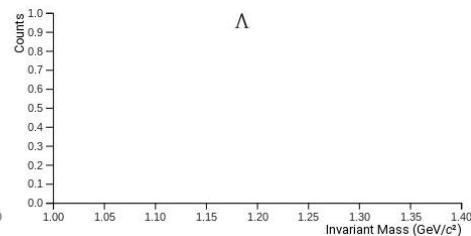
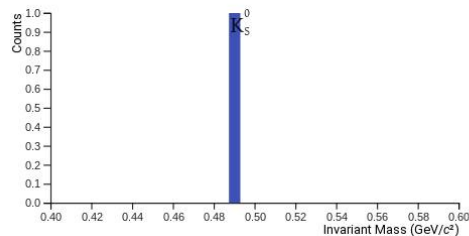
Add

(2) une masse est calculée

Particles

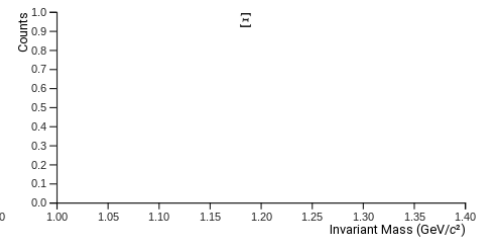
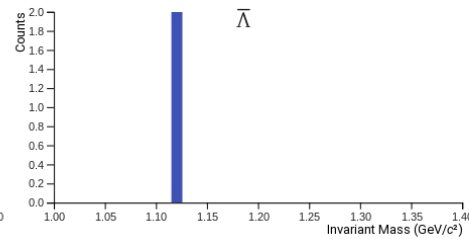
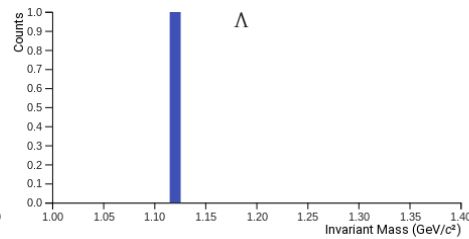
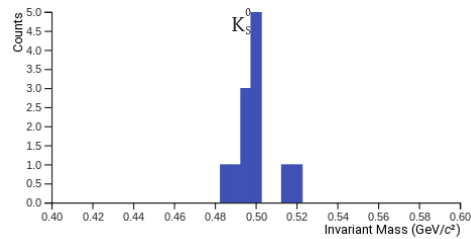
Type	mass (GeV/c ²)
e^-, e^+	0.0005
π^-, π^+	0.1396
K_S^0	0.4976
p, \bar{p}	0.9383
$\Lambda, \bar{\Lambda}$	1.1157
$\Xi, \bar{\Xi}$	1.3217

Histograms



Exercice d'initiation

Histograms



Bravo : vous venez d'analyser 15 collisions proton-proton enregistrées par l'expérience ALICE.

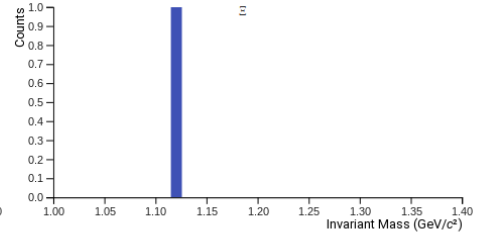
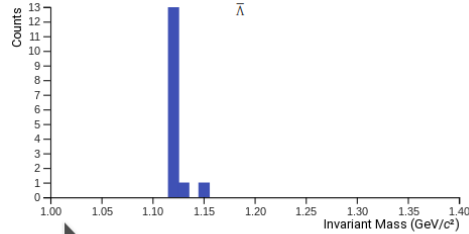
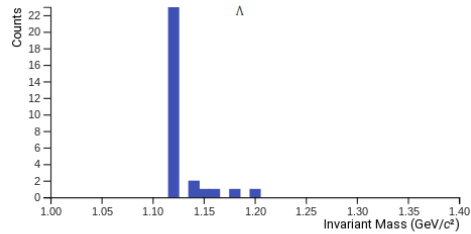
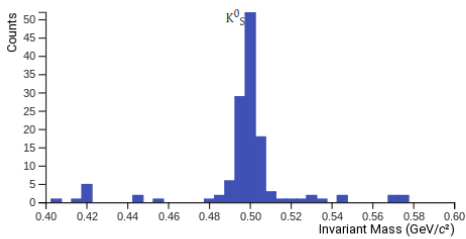
Cette méthode est fastidieuse et inapplicable pour analyser des millions d'événements.

Dans une publication en préparation, nous analysons 24 pb⁻¹ soit environ 1440000 millions de collisions proton-proton

Résultats Masterclass Orsay-31March2022

ALICE Masterclass Teacher

Mass Histograms



Résultats Masterclass Orsay-30March2023

Exercice analyse

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

\wedge

\wedge

\equiv

Exercice analyse

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

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

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

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

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

Exercice analyse

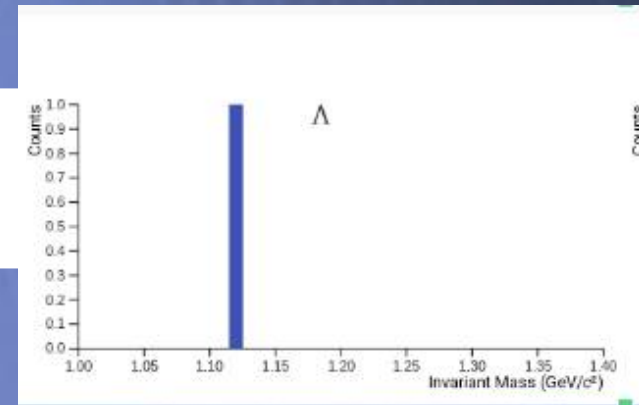
Problématique

- 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

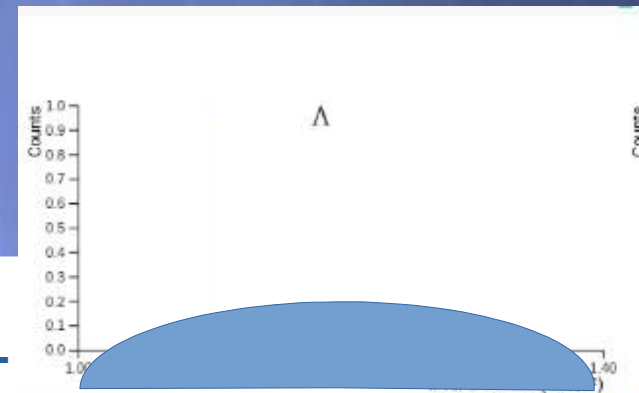
→ analyse statistique (algorithmique) qui sélectionne les bonnes traces et effectue toutes les combinaisons possibles : **apparition du bruit de fond combinatoire** en plus du **pic de la particule mère reconstruite**



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



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



Exercice analyse

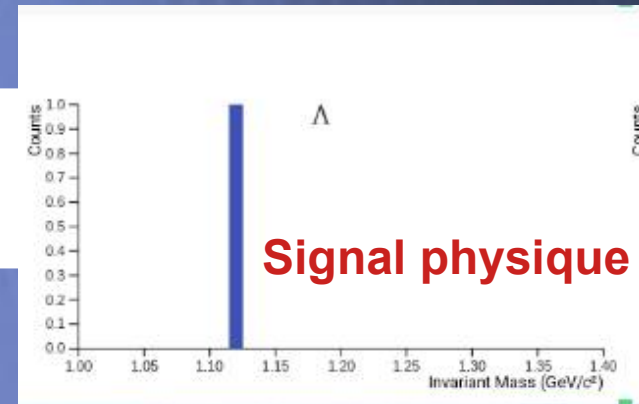
Problématique

- 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

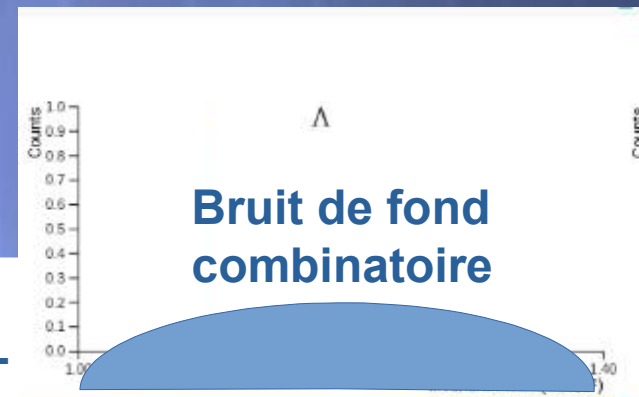
→ analyse statistique (algorithmes) qui sélectionne les bonnes traces et effectue toutes les combinaisons possibles : **apparition du bruit de fond combinatoire** en plus du **pic de la particule mère reconstruite**



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



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

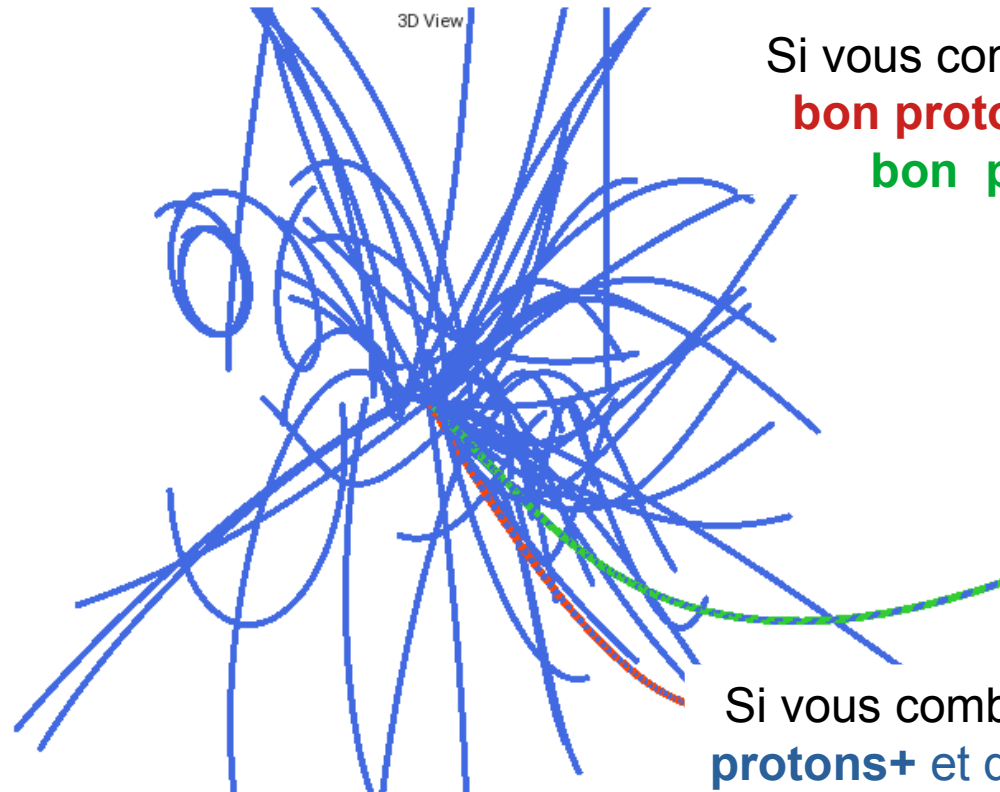


Exercice analyse

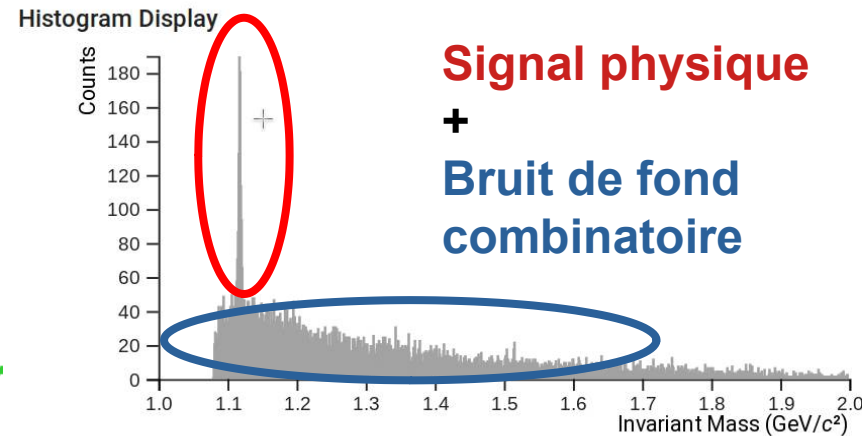
Problématique

- 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**



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



Signal physique
+
Bruit de fond combinatoire

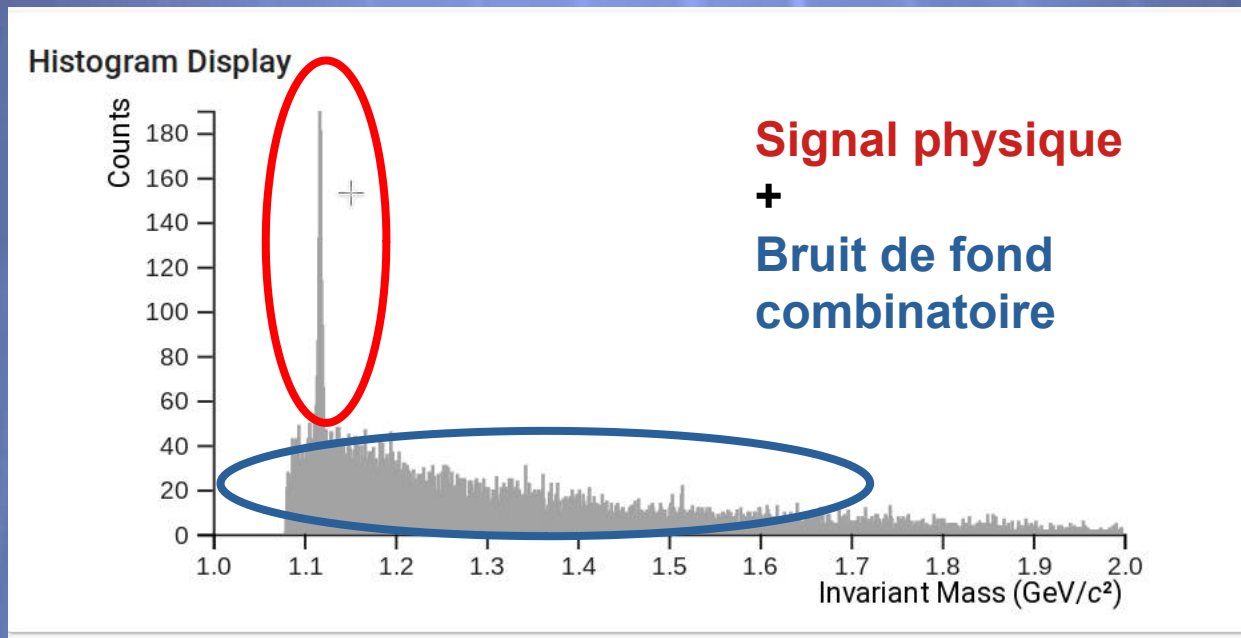
Si vous combinez des **protons+** et des **pions-**

Exercice analyse

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 (algorithmes) 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**

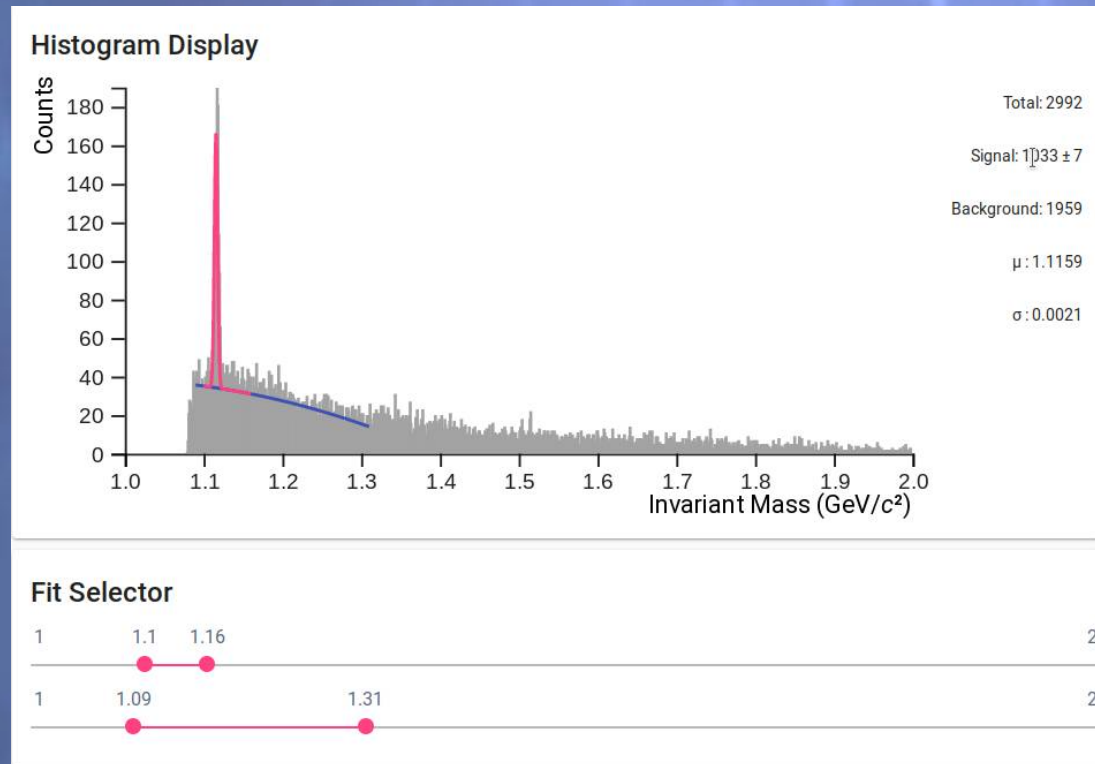


Exercice analyse

Problématique

- l'analyse en sélectionnant les bonnes traces («à la main ») permet d'obtenir un joli pic contenant uniquement 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**

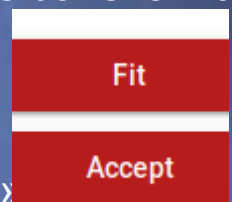


Utilisation de fonctions mathématiques qui reproduisent la forme du signal et celle du bruit de fond.

L'intégrale des fonctions permet d'extraire le nombre de Λ 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 résultats Semble OK, « Accept »

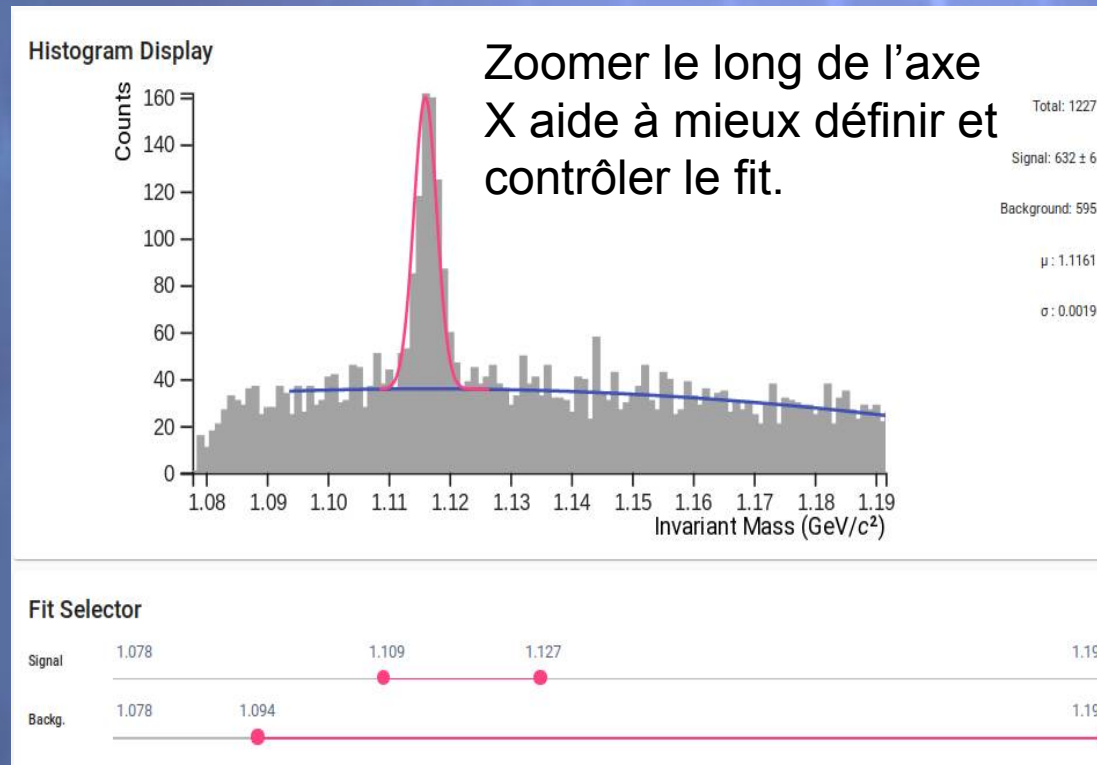


Exercice analyse

Problématique

- l'analyse en sélectionnant les bonnes traces («à la main ») permet d'obtenir un joli pic contenant uniquement 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**

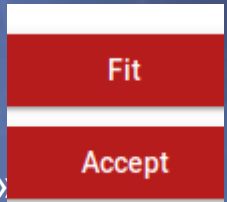


Utilisation de fonctions mathématiques qui reproduisent la forme du signal et celle du bruit de fond.

L'intégrale des fonctions permet d'extraire le nombre de Λ 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 »

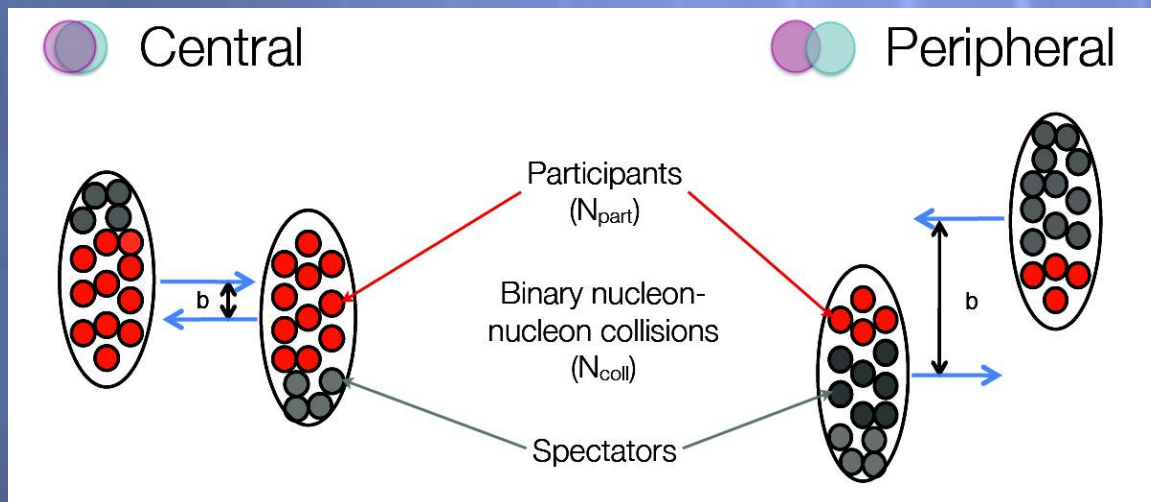
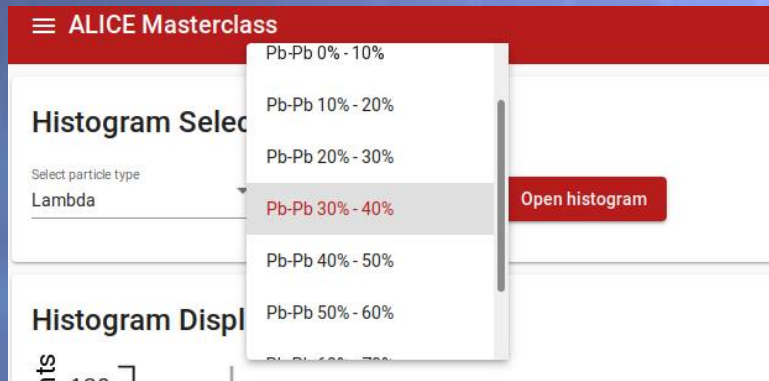


Exercice analyse

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

→ 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 analyse

☰ ALICE Masterclass

(1)

Menu

Home

Strangeness

Visual Analysis

Large Scale Analysis

(2)

Histogram Selector

Select particle type

Select collision & centrality

Open histogram

K^0

Λ

$\bar{\Lambda}$

pp

Pb-Pb 0%-10 %

Pb-Pb 10%-20 %

Pb-Pb 20%-30 %

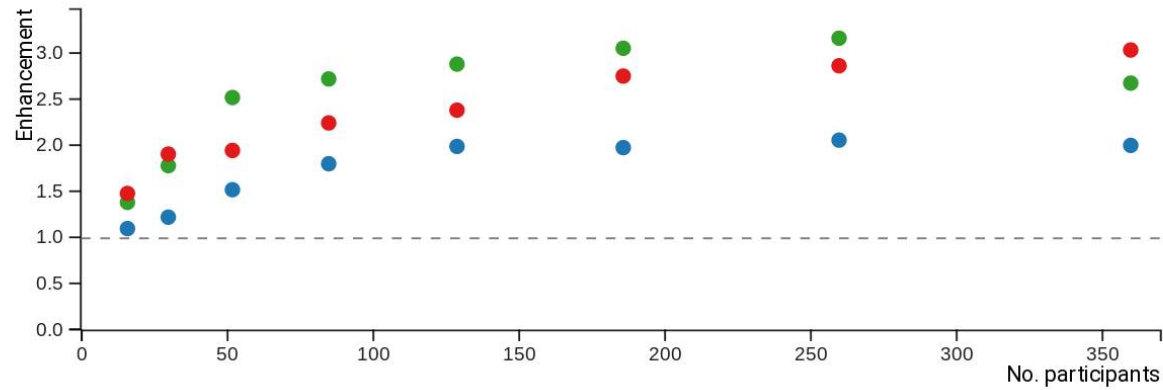
....

Pb-Pb 80%-90 %

Résultats Masterclass Orsay-31March2022

ALICE Masterclass Teacher

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

Exercice analyse : 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

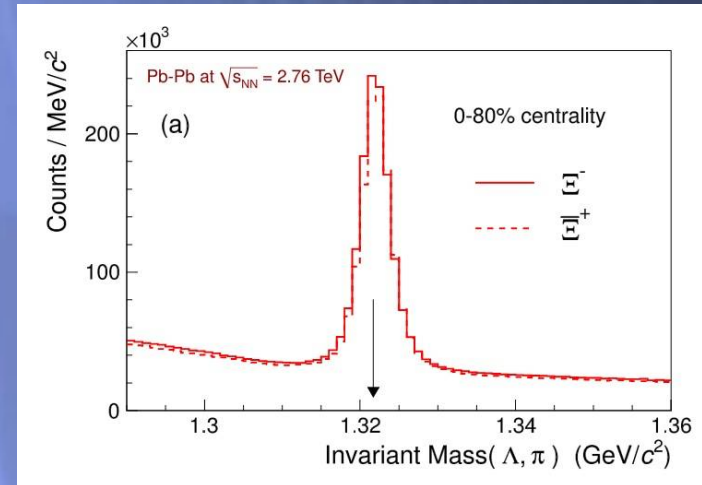
Article history:

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

ABSTRACT

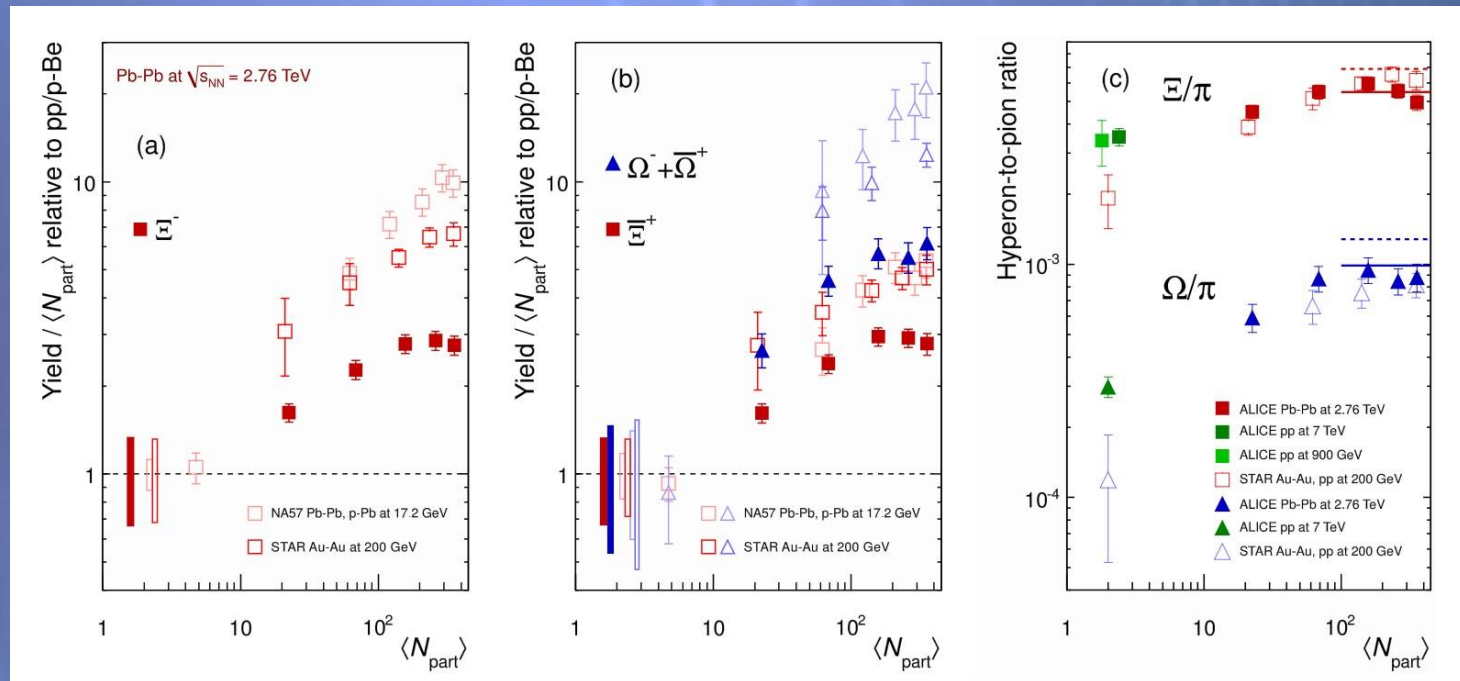
The production of Ξ^- and Ω^- baryons and their anti-particles in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV has been measured using the ALICE detector. The transverse momentum spectra at mid-rapidity ($|y| < 0.5$) for charged Ξ and Ω hyperons have been studied in the range $0.6 < p_T < 8.0$ GeV/c 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](#).



Exercice analyse : discussion des résultats

...contenant les résultats finaux 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)

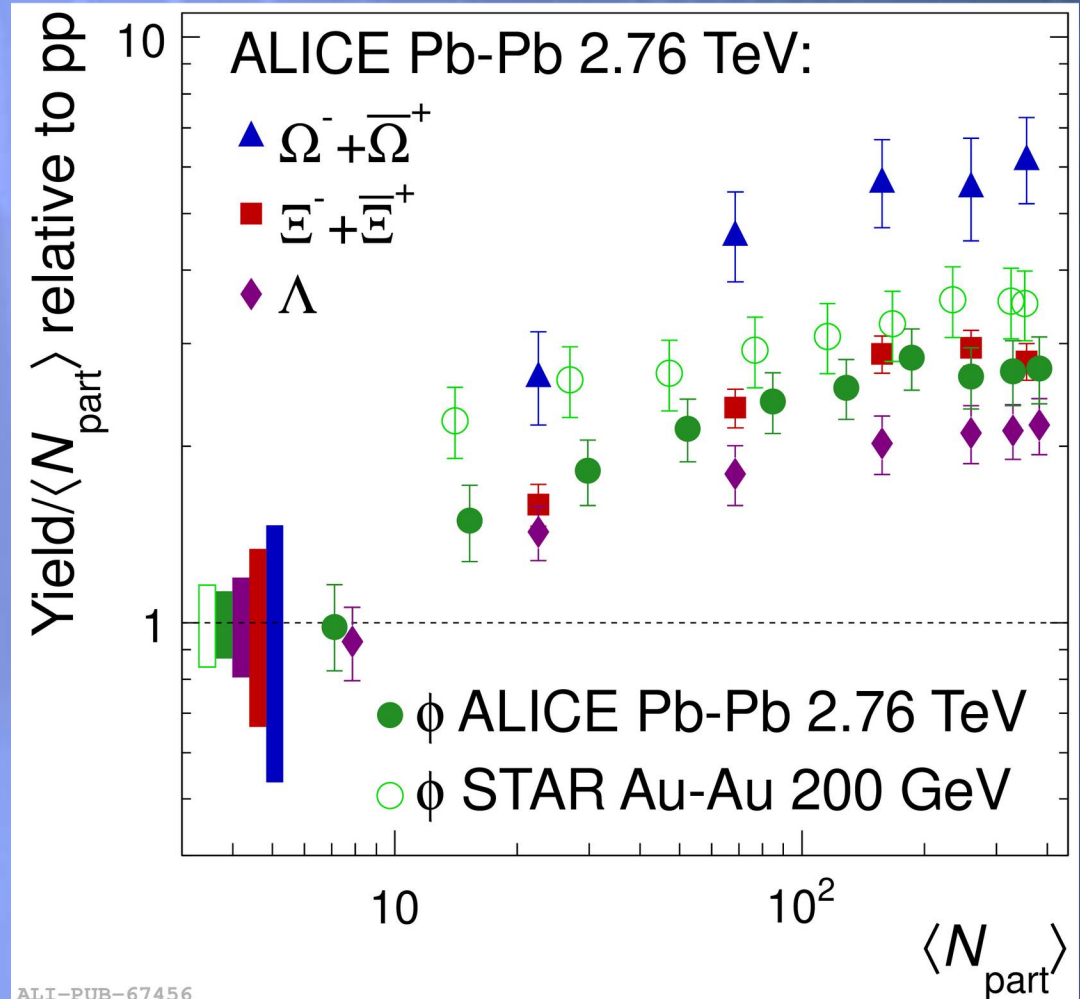
Mise en évidence d'une hiérarchie (plus le contenu en quarks étranges est important plus le rapport augmente)

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

Exercice analyse : 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 quark s dans la particule, plus son taux de production croit avec $\langle N_{\text{part}} \rangle$



Exercice analyse : discussion des résultats

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

