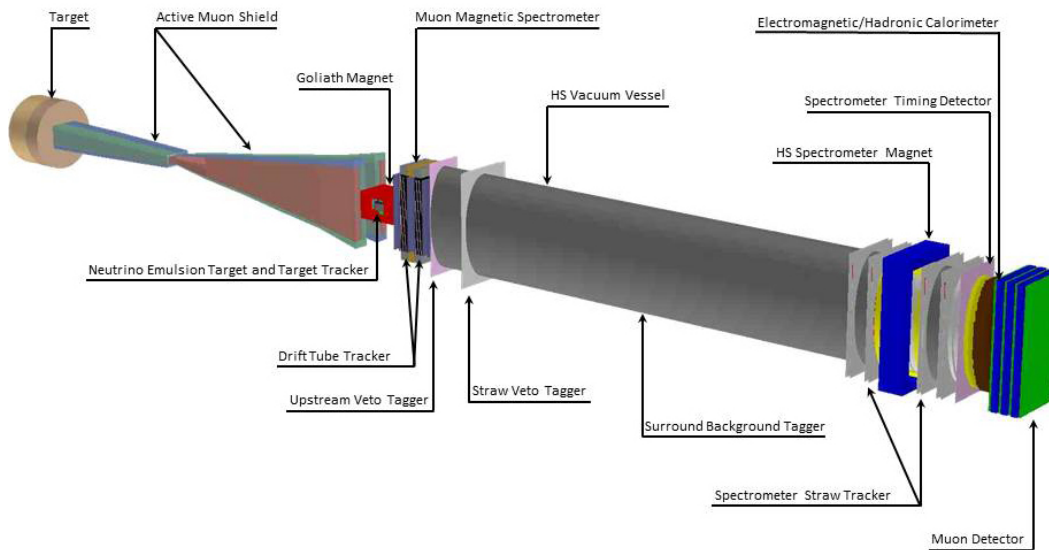


## RAPPORT DE STAGE

Laboratoire de physique nucléaire et de hautes énergies

# Optimisation du détecteur SHiP



*Etudiant:* Maxime Zumbihl

*Maître de stage:* Jacques  
Chauveau

Avril-Juin 2016

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>L'expérience SHiP</b>	<b>2</b>
2.1	Motivations physiques . . . . .	2
2.2	Dispositif expérimental . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Identification des particules par temps de vol</b>	<b>6</b>
3.1	Objectifs . . . . .	6
3.2	Démarche . . . . .	7
3.3	Résultats et analyse . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>11</b>

## 1 Introduction

Le Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Énergies (LPNHE) fondé dans les années 1970, est une Unité Mixte de Recherche (UMR 7585) de l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique de Particules (IN2P3), institut du CNRS, des universités Pierre et Marie Curie (UPMC) et Paris Diderot.

Il est constitué de douze équipes de recherche, engagées dans plusieurs grands programmes expérimentaux internationaux dans les domaines de la physique des particules (ATLAS, LHCb), des astroparticules (AUGER, H.E.S.S.) et de la cosmologie (LSST, EUCLID) [1].

L'expérience SHiP (Search for Hidden Particles) est un nouveau dispositif à cible fixe devant être alimenté par le synchrotron SPS au CERN. Il est dédié à l'étude et la recherche par détection directe de particules cachées prédites par de nombreux modèles théoriques d'une physique au-delà du modèle standard pouvant expliquer la nature de la matière noire, les oscillations de neutrinos ainsi que l'asymétrie matière-antimatière dans l'univers. En particulier, l'expérience a pour but la détection de particules telles que les neutrinos lourds (Heavy Neutral Leptons, HNLs), le photon noir, les particules légères supersymétriques, les axions...qui sont toutes des candidates à la matière noire. Dans le cadre de ce stage, nous nous sommes concentrés sur l'étude du HNL, bien que les résultats obtenus soient aussi valables pour les autres particules recherchées. Le détecteur comporte une partie spécifique à l'étude des neutrinos tau sur laquelle nous n'avons pas travaillé. Cet expérience est actuellement en cours de réoptimisation.

L'objectif de ce stage est l'optimisation du détecteur SHiP, et plus particulièrement d'une partie précise du dispositif, le timing detector.

## 2 L'expérience SHiP

### 2.1 Motivations physiques

Avec la découverte en 2012, au Large Hadron Collider (LHC), du boson de Higgs, l'existence de toutes les particules prédites par le modèle standard (SM) de la physique des particules semblent avoir été prouvée expérimentalement. Néanmoins, il reste actuellement plusieurs phénomènes inexpliqués qui montrent que le modèle standard est une théorie incomplète. Ces lacunes sont les suivantes:

- **Masse et oscillations des neutrinos:** Qu'est-ce qui fait que les neutrinos disparaissent puis réapparaissent sous une autre forme? Quelle est l'origine de leur masse?
- **Asymétrie baryonique:** Quel mécanisme a entraîné la légère asymétrie entre matière et anti-matière baryonique dans les premiers instants de l'univers et qui fait que nous vivons aujourd'hui dans un univers de matière? [2]
- **Matière noire:** Quelle est la nature de la forme de matière la plus abondante de l'univers?
- **Inflation cosmologique:** Quel a été le phénomène responsable de l'accélération de l'expansion de l'univers dans ses premiers instants?
- **Energie noire:** Quel est le phénomène responsable de l'accélération de l'expansion de l'univers actuellement?

L'incapacité du modèle standard à fournir des réponses à ces questions a obligé les physiciens à formuler de nouvelles théories allant au delà du modèle standard (Beyond Standard Model, BSM) prédisant de nouvelles particules ou de nouvelles interactions encore non observées. Pour tenter de les mettre en évidence expérimentalement, il existe deux approches complémentaires: soit la particule a une masse importante, au moins supérieure à  $1 \text{ TeV}/c^2$ , il convient alors d'augmenter l'énergie des collisions dans les accélérateurs, c'est notamment le cas au LHC; soit la particule est légère mais interagit très faiblement, il est alors nécessaire de repousser la "frontière d'intensité" (voir fig.1) pour ainsi détecter ces nouvelles interactions. L'expérience SHiP s'inscrit dans ce cadre.

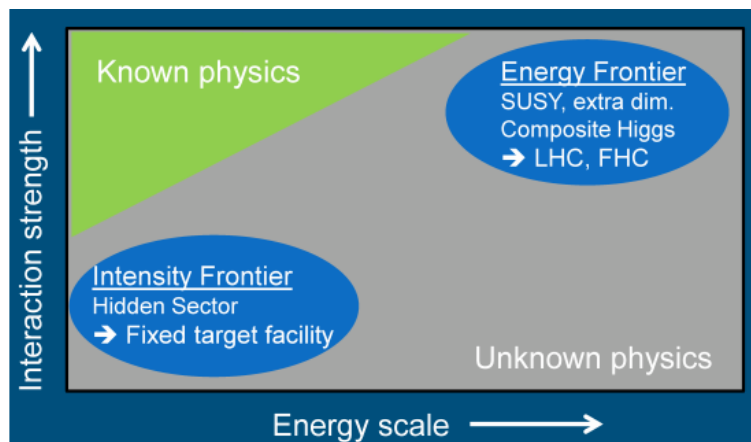


Figure 1: Domaine d'exploration de la nouvelle physique

De nombreux modèles prédisent l'existence d'un secteur caché (Hidden Sector, HS) qui interagirait avec les particules du modèle standard par le biais de messagers (fig.2). Mathématiquement, cela

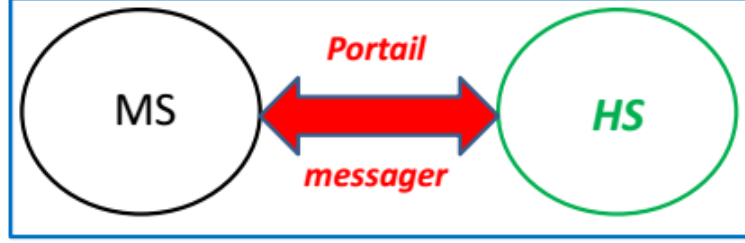


Figure 2: Le modèle standard se couple au secteur caché par le biais de messagers

se traduit par l'ajout d'un terme de couplage dans le Lagrangien de la particule (EXEMPLE). Ces messagers, ou portails peuvent être de natures différentes. Durant ce stage nous nous sommes concentré sur l'étude du portail neutrino. D'après ce modèle, il existe des particules du secteur caché, les HNLs, qui se couplent aux neutrinos du modèle standard, ce qui leur confère leur masse et expliquerait leurs oscillations. Ces HNLs sont des particules dites de Majorana [3], c'est-à-dire qu'elles sont leurs propres antiparticules. Il en existe trois, appelées  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ , associées à chaque neutrino du SM, respectivement  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  et  $\nu_\tau$ . La masse de ces particules est inconnu. Au SPS, la technique du beam dump nous permet d'explorer avec une très grande sensibilité le domaine de masse de l'ordre du  $\text{GeV}/c^2$ . Nous avons considéré l'hypothèse qui suppose pour les HNLs une masse comprise dans cette échelle. Selon cette hypothèse, la masse de  $N_1$  serait de l'ordre de la dizaine de keV et serait la particule composant la matière noire. Celles de  $N_2$  et  $N_3$  seraient de l'ordre de  $100 \text{ MeV}/c^2$  à quelques  $\text{GeV}/c^2$ , ils confèreraient leur masse aux neutrinos standard et seraient responsables de l'asymétrie baryonique dans l'univers [4]. Les HNLs sont produits par désintégration de hadrons ( $\pi$ , K, D, B). Nous nous intéressons plus particulièrement aux désintégrations des mésons charmés D et des mésons beaux B dont les masses, respectivement aux alentours de  $1860 \text{ MeV}/c^2$  et  $5250 \text{ MeV}/c^2$ , permettent la production de neutrinos lourds d'une masse d'un  $\text{GeV}/c^2$  ou plus. La liste des canaux de désintégration des particules recherchées issues des différents modèles théoriques pouvant être testés avec SHiP est donnée figure 3. Nous avons étudié uniquement  $N \rightarrow \mu^\pm \pi^\mp$  et  $N \rightarrow \mu^\pm K^\mp$  [5].

Quarks	2.4 MeV $\frac{2}{3}$ u up	1.27 GeV $\frac{2}{3}$ c charm	171.2 GeV $\frac{2}{3}$ t top	Models	Final states
	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ b bottom		
	$<0.0001 \text{ eV}$ 0 $\nu_e$ electron neutrino	$\sim 0.01 \text{ eV}$ 0 $\nu_\mu$ muon neutrino	$\sim 0.04 \text{ eV}$ 0 $\nu_\tau$ tau neutrino		
Leptons	0.511 MeV -1 e electron	105.7 MeV -1 $\mu$ muon	1.777 GeV -1 $\tau$ tau	Neutrino portal, SUSY neutralino	$\ell^\pm \pi^\mp, \ell^\pm K^\mp, \ell^\pm \rho^\mp, \rho^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$
				Vector, scalar, axion portals, SUSY sgoldstino	$\ell^+ \ell^-$
				Neutrino portal, SUSY neutralino, axino	$\pi^+ \pi^-, K^+ K^-$
			Axion portal, SUSY sgoldstino	$\gamma \gamma$	
			SUSY sgoldstino	$\pi^0 \pi^0$	

Figure 3: A chaque neutrino du SM est associé un HNL du secteur caché (gauche); Canaux de désintégrations des particules cachées recherchées

## 2.2 Dispositif expérimental

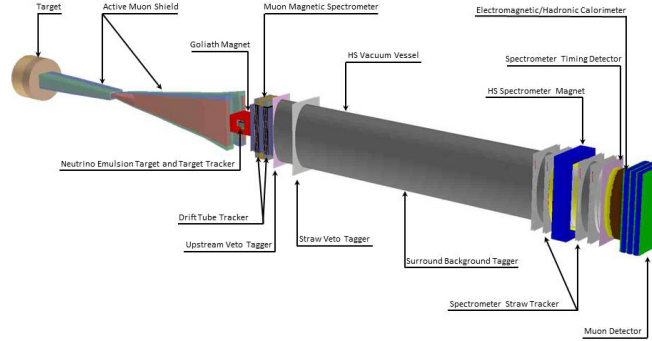


Figure 4: Détecteur SHiP

La détection est faite de manière directe, c'est-à-dire que l'on cherche de la masse manquante dans les états finaux, ce qui nous permettrait de montrer l'existence d'une nouvelle particule si celle-ci est suffisamment légère pour être produite et détectée.

Les événements recherchés sont rares et les interactions très faibles, cela implique que les particules que l'on souhaite détecter ont une très longue durée de vie et traversent aisément la matière sans interagir. Le détecteur est donc conçu dans l'idée de n'avoir aucun bruit de fond venant parasiter le signal. Il comprend de nombreux éléments dont l'objectif est exclusivement la réduction du bruit de fond, provenant principalement des muons et des neutrinos, ainsi qu'un système de véto imposant des conditions supplémentaires sur le signal pour être considéré comme tel. La structure du détecteur est la suivante :

**Cible:** Il s'agit d'une cible de protons fixe, épaisse et lourde (Molybdène), de sorte à ce que tous les protons d'un bunch du faisceau accéléré à 400 GeV par le SPS interagissent avec la cible. L'objectif est d'accumuler  $10^{20}$  protons sur cible après cinq ans. Les protons interagissent avec la cible essentiellement par spallation.

**Beam Dump/Hadron absorber:** Bloc de Tungstène censé stopper les pions ( $\pi$ ) et les kaons (K) avant leur désintégration en  $l$  et  $\nu_l$ ,  $l$  pouvant être un électron  $e$  ou un muon  $\mu$ . Le calcul de la capacité d'arrêt du matériau se fait grâce à la formule de Bethe-Bloch donnant la perte d'énergie par unité de longueur d'une particule traversant un milieu de densité  $\rho$ .

Ainsi les  $\pi$  et les K se désintègrent au repos, les produits de désintégration sont donc émis dans toutes les directions de l'espace et non pas collimés vers l'avant. Cela permet de réduire le bruit de fond induit par les neutrinos et les leptons. L'objectif est d'éliminer tout ce qui est déjà connu et ainsi d'observer exclusivement de la nouvelle physique.

**Muon shield:** Système d'aimants permettant de dévier la trajectoire des particules chargées et notamment des muons, qui ne sont pas arrêtés par le beam dump, vers les parois de sorte à ce qu'il n'entre pas dans le détecteur. De même que pour le beam dump l'objectif est de réduire le bruit de fond induit par les muons. Sa capacité à dévier la trajectoire des muons impose une condition sur les dimensions du détecteur.

**Détecteur de  $\nu_\tau$ :** Composé d'un neutrino emulsion target (NET) dans un champ magnétique, dans lequel les neutrinos interagissent, et d'un muon magnetic spectrometer (MMS) qui détectent les  $\tau$  produits par les neutrinos, ou les produits de désintégration de celui-là, notamment des  $\mu$ . Il concerne donc la partie étude des  $\nu_\tau$  de l'expérience SHiP.

**Volume de désintégration (Hidden Sector vacuum vessel):** Ce volume a une section elliptique, de grand axe 10 m et de petit axe 5m, et fait 62m de long. Pour éviter les interactions des muons et des neutrinos avec l'air résiduel, et ainsi diminuer le bruit de fond, la pression à l'intérieur du volume de désintégration est abaissée à  $10^{-6}$  bar. Il est néanmoins à l'étude, le remplacement dans le volume de l'air par de l'hélium à pression atmosphérique dans le but de réduire les coûts. Les parois sont remplies d'un scintillateur liquide, un mélange de solvants organiques, servant de veto (Surround Background Tagger).

**Détecteur HS:** Il s'agit de la partie de l'expérience qui permettra de détecter de nouvelles particules du secteur caché, plus exactement les produits de leurs désintégrations. Il est composé de plusieurs instruments au rôle distinct:

**Spectromètre HS:** Il est composé de quatre stations de chambres à pailles, deux de part et d'autre d'un dipôle magnétique, d'une résolution spatiale d'environ  $100\mu\text{m}$ . Ce sont des détecteurs qui permettent de déterminer l'impulsion et la direction des particules incidentes ce qui permet d'extrapoler la trajectoire des particules pour remonter à leur vertex de désintégration.

**Timing Detector:** Il est actuellement en cours de recherche et développement mais il s'agira très vraisemblablement d'un mur de scintillateur de 6m x 12m et de 2cm d'épaisseur. Son objectif initial est de réduire le bruit de fond induit par les muons en imposant la condition que deux muons arrivant sur le timing detector soient cohérents en temps pour considérer qu'ils proviennent bien de la désintégration du HNL et non d'autres interactions. Il est donc nécessaire que la précision temporelle de l'instrument soit élevée, de l'ordre de 100 ps.

De plus, il peut endosser un rôle différent et participer activement à l'identification des particules par mesure de leur temps de vol. Cet aspect, qui est au cœur de ce stage, est développé dans la troisième partie.

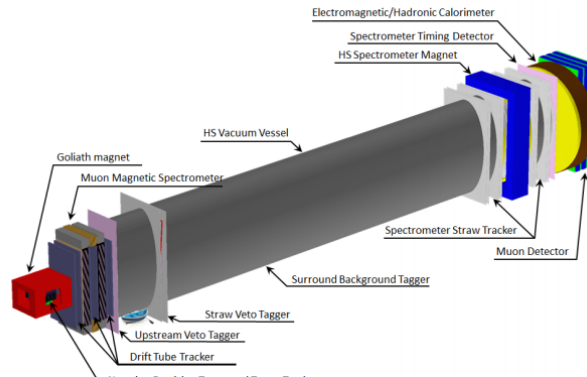


Figure 5: Volume de désintégration et détecteur HS

Calorimètre électromagnétique (ECal): Il s'agit d'un calorimètre de type shashlik. Lorsqu'un électron, un positron ou un photon entrent en contact avec le calorimètre électromagnétique, cela crée une gerbe électromagnétique, c'est-à-dire qu'il génère, par production de paires  $e^+e^-$  ou par rayonnement de freinage (bremsstrahlung) de nouveaux électrons (ou positrons) ou photons de plus basse énergie. Tout ou partie de l'énergie de la particule est déposée dans le calorimètre ce qui permet de recueillir l'information sur l'énergie de la particule.

Les objectifs du calorimètre électromagnétique sont :

1. L'identification des  $e^\pm$ , des photons  $\gamma$  et des pions  $\pi$ .
2. La mesure de l'énergie de ces deux particules entre 0,3 et 70 GeV avec une précision supérieure à 10%.
3. La reconstruction de la trace du  $\pi^0$  entre 0,6 et 100 GeV, celui-ci se désintégrant dans 99% des cas en deux photons.
4. Fournir des informations temporelles de l'ordre de la nanoseconde.

Calorimètre hadronique (HCal): Il fonctionne globalement de la même façon que le calorimètre électromagnétique mais pour les hadrons: lorsqu'un hadron rentre en contact avec le calorimètre hadronique, il se crée des jets hadroniques détectables. Les objectifs de ce calorimètre sont :

1. L'identification des  $\pi$ .
2. Discriminer les  $\pi$  et les  $\mu$  particulièrement pour les particules de faible impulsion ( $P < 5$  GeV/c).
3. L'identification des particules neutres telles que les  $K_L$  ou les neutrons, invisibles pour les autres détecteurs, pour l'identification et le rejet du bruit de fond.
4. Fournir des informations temporelles de l'ordre de la nanoseconde.

Détecteurs de muons: Les muons n'interagissent pas suffisamment dans le calorimètre électromagnétique. On utilise donc ce détecteur pour les identifier avec une grande efficacité, et notamment ceux provenant des canaux de désintégration  $N \rightarrow \mu^\pm \pi^\mp$  et  $N \rightarrow \mu^+ \mu^- \nu_\mu$  et les séparer de ceux venant du bruit de fond. Ce détecteur est composé de 4 stations de tracking et 3 filtres à muons.

Dans la phase actuelle de réoptimisation du détecteur, des performeurs d'identification des particules ultimes sont recherchés.[6]

## 3 Identification des particules par temps de vol

### 3.1 Objectifs

Comme dit précédemment, l'objectif de ce stage est d'optimiser le timing detector et de vérifier s'il est possible de l'utiliser non pas uniquement pour le rejet du bruit de fond mais aussi pour l'identification des particules par leur temps de vol. Pour être plus précis, l'objectif est de pouvoir différencier, de par la mesure de leur temps de vol, plusieurs canaux de désintégration,  $N \rightarrow \mu^\pm \pi^\mp$  et  $N \rightarrow \mu^\pm K^\mp$  pour ce stage particulièrement. Cette identification doit pouvoir se faire à basse impulsion. En effet, si les particules sont ultra-relativistes ( $p \gg m$ ), leurs vitesses seront très proches de celle de la lumière et il sera alors impossible de les différencier par leur temps de vol avec la résolution temporelle qui nous est accessible. Cette étude passe par la modélisation d'évènements et leur reconstruction.

## 3.2 Démarche

Tout le travail réalisé se base sur la simulation informatique effectuée grâce au logiciel FairShip, un ensemble de programmes écrit par les membres de la collaboration SHiP et spécialement dédié à cette expérience. La première étape de la simulation est la génération des événements, leurs interactions et leur propagation dans le détecteur. Cette étape se fait par des générateurs utilisant la méthode Monte-Carlo. Pythia8 se charge des interactions primaires proton-proton entre la cible et le faisceau du SPS ainsi que des interactions secondaires pouvant éventuellement avoir lieu, Geant4 gère les interactions des particules avec la matière et leur propagation dans le détecteur, il doit donc en connaître la géométrie qui est stockée dans un fichier externe appelé par Geant. Pour générer ces événements ces deux logiciels, et notamment Pythia8, doivent prendre en compte certains paramètres, à savoir, la masse du HNL, la valeur de ses constantes de couplage, son temps de vie, ses canaux de production et de désintégration qui doivent être rentrés manuellement par l'utilisateur dans un programme dédié à la simulation. Nous avons choisi pour la masse du neutrino lourd 1 GeV, il est produit par la désintégration des particules charmées. Pour sa désintégration, nous avons d'abord considéré le canal  $N \rightarrow \mu^\pm \pi^\mp$ , puis  $N \rightarrow \mu^\pm K^\mp$ .

Après avoir fait tourner la simulation, les traces Monte-Carlo ainsi que les coups dans les différents détecteurs sont stockés dans un fichier. Ces derniers sont les plus importants car il s'agit des données auxquelles nous aurons accès expérimentalement, c'est donc à partir de cela que nous devons travailler.

La seconde étape est la reconstruction des traces à partir des données enregistrées par les détecteurs. Pour cela, le programme reconstruit le quadrivecteur impulsion de chaque particule ayant traversé l'un des détecteurs grâce aux informations détenues par ceux-ci, notamment l'énergie déposée et leur position à une erreur près. Un algorithme permet l'extrapolation des traces depuis le système de tracking (les stations de chambres à paille). À partir de ces informations sur l'impulsion et la direction, on peut extrapoler la trace jusqu'au vertex de désintégration de la particule mère. En effet, si deux traces se rapprochent suffisamment l'une de l'autre, à une distance appelée distance de moindre approche (DOCA), on peut considérer qu'elles proviennent de la même désintégration et ainsi identifier ce point comme étant un vertex (les traces ne se croisent pas nécessairement au vertex à cause de la résolution spatiale de l'expérience, prise en compte dans la simulation). Il peut arriver que l'extrapolation ne fonctionne pas pour diverses raisons, il se peut par exemple, que l'un des deux produits de désintégration n'ait pas été détecté, il devient donc impossible de reconstruire le vertex.

L'analyse se fait aussi grâce à un programme spécifique préexistant. Néanmoins, il ne comprend pas l'analyse du Timing Detector, ni celle du temps de vol. Une partie du stage a donc été consacrée à programmer cela. Le principe de l'identification des particules par temps de vol est le suivant: considérons un vertex à deux traces; le temps de vol de chaque particule issue de la désintégration peut être calculé ainsi:

$$t = \frac{L}{v} = \frac{L}{\beta c}$$

avec  $L$ , la longueur de la trace,  $v$  la vitesse de la particule,  $c$  la vitesse de la lumière et  $\beta = \frac{v}{c}$ . Or  $\beta = \frac{p}{E}$  avec  $p$  l'impulsion de la particule et  $E$ , son énergie. De plus  $E = \sqrt{m^2 + p^2}$ . On obtient donc :

$$t = \frac{L}{c} \sqrt{1 + \frac{m^2}{p^2}}$$



Il est ainsi possible de remonter à la masse de la particule, ce qui permet son identification:

$$m^2 = p^2 \left( \left( \frac{ct}{L} \right)^2 - 1 \right)$$

Néanmoins, le timing detector ne nous donne pas directement accès au temps de vol de la particule. Il est nécessaire d'avoir une particule traversant le détecteur servant à donner le signal de départ. Le temps chronométré correspond donc à la différence entre le temps de vol de la particule et celui de la référence. Pour les désintégrations considérées, nous avons pris le muon comme référence. S'il n'y a pas de  $\mu$ , il convient de choisir comme référence la particule ayant la plus forte impulsion.

Il convient, tout d'abord, dans l'optique d'identifier les particules par leur temps de vol, d'associer aux traces extrapolées ayant atteint le timing detector, les coups correspondant enregistrés par celui-ci. Il nous faut donc connaître la résolution spatiale de l'expérience. on associe ensuite chaque trace à un point lorsque leur différence de position est inférieure à  $3\sigma$ .

Il a déjà été mentionné que, pour réduire à zéro le niveau de bruit de fond, plusieurs critères de sélection sont appliqués au signal pour le différencier du bruit de fond. Ces critères sont les suivants:

- Chaque évènement ne doit comporter qu'un seul candidat HNL.
- Le neutrino lourd doit se désintégrer dans le volume de désintégration et les traces des deux particules filles doivent se trouver dans ce même volume.
- le nombre de degrés de liberté (N.d.f) dans le système de tracking doit être supérieur à 25, c'est-à-dire qu'une particule doit laisser plus 25 coups dans les chambres à paille.
- La DOCA doit être inférieure à 1cm.
- L'impulsion des produits de désintégration du HNL doit être supérieure à 1GeV.
- Le paramètre d'impact doit être inférieur à 10cm.
- Les particules ne doivent pas avoir activé les véto mis en place.

Les tables d'efficacité de chacune des coupures sont données fig.???. L'analyse du temps de vol est faite après l'application de ces critères.

Selection	Events remaining
CheckHNLOrigin	12705
Event Reconstructed	6930
Vtx in Fiducial Volume	6929
Tracks in Fiducial Volume	6532
NDF<25	5696
DOCA<1 cm	5419
Chi2/NDF<5	5068
Daughters P < 1 GeV	5058
IP< 10 cm	5031
Event not Vetoed	4830

Figure 6: Tableau d'efficacité de chaque coupure pour 50000 évènements  $\mu\pi$

### 3.3 Résultats et analyse

Il est utile de vérifier, dans un premier temps, la distribution en impulsion des particules issues de la désintégration du HNL, pour savoir s'il en existe suffisamment de basse impulsion pour motiver une étude du temps de vol (fig.7).

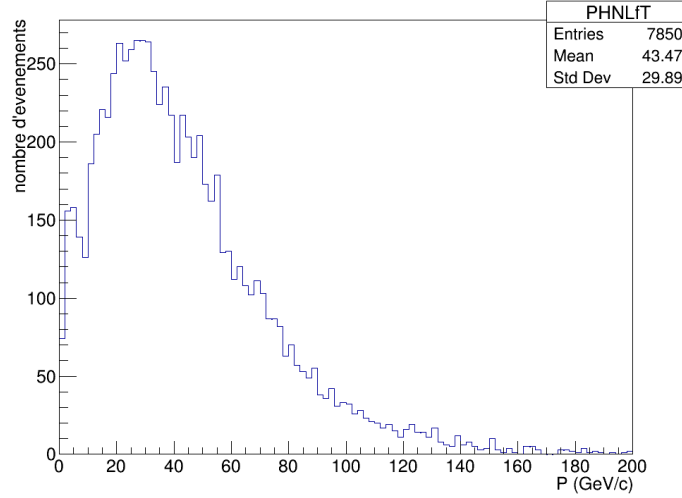


Figure 7: Impulsion du HNL

La figure 8 présente les résultats de l'analyse. Nous avons plusieurs quantités. Tout d'abord, nous avons la différence entre  $\mu$  et les autres particules  $\pi$  et  $K$ . Nous observons l'existence d'un pic, assez large compte tenu de la résolution spatiale de 100 ps, correspondant au temps de vol du  $\pi$  ou du  $K$ .

Nous avons ensuite un graphe assez similaire correspondant à la conversion temps de vol -  $m^2$  telle que décrite précédemment.

Nous avons, enfin, un graphe représentant la masse au carré en fonction de l'impulsion. Nous pouvons tirer plusieurs informations de ce graphe. Premièrement, nous observons que nous obtenons les résultats escomptés.  $m^2(\pi) \simeq 0.02$  et  $m^2(K) \simeq 0.25$ , or nous observons que les points du graphes sont distribués autour de ces valeurs. Deuxièmement, il nous confirme qu'une étude du temps de vol à haute impulsion ne présente pas d'intérêt; en effet lorsque l'impulsion augmente, les points se dispersent, rendant la mesure de la masse, et donc l'identification de la particule, de plus en plus imprécise. Enfin, nous avons accès à une dernière information en superposant les courbes du  $K$  et du  $\pi$ , nous pouvons en effet savoir jusqu'à quelle valeur de P il est encore possible de différencier un  $\pi$  d'un  $K$  uniquement par leur temps de vol. Nous obtenons une valeur comprise entre 6 et 7 GeV, ce qui rejoint la première observation.

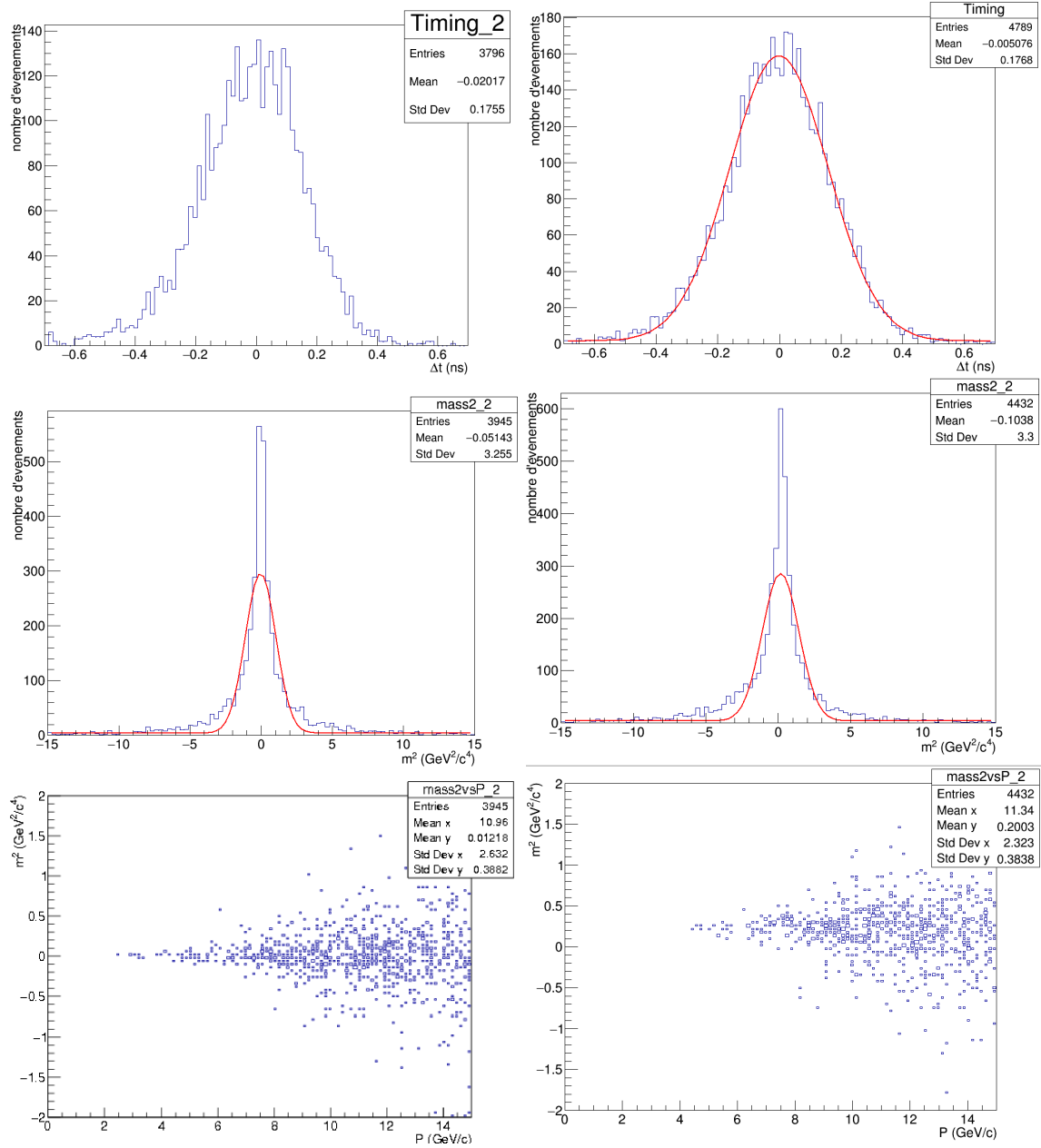


Figure 8: Les graphes de gauche correspondent aux événements  $\mu\pi$  et ceux de droite aux événements

## 4 Conclusion

Le détecteur SHiP est actuellement en cours de réoptimisation. La volonté de lui implémenter des techniques d'identification des particules par leur temps de vol s'inscrit dans cette optique. Nous avons pu grâce à l'utilisation de l'outil informatique montrer que cela était possible, à basse impulsion, pour les désintégrations des HNLs en  $\mu\pi$  et  $\mu K$ , bien que ces résultats soient généralisables aux autres particules recherchées. Ces résultats sont encourageants mais l'étude devrait être complétée. En effet, nous n'avons considéré pour la simulation que le signal HNL, la prochaine étape serait de faire tourner le programme en y ajoutant des fichiers de bruit de fond pour vérifier si l'identification est toujours efficace. Nous pourrions ainsi voir si nous pouvons ajouter un critère de sélection sur le temps de vol, en plus de ceux déjà utilisés. Il faudrait aussi tester d'autres canaux de désintégration, notamment ceux dont les états finaux comportent plus de deux corps, ~~ce qui complique l'identification.~~

## Bibliographie

[1] URL: <https://lphhe.in2p3.fr>

[2] A. D. Sakharov, Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe, *Sov. Phys. Usp.* 34 (5), pp.392–393, 1991.

[3] D. Gorbunov, M. Shaposhnikov, How to find neutral leptons of the nuMSM?, arXiv:0705.1729 [hep-ph], 2007.

[4] M. Drewes, B. Garbrecht, Experimental and cosmological constraints on heavy neutrinos, arXiv:1502.00477 [hep-ph], 2015.

[5] SHiP collaboration, A facility to Search for Hidden Particles at the CERN SPS: the SHiP physics case, arXiv:1504.04855 [hep-ph], 2015.

[6] SHiP collaboration, A facility to Search for Hidden Particles (SHiP) at the CERN SPS, arXiv:1504.04956 [physics.ins-det], 2015.