

Conception d'un aimant à plan focal pour la détection des produits de fusion dans les expériences laser - plasma



William MAGRINI, Jean-Éric DUCRET
magrini@celia.u-bordeaux1.fr, ducret@celia.u-bordeaux1.fr



Introduction

Le but de notre étude est de concevoir un spectromètre à particules chargées pour les réactions de fusion dans des plasmas laser. Ces particules ont des énergies de l'ordre du MeV. Nous avons donc choisi de concevoir ce spectromètre avec des éléments d'optique magnétique.

Nous nous sommes intéressés au dimensionnement d'un aimant à plan focal à partir d'un modèle analytique et d'un code numérique résolvant les équations de transport (Runge-Kutta d'ordre 4). Cet aimant doit être capable de *trier* les particules afin de pouvoir caractériser leurs énergies.

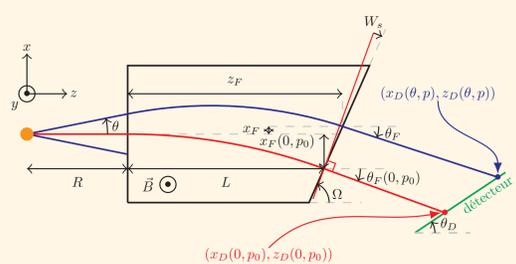
Nous avons calculé la distance focale d'un tel dispositif qui devra minimiser la taille des taches focales tout en maximisant la résolution en énergie.

Modèle initial

Le rayon de courbure ρ d'une particule de charge q et de vitesse V dans un champ magnétique B est donné par :

$$\rho = \frac{\gamma m V}{q B} \quad \text{avec} \quad \gamma = \left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right)^{-1/2} \rightarrow \text{Facteur de Lorentz}$$

Les réactions produisant ces particules sont isotropes, donc toutes les particules ont des angles différents à l'entrée de l'aimant. Elles sortiront alors avec des angles également différents pour une énergie (un ρ) donnée.



On établit un modèle du transport magnétique dans un champ créneau que l'on compare aux résultats d'un code de transport (Runge-Kutta d'ordre 4) de particules. Le champ magnétique est fixé à $B = 4$ kG, valeur tout à fait courante pour ce genre d'applications.

Nous nous sommes intéressés aux deux configurations suivantes :

LMJ : $E_0 = 14$ MeV et $R = 500$ cm, $\Delta\theta = 5$ mrad
 $D + {}^3\text{He} \rightarrow \text{p} + \alpha$ avec $E_0 = E(p) \sim 14$ MeV

CELIA : $E_0 = 5$ MeV et $R = 25$ cm, $\Delta\theta = 10$ mrad
 $\text{p} + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3\alpha$ avec $E_0 = E(\alpha) \sim 3 - 5$ MeV

Pour $E = E_0$, on calcule L afin que $\theta_f(0, p_0)$ soit égal à $-10^\circ / -5^\circ$ pour le LMJ/CELIA, ce qui permet de placer le détecteur hors du champ de vue direct du plasma. En posant $t = \tan \Omega$, on obtient alors :

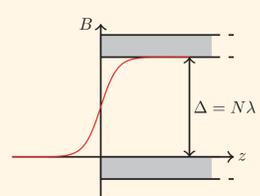
$$\sin \theta_f = \frac{t \left(1 + \theta_i t + \frac{x_f(0, p_0) - R\theta_i - z_f(0, p_0)t}{1+t^2}\right) - \sqrt{1+t^2 - \left(1 + \theta_i t + \frac{x_f(0, p_0) - R\theta_i - z_f(0, p_0)t}{1+t^2}\right)^2}}{1+t^2}$$

La distance focale D pour une énergie donnée est obtenue en minimisant la taille de la tache focale par rapport à D :

$$\frac{dI}{dD} = 0 \quad \text{avec} \quad I = \int_{-\Delta\theta}^{\Delta\theta} \frac{d\theta}{2\Delta\theta} \left\{ [x_D(\theta, p) - x_D(0, p)]^2 + [z_D(\theta, p) - z_D(0, p)]^2 \right\}$$

La taille de la tache focale est ensuite estimée par $T = \sqrt{I}$.

Modélisation du champ de fuite



Nous avons ensuite introduit un champ de fuite de l'aimant caractérisé par trois paramètres λ , Δ et N reliés entre eux par $\lambda = \Delta/N$ où $N \in \mathbb{N}$ et Δ est l'entrefer de l'aimant. On utilise la formule empirique suivante pour modéliser cette variation longitudinale :

$$B(z) = \frac{B_0}{1 + \exp[P(z)]} \quad \text{avec} \quad P(z) = A \frac{z}{\lambda} + B \left(\frac{z}{\lambda}\right)^3$$

Le polynôme est choisi impair pour que $B(z)$ ait les bonnes propriétés. Le champ de fuite doit aussi respecter les conditions suivantes :

- $\left. \frac{dB}{dz} \right|_{z=0} = \frac{1}{\lambda} \rightarrow \lambda$ définit la pente à l'entrée de l'aimant.
- $1 + \exp[P(\Delta)] \simeq 1 + 10^{-p}$ et $1 + \exp[P(-\Delta)] \simeq 10^p$

Ces deux conditions nous permettent de déduire

$$A = -4 \quad B = (1/N)^3 (4N - p \ln(10))$$

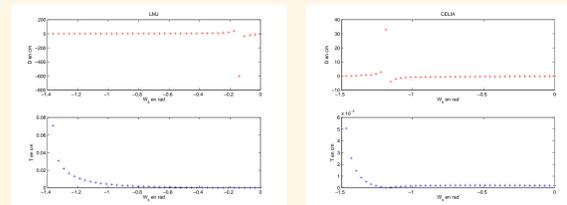
Le champ de fuite n'a été inclus que dans le calcul avec le code de transport et on a choisi pour cela, $N = 2$, $p = 3$ et $\lambda = 2.5/0.25$ cm dans le cas du LMJ/CELIA.

Bibliographie

- [1] J. FRENJE *et al.* - "First measurement of the absolute neutron spectrum using the magnetic recoil spectrometer at omega", *Review Of Scientific Instruments* **79** (2008).
- [2] F. MÉOT *et al.* - "Zgoubi User's Guide", 2013 (<http://sourceforge.net/projects/zgoubi/>)

Résultats

On détermine l'angle W_s en calculant le domaine de validité du modèle défini par $D > 0$ pour $E = E_0$:



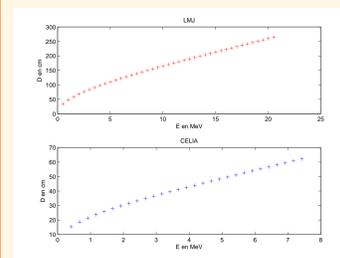
On a choisi W_s pour chaque configuration :

LMJ : $W_s = -0.7$ rad

CELIA : $W_s = -1.3$ rad

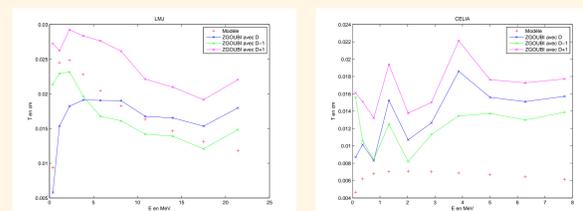
Les domaines de validité varient beaucoup d'une configuration à l'autre.

La figure qui suit donne la distance focale de l'aimant en fonction de l'énergie pour les deux configurations possibles :



Les distances focales prennent des valeurs très différentes d'une configuration à l'autre. Lorsque W_s est fixé, les distances focales sont positives pour toute la gamme en énergie.

Les figures suivantes permettent de comparer la taille des taches focales données par le modèle avec celles données par ZGOUBI si on prend D , $D + 1$ ou $D - 1$:

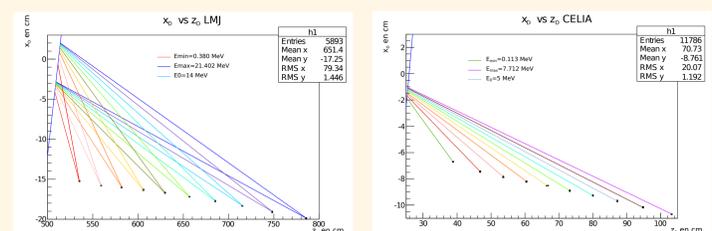


Sur ces courbes, la taille des taches focales est relativement stable vis à vis de la distance focale.

Cela implique que le positionnement du détecteur derrière l'aimant n'a pas besoin d'être très précis.

En ajoutant le champ de fuite à la carte de champ, seule une légère diminution des tailles de taches focales est visible.

Nous avons tracé les positions des taches focales dans le plan de l'aimant en prenant en compte le champ de fuite :



Les particules atteignent leurs points de focalisation sans traverser le détecteur. Cela signifie qu'il n'y aura pas de problème lié à ces effets pour le positionner.

Conclusion

Nous avons calculé de deux façons la géométrie d'un aimant dipolaire permettant la focalisation spatiale des particules chargées produites dans les réactions de fusion nucléaire dans les plasmas.

Ces deux calculs sont satisfaisants : ils indiquent des distances focales tout à fait raisonnables par rapport aux dimensions des installations concernées et les résolutions en énergie sont relativement bonnes (1 keV pour le LMJ et 0.5 keV pour le CELIA).

L'étape suivante de ce calcul consiste à prendre en compte une carte de champ 3D réaliste (mesurée ou calculée).

Ce spectromètre pourra être utilisé pour la détection de particules chargées ou de neutrons par conversion $n \rightarrow p/d/t$ dans une cible mince [1].