

44

GANIL

GRAND ACCELERATEUR NATIONAL D'IONS LOURDS - CAEN
LABORATOIRE COMMUN IN2P3 (CNRS) - DSM (CEA)

Sur la possibilité d'accélérer simultanément X^+ et X^- dans un même cyclotron à secteurs séparés: le bicyclotron

A. CHABERT, L. BOY

12 novembre 1996



swg649

GANIL S 96 08



Sur la possibilité d'accélérer simultanément X^+ et X^- dans un même cyclotron à secteurs séparés: le bicyclotron

A. CHABERT, L. BOY

12 novembre 1996

Résumé

Ce document est une étude de principe d'un cyclotron à secteurs séparés permettant d'accélérer simultanément deux états de charges X^+ et X^- d'un même élément. Nous exposons le principe du bicyclotron et traitons l'accélération de H^+ et H^- comme exemple.

1 Introduction

Nous proposons d'accélérer simultanément dans le même CSS deux faisceaux X^+ et X^- tournant en sens opposé. On utilise ainsi un seul accélérateur pour délivrer deux faisceaux, ou un seul faisceau de X^+ d'intensité double en épluchant X^- après accélération. On dispose aussi de tous les avantages du CSS sur le cyclotron compact, en particulier dans le cas de fortes intensités. De plus, les lignes d'injection et d'extraction peuvent être communes aux deux faisceaux, avec éventuellement une réduction des effets de charge d'espace et une augmentation de l'intensité limite de chaque espèce. Ce document présente les principes d'un tel accélérateur ainsi qu'un exemple d'accélération de H^+ et H^- .

2 Principe du bicyclotron

2.1 Présentation, schéma de principe

Les deux espèces X^+ et X^- n'ont pas la même masse car X^- possède deux électrons supplémentaires. En négligeant les énergies de liaison de ces deux électrons, on obtient une différence de masse relative:

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{m^- - m^+}{m} \approx \frac{2m_e}{Am_u} = \frac{1.097 * 10^{-3}}{A}$$

Par conséquent, leur phase varie de façon différente en cours d'accélération; l'écart de phase entre les deux faisceaux au tour N est donné par:

$$\Delta\phi[deg] = 2\pi Nh \frac{\Delta m}{m} = 0.395 * \frac{Nh}{A}$$

On peut donc choisir d'injecter les deux faisceaux avec une phase différente pour les éjecter en phase ou, inversement, de les injecter en phase et de les extraire déphasés. Dans le premier cas, le gain d'énergie par tour, la dispersion en énergie, et donc la séparation des tours sont optima

en fin d'accélération, ce qui garantit de bonnes conditions d'extraction. Nous choisissons donc d'éjecter en phase, ce qui implique un déphasage à l'injection que l'on restreint à $\Delta\phi_{inj} = 60^\circ$ ($\pm 30^\circ$). On obtient ainsi une condition reliant le nombre de tours N , l'harmonique h et le nombre de nucléons A :

$$\frac{Nh}{A} \leq 150$$

En conséquence, il est souhaitable d'avoir:

- un grand gain d'énergie par tour pour diminuer N ;
- un faible harmonique;
- un élément lourd.

Sur la figure 1, nous avons représenté le schéma de principe du bicyclotron. L'injection nécessite deux plateformes haute tension, ainsi que deux systèmes de groupement, pour la source de X^+ et pour la source de X^- . Une fois les groupeurs passés, on peut utiliser une ligne unique pour injecter dans un CSS à secteurs droits. L'injection et l'extraction sont conventionnelles avec en plus la possibilité d'utiliser certains éléments magnétiques pour les deux faisceaux. Deux cavités accélératrices monogap (h pair) ou double gap (h impair) sont placées dans deux vallées opposées. Les deux faisceaux extraits sont superposés dans une ligne moyenne énergie qui peut comporter un épilucheur placé le plus près possible de l'entrée d'un éventuel booster pour profiter de la compensation de charge d'espace.

2.2 Charge d'espace, effet faisceau-faisceau

Dans le cyclotron, les trajectoires se croisent deux fois par tour, mais, comme les faisceaux sont injectés déphasés, les paquets ne s'interpénètrent vraiment que sur les derniers tours. Comme les énergies sont faibles (dizaine de MeV/u) l'effet électrostatique est dominant et il y a neutralisation partielle de la charge deux fois par tour pour les h paquets par tour, en particulier sur les derniers tours. En comparaison avec un cyclotron à un seul faisceau les effets de charge d'espace ne peuvent donc être que plus faible.

Dans la ligne moyenne énergie, les deux faisceaux étant éjectés en phase, ceux-ci se superposent et il y a compensation de la charge d'espace. Pour la ligne d'injection, le problème est plus complexe car, après passage dans les groupeurs, les paquets formés sont intercalés, et les forces longitudinales (système de groupement) ainsi que les forces radiales (focalisation) peuvent être importantes .

De toute façon, grâce au CSS la ligne d'injection et les conditions d'adaptation à l'injection sont plus simples à réaliser que dans un cyclotron compact, et la focalisation transverse peut être plus importante. Avec un champ faible et un petit nombre de tours la séparation des tours à l'éjection est suffisante pour permettre une extraction monotour même avec un système d'extraction simple.

En ce qui concerne les interactions entre paquets, il est possible d'avoir des échanges de charges. Cet effet reste à étudier, cependant on peut raisonnablement le négliger dans un premier temps, le nombre de collisions et les sections efficaces étant relativement faibles.

3 Exemple, l'accélération de H^+ et H^-

3.1 Choix des paramètres

Le réacteur sous critique proposé par *C. Rubbia* [1] nécessite quelques dizaines de mA de protons à 1 GeV. *N. Fiétier et P. Mandrillon* [2] proposent un accélérateur composé de cyclotrons en cascade avec:

- deux cyclotrons compacts injecteurs H^+ et H^- entre 0.1 et 10 MeV;
- un CSS 4 secteurs entre 10 et 120 MeV;
- un CSS 10 secteurs entre 120 MeV et 1 GeV.

A titre d'exemple, examinons les caractéristiques d'un bicyclotron susceptible de remplacer les deux cyclotrons injecteurs. Pour satisfaire la relation définie précédemment nous prenons:

$$\left. \begin{array}{l} N = 20 \\ h = 5 \end{array} \right\} \rightarrow \frac{Nh}{A} = 100 (\leq 150)$$

Donc une différence de phase d'injection pour extraire simultanément les deux faisceaux de:

$$\Delta\phi = \pm 20 \text{ dg}$$

Les paramètres choisis sont résumés dans le tableau 3.1; nous avons pris un champ faible pour avoir un grand rayon d'extraction et faciliter l'éjection monotour.

W_{inj} (MeV)	0.76
\bar{r}_{inj} (m)	0.36
W_{ext} (MeV)	10
\bar{r}_{ext} (m)	1.3
F (Mhz)	26
Harmonique	5
Nb cavités	2
Ouverture angulaire(dg)	36
V (kV)	125
Nb secteurs	4
Ouverture angulaire (dg)	45
\bar{B} (T)	0.35

TAB. 1 - *Caractéristiques du bicyclotron simulé*

3.2 Simulation numérique

Nous avons simulé l'accélération de deux faisceaux H^+ et H^- dans le bicyclotron avec les paramètres que nous venons de définir. Ces simulations ont été réalisées avec un code multiparticules (dérivé de NAJO) avec les approximations suivantes:

- sans charge d'espace;

- sans effet faisceau-faisceau.

Nous avons utilisé une carte de champ magnétique synthétique parfaitement isochronisée pour un ion de masse "moyenne", c'est à dire possédant la masse de l'hydrogène neutre. Les lois de phase obtenues pour la particule centrale des faisceaux de H^+ , H^- et du faisceau "moyen" H^0 sont représentées sur la figure 2.

Les caractéristiques des faisceaux injectés sont les suivantes:

$\delta W/W$ (%)	0
$\delta\phi$ (dg)	6
ϵ_r (π mm mrad)	5
δr (mm)	1.1

TAB. 2 - Caractéristiques communes des faisceaux de H^+ et H^- injectés

Comme il ne s'agissait que d'une étude de principe, l'injection n'a pas été simulée et l'éjection n'est assurée que par des éléments magnétiques. Sur la figure 3, nous avons tracé les trajectoires des particules centrales des faisceaux de H^+ et de H^- dans le plan médian du bicyclotron. L'évolution des deux faisceaux dans l'espace des phase en fonction du rayon au centre de la vallée d'éjection est représentée sur la figure 4.

Les caractéristiques des faisceaux extraits sont résumées dans le tableau 3.2. En injectant déphasé on accélère sur la flanc de la sinusoïde ce qui augmente la dispersion en énergie et l'émittance corrélée. Il serait possible de réduire cet effet en diminuant la dispersion en phase à l'injection ou en ajoutant une cavité de flat topping. Après optimisation des phases d'injection, on obtient une symétrie presque parfaite des deux faisceaux accélérés, tant pour la particule centrale que pour les écarts types.

FAISCEAUX EXTRAITS			
	H^-	H^+	Différence
Particule centrale			
Energie	10.272 (MeV)	10.268 (MeV)	$1.2 * 10^{-3}$ (%)
Rayon	1.2195 (m)	1.2199 (m)	0.4 (mm)
Phase	-26.38 (dg)	-26.43 (dg)	0.05 (dg)
Valeurs r.m.s des faisceaux			
$\delta W/W$ (%)	1.9	1.6	0.3
$\delta\phi$ (dg)	6.0	6.1	0.1
$\epsilon_{r,tot}$ (π mm mrad)	20.0	18.7	1.3
$\epsilon_{r,dc}$ (π mm mrad)	3.3	4.7	1.4
δr_{tot} (mm)	12.1	7.9	4.2
δr_{dc} (mm)	1.6	1.9	0.3

TAB. 3 - Caractéristiques des faisceaux de H^+ et H^- extraits du bicyclotron.

4 Conclusion

Ce document présente une étude de principe, et les paramètres du bicyclotron devraient être optimisés pour un cas donné. Néanmoins, nous avons montré qu'un bicyclotron pourrait fournir au moins la même intensité que deux injecteurs. De plus, un CSS à fréquence et champ fixe est une machine sans difficulté de construction et d'opération aisée. Il faut cependant deux plateformes haute tension, mais après passage dans les groupeurs les lignes peuvent être en partie communes aux deux faisceaux.

Pour poursuivre l'étude du bicyclotron, il faudrait développer un code intégrant les effets des forces de charge d'espace entre deux faisceaux et éventuellement tenir compte des échanges de charges.

Références

- [1] C. RUBBIA and J.A. RUBIO. *A tentative programme towards a full scale energy amplifier.* CERN/LHC/96-11
- [2] N. FIÉTIER and P. MANDRILLON. *A cyclotron based accelerator for driving the energy amplifier* proc. 14 ICC, Capetown octobre 95

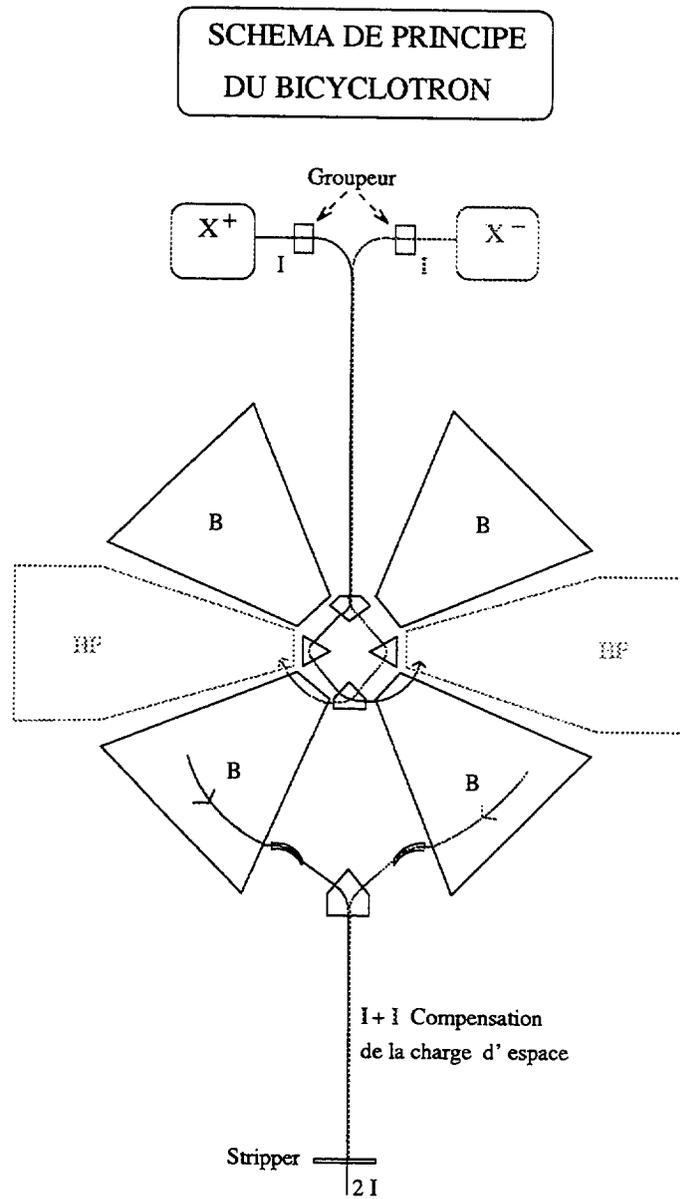


FIG. 1 - Schéma de principe du bicyclotron, ici avec deux cavités résonantes bigap

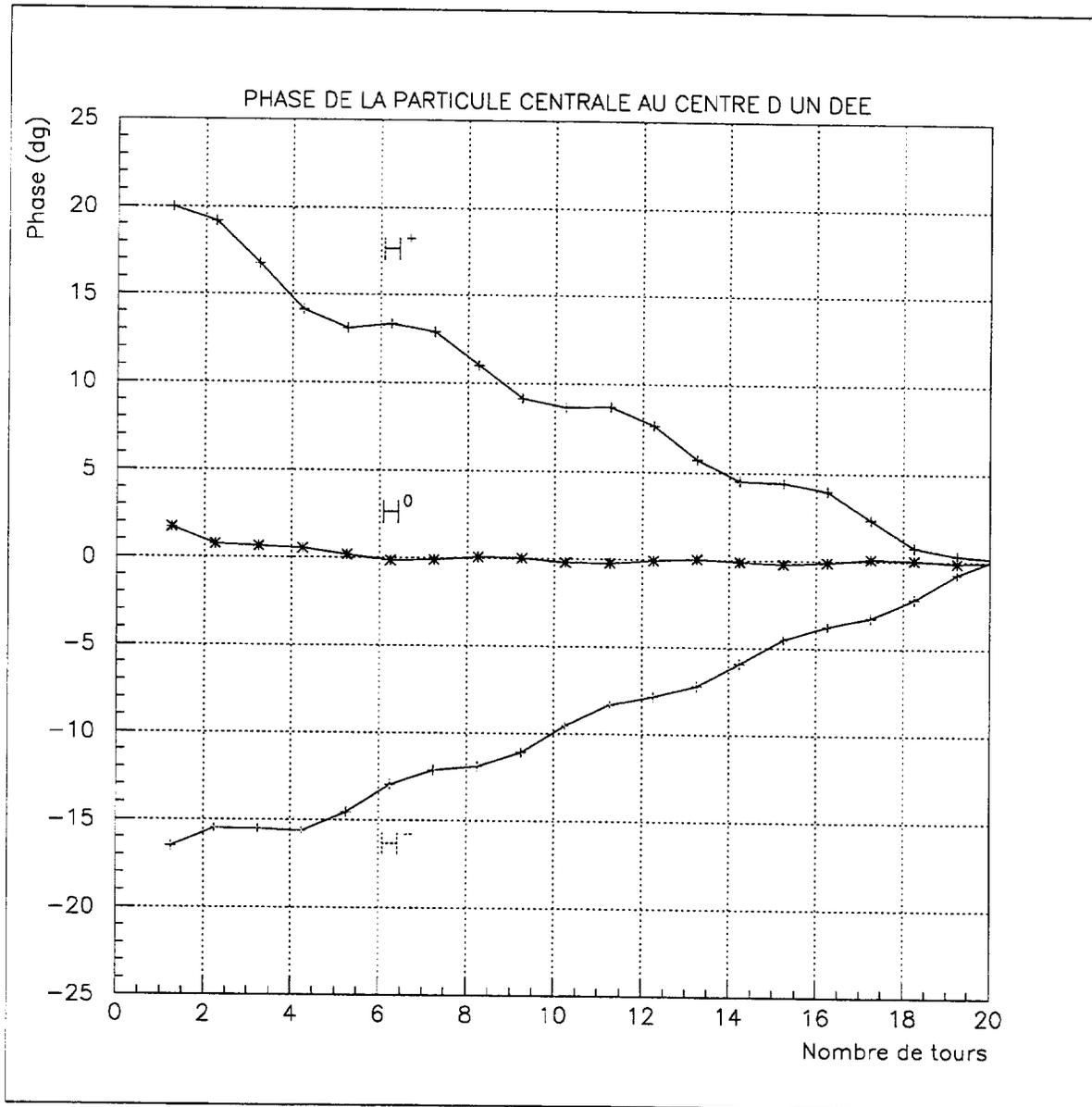


FIG. 2 - Phase de la particule centrale en fonction du nombre de tours pour les deux faisceaux de H^+ et H^- ainsi que pour le faisceau isochrone de masse moyenne H^0 au centre d'un dee

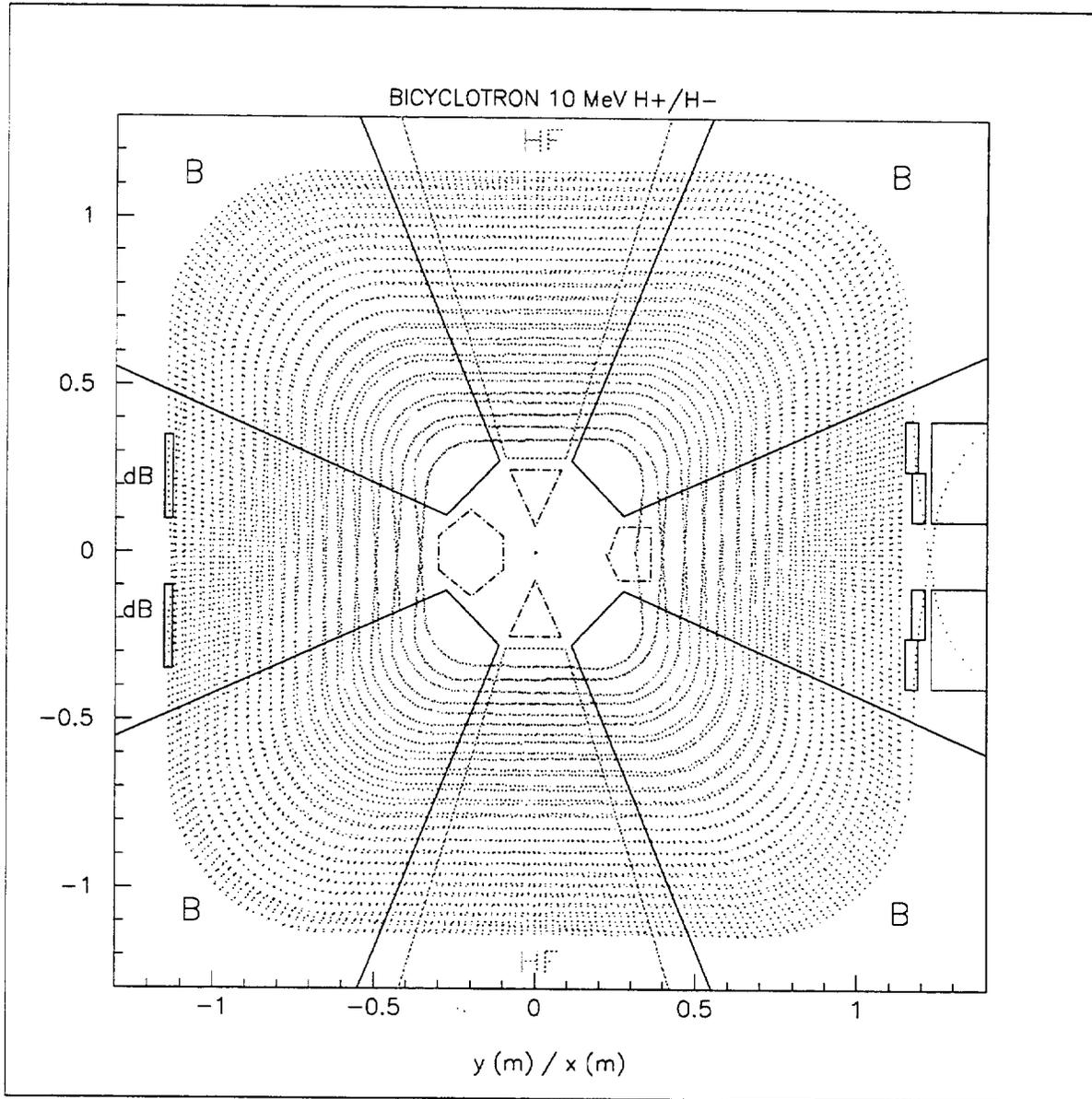


FIG. 3 - Trajectoire de la particule centrale des deux faisceaux de H^+ et H^- dans le bicycotron

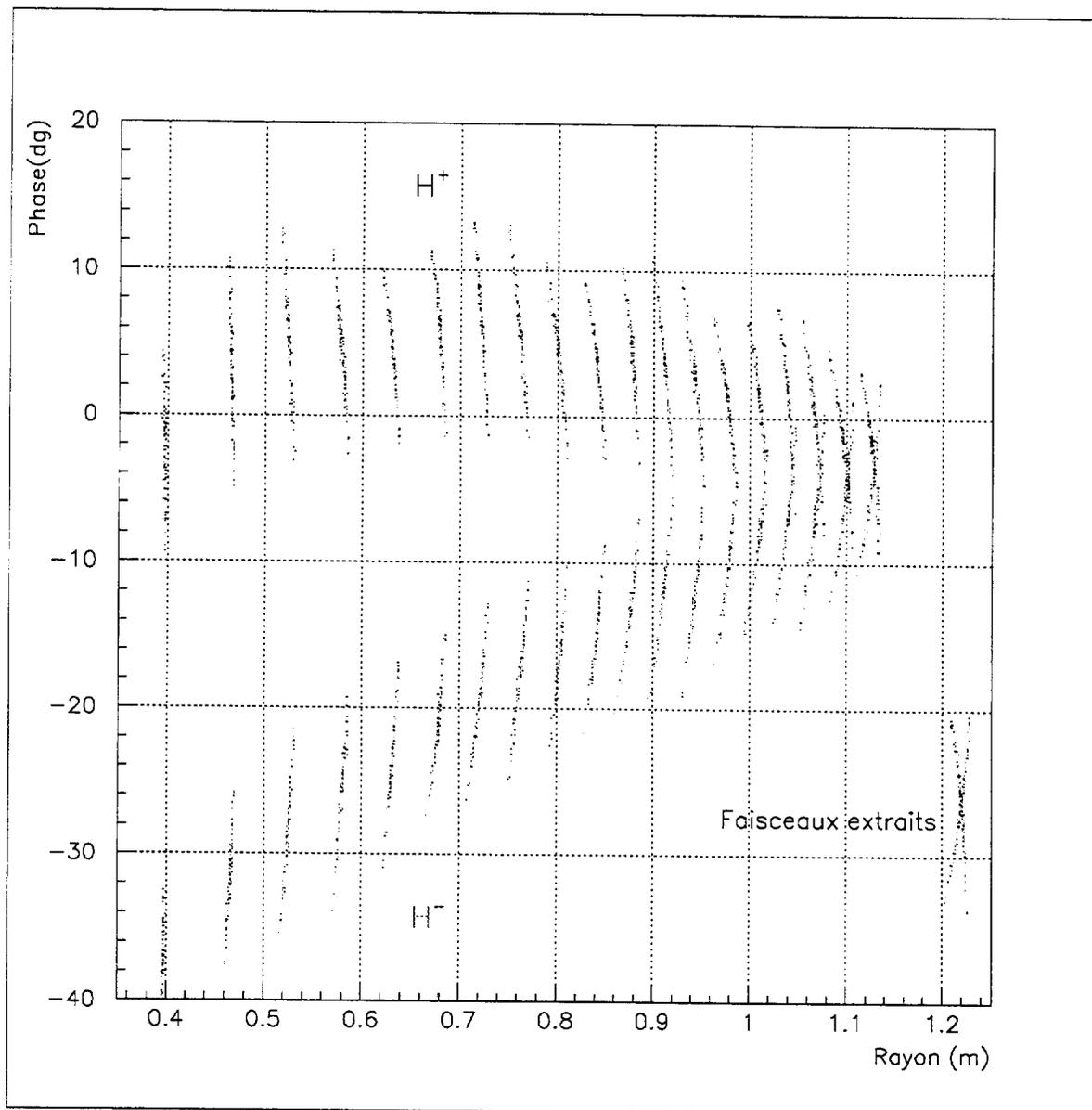


FIG. 4 - Variation de la phase en fonction du rayon pour les deux faisceaux de H^+ et H^- au centre de la vallée d'éjection. Les paquets se recouvrent partiellement sur les cinq derniers tours quand les deux faisceaux deviennent isochrones, et ils sont extraits à la même phase.

