

Université Paris – sud 11
Ecole Doctorale Particules, Noyaux et Cosmos-ED517
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire-UMR8607
Discipline: Physique des Particules et Accélérateurs

THESE DE DOCTORAT

présentée par

Illya DREBOT

Electron beam dynamics with and without
Compton back scattering

La Dynamique des paquets d'électrons en absence et
en présence de rétrodiffusion Compton

Soutenu le 7 Novembre 2013

Résumé

Ce document présente mon travail sur la dynamique transverse et longitudinale non linéaire d'un faisceau d'électrons dans ThomX, une nouvelle source de rayons X basée sur la rétrodiffusion Compton.

Au cours de ce travail j'ai développé un code de simulation contenant les modèles théoriques pour calculer la dynamique non linéaire transverse et longitudinale sous l'influence de rétrodiffusion Compton. Les processus étudiés incluent les effets collectifs tels que la force de charge d'espace longitudinale, les effets de la résistivité des parois, le rayonnement synchrotron cohérent et la diffusion interne au faisceau. J'ai aussi simulé un algorithme de boucle de rétroaction longitudinale et étudié l'effet de la latence de la boucle dans les simulations pour comprendre son effet sur la dynamique du faisceau.

Ce code permet d'effectuer une simulation complète en 6 dimensions de la dynamique d'un faisceau dans un anneau sous l'effet de rétrodiffusion Compton en prenant en compte la stabilisation par boucle de rétroaction pour les 400 000 tours (20ms) d'un cycle d'injection. L'une des fonctionnalités importantes de ce code est qu'il peut être exécuté sur une ferme d'ordinateurs. En utilisant ce code j'ai étudié la dynamique des électrons dans ThomX et le flux de photons Compton diffusés. J'ai analysé la contribution relative de chaque phénomène physique à la dynamique globale du faisceau et comment minimiser leurs effets disruptifs.

Dans le cadre de mon travail sur la boucle de rétroaction sur la phase longitudinale j'ai aussi mesuré et analysé les propriétés de la cavité RF ELETTRA à utiliser sur ThomX.

Introduction

Les progrès récents dans le domaine des lasers et des électrons en technologie d'accélération a ouvert la possibilité de créer une source de grande énergie monochromatique et de haute intensité de rayons γ et de rayons X sur la base de la rétrodiffusion Compton (CBS) de photons laser sur des électrons relativistes.

L'idée de la production de photons de haute énergie sur la base de Compton rétrodiffusion a été proposée en 1951-52 par H. Motz [1] et K. Landecker [2]. Plus tard, la méthode de rétrodiffusion Compton a été développée par R. H. Milburn [3]. Mais la disponibilité de source intense photon à ce moment-là était très faible et en raison de la petite section de rétrodiffusion Compton ($\sigma_c \sim 6.6 * 10^{-29} \text{ m}^2$), il n'était pas possible d'utiliser cette méthode pour des applications pratiques.

Au cours des 10 dernières années, le progrès des techniques de laser et d'accélération nous ont donné la possibilité de produire des rayons X sur la base

de laser Compton rétrodiffusion des électrons relativistes et recevoir un taux de flux de sortie de 10^{12} à 10^{13} photons/sec, un écart angulaire de quelques mrad , avec une énergie de photons diffusés de quelques dizaines de keV. La relativement faible énergie initiale des électrons dans la plage de 30 à 200 MeV , beaucoup plus faible que celle des sources de rayonnement synchrotron , donne la possibilité de construire un anneau de stockage compact . Par exemple pour la machine ThomX qui est conçu pour une énergie électronique de 50 MeV, aura une circonférence de 16 m et une superficie d' un 70 m^2 . Cela donne la possibilité d'installer des sources lumineuses de rayons X sur la base de Compton rétrodiffusion comme ThomX dans les hôpitaux et les universités ou facteurs de l'industrie directement .

Applications des rayons X de haute énergie

Les principales caractéristiques des sources de rayons X sur la base de Compton rétrodiffusion comme compacité , faible coût et les paramètres des faisceaux générés comme la bande passante de l'énergie , la luminosité et la monochromie rendre comparable avec les sources de rayonnement synchrotron modernes et les rendre attractifs pour un large éventail d' applications telles que:

- Les applications médicales et la microscopie à rayons X , microscopie à rayons X des échantillons biologiques . Angiographie .
- topographie X - Ray et la diffraction , l'étude des transitions de phase , exprimer la topographie de cristaux semi-conducteurs ;
- Étude □ de l'environnement (analyse des polluants , etc) ;
- patrimoine culturel (analyse non destructive de peinture et autres arts objets)

Compton rétrodiffusion

Compton rétrodiffusion est la collision d'un photon avec une électrons relativistes . Nous définissons l'énergie du photon que ϵ_0 , l'énergie des électrons comme E_0 , l'énergie de l'électron comme mc^2 et $\gamma = E_0/mc^2$ reste et nous supposons $E_0 \gg \epsilon_0$. Les photons seront dispersés dans un cône avec un angle d'ouverture d'environ $1 / \gamma$ autour de la direction du mouvement des électrons .

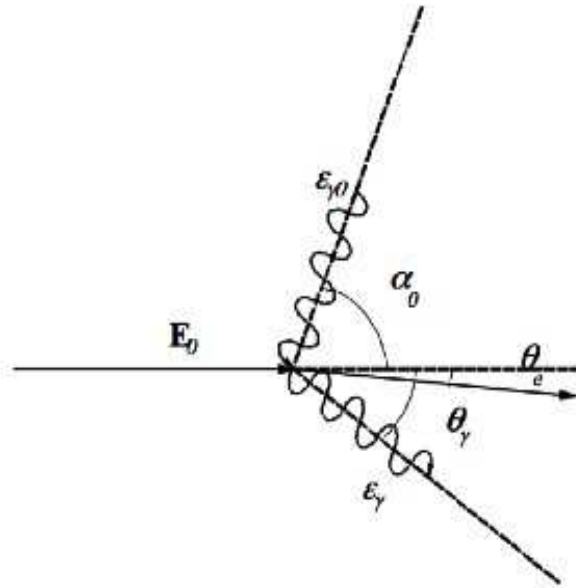


Figure 1.5: Kinematic of scattering process.

Simulation numérique

Pour les simulations numériques de diffusion Compton, nous utilisons le CAIN de code écrit par K. Yokoya. CAIN est un code FORTRAN Monte-Carlo autonome pour l'interaction impliquant des électrons de haute énergie, positrons et photons [20]. Le principal avantage de l'utilisation de ce code pour nous, c'est que le code CAIN donne-nous la possibilité d'utiliser la distribution non gaussienne des électrons. Cela nous donne la possibilité d'intégrer le code CAIN en fonction dans un code de suivi 6D pour simuler la diffusion Compton à la dynamique longitudinale et transversale du paquet d'électrons, de voir l'évolution du faisceau d'électrons sous l'effet Compton dans le ring et comment cette évolution influencera le flux de photons diffusés.

Disposition générale et régime de travail de la ThomX

Générateur de rayons X

ThomX est un projet de source de rayons X sur la base de la diffusion Compton des photons laser et les électrons relativistes. Le paquet d'électrons est stocké dans un anneau de stockage permettant de collision avec l'impulsion laser sur chaque tour. La durée de vie du faisceau est d'environ 400 000 tours, ce qui correspond à 20 ms. L'utilisation d'un anneau de stockage d'électrons circulaire donne un avantage significatif sur les sources Compton base Linac - où les électrons peuvent être utilisés qu'une seule fois pour produire un flux élevé. ThomX comme source de rayons X se compose de six parties principales qui sont présentés dans la figure 1.13 et énumérés ci-dessous :

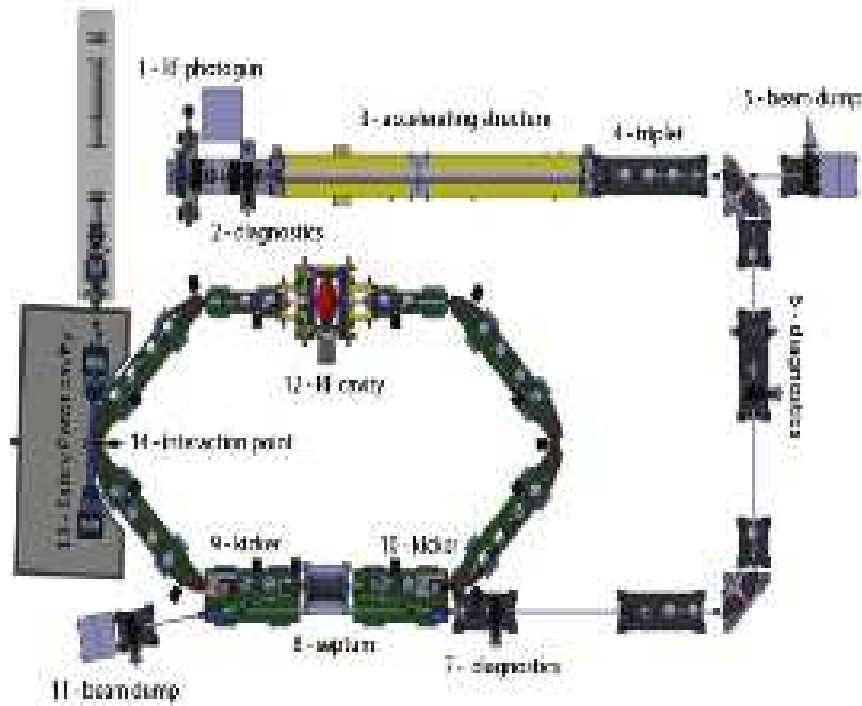


Figure 1.13: Layout of the ThomX source. [23].

- 1 . Photo canon à électrons pour produire électrons groupe 1 nC .
- 2 . Section d'accélération linéaire pour accélérer les électrons à 50 - 70 MeV.
- 3 . Ligne de transfert .
- 4 . Anneau de stockage avec la circonférence de 16,8 m .
- 5 . Point d'interaction avec la cavité Fabry-Perot .
- 6 . Laser .

Comme nous pouvons le voir ThomX peut être divisé pour trois composants principaux : injection , anneau , laser et la cavité FP .

Dynamique de faisceau à ThomX

Dans ce chapitre, je décris les modèles théoriques de la dynamique des faisceaux que j'utilise dans le code de simulation . La dynamique de faisceau 6D peuvent être divisés en deux partie principale du mouvement transversal et le mouvement longitudinal . Ils sont couplés par des éléments non diagonaux dans les matrices de transport ou par le système de couplage des équations du mouvement dans le formalisme hamiltonien . Dans ce chapitre, j'ai aussi des modèles actuels de calcul des effets collectifs tels que la charge longitudinale de l'espace , un mur de résistance , rayonnement synchrotron cohérent et diffusion dans le faisceau .

Les modèles de mouvement transversal à accélérateurs circulaires

Il existe deux principaux modèles pour décrire les mouvements transversaux de particules chargées dans un accélérateurs circulaires :

- matrices de transport .
- Le formalisme hamiltonien avec la théorie des perturbations .

dynamique longitudinale

Dans ce chapitre, je décris les principaux effets qui ont une incidence sur le mouvement longitudinal d'un seul groupe dans le ring. Les électrons perdent de l'énergie en raison de Compton Retour diffusion , le rayonnement synchrotron et les effets collectifs . Ces pertes doivent être compensées par l'ajout d' énergie aux électrons de la cavité RF . Ces effets avec dépendent de la longueur de l'orbite et la dynamique de la particule dans l'anneau va créer une dynamique longitudinale qui est décrite dans ce chapitre .

Représentation de la grappe par des macro- particules

Dans le ring ThomX la charge du paquet d'électrons injecté est de 1 nC . Cela correspond à environ 10^{10} électrons dans un seul groupe . Pour simuler la durée de vie du faisceau complet ~ 20 ms cela nécessiterait une grande quantité de mémoire et temps d'ordinateur pour simuler chaque électron individuel . Afin de réduire les besoins en mémoire et le temps de calcul que nous recueillons électrons dans des groupes appelés macro- particules . La charge d'un macro- particule est nommé poids. Dans mes simulations d'un poids moyen de macro- particules est de l'ordre de $6 * 10^5$. Cela signifie que la pleine bande peut être représenté par 10 000 macro- particules .

Effets collectifs

L'interaction d'un faisceau de particules chargées avec ce sont les propres champs électromagnétiques (champs de sillage) induites dans la paroi du tube de faisceau sous vide peut conduire à des effets collectifs et de modifier la dynamique du faisceau . La conséquence la plus importante associée à ces effets collectifs est l'instabilité de la dynamique transversale et longitudinale . Si les conditions de résonance sont obtenues d'une petite déviation de l'énergie du faisceau ou de phase peut être amplifié par les champs de sillage. Cette rétroaction positive peut conduire à une augmentation de l'amplitude des oscillations synchrotron et comme conséquence de réduire la qualité du faisceau et même détruire la poutre.

Domaine de réveil formalisme

Effets collectifs peuvent être estimées en utilisant le champ formalisme de suite . L'intégrale normalisée sur la force électro- magnétique (force de Lorentz) en raison des champs excités par une charge ponctuelle ou de la distribution de la fonction delta est appelée la fonction de réveil [38] . La fonction de réveil est la fonction de réponse à l'excitation par la charge ponctuelle . Dans le cas des grappes ultra- relativistes la fonction de réveil est déterminé seulement par la forme et des paramètres électro-magnétiques de la structure du tube de faisceau .

Intra faisceau diffusion

Au cours de leur mouvement dans un anneau de stockage , les électrons subissent des oscillations transversales dues aux forces de Coulomb à l'intérieur de la poutre et les éléments magnétiques dans le noyau . Les collisions entre les particules se produisent en raison de leurs mouvements relatifs conduisant à une augmentation de l'émittance . Cet effet est appelé Intra faisceau diffusion (IBS) . En cas de collision avec un grand transfert d'énergie cinétique des particules peuvent être éjectées au-delà de la séparatrice , entraînant une diminution de la durée de vie du faisceau (simple effet Touschek) . Collisions stochastiques avec petit élan de plomb à une émittance accrue sans perte de l'électron (effet de Touschek multiples [43]) . Cette augmentation permet de réduire la densité du faisceau et par conséquent réduira le flux des photons produits par Compton Scattering dos et aura une incidence sur la distribution d'énergie.

Descriptif du code de simulation

L'anneau ThomX a été conçu avec trois codes différents . La première conception de la lin - oreille et optiques transversales non linéaires a été réalisée avec le code BETA fournissant des fonctions petits bêta à IP (0,1 m) ainsi que de grandes ouvertures et aimant tolérances multi-pôles dynamiques . Une deuxième étape a été réalisée avec le code de TRACYIII dédié à longue suivi symplectique et Fréquence Carte Analyse (FMA) de traverser contrôle de la stabilité du mouvement de particules obtenues avec le code BETA . Jusqu'à ce stade , aucun des effets collectifs sont inclus et un code dédié a été développé notamment une collection de champ de réveil ainsi que la dynamique non linéaire . Il est un multi- particules suivi symplectique 6D restreint pour parfaits bord dur dérive, quadripôles et dipôles de longueur finie . D'autres éléments d'ordre supérieur , comme sextupôles , sont traités de la longueur mince rapprochement . La cavité de fréquence radio est simplement considéré comme un cosinus coup longitudinal . La cartographie à travers les éléments sont donnés par la solution exacte hamiltonien pour la dérive , dipôle (y compris les petites courbure) et le bord de dipôle effet . La cartographie quadripolaire est limité à de petits angles radiaux. Il en été par rapport à différents codes (TRACYIII , élégant, BETA et MADX) sur l'anneau SOLEIL et ThomX avec un soin particulier sur le dipôle et les effets de bord de dipôle . Les différents effets collectifs sont :

- Large modèle d'impédance de la bande.
- Charge espace longitudinal .
- Restive mur .
- Intra faisceau diffusion .

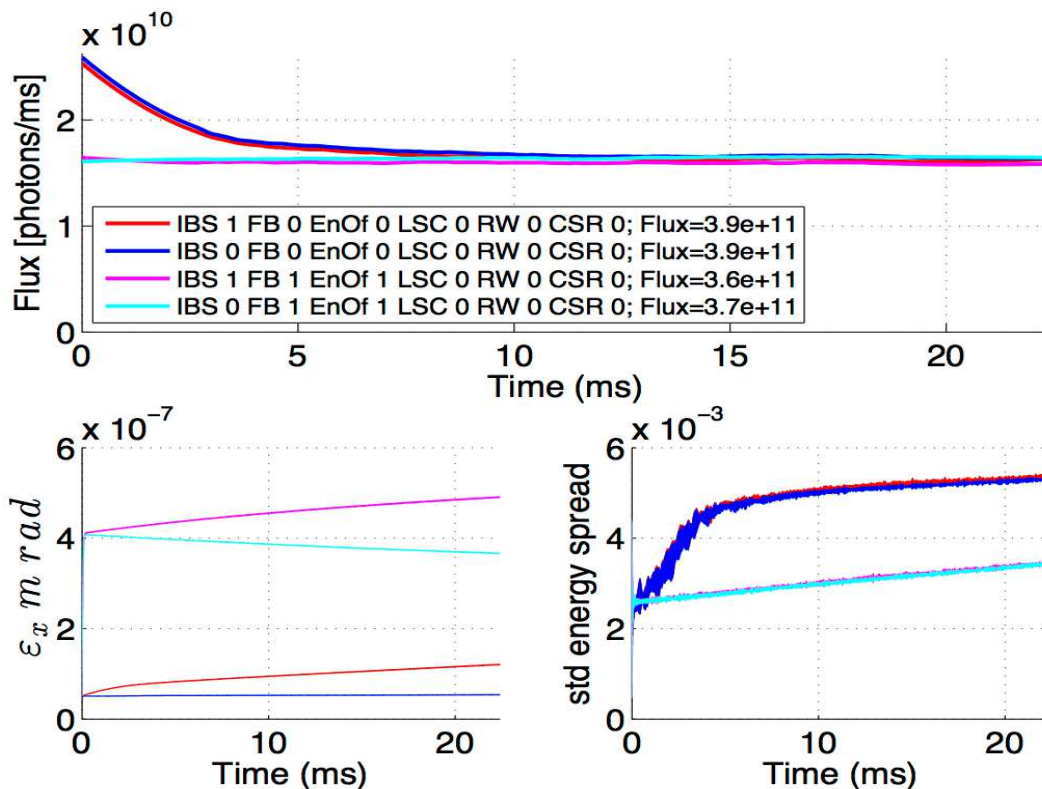
Ce code est développé avec le logiciel Matlab comme une boîte à outils ouverte dans laquelle des effets supplémentaires peuvent être facilement mises en œuvre , par exemple , Compton rétrodiffusion (CBS) . En outre , le procédé de contrôle peut être réglé sur linéaire ou non linéaire , avec ou sans les effets collectifs précédentes.

Comparaison de l'effet de tous les processus de le flux Compton

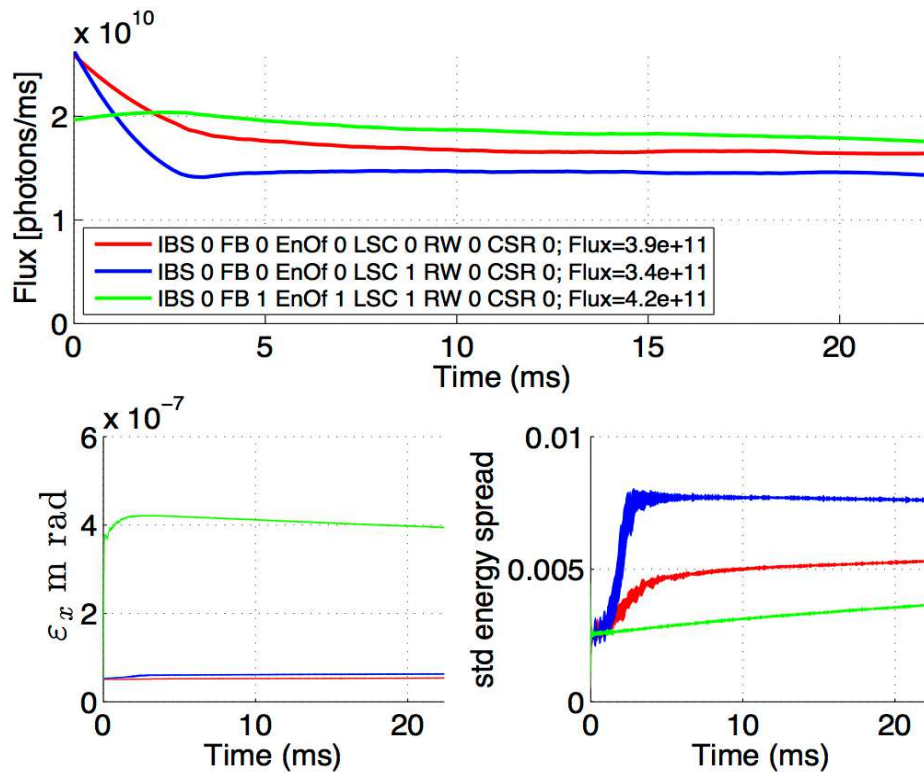
J'ai fait des simulations de tous les effets physiques inclus dans le code et étudié comment ils changent la dynamique de faisceau et par voie de conséquence comment ils affectent les flux énergétiques et des distributions de photons diffusés . J'ai fait des simulations avec tous ces effets ensemble pour voir comment ils vont affecter le faisceau simultanément et modifier l'influence de l'autre.

Pour cela, nous faisons deux séries de simulations un sans retour longitudinal (FB 0 ENOF 0) et un autre avec les informations longitudinal et avec une énergie initiale décalage de 1 % (FB 1 ENOF 1) . Le dernier nous donne la possibilité de supprimer l'effet destructeur de la RSE vu dans le chapitre précédent .

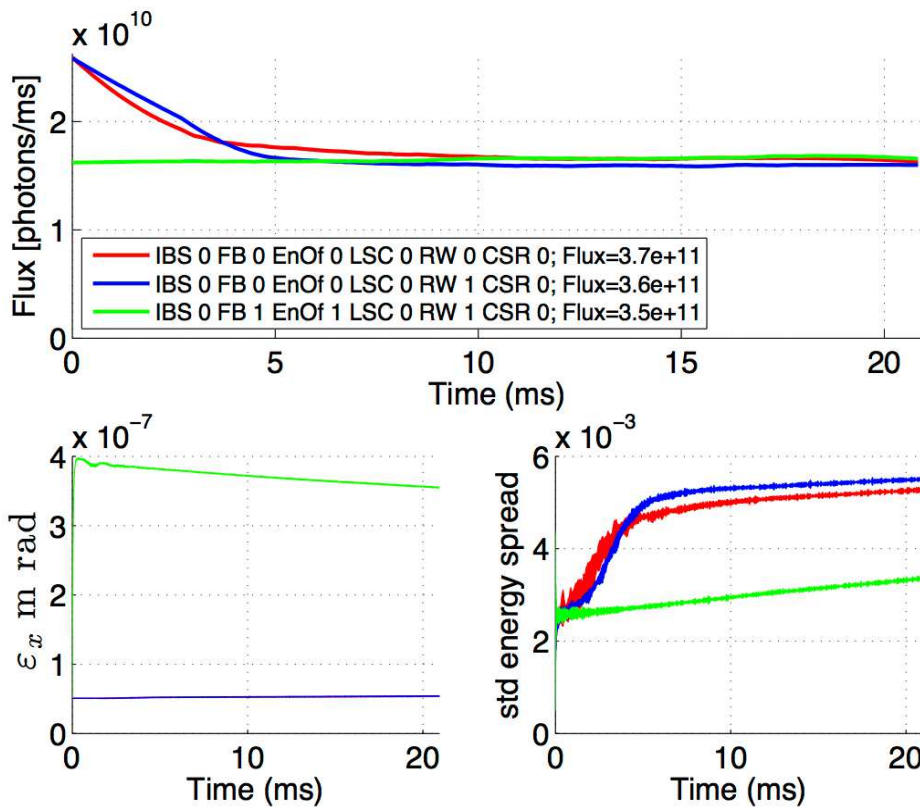
Toutes ces simulations ont été effectuées avec les distributions " en forme de banane " du paquet d'électrons et linéaire 6-D tas suivi non .



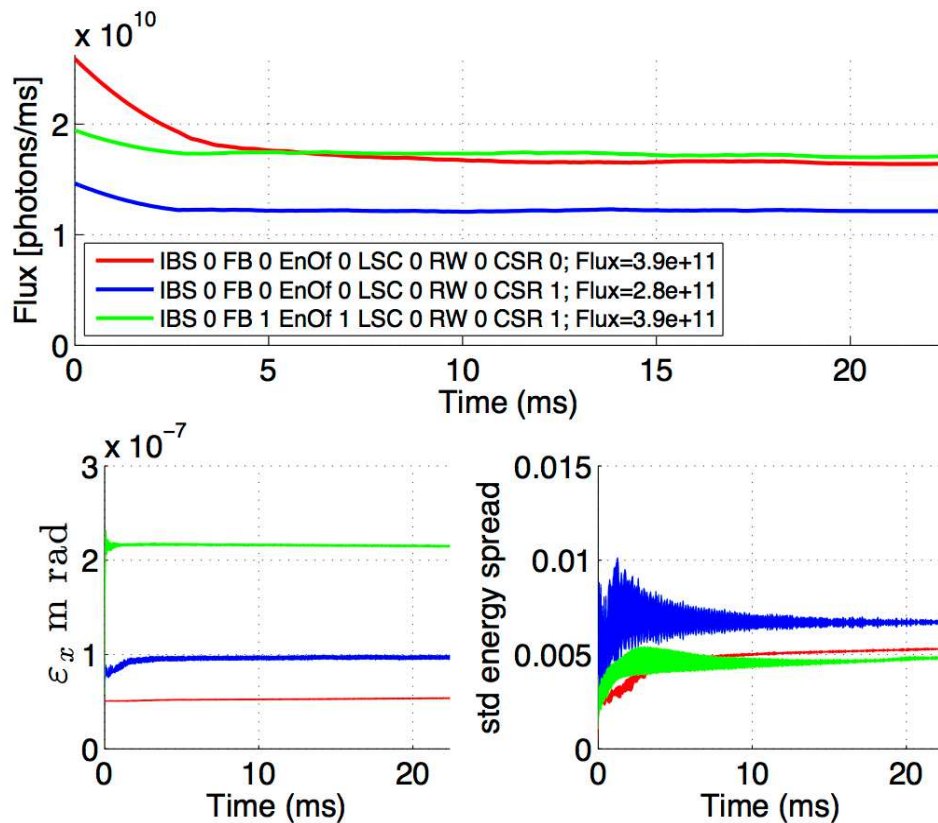
La figure montre que l'influence de l' IBS sur le flux de photons diffusés sera réduite si l'on considère non linéaire avec un suivi en 6-D . Cela est dû à l'augmentation de l'émittance et la propagation de l'énergie dans ce processus.



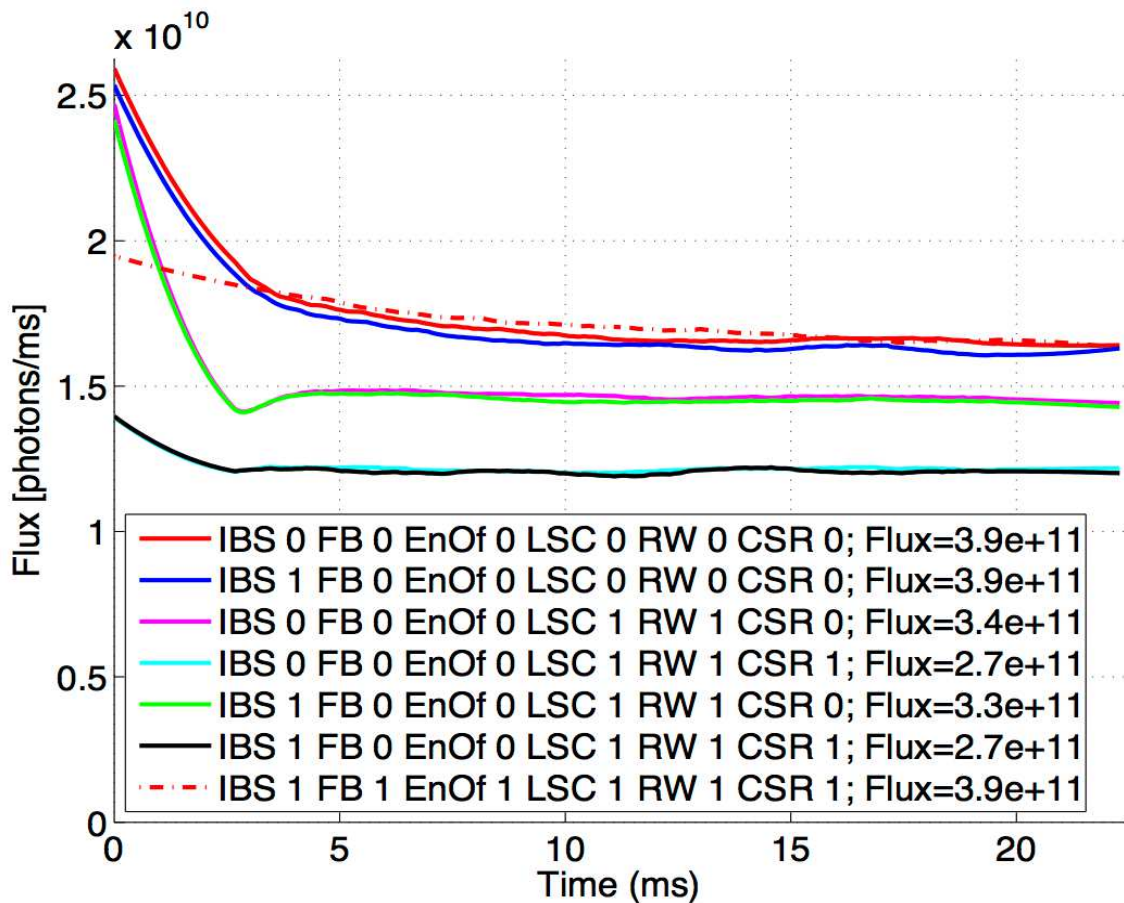
Lorsque LSC est ajouté aux simulations présentées dans la figure , nous voyons clairement l'effet de rétroaction longitudinal (FB) qui ne donne pas la possibilité de le domaine de réveil LSC à augmenter la propagation de l'énergie et de réduire l'amplitude des oscillations significatif énergie . La différence de flux au début s'explique par l'augmentation initiale de l'émittance horizontale grâce à l'énergie décalage initial . L'effet de RW est présenté dans la figure suivante.



Il sera également réduite par le FB longitudinal , mais par rapport à l' influence de la LSC RW sur la dynamique du faisceau est beaucoup plus petite et dans ce cas , nous voyons un grand effet sur le flux grâce à l'énergie décalage initial . Mais comme indiqué dans le chapitre sur la RSE une énergie décalage initial est nécessaire pour réduire l'effet destructeur de la RSE et nous pouvons le voir sur l'évolution du nombre de particules macro dans le peloton . Cette influence de l'énergie initiale de décalage sur la dynamique du faisceau ainsi que FB longitudinal est présenté dans la figure suivante.



Les facteurs qui causent cette différence de flux dans la figure 5.41 sont la perte d'électrons en raison de la RSE et les différentes positions du centre de masse pour les électrons sans retour longitudinal tel que présenté dans la figure 5.42 . L'énergie décalage initial va conduire à une augmentation de la taille transversale de la bande et donc une réduction d'un flux . Cependant ce décalage énergie atténué l'effet destructeur de la RSE conduit à des pertes d'électrons moins et la position de la grappe plus stable et offre un flux plus élevé . De la simulation présentée à la figure 5.43 , nous pouvons clairement voir que pour la ThomX sonner les phénomènes physiques dominants qui fournissent les plus grandes pertes de faisceau et comme conséquence de réduire le flux de photons diffusés est la RSE . L'effet de la méthode que j'ai proposé pour atténuer les effets de la RSE est illustré à la figure 5.41 . En mettant en œuvre FB longitudinal et l'injection du faisceau avec une énergie initiale de décalage du flux de photons diffusés est améliorée de 33%.



Conclusion

Dans ce document, j'ai présenté mon travail sur la dynamique non linéaire transversales et longitudinales d'un faisceau d'électrons dans un anneau de stockage utilisé comme source Compton .

Ceci est important dans le cadre du projet ThomX , une nouvelle source de rayons X basée sur la rétrodiffusion Compton. ThomX est un anneau de stockage d'électrons compact et la dynamique de faisceau études des paramètres machine que j'ai fait permettra au faisceau d'électrons de répondre aux exigences élevées de qualité au point de collision avec les photons laser .

J'ai étudié l'influence des paramètres du faisceau des électrons sur le flux et la distribution de l'énergie des photons Compton . J'ai également étudié l'influence des déviations et des erreurs de synchronisation sur ce flux .

Pour ce faire , j'ai travaillé sur un code qui prend en compte les principaux facteurs de Physique d'une dynamique des faisceaux comme Compton recul , la diffusion de intrafaisceaux et effet Touscheck .

Merci à ce code , j'ai trouvé une forte influence des effets non linéaires et injection non identifié sur la dynamique du faisceau .

J'ai présenté la possibilité de demander une évaluation longitudinale et l'effet du retard de l' un feed-back dans la simulation pour explorer son effet

d'amortissement et un retour RF directe . Dans ce contexte , j'ai participé à la mesure et l'analyse de la cavité RF pour ThomX .

J'ai aussi présenté des effets collectifs tels que la charge d'espace longitudinal , paroi résistive et rayonnement synchrotron cohérent qui affectent le faisceau dans l'accélérateur .

Ceci permet d'avoir une simulation 6D complète de la dynamique du faisceau en un anneau Compton en tenant compte de la stabilisation de rétroaction pour les spires 400 000 (~ 20 ms) d' un cycle d'injection.

Ce code a pour caractéristique importante de combiner 6D non suivi linéaire avec des effets collectifs , les informations de phase longitudinal , diffusion Compton dans le faisceau et la rétrodiffusion dans la même simulation . Ce code de simulation peut être exécuté sur un ordinateur de ferme .

Intra faisceau diffusion est l'un des processus les plus de calcul intensif, mais je mis en œuvre une méthode simplifiée qui réduit le temps de calcul d'un facteur de 100 , sans augmentation significative des incertitudes .

J'ai vérifié que les effets de la diffusion de intrafaisceaux est très forte à l'injection en raison de la longueur de la bande à court et petites émittances transversales et ses effets deviennent plus petits avec une taille de faisceau de plus en plus . J'ai aussi montré que l'effet de diffusion de la intrafaisceaux sur les distributions d'énergie des photons diffusés est causée par l'augmentation de la dynamique transversale du paquet d'électrons .

J'ai vérifié que l'impact négatif de certains effets collectifs tels que la charge d'espace longitudinal et la paroi résistive et décalage d'injection peut être atténuée par la mise en œuvre d'une rétroaction de phase longitudinal .

J'ai trouvé que l'effet du rayonnement synchrotron cohérent domine la dynamique du faisceau en raison de la longueur très courte de groupe à l'injection .

Je présente une stratégie visant à réduire l'influence destructrice et perturbateurs du rayonnement synchrotron cohérent par les évaluations longitudinal à l'aide avec une énergie de l'accélérateur linéaire décalage initial .

Dans l'avenir, le code que j'ai développé et ces simulations aideront les opérateurs de ThomX d'avoir une bonne compréhension de la dynamique du faisceau , en particulier lors de sa phase de mise en service devrait débuter en 2015.