

Premiers résultats de l'expérience



au



Patric Muggli, pour la collaboration AWAKE

Max Planck Institute for Physics, Munich

CERN

muggli@mpp.mpg.de

<https://www.mpp.mpg.de/~muggli>



Max-Planck-Institut für Physik
(Werner-Heisenberg-Institut)



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

P. Muggli, SPF-JA 10/05/2017

Premiers résultats de l'expérience

RÉVEILLÉE

au

Patric Muggli, pour la collaboration RÉVEILLÉE

Max Planck Institute for Physics, Munich

CERN

muggli@mpp.mpg.de

<https://www.mpp.mpg.de/~muggli>



Max-Planck-Institut für Physik
(Werner-Heisenberg-Institut)



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

P. Muggli, SPF-JA 10/05/2017

AWAKE?



Une expérience d'onde de sillage plasma
excitée par un faisceau de p^+
avec pour but
d'accélérer des e^- vers de hautes énergies (GeV-TeV)
pour la physique des particules: e^-/p^+

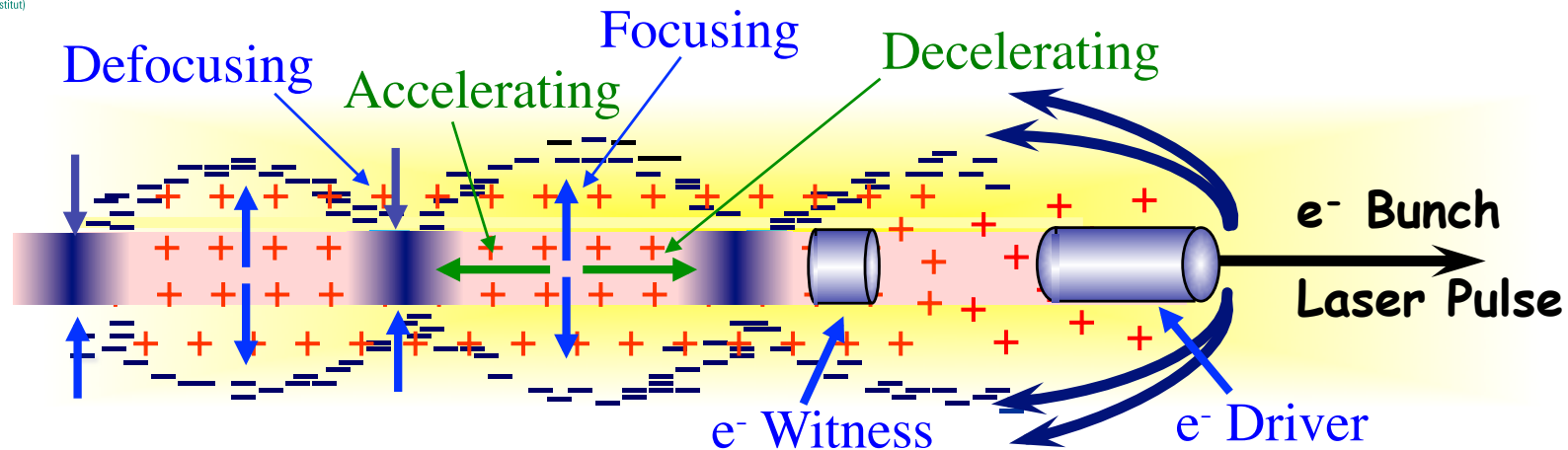
1^{er} pas: auto-modulation du faisceau de p^+ : STABLE!



*AWAKE = Advanced WAKefield Experiment



ONDE DE SILLAGE PLASMA



$$\omega_{pe} = \left(\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e} \right)^{1/2}$$

“Fréquence”
Plasma

$$E_{WB} = m_e c \omega_{pe} / e$$

Champ “claquage”
dans un plasma froid

$$\underline{E}_z = \left(\frac{m_e c^2}{\epsilon_0} \right)^{1/2} n_e^{1/2} \cong 100 \sqrt{n_e (cm^{-3})} = 1 \underline{GV / m}$$

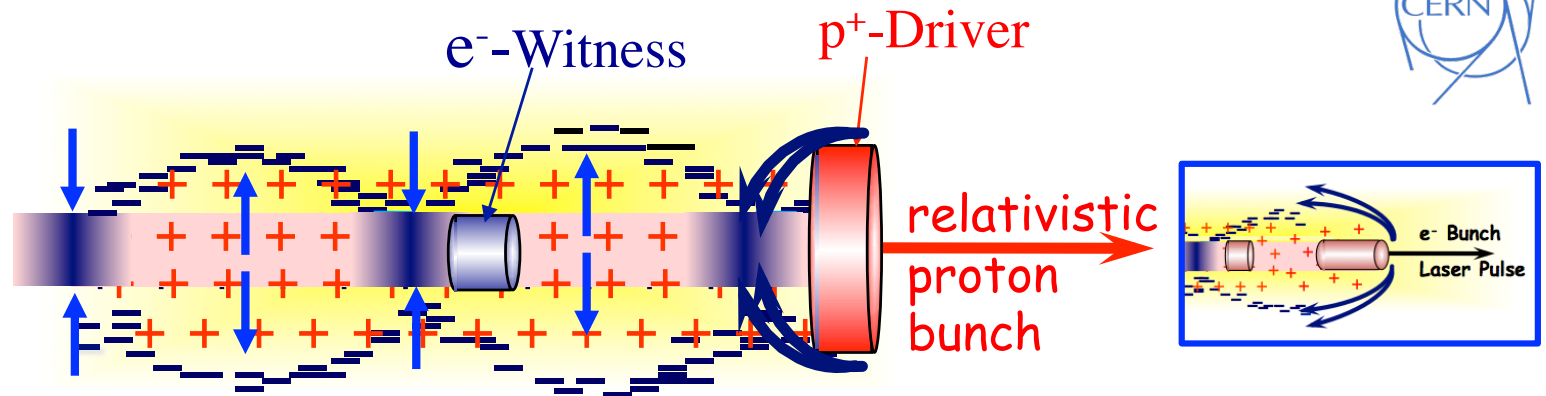
@ $n_e = 10^{14} cm^{-3}$





Max-Planck-Institut für Physik
(Werner-Heisenberg-Institut)

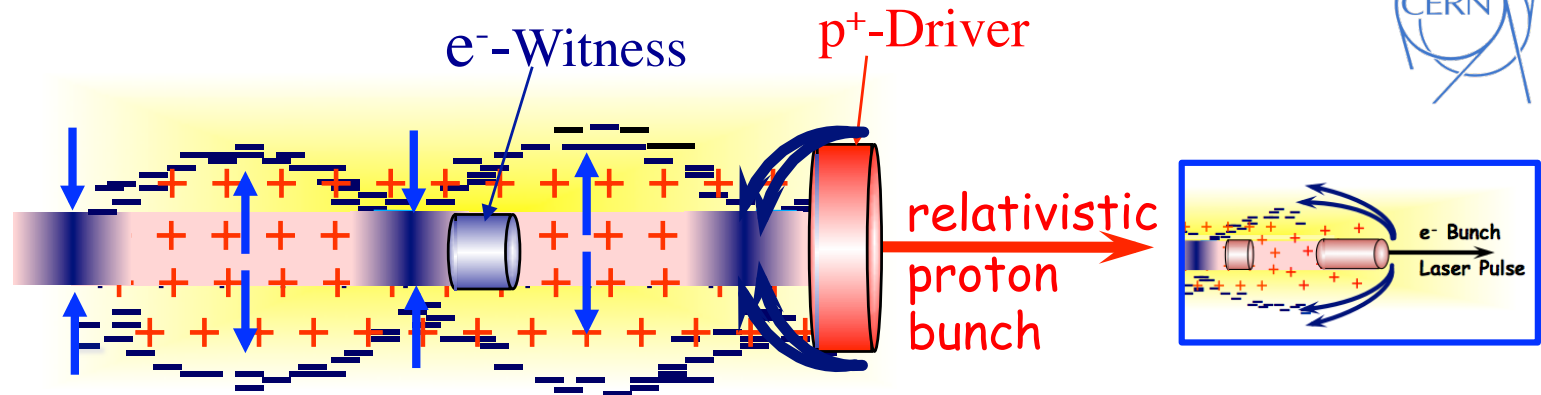
ONDE DE SILLAGE PLASMA & p^+



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



ONDE DE SILLAGE PLASMA & p^+



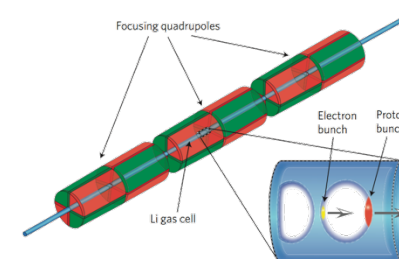
- ✧ ILC-CLIC, faisceau de 0.5TeV avec $2 \times 10^{10} e^-$ ~1.6kJ
- ✧ CERN-SPS, faisceau de 400GeV avec $10^{11} p$ ~6.4kJ
- ✧ CERN-LHC, faisceau de 7TeV avec $10^{11} p^+$ ~112kJ
- ✧ Un seul faisceau du LHC pourrait produire un faisceau de ILC en un seul module PWFA!

✧ Pas d'accélérateurs en étage ...

✧ Gradient moyen élevé! ($\geq 1 \text{ GeV/m}$, 100's m)

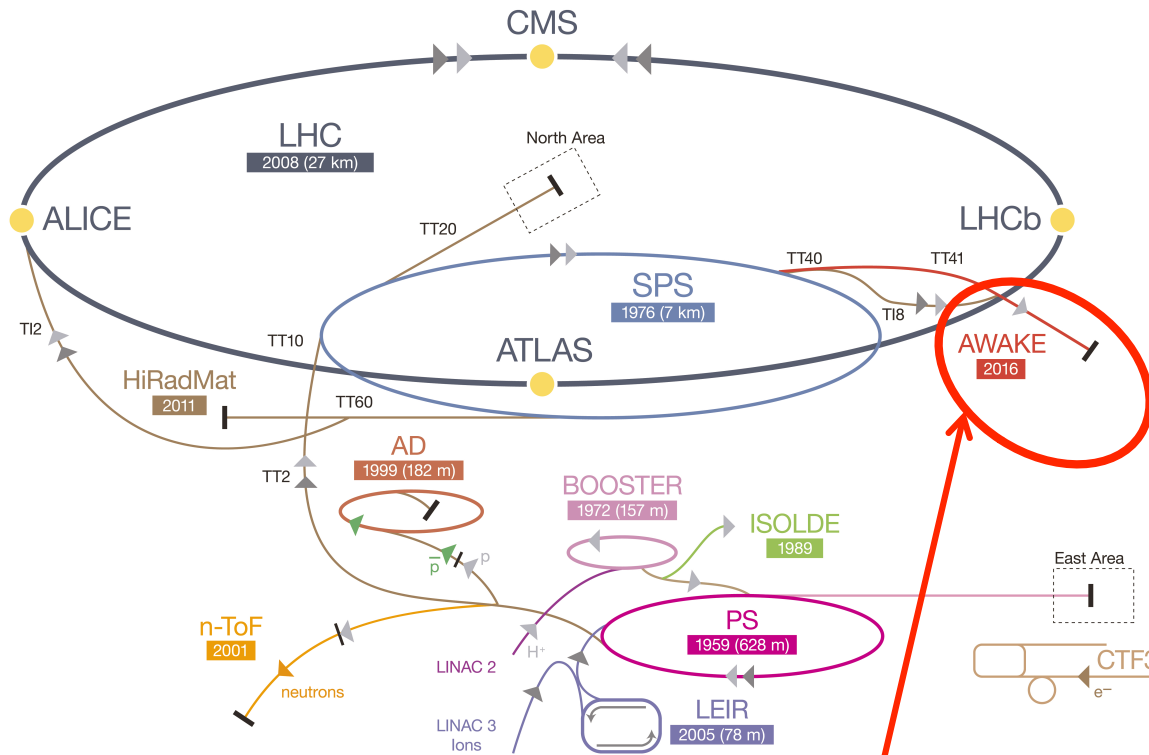
✧ Onde de sillages par faisceau e^+ : Blue, PRL 90, 214801 (2003)

Caldwell, Nat. Phys. 5, 363, (2009)



FAISCEAUX de PROTONS AU CERN

Le complexe d'accélérateurs au CERN

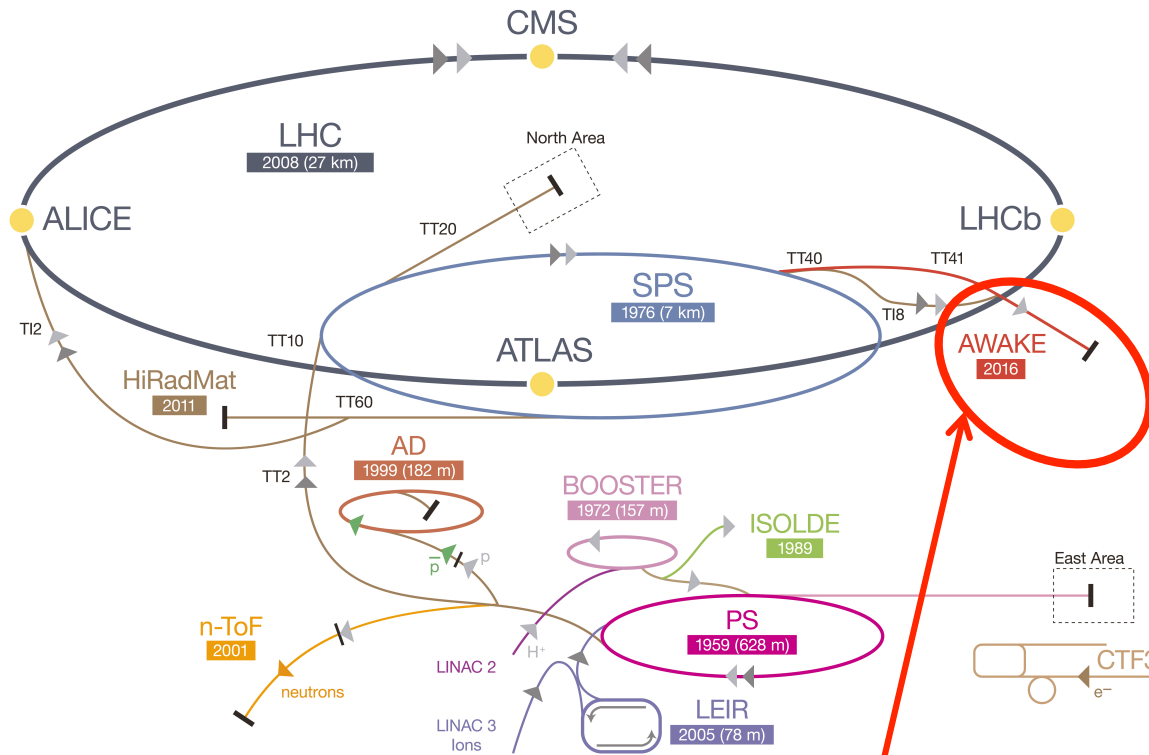


Parameter	PS	SPS	SPS Opt
E_0 (GeV)	24	400	400
N_p (10^{10})	13	10.5	30
$\Delta E/E_0$ (%)	0.05	0.03	0.03
σ_z (cm)	20	12	12
ε_N (mm-mrad)	2.4	3.6	3.6
σ_r^* (μm)	400	200	200
β^* (m)	1.6	5	5


 Aire d'expérience

✧ Faisceau du SPS: haute énergie, petite σ_r^* , longue fonction β^*

Le complexe d'accélérateurs au CERN



Parameter	PS	SPS	SPS Opt
E_0 (GeV)	24	400	400
N_p (10^{10})	13	10.5	30
$\Delta E/E_0$ (%)	0.05	0.03	0.03
σ_z (cm)	20	12	12
ε_N (mm-mrad)	2.4	3.6	3.6
σ_r^* (μm)	400	200	200
β^* (m)	1.6	5	5



Aire d'expérience

$\sigma_z = 12\text{cm}!!$

✧ Faisceau du SPS: haute énergie, petite σ_r^* , longue fonction β^*



Le complexe d'accélérateurs au CERN



Parameter	PS	SPS	SPS Opt
-----------	----	-----	---------

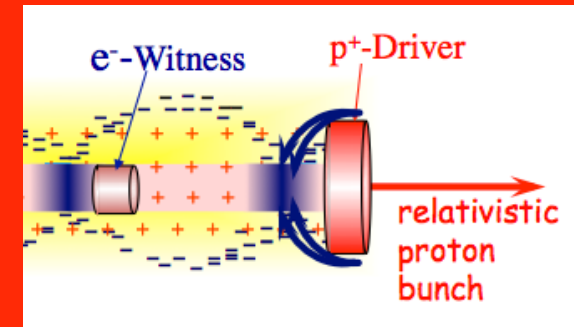
Loi d'échelle

$$\lambda_{pe} \sim \sigma_z, k_{pe} \sigma_z \sim 1$$

$$\lambda_{pe} = 2\pi c / \omega_{pe} = 2\pi c / (n_e e^2 / \epsilon_0 m_e)^{1/2}$$

$$\sigma_z = 12 \text{ cm} \sim \lambda_{pe} \rightarrow n_e \sim 8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$\rightarrow E_{WB} = mc\omega_{pe} / e = 2\pi mc^2 / e\lambda_{pe} \sim 27 \text{ MV/m}$$



Le complexe d'accélérateurs au CERN



Parameter	PS	SPS	SPS Opt
-----------	----	-----	---------

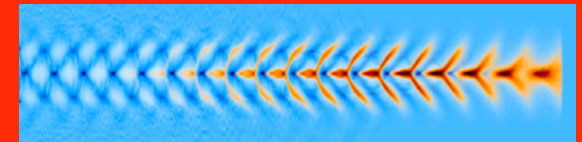
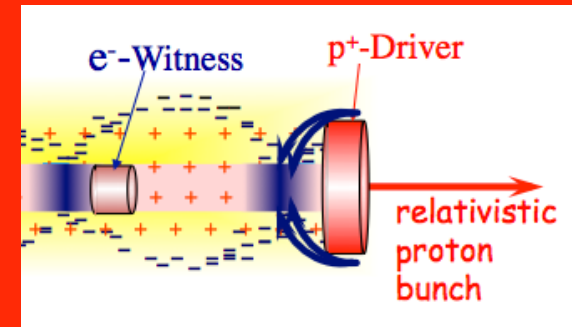
Loi d'échelle

$$\lambda_{pe} \sim \sigma_z, k_{pe} \sigma_z \sim 1$$

$$\lambda_{pe} = 2\pi c / \omega_{pe} = 2\pi c / (n_e e^2 / \epsilon_0 m_e)^{1/2}$$

$$\sigma_z = 12 \text{ cm} \sim \lambda_{pe} \rightarrow n_e \sim 8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$\rightarrow E_{WB} = mc\omega_{pe} / e = 2\pi mc^2 / e\lambda_{pe} \sim 27 \text{ MV/m}$$



$$\rightarrow \lambda_{pe} \sim \sigma_r = 200 \mu\text{m}, k_{pe} \sigma_r \sim 1, n_e \sim 7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

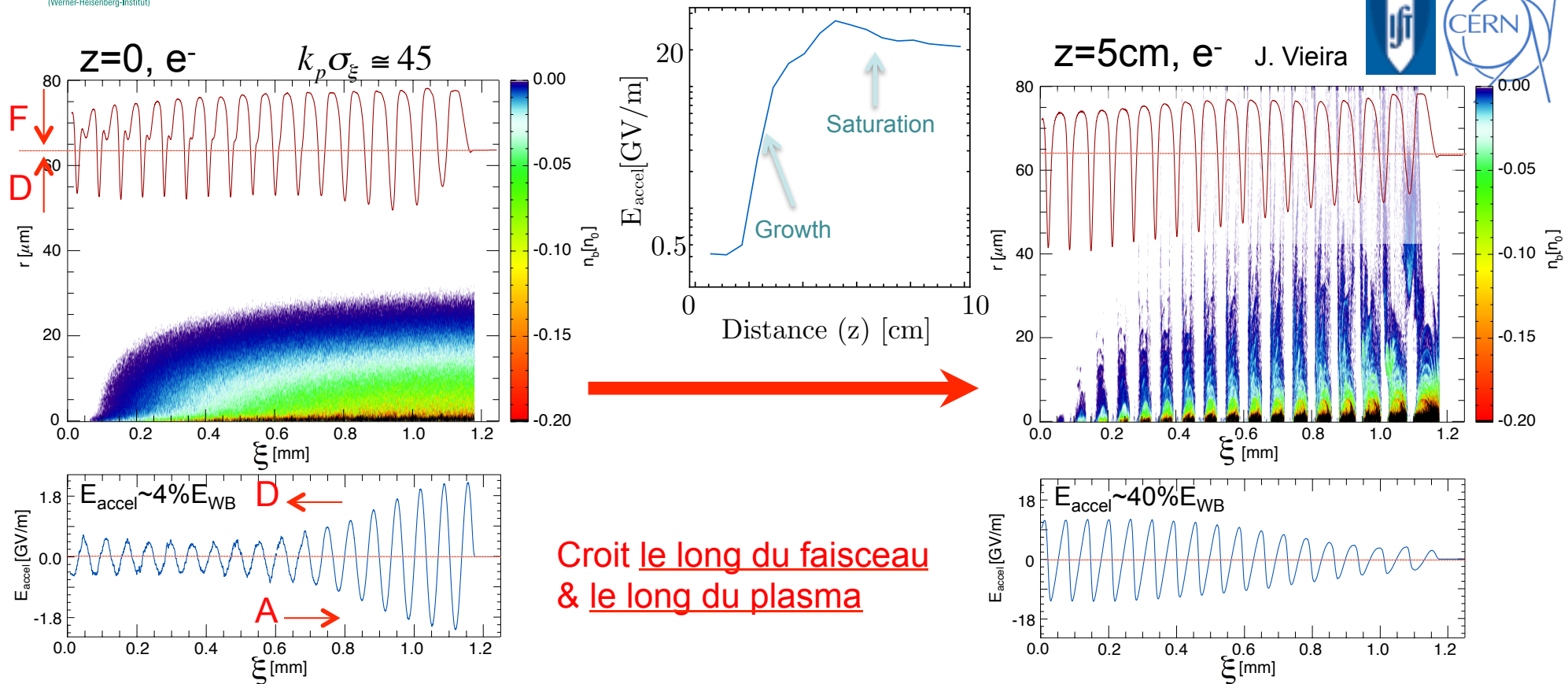
$$\rightarrow E_{WB} \sim 2.5 \text{ GV/m}, f_{pe} \sim 237 \text{ GHz}$$

$$\rightarrow \sigma_z \sim 12 \text{ cm avec période } \lambda_{pe} \sim 1.2 \text{ mm!!}$$

→ Utilise “seeded self-modulation” (SSM)
 (auto-modulation déclenchée (AMD))



AUTO-MODULATION DECLENCHEE (SSM)

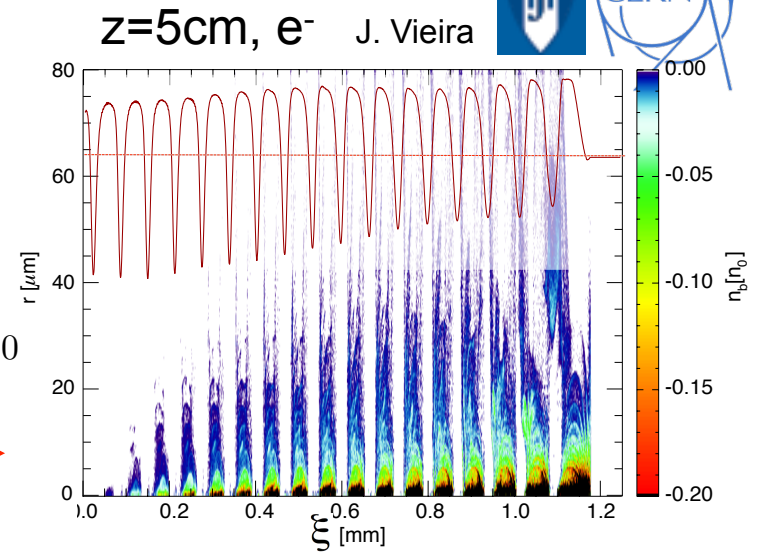
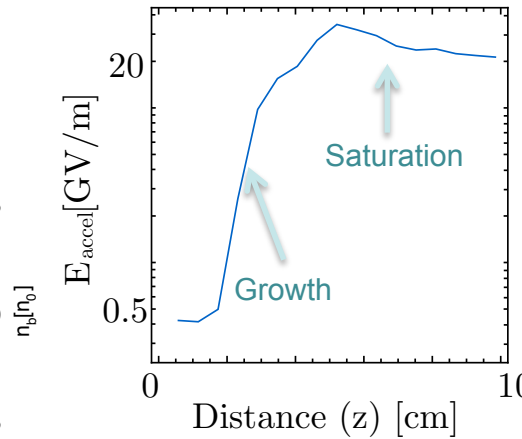
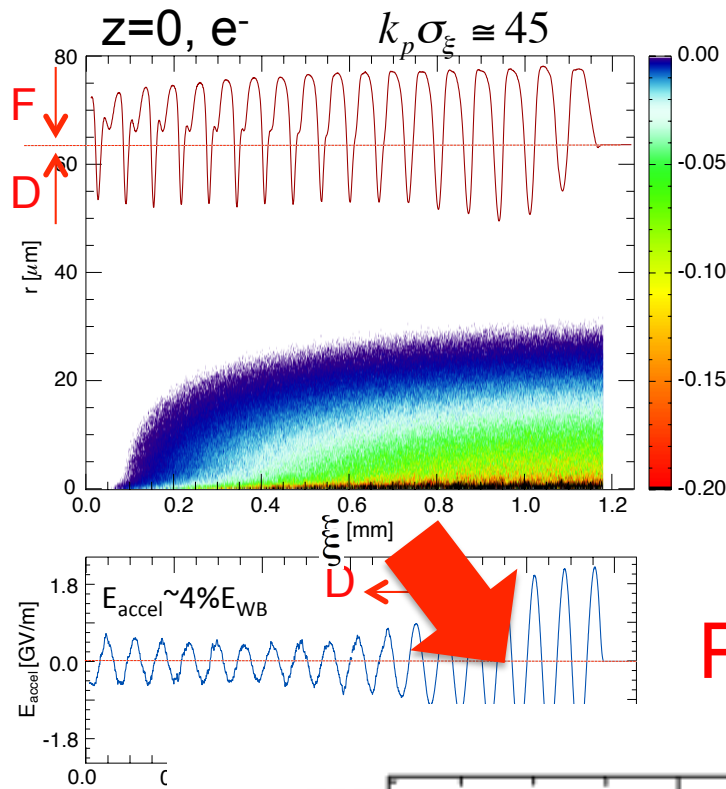


Kumar et al., PRL 104, 255003 (2010)
Pukhov et al., PRL 107, 145003 (2011)
Schroeder et al., PRL 107, 145002 (2011)

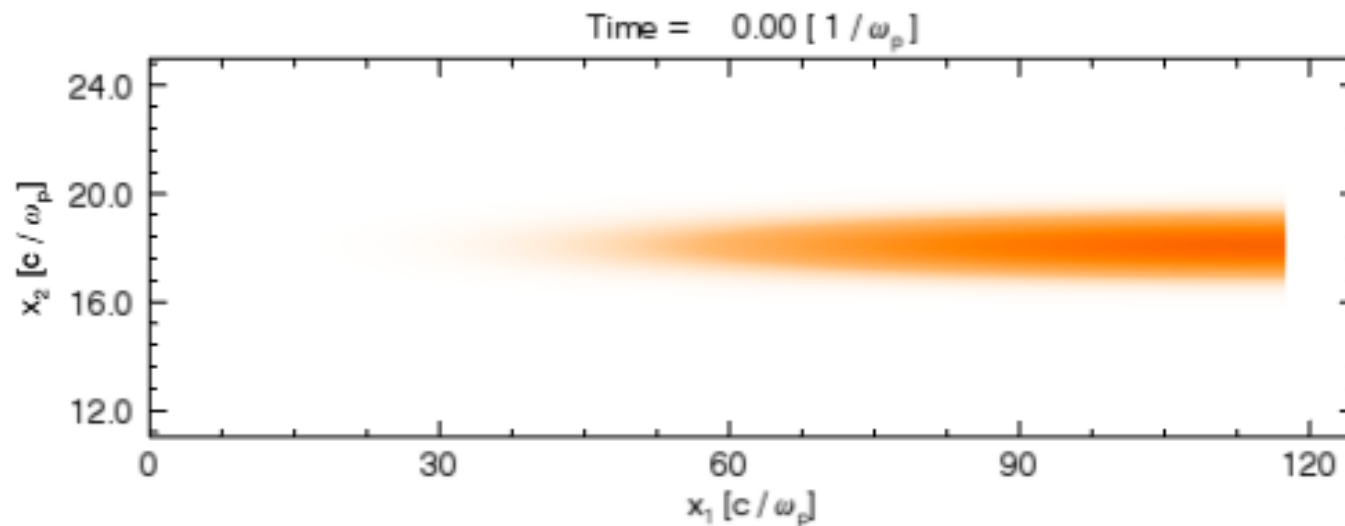
✧ La composante transverse de l'onde de sillage déclenchée module la densité du faisceau $\sim \lambda_{pe} \ll \sigma_{z,\xi}$

✧ Le champs longitudinal atteint une grande amplitude par excitation résonante

AUTO-MODULATION DECLENCHEE (SSM)

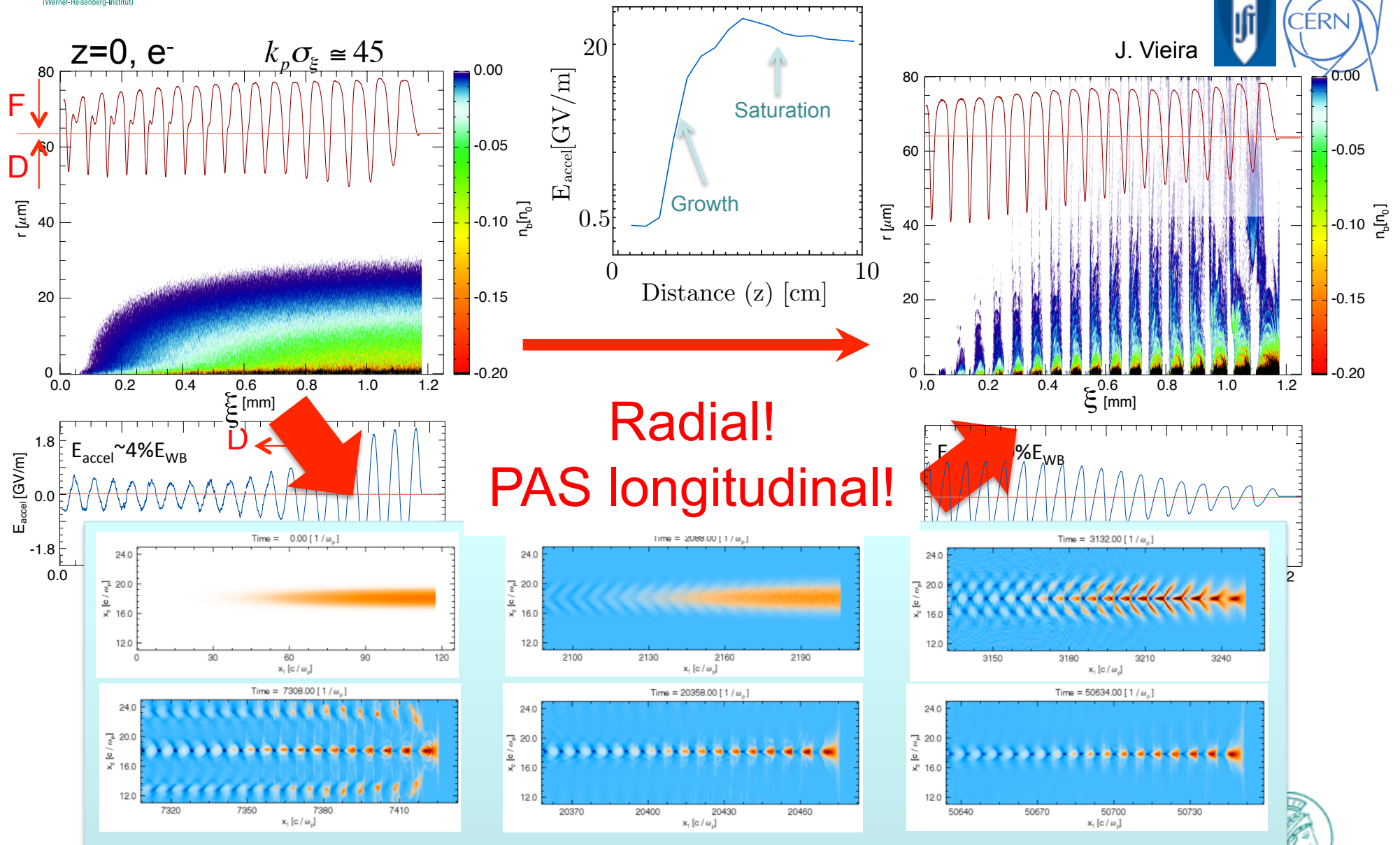


Radial!
PAS longitudinal!



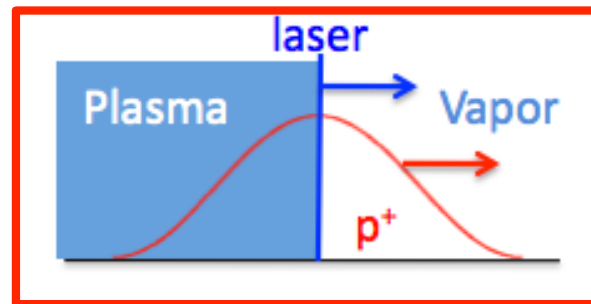
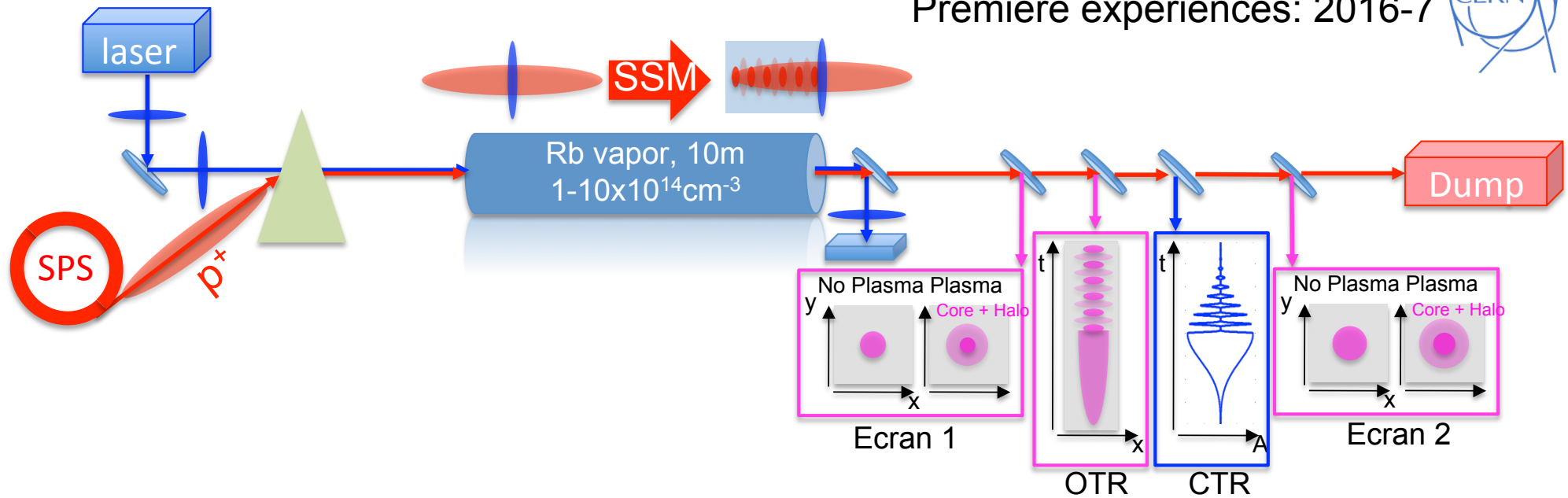
2D Slab, e^-

AUTO-MODULATION DECLENCHEE (SSM)



L'EXPERIENCE AWAKE

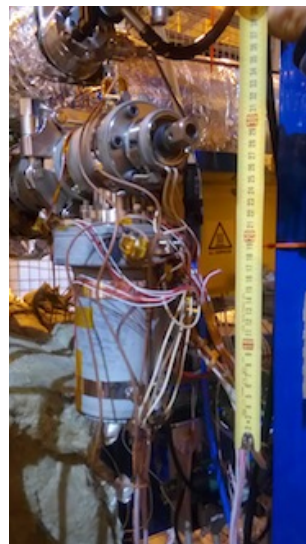
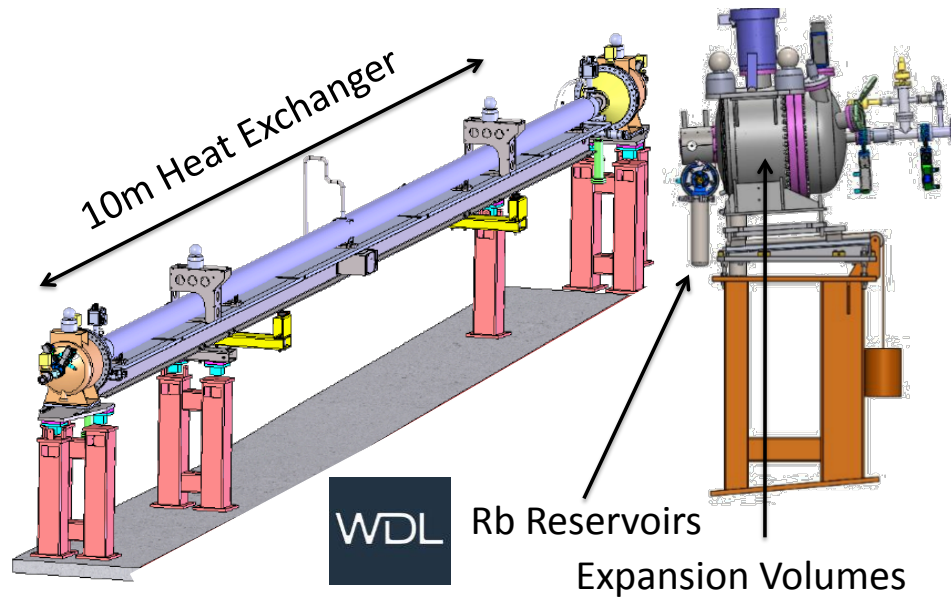
Première expériences: 2016-7



✧ Déclenchement par front d'ionisation

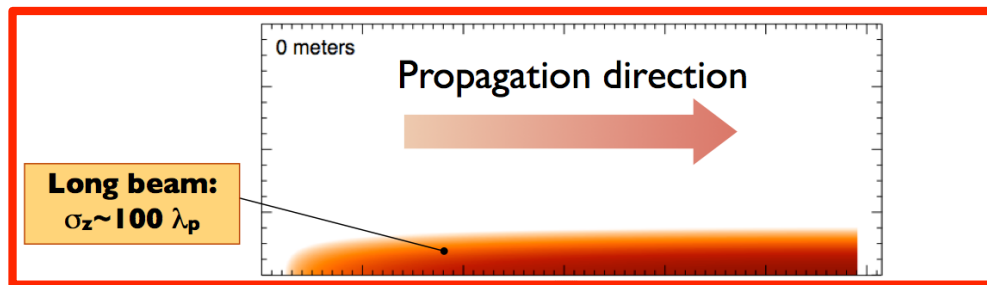
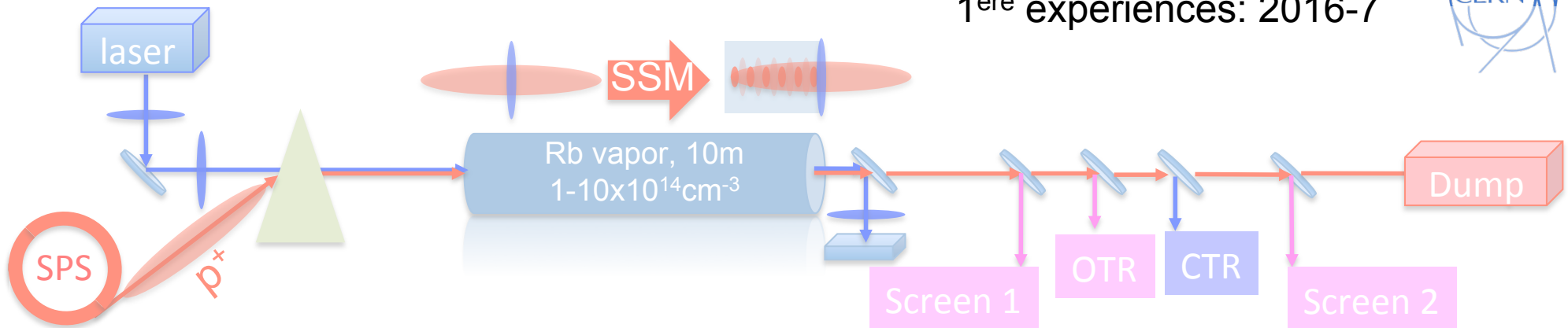
SOURCE DE VAPEUR DE RUBIDIUM

Installé à AWAKE!

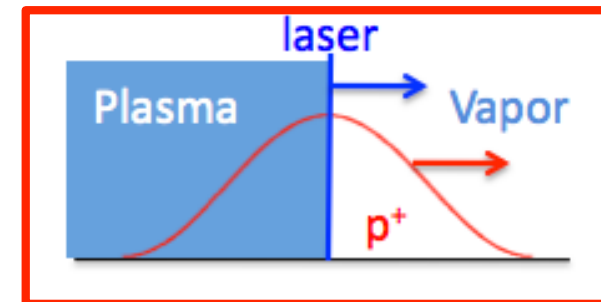


EXPERIENCE AWAKE @ CERN

1^{ère} expériences: 2016-7



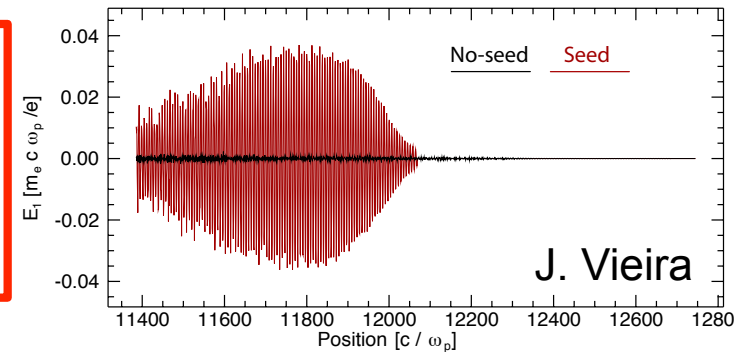
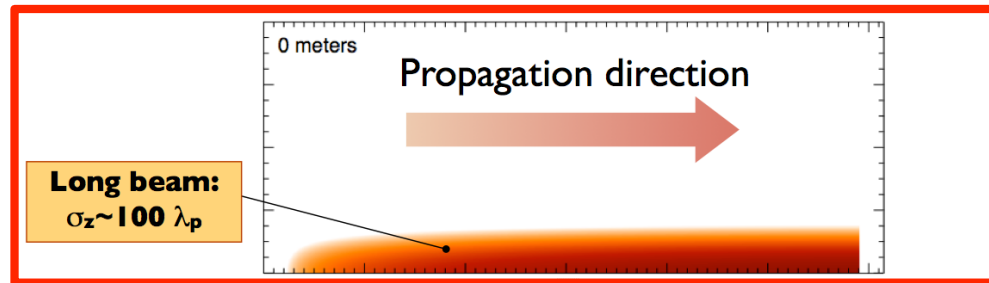
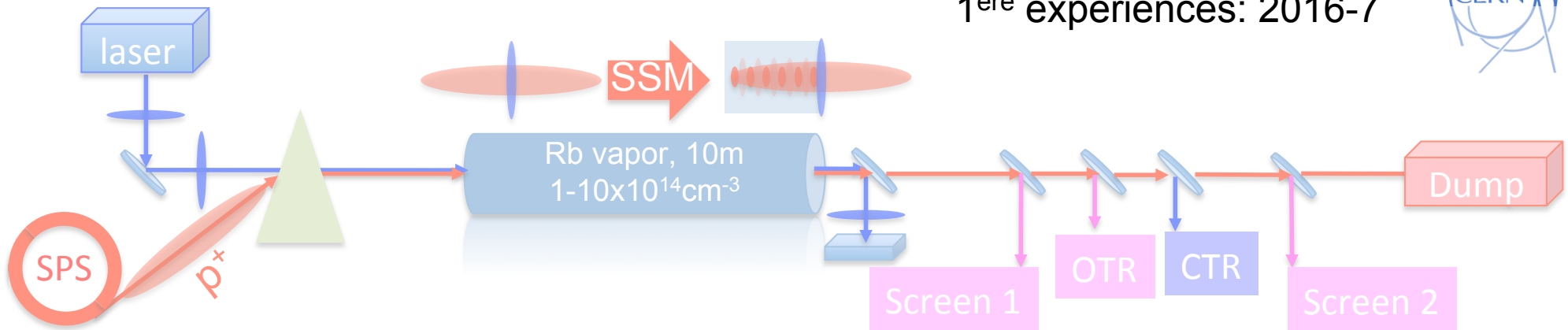
+



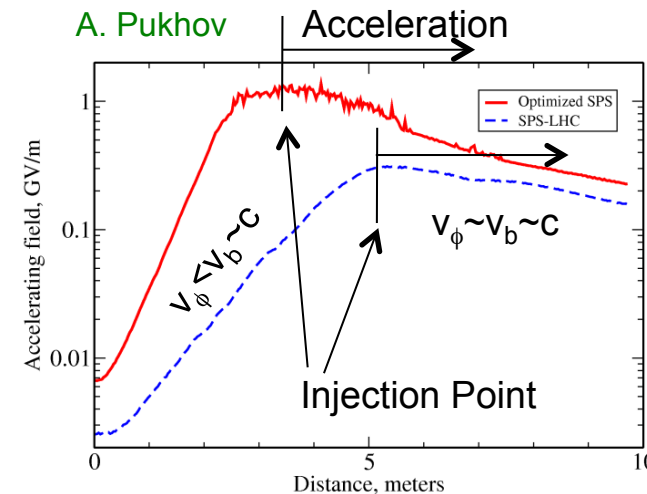
- ✧ Courte impulsion laser crée le plasma et déclenche la modulation
- ✧ $\sigma_z \sim 12\text{cm} \gg \lambda_{pe} \sim 1.2\text{mm}$ ($n_e \sim 7 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$) $\rightarrow$ Seeded self-modulation (SSM)*
- ✧ $\sigma_z \text{ laser} \sim 30\mu\text{m} < \lambda_{pe} \rightarrow$ bon déclencheur

EXPERIENCE AWAKE @ CERN

1^{ère} expériences: 2016-7

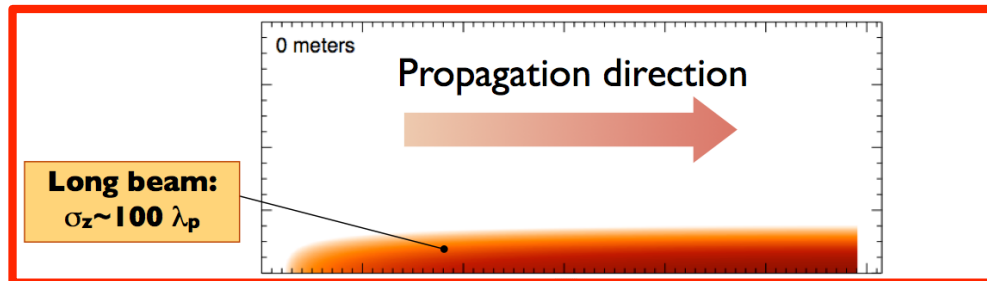
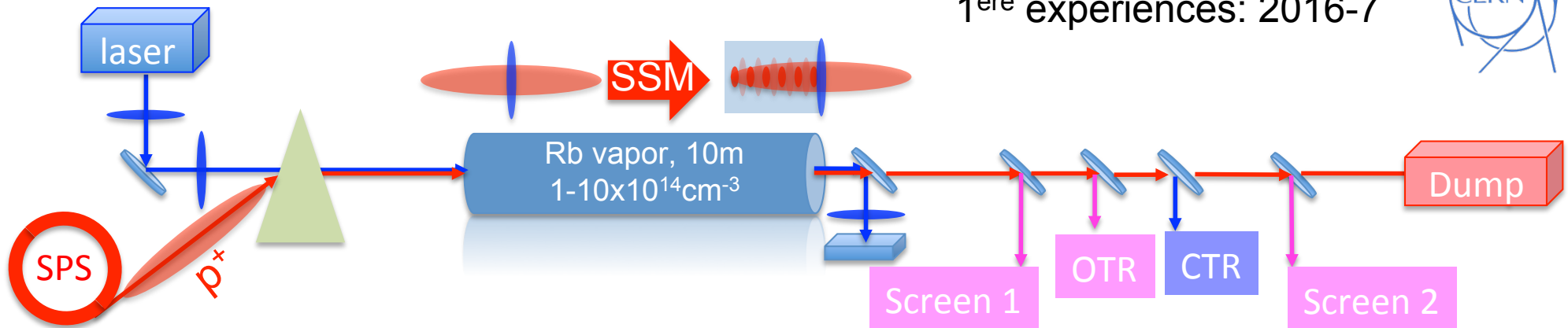


✧ L'onde de sillage croît...

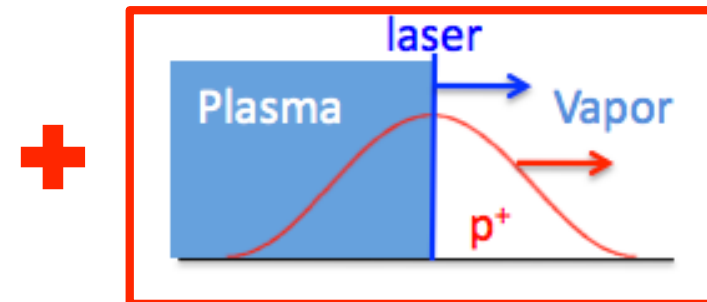
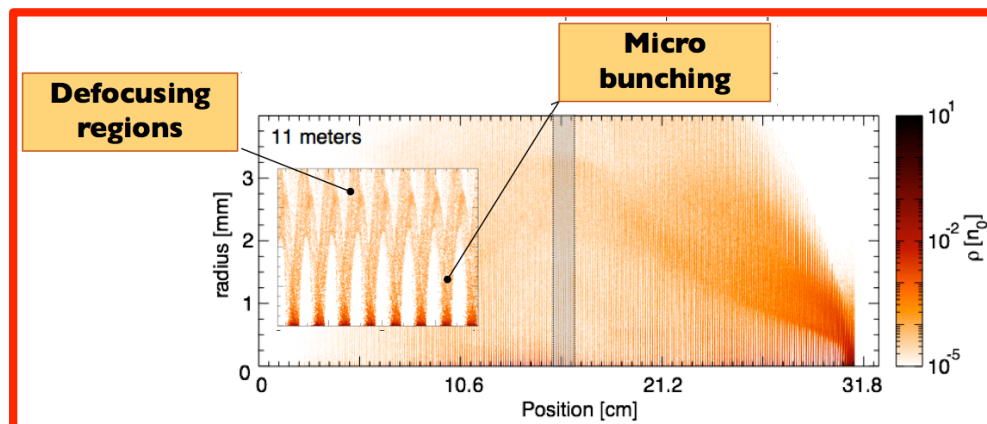


EXPERIENCE AWAKE @ CERN

1^{ère} expériences: 2016-7



=



- ✧ Le long ($\sigma_z \sim 12\text{cm}$) faisceau de p^+ **auto-module** avec une période $\lambda_{pe} \sim 1.2\text{mm}$ ($n_e \sim 7 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$)
- ✧ $\sim 100\lambda_{pe}$ par σ_z



1st but de AWAKE (2016-17):
 Démontrer et étudier
 l'auto-modulation déclenchée (SSM)
 d'un long faisceau p^+ dans un plasma de haute
 densité

$$\sigma_z \gg \lambda_{pe} \sim n_e^{-1/2}$$



1st but de AWAKE (2016-17):

Démontrer et étudier

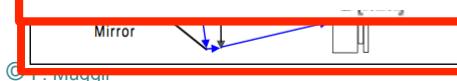
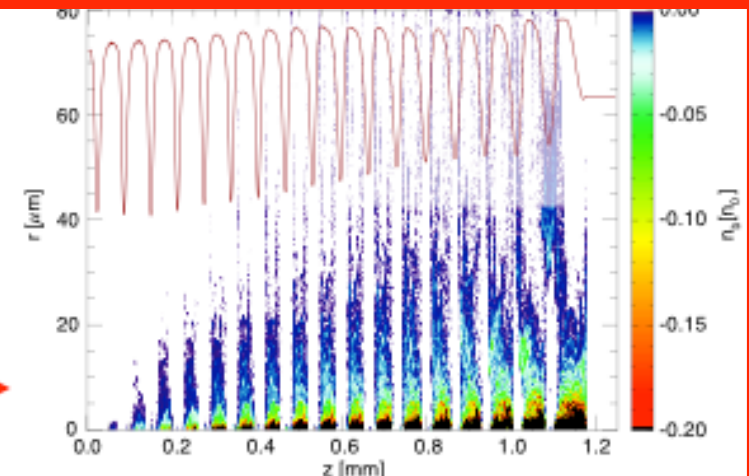
l'auto-modulation déclenchée (SSM)
d'un long faisceau p^+ dans un plasma de haute
densité

$$\sigma_z \gg \lambda_{pe} \sim n_e^{-1/2}$$

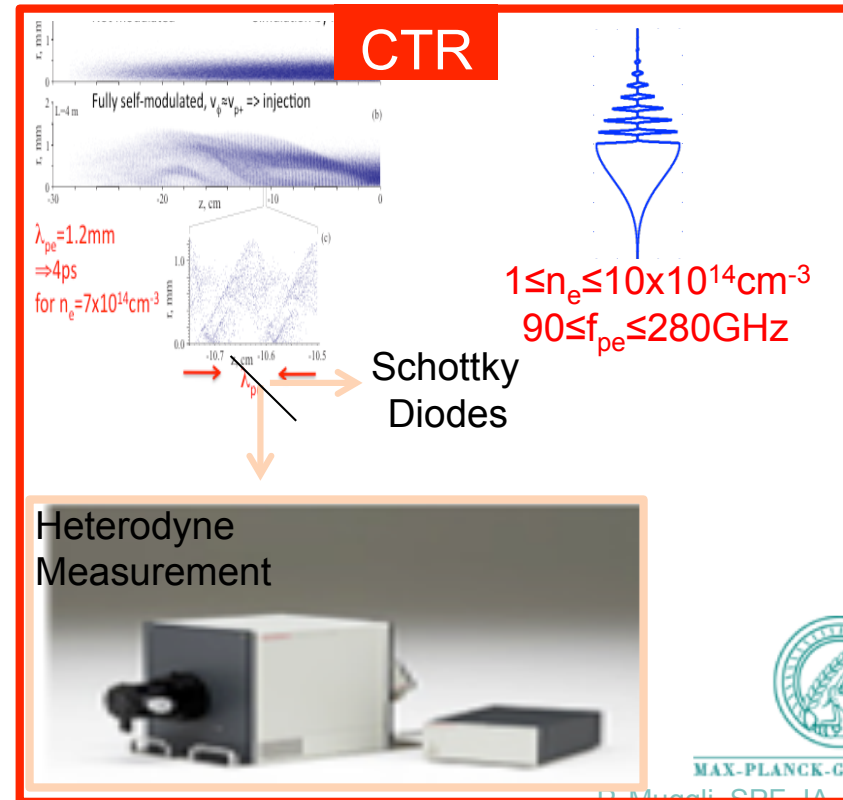
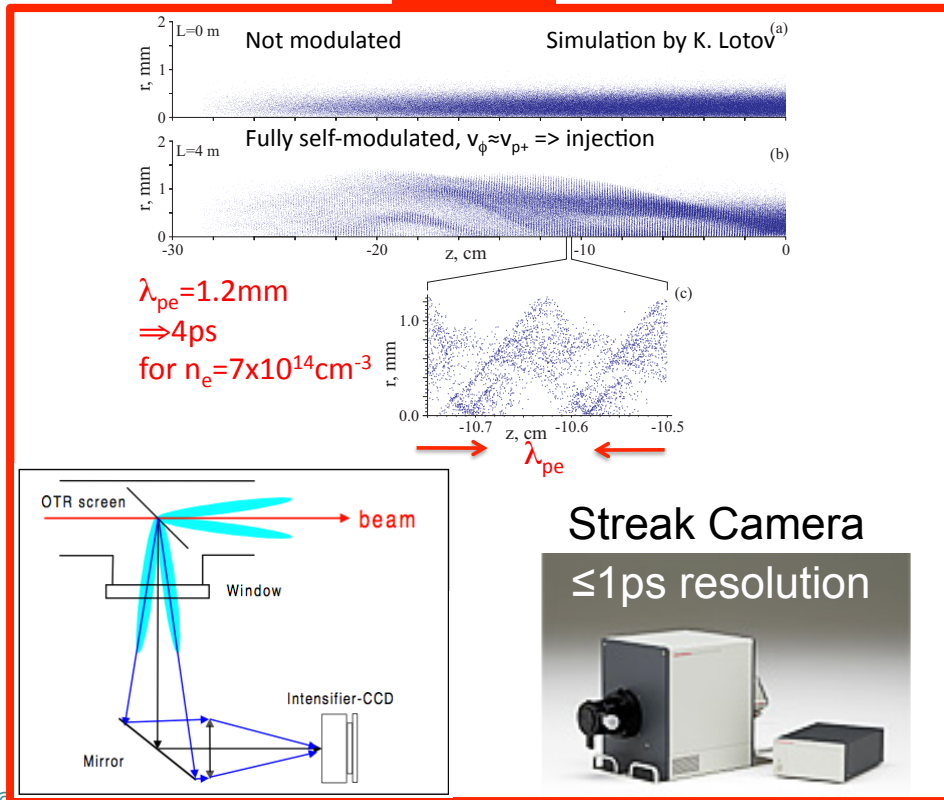
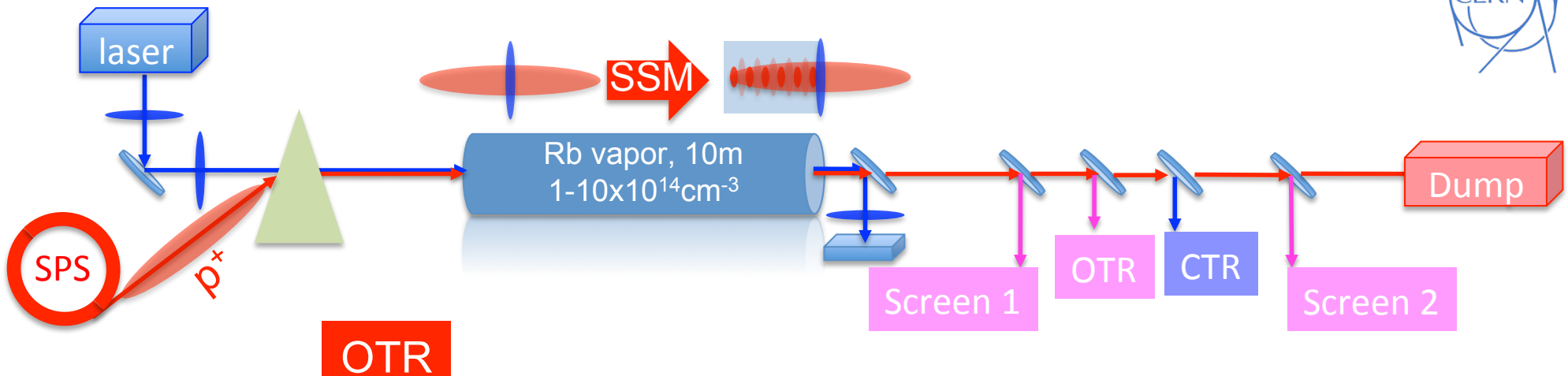
Trois observables sur le faisceau de p^+

- ✧ Défocalisation
- ✧ Modulation à λ_{pe} (f_{pe}) (OTR)
- ✧ Emission de radiation de transition cohérente (CTR) à λ_{pe} (f_{pe})

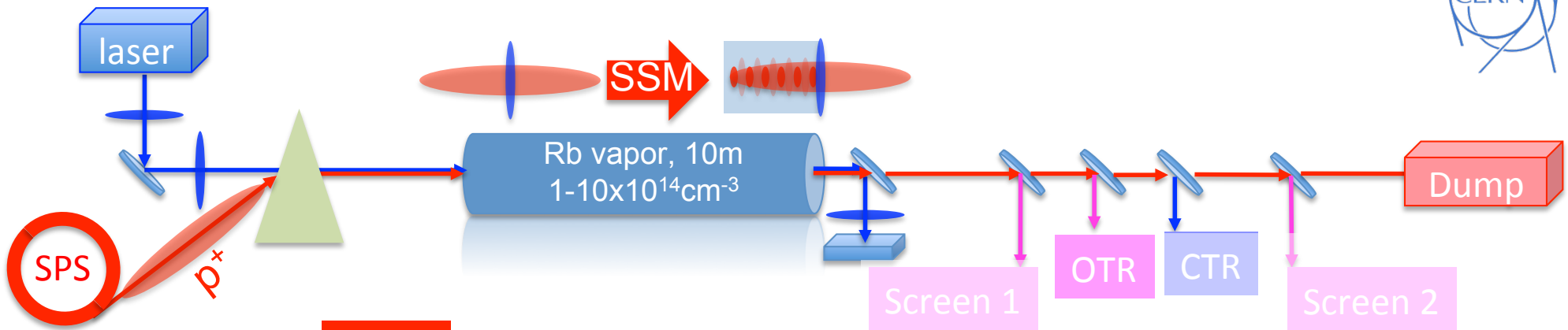
SSM



DIAGNOSTIQUES DE SSM

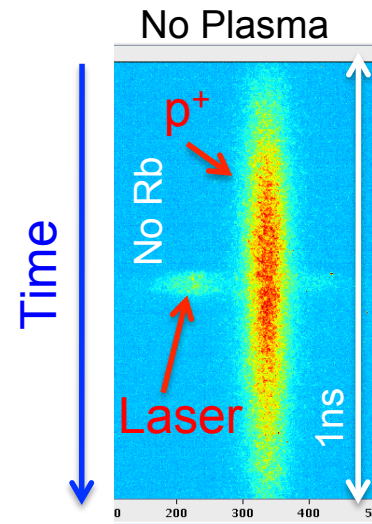
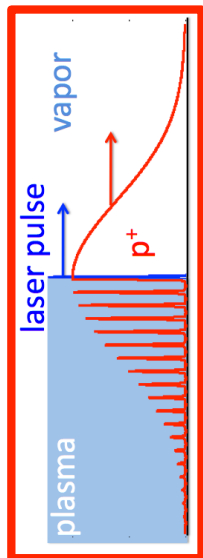


DECLENCHEMENT



OTR

Streak camera Images

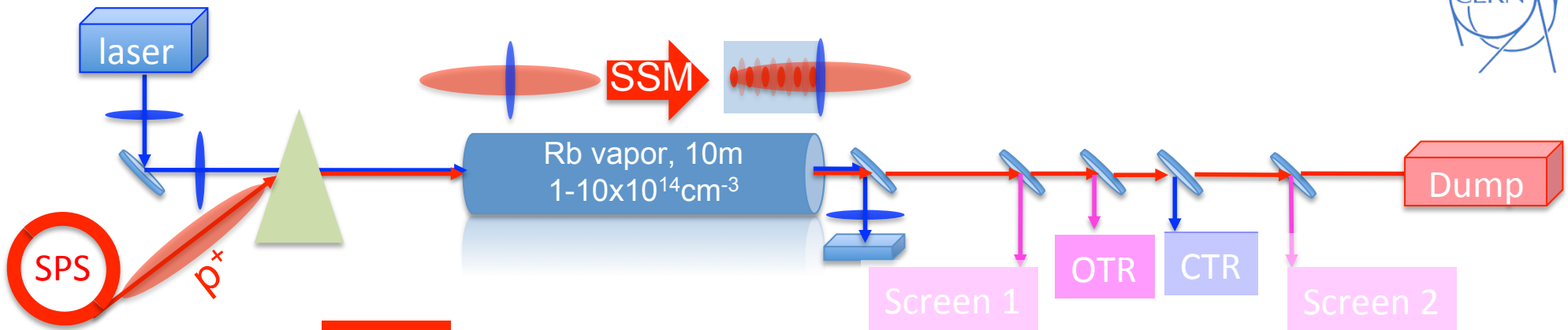


$n_{\text{Rb}} = 3.7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
 $N = 3 \times 10^{11} p^+$
 Long
 $f_{\text{mod}} \sim 164 \text{ GHz}$

Preliminary!!!

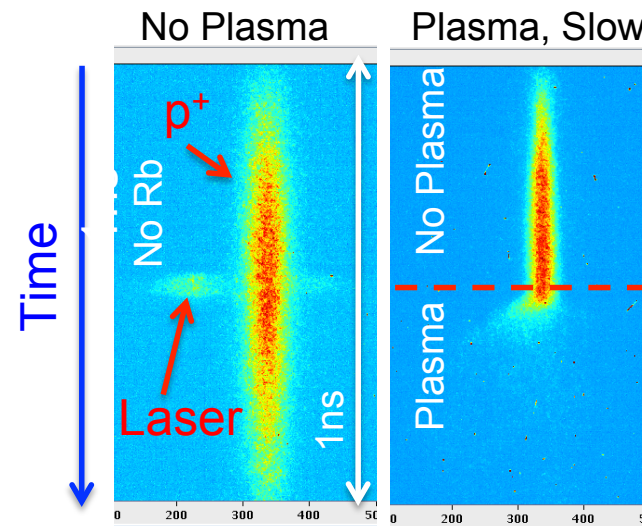
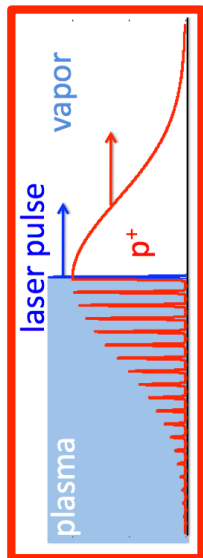
K. Rieger, MPP

DECLENCHEMENT



OTR

Streak camera Images

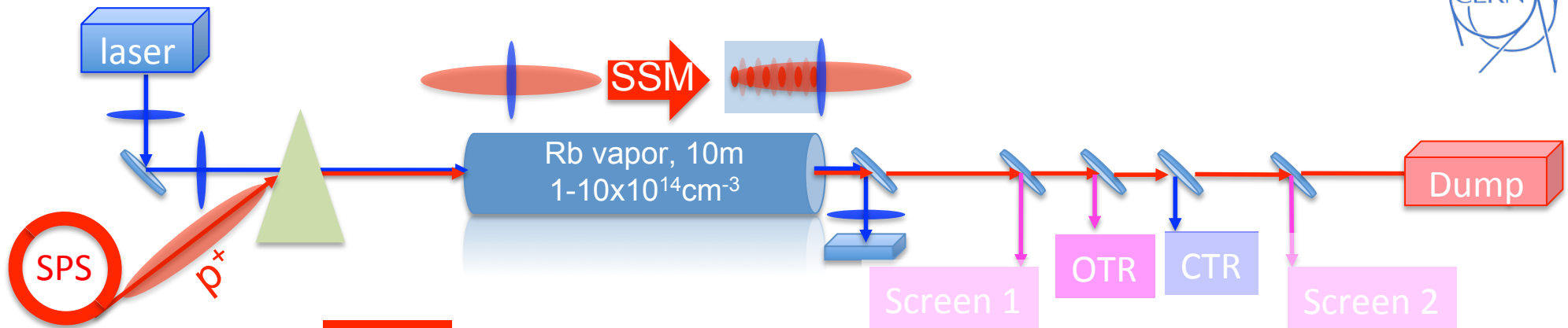


$n_{\text{Rb}} = 3.7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
 $N = 3 \times 10^{11} p^+$
 Long
 $f_{\text{mod}} \sim 164 \text{ GHz}$

Préliminaire!!!

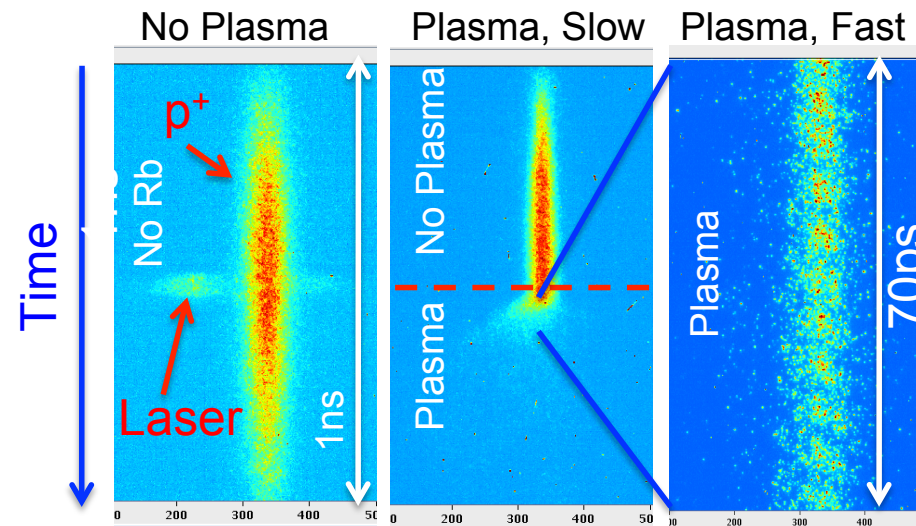
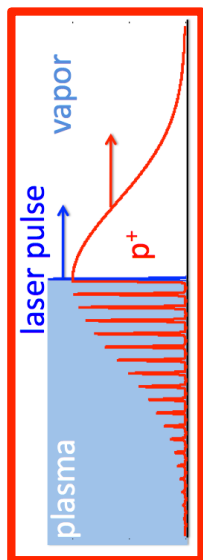
K. Rieger, MPP

DECLENCHEMENT



OTR

Streak camera Images



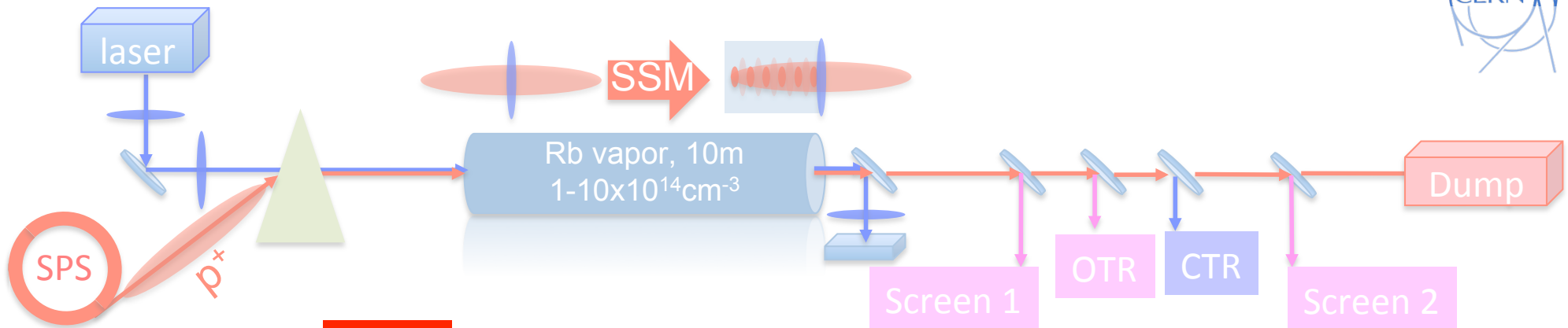
$n_{\text{Rb}} = 3.7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
 $N = 3 \times 10^{11} p^+$
 Long
 $f_{\text{mod}} \sim 164 \text{ GHz}$

Préliminaire!!!

K. Rieger, MPP

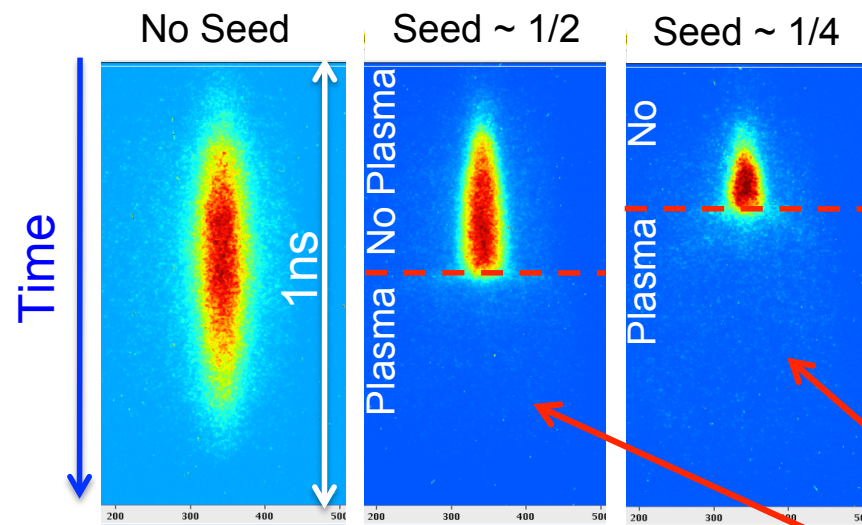
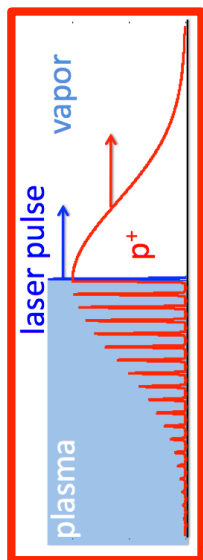
- ✧ Ajustement en temps à l'échelle de la ps
- ✧ Effet commence avec l'impulsion laser → **déclenchement!**
- ✧ Modulation de densité visible ~ps-scale

DECLENCHEMENT



OTR

Streak camera Images



$n_{\text{Rb}} = 2.2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
 $N = 3 \times 10^{11} p^+$
 Short

Préliminaire!!!

p^+
 Défocalisés
 par l'AM

- ✧ Différentes positions de déclenchement
- ✧ Effets plus fort avec déclenchement à $\frac{1}{4}$ qu'à $\frac{1}{2}$





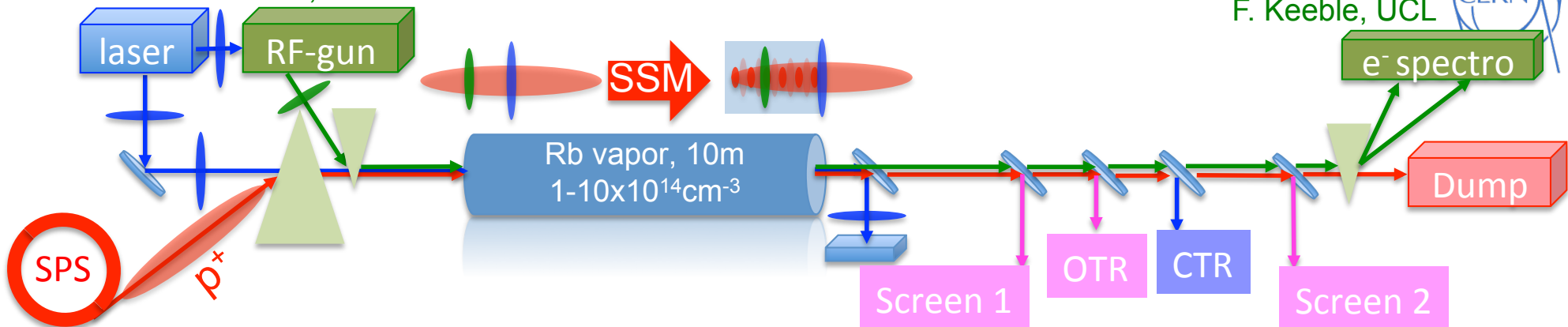
Max-Planck-Institut für Physik
(Werner-Heisenberg-Institut)

ECHANTILLONAGE DE L'ONDE/ACCELERATION



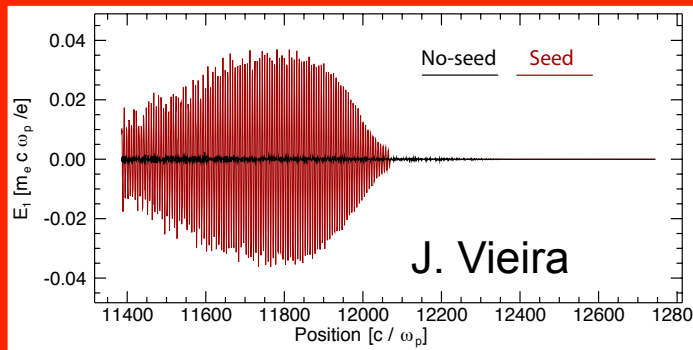
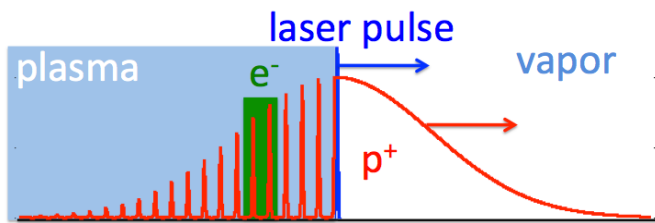
S. Doebert, , K. Pepitone, CERN
G. Burt, CI

F. Keeble, UCL

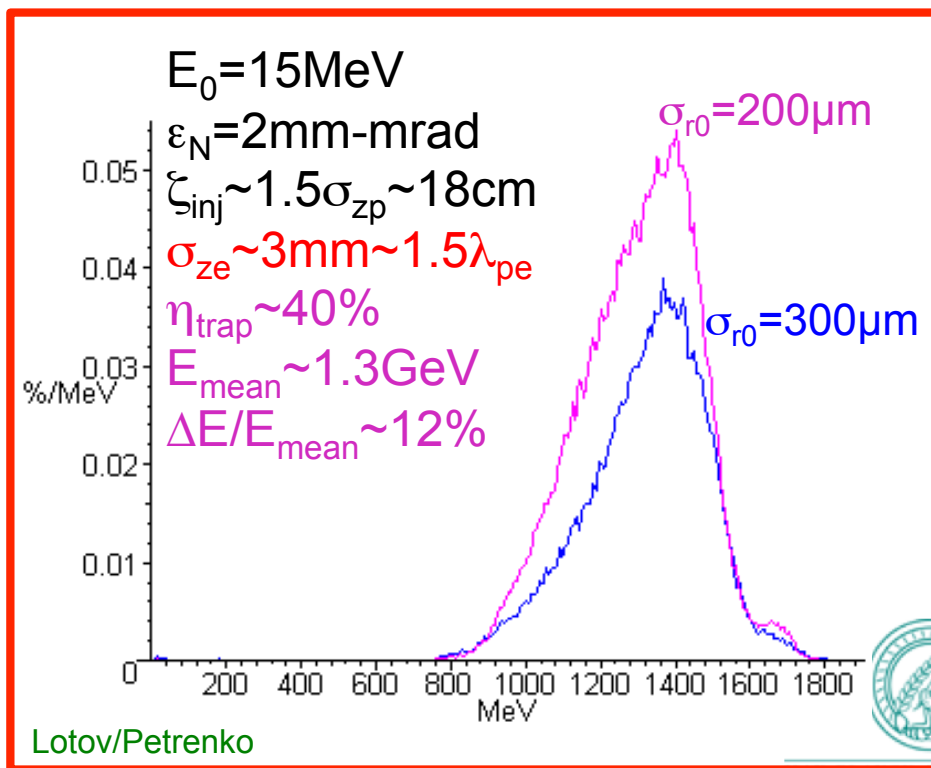


Injection experiments: 2017: $\sigma_{ze} > \lambda_{pe}$

external e⁻ injection



❖ Accélérer des e⁻ au GeV avec un gradient $\sim$ GeV/m and $\Delta E/E$ limité





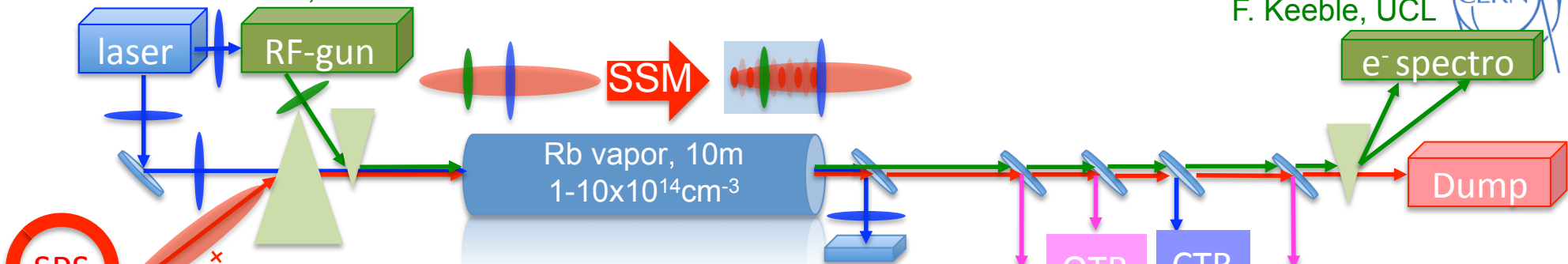
Max-Planck-Institut für Physik
(Werner-Heisenberg-Institut)

ECHANTILLONAGE DE L'ONDE/ACCELERATION

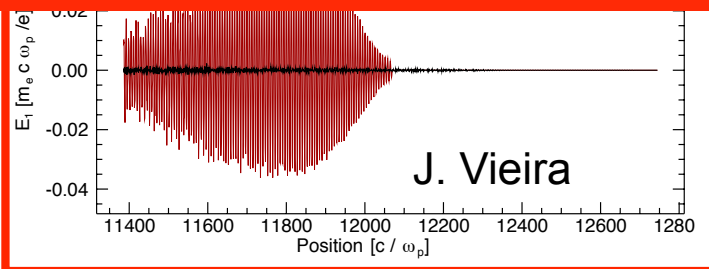
S. Doebert, , K. Pepitone, CERN
G. Burt, CI



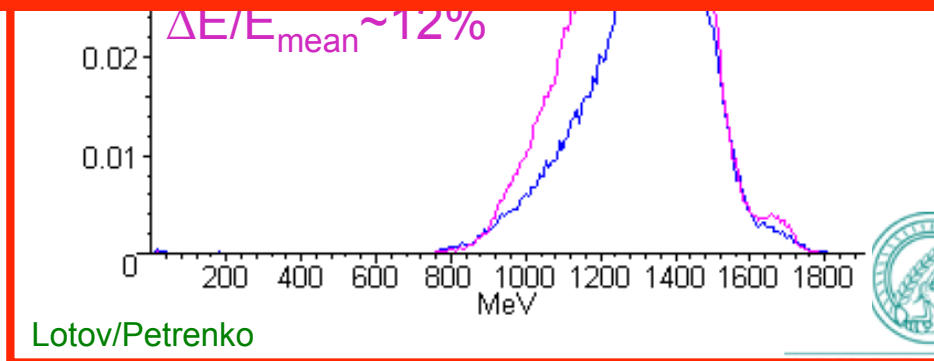
F. Keeble, UCL



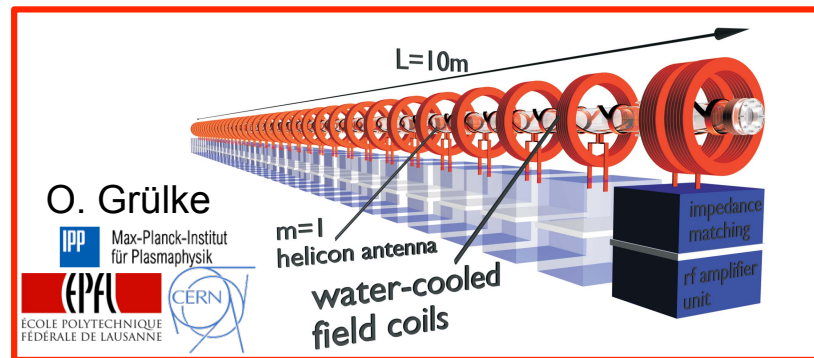
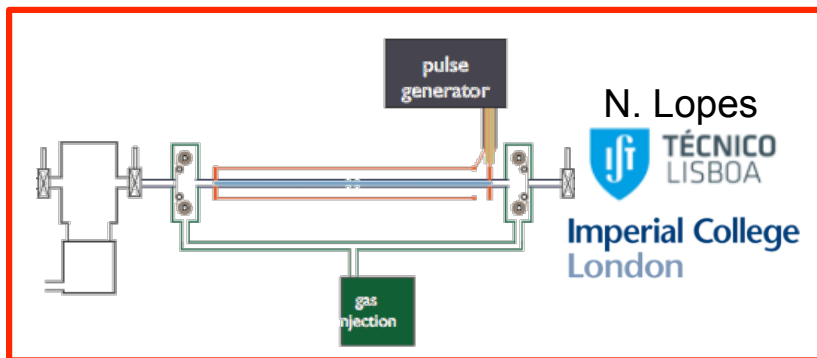
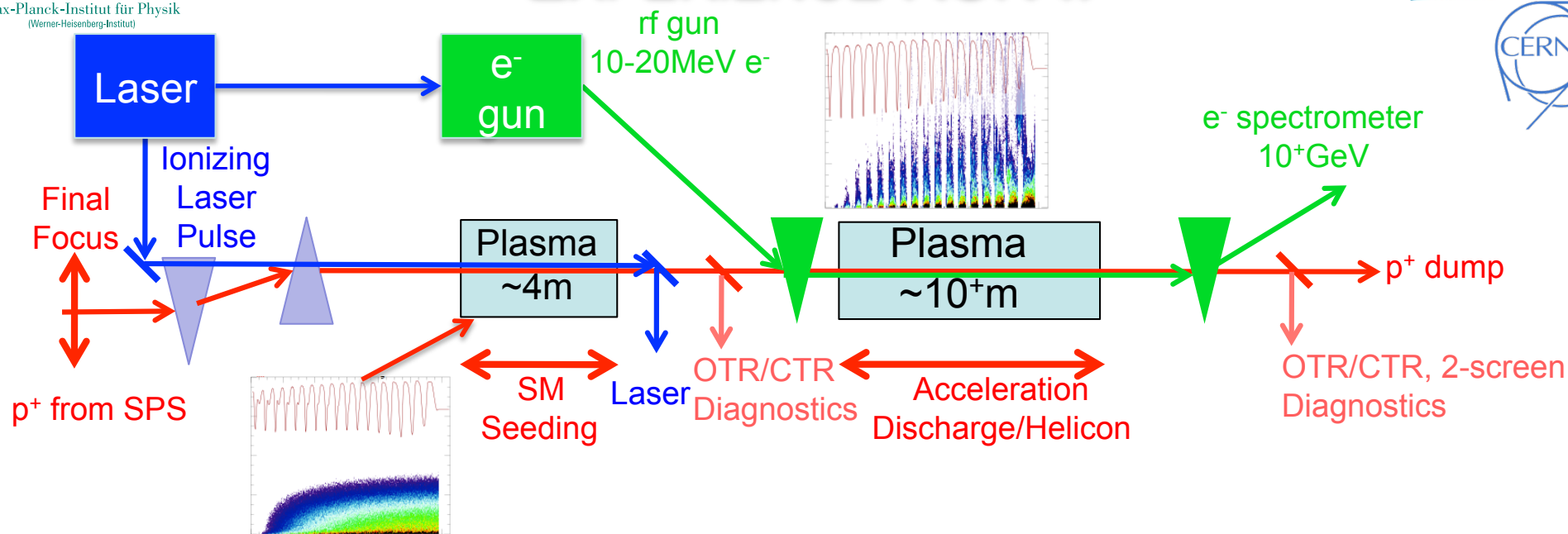
2nd but de AWAKE (2018):
Injection externe d'e⁻ (~15MeV)
dans l'onde de sillage
et atteindre
~GeV de gain avec $\Delta E/E$ fini



✧ Accélérer des e⁻ au GeV avec
gradient ~GeV/m and $\Delta E/E$ limité



EXPERIENCE RUN II

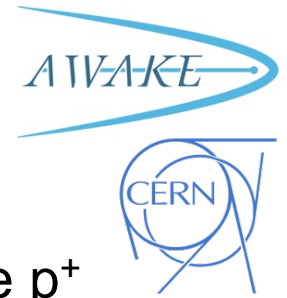


- ✧ Ionization d'un vapeur d'alkalin (Rb), plasma de 3-4m pour déclenchement NECESSAIRE!
- ✧ Plasma ~10m décharge ou helicon pour accélération seulement (extensible à 100's m)
- ✧ Injecter e^- en impulsion courte ($\sigma_z \ll \lambda_{pe}$), qualité: $\Delta E/E$, $\varepsilon \Rightarrow$ beam loading and blow-out
- ✧ Saut de densité plasma pour maintenir les champs hauts

✧ 2021-LS3, RUN II



RESUME



- ✧ Le but de AWAKE aims est d'atteindre un gradient $\sim 1 \text{ GeV/m}$ en utilisant l'auto-modulation déclenchée (SSM) d'un long faisceau de p^+ dans un plasma dense ($\sigma_z \gg \lambda_{pe}$) $\Rightarrow e^-$ acceleration
- ✧ Résultats importants et intéressants (SSM):
 - ✧ Observé SSM (defocalisation, μ -faisceaux)
 - ✧ Démontré le déclenchement: SSM
 - ✧ Structure temporelle des μ -faisceaux (très) stable $\div$ aux variations du faisceau p^+ : essentiel pour l'injection et l'accélération d' e^- , PAS d'instabilité
 - ✧ Pas de déclenchement $\Rightarrow$ SMI or hose instability
 - ✧ $f_{\text{mod}} \sim f_{\text{Rb}} \sim f_{pe}$
- ✧ Beaucoup de résultats pas présentés!!!!
- ✧ SSM et **demo d'accélération d' e^- : 2017-18**
- ✧ **Run II: (2021-): deux plasmas, qualité du faisceau d' e^- : $\Delta E/E$, ε**
- ✧ **Application de l'accélération d' e^- par onde de sillage excitée par in faisceau de p^+ : collisions e^-/p^+**

**Préliminaire!!!
Analyse très bientôt!**

E. Gschwendtner et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 829, 76 (2016).
E. Öz et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 829, 321 (2016).
E. Öz et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 740(11), 197 (2014).
A. Caldwell and M. Wing, Eur. Phys. J. C 76 (2016) 463.
A. Caldwell et al., Nucl. Instrum. A 829 (2016) 3
P. Muggli et al., arXiv:1708.01087 (2017)



Thank you to my collaborators



Thank you!

<http://www.mpp.mpg.de/~muggli>
muggli@mpp.mpg.de