

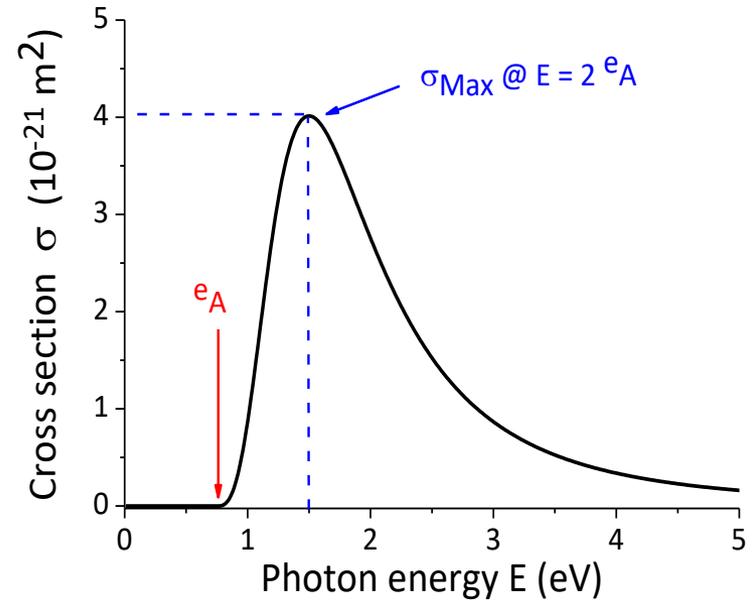
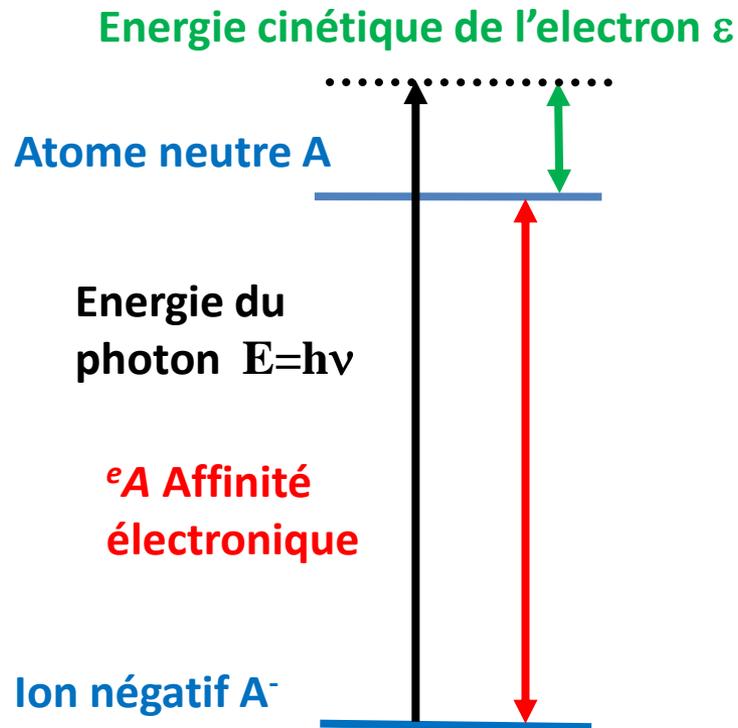
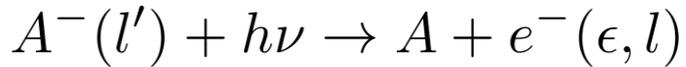
Atelier Ions Négatifs GDR EMILI Photodétachement

Cyril Drag & Benjamin Estèves

Laboratoire de Physique des Plasmas (UMR 7648)

26/10/2021

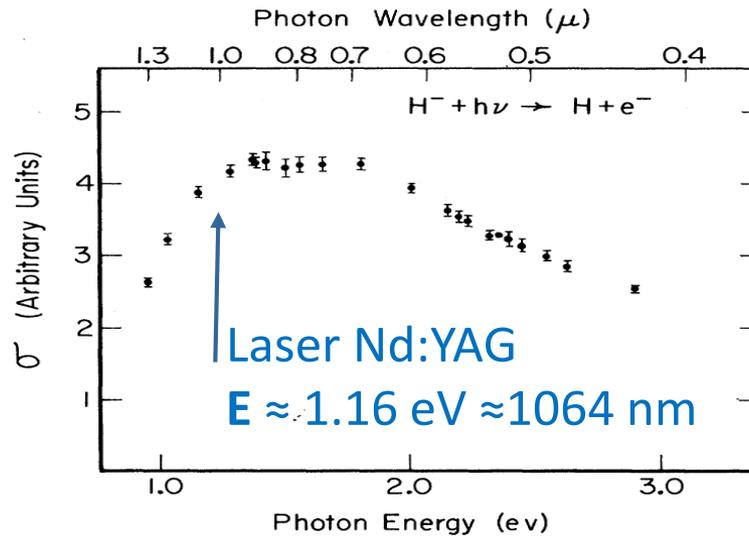
Photodétachement (1/2)



Probabilité de détachement : $\Gamma = \sigma \Phi$ (en s^{-1})

Photodétachement (2/2)

- **transition vers un continuum** (e^- emporte l'excès d'énergie dans une large gamme d'énergies possibles) : pas de forte contrainte sur la longueur d'onde et **transition irréversible**;



Smith and Burch, *Phys. Rev. Lett.* **2**, 165 (1959)

Désavantages :

- si il y a plusieurs espèces d'ions négatifs : peu sélectif (ex: O^- , O_2^-);
- pas de mesures de température par élargissement Doppler.

- Section efficace de ce type de transition est **faible**.
Transition résonante entre état lié, $\sigma \sim \lambda^2$;
Transition vers le continuum, $\sigma \sim a_0^2$ ($1 \mu\text{m} \gg 0,5 \text{ nm}$).

Quelques experiences au LPP



- **Production de neutres** (expérience réalisée au LAC)
Injecteur de neutre pour d'ITER

Salle 1008 (Christophe et Cyril)

- **Mesure de l'énergie des électrons par microscopie de photodétachement**
Affinité électronique de l'hydrogène

Salle 1008 (Christophe et Cyril)

- **Mesure du nombre d'ions négatifs par spectroscopie CRDS**
Ions négatifs dans une décharge de type « Glow » d'oxygène

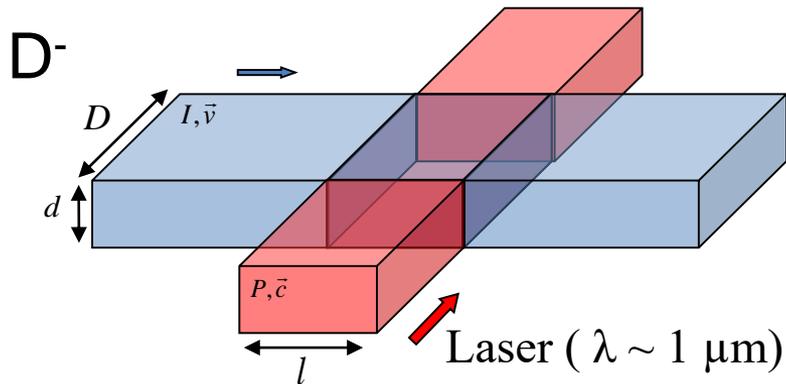
Salle 1003C (Jean-Paul)

- **Mesure du nombre d'ions négatifs (avec une sonde) dans un plasma**
Mesure de l'électronégativité dans un propulseur à iode

Salle 1003D (Benjamin, Cyril et Pascal)
Oral 27/10/2021 à 10h15 (Benjamin)

Production de neutres : le prix de la saturation

Problématique : faisabilité d'un injecteur de neutres pour ITER (A. Simonin)



En CW, durant un temps t_{int} d'illumination, en régime linéaire : Probabilité = $\sigma \Phi t_{\text{int}}$

n_0 = densité ions négatifs

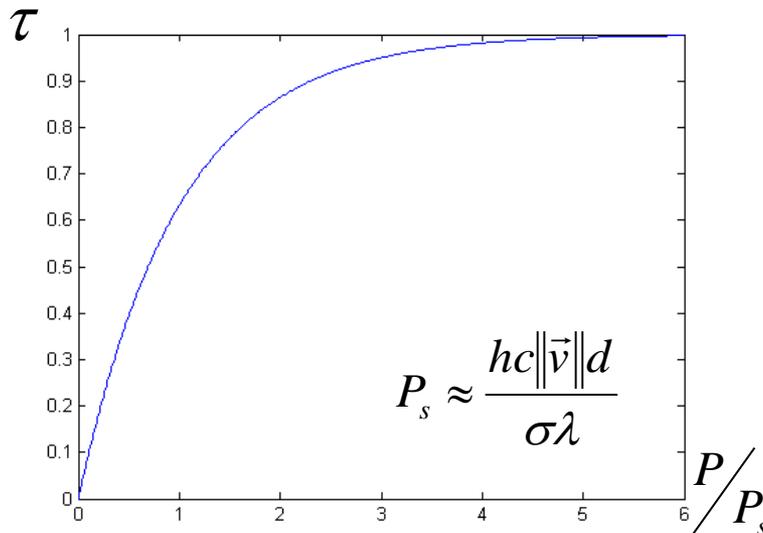
$n(t)$ densité de neutres

dn = variation nombre de neutres

$$dn = \sigma \Phi(t) (n_0 - n(t)) dt.$$

$$n = n_0 \left[1 - \exp \left(-\sigma \int \Phi(t) dt \right) \right]$$

Taux de photodétachement



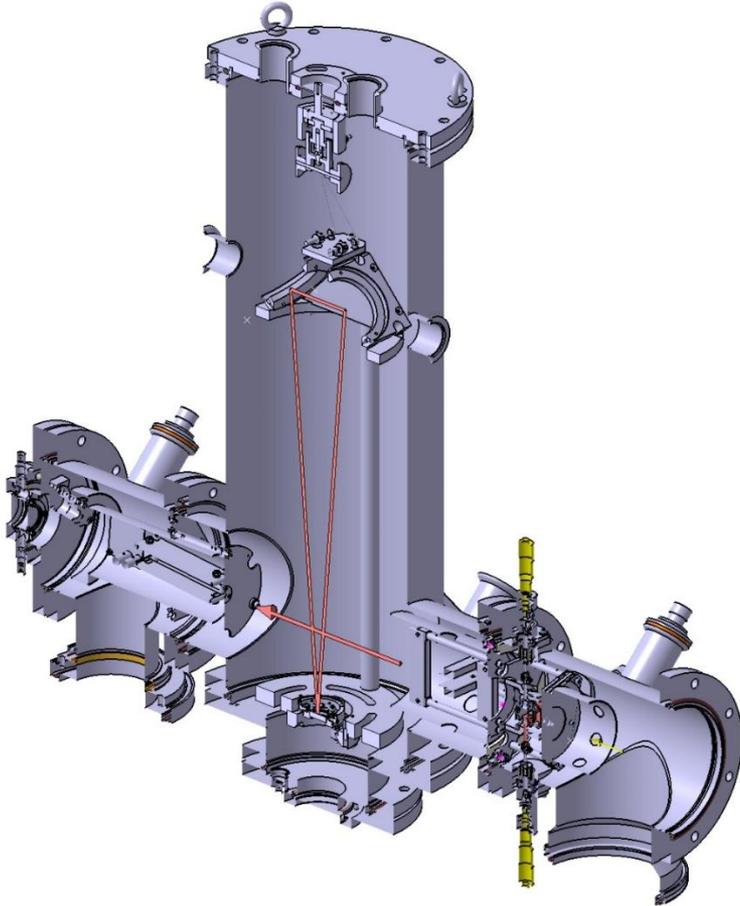
P_s : puissance « de saturation »

Application numérique pour $d=1$ cm,
 $E_c = 1$ MeV :

$$P_s \approx 5 \text{ MW}$$

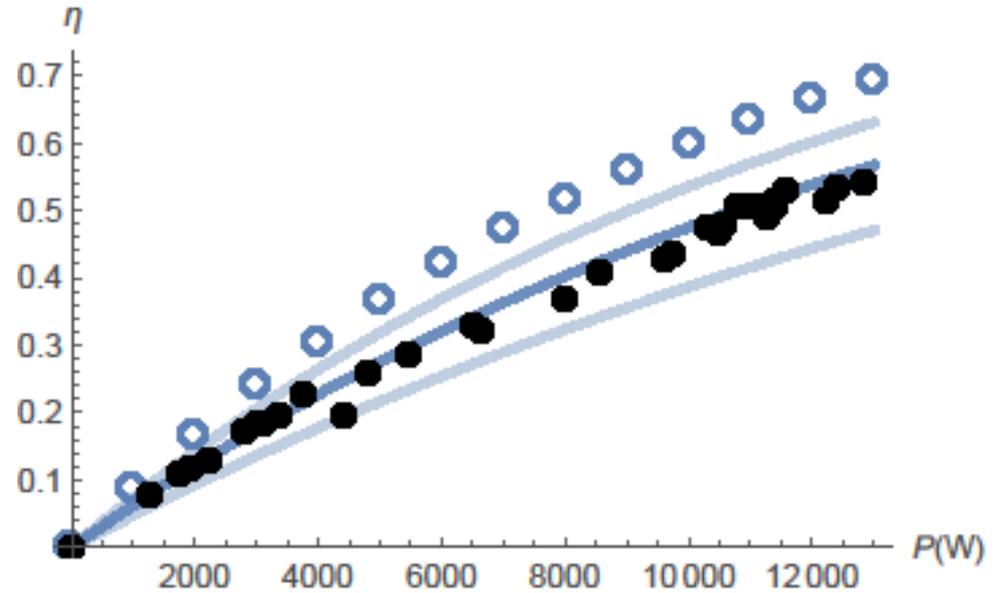
Production de neutres : cavité optique

Modèle réduit d'un photodétacheur efficace : dans un faisceau millimétrique et d'énergie de 1,2 keV, on photodétache **plus de 50 %** des ions.



Cavité optique suspendue, injectée par un laser de 25 W (laser monomode à fibre dopée à Yb NKT Photonics Koheras Y10 + amplificateur ALSIR-10-USF)

Fraction neutralisée



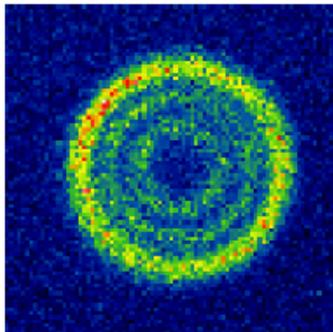
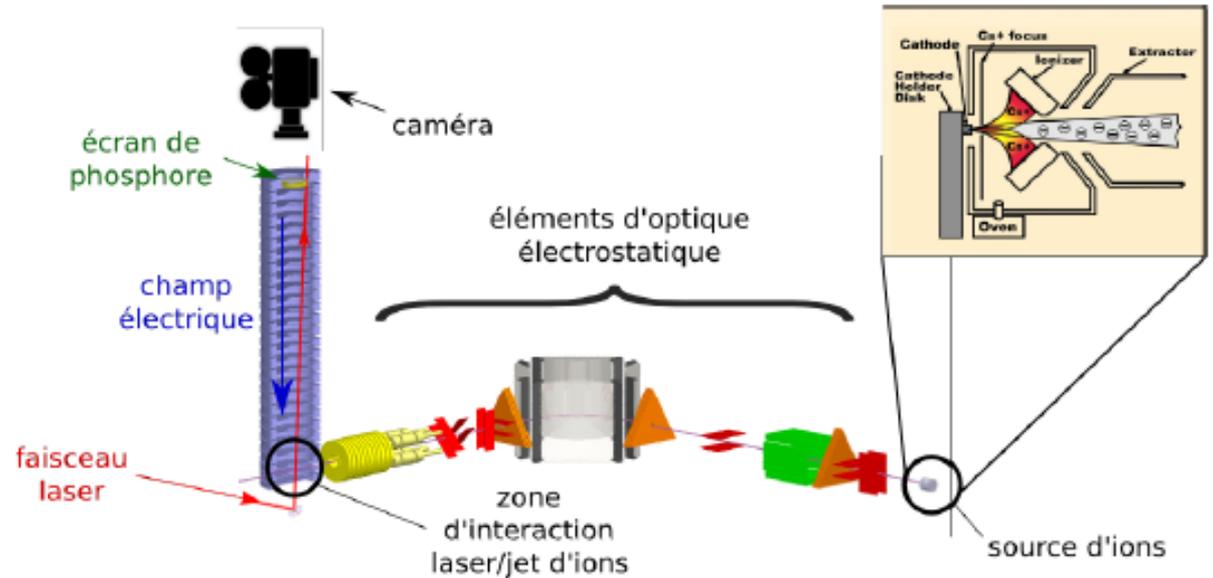
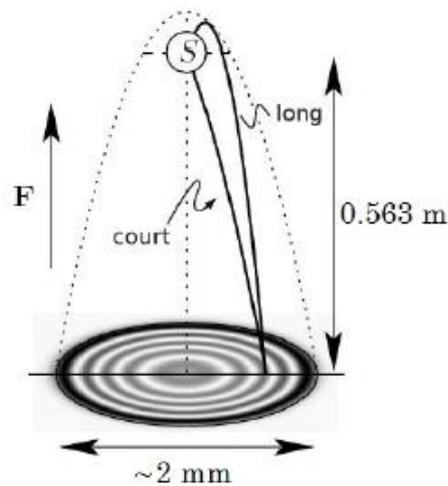
puissance intracavité

La théorie est représentée avec une section efficace supposée $\sigma = 3.6 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ et 3 décalages latéraux possibles des faisceaux laser : 0, 250 et 400 μm , de haut en bas.

D. Bresteau *et al.*, *Rev. Scient. Instr.* **88**, 113103 (2017)

A. Simonin *et al.*, *Nuc. Fus.* **61**, 046003 (2021)

Microscopie de photodétachement



C. Blondel *et al.*, *Phys. Rev.* **77**, 3755 (1996)
 R. Peláez *et al.*, *J. Phys. B* **42**, 125001 (2009)

$$j(\rho) \propto \text{Ai}^2 \left[\frac{1}{\lambda_0} \left(\frac{\rho^2}{4z_0} - \frac{\epsilon}{qF} \right) \right]$$

Mesures d'affinités électroniques

Z	Élément	eA (m^{-1})	Inc. (m^{-1})	eA (eV)	Inc. (μeV)	Référence
16	^{32}S	1675297,53	0,41	2,077104	0,5	
14	Si	1120724,40	0,6	1,389521	0,7	Chaibi <i>et al.</i> , <i>Eur. Phys. J. D</i> 58 , 29 (2010)
8	^{16}O	1178467,59	0,7	1,461114	0,9	
16	^{34}S	1675297,76	0,85	2,077104	1,1	Carette <i>et al.</i> , <i>Phys. Rev. A</i> 81 , 042522 (2010)
34	Se	1629727,6	0,9	2,020605	1,1	Vandevraye <i>et al.</i> , <i>Phys. Rev. A</i> 85 , 015401 (2012)
6	^{12}C	1017970,5	1	1,262123	1,2	Bresteau <i>et al.</i> , <i>Phys. Rev. A</i> 93 , 013414 (2016)
	^{13}C	1017963,3	1	1,262114	1,2	
32	Ge	994220,6	1	1,232676	1,2	Bresteau <i>et al.</i> , <i>J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.</i> 48 , 125001 (2015)
50	Sn	896944,7	1,3	1,112070	1,6	Vandevraye <i>et al.</i> , <i>J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.</i> 46 , 125002 (2013)
35	Br	2712917,0	1,5	3,363588	1,9	Blondel <i>et al.</i> , <i>Phys. Rev. A</i> 40 , 3698 (1989)
9	F	2743244,6	1,9	3,401190	2,4	Blondel <i>et al.</i> , <i>J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.</i> 34 , L281 and 2757 (2001)
8	^{18}O	1178460,6	2	1,461105	2,5	Blondel <i>et al.</i> , <i>Phys. Rev. A</i> 64 , 052504 (2001)
	^{17}O	1178462,9	2,2	1,461108	3	
53	I	2467287,4	2,9	3,059046	4	Peláez <i>et al.</i> , <i>J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.</i> 42 , 125001 (2009)
52	Te	1589618	5	1,970875	6	Haeffler <i>et al.</i> , <i>Z. Phys. D</i> 38 , 211 (1996)
15	P	602179	8	0,74661	10	Peláez <i>et al.</i> , <i>J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.</i> 44 , 195009 (2011)
19	K	404454	10	0,50146	12	Andersson <i>et al.</i> , <i>Phys. Rev. A</i> 62 , 22503 (2000)
83	Bi	760066	10	0,94236	12	Bilodeau <i>et al.</i> , <i>Phys. Rev. A</i> 64 , 024501 (2001)
1	1H	608299	15	0,75419	19	Lykke <i>et al.</i> , <i>Phys. Rev. A</i> 43 , 6104 (1991)
51	Sb	844786	15	1,04740	19	Scheer <i>et al.</i> , <i>Phys. Rev. Lett.</i> 79 , 4104 (1997)
37	Rb	391918	16	0,48592	20	Frey <i>et al.</i> , <i>J. Phys. B: At. Mol. Phys.</i> 11 (1978) L589
3	Li	498490,0	17	0,618049	21	Haeffler <i>et al.</i> , <i>Phys. Rev. A</i> 53 , 4127 (1996)
5	B	225612	20	0,27972	25	Scheer <i>et al.</i> , <i>Phys. Rev. Lett.</i> 80 , 2562 (1998)

Photodétachement par laser

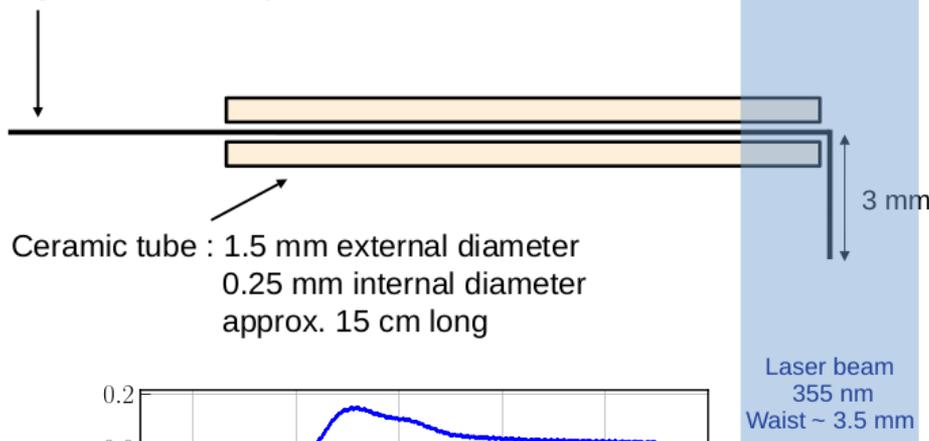
Principe



Processus de Photodétachement:

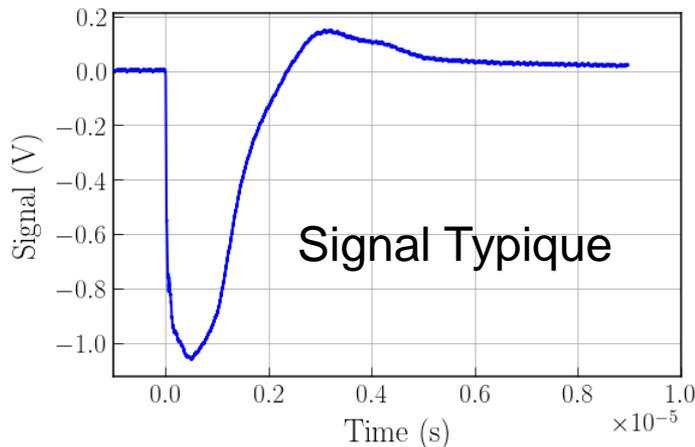


Tungstene wire 200 μm diameter



Principe :

On polarise la sonde au dessus du potentiel plasma afin de récolter les électrons récemment photo-détachés par le laser.

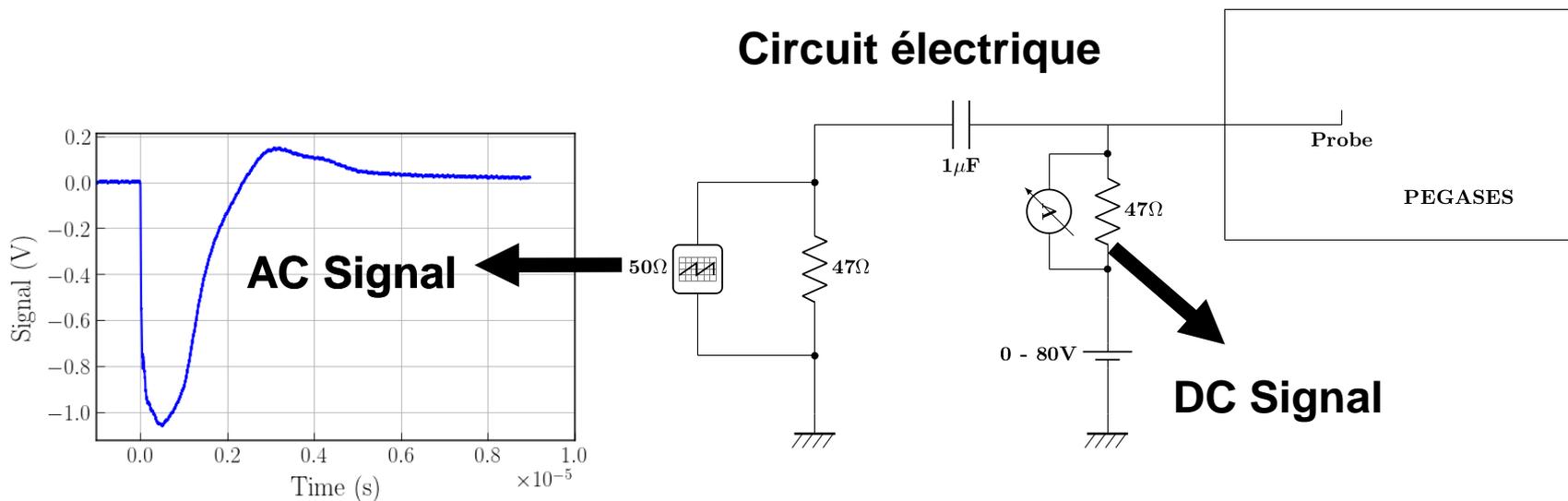
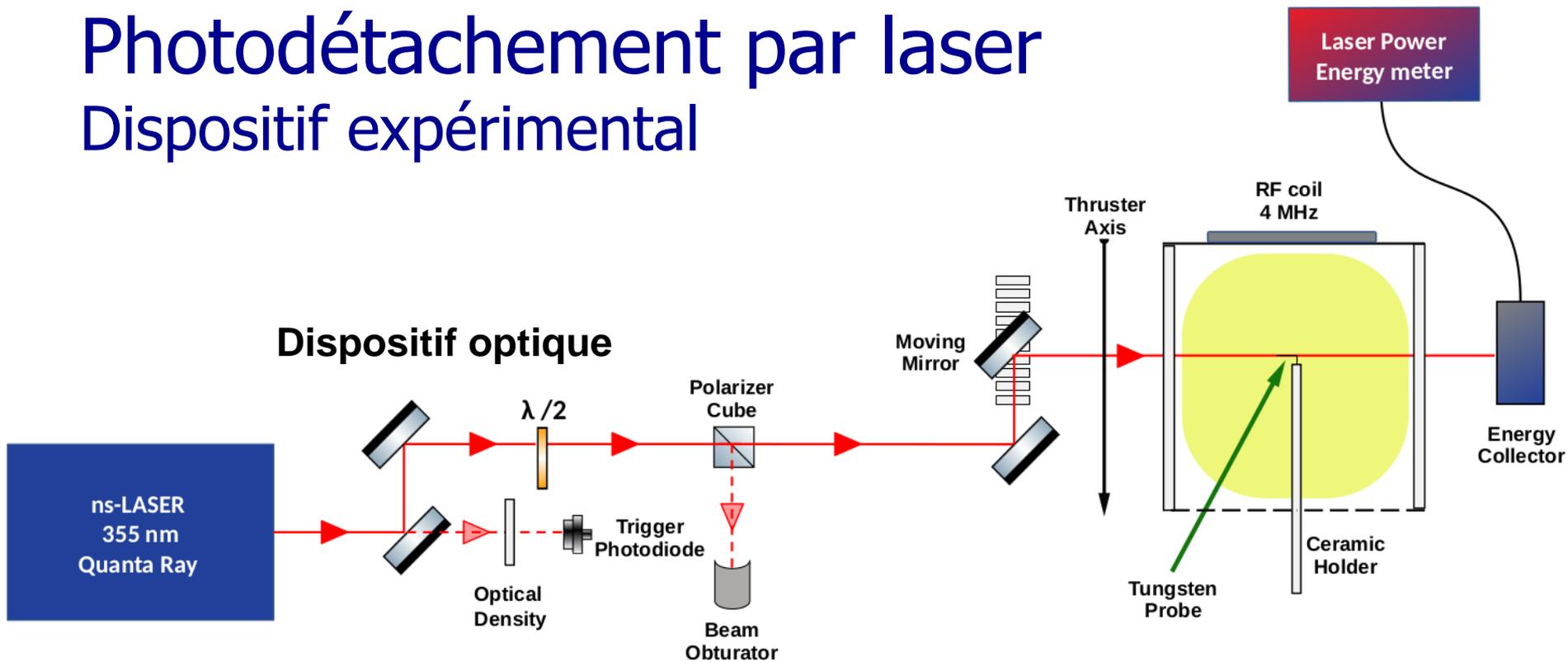


$$\alpha = \frac{n^-}{n_e} = \frac{\Delta I_e}{I_{DC}}$$

Bacal et al., Rev. Scient. Instruments, 2000

Photodétachement par laser

Dispositif expérimental

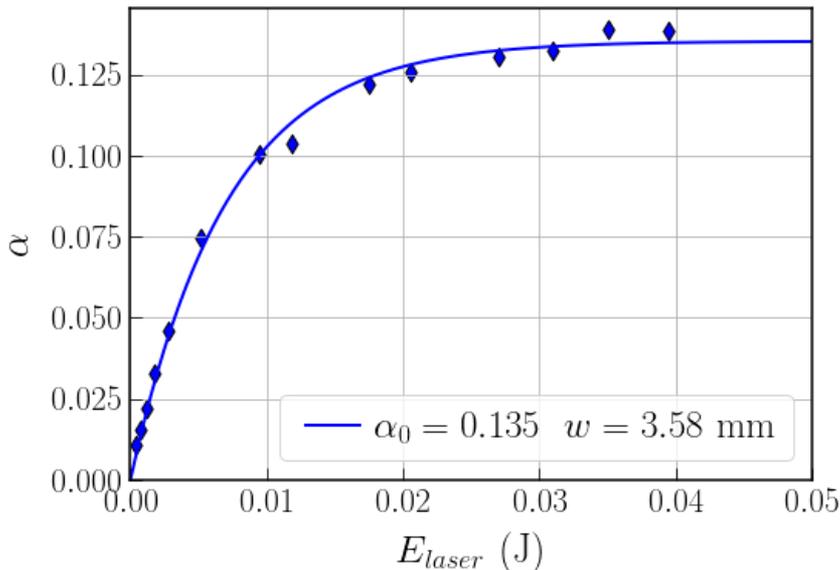


Photodétachement par laser

Vérification obligatoire (Bacal et al., Rev. Scient. Instruments, 2000)



Saturation avec l'énergie du laser

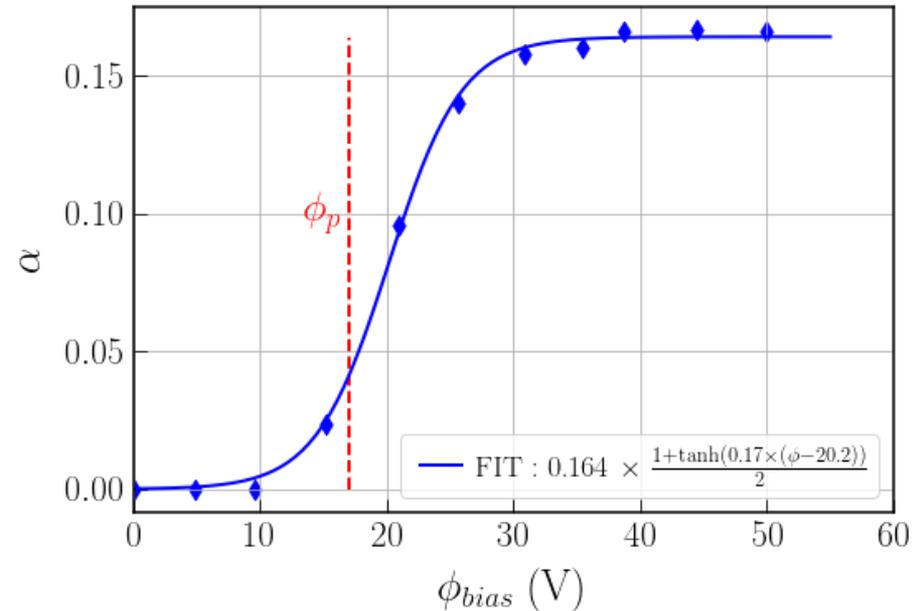


$$\alpha = \alpha_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{\sigma}{2\pi w^2} \frac{E_{Laser}}{E_{phot}}\right) \right)$$

Dans ces conditions expérimentales :

$E_{laser} \sim 40 \text{ mJ}$

Saturation avec la tension de polarisation



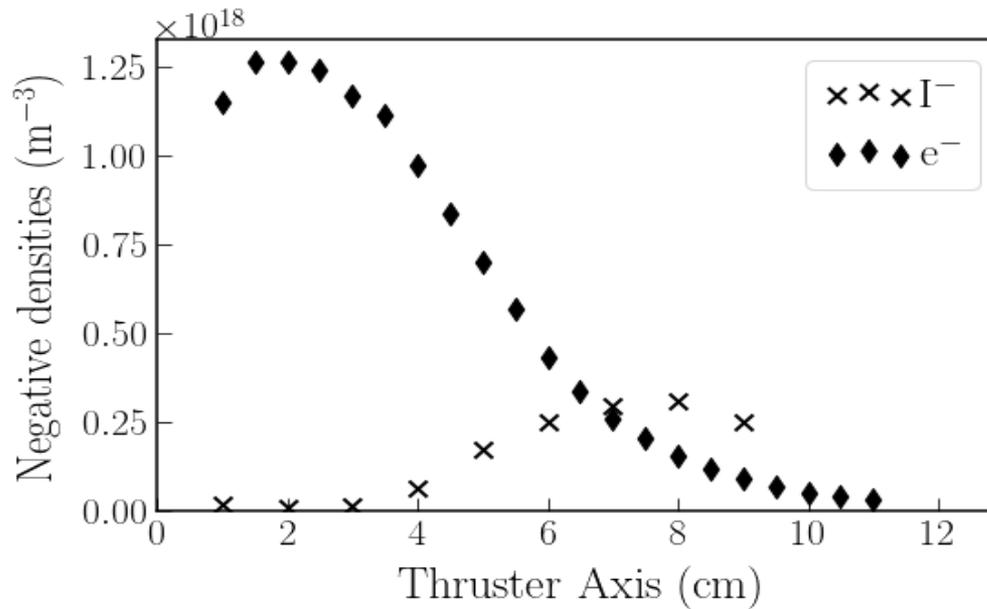
Dans ces conditions expérimentales :

$V_{bias} = 35V$

Espèces chargées dans PEGASES



15 mTorr – 200 W



$$\alpha = \frac{n_-}{n_e}$$