

H. Monard - LAL

Ecole Accélérateur IN2P3  
Mars 2016-Bénodet



*Les Sources d'électrons*

# Plan de l'exposé

- Rappels
- canon à électrons
- Processus émissions
- conclusions



A la recherche de la source idéale

# Qu'est-ce qu'un électron ?

- **Une particule chargée** (1897)

$$q = -1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = 9.01 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$E_0 = 0.511 \text{ MeV}^*$$

$$E = mc^2$$

Masse très faible !

La plus « légère » des particules (avec e+) \*\* neutrino !!

- **Sensible au champ électrique  $\vec{E}$  et magnétique  $\vec{B}$**

$$\vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

accélération

rotation

!! Seules les particules chargées sont accélérées

Rapidement relativiste  
et trajectoires hélicoïdales

## Paramètres relativistes

$\beta = v/c$ \*\* vaut rapidement  $\sim 1$

$\gamma = E/E_0 + 1 \sim E/E_0 \sim 2 E$  Energie en MeV

Exemple :  $E = 2 \text{ MeV}$

$$\gamma = 2/0.5 + 1 = 5$$

$$\beta = \sqrt{1 - 1/\gamma^2} = 0.9797$$

$$v = 2.94 \times 10^8 \text{ m/s}$$

\*1 eV = énergie d'un électron sous une ddp de 1 V

\*\*c =  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

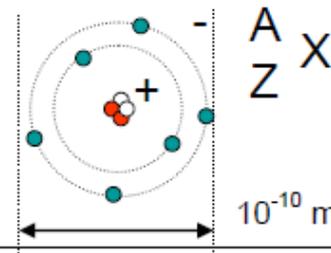
# Où se trouvent les électrons ?

- Matière = atomes = noyau (protons+neutrons) + électrons
- Les électrons sont **liés** au noyau par interaction EM et sont placés sur certaines orbites (énergies particulières discrètes)  
(modèle classique)
- Matière solide = ensemble d'atomes **conducteur** = électrons de valence mis en commun et réseau d'ions
- Il faut **perturber** la matière pour lui ôter ses électrons

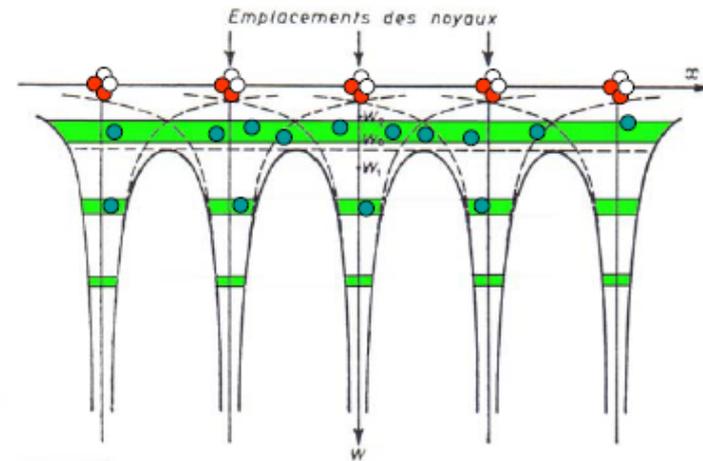


Travail de sortie W

modèle planétaire en physique classique



Z = nbre de protons (+)  
nbre d'électrons (-)  
N = A - Z = nbre de neutrons

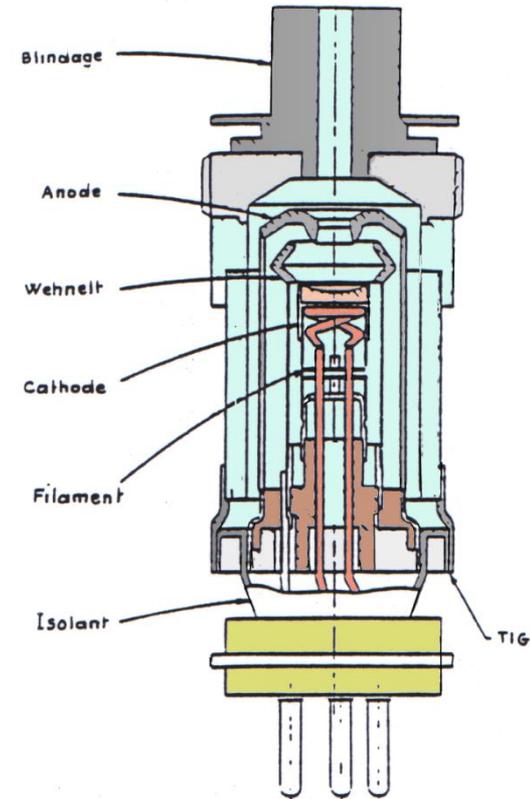
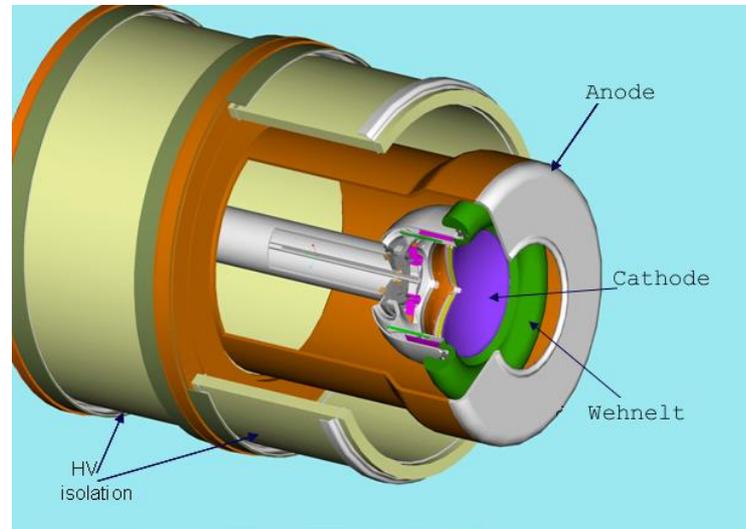
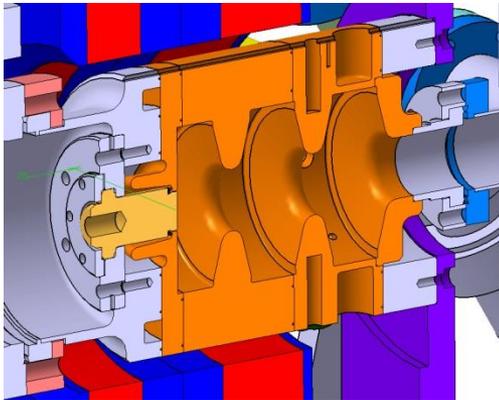


Statistique de Fermi-Dirac

Densité électrons  $\sim 10^{23}/\text{cm}^3$

# Comment fait-on Un faisceau d'électrons ?

De quoi est constitué un canon à électrons ?



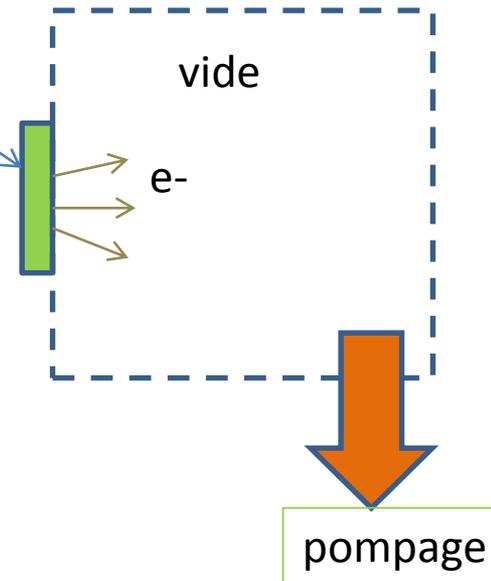
# Comment fait-on un faisceau d'électrons ?

Zone vide d'air (P  $10^{-6}$  à  $10^{-10}$  mbar ) + cathode + champ électrique E (keV au MeV)

- Cathode : émetteur électrons



Nous verrons :  
Trois principes physiques  
d'émission des électrons  
(matériau solide)



# Comment fait-on un faisceau d'électrons ?

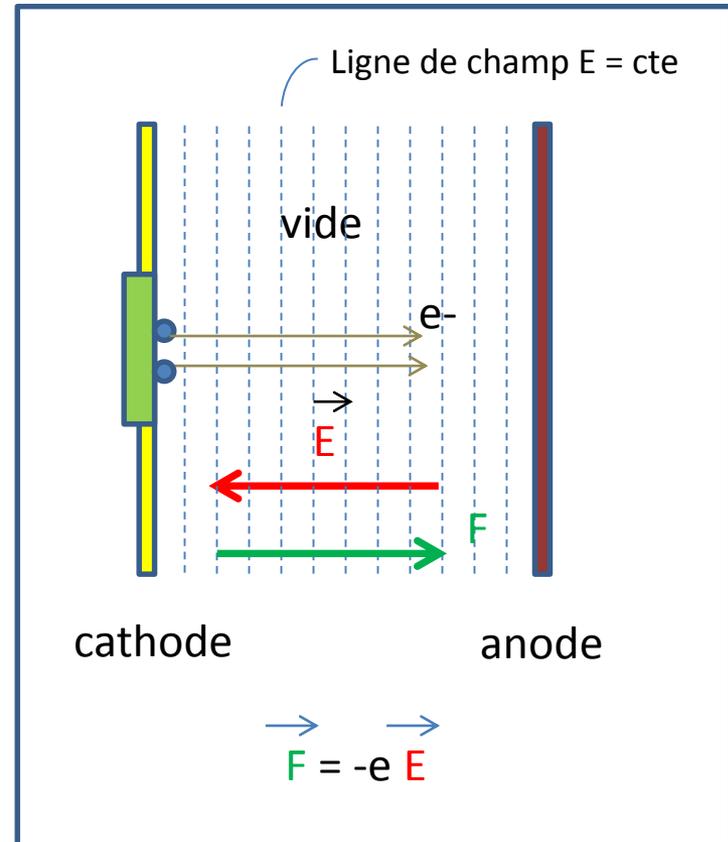
Comment fait-on un canon à électrons ?

- Cathode : émetteur électrons
- Créer un champ électrique  $\vec{E}$

Le champ E accélère les électrons  
(augmente leur vitesse)

o le plus simple : anode  
plaques // chargées  
ou géométrie plus complexe  
→ champ E statique

o plus complexe : cavité RF  
canon RF : cavité résonante EM  
(mode TM 010)  
→ champ  $E = f(t)$



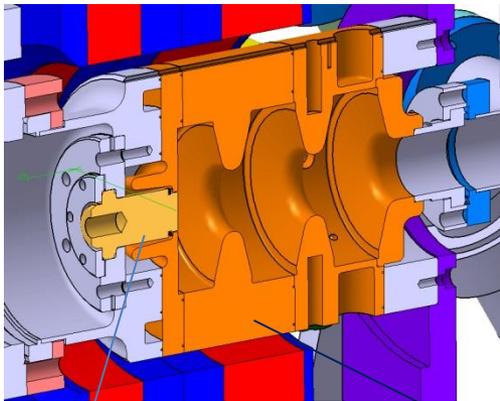
$$E \text{ [V/m]} = V / d$$

# Comment fait-on un faisceau d'électrons ?

Comment fait-on un canon à électrons ?

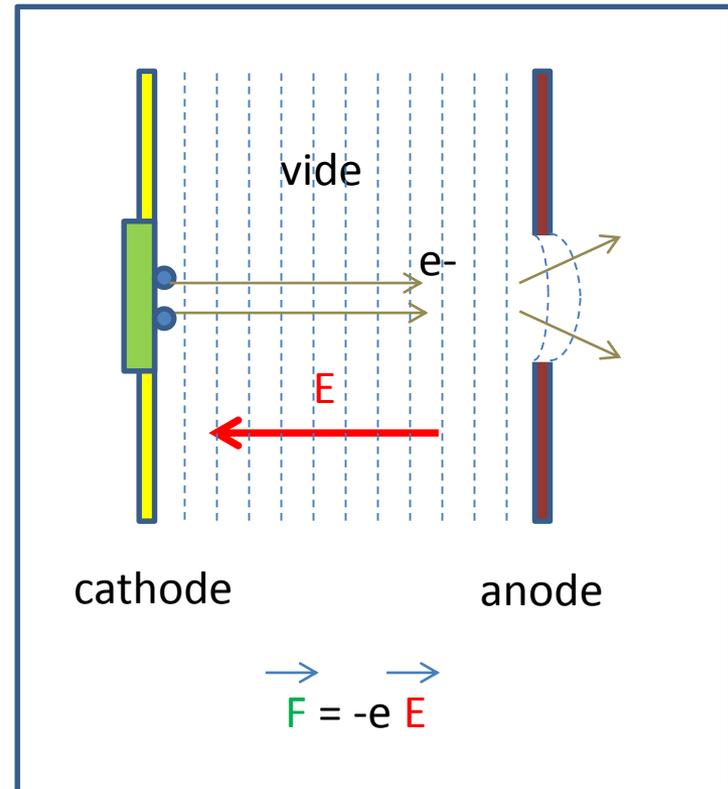
- Cathode : émetteur électrons
- Créer un champ électrique E (anode)

- Faire un trou !



Canon RF

cathode



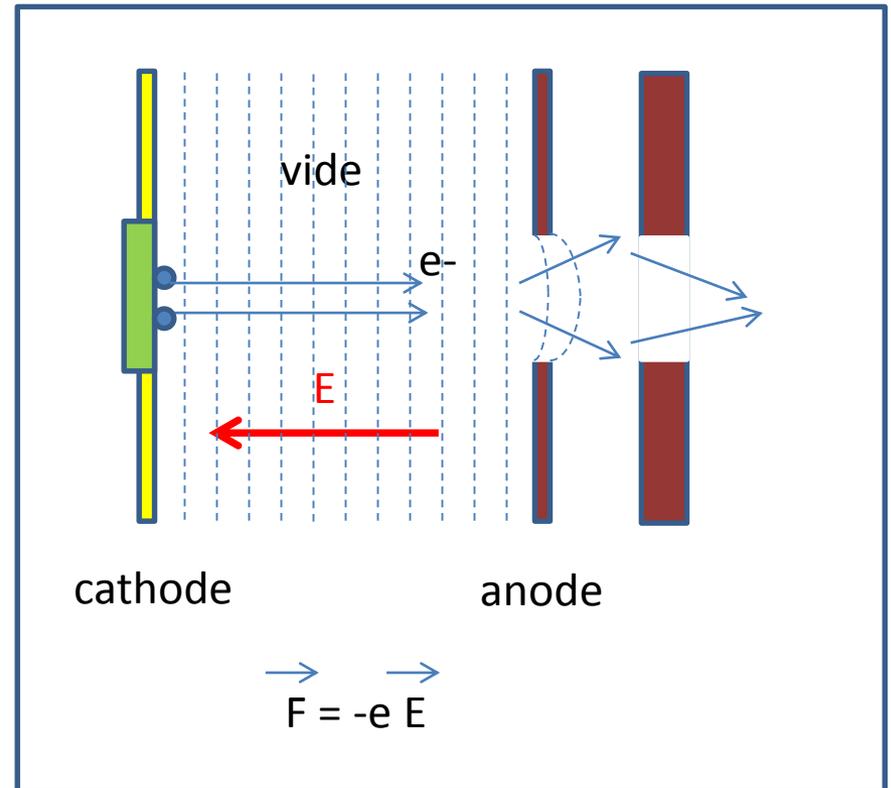
# Comment fait-on un faisceau d'électrons ?

Comment fait-on un canon à électrons ?

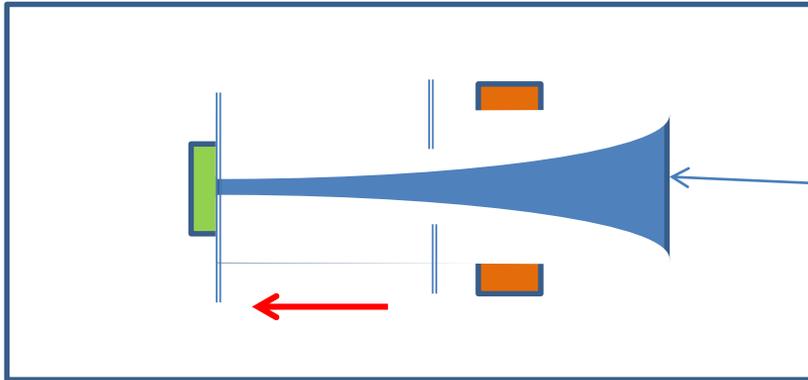
- Cathode : émetteur électrons
- Créer un champ électrique E
- Faire un trou !
  - o déformation lignes de champ
  - o défocalisation du faisceau
  - focalisation nécessaire

- Focaliser

- o électrostatique (Einzel)  
( énergie  $\sim$  keV)
- o magnétique (solénoïde, quadrupôle)  
( énergie  $\sim$  MeV)



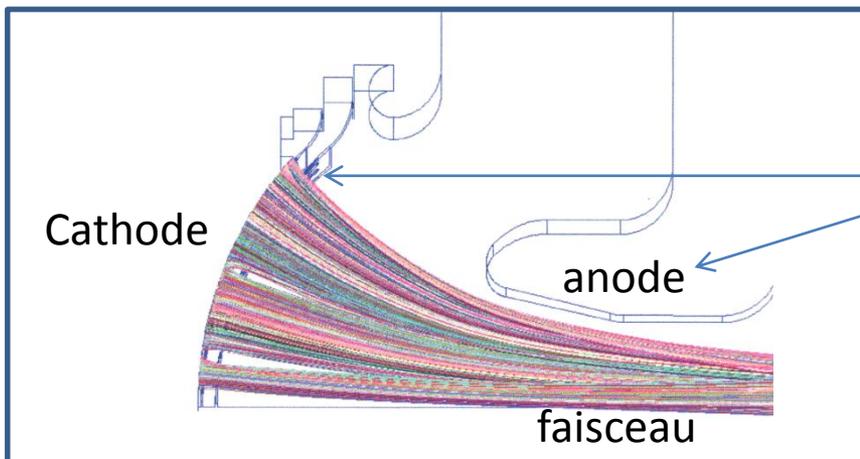
# Comment fait-on Un faisceau d'électrons ?



Caractérisation :

- Courant (moyen) : Nbre e-/s
- Taille et divergence = émittance
- Brillance = courant/émittance

Problème : les électrons se repoussent ! : divergence du faisceau



Modification géométrie plaques //  
en géométrie plus complexe :

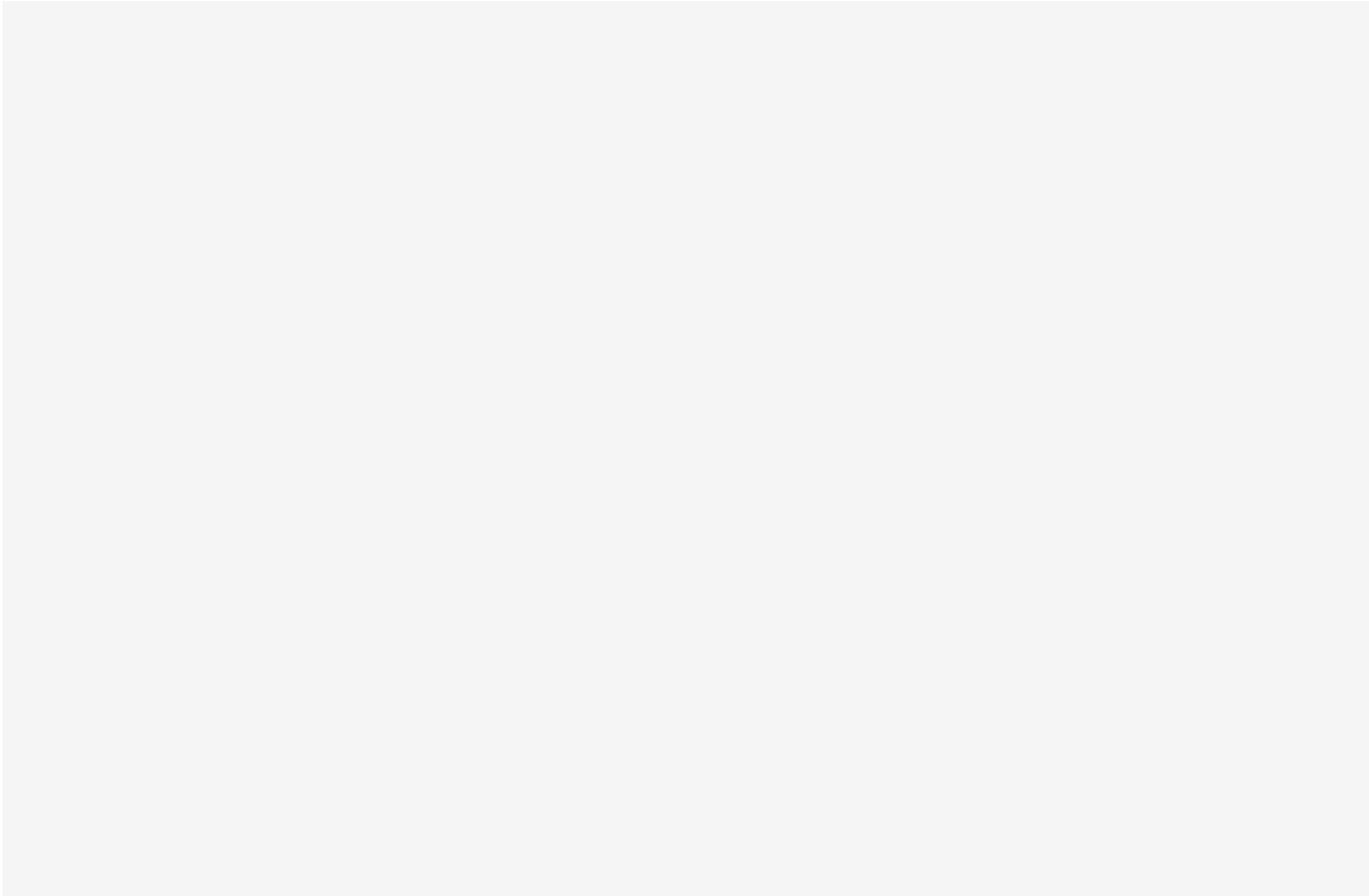
Modifie ligne de champ E

→ Géométrie de Pierce (1954)

JR Pierce

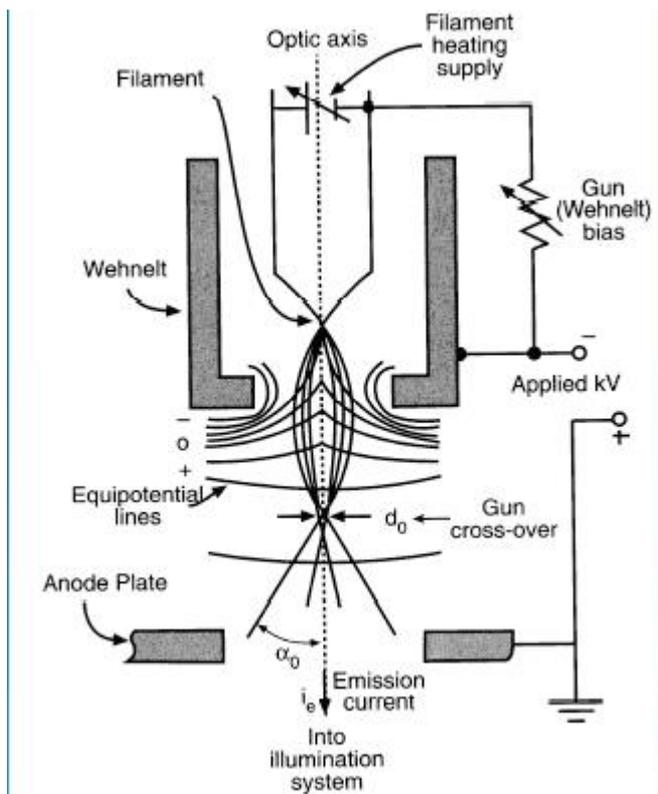


# Exemple Faisceau électrons

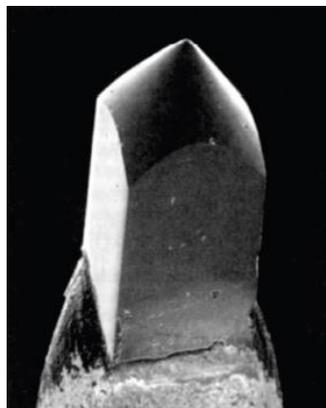


Tube de Crookes (1870)

# Exemple canon



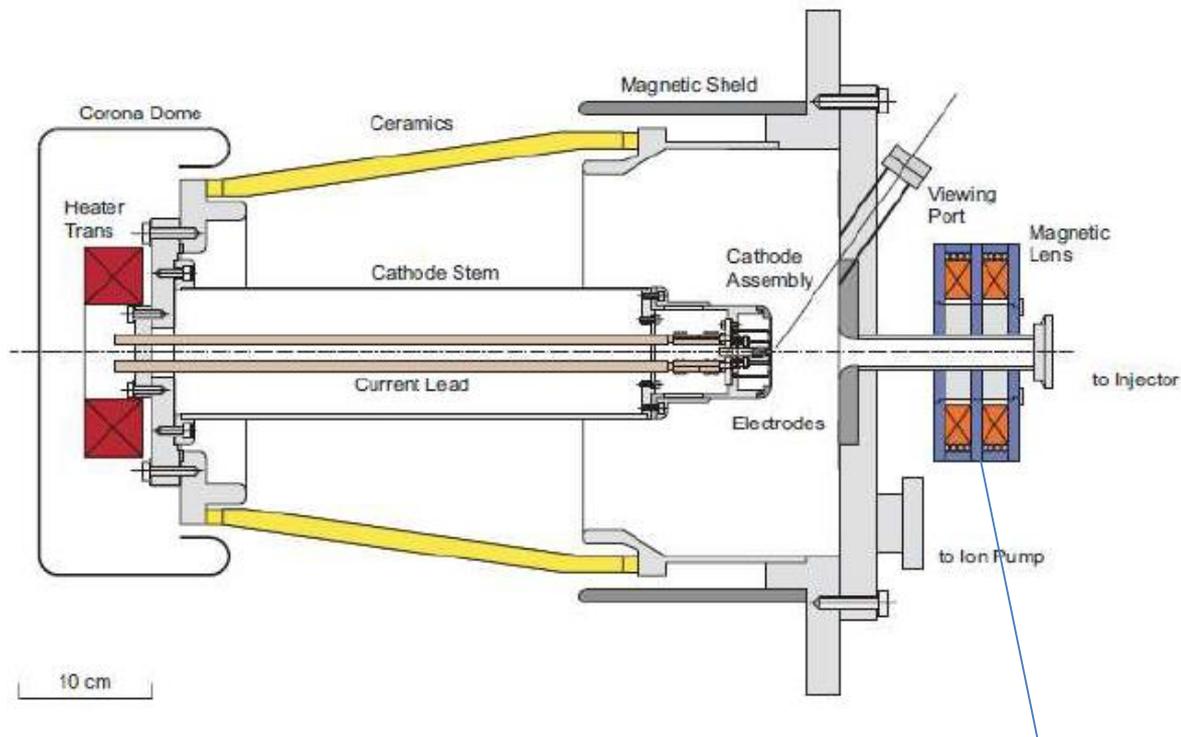
W (tungstène)



LaB<sub>6</sub>



# Exemple canon



focalisation

Image : T Shintake

# Qualités du faisceau recherchées

## Qualités recherchées

- Faisceau **Intense** : courant élevé
  - Cathode **robuste** : longue durée de vie
  - Faisceau **Brillant** :  $> 10^{13} \text{ A}/(\text{m.rad})^2$
  - Durée **impulsion courte**
- Industrie** (grouped with Intense and robuste)
- Recherche** (grouped with Brillant and impulsion courte)
- $> 100 \text{ mA}$  (linked to Intense)
- $> 1 \text{ mois}$  (linked to robuste)
- $< 1 \text{ ns}$  (linked to impulsion courte)

### Recherche

- Injecteurs grands accélérateurs
- Soudure cavité supraconductrice
- Source RX
- MEB (Microscope Electronique)
- ...

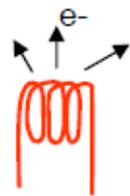
### Industrie

- Soudure
- Évaporation métaux
- Production RX : contrôle non destructifs
- Stérilisation matériel médical
- Traitement de surface matériaux
- Polymérisation (protection câbles)
- Écrans TV, oscillo (disparus !)
- ...

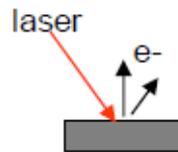
# Processus d'émission

A partir de la matière **stable** :

- Si on **chauffe** suffisamment      émission **THERMO-IONIQUE**
- Si on **éclaire** suffisamment      émission **PHOTOELECTRIQUE**
- Si on applique un fort **champ électrique**      émission **DE CHAMP**
- autres : émissions ferroélectrique, plasma, ...



THERMO-IONIQUE



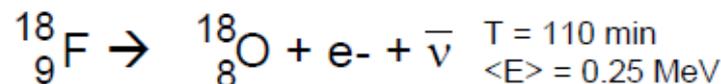
PHOTOELECTRIQUE



DE CHAMP

→ Plusieurs processus peuvent avoir lieu en même temps

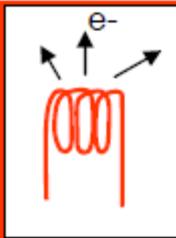
Si la matière est **instable** naturellement : radioactivité  $\beta^-$        ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + e^- + \bar{\nu}$



Spectre en énergie de l'électron et continu  
Temps émission 30 s à 30 ans

Sources  
**THERMOIONIQUES**





# Emission Thermoionique

Loi de Richardson (1902)

$$J_s = A T^2 e^{-W/(kT)}$$

$J_s$ : densité de courant	[A/cm <sup>2</sup> ]
$A$ ~ constante ~ 120	[A/cm <sup>2</sup> /K <sup>2</sup> ]
$T$ : température	[K]
$k$ : constante de Boltzmann	[eV/K]
$W$ : travail de sortie	[eV]

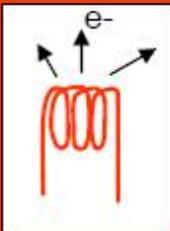
Pour **augmenter**  $J_s$  :  $T \uparrow$   $W \downarrow$

Matériau avec  $T_{\text{fusion}}$  élevée et  $W$  faible : **corps pur n'existe pas !**

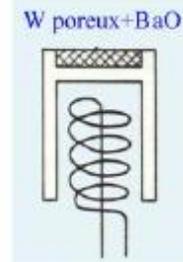
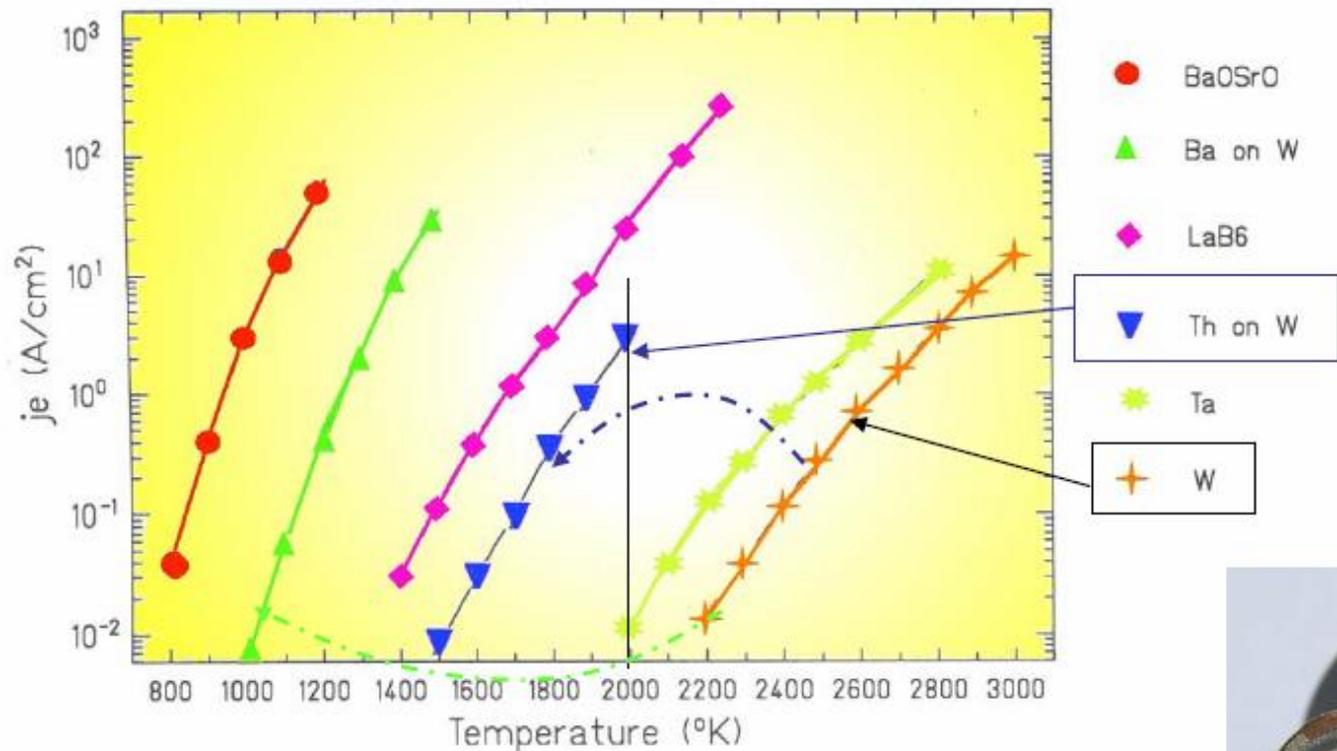
En pratique : matrice en matériau réfractaire + élément chimique qui rend  $W$  plus faible (**activation**)

En unité pratique :  $J_s \sim 120 T^2 e^{-11600 W/T}$        $T$  [K],  $W$  [eV]

Exemples : pour Tungsten pur  $T = 2000$  K,  $W = 4.5$  eV  $J_s \sim 0.005$  A/cm<sup>2</sup>  
Tungsten W+Th  $T = 2000$  K,  $W = 3.2$  eV  $J_s \sim 4$  A/cm<sup>2</sup>



# Cathodes Thermoioniques

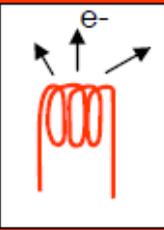


$\phi_{Cs} = 1.94 \text{ eV}$   
 $\phi_W = 4.53$   
 $\phi_{BaO} = 1.57$   
 $\phi_{LaB_6} = 2.66$

Diminution de  $\phi$  et de  $T^\circ K$  de travail

Durée de vie augmentée

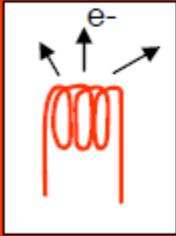




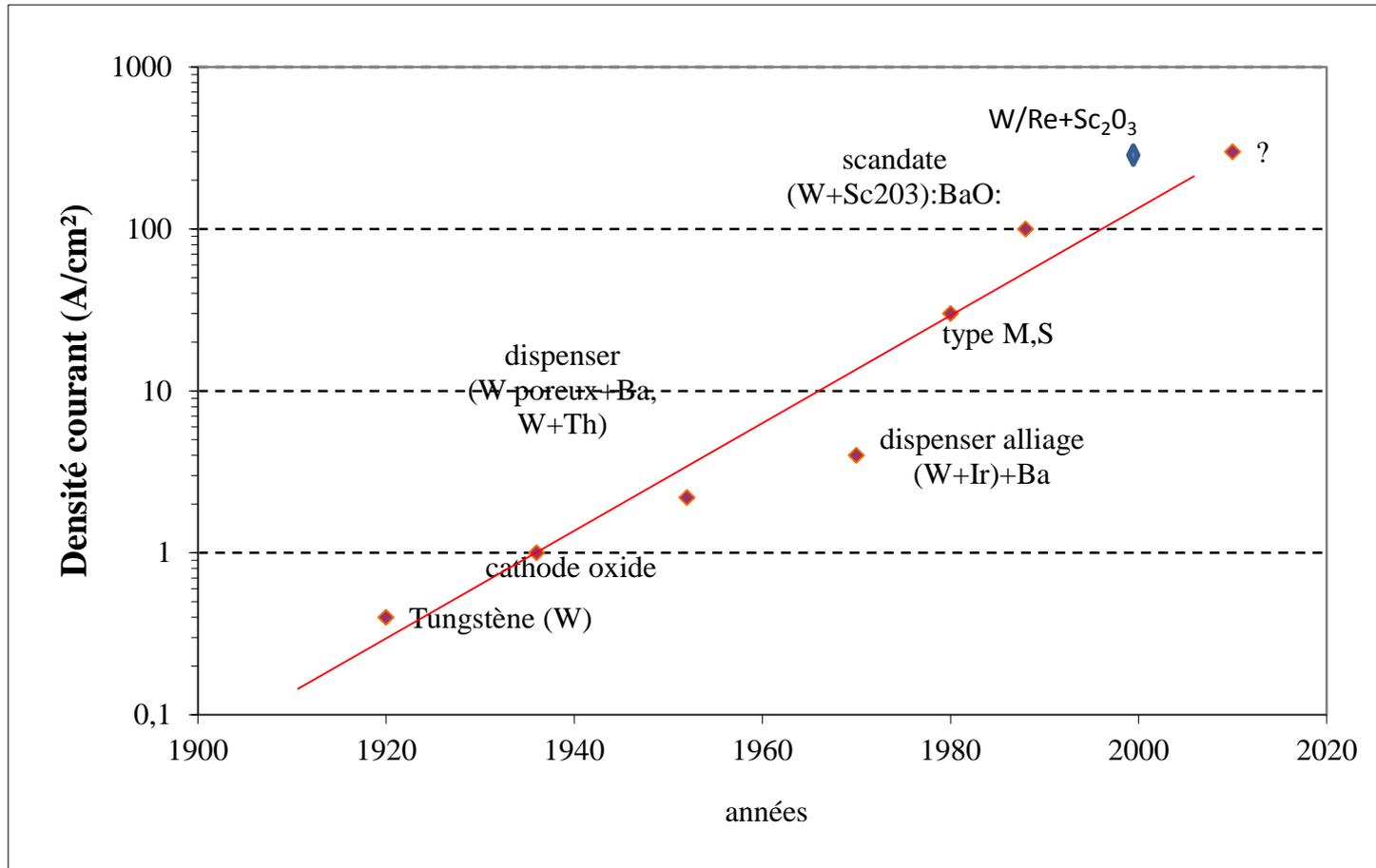
# Cathodes Thermoioniques

Composé	Matrice	Température (K)	Travail Sortie (eV)	Durée Vie (h)
ThO <sub>2</sub> W <sub>2</sub> C fritté	W <sub>2</sub> C	2200	2.7	10000 (3-4 ans)
BaO + SrO Dispenser L	W	1400	2.0	50000 (15 ans TV)
(BaO,CaO) <sub>3</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> W imprégné	W	1300	2.0	50000 (klystron)
LaB <sub>6</sub>	Ta	1700	2.8	1000

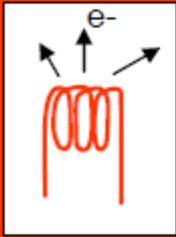
Température de travail pas trop élevée : dégazage, dégradation  
Bonne durée de vie > 10000 h  
Si vide est mauvais  $P > 10^{-5}$  mbar : cathode métallique



# Cathodes Thermoioniques



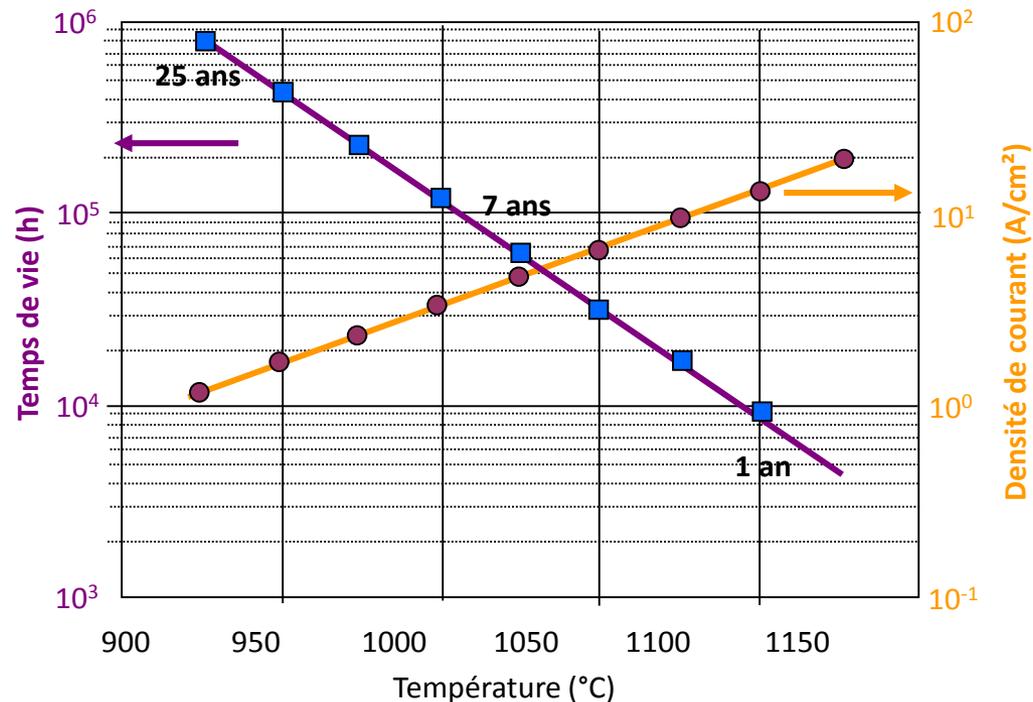
Densité de courant maximale atteinte en fonction des années



# Cathodes Thermoioniques

Durée de vie d'une cathode de type M

Matrice de  $[W \text{ poreux}] + 5BaO : 3CaO : 2Al_2O_3$



Durée de vie = temps ou bout duquel on observe une baisse de 10% du courant

# Durée de vie

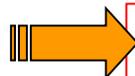
La limitation de la durée de vie est due à

- La haute température : stress thermique pour la matrice et pour la couche d'activation (évaporation)
- La pollution de surface : l'activation se transforme en contamination à cause du vide résiduel
- bombardement éventuel de la surface de la cathode

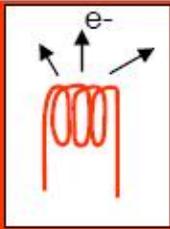
La durée de vie d'un appareil utilisant une source thermoionique d'électrons est généralement la durée de vide de la cathode (ex : klystron)

Le nombre d'électrons est **infini** (très grand) : le tarissement n'est pas du au nombre fini d'électrons mais aux conditions d'extraction qui changent

Une cathode n'est pas un réservoir infini, mais **fini** d'électrons qui se vide Plus ou moins rapidement suivant l'intensité et la fréquence d'utilisation

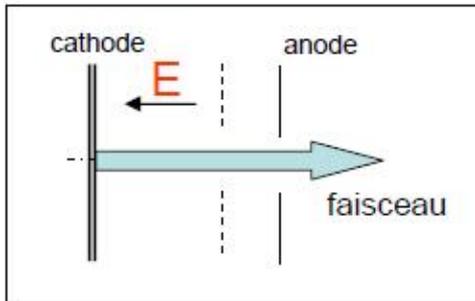


La source se tarie !



# Canons Thermoioniques

## Principe du canon

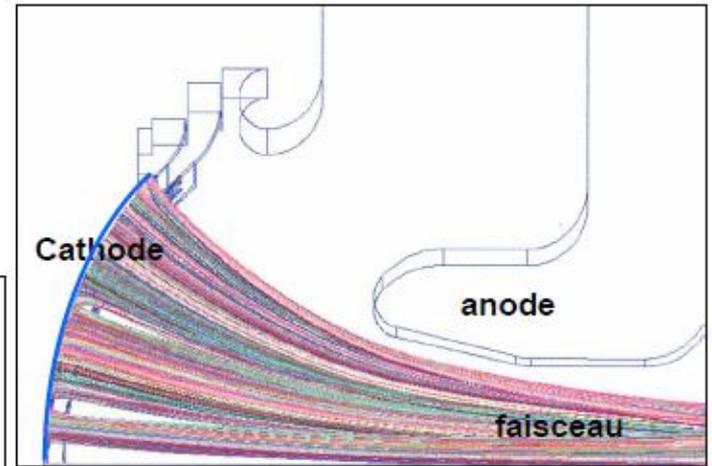


V : 10 à 1000 kV

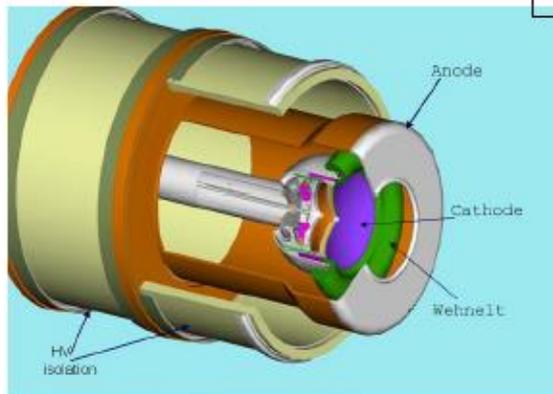
Child-Langmuir

$$I = P V^{3/2}$$

I : courant [A]  
V : tension [V]  
P : pervéance [ $A/V^{3/2}$ ]  
P = géométrie



Les cathodes sont généralement sphériques  
**Canons géométrie de Pierce**

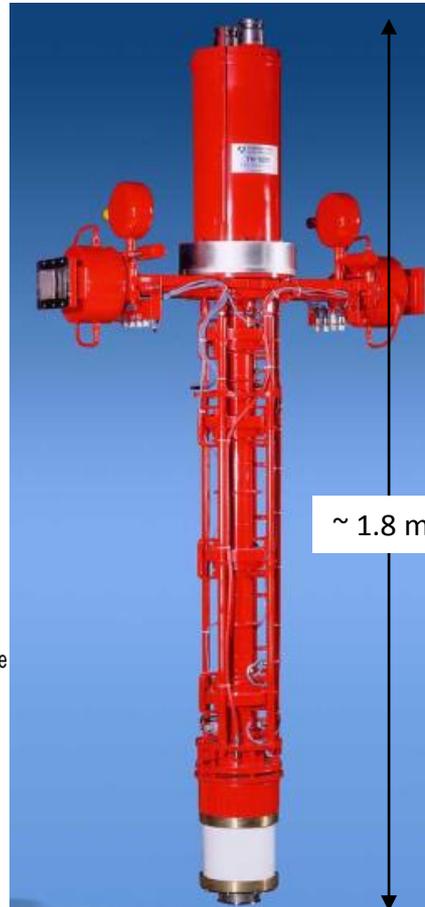
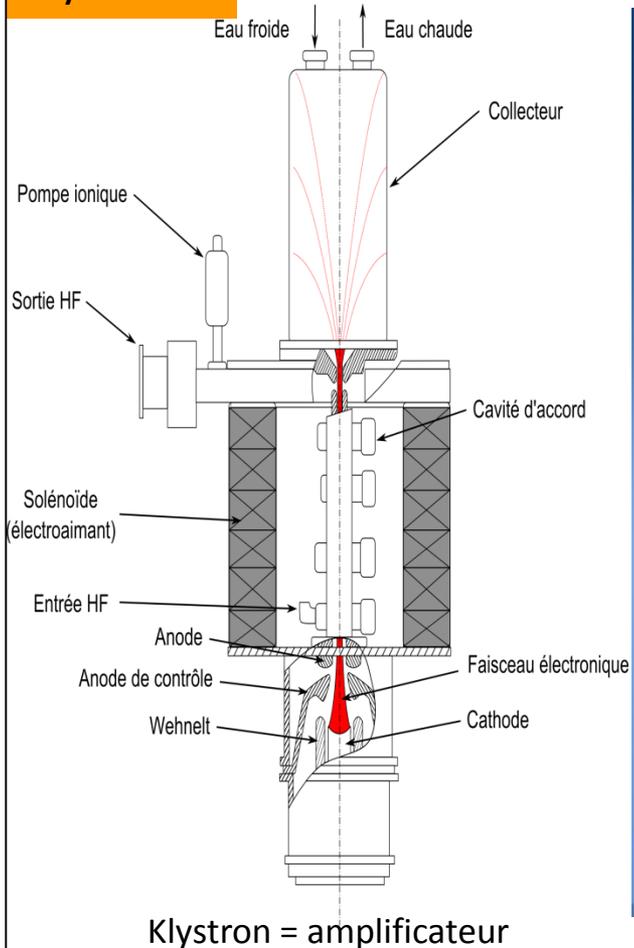


Le plus d'applications industrie + recherche

→ Robustesse + durée de vie

# Applications

## klystrons



PV reception 30 nov 1993 - TH2040E n° 24132

		1	
Vf	V	tension chauffage	39
$\Delta Vf/Vf$	%		
If	A	courant chauffage	15,5
Pf	W	Puissance chauffage	604,5
$\Delta Pf/Pf$	%		
Vk cr	kV	tension faisceau	232
Ik cr	A	courant faisceau	238
Va	kV	tension anode	
la	mA	courant anode	
Z	Ohm	impédance faisceau	975
$\mu P$		micropervéance	2,13
fr	Hz	fréquence répétition	150
Pct	kW	puissance moyenne corps	1
lct	mA	courant corps	
<b>Ps moy</b>	<b>kW</b>	<b>puissance moyenne RF sortie</b>	<b>11,3</b>
tp V	$\mu S$	largeur Vk à 75%	3,7
tp F	$\mu S$	largeur RF à -3dB	3
Fo	MHz	fréquence RF	2998,5
Pecr	W	puissance crête RF entrée	130
<b>Pscr</b>	<b>MW</b>	<b>puissance crête RF sortie</b>	<b>25,1</b>
$\Delta Pscr$	dB	bande passante	
<b>G</b>	<b>dB</b>	<b>gain</b>	<b>52,9</b>
Rdt	%	rendement	45,5%
lfoc1	A	courant foc1	
lfoc2	A	courant foc2	
lfoc3	A	courant foc3	
lfoc	A	courant foc unique	17,5
lpi	$\mu A$	courant pompe ionique	<1

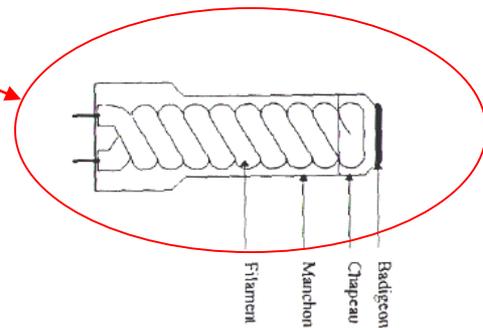
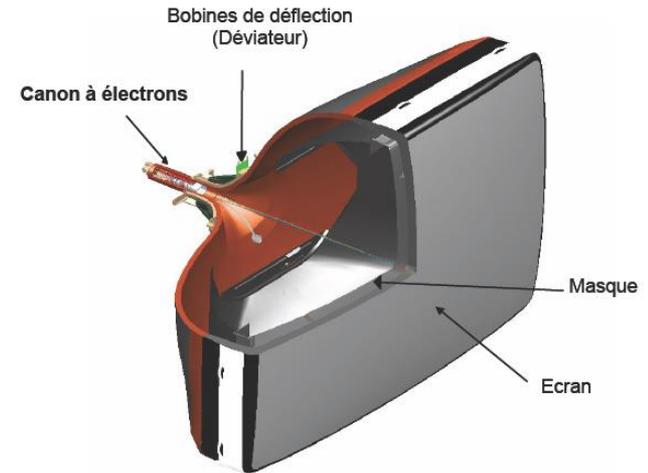
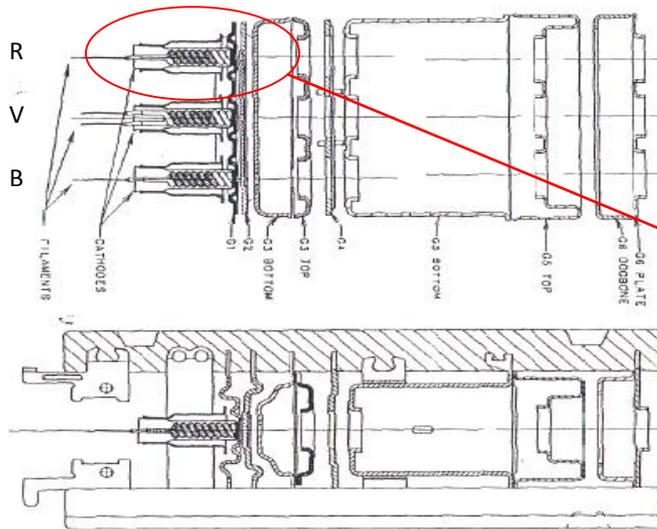
Cathode type M

Durée vie klystron = durée vie cathode

Garantie constructeur ~ 5000 h

# Applications

## Canon électrons écran TV



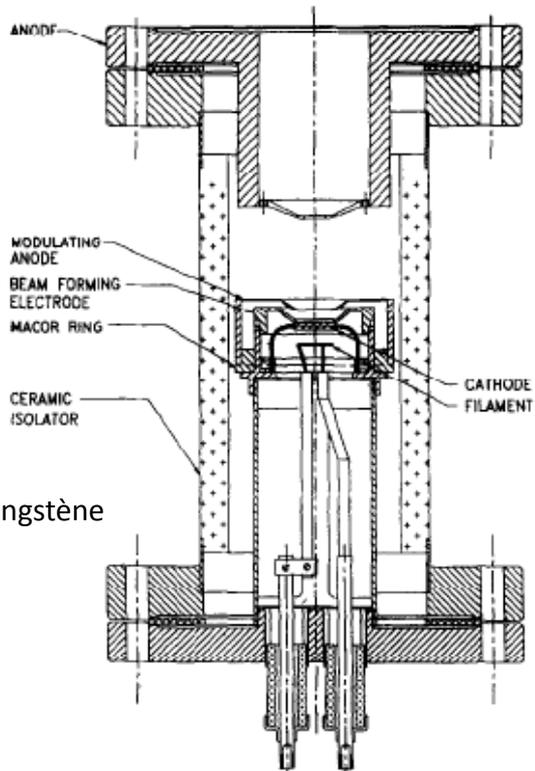
Cathode  $I \sim \text{mA}$

$T \sim 1000 \text{ K}$

Cathode à oxydes

# Applications

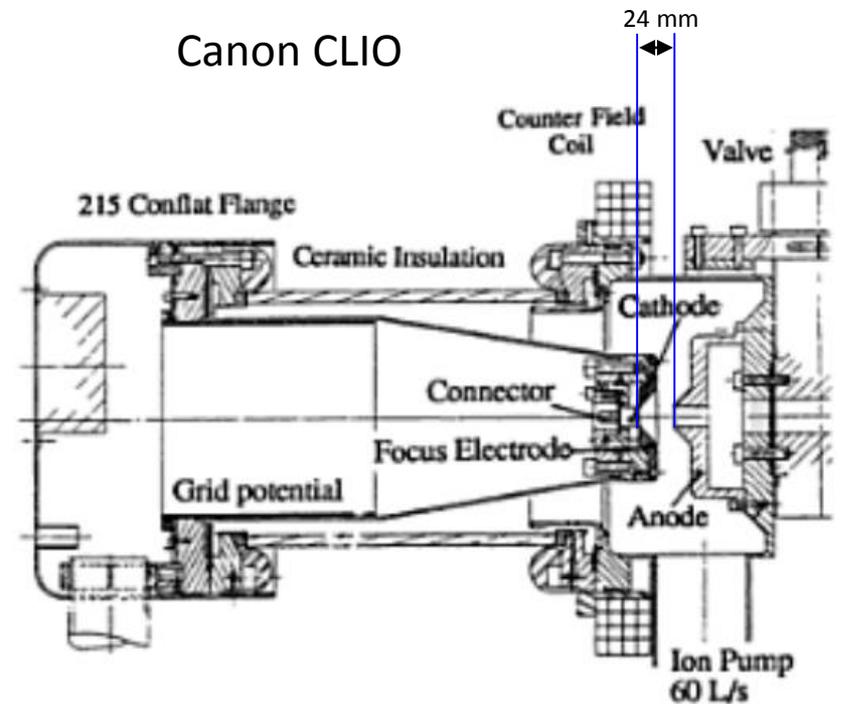
Canon pour LINAC



Filament tungstène

Fig. 1. Electron gun structure and assembly.

$I = 120 \text{ mA}$   $t = 2.6 \mu\text{s}$   $F = 1 \text{ Hz}$   $E = 40 \text{ keV}$



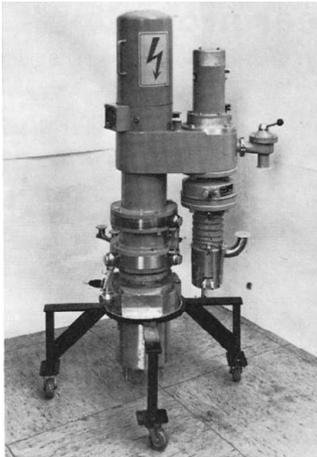
Canon CLIO

Cathode dispenser – canon Pierce

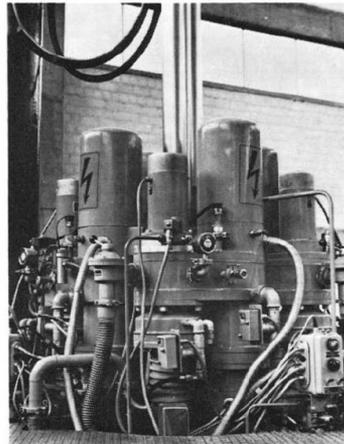
$I = 1 \text{ A}$   $t = 1 \text{ ns}$   $F = 500 \text{ MHz}$   $E = 90 \text{ keV}$

# Applications

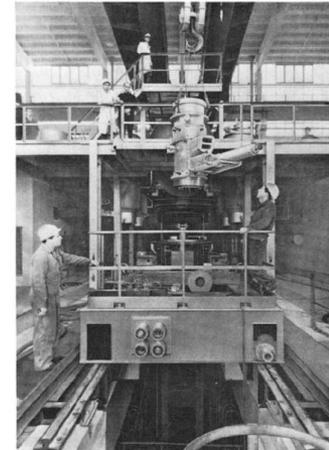
## Canon pour fusion métaux



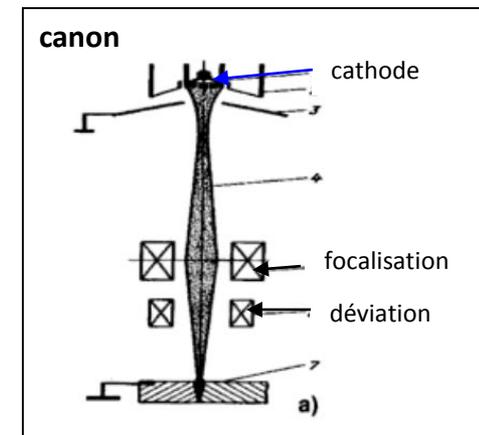
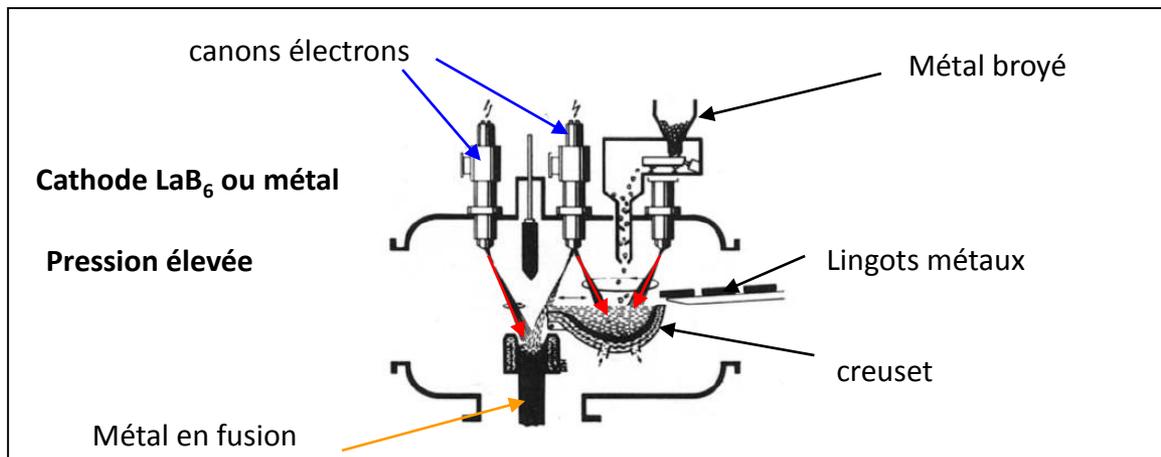
200 kW - 20 kV



4x140 kW - 20 kV

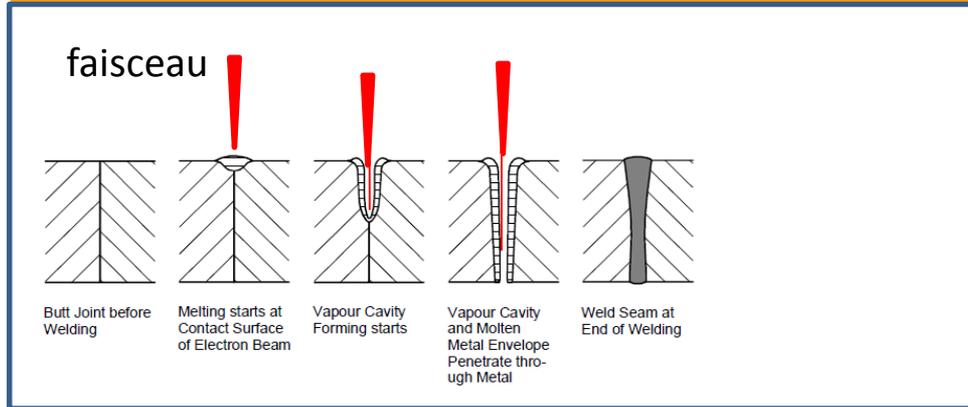


1.7 MW



# Applications

## Soudure par faisceau d'électron (electron beam welding)



$P \sim 1\text{MW}/\text{cm}^2$

Epaisseur soudée : 0,02 à 100 mm

Utilisé :

- Aéronautique
- Centrale nucléaire
- Médical
- Industrie auto
- Composants pour le vide
- ...



Avantages :

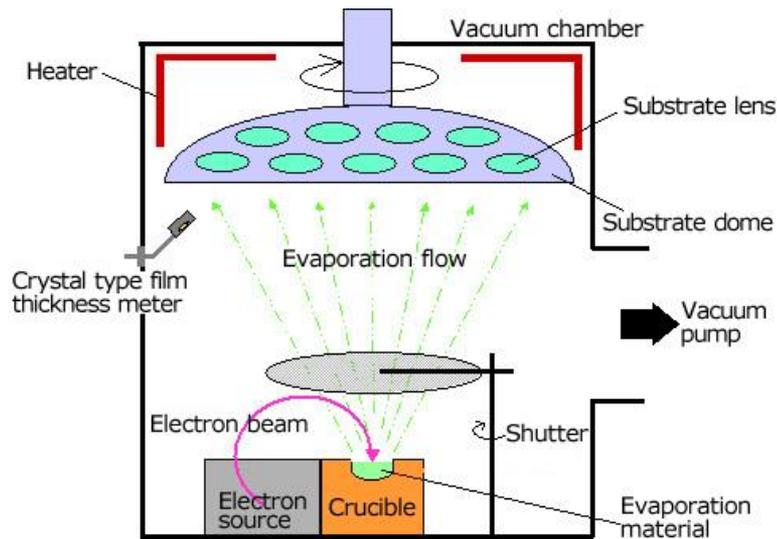
- grandes épaisseurs
- Retrait minimal
- Grande précision
- Grande vitesse de soudure

Métaux

- réfractaires
- Faiblement allié
- À grande conductibilité thermique (Cu, Al)

# Applications

Evaporation par faisceau d'électron (EBPVD Electron beam physical vapor deposition)



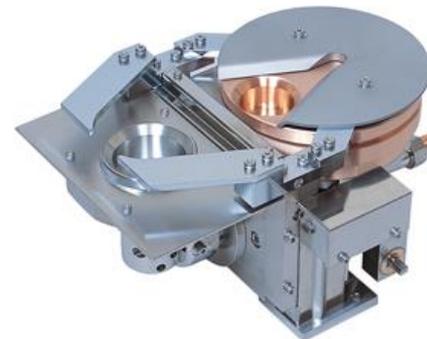
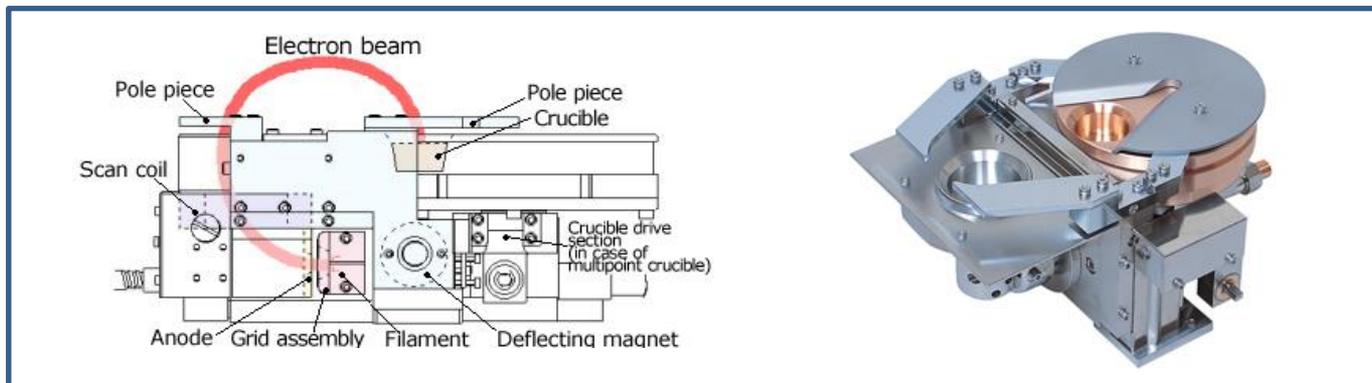
$P \sim 10 \text{ à } 100 \text{ kW}$

$E \sim 30 \text{ kV}$  courant  $\sim 1 \text{ A}$

$V_{\text{evap}} \sim 1 \text{ nm/min à } 1 \mu\text{m/min}$

Utilisé dans

- Electronique
- aéronautique
- Traitement surface miroir
- Couche protection chimique



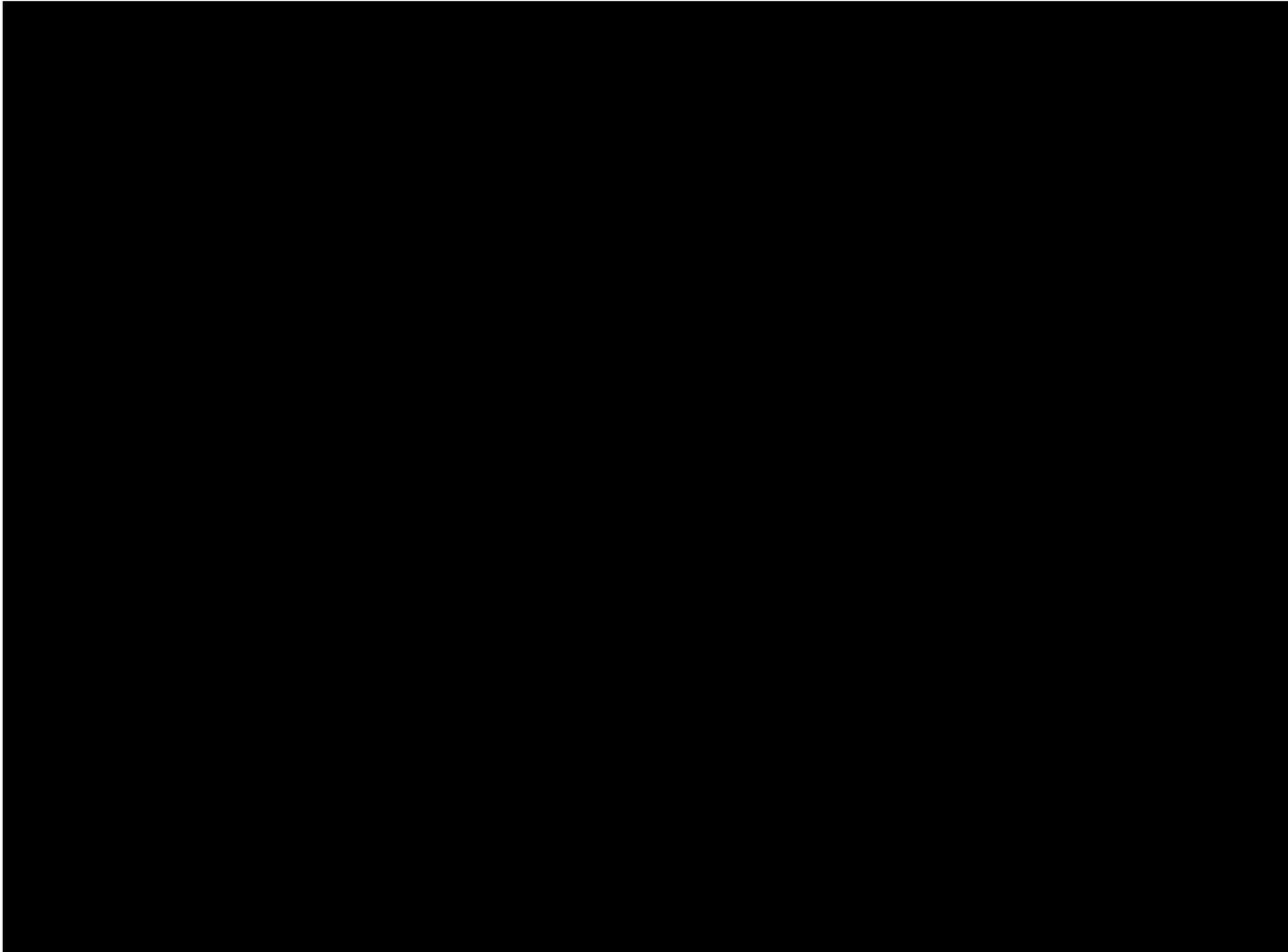
\* Métaux, alliages  
TiC, TiBr, ZrBr

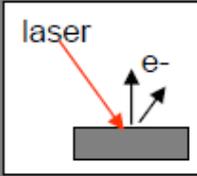
\* Co-évaporations

**LES SOURCES  
PHOTOELECTRIQUES**



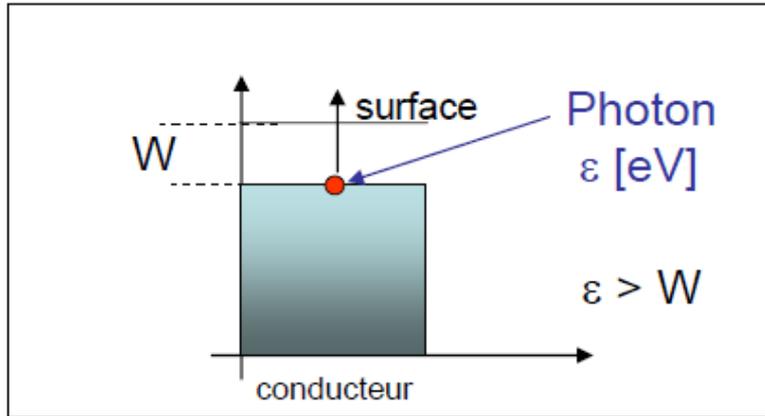
# Effet photoélectrique





# Emission Photoélectrique

Principe **photoémission** : interaction photon-électron



- Utilisation d'un **laser** (grand flux de photons)
- effet à **seuil** : longueur d'onde minimale
- Photoémission est instantanée

$$\lambda \text{ [nm]} = \frac{1240}{\varepsilon \text{ [eV]}}$$

800 nm = 1.55 eV  
 532 nm = 2.33 eV  
 266 nm = 4.66 eV

Modèle à trois étapes

Loi de Fowler-Dubridge

$$J_s = A T^2 I (1-R) F(x)$$

Pour augmenter  $J_s$  :  $T \uparrow$   $I \uparrow$   $R \downarrow$

Effet **photoélectrique thermo-assisté**

$J_s$  : densité de courant [A/cm<sup>2</sup>]  
 A ~ constante [A/W/K<sup>2</sup>]  
 T : température [K]  
 R : coefficient de réflexion  
 I : éclairement [W/cm<sup>2</sup>]  
 F(x) : fonction de Fowler

Travail de sortie W

Effet photoélectrique : Einstein 1905, Fowler 1931

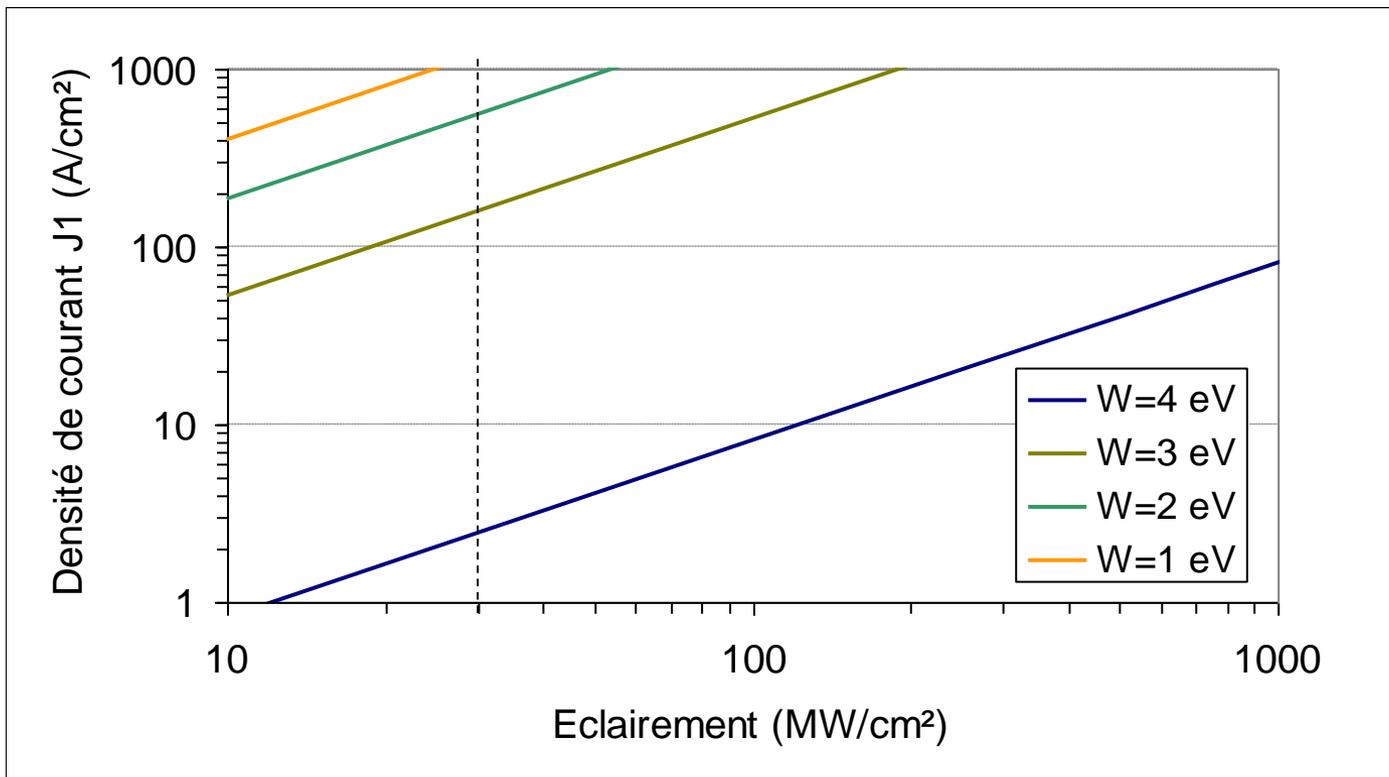
# Influence du travail de sortie

$$J_1 = A a_1 T^2 I (1-R) F(x_1) [e/\hbar\omega]$$

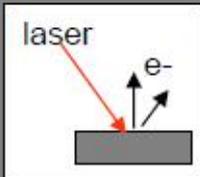
$$\lambda = 300 \text{ nm}$$
$$\varepsilon = 4.13 \text{ eV}$$

$$x = (h\nu - W)/kT$$

$$W \downarrow \quad x \uparrow \quad F(x) \uparrow$$



→ Intérêt d'utiliser un matériau à faible travail de sortie



# Cathodes Photoélectriques

Rendement photoélectrique

$$\eta = \frac{Ne}{Nph}$$

Q [C]

E [J]

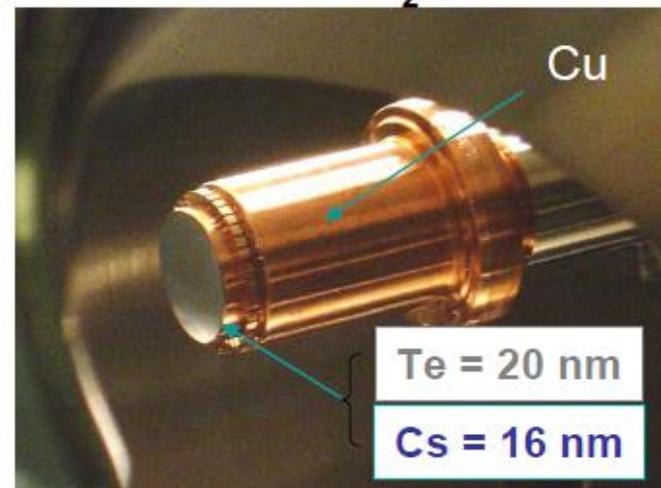
**Métaux** : - mauvais rendement  $\ll 1\%$   
+ bonne résistance

**Semi-conducteur** : + rendement  $\sim$  qlq %  
- sensibilité vide

Conducteur : W travail de sortie  
ou semi-conducteur : AE+BI

Matériau	266 nm	355 nm	532 nm
Cu	$2.2 \times 10^{-6}$	$8 \times 10^{-9}$	
Mg	$5.0 \times 10^{-5}$		
Ta	$3.0 \times 10^{-5}$		
$K_2CsSb$	$10.0 \times 10^{-2}$	$16 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{-2}$
$Cs_2Te$	$8.0 \times 10^{-2}$		

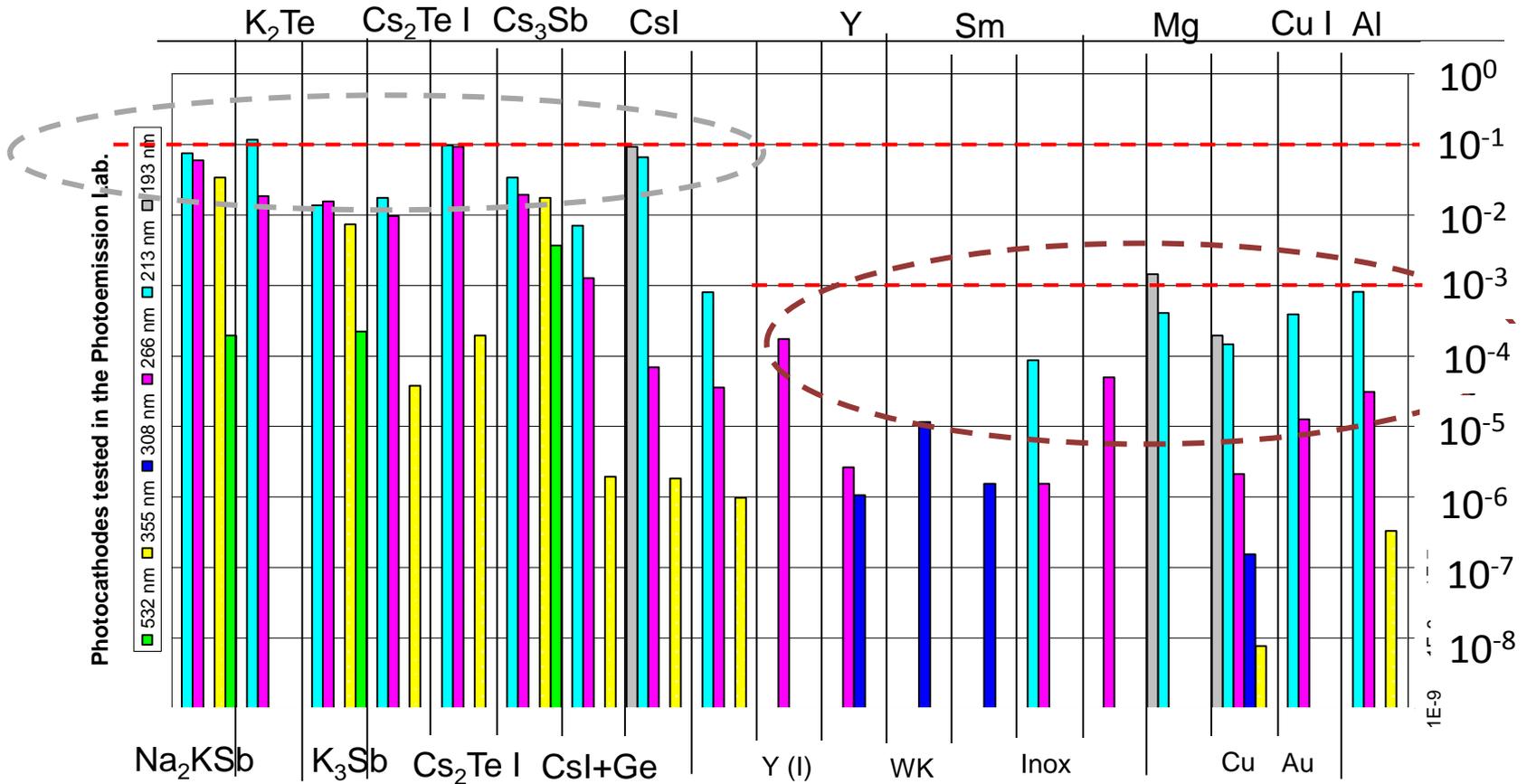
Photocathode **Cs<sub>2</sub>Te** - ELYSE



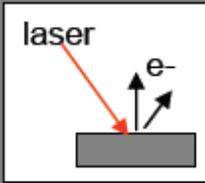
# Semiconducteur

# Métal

## Rendement quantique

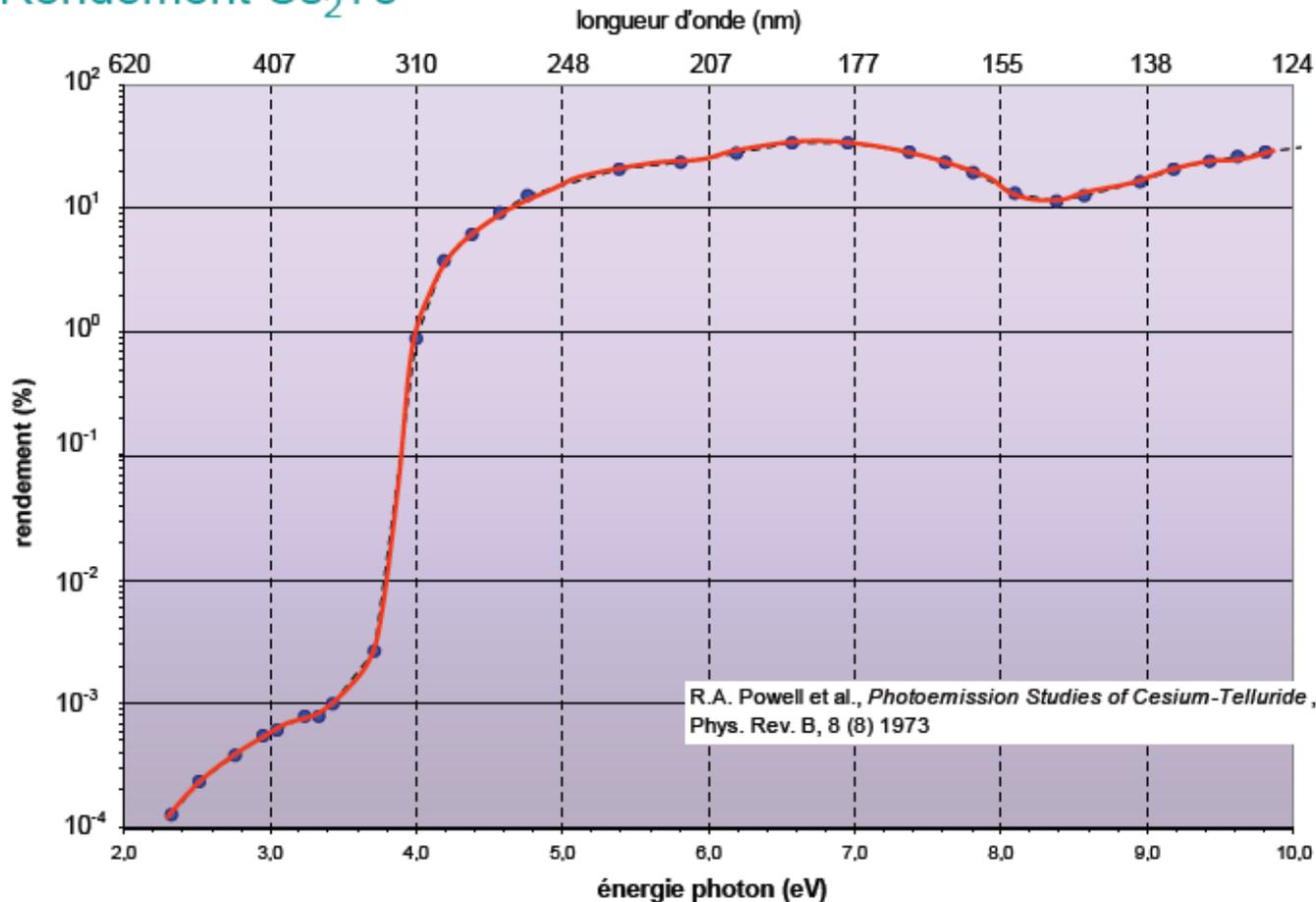


Données du CERN/CTF (G. Suberlucq)



# Cathodes Photoélectriques

## Rendement Cs<sub>2</sub>Te

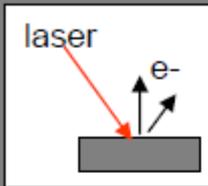


Rendement chute à l'utilisation :

- Pollution
- bombardement

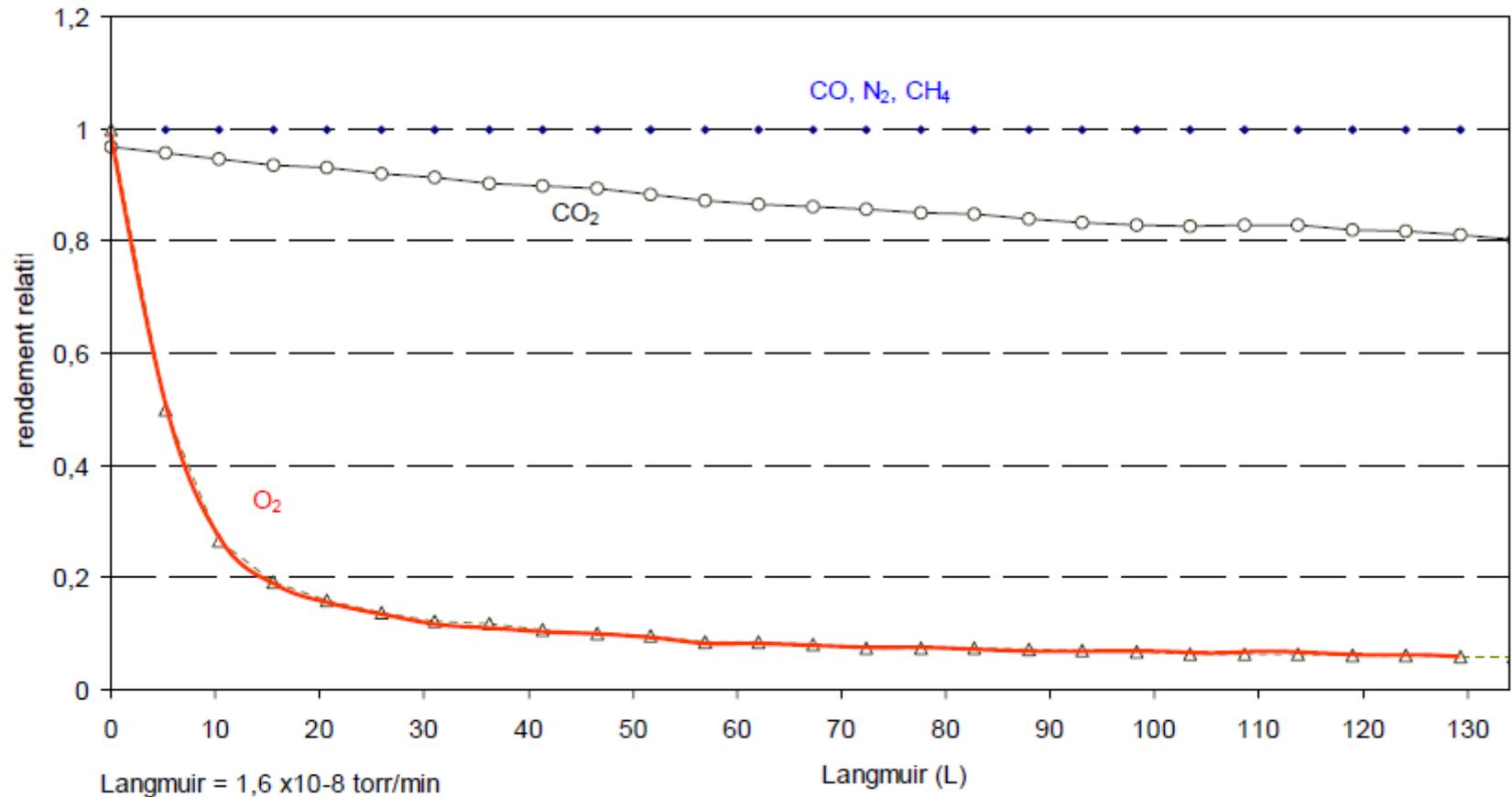
Durée de vie :  
mois... année

Dépend de l'utilisation



# Cathodes Photoélectriques

Pollution de Cs<sub>2</sub>Te par différents gaz



F. Sabary et al., Auger and X-ray photoemission study on Cs<sub>2</sub>Te photocathodes, J. Appl. Phys. 80 (5) 1996

# Durée de vie

La limitation de la durée de vie est due à

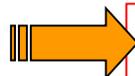
→ La **pollution de surface** : l'activation se transforme en contamination à cause du vide résiduel

→ **bombardement éventuel de la surface de la cathode**

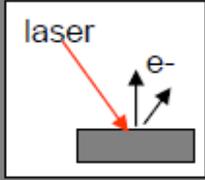
La durée de vie d'une photocathode dépend de son utilisation :

Le nombre d'électrons est **infini** (très grand) : le tarissement n'est pas du au nombre fini d'électrons mais aux **conditions d'extraction favorables qui se dégradent**

Une cathode n'est pas un réservoir infini, mais **fini** d'électrons qui se vide Plus ou moins rapidement suivant l'intensité et la fréquence d'utilisation



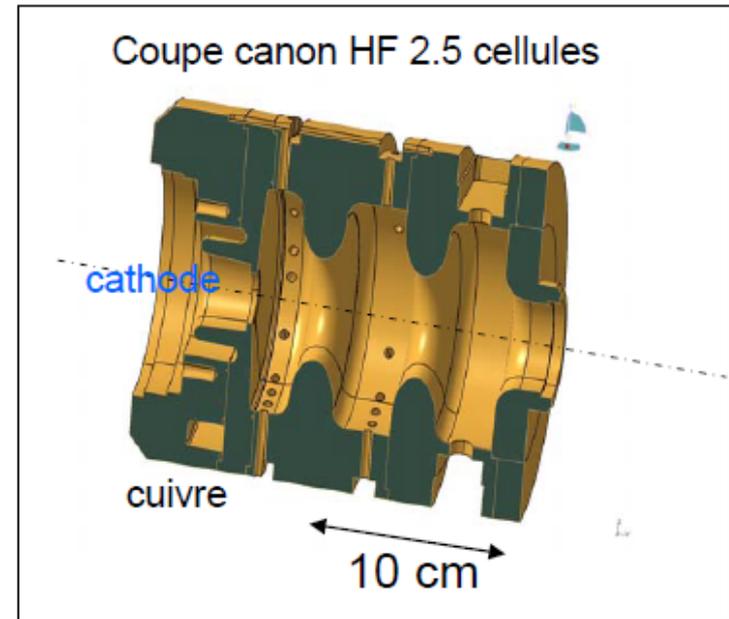
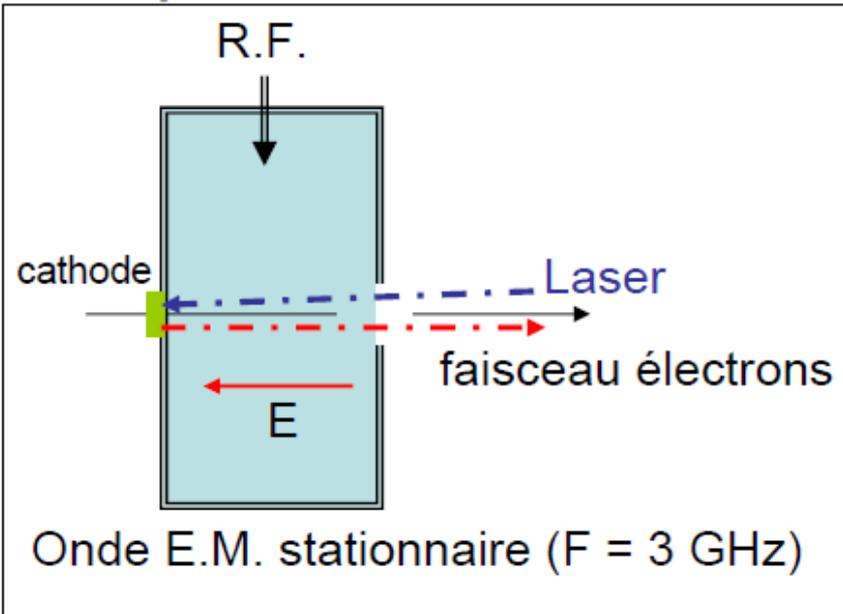
La source se tarie !



# Canons Photoélectriques

canon HF

## Principe canon HF



Design par simulation

## Avantages :

Impulsion laser courte : faisceau électrons courts (**ps**)

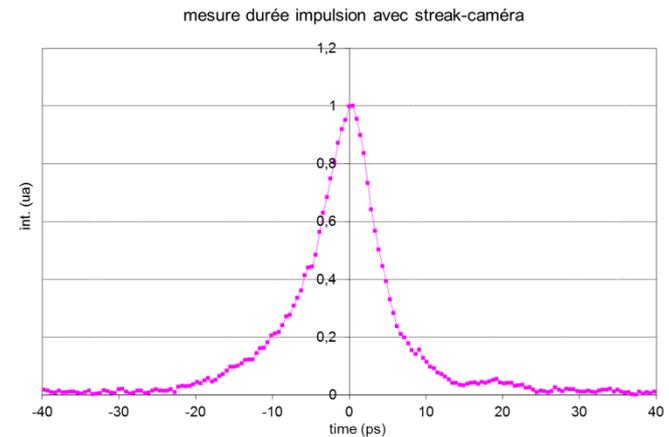
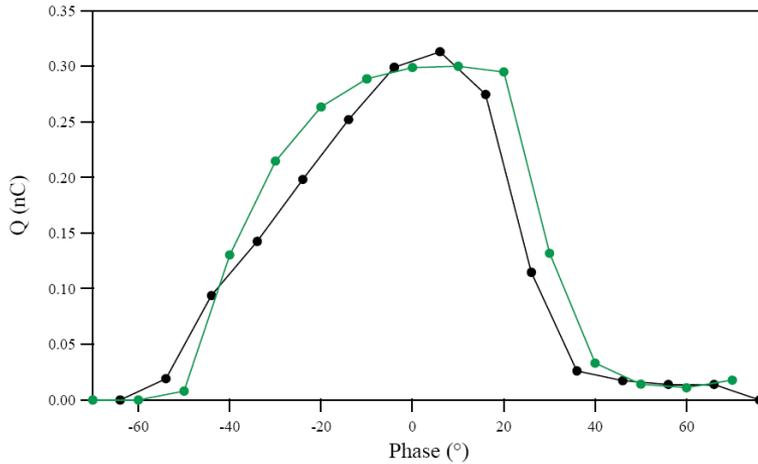
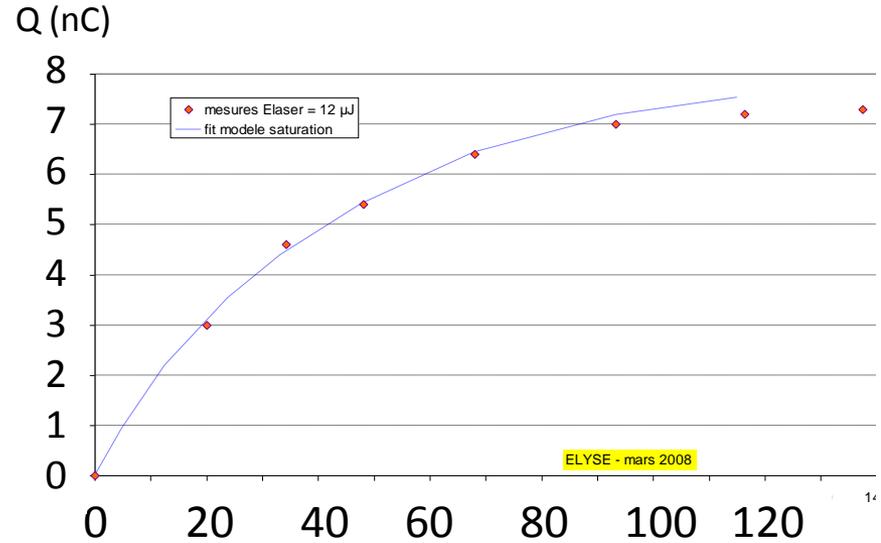
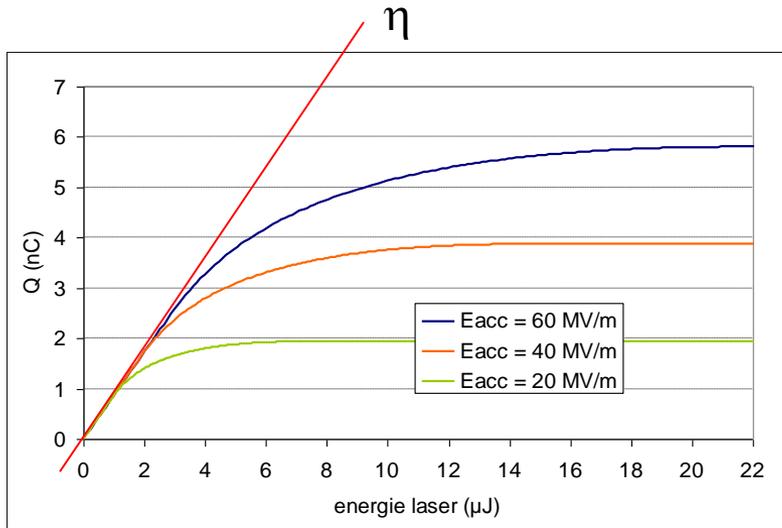
Faible dispersion énergie < **1%**

Fort gradient accélérateur : 100MV/m

**Photo-injecteurs**

$$E(z,t) = E_0 \cos(kz) \sin(\omega t + \phi)$$

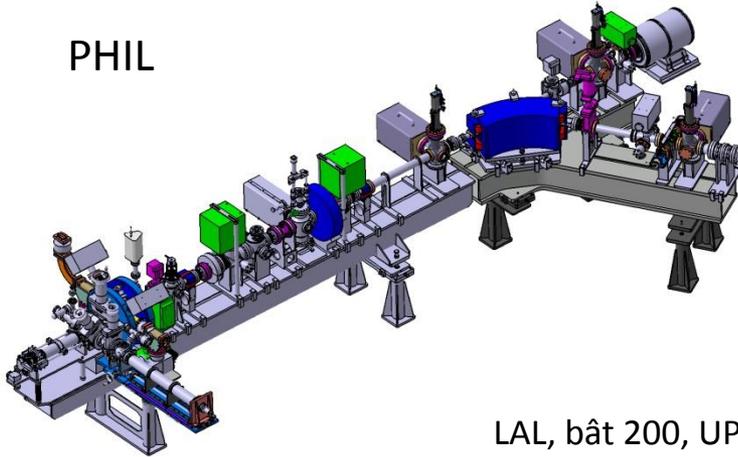
# Canon RF : mesures



Mesure durée 1 seule impulsion

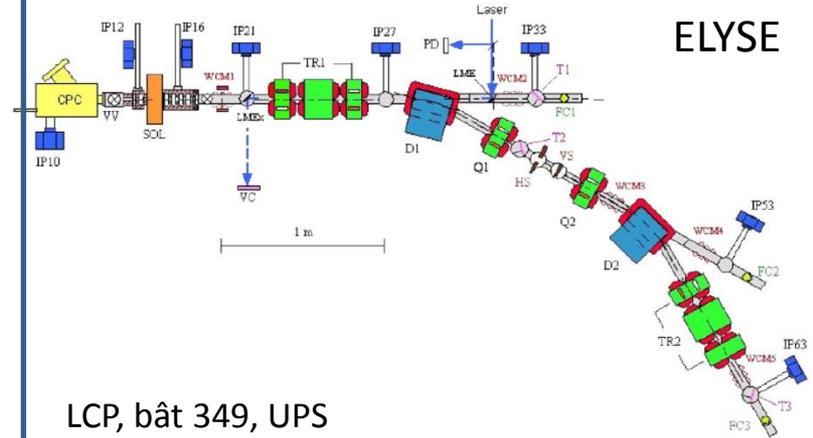
# Exemples Photoinjecteurs

PHIL



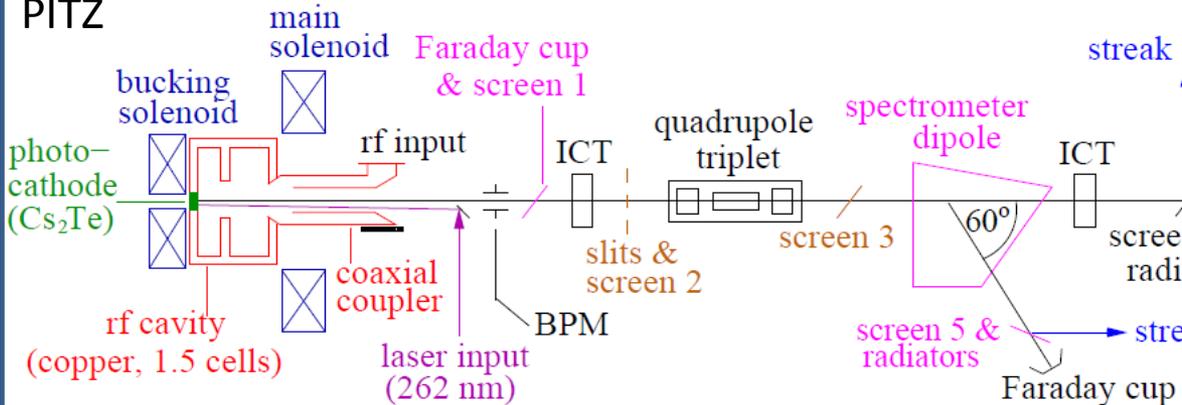
LAL, bât 200, UPS

ELYSE



LCP, bât 349, UPS

PITZ

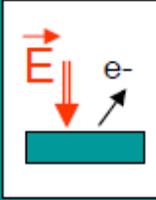


## Photo-injecteurs :

- CLIC/CERN 3 GHz
- PHIL 3 GHz
- ELYSE 3GHz
- ThomX 3 GHz
- PITZ(XFEL) 1.3 GHz
- ...

**LES SOURCES  
A EMISSION DE CHAMP**





# Emission de Champ

Application d'un champ électrique intense ( $E > 1 \text{ GV/m}$ ) **pertube** la matière : électrons **peuvent sortir** de la matière (effet tunnel)

$$J_s = k_1 \frac{E^2}{W} e^{(k_2 \frac{W^{3/2}}{E})}$$

Pour augmenter  $J_s$  :  $E \uparrow$   $W \downarrow$

$J_s$  : densité de courant [A/cm<sup>2</sup>]  
 $k_1, k_2 \sim$  constante  
 $E$  : champ électrique [V/m]  
 $W$  : travail de sortie [eV]

Matériau avec  $W$  faible : meilleur photoémetteur = meilleure émission de champ

Augmenter  $E$  : effet de pointe renforcement du champ électrique local

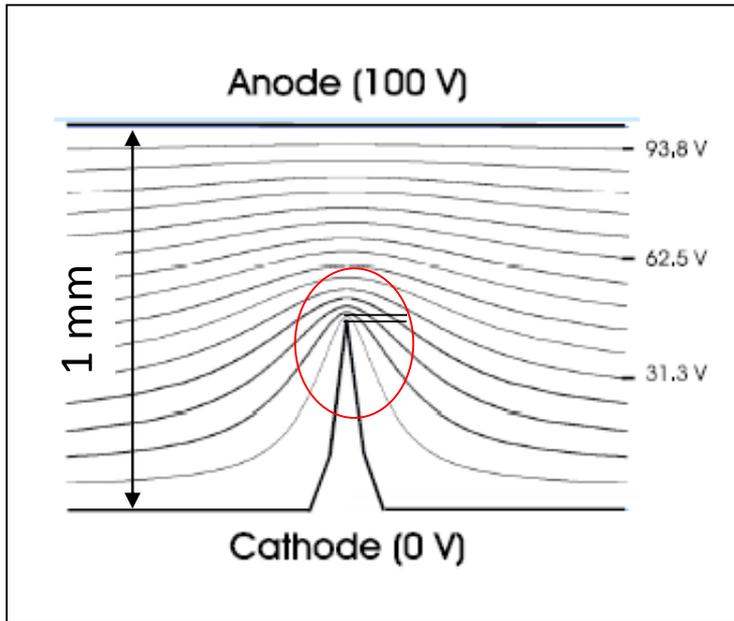
$$E \sim \beta E \quad \beta \nearrow 10 \text{ à } 100$$

$E \sim 1 \text{ GV/m}$  : Effet Schottky  $W = W - dW$

Thermoémission et Thermoémission de champ

# Effet de pointe

Effet de pointe : renforcement du champ par un facteur noté  $\beta$



Resserrement des lignes de potentiel au niveau de la pointe

$$V = 100 \text{ V sur } d = 1 \text{ mm}$$

$$E_m = 0.1 \text{ MV/m}$$

$$dV = 6 \text{ V sur } 0.001 \text{ mm}$$

$$E_{loc} = 6 \text{ MV/m}$$

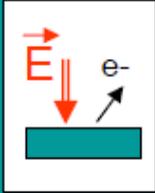
$$E_{loc} / E_m = \beta = 60$$

On remplace  $E$  par  $\beta E$

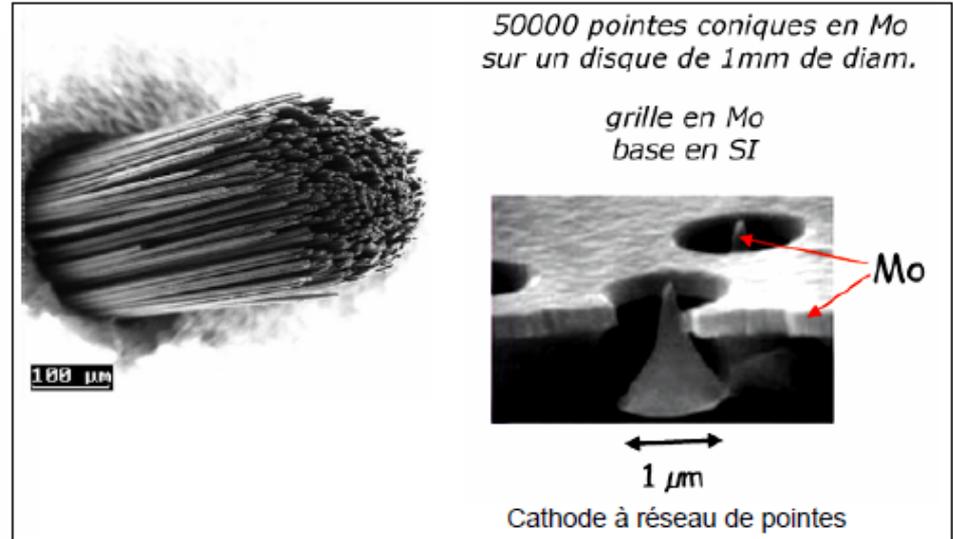
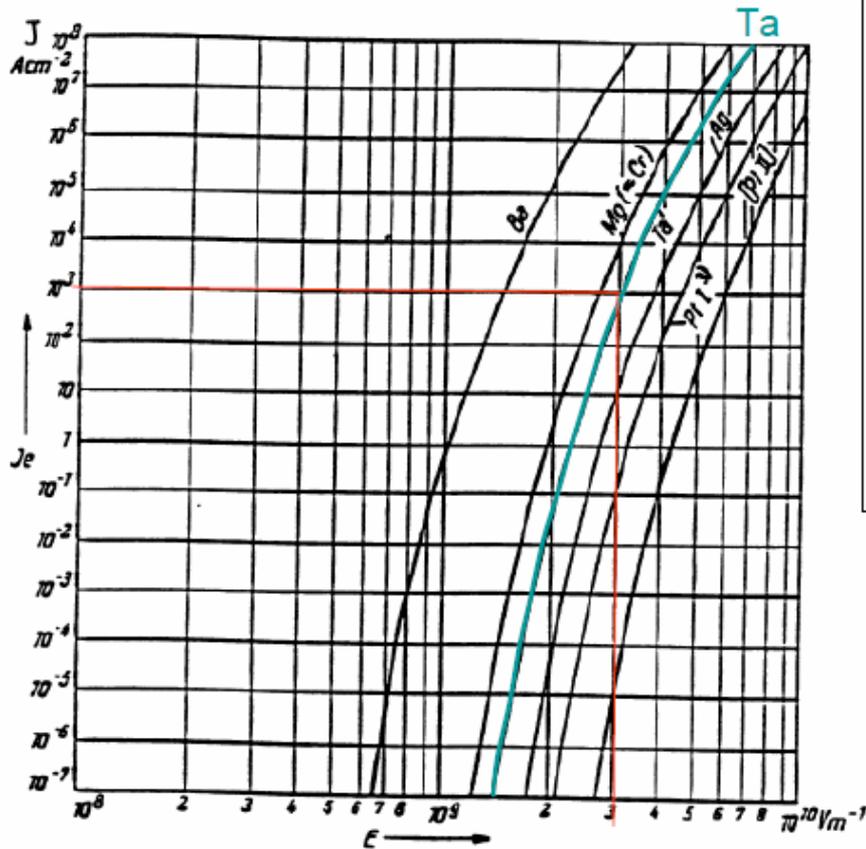
$\beta$  dépend de la géométrie

$\beta \sim 100$  à  $10000$

Pour renforcer l'émission de champ : fabriquer des pointes



# Cathodes émission de champ



Haute intensité, fragilité

Difficulté fabrication cathode + coût

Surface émission petite

→ Microscopie électronique

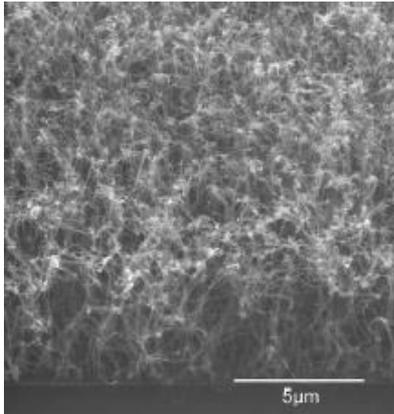
→ écrans plats

Nanotubes de carbones : 1 -10 nm diamètre, longueur ~ μm

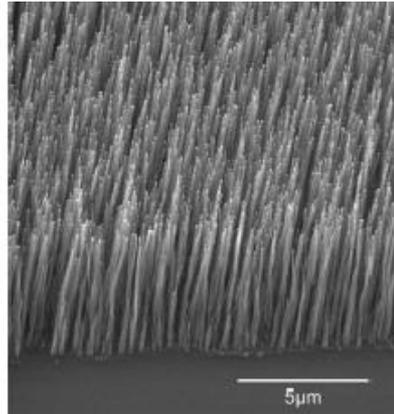
Facteur β énorme ~ 1000 , champ E appliqué plus faible

# Emission de champ

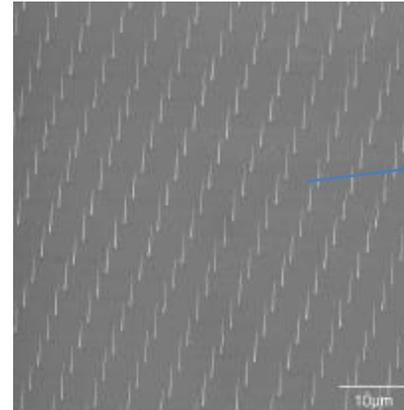
Différentes technique de fabrication nanotube carbone :



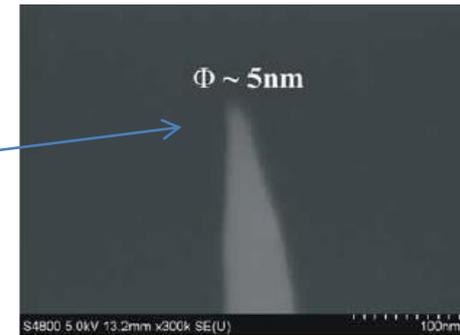
Nanotubes anarchiques



Nanotubes alignés



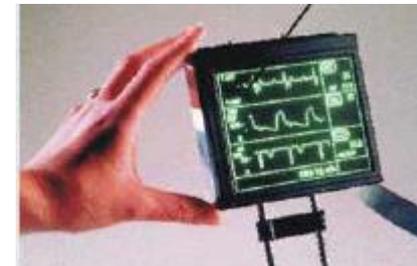
Nanotube en réseau



Pointe un seul tube

Emission d'un réseau :  
Taille  $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$   
Hauteur nanotube =  $8\mu\text{m}$   
Espacement =  $5\mu\text{m}$

Courant émis  $\sim \text{mA}$  et  $j \sim 1\text{A}/\text{cm}^2$



Développement écrans ultra-plats  $\sim 5\text{mm}$

# Conclusions

## *Qualités recherchées*

- Faisceau **Intense** : courant élevé
  - Cathode **robuste** : longue durée de vie
  - Faisceau **Brillant**
  - Durée **impulsion courte**
- } **Industrie**
- } **Recherche**

Sources électrons les plus utilisées : canons **thermoioniques**

Quantité applications des faisceaux d'électrons, industrie et recherche

Le choix de la source dépend de l'application envisagée

# Historique subjectif

- 1832 M. Faraday : soupçonne existence porteurs charge négative
- 1858 J. Plucker : étude rayons cathodiques
- 1864 JC. Maxwell : théorie électromagnétique
- 1878 Crooks faire fondre le métal avec rayons cathodiques
- 1881 T. Edison : découverte effet thermoélectronique
- 1887 H. Hertz : découvre l'effet photoélectrique
- 1895 J. Perrin travaux sur rayons cathodiques
- 1897 JJ. Thompson prouve existence électrons et mesure  $q/m$
- 1897 RW. Wood : découvre effet émission de champ. Premier oscilloscope !
- 1902 O Richardson : loi thermoémission
- 1904 A Wehnelt : découvre activation surface
- 1905 R. Millikan : mesure de la charge d'un électron
- 1905 A Einstein : article interprétation effet photoélectrique
- 1913 Child : loi de Child-Langmuir
- 1914 Schottky : découvre effet Schottky
- 1925 : première accélération 200 keV d'électrons
- 1928 Fowler Nordheim : loi du même nom
- 1937 EW. Muller : invente microscope électronique (émission de champ)
- 1949 Synchrotron à 320 MeV électrons
- 1950 Lemmens ; invente cathode L
- 1960 ; invention du laser
- 1972 électrons de 20 GeV au SLAC
- 1980 : premier laser picoseconde
- 1984 : invention canon RF, premier faisceau électrons picoseconde
- 1990 : premier laser femtoseconde
- 1993 : première démonstration accélération laser-plasma
- 1995 : apparition photocathode CsTe
- 2004 : démonstration accélération laser-plasma régime dit « de la bulle »

# Références

## Articles Historiques

- Richardson O W 1912 *Phil. Mag.* **23** 594
- Wehnelt A 1904 *Ann. Phys., Lpz.* **14** 425
- Fowler R H and Nordheim L W 1928 *Proc. R. Soc. A* **119** 173
  
- GA Boutry, *Acta. Elec.*, 16 (1973) p 127, "Brève histoire de la photoémission"

## Références sources en général

- Fundamental physics of vacuum electron sources, S, Yamamoto, *Rep. Prog. Phys.*, 69 (2006) 181-232
- Thèse E. Minoux (2006), Ecole Polytechnique

## Livres

- The physics of high brightness beam, J. Rosenzweig, L. Serafini, 2<sup>nd</sup> ICFA AAW
- Intense electron and Ion beams, SI Molokovsky, AD Sushkov (Springer)
- Electron beams & microwave vacuum electronics, SE Timsring, (Wiley) 2007