

# Chapitre VII: Chambres d'ionisation

# Types de chambres d'ionisation

- Volume sensible: gaz (la plus souvent de l'air → mesure directe de l'exposition) → chambre d'ionisation
- Volume sensible: semiconducteur (silicium, germanium, diamant) → chambre d'ionisation solide

# Avantages et inconvénients des chambre d'ionisation solides

## Avantages:

- Par rapport aux détecteurs à gaz → à énergie égale, ils délivrent une impulsion d'amplitude plus élevée ( $W \approx 3$  eV dans un semiconducteur et  $W \approx 30$  eV dans un gaz) → 10 fois plus d'électrons → plus grande précision
- Masse volumique environ 2000 fois plus grande qu'un gaz (1 atm) → rendement de détection, à volume égal, beaucoup plus grand qu'une chambre d'ionisation à gaz

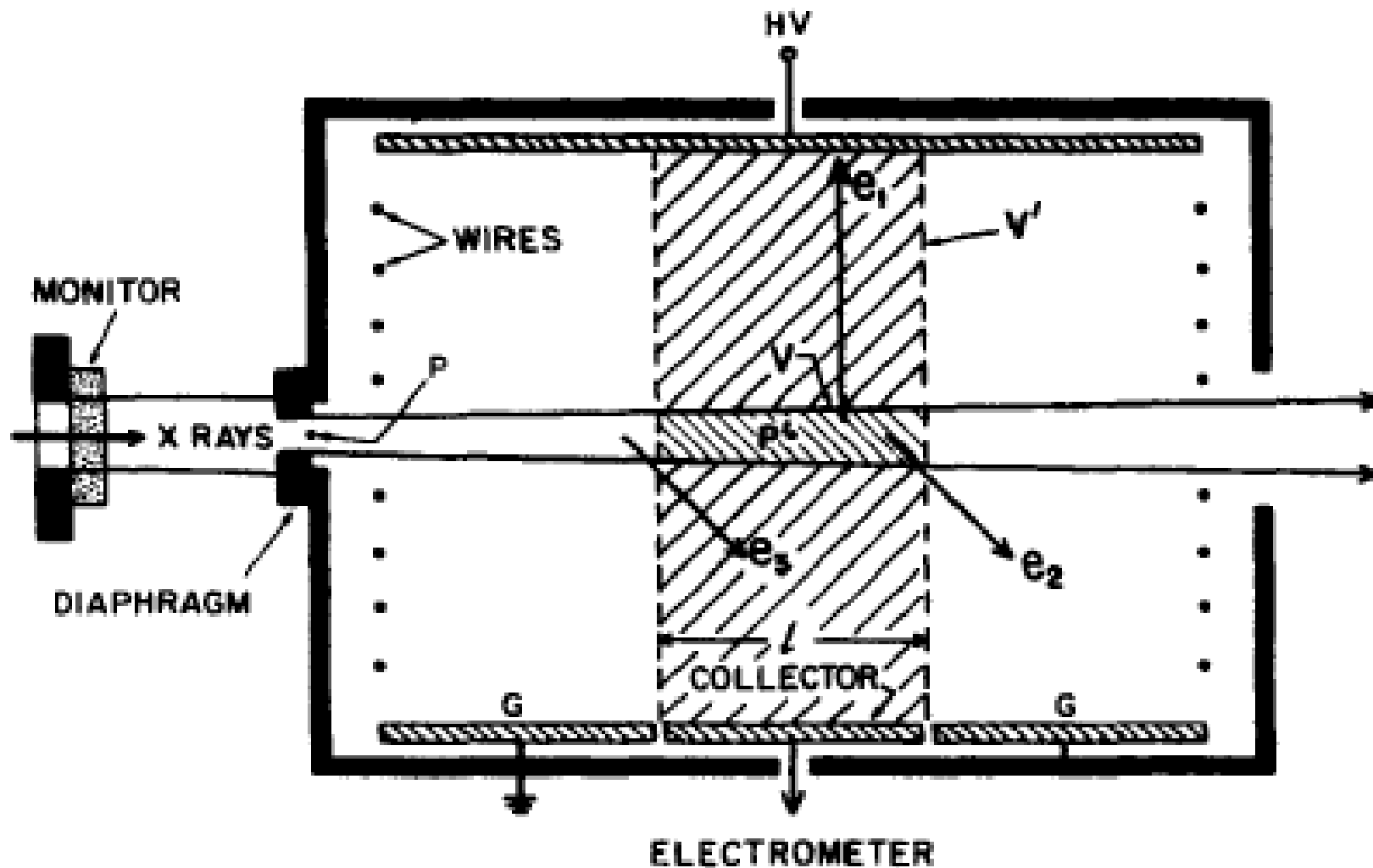
## Inconvénients:

- Très souvent, nécessaire de le refroidir pour obtenir des performances optimales (Ge)
- Difficile d'obtenir des détecteurs de gros volume à prix raisonnables → taille du volume sensible faible
- Prix élevé d'un détecteur au diamant

# Plan du chapitre

- Chambre d'ionisation à air libre (free air ion chamber)
- Chambre d'ionisation à cavité
- Recombinaisons dans une chambre d'ionisation

# Chambre d'ionisation à air libre: schéma



# Chambre d'ionisation à air libre: description

- But: mesure de l'exposition Pour des photons dont l'énergie peut varier entre 5 keV et 500 keV
- La chambre est entourée par un blindage de Pb pour éviter les rayonnements extérieurs au faisceau à mesurer
- L'axe central du faisceau correspond à l'axe de la chambre
- Le faisceau rentre dans la chambre par une fenêtre en tungstène
- D'un côté de la chambre: 3 plaques → l'électrode collectrice (longueur  $l$ ) et deux électrodes de garde (servant à délimiter le volume utile)
- De l'autre côté: une plaque reliée à une haute tension (de manière à obtenir un champ de  $\sim 100$  V/m entre les plaques)
- Des fils de garde entourant l'ensemble permettent d'obtenir un champ électrique uniforme

# Chambre d'ionisation à air libre: Principe (1)

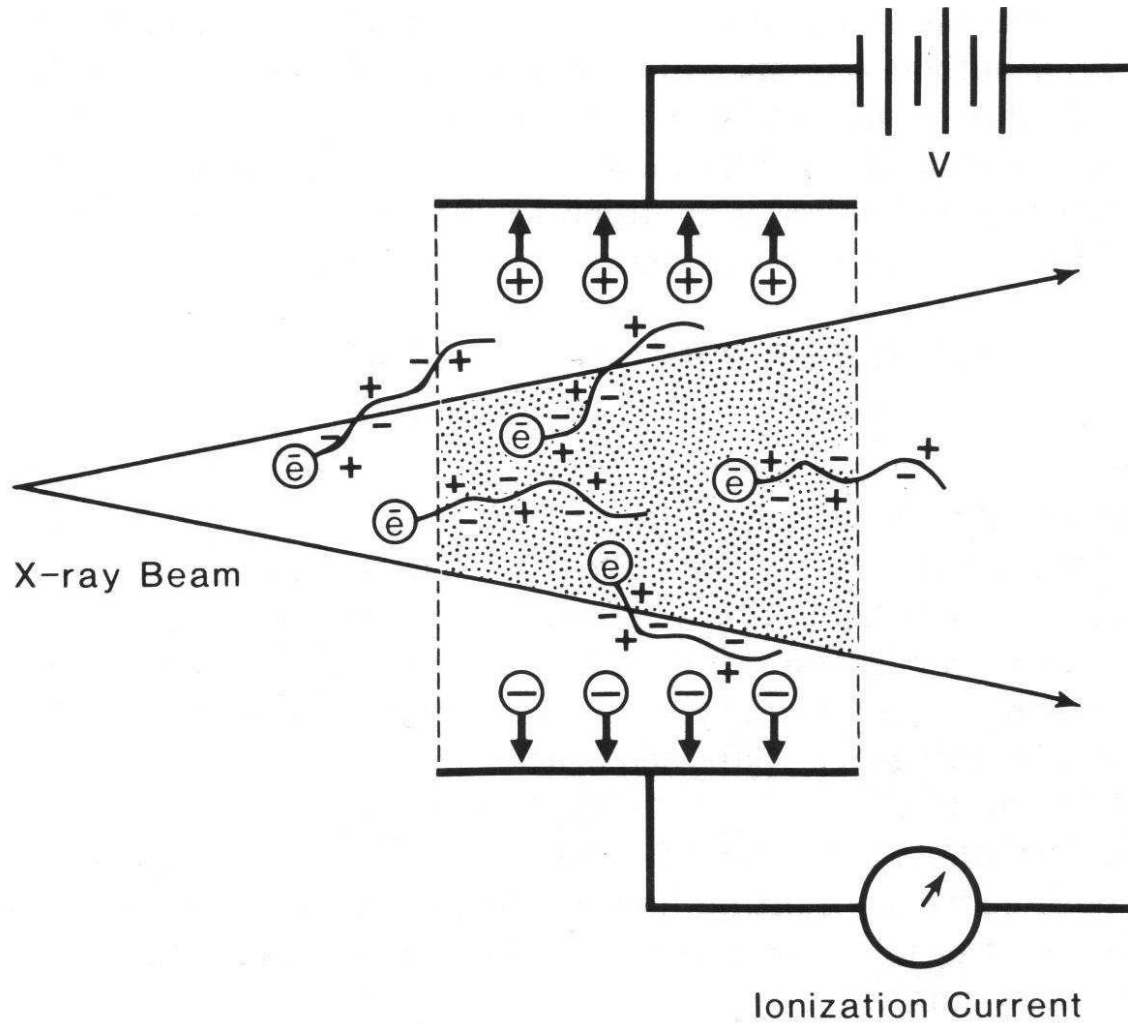
- Les photons pénétrant dans la chambre vont mettre en mouvement des électrons de « grande » énergie par effet photoélectrique ou Compton dans  $V$
- Ces  $e^-$  de « grande » énergie vont produire des ionisations secondaires le long de leur parcours ( $\approx 40$  cm pour RX de 500 keV)
- A cause du champ électrique  $\rightarrow$  les charges positives créées dans  $V'$  vont migrer vers l'électrode négative et les charges négatives créées dans  $V'$  vont migrer vers l'électrode positive  $\rightarrow$  présence d'un courant qui peut être mesuré
- $V'$  est appelé le volume de collection
- Les scattered photons, le Bremsstrahlung et les recombinaisons sont négligés

## Chambre d'ionisation à air libre: Principe (2)

- Rappel de la définition de l'exposition: quotient de  $dQ$  par  $dm$  avec  $dQ$  la valeur absolue de la charge de tous les ions d'un même signe produits dans l'air quand tous les  $e^-$  et les  $e^+$  libérés ou créés par des rayons X ou des  $\gamma$  dans un volume  $dV$  d'air (de masse  $dm$ ) sont stoppés dans l'air
- Si tous les  $e^-$  produits par les photons dans  $V$  perdent toute leur énergie par ionisation de l'air inclus dans le volume  $V' \rightarrow$  la charge peut être mesurée  $\rightarrow$  mesure de l'exposition
- Cependant certains  $e^-$  créés dans  $V$  peuvent perdre leur  $E$  en dehors de  $V' \rightarrow$  charge non collectée
- Cependant certains  $e^-$  créés en dehors de  $V$  peuvent perdre leur  $E$  dans  $V' \rightarrow$  charge supplémentaire collectée



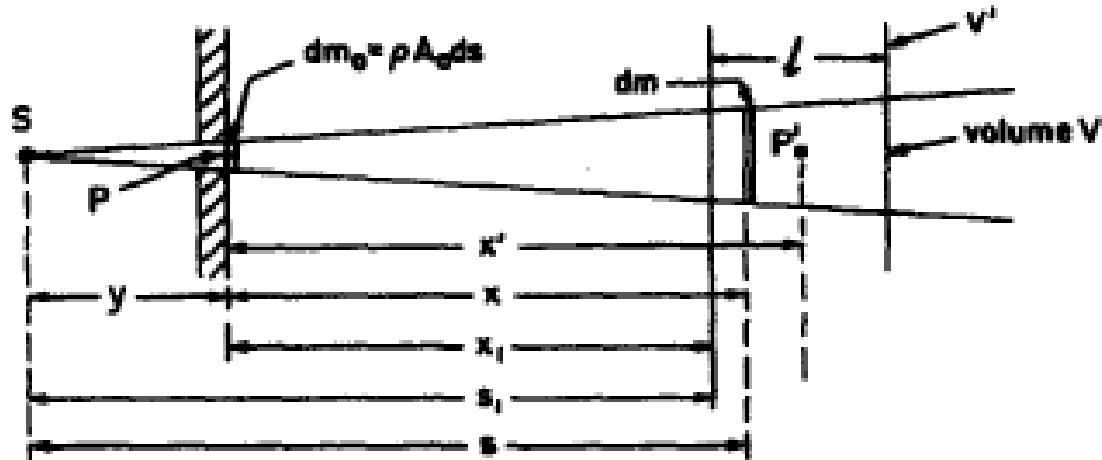
# Chambre d'ionisation à air libre: Collection des charges



## CPE pour le volume de collection

- Pour que la définition de l'exposition soit satisfaite  $\rightarrow$  CPE nécessaire pour  $V'$   $\rightarrow$  compensation entre les charges entrantes et sortantes
- CPE est atteint si le parcours des  $e^-$  ( $\approx 40$  cm) créés par les photons incidents est inférieur à la distance entre chaque plaque et le volume  $V$  (et aussi à la distance entre  $V$  et l'entrée et le fond de la chambre) et si la fluence du faisceau de photons reste constante le long de distance  $l$  (pas d'atténuation)

# Détermination de X dans le plan de l'ouverture (1)



## Définissons:

- P: point au centre de l'ouverture
- $A_0$ : aire de l'ouverture
- $y$ : distance entre la source S et l'ouverture
- $dm_0$ : un élément de masse cylindrique en P  $\rightarrow dm_0 = \rho A_0 ds$
- $dm$ : un élément de masse cylindrique en P' à une distance  $s$  de la source inclus dans  $V \rightarrow dm = \rho A_0 (s/y)^2 ds$
- $\Psi_0$ : fluence en P

## Détermination de X dans le plan de l'ouverture (2)

- Si les  $e^-$  résultants des interactions des photons dans  $dm_0$  dissipent toute leur  $E$  dans l'air  $\rightarrow$

$$dQ_0 = dm_0 \Psi_0 \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air} \left( \frac{e}{\overline{W}} \right)_{air} = \rho A_0 \Psi_0 \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air} \left( \frac{e}{\overline{W}} \right)_{air} ds$$

- Considérons la fluence énergétique en  $dm$  (avec  $\mu$  le coefficient d'atténuation dans l'air)  $\rightarrow$

$$\Psi(s) = \Psi_0 \left( \frac{y}{s} \right)^2 e^{-\mu(s-y)} \cong \Psi_0 \left( \frac{y}{s} \right)^2 [1 - \mu(s - y)]$$

- L'ionisation causée par les  $e^-$  originaires de  $dm$   $\rightarrow$

$$\begin{aligned} dQ &= dm \Psi(s) \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air} \left( \frac{e}{\overline{W}} \right)_{air} \\ &= \rho A_0 \left( \frac{s}{y} \right)^2 \Psi_0 \left( \frac{y}{s} \right)^2 [1 - \mu(s - y)] \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air} \left( \frac{e}{\overline{W}} \right)_{air} ds \\ &= dQ_0 [1 - \mu(s - y)] \end{aligned}$$

## Détermination de X dans le plan de l'ouverture (3)

La charge totale générée par les  $e^-$  originaires de  $V$  (avec  $s_1$ , la distance entre la source et  $V$  et  $x_1$ , la distance entre l'ouverture et  $V$ )  $\rightarrow$

$$\begin{aligned} Q &= \rho A_0 \Psi_0 \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air} \left( \frac{e}{\overline{W}} \right)_{air} \int_{s_1}^{s_1+l} [1 - \mu(s - y)] ds \\ &= \rho A_0 l \Psi_0 \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air} \left( \frac{e}{\overline{W}} \right)_{air} \left[ 1 - \mu \left( x_1 + \frac{l}{2} \right) \right] \end{aligned}$$

avec  $x_1 + l/2$  la distance entre P et P'

## Détermination de X dans le plan de l'ouverture (4)

- L'exposition (pour un volume  $A_0 l$ ) en P est donc donnée par  $\rightarrow$

$$\begin{aligned} X_P &= \frac{dQ_0}{dm_0} = \frac{Q}{m} \left[ 1 - \mu \left( x_1 + \frac{l}{2} \right) \right]^{-1} \\ &\cong \frac{Q}{m} \left[ 1 + \mu \left( x_1 + \frac{l}{2} \right) \right] \end{aligned}$$

- Typiquement  $\mu \cong 2-3\% \rightarrow \mu(x_1 + l/2) < 0.01$

# Résultat d'une mesure dans chambre d'ionisation à air libre

$$X_P = \frac{Q}{\rho A_0 L} \prod_i k_i$$

- $k_{TP}$ : correction due aux effet de température et de pression
- $k_D$ : correction due à l'estimation à l'ouverture
- $k_A$ : correction due à l'atténuation du faisceau dans l'air
- $k_S$ : correction due aux recombinaisons
- $k_H$ : correction due à l'humidité
- $k_{SC}$ : correction due aux ionisations produites par les photons diffusés
- ...

## Remarque sur l'énergie maximale des photons

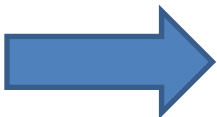
- Si  $E$  des RX  $\nearrow$   $\rightarrow$  parcours des  $e^-$   $\nearrow$   $\rightarrow$  pour maintenir CPE  $\rightarrow$  dimensions de la chambre  $\rightarrow$  problème de non-uniformité du champ (+ recombinaison devient difficilement négligeable)
- Possibilité:  $\nearrow$  la pression de l'air  $\rightarrow$  dans ce cas  $\nearrow$  de l'atténuation et du scattering des photons dans l'air
- En pratique  $\rightarrow$  chambre d'ionisation à air libre limitée à des  $E < 500$  keV



## Exemple de chambre d'ionisation à air libre



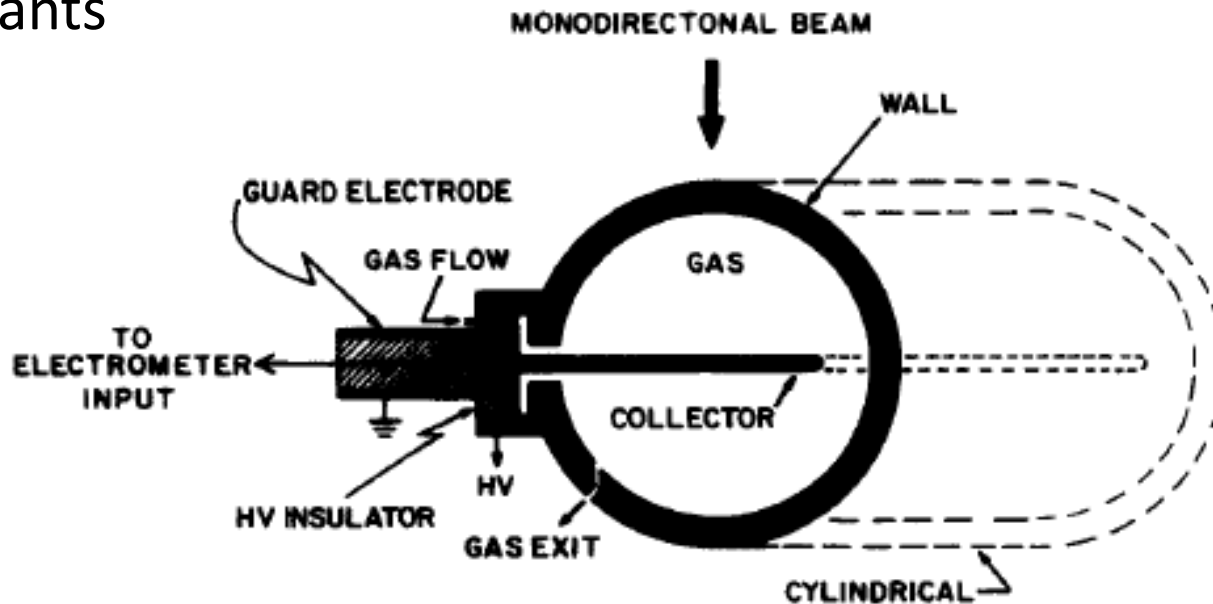
National Radiation Standard Laboratory  
(NRSL), Taipei, Taiwan



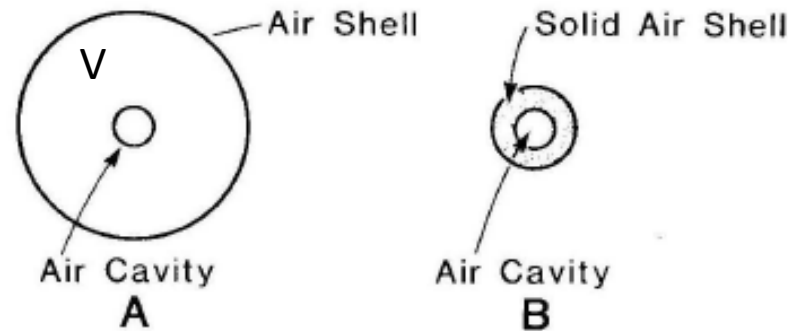
Laboratoires de standardisation → calibration

# Chambre d'ionisation à cavité (à paroi « équivalent-air »)

- Un grand nombre de designs  $\neq$   $\rightarrow$  toujours le même principe
- Une enveloppe solide entoure une cavité remplie d'un gaz (air,...) et un champ électrique est appliqué à l'intérieur de la cavité  $\rightarrow$  collection des ions formés par les rayonnements ionisants



# Chambre d'ionisation à cavité: Principe pour des $\gamma$ (1)



- A: un volume d'air sphérique  $V$  entoure une cavité d'air au centre  $\rightarrow$  supposons une irradiation uniforme de  $V$  par des photons  $\rightarrow$  la distance entre les parois extérieure et intérieure de  $V \geq$  range des  $e^-$  dans l'air  $\rightarrow$  nombres d' $e^-$  entrants et sortants de la cavité sont =  $\rightarrow$  CPE  $\rightarrow$  mesure de  $Q$  dans la cavité produite par les  $e^-$  créés dans  $V \rightarrow$  avec  $m$  connu  $\rightarrow$  calcul de  $X$

## Chambre d'ionisation à cavité: Principe pour des $\gamma$ (2)

- B: la paroi en air est « comprimée » pour obtenir une paroi solide  $\rightarrow$  densité plus  $\nearrow$  mais condition sur le range des  $e^-$  dans l'air toujours respectée  $\rightarrow$  CPE toujours respectée avec une épaisseur de paroi beaucoup plus petite (ex: 1.25 MeV- $\gamma$  de  $^{60}\text{Co}$   $\rightarrow$   $\approx$  5 mm)
- En pratique  $\rightarrow$  on choisit un matériau « équivalent-air » pour la paroi (équivalence de  $\mu_{en}$  pour les photons incidents mais aussi de  $dE/\rho dx$  pour les  $e^-$  créés  $\rightarrow$  conditions OK quand effet Compton domine)  $\rightarrow$  polystyrène, polyéthylène, PMMA, téflon, graphite,...
- La paroi interne de la cavité est couverte d'un matériau conducteur (graphite colloïdal dans une base d'alcool)  $\rightarrow$  électrode



$$X_P = \frac{Q}{\rho_{air} V} \prod_i k_i$$

## Exemples d'épaisseur requise pour CPE

Energie du photon (MeV)	Epaisseur (g/cm <sup>2</sup> )
0.02	0.0008
0.05	0.0042
0.1	0.014
0.2	0.044
0.5	0.17
1	0.43
2	0.96
5	2.5
10	4.9

L'épaisseur est basée sur le parcours d'e<sup>-</sup> dans H<sub>2</sub>O → pour des chambres d'ionisation à paroi tissu-équivalent et à cavité d'air  
→ corrections nécessaires

## Chambre d'ionisation à cavité: Principe pour des $e^-$

- Si on considère une irradiation par des particules chargées  $\rightarrow V$  doit être petit  $\rightarrow$  la paroi doit être fine par comparaison au range des particules incidentes
- Si équivalence en  $Z$  de la paroi et du gaz de la cavité  $\rightarrow$  équilibre entre les  $e^- \delta$  de la cavité vers la paroi et vice-versa si la paroi est suffisamment grande
- En pratique  $\rightarrow$  pour des  $e^-$  incidents produisant des  $e^- \delta$  avec  $E < 100$  keV  $\rightarrow$  épaisseur de la paroi  $\cong 15$  mg/cm<sup>2</sup> est suffisant (range d'un  $e^-$  de 100 keV)
- Application de la théorie de la cavité pour obtenir la dose dans le milieu

## Chambre d'ionisation à cavité (c) $\leftrightarrow$ à air libre (l)

- c: permet la mesure de la dose pour tout type de particules incidentes et pour une large gamme d' $E$ ; l: seulement pour photons avec  $E < 500$  keV
- c: très compacte (facteur 1000 entre le range d'un  $e^-$  dans un solide et un gaz)  $\rightarrow$  permet des mesures en  $\neq$  points d'un milieu soumis à irradiation
- c: mesure de rayonnements multidirectionnels; l: direction du rayonnement  $\perp$  à l'ouverture
- c: via la théorie de la cavité  $\rightarrow$  la dose peut être déterminée pour tout matériau qui constitue la paroi

## Application: dosimètre stylo

- Condensateur chargée  $\rightarrow$  potentiel constant aux bornes du condensateur
- Quand un rayonnement ionisant traverse le dosimètre  $\rightarrow$  ionisation de l'air  $\rightarrow$  déplacement des charges vers les électrodes  $\rightarrow$  diminution du potentiel  $\rightarrow$  décharge du condensateur
- La différence de potentiel est  $\propto$  à l'exposition
- Utilisation:
  - Alarme
  - Mesure en continu de la dose

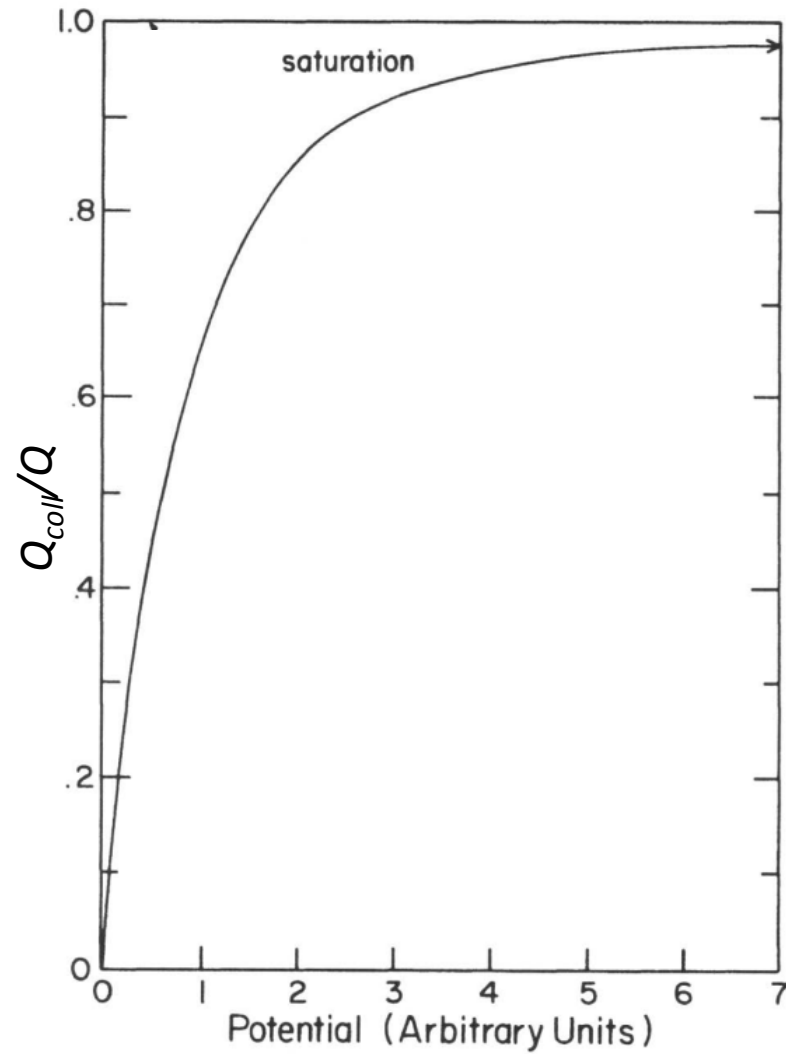




# Recombinaisons

- La dose déposée dans un gaz par un rayonnement ionisant est  $\propto$  à la charge  $Q$  produite dans le gaz
- En règle générale la charge collectée  $Q_{coll}$  collectée par les électrodes de la chambre et mesurée est  $< Q \rightarrow$  recombinaisons des ions dans le gaz
- Les recombinaisons se produisent entre des ions positifs et des  $e^-$  ou entre ions positifs et négatifs
- Une chambre d'ionisation est dite saturée si  $Q_{coll} \rightarrow Q$
- Généralement si le potentiel appliqué  $U_0 \nearrow \rightarrow$  on approche asymptotiquement de la saturation
- Attention: si  $U_0 \nearrow$  trop  $\rightarrow$  multiplication

# Variation de $Q_{coll}$ en fonction du potentiel appliqué



# Recombinaisons dans une chambre d'ionisation

Définition d'un taux de recombinaison  $R$  ( $\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$ ) et d'un coefficient de recombinaison  $\alpha$  ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) tels que:

$$R = -\frac{dn^+}{dt} = -\frac{dn^-}{dt} = \alpha n^+ n^-$$

avec  $n^+$  et  $n^-$ , les densités volumiques de charge

## Types de recombinaisons

- Recombinaison en colonne (ou initiale): les paires d'ions sont créées dans une « colonne » le long de la trajectoire de la particule ionisante → la densité de paires est élevée le long de cette trajectoire avant que les ions ne diffusent → recombinaison élevée → la recombinaison en colonne est plus importante pour les particules à forte densité d'ionisation (comme les  $\alpha$ ) que pour des  $e^-$ , par exemple, qui déposent leur  $E$  le long d'une plus grande trajectoire → indépendant de  $D$
- Recombinaison en volume: due aux collisions entre ions et/ou  $e^-$  après qu'ils aient commencé à diffusé loin de leur position initiale → puisque les ions migrent lentement vers les électrodes → ions et/ou  $e^-$  créés par des rayonnements ionisants indépendants peuvent se recombiner → augmente avec le taux d'irradiation → dépendant de  $D$

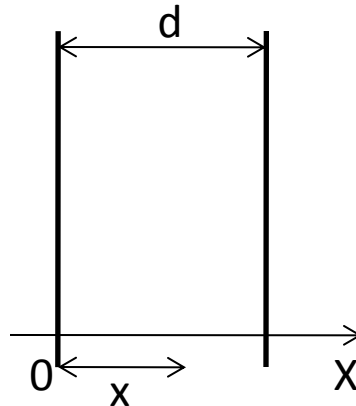
## Type de gaz et recombinaisons

- Un  $e^-$  créé lors d'une ionisation peut être fixé (attachement) sur un atome neutre du gaz  $\rightarrow$  ion négatif
- L'attachement se produit dans des gaz électronégatifs ( $O_2$ , air, ...)
- La vitesse de migration d'un ion vaut  $v_d \approx 1$  cm/s par V/cm appliqué et celle d'un  $e^-$  est  $v_d \approx 1000$  cm/s par V/cm
- les  $e^-$  sont évacués rapidement de la chambre d'ionisation  $\rightarrow$  peu de possibilités de recombinaison
- Les ions par contre étant collectés plus lentement ont plus de possibilités de recombinaison
- Les recombinaisons sont surtout à considérer pour des gaz électronégatifs et donc pour de l'air

# Théorie générale de la recombinaison en volume dans une chambre d'ionisation (Théorie de Mie)

- Théorie valable pour un taux d'ionisation uniforme dans la chambre
- Chambre d'ionisation à électrodes planes parallèles
- Chambre d'ionisation cylindrique
- Chambre d'ionisation sphérique
- Extrapolation générale

# Chambre d'ionisation à électrodes planes parallèles (1)



- Considérons une chambre d'ionisation à électrodes  $\parallel$  d'aire  $S$  et séparées par une distance  $d$
- L'axe  $OX$  est  $\perp$  aux électrodes et orienté de l'électrode positive vers l'électrode négative  $\rightarrow$  l'anode (+) est en  $x = 0$  et la cathode (-) en  $x = d$
- Le champ électrique produit par les ions est négligeable (première approximation) par rapport au champ appliqué  $E_0$
- Puisque  $E_0$  est uniforme, les vitesses de migration des ions positifs ( $u_+$ ) et négatifs ( $u_-$ ) sont constantes
- Soit  $q$ , le taux d'ionisation (nombre d'ionisations par unité de temps et de volume) supposé constant et uniforme

## Chambre d'ionisation à électrodes planes parallèles (2)

- La quantité de charges + produites entre 0 et  $x$  dans l'intervalle de temps  $dt$  est égale à la quantité de charges qui traversent le plan  $X = x$  dans le même intervalle de temps  $\rightarrow$  avec  $n^+(x)$  et  $n^-(x)$  les densités volumiques de charges à la distance  $x$  de l'anode  $\rightarrow$

$$qSxdt = n^+(x)Su_+dt$$

$$qS(d-x)dt = n^-(x)Su_-dt$$

$$n^+(x) = \frac{qx}{u_+}$$

$$n^-(x) = \frac{q(d-x)}{u_-}$$





## Chambre d'ionisation à électrodes planes parallèles (3)

- Le taux de recombinaison  $R'$  (par unité de surface et de temps -  $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) vaut:

$$R' = \int_0^d \alpha n^+(x) n^-(x) dx = \frac{\alpha q^2 d^2}{u_- u_+} \int_0^d \frac{x}{d} \left(1 - \frac{x}{d}\right) dx = \frac{1}{6} \frac{\alpha q^2 d^3}{u_- u_+}$$

- Avec  $qd$ , le nombre d'ionisations par unité de surface et de temps, on définit l'efficacité de collection de charges  $f$  comme le rapport entre  $Q_{coll}$ , la charge collectée au niveau des électrodes et  $Q$ , la charge produite dans la chambre par un champ de radiation constant  $\rightarrow$

$$f = \frac{Q_{coll}}{Q} = 1 - \frac{R'}{qd} = 1 - \frac{1}{6} \frac{\alpha q d^2}{u_- u_+} = 1 - \frac{1}{6} \xi^2$$

## Chambre d'ionisation à électrodes planes parallèles (4)

- La vitesse de migration d'une charge  $u$  est liée au champ électrique appliqué  $E$  par  $u = \mu E$  (avec  $\mu$ , la mobilité –  $\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
- Dans notre cas le potentiel appliqué  $U_0 = Ed \rightarrow$

$$\xi = \sqrt{\frac{\alpha q d^2}{u_- u_+}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\mu_+ \mu_-} \frac{d^2 \sqrt{q}}{U_0}} = m^2 \frac{d^2 \sqrt{q}}{U_0}$$

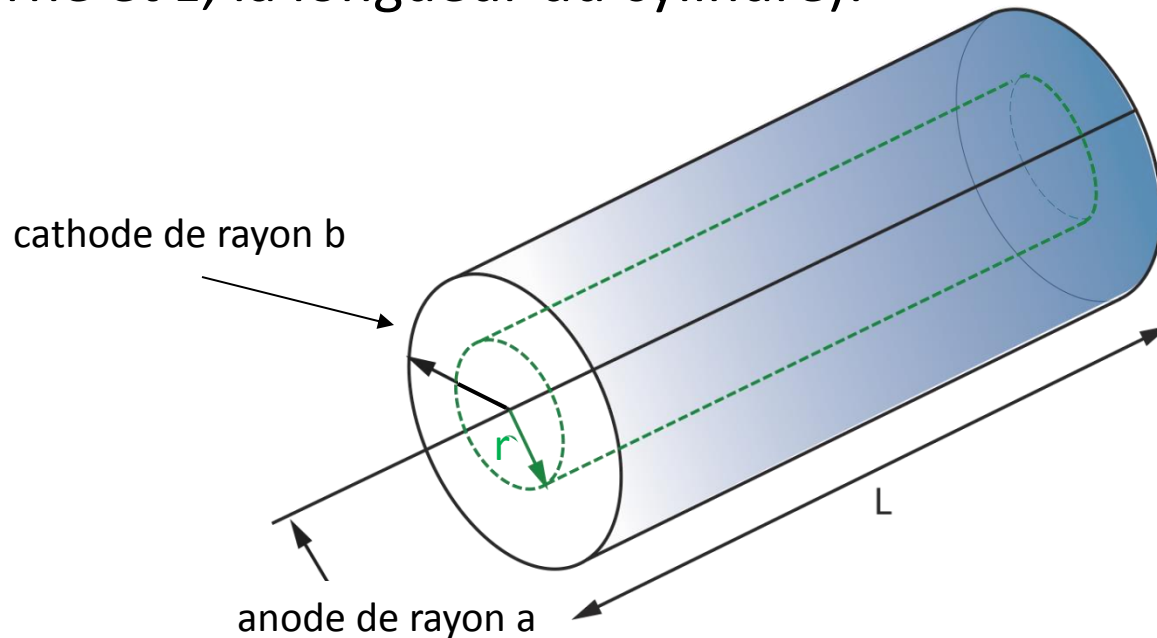
où  $m^2$  est une constante du gaz (pour de l'air CNTP  $m^2 = 6.47 \times 10^{-5} \text{ V}^2\text{sm}^{-1}$ )

- Un calcul qui tient compte du champ électrique produit par les charges d'espace ( $\rightarrow E$  non-uniforme) donne  $\rightarrow$

$$f = \frac{1}{1 + \frac{1}{6}\xi^2}$$

# Chambre d'ionisation cylindrique (1)

On peut raisonner de manière identique (avec  $u$  et  $\mu$  dépendant de la position  $r$ ) pour une chambre d'ionisation de forme cylindrique (avec  $a$  et  $b$ , les rayons des électrodes interne et externe et  $L$ , la longueur du cylindre):



## Chambre d'ionisation cylindrique (2)

$$q\pi(r^2 - a^2)Ldt = n^+(r)2\pi rLu_+(r)dt$$

$$q\pi(b^2 - r^2)Ldt = n^-(r)2\pi rLu_-(r)dt$$



$$n^+(r) = \frac{q(r^2 - a^2)}{2ru_+(r)}$$

$$n^-(r) = \frac{q(b^2 - r^2)}{2ru_-(r)}$$

Comme, pour une chambre cylindrique →

$$E(r) = \frac{U_0}{r \ln(b/a)} \quad \longrightarrow \quad u_{\pm}(r) = \mu_{\pm}E(r) = \mu_{\pm} \frac{U_0}{r \ln(b/a)}$$

## Chambre d'ionisation cylindrique (3)



$$n^+(r) = \frac{qa^2 \ln(b/a)}{2\mu_+ U_0} \left[ \left(\frac{r}{a}\right)^2 - 1 \right]$$

$$n^-(r) = \frac{qa^2 \ln(b/a)}{2\mu_- U_0} \left[ \left(\frac{b}{a}\right)^2 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 \right]$$

Le taux de recombinaison  $R''$  (par unité de longueur et de temps -  $\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) vaut:

$$\begin{aligned} R'' &= \int_0^d \alpha n^+(r) n^-(r) 2\pi r dr \\ &= \frac{\pi\alpha}{2\mu_- \mu_+} \left( \frac{qa^3 \ln(b/a)}{U_0} \right)^2 \int_a^b \frac{r}{a} \left[ \left(\frac{b}{a}\right)^2 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 \right] \left[ \left(\frac{r}{a}\right)^2 - 1 \right] \frac{dr}{a} \\ &= \frac{\pi\alpha}{4\mu_- \mu_+} \left( \frac{qa^3 \ln(b/a)}{U_0} \right) \frac{[(b/a)^2 - 1]^3}{6} \end{aligned}$$

## Chambre d'ionisation cylindrique (4)

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{Q_{coll}}{Q} = 1 - \frac{R''}{\pi(b^2 - a^2)q} \\
 &= 1 - \frac{1}{6} \frac{\alpha q}{4\mu_- \mu_+} \left( \frac{a^2 \ln(b/a)^2}{U_0} \right)^2 [(b/a)^2 - 1]^2 \\
 &= 1 - \frac{1}{6} \frac{\alpha q}{\mu_- \mu_+} \left[ \frac{(b-a)^4}{U_0^2} \right] \left[ \frac{b+a \ln(b/a)}{b-a} \frac{1}{2} \right]^2 \\
 &= 1 - \frac{1}{6} \xi^2
 \end{aligned}$$

avec

$$\begin{aligned}
 \xi &= \sqrt{\frac{\alpha}{\mu_+ \mu_-} \frac{[\kappa_{cyl}(b-a)]^2 \sqrt{q}}{U_0}} \\
 \kappa_{cyl} &= \sqrt{\frac{b/a + 1}{b/a - 1} \frac{\ln(b/a)}{2}}
 \end{aligned}$$

# Chambre d'ionisation sphérique

Même calcul que pour un cylindre → il suffit de prendre les valeurs de  $\xi$  et  $\kappa$  correspondant à une sphère →

$$\xi = \sqrt{\frac{\alpha}{\mu_+ \mu_-} \frac{[\kappa_{sph}(b-a)]^2 \sqrt{q}}{U_0}}$$
$$\kappa_{sph} = \sqrt{\frac{1}{3} \left( \frac{b}{a} + 1 + \frac{a}{b} \right)}$$

# Extrapolation générale

- on peut extrapoler les relations précédentes pour les écrire sous la forme →

$$\frac{1}{Q_{coll}} = \frac{1}{Q} + \frac{c}{U_0^2}$$

où  $c$  est une constante dépendant de la géométrie du détecteur et de la nature du gaz

- $\neq$  valeurs de  $1/Q_{coll}$  en fonction de  $U_0 \rightarrow$  extrapolation pour  $1/U_0^2=0 \rightarrow 1/Q$  correct pour une irradiation continue

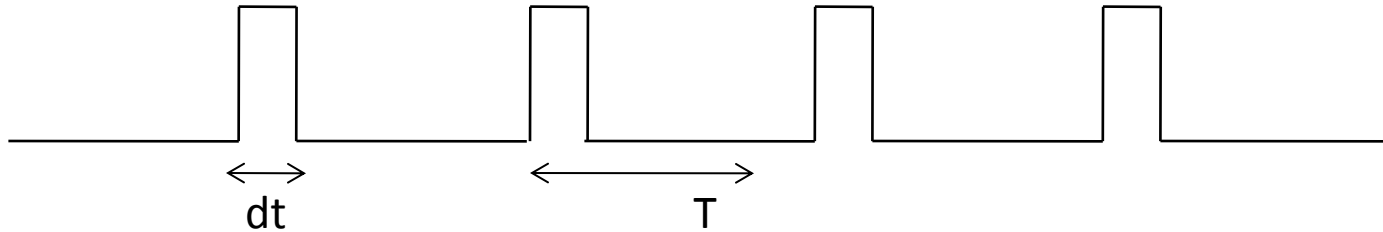


## Recombinaisons en colonne

- Si les recombinaisons en volume sont négligeables et que seules les recombinaisons en colonne doivent être prises en compte (particules à forte densité d'ionisation ou gaz à haute pression) → démonstration empirique de Jaffe-Zanstra →

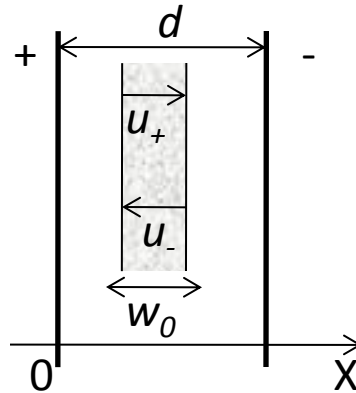
$$\frac{1}{Q_{coll}} = \frac{1}{Q} + \frac{c'}{U_0}$$

# Recombinaison pour des irradiations pulsées



- On pose  $dt$ : largeur des impulsions de radiation et  $T$ : temps de collection des charges
- Si beaucoup d'impulsions pendant  $T$  ou  $dt > T \rightarrow$  théorie de l'irradiation continue
- Si  $dt \ll T$  ( $dt \approx \mu s$  et  $T \approx ms$ )  $\rightarrow$  théorie de Boag

# Théorie de Boag pour les irradiations pulsées (1)



- $w_0$ : largeur initiale de la zone irradiée  $\rightarrow$  évolution de  $w$  avec le temps  $t$ :  $w(t) = w_0 - (u_+ + u_-)t$  avec  $w(T) = 0 \rightarrow T = w_0 / (u_+ + u_-)$
- Hypothèse:  $n^+ = n^- = n \rightarrow$

$$\frac{dn}{dt} = -\alpha n^2 \quad \text{avec} \quad n_0 = n(0)$$
$$n(t) = \frac{n_0}{1 + \alpha n_0 t}$$

## Théorie de Boag pour les irradiations pulsées (2)

Intégration du taux de recombinaison pendant le temps  $T \rightarrow R_T$ :  
taux de recombinaison par unité de surface -  $m^{-2}$ )  $\rightarrow$

$$\begin{aligned} R_T &= \frac{1}{S} \int_0^T V dn = \frac{1}{S} \int_0^T w S \alpha n^2 dt \\ &= \alpha n_0^2 \int_0^T \frac{(w_0 - (u_+ + u_-)t)}{(1 + \alpha n_0 t)^2} dt \\ &= n_0 w_0 \left[ 1 - \frac{1}{\alpha n_0 T} \ln(1 + \alpha n_0 T) \right] \end{aligned}$$

## Théorie de Boag pour les irradiations pulsées (3)

- L'efficacité de collection de charges  $f \rightarrow$

$$f = 1 - \frac{R}{n_0 w_0} = \frac{1}{\alpha n_0 T} \ln(1 + \alpha n_0 T)$$

- Si  $w_0 = d \rightarrow$

$$\alpha n_0 T = \alpha n_0 \frac{d}{u_+ + u_-} = \frac{\alpha n_0}{\mu_+ + \mu_-} \frac{d^2}{U_0}$$

- Si  $\alpha$  petit  $\rightarrow$

$$f \simeq 1 - \frac{1}{2} \alpha n_0 T \rightarrow \frac{1}{Q_{coll}} = \frac{1}{Q} + \frac{c''}{U_0}$$

## Théorie de Boag pour les irradiations pulsées (4)

- Pour une chambre cylindrique  $\rightarrow d$  doit être remplacé par

$$d \rightarrow (a - b)\kappa_{cyl}$$

- Pour une chambre sphérique  $\rightarrow d$  doit être remplacé par

$$d \rightarrow (a - b)\kappa_{sph}$$

# Corrections atmosphériques: Densité de l'air (1)

- La charge collectée dépend du type et de la masse de gaz dans la chambre
- La plupart du temps → chambre ouverte à l'atmosphère ambiante → équilibre du gaz avec l'environnement → densité du gaz (avec  $[T] = \text{K}$  et  $[P] = \text{Pa}$ ) →

$$\rho = \rho_{CNTP} \left( \frac{273.15}{T} \times \frac{P - 0.3783P_w}{101325} \right)$$

- $P_w$  est la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air
- $P_w$  dépend de l'humidité relative (RH) de l'air définie comme le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante (ou tension de vapeur) à la même  $T$  → mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans les mêmes conditions

## Corrections atmosphériques: Densité de l'air (2)

- Exemples de  $P_w$ :
  - à  $T = 295.15$  K et  $RH = 100\%$  →  $P_w = 2643.33$  Pa
  - à  $T = 295.15$  K et  $RH = 50\%$  →  $P_w = 1321.73$  Pa
- Exemples de modification de densité  $\rho$ : Si  $P = 101325$  Pa et  $P_w = 1321.73$  Pa →  $\rho_h$  (air humide) < de 0.5% par rapport à  $\rho_a$  de l'air sec ( $P_w = 0$  Pa)
- Tous ces paramètres doivent être fréquemment mesurés durant une longue série de mesures
- L'effet de l'humidité est souvent négligé car elle implique aussi une correction sur  $W/e$  qui varie en opposition avec la correction sur la densité → erreur nette extrêmement faible (< 0.3 %)



# Corrections atmosphériques: effet de l'humidité sur $W/e$ (1)

- Pour de l'air sec →

$$(\overline{W}/e)_a = 33.97 \text{ J/C}$$

- Pour de l'air humide  $(W/e)_h < (W/e)_a$  mais la  $\rho$  de l'air  $\searrow$  pour de l'air humide et comme

$$D = \Phi \left( \frac{dE}{\rho dx} \right) = \frac{Q}{\rho V} \left( \frac{\overline{W}}{e} \right)$$


→ les effets se contrebalancent

- Cependant l'humidité de l'air influe aussi sur  $dE/dx$

## Corrections atmosphériques: effet de l'humidité sur $W/e$ (2)

- Considérons une chambre d'ionisation à cavité soumise à un flux de rayons X (par exemple) constant,  $\Phi = c$
- Supposons qu'elle soit remplie successivement avec de l'air sec et de l'air humide  $\rightarrow$

$$\Phi = \frac{Q_a}{\rho_a V} \left( \frac{\overline{W}}{e} \right)_a \frac{1}{(dE/\rho dx)_a} = \Phi = \frac{Q_h}{\rho_h V} \left( \frac{\overline{W}}{e} \right)_h \frac{1}{(dE/\rho dx)_h}$$



$$\frac{Q_h}{Q_a} = \frac{\left( \frac{\overline{W}}{e} \right)_a}{\left( \frac{\overline{W}}{e} \right)_h} \times \frac{\left( \frac{dE}{dx} \right)_h}{\left( \frac{dE}{dx} \right)_a}$$

- 1<sup>er</sup> terme  $> 1$  et 2<sup>ème</sup> terme  $< 1 \rightarrow Q_h/Q_a$  est relativement « plat »  
 $\rightarrow 1.0028 \pm 0.0003$  ( $15\% < RH < 75\%$ )

# Effets de l'humidité

