

Tests d'Électrodynamique Quantique et Étalons de Rayons-X à l'Aide des Atomes Pioniques et des Ions Multichargés

Martino Trassinelli

Groupe de

Métrologie des systèmes simples et Tests fondamentaux

Laboratoire Kastler Brossel,
École Normale Supérieure et Université Pierre et Marie Curie

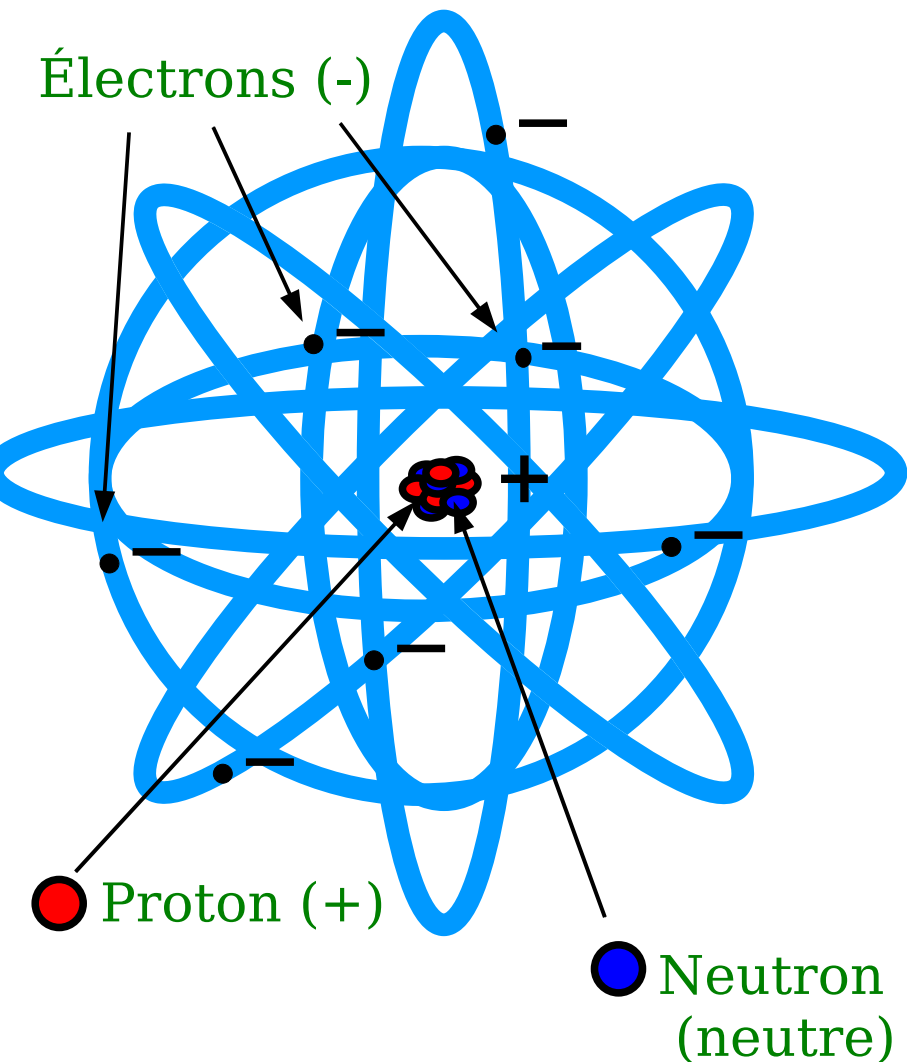
sous la direction de Paul Indelicato

- **Introduction**
- **Atomes pioniques**
 - Production des atomes pioniques et détection rayonnement émis
 - Calculs théoriques sur les atomes pioniques
 - Nouvelle mesure de la masse du pion
 - Test de l'équation Klein-Gordon
- **Ions multichargés**
 - Production des ions multichargés et détection rayonnement émis
 - Tests d'électrodynamique quantique (QED) dans les atomes à peu d'électrons
- **Conclusion**
- **Perspectives**

Atomes particuliers

Atome neutre :

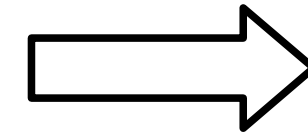
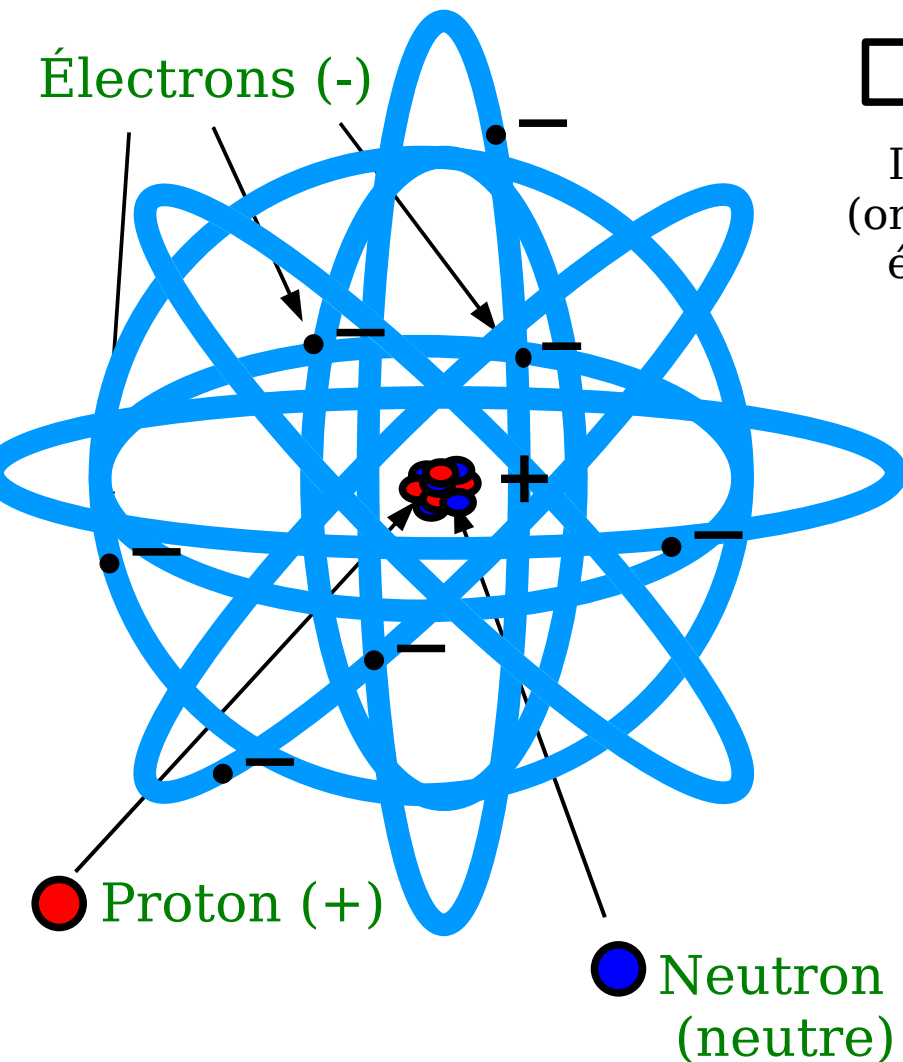
(nb. électrons = nb. protons)



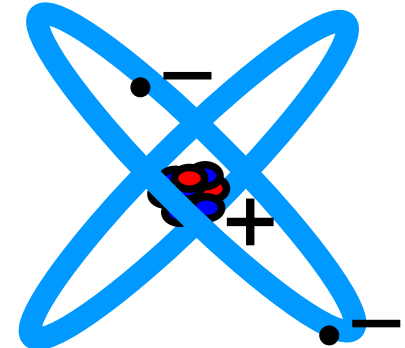
Atomes particuliers

Atome neutre :

(nb. électrons = nb. protons)



Ionisation
(on enlève les
électrons)

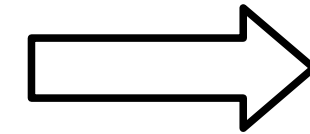
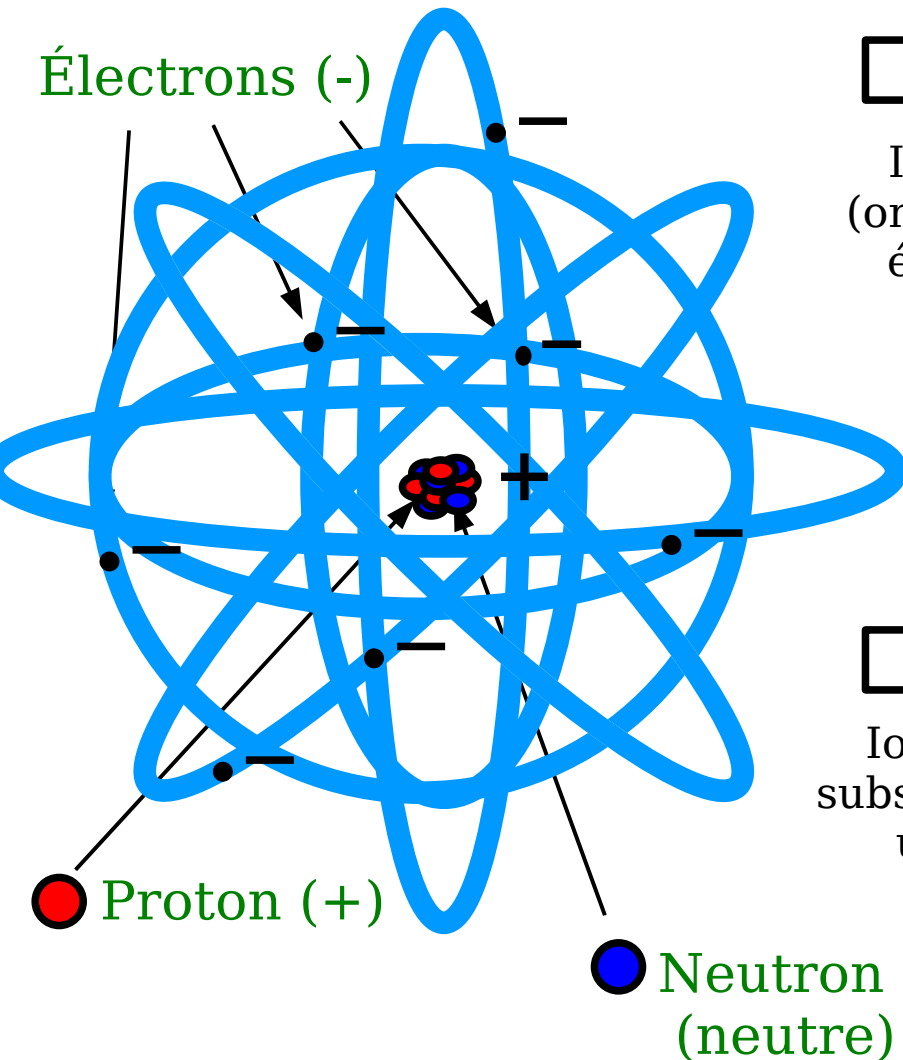


Ion multichargé :

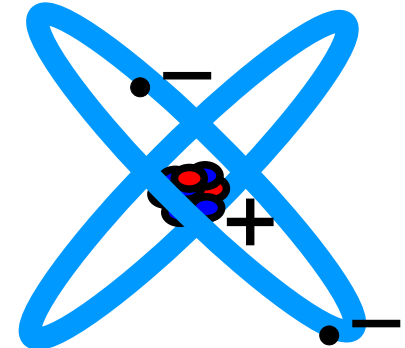
- L'atome devient très chargé positivement
- On laisse quelques électrons

Atomes particuliers

Atome neutre :
(nb. électrons = nb. protons)

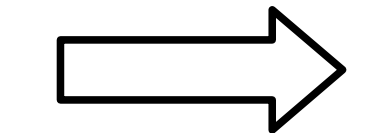


Ionisation
(on enlève les électrons)

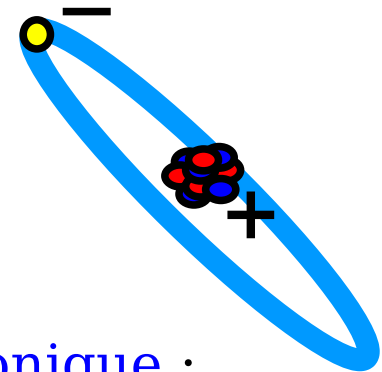


Ion multichargé :

- L'atome devient très chargé positivement
- On laisse quelques électrons



Ionisation et
substitution avec
une autre
particule



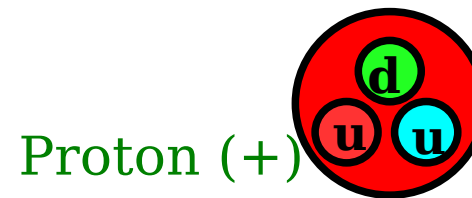
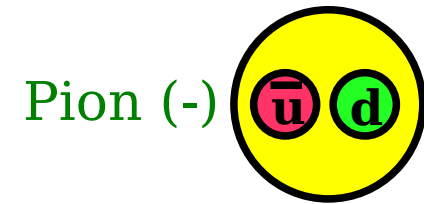
Atome pionique :

- On remplace tous les électrons par une particule instable : le méson- π ou pion

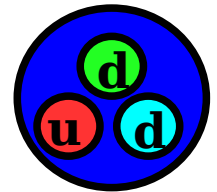
Le pion et les atomes pioniques

Caractéristiques du pion :

- Découvert en 1947 (Powell et al.)
- Produit artificiellement en 1949 (Lattes et al.)
- Temps de vie = 26 ns
- Masse = $273 m_e$ ($139 \text{ MeV}/c^2$)
- Formé par un quark et un antiquark
- Spin du pion = 0



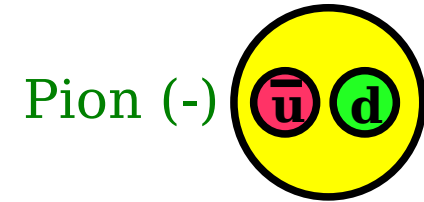
Neutron
(neutre)



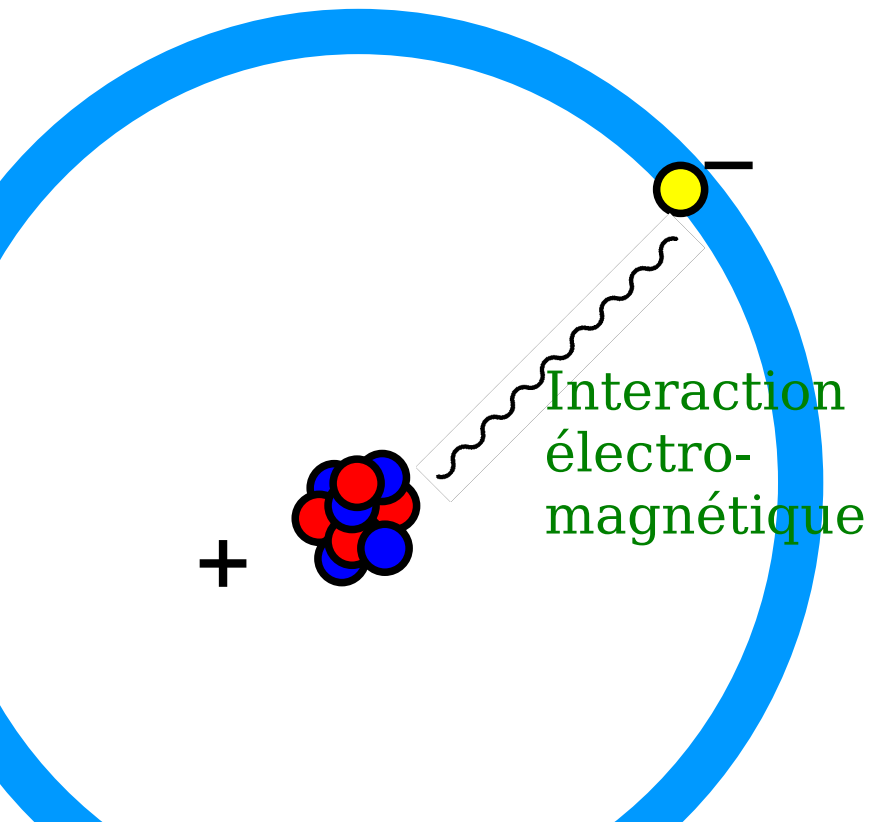
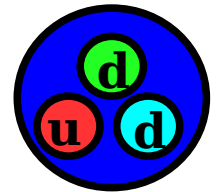
Le pion et les atomes pioniques

Caractéristiques du pion :

- Découvert en 1947 (Powell et al.)
- Produit artificiellement en 1949 (Lattes et al.)
- Temps de vie = 26 ns
- Masse = $273 m_e$ ($139 \text{ MeV}/c^2$)
- Formé par un quark et un antiquark
- Spin du pion = 0



Neutron
(neutre)



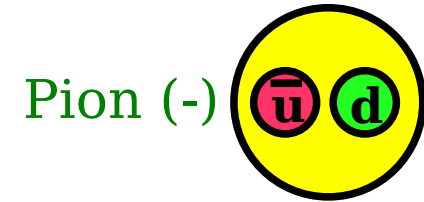
Atomes pioniques :

- Noyau + pion = système lié
- Attraction due à la charge opposée

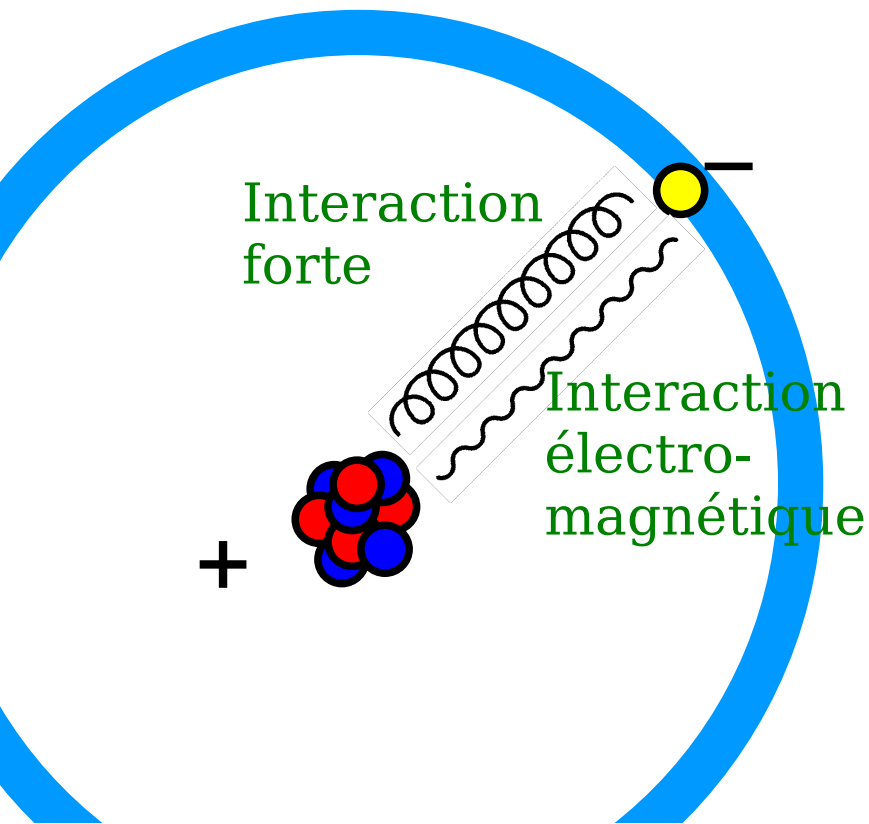
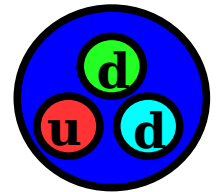
Le pion et les atomes pioniques

Caractéristiques du pion :

- Découvert en 1947 (Powell et al.)
- Produit artificiellement en 1949 (Lattes et al.)
- Temps de vie = 26 ns
- Masse = $273 m_e$ ($139 \text{ MeV}/c^2$)
- Formé par un quark et un antiquark
- Spin du pion = 0



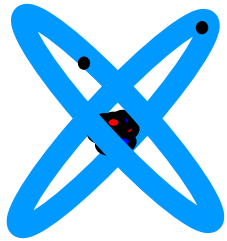
Neutron
(neutre)



Atomes pioniques :

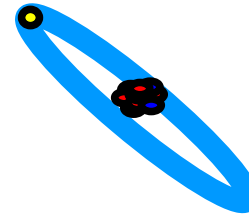
- Noyau + pion = système lié
- Attraction due à la charge opposée
- Interaction forte due à la présence de quarks

Caractéristiques des atomes pioniques et ions multichargés



Ions multichargés:

- Z grand (ici Z=16-18)
- corrélation entre électrons



Atomes pioniques:

- m grand ($273 m_e$)
- interaction forte
- petite durée de vie

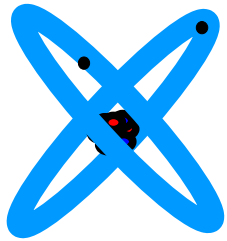
$$r_0 = \frac{\hbar}{Z\alpha mc}$$

Petit rayon

- Sensibilité aux effets de QED
 - polarisation du vide
 - self-énergie
- Influence de la taille du noyau

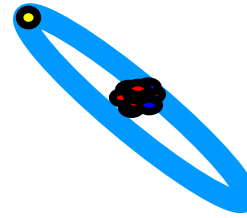
Z = nombre atomique,
m = masse réduite,
h = constante de Planck,
c = vitesse de la lumière,
 α = constante de structure fine

Caractéristiques des atomes pioniques et ions multichargés



Ions multichargés:

- Z grand (ici Z=16-18)
- corrélation entre électrons



Atomes pioniques:

- m grand ($273 m_e$)
- interaction forte
- petite durée de vie

$$r_0 = \frac{\hbar}{Z\alpha mc}$$

Petit rayon

- Sensibilité aux effets de QED
 - polarisation du vide
 - self-énergie
- Influence de la taille du noyau

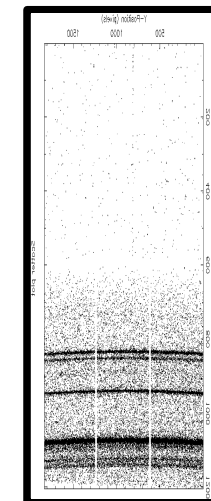
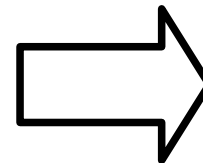
$$E_n = mc^2 \frac{(Z\alpha)^2}{2n^2}$$

Augmentation de l'énergie des niveaux atomiques

- Effets relativistes visibles
- Photons émis dans la gamme des rayons-X (1-10 keV)



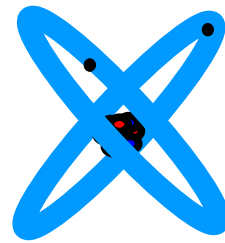
Spectre d'émission de l'hydrogène (lumière visible)



Spectre d'émission de l'argon héliumoïde et lithiuoïde (rayons-X)

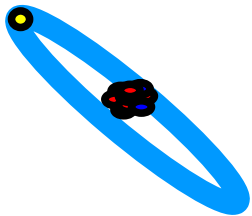
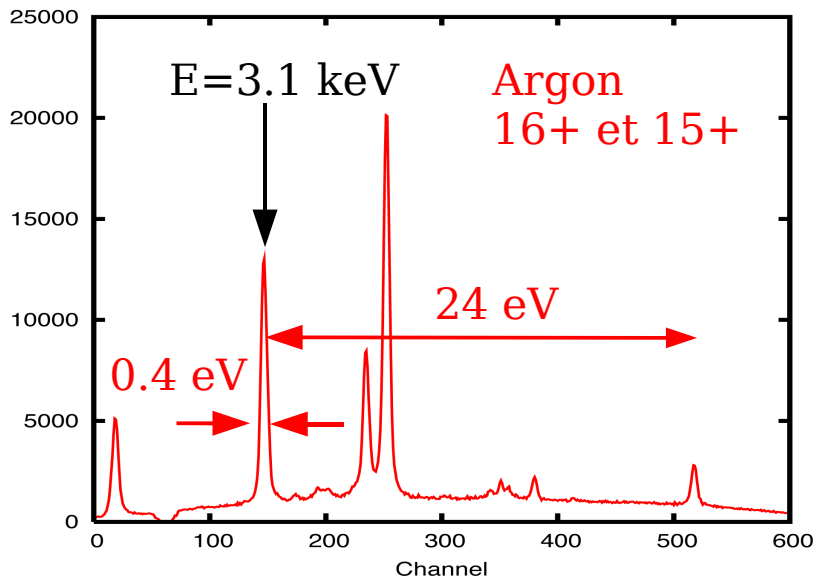
Z = nombre atomique,
m = masse réduite,
h = constante de Planck,
c = vitesse de la lumière,
 α = constante de structure fine

Comparaison des spectres X



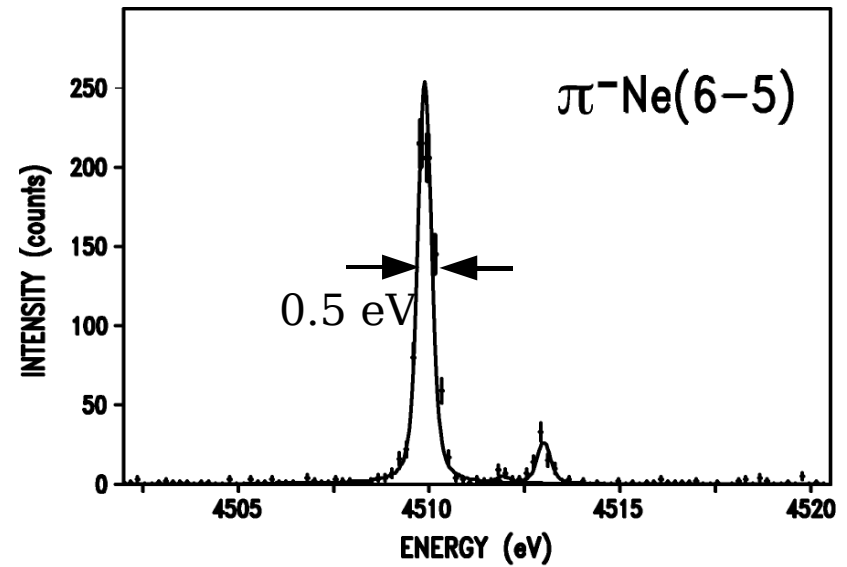
Ions multichargés

- Largeur naturelle : ~ 10 meV (pour transitions de 2-4 keV)
- Spectres complexes
- Émission X intense par les sources d'ions

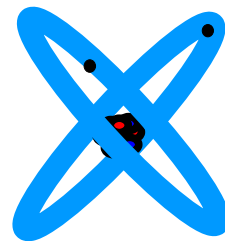
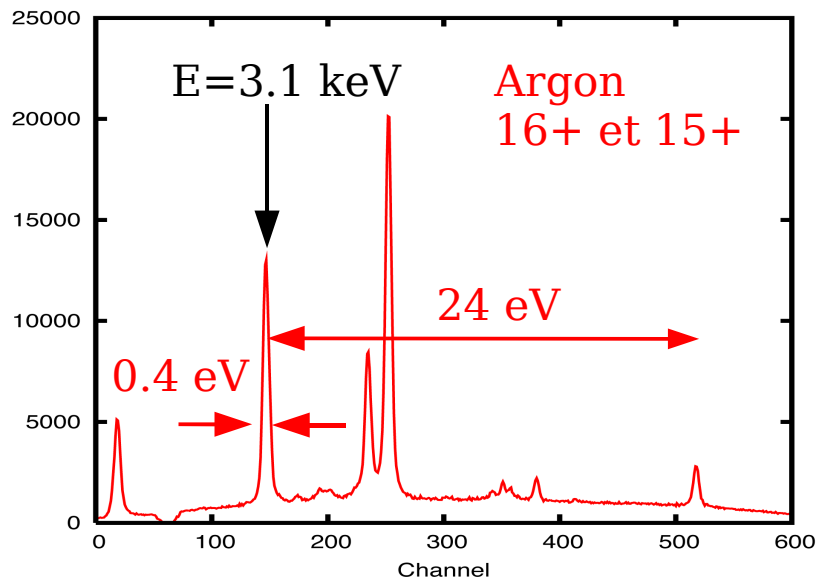


Atomes pioniques

- Largeur naturelle : ~ 10 meV (pour transitions de 2-4 keV)
- Atomes hydrogénoïde \rightarrow spectres simples
- Émission X faible par les sources d'atomes pioniques

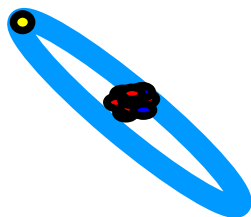


Comparaison des spectres X



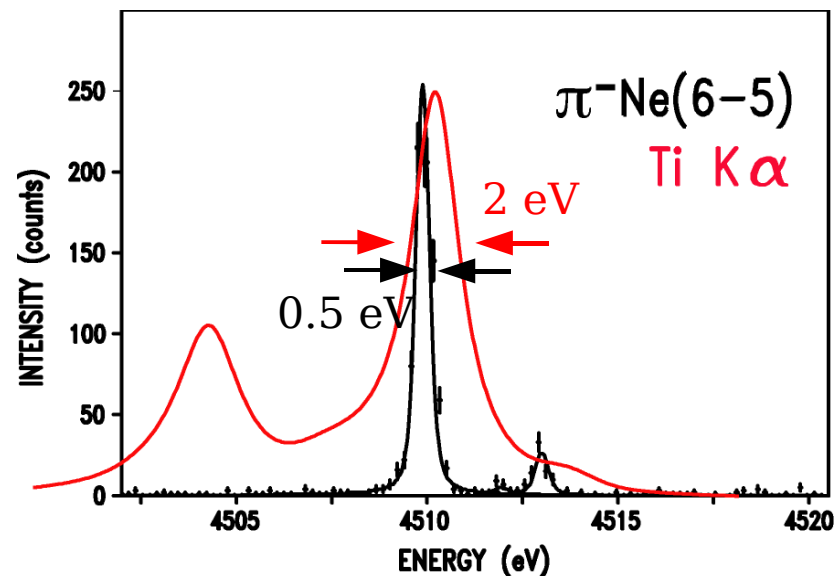
Ions multichargés

- Largeur naturelle : ~ 10 meV (pour transitions de 2-4 keV)
- Spectres complexes
- Émission X intense par les sources d'ions



Atomes pioniques

- Largeur naturelle : ~ 10 meV (pour transitions de 2-4 keV)
- Atomes hydrogénoïde \rightarrow spectres simples
- Émission X faible par les sources d'atomes pioniques



Largeur expérimentale des raies
 \ll largeur des raies des sources X par fluorescence

Applications : test de QED et étalons X

13

Caractérisation des spectromètres X

- Largeur des raies : ~ 10 meV (pour transitions de 2-4 keV)
- Émission rayons-X intense par les sources d'ions multichargés

Applications : test de QED et étalons X

Caractérisation des spectromètres X

- Largeur des raies : ~ 10 meV (pour transitions de 2-4 keV)
- Émission rayons-X intense par les sources d'ions multichargés

Étalons pour rayons-X de l'ordre de quelques keV

- Énergies prédictibles par la théorie avec une précision de quelques ppm
- Spectres dans un grand domaine d'énergie

Caractérisation des spectromètres X

- Largeur des raies : ~ 10 meV (pour transitions de 2-4 keV)
- Émission rayons-X intense par les sources d'ions multichargés

Étalons pour rayons-X de l'ordre de quelques keV

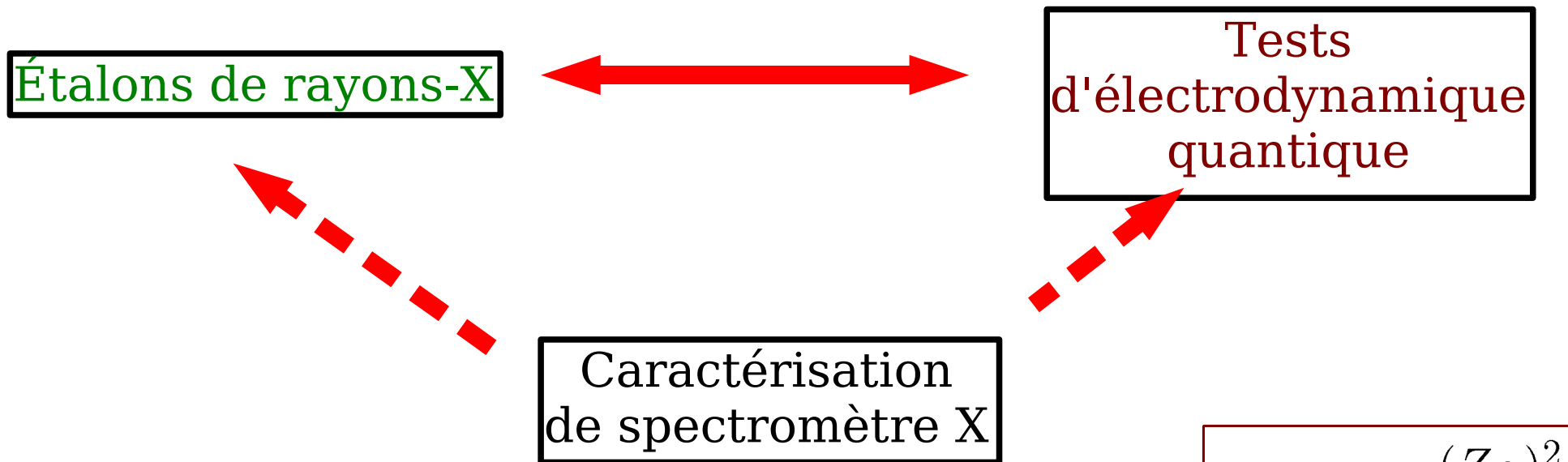
- Énergies prédictibles par la théorie avec une précision de quelques ppm
- Spectres dans un grand domaine d'énergie

Tests d'Électrodynamique Quantique (QED)

- Atomes pioniques : test de l'équation de Klein-Gordon
- Ions multichargés : test des méthodes de calcul théoriques pour les ions
- Test des contributions de la polarisation du vide et self-énergie

(Mesure de l'interaction forte à basse énergie \rightarrow hydrogène pionique)

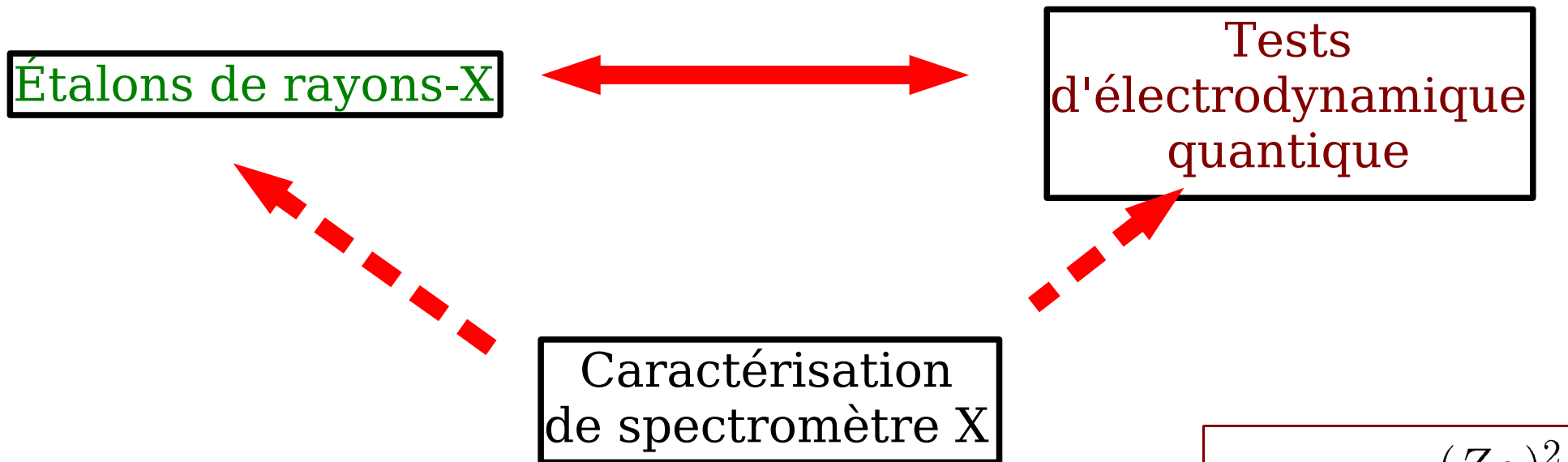
Étalons-QED-caractérisation



$$E_n = mc^2 \frac{(Z\alpha)^2}{2n^2}$$

- Précision des étalons \leftrightarrow tests de QED
- Précision des étalons \leftrightarrow mesure de la masse de la particule liée

Étalons-QED-caractérisation



$$E_n = mc^2 \frac{(Z\alpha)^2}{2n^2}$$

- Précision des étalons \leftrightarrow tests de QED
- Précision des étalons \leftrightarrow mesure de la masse de la particule liée

Contribution de cet exposé

Nouvelle mesure de la masse du pion

Structure hyperfine des atomes pioniques

Test de l'équation de Klein-Gordon

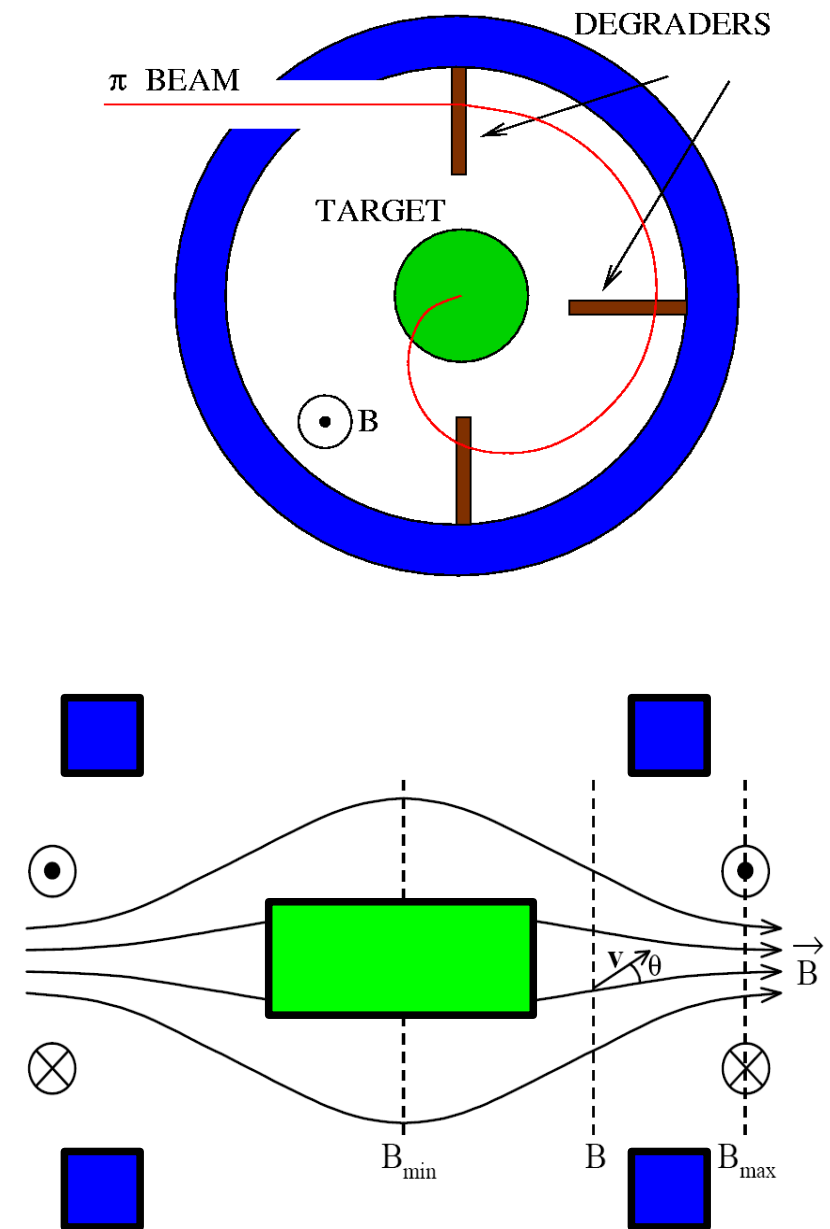
Développement d'une nouvelle source d'ions

Test de QED avec les ions multichargés

Atomes pioniques

Production des atomes pioniques

- **Pions** produits au Paul Scherrer Institut (Villigen, Suisse)
(10^8 pions/sec, $E_{\text{kin}} = 110$ Mev/c)
- Piège cyclotronique
- Champ magnétique max. $B = 3.5$ T
- Cible gazeuse ou liquide :
T= de 14°K à température ambiante,
pression effective = de ~ 0 à 40 bars
- 1-5% des pions sont capturés



Production des atomes pioniques

- **Pions** produits au Paul Scherrer Institut (Villigen, Suisse)
(10^8 pions/sec, $E_{\text{kin}} = 110$ Mev/c)

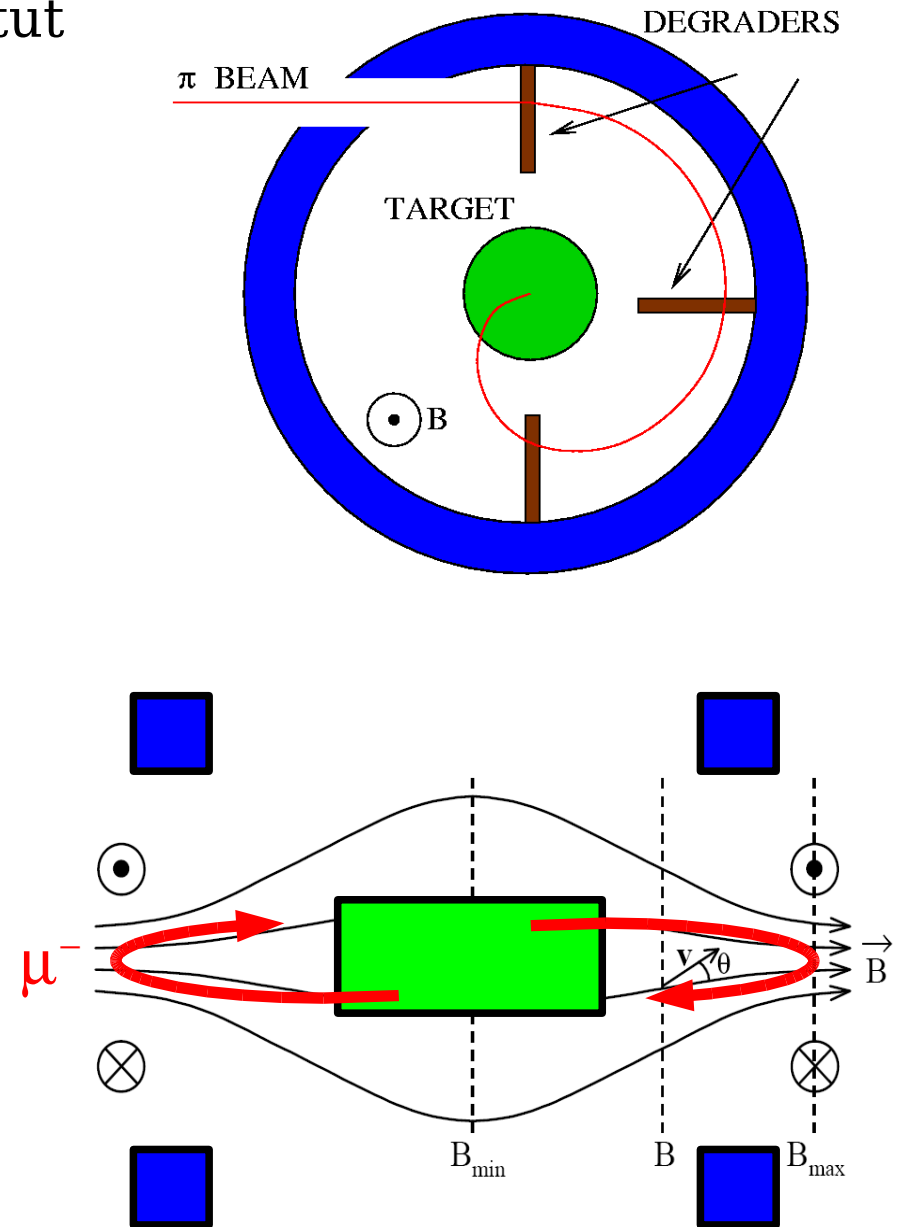
- Piège cyclotronique
- Champ magnétique max. $B = 3.5$ T

- Cible gazeuse ou liquide :
T = de 14°K à température ambiante,
pression effective = de ~ 0 à 40 bars

- 1-5% des pions sont capturés
- Production et recapture des muons

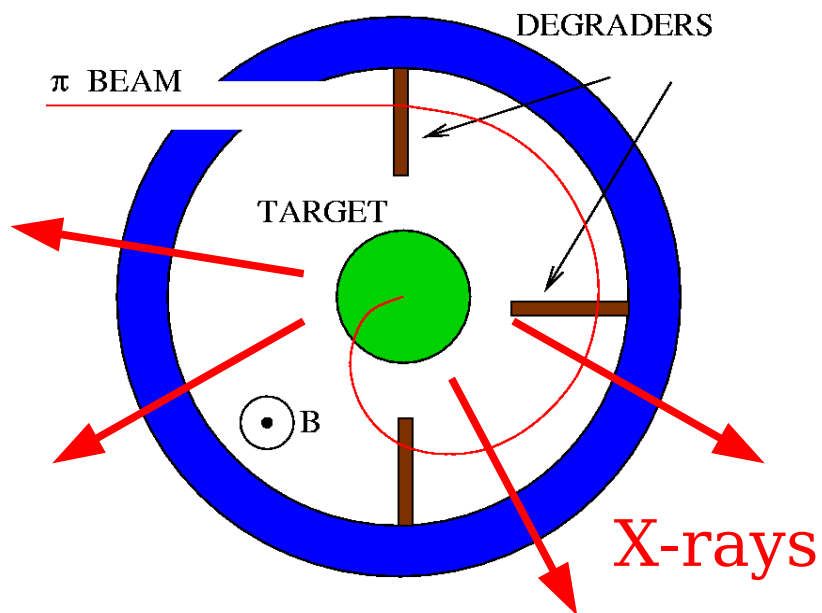


- Formation des atomes muoniques (et pioniques)

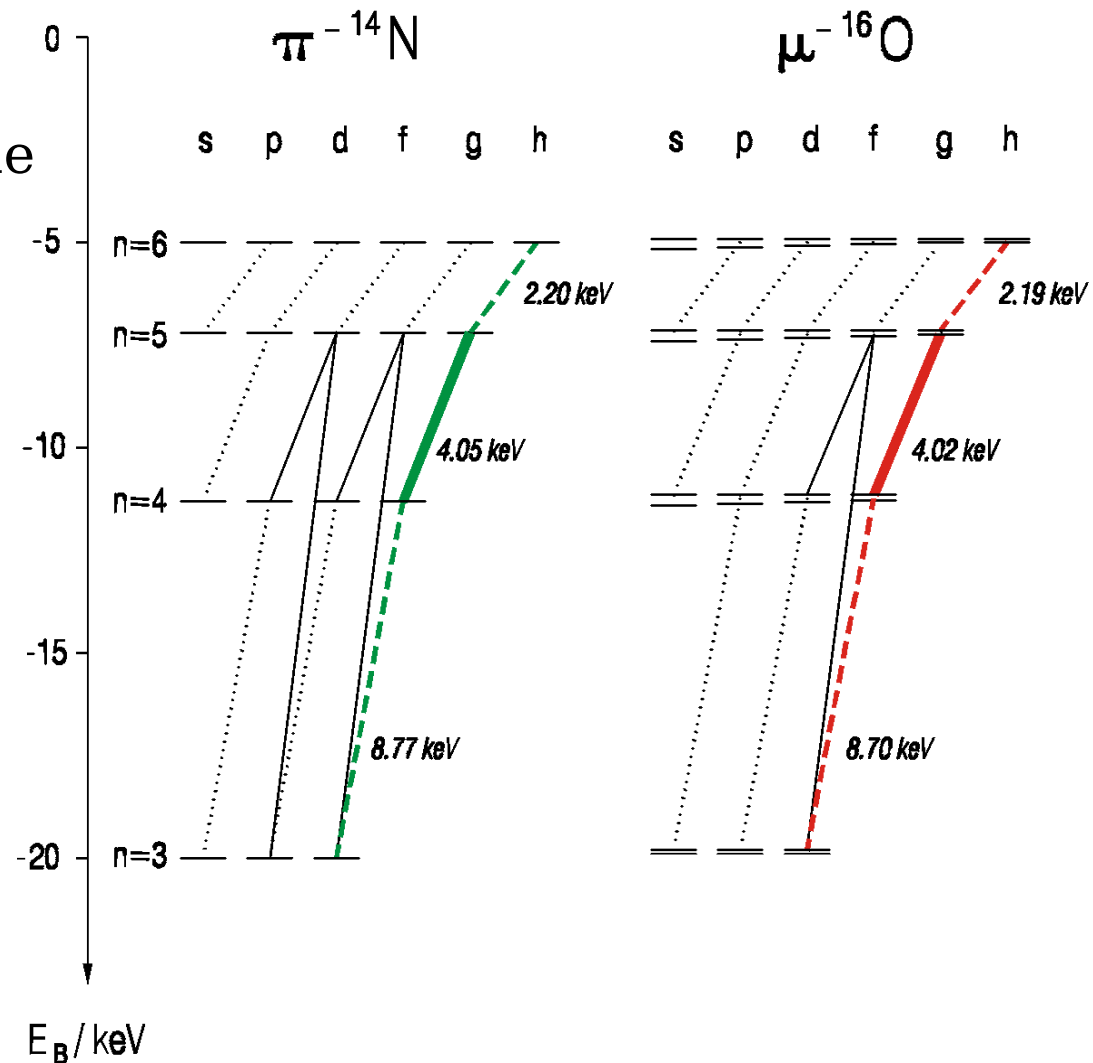


Émission des rayons-X par les atomes pioniques

- Atomes pioniques formés dans un état excité
- Cascade radiative avec émission de rayons-X



Transitions dans
l'azote pionique et l'oxygène pionique

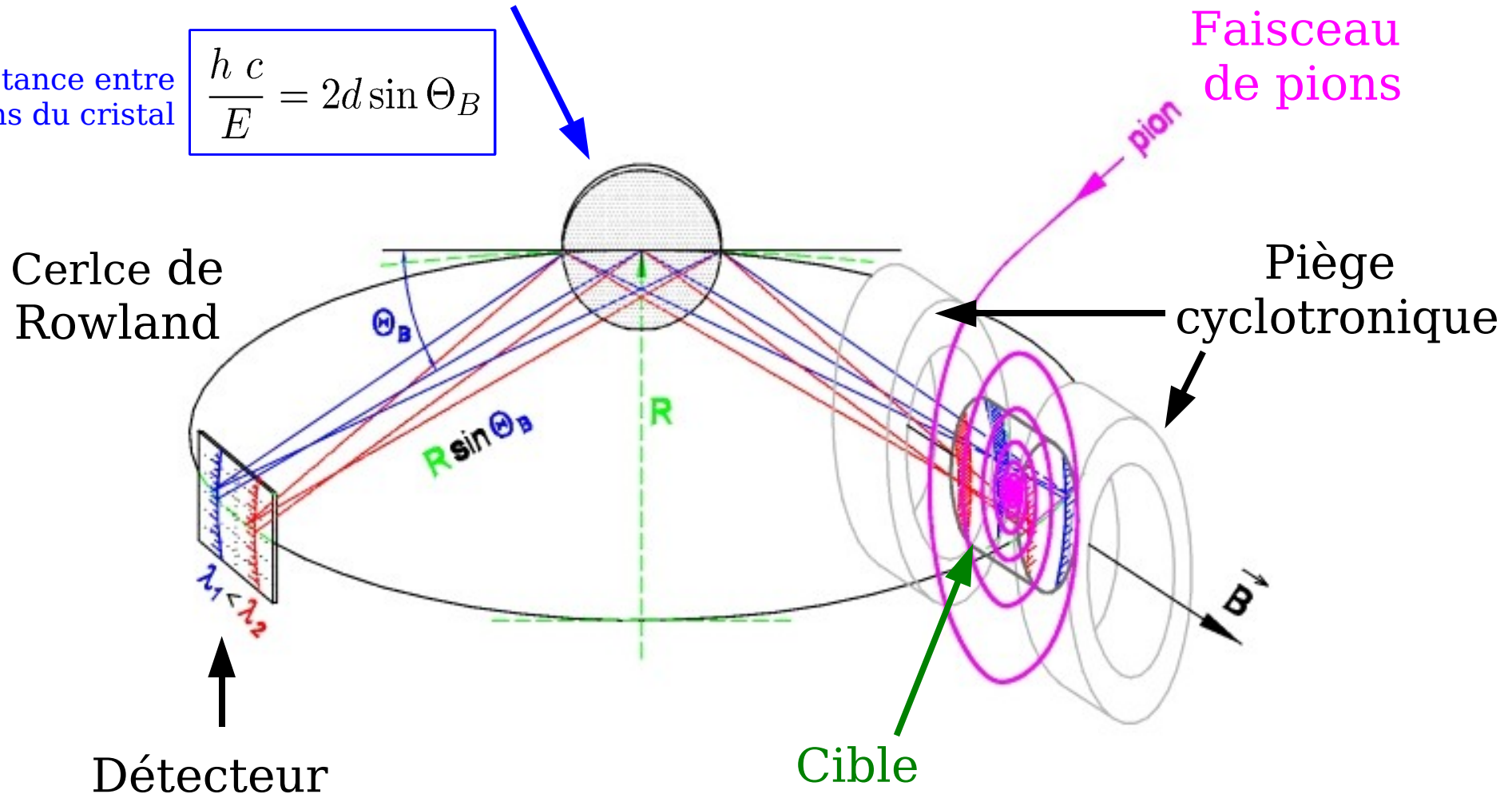


Spectromètre de Bragg de type Johann (1) 22

Cristal de Bragg courbé
sphériquement

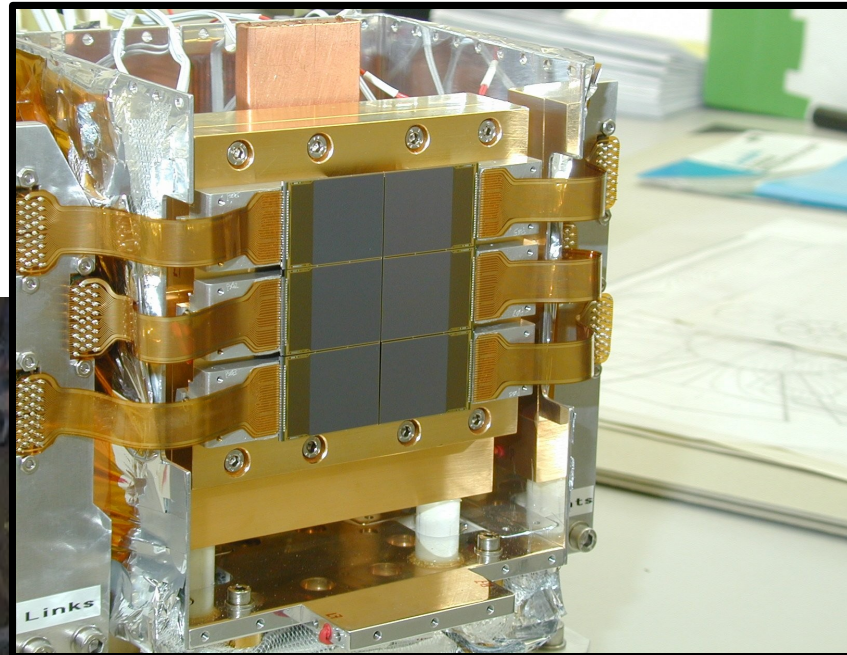
d = distance entre
les plans du cristal

$$\frac{h c}{E} = 2d \sin \Theta_B$$



Spectromètre de Bragg de type Johann (2)

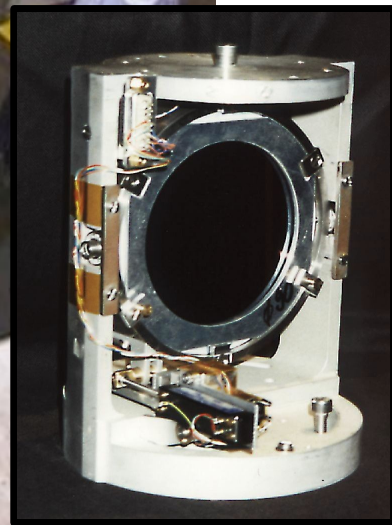
Détecteur :
série de 6 x CCD (610x604 pixels chacun)
Résolution en énergie. = 150 eV à 3 keV



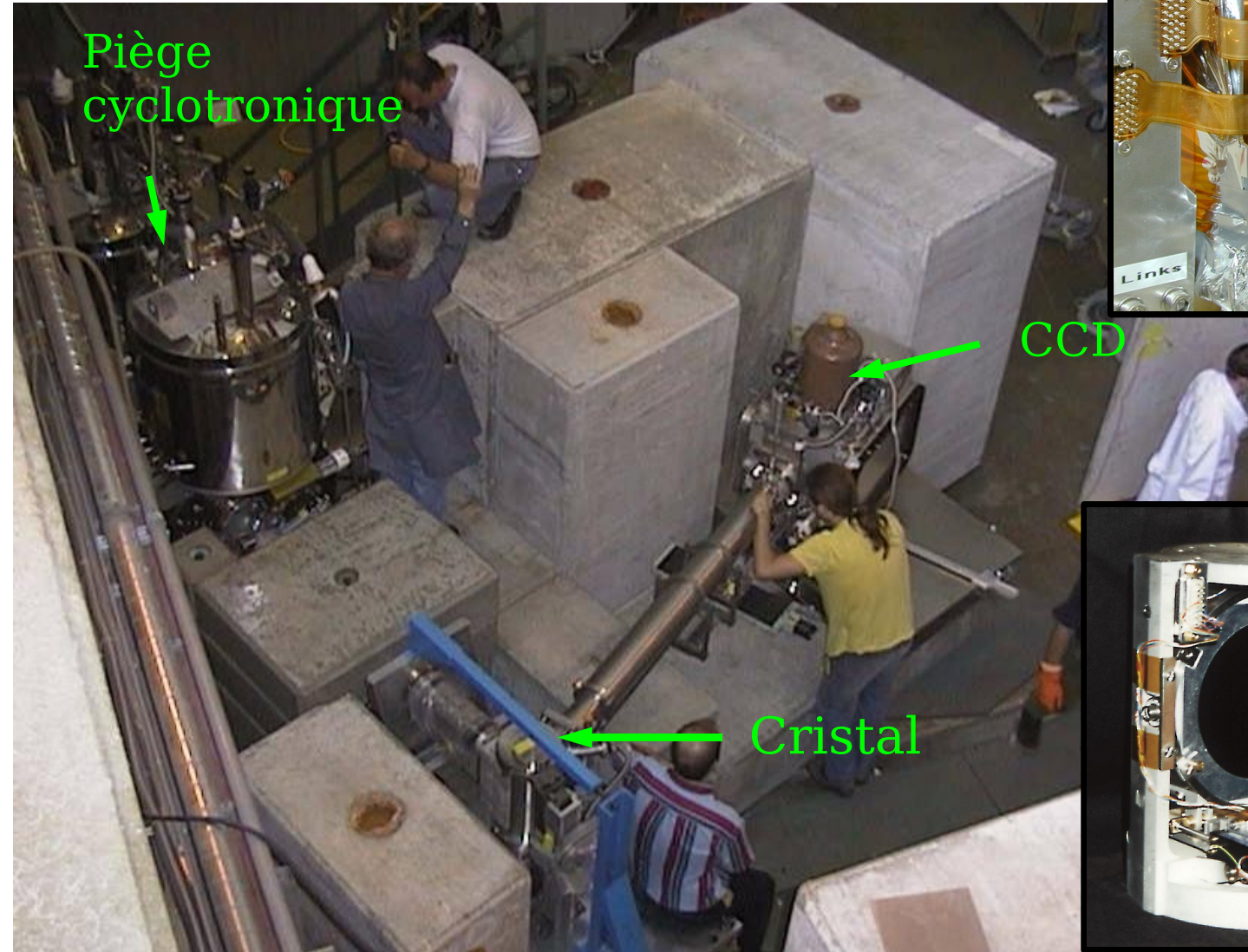
Piège cyclotronique

CCD

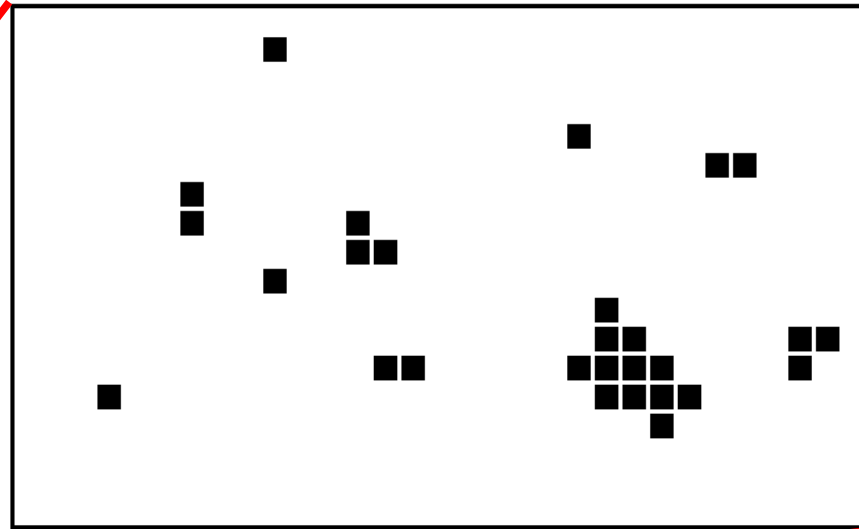
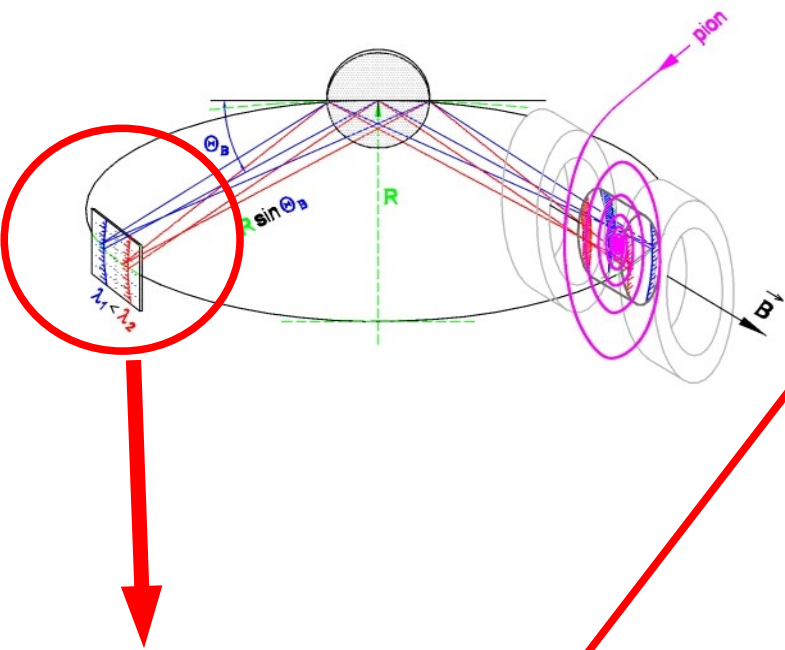
Cristal



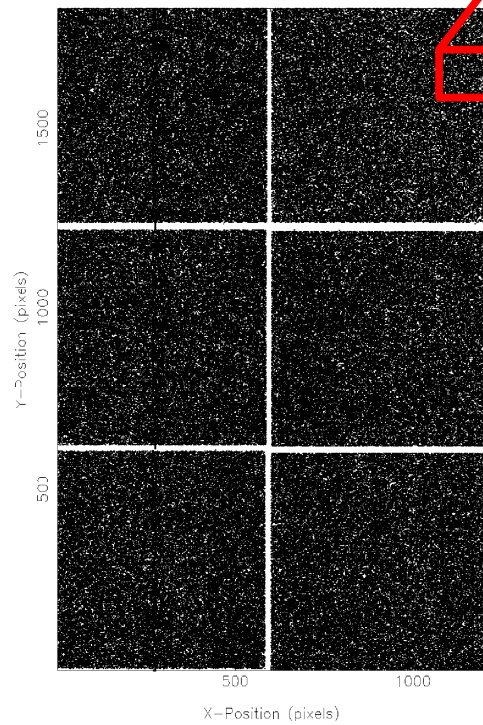
Cristal sur son support



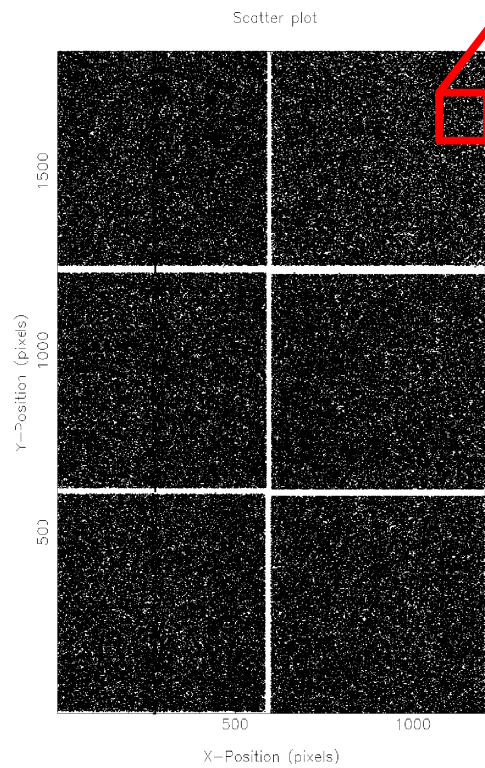
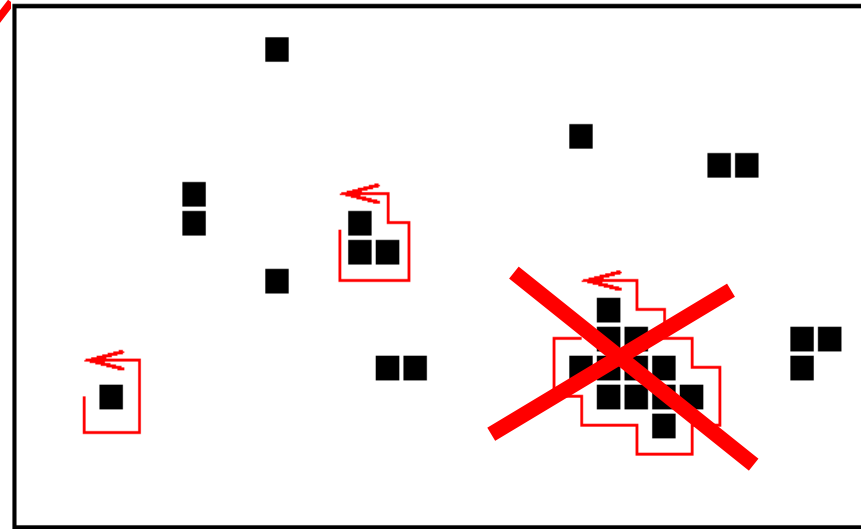
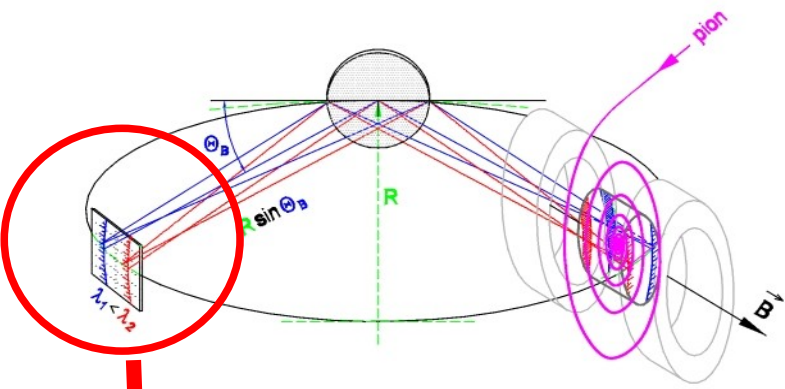
Détection (1)



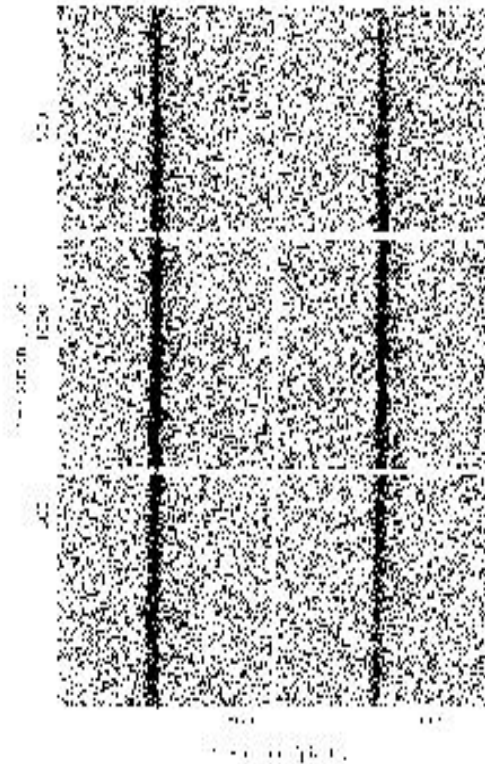
Scatter plot



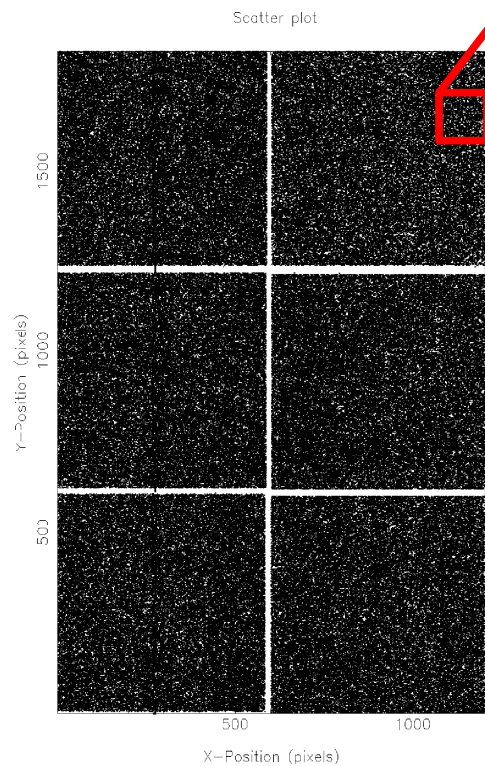
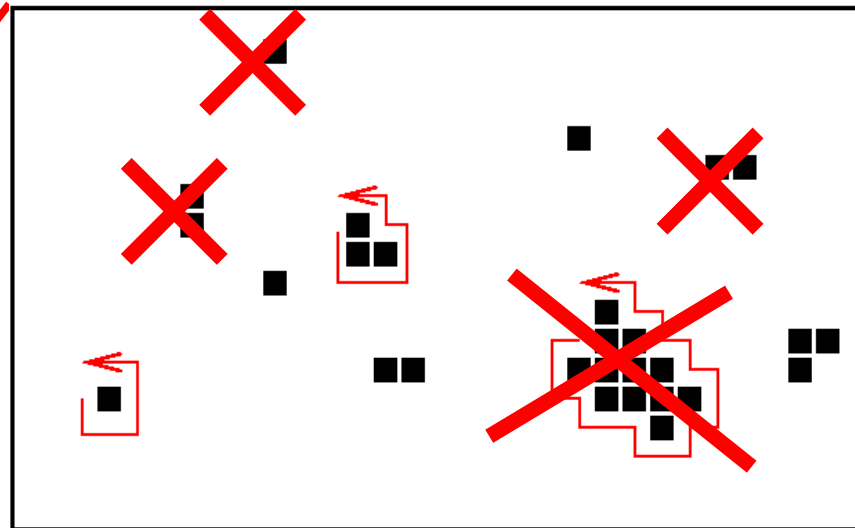
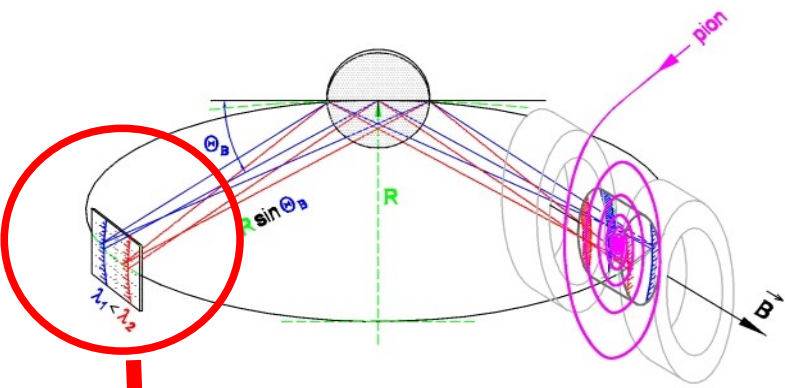
Détection (1)



Analyse
d'amas



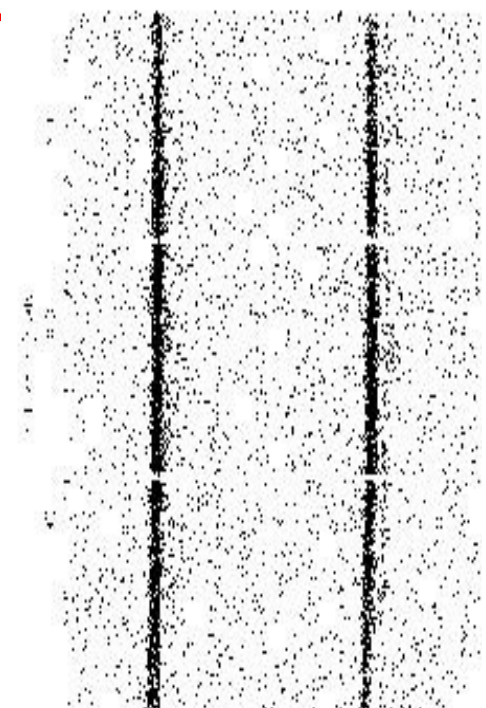
Détection (1)



Analyse
d'amas

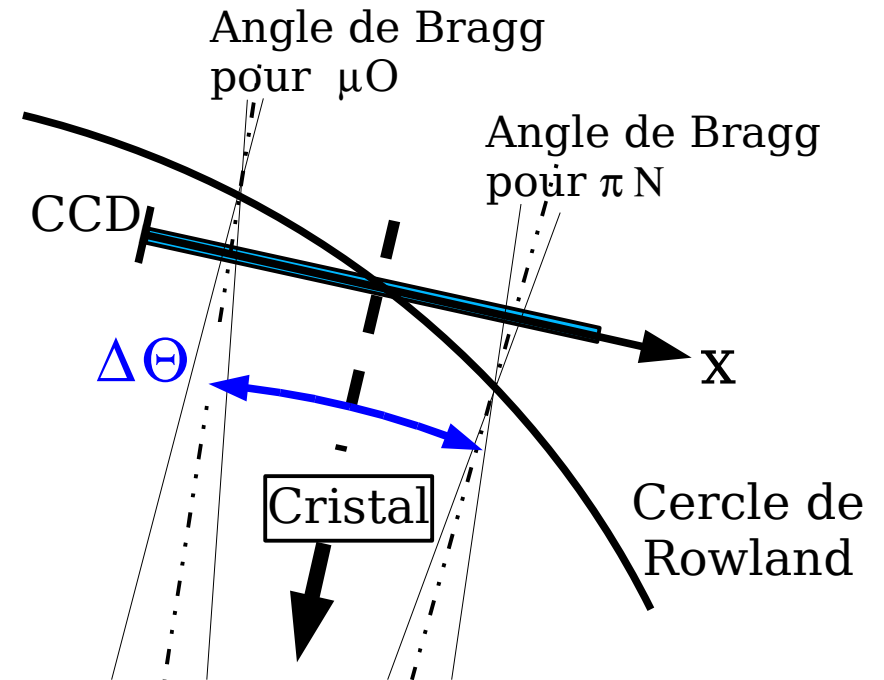
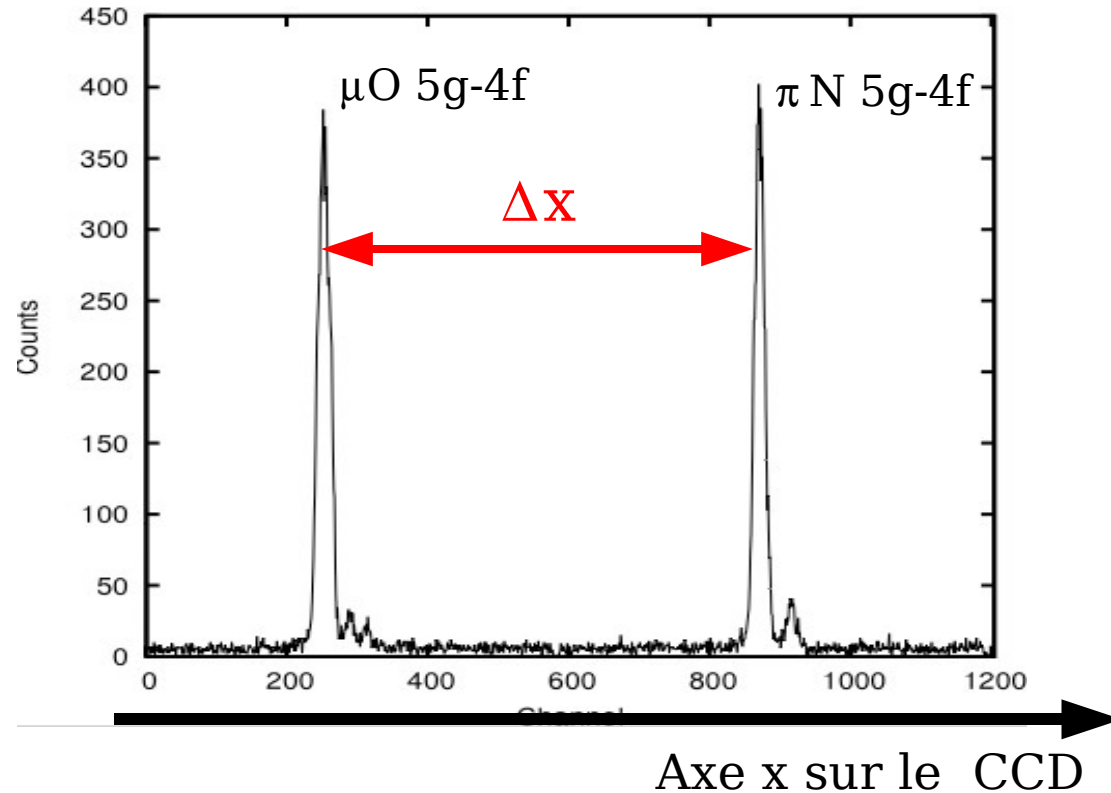


Analyse
d'amas et
sélection
en
énergie



Énergie (axe x)

Détection (2)



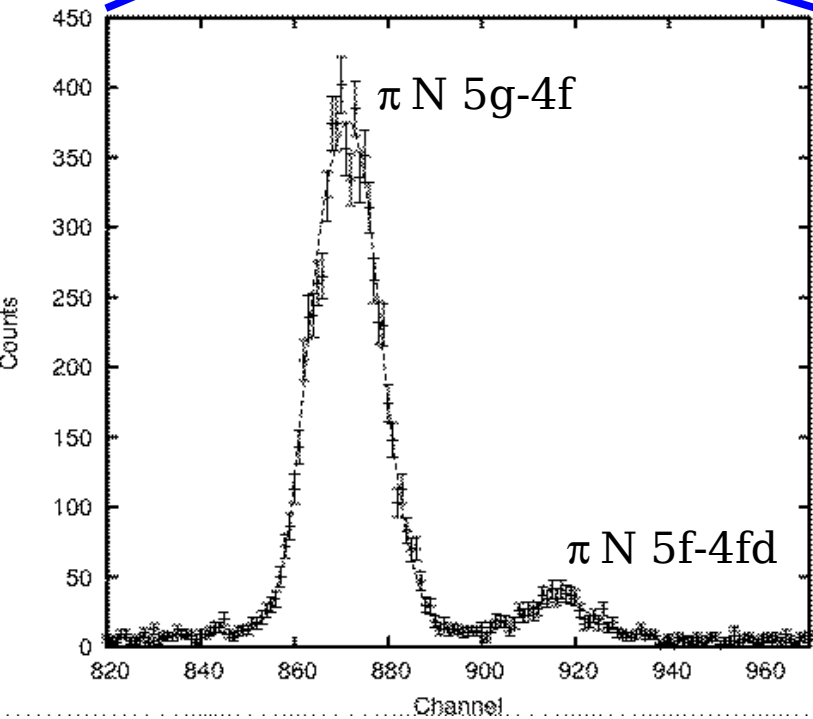
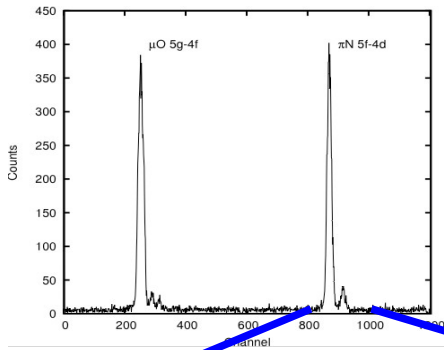
Formule de Bragg

$$\frac{h c}{E} = 2d \sin \Theta_B$$

Mesure de Δx -> mesure de $\Delta \Theta$ -> mesure de ΔE

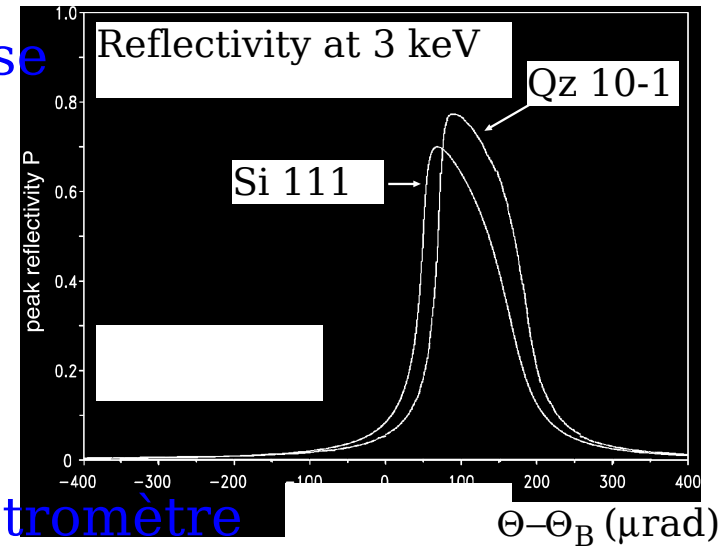
- Résolution du spectromètre = 0.4 eV
- Précision de la mesure des $\Delta E < 0.005$ eV

Profil de la ligne



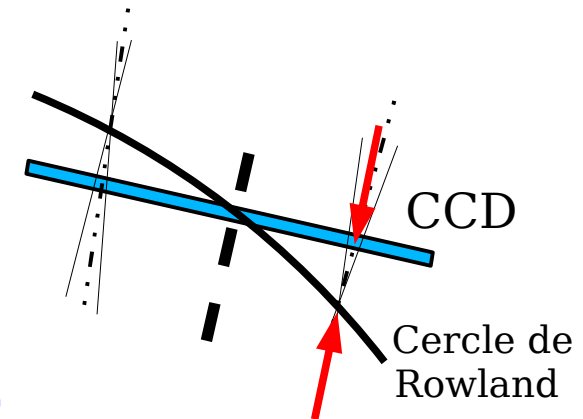
Fonction de reponse
du cristal

- Code XOP



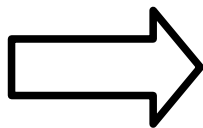
Géométrie du spectromètre

- Ligne hors focus
- Ouverture du cristal



Élargissement Doppler

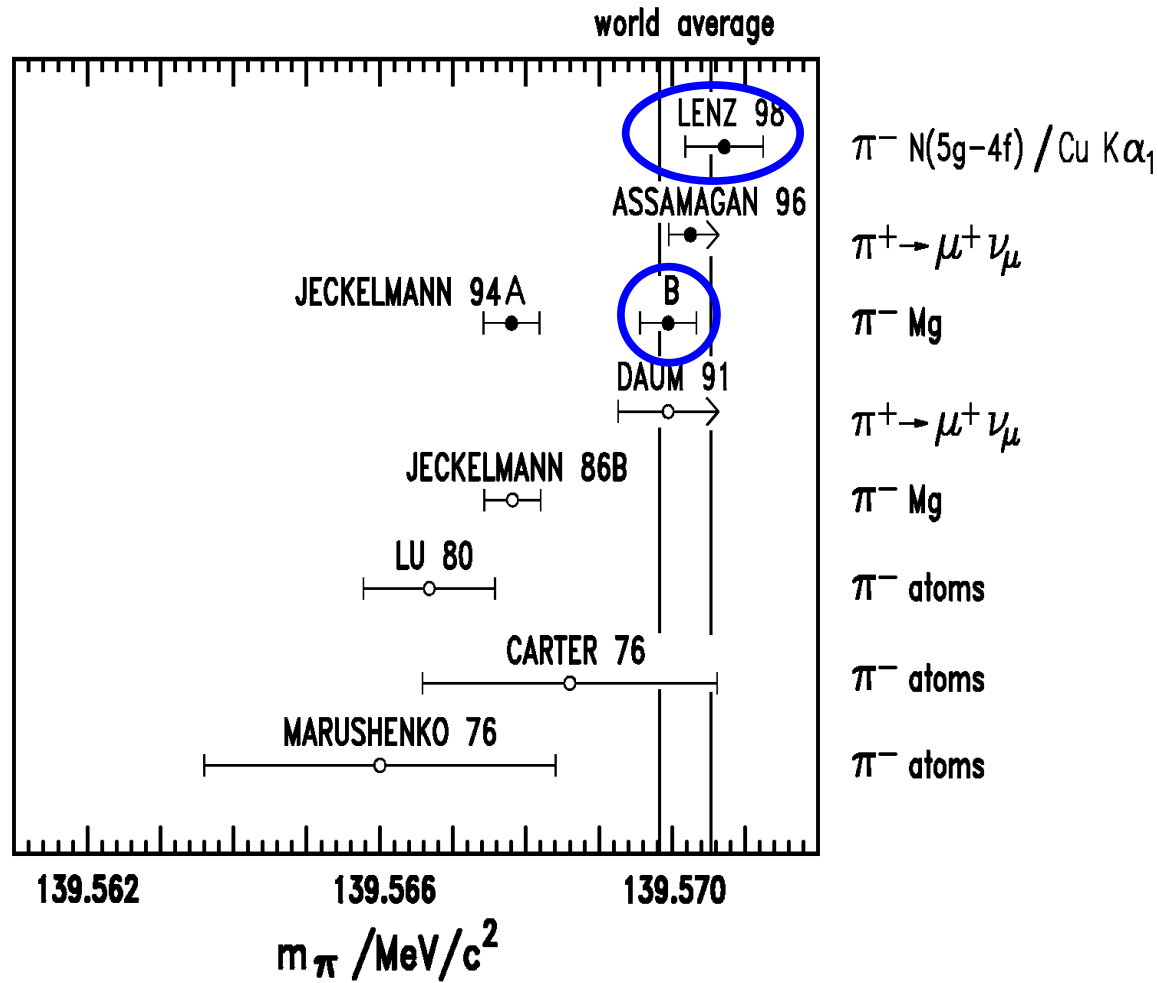
- Explosion coulombienne



- Simulation Monte Carlo
- Programmes d'ajustement de profil *ad hoc*

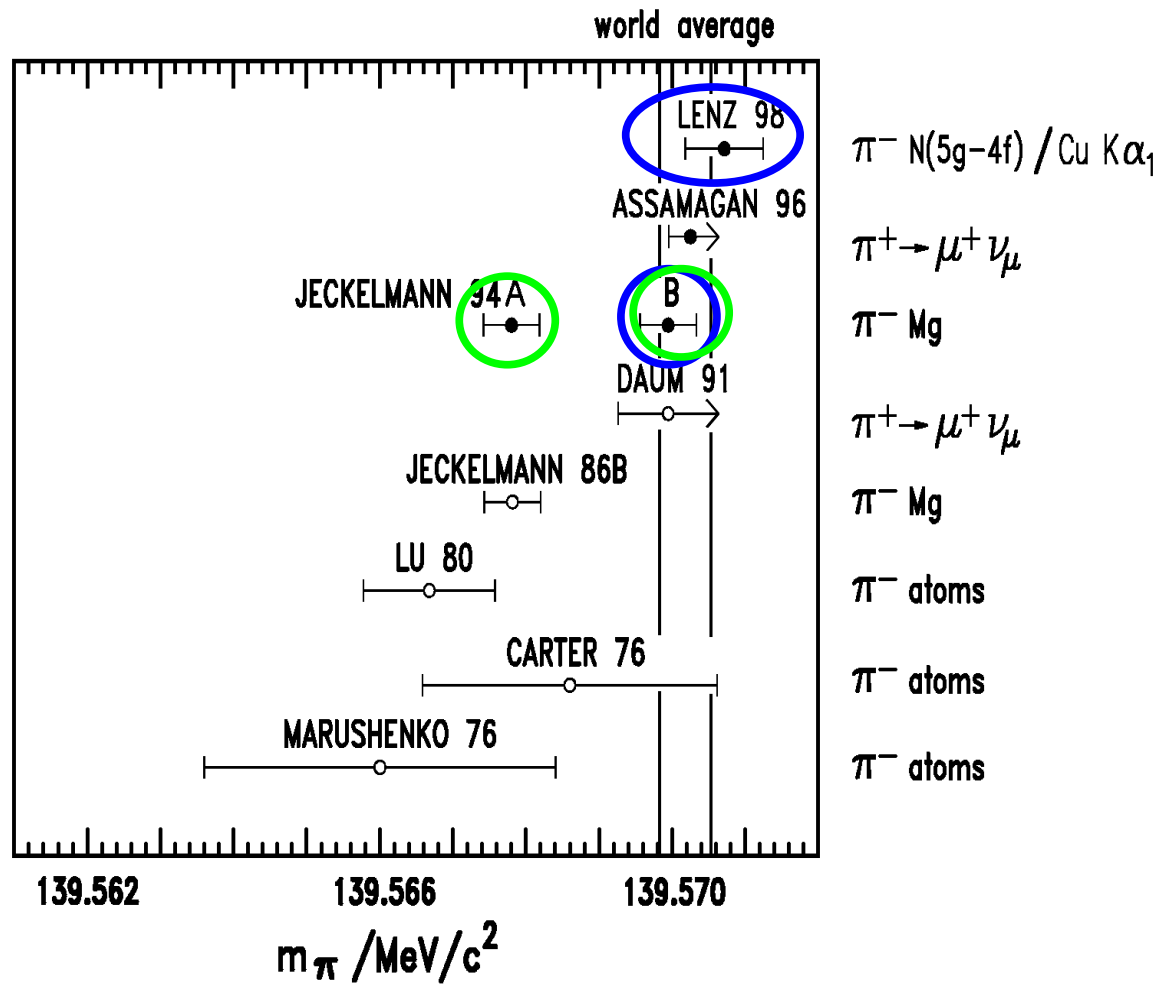
Mesures de la masse du pion chargé (2) 29

Précision actuelle : 2.5 ppm (moyenne entre deux mesures : Lenz 1998 et solution B de Jeckelmann 1994 [1])



Mesures de la masse du pion chargé (2) 30

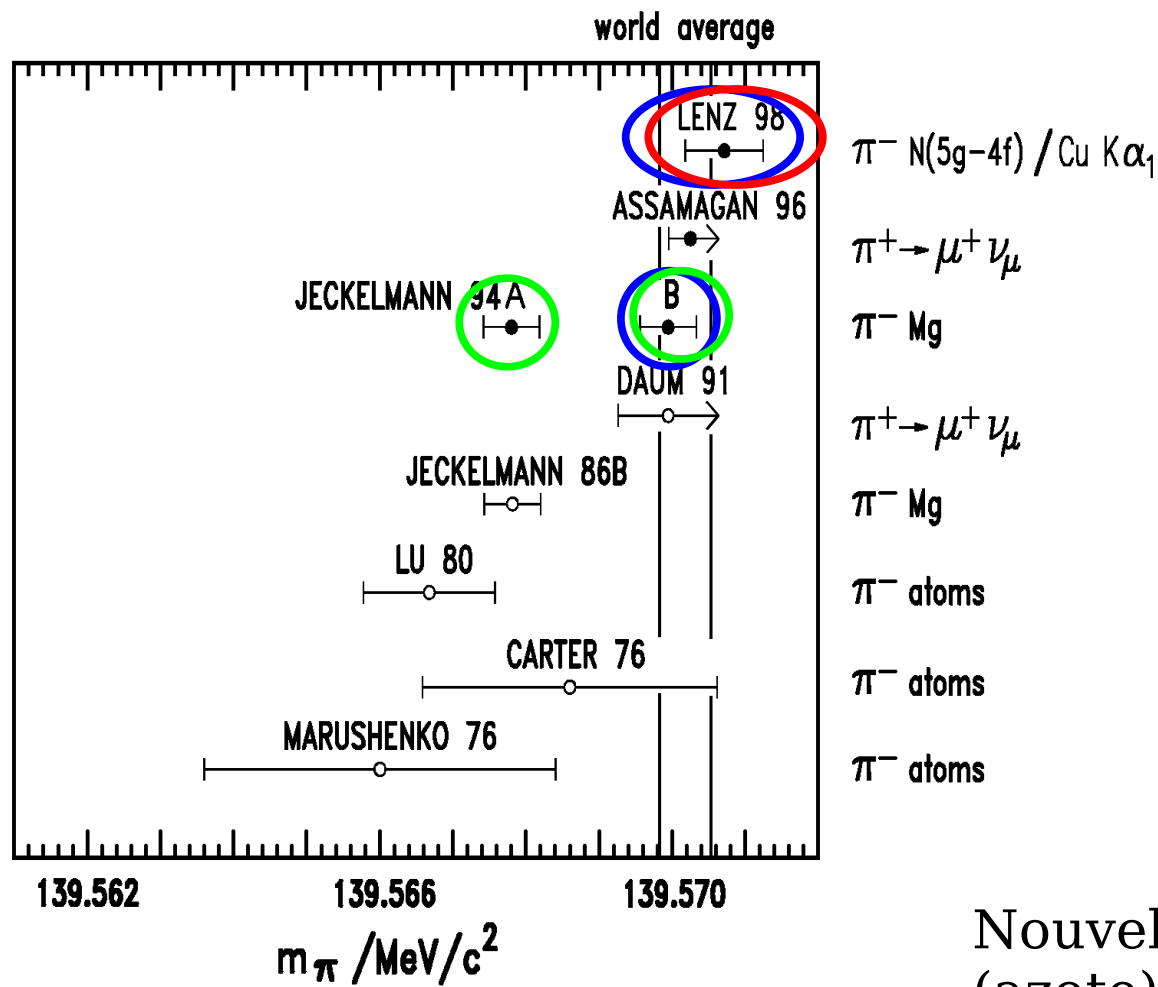
Précision actuelle : 2.5 ppm (moyenne entre deux mesures : Lenz 1998 et solution B de Jeckelmann 1994 [1])



Ambiguïté des mesures due à la recapture électronique dans la cible solide

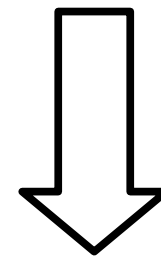
Mesures de la masse du pion chargé (2)

Précision actuelle : 2.5 ppm (moyenne entre deux mesures : Lenz 1998 et solution B de Jeckelmann 1994 [1])



Ambiguïté des mesures due à la recapture électronique dans la cible solide

Cible gazeuse -> réduction drastique de la recapture



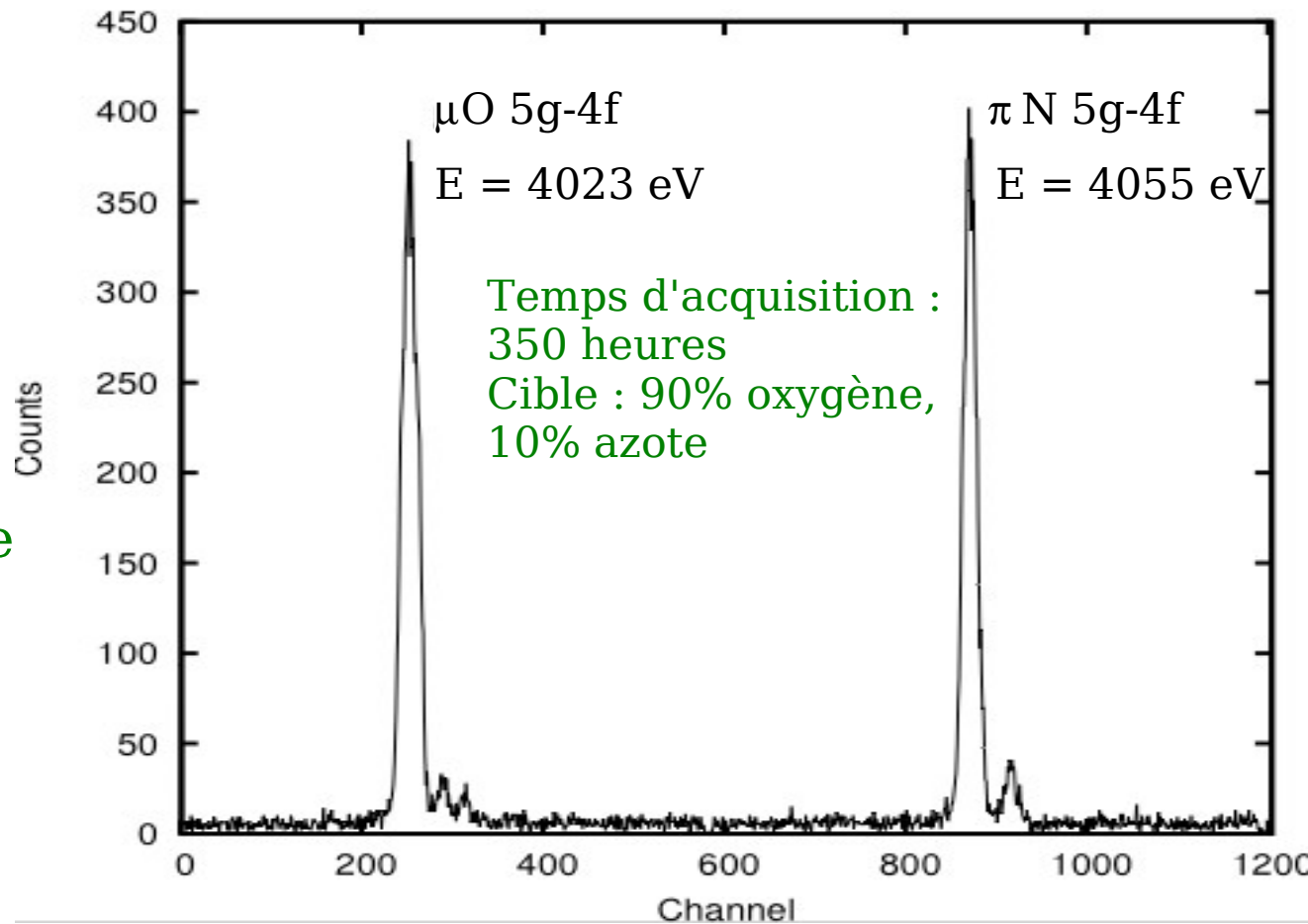
Nouvelle mesure avec cible gazeuse (azote) et calibration fournie par les transitions de l'oxygène muonique

[1] Particle Data Book, Phys. Lett. B 592, 1+ (2004)

Nouvelle mesure de la masse du pion

- Mesure d'énergie relative entre les transitions 5-4 de l'oxygène muonique et de l'azote pionique
- Erreur sur la masse du muon = 0.05 ppm

-> masse du pion mesurée avec une précision de 1.7 ppm



$$\frac{m_{\pi}}{m_{\mu}} = F(\Delta E, \alpha, m_O, m_N) + \mathcal{O}\left[\left(\frac{m_{\pi}}{m_N}\right)^3\right] + \mathcal{O}\left[\left(\frac{m_{\mu}}{m_O}\right)^3\right]$$

Calcul de F -> prédictions théoriques!!

Calcul des énergies de transition pour les atomes pioniques

- Équation de Klein-Gordon -> pour particules de spin 0
- Corrections de QED : self-énergie, polarisation du vide, ...
- Correction de recul du noyau
- Déplacement dû à la structure hyperfine (HFS)

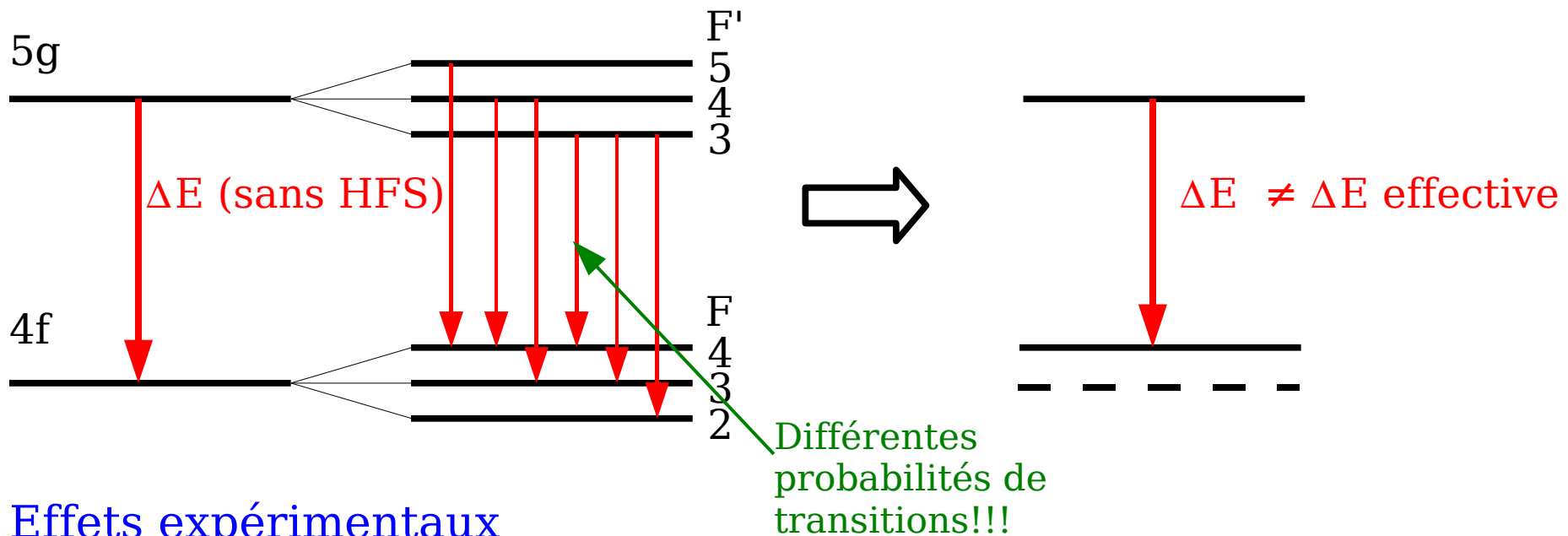
	5g-4f	5f-4d
Coulomb	4054.1180	4054.7189
Self Energy	-0.0001	-0.0003
Vac. Pol. (Uehling)	1.2485	2.9470
Vac. Pol. Wichman-Kroll	-0.0007	-0.0010
Vac. Pol. Two-loop Uehling	0.0008	0.0038
Vac. Pol. Källén-Sabry	0.0116	0.0225
Relativistic Recoil	0.0028	0.0028
HFS Shift	-0.0008	-0.0022
Total	4055.380	4057.691

 Contribution de cette thèse

Structure hyperfine de l'azote pionique

Origine de la structure hyperfine

- Interaction entre moment magnétique nucléaire et moment orbital
- Absence d'interaction entre le spin de la particule et le moment orbital (spin du pion = 0)



Effets expérimentaux

- Écart entre les raies : de l'ordre de 15 meV \ll résolution du spectromètre
- Déplacement de l'énergie de transition



Déplacement HFS pour $5g \rightarrow 4f = 0.00085$ eV
 $\rightarrow 0.2$ ppm dans la mesure de la masse du pion

Structure hyperfine des atomes pioniques 35 (Calcul relativiste [1])

- Spin du pion=0 -> dynamique relativiste décrite par l'équation de Klein-Gordon

$$\left\{ \frac{1}{c^2} [E + eV(r)]^2 + \frac{\hbar^2}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} r - \hbar^2 \frac{l(l+1)}{r^2} - \mu^2 c^2 - \hat{W}(\mathbf{r}) \right\} \varphi_{nl}(\mathbf{r}) = 0$$

Équation de Klein-Gordon
(quadratique en E)

Terme perturbatif dû à la HFS

$$\hat{W}(\mathbf{r}) = +ie\hbar [\partial_i A^i(\mathbf{r}) + A_i(\mathbf{r}) \partial^i] + e^2 A^i(\mathbf{r}) A_i(\mathbf{r})$$

Structure hyperfine des atomes pioniques 36

(Calcul relativiste [1])

- Spin du pion=0 -> dynamique relativiste décrite par l'équation de Klein-Gordon

$$\left\{ \frac{1}{c^2} [E + eV(r)]^2 + \frac{\hbar^2}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} r - \hbar^2 \frac{l(l+1)}{r^2} - \mu^2 c^2 - \hat{W}(r) \right\} \varphi_{nl}(r) = 0$$

Équation de Klein-Gordon
(quadratique en E)

Terme perturbatif dû à la HFS

$$\hat{W}(r) = +ie\hbar [\partial_i A^i(r) + A_i(r) \partial^i] + e^2 A^i(r) A_i(r)$$

- Méthode de perturbation $E = E_0 + E_1 \dots$

...mais l'éq. de Klein-Gordon n'est pas linéaire!

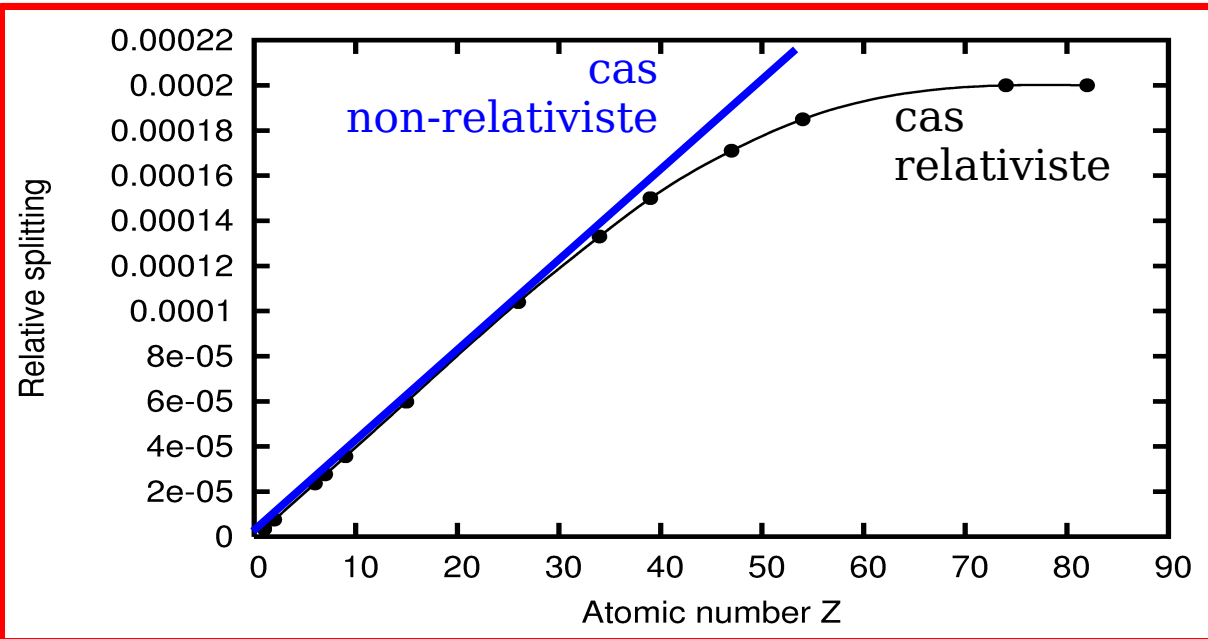
$$E_{(1)} = \frac{c^2 \langle W \rangle}{E_{(0)} \left(1 + \frac{\mu^2 c^4}{E_{(0)}^2} \right)}$$

$E_{(0)} = mc^2 + \mathcal{E}_0$
énergie de masse et de liaison

$$E_{(1)}^{nlF} = \frac{\mu_I \mu_N e \mu_0 \hbar}{2\pi \mu \left(1 + \frac{\mathcal{E}_0}{\mu c^2} \right) \left[1 + \left(1 + \frac{\mathcal{E}_0}{\mu c^2} \right)^{-2} \right]} \left[\frac{F(F+1) - I(I+1) - l(l+1)}{2I} \right] \langle nl | \hat{r}^{-3} | nl \rangle$$

I spin nucléaire,
l nb. quantique moment angulaire

Structure hyperfine des atomes pioniques (Calcul relativiste [1])



Intervalle d'énergie entre les niveaux HFS de l'orbitale 2p normalisée :
 $(E_{3/2} - E_{1/2}) / (\mu_N \mathcal{E}_0^{2p})$

Formule non-relativiste

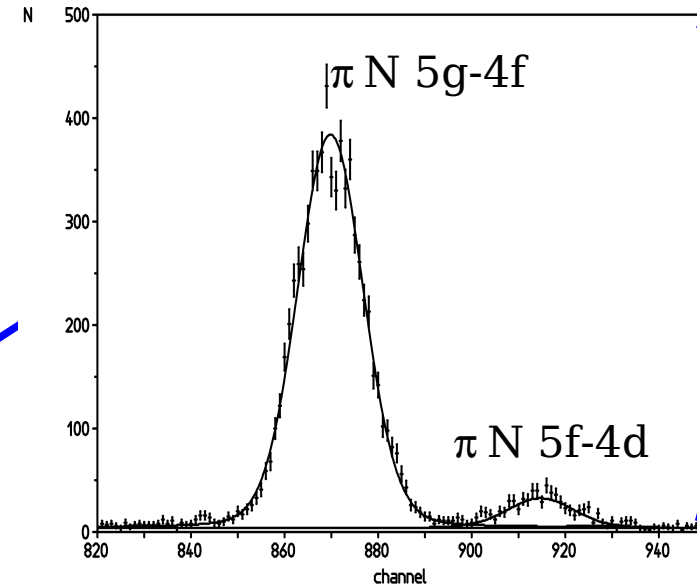
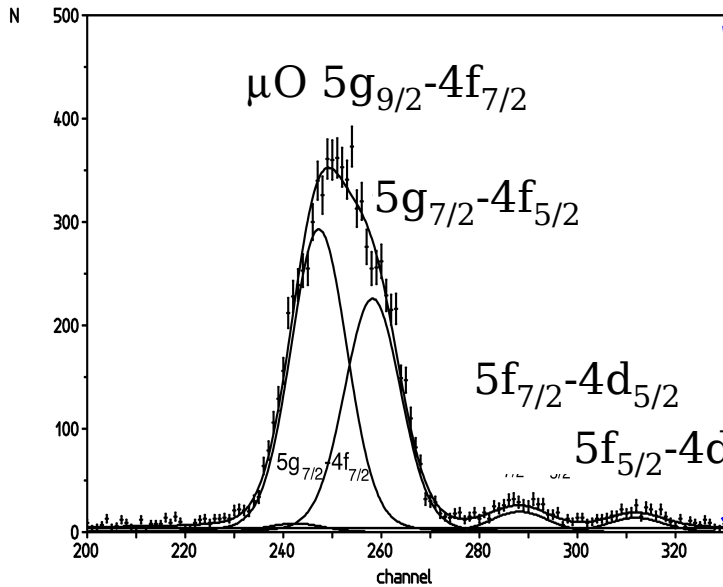
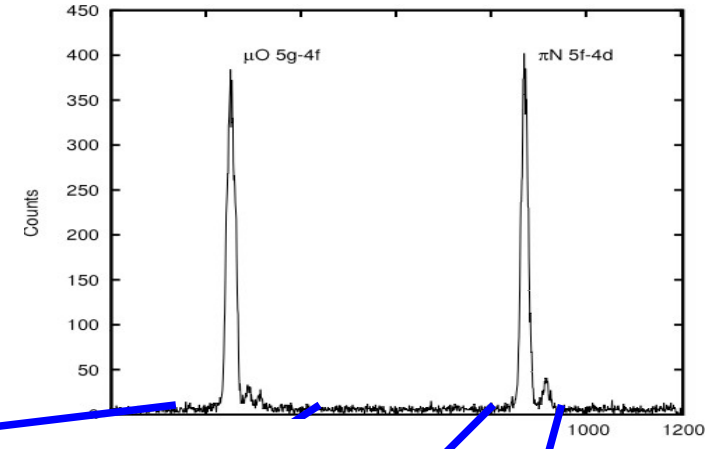
$$E_1^{NR} = \mu_I \mu_N \frac{e \mu_0 \hbar}{4 \pi \mu} \frac{F(F+1) - I(I+1) - l(l+1)}{2I} \langle nl | \hat{r}^{-3} | nl \rangle_{NR}$$

Corrections relativistes inclues!!!

$$E_{(1)}^{nlF} = \frac{\mu_I \mu_N \mu_0 \hbar}{2 \pi \mu \left(1 + \frac{\mathcal{E}_0}{\mu c^2}\right) \left[1 + \left(1 + \frac{\mathcal{E}_0}{\mu c^2}\right)^{-2}\right]} \left[\frac{F(F+1) - I(I+1) - l(l+1)}{2I} \right] \langle nl | \hat{r}^{-3} | nl \rangle$$

Résultat de la masse du pion (1)

- Ajustement des profils de raies en utilisant le modèle de réponse du spectromètre
- Profil adapté pour chaque groupe de raie
- Structure fine différente due au spin des particules

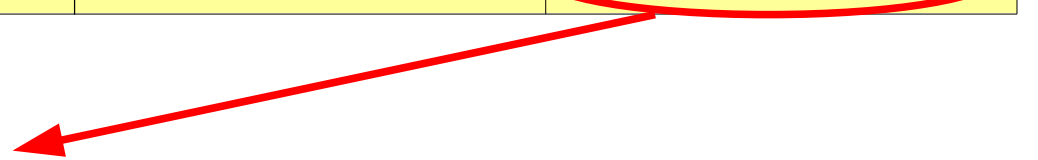


- Temps total d'acquisition des données : 350 heures
- Précision de la mesure de distance entre pixels : ~ 0.11 pixels
 $\rightarrow 6$ meV \rightarrow 1.5 ppm sur la masse du pion (erreur statistique)
- Erreurs systématiques....

Résultat de la masse du pion (2)

	Correction		Errors		Errors	
	$\mu\text{O-piN}$ arcsec	error + arcsec	error - arcsec	error + ppm	error - ppm	
Bending correction	0.214	0.004	0.004	0.015	0.015	
Penetration depth correction	-0.004	0.001	0.001	0.004	0.004	
Strong interaction 45 μeV	-0.003	0.003	0.003	0.011	0.011	
1 K electron <0.16%		0.000	0.050	0.000	0.184	
Curvature correction		0.040	0.040	0.147	0.147	
Off-line CCD height reduction		0.061	0.061	0.225	0.225	
Fit region		0.004	0.004	0.015	0.015	
Model for the line fit		0.070	0.070	0.258	0.258	
Detector-Crystal distance		0.153	0.153	0.564	0.564	
Orientation detector + tubes $\leq 0.14^\circ$		0.000	0.008	0.000	0.030	
Height CCD (out of plane) ≤ 20 mm		0.000	0.009	0.000	0.032	
Target shape		0.027	0.027	0.099	0.099	
CCD alignment ("gap")		0.090	0.090	0.332	0.332	
Pixel distance		0.033	0.033	0.122	0.122	
$\pi\text{N}, \mu\text{O}$ energies		0.093	0.093	0.343	0.343	
Temperature renormalisation of Det-Cry dist.	-0.003	0.005	0.005	0.018	0.018	
Corr: sum/Errors: quadratic sum	0.207	0.209	0.215	0.769	0.792	

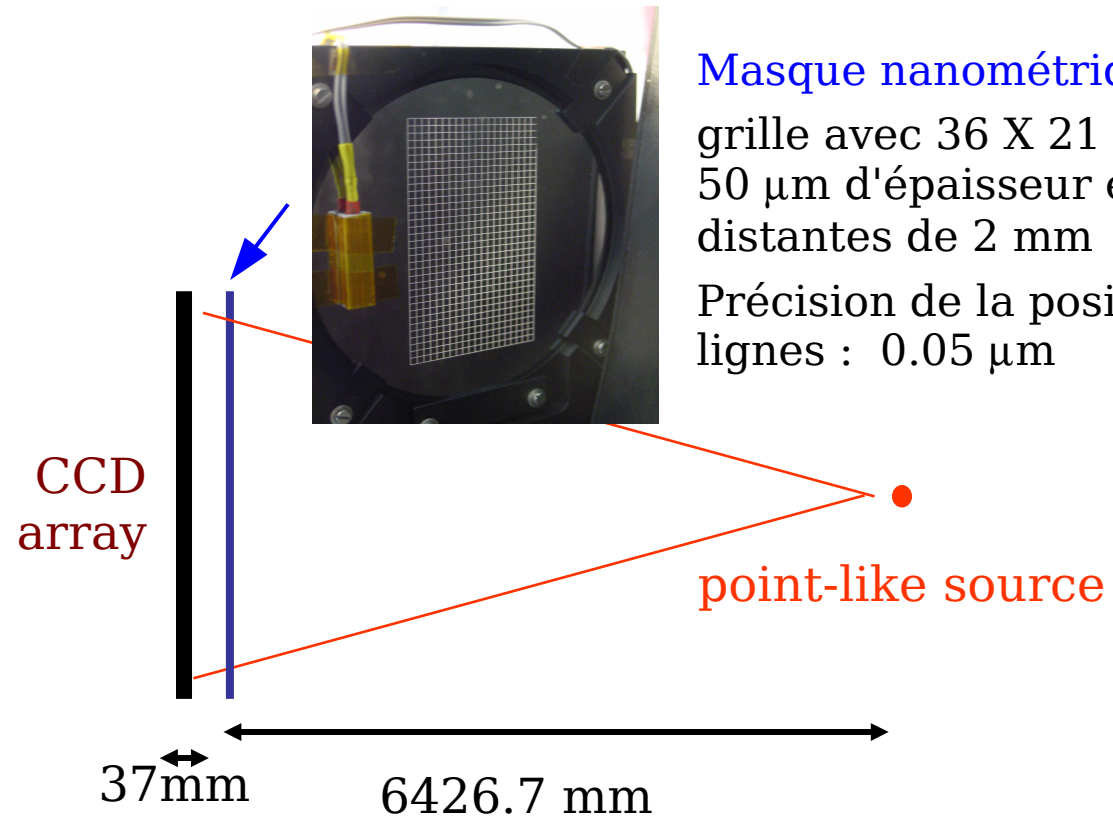
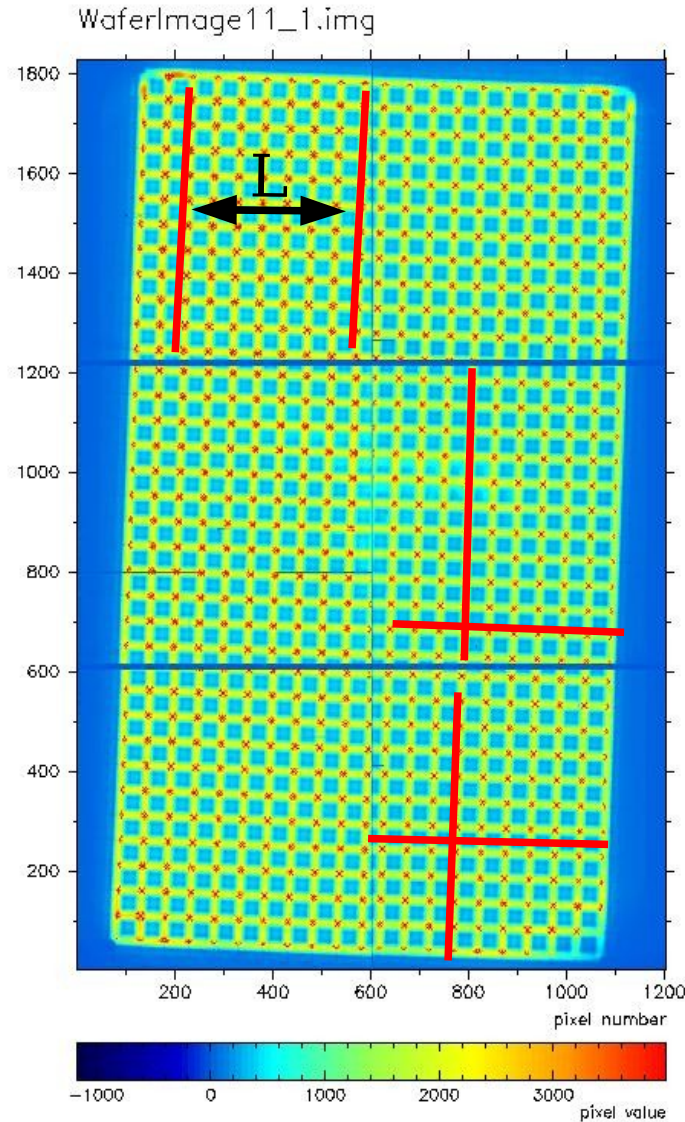
Contribution de cette thèse



Erreur de la masse du pion : $[(0.8)^2_{\text{(systématique)}} + (1.5)^2_{\text{(statistique)}}]^{1/2} = 1.7$ ppm

Distance entre pixels et position des CCDs⁴⁰

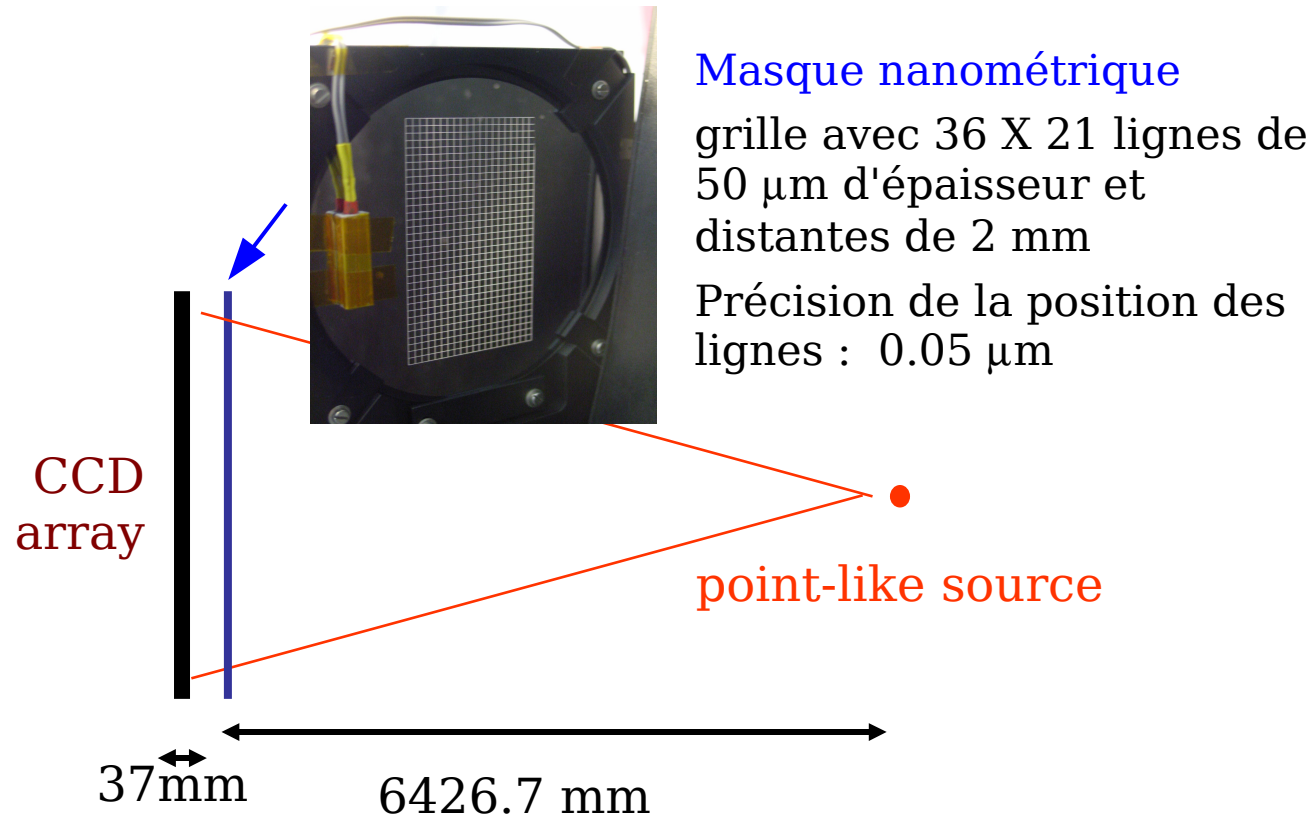
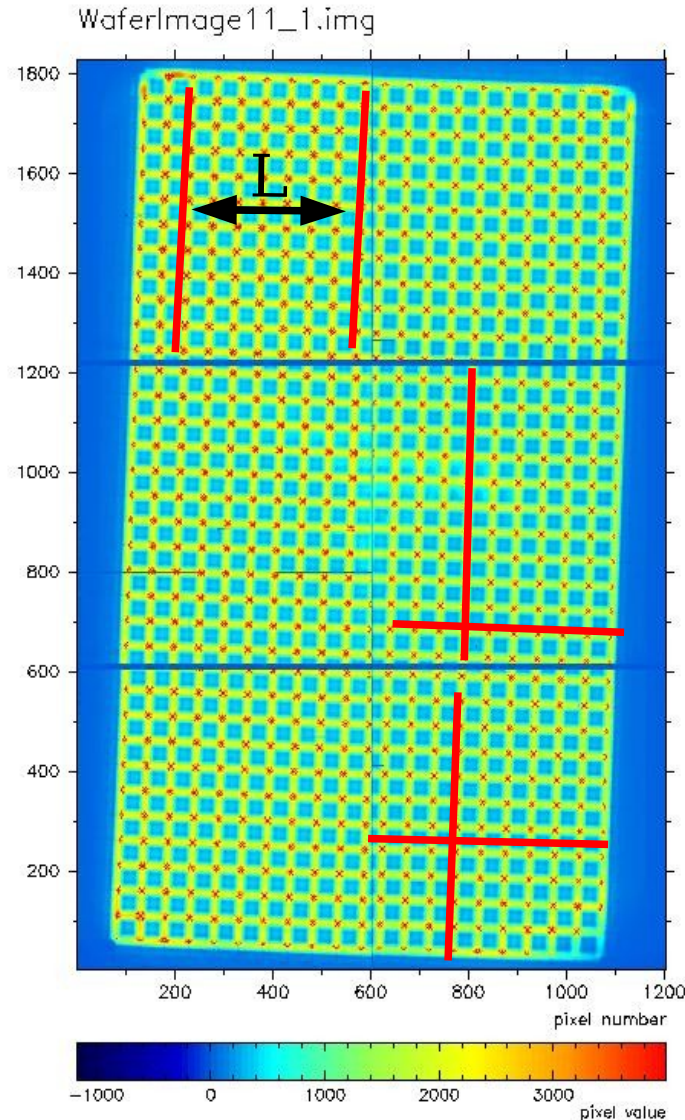
Mesure en septembre 2003...



... après 8 mois d'analyse ...

Distance entre pixels et position des CCDs⁴¹

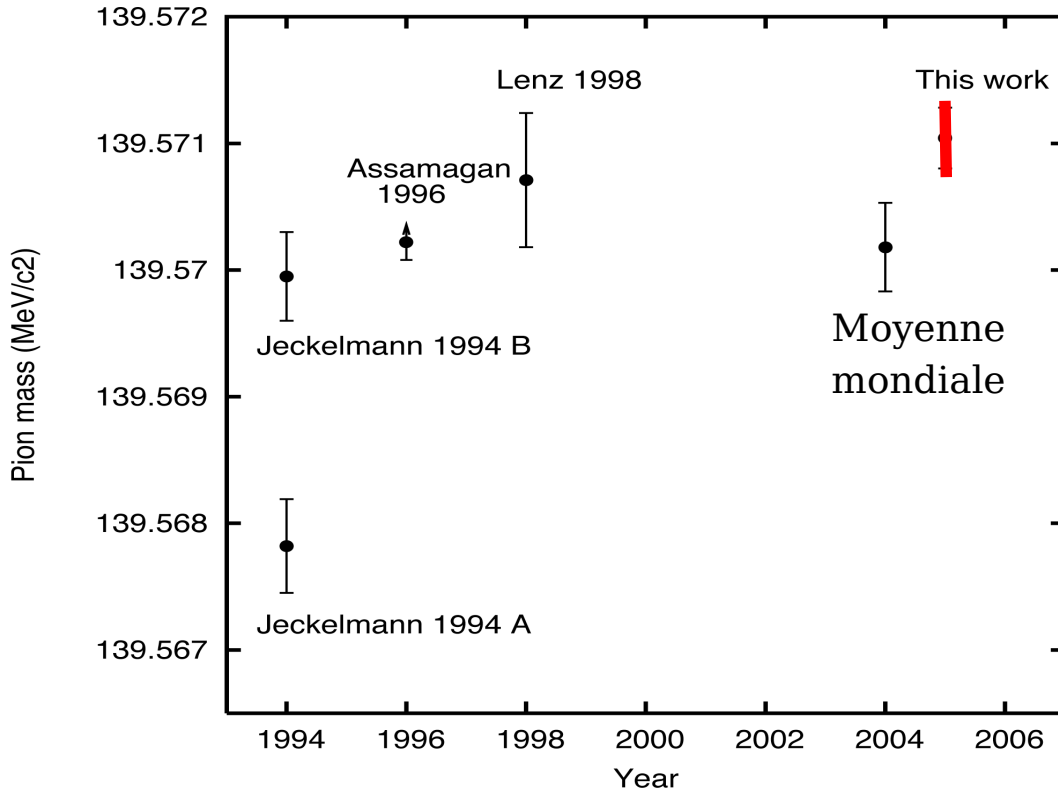
Mesure en septembre 2003...



... après 8 mois d'analyse ...

- Distance entre pixels = $39.9775 \pm 0.0006 \mu\text{m}$ $\rightarrow 0.1 \text{ ppm}$
- Erreur sur la position des CCDs : 0.05 mrad (orientation)
0.02 pixels (déplacement) $\rightarrow 0.3 \text{ ppm}$

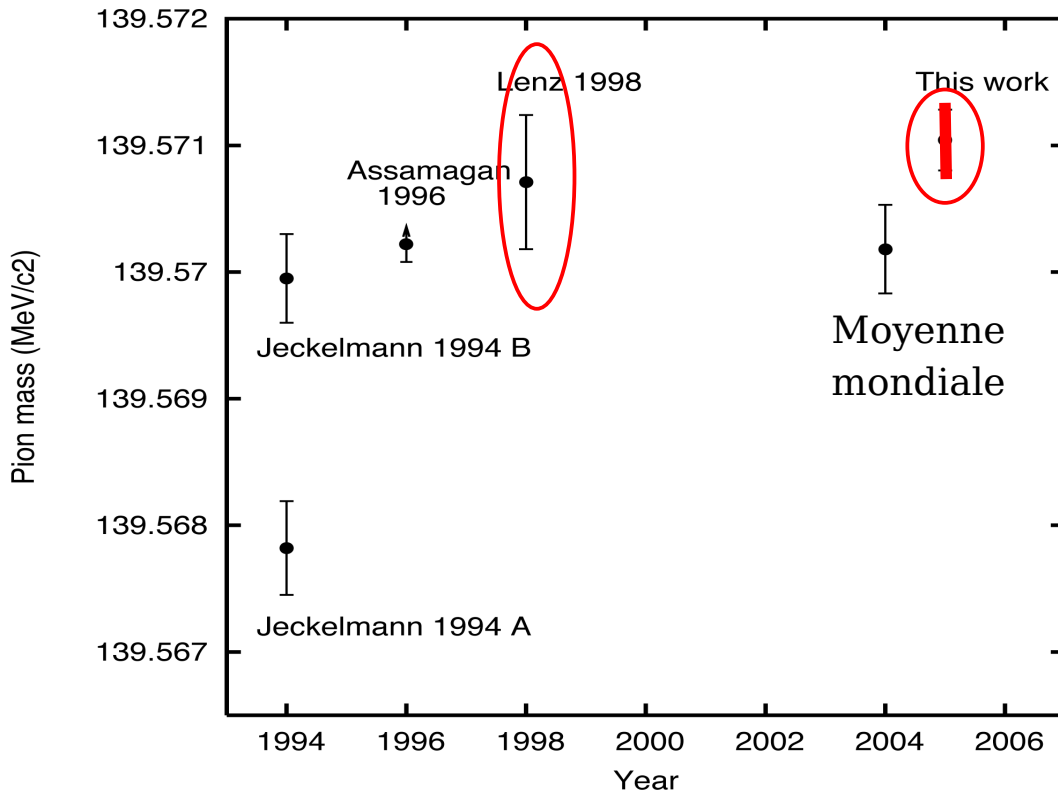
Résultat de la masse du pion (3)



$$m_{\pi} = (139.571\,04 \pm 0.000\,23) \text{ MeV}$$

- 30% plus précis que la moyenne mondiale
- 2 fois plus précis que Lenz 1998
- Augmentation de la précision des étalons de rayons-X

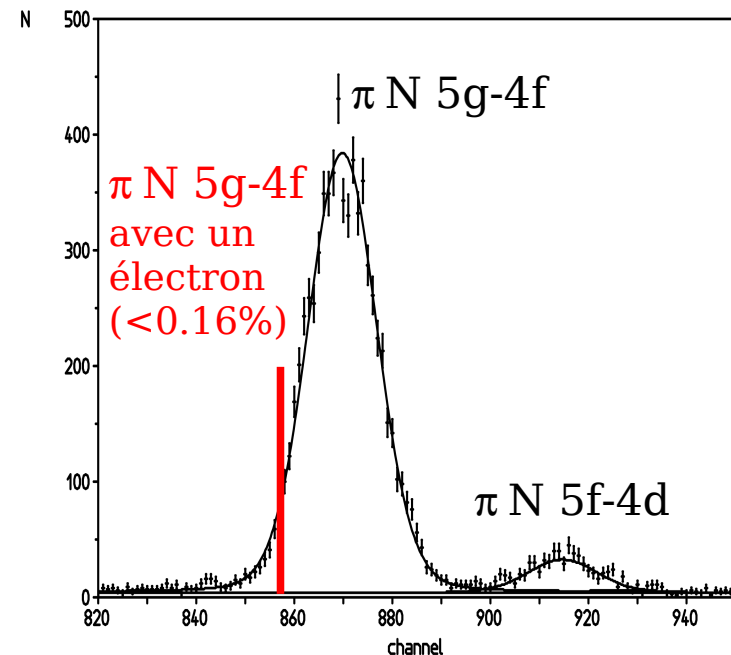
Résultat de la masse du pion (3)



$$m_{\pi} = (139.571\,04 \pm 0.000\,23) \text{ MeV}$$

- 30% plus précis que la moyenne mondiale
- 2 fois plus précis que Lenz 1998
- Augmentation de la précision des étalons de rayons-X

- Cohérence avec la mesure précédente faite avec une cible gazeuse
- Aucune ambiguïté due à la recapture électronique



Masse du neutrino muonique

Désintégration du pion positif à repos
+ mesure de la masse du pion



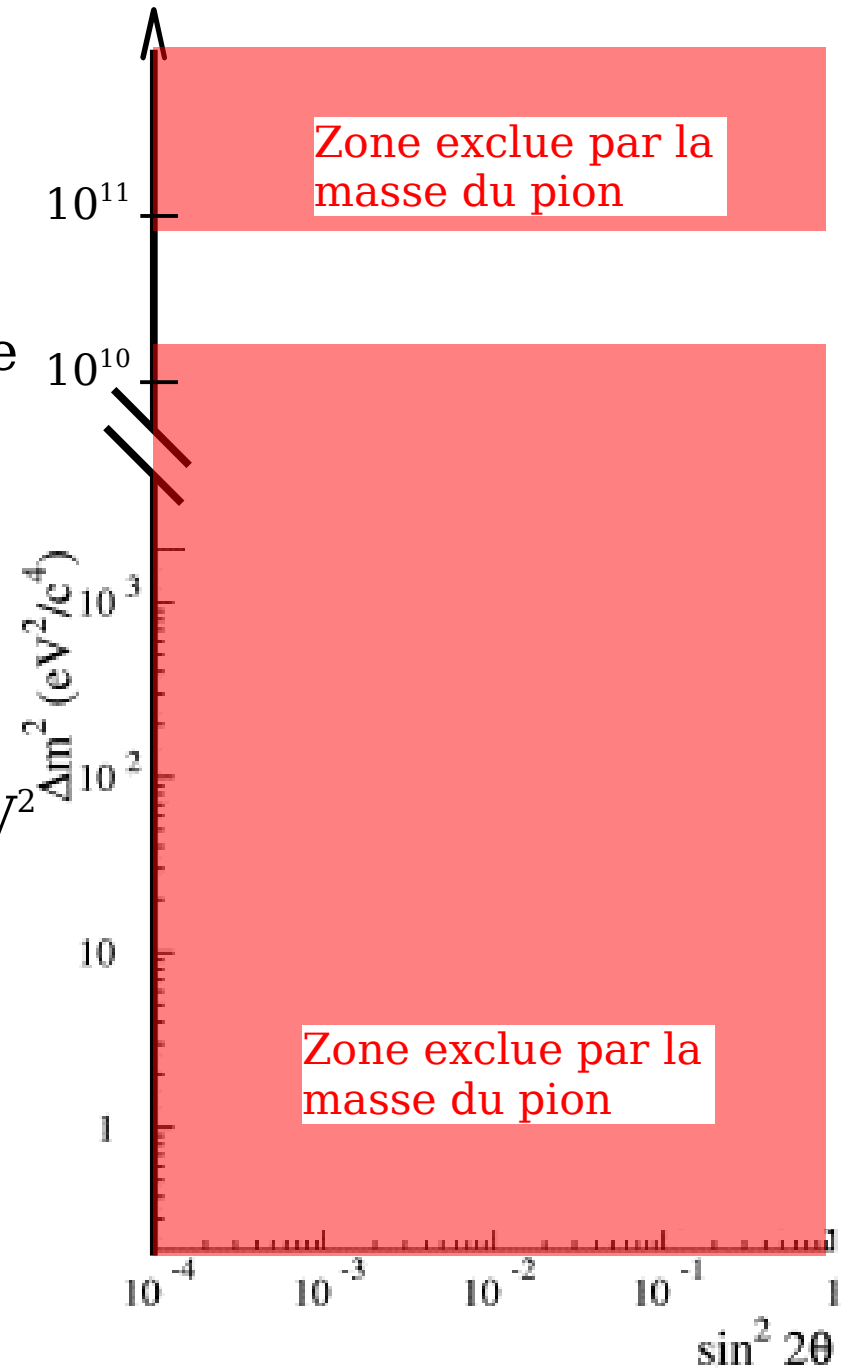
Mesure de la masse du neutrino muonique

$$\nu_{\mu} : 122 < m < 277 \text{ keV}$$

Oscillation de neutrinos : $\nu_e \leftrightarrow \nu_{\mu}$

$$\nu_e : m < 3 \text{ eV}$$

$$\rightarrow 1.5 \times 10^{10} \text{ eV}^2 > \Delta m^2(\text{e-}\mu) > 7.7 \times 10^{10} \text{ eV}^2$$



Masse du neutrino muonique

Désintégration du pion positif à repos
+ mesure de la masse du pion



Mesure de la masse du neutrino muonique

$$\nu_\mu : 122 < m < 277 \text{ keV}$$

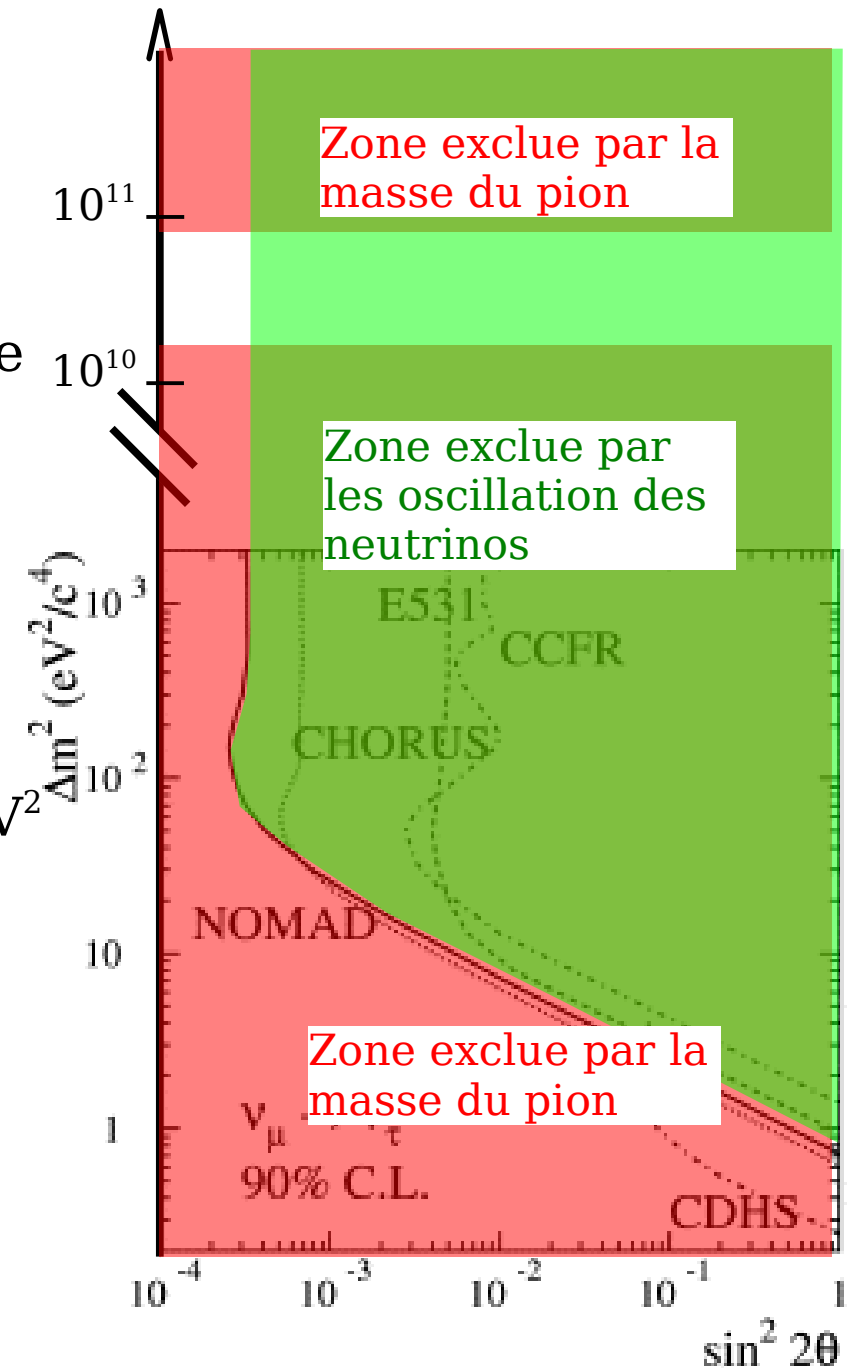
Oscillation de neutrinos : $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$

$$\nu_e : m < 3 \text{ eV}$$

$$\rightarrow 1.5 \times 10^{10} \text{ eV}^2 > \Delta m^2(\text{e}-\mu) > 7.7 \times 10^{10} \text{ eV}^2$$

+ oscillation des neutrinos [1]

$$\rightarrow \theta < 10^{-3}$$



Masse du neutrino muonique

Désintégration du pion positif à repos
+ mesure de la masse du pion



Mesure de la masse du neutrino muonique

$$\nu_{\mu} : 122 < m < 277 \text{ keV}$$

Oscillation de neutrinos : $\nu_e \leftrightarrow \nu_{\mu}$

$$\nu_e : m < 3 \text{ eV}$$

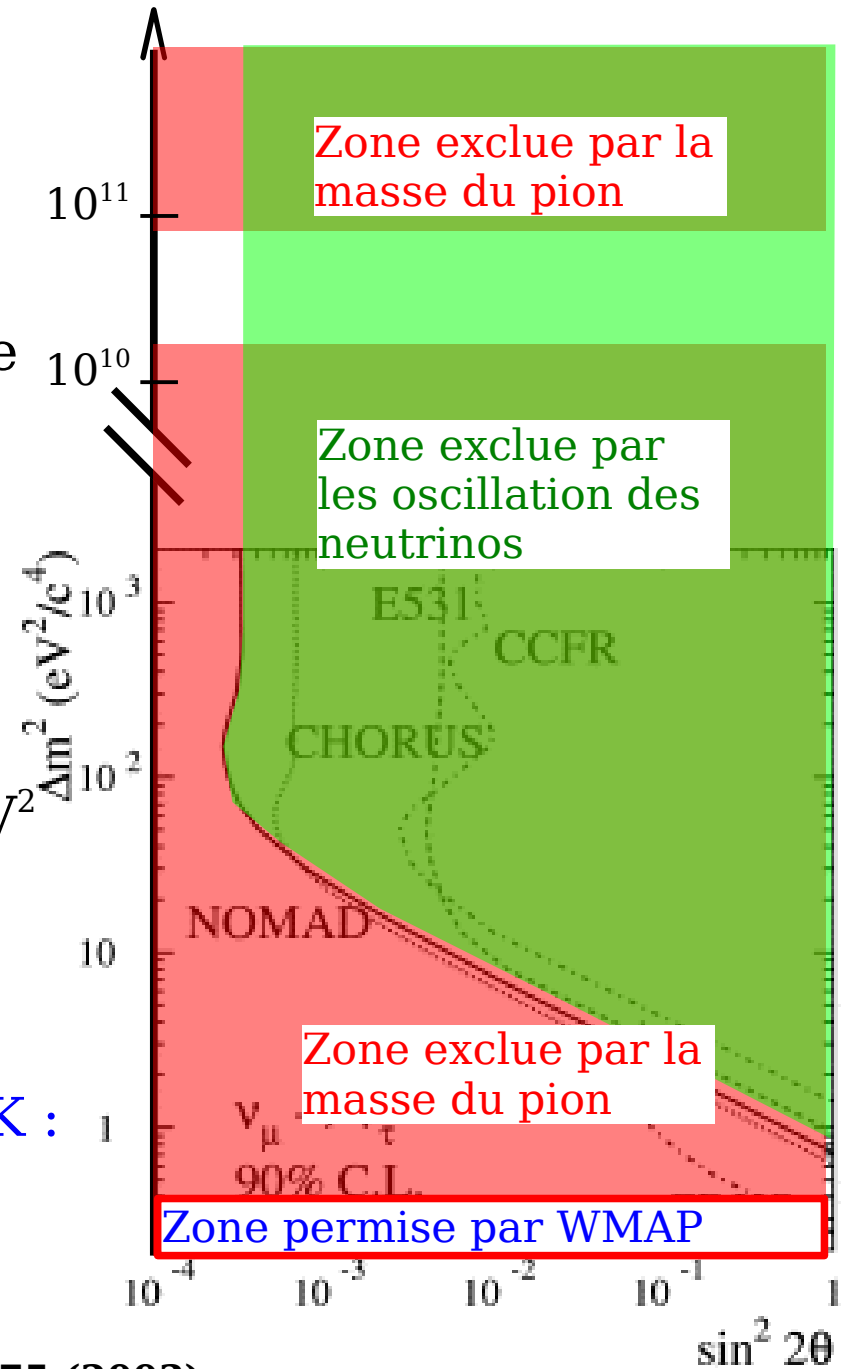
$$\rightarrow 1.5 \times 10^{10} \text{ eV}^2 > \Delta m^2(\text{e}-\mu) > 7.7 \times 10^{10} \text{ eV}^2$$

+ oscillation des neutrinos [1]

$$\rightarrow \theta < 10^{-3}$$

Anisotropie du rayonnement fossile à 3° K :

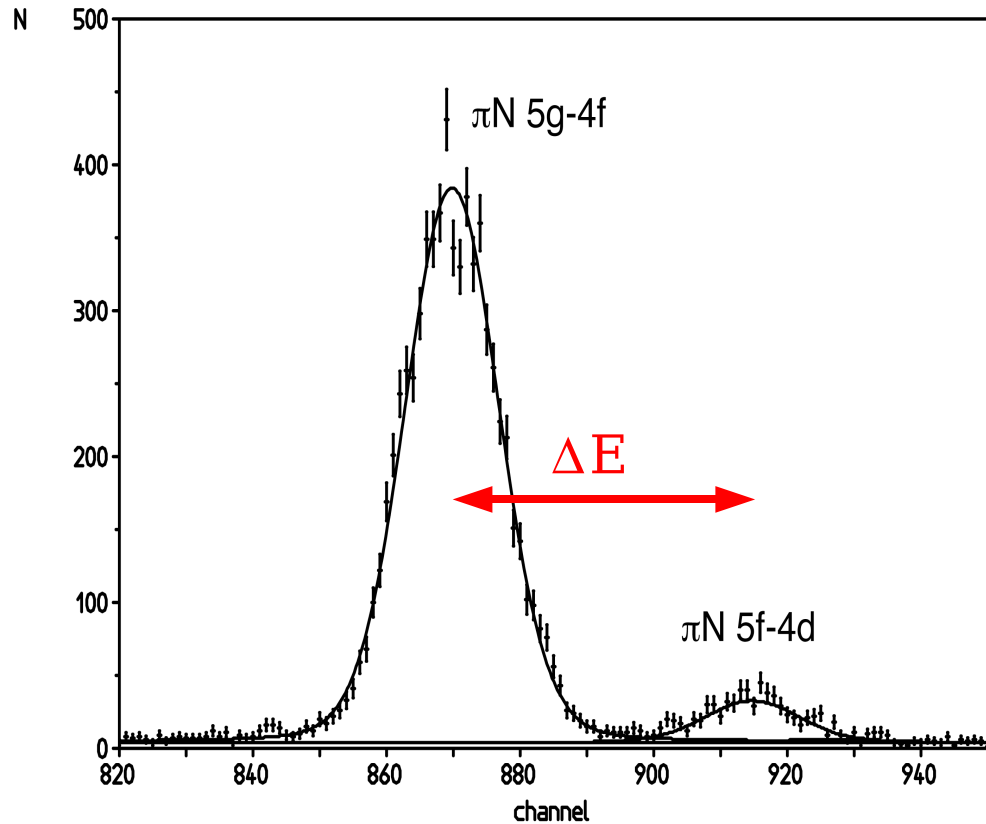
$$\nu < 0.23 \text{ eV} [2]$$



[1] NOMAD collaboration, Nucl. Phys. B 611, 3 (2001)

[2] WMAP collaboration, Astrophys. J. Suppl. Ser. 148, 175 (2003)

Test de l'équation de Klein-Gordon

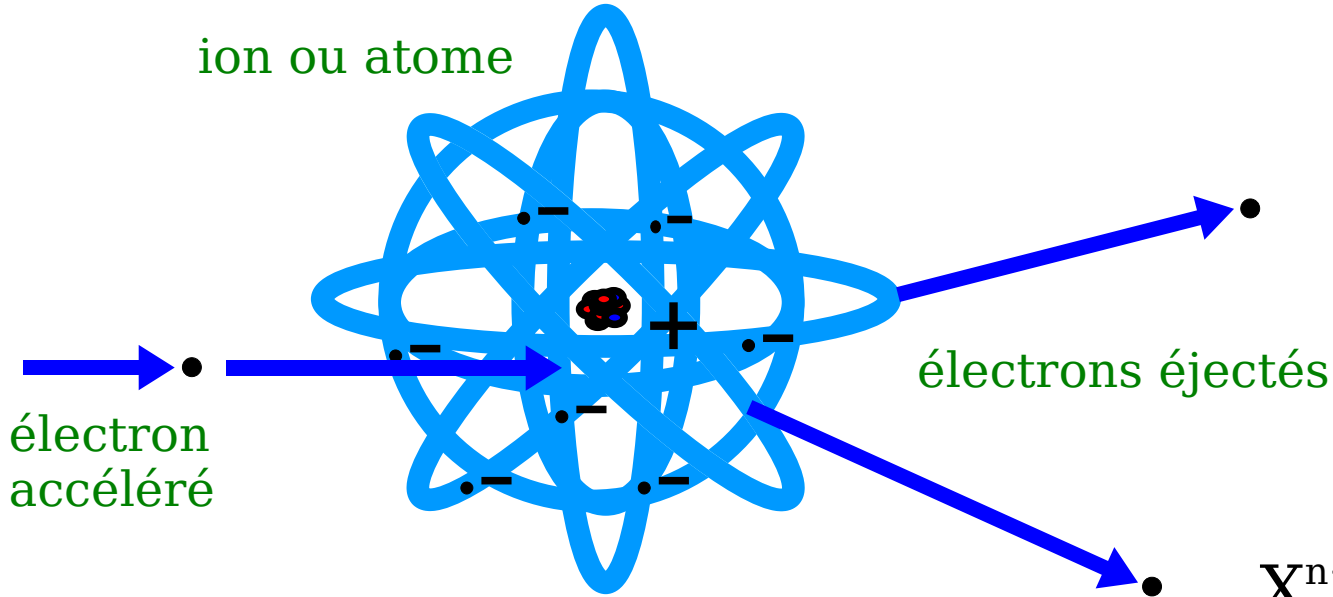


- Spectroscopie des atomes pioniques \rightarrow test de QED pour particules de spin 0
- Structure fine de la transition 5-4 de l'azote pionique
- Test précédent : titane pionique, précision = 2%

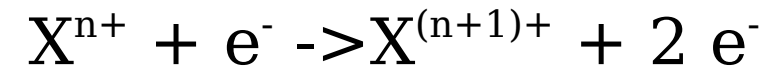
- Valeur théorique (QED + interaction forte) : $\Delta E = 2.321 \text{ eV}$
- Nouvelle mesure : $\Delta E = 2.300^{+0.014}_{-0.007} \text{ eV}$ (erreur rel. = 0.6%)
- Limitation : calcul de la contribution des atomes avec un électron restant dans la couche 1s

Ions multichargés

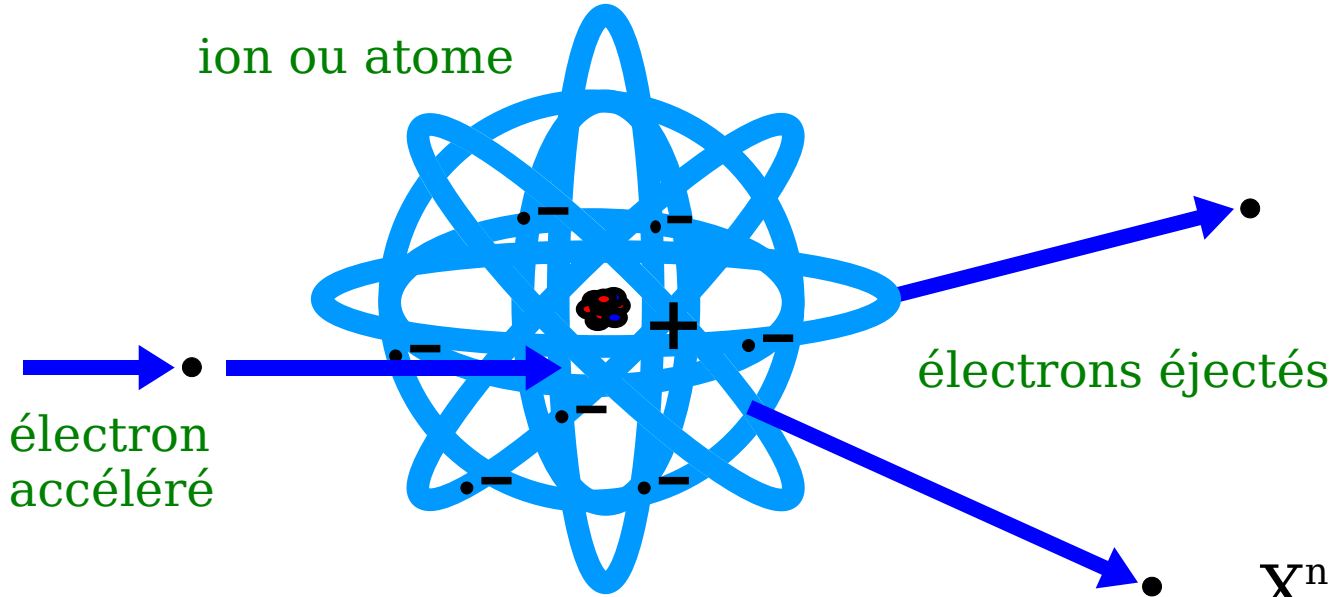
Production des ions



- Ionisation par collision électron-atome
- Suite de collisions successives -> états de charge très élevés



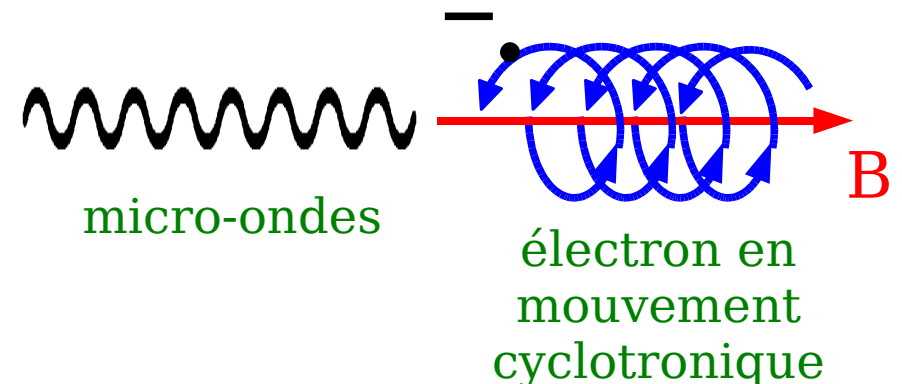
Production des ions



- Ionisation par collision électron-atome
- Suite de collisions successives -> états de charge très élevés



- Accélération des électrons dans un champ magnétique
- Micro-ondes résonant avec le mouvement cyclotronique des électrons $\omega_{\text{cycl}} = e B/m$
- Puissance injectée de 100-800 w -> $E_{\text{cin}}(e^-)$ jusqu'à 1 MeV



Piège des ions et des électrons

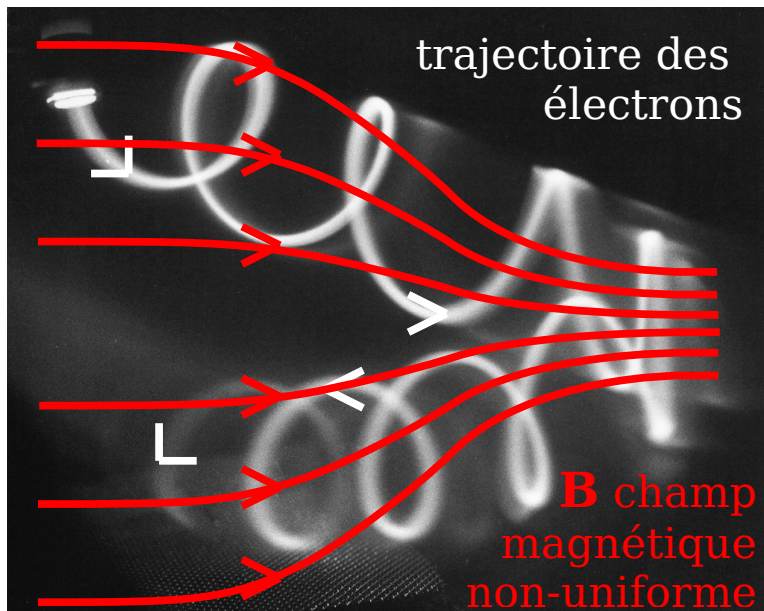
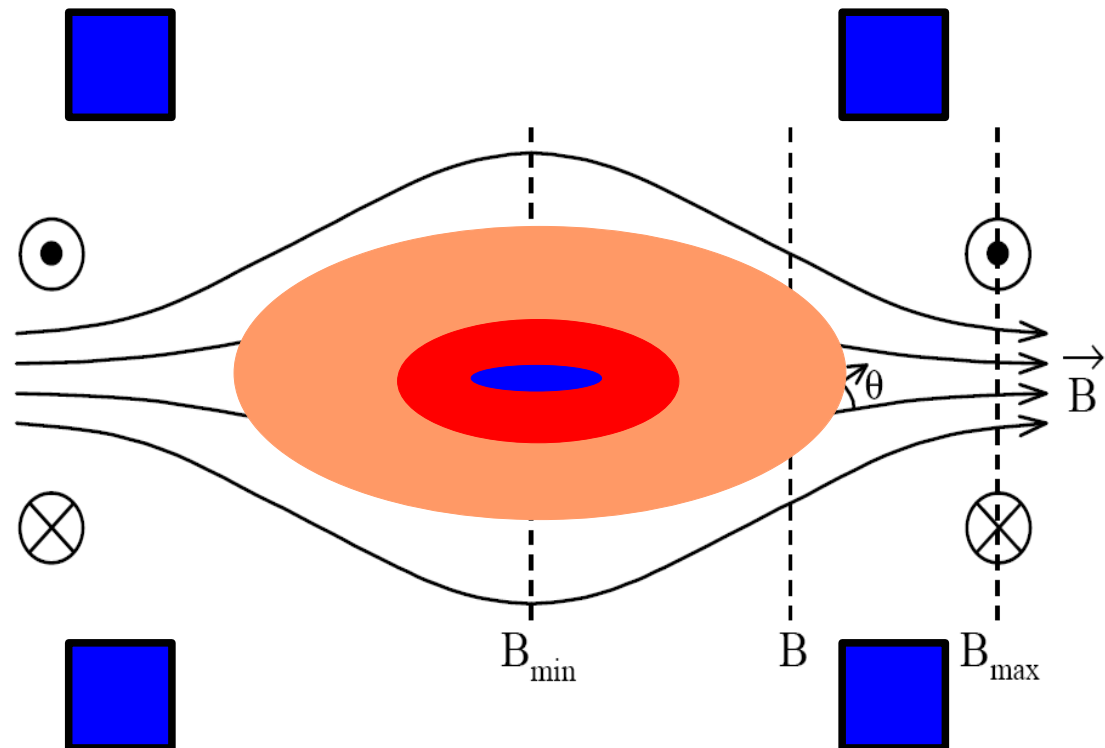
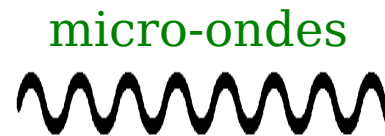


Photo obtenue par Reiner Stenzel

- Champ magnétique non-uniforme
 - > électrons localement piégés
 - > accumulation de charge
 - > ions piégés

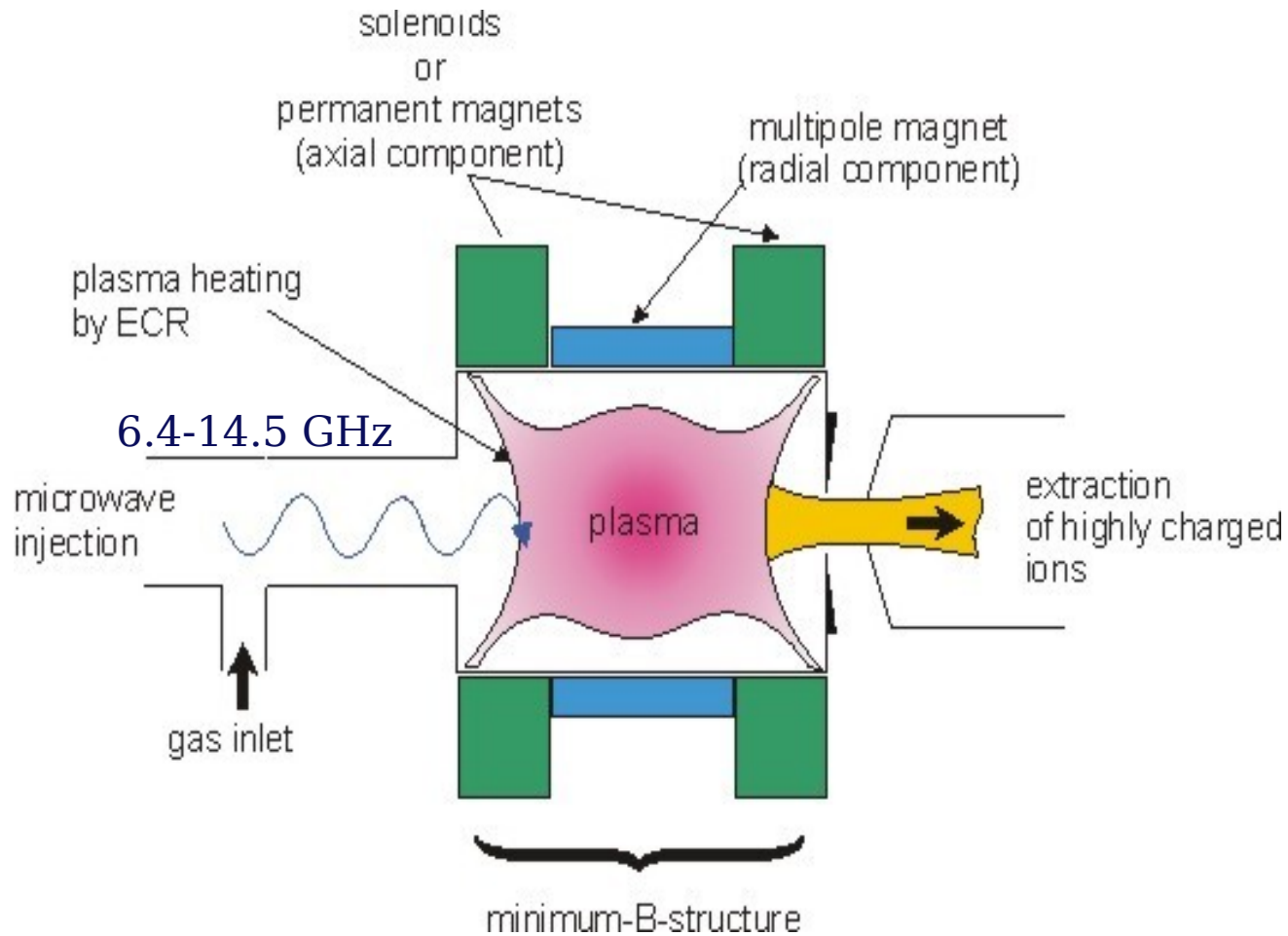


Électrons très énergétiques et ions très chargés

Plasma

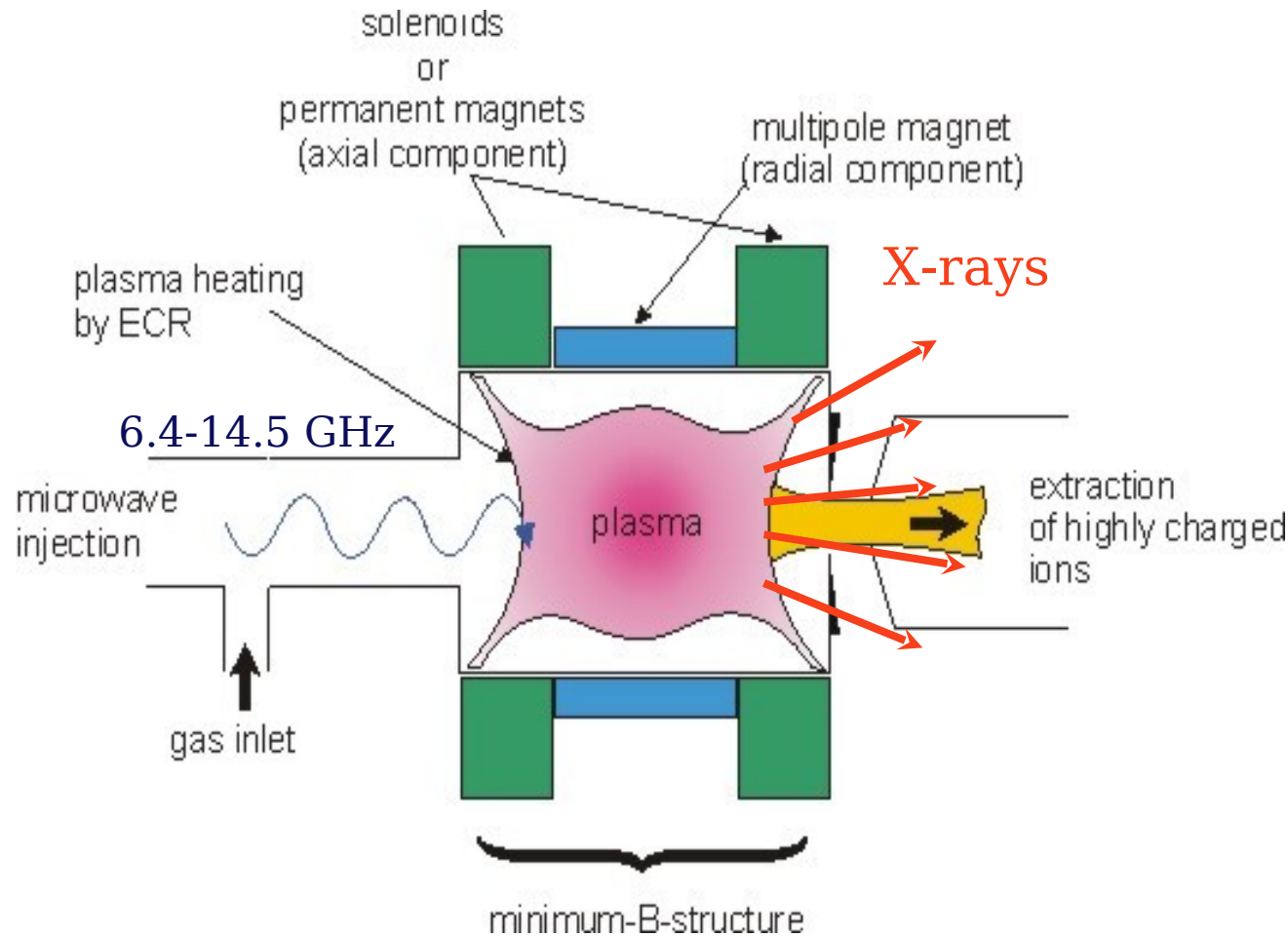
Surface de résonance

Source d'ions à résonance cyclotronique des électrons (ECRIS) et émission de rayons-X 52



Pression typique du plasma : 10^{-5} - 10^{-7} mbar

Source d'ions à résonance cyclotronique des électrons (ECRIS) et émission de rayons-X 53



Caractéristique des rayons-X émis

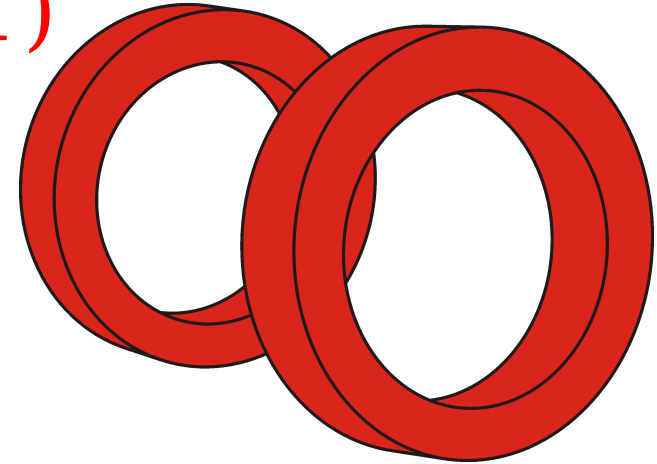
- Les ions sont "froids" ($E_{\text{cin}} \sim 1\text{eV}$ par charge)
->élargissement Doppler $\sim 10\text{-}40\text{ meV}$
- Spectres simples pour les ions hydrogénoïdes et héliumoïdes
- Émission intense de rayons-X (et d'autres radiations)

Pression typique du plasma : $10^{-5}\text{-}10^{-7}$ mbar

Piège cyclotronique -> Trappe d'ions à résonance cyclotronique des électrons (ECRIT)

Bobines supraconductrices:

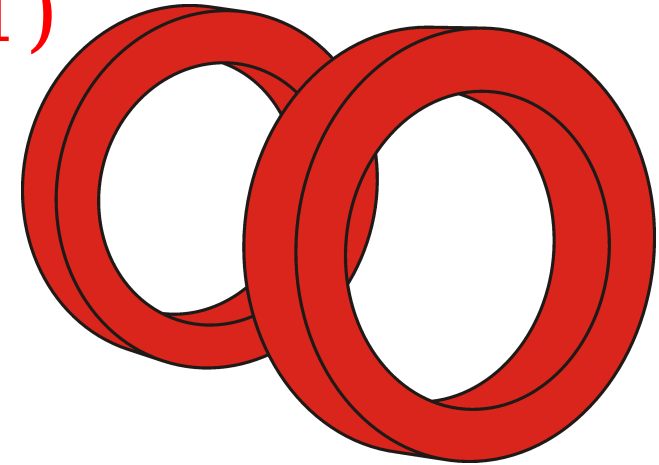
- Utilisé dans le piège cyclotronique pour la production des atomes pioniques
- Courant maximal 55 A
- Champ magnétique longitudinal = jusqu'à 3.5 Tesla



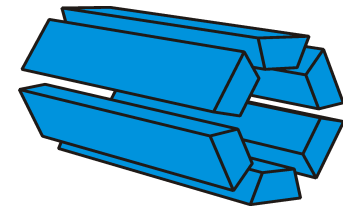
Piège cyclotronique -> Trappe d'ions à résonance cyclotronique des électrons (ECRIT)

Bobines supraconductrices:

- Utilisé dans le piège cyclotronique pour la production des atomes pioniques
- Courant maximal 55 A
- Champ magnétique longitudinal = jusqu'à 3.5 Tesla



+



Hexapôle magnétique permanent

- Champ à la surface $B=1$ Tesla
- Écart entre les pôles pour un pompage efficace

Générateur de micro-ondes à 6.4 Ghz HF

Piège cyclotronique -> Trappe d'ions à résonance cyclotronique des électrons (ECRIT)

Bobines supraconductrices:

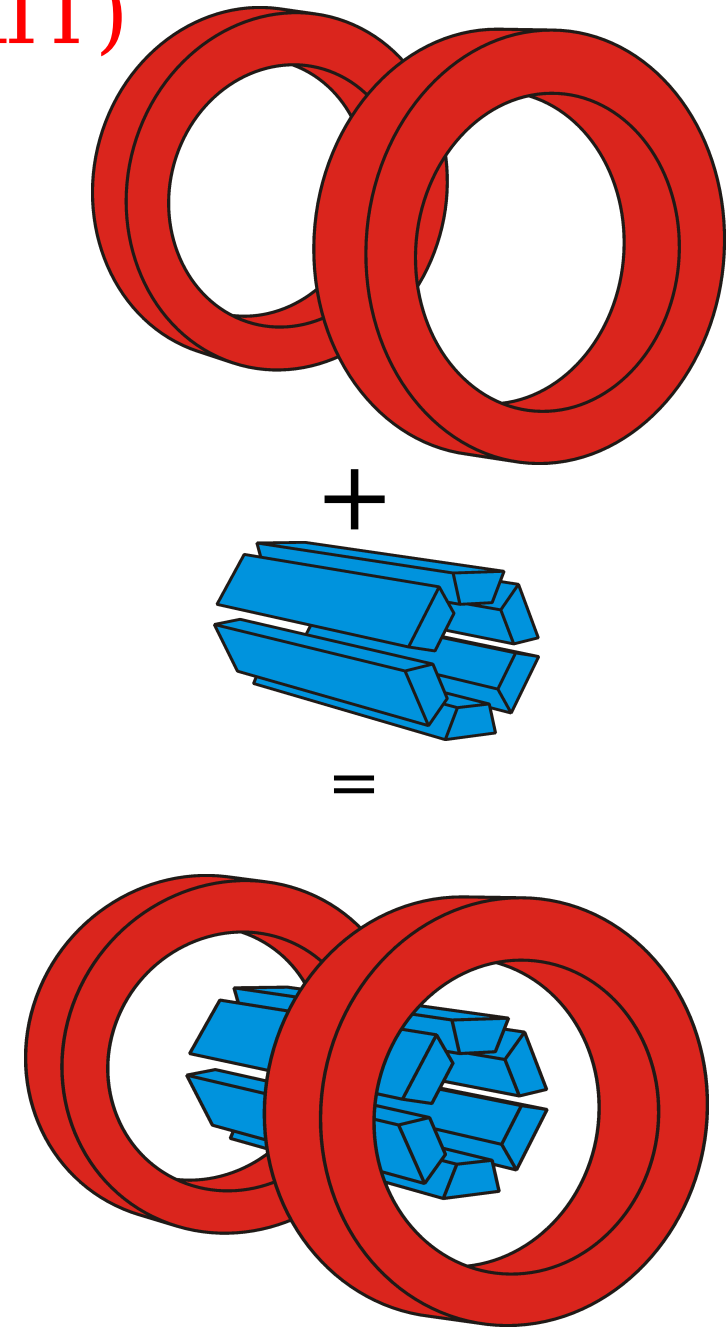
- Utilisées dans le piège cyclotronique pour la production des atomes pioniques
- Courant maximal 55 A
- Champ magnétique longitudinal = jusqu'à 3.5 Tesla

Hexapôle magnétique permanent

- Champ à la surface $B=1$ Tesla
- Ouverture entre les pôles pour un pompage efficace

Générateur de micro-ondes à 6.4 Ghz HF

Rapport miroir $B_{\max}/B_{\min} = 4.3!$



ECRIT du Paul Scherrer Institut

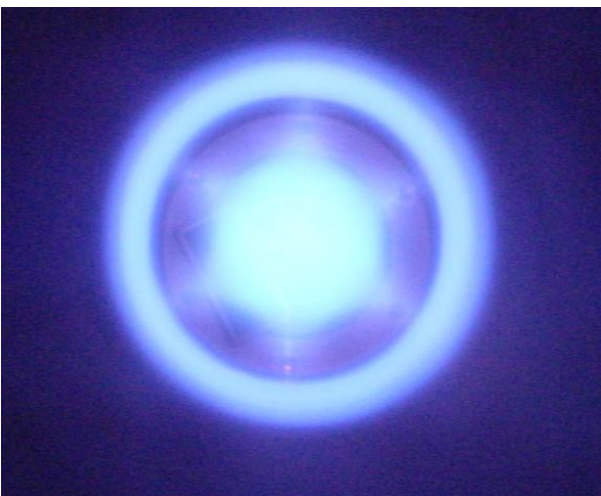
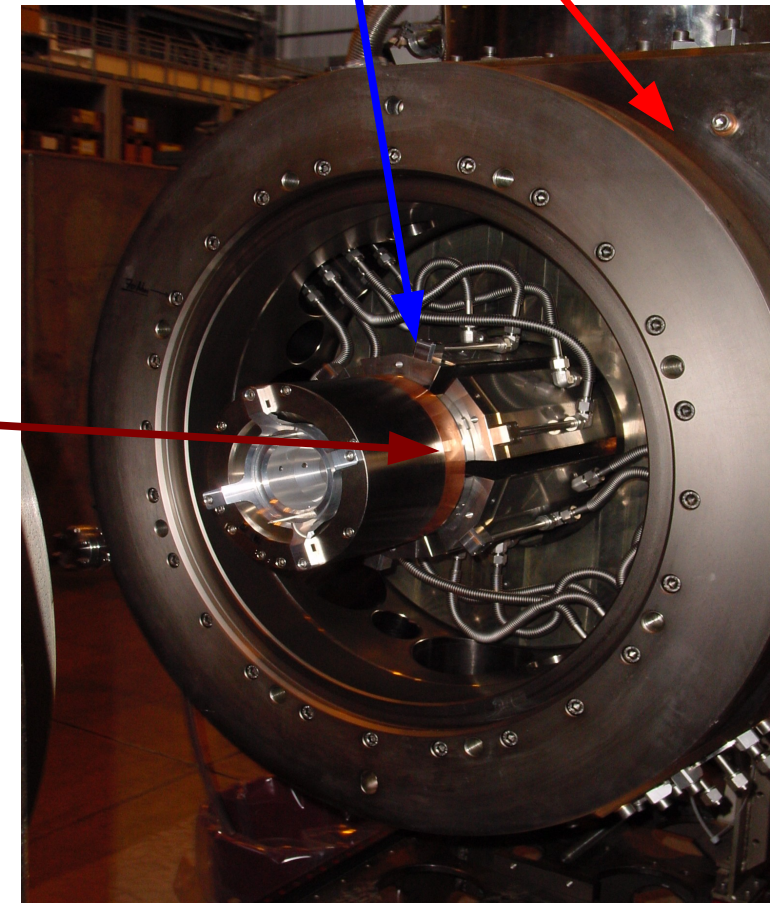
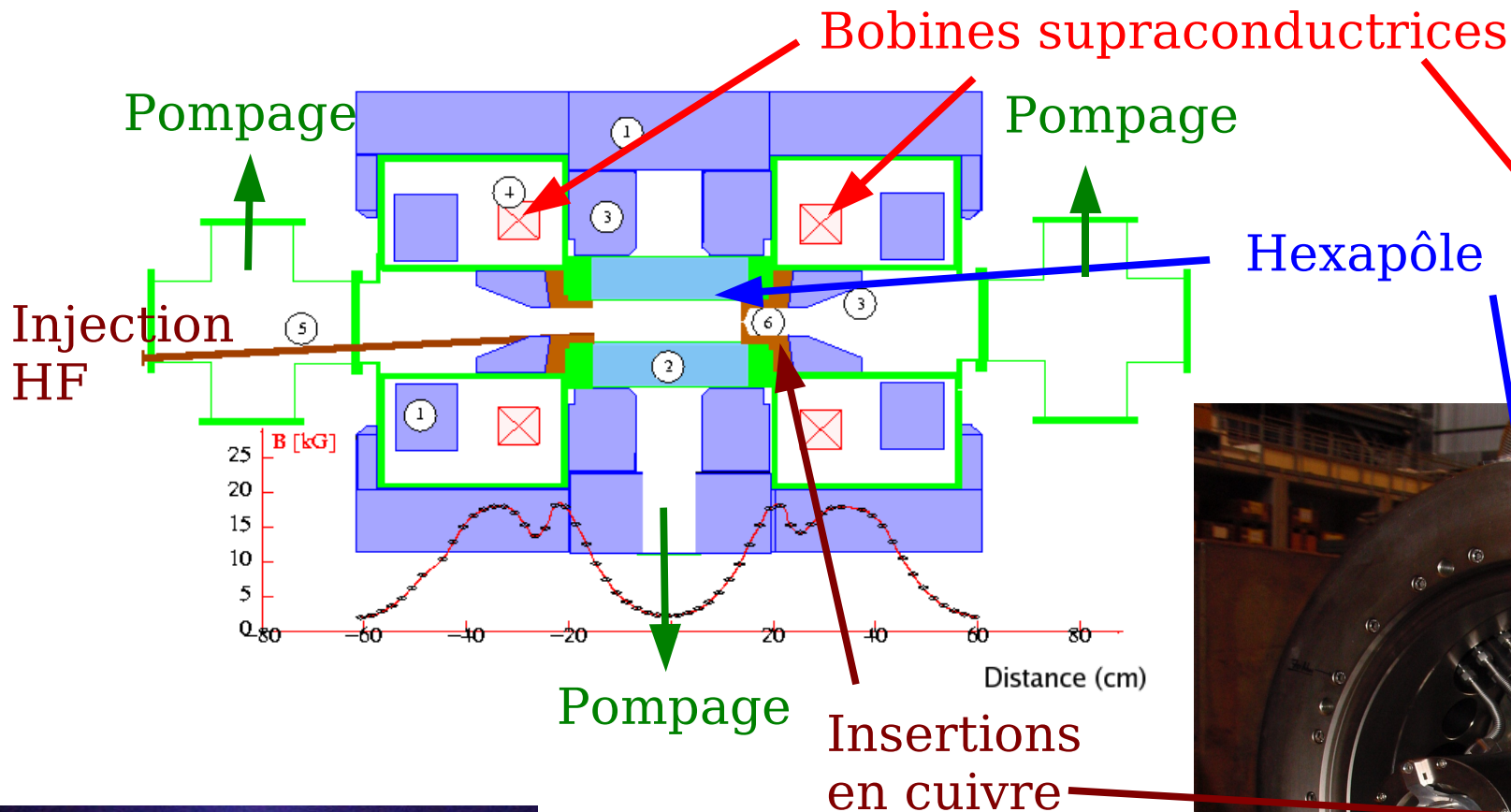
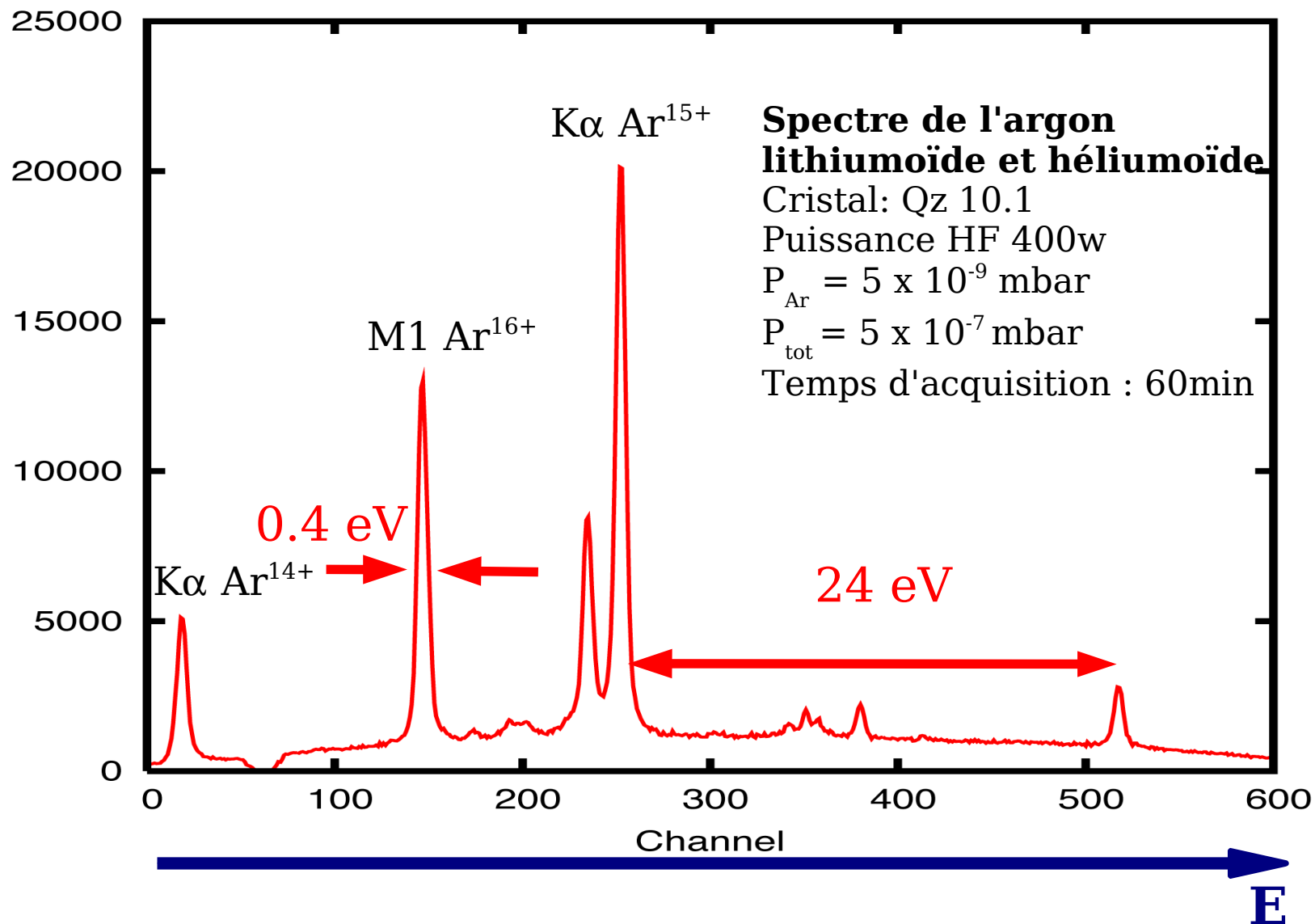
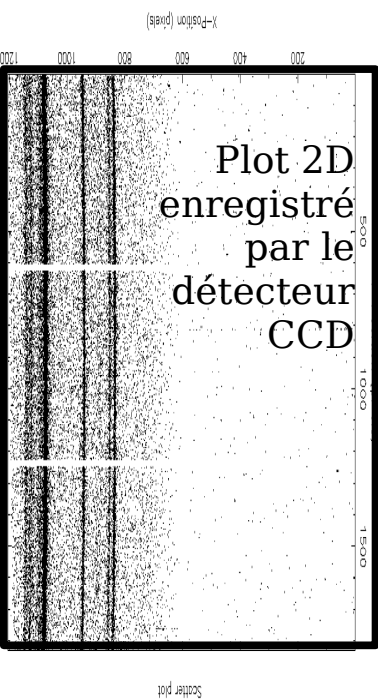
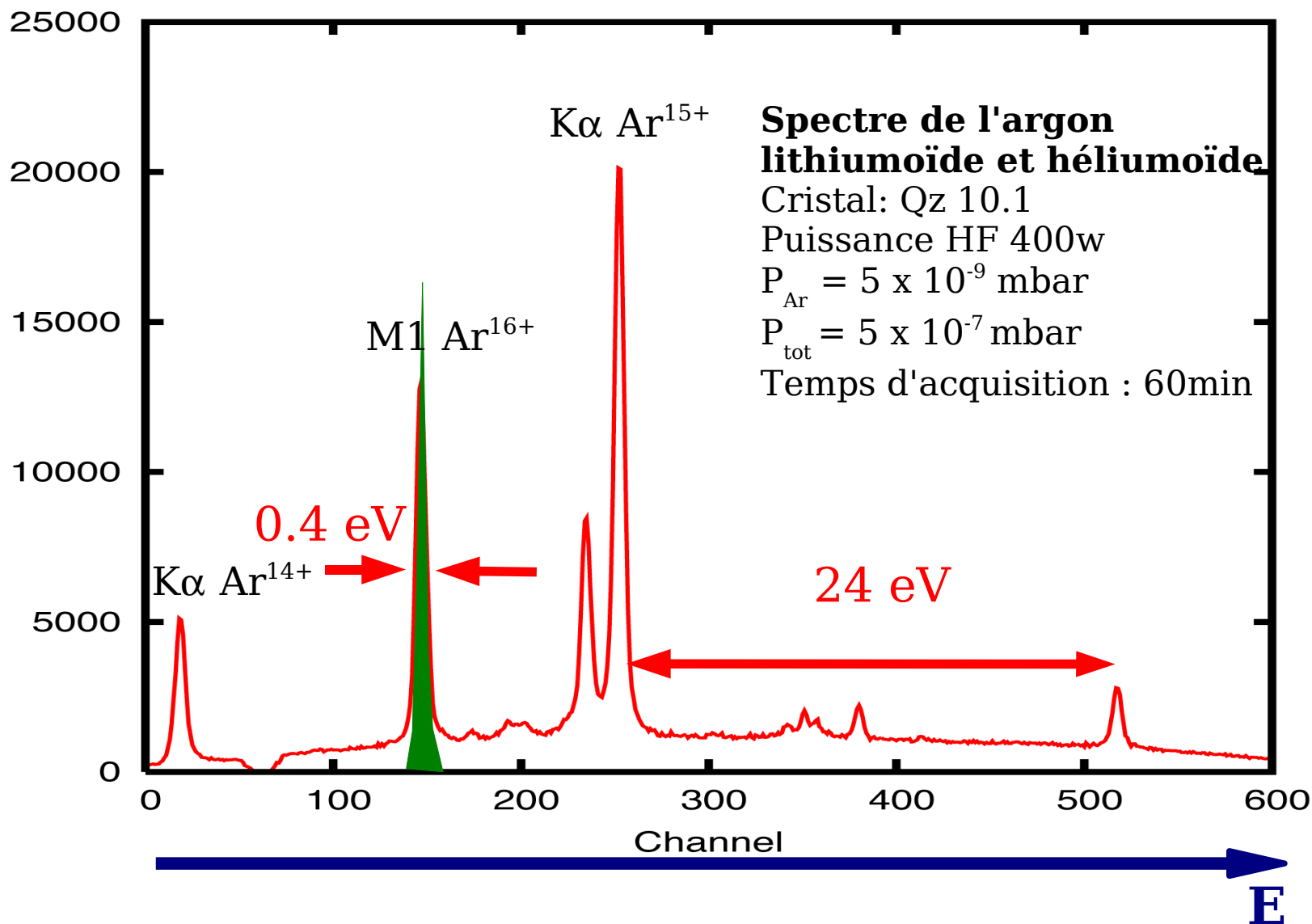
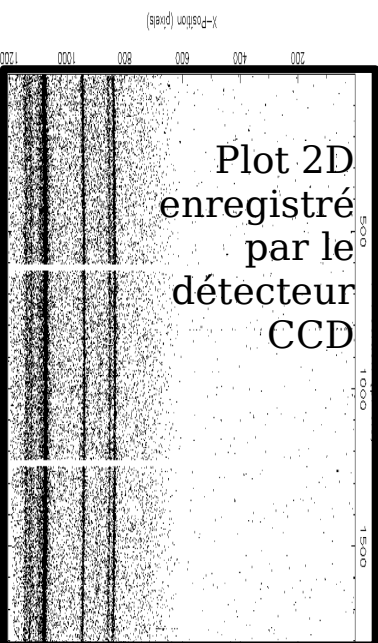


Photo du plasma au centre de la source obtenu pour la première fois en 2002

Spectres des ions multichargés



Les plus intenses spectres X d'ions multichargés produits!!
(mis à part les Tokamaks)

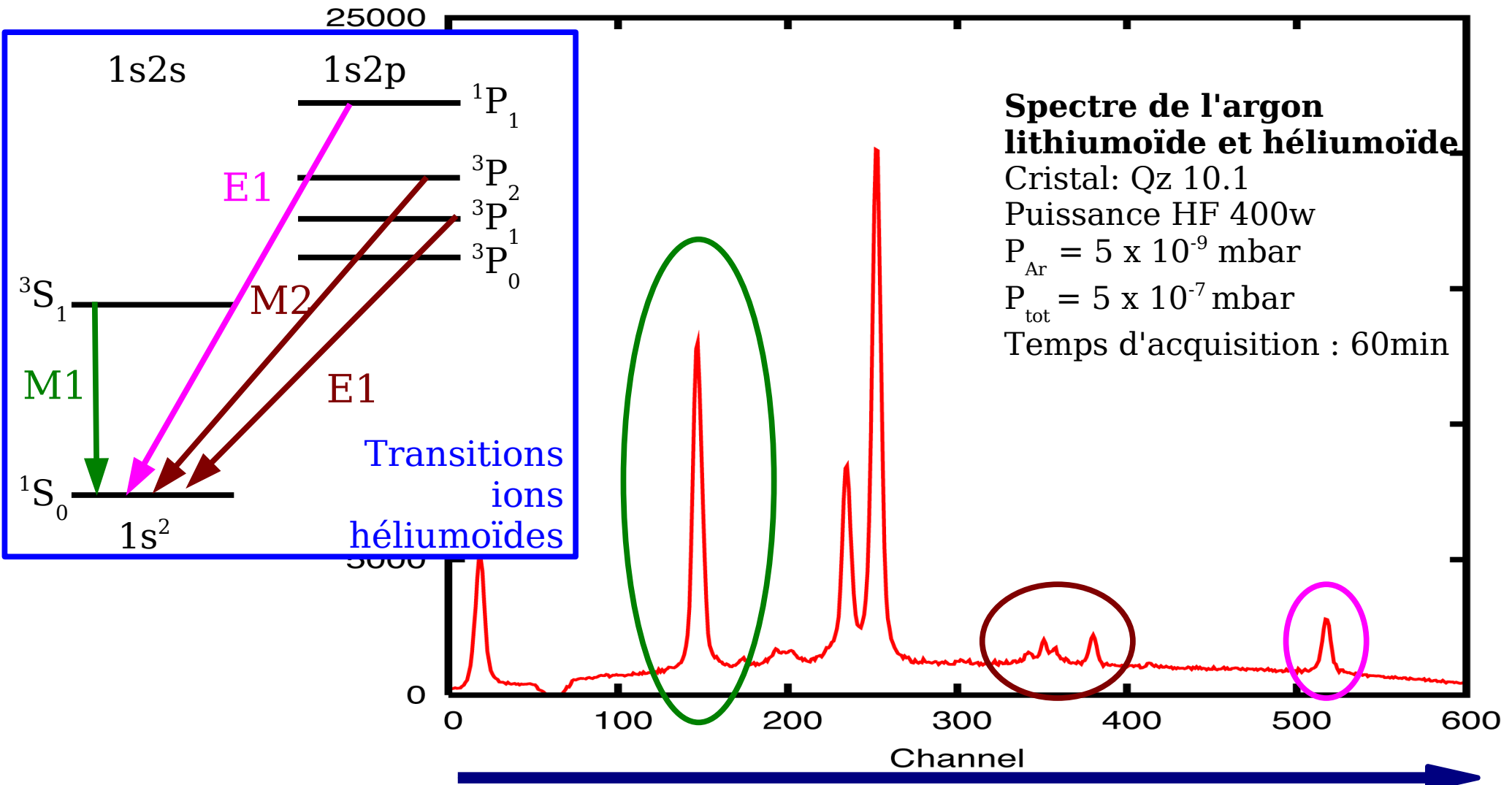


$Ar^{16+} 1s2s \ ^3S_1 \rightarrow 1s^2 \ ^1S_0$ M1:

Largeur naturelle $\ll 1$ meV, élargissement Doppler = **40 meV**

Raie idéale pour la mesure de la fonction de réponse du spectromètre [1]

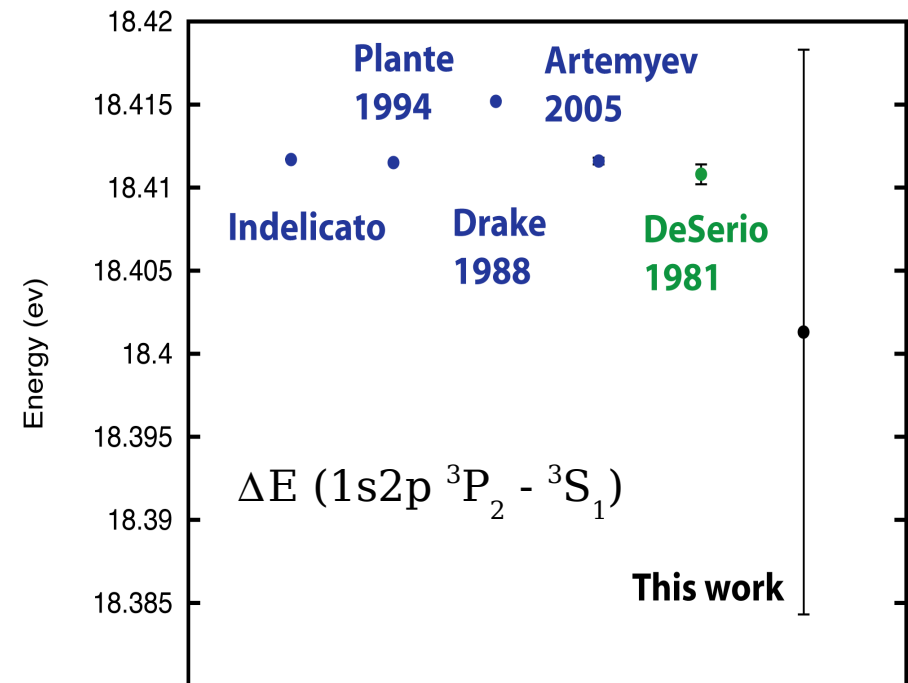
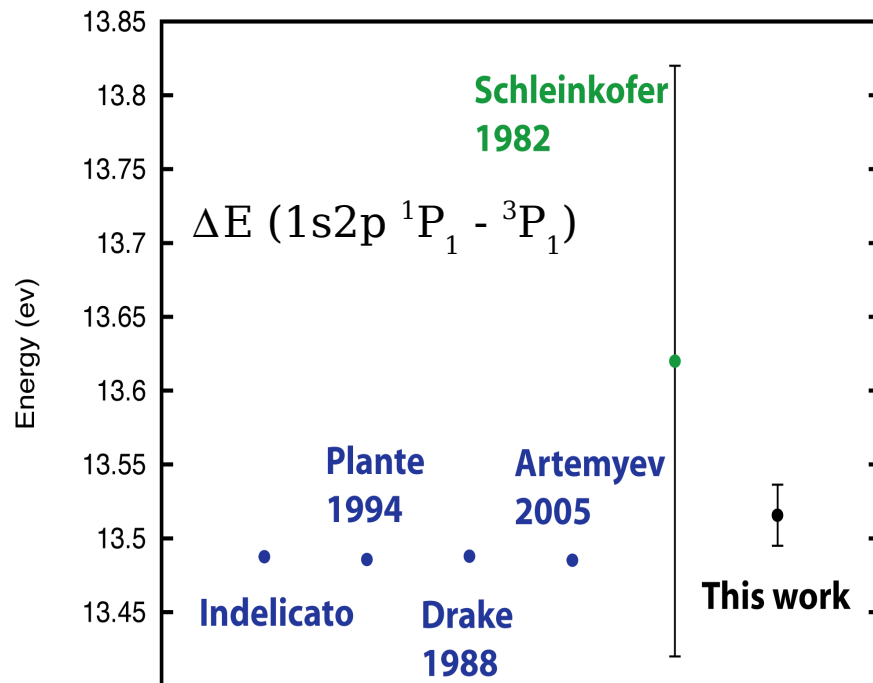
Spectres des ions multichargés



- Mesure de position des pics en utilisant la fonction de réponse du spectromètre X
- Mesures préliminaires sur l'argon et le soufre héliomoïdes

Mesure des énergies de transition du soufre héliumoïde [1]

Comparaison entre prédictions théoriques et anciennes mesures

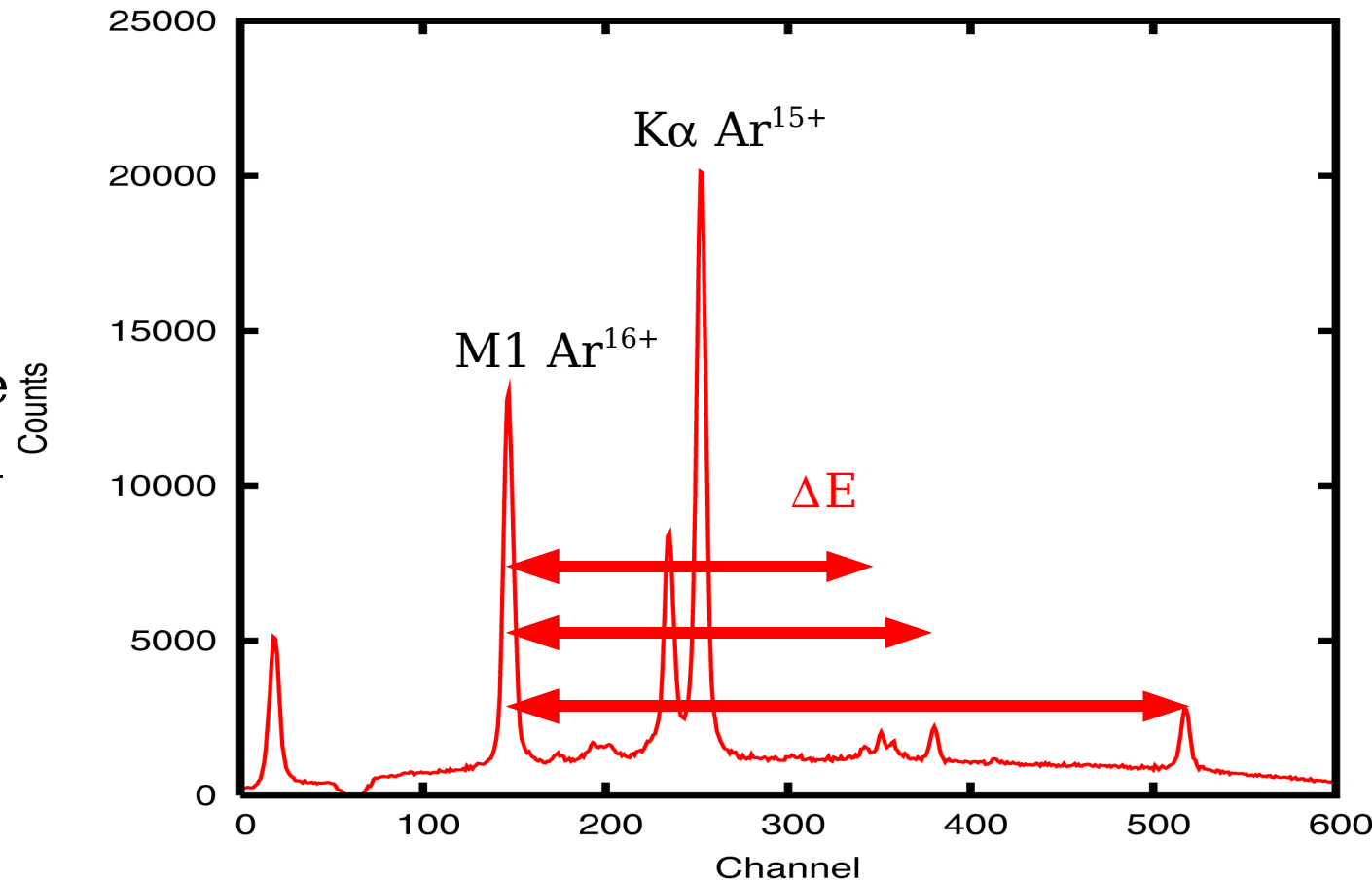


Résultats:

- Mesures 10 fois plus précises que l'expérience précédente (Deslattes) : de l'ordre de 20 meV
- Compatibilité avec les prédictions théoriques et les mesures de spectroscopie UV (DeSerio)

Énergies relatives <-> énergies absolues

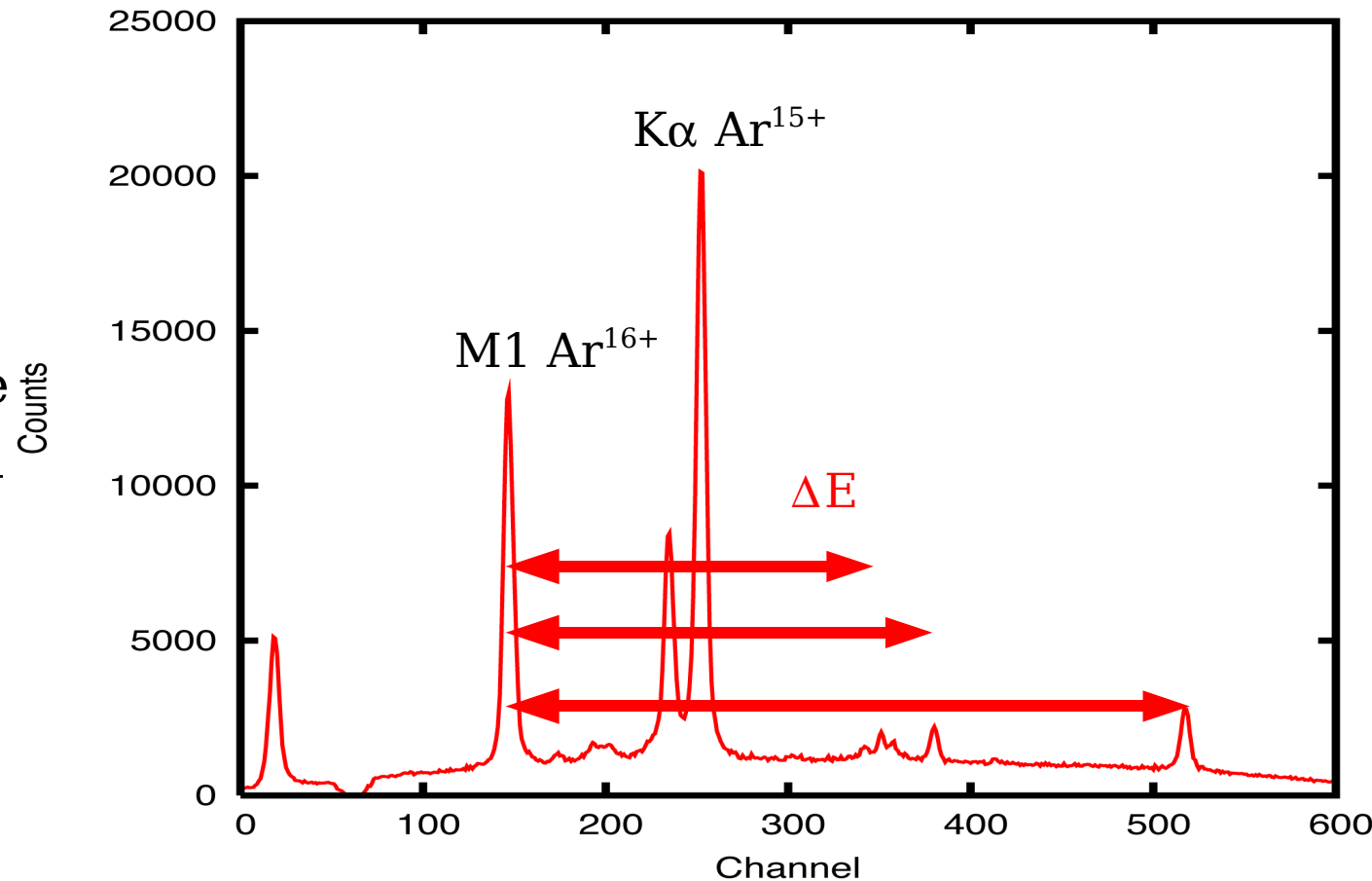
- Transition M1 du ion héliumoïde très intense
- Mesures relatives à la transition M1



Énergies relatives <-> énergies absolues

63

- Transition M1 du ion héliumoïde très intense
- Mesures relatives à la transition M1



- Mesures absolue de la transition M1 (spectromètre à double cristal plan)



- Mesures des transitions $n=2-1$ dans les ions héliumoïdes avec une précision de quelque ppm -> test d'électrodynamique quantique

Conclusion

Atomes pioniques

- Nouvelle mesure de la masse du pion négativement chargé avec une précision de 1.7 ppm (moyenne mondiale : 2.5 ppm) -> réduction de l'incertitude des étalons X à l'aide des atomes pioniques
- Calcul de la structure hyperfine (et des corrections de recul)
- Test de l'équation de Klein-Gordon avec une précision de 0.6% (expérience précédente : 2%)

Ions multichargés

- Développement d'une nouvelle source d'ions
- Nouvelles mesures des énergies des niveaux 2p et 2s dans l'argon et le soufre héliumoides avec une précision de 10-20 meV (expérience précédentes : 100-200 meV)
- Comparaison avec les prédictions théoriques
- Développement d'une nouvelle analyse des spectres

Perspectives

Atomes pioniques

- Mesure de l'interaction forte à l'aide de la spectroscopie X de l'hydrogène et deutérium pionique
- Application de la méthode de perturbation pour l'éq. Klein-Gordon pour le moment quadrupolaire nucléaire et pour le potentiel optique

Ions multichargés

- Nouvelle analyse des spectres X de l'argon, du **chlore** et du soufre multichargés
- Nouvelles mesures avec la source d'ions de Paris (project SIMPA)
- Mesures d'énergies absolues avec le spectromètre à double cristal plan
 - > définition de nouveaux étalons X à l'aide des ions multichargés
 - > mesure de la M1 (0.5 ppm) -> mesures les plus précises sur les transition $n=2-1$ dans les ions héliumoïde ($\sim 2-4$ ppm)

Membres de la collaboration

Laboratoire Kastler Brossel (Paris, France)

P. Indelicato, E.-O. Le Bigot, B. Manil

Paul Scherrer Institut (Villigen, Suisse)

C. David, B. Leoni, L.M. Simons, L. Stingelin, A. Wasser

Institut für Kernphysik, Forschungszentrum Jülich (Jülich, Allemagne)

D. Gotta, M. Hennebach

Space Research Center, (Leicester, Grande Bretagne)

N. Nelms

Stefan Meyer Institut für subatomare Physik (Vienne, Autriche)

A. Gruber, A. Hirtl, J. Zmeskal

Universidade de Coimbra (Coimbra, Portugal)

D.S. Covita, J.M.F. dos Santos, J.F.C.A. Veloso

Structure hyperfine des atomes pioniques (Calcul non-relativiste)

- Spin du pion=0 -> absence du terme qui dépend du spin de la particule orbitante
- Présence du terme $\mathbf{L} \cdot \boldsymbol{\mu}_N$ due à l'interaction entre moment magnétique nucléaire et moment orbital

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} r + \hbar^2 \frac{l(l+1)}{2\mu r^2} - eV(r) + \hat{W}_{NR}(\mathbf{r}) \right] \psi_{nl}(r) = E \psi_{nl}(r)$$

opérateur
moment
angulaire

Equation de Schrodinger
(linéaire en E)

Terme perturbatif
du a la HFS

$$\hat{W}_{NR}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 e \hbar}{4\pi \mu} \frac{1}{r^3} \hat{\mathbf{L}} \cdot (\boldsymbol{\mu}_I \boldsymbol{\mu}_N)$$

moment
magnétique
nucléaire

- Méthode de perturbation $E = E_0 + E_1 + \dots$

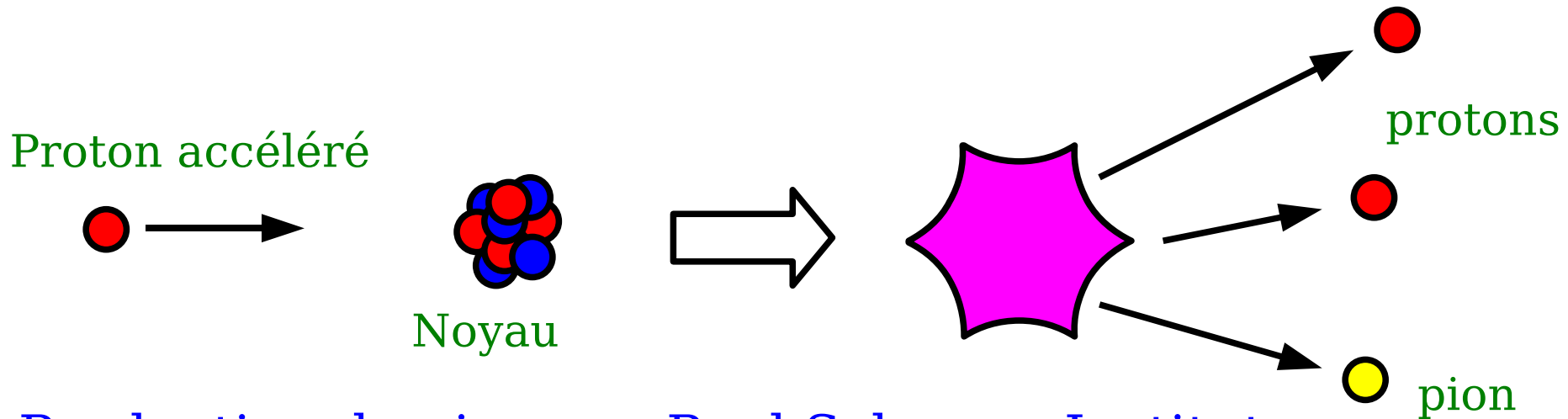
$$E_1^{NR} = \langle \psi_{nl} | \hat{W}_{NR} | \psi_{nl} \rangle$$



$$E_1^{NR} = \mu_I \mu_N \frac{e \mu_0 \hbar}{4\pi \mu} \frac{F(F+1) - I(I+1) - l(l+1)}{2I} \langle n'l | \hat{r}^{-3} | nl \rangle_{NR}$$

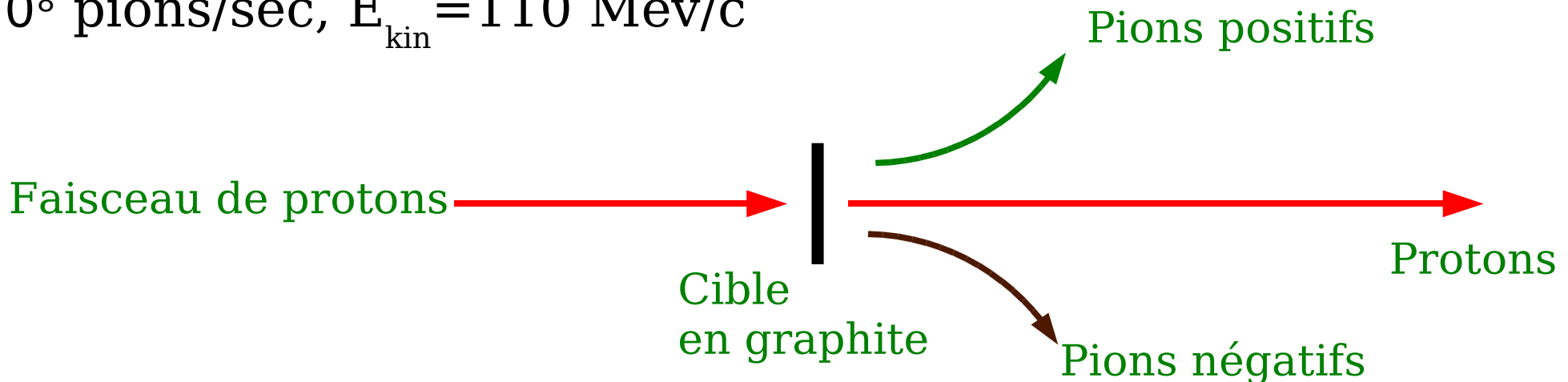
I spin nucléaire,
l nb. quantique moment angulaire

Production des pions

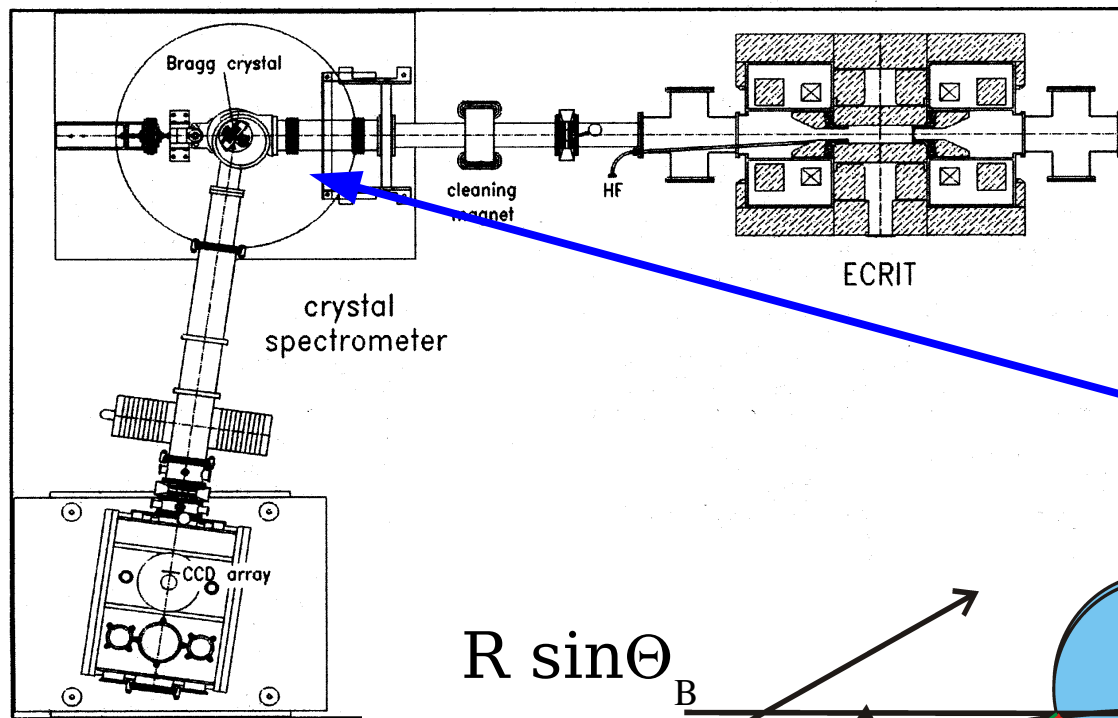


Production de pions au Paul Scherrer Institut
(Villigen, Suisse) :

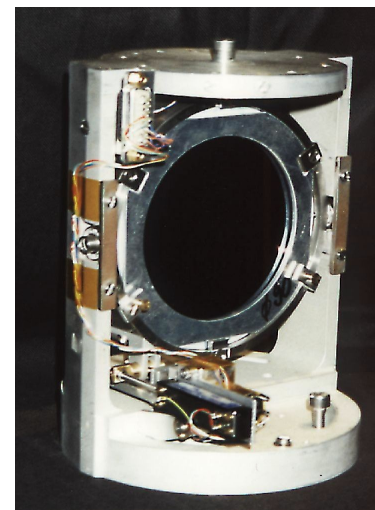
- Faisceau de protons : $E_{\text{kin}} = 590 \text{ MeV/c}$, $I = 1.9 \text{ mA}$
- Cible en graphite
- 10^8 pions/sec, $E_{\text{kin}} = 110 \text{ MeV/c}$



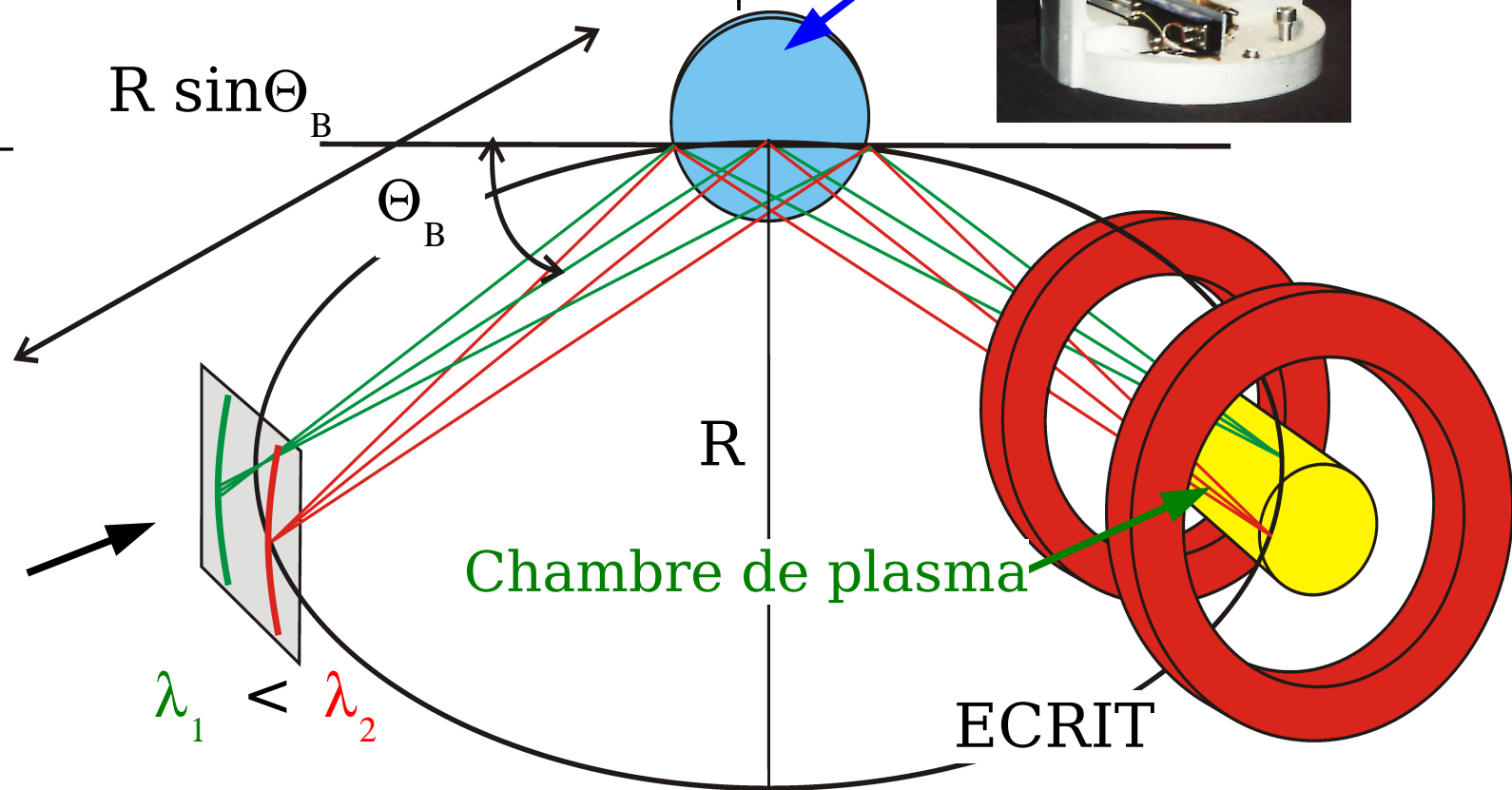
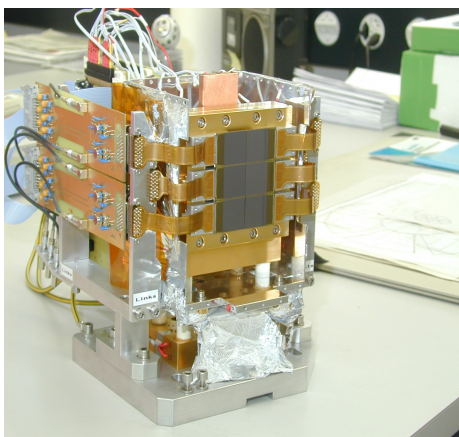
Installation de l'ECRIT et du spectromètre X⁶⁹



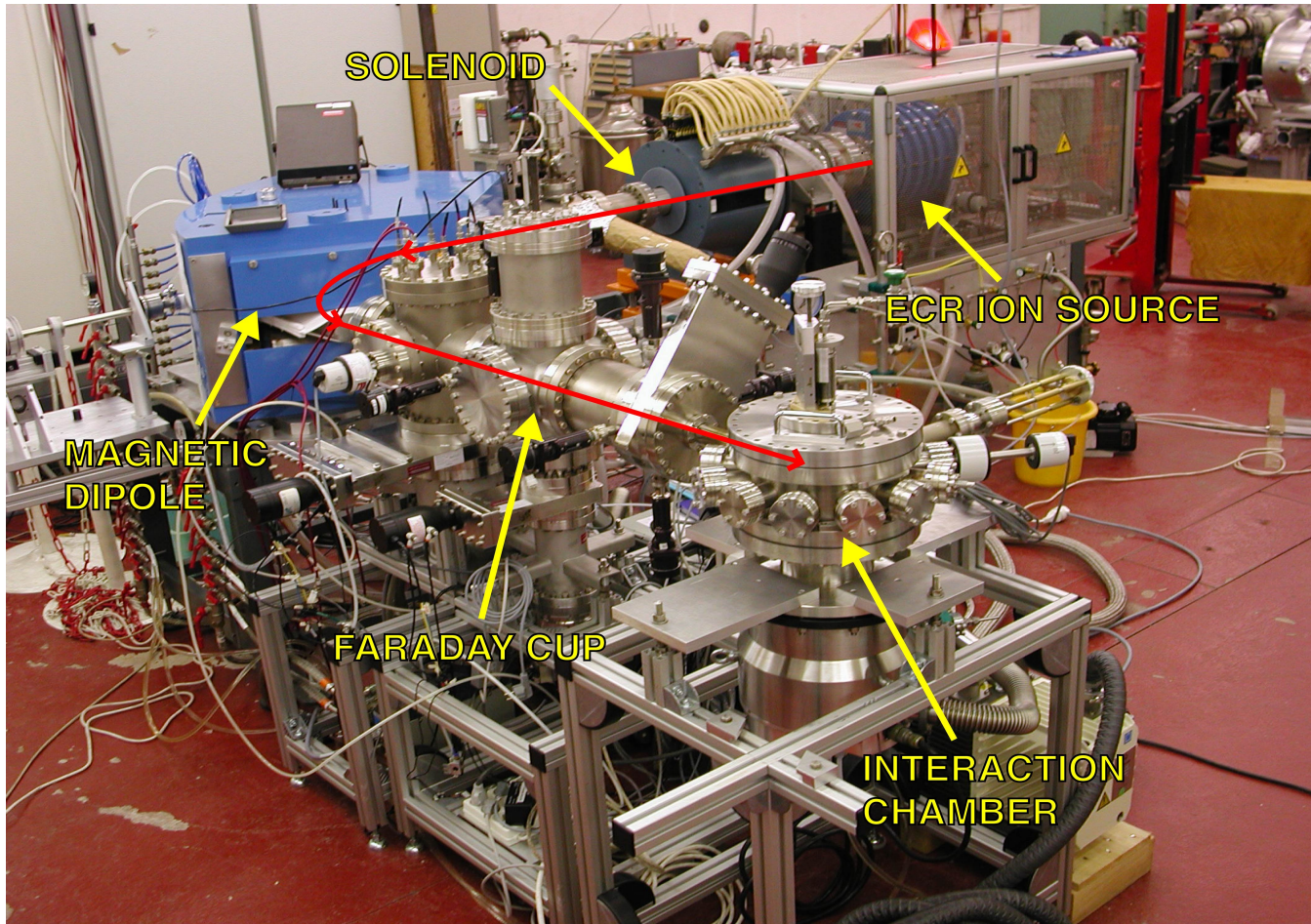
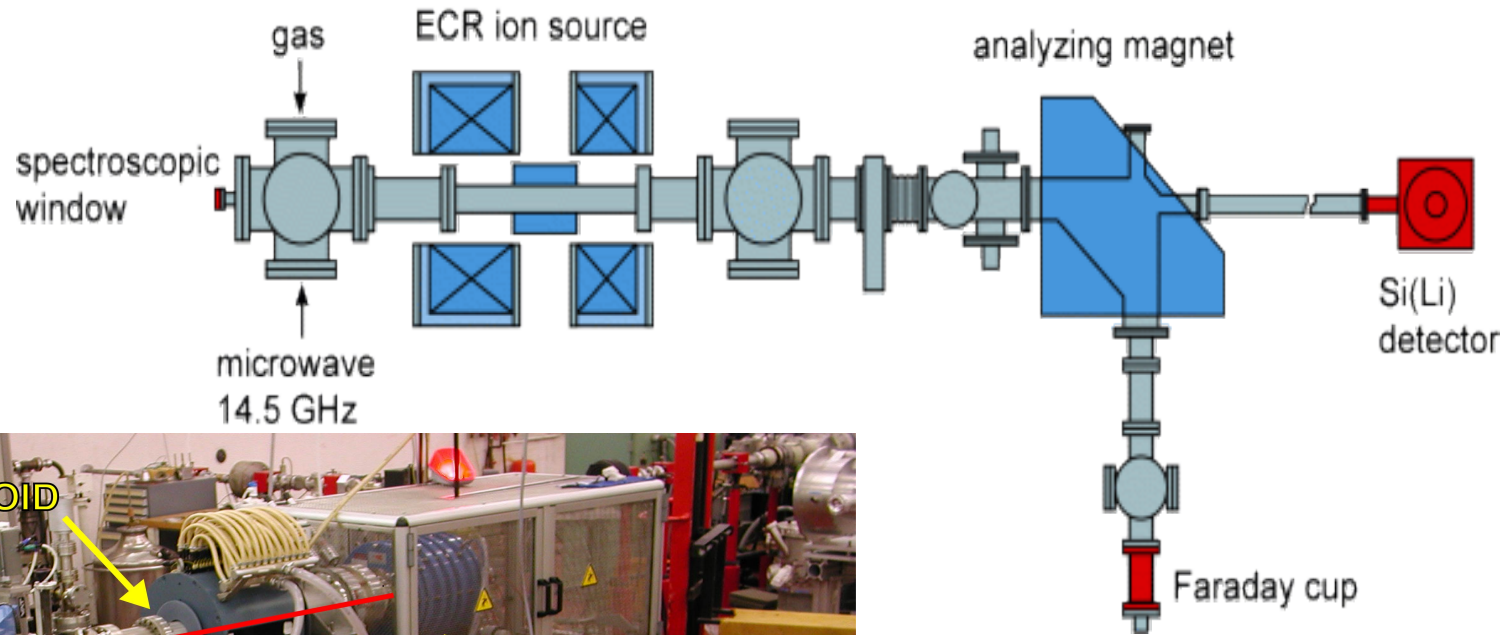
Cristal avec courbure sphérique



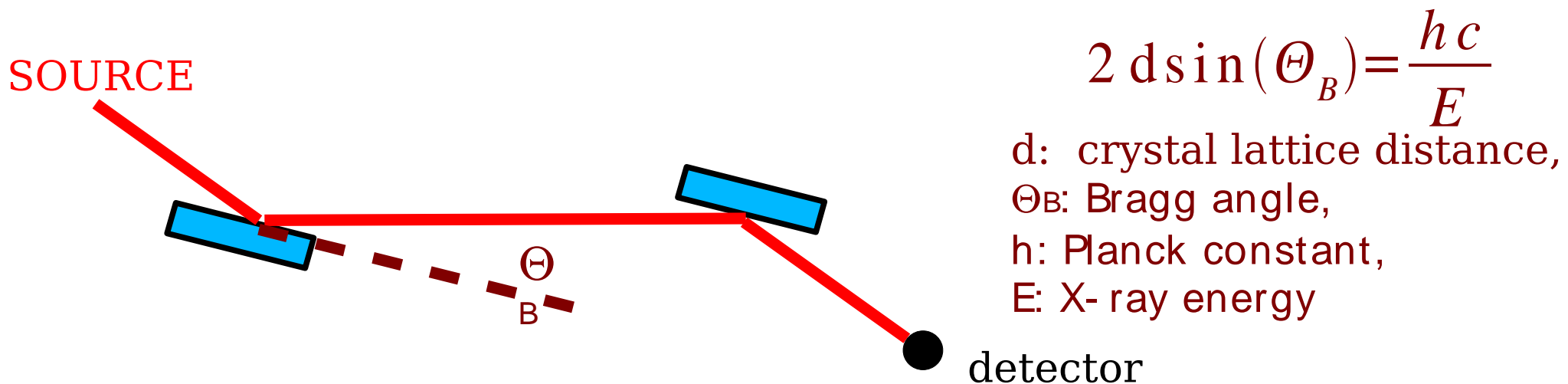
Détecteur CCD



ECR multicharged ion source in Paris (SIMPA)⁷⁰

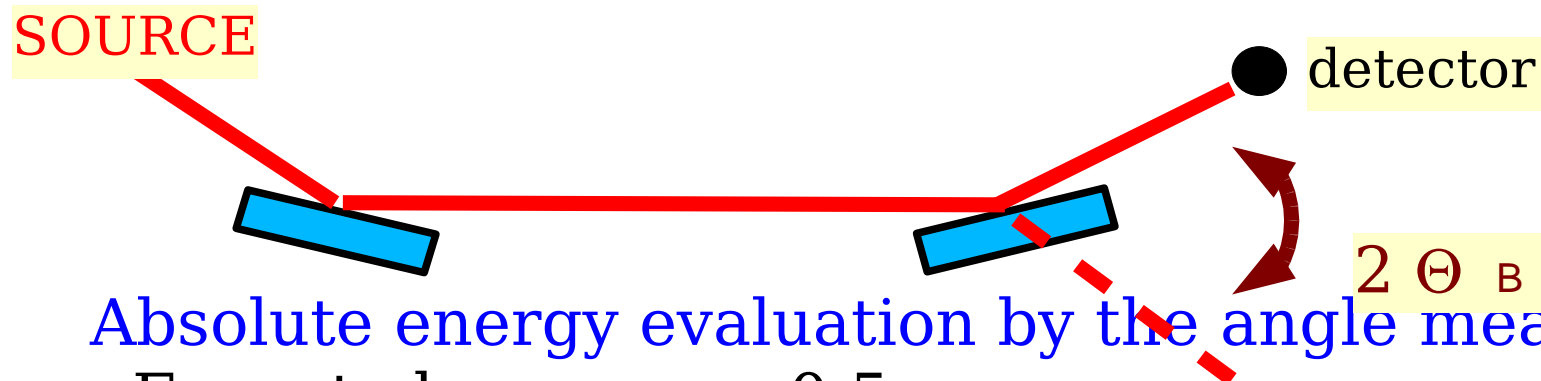


Double crystal spectrometer



$$2 d \sin(\Theta_B) = \frac{hc}{E}$$

d: crystal lattice distance,
 Θ_B : Bragg angle,
 h: Planck constant,
 E: X-ray energy



Absolute energy evaluation by the angle measurement

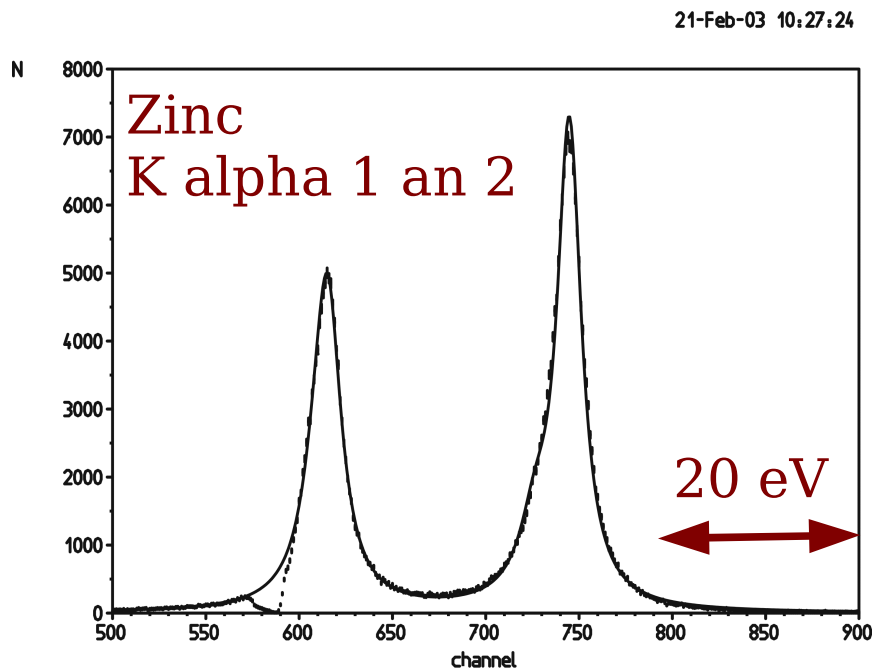
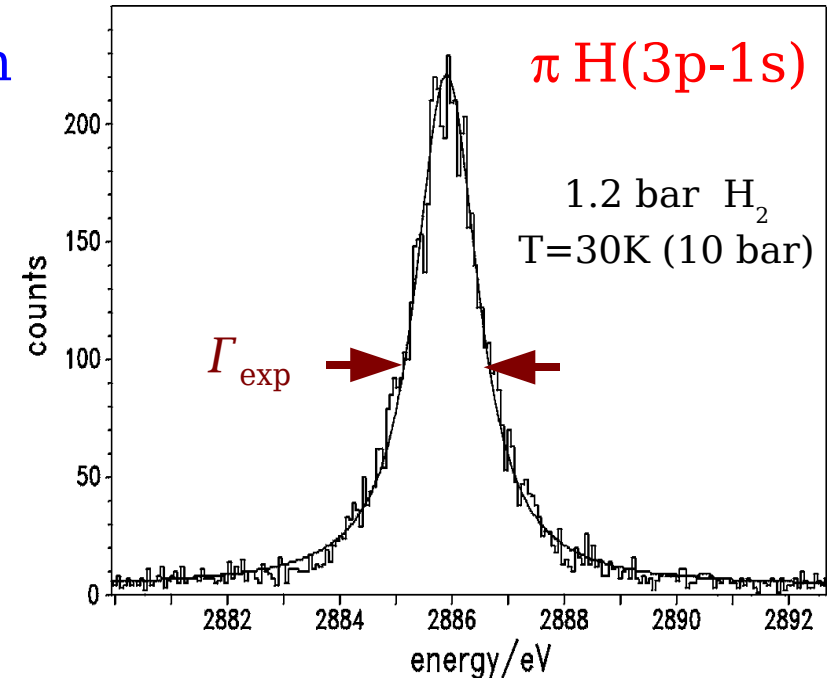
- Expected accuracy: 0.5 ppm
- Measurable energy range: 0.5-12 keV (changing the crystal type)

3p-1s width in pionic hydrogen

Pionic Hydrogen fundamental level width

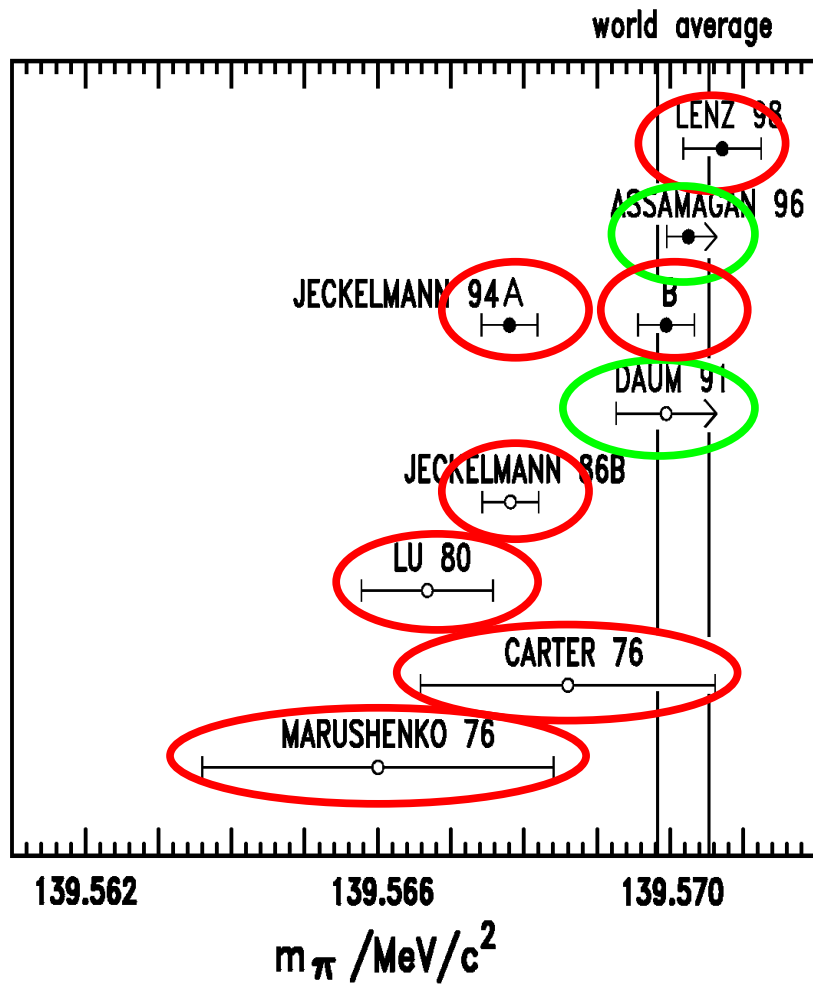
- Γ_{1s} not measurable directly
- Broadening due to the pionic atoms kinetic energy
- Broadening due to the spectrometer resolution

$$\Gamma_{\text{exp}} = \Gamma_{\text{SPECTROMETER}} \otimes \Gamma_{\text{DOPPLER}} \otimes \Gamma_{1s}$$



Problem: it necessary to know the response function of the spectrometer

Mesures de la masse du pion chargé (1)



π^- N(5g-4f) / Cu K α_1

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$

π^- Mg

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$

π^- Mg

π^- atoms

π^- atoms

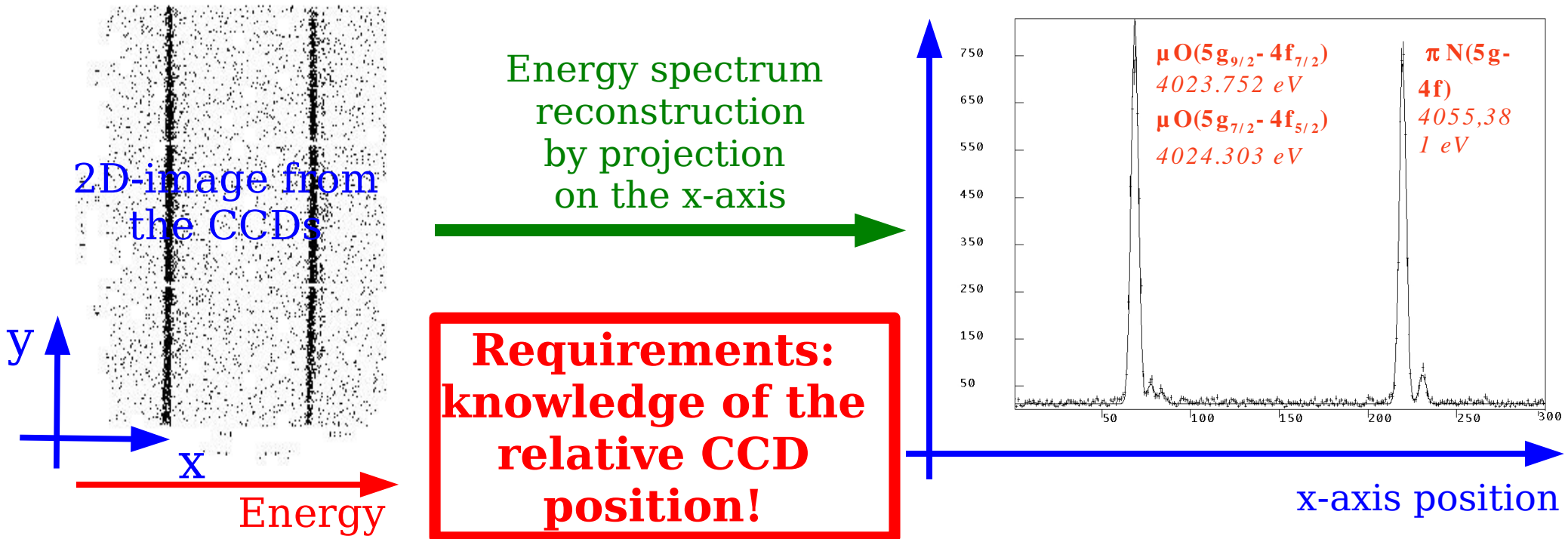
π^- atoms

• Mesure de la masse du pion par :

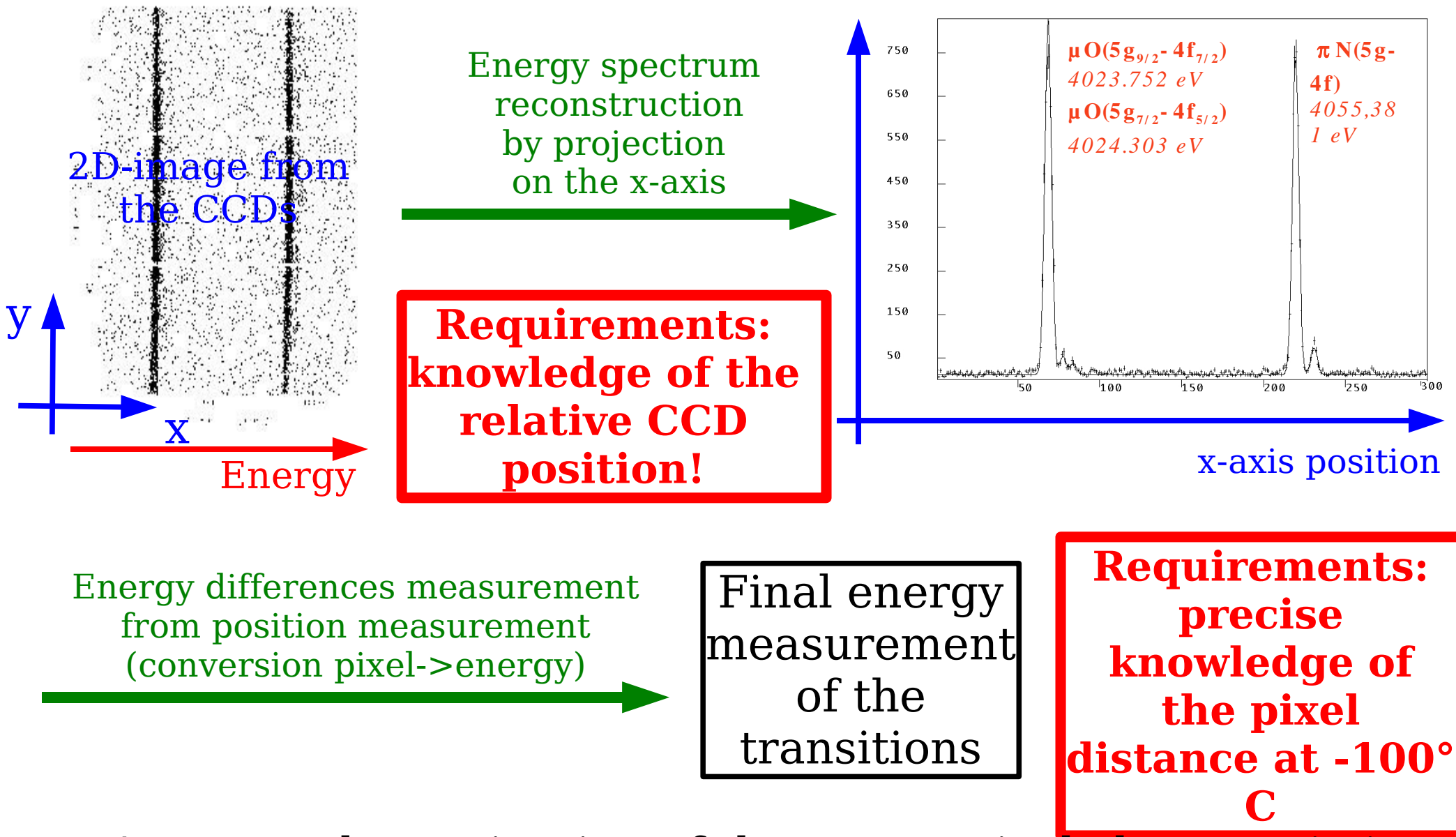
- spectroscopie des atomes pioniques
- désintégration des pions (limite inférieure)

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$$

CCD array geometrical characteristics

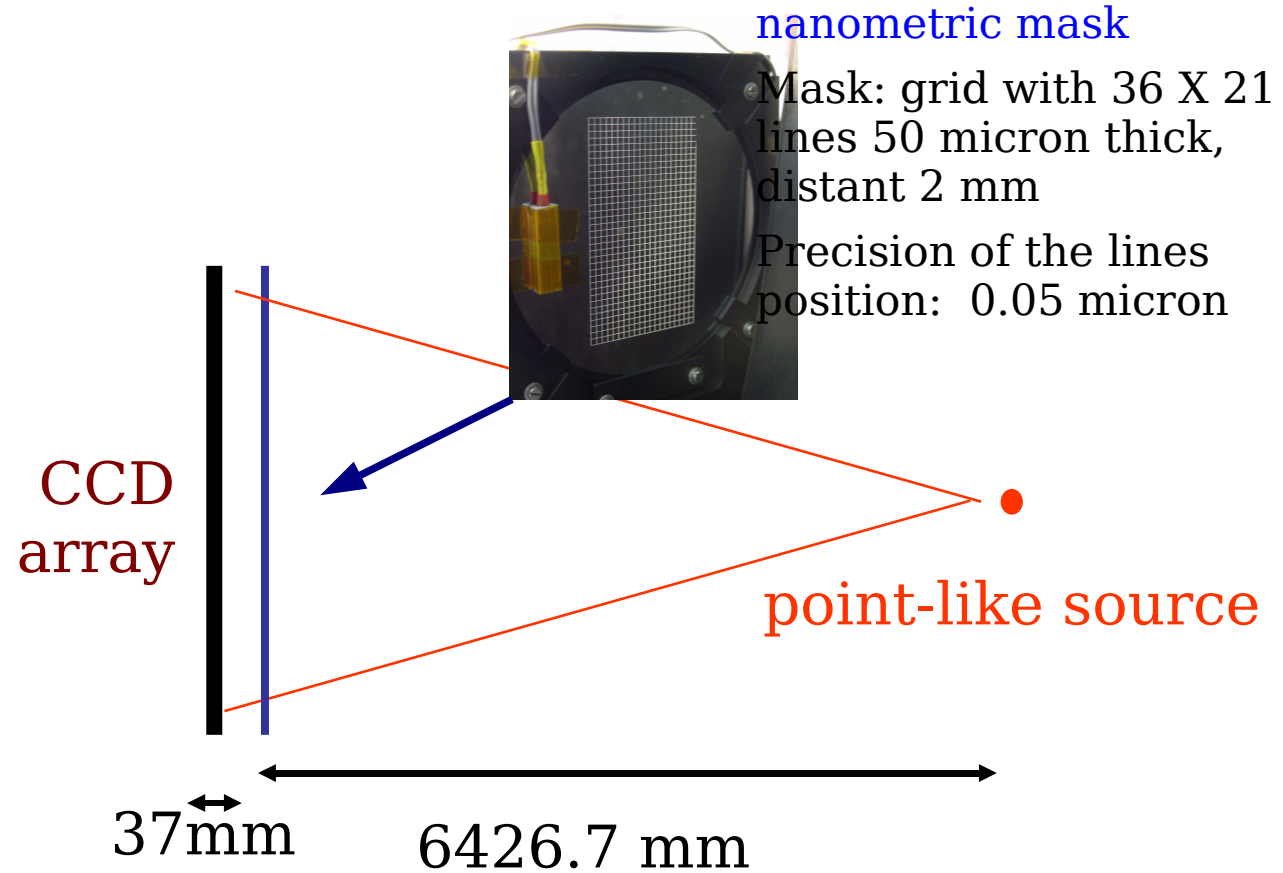
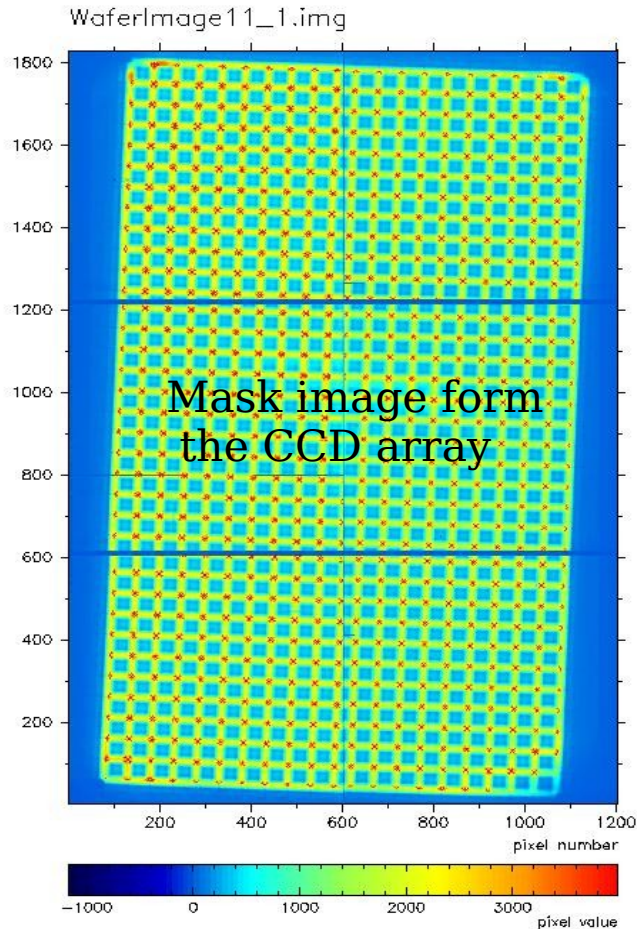


CCD array geometrical characteristics



=> Accurate determination of the geometrical characteristics of the CCD array for the final pion mass evaluation

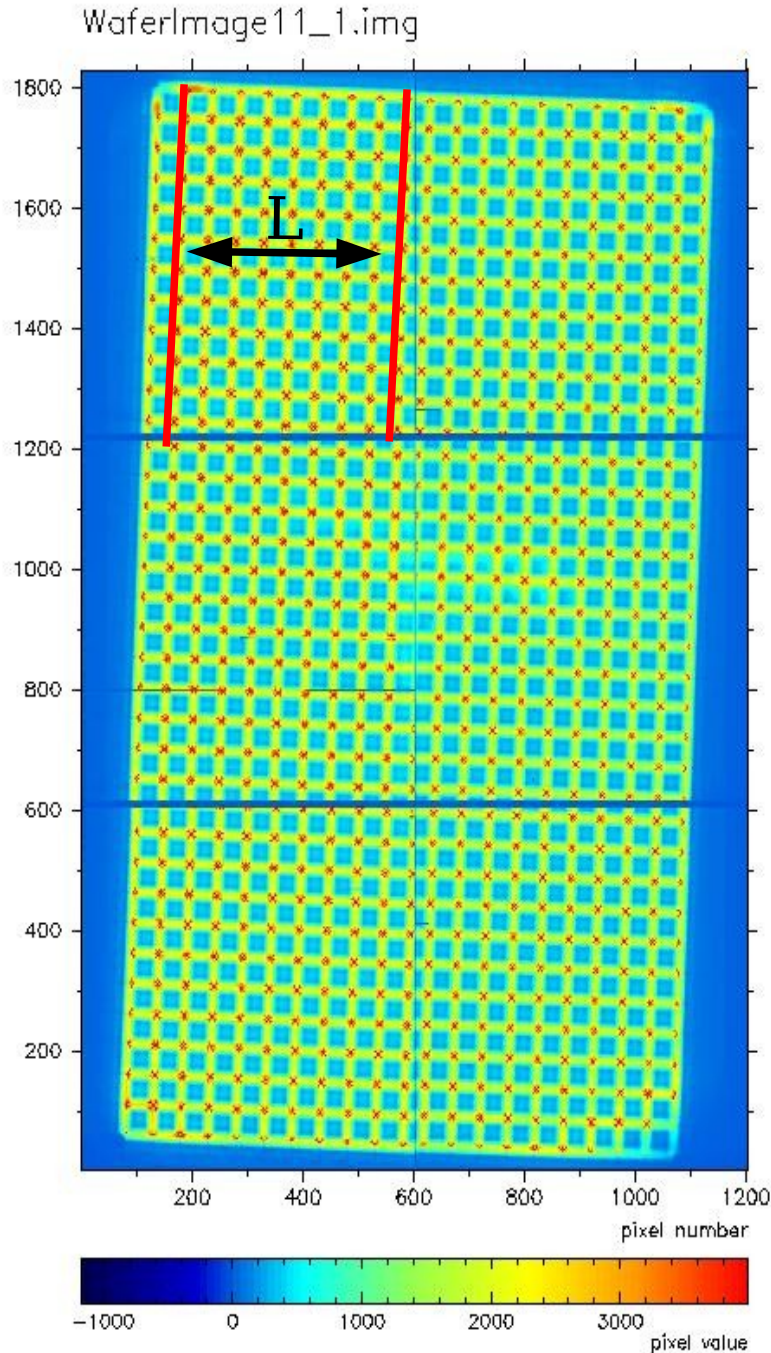
CCD array measurement



Measurement of the lines position in the image:

- > measurement of the distance between pixels
- > measurement of the relative position between CCDs

CCD measurement results



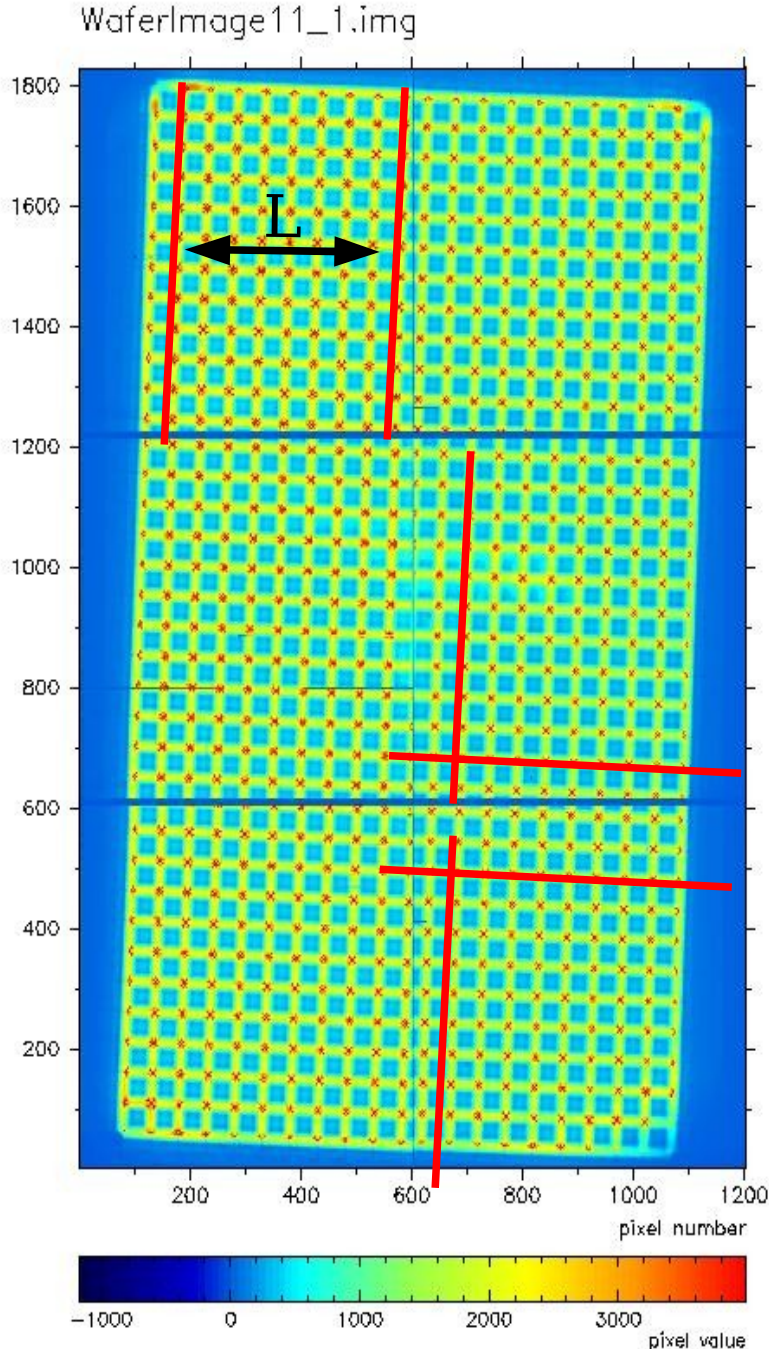
Pixel distance measurement

- Real line position vs. line distance in the image
-> pixel distance (pxd)
- More than 180 independent measurement per CCD using different lines
- Study of the temperature dependency of the pixel distance (between -105°C and -40°C)

$$\text{pxd} = 39.9764 \pm 0.0009 \mu\text{m}$$

=> less than 0.3 ppm for the pion mass

CCD measurement results



Pixel distance measurement

- Real line position vs. line distance in the image
-> pixel distance (pxd)
- More than 180 independent measurement per CCD using different lines
- Study of the temperature dependency of the pixel distance (between -105°C and -40°C)

$$\text{pxd} = 39.9764 \pm 0.0009 \mu\text{m}$$

=> less than 0.3 ppm in the pion mass

CCD relative position

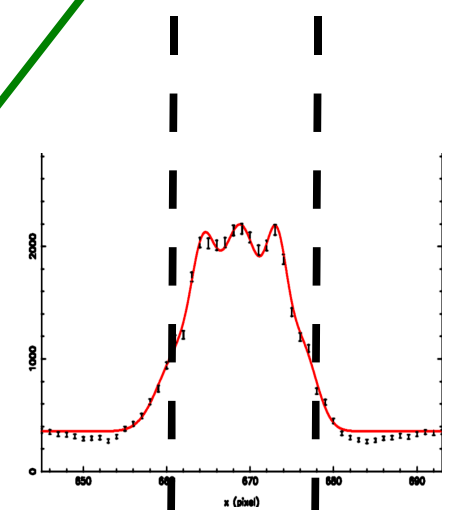
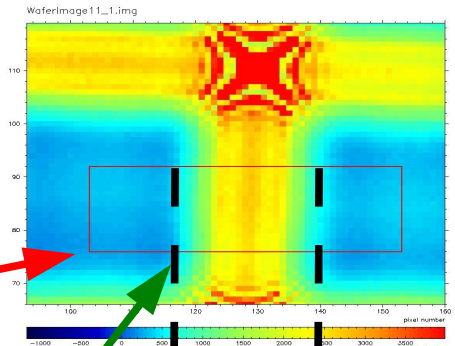
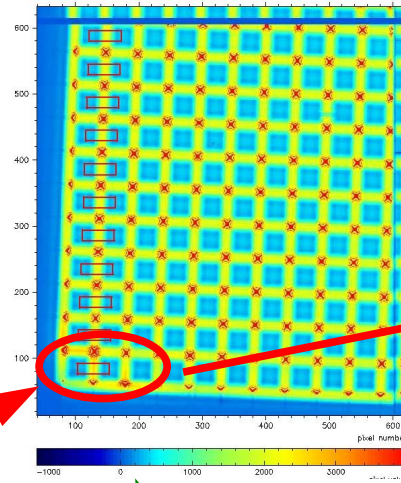
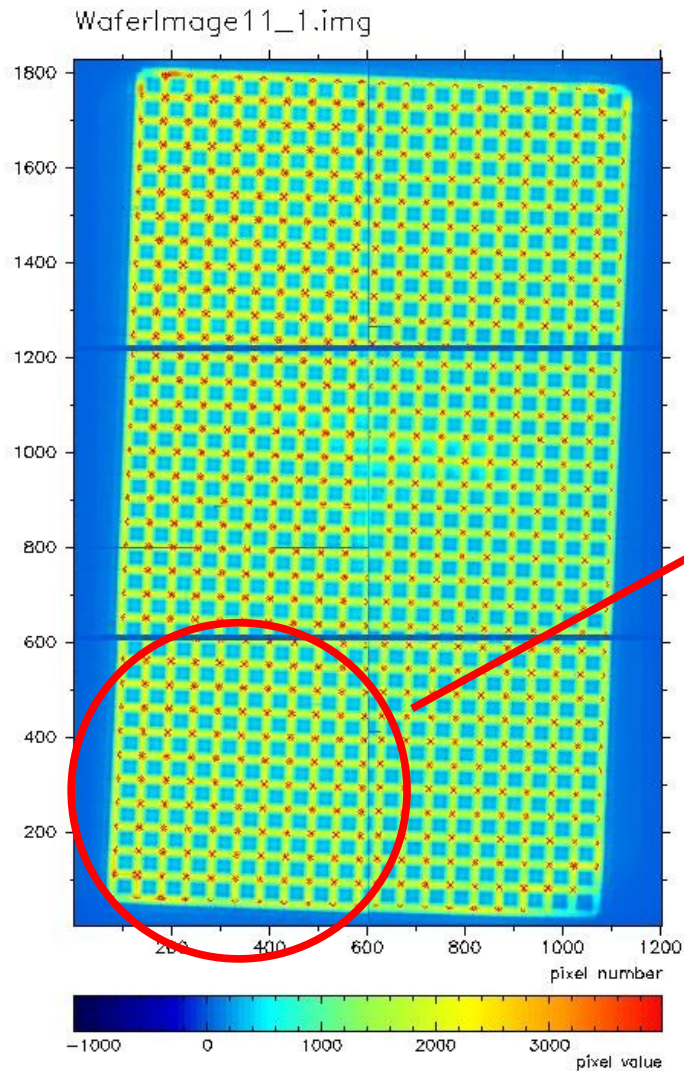
- 2 pairs of lines to measure position and orientation between 2 CCDs
- Accuracy limited by the systematics errors

CCD number	Theta (rad)	err Theta	Gap x (pxls)	err Gap x	Gap y (pxls)	err Gap y
CCD2-CCD1	-0.000595	0.000055	-1.245	0.020	11.398	0.019
xxx						
CCD2-CCD3	-0.000698	0.000055	0.503	0.020	-11.018	0.019
CCD2-CCD4	0.000801	0.000055	-10.850	0.020	10.279	0.019
CCD2-CCD5	0.002194	0.000055	-11.574	0.020	1.742	0.019
CCD2-CCD6	0.005530	0.000055	-13.967	0.020	-9.432	0.019

less than 0.15 ppm for the pion mass !

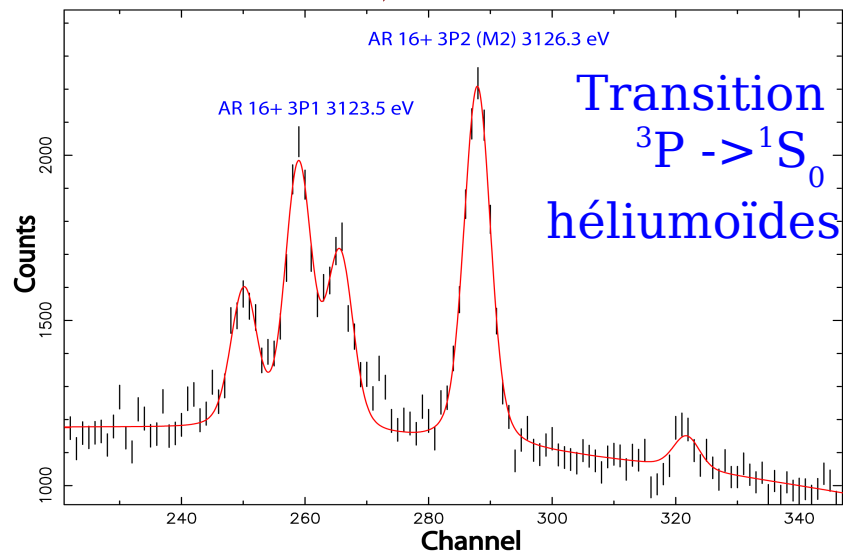
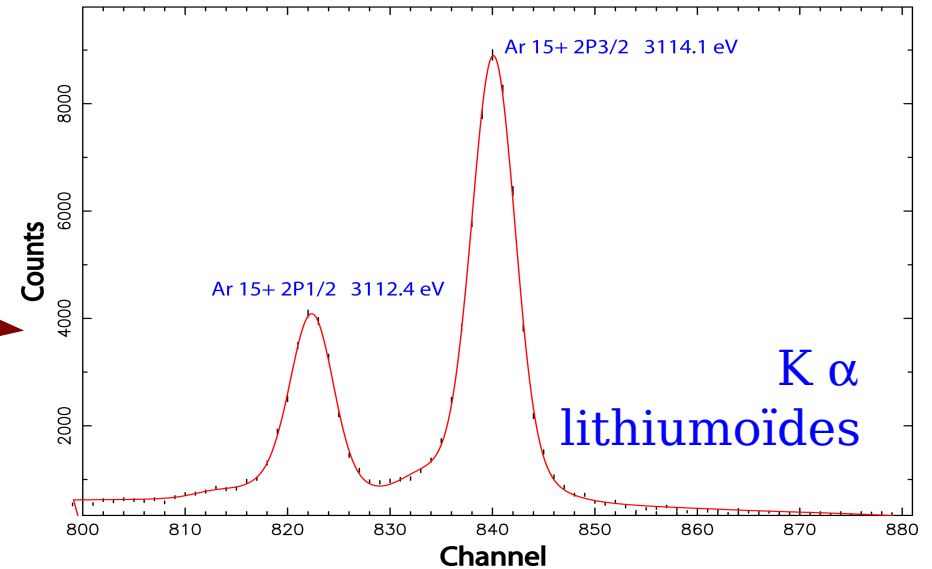
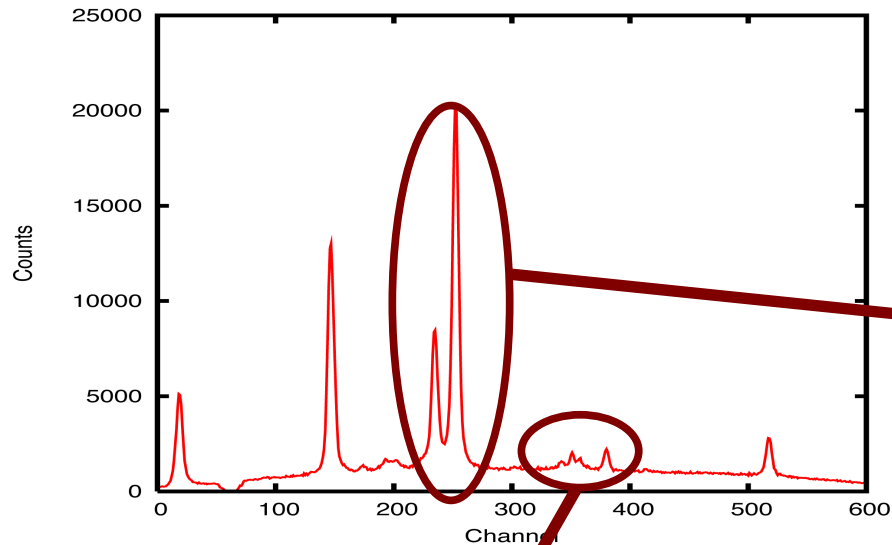
M. Trasinelli, et al., to be published

CCD array measurement



Selected zones for the liner fit

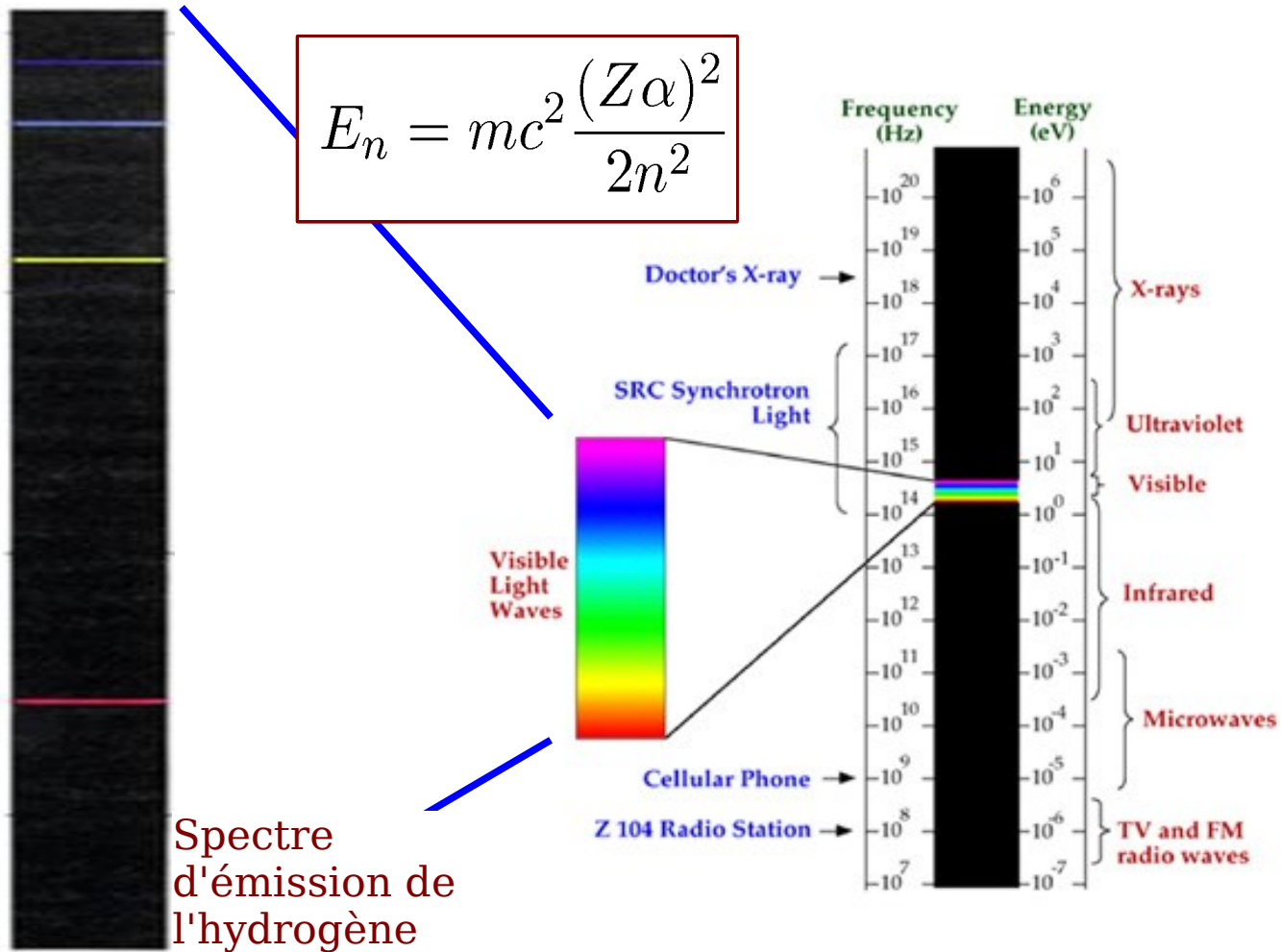
Mesure des énergies de transition des ions héliumoides



Résultats:

- Chi2/No.Ch $\sim 1-2$
- Précision de la mesure de la position de pics : 0.02 pixels \rightarrow quelques meV

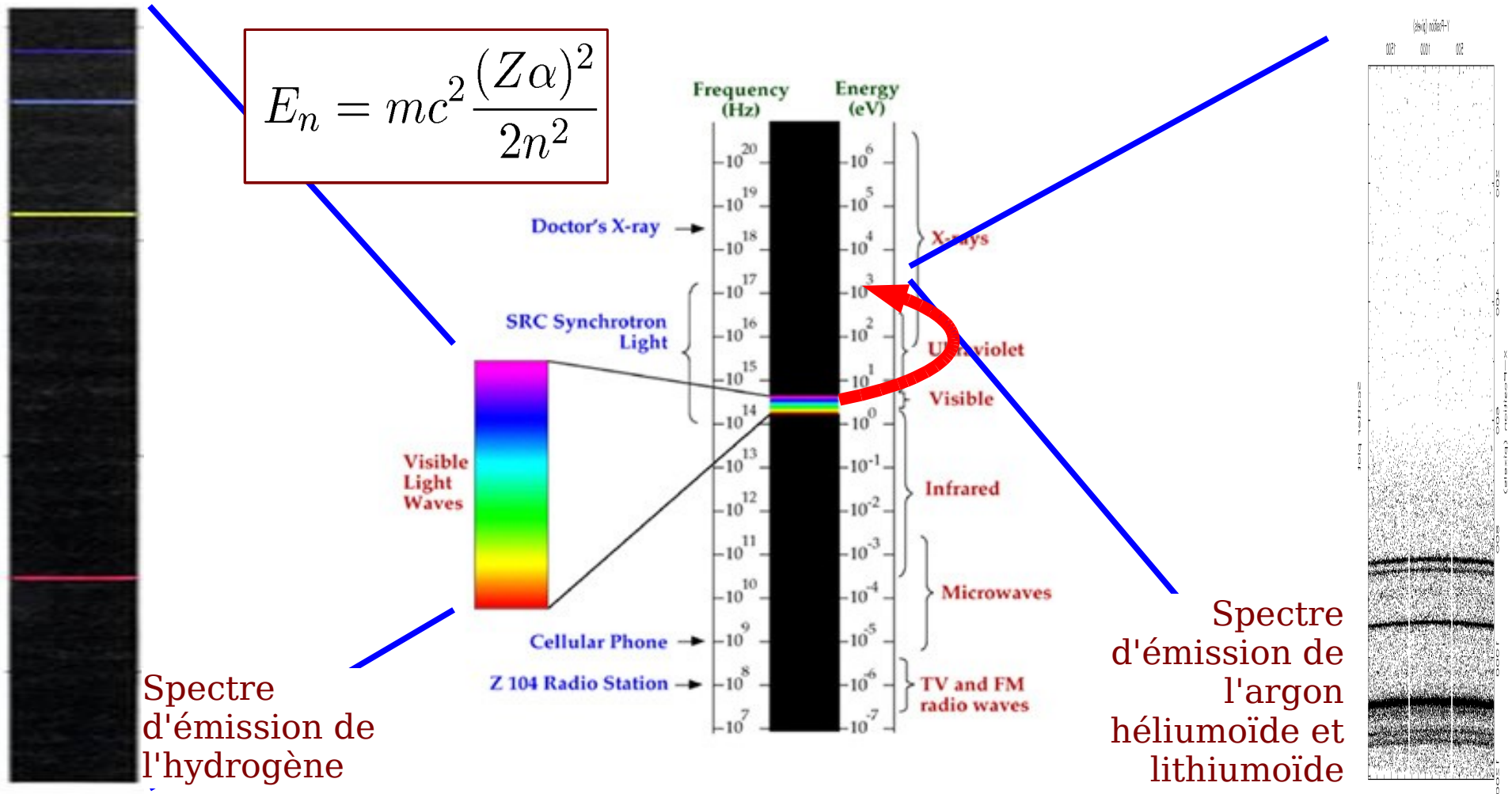
Caractéristique de la lumière émise



Atomes "normaux":

- Émission des photon dans le domaine visible

Caractéristique de la lumière émise



Atomes "normaux":

- Émission des photon dans le domaine visible

Atomes pioniques et ions multichargés:

- Plus grand écart entre niveaux atomiques
- Émission dans le domaine X (1-10 keV)