

Perspectives expérimentales pour les collisions électron-ion avec l'anneau cryogénique CSR

Claude Krantz

Max Planck Institute for Nuclear Physics

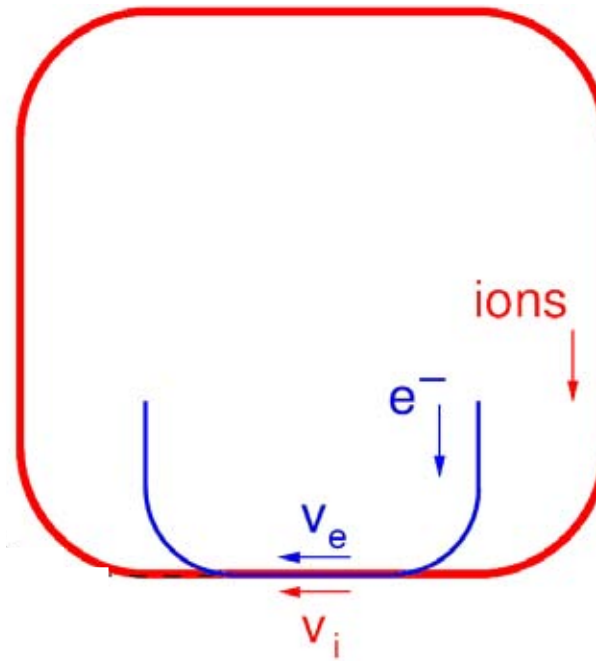
Collisions électroniques et anneaux de stockage

L'anneau cryogénique CSR

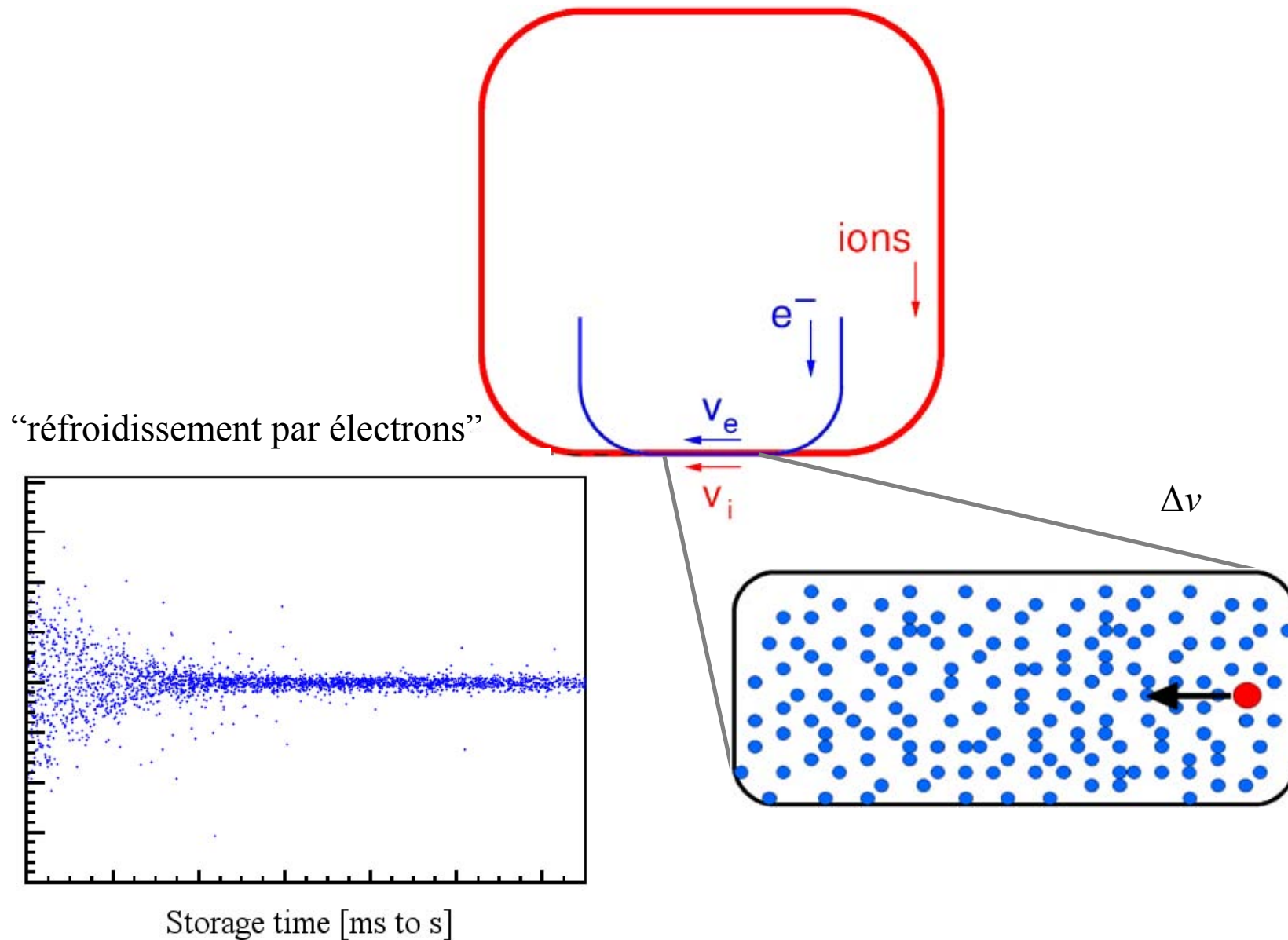
Perspectives expérimentales



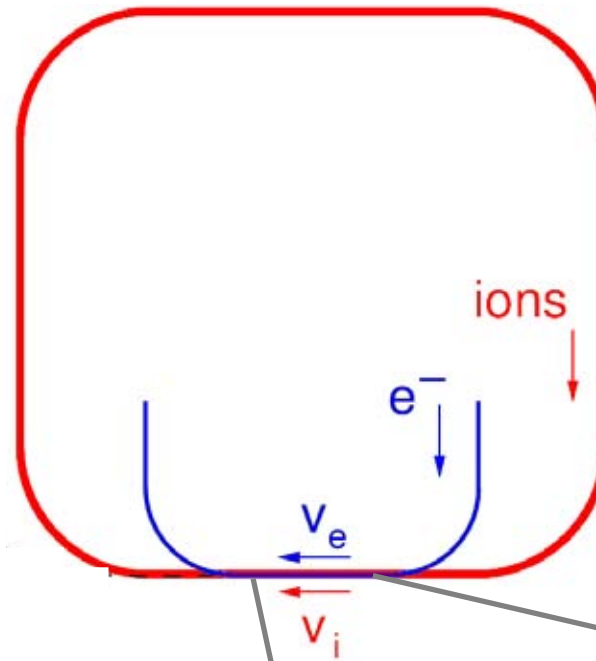
Collisions électroniques



Collisions électroniques



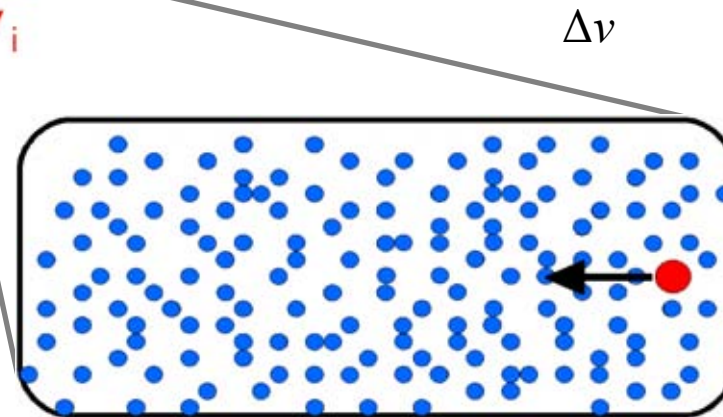
Collisions électroniques



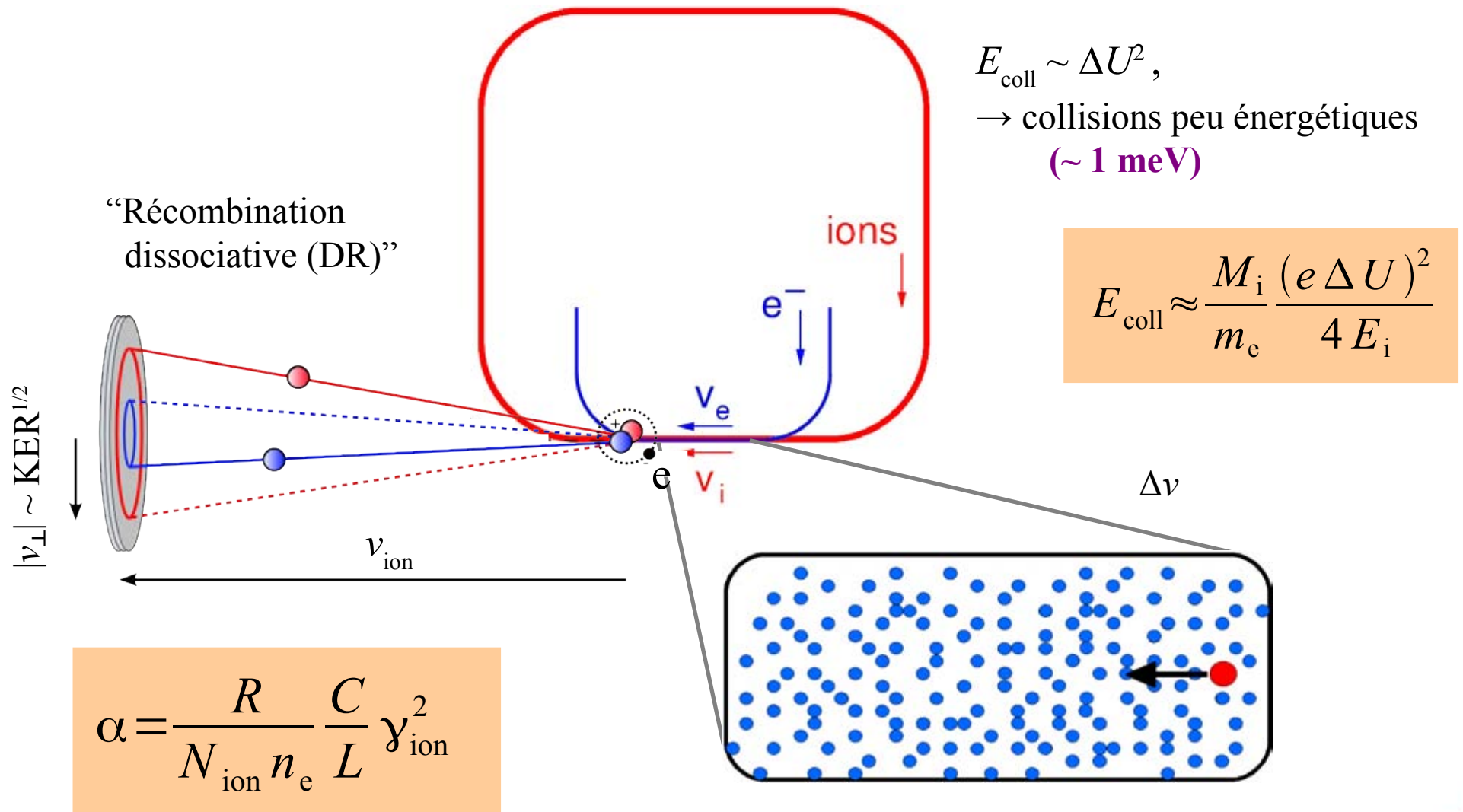
$E_{\text{coll}} \sim \Delta U^2,$
 $\rightarrow$ collisions peu énergétiques
 ($\sim 1 \text{ meV}$)

$$E_{\text{coll}} \approx \frac{M_i}{m_e} \frac{(e \Delta U)^2}{4 E_i}$$

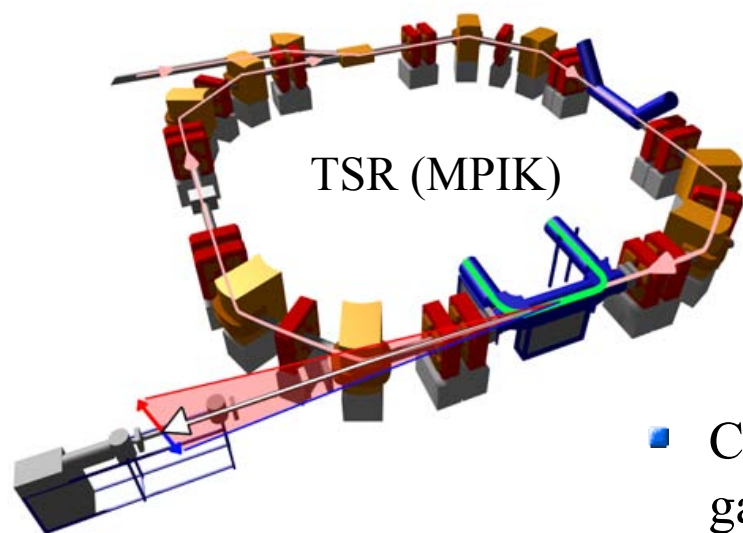
$$\alpha = \frac{R}{N_{\text{ion}} n_e} \frac{C}{L} \gamma_{\text{ion}}^2$$



Collisions électroniques



Collisions électroniques



- Chimie interstellaire gazeuse :

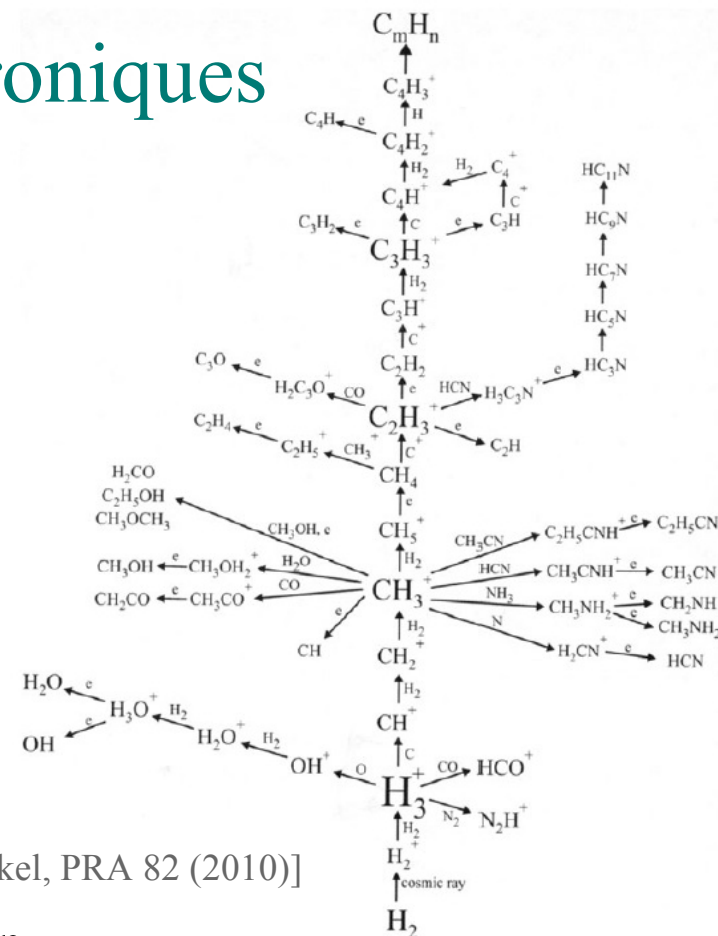


e.g. [Petrignani, PRA 83 (2011); Kreckel, PRA 82 (2010)]

- ## ■ Produits énergétiques en environnement froid :



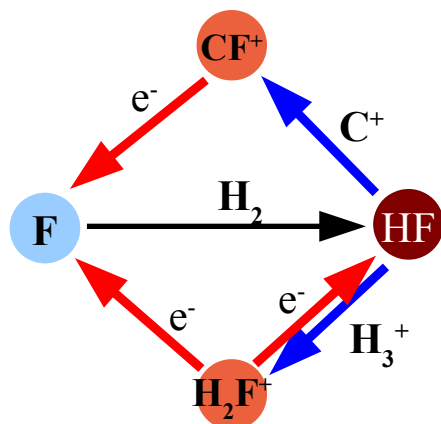
- Indicateur polaire de H_2 : HF



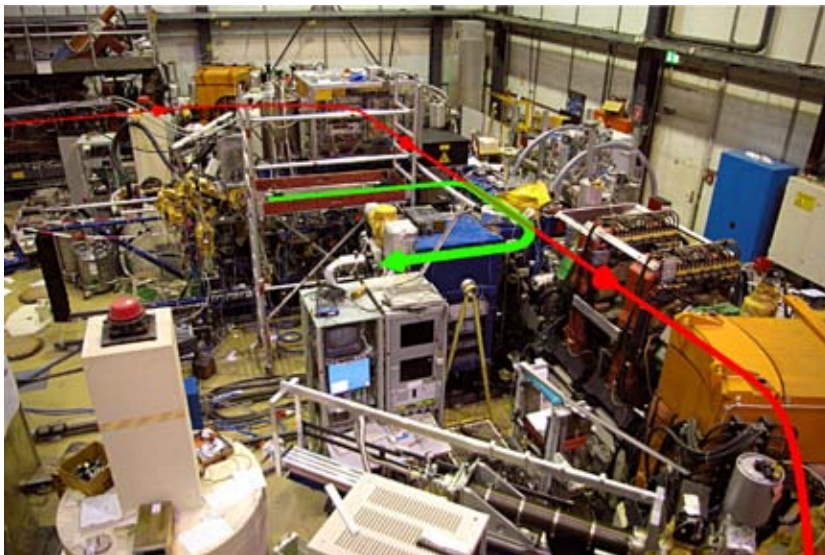
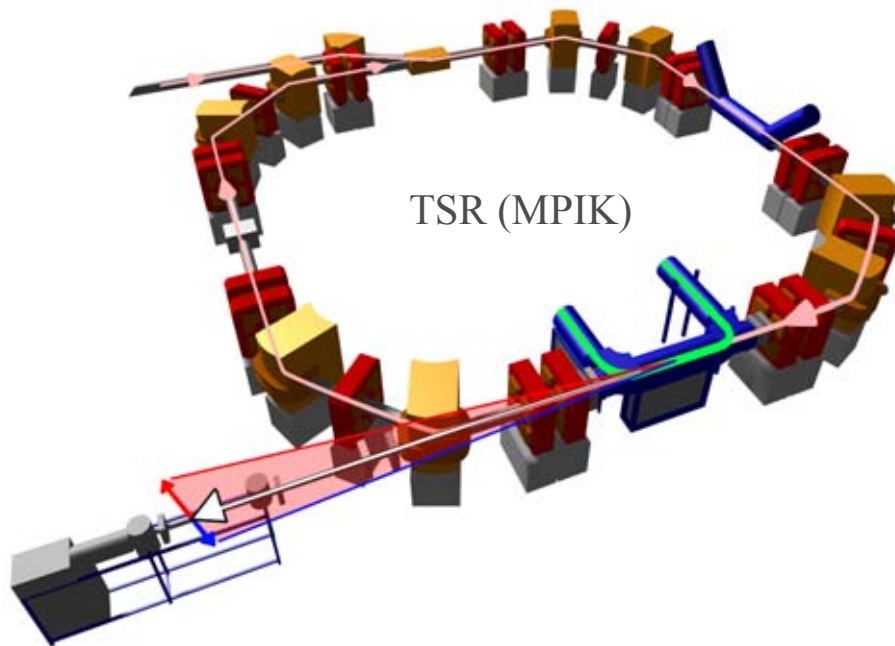
[Buhr, PRL 105 (2010)]

[Mendes, ApJ Lett. 746 (2012)]

[Novotný, t.b.p.]



Collisions électroniques



- Rigidité maximale: $r B_{\max}$
TSR: $\approx 1.4 \text{ Tm}$

- Vitesse maximale:

$$v_{\max} = \frac{q}{M} r B_{\max}$$

e.g.

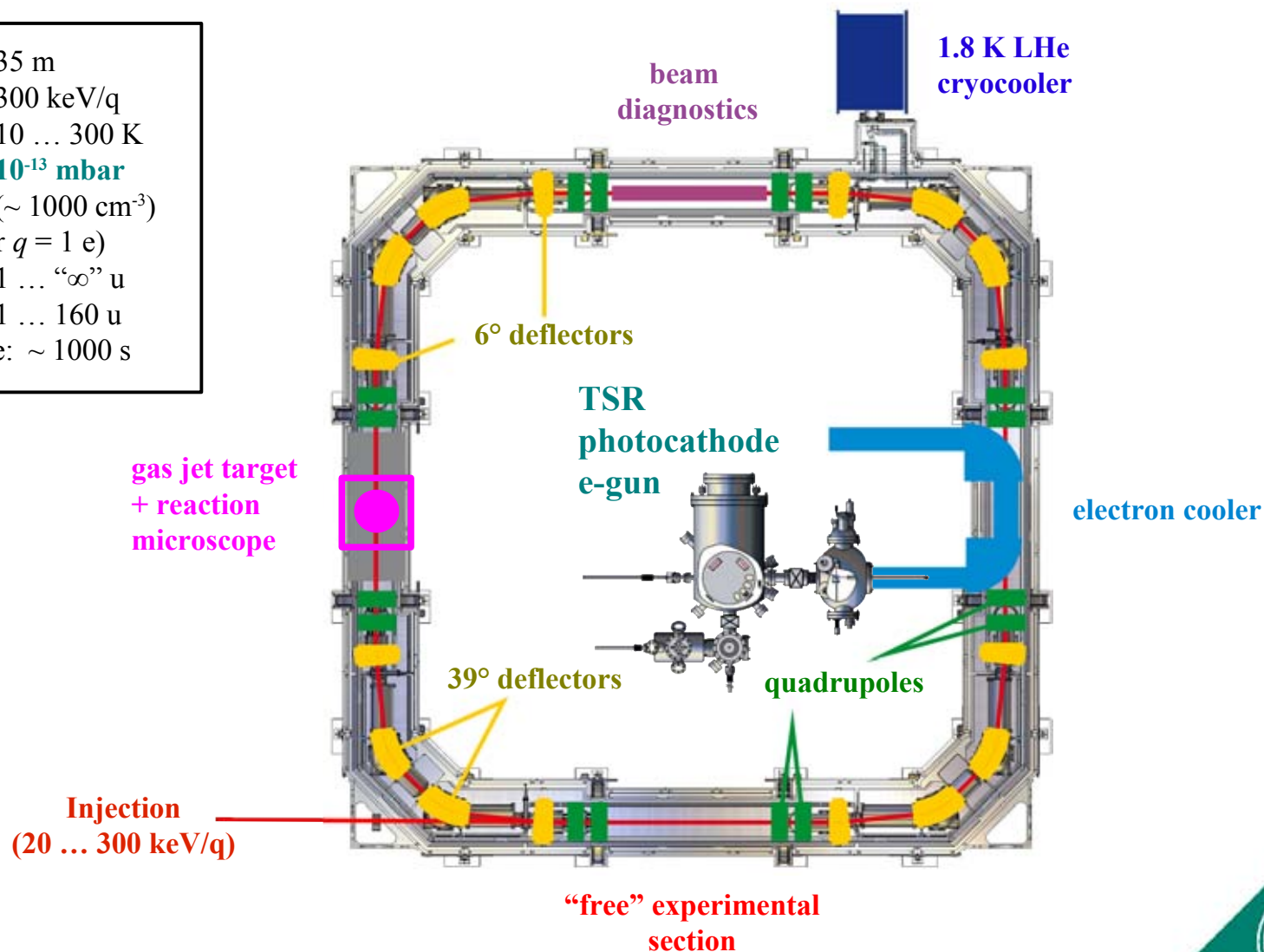
H_3^+	(3 u)	: $v \sim 0.054 \text{ c}$
CHD^+	(15 u)	: $v \sim 0.030 \text{ c}$
D_3O^+	(22 u)	: $v \sim 0.021 \text{ c}$
DCND^+	(30 u)	: $v \sim 0.015 \text{ c}$
HCl^+	(36 u)	: $v \sim 0.012 \text{ c}$
D_2Cl^+	(39 u)	: $v \sim 0.010 \text{ c}$

- Durée de stockage **dégrade ...**
- M/q maximal :
durée de stockage
< temps de relaxation

L'anneau cryogénique CSR

CSR: Cryogenic Storage Ring

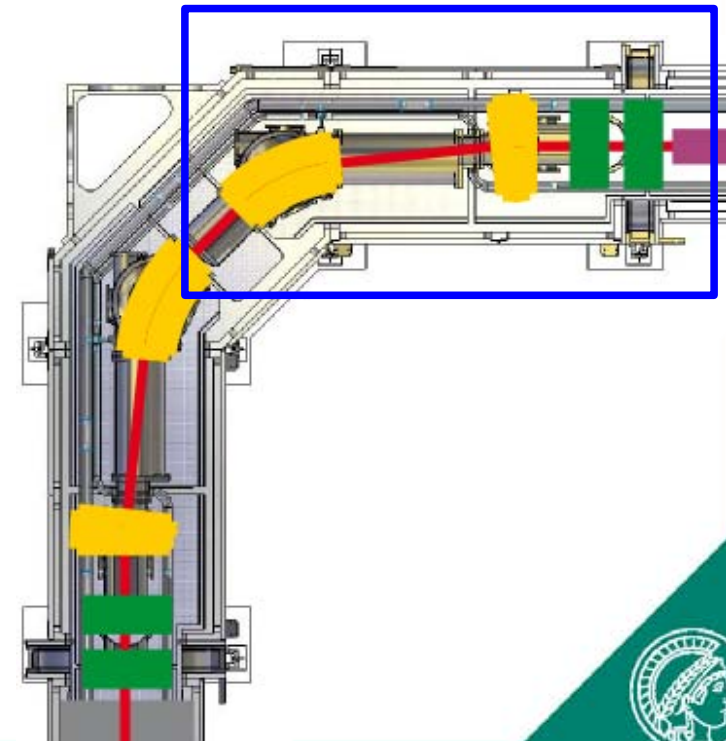
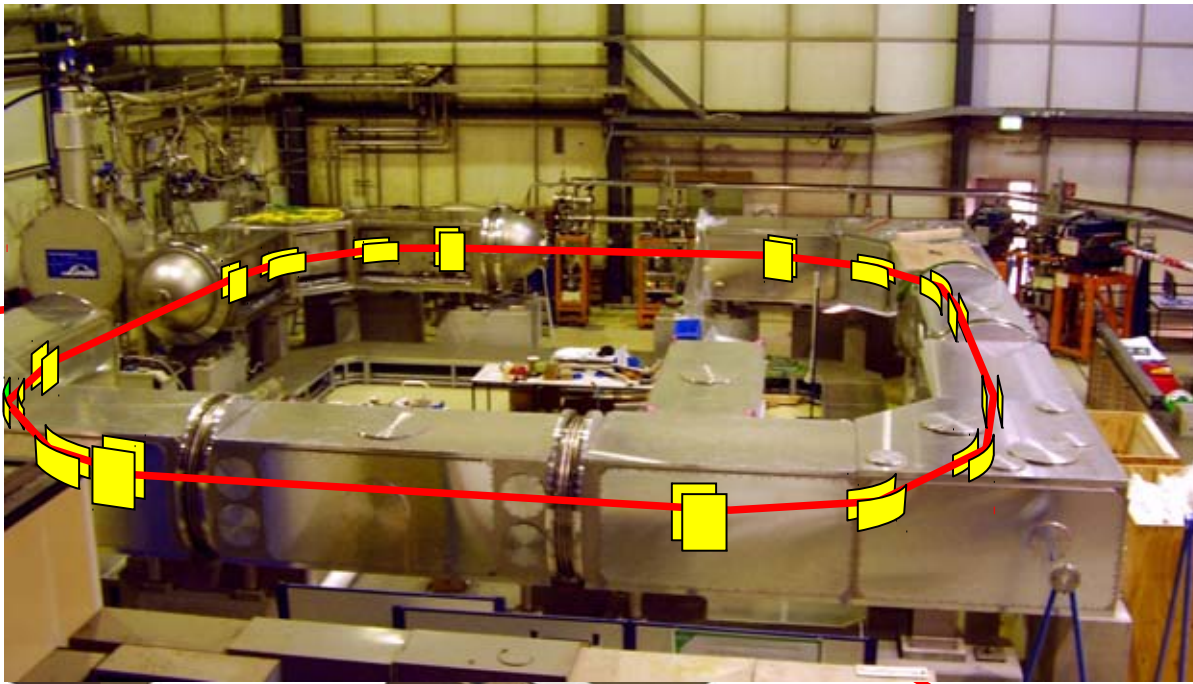
circonférence: 35 m
 énergie faisceau: 300 keV/q
 température: 10 ... 300 K
 vide (@ 10 K): **10^{-13} mbar**
 ($\sim 1000 \text{ cm}^{-3}$)
 masses ions (pour $q = 1 \text{ e}$)
 non refroidis: 1 ... " ∞ " u
 refroidis: 1 ... 160 u
 durée de stockage: $\sim 1000 \text{ s}$



L'anneau cryogénique CSR

Guidage et focalisation électrostatique

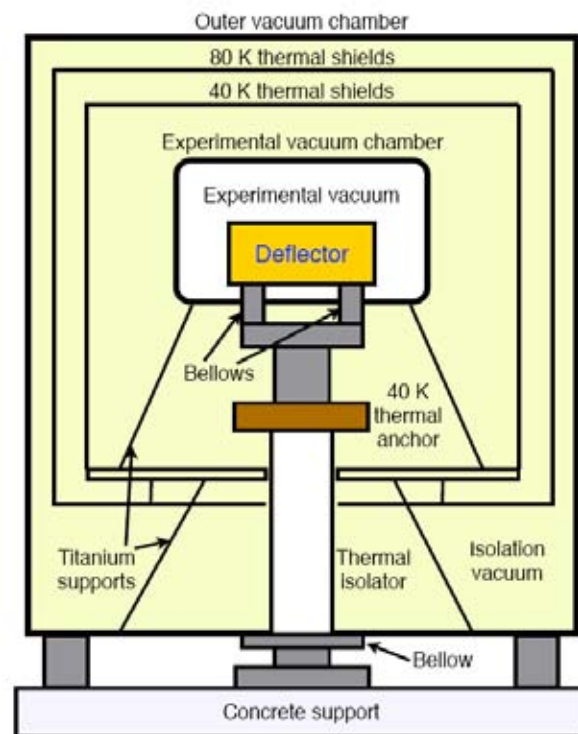
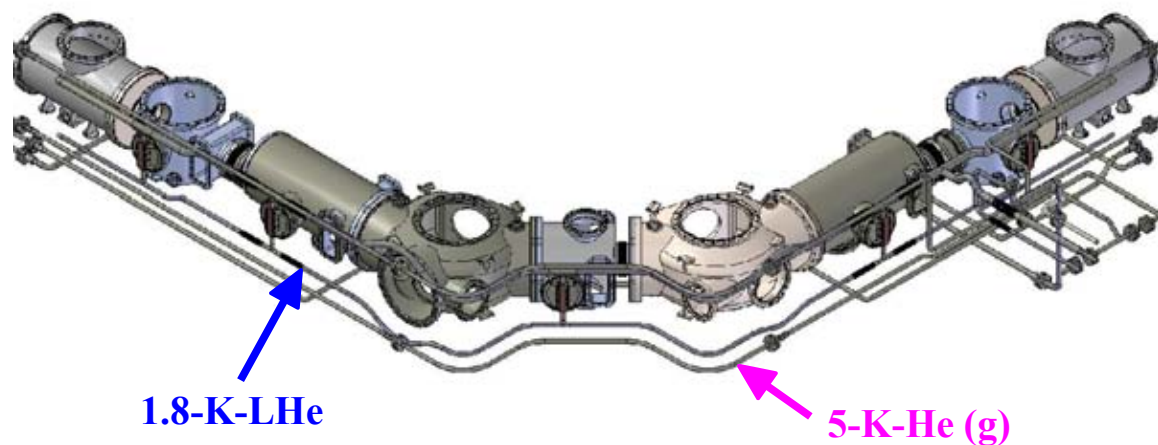
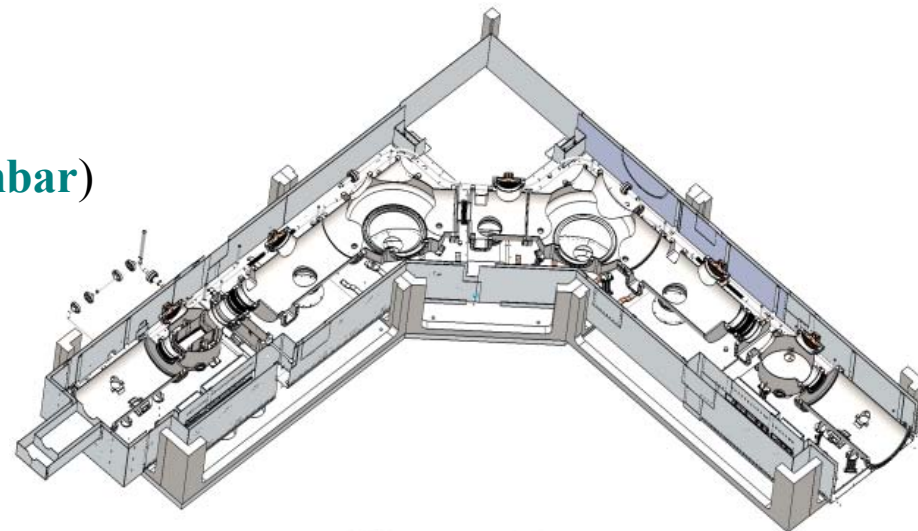
- anneau à quadruple symétrie
quatre secteurs optiques identiques
- 4 x 2 paires de lentilles **quadrupôles**
- 4 x 2 **défecteurs 6°** (20 kV)
- 4 x 2 **défecteurs 39°** (20 kV)



L'anneau cryogénique CSR

Cryostat

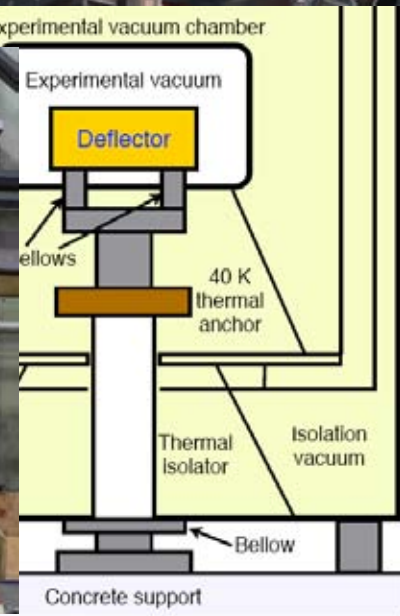
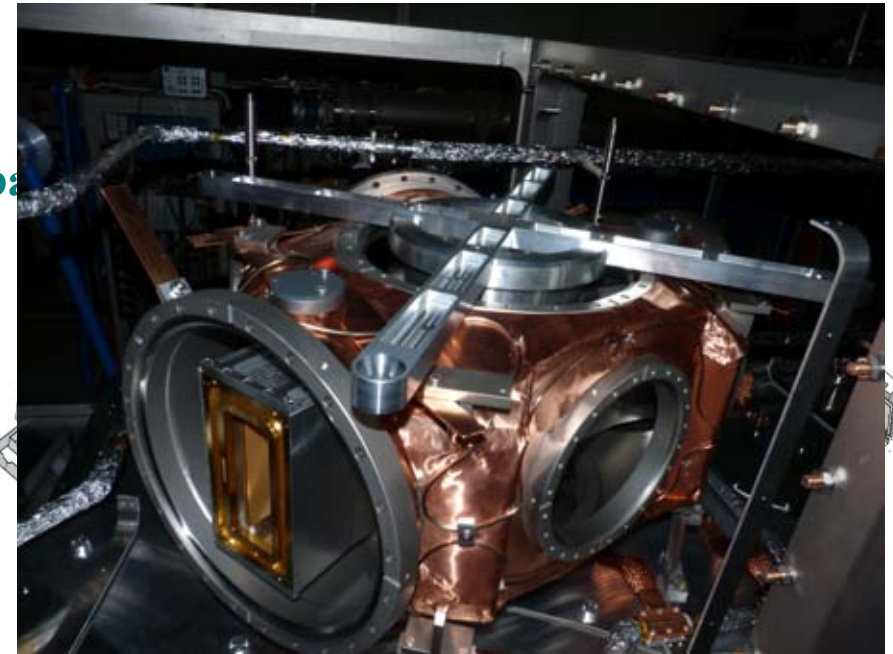
- chambre à vide intérieure (~ 10 K, 10^{-13} mbar)
refroidi par He suprafluide (20 W).
- 2 écrans protecteurs (40 et 80 K)
refroidi par He (g, 5 K) (600 W)
- “superisolation”
- chambre à vide extérieure



L'anneau cryogénique CSR

Cryostat

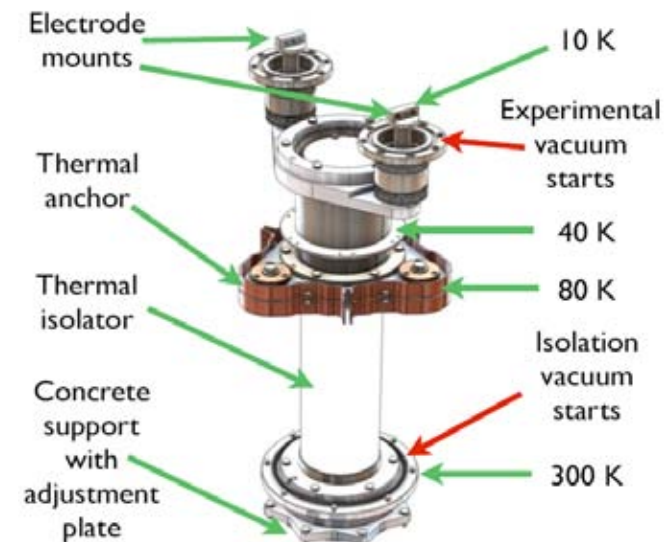
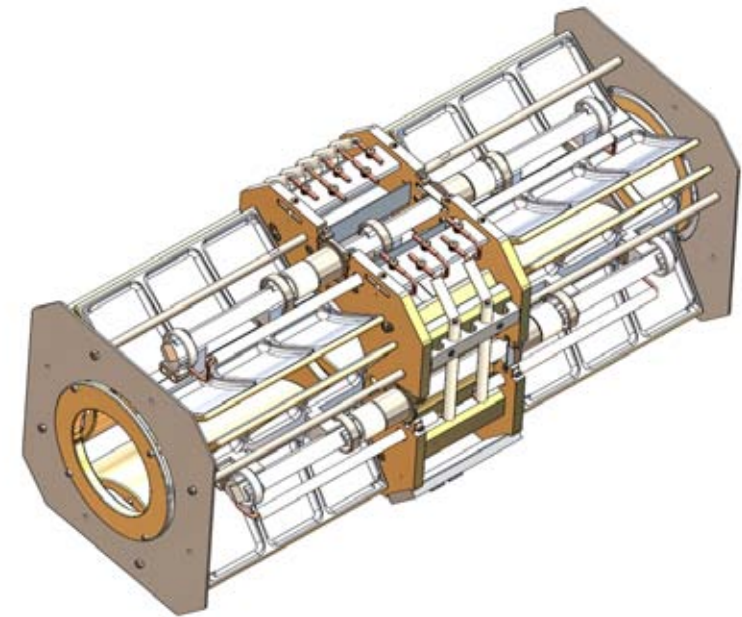
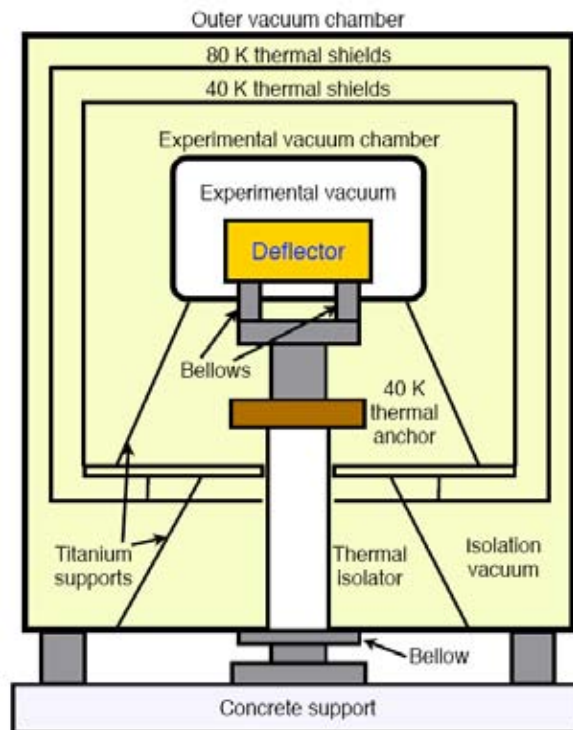
- chambre a vide interieure (~ 10 K, 10^{-13} mba) refroidi par He suprafluide (20 W).
- 2 écrans protecteurs (40 et 80 K) refroidi par He (g, 5 K) (600 W)
- “superisolation”
- chambre à vide exterieure



L'anneau cryogénique CSR

Eléments optiques

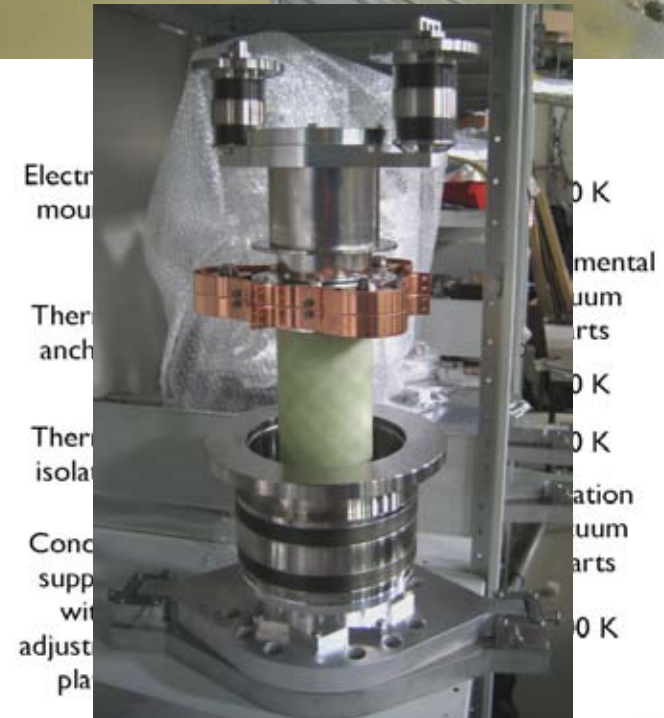
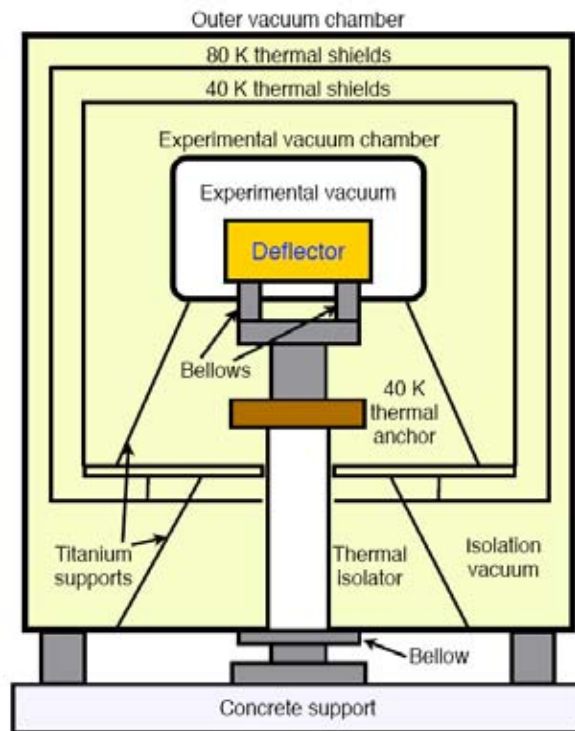
- Connexion **thermique** vers 10 K ...
- ... mais **découplage mécanique**.
(retrait thermique)



L'anneau cryogénique CSR

Eléments optiques

- Connexion **thermique** vers 10 K ...
- ... mais **découplage mécanique**.
(retrait thermique)



Système de refroidissement par électrons

Entièrement cryogénique → **Cryostat, isolation ...**

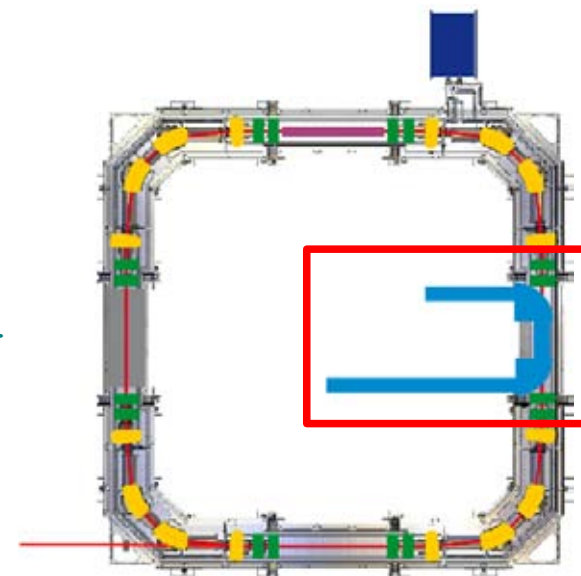
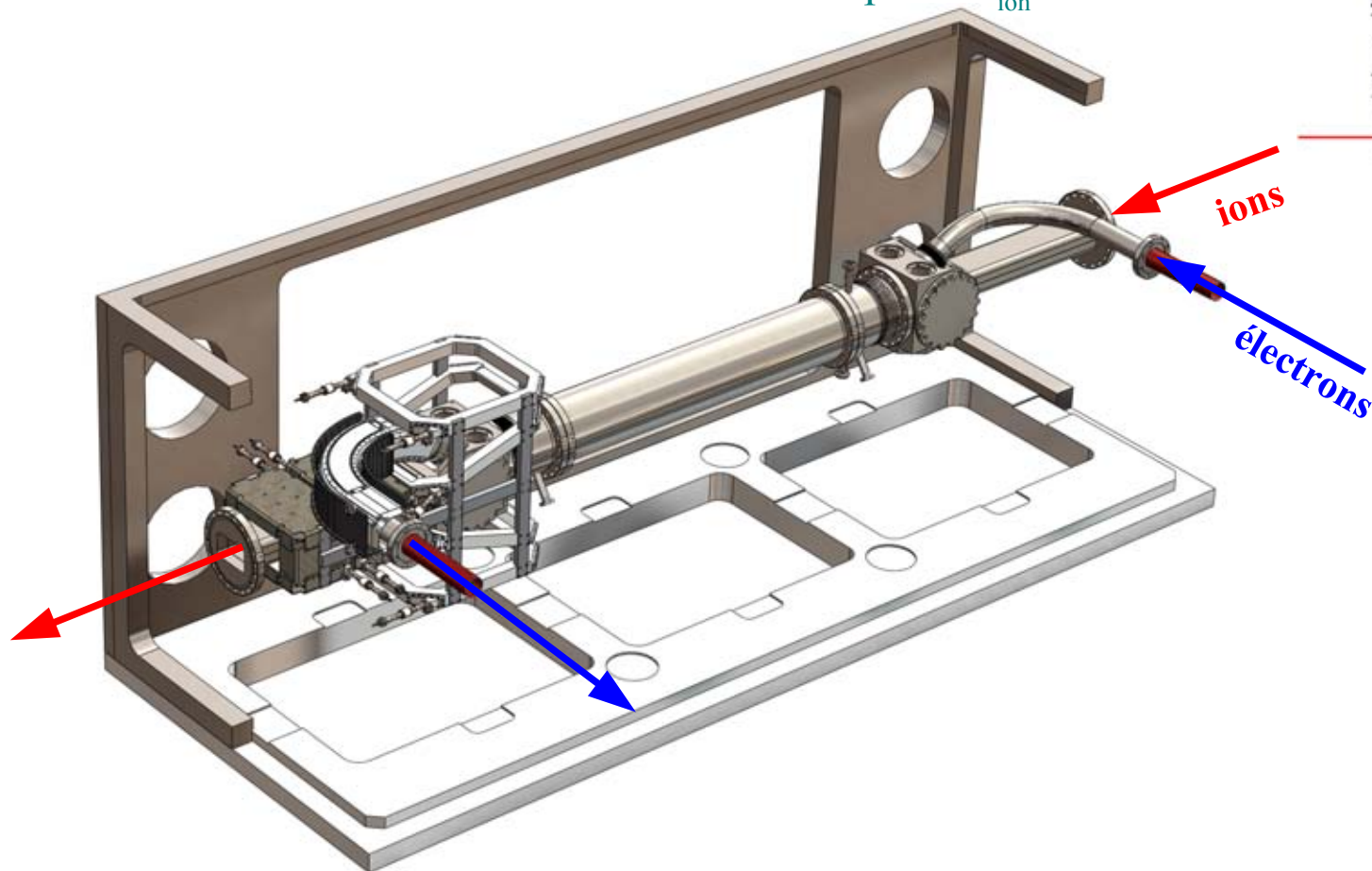
Limite énergétique CSR : → vitesse des électrons très petite

$$E_{\text{ion}}/Z_{\text{ion}} = 300 \text{ keV}$$

160 eV pour p^+

< 20 eV plupart des ions molec.

1 eV pour $M_{\text{ion}} = 160 \text{ u}$



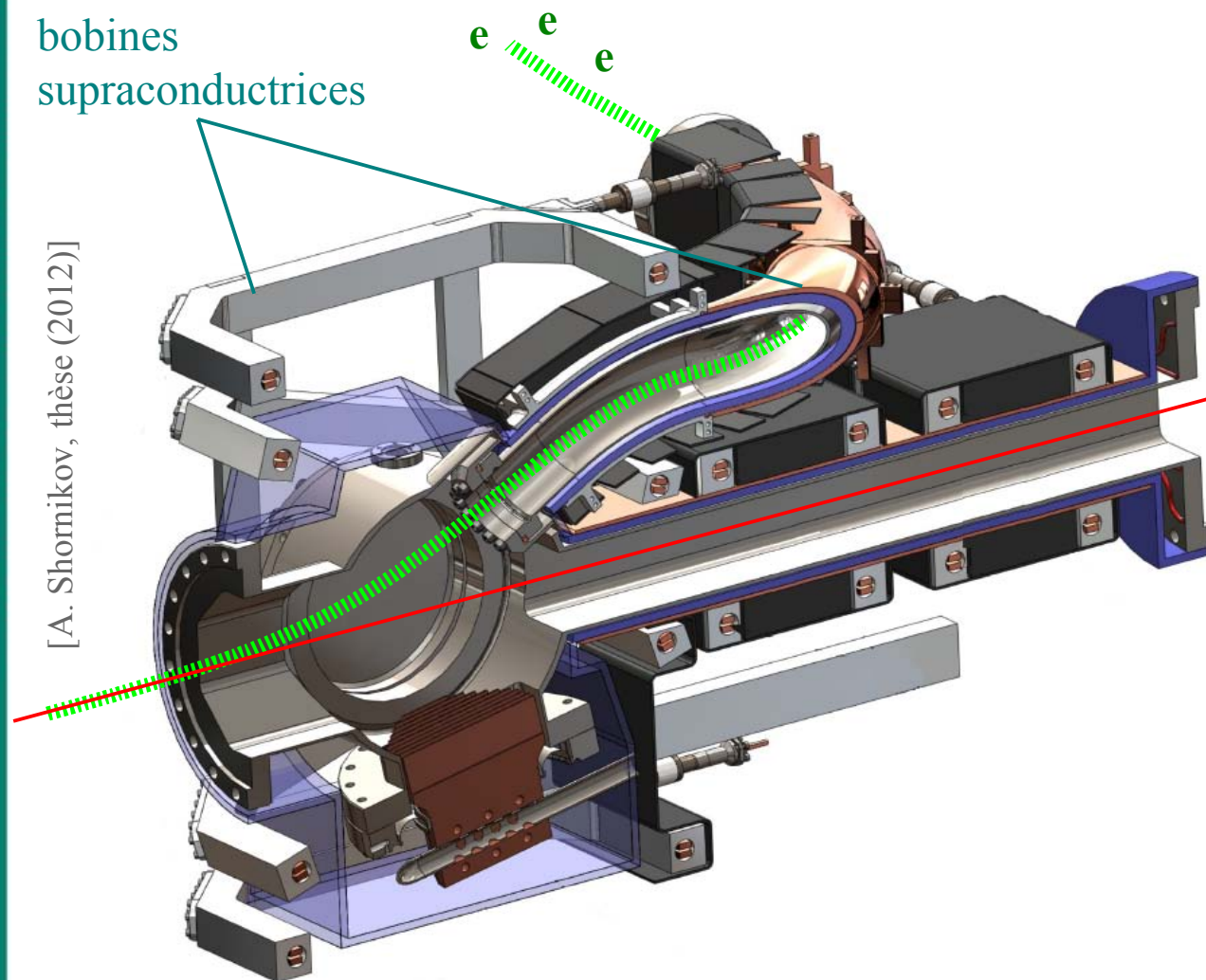
500
km/s

[Shornikov t.b.p.]

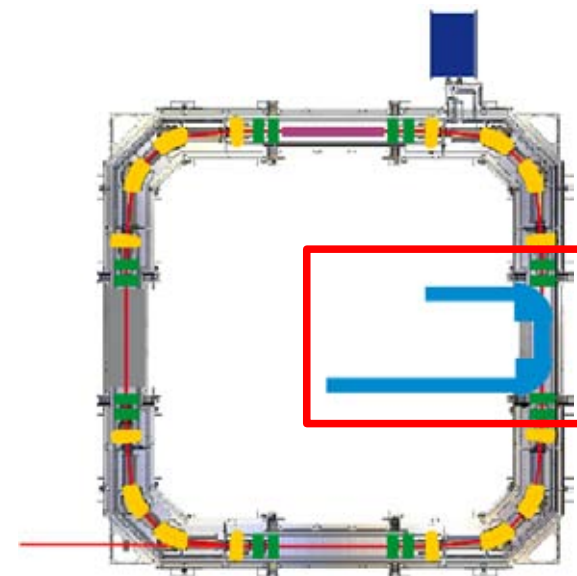
Système de refroidissement par électrons

Réunion/séparation des faisceaux :

bobines
supraconductrices



[A. Shornikov, thèse (2012)]



ion beam

réunion/séparation par **champ magnétique homogène**
(correction de trajectoire)

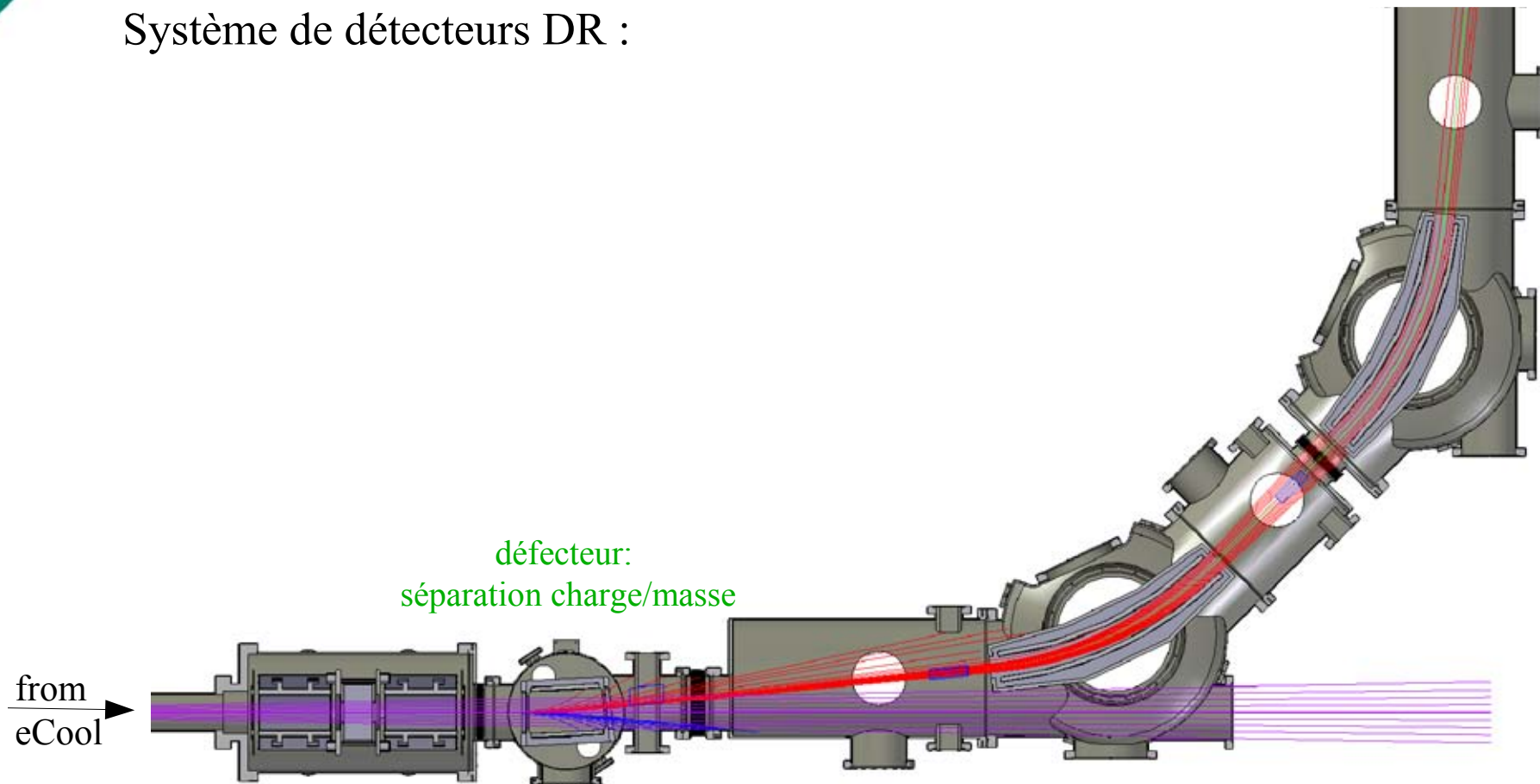
Aiments et chambres
cryogéniques

Supraconducteurs (30 K)
(pas de chauffage du CSR)



Perspectives expérimentales

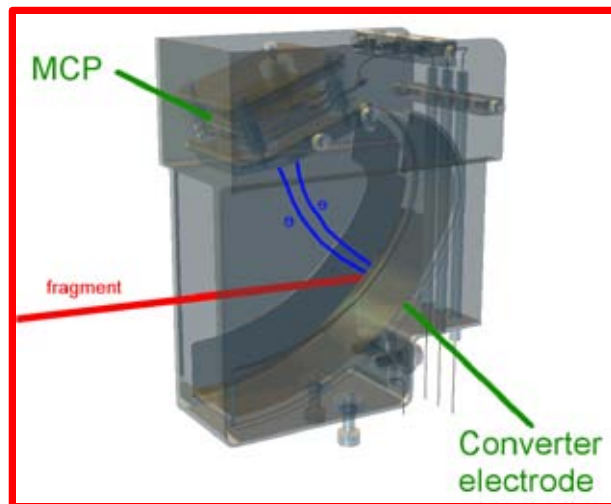
Système de détecteurs DR :



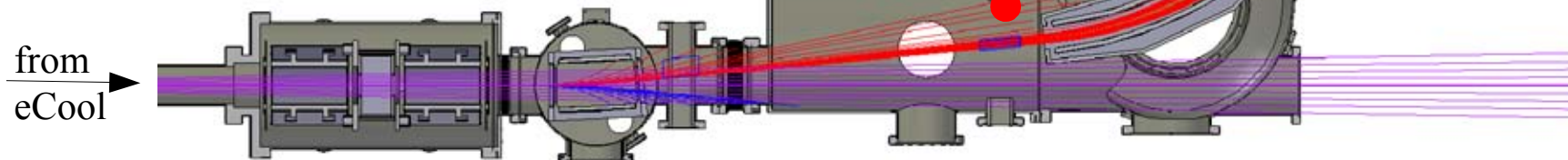
Perspectives expérimentales

Système de détecteurs DR :

détecteurs de produits chargés



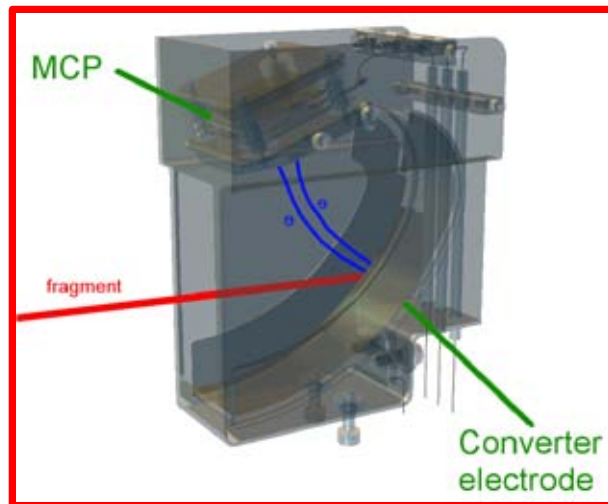
séparation charge/masse



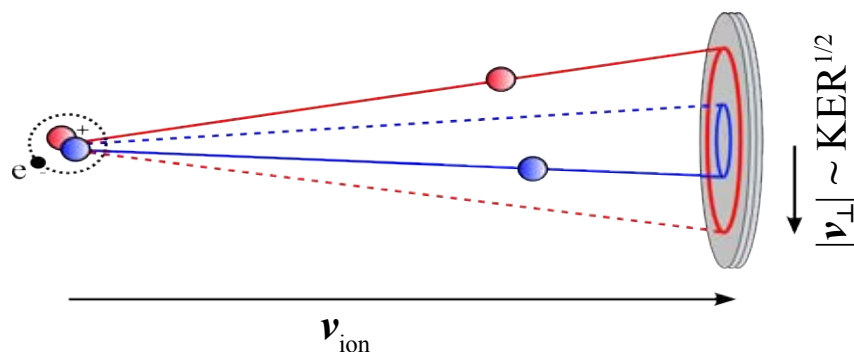
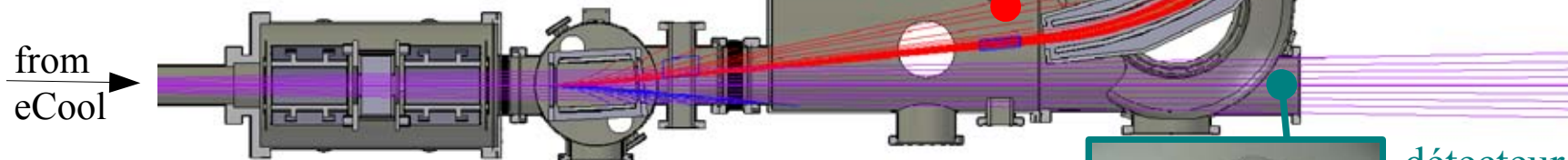
Perspectives expérimentales

Système de détecteurs DR :

détecteurs de produits chargés



séparation charge/masse

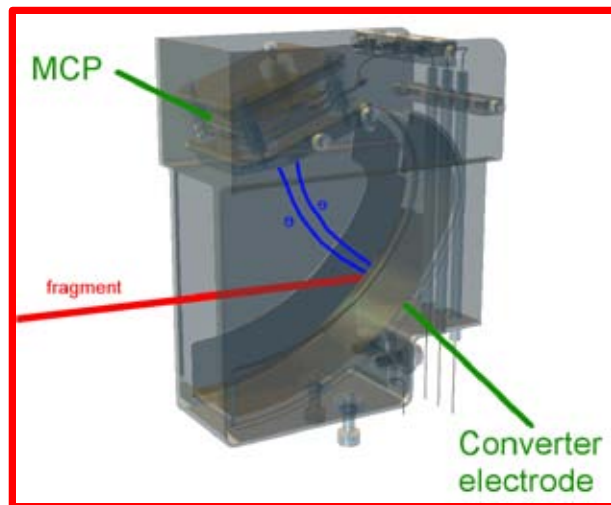


détecteur de neutres :
MCP + écran
phosphor / ligne
à retard

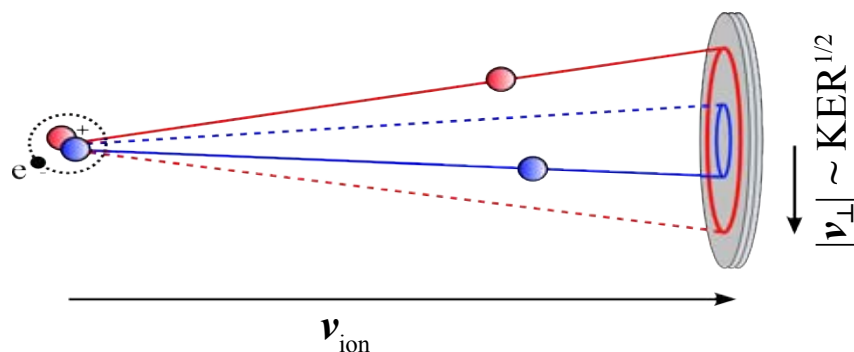
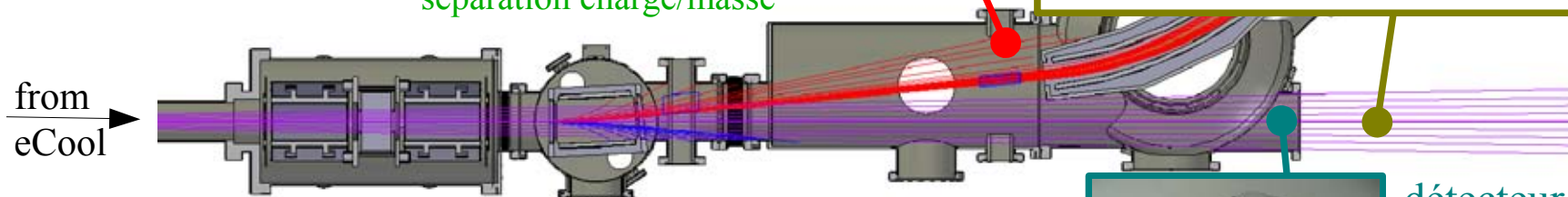
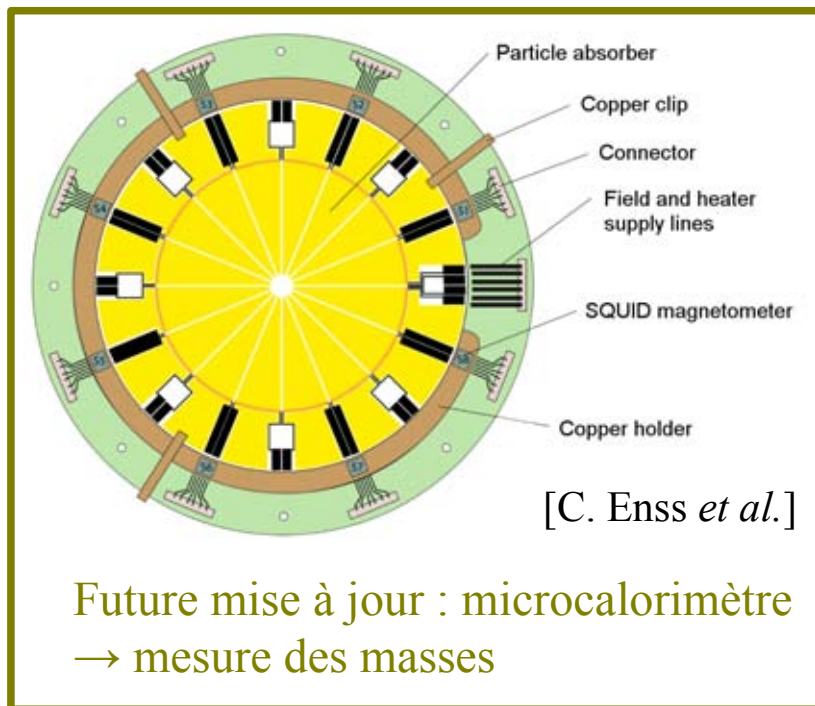
Perspectives expérimentales

Système de détecteurs DR :

détecteurs de produits chargés



séparation charge/masse



détecteur de neutres :
MCP + écran
phosphor / ligne
à retard

Perspectives expérimentales

Optique électrostatique

faible rapports charge/masse
(p.ex.. ions moléculaires)



Qualité du vide (10^{-13} mbar)

Durées de stockage très longues.

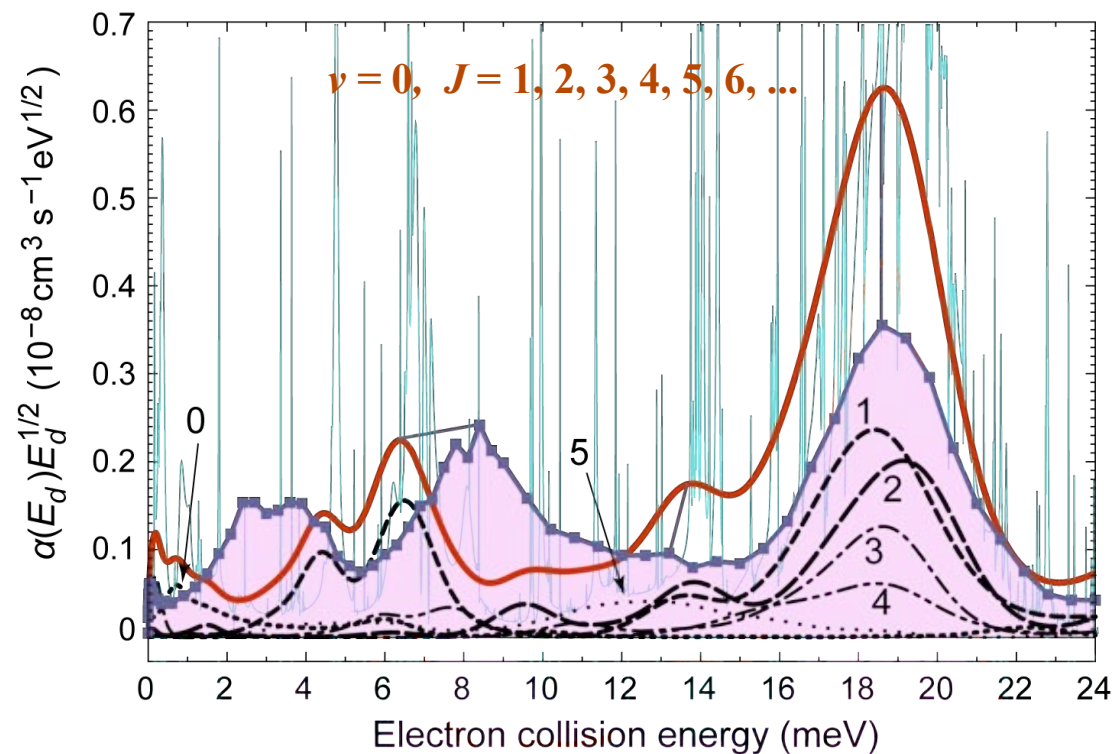
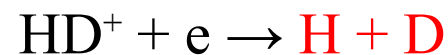
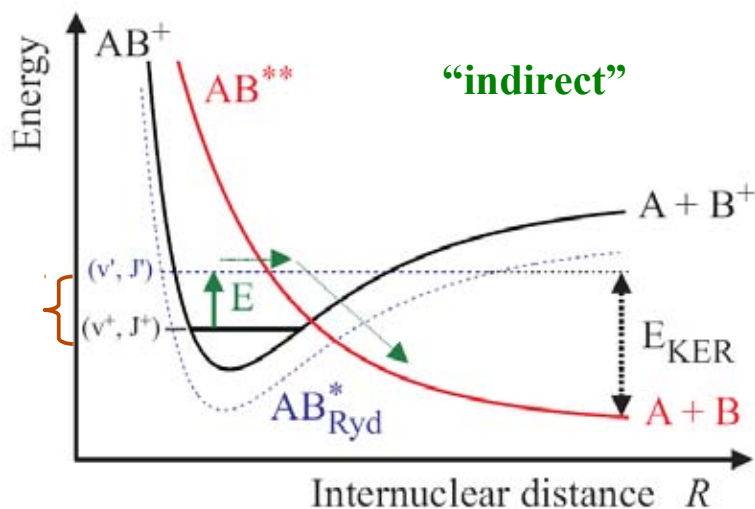
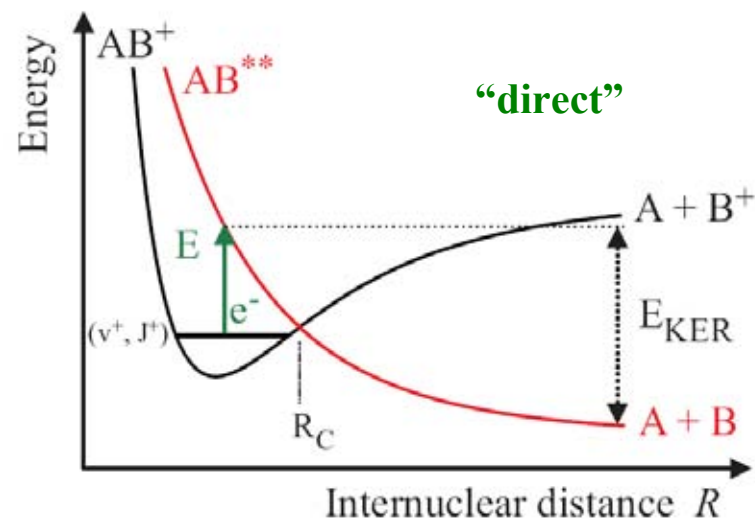
Relaxation dans l'espace des phases
(refroidissement par électrons)

Environnement cryogénique (10 K)

Relaxation interne
(déexcitation radiative, état
fondamental rovibrationnel)



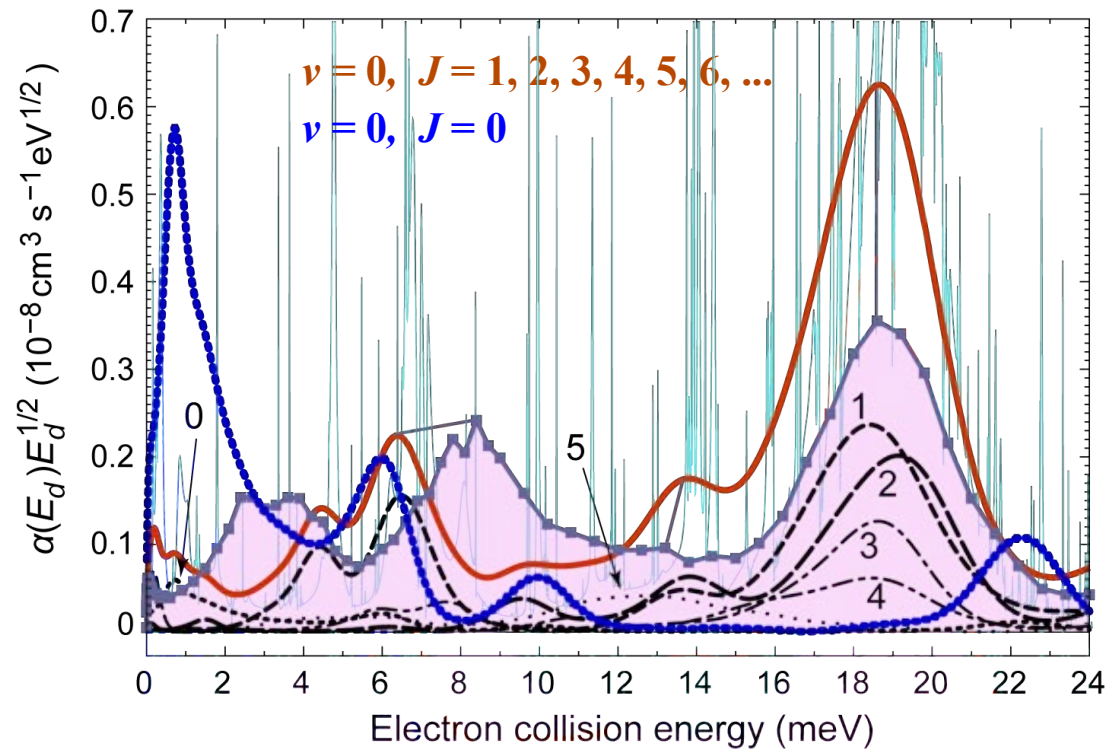
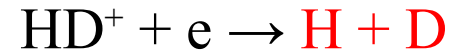
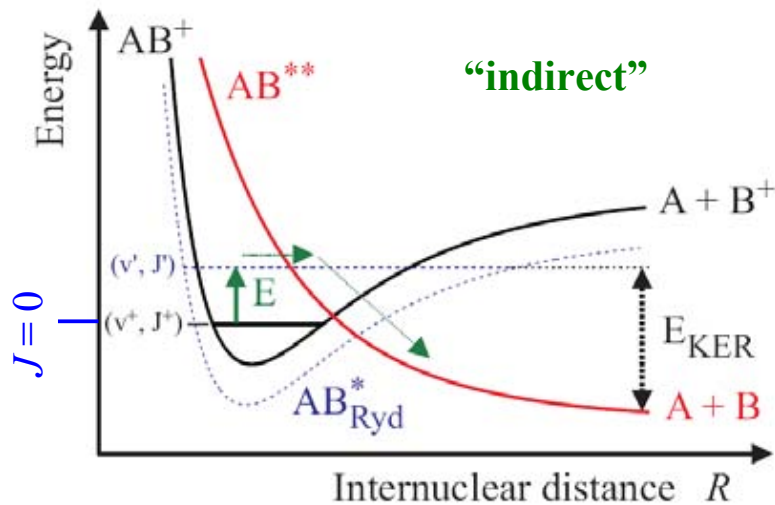
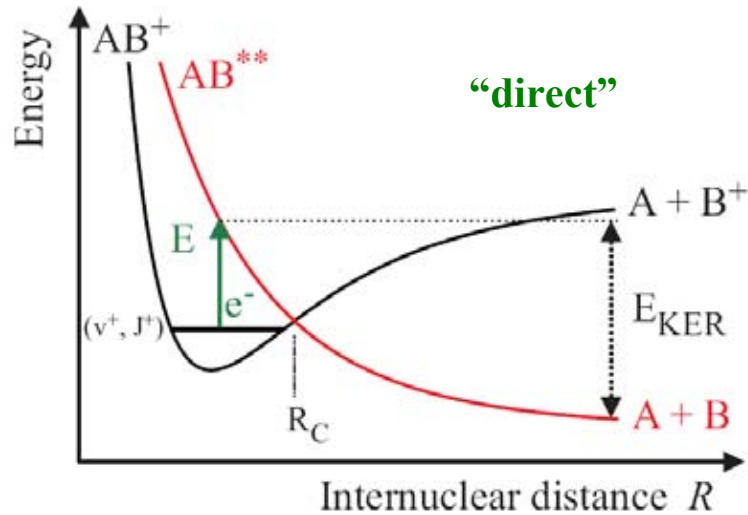
Perspectives expérimentales



Waffeu-Tamo *et al.*, PRA 84 (2011) (0 K)

TSR data ($kT_e \sim 1 \text{ meV}$, $T_{ion} \sim 300 \text{ K}$)

Perspectives expérimentales



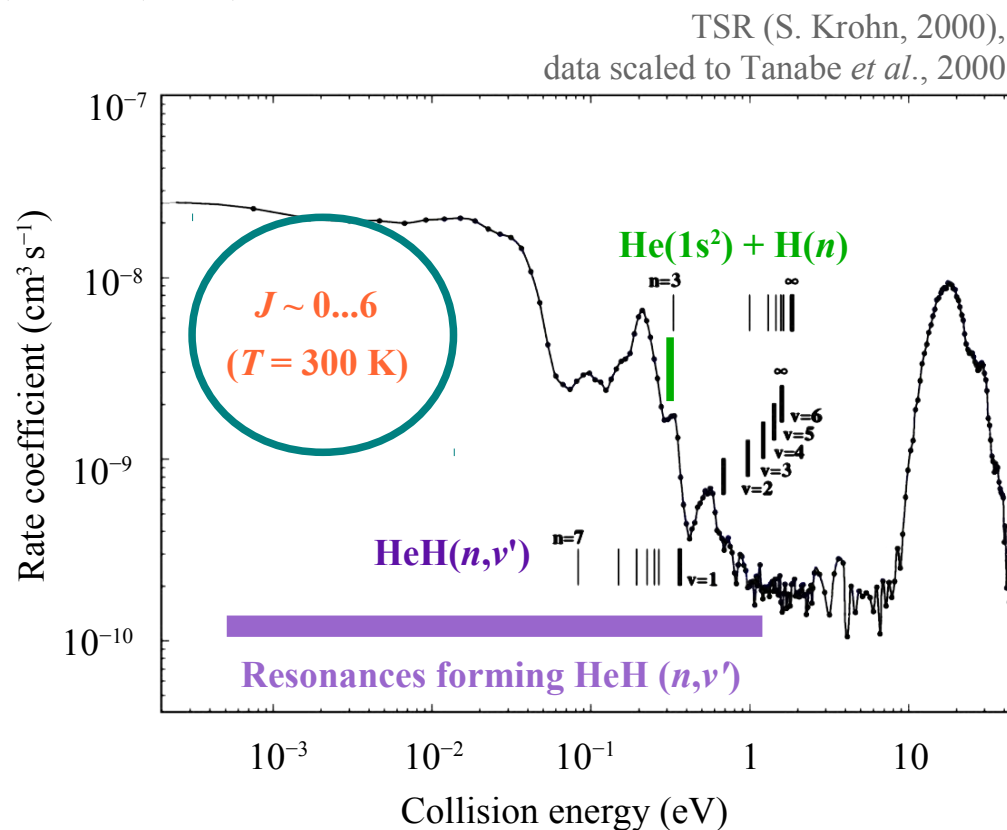
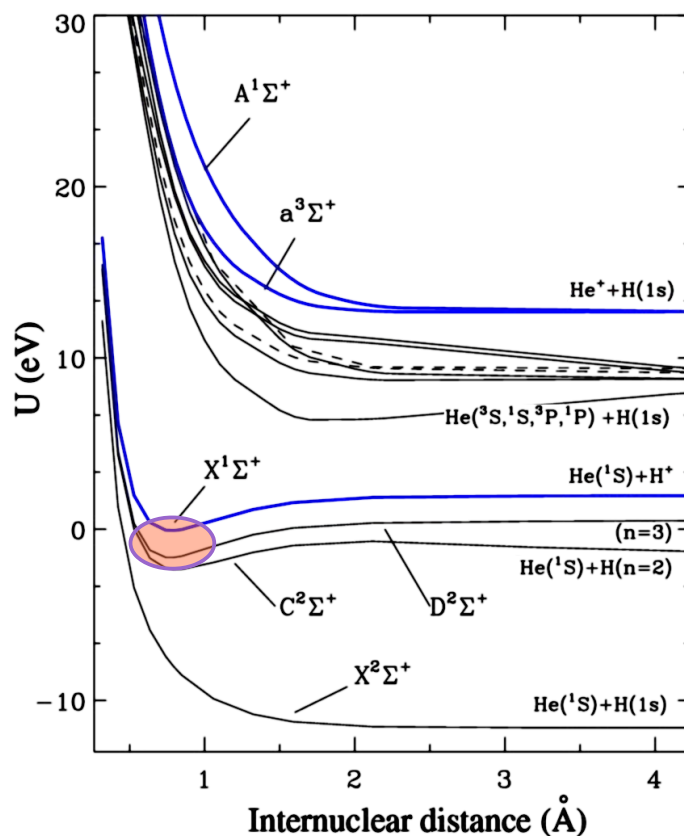
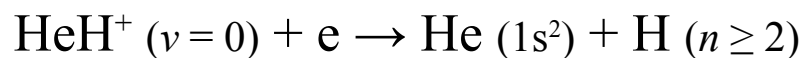
Waffeu-Tamo *et al.*, PRA 84 (2011) (0 K)

TSR data ($kT_e \sim 1 \text{ meV}$, $T_{\text{ion}} \sim 300 \text{ K}$)

CSR prediction ($T_{\text{ion}} = 10 \text{ K}$)

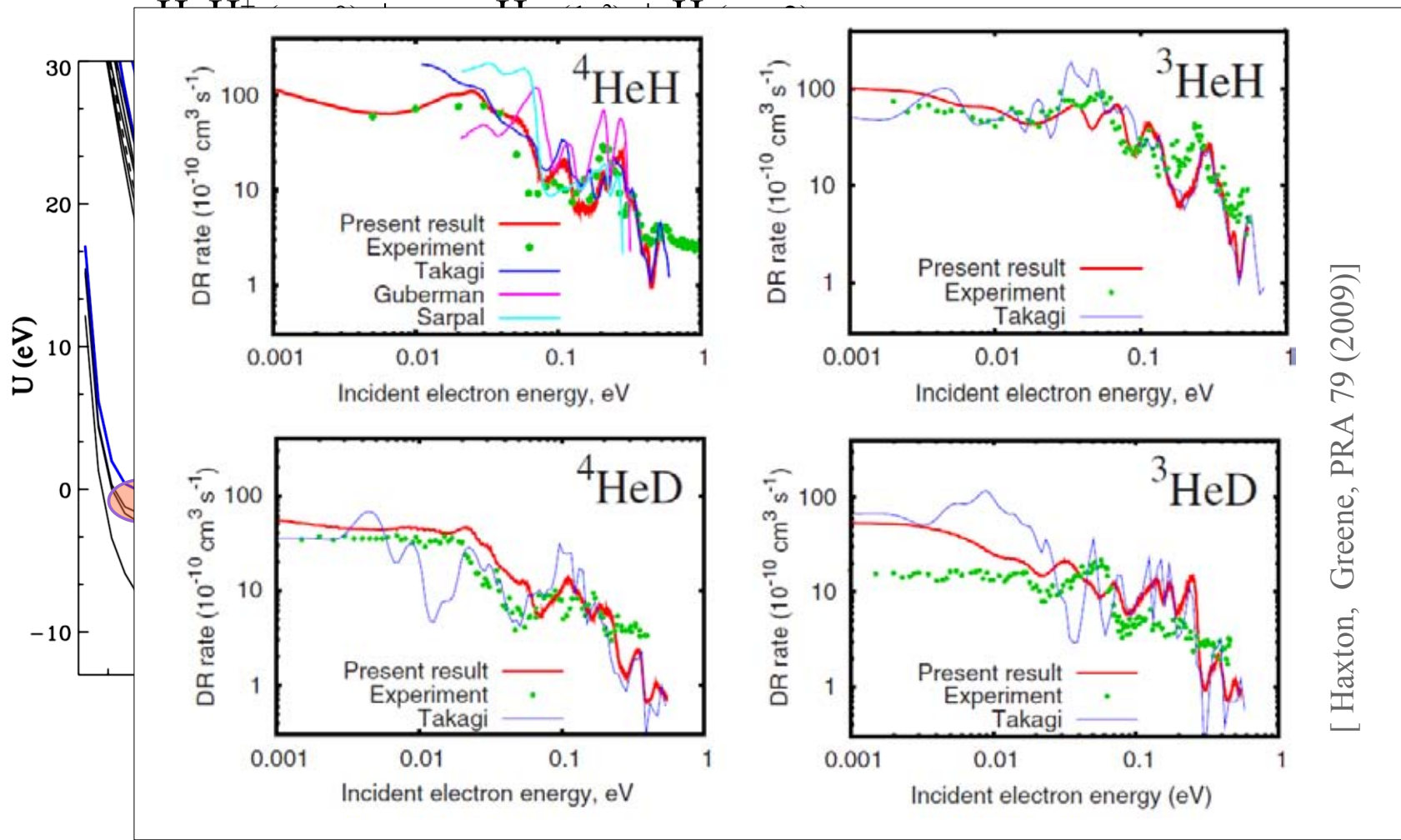
at CSR: $E_{\text{cool}} = 54 \text{ eV}$
 $10 \text{ K} \rightarrow J=0$

Perspectives expérimentales



at CSR: $E_{\text{cool}} = 32 \text{ eV}$
 $10 \text{ K} \rightarrow J = 0$

Perspectives expérimentales



[Haxton, Greene, PRA 79 (2009)]

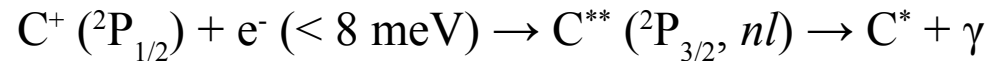
at CSR: $E_{\text{cool}} = 32 \text{ eV}$
 $10 \text{ K} \rightarrow J = 0$



Perspectives expérimentales

Ions à petit rapport charge/masse:

- Ions atomiques à charge simple C^+ , N^+ , F^+ , Si^+ , P^+ , Cl^+ , Fe^+
Contribution à l'astrochimie [Bryans et al., ApJ 694 (2009)]
(Récombinaison diélectronique par structure fine)



- Aggrégats / fullerènes ionisés ...
Dépendance entre taux de récombinaison et excitations?
- DR de molécules organiques $C_xH_y^+$, $C_xH_yOH^+$...
- ... récombinaison non-dissociative?
Répartition énergétique intra-moléculaire non-destructive
- ...





Résumé

L'anneau cryogénique électrostatique CSR est en construction ...

... équipé d'un refroidisseur par électrons,

... adapté aux collisions électron-ion à faible rapport q/M

... avec des ions moléculaires en état fondamental.



**Max-Planck-Institut
für Kernphysik,
Heidelberg**



Klaus Blaum
Robert von Hahn
Florian Fellenberger
Felix Berg
Michael Lange
Sebastian Menk
Michael Froese
Andrey Shornikov
Arno Becker
Stephen Vogel
Robert Repnow
Manfred Grieser
Andreas Wolf
C. K.

Merci!

**Justus-Liebig Universität,
Giessen**



Kaija Spruck
Stefan Schippers

**Columbia Astrophysics Lab,
New York**



Oldřich Novotný
Daniel W. Savin

The CSR electron cooler

Design phase complete

Cryo-cooling system and HTS magnet tested

Final construction design of cold vacuum chambers

Ordering of vacuum and magnet components

2012: Assembly of cold chambers and magnets

2012: Assembly of outer beam lines

2013: TSR photo cathode setup → CSR

...

first electron cooling at CSR

Système de refroidissement par électrons

Refroidissement de faisceaux a faible rapport charge/masse :

- Expérience TSR

CF⁺ (31 u, 2.6 MeV) : $E_e = 46$ eV

DCND⁺ (30 u, 3.1 MeV): $E_e = 56$ eV

NO⁺ (30 u, 2.0 MeV) : $E_e = 34$ eV

TSR: refroidissement de CF⁺ à $E_e = 46$ eV

$\varepsilon \sim 0.01$ mm mrad
(< 1 mm @ 12 m)

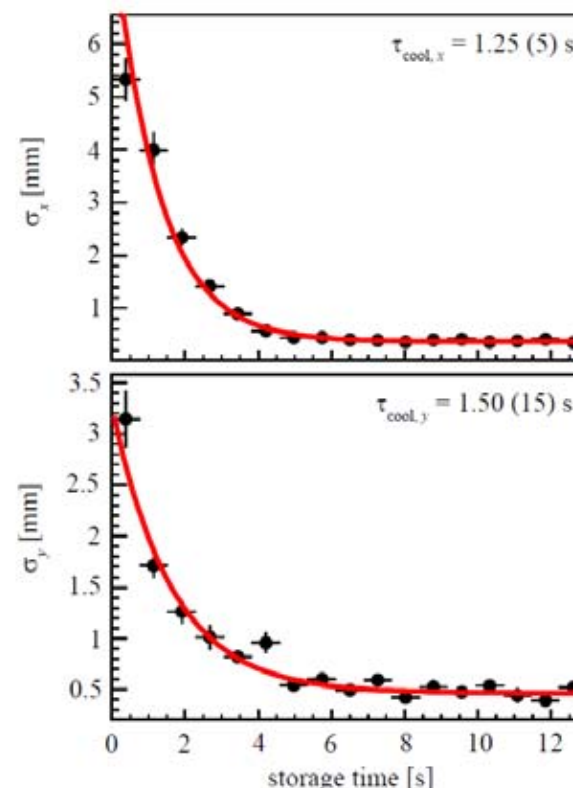
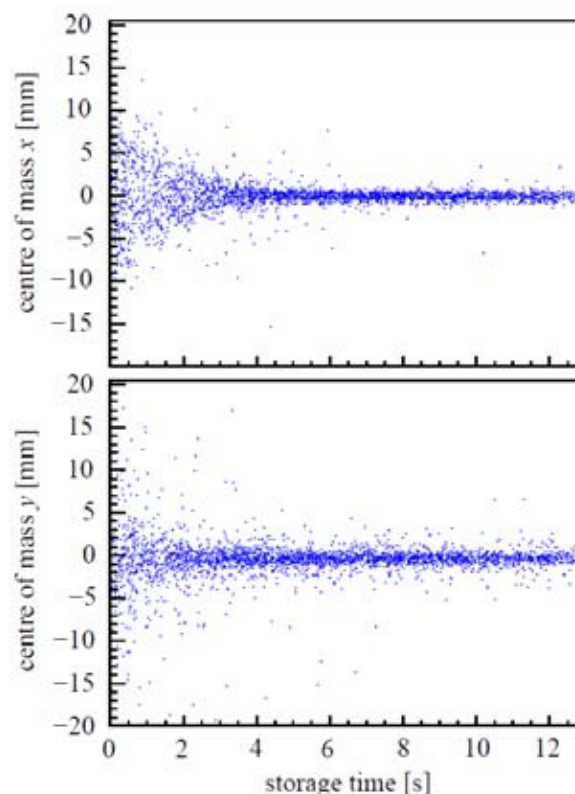
- Durée de relaxation:

$$\tau \sim \frac{M T_e^{3/2}}{q^2 n_e}$$

- Petite E_e :

n_e limité
par perveance
du canon

- Température du faisceau électronique est décisive!



Système de refroidissement par électrons

Refroidissement de faisceaux a faible rapport charge/masse :

- Expérience TSR

CF⁺ (31 u, 2.6 MeV) :

DCND⁺ (30 u, 3.1 MeV):

NO⁺ (30 u, 2.0 MeV) :

- Durée de relaxation:

$$\tau \sim \frac{M T_e^{3/2}}{q^2 n_e}$$

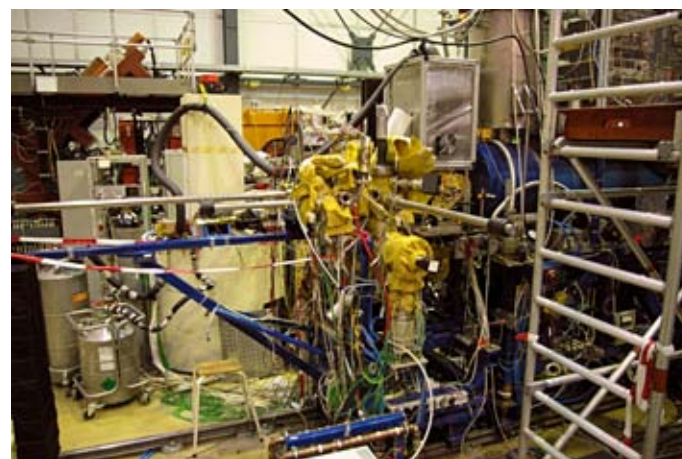
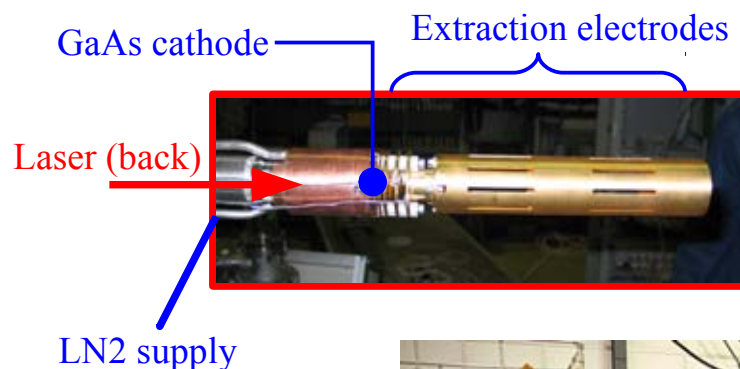
- Petite E_e :

n_e limité
par perveance
du canon

- Température du
faisceau électronique
est décisive!

Canon à électrons photocathodique (TSR) :

$T_e \sim 10 \times$ plus basse qu'un canon thermionique



$$k_B T_e \sim 1 \text{ meV}$$

$$n_e \sim 10^5 \text{ cm}^{-3} @ 1 \text{ eV}$$

The CSR electron cooler

Electron energy: towards 1 eV and below ...

- Calibration of E_e against cathode potential taking beam **space charge** and **work function** differences into account

- Current:
few μA at $E_{\text{cool}} = 1 \text{ eV}$

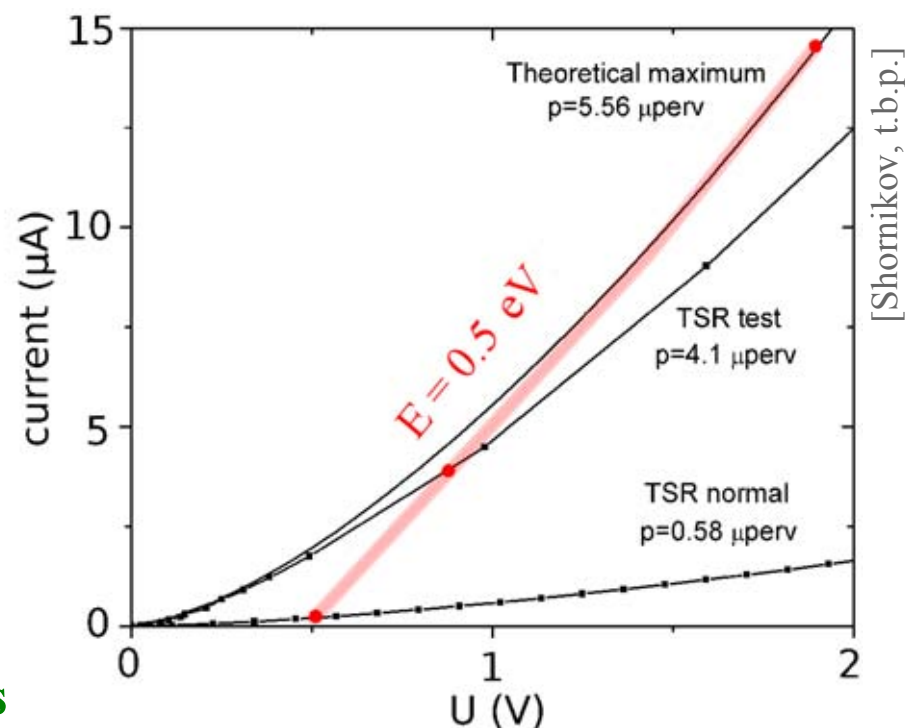
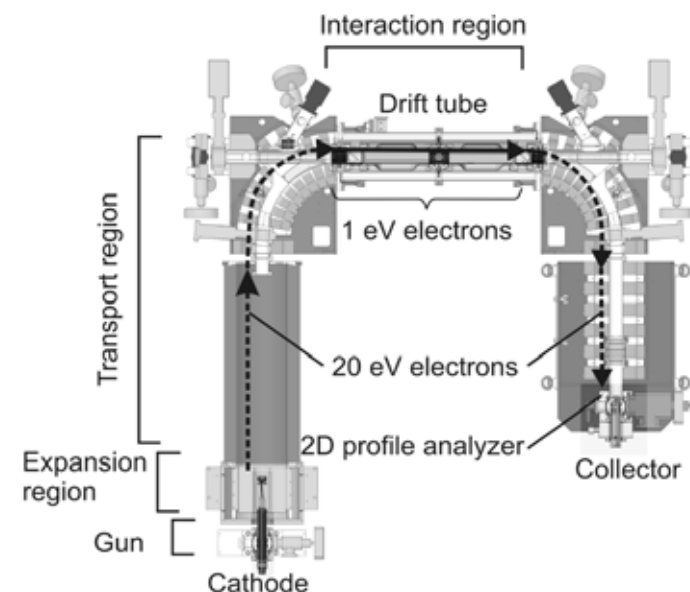
$$n_e \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

- Cooling times

$$\tau \sim \frac{M_{\text{ion}} T_e^{3/2}}{Z_{\text{ion}}^2 n_e}$$

up to $\sim 100 \text{ s}$...

... but: ion lifetime $\sim 1000 \text{ s}$

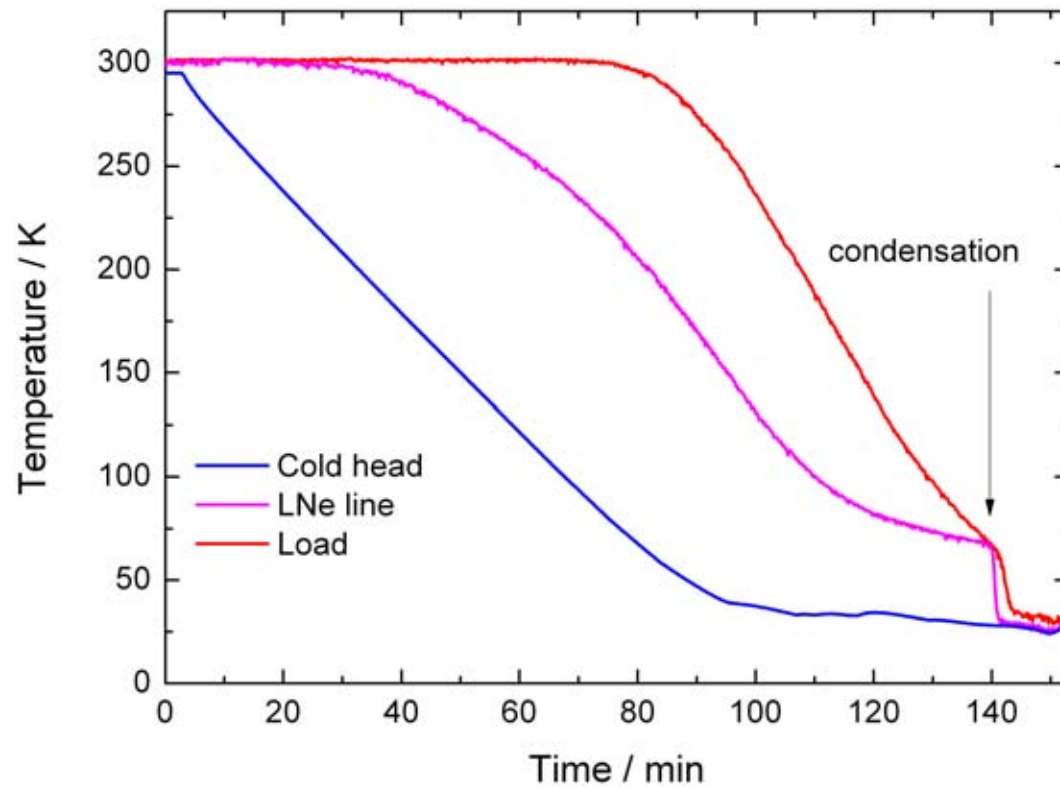
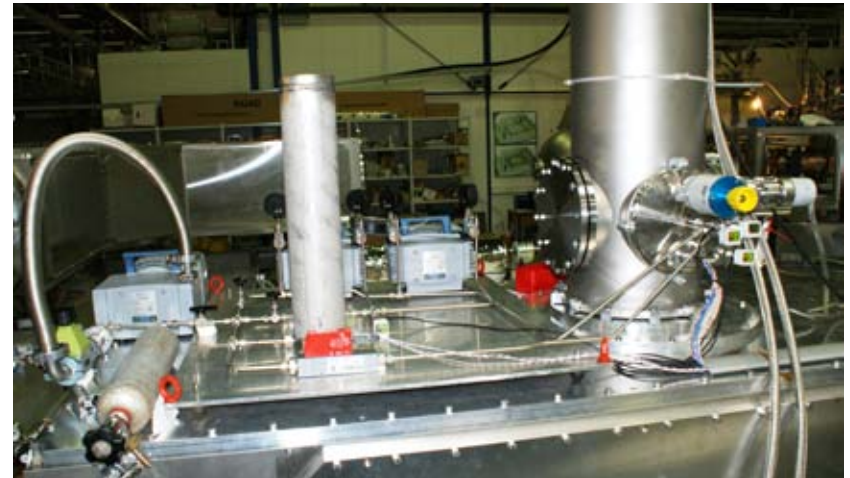




The CSR electron cooler

Magnet cooling system (LNe)

25 W at 32 K



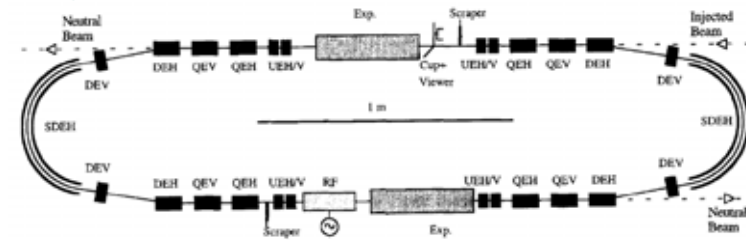
HTS magnet prototype



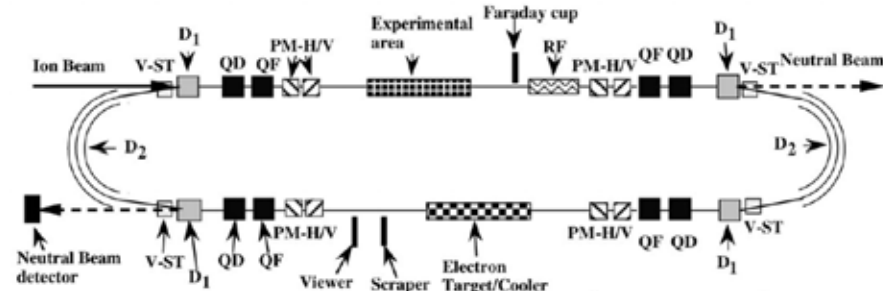
The CSR Project

First electrostatic storage rings

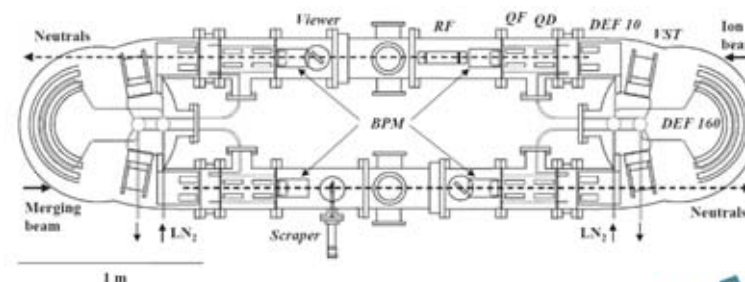
- **ELISA** (Aarhus, 1998)
Racetrack design,
25 keV/q, room temp.
- **KEK Ring** (Tsukuba, 2001)
ELISA design,
Electron target
- **TMU Ring** (Tokyo, 2004)
77 K (LN₂)
- **DESIREE** (Stockholm, *in constr.*)
Double ring (ion-ion interact.),
< 20 K,
25 kV and 100 kV injectors
- **CSR** (Heidelberg, *in constr.*)
< 10 K,
300 keV/q
electron cooling



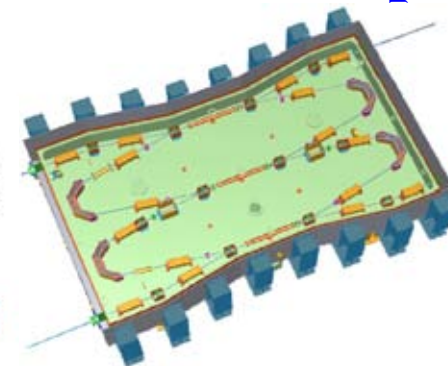
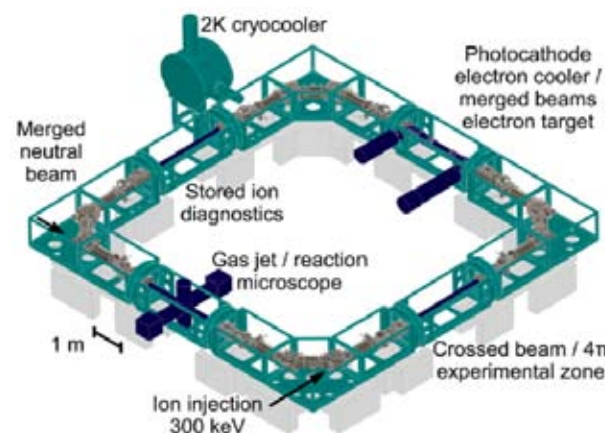
Møller, NIM A 394



Tanabe, NIM A 482



Iimno, NIM A, 532



Löfgren, Proc. EPAC06