

Noyaux Exotiques (NEX)

Simon Lechner

LP2i-B

Outline

- 1 Aperçu des domaines de recherche de group NEX

Outline

- 1 Aperçu des domaines de recherche de group NEX
- 2 Nouvelle activite : refroidissement laser (laser cooling)

Outline

- 1 Aperçu des domaines de recherche de group NEX
- 2 Nouvelle activite : refroidissement laser (laser cooling)
- 3 Perspective

Outline

- 1 Aperçu des domaines de recherche de group NEX
- 2 Nouvelle activite : refroidissement laser (laser cooling)
- 3 Perspective

Themes de l'équipe Noyaux Exotiques (NEX)

Interaction faible

- test CVC et CKM
- recherche de courants exotiques

Structure nucléaire des noyaux exotiques

- décroissances exotiques (2p, beta-p, ..)
- spectroscopie des noyaux riches en neutrons
- brisure de symétrie isospin
- mesures de masses, **spectroscopie laser** et structure nucléaire

Réactions nucléaires

- mesures probabilités de désexcitation
- mesures probabilités de fission

Manips (exploitation)

ISOLDE
ALTO
JYFL
GANIL

GANIL
RIKEN
AIFIRA

JYFL
ISOLDE

GSI
GANIL

Projets

Phase Dvt/Exploitation

WISArD
B. Blank
M. Versteegen

ACTAR TPC
J. Giovino

Brochette
S. Grévy

NECTAR
B. Jurado

Phase Dvt

DESIR
B. Blank

HRS
B. Blank

GPIB
P. Ascher
M. Gerbaux
S. Grévy

PIPERADE
P. Ascher
M. Gerbaux
S. Lechner
S. Grévy

Laser cooling
(in planning)
S. Lechner

Outline

- 1 Aperçu des domaines de recherche de group NEX
- 2 Nouvelle activite : refroidissement laser (laser cooling)
- 3 Perspective

Pourquoi on a besoin des ions froids?

- Les installations à faisceaux d'ions radioactifs (radioactive ion beam (RIB) facility) créent des faisceaux d'ions continus "chauds"

Pourquoi on a besoin des ions froids?

- Les installations à faisceaux d'ions radioactifs (radioactive ion beam (RIB) facility) créent des faisceaux d'ions continus "chauds"
- Pour étudier le noyau avec une grande précision, de nombreuses expériences à faible énergie nécessitent des faisceaux refroidis et/ou groupés (bunched)

Pourquoi on a besoin des ions froids?

- Les installations à faisceaux d'ions radioactifs (radioactive ion beam (RIB) facility) créent des faisceaux d'ions continus "chauds"
- Pour étudier le noyau avec une grande précision, de nombreuses expériences à faible énergie nécessitent des faisceaux refroidis et/ou groupés (bunched)
 - ▶ spectroscopie laser

Pourquoi on a besoin des ions froids?

- Les installations à faisceaux d'ions radioactifs (radioactive ion beam (RIB) facility) créent des faisceaux d'ions continus "chauds"
- Pour étudier le noyau avec une grande précision, de nombreuses expériences à faible énergie nécessitent des faisceaux refroidis et/ou groupés (bunched)
 - ▶ spectroscopie laser
 - ▶ spectrometry mass

Pourquoi on a besoin des ions froids?

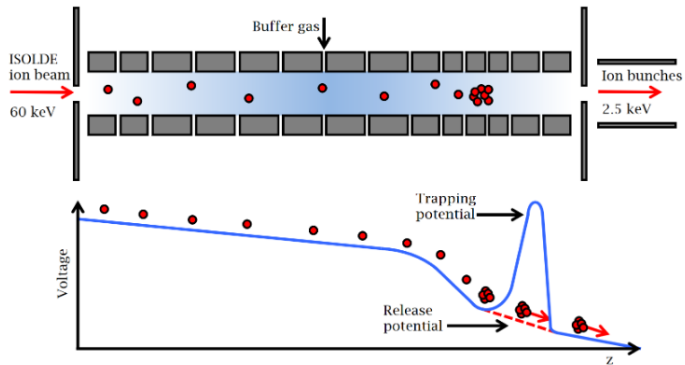
- Les installations à faisceaux d'ions radioactifs (radioactive ion beam (RIB) facility) créent des faisceaux d'ions continus "chauds"
- Pour étudier le noyau avec une grande précision, de nombreuses expériences à faible énergie nécessitent des faisceaux refroidis et/ou groupés (bunched)
 - ▶ spectroscopie laser
 - ▶ spectrometry mass
 - ▶ études sur la désintégration

Pourquoi on a besoin des ions froids?

- Les installations à faisceaux d'ions radioactifs (radioactive ion beam (RIB) facility) créent des faisceaux d'ions continus "chauds"
- Pour étudier le noyau avec une grande précision, de nombreuses expériences à faible énergie nécessitent des faisceaux refroidis et/ou groupés (bunched)
 - ▶ spectroscopie laser
 - ▶ spectrometry mass
 - ▶ études sur la désintégration
- On utilise généralement le buffer gas cooling dans les RIB

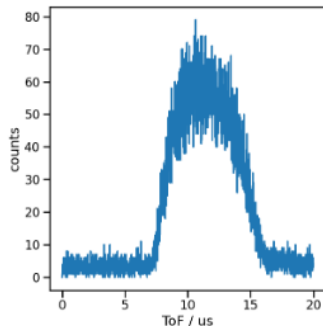
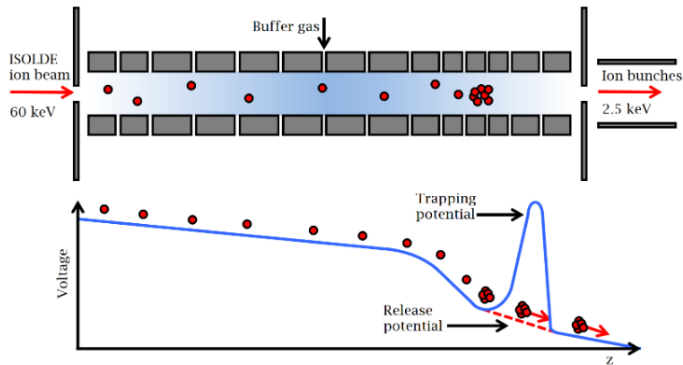
Conventional Buffer Gas Cooling

- Radiofrequency quadrupole (RFQ) cooler and buncher rempli de buffer gas hélium (comme GPIB dans le hall a LP2i-B)



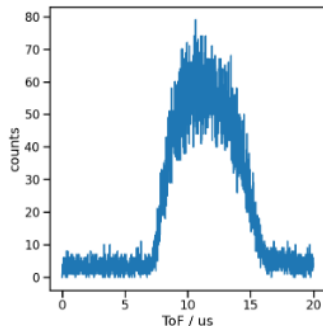
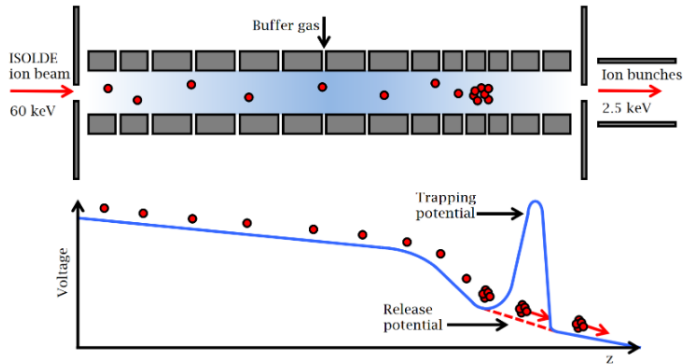
Conventional Buffer Gas Cooling

- Radiofrequency quadrupole (RFQ) cooler and buncher rempli de buffer gas hélium (comme GPIB dans le hall a LP2i-B)
- Fournit des bunches avec une répartition bien définie de l'énergie et du temps



Conventional Buffer Gas Cooling

- Radiofrequency quadrupole (RFQ) cooler and buncher rempli de buffer gas hélium (comme GPIB dans le hall a LP2i-B)
- Fournit des bunches avec une répartition bien définie de l'énergie et du temps
- Refroidissement limité à une température de gaz de 300 K



Question

Est-il possible d'avoir des ions encore plus froids ?

Question

Est-il possible d'avoir des ions encore plus froids ?

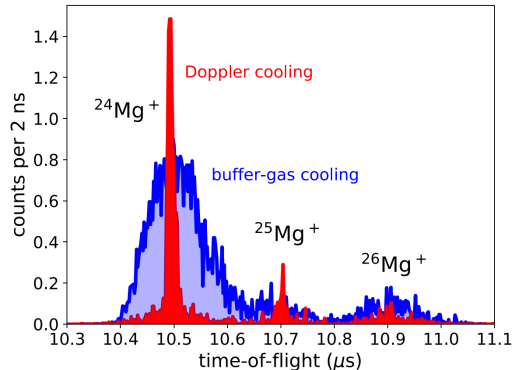
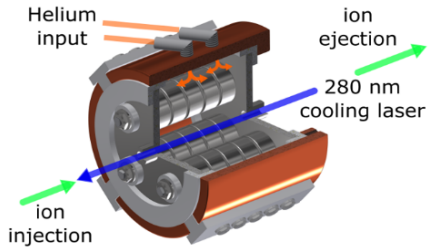


Laser Cooling

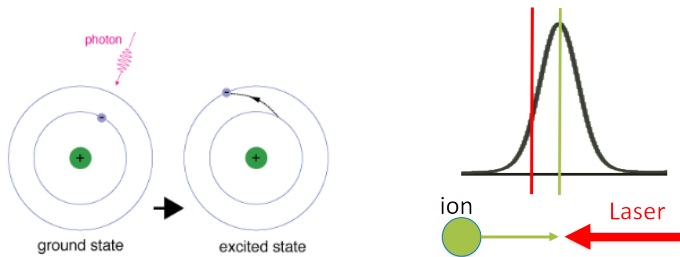
Buffer Gas Cooling vs Laser Cooling

Ultra-cold ion bunches interesting for nuclear physics

	Buffer gas (GPIB)	Laser
T	300 K	1 mK (Mg^+)
E	26 meV	86 neV

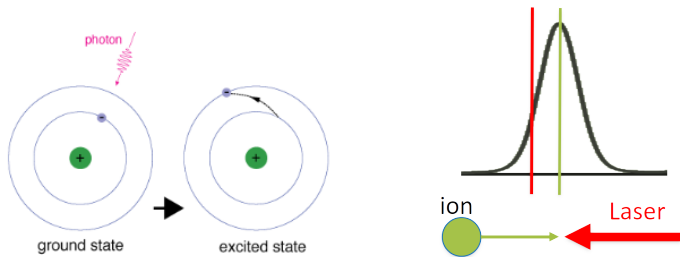


Laser Cooling (aka Doppler Cooling) Principle



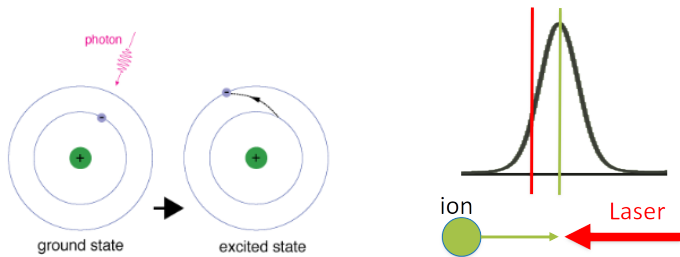
- En imaginant l'ion comme une balle et le laser comme un vent violent

Laser Cooling (aka Doppler Cooling) Principle



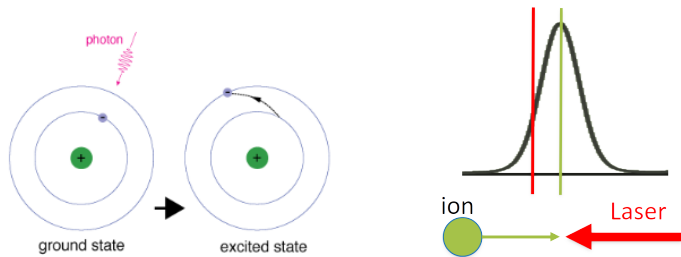
- En imaginant l'ion comme une balle et le laser comme un vent violent
- Le laser ralentira les ions avec des excitations et de-excitations des electrons

Laser Cooling (aka Doppler Cooling) Principle



- En imaginant l'ion comme une balle et le laser comme un vent violent
- Le laser ralentira les ions avec des excitations et de-excitations des electrons
- Les ions en mouvement subissent un effet Doppler

Laser Cooling (aka Doppler Cooling) Principle



- En imaginant l'ion comme une balle et le laser comme un vent violent
- Le laser ralentira les ions avec des excitations et de-excitations des electrons
- Les ions en mouvement subissent un effet Doppler
- Seuls les ions piégés qui se déplacent vers le laser peuvent interagir avec le laser

Laser Cooling

- Utilisé depuis 1970 pour refroidir des atomes, des ions et des molécules piégés à des températures inférieures à 1 K (price Nobel 1997)

Laser Cooling

- Utilisé depuis 1970 pour refroidir des atomes, des ions et des molécules piégés à des températures inférieures à 1 K (price Nobel 1997)
- Util standard pour des experiences a haut-precision:

Laser Cooling

- Utilisé depuis 1970 pour refroidir des atomes, des ions et des molécules piégés à des températures inférieures à 1 K (price Nobel 1997)
- Util standard pour des experiences a haut-precision:
 - ▶ Atomic and ionic clocks (soon nuclear clocks)

Laser Cooling

- Utilisé depuis 1970 pour refroidir des atomes, des ions et des molécules piégés à des températures inférieures à 1 K (price Nobel 1997)
- Util standard pour des experiences a haut-precision:
 - ▶ Atomic and ionic clocks (soon nuclear clocks)
 - ▶ Quantum information science

Laser Cooling

- Utilisé depuis 1970 pour refroidir des atomes, des ions et des molécules piégés à des températures inférieures à 1 K (price Nobel 1997)
- Util standard pour des experiences a haut-precision:
 - ▶ Atomic and ionic clocks (soon nuclear clocks)
 - ▶ Quantum information science
 - ▶ Physics beyond the Standard Model

Laser Cooling

- Utilisé depuis 1970 pour refroidir des atomes, des ions et des molécules piégés à des températures inférieures à 1 K (price Nobel 1997)
- Util standard pour des experiences a haut-precision:
 - ▶ Atomic and ionic clocks (soon nuclear clocks)
 - ▶ Quantum information science
 - ▶ Physics beyond the Standard Model
- Pas encore largement utilisé pour les ions radioactifs

Laser Cooling

- Utilisé depuis 1970 pour refroidir des atomes, des ions et des molécules piégés à des températures inférieures à 1 K (price Nobel 1997)
- Util standard pour des experiences a haut-precision:
 - ▶ Atomic and ionic clocks (soon nuclear clocks)
 - ▶ Quantum information science
 - ▶ Physics beyond the Standard Model
- Pas encore largement utilisé pour les ions radioactifs
 - ▶ Nécessite des mesures rapides (demi-vie) et efficaces (faibles quantités)

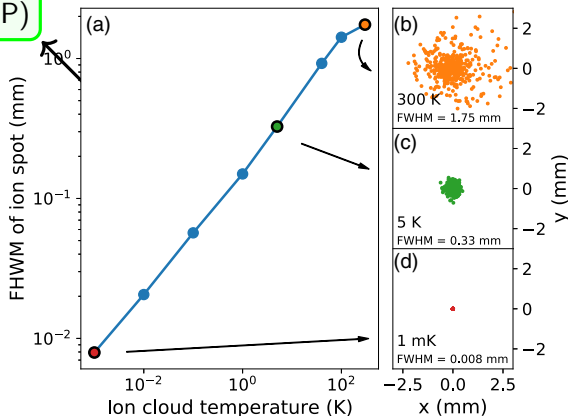
Améliorations et possibilités avec Laser Cooling pour DESIR

**Ultra-Cold
Rare Isotopes**

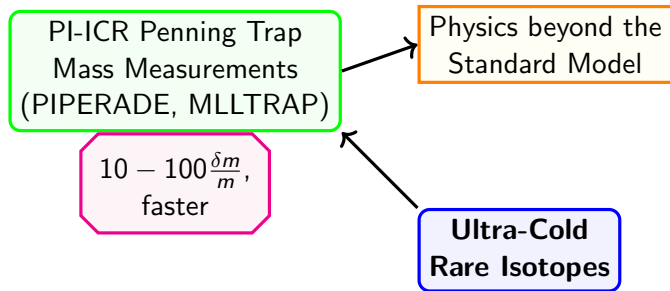
Améliorations et possibilités avec Laser Cooling pour DESIR

PI-ICR Penning Trap
Mass Measurements
(PIPERADE, MLLTRAP)

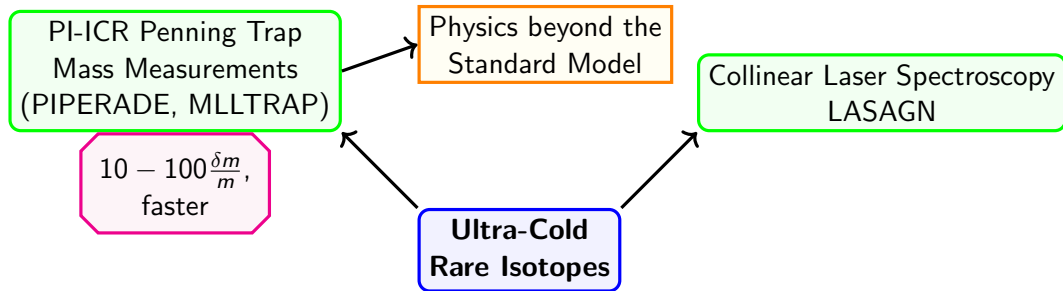
$10 - 100 \frac{\delta m}{m}$,
faster



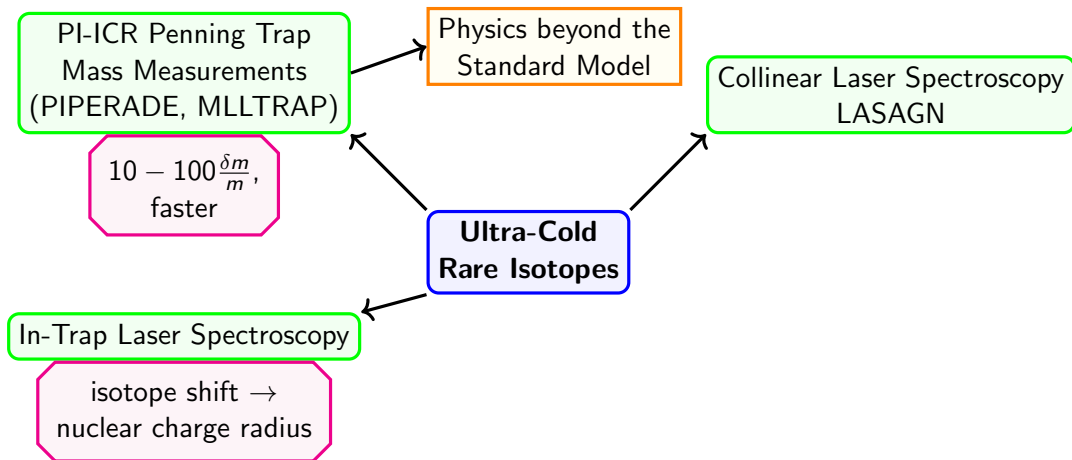
Améliorations et possibilités avec Laser Cooling pour DESIR



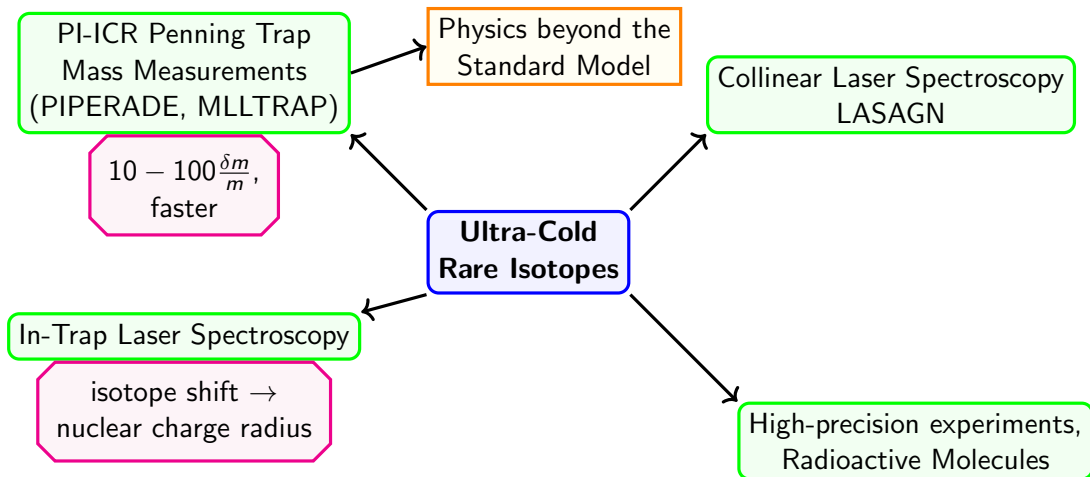
Améliorations et possibilités avec Laser Cooling pour DESIR



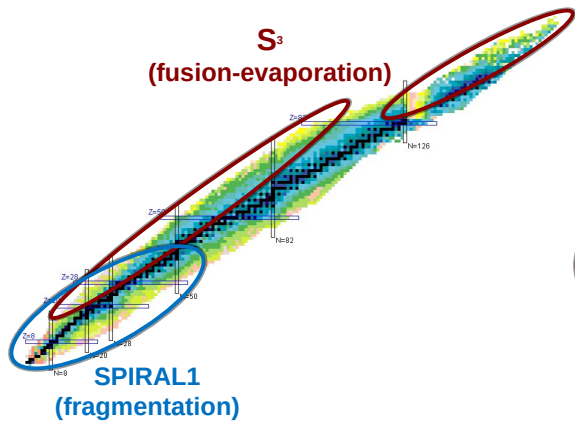
Améliorations et possibilités avec Laser Cooling pour DESIR



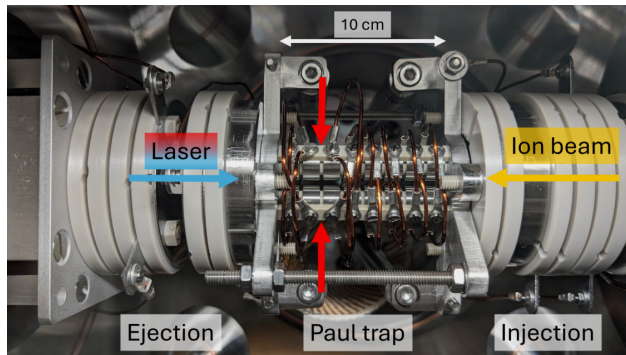
Améliorations et possibilités avec Laser Cooling pour DESIR



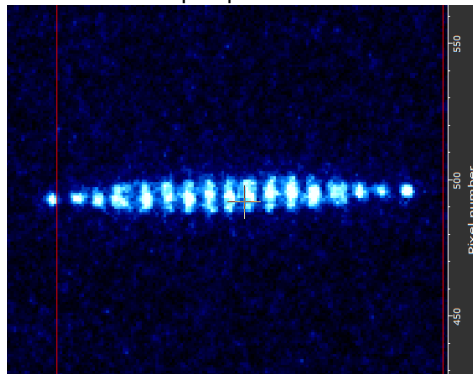
New DESIR facility in GANIL for low-energy nuclear physics



Collaboration avec KU Leuven (Belgique)



$^{88}\text{Sr}^+$ Cristal de Coulomb (mK) produit dans quelques seconds



- Chaque point lumineux représente un ion
- Les ions piégés entièrement refroidis s'organisent selon la force de Coulomb

Outline

- 1 Aperçu des domaines de recherche de group NEX
- 2 Nouvelle activite : refroidissement laser (laser cooling)
- 3 Perspective

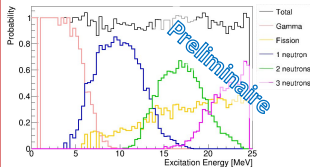
- **L'objectif principal est le refroidissement laser de faisceaux d'ions radioactifs**
- Construction de prototype au LP2i-B
 - ▶ Coordinatrice technique Sonia Karkar
 - ▶ Demande de financement auprès de l'ANR en 2026
 - ▶ Conception basée sur celle de la KU Leuven
 - ▶ Certains équipements existent déjà
- Collaboration avec la KU Leuven (Ruben de Groote), l'IGISOL (Tommi Eronen, Iain Moore) et Manchester (Paul Campbell)

Backup



Nuclear rEaCTions At storage Rings: NECTAR

Probabilités de désexcitation ^{239}U



Analyse réalisée par C. Berthelot (doctorante) et B. Wloch (post-doc)

- 2^e expérience GSI du 20 au 26 Juin 2024

✉ première mesure simultanée des probabilités de fission, émission + et émission de 1, 2 et 3 neutrons !

- 2 articles

M. Sguazzin *et al.*, Phys. Rev. Lett. 134 (2025) 072501

M. Sguazzin *et al.*, Phys. Rev. C 111 (2025) 024614, editor's suggestion

depuis Juin 2024, 7 conférences invitées, prix meilleur talk G. Leckenby (post-doc)

- 3^{ème} expérience approuvée pour 2027 dans le cadre d'un appel à propositions très compétitif, détermination des sections efficaces (n,γ) , (n,n') et $(n,2n)$ du ^{205}Pb .

Première expérience «brochette» GANIL: ACTAR TPC + setup Coulex

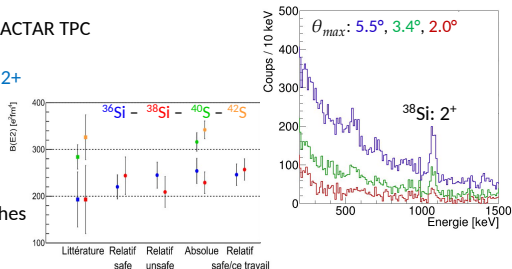
- mesure de la section efficace de diffusion inélastique sur protons : ACTAR TPC
- mesure de la probabilité de transition réduite $B(E2)$: setup Coulex

✉ accès aux contributions protons et neutrons des états 2^+ des isotopes de Silicium entre $N=20$ et $N=28$

analyse des données d'excitation Coulombienne au LP2iB:
soutenance de thèse de Quentin Délégnac – mars 2025

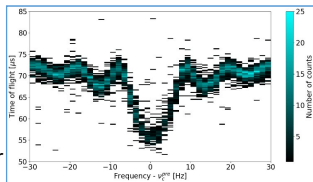
collaboration IPHC : interprétation dans le cadre du modèle en couches

✉ contraintes sur l'interaction SDPF-U-MIX
(collaboration F. Nowacki et D. Dao)



PIPERADE/GPIB - mesures de masse

- poursuite études ToF-ICR et PI-ICR
- dével. C/C et acquisition
- étude des distrib. en énergie et ToF des ions mis en paquets par le GPIB



mesures de masse (collab. JYFLTRAP/IGISOL)

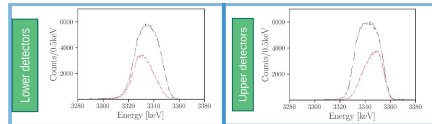
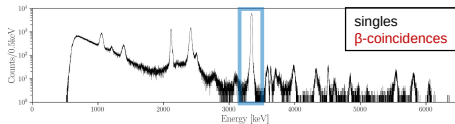
- noyaux riches en neutrons autour de $A = 110-120$
☒ 3^{ème} publi **M. Hukkanen** : PLB 856, 138916 (2024)
- cobalts riches en neutrons proche de $N = 40$
☒ soutenance thèse de **Mathieu Flayol** nov. 2024
☒ papier en préparation (collab. IPHC Nowacki et Dao)

arrivées: thèse **G. Guignard (PIPERADE)** sept. 2024, post-doc **C. Roumegoux (GPIB)** avril 2024
 + prise de fonction **S. Lechner** (chercheur) en février 2025 (0.3 ETP sur PIPERADE)

recherche de courants exotiques de l'int. faible: **WISArD**



- exp. mai 2024 et avril 2025: ^{32}Ar @ ISOLDE
☒ dispositif complet et fonctionnel
☒ **meilleure limite sur courant scalaire accessible !**
 (inc. stat. $\leftrightarrow 0.2\%$ sur mesure de a)
 analyse en cours: thèse **S. Lecanuet** (oct. 2023)
- thèse **A. Lepine**, oct. 2024 (β spectrum shape)
- présentation **Conseil Scientifique IN2P3**
 (retour très positif)



décroissances exotiques - ACTAR TPC: radioactivité 2-protons de ^{48}Ni et ^{45}Fe

analyse de l'exp. GANIL / LISE3 + ACTAR TPC (E791, 2021)

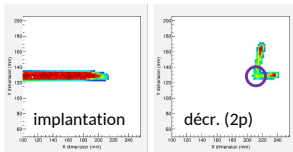
radioactivité 2-protons de ^{48}Ni et ^{45}Fe

(thèse A. Ortega Moral + post-doc 2024)

collaboration théorie S. Wang (W. Nazarewicz)

devel. Gamow Coupled Channels (GCC) model

(structure + dyn. 3 corps + couplage continuum)



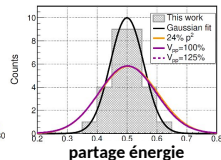
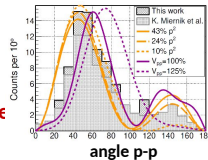
comparaison des observables exp.

avec GCC et modèle « 3-body »

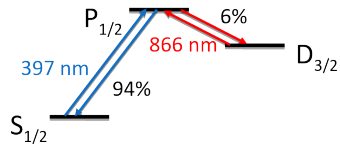
décroissance ($T_{1/2}$ & Q_{2p}) et

corrélations (dist. angulaire et énergie)

☑ article soumis (PRC)

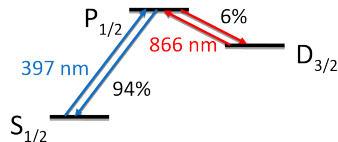


Sympathetic Cooling Principle



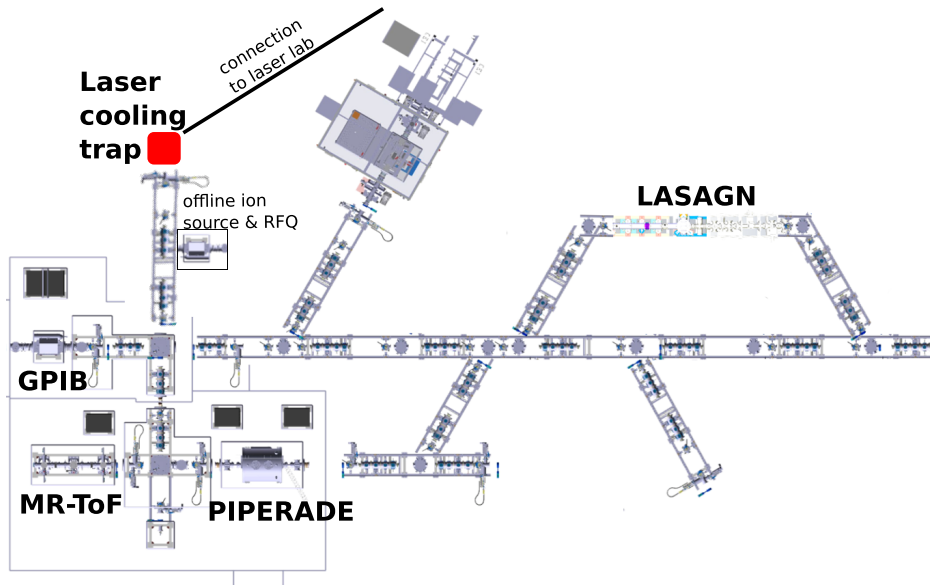
- Most atoms, ions and molecules cannot be directly laser cooled \rightarrow

Sympathetic Cooling Principle



- Most atoms, ions and molecules cannot be directly laser cooled →
- Simultaneously trap laser-cooled and non-laser-cooled ion species →
- Through Coloumb interaction thermal energy is exchanged between both species →
- Sympathetic cooling to common equilibrium temperature
- Applicable for almost every element

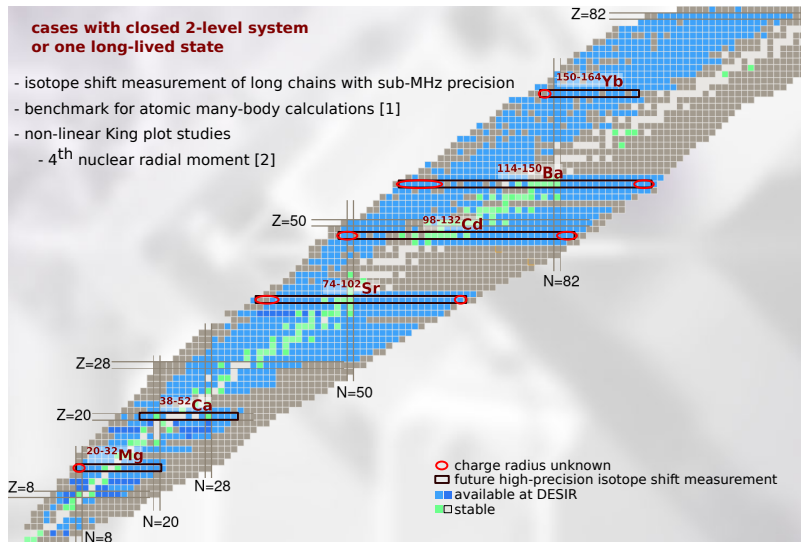
Position at DESIR



Physics cases for in-trap laser spectroscopy

cases with closed 2-level system or one long-lived state

- isotope shift measurement of long chains with sub-MHz precision
- benchmark for atomic many-body calculations [1]
- non-linear King plot studies
 - 4th nuclear radial moment [2]



- relationship between isotope shift and nuclear radial moments:

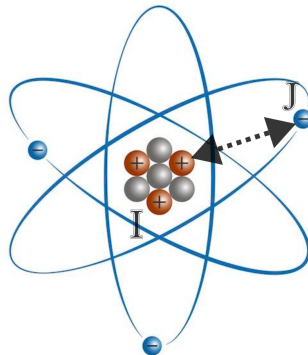
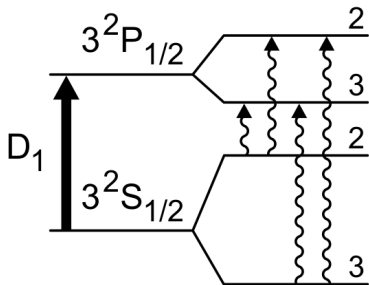
$$\delta\nu_i^{A,A'} = K_{\text{MS},i} \frac{m_{A'} - m_A}{m_{A'} m_A} + \sum_k F_{i,k} \delta \langle r_c^{2k} \rangle^{A,A'}$$

[1] P. Imgram *et al.*, PRA 99, 012511 (2019)

[2] P.-G. Reinhard *et al.*, PRC 101, 021301(R) (2020)

Laser Spectroscopy

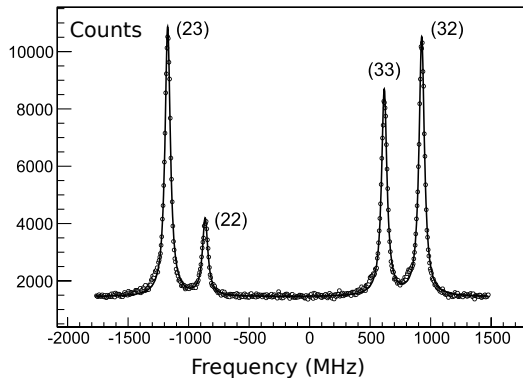
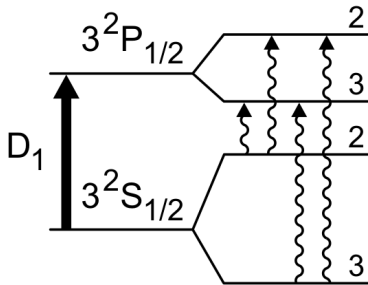
$$\vec{F} = \vec{I} + \vec{J}$$



Probing the atom to study the nucleus

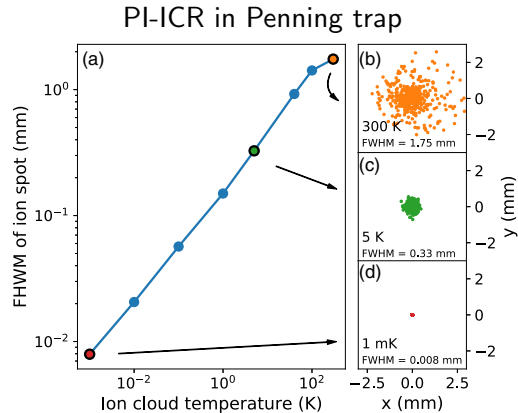
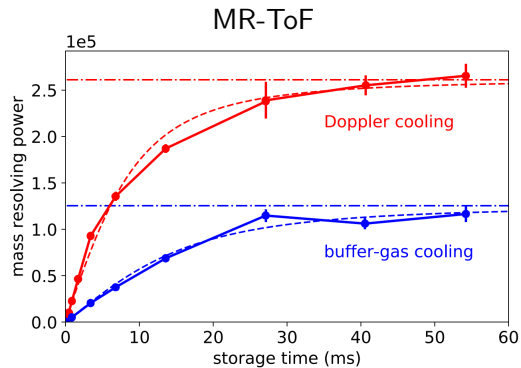
Laser Spectroscopy

$$\vec{F} = \vec{I} + \vec{J}$$

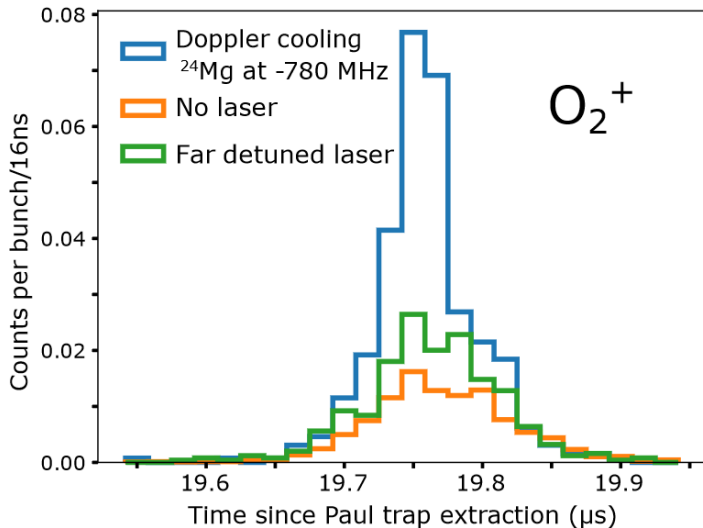


D. Yordanov, PhD thesis, (2007)

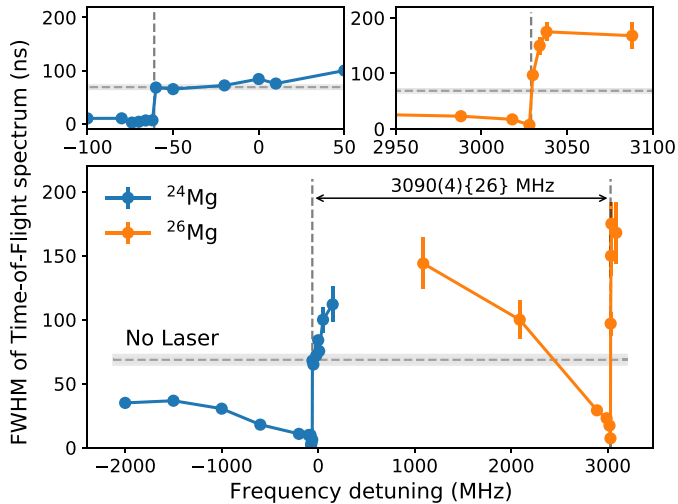
Laser Cooling Improvement



Laser Cooling at MIRACLS

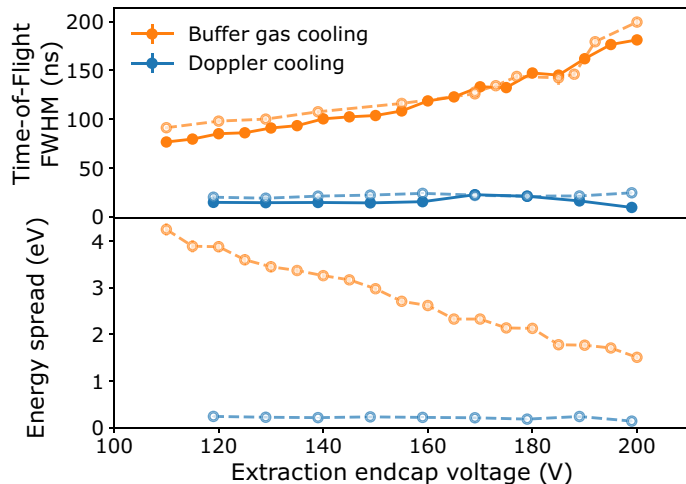


Isotope Shift from Laser Cooling

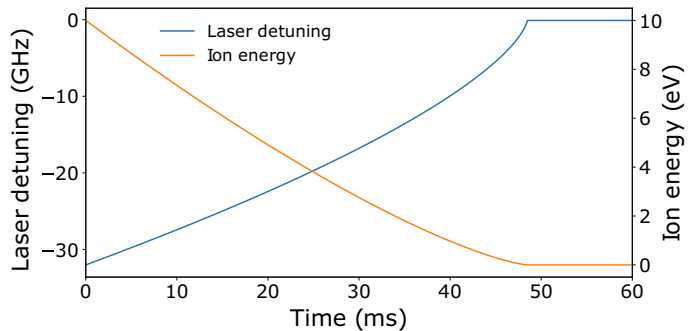


- Transition from cooling to heating at resonance frequency
- No photon detection or photo-ionization needed
- Comparable precision as conventional collinear laser spectroscopy

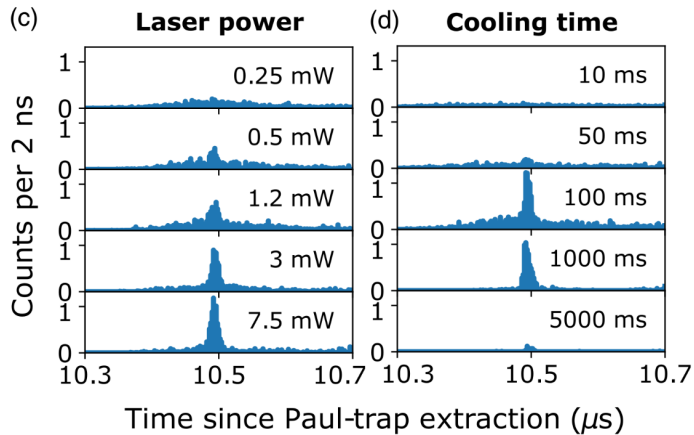
MIRACLS Laser Cooling



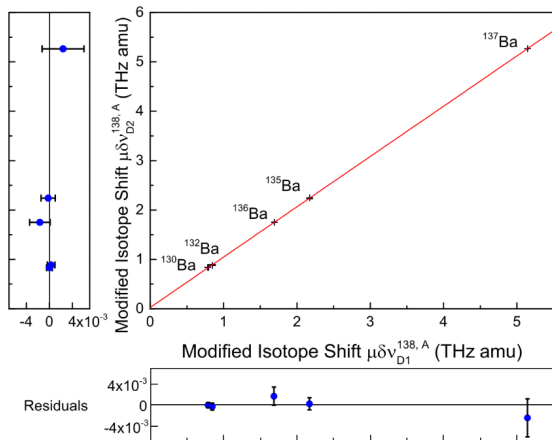
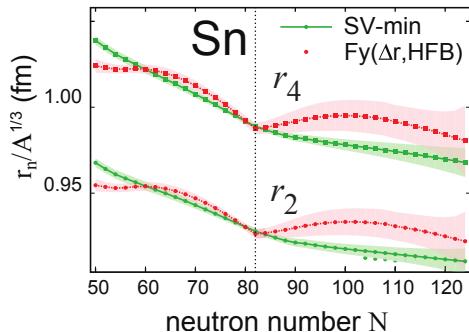
MIRACLS Laser Cooling



MIRACLS Laser Cooling



High-precision isotope shift



- Neutron density can be extract from 4th radial moment [1]

P. Imgram *et al.*, PRA 99, 012511 (2019)

P.-G. Reinhard *et al.*, PRC 101, 021301(R) (2020)

[1] H. Kurasawa, and T. Suzuki, Prog. Theor. Exp. Phys. 113D01 (2019)