

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

М.Д. Селиверстов

17.10.2017

Современные методы лазерной спектроскопии в ядерной физике

- Исследование основных состояний ядер: зарядовые радиусы и электромагнитные моменты
- Экспериментальные методики: основные характеристики, классификация
- Обзор методов, применяемых в настоящее время: описание, достигнутые параметры, сравнение
- Перспективы

Изотопический сдвиг

$$\Delta v = \Delta v^{MS} + \Delta v^{FS}$$

Массовый сдвиг:

$$\Delta v^{MS} = \Delta v^{NMS} + \Delta v^{SMS}$$

Полевой сдвиг:

$$\Delta v^{FS} \approx F \delta \langle r^2 \rangle$$

Сверхтонкое расщепление

$$V_{FF'} = V_0 + \Delta E_F - \Delta E_{F'}$$

$$\Delta E_F = A \frac{K}{2} + B \frac{0.75 K (K+1) - I(I+1)J(J+1)}{2IJ(2I-1)(2J-1)}$$

$$F = I + J \quad K = F(F+1) - I(I+1) - J(J+1)$$

$$A \sim \mu$$

$$B \sim Q_S$$

Связь зарядовых радиусов и квадрупольных моментов с деформацией ядра

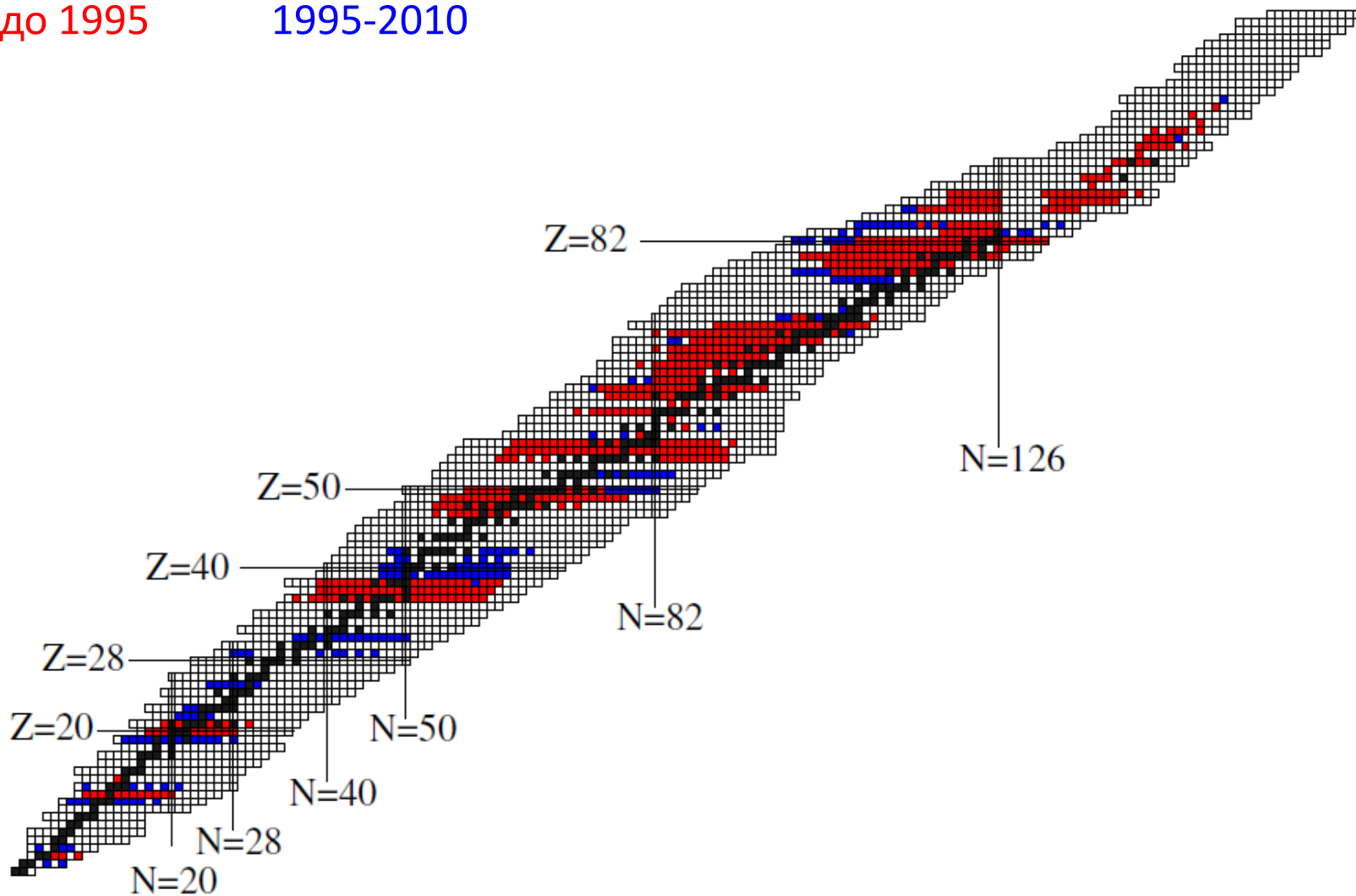
$$V_0, V_{FF'} \rightarrow \Delta v, A, A', B, B' \rightarrow \delta\langle r^2 \rangle, \mu, Q_s, (I)$$

$$\delta\langle r^2 \rangle \rightarrow \langle (\beta_2)^2 \rangle$$

$$Q_s \rightarrow Q_0 \rightarrow \langle \beta_2 \rangle$$

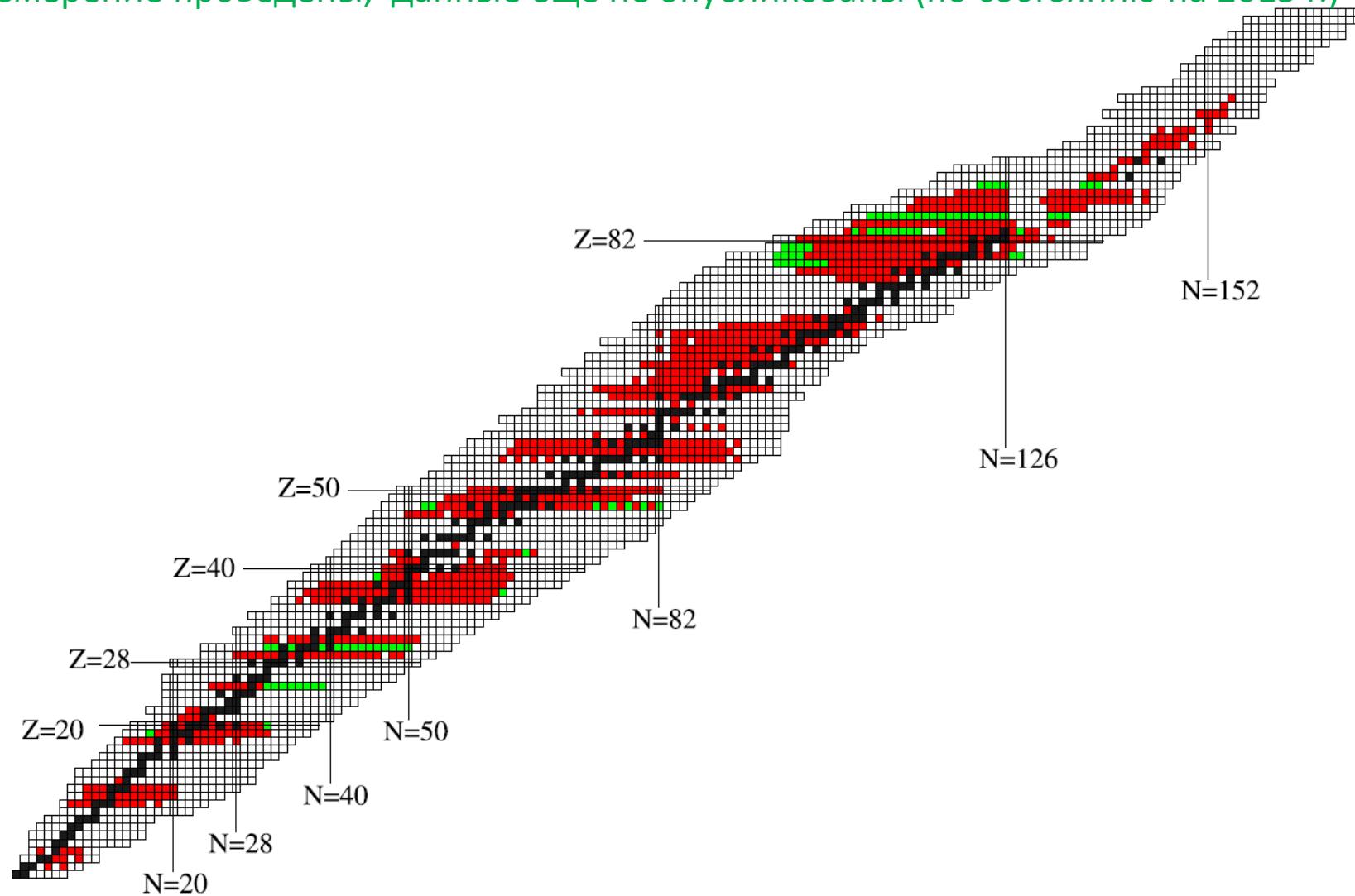
до 1995

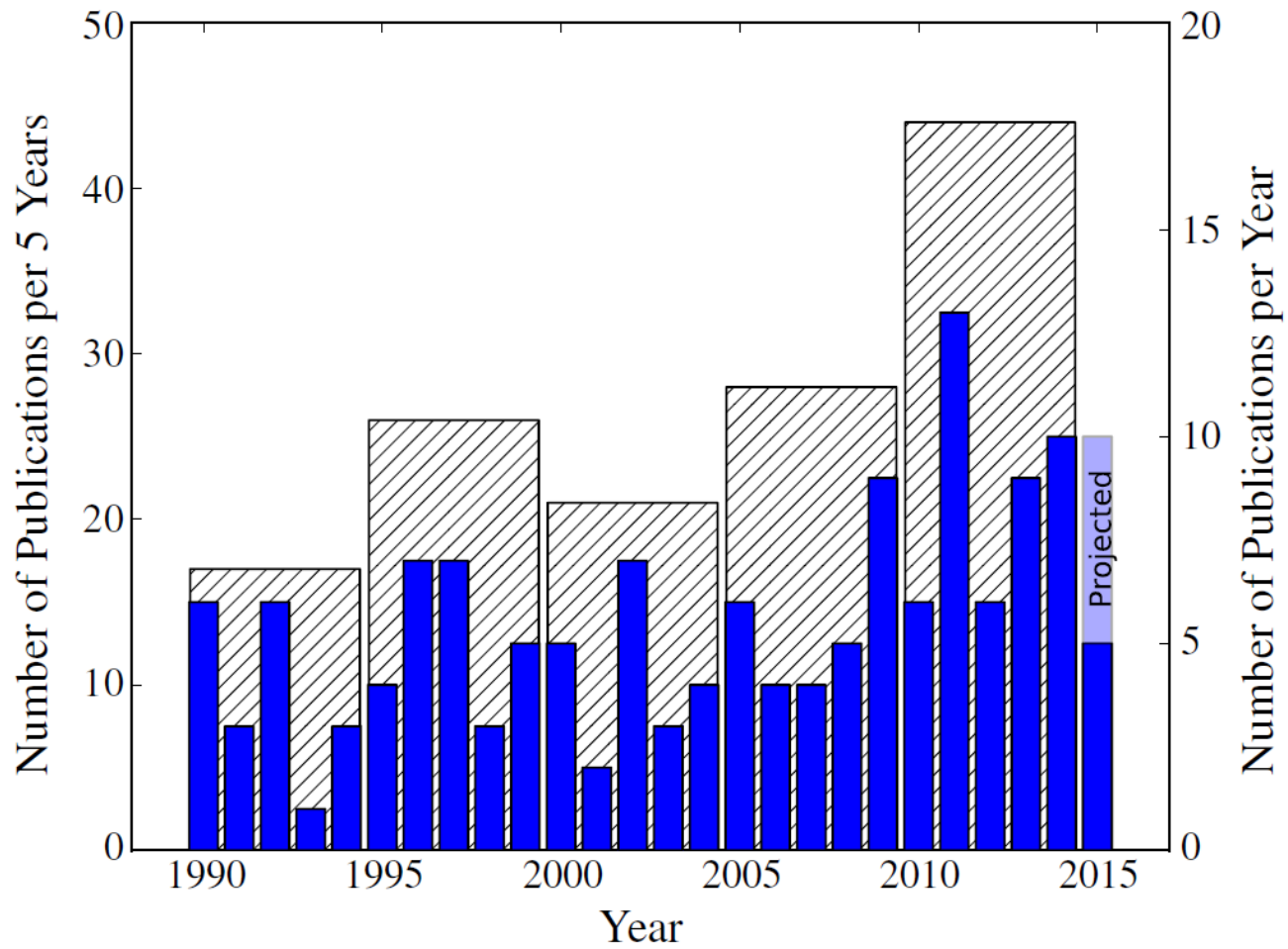
1995-2010



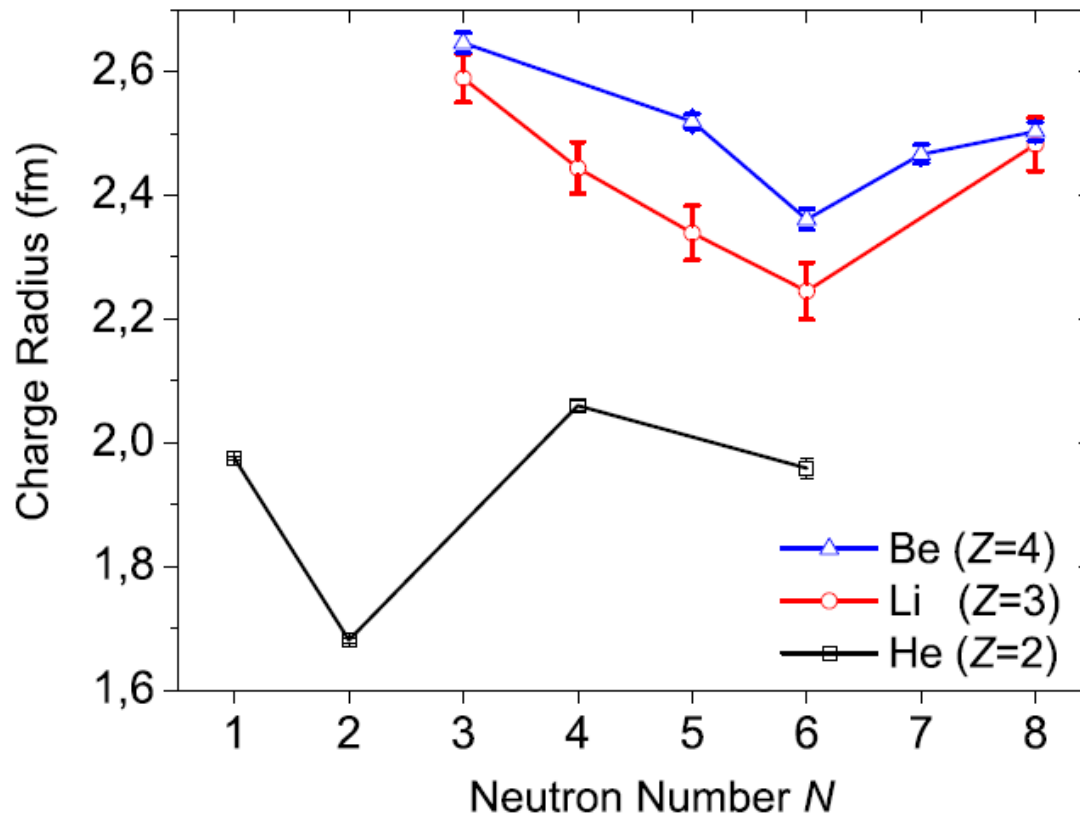
Результаты, опубликованные до 2015

Измерение проведены, данные ещё не опубликованы (по состоянию на 2015 г.)





Лёгкие ядра (Li, Be): нейтронное гало

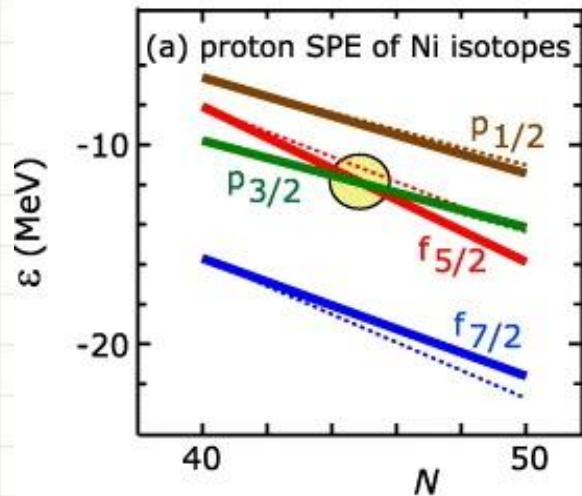


^{11}Li : TRIUMF
 ^{12}Be : ISOLDE

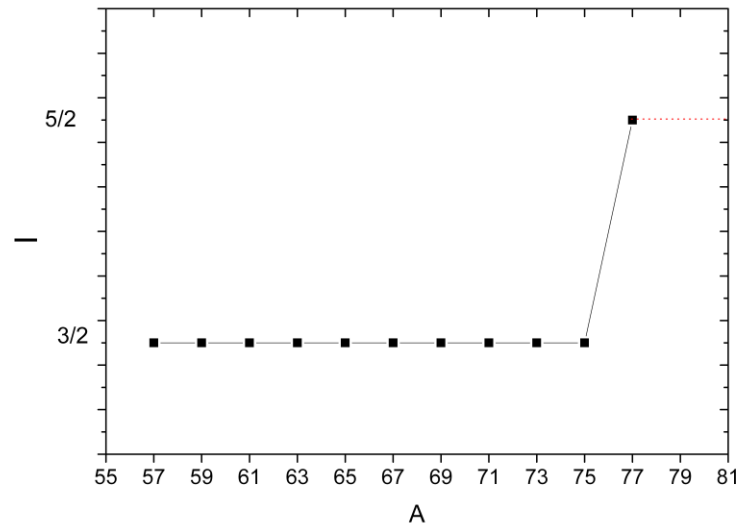
μ и Q_S измерены ранее также с помощью лазерной спектроскопии:
деформация отсутствует

Область средних масс: эволюция оболочечной структуры удалённых ядер

$Z = 28$



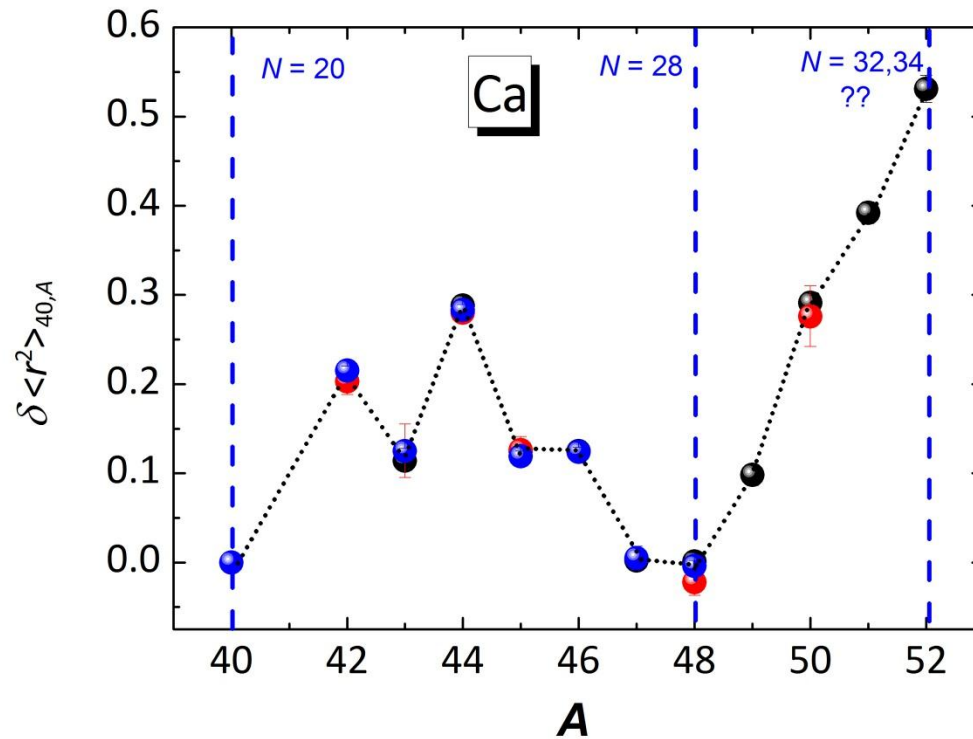
$f_{5/2} / p_{3/2}$ inversion was shown by I and μ laser measurements ($^{71,73,75,77}\text{Cu}$) and may be explained with **tensor force** inclusion.



spins for odd ^{29}Cu isotopes

Same inversion was found for Ga ($A=79-81, N=48-50$).

Поиск (подтверждение) новых магических чисел

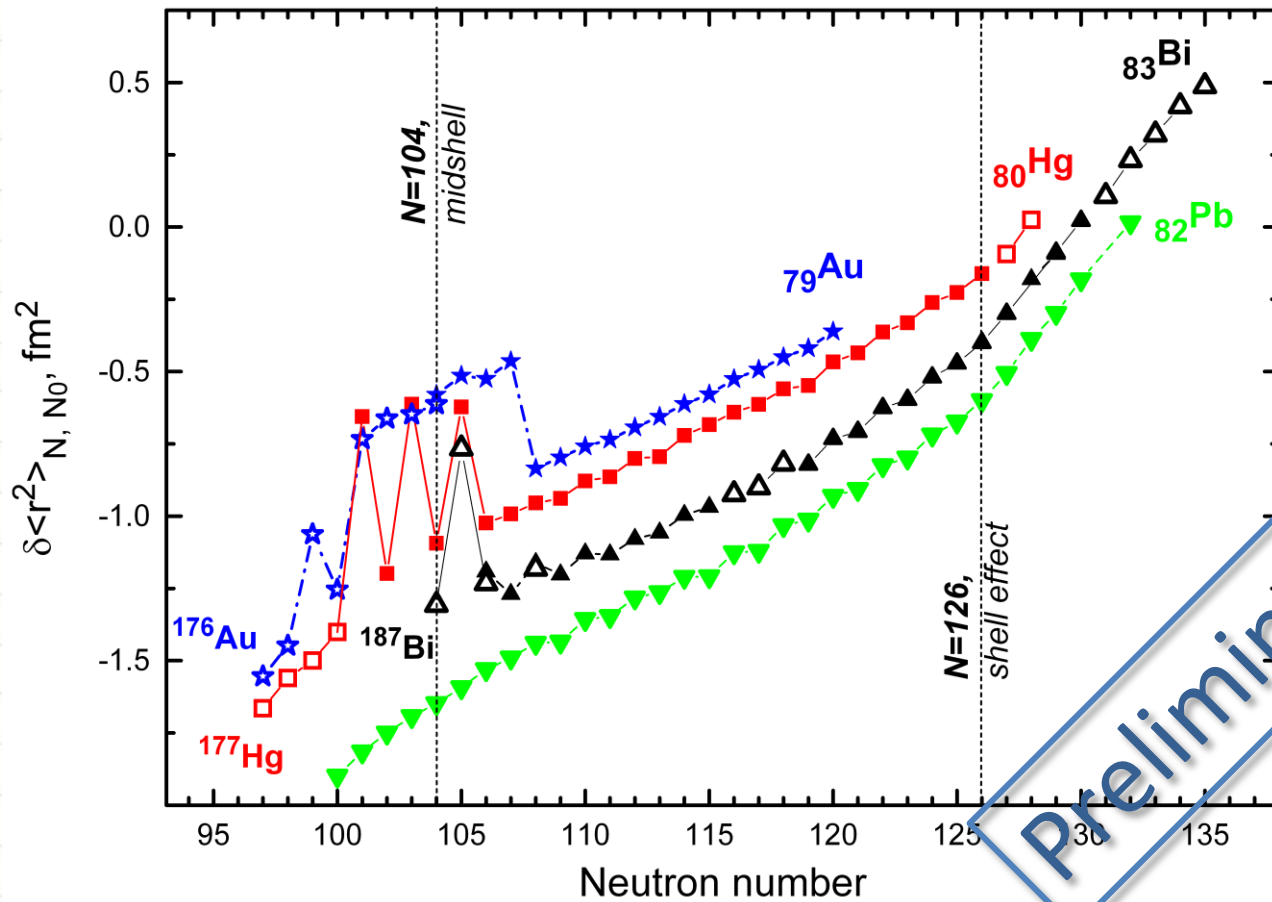


^{40}Ca
 ^{48}Ca

Измерение масс:

$^{52}\text{Ca}, ^{54}\text{Ca} - ?$

Область $Z = 82$: сосуществование форм



Preliminary

Основные характеристики экспериментальной методики

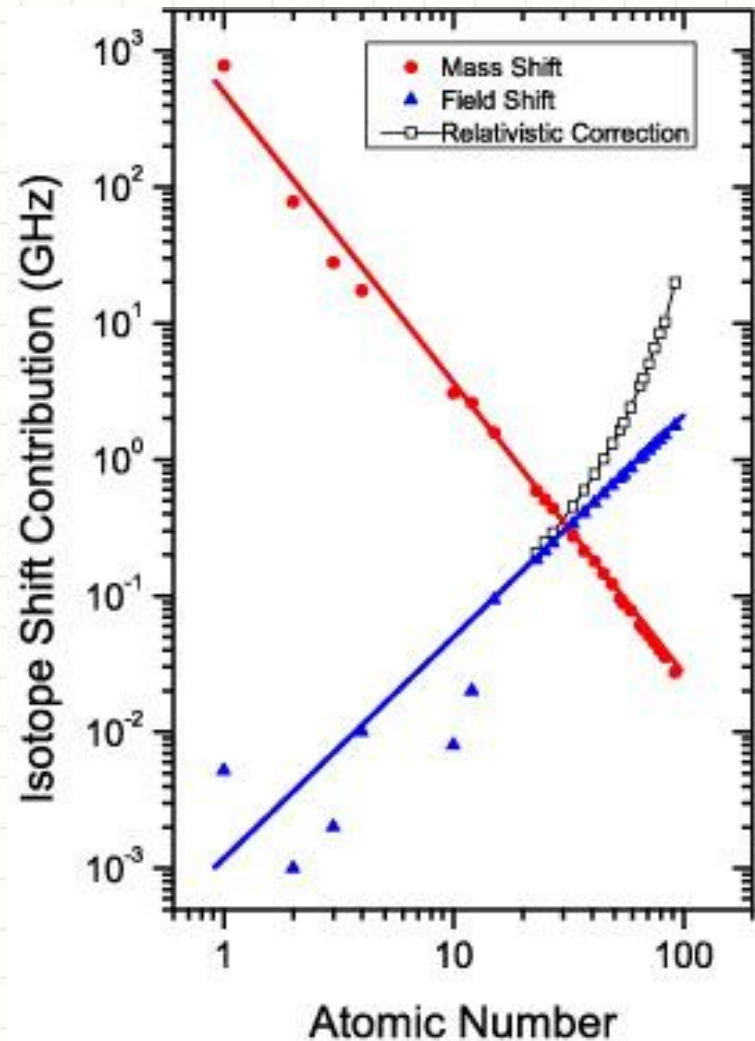
- Разрешение
- Чувствительность
- Универсальность / область применения

Спектральное разрешение

Основной фактор, определяющий разрешение методики – доплеровское Уширение:

$$\Delta\nu_D = 7.16 \times 10^{-7} \nu_0 \sqrt{T/M},$$

> 1 ГГц



Спектральное разрешение

Doppler free

Двухфотонная спектроскопия

Sub-Doppler

Коллинеарная геометрия
+ быстрые ионные (атомные) пучки

Перпендикулярная геометрия
+ коллиммированные атомные пучки

Doppler-limited

Доплеровское уширение

Доплеровское + столкновительное
уширение

Чувствительность и универсальность : Методы детектирования

- Оптические (флуоресценция)
- Регистрация заряженных частиц (фотоионизация)
 - ✓ Прямая регистрация (цилиндр Фарадея, ВЭУ,...)
 - ✓ Регистрация радиоактивных распадов (α , β , ...)

Взаимодействие лазерного излучения с исследуемыми нуклидами:

- на выходе масс-сепаратора (коллинеарная спектроскопия и др.)
- на входе масс-сепаратора (in-source, in-gas-cell, in-gas-jet, LIST)

Взаимодействие лазерного излучения с исследуемыми нуклидами:

- Непрерывные лазеры (cw)
- Импульсные лазеры. Фотоионизация: проблема скважности («duty cycle») $\tau_{\text{имп}}/\Delta T$

✓ синхронизация временной структуры лазерного излучения и потока атомов (ловушки, лазерная десорбция): CRIS

✓ Увеличение времени нахождения атомов в зоне облучения: *in-source, in-gas-cell*

Коллинеарная спектроскопия

$$\delta v = \frac{1}{\sqrt{2mE}} \delta E.$$

В области средних масс ($A = 100$):

Разброс энергий иона в ионном источнике: $\delta E \approx 1$ эВ

Разброс скоростей: $\delta v \approx 1500$ м/с

На выходе масс-сепаратора (30 кэВ):

Разброс энергий иона в ионном источнике: $\delta E \approx 1$ эВ

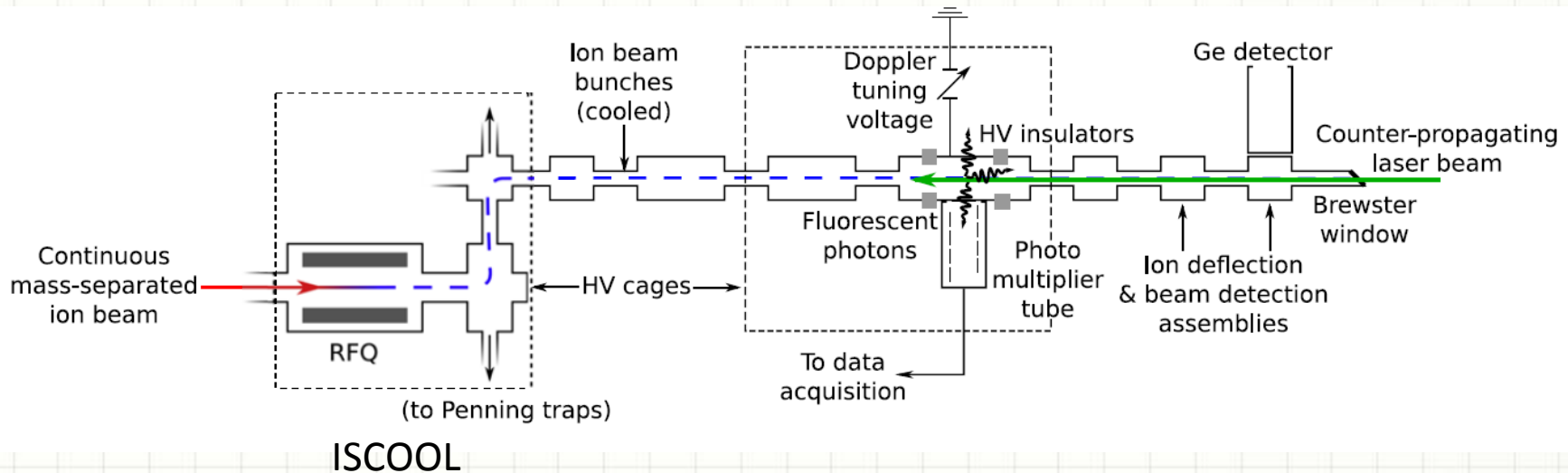
Разброс скоростей: $\delta v \approx 4$ м/с

Для перехода с $\lambda = 300$ нм

остаточное доплеровское уширение $\delta v_D \approx 30$ МГц

сравнимо с естественной шириной линии ($\tau = 5$ нс)

Установка COLLAPS (ISOLDE/CERN) COLlinear LAsEr SPectroscopy



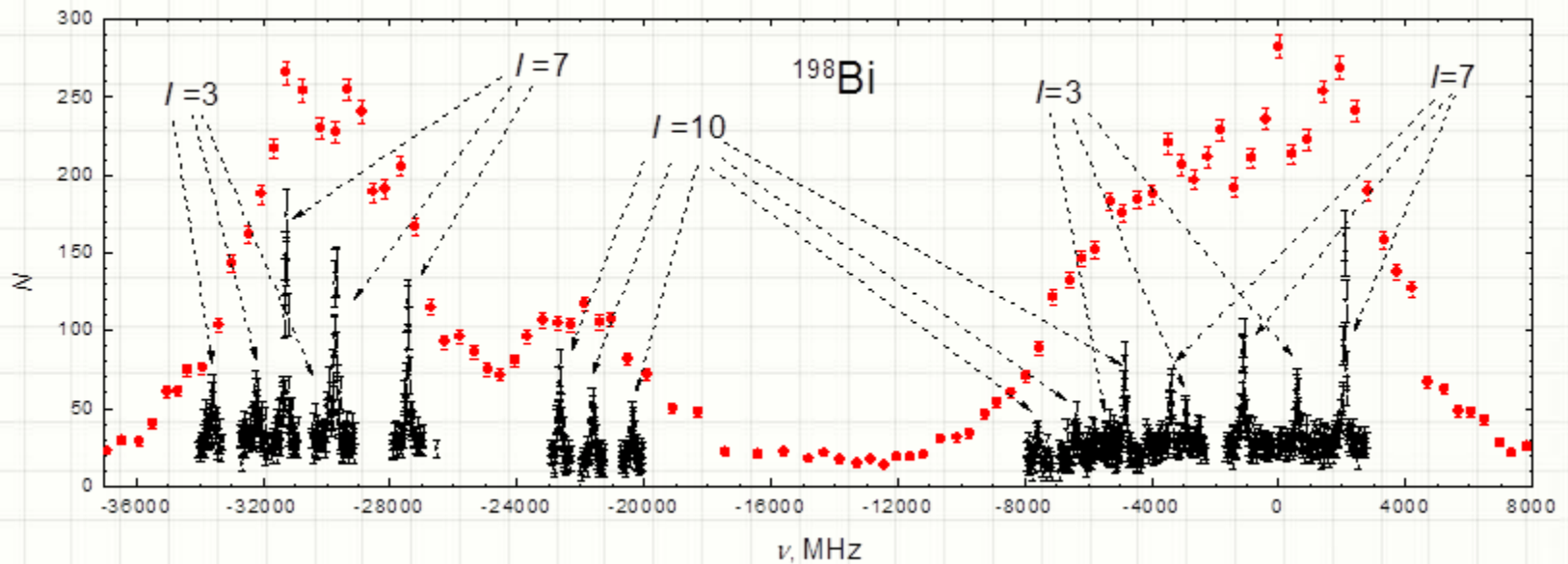
ISCOOL: снижение фона по сравнению с «классической» конфигурацией : $\sim 10^4$

Ионный ток из масс-сепаратора > 100 ионов в секунду

Снижение фона за счёт регистрации совпадений фотон-ион(атом)
«coincidence spectroscopy» (JYFL, Ювяскюля)

Повышение эффективности детектирования - оптическая накачка

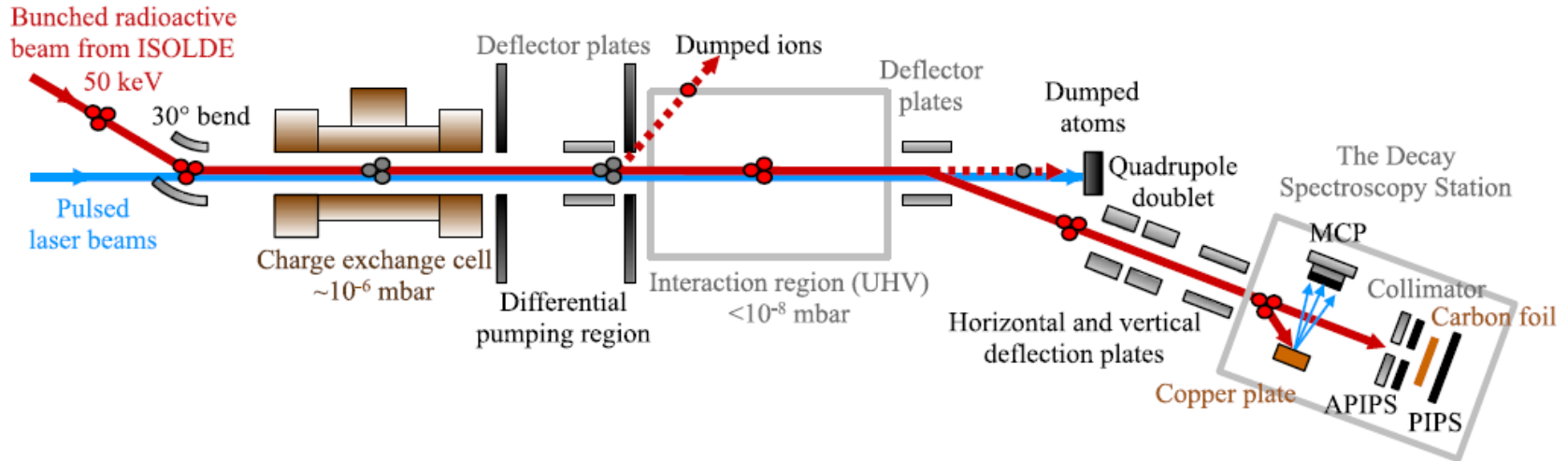
Установка COLLAPS (ISOLDE/CERN) COLlinear LASer SPectroscopy



- Спектр ^{198}Bi , полученный с помощью спектроскопии в лазерном ионном источнике («in-source»)
- Спектр ^{198}Bi , полученный с помощью коллинеарной спектроскопии (COLLAPS)

Установка CRIS (ISOLDE/CERN)

Collinear Resonance Ionization Spectroscopy



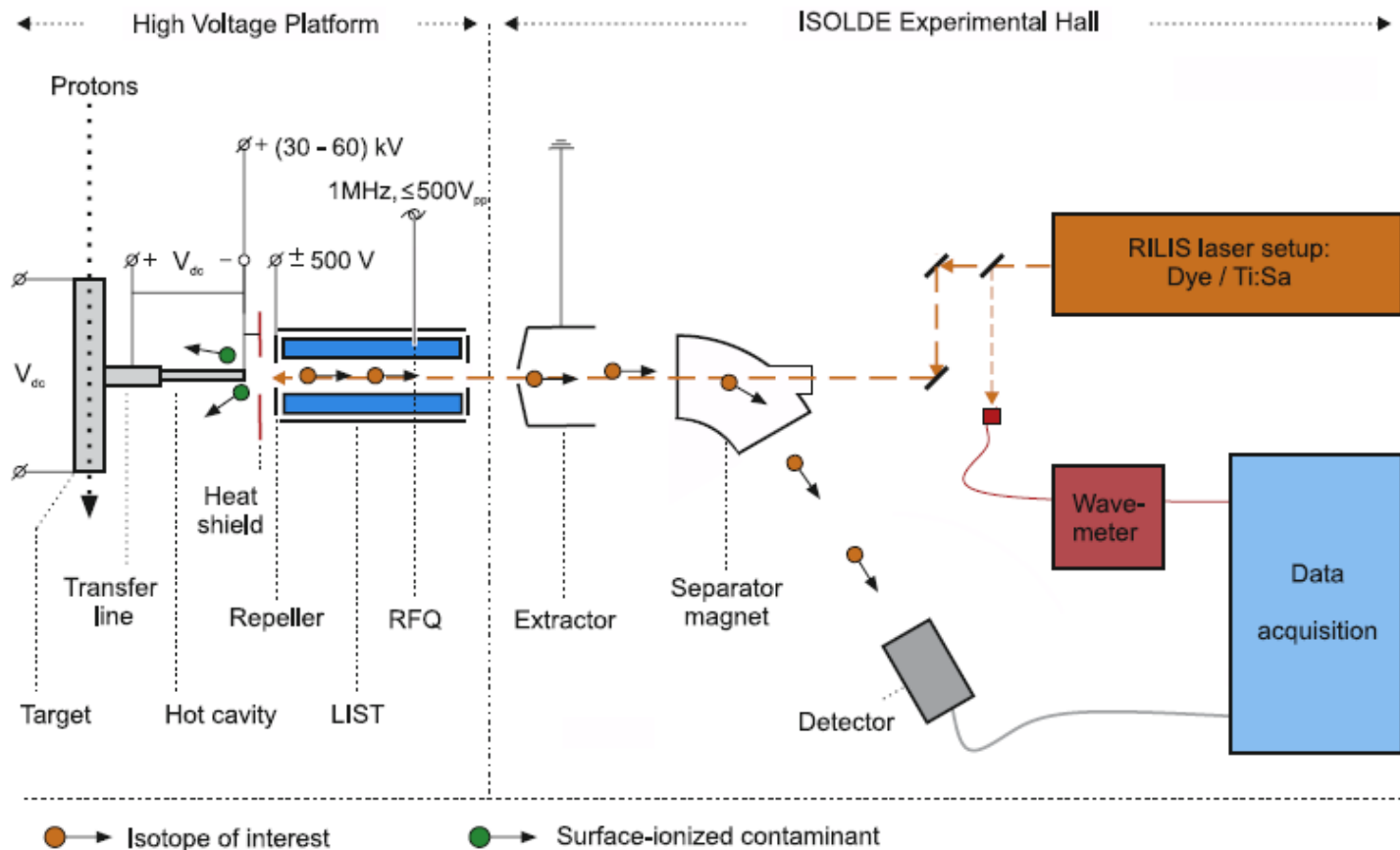
Длительность банча ионов (атомов): 1-5 мкс

Высокая эффективность фотоионизации: высокая чувствительность:
 20 c^{-1} (^{78}Cu)

Хорошее разрешение $\sim 30 \text{ МГц}$

Fr, Ra, Ga, Cu

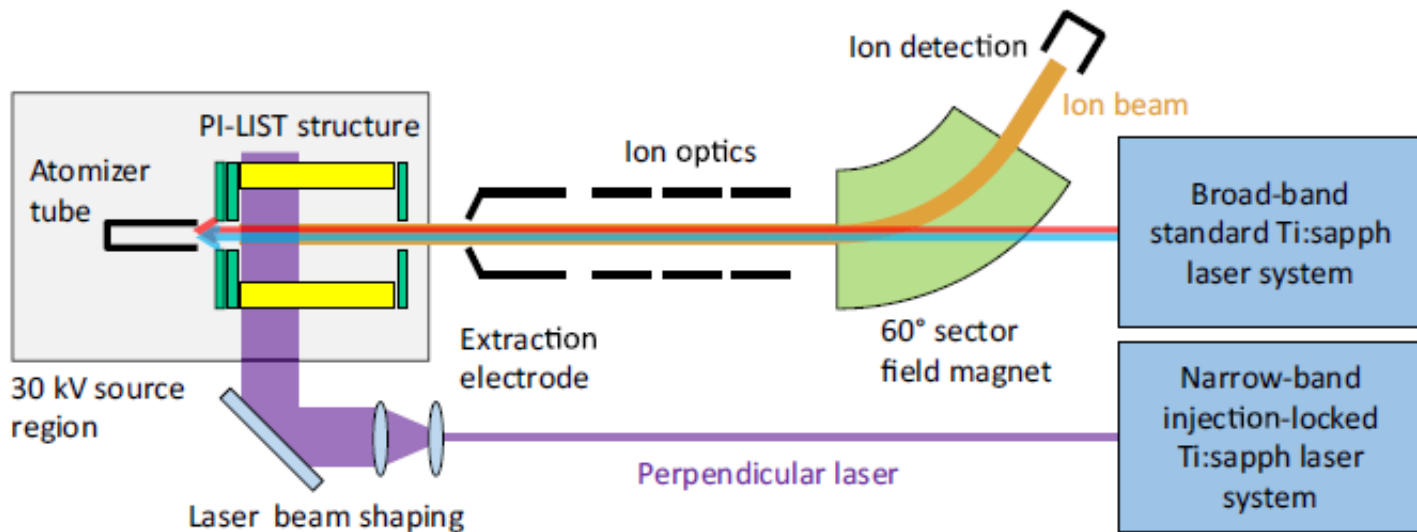
LIST (Laser Ion Source and Trap) ISOLDE (CERN) вариант In-source Photoionization Spectroscopy



Снижение фона поверхностной ионизации: $\sim 10^4$
Снижение эффективности фотоионизации: $\sim 50-100$

^{217}Po

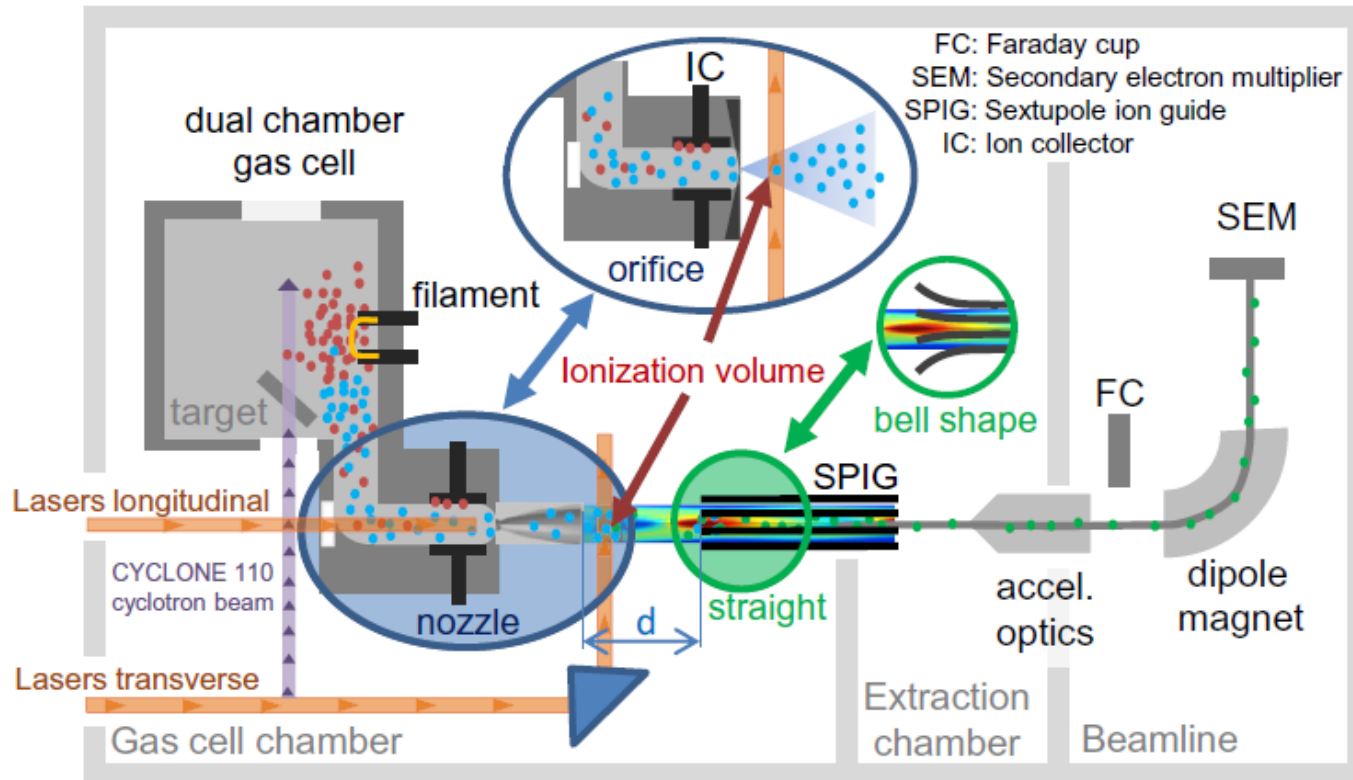
PI-LIST (Perpendicularly Illuminated Laser Ion Source and Trap)



Сужение ширины линии до 100 МГц

Снижение эффективности фотоионизации по сравнению с LIST: $\sim 2-3$

IGLIS (In-Gas Laser Ionization Spectroscopy) LISOL (Leuven Isotope Separator On-Line)



$57-59\text{Cu}$
 $97-101\text{Ag}$

Быстрый вылет продуктов ядерных реакций из газовой ячейки: 1-10 мс:
измерение короткоживущих изотопов

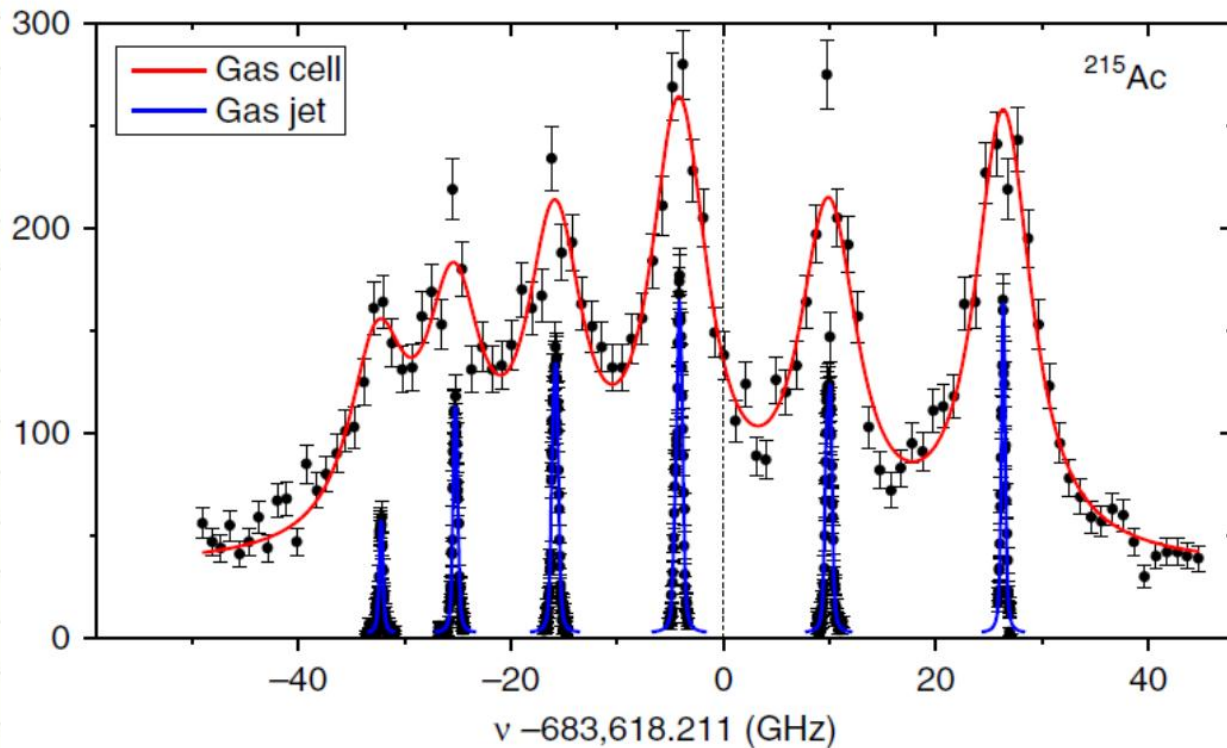
Доступ к труднолетучим (refractory) элементам

Ar: 200-500 mbar
 $\Delta v \sim 4-10$ ГГц

In-gas-jet RIS

При одинаковой эффективности - увеличение разрешения более чем в 10 раз:

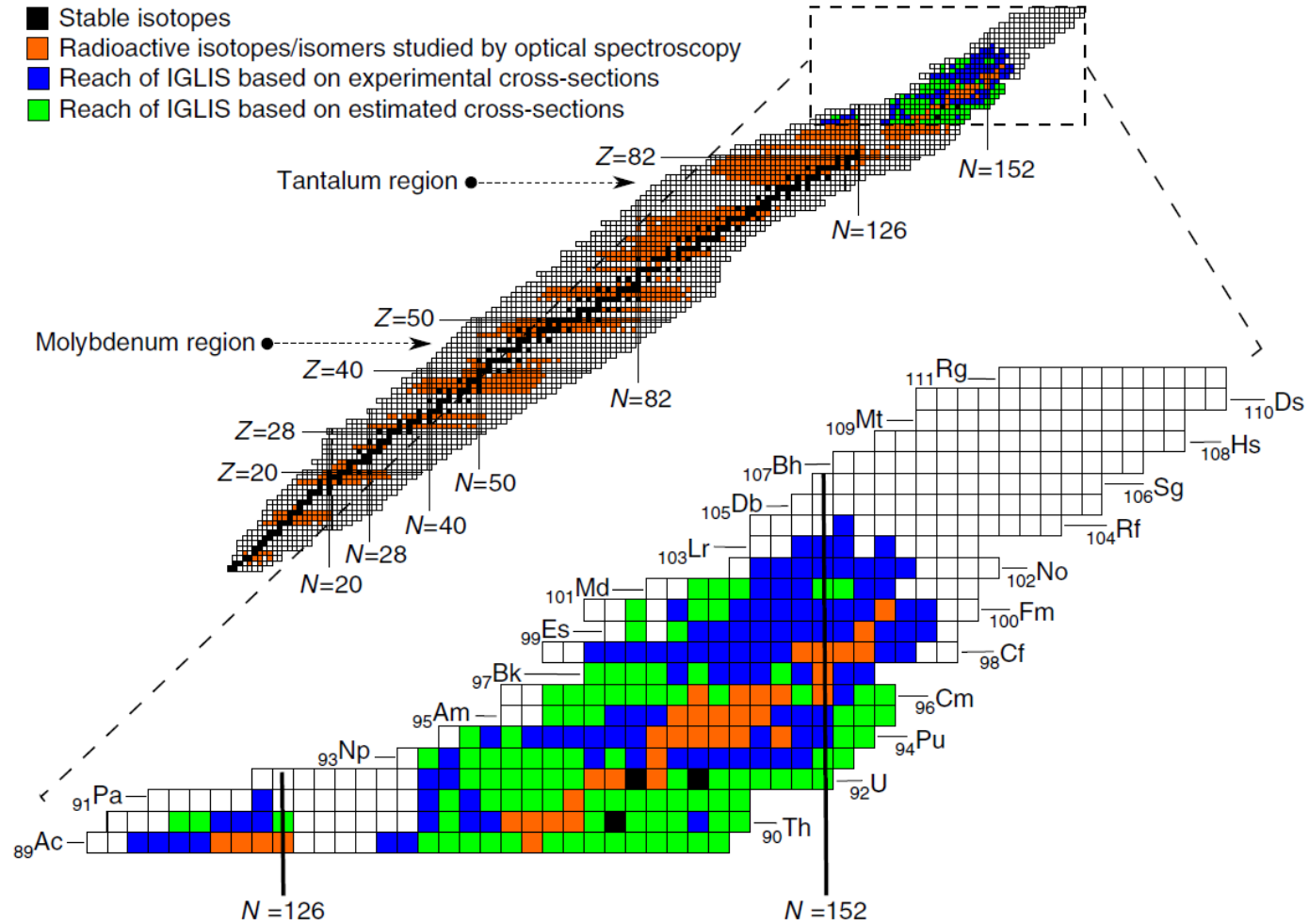
6 ГГц >>> 300 МГц (^{215}Ac)



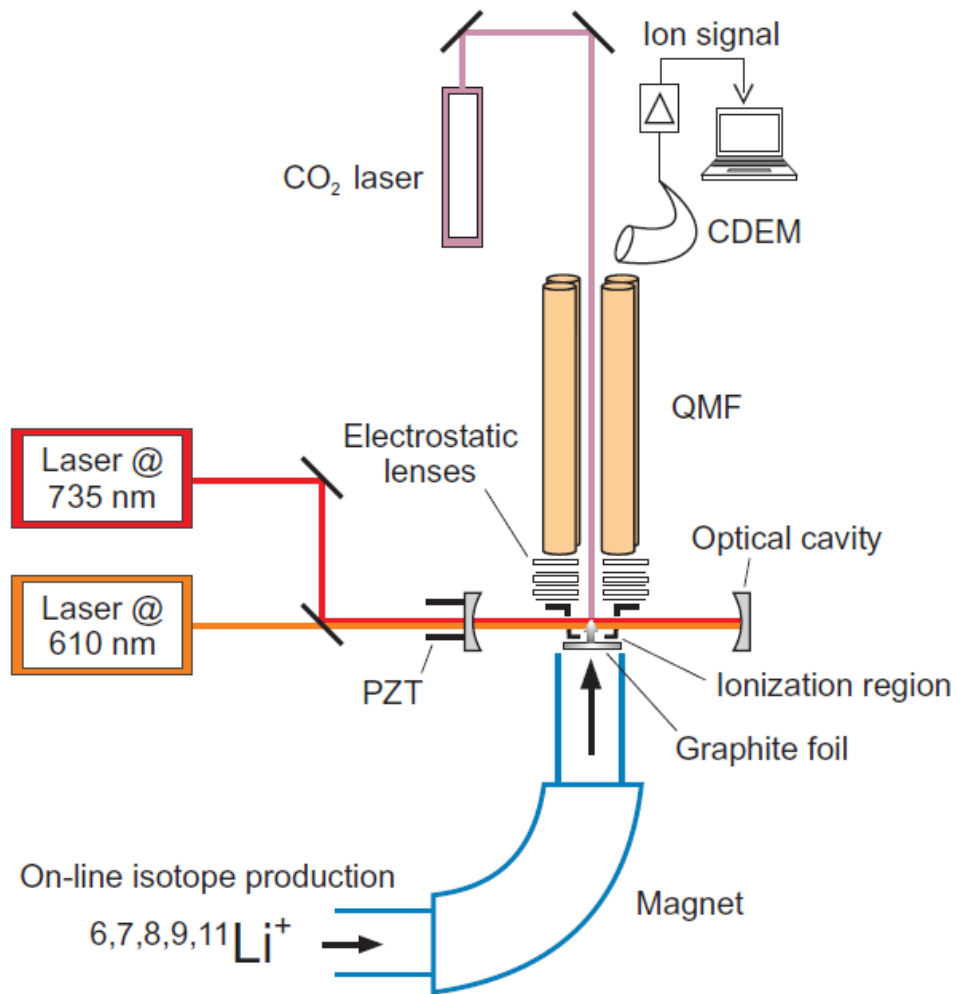
212–215Ac

Эффективность детектирования $\sim 0,5\%$, планируется довести до 10%

In-gas-jet RIS



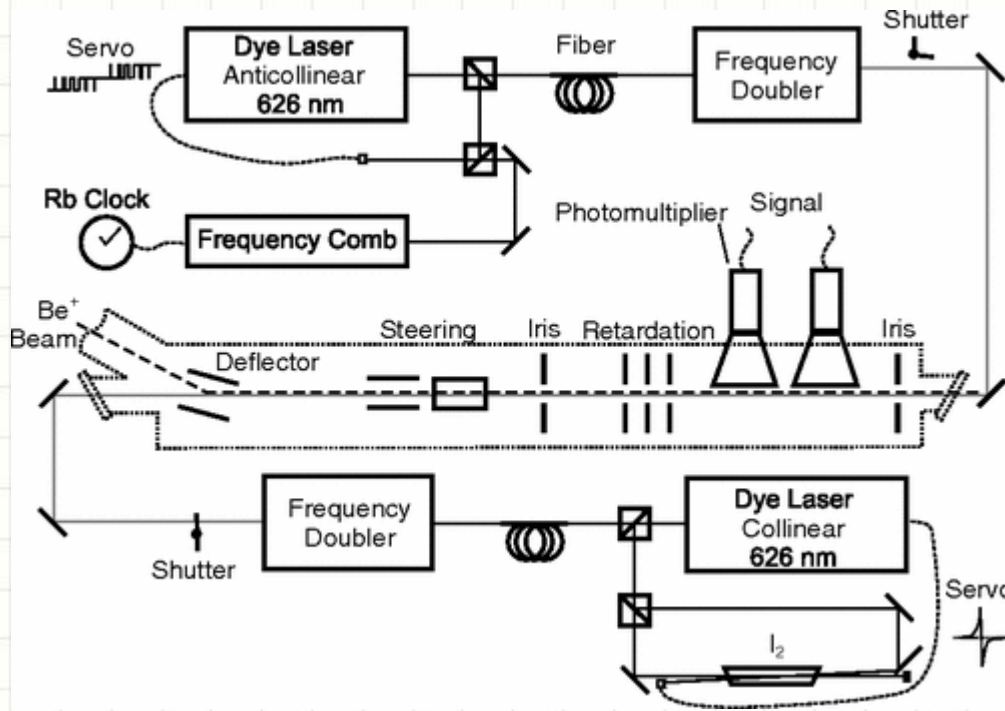
«Сверхвысокое» разрешение двухфотонная спектроскопия



^{11}Li

TRIUMF

«Сверхвысокое» разрешение квази-двухфотонная спектроскопия



^{12}Be

ISOLDE

$$v_+ v_- = v_0^2$$

Публикации с участием лазерной группы ИРИС

IGLIS

Hyperfine Interactions 127 (2000) 91–94
Resonance ionization spectroscopy of radioisotopes at the IGISOL facility, JYFL

G. Yeandle^a, J. Billowes^a, P. Campbell^a, P. Dendooven^b, K. Peräjärvi^b, M.D. Seliverstov^c, G. Tungate^d and J. Äystö^b

NATURE COMMUNICATIONS | 8:14520

Towards high-resolution laser ionization spectroscopy of the heaviest elements in supersonic gas jet expansion

R. Ferrer¹, A. Barzakh², B. Bastin³, R. Beerwerth^{4,5}, M. Block^{6,7,8}, P. Creemers¹, H. Grawe⁶, R. de Groot¹, P. Delahaye³, X. Fléchar⁹, S. Franchoo¹⁰, S. Fritzsche^{4,5}, L.P. Gaffney¹, L. Ghys^{1,11}, W. Gins¹, C. Granados¹, R. Heinke¹², L. Hijazi³, M. Huysse¹, T. Kron¹², Yu. Kudryavtsev¹, M. Laatiaoui^{6,7}, N. Lemesne³, M. Loiselet¹³, F. Lutton³, I.D. Moore¹⁴, Y. Martínez^{1,15}, E. Mogilevskiy^{1,16}, P. Naubereit¹², J. Piot³, S. Raeder¹, S. Rothe¹⁵, H. Savajols³, S. Sels¹, V. Sonnenschein¹⁴, J.-C. Thomas³, E. Traykov³, C. Van Beveren¹, P. Van den Bergh¹, P. Van Duppen¹, K. Wendt¹² & A. Zadornaya¹

COMPLIS

Hyperfine Interact (2006) 171:173–179
Laser spectroscopy measurements of neutron-rich tellurium isotopes by COMPLIS

R. Sifi • F. Le Blanc • N. Barré • L. Cabaret • J. Crawford • M. Ducourtieux • S. Essabaa • J. Genevey • G. Huber • M. Kowalska • C. Lau • J. K. P. Lee • G. Le Scornet • J. Oms • J. Pinard • B. Roussière • J. Sauvage • M. Seliverstov • H. Stroke •

COLLAPS

Physics Letters B 760 (2016) 387–392

Quadrupole moments of odd-A ^{53–63}Mn: Onset of collectivity towards N = 40

C. Babcock^{a,b,*}, H. Heylen^{c,*}, M.L. Bissell^d, K. Blaum^e, P. Campbell^d, B. Cheal^a, D. Fedorov^k, R.F. Garcia Ruiz^c, W. Geithner^g, W. Gins^c, T. Day Goodacre^{d,b}, L.K. Grob^{i,d}, M. Kowalska^b, S.M. Lenzi^h, B. Maass¹, S. Malbrunot-Ettenauer^b, B. Marsh^b, R. Neugart^{e,j}, G. Neyens^c, W. Nörtershäuser¹, T. Otsuka¹, R. Rossel^b, S. Rothe^b, R. Sánchez^g, Y. Tsunoda¹, C. Wraith^a, L. Xie^d, X.F. Yang^c

PHYSICAL REVIEW LETTERS 103, 142501 (2009).

“Nuclear spins and magnetic moments of ^{71;73;75}Cu: inversion of $\pi 2p_{3/2}$ and $\pi 1f_{5/2}$ levels in ⁷⁵Cu”

K.T. Flanagan, P. Vingerhoets, M. Avgoulea, J. Billowes, M.L. Bissell, K. Blaum, B. Cheal, M. De Rydt, V.N. Fedosseev, D.H. Forest, Ch. Geppert, U. Köster, M. Kowalska, J. Krämer, K.L. Kratz, A. Krieger, E. Mané, B.A. Marsh, T. Materna, L. Mathieu, P.L. Molkanov, R. Neugart, G. Neyens, W. Nörtershäuser, M.D. Seliverstov, O. Serot, M. Schug, M.A. Sjoedin, J.R. Stone, N.J. Stone, H.H. Stroke, G. Tungate, D.T. Yordanov, and Yu.M. Volkov

CRIS

PHYSICAL REVIEW C 96, 041302(R) (2017)

Dipole and quadrupole moments of ^{73–78}Cu as a test of the robustness of the Z = 28 shell closure near ⁷⁸Ni

R. P. de Groot^{1,*}, J. Billowes², C. L. Binnersley², M. L. Bissell², T. E. Cocolios¹, T. Day Goodacre³, G. J. Farooq-Smith¹, D. V. Fedorov⁴, K. T. Flanagan², S. Franchoo⁵, R. F. Garcia Ruiz², Á. Koszorús¹, K. M. Lynch⁶, G. Neyens^{1,6}, F. Nowacki⁷, T. Otsuka^{1,8,9,10}, S. Rothe^{2,3}, H. H. Stroke¹¹, Y. Tsunoda¹⁰, A. R. Vernon², K. D. A. Wendt¹², S. G. Wilkins², Z. Y. Xu¹ and X. F. Yang¹

LIST

PHYSICAL REVIEW X 5, 011018 (2015)

In-Source Laser Spectroscopy with the Laser Ion Source and Trap: First Direct Study of the Ground-State Properties of ^{217,219}Po

D. A. Fink^{1,2,3,*}, T. E. Cocolios^{4,5}, A. N. Andreyev^{6,7}, S. Antalic⁸, A. E. Barzakh⁹, B. Bastin¹⁰, D. V. Fedorov⁹, V. N. Fedosseev¹, K. T. Flanagan⁴, L. Ghys^{11,12}, A. Gottberg^{1,13}, M. Huysse¹¹, N. Imai¹⁴, T. Kron¹⁵, N. Lemesne¹⁰, K. M. Lynch^{4,5,11}, B. A. Marsh¹, D. Pauwels¹², E. Rapisarda⁵, S. D. Richter¹⁵, R. E. Rossel^{1,15}, S. Rothe^{1,15}, M. D. Seliverstov^{6,9}, A. M. Sjödin¹⁰, C. Van Beveren¹¹, P. Van Duppen¹¹ and K. D. A. Wendt¹⁵

¹EN Department, CERN, CH-1211 Geneva, Switzerland

Перспективы

Продолжение исследований

- ISOLDE, ИРИС, TRIUMF, JYFL

планируется

- **ПИК**, FAIR (CS), JYFL (IGLIS, CS),
Дубна (IGLIS), MSU (CS), RIKEN
(IGLIS), RISP (CS) , GANIL (CS, IGLIS)