

# Ионные ловушки в фундаментальных исследованиях

*(продолжение)*

**Ю.Н. Новиков**

*Объединённый семинар ОФВЭ-ОТФ ПИЯФ  
24 июня 2021 г.*

# Содержание доклада

- Место ионных ловушек в масс-спектрометрии
- Как устроена ловушка?
- Ионная ловушка и нейтринная физика:  
*Дираковское или Майорановское нейтрино в двойном электронном захвате?*  
*Нужно ли и как измерить массу нейтрино с помощью ионной ловушки?*
- Ионная ловушка и QED:  
*Массовый ландшафт сверхтяжёлых элементов*  
*Необычное явление высокоэнергичной атомной изомерии*
- Ионная ловушка и перечень других проблем фундаментальной физики:  
*Проверка принципа СРТ,*  
*Унитарность матрицы СКМ,*  
*Специальная теория относительности,*  
*Измерения мировых констант*  
*Поиск стерильных нейтрино с массой около 1 кэВ*

## Что измеряется в ловушках и как определяются массы?

- $R = \frac{m}{m_k} = \frac{\nu_k}{\nu}$  - отношение циклотронных частот калибровочного и искомого ионов (измеряемая величина)
- Отсюда определяется неизвестная масса иона при известной массе калибровочного:  $m = m_k \cdot R$
- Неизвестная масса нейтрального атома определяется через массу однократно заряженного иона как:

$$M = m + m_e - B_e / c^2, \text{ с погрешностью } \delta M$$

где  $m_e$  масса электрона, а  $B_e$  - энергия его связи.

Так как  $m_e$  и  $B_e \ll m$  можно считать, что  $\delta M/M \approx \delta R/R$

В таблицы масс вносятся значения  $M \pm \delta M$ . Заметим, что масса атома углерода по определению равна  $12.0 \pm 0.0$  и

Во многих задачах физики требуются разности масс. Их можно просто получить измерением отношений частот R

$$Q = M_i - M_f = (M_f - m_e)(R-1) + RB_f - B_i \approx (M_f - m_e)(R-1)$$

$R = \frac{m_i}{m_f} = \frac{\nu_f}{\nu_i}$  - отношение циклотронных частот дочернего и материнского ионов  
- измеряемая величина,

$$\frac{\delta Q}{Q} \approx \frac{\delta R}{R-1} - \text{измеряемая величина,}$$

где

Q- определяемая разность масс нейтральных атомов,

B – энергии связи валентных электронов, которыми можно пренебречь

# Основные достоинства ионной ловушки Пеннинга

- Высочайшая точность измерения масс, превосходящая измерения всеми другими существующими методами на много порядков
- Непревзойдённая чувствительность: на уровне регистрации одной частицы
- Достоверность получаемых данных, откалиброванных во время эксперимента непосредственно углеродом-эталонном массы

## Требования к ловушке для прецизионности измерений

Давление в ловушке	$P \leq 10^{-16}$ mbar
Характеристики магнитного поля	$\delta B/B \delta t < 10^{-9}/\text{h}$ $\delta B/B \leq 10^{-8}$ per 1 cm <sup>3</sup>
Температура ионов в ловушке	$T \approx \text{mK}$
Стабилизация системы сверхпроводящего магнита	$\Delta T < 10$ mK $\Delta P < 0.05$ mbar

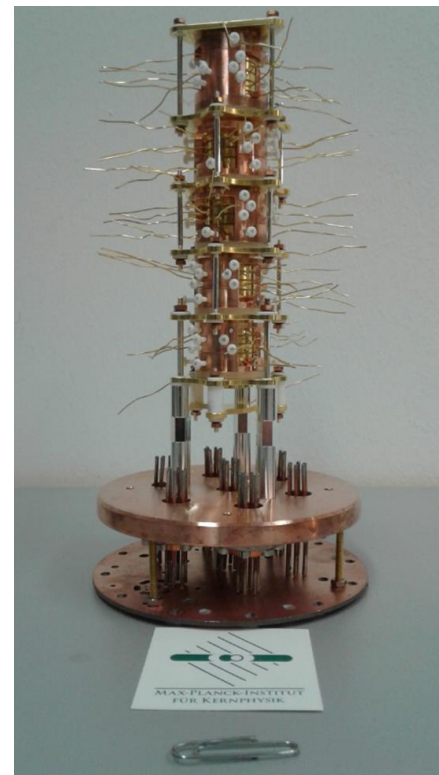
## Потребности различных областей науки в точности измерения массы (полной энергия связи системы)

Область науки	Достаточная точность измерения	Действующая ловушка
Химия+биология	$10^{-6}$	коммерческие
Ядерная физика, астрофизика	$10^{-7}$	ISOLTRAP, CPT
Атомная и молекулярная физика, QED	$10^{-9-11}$	SHIPTRAP, JYFLTRAP, LEBIT, TITAN, FSU
Элементарные частицы, CPT, фунд. константы, физика вне СМ	$\leq 10^{-11}$	PENTATRAP



Институт Макса Планка по ядерной физике  
Гейдельберг, Германия

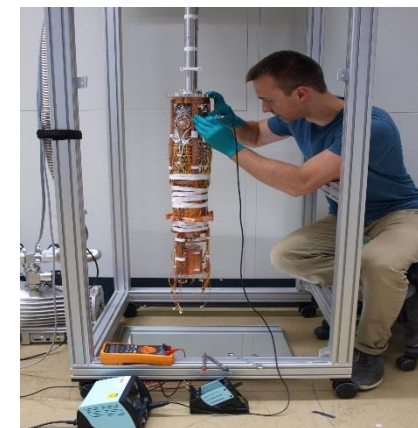
# РЕНТАТРАР



Prof. Dr. K. Blaum



Д-р С.Елисеев

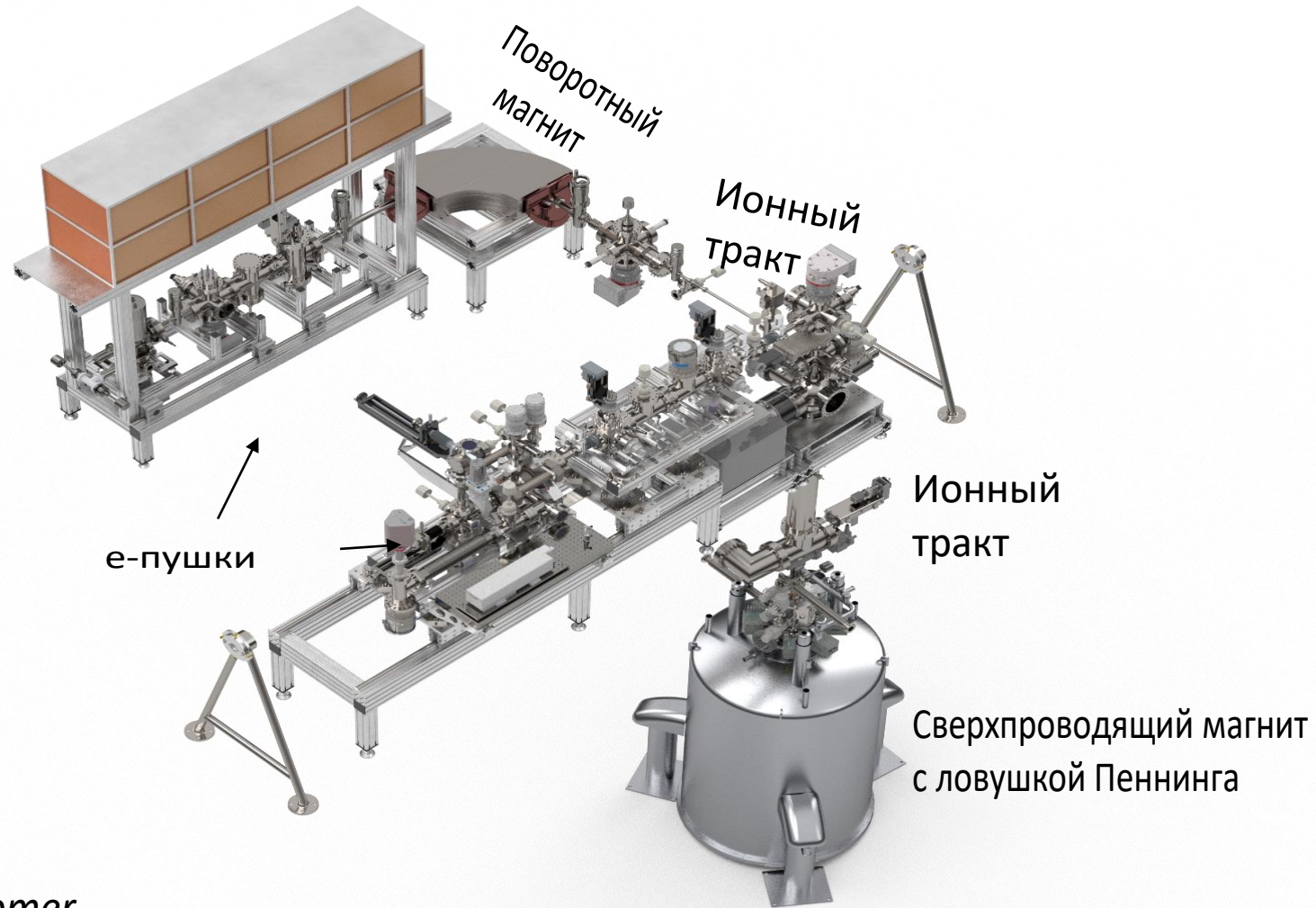


Д-р П.Филянин

## Башня из пяти ловушек



# Система PENTATRAP в институте М.Планка в Гейдельберге / K.Vlaum, S.Eliseev



K. Kromer

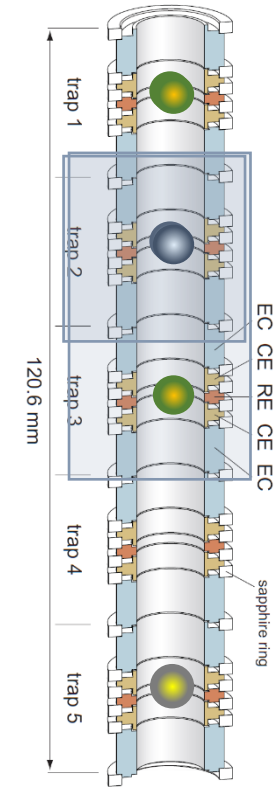
# Атомная изомерия на PENTATRAN

# Измерения отношения частот методом «пинг-понг» на PENTATRAP

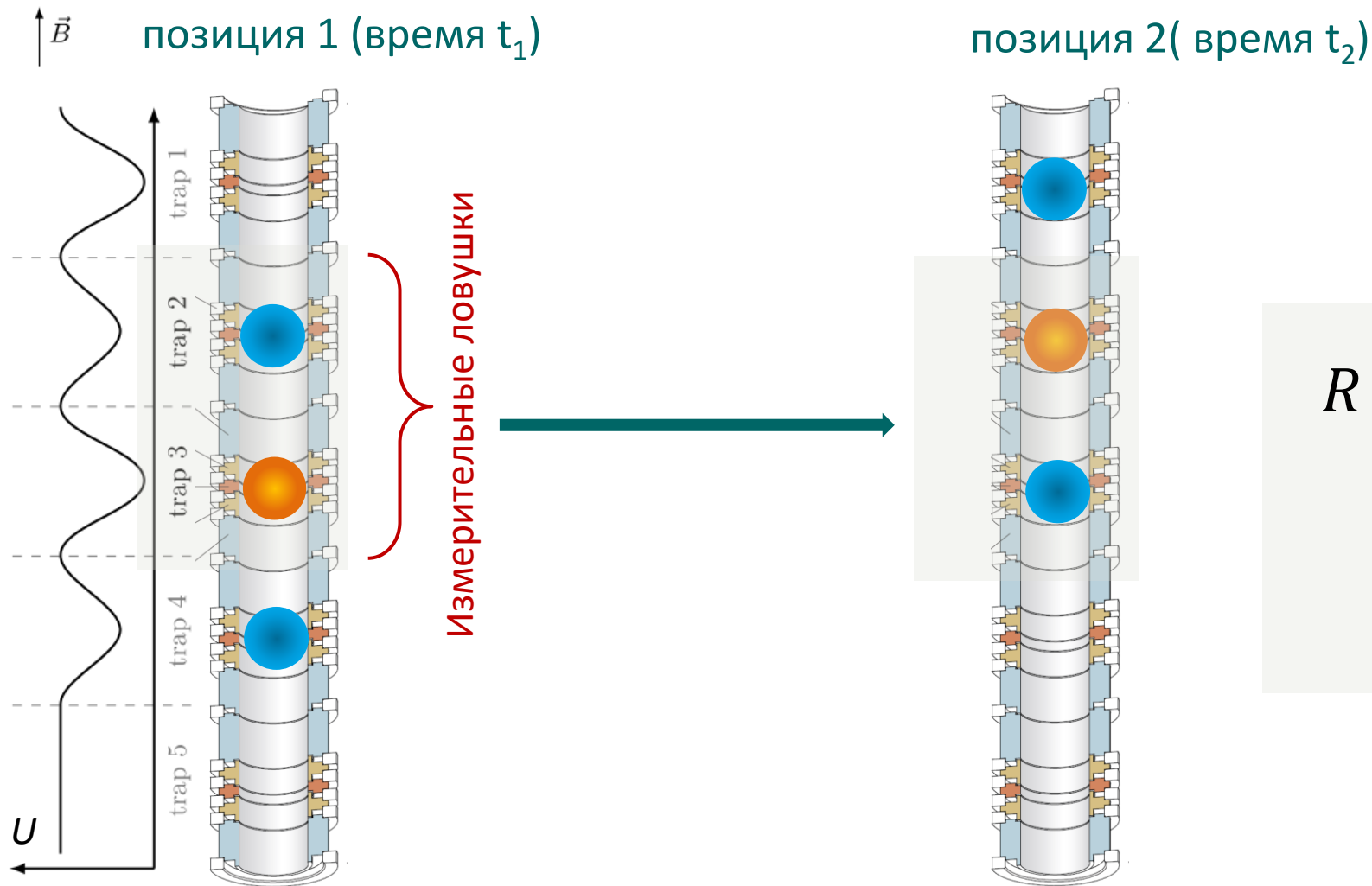
$$\omega_c = \frac{q}{m} \cdot B$$

Магнитное поле неизвестно, но оно не требуется, если имеется второй ион с известной массой

$$R = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{q_1 \cdot m_2}{q_2 \cdot m_1} \frac{E}{E'}$$



# Метод одновременного измерения масс



$$R = \sqrt{R(t_1)R(t_2)} = \frac{m_2}{m_1}$$

если  $\frac{B_{\text{трап2}}}{B_{\text{трап3}}} = \text{const}$

$$R(t_1) = \frac{v_{ion1}}{v_{ion2}}(t_1) = \frac{m_2}{m_1} \frac{B_{\text{трап2}}}{B_{\text{трап3}}}(t_1)$$

$$R(t_2) = \frac{v_{ion1}}{v_{ion2}}(t_2) = \frac{m_2}{m_1} \frac{B_{\text{трап3}}}{B_{\text{трап2}}}(t_2)$$

# Неожиданный результат при измерении отношения циклотронных частот в тройце $^{187}\text{Re}^{29+}$ --- $^{187}\text{Os}^{29+}$ --- $^{187}\text{Re}^{29+}$

- Наблюдались два значения  $R_1$  и  $R_2$ , примерно в одинаковом числе случаев при измерении отношения в  $\text{Re}^{29+}/\text{Os}^{29+}$  при одновременном запуске тройцы



- Такая же разница наблюдалась при измерении этого отношения, когда в трап одновременно запускались три иона  $\text{Re}^{29+}$

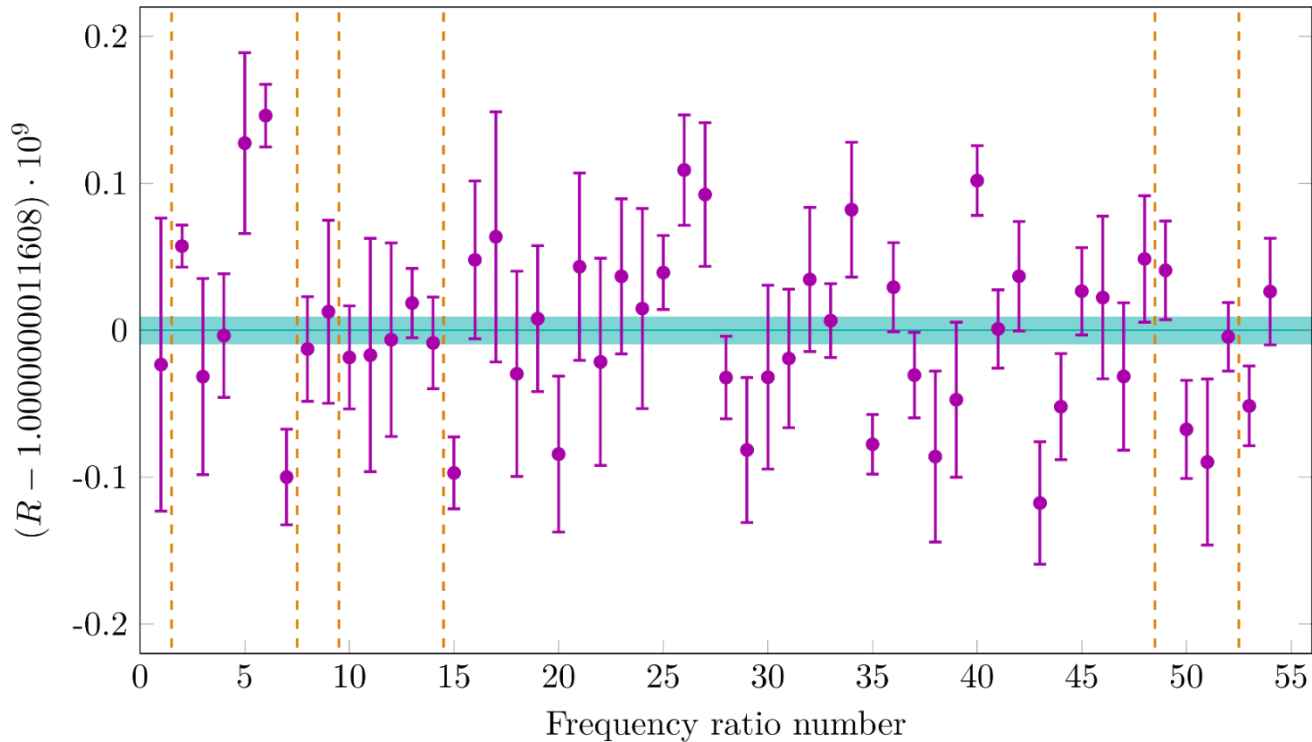


- Однако такой разницы не было,  $R_1=R_2$ , если запускались одновременно три иона  $\text{Os}^{29+}$



- Вывод: Наблюдённая разница может объясняться наличием изомерного состояния в  $^{187}\text{Re}^{29+}$

# Обнаружение метастабильного состояния в высокозарядном ионе $^{187}\text{Re}^{29+}$



$$R - 1 = 1.1608(92) \cdot 10^{-9}$$

$$\delta R = 9.2 \cdot 10^{-12}$$

$$\Delta E = (R - 1)m_2^{\text{ground}}c^2$$

$$\delta(\Delta E) = c^2 \sqrt{\left(m_2^{\text{ground}} \cdot \delta R\right)^2 + \left(\underbrace{(R - 1)\delta m_2^{\text{ground}}}_{\approx 10^{-9}}\right)^2}$$

$$\Delta E = 202.2(1.6) \text{ eV}$$

# Как объяснить наличие долгоживущего состояния с аномально большой энергией возбуждения?

- Доказательством правильности идентификации наличия изомера в  $^{187}\text{Re}^{29+}$  явилось обнаружение такого же уровня в изоэлектронном ионе  $^{187}\text{Os}^{30+}$ ,
- Анализ поведения электронных состояний показал возможность «внедрения» в спектр более высоких термов.

Основное состояние  $\text{Re}^{29+}$  и  $\text{Os}^{30+}$ :  $[\text{Kr}] 4d^{10}$

Метастабильное  $[\text{Kr}] 4d^9 4f^1$  с  $E_{\text{exc}} \approx 200 \text{ eV}$  в  $\text{Re}^{29+}$

Изомер  $\text{Re}^{29+}$

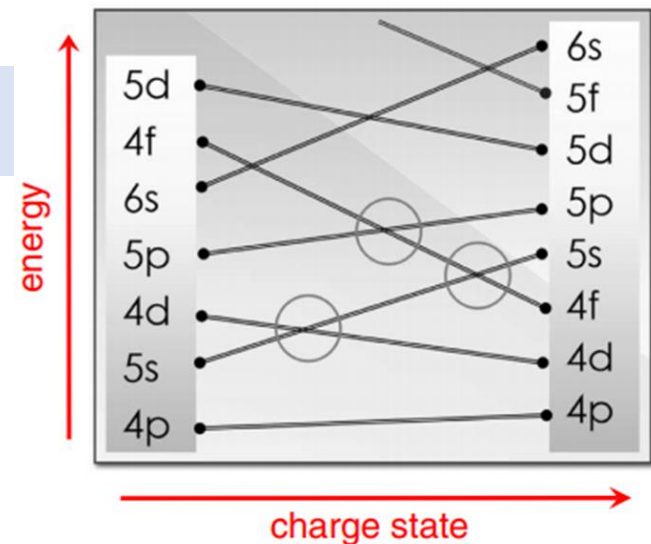
$B_{\text{PENTATRAP}} = 202.2(17) \text{ eV}$   
 $B_{\text{Harman}} = 202.2(5) \text{ eV}$   
 $B_{\text{Indelicato}} = 202.1(27) \text{ eV}$   
 $B_{\text{Haverkort}} = 202.8(4) \text{ eV}$

Основное состояние

Изомер  $\text{Os}^{30+}$

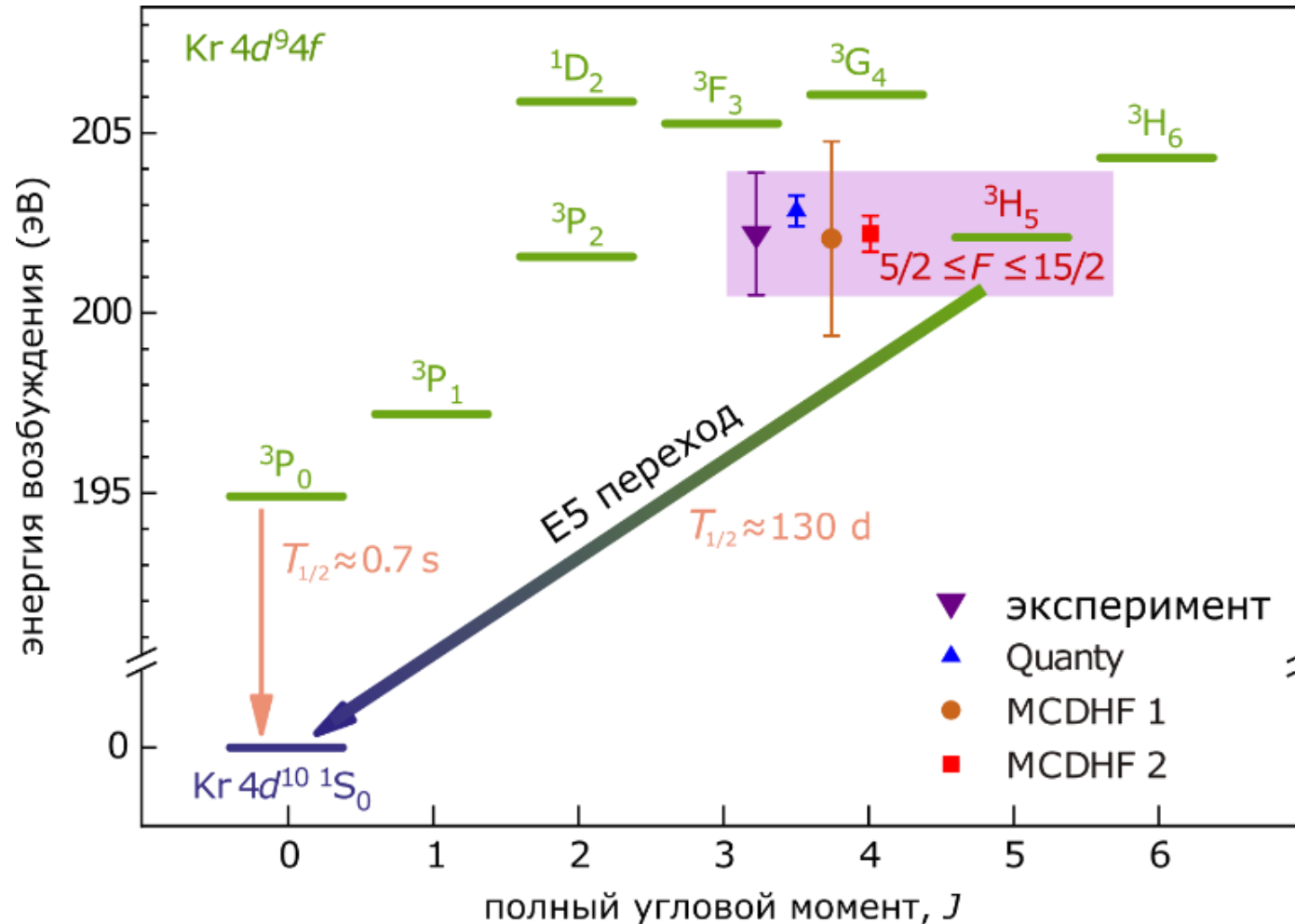
$B_{\text{PENTATRAP}} = 207(3) \text{ eV}$   
 $B_{\text{Haverkort}} = 209(2) \text{ eV}$   
 $B_{\text{Indelicato}} = 207(3) \text{ eV}$

Основное состояние



J. Berengut

# Высокозапретный (E5-electric triacontadipole) распад изомера. Состояние «спиновой ловушки»



R. X. Schüssler, H. Bekker, M. Braß, H. Cakir,  
J. R. Crespo López-Urrutia, M. Door, P. Filianin,  
Z. Harman, M. W. Haverkort, W. J. Huang,  
P. Indelicato, C. H. Keitel, C. M. König,,  
K. Kromer, M. Müller, Y. N. Novikov,  
A. Rischka, C. Schweiger, S. Sturm,  
B. S. Ulmer, S. Eliseev & K. Blaum.

*"Detection of metastable electronic states by Penning trap mass spectrometry",  
Nature **581** (2020) 42-46.*

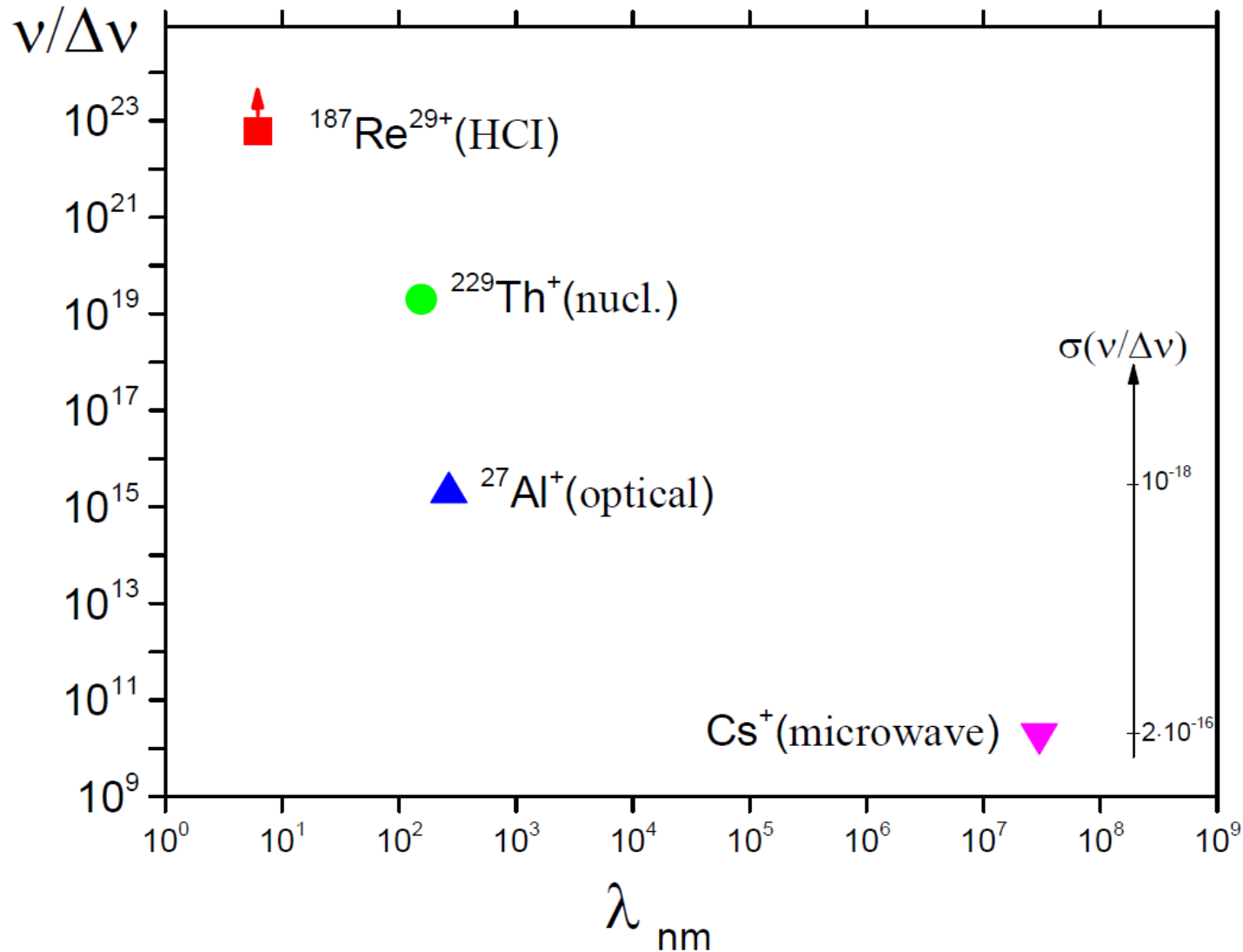


Что дальше, и чем может быть  
интересно наблюждённое явление?

# Дальнейшая программа исследований с привлечением PENTATRAP

- Поиск аналогичных метастабильных состояний в других нуклидах с ионами той же изоэлектронной структуры, например, в  $^{163}\text{Dy}^{20+}$ , у которого ядерный спин равен  $5/2$ , как у  $^{187}\text{Re}$ ,
- Необходимость атомных расчётов таких структур на предмет возникновения «спиновой ловушки» в каждом конкретном случае,
- Какова возможность использования этих многозарядных ионов в качестве эталонов частоты (часов)? *M.G. Kozlov et al. "Highly charged ions"...Rev. Mod. Phys. 90 (2018) 045005*

# Оценённые факторы точности эталонов частоты (часов) различных типов



$$\nu = \frac{E \text{ уровня}}{4.15 \cdot 10^{-15}} \text{ Hz} \quad \rightarrow \quad 5 \times 10^{16} \text{ Hz}$$

$$\Delta\nu = \frac{1}{2\pi\tau_{\text{уровня}}} \text{ Hz} \quad \rightarrow \quad < 10^{-7} \text{ Hz}$$

$$\Lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{\nu} \text{ m} \quad \rightarrow \quad 6 \text{ nm}$$

# Основной результат атомной спектроскопии на PENTATRAP

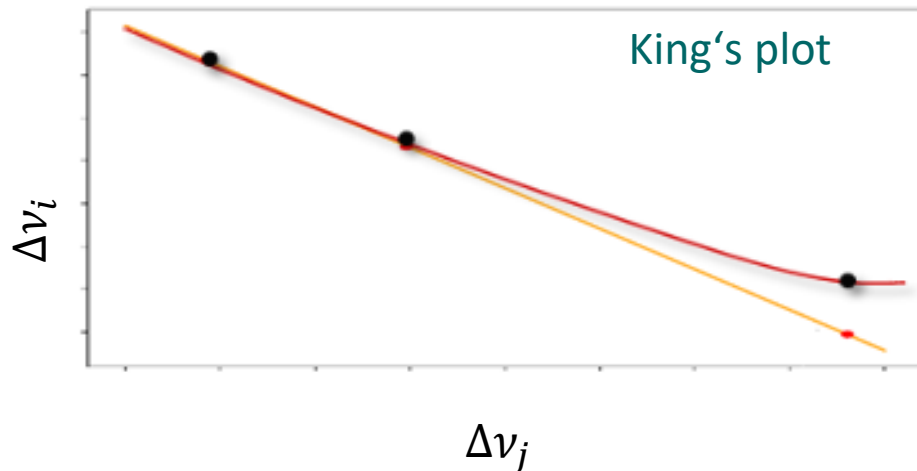
- Обнаружение необычного высоко возбуждённого высокоспинового долгоживущего метастабильного атомного состояния открывает **новое направление** в атомной спектроскопии.
- Проект PENTATRAP ставит целью поиск аналогичных состояний «спиновой ловушки» в других атомах для оценки распространённости явления и для выбора **нового поколения** высокочастотных ионных часов.
- Позволит ли обнаруженное явление в высокочастотных ионных системах исследовать **постоянство мировых констант** во времени?

# Немного фантазии на будущее

- Разность энергий оптических переходов в цепочках изотопов может меняться,
- Это изменение зависит от масс этих изотопов ( $m_1$  и  $m_2$ ):

$$\Delta\nu_i = C_1 \cdot \frac{m_1 - m_2}{m_1 m_2} + C_2 \cdot \Delta\nu_j + \left[ \begin{array}{c} \text{эффекты высокого порядка в SM+ легкий бозон, связывающий} \\ \text{кварки и лептоны пятой силой} \end{array} \right]$$

$\nu_i(\text{изотоп}_1) - \nu_i(\text{изотоп}_2) \equiv \Delta\nu_i$ , где  $i, j$  – относятся к разным оптическим переходам в изотопах 1 и 2



Этот эффект, проявляющийся в нелинейности т.н. «King's plot», можно зафиксировать в разветвлённых цепочках изотопов, отношения масс которых  $m_1/m_2$ , измерены с точностью  $\leq 10^{-11}$ , т.е. на PENTATRAP. В планах измерить массы в цепочках изотопов **Ca, Sr, Yb, Nd, Ba**

Перечень других фундаментальных задач,  
решённых с помощью ловушек Пеннинга

## Другие фундаментальные параметры, полученные с помощью ловушек Пеннинга

$$m_{e^-} / m_{e^+} \quad \text{отличие от единицы} < 8 \times 10^{-9}$$

$$V_{ud} = 0.97373 \quad (31)$$

$$V_{ud}^2 + V_{us}^2 + V_{ub}^2 = 0.99995 \quad (61)$$

$$g_{e^-} / g_{e^+} \quad \text{отличие от единицы} < 2 \times 10^{-12}$$

$$m_{p^+} / m_{p^-} \quad \text{отличие от единицы} \quad 9 \times 10^{-11}$$

$$\delta m_e \quad \text{неточность} \approx 10^{-9} \quad (\delta \alpha \approx 10^{-10})$$

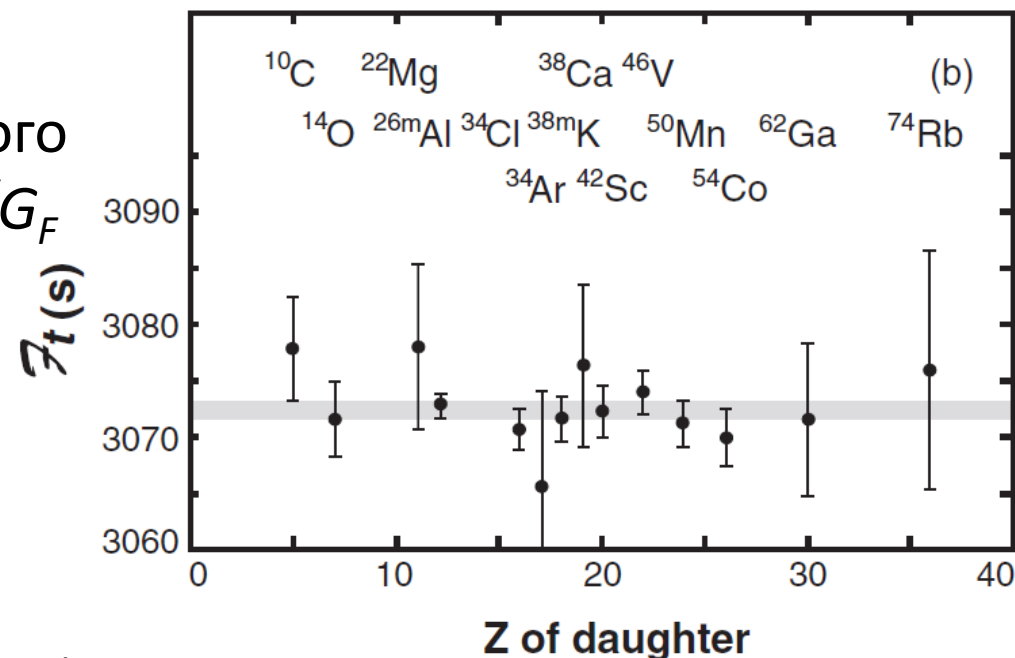
# Сохраняющийся слабый векторный ток и унитарность матрицы смешивания CKM

Разница масс в сверхразрешённом  $0^+ \rightarrow 0^+$  бета-распаде входит в выражение для  $ft$ :

$$\mathcal{F}t \equiv ft(1 + \delta'_R)(1 + \delta_{NS} - \delta_C) = \frac{K}{2G_V^2(1 + \Delta_R^V)}$$

Из бета-распада определяют  $G_V$ , а слабая константа Ферми известна из чисто лептонного распада мюона. Поэтому получаем:  $V_{ud} = G_V/G_F = 0.97417(21)$  - элемент матрицы CKM  $u$  и  $d$  - смешивания, что приводит к унитарности матрицы CKM с точностью лучше 0.1%

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0.99978 \pm 0.00055$$





Добавим к этим проблемам  
рассмотренные на прошлом семинаре  
вопросы из арсенала работ, выполненных  
с участием группы из ОФВЭ ПИЯФ

Основной результат «сверхтяжёлого»  
эксперимента на ловушке SHIPTRAP:

обнаружение островков стабильности на  
пути к предсказанному большому Острову  
устойчивости

Основной результат поиска кандидатов на  
безнейтринный процесс на ловушке SHIPTRAP:

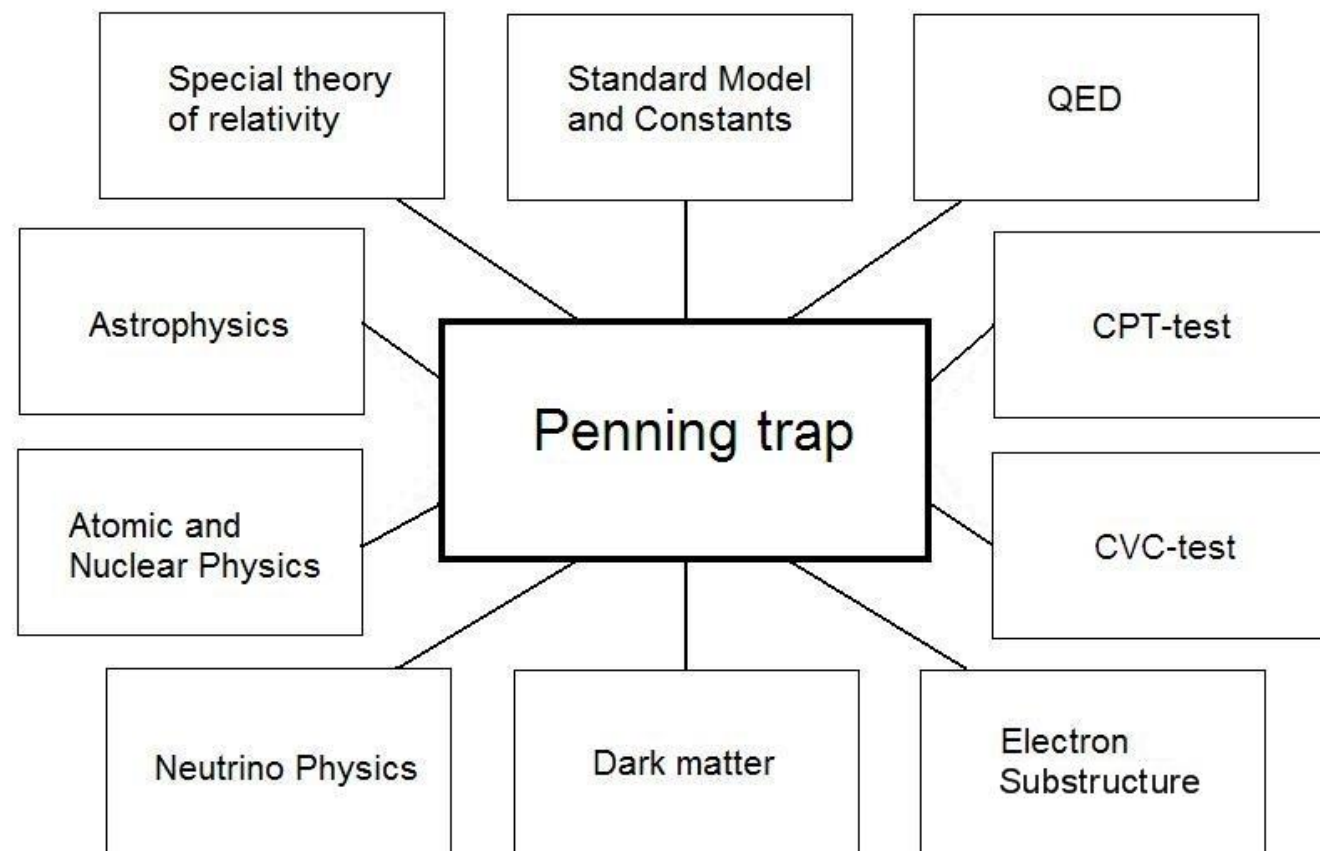
пока только один нуклид может претендовать на  
крупномасштабный эксперимент.

Поиски кандидатов должны быть продолжены на установке  
PENTATRAP

# Результат пилотных экспериментов по измерению абсолютной массы электронного нейтрино

- Установки криогенной микрокалориметрии и ловушки PENTATRAP, входящие в проект ЕСНО, полностью готовы к измерениям,
- Пробные замеры спектра атомной разрядки выполнены. Полученное значение эффективной массы электронного нейтрино в процессе захвата в  $^{163}\text{Ho}$  составило  $< 150$  эВ, что почти в 2 раза улучшает существовавшее значение,
- На PENTATRAP начаты измерения разности масс  $^{163}\text{Ho} - ^{163}\text{Dy}$  с планируемой относительной точностью  $10^{-11}$ , соответствующей  $\approx 1$  эВ. Этот результат позволит выйти на верхний предел на массу нейтрино 1 эВ.

# Востребованность ионной ловушки



K. Blaum, Yu.N. Novikov and G. Werth, *Penning traps as a versatile tool for precise experiments in fundamental physics*, Contemporary Physics **51** ( 2010) pp.149–175.

# Место ионных ловушек в фундаментальных исследованиях

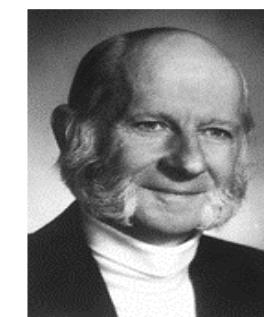
## ХАРАКТЕРИСТИКИ:



Максимум энергии  
Максимум светимости  
Миллиарды долларов  
Тысячи участников



C. Rubbia



H. Delmeth

Минимум энергии (покой)  
Минимум интенсивности  
Миллионы долларов  
Десятки участников.

# Сотрудничество в рамках проектов PENTATRAP/ECHO, SHIPTRAP

Институты	Координатор
Институт М.Планка по ядерной физике (Гейдельберг)	K. Blaum
Институт объединения Гельмгольца (ГСИ/ФАИР-Дармштадт)	M. Block
Университет Майнца, институт Гельмгольца в Майнце	M. Block, Ch. Duellmann, K.Wendt
Институт Кирхгофа Университета Гейдельберга (проект ECHO )	L.Gastaldo
Теоретический отдел Университета Гейдельберга	M. Haverkort
<b>Кафедра квантовой механики СПбГУ</b>	<b>В. Шабеев</b>
Университет Сорбонны (Париж)	P. Indelicato

**Спасибо за внимание  
и...терпение**