

# Рабочее совещание по регистрации Темной материи ИЯИ РАН

**Сцинтилляционный криогенный детектор  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$  коллаборации AMORE: исследование безнейтринного двойного бета распада  $\text{Mo-100}$  и поиск WIMP**

В.Н.Корноухов  
ГНЦ ИТЭФ

27 марта 2012 г.

# Коллаборация АМоRE

## (Advanced Mo based Rare process Experiment)

- Korea (39)  
*Seoul National University* : H.Bhang, S.Choi, M.J.Kim, S.K.Kim, M.J.Lee, S.S.Myung, S.Olsen, Y. Sato, K.Tanida, S.C.Kim, J.Choi, H.S.Lee, S.J.Lee, J.H.Lee, J.K.Lee, X.Li, J.Li, H.Kang, H.K.Kang, Y.Oh, S.J.Kim, E.H.Kim, K.Tshoo, D.K.Kim(24)  
*Sejong University* : Y.D.Kim, E.-J.Jeon, K. Ma, J.I.Lee, W.Kang, J.Hwa (5)  
*Kyungpook national University* : H.J.Kim, J.So, Gul Rooh, Y.S.Hwang(4)  
*KRISS* : Y.H.Kim, M.K.Lee, H.S.Park, J.H.Kim, J.M.Lee, K.B.Lee (6)
- Russia (16)  
*ITEP(Institute for Theoretical and Experimental Physics)* : V.Kornoukhov, P. Polozov, N.Khanbekov (3)  
*Baksan National Observatory* : A.Ganggapshev, A.Gezhaev, V.Gurentsov, V.Kuzminov, V.Kazalov, O.Mineev, S.Panasenko, S.Ratkevich, A.Verensnikova, S.Yakimenko, N.Yershov, K.Efendiev, Y.Gabriljuk (13)
- Ukraine(11)  
*INR(Institute for Nuclear Research)* : F.Danevich, V.Tretyak, V.Kobychev, A.Nikolaiko, D.Poda, R.Boiko, R.Podviianiuk, S.Nagorny, O.Polischuk, V.Kudovbenko, D.Chernyak(11)
- China(3)
- *Tsinghua University* : J.Li, Y. Li, Q.Yue(3)
- Germany(3)  
*University of Heidelberg* : C.Enss, A. Fleischmann, L. Gastaldo (3)

Основание коллаборации:  
**октябрь 2009**

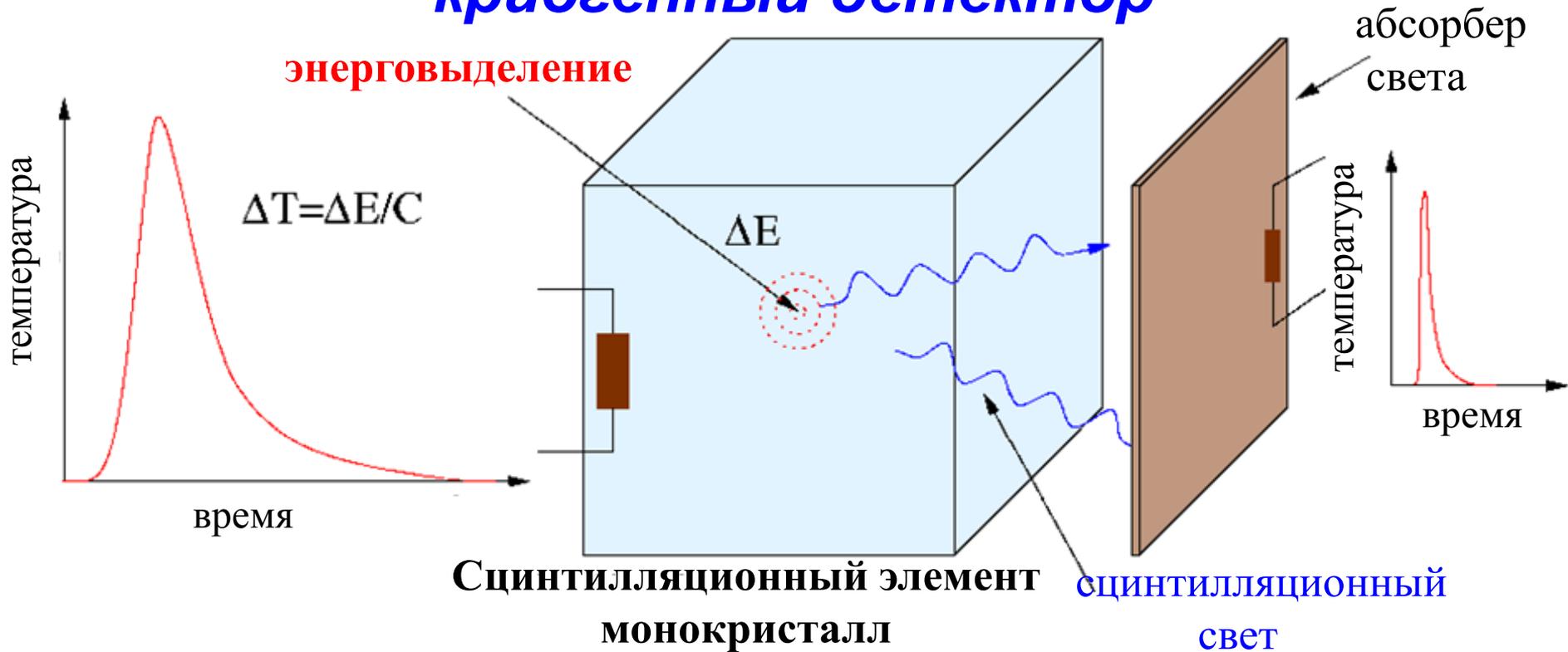
На сегодняшний день коллаборация  
объединяет:

**5 стран**  
**9 институтов**  
**72 участника**



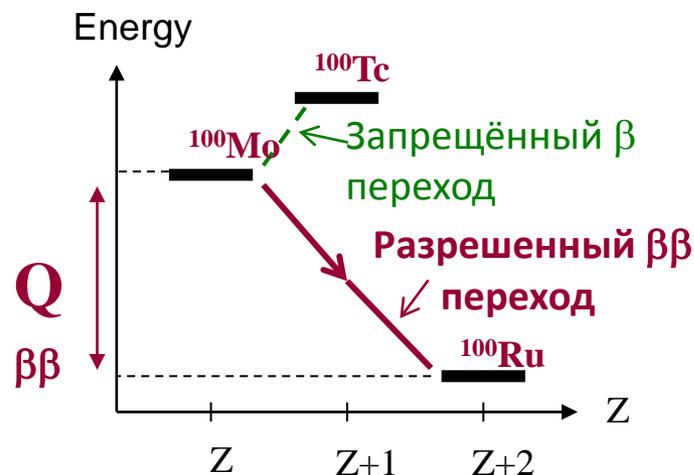
International Workshop on Double Beta Decay Search  
Oct. 15 ~ Oct. 17, SNU, Korea

# Как работает сцинтилляционный криогенный детектор



# Основная цель коллаборации АМоRE

- Исследование процесса  $0\nu 2\beta$ -распада изотопа  $^{100}\text{Mo}$ .
- $^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru} + 2e^- + 3.043 \text{ МэВ (Q-value)}$



## Мотивация:

$Q_{\beta\beta} = 3034$  кэВ: самая высокая энергия процесса среди ДБР-изотопов, которые могут быть произведены в количестве десятков-сотен килограмм центрифужным методом (только в России!);

Детектор: на основе криогенного сцинтилляционного монокристалла  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$  с использованием обогащённого изотопа  $^{100}\text{Mo}$  и кальция обеднённого по изотопу  $^{48}\text{Ca}$ .

# Какой детектор нужен, что бы достичь $T_{1/2}^{0\nu} \approx 10^{26} - 10^{27}$ лет ( $\langle m_{\beta\beta} \rangle \approx 0.05 - 0.02$ эВ)?

Чувствительность (период полураспада  $T_{1/2}$ )  $2\beta$  экспериментов:

$$T_{1/2} \propto \varepsilon \cdot \delta \sqrt{\frac{m \cdot t}{R \cdot BG}}$$

$\varepsilon$  – detection efficiency

$\delta$  – abundance of candidate nuclei in the detector

$m$  – mass of detector

$t$  – time of measurements

$R$  – energy resolution

$BG$  – background



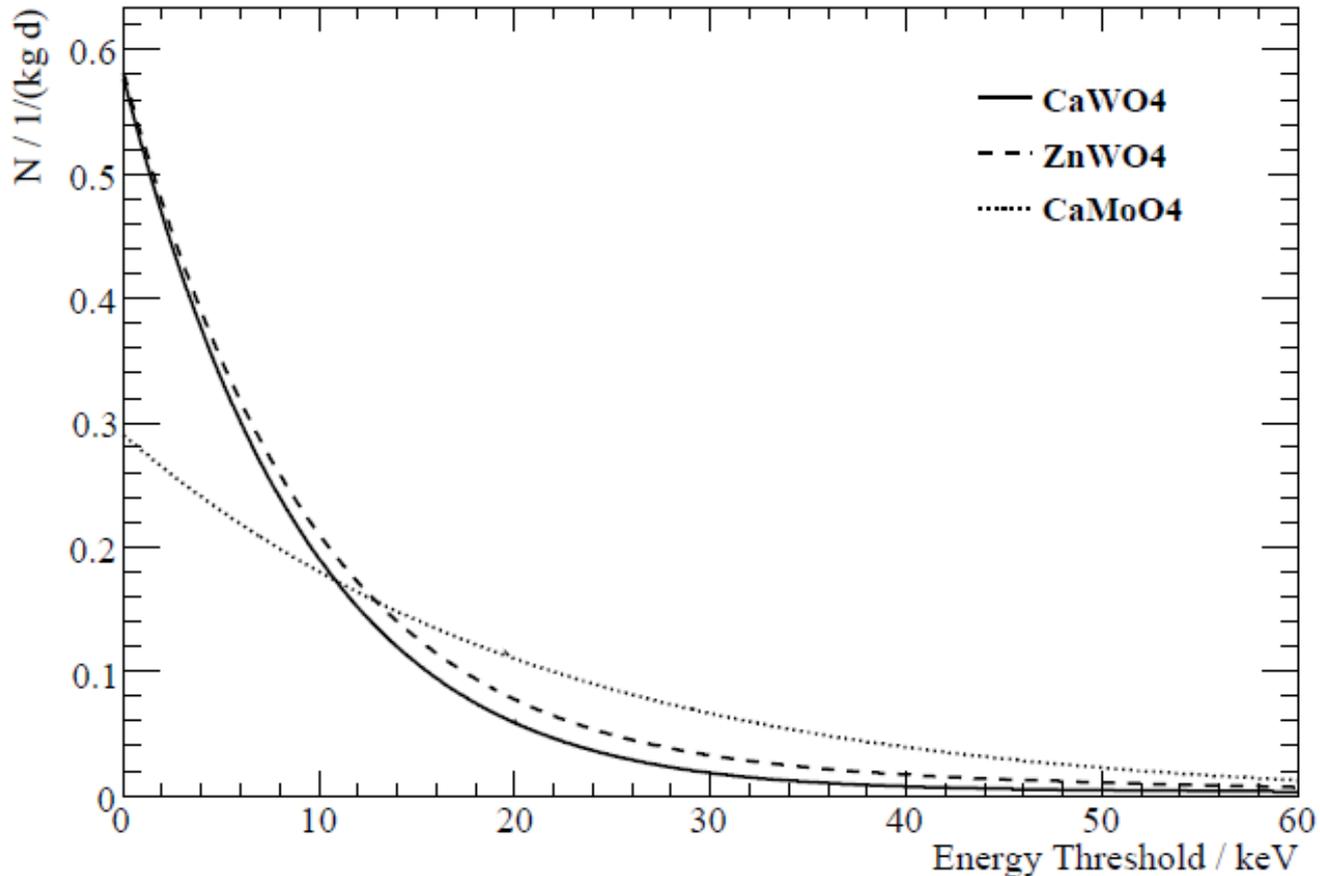
- ~50-100 кг изотопа  $^{100}\text{Mo}$ , ~ 400 - 800 сцинтилляционных элементов
- ультранизкое содержание **опасных** радиоактивных примесей:  
 $^{226}\text{Ra}$  ( $^{214}\text{Bi}$ )  $\leq 0.1$  мБк/кг,  $^{228}\text{Th} \leq 0.05$  мБк/кг
- высокое энергетическое разрешение  $< 1\%$  (на уровне разрешения для ППД)
- 5-10 лет набора данных

# Выбор ядер-мишеней для регистрации WIMP: пример коллаборации CRESST

Development of cryogenic phonon detectors  
based on  $\text{CaMoO}_4$  and  $\text{ZnWO}_4$  scintillating crystals  
for direct dark matter search experiments

I. Bavykina <sup>a,\*</sup> G. Angloher <sup>a</sup> D. Hauff <sup>a</sup> M. Kiefer <sup>a</sup> F. Petricca <sup>a</sup> F. Pröbst <sup>a</sup>  
<sup>a</sup>Max-Planck-Institut für Physik (Werner-Heisenberg-Institut), Föhringer Ring 6, 80805 Munich, Germany

Received 6 June 2008; revised 23 September 2008; accepted 30 September 2008



# Преимущества $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$

- Физические преимущества:

- 1) калориметрический детектор: «детектор  $\equiv$  источник»  $\rightarrow$  высокая эффективность ( $\sim 90\%$ ) регистрации полезных событий;
- 2) высокое содержание рабочего изотопа ( $\sim 50\%$  по массе) в соединении (стехиометрическое отношение);
- 3) технология производства (метод Чохральского) позволяет добиться высокой чистоты выращиваемых кристаллов  $\rightarrow$  существенное снижение внутреннего фона от  $^{238}\text{U}$ -,  $^{232}\text{Th}$ -рядов;
- 4) энергетическое разрешение, сравнимое с разрешением для ППД (3-6 кэВ для фонованого режима), подавлен вклад от фона  $2\nu 2\beta$ -распада  $^{100}\text{Mo}$ ;
- 5) высокий световыход (до 9300 фотон/МэВ);
- 6) возможность анализа сигнала с целью подавления  $\alpha$ -фона от поверхностного и приповерхностного загрязнения;
- 7) возможность увеличения масштабов экспериментов, путём последовательного добавления монокристаллов в установку.

- Преимущества производства:

- 1) в России налажено промышленное производство центрифужным методом стабильных изотопов в количестве десятков-сотен килограмм, в том числе изотопов молибдена;
- 2) на предприятии РосАтома уже имеется изотоп  $^{40}\text{Ca}$ , обедненного по изотопу  $^{48}\text{Ca}$  (как побочный продукт наработки изотопа  $^{48}\text{Ca}$ ).

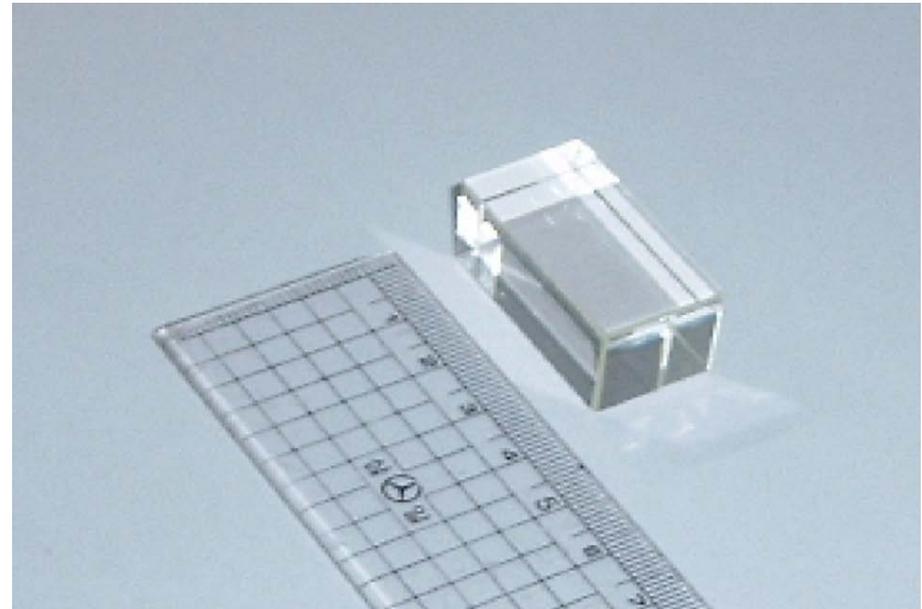
# Производство монокристаллов $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$

- $T_{\text{пл}} = 1445 \text{ }^\circ\text{C}$  (Pt или Ir тигель)
- Разработка технологии роста кристаллов началась в 2004 году.
- Для выращивания кристаллов используется метод Чохральского.
- Скорость вытягивания  $1 \div 5 \text{ мм/час}$
- Основные этапы производства:  
1) шихта:                    2) до отжига:    3) после:



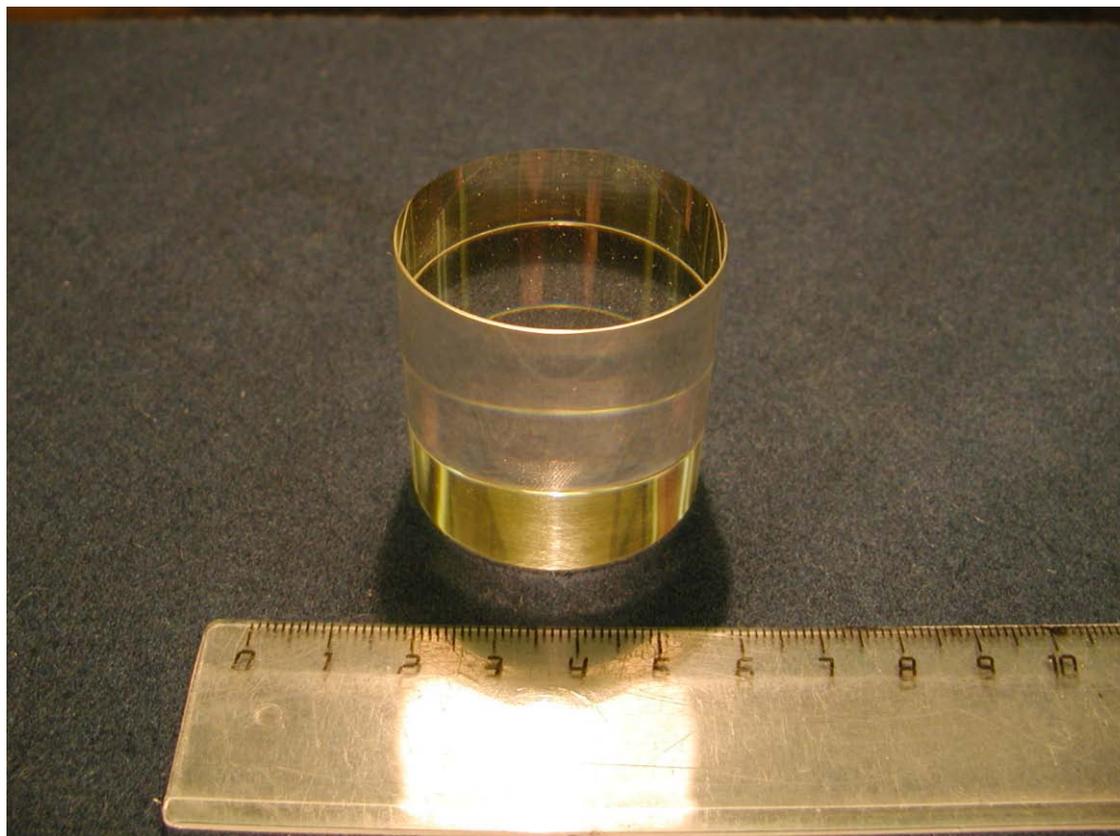
# 2004 год: первые кристаллы

- размеры  $\text{CaMoO}_4$  кристаллов до  $15 \text{ см}^3$ ;
- световыход  $\sim 400$  фотонов/МэВ;
- Невысокая прозрачность (наблюдается полоса поглощения около  $395 \text{ нм}$ ).
- $^{214}\text{Bi}(^{238}\text{U}) = 286 \text{ мБк/кг}$
- $^{232}\text{Th}(^{208}\text{Tl}) < 25 \text{ мБк/кг}$



# Результат работы (2007 год)

- Сцинтилляционный цилиндрический кристалл  $\text{CaMoO}_4$  на основе природных компонент с размерами D40x40 мм.



# Последние результаты: обогащённые кристаллы $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$

- Получены сцинтилляционные элементы на основе обогащённых кристаллов.
- D(42 x 40) x 42 мм, масса 269 г

Прозрачность:

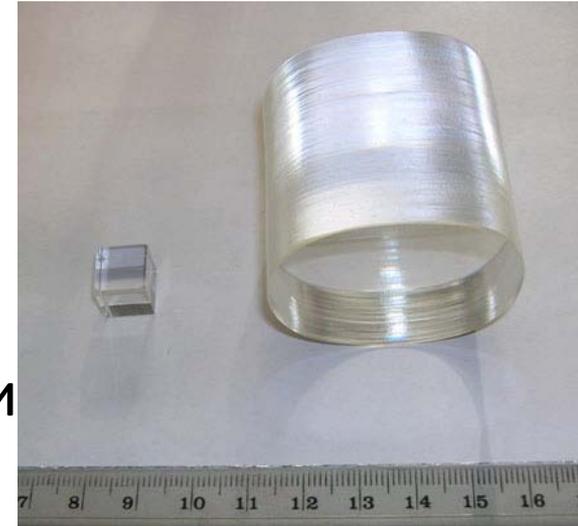
- $L = 90$  см при 530 нм (максимум высвечи сцинтилляции)

Световыход:

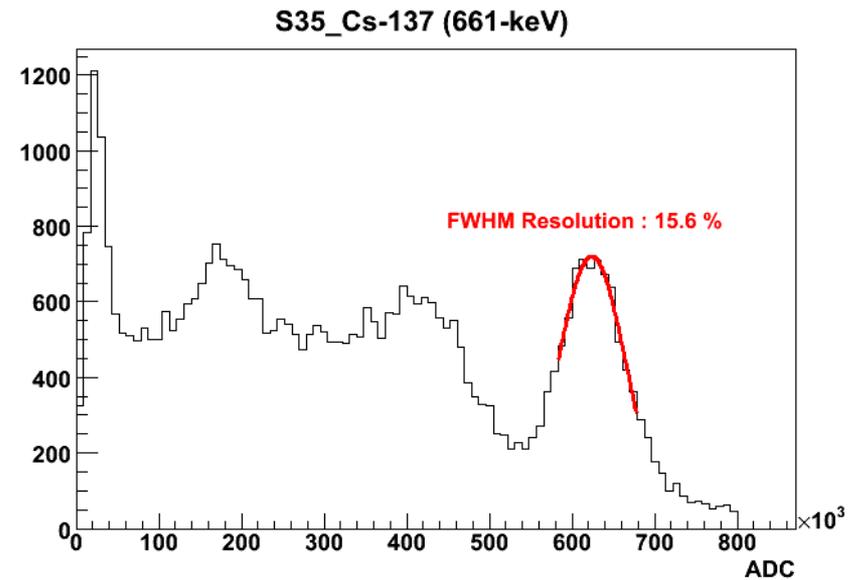
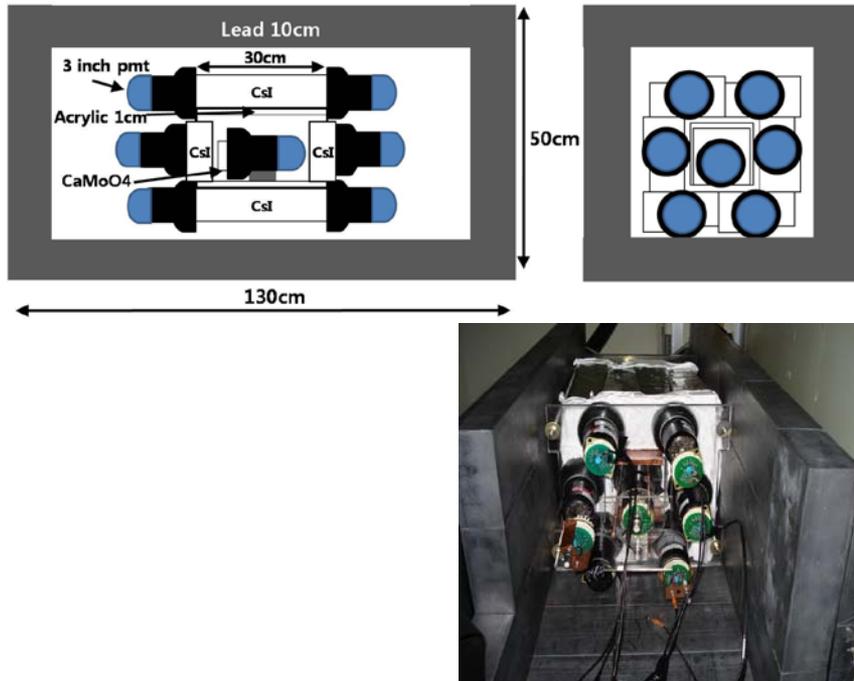
- $LY = 9300$  фотонов/МэВ, сравним с лучшими  $\text{CaMoO}_4$  монокристаллами на природном сырье

Кинетика сцинтилляций, основная компонента:

- $\tau_{\text{rt}} = 16,5$  мкс (комнатная температура),
- $\tau_{\text{cr}} = 345$  мкс (8 К и ниже)



# Энергетическое разрешение сцинтиляционного элемента С35 (661 кэВ, Cs-137)



Измерения энергетического разрешения проводились в подземной лаборатории ЯнгЯнг (Корея). Полученное значение разрешения 15,6 % при энергии 661 кэВ ( $^{137}\text{Cs}$ ).

Активная защита установки состояла из 14 кристаллов CsI, просматривавшихся 14 ФЭУ, для пассивной защиты вокруг установки располагался слой свинца, толщиной 10 см. Для снижения фона от атмосферного  $^{222}\text{Rn}$  установка продувалась азотом.

# HPGe измерения на Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН

Sample, material	Isotope			
	$^{40}\text{K}$	$^{228}\text{Ac} = (^{232}\text{Th})$	$^{208}\text{Tl} [(^{232}\text{Th})]^*$	$^{214}\text{Bi} = (^{238}\text{U})$
	Specific activity, Bq/kg			
Mo oxide, $^{100}\text{MoO}_3$	$(5,3 \pm 0,8) \cdot 10^{-2}$	$\leq 3,8 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1,0 \cdot 10^{-3}$ [ $\leq 2,8 \cdot 10^{-3}$ ]	$\leq 2,3 \cdot 10^{-3}$
Calcium carbonate, $^{40}\text{CaCO}_3$	$(7,3 \pm 3,1) \cdot 10^{-2}$	$(1,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-1}$	$(4,4 \pm 3,6) \cdot 10^{-3}$ [ $(1,2 \pm 1,0) \cdot 10^{-2}$ ]	$(2,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-1}$
Single crystal SB-29 $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$	$\leq 1,2 \cdot 10^{-2}$	$\leq 3,1 \cdot 10^{-3}$	$\leq 8,3 \cdot 10^{-4}$ [ $\leq 2,4 \cdot 10^{-3}$ ]	$\leq 6,4 \cdot 10^{-3}$
Calcium formate, $\text{Ca}(\text{HCOO})_2$	$\leq 7,0 \cdot 10^{-3}$	$\leq 3,0 \cdot 10^{-3}$	$\leq 8,9 \cdot 10^{-4}$ [ $\leq 2,5 \cdot 10^{-3}$ ]	$\leq 1,7 \cdot 10^{-3}$

В результате применения двойной перекристаллизации во время производства монокристаллов удалось добиться очистки от опасных р/а примесей  **$\geq 35$  раз.**



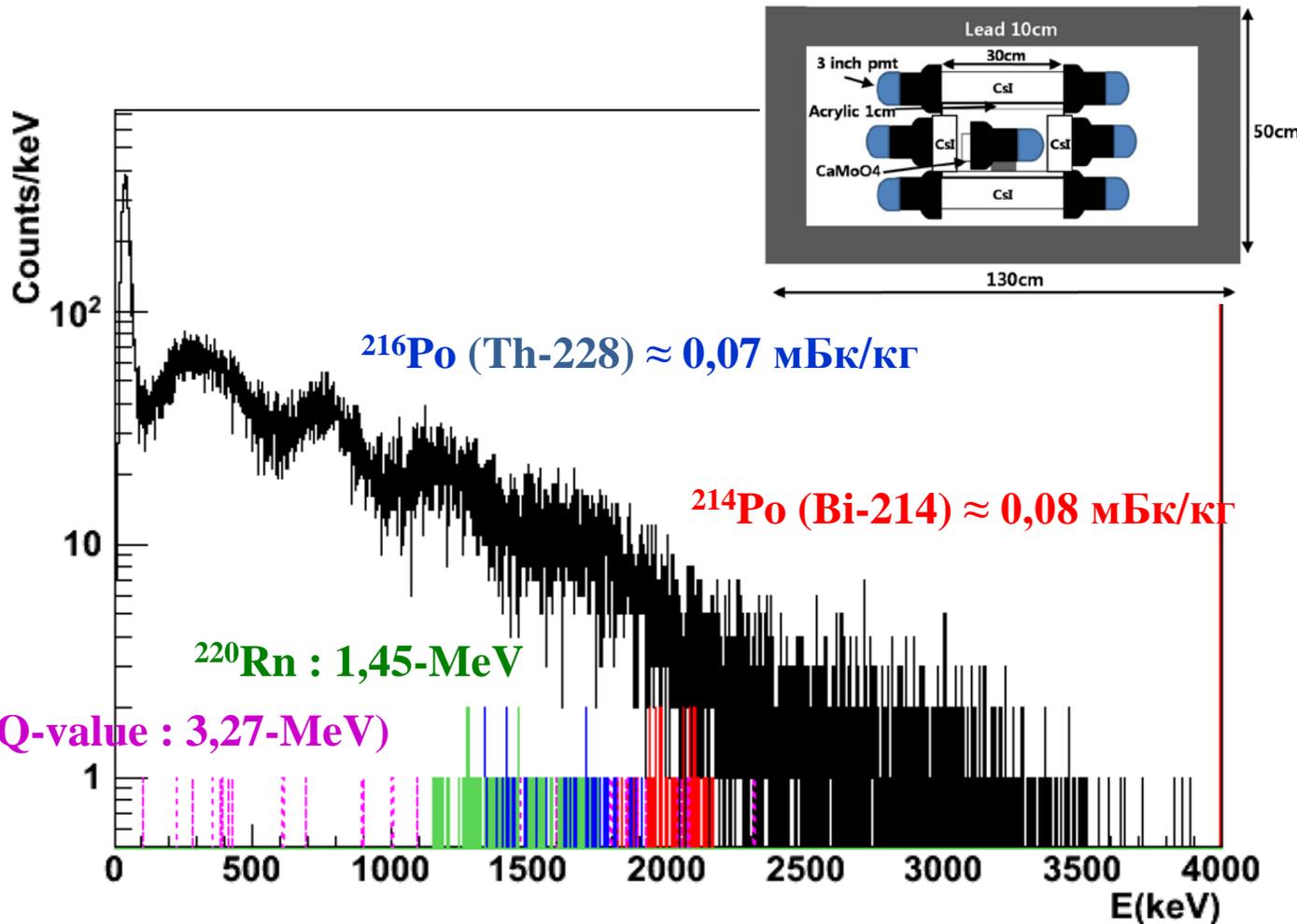
# Фоновый спектр сцинтилляционного элемента СБ28

$\beta$ - $\alpha$  decay in  $^{238}\text{U}$

$^{214}\text{Bi}$  (Q-value : 3.27-MeV)  $\rightarrow$   $^{214}\text{Po}$  (Q-value : 7.83-MeV)  $\rightarrow$   $^{210}\text{Pb}$

$\alpha$ - $\alpha$  decay in  $^{232}\text{Th}$

$^{220}\text{Rn}$  (Q-value : 6.41-MeV)  $\rightarrow$   $^{216}\text{Po}$  (Q-value : 6.91-MeV)  $\rightarrow$   $^{212}\text{Pb}$



# Криогенный сцинтиляционный детектор AMoRE

- Рабочая температура детектора: ~ десятки мК.
- При взаимодействии заряженной частицы в сцинтиляционном кристалле появляется сцинтиляционный и фононный сигналы. В эксперименте планируется снимать оба сигнала и затем проводить их анализ с целью подавления альфа-фона от поверхностного и приповерхностного загрязнения.
- 

$T \sim 15$  мК.

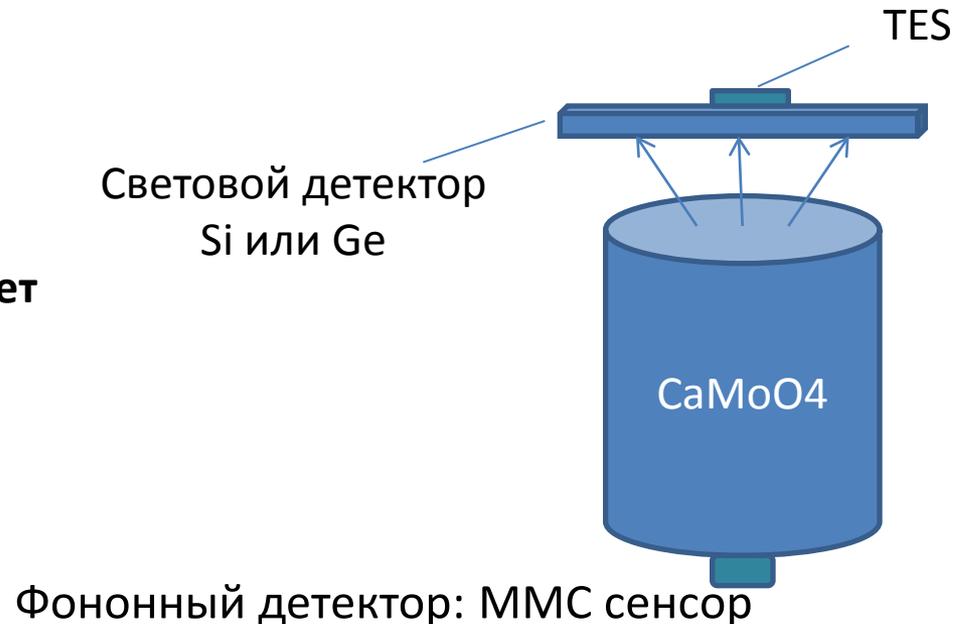
Общая масса  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4 = 100$  кг.

Масса изотопа  $^{100}\text{Mo} = 50$  кг.

Время проведения: 5 лет.

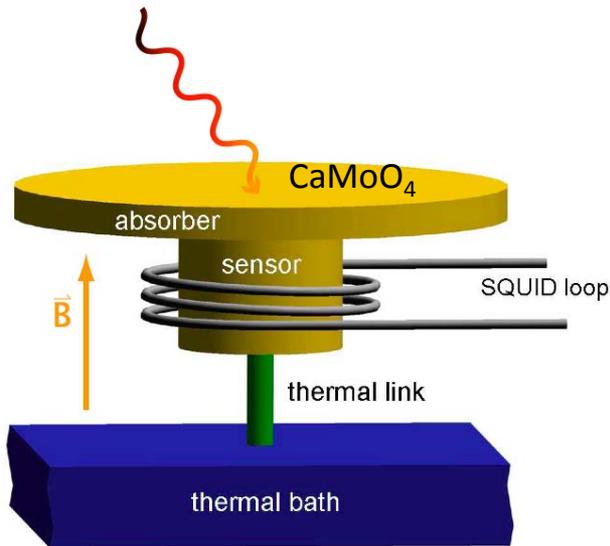
$T_{1/2}^{0\nu} = 3 \cdot 10^{26}$  лет, что соответствует

$\langle m_\nu \rangle = 50$  мэВ

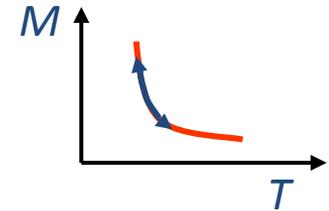


# Разработка криогенного детектора на основе $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$

- MMC — Metallic Magnetic Calorimeter



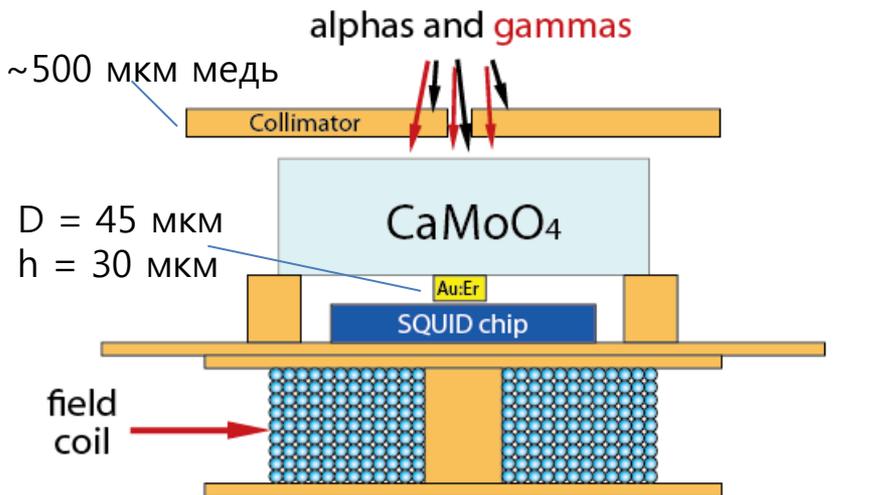
Парамагнитный сенсор Au:Er



Для измерения температуры (фононного сигнала) абсорбера (кристалла  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ ) в эксперименте планируется использование сенсоров из парамагнитных материалов — MMC-сенсоров. MMC-сенсоры, находясь в постоянном магнитном поле, изменяют свою намагниченность при изменении температуры.

Намагниченность сенсора считывается системой квантовых магнетометров — SQUID. Системы SQUID и MMC калориметры производятся в Гейдельбергском университете, группа физиков из которого недавно присоединилась к коллаборации AMORE.

# Криогенные измерения с использованием образца $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$

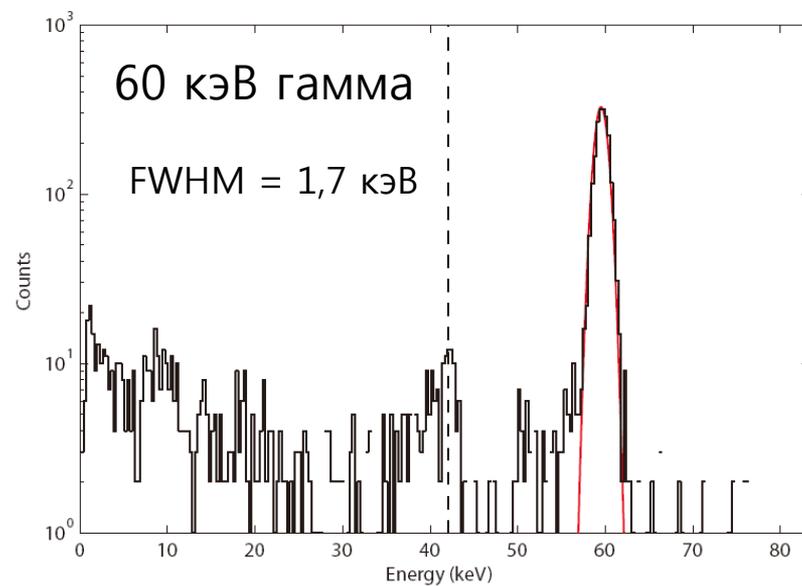
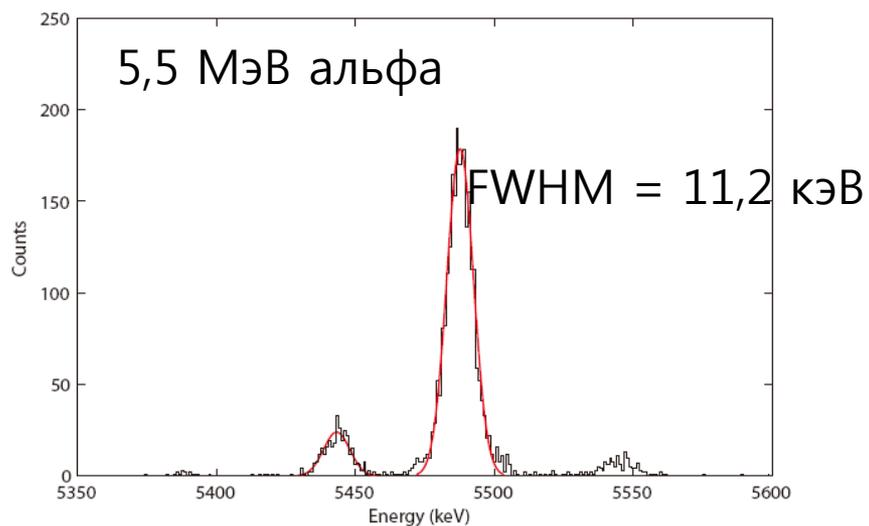


Проведены первые криогенные измерения с образцом  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$  размерами 1 см x 0,7 см x 0,6 см.

Температура: 13 – 100 мК

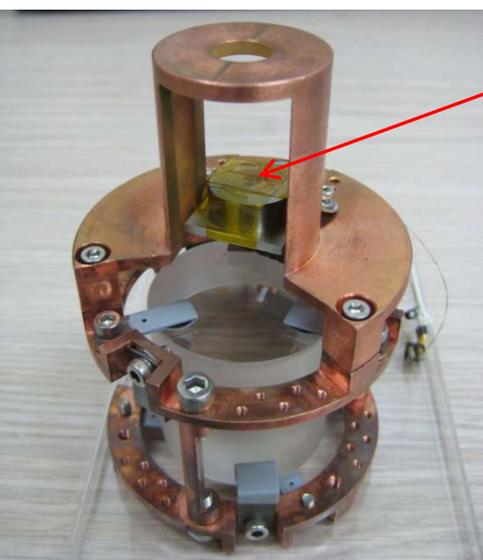
Р/а источник  $^{241}\text{Am}$ :

$\alpha$ -частицы и  $E_\gamma = 59,5$  кэВ

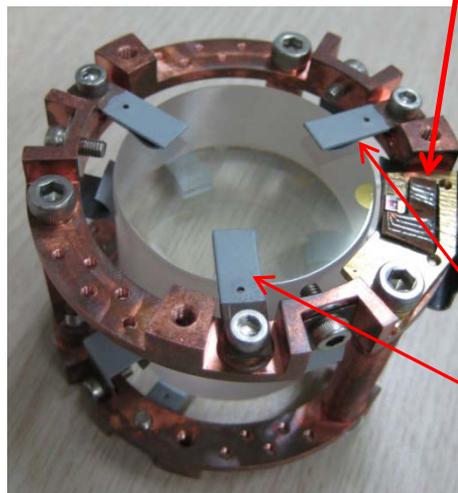


# Криогенные измерения с полноразмерным элементом

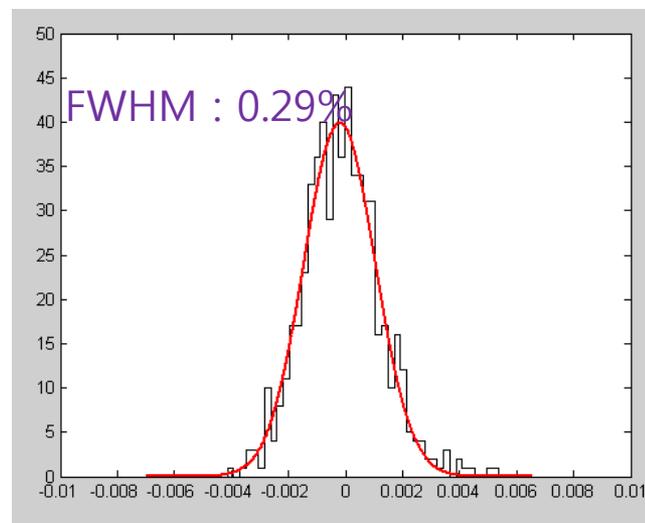
- Разработана установка для проведения эксперимента с полноразмерным элементом (40x40 мм). Проведены первые измерения.



$^{241}\text{Am}$

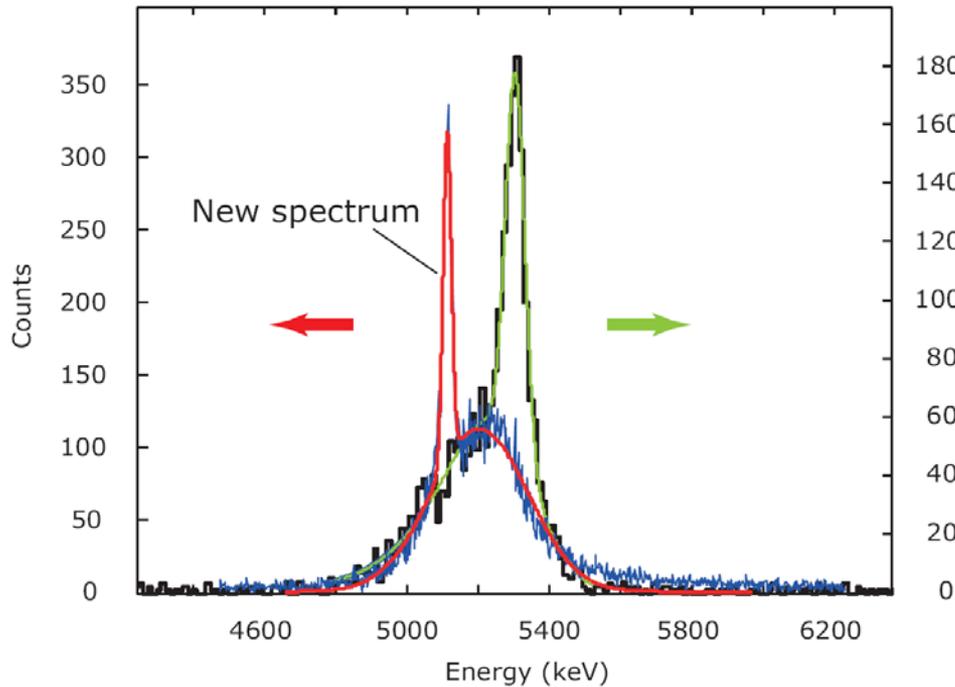


MMC&SQUID

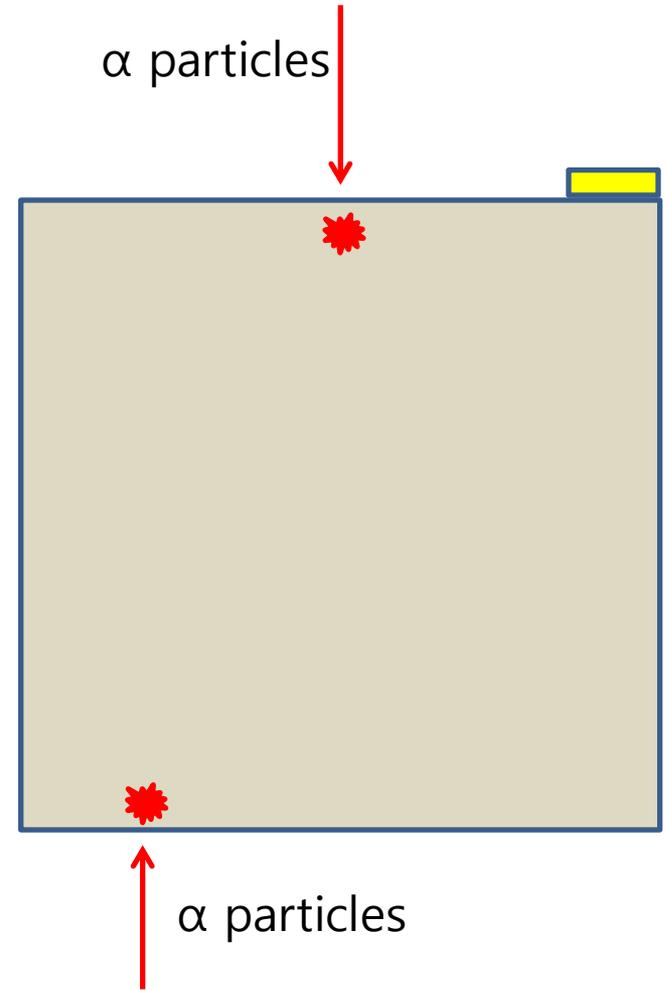


Тefлоновые  
держатели

# Position dependence



- Geometric approach.
- Analytic approach.



# Подземная лаборатория ЯнгЯнг (Корея)



(Upper Dam)

- Located in a tunnel of Yangyang Pumped Storage Power Plant Korea Middleland Power Co.
- Minimum vertical depth : 700 m
- Access to the lab by car (~2km)
- In operation since 2003

## Experiments:

- KIMS: DM search exp. in operation
- AMORE: DBD Search exp. in preparation (additional laboratory space in design)

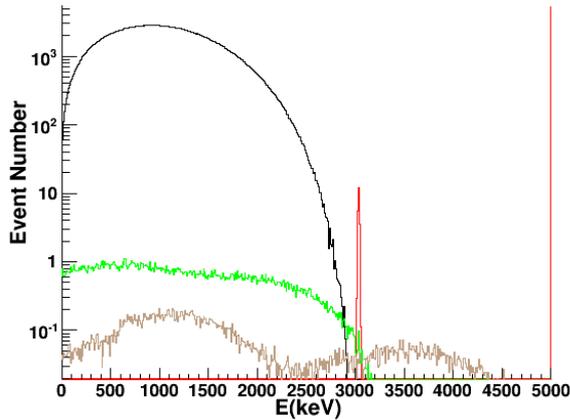
(Power Plant)

(Lower Dam)

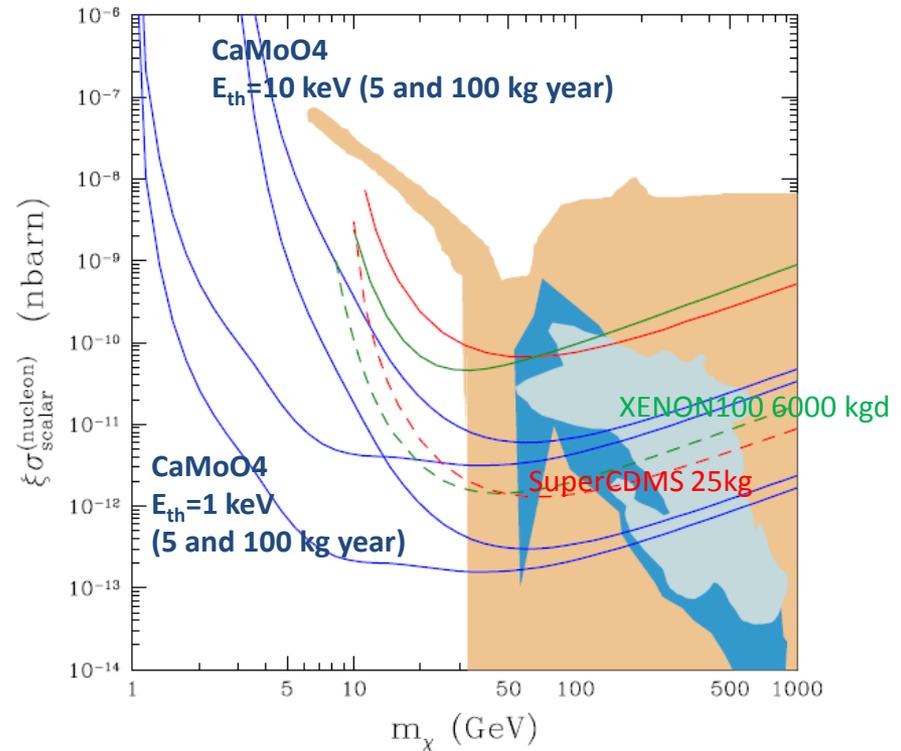
양양양수발전소

# Чувствительность сцинтилляц. криогенного CaMoO4 детектора

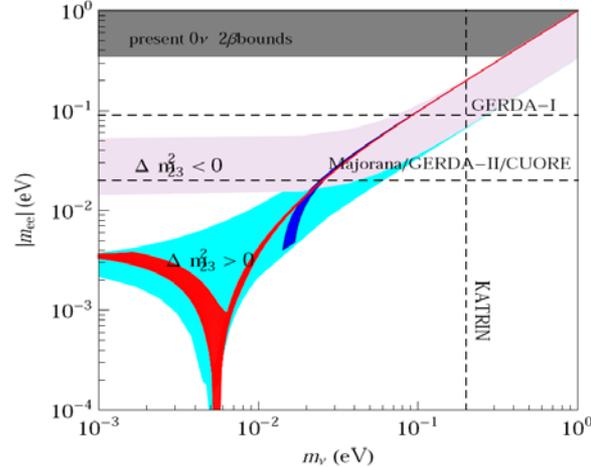
- 0.5% FWHM  $\rightarrow$  15 keV FWHM for low temp.
- 5 years, 100 kg  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$  :  $T_{1/2} = 3.0 \times 10^{26}$  years  $\rightarrow$   $\langle m \rangle = 20 - 70$  meV



Dark matter search  
 $\rightarrow$  High sensitivity



Hirsch et al, PLB679:454-459,2009



Fully covers  
 inverted hierarchy



# Принцип разделения изотопов: центрифужный метод

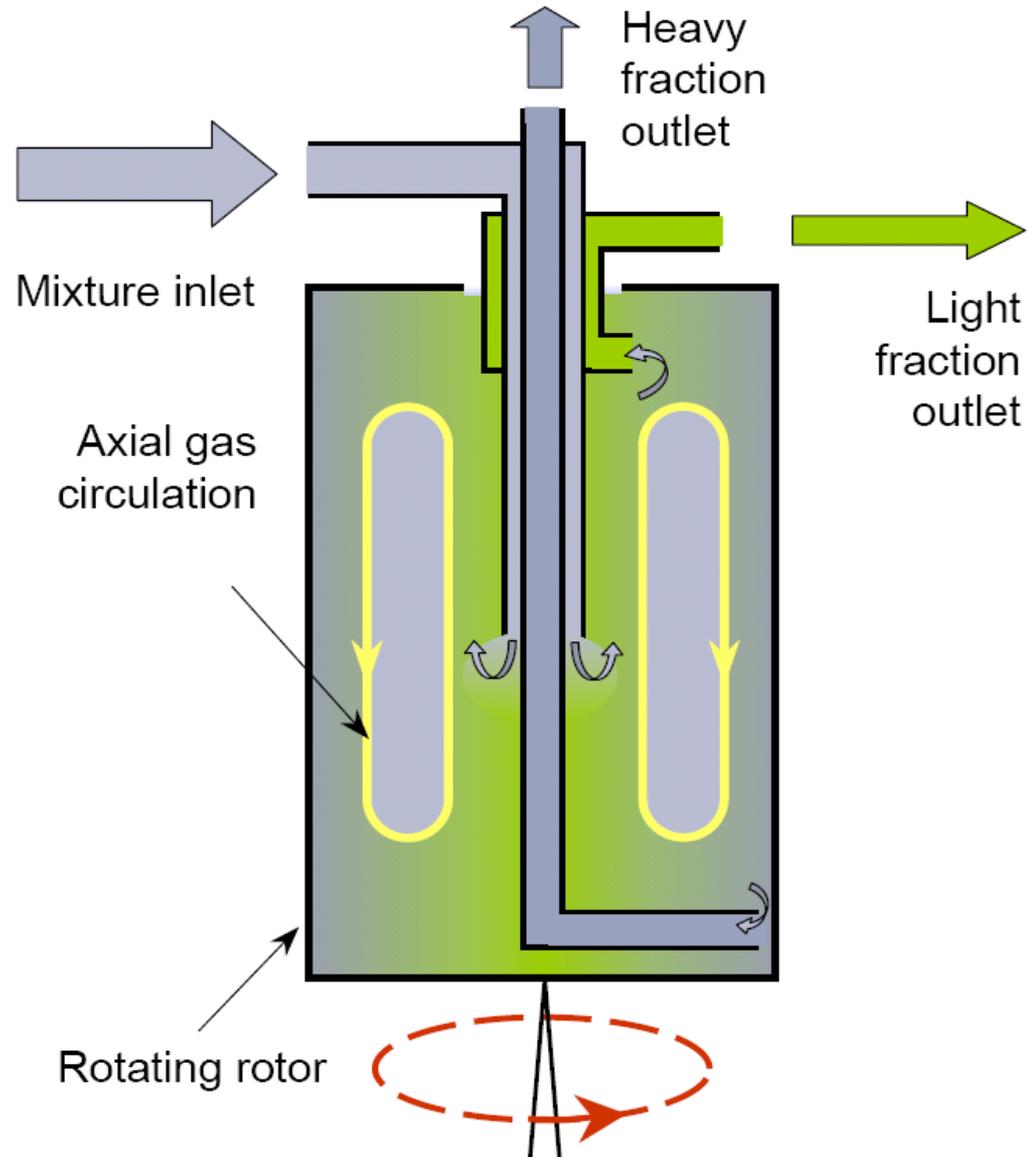
Ускорение:

500 000 g

Обороты  $\sim 1500 \text{ сек}^{-1}$

Каскад: сотни и даже  
тысячи «вертушек»

Наработка на отказ:  
30 лет



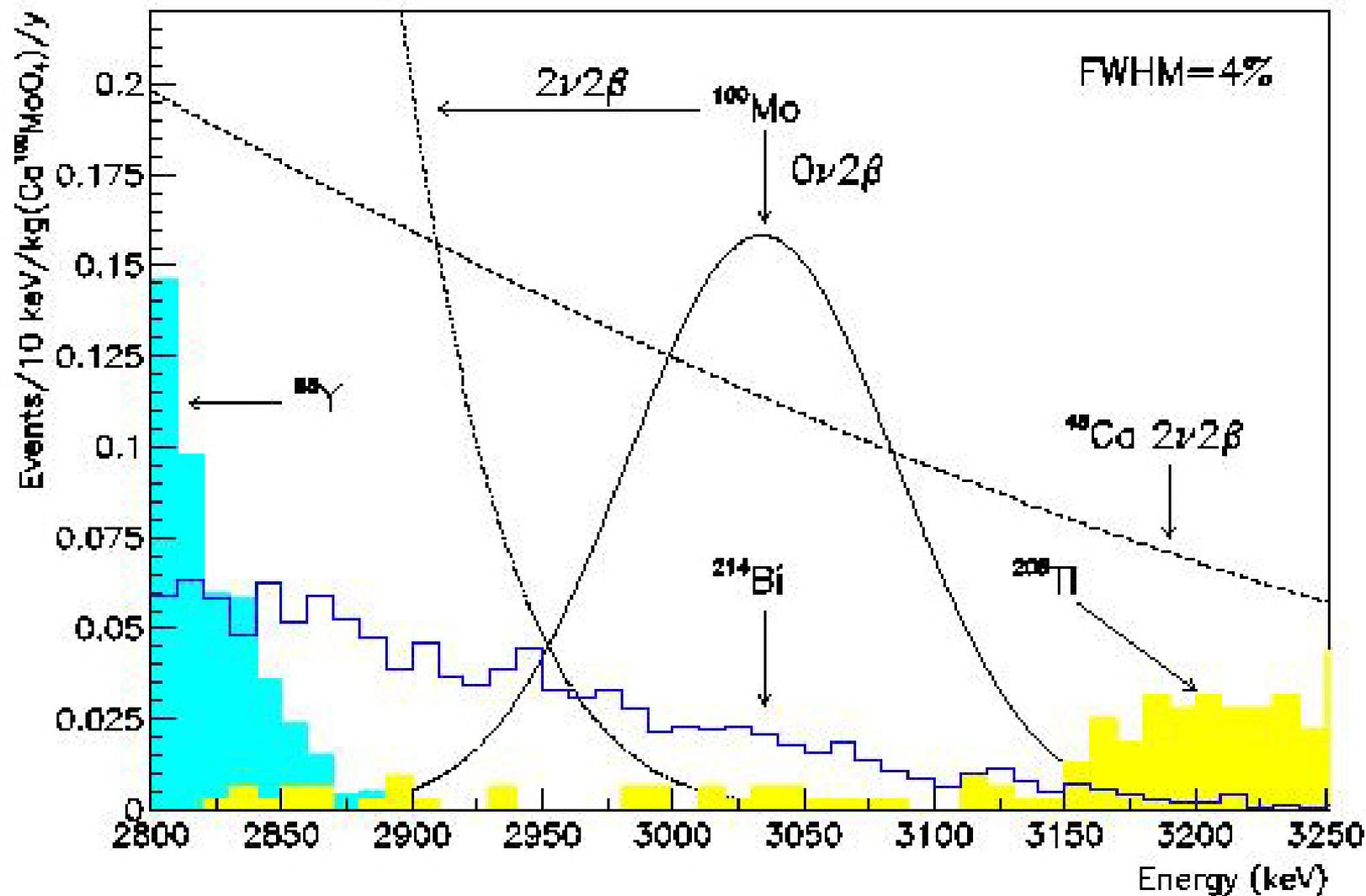
# СВЕТЛАНА, ЭХЗ



**А.Н.Шубин (1939 - 2008)**

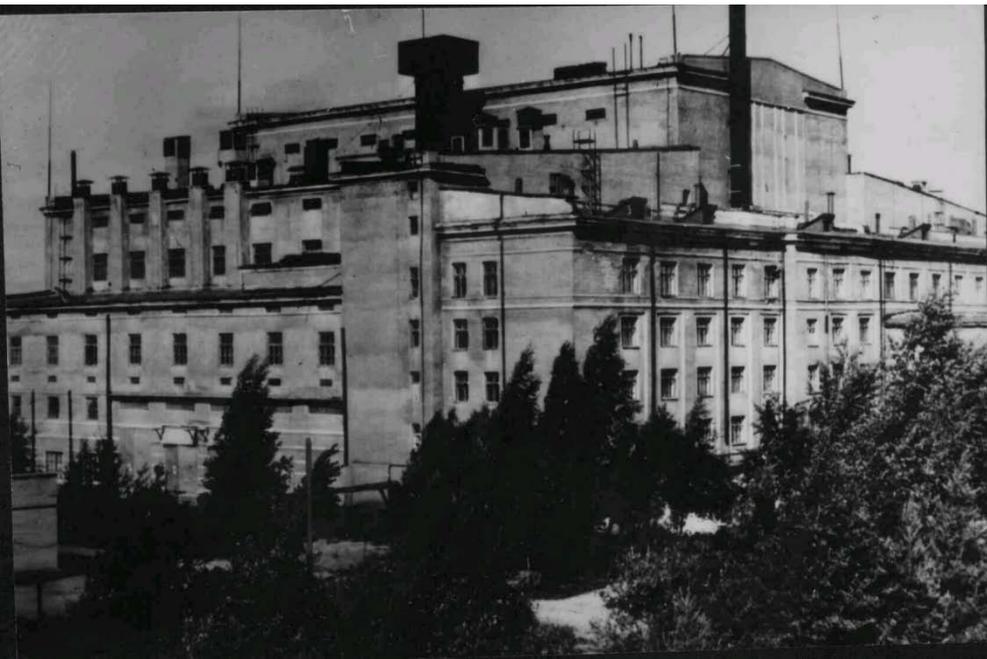


# Ca-40 обедненный по Ca-48: мотивация



# Промышленный э/м сепаратор СУ20 ВГУП «Комбинат Электрохимприбор»

- В наличии: 33 кг Са-40 ( $^{40}\text{CaCO}_3$ )
- Са-48 < 0,001%
- достаточно для проведения эксперимента со 150 кг Мо-100
- каждый год производится по 4 - 5 кг Са-40



# Результаты

- 1) В России создана технология производства низкофоновых монокристаллов  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$  большого объема и весом  $\approx 0,6$  кг и сцинтилляционных элементов на их основе. В результате применения двойной перекристаллизации во время роста кристаллов проведена очистка от опасных примесей в  $\geq 35$  раз. Достигнутая удельная активность опасных изотопов  $^{214}\text{Bi}$ ( $^{238}\text{U}$ ) и  $^{228}\text{Th}$ ( $^{232}\text{Th}$ )  $\sim 0,08$  мБк/кг и  $0,07$  мБк/кг соответственно, что позволяет приступить к проведению эксперимента.
- 2) Имеющиеся образцы показали хорошие результаты при сертификации. Достигнута прозрачность  $L = 90$  см при  $530$  нм (максимум высвечивания сцинтилляции), световыход на уровне высвечивания монокристаллов из природного сырья.
- 2) В России имеется запас обогащенного изотопа  $^{40}\text{Ca}$  (обедненного по  $^{48}\text{Ca}$ ) и возможность наработки изотопа  $^{100}\text{Mo}$  в количествах  $\approx$  десятки и сотни кг. Это позволяет планировать эксперимент по поиску  $0\nu 2\nu$ - распада  $^{100}\text{Mo}$  с общей массой  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$  от  $100$  кг (от  $50$  кг  $^{100}\text{Mo}$ ).
- 3) Проведены измерения энергетического разрешения монокристаллов  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$  при мК-температуре. Получено энергетическое разрешение ( $11,2$  кэВ для  $E_\alpha = 5,48$  МэВ) и низкий энергетический порог для небольших образцов. При измерениях с большим кристаллом ( $D 40$  мм x  $40$  мм) получено отношение сигнала к шуму лучше чем  $0.29\%$  FWHM (для  $E_\alpha = 5,48$  МэВ).
- 5) Планируемая чувствительность эксперимента с криогенным сцинтилляционным детектором на основе  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$  и массой  $100$  кг за  $5$  лет сбора данных:  $T_{1/2}^{0\nu} = 3 \cdot 10^{26}$  лет.

## $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ & БНО: .....?

- Запланирована 1-я фаза эксперимента AMORE по поиску БДБР изотопа Мо-100 (сцинтилляционный режим при RT)
- ???: 1-я фаза эксперимента AMORE по поиску БДБР изотопа Мо-100 (криогенный режим при 20 мК). Масса – до 10 кг кристаллов (масштаб CRESST/Curichino).  
***Одновременно: поиск WIMP***

### ➤ **Поиск WIMP с использованием $\text{CaMoO}_4$ и $\text{CaWO}_4$ (природный состав):**

- ❖ с массой 10 кг (масштаб ~ CRESST/Curichino)
- ❖ С массой до 1 000 кг (масштаб ~ CUORE)

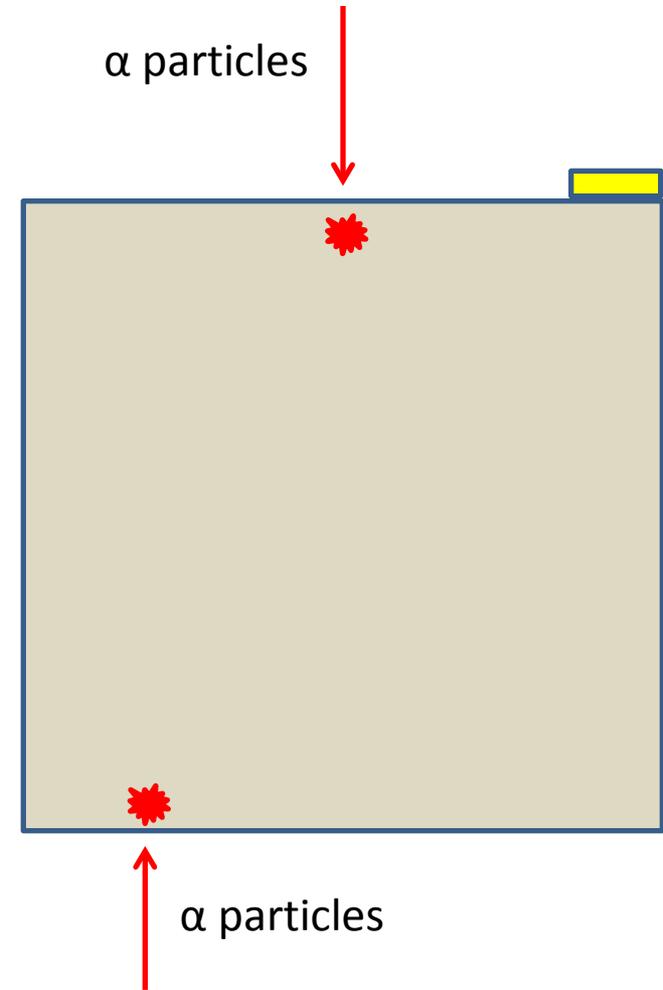
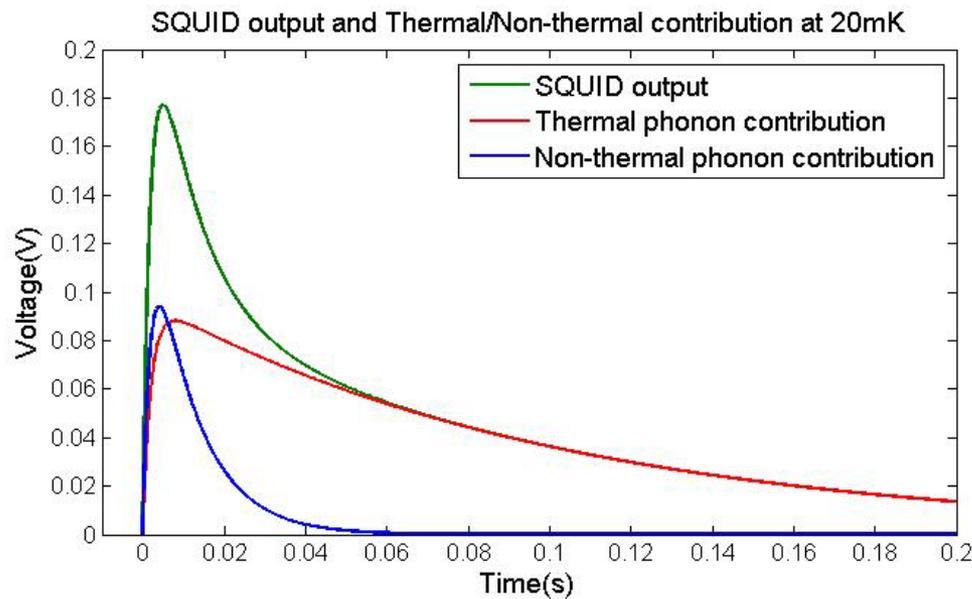
# $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ и $\text{CaMoO}_4$ эксперименты на БНО ИЯИ РАН

**Масштаб эксперимента: от 10 кг до 1 000 кг**

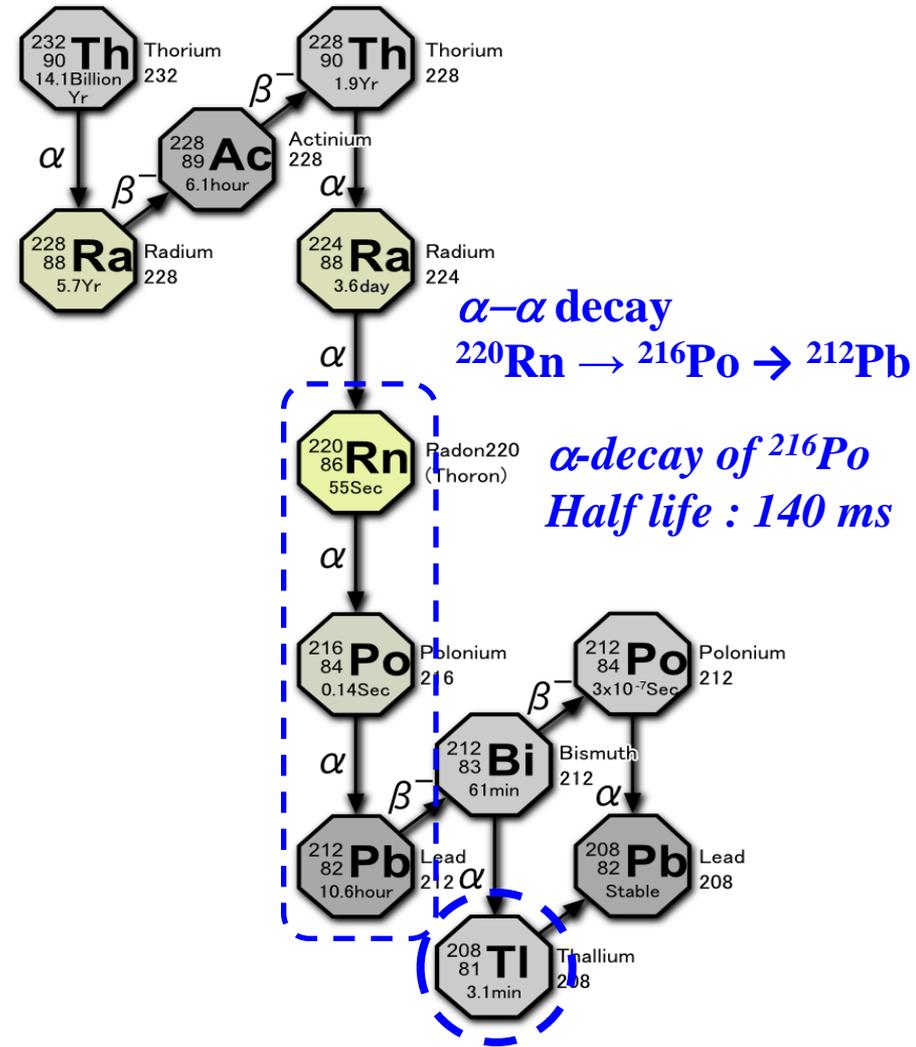
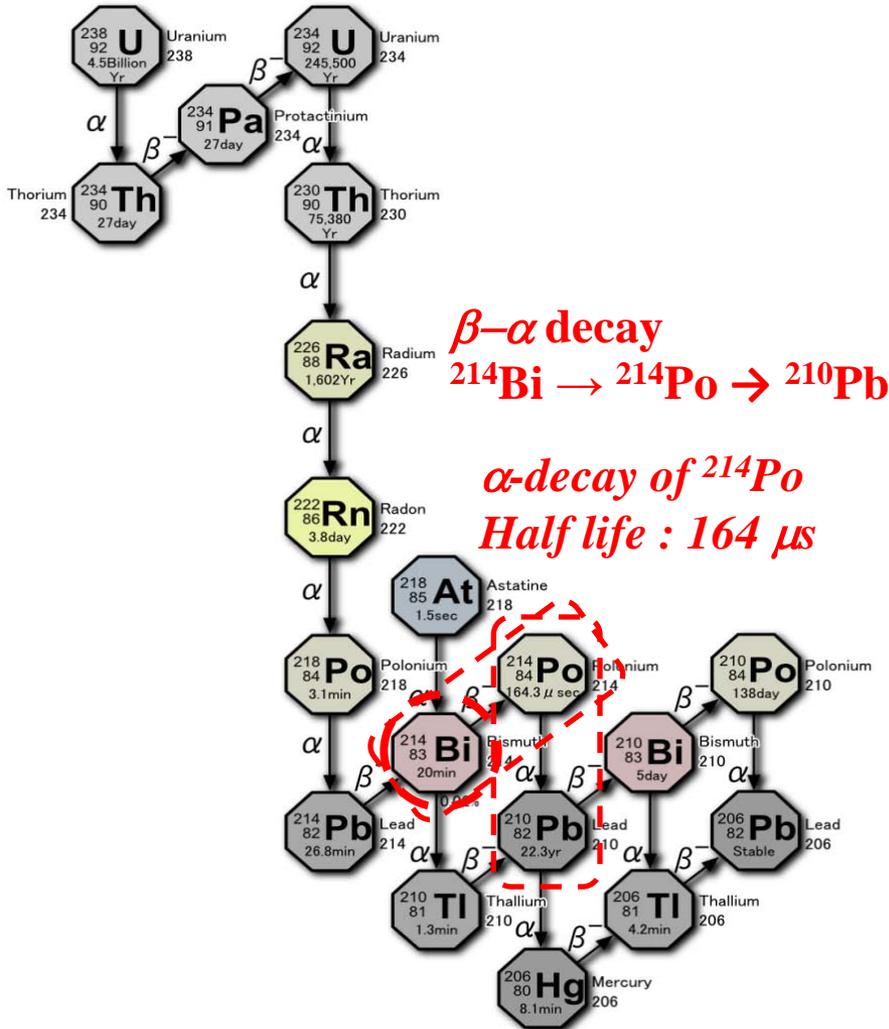
- ❖ Производство изотопов (масштаб от десятков до сотен кг):  
Россия
- ❖ Производство монокристаллов  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ ,  $\text{CaMoO}_4$ ,  
( $\text{CaWO}_4$ ,  $\text{ZnMoO}_4$ ): Россия
- ❖ Развитие высокотехнологичных отраслей в РФ и создание  
рабочих мест в этих отраслях
- ❖ Поступление налогов в бюджет РФ
- ❖ Привлечение молодежи из российских вузов и НИИ к  
участию в долгосрочном (10 – 20 лет )  
“высокотехнологичном” эксперименте.

Дополнительные слайды

# Analytic approach (Pulse shape analysis)



# $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ decay chains



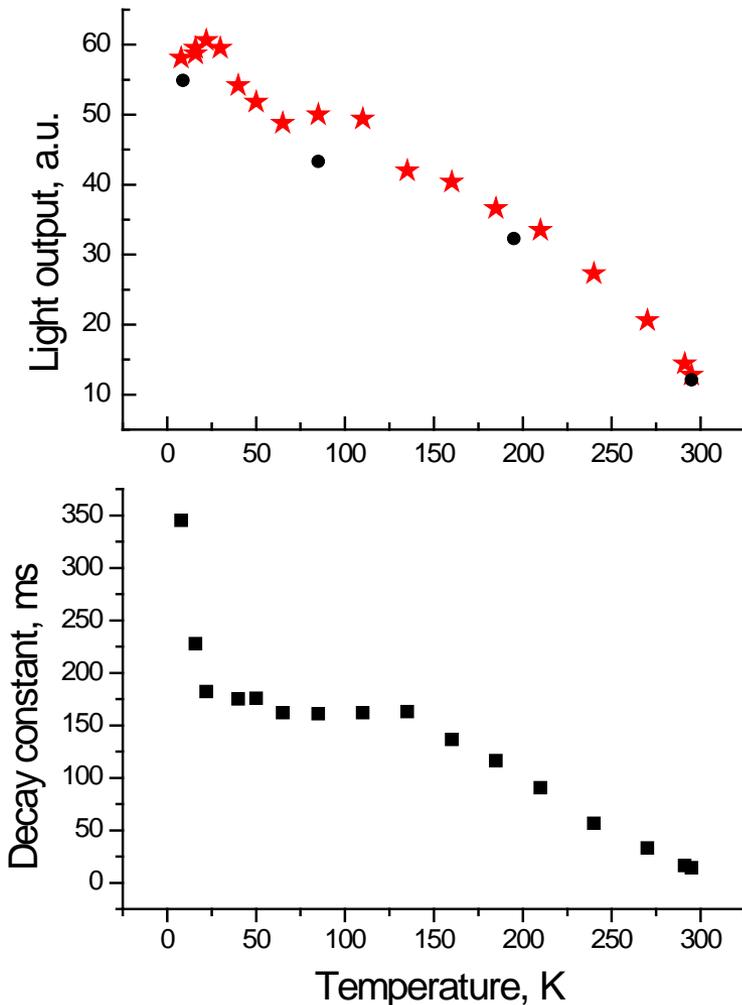
# Зависимость сцинтилляционных свойств $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ от температуры

Dr. V.B. Mikhailik *Department of Physics, University of Oxford Oxford OX1 3RH, UK*

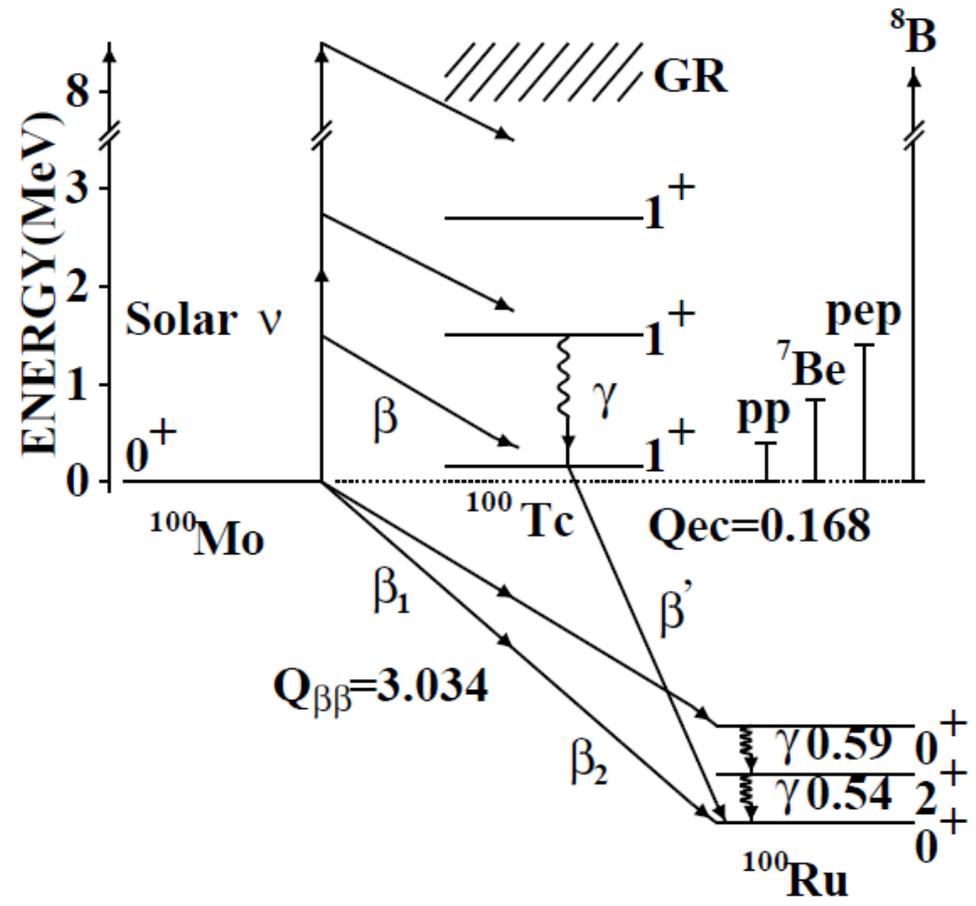
Параметр	T=295 K	T=8 K
Световыход (относительно референсного $\text{CaMoO}_4^*$ ), %	$105 \pm 39$	$106 \pm 32$
Постоянная распада (главная компонента), мкс	$16.5 \pm 0.3$	$345 \pm 25$

\* Образец  $\text{CaMoO}_4$  произведённый Carat в 2006 г.

Проводились независимые измерения световыхода образцов (1 см x 1 см x 1 см) обогащённых кристаллов в широком диапазоне температур. Световыход сравнивался со значениями лучшего образца природного кристалла.



# Регистрация pp-нейтрино от Солнца



# AMoRE: full scale experiment

Crystal size:  $0.6 \text{ cm}^3$

Energy resolution  
2keV (60keV)  
11 keV (5.5MeV)



Crystal size:  $\sim 60 \text{ cm}^3$ , 250 g

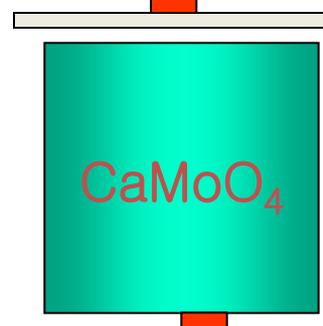
Energy resolution  
 $< 0,5 \% @ 3 \text{ MeV}$

Additional light sensor

Time constant of phonon signal

Light detector →

Si or Ge TES/MMC/NTD



$60 \text{ cm}^3 \text{ CMO}$

$C = 0.17 \text{ nJ/K at } 10 \text{ mK}$   
 $1.4 \text{ nJ/K at } 20 \text{ mK}$

Phonon sensor (MMC)