

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 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.Gezahev, 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

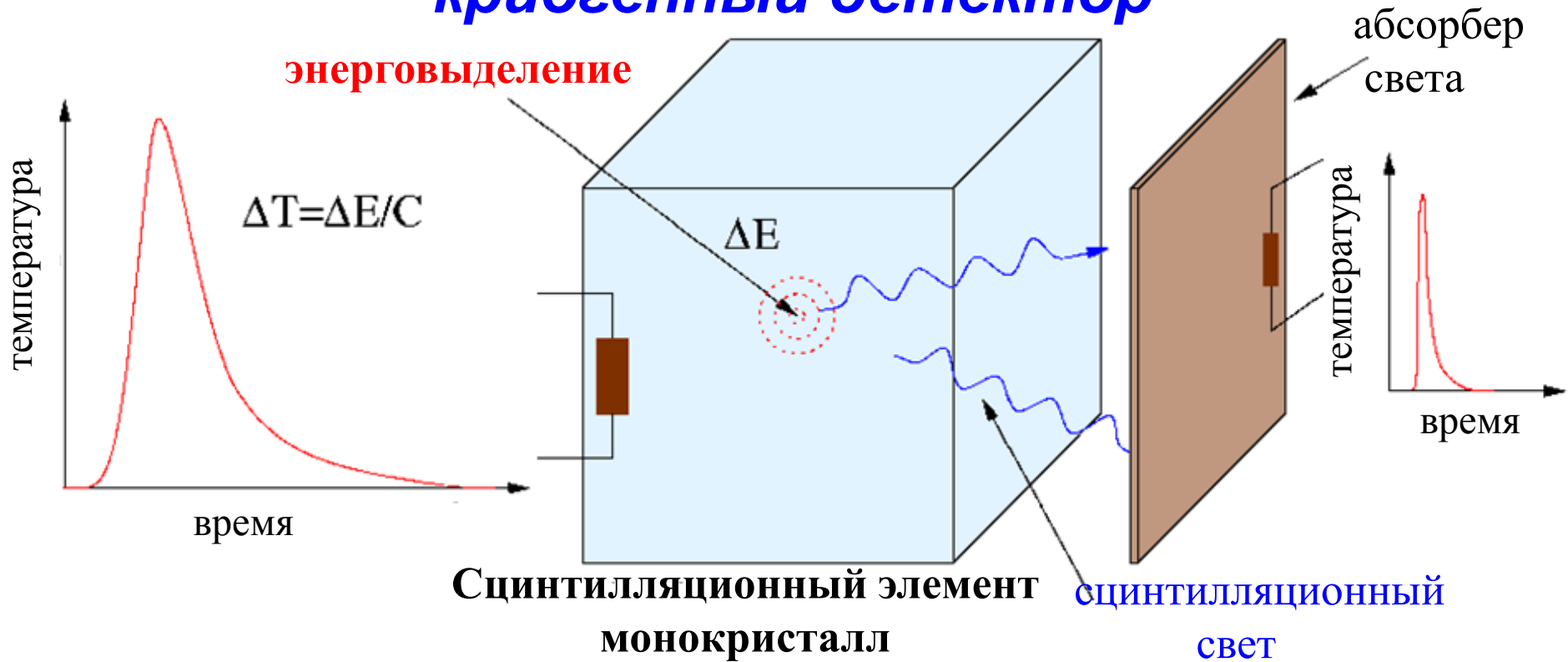
На сегодняшний день коллаборация
объединяет:

5 стран
9 институтов
72 участника



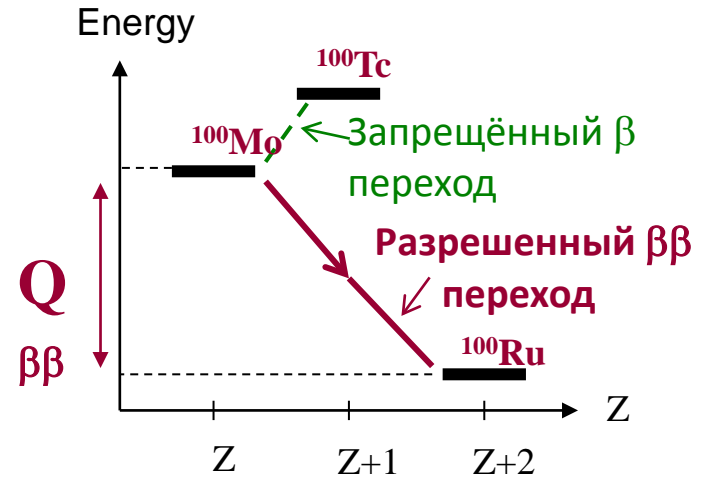
International Workshop on Double Beta Decay Search
Oct. 15 ~ Oct. 17, SNU, Korea

Как работает сцинтилляционный криогенный детектор



Основная цель коллаборации AMoRE

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



Мотивация:

$Q_{\beta\beta} = 3034 \text{ кэВ}$: 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}Mo и кальция обеднённого по изотопу ^{48}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 $T_{1/2}$) 2β экспериментов:

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

ε – detection efficiency

δ – abundance of candidate nuclei in the detector

m – mass of detector

t – time of measurements

R – energy resolution

BG – background



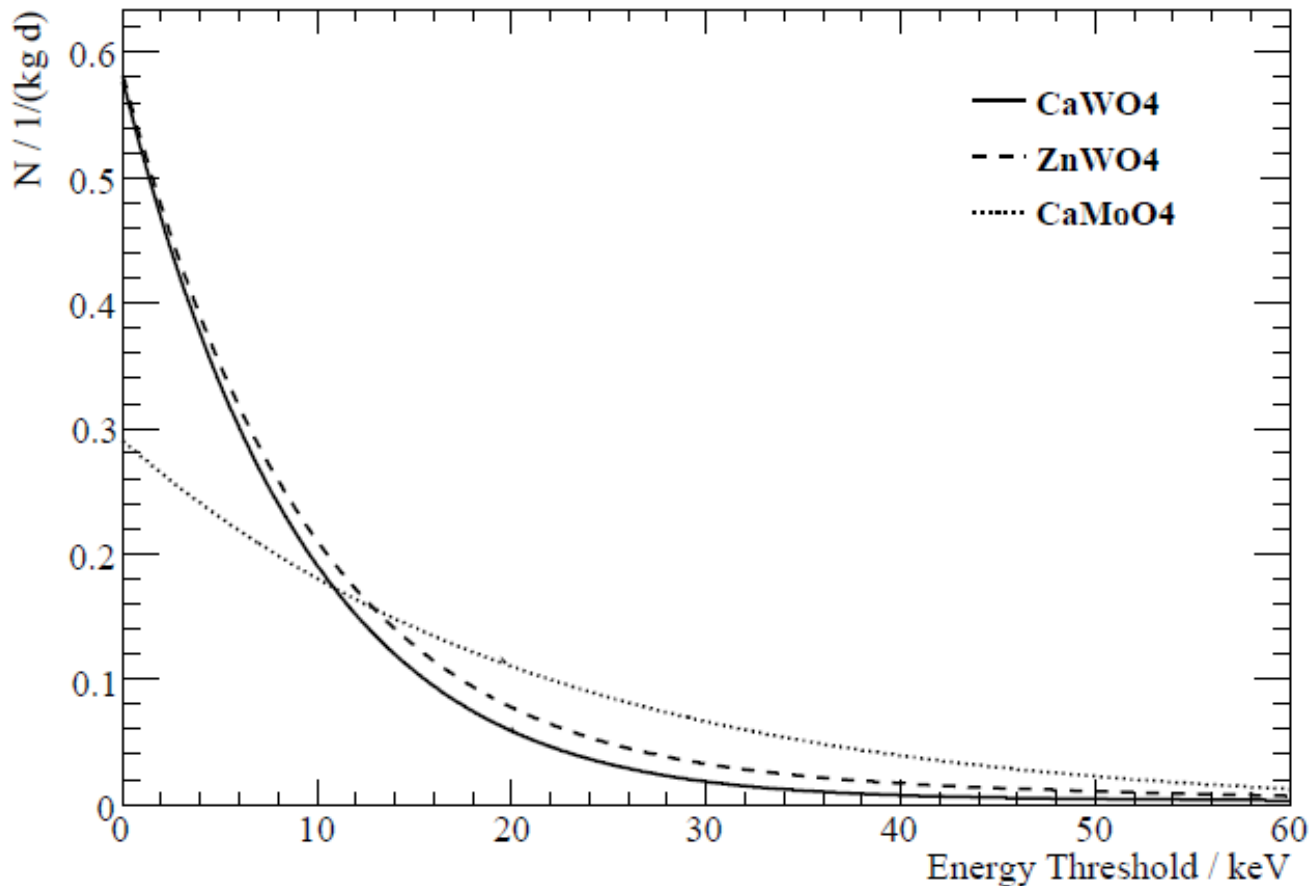
- ~50-100 кг изотопа ^{100}Mo , ~ 400 - 800 сцинтилляционных элементов
- ультранизкое содержание **опасных** радиоактивных примесей:
 ^{226}Ra (^{214}Bi) ≤ 0.1 мБк/кг, $^{228}\text{Th} \leq 0.05$ мБк/кг
- высокое энергетическое разрешение $< 1\%$ (на уровне разрешения для ППД)
- 5-10 лет набора данных

Выбор ядер-мишеней для регистрации WIMP: пример коллаборации CRESST

Development of cryogenic phonon detectors
based on CaMoO_4 and ZnWO_4 scintillating crystals
for direct dark matter search experiments

I. Bavykina ^{a,*} G. Angloher ^a D. Hauff ^a M. Kiefer ^a F. Petricca ^a F. Pröbst ^a
^aMax-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:

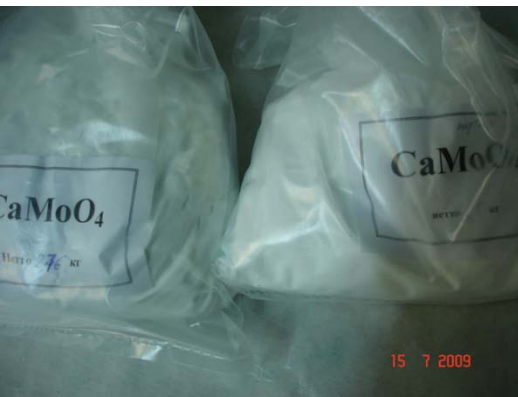
- 1) калориметрический детектор: «детектор \equiv источник» \rightarrow высокая эффективность ($\sim 90\%$) регистрации полезных событий;
- 2) высокое содержание рабочего изотопа ($\sim 50\%$ по массе) в соединении (стехиометрическое отношение);
- 3) технология производства (метод Чохральского) позволяет добиться высокой чистоты выращиваемых кристаллов \rightarrow существенное снижение внутреннего фона от ^{238}U -, ^{232}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}Mo ;
- 5) высокий световыход (до 9300 фотон/МэВ);
- 6) возможность анализа сигнала с целью подавления α -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}Ca , обедненного по изотопу ^{48}Ca (как побочный продукт наработки изотопа ^{48}Ca).

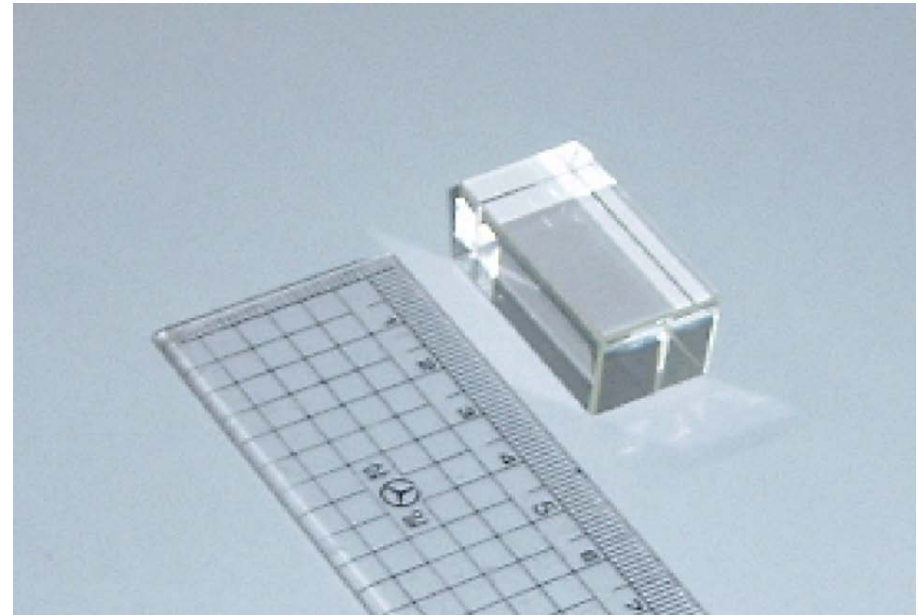
Производство монокристаллов $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$

- $T_{\text{пл}} = 1445 \text{ }^\circ\text{C}$ (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:



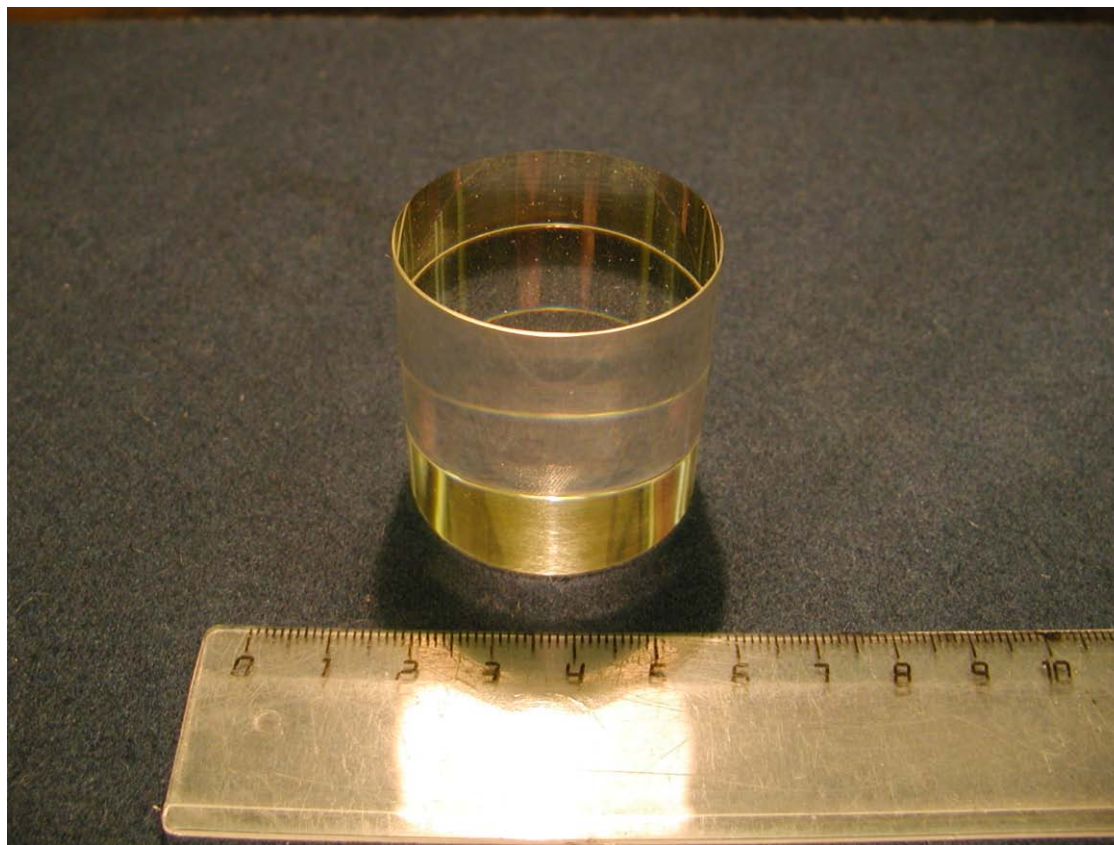
2004 год: первые кристаллы

- размеры CaMoO_4 кристаллов до 15 см^3 ;
- световыход ~ 400 фотонов/МэВ;
- Невысокая прозрачность (наблюдается полоса поглощения около 395 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 CaMoO_4 на основе природных компонент с размерами $D40 \times 40$ 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:

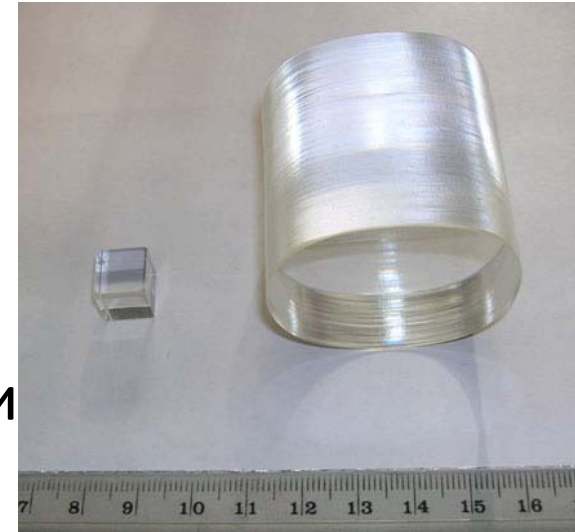
- $L = 90$ см при 530 нм (максимум высвечи сцинтилляции)

Световыход:

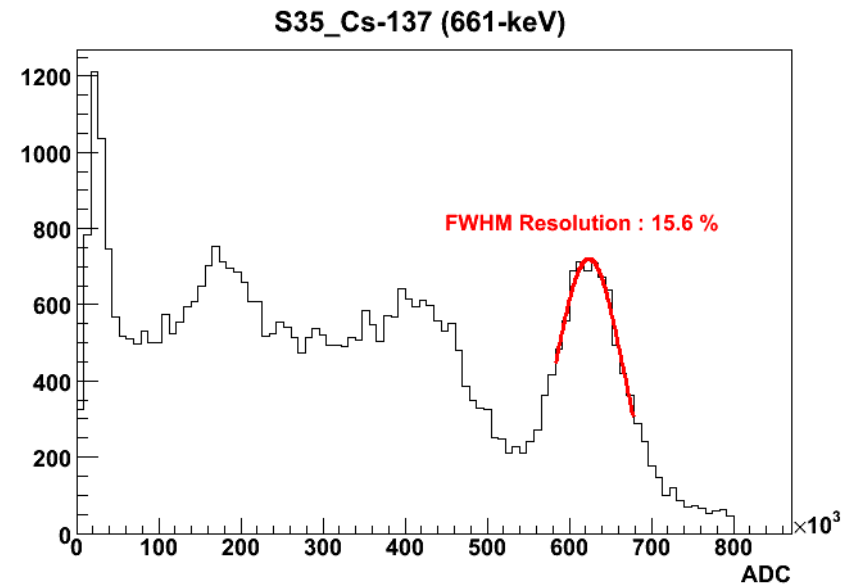
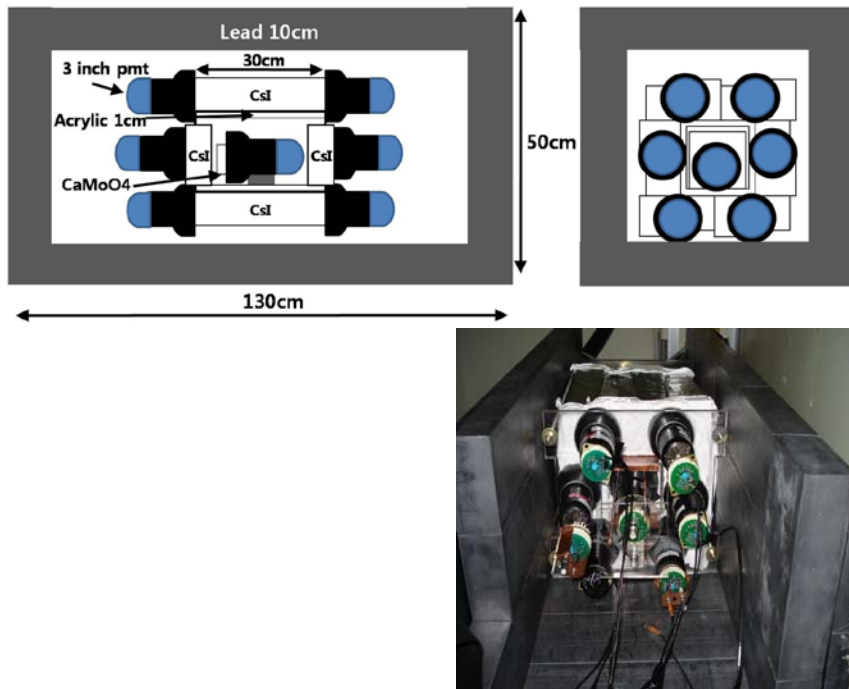
- $LY = 9300$ фотонов/МэВ, сравним с лучшими CaMoO_4 монокристаллами на природном сырье

Кинетика сцинтилляций, основная компонента:

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



Энергетическое разрешение сцинтилляционного 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}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}Rn установка продувалась азотом.

HPGe измерения на Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН

Sample, material	Isotope			
	^{40}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 **≥ 35 раз.**



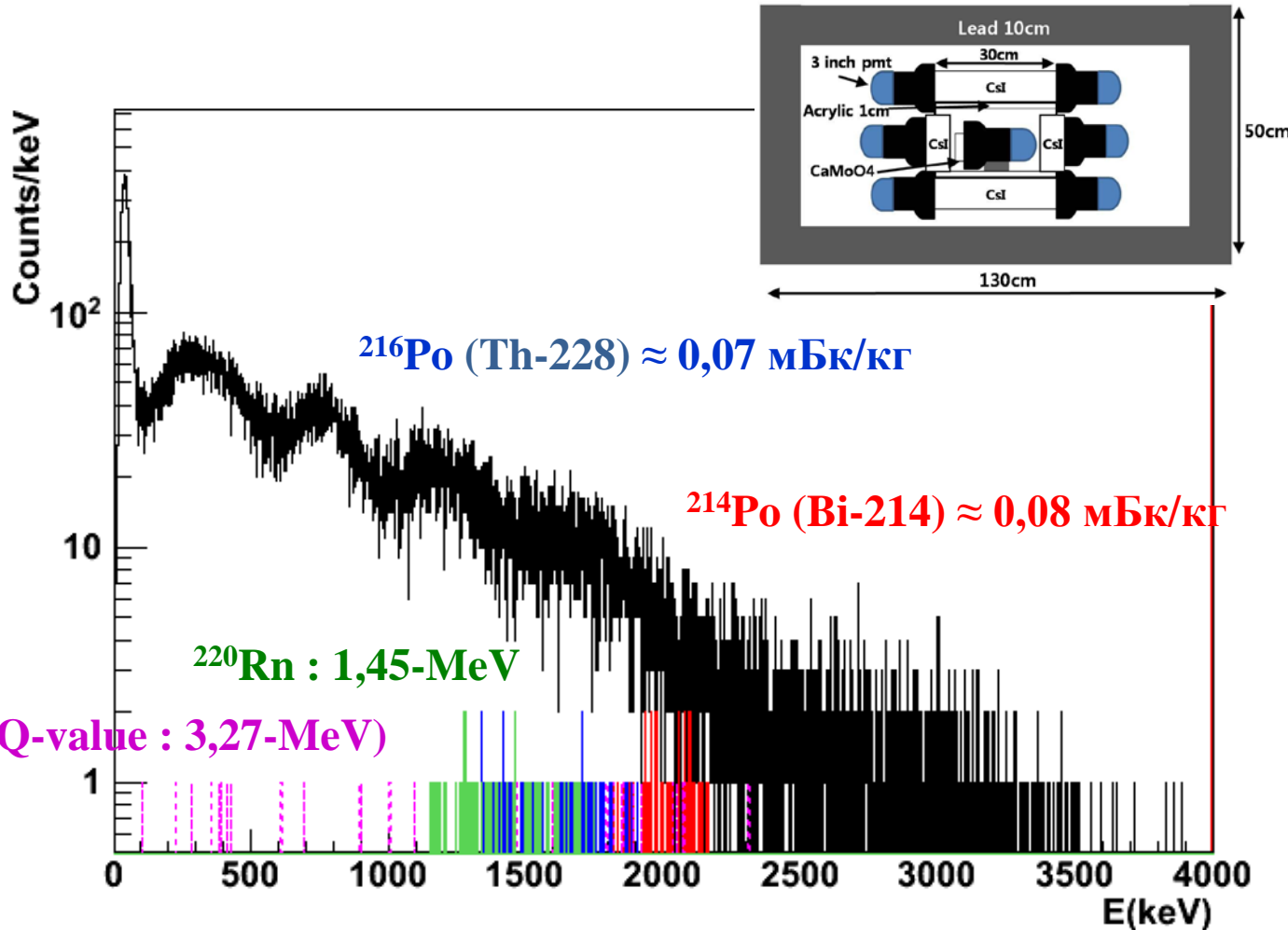
Фоновый спектр сцинтилляционного элемента СБ28

β - α decay in ^{238}U

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

α - α decay in ^{232}Th

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

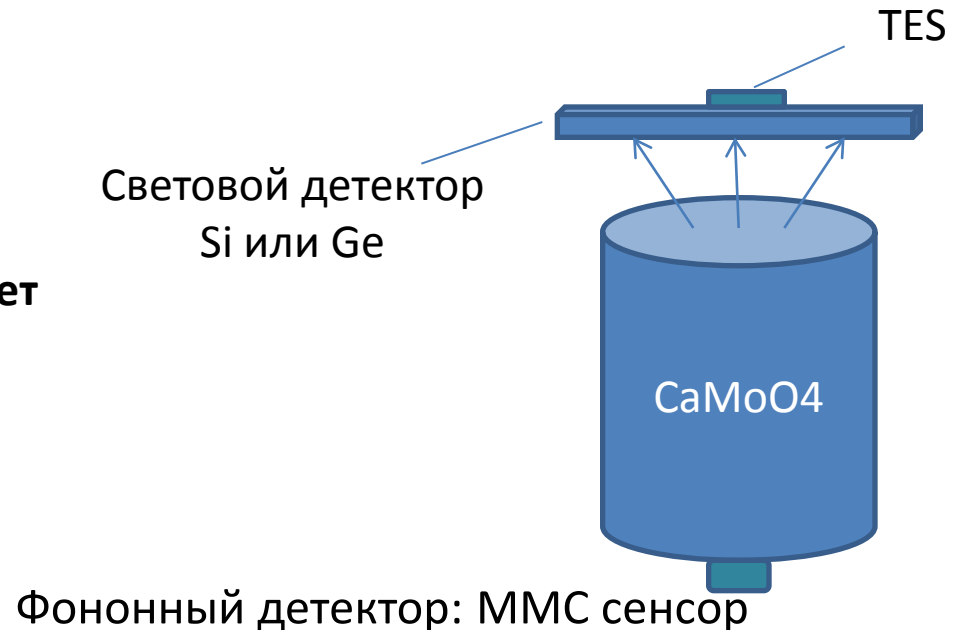
Общая масса $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4 = 100$ кг.

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

Время проведения: 5 лет.

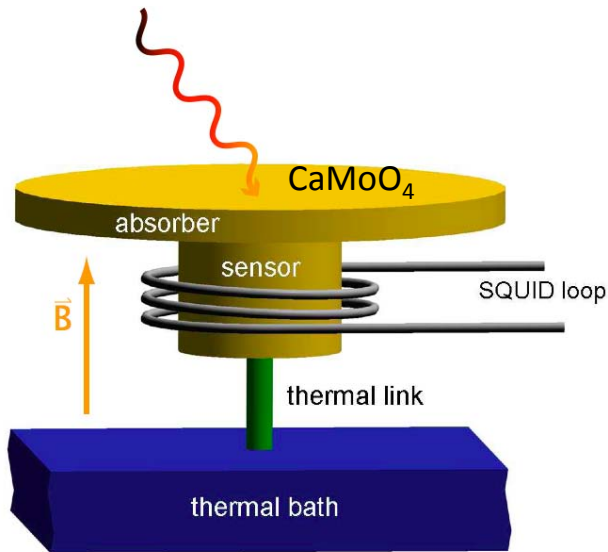
$T_{1/2}^{0\nu} = 3 \cdot 10^{26}$ лет, что соответствует

$\langle m_\nu \rangle = 50$ мэВ

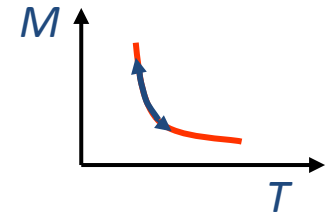


Разработка криогенного детектора на основе $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$

- ММС — Metallic Magnetic Calorimeter



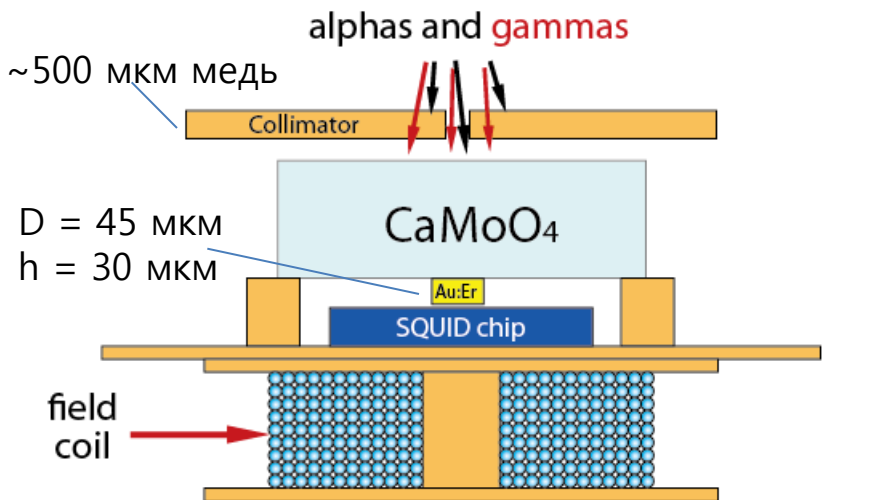
Парамагнитный сенсор Au:Er



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

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

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

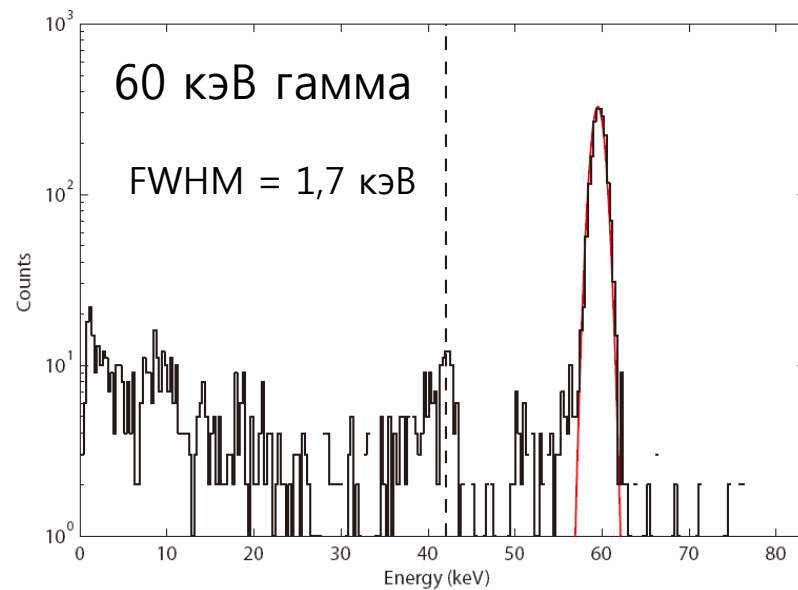
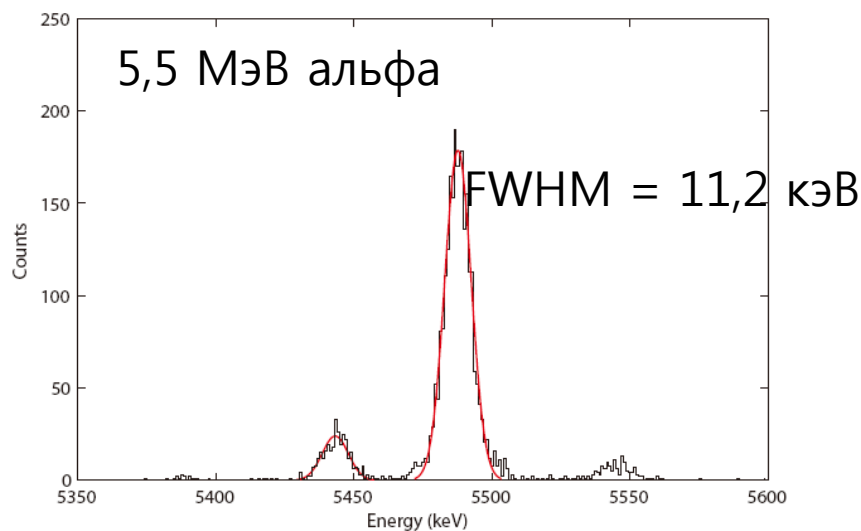


Проведены первые криогенные измерения с образцом $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ размерами 1 см x 0,7 см x 0,6 см.

Температура: 13 – 100 мК

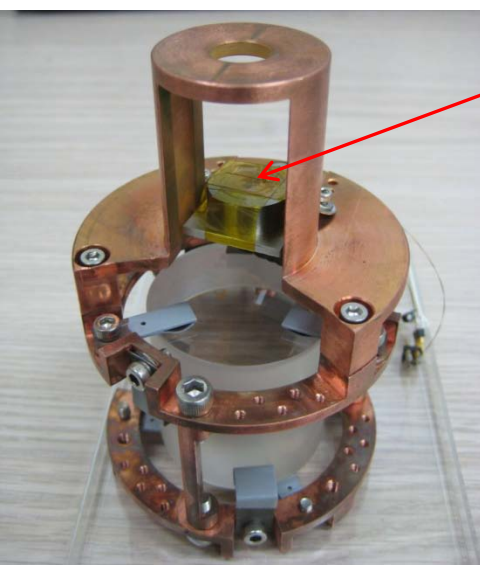
Р/а источник ^{241}Am :

α -частицы и $E_\gamma = 59,5$ кэВ

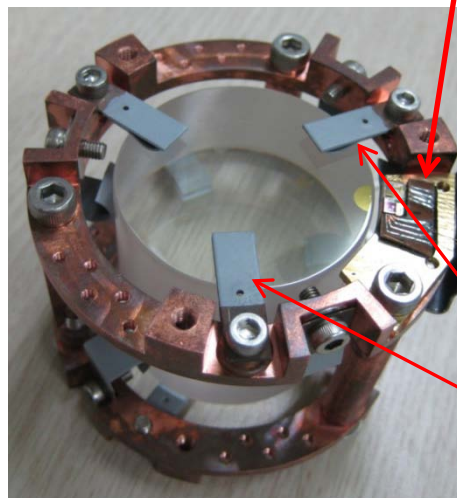


Криогенные измерения с полноразмерным элементом

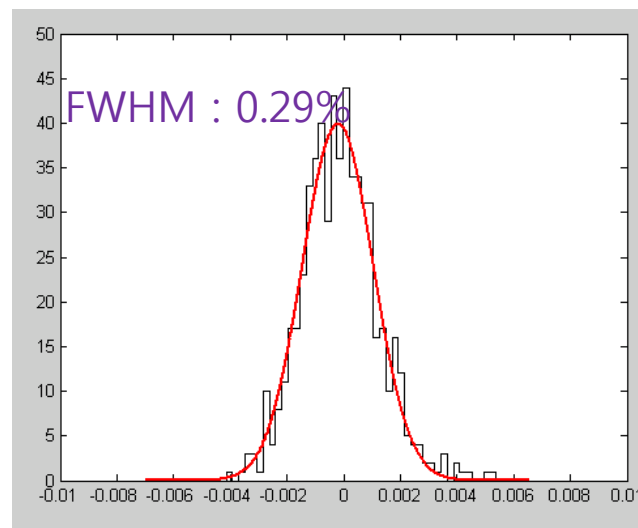
- Разработана установка для проведения эксперимента с полноразмерным элементом (40x40 мм). Проведены первые измерения.



^{241}Am

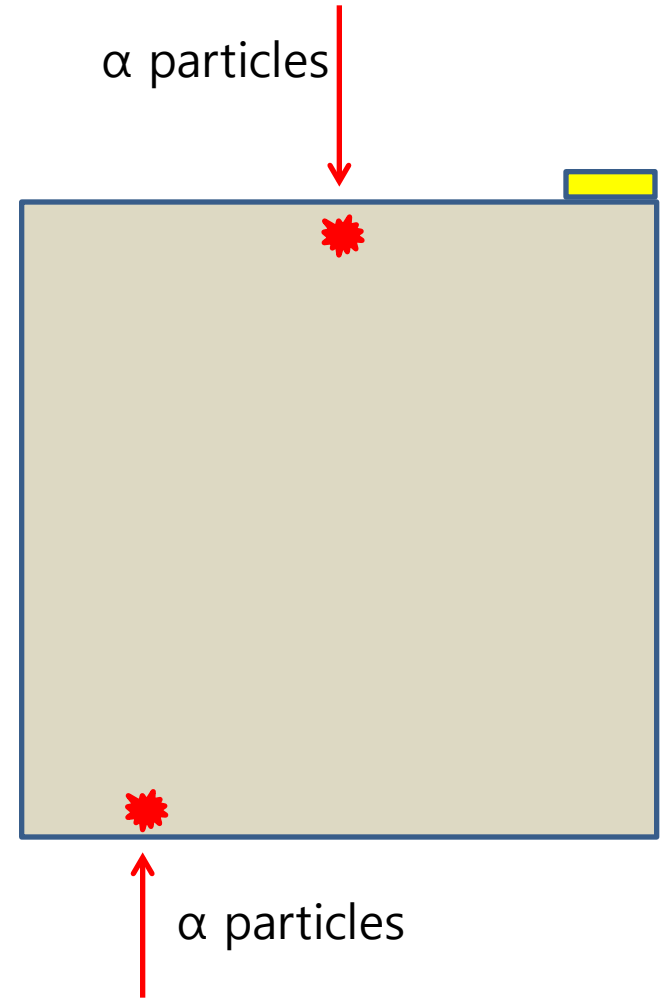
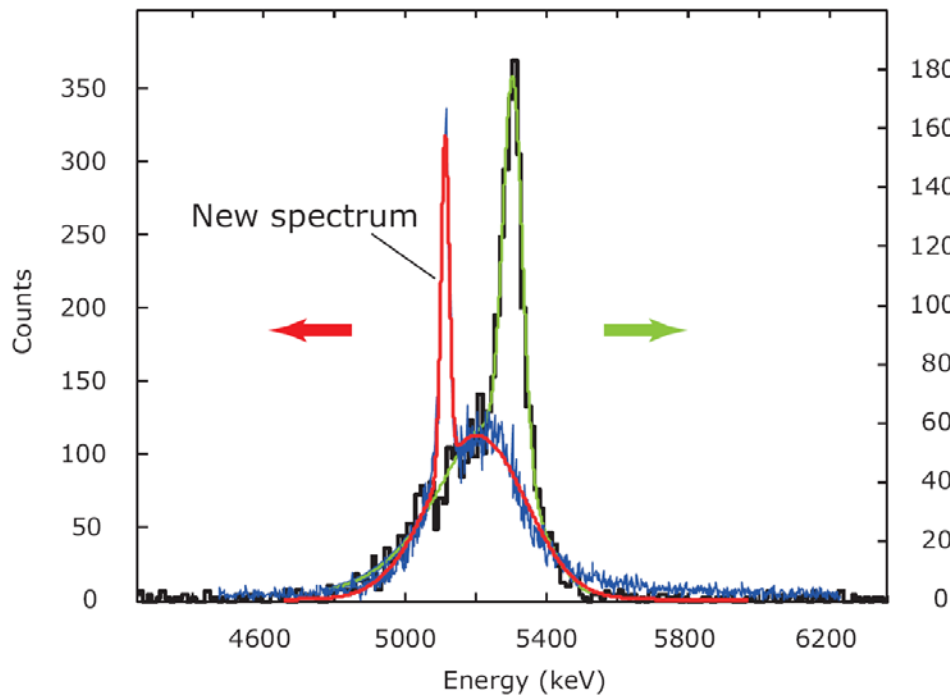


MMC&SQUID



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)

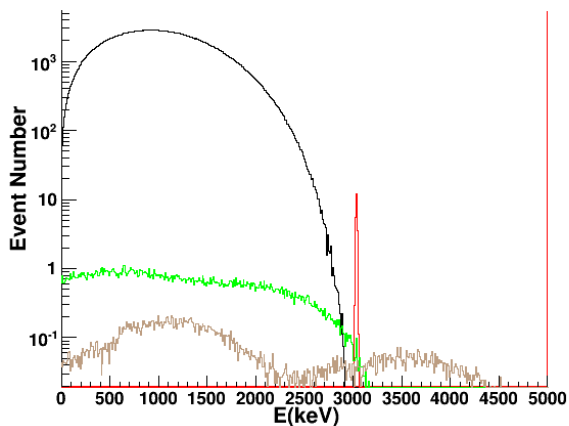
(Lower Dam)



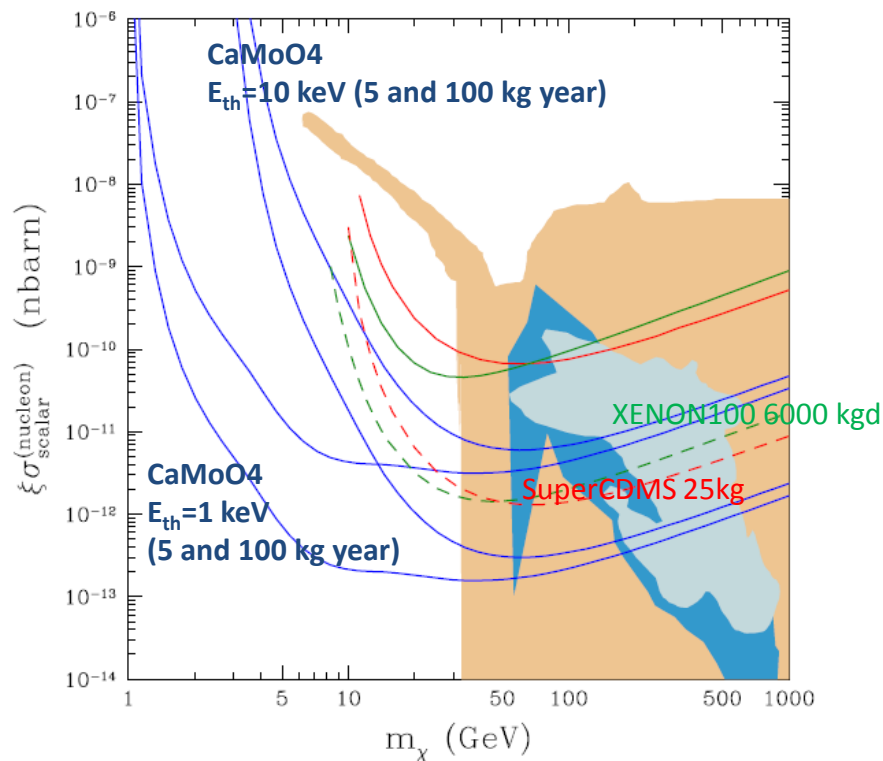
양양양수발전소

Чувствительность сцинтилляц. криогенного CaMoO4 детектора

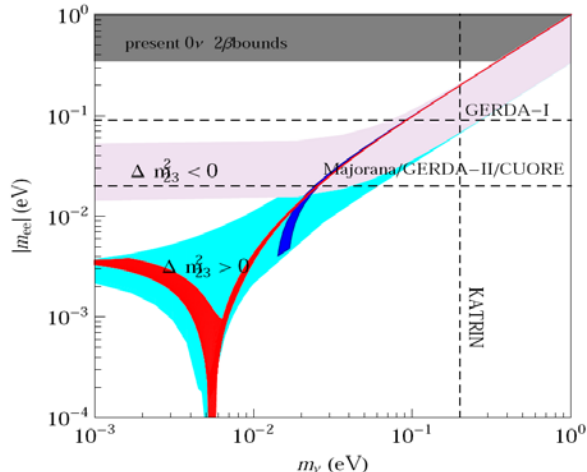
- 0.5% FWHM \rightarrow 15 keV FWHM for low temp.
- 5 years, 100 kg $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$: $T_{1/2} = 3.0 \times 10^{26}$ years \rightarrow $\langle m \rangle = 20 - 70$ meV



Dark matter search
 \rightarrow High sensitivity



Hirsch et al, PLB679:454-459,2009



Fully covers
 inverted hierarchy



Принцип разделения изотопов: центрифужный метод

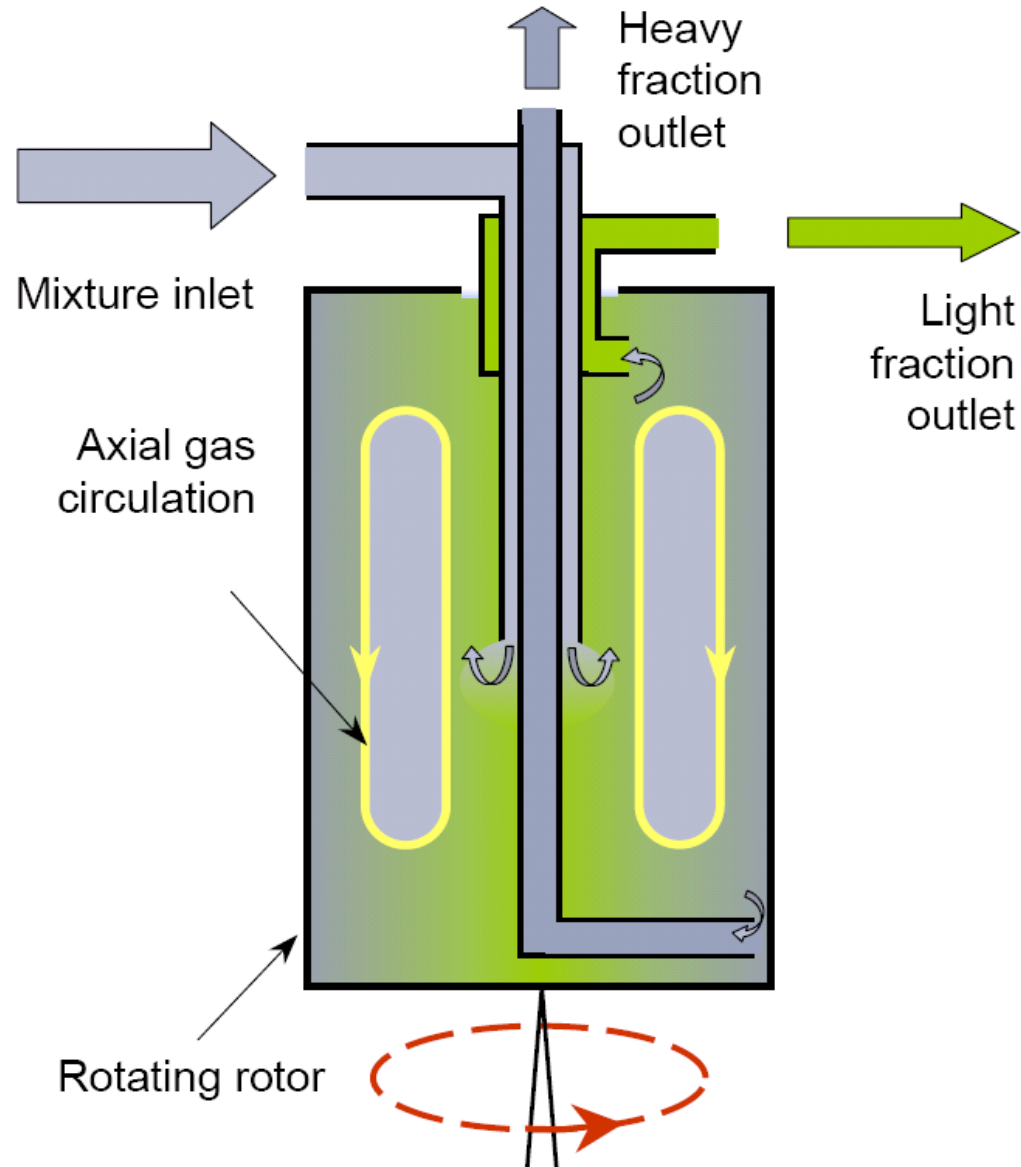
Ускорение:

500 000 g

Обороты $\sim 1500 \text{ сек}^{-1}$

Каскад: сотни и даже
тысячи «вертушек»

Наработка на отказ:
30 лет



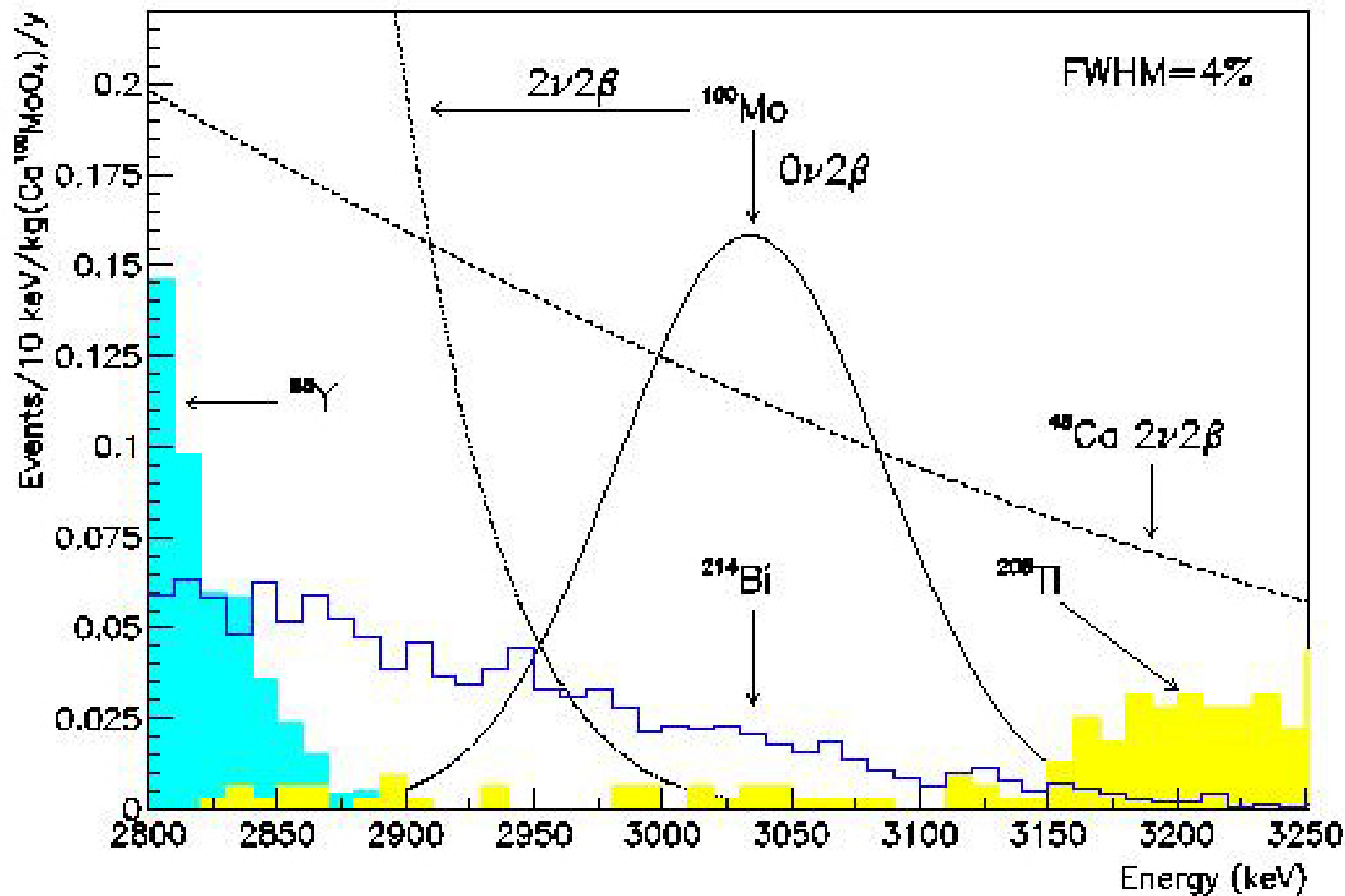
СВЕТЛАНА, ЭХЗ



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 ≥ 35 раз. Достигнутая удельная активность опасных изотопов ^{214}Bi (^{238}U) и ^{228}Th (^{232}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}Ca (обедненного по ^{48}Ca) и возможность наработки изотопа ^{100}Mo в количествах \approx десятки и сотни кг. Это позволяет планировать эксперимент по поиску $0\nu 2\nu$ - распада ^{100}Mo с общей массой $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ от 100 кг (**от 50 кг ^{100}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 CaMoO_4 и CaWO_4 (природный состав):**

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

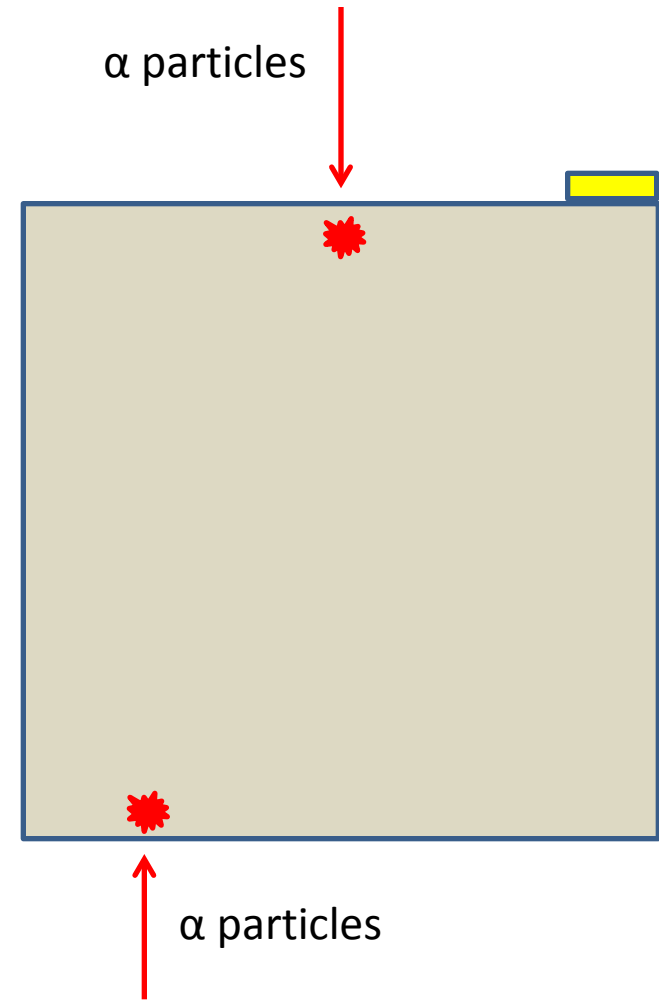
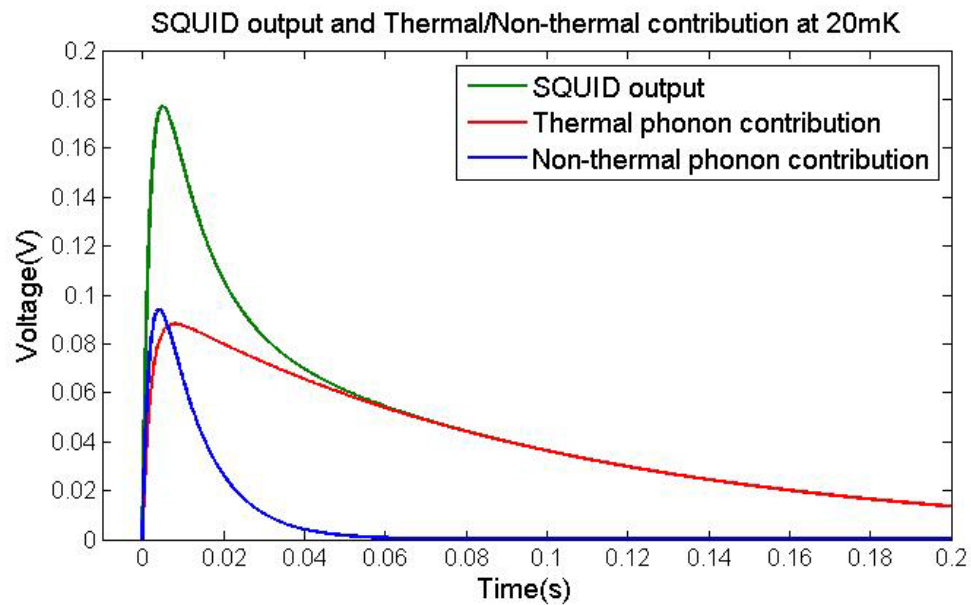
$^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ и CaMoO_4 эксперименты на БНО ИЯИ РАН

Масштаб эксперимента: от 10 кг до 1 000 кг

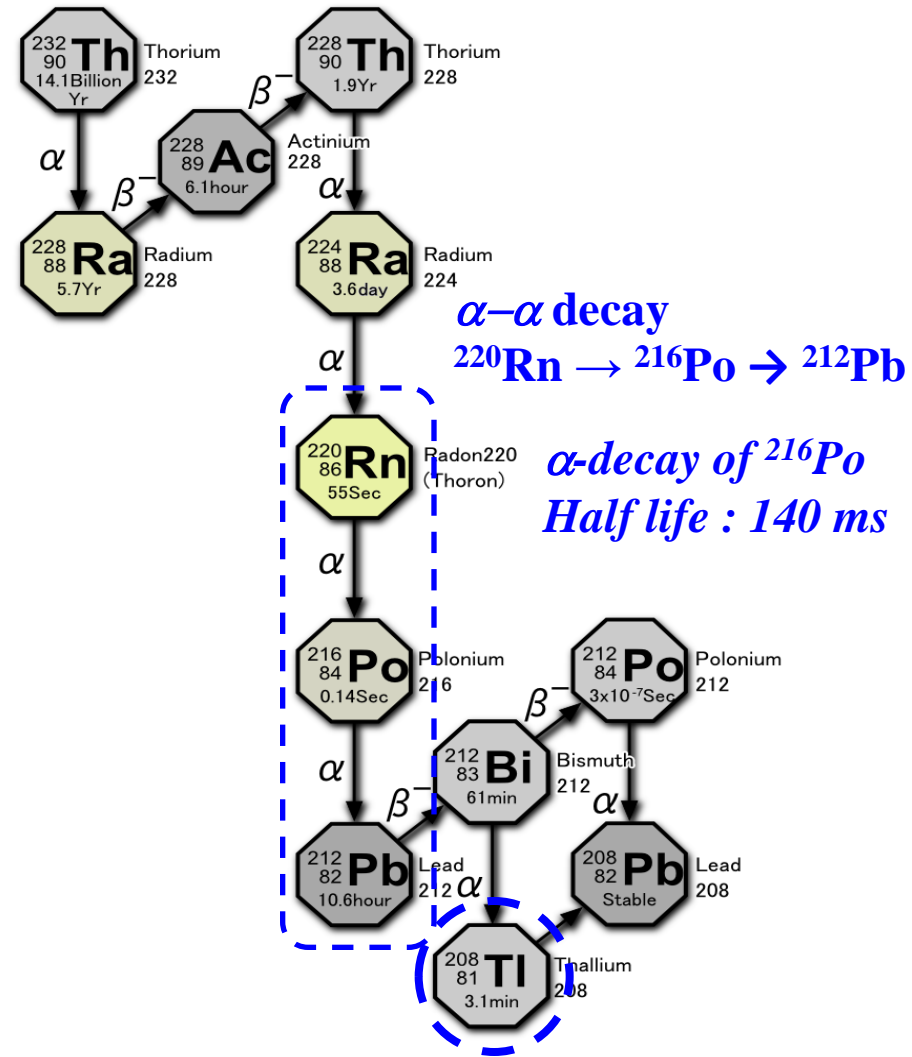
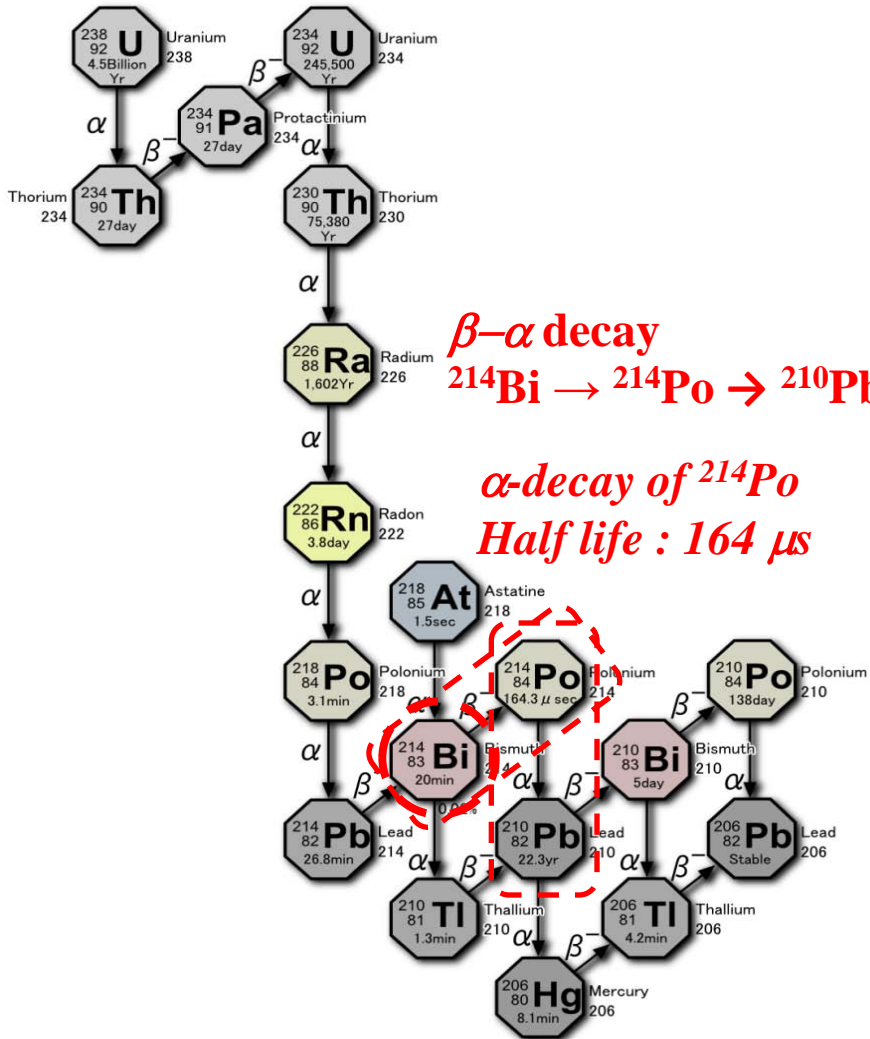
- ❖ Производство изотопов (масштаб от десятков до сотен кг):
Россия
- ❖ Производство монокристаллов $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$, CaMoO_4 ,
(CaWO_4 , ZnMoO_4): Россия
- ❖ Развитие высокотехнологичных отраслей в РФ и создание
рабочих мест в этих отраслях
- ❖ Поступление налогов в бюджет РФ
- ❖ Привлечение 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



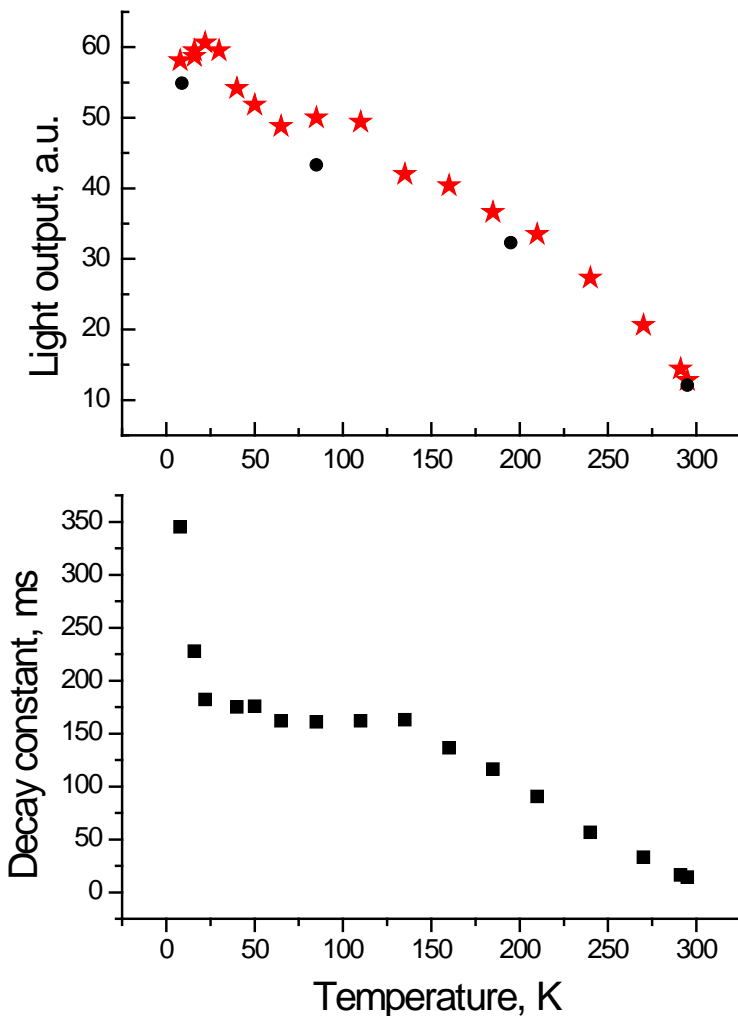
Зависимость сцинтилляционных свойств $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ от температуры

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

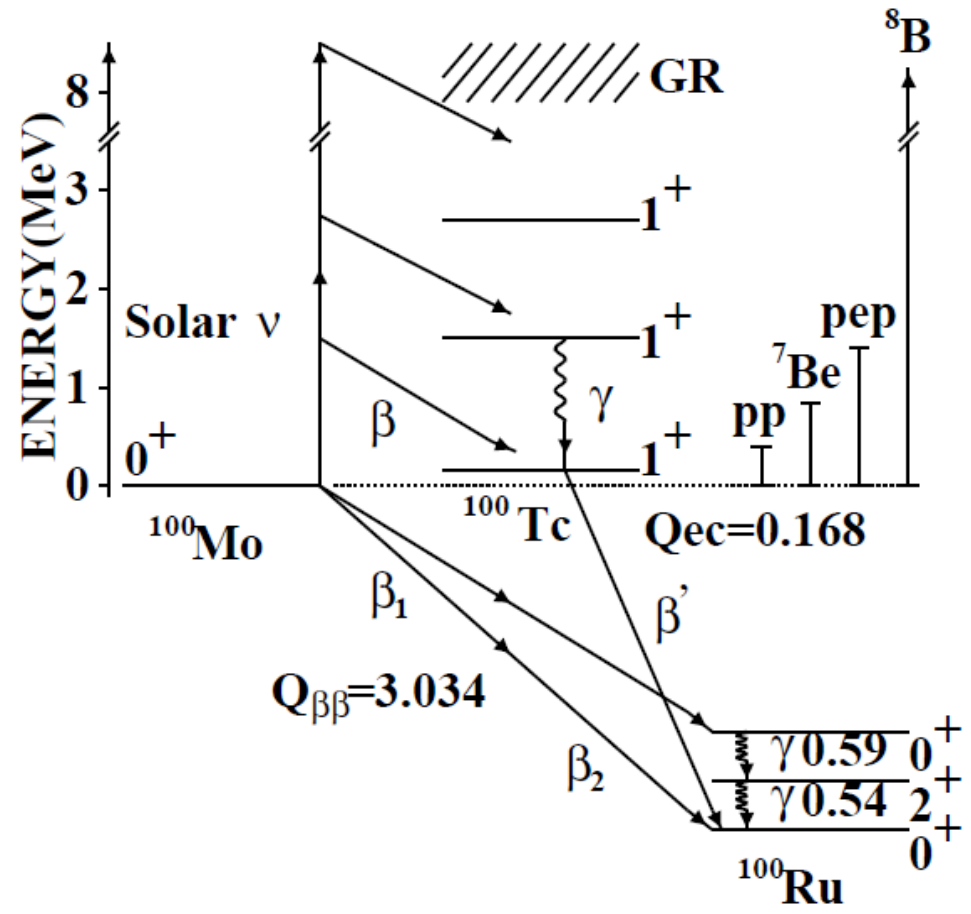
Параметр	T=295 K	T=8 K
Световыход (относительно референсного CaMoO_4^*), %	105 ± 39	106 ± 32
Постоянная распада (главная компонента), мкс	16.5 ± 0.3	345 ± 25

* Образец 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 cm^3

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



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

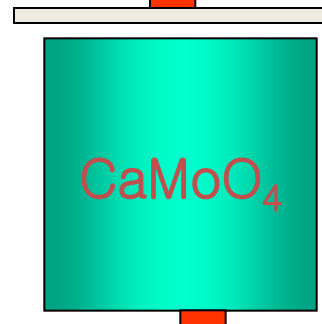
Energy resolution
 $< 0,5 \% @ 3 \text{ MeV}$

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)