

Криогенные детекторы

- Детекторы со сверхпроводящими туннельными переходами (STJ-superconducting tunnel junction).

Ромашкина И.Л.

ОЯСМ, НИИЯФ МГУ

- Низкотемпературные детекторы.

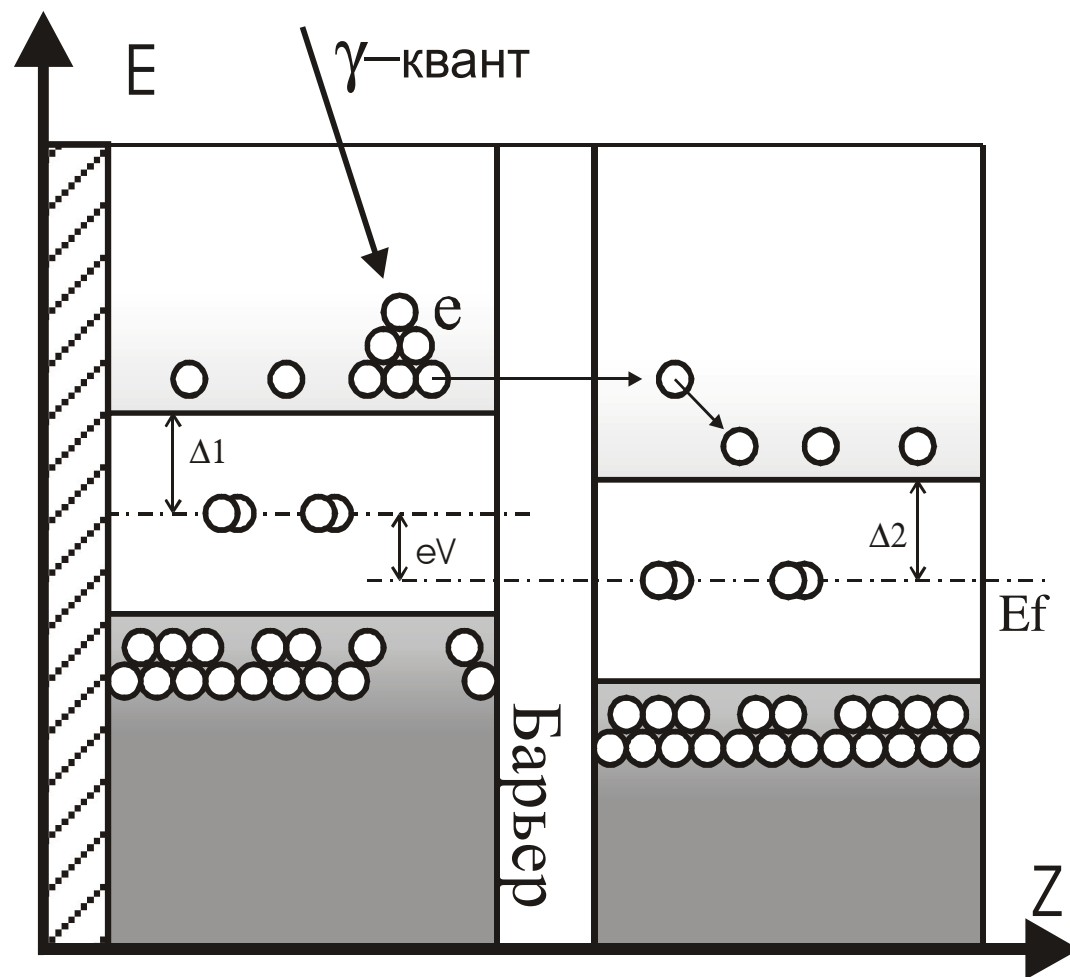
Козин М.Г.

Зарубежные данные

- Идея использования СТП для детектирования ядерного излучения – середина 60-х гг. XX в.

	ПП	СП
ϵ - средняя энергия, необходимая для создания одного носителя	эВ	мэВ
	$\Delta=1,1$ эВ (Si)	$\Delta=1,5$ мэВ (Nb)
$N=E/\epsilon$ - среднее число носителей, для кванта излучения с энергией $E = 1$ кэВ	10^3	10^6
Разрешение $1/\sqrt{N}$		в 30 раз лучше

Схема энергетических зон простейшего СТД



Траб. = 0,1 Тс

Материал	Тс, К	Δ , мэВ	Ω_D , мэВ
Nb	9,2	1,5	23,7
Ta	4,5	0,7	20,7
Al	1,2	0,17	36,9
Sn	3,7	0,57	17,2
In	3,4	0,52	9,3
Pb	7,2	1,36	9,0
V	5,4		
Zn	0,88	0,12	28,2
Mo	0,95	0,139	39,6
Hf		0,019	21,7
Ti	0,39		
Zr	0,55		
W	0,012		
Tl		0,37	6,7
Hg		0,82	6,2
	1-10 К	1 мэВ и менее	Десятки мэВ

- Первый положительный результат по детектированию α -частиц при помощи Sn-SnO_x-Sn СТП

Wood G.H., White E.L.

Appl. Phys. Letts, 1969, v.15 N8, p.237-239

- Шпинель В.С., Ромашкина И.Л.

Возможности применения сверхпроводящих детекторов для прецизионной ядерной спектроскопии и регистрации ядер отдачи.

Препринт НИИЯФ МГУ-91-39/243

Москва 1991

Андрианов В.А.
Козин М.Г.
Ромашкина И.Л.

ОЯСМ НИИЯФ

Сергеев С.А.
Нефедов Л.В.

Создан компьютеризированный комплекс аппаратуры для экспериментального исследования сверхпроводящих туннельных переходов (СТП) в качестве детекторов мягкого рентгеновского излучения в широком температурном диапазоне на базе откачного гелиевого криостата (интервал температур 1,3-4.2 К) и рефрижератора растворения He^3 - He^4 (0,03-1,5 К), позволяющий регистрировать вольт-амперные характеристики туннельных переходов, форму и амплитудные спектры импульсов, возникающих при поглощении квантов рентгеновского излучения.

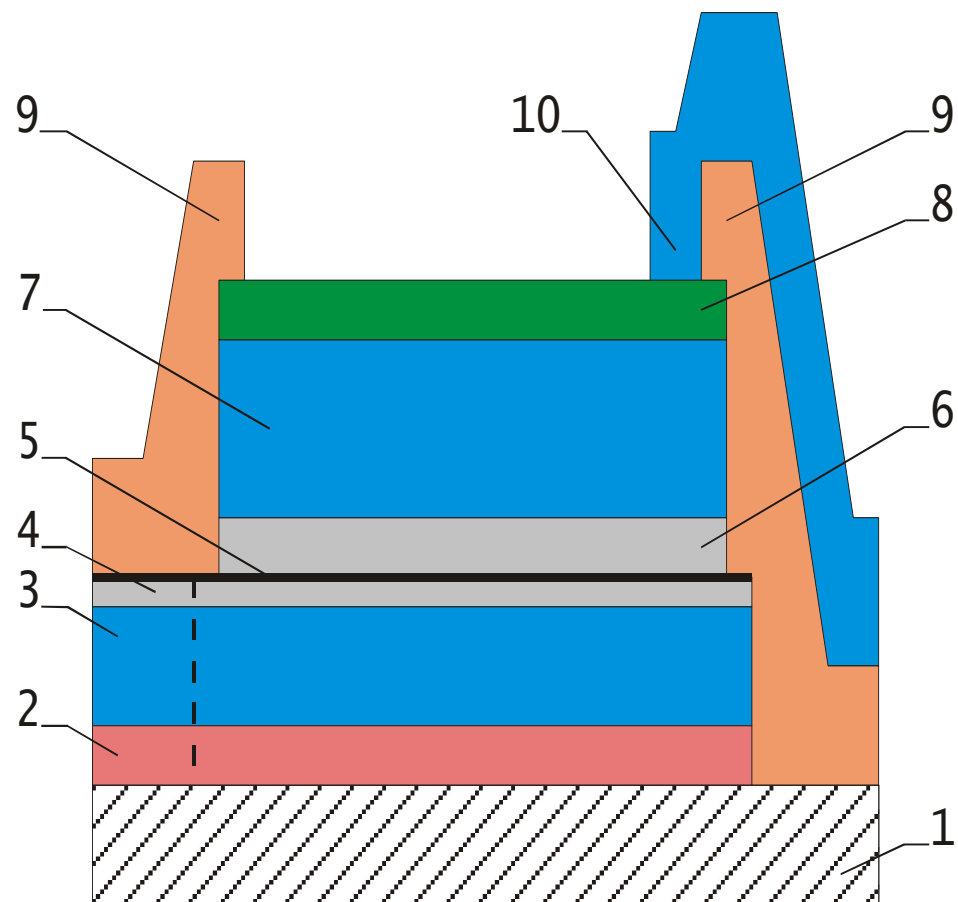
Кошелец В.П.

ИРЭ РАН

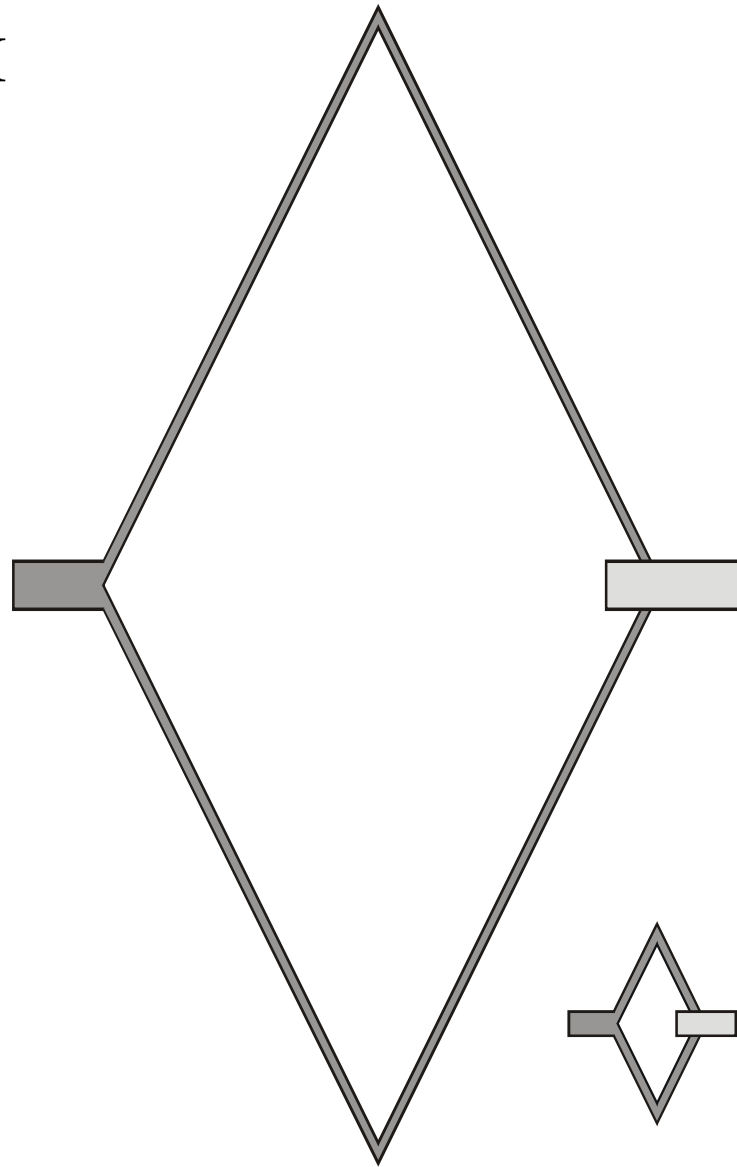
Магнетронное напыление слоев СТП, формирование по маскам методом фотолитографии.

Вертикальный разрез структуры СТД чипа

- 1 – Al_2O_3
- 2 – Ti толщина 300Å
- 3 – Nb(1) толщина 1000Å
- 4 – Al(1) толщина ~80Å
- 5 – AlO_x толщина ~2Å
- 6 – Al(2) толщина 130Å
- 7 – Nb(2) толщина 1500Å
- 8 – NbN толщина 300Å
- 9 – изолятор
- 10 – верхний контакт из Nb толщиной 3500Å



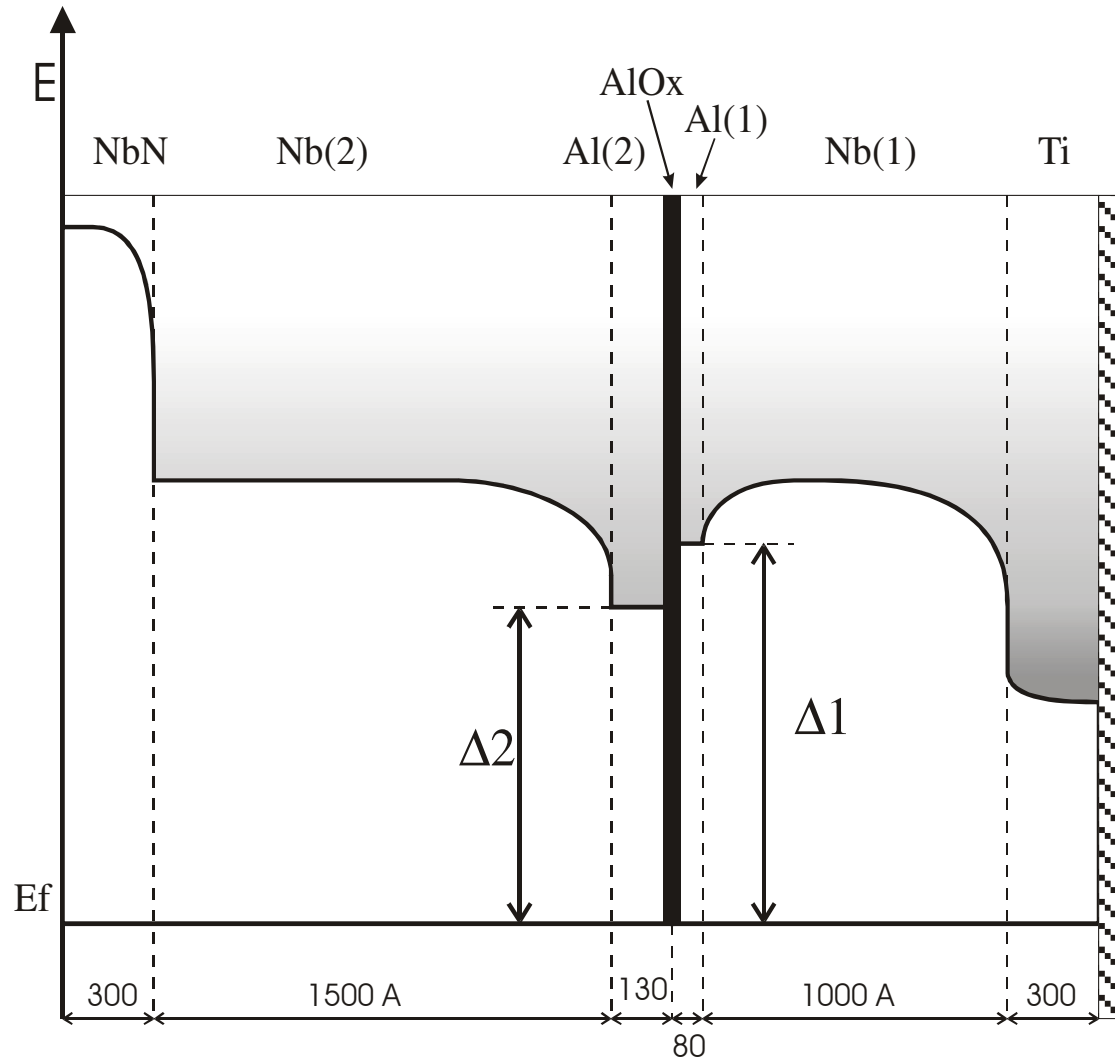
Форма и размеры туннельных переходов



$$S=20*20 \mu\text{m}^2$$

$$S=20000 \mu\text{m}^2$$

Схема энергетических зон детектора



E_f – энергия Ферми
 Δ_1 и Δ_2 – величина сверхпроводящей щели в Al(1) и Al(2),
соответственно

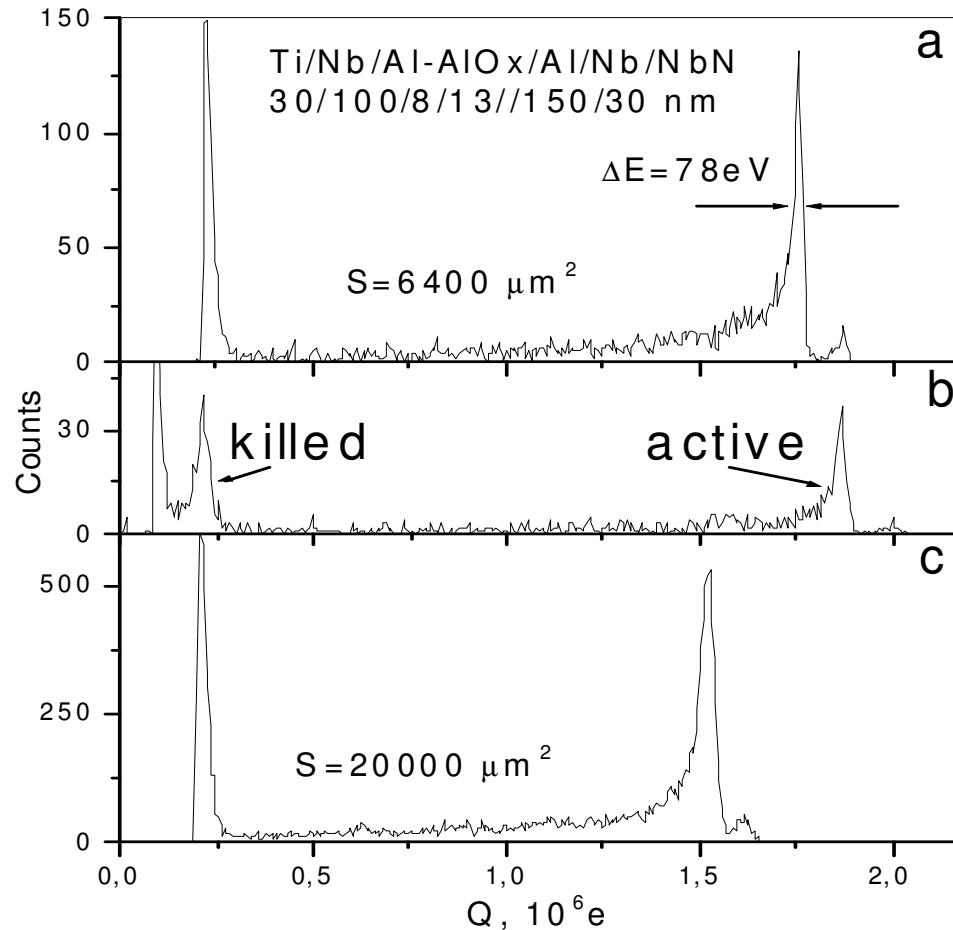
STJ X-ray detectors with titanium sublayer

M.G. Kozin^a, I.L. Romashkina^{a,*}, S.A. Sergeev^a, L.V. Nefedov^a,

V.A. Andrianov^a, V.N. Naumkin^a, V.P. Koshelets^b, L.V. Filippenko^b

Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res. A 520 (2004) 250-253 (LTD-10)

Известия РАН, сер. физ. 69 №1 (2005) 36-38 (Ядро)



Fe-55 source

Pulse height spectra of
STJ detectors with
killed electrode:

$S = 6400 \mu m^2$

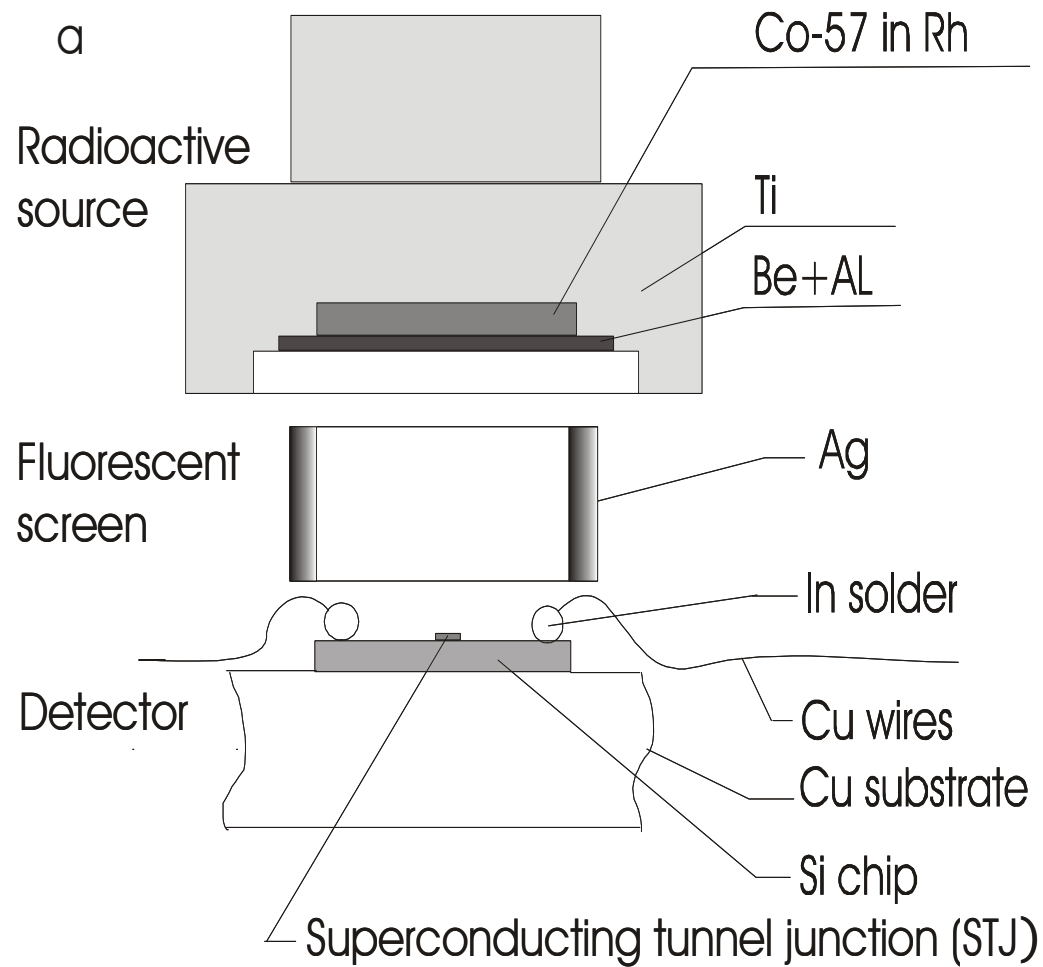
a) $T = 1.34 K$, $H = 127 Oe$,
 $V_b = 0.428 mV$;

b) $T = 1.38 K$, $H = 104 Oe$,
 $V_b = 0.532 mV$;

$S = 20000 \mu m^2$

c) $T = 1.34 K$, $H = 104 Oe$,
 $V_b = 0.350 mV$.

Схема геометрии опытов по возбуждению и регистрации флюоресценции.



X-RAY FLUORESCENCE DETECTING BY SUPERCONDUCTING TUNNEL JUNCTION

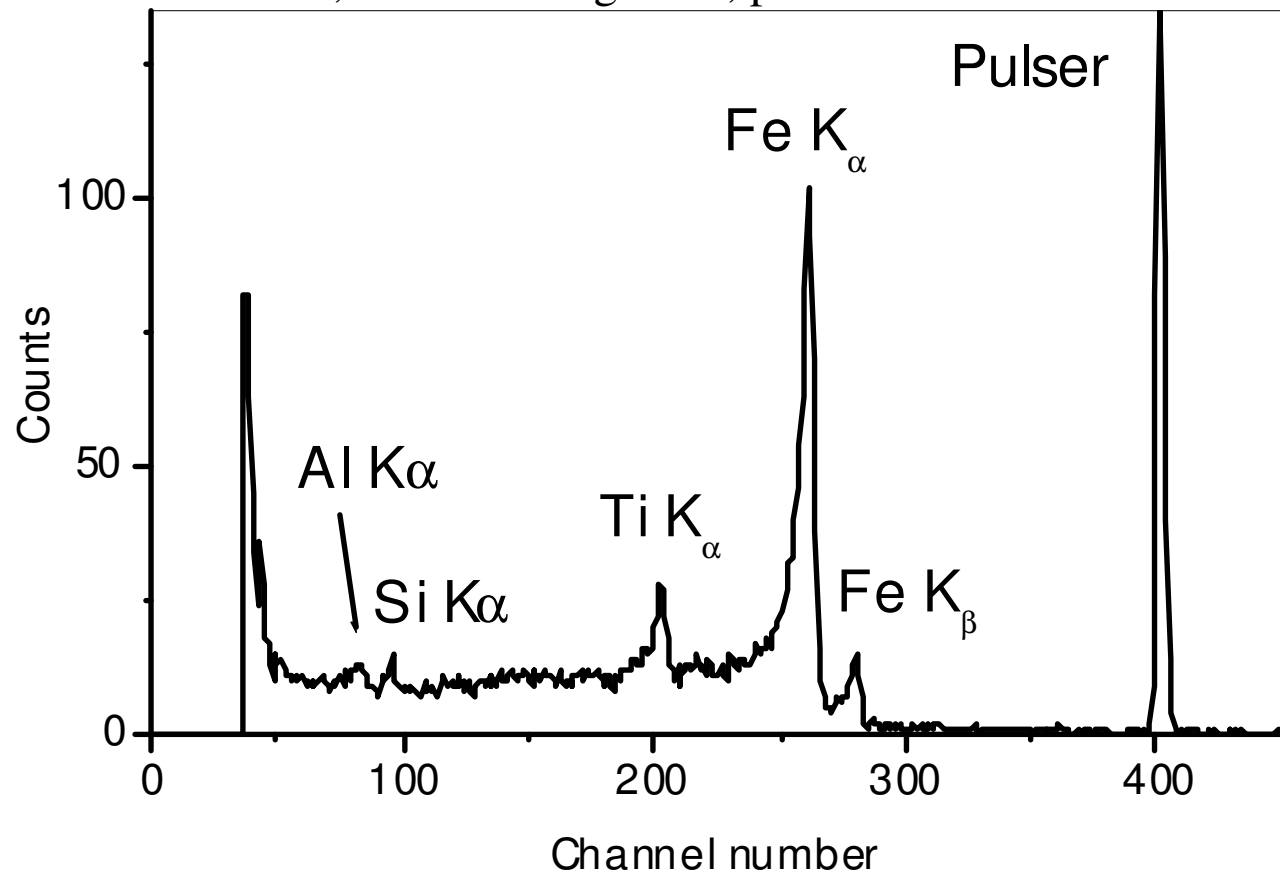
V.A. Andrianov¹, M.G. Kozin¹, I.L. Romashkina¹, S.A. Sergeev¹,
L.V. Nefedov¹, V.P. Koshelets², L.V. Filippenko²

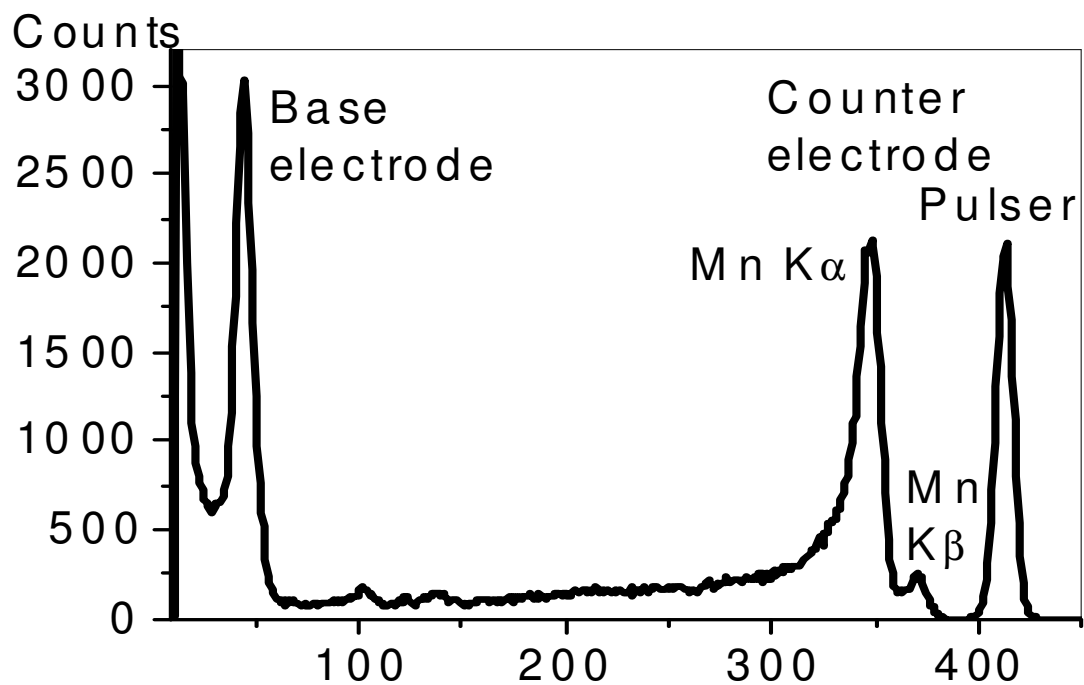
LV Nat. Conf. On Nucl. Phys. "Frontiers in the Physics of Nucleus"
Book of Abstracts, St-Petersburg 2005, p.329

⁵⁷Co sources

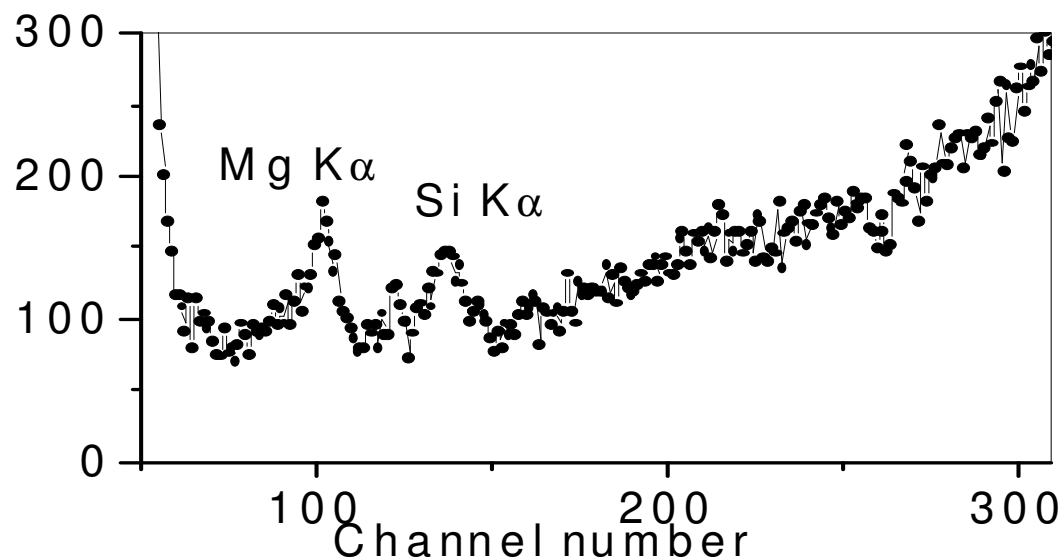
S=6400 μm²

a small cylinder
wrapped from Ti
foil





Амплитудный
спектр,
возникающий при
облучении
детектора квантами
излучения от
источника ^{55}Fe .



Fe-55 source <1mCi

$S=20000 \mu\text{m}^2$

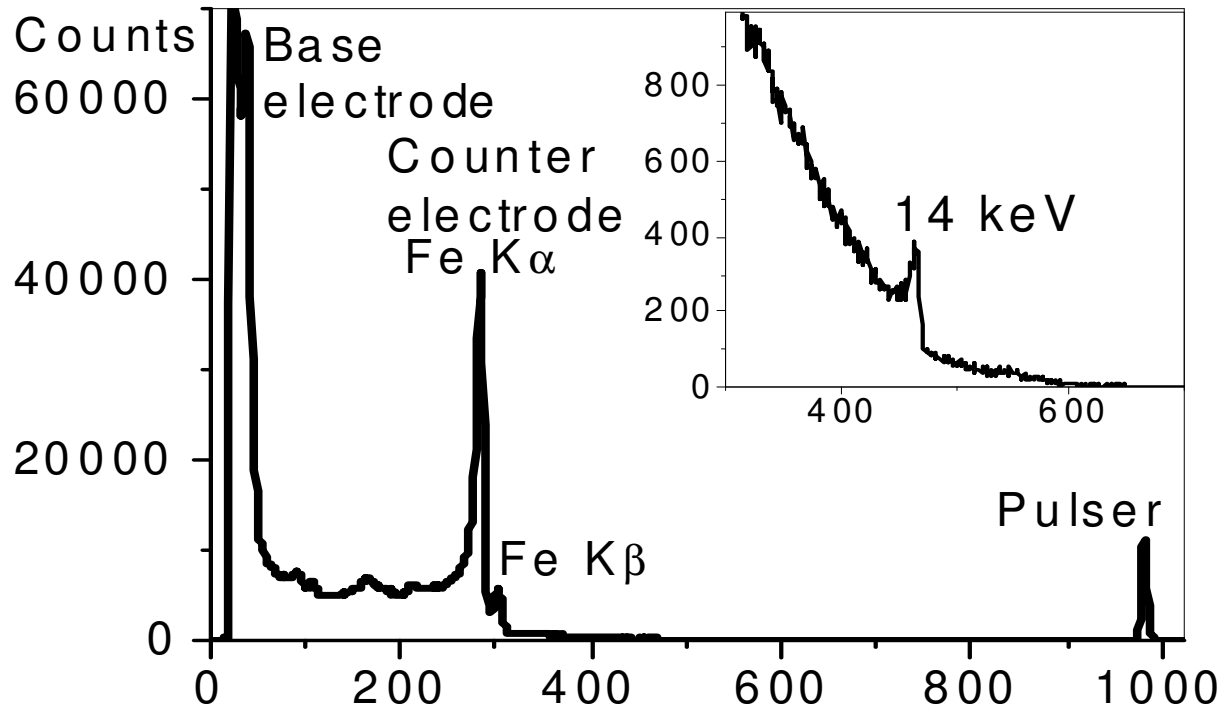
Mg-foil $26 \mu\text{m}$

$t=0,91 \text{ h}$

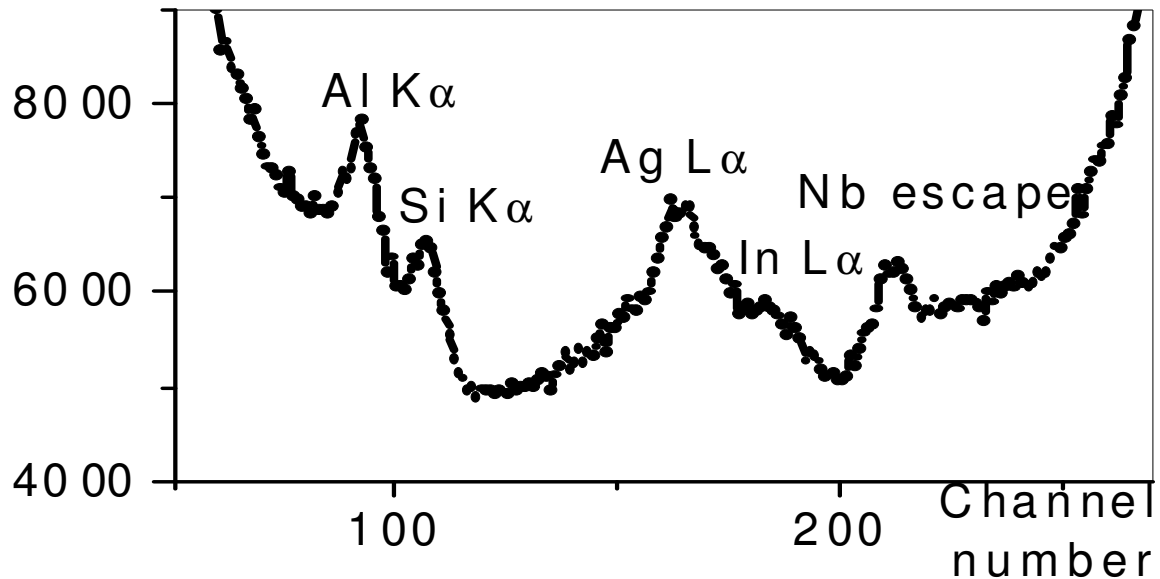
$T=1,329 \text{ K}$

$H=138 \text{ Oe}$

$V=0,356 \text{ mV}$

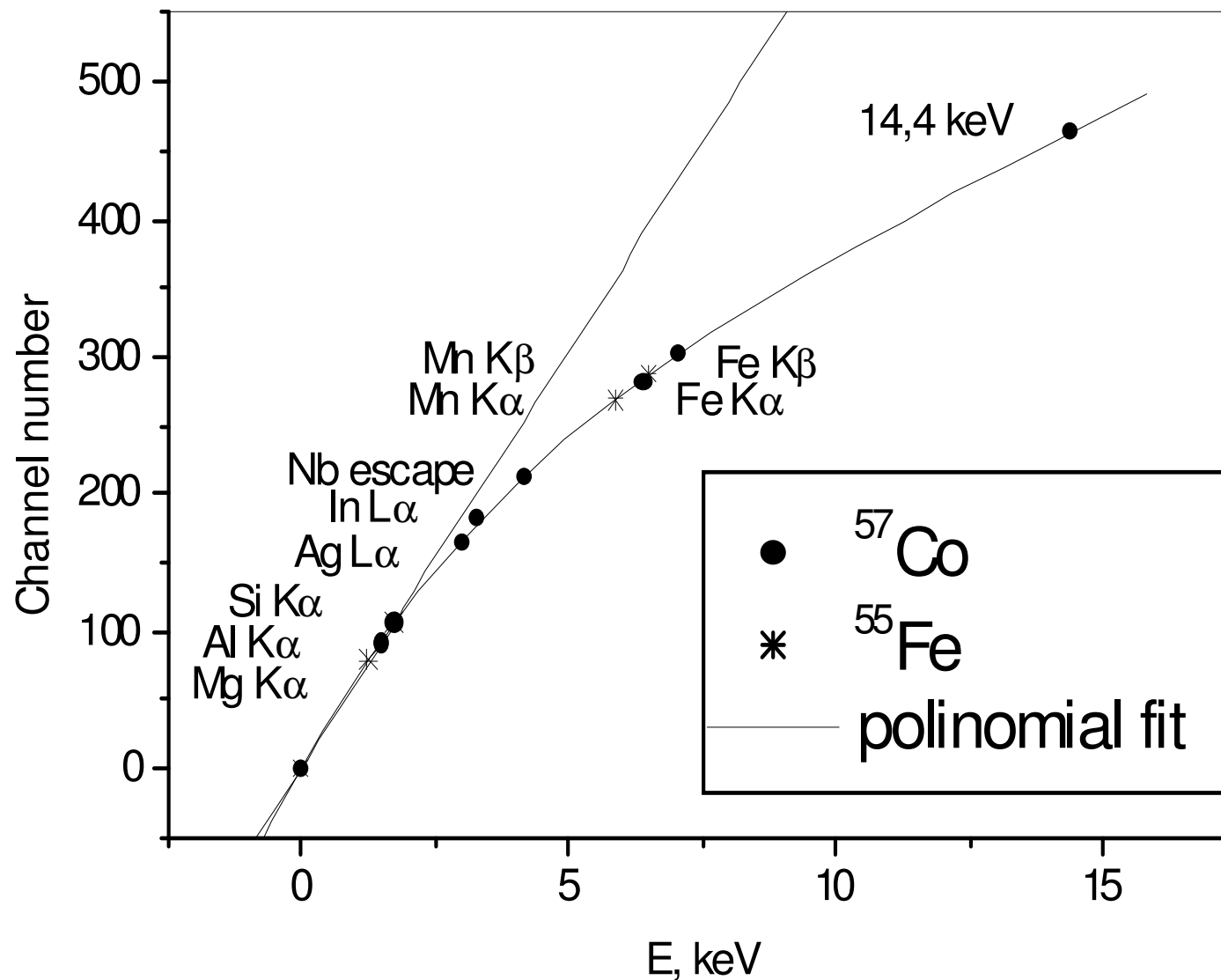


Амплитудный спектр, возникающий при облучении детектора квантами излучения от мессбауэровского источника ^{57}Co .



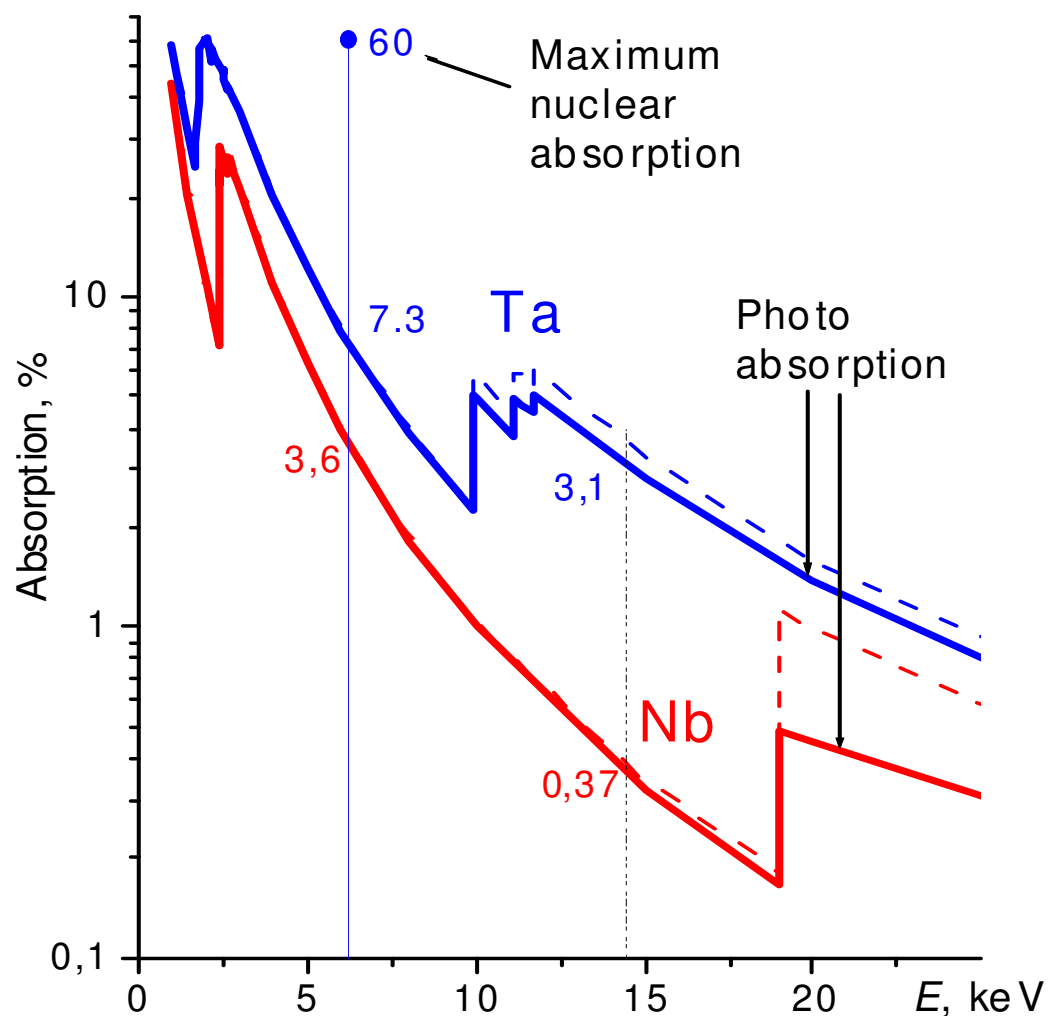
20mCi Co-57
 $S=20000 \mu\text{m}^2$
 Ag-ring
 $t=2,26 \text{ h}$
 $T=1,325 \text{ K}$
 $H=138 \text{ Oe}$
 $V=0,935 \text{ mV}$

Зависимость отклика детектора от энергии



Приборы и техника эксперимента, 2006, № 6, с.135-139.

Зависимости фотопоглощения A в пленках Nb и Ta толщиной $t=150$ нм от энергии излучения E .



Величины поглощения для γ -линий ^{181}Ta и ^{57}Fe указаны числами у пересечения этих зависимостей с соответствующими вертикальными линиями (6.22 и 14.41 кэВ). Для ^{181}Ta отдельной точкой (60%) показано также гипотетическое поглощение за счет ядерного γ -резонанса (вероятность поглощения без отдачи считается равной 1).

Позиционная чувствительность

Группа Р. Мессбауэра, Мюнхен, LTD7

Разделение поглотителя и сенсора.

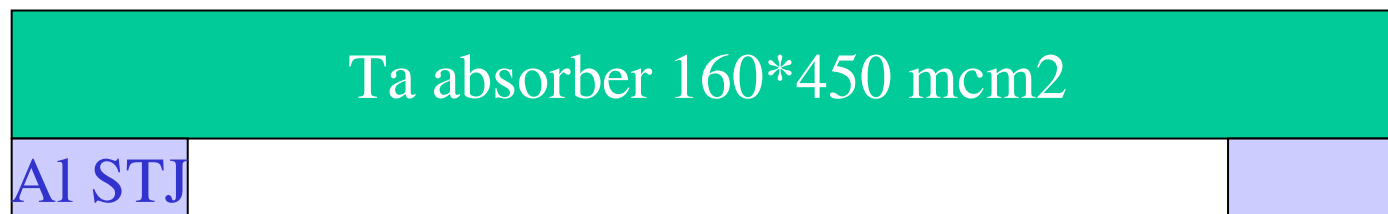
Положение точки поглощения кванта

определяется по разности амплитуд

сигналов от двух переходов,

расположенных по краям полоски.

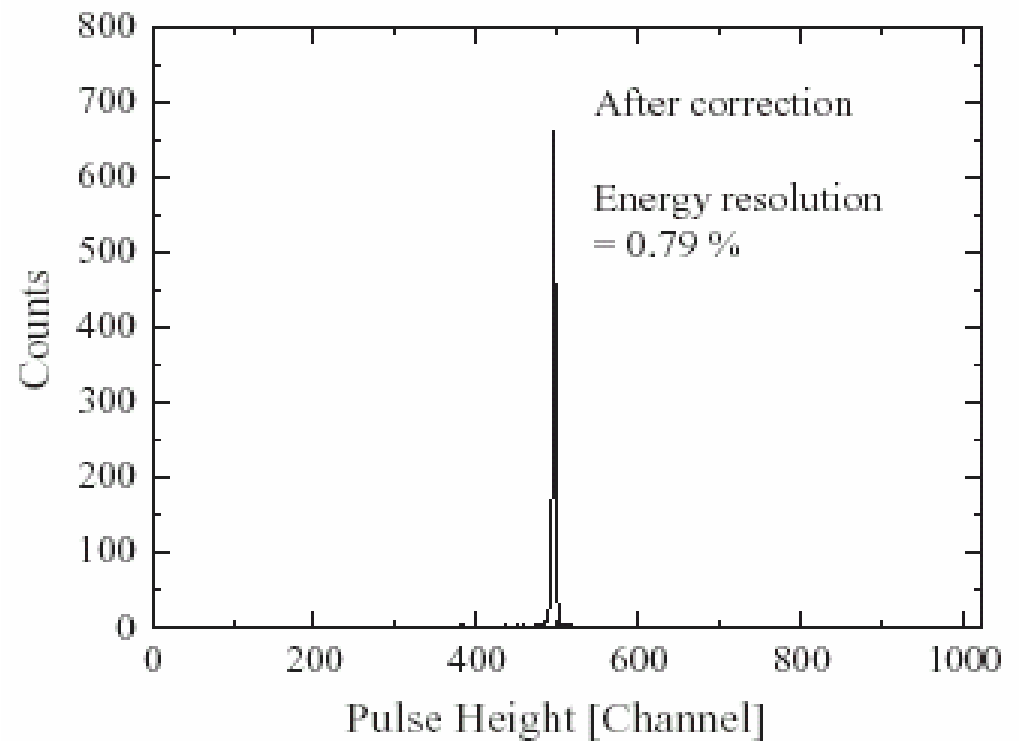
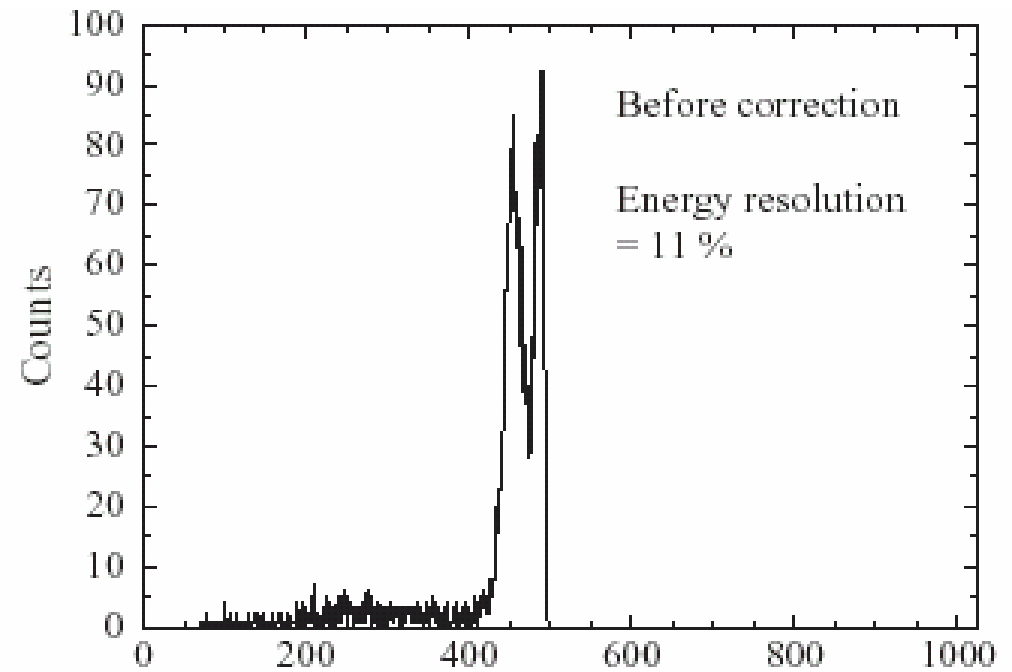
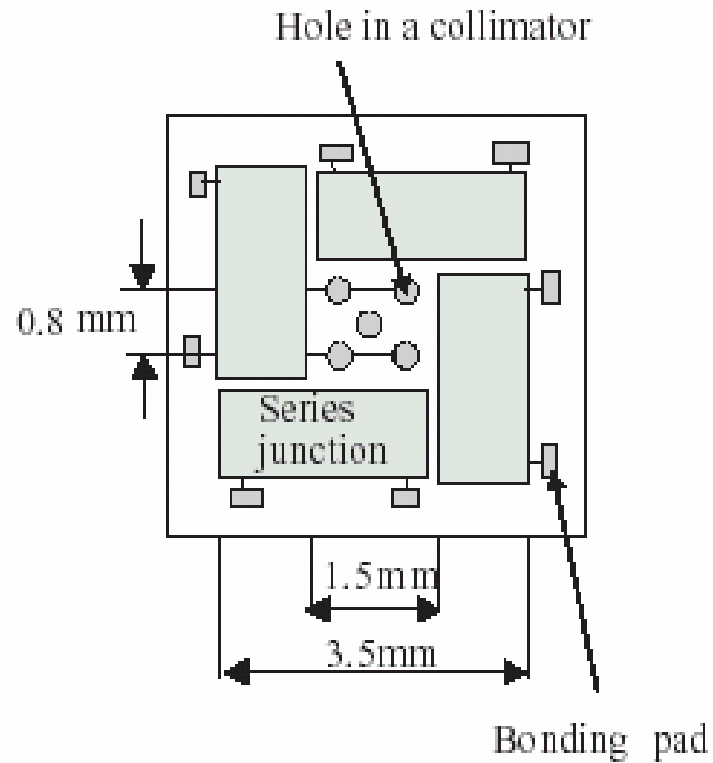
Разрешение 6 мкм, 78 eV (Al 27 eV)



Увеличение площади Позиционная чувствительность

- Матрицы (arrays) одинаковых СТП-переходов. S-CAM, ESA. Всеволновая астрономия от ИК до рентгеновской.
- Мультиплексоры (каждому пикселю свой предусилитель)
- Цепочки переходов. Улучшение разрешения путем коррекции амплитуды с учетом позиционной чувствительности

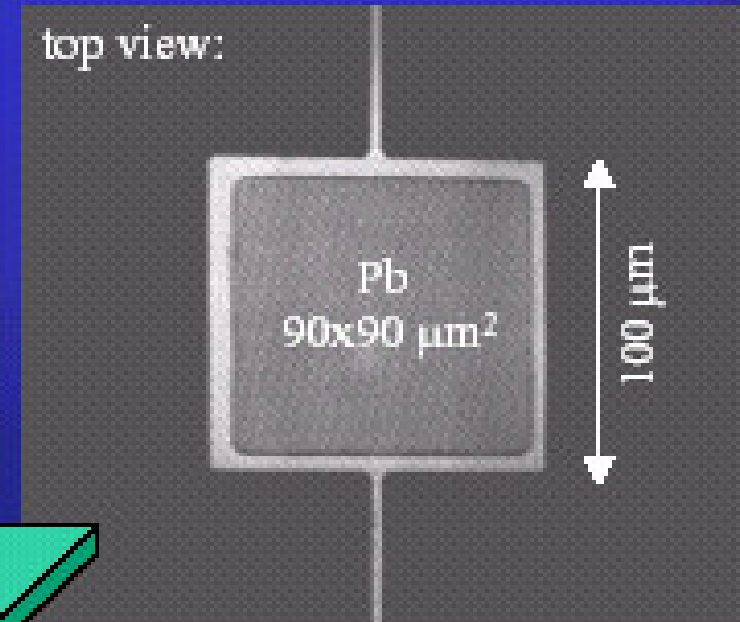
Am-241 alfa



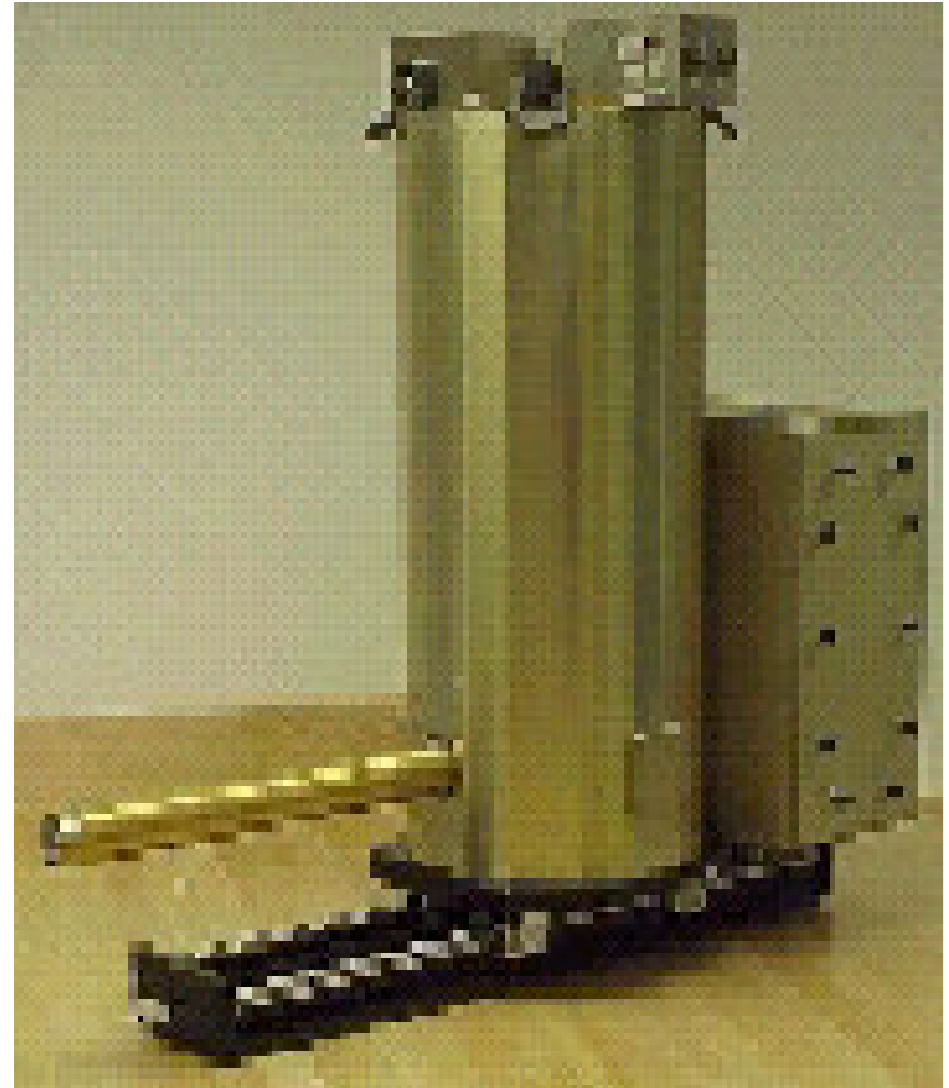
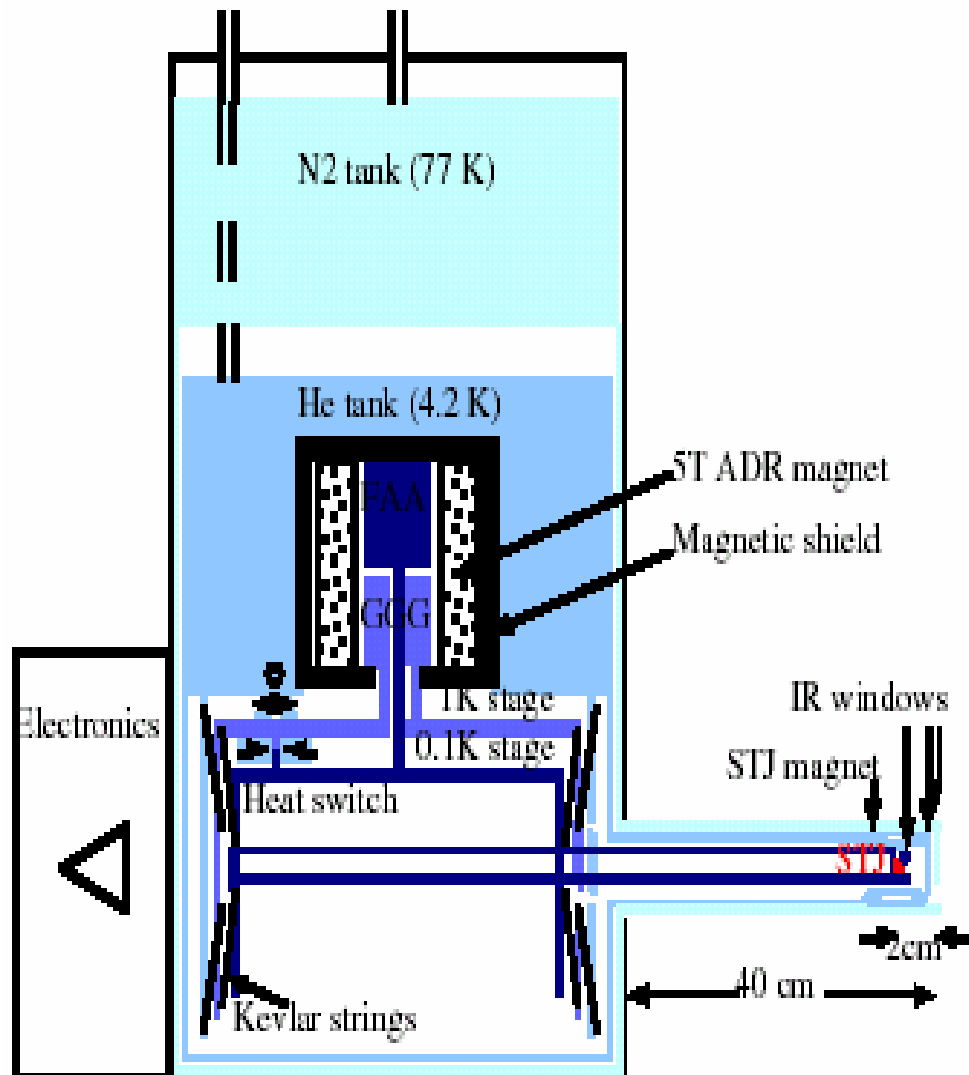
STJ Detector TUM-detector

Al-STJ with Pb absorber on membrane:

- Si_3N_4 membrane (300 nm)
- Pb absorber (1.3 μm)
- *phononic read-out* by STJ over natural Al_xO_y



A Superconducting Detector System for High-Resolution Energy-Dispersive Soft X-Ray Spectroscopy (LLNL, LBNL)

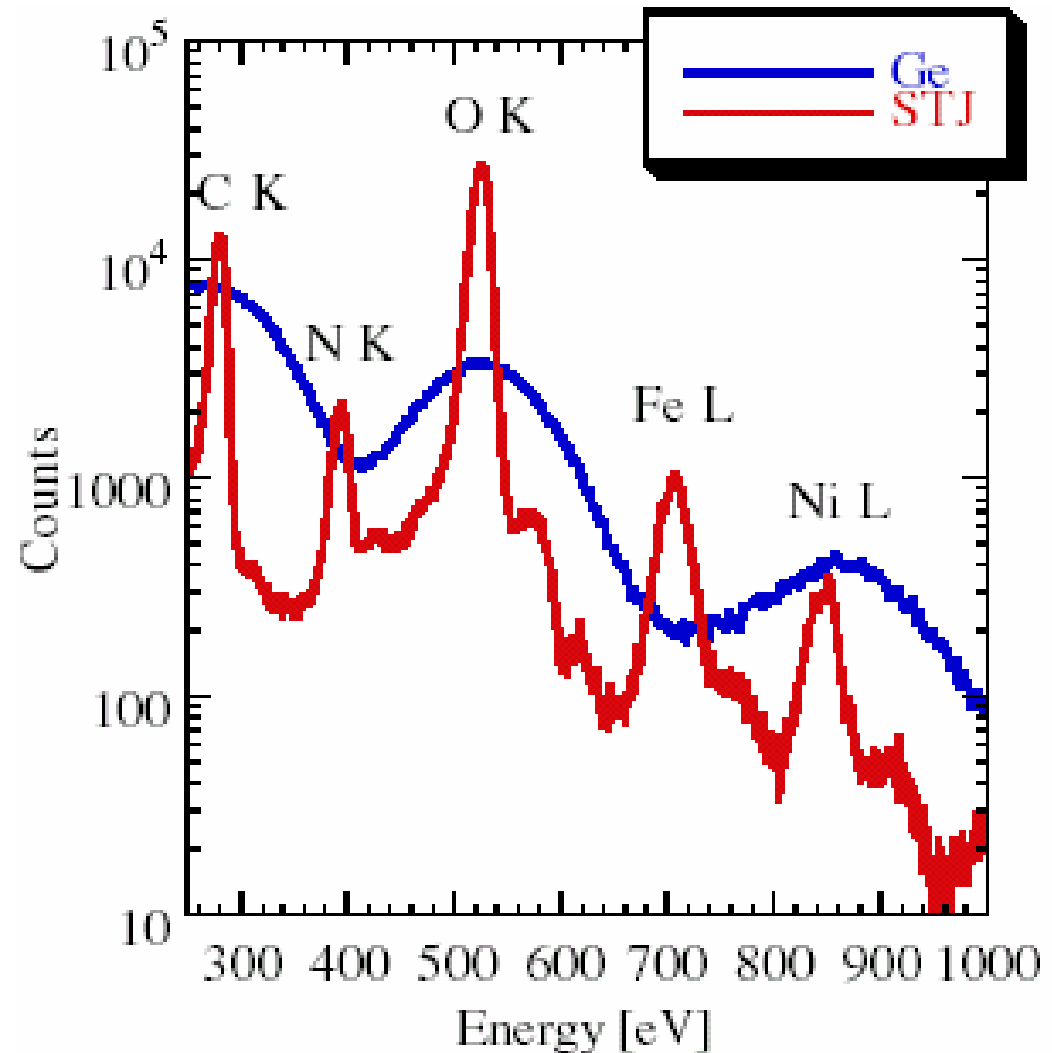


Fluorescence spectrum of the metalloprotein containing ≈ 480 ppm nickel and ≈ 5800 ppm iron.

The 2-hour spectrum

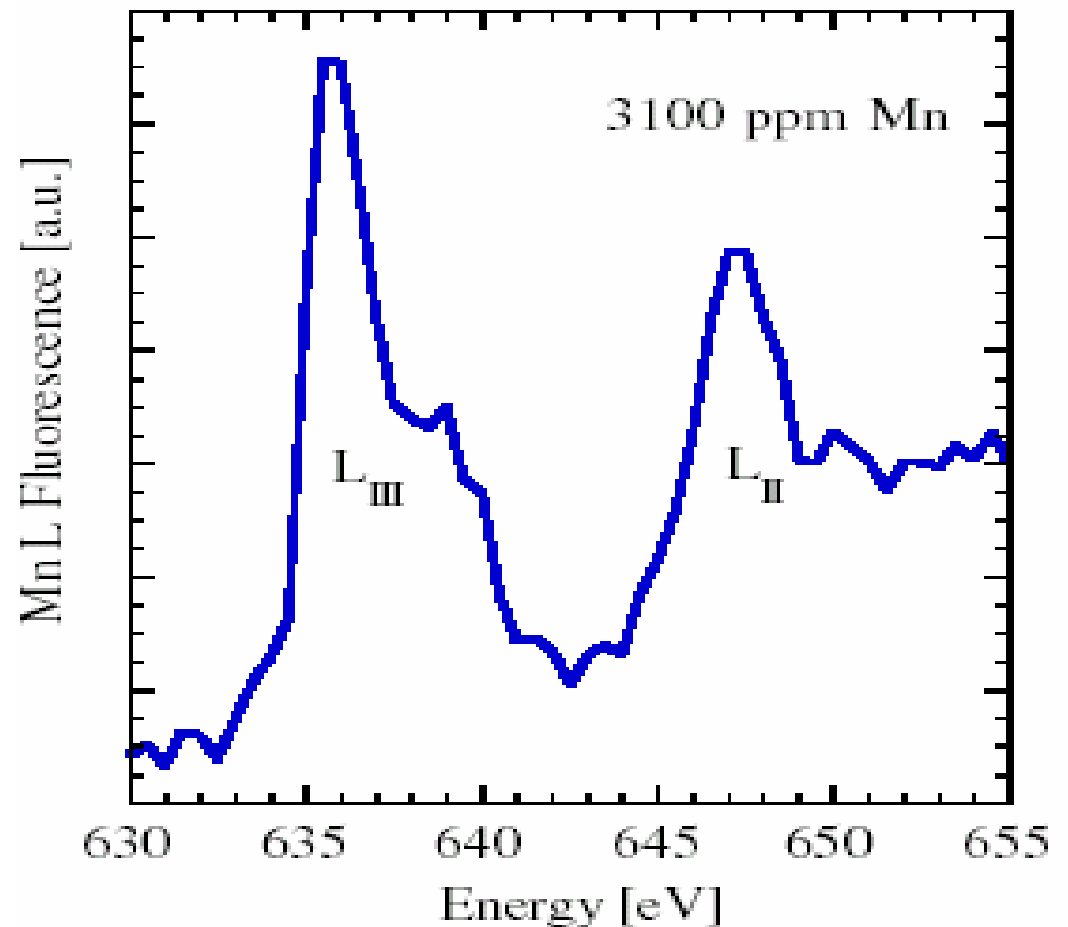
$100 \mu\text{m} \cdot 100 \mu\text{m}$ STJ

detector-sample
distance ≈ 25 mm.

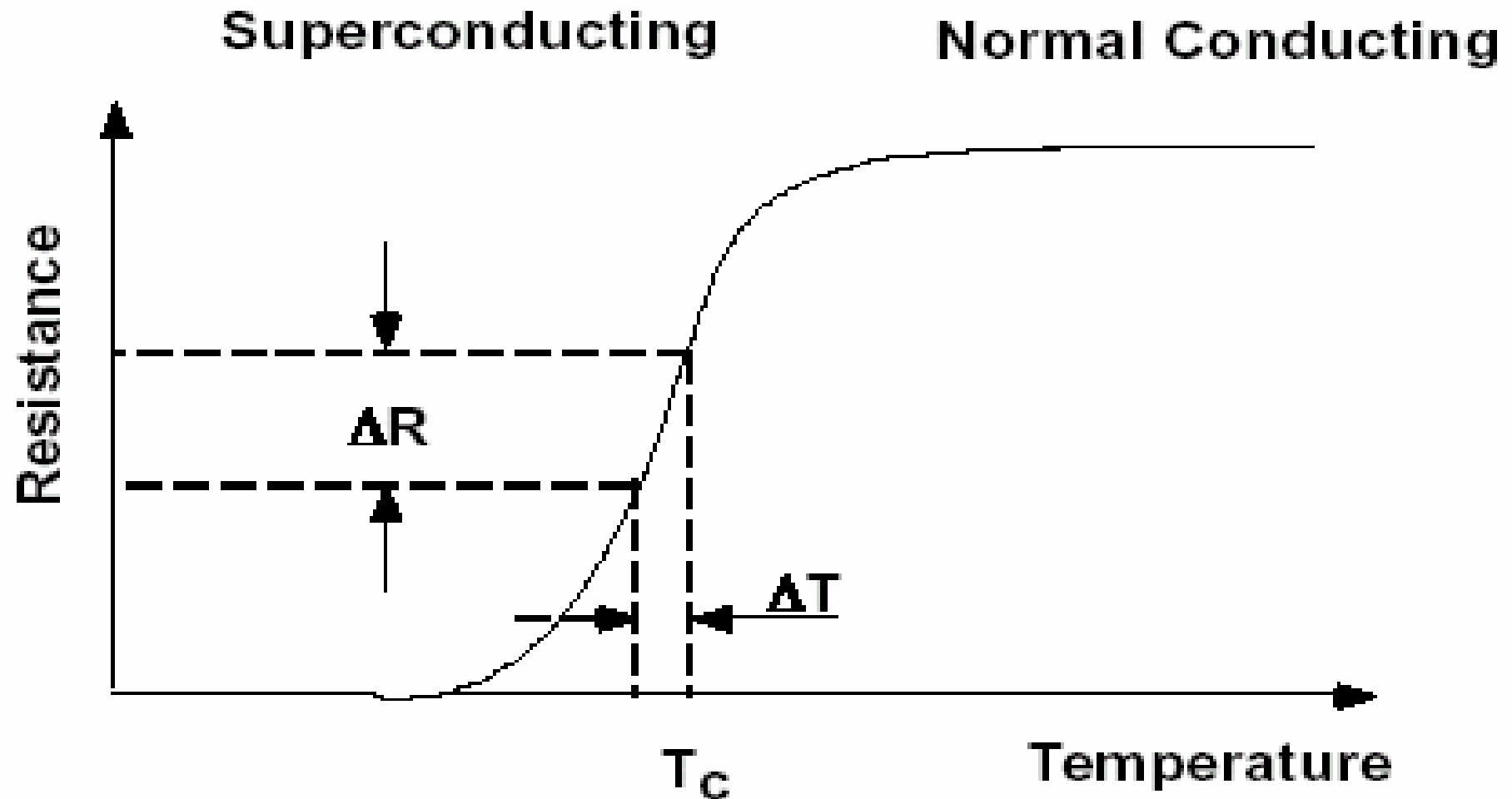


The fluorescence-detected absorption spectrum of Mn impurities in an MgO crystal

200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ STJ
1 hour exposition
not affected by the O K
fluorescence at 525 eV.



TES sensor principle



Ag/Al TES, K.D. Irwin et al.

US patent 5 880 468, March 9, 1999

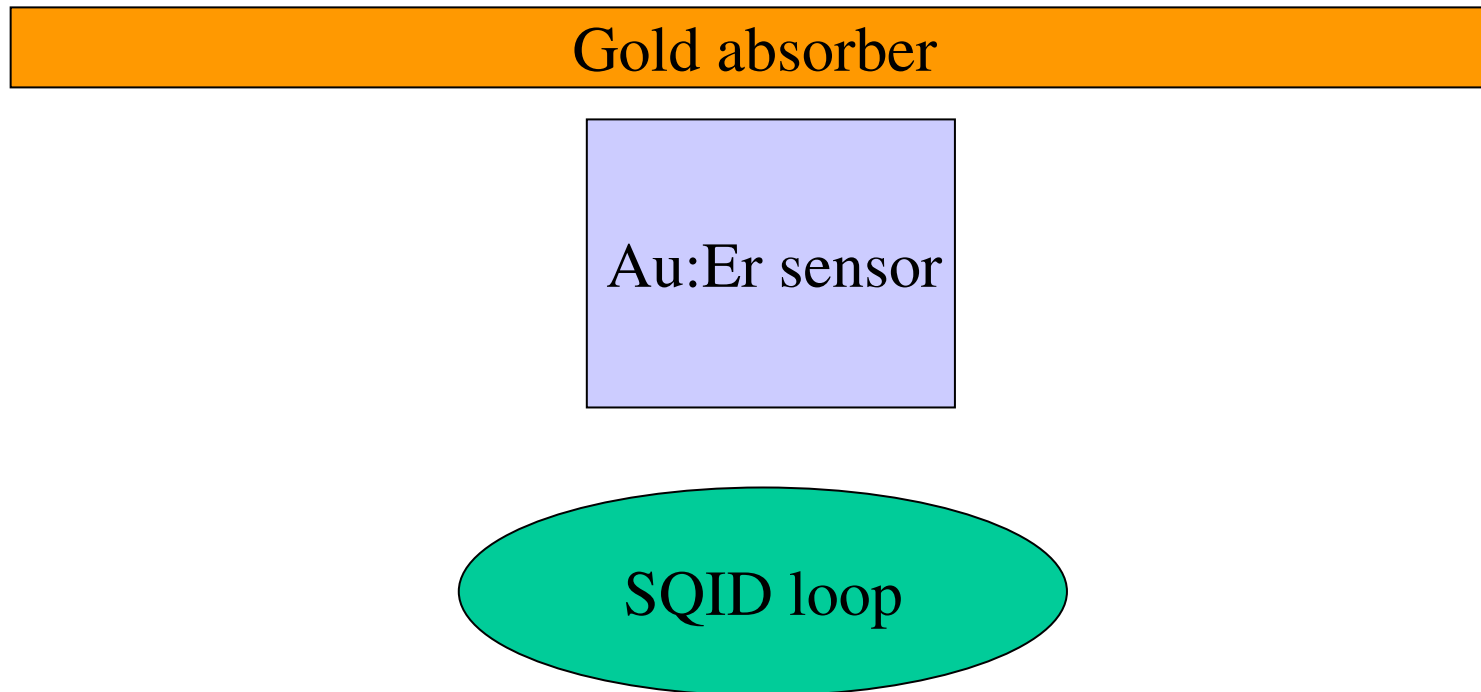
Рабочая температура варьируется за счет эффекта близости: Al $T_C=1.2$ К, Ag –normal
Бислой Al/Ag $T_C=96$ мК, ширина перехода меньше 0.1 мК

Разрешение лучше 10 эВ при 4.5 кэВ (Ti K)

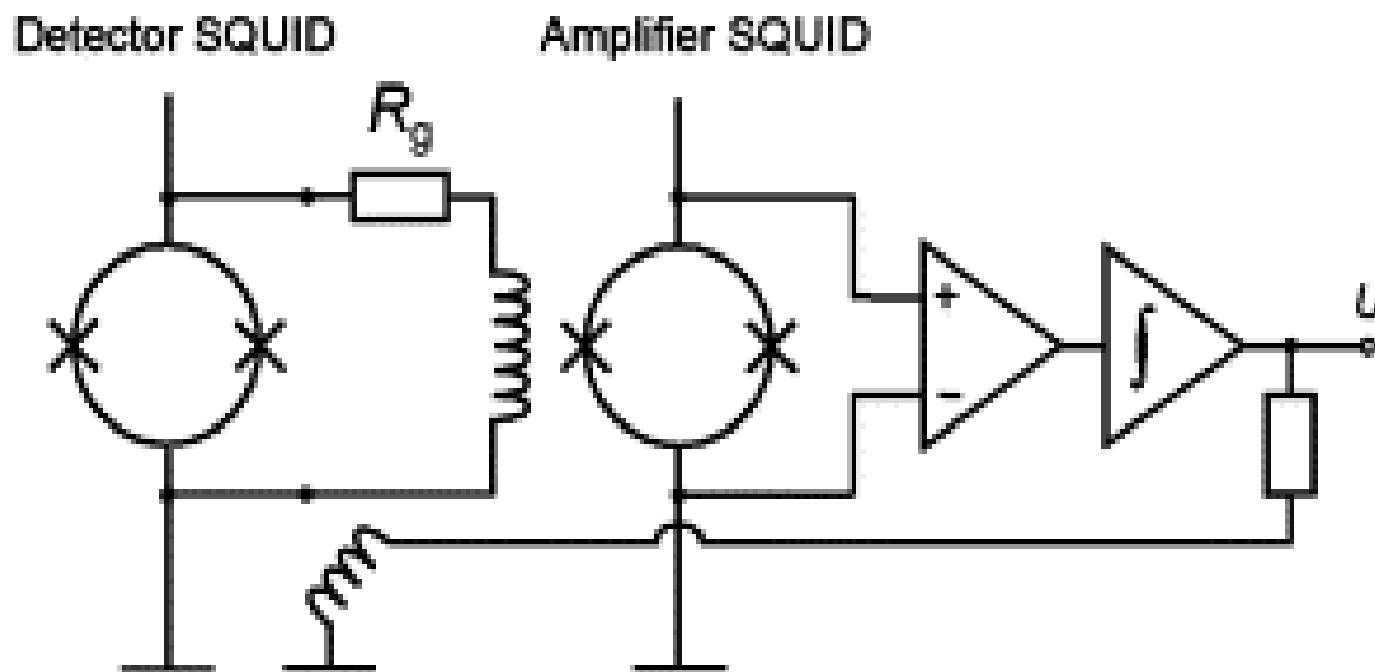
Поглотитель Ag 250*250*2 мкм

Aluminum 439 Ang
Silver 1045 Ang

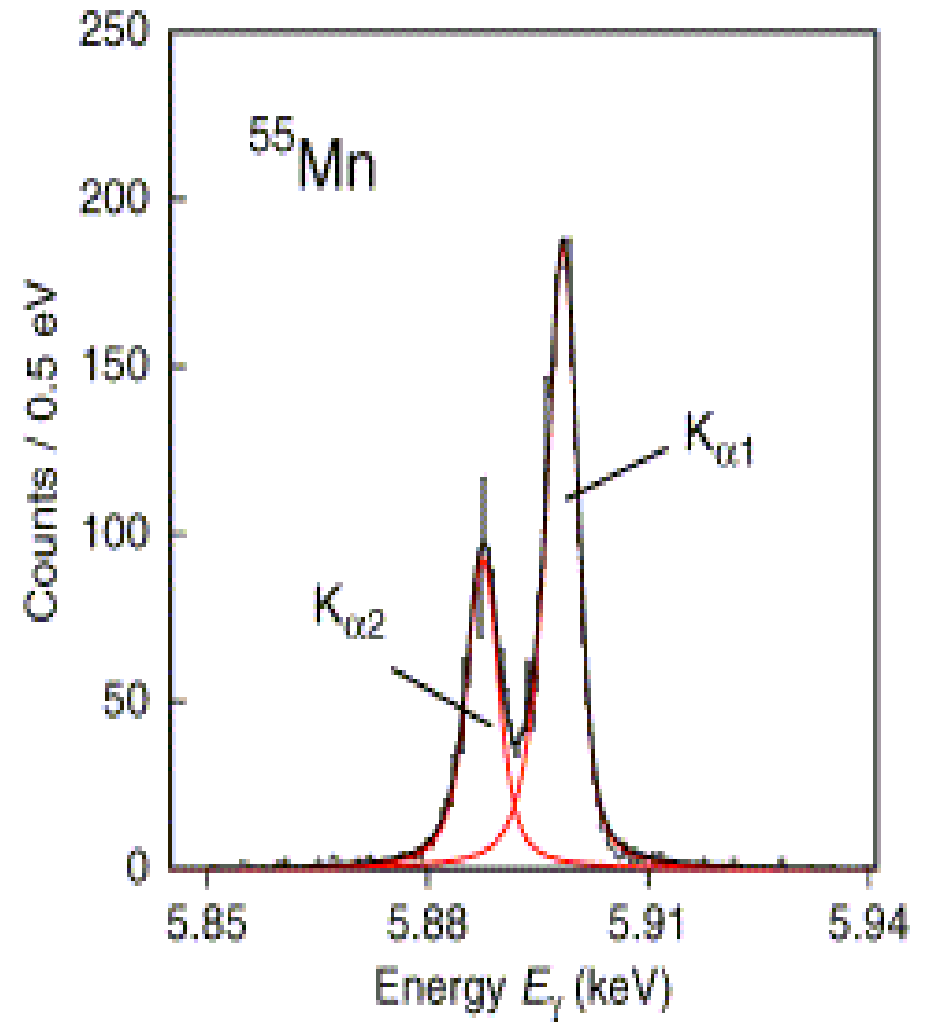
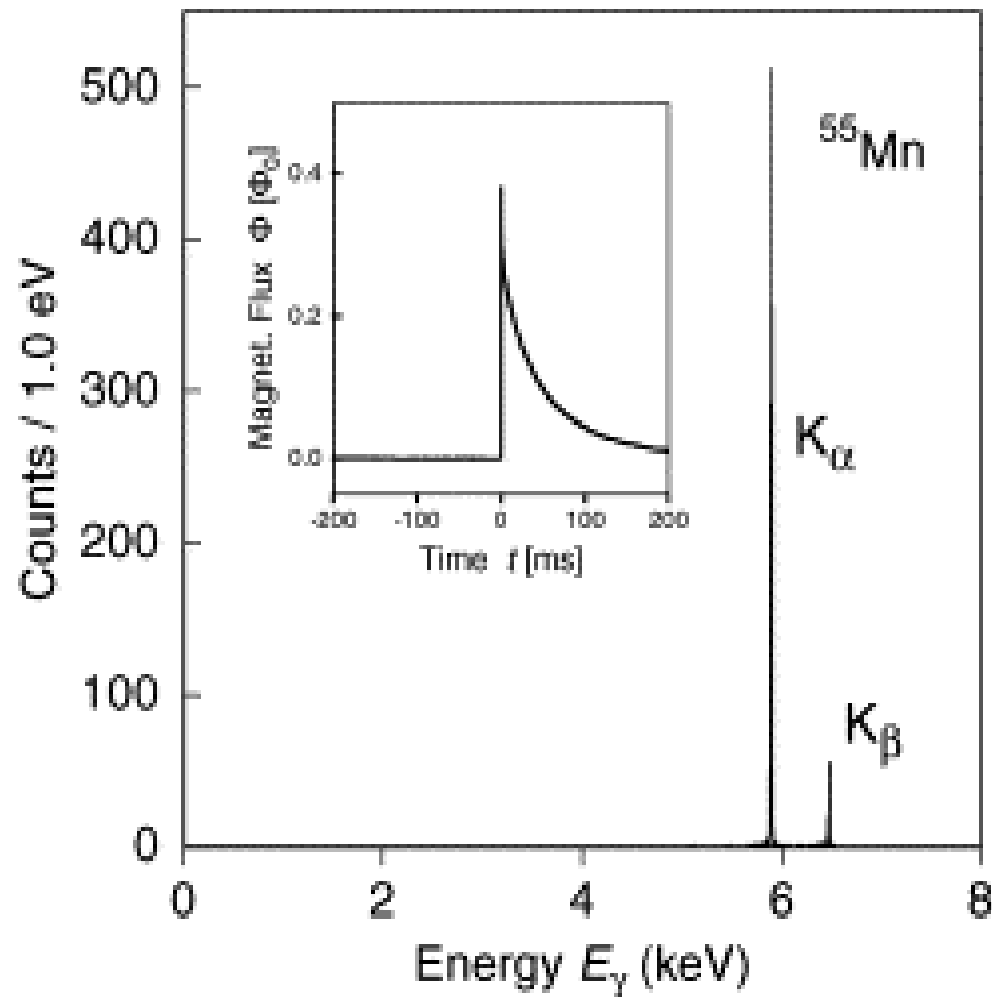
Metallic Magnetic Calorimeter



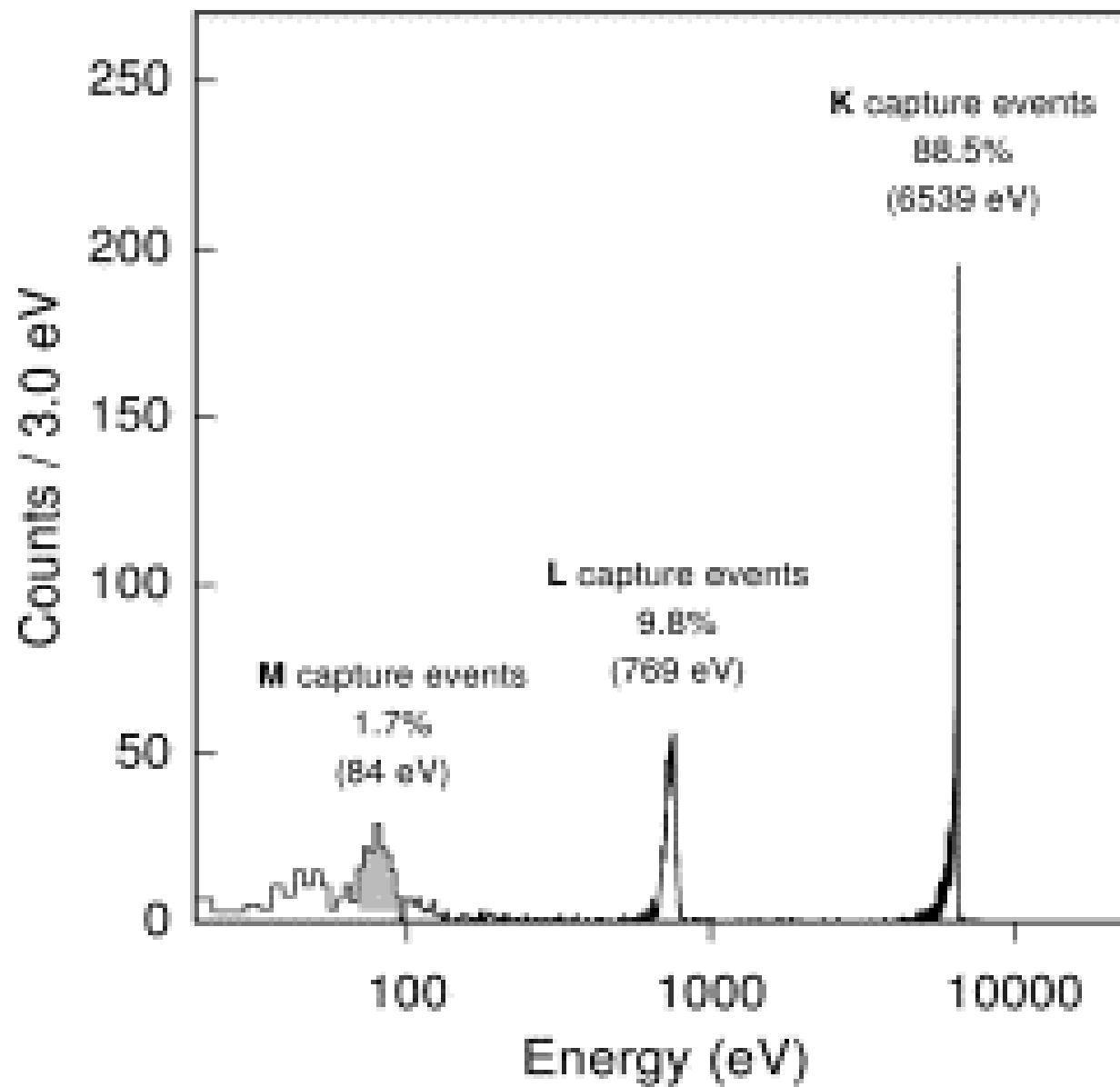
Система из 2-х СКВИДов



ММС спектры источника Fe55



К, L и M захват в одном спектре



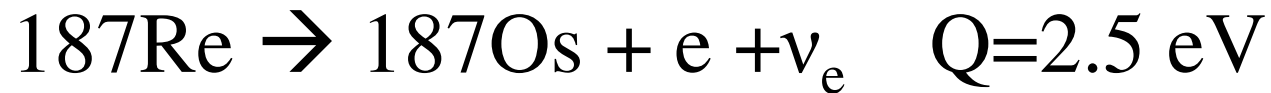
Большие проекты

- Определение массы нейтрино по конечной точке бета спектра Re-187
- Поиск WIMPs. CDMS и продолжения.
- Безнейтринный двойной бета-распад

LTD 12, Paris, July 22-27, 2007

Спасибо за внимание!

Re-187



$$E_{\text{end}} = (Q - m_e c^2) - (e\Phi + E_F) - \Delta B_1$$

Ge-NTD, Ir/Au и γ -Al/Ag TES

TES лучше

Общая масса рения 265 мг, 300 детекторов

9×10^9 событий за год измерений

Чувствительность 1.5 eV

WIMPs

CDMS II	5 kg Ge + 2 kg Si	Soudan
CRESST II	2–10 kg CaWO_4	G.Sasso
EDELWEISS 2	120 kg Ge	Frejus
CUORICINO	40 kg TeO_2	G.Sasso
CUORE	790 kg TeO_2	G. Sasso
ORPHEUS	R&D	
ROSEBUD	100–300 g BGO/ CaWO_4	Canfranc
HERON	Liquid helium	?
TOKIO	$\text{NaF}+\text{LiF}$	Japan

Double β -decay



Compound	Isotopic abundance of the candidate nucleus (%)	Transition energy (keV)
$^{48}\text{CaF}_2$	0.0187	4272
^{76}Ge	7.44	2038.7
$^{100}\text{MoPbO}_4$	9.63	3034
$^{116}\text{CdWO}_4$	7.49	2804
$^{130}\text{TeO}_2$	34	2528
$^{150}\text{NdF}_2$	4.64	3368