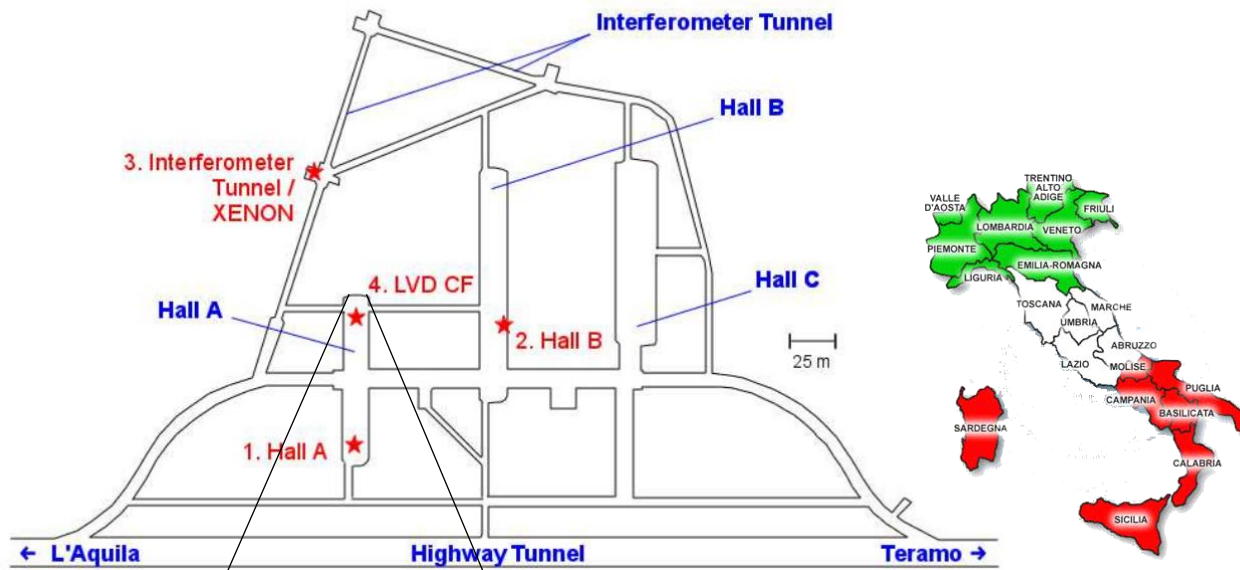


Источники фоновых событий в детекторе LVD

*Наталья Агафонова (ИЯИ РАН),
Андрей Юдин (ИТЭФ), Константин Мануковский,
Екатерина Добрынина (ИЯИ РАН)*

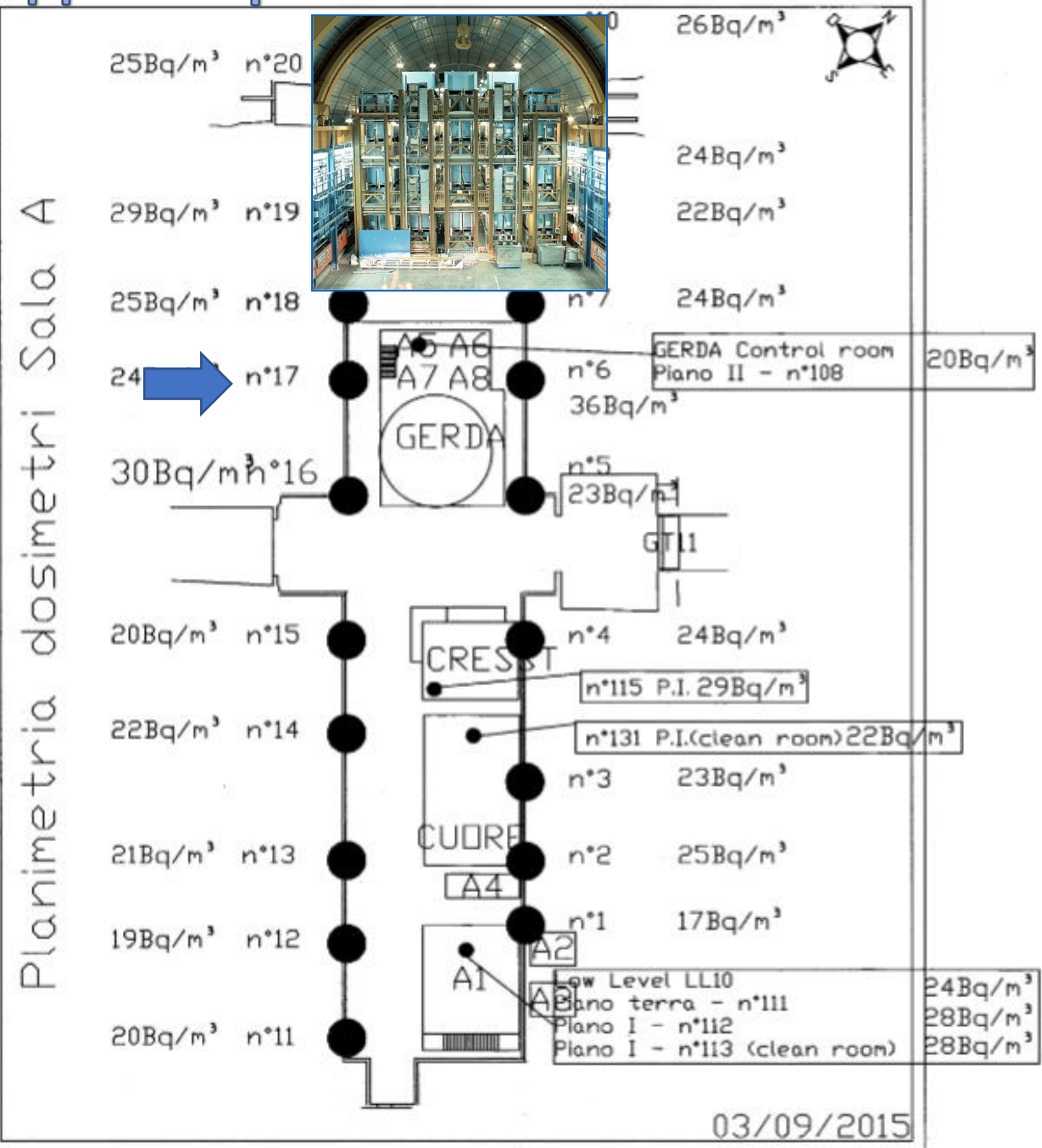
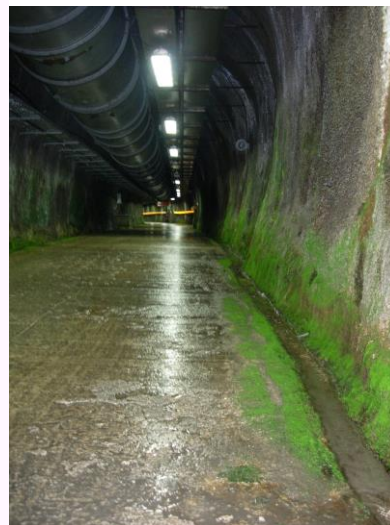
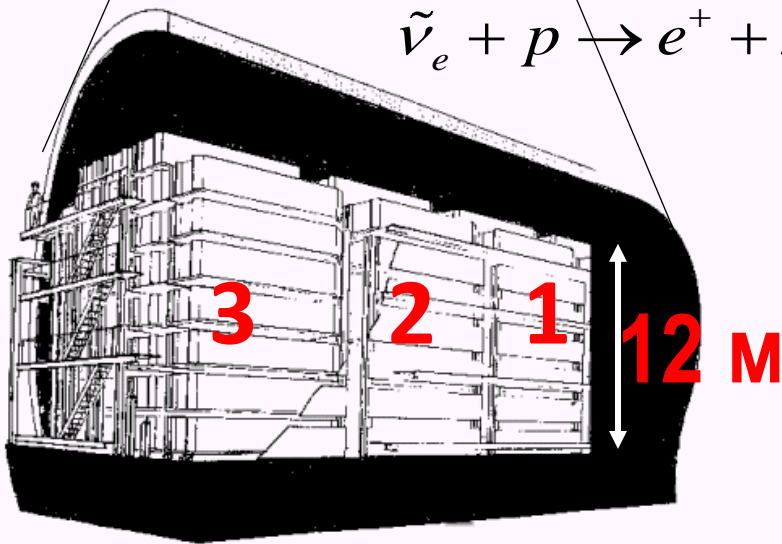
и коллаборация LVD

Детектор Большого Объема LVD

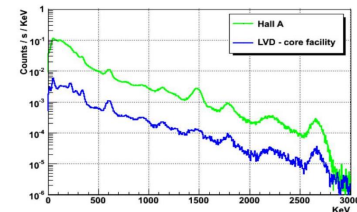
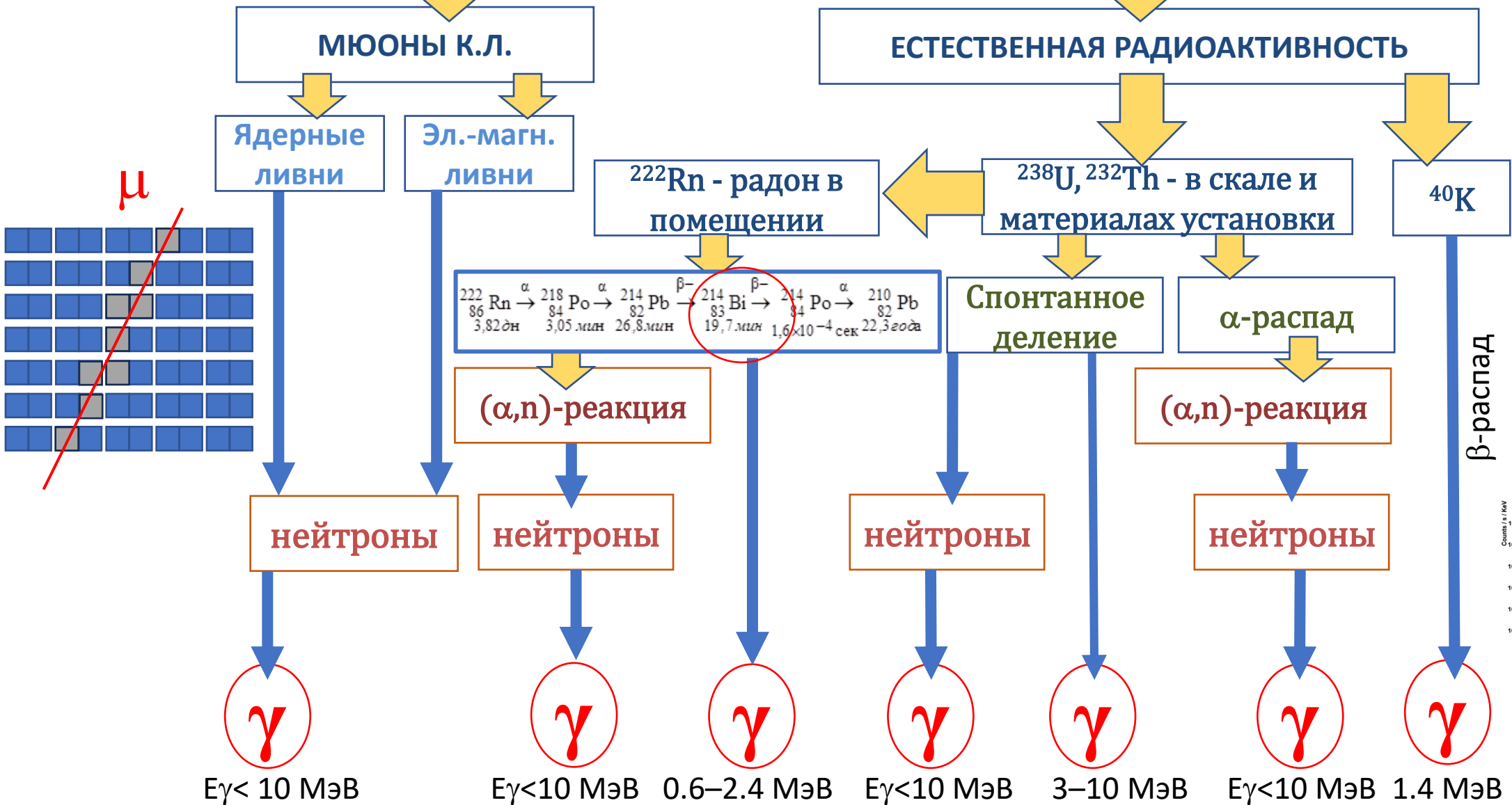


Start working and receiving data: 1992

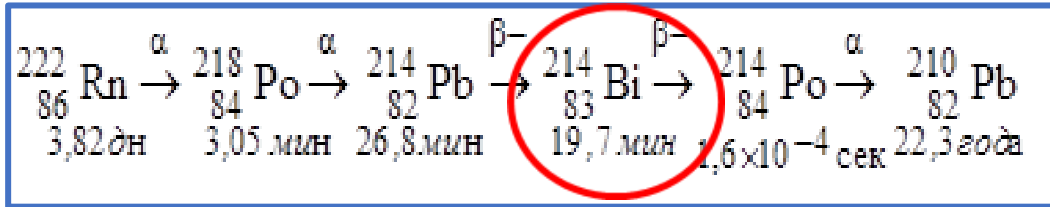
Масса железа	1020 т
Масса сцинтиллятора	1008 т
Средняя глубина	3620 м в.э.



Фон детектора при поиске ν



Регистрация событий в LVD от естественной радиоактивности

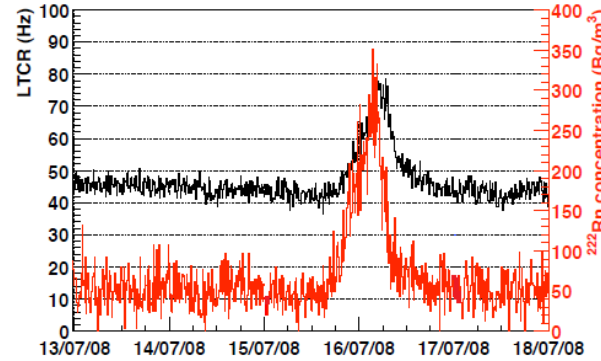


Основными источниками фона по низкому порогу в LVD являются естественная радиоактивность грунта и радон.

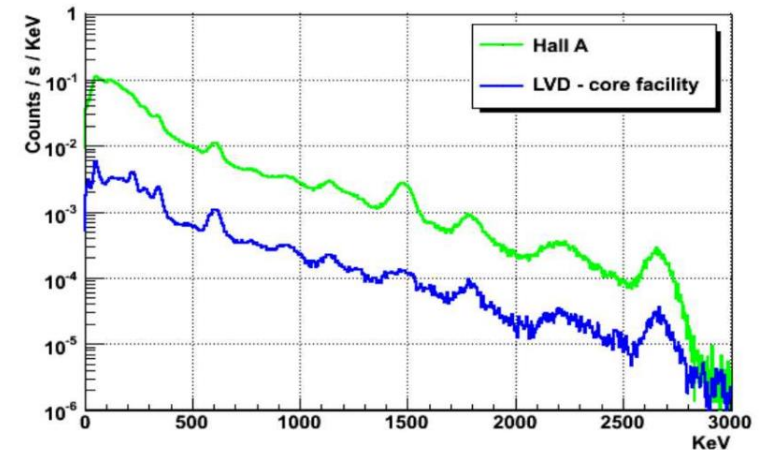
Мониторинг концентрации радона осуществляется с помощью регистрации γ -квантов от распадов дочерних ядер ${}^{222}_{86}\text{Rn}$, период полураспада которого 3,8 дня.

Энергия γ -кванта, МэВ	Количество γ -квантов на 100 ядер ${}^{214}\text{Bi}$
0,609	47
1,764	17
1,120	17
1,238	6
2,204	5
1,378	5
0,769	5
1,400	4
2,445	2

Темп счета LVD по низкому порогу, соотнесенный с показаниями радонметра



Энергетический спектр гамма-квантов, измеренный внутри LVD (синяя линия) и в зале А (зеленая линия).



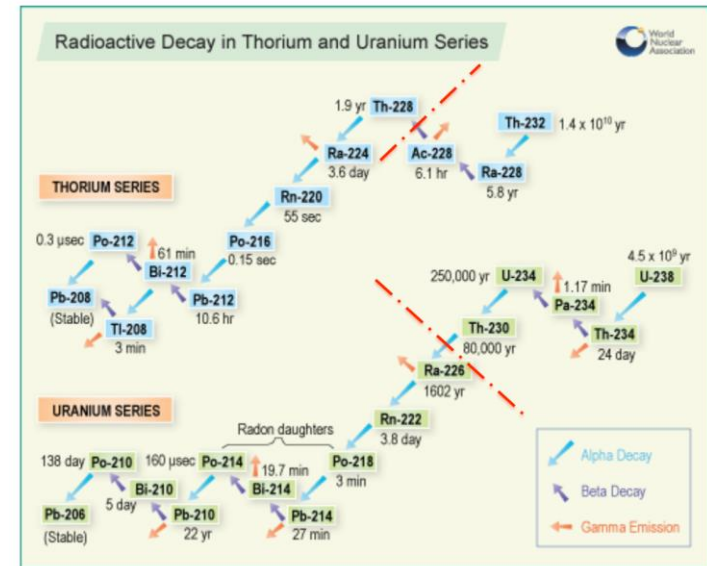
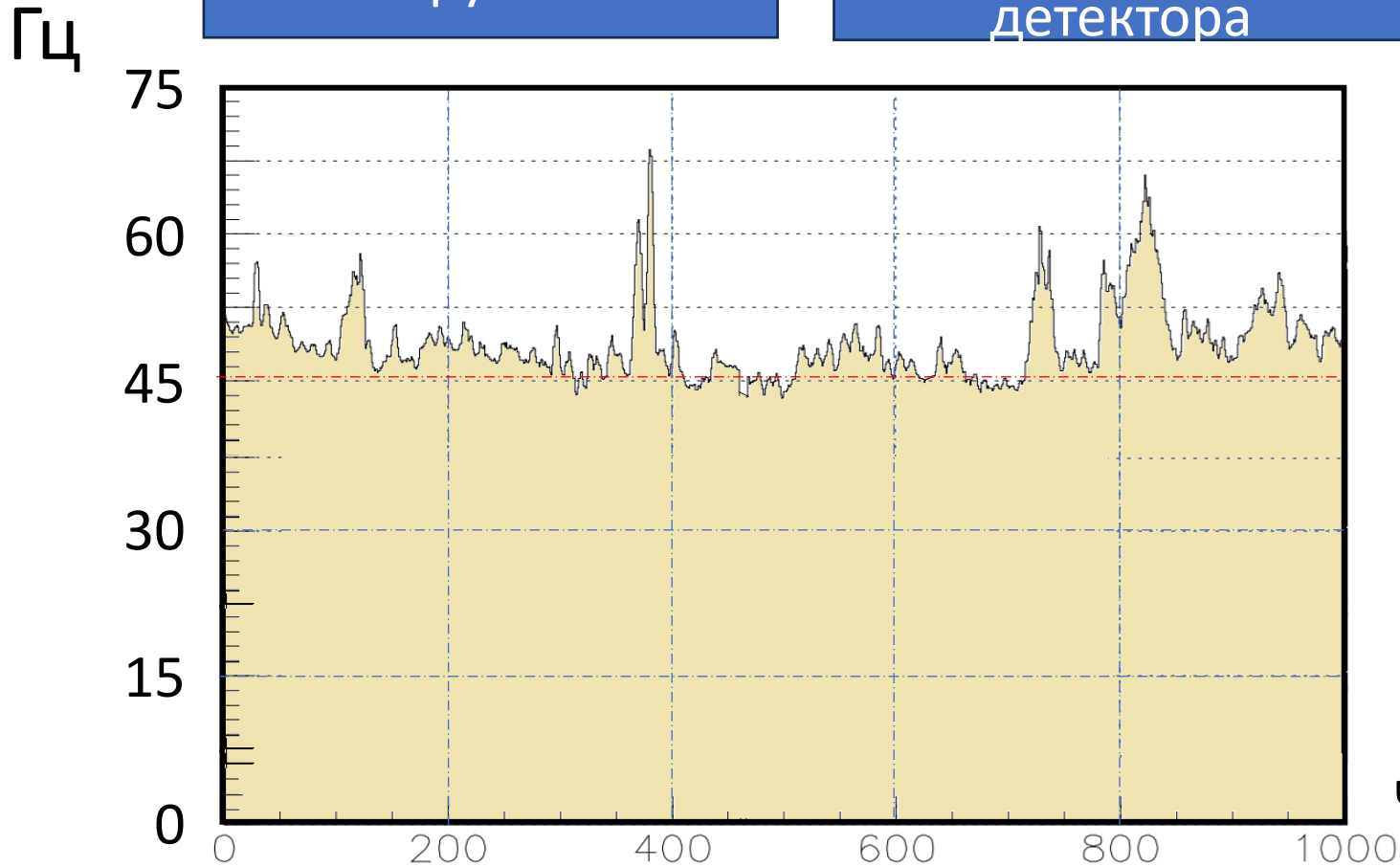
Средняя концентрация ${}^{222}\text{Rn}$	
Hall A	26 Bq/m ³
Hall B	43 Bq/m ³
Hall C	104 Bq/m ³

Монте-Карло моделирование Geant4

Радиоактивность
грунта

Радиоактивность
материалов
детектора

Распад ядер
атмосферного
радона в зале

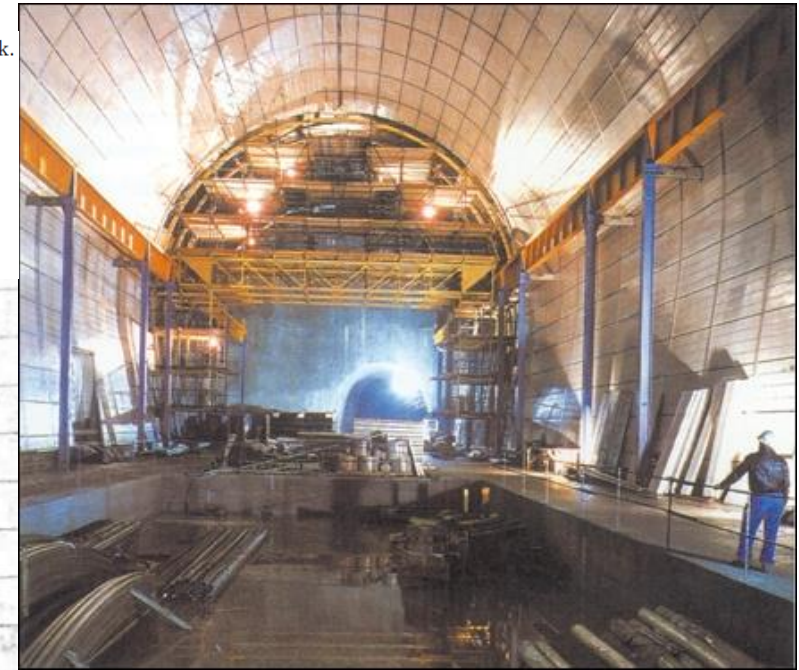
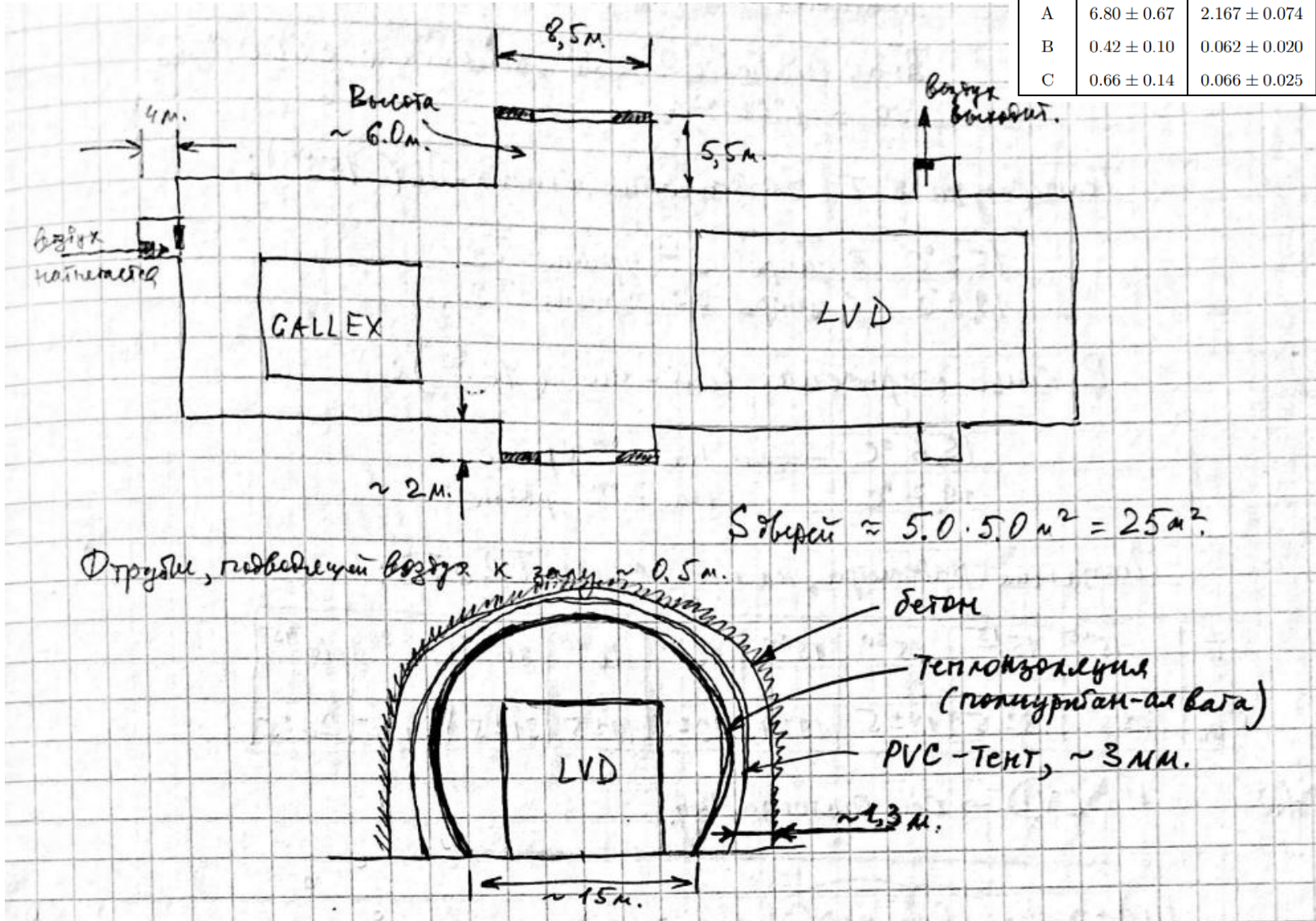


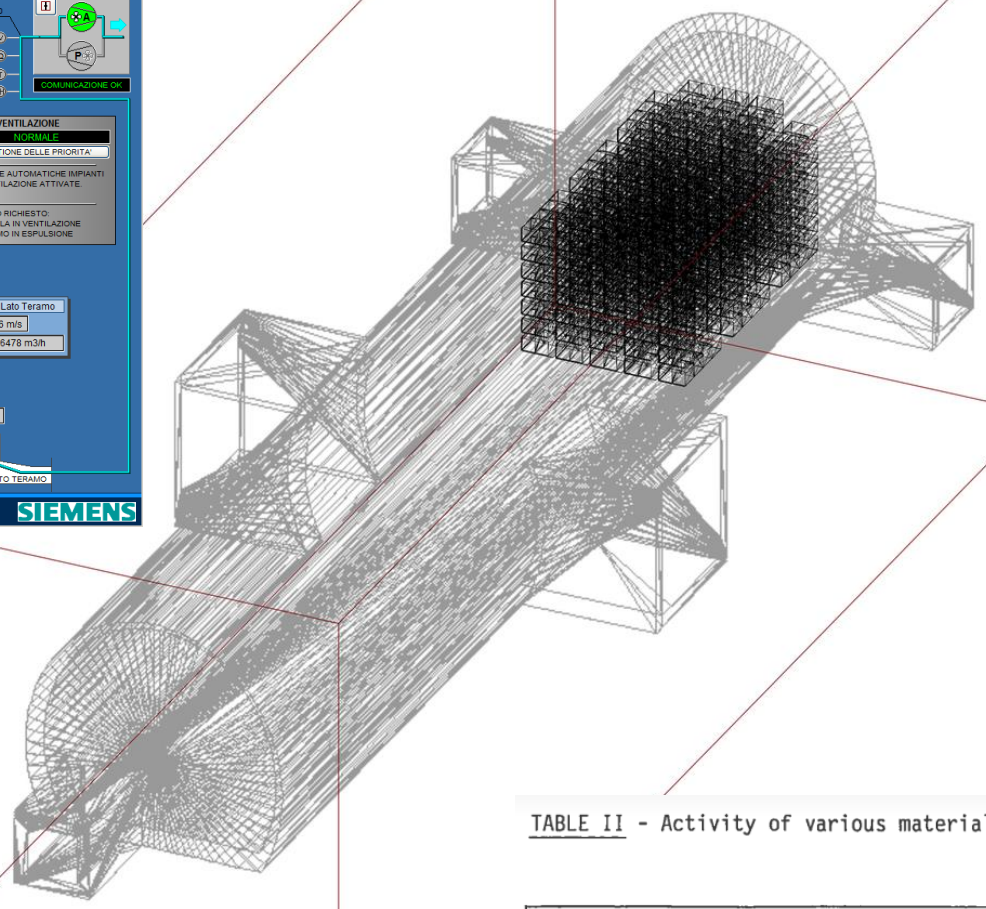
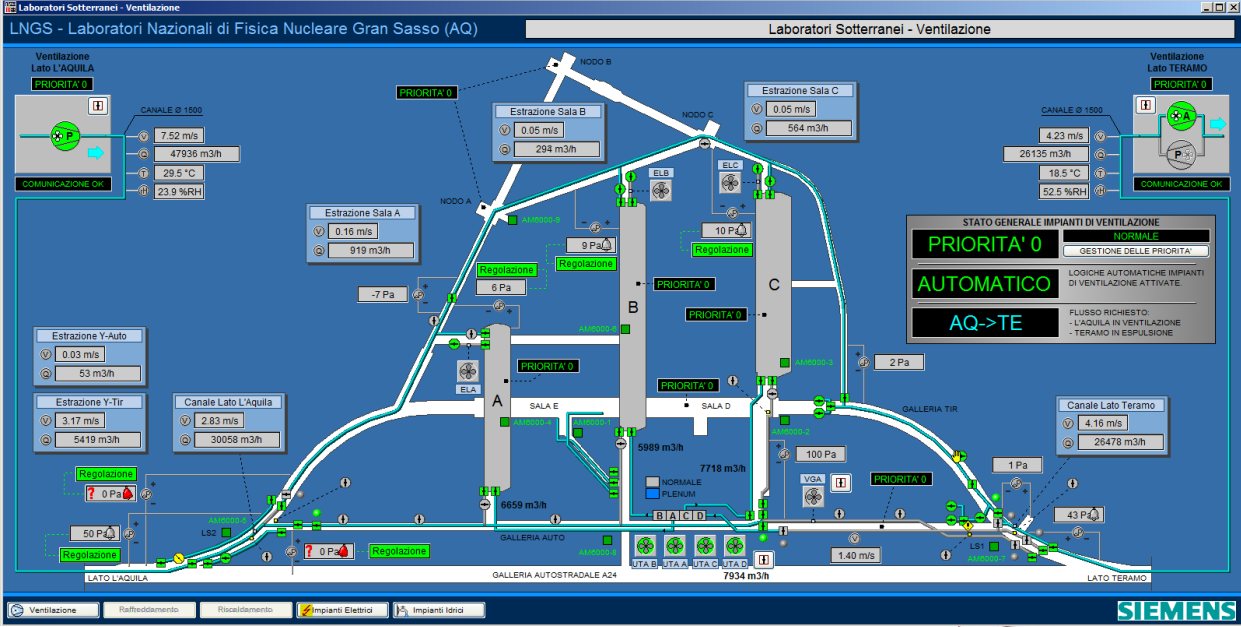
Пример временного ряда скорости счета низкоэнергетических импульсов в 1 башни LVD (1 бин – 1 час, единицах [имп./счетчик/секунда])

Монте-Карло моделирование Geant4 - схема зала А, грунт

²³⁸U and ²³²Th activities in LNGS rock.

Hall	Activities (ppm)	
	²³⁸ U	²³² Th
A	6.80 ± 0.67	2.167 ± 0.074
B	0.42 ± 0.10	0.062 ± 0.020
C	0.66 ± 0.14	0.066 ± 0.025



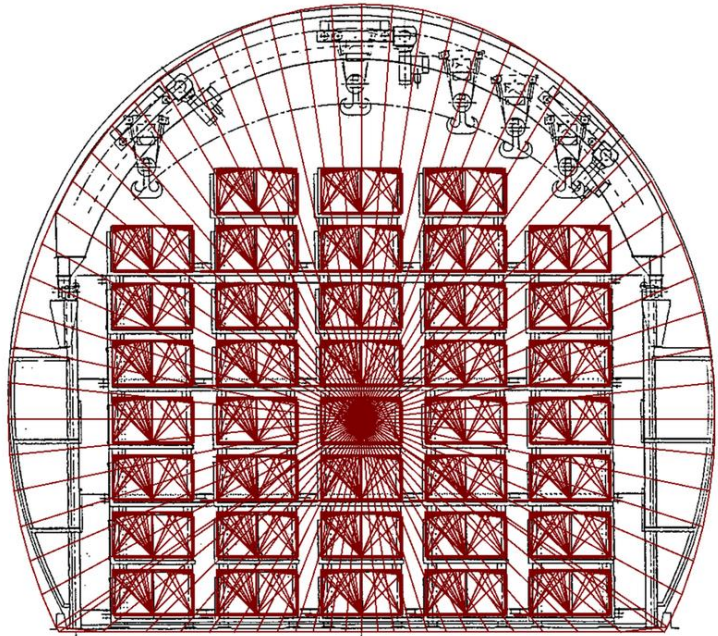


Soil (infiltration)

²³⁸ U	6.809 ppm
²³² Th	2.167 ppm
⁴⁰ K	0.846 ppm

Soil (normal)

²³⁸ U	< 0.643 ppm
²³² Th	< 0.123 ppm
⁴⁰ K	< 0.019 ppm



E. Bellotti, M. Buraschi, E. Fiorini and C. Liquori:
NEW MEASUREMENT OF ROCK CONTAMINATIONS AND NEUTRON
ACTIVITY IN THE GRAN SASSO TUNNEL

TABLE II - Activity of various materials in the Gran Sasso tunnel (in Bq/Kg).

Material	Activity or 95 c.l. limit			
	²³² Th	²³⁸ U	⁴⁰ K	²¹⁴ Bi
Rock Lab.A, pos.a (infiltration)	8.8±.3	84.7±8.4	224±6	41.9±.6
" Lab.A, pos.b (infiltration)	7.7±.4	66.8±7.1	256±13	41.7±.9
" Lab.A, pos.c (infiltration)	9.5±.4	122±13	264±13	56.6±1.4
" Lab.A, pos.d (normal)	<0.5	<8	<5	1.0±.2

Монте-Карло моделирование Geant4 - конструкция детектора, материалы

СОДЕРЖАНИЕ ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th
В МАТЕРИАЛАХ СЧЕТЧИКА

	$\text{K } \frac{1}{2}$		$^{238}\text{U } \frac{1}{2}$		$^{232}\text{Th } \frac{1}{2}$	
СТЕКЛО ФЭУ-49Б	1) $(4.9 \pm 1.0) \cdot 10^{-4}$	2) $7 \cdot 10^{-5}$	1) $(6.4 \pm 1.8) \cdot 10^{-7}$	2) $7.5 \cdot 10^{-7}$	1) $(11 \pm 3) \cdot 10^{-7}$	2) $9.4 \cdot 10^{-7}$
КЕРАМИКА ДЕЛИТЕЛЯ	*) $(1.3 \pm 0.3) \cdot 10^{-2}$	$100 \cdot 10^{-5}$	*) $(6.9 \pm 1.3) \cdot 10^{-6}$	$3.6 \cdot 10^{-6}$	*) $(2.6 \pm 0.5) \cdot 10^{-5}$	$4.8 \cdot 10^{-8}$
НЕРЖАВ. СТАЛЬ	—	$\sim 0.12 \cdot 10^{-5}$	—	$\leq 4.3 \cdot 10^{-9}$	—	$2.9 \cdot 10^{-8}$
ТЕФЛОН	—	$1.1 \cdot 10^{-4}$	—	$2.4 \cdot 10^{-8}$	—	$3.1 \cdot 10^{-8}$
СЦИНТИЛ- ЛЯТОР	—	—	$\leq 10^{-10}$		—	—

Стекло $7.5 \cdot 10^{-7} \times 3 \times 1 \text{ кг} = 2.25 \cdot 10^{-3}$,
Керамика $3.6 \cdot 10^{-7} \times 0.05 \text{ кг} = 2.25 \cdot 10^{-3}$,



Масса железа	1020 т
Масса сцинтиллятора	1008 т
Средняя глубина	3620 м в.э.

1) ДАННЫЕ ГРУППЫ КОПЫЛОВА (ИЯИ АН СССР)

*) ДЛЯ ВСЕЙ КЕРАМИКИ

2) ДАННЫЕ КОВАЛЬЧУКА (БНО ИЯИ АН СССР)

$m(\text{КОНТЕЙНЕР СЧЕТЧИКА}) = 300 \text{ кг}$

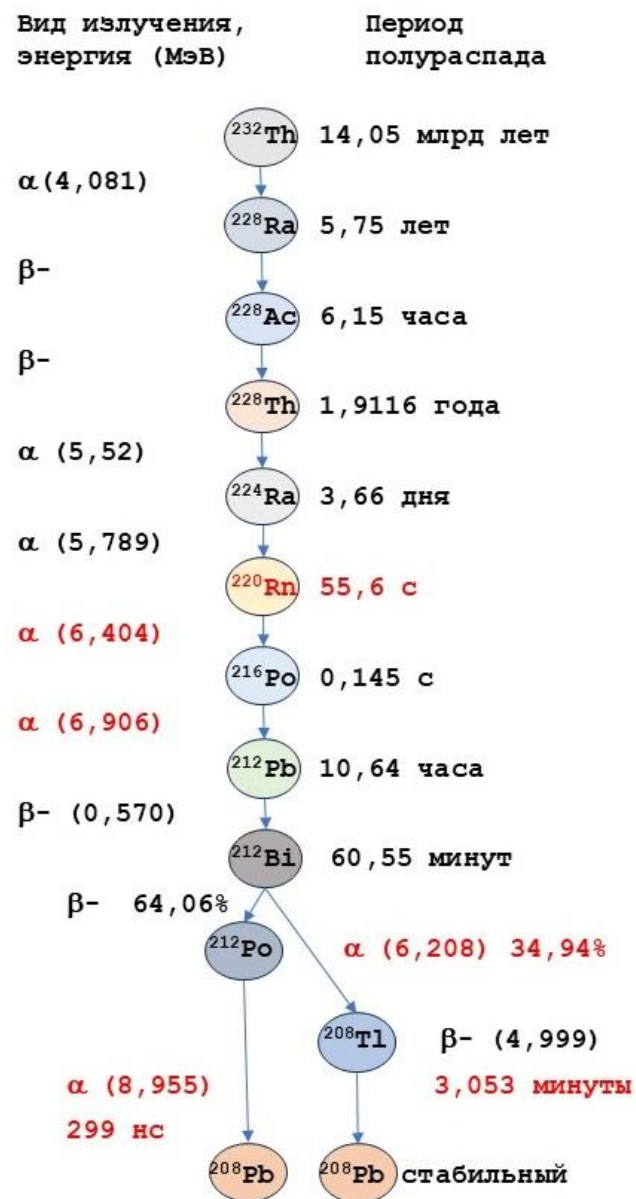
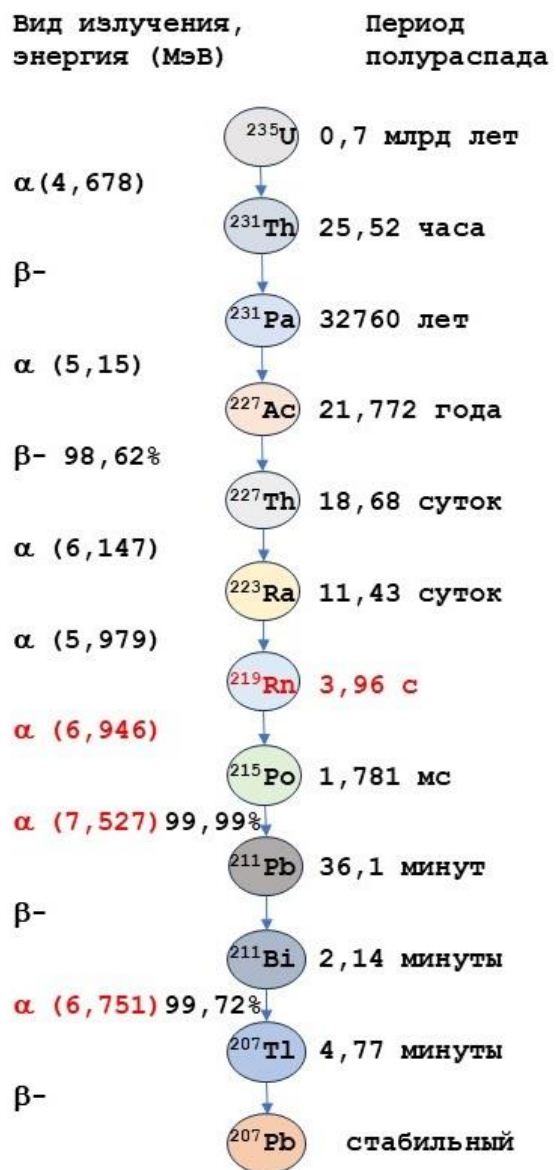
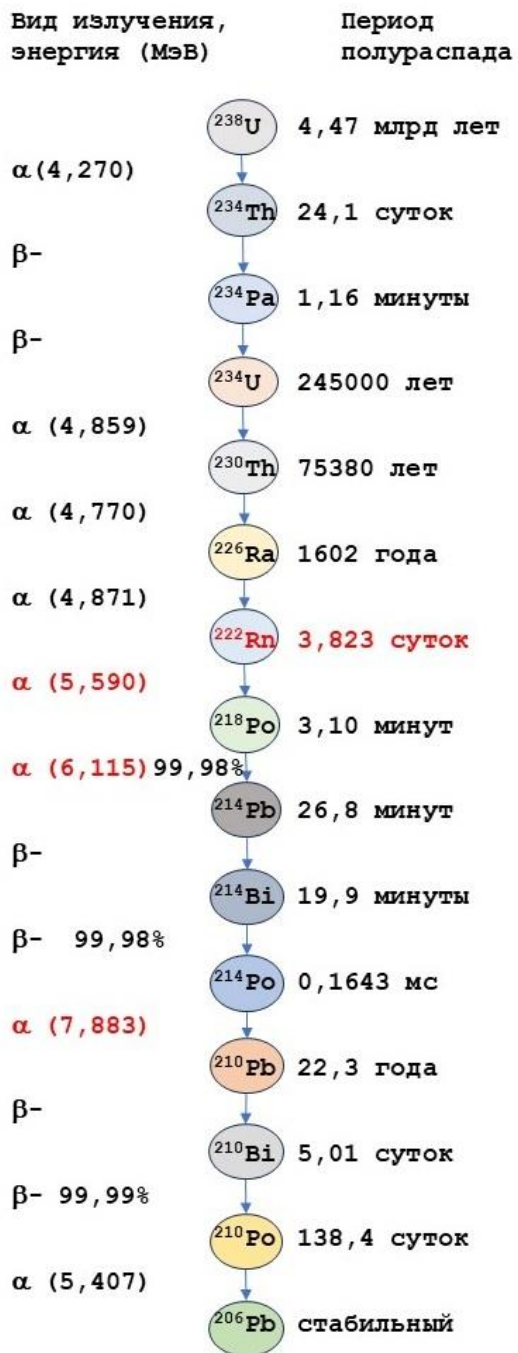
$m(\text{СТЕКЛО ФЭУ-49Б}) = 1 \text{ кг}$

$m(\text{КЕРАМИКА ДЕЛИТЕЛЯ}) = 0.05 \text{ кг}$

$m(\text{СЦИНТИЛЛЯТОР}) = 1200 \text{ кг}$

СОДЕРЖАНИЕ ^{238}U В ОДНОМ СЧЕТЧИКЕ $\sim 4 \cdot 10^{-3}$ г.

Наиболее вероятные цепочки распадов семейств урана-235, урана-238 и тория-232.

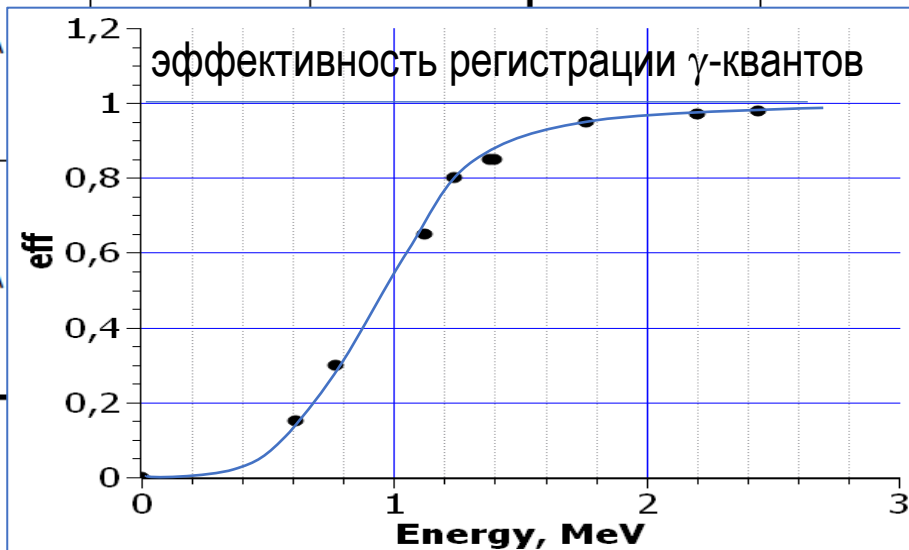


Монте-Карло моделирование Geant4 – результаты (E>0.5 МэВ)

	$^{238}\text{U}_\alpha$	$^{238}\text{U}_\beta$	$^{238}\text{U}_\gamma$	$^{232}\text{Th}_\alpha$	$^{232}\text{Th}_\beta$	$^{232}\text{Th}_\gamma$	$^{40}\text{K}_\alpha$	$^{40}\text{K}_\beta$	$^{40}\text{K}_\gamma$	$^{222}\text{Rn}_{\text{all}}$
Steel $^{238}\text{U} \leq 4.3$ ppb $^{232}\text{Th} 29$ ppb $^{40}\text{K} 0.14$ ppb	0 0 0 0 0 0	0.2615 0.2532 0.2470 0.2221 0.2499 0.2335 0.0134 0.0127 0.0134 0.0143 0.0193 0.0122	38.80 33.43 38.58 34.96 36.05 30.68 18.26 15.91 18.42 16.55 17.31 14.52	0 0 0 0 0 0	0.5713 0.5314 0.5202 0.5314 0.5117 0.5375 ---	58.20 49.67 58.71 52.79 54.48 46.12 0 0 0 0 0 0	---	4.332 3.758 4.303 3.893 4.108 3.457	1.564 1.339 1.583 1.412 1.459 1.219	N/A
Soil (infiltration) $^{238}\text{U} 6.809$ ppm $^{232}\text{Th} 2.167$ ppm $^{40}\text{K} 0.846$ ppm	0.1047 0.5289 0.0654 0.3936 0.1063 0.5309	0 0.00 0 0.00 0 1.13	200.2 6102 129.6 5058 164.1 5508	0.0145 0.0744 0.0094 0.0545 0.0150 0.0736	0 0.0391 0 0.0391 0 0.0391	25.24 545.8 16.56 462.6 17.91 479.3	---	0 0.0000 0 0.0667 0 0.1333	53.13 1219 33.68 1028 35.98 1058	N/A
Soil (normal) $^{238}\text{U} < 0.643$ ppm $^{232}\text{Th} < 0.123$ ppm $^{40}\text{K} < 0.019$ ppm	0.0099 0.0500 0.0062 0.0372 0.0100 0.0501	0 0.0000 0 0.0000 0 0.1067	18.90 576.3 12.24 477.7 15.50 520.1 0 0 0 0 0 0	0.00082 0.0042 0.00053 0.0031 0.00085 0.0042	0 0.0022 0 0.0022 0 0.0022	1.433 30.98 0.940 26.26 1.017 27.20 0 0 0 0 0 0	---	0 0.0000 0 0.0015 0 0.0030	1.187 27.23 0.753 22.97 0.804 23.63	N/A
Air (low activity) $^{222}\text{Rn} 20.0$ Bq/m ³	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	10.37 19.97 10.76 20.69 11.69 22.19
Air (high activity) $^{222}\text{Rn} 200.0$ Bq/m ³	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	103.7 199.7 107.6 206.9 116.9 221.9

Скорость счета событий (имп/сек/сч) с энергией выше 0.5 МэВ во внутренних/внешних счетчиках для различных источников из различных сред с учетом эффективности регистрации.

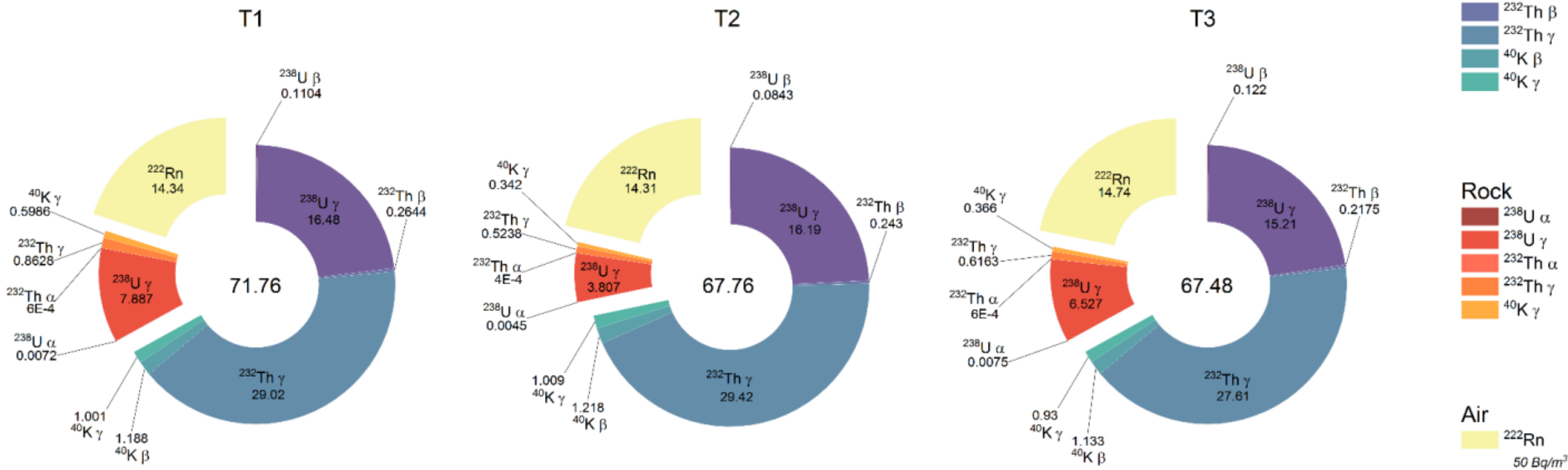
	$^{238}\text{U}_\alpha$	$^{238}\text{U}_\beta$	$^{238}\text{U}_\gamma$	$^{232}\text{Th}_\alpha$	$^{232}\text{Th}_\beta$	$^{232}\text{Th}_\gamma$	$^{40}\text{K}_\alpha$	$^{40}\text{K}_\beta$	$^{40}\text{K}_\gamma$	$^{222}\text{Rn}_{\text{all}}$
Steel $^{238}\text{U} \leq 4.3$ ppb $^{232}\text{Th} 29$ ppb $^{40}\text{K} 0.14$ ppb	0 0 0 0 0 0	0.1104 0.0903 0.0843 0.0789 0.1220 0.0809	16.48 12.61 16.19 13.35 15.21 11.70	0 0 0 0 0 0	0.2644 0.1919 0.2430 0.1812 0.2175 0.1508	29.02 21.99 29.42 23.43 27.61 20.60	---	1.188 0.9544 1.218 0.9895 1.133 0.8752	1.001 0.7739 1.009 0.8238 0.930 0.7071	N/A
Soil (normal) $^{238}\text{U} < 0.643$ ppm $^{232}\text{Th} < 0.123$ ppm $^{40}\text{K} < 0.019$ ppm	0.0072 0.0321 0.0045 0.0229 0.0075 0.0317	0 0 0 0 0 0	7.887 188.8 3.807 155.1 6.527 163.2	0.0006 0.0027 0.0004 0.0019 0.0006 0.0026	0 0 0 0 0 0	0.8628 13.14 0.5238 10.58 0.6163 10.92	---	0 0 0 0 0 0	0.5986 11.63 0.3420 9.528 0.3660 9.896	N/A
Air (low activity) $^{222}\text{Rn} 20.0$ Bq/m ³	N/A					N/A	N/A	N/A	N/A	5.735 9.014 5.724 9.212 5.897 10.22
Air (high activity) $^{222}\text{Rn} 200.0$ Bq/m ³	N/A					N/A	N/A	N/A	N/A	57.35 90.14 57.24 92.12 58.97 102.2



Монте-Карло моделирование Geant4 - результаты

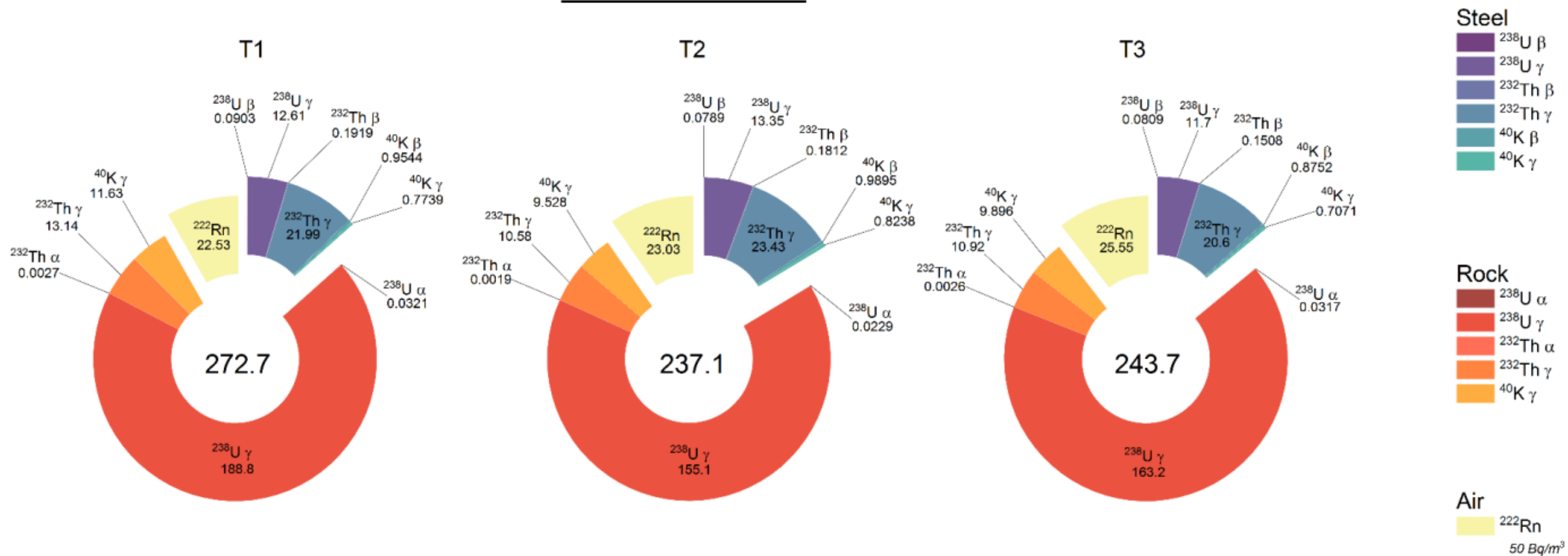
Суммарный вклад различных источников фона в средний темп счета событий (имп/сек/сч) с энергией выше 0.5 МэВ во внутренних счетчиках для всех башен (с учетом эффективности регистрации).

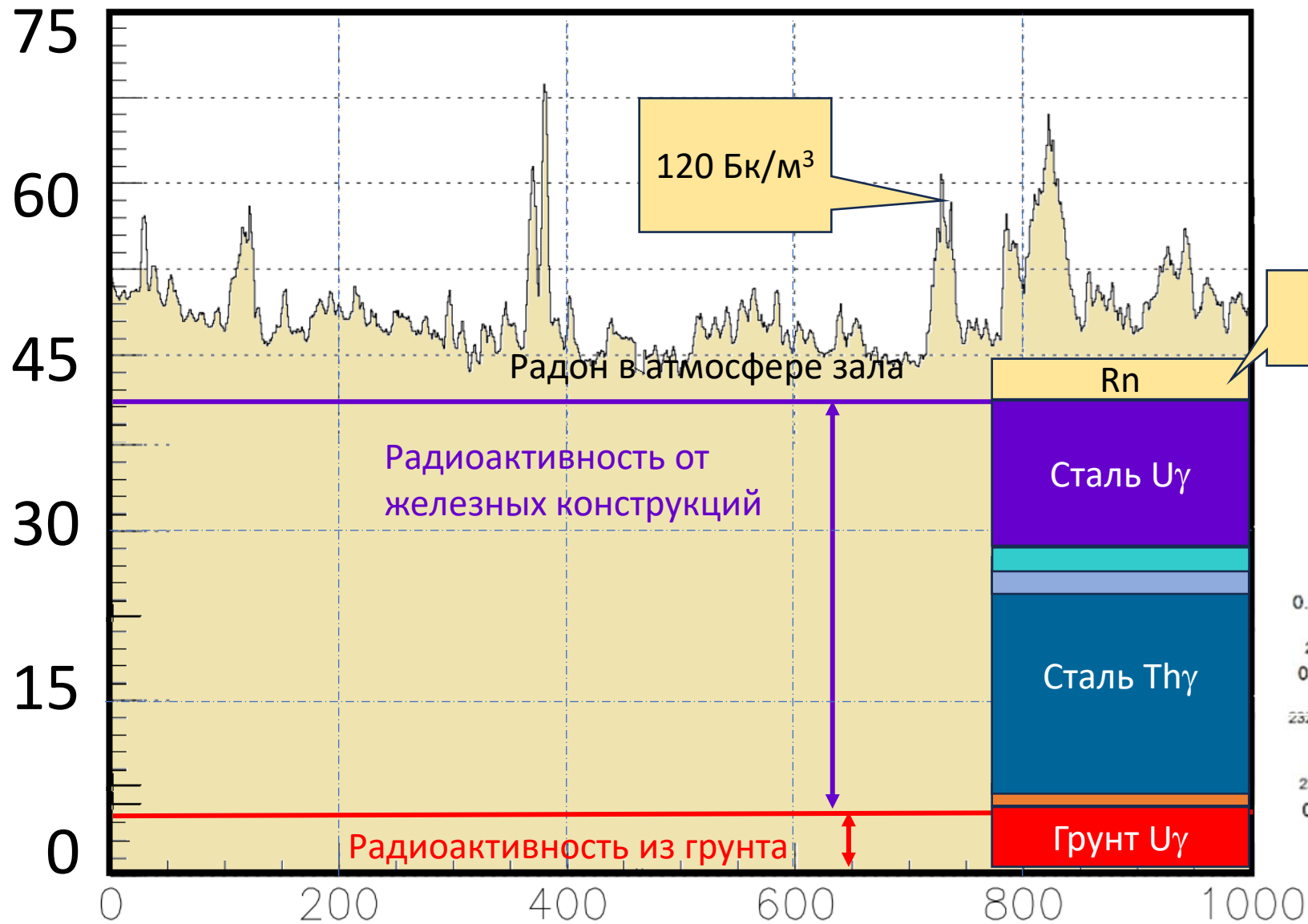
Internal counters



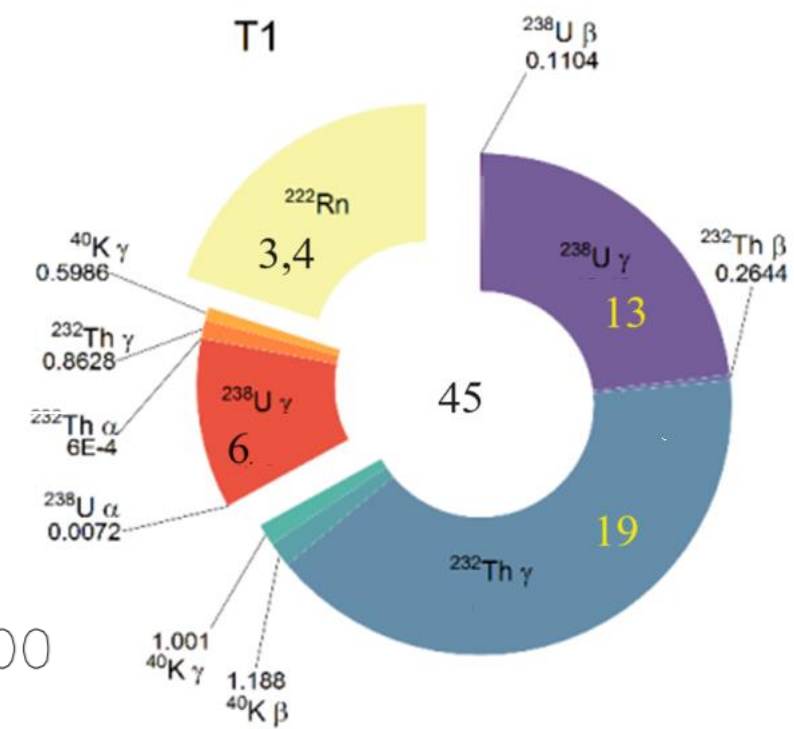
Суммарный вклад различных источников фона в средний темп счета событий (имп/сек/сч) с энергией выше 0.5 МэВ во внешних счетчиках для всех башен (с учетом эффективности регистрации).

External counters



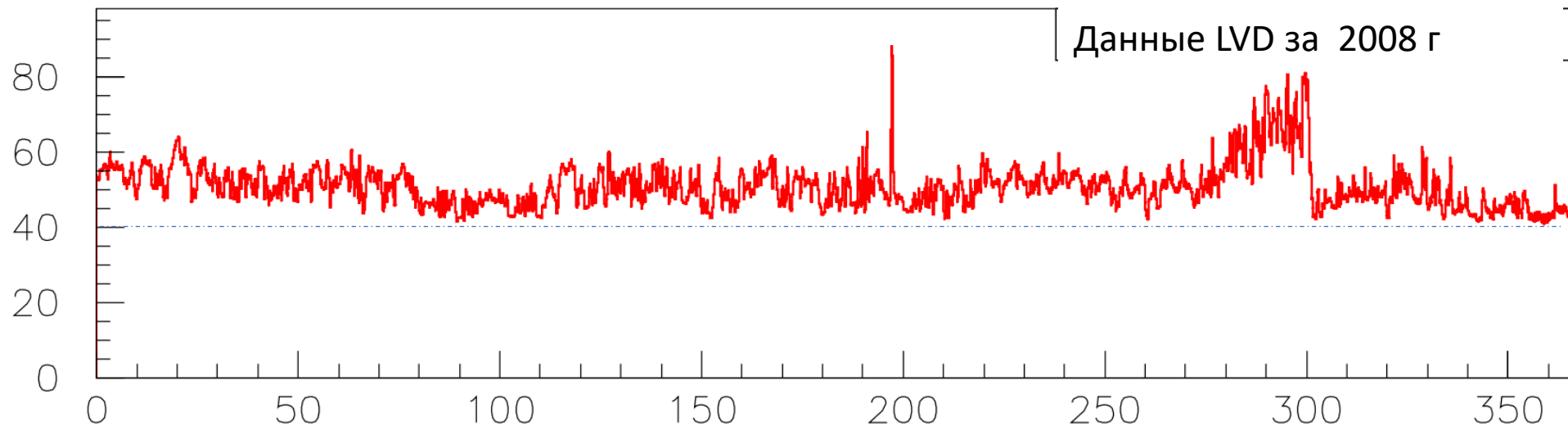


Расчет вклада с учетом эффективности регистрации $\eta=0.33$



Заключение

Около 40 отсчетов в общей скорости счетов составляет постоянная составляющая, ответственная за радиоактивность грунта и материалов конструкции. Оставшаяся часть - от 4 до 30 (в моменты пиков) – обусловлена выбросам радона в атмосфере экспериментального зала.



Исследование выполнено при финансовой поддержке по гранту Российского научного фонда 23-22-00048, <https://rscf.ru/project/23-22-00048/>.

Спасибо

LVD Collaboration: Authors and Affiliations

N. Yu. Agafonova¹, M. Aglietta^{2,3}, P. Antonioli⁴, V. V. Ashikhmin¹, G. Badino, G. Bari⁴, G. Bruno^{5,6}, E. A. Dobrynina¹, R. I. Enikeev¹, W. Fulgione^{3,5}, P. Galeotti^{2,3}, M. Garbini^{4,7}, P. L. Ghia⁸, P. Giusti⁴, E. Kemp⁹, A. S. Malgin, A. Molinaro^{5,10}, R. Persiani⁴, I. A. Pless¹¹, O. G. Ryazhskaya, O. Saavedra, G. Sartorelli⁴, I. R. Shakiryanova¹, M. Selvi⁴, G. C. Trinchero^{2,3}, C. F. Vigorito², V. F. Yakushev¹, and A. Zichichi^{4,7}

1 Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences 117312, Moscow, Russia

2 Department of Physics, University of Turin and INFN 10125, Turin, Italy

3 INAF, Osservatorio Astrofisico di Torino 10025, Turin, Italy

4 University of Bologna and INFN 40127, Bologna, Italy

5 INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso 67100, Assergi, L'Aquila, Italy

6 New York University Abu Dhabi, NYUAD 129188, Abu Dhabi, United Arab Emirates

7 Centro Enrico Fermi 00184, Roma, Italy

8 Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot Curie, CNRS 91406, Orsay, France

9 University of Campinas 13083, Campinas, Brazil

10 Gran Sasso Science Institute 67100, L'Aquila, Italy

11 Massachusetts Institute of Technology 02139, Cambridge, USA

Дополнительные слайды

	$^{238}\text{U}_\alpha$	$^{238}\text{U}_\beta$	$^{238}\text{U}_\gamma$	$^{232}\text{Th}_\alpha$	$^{232}\text{Th}_\beta$	$^{232}\text{Th}_\gamma$	$^{40}\text{K}_\alpha$	$^{40}\text{K}_\beta$	$^{40}\text{K}_\gamma$	$^{222}\text{Rn}_{\text{all}}$
Steel $^{238}\text{U} \leq 4.3$ ppb $^{232}\text{Th} 29$ ppb $^{40}\text{K} 0.14$ ppb	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	---	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	N/A
Soil (infiltration) $^{238}\text{U} 6.809$ ppm $^{232}\text{Th} 2.167$ ppm $^{40}\text{K} 0.846$ ppm	15.1 63.7 8.60 45.9 13.8 65.1	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	2.07 8.98 1.46 6.49 2.24 8.86	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	---	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	N/A
Soil (normal) $^{238}\text{U} < 0.643$ ppm $^{232}\text{Th} < 0.123$ ppm $^{40}\text{K} < 0.019$ ppm	1.42 6.01 0.81 4.33 1.30 6.15 0.140 0.61 0.092 0.47 0.154 0.65	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0.118 0.51 0.083 0.37 0.127 0.50 0.0167 0.069 0.0102 0.051 0.0178 0.073	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	---	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	N/A
Air (low activity) $^{222}\text{Rn} 20.0$ Bq/m ³	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0 0 0 0 0 0
Air (high activity) $^{222}\text{Rn} 200.0$ Bq/m ³	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0 0 0 0 0 0

TABLE 3. Primordial radionuclides content in rock and concrete in the European underground facilities.

	^{238}U	^{232}Th	K	Ref.
LNGS Hall A (rock)	6.80 ± 0.67 ppm	2.167 ± 0.074 ppm	160 ppm	[6]
LNGS Hall B (rock)	0.42 ± 0.10 ppm	0.062 ± 0.020 ppm	160 ppm	[6]
LNGS Hall C (rock)	0.66 ± 0.14 ppm	0.066 ± 0.025 ppm	160 ppm	[6]
LNGS all Halls (concrete)	1.05 ± 0.12 ppm	0.656 ± 0.028 ppm	-	[11]
LSM (rock)	0.84 ± 0.2 ppm	2.45 ± 0.2 ppm	$213 \pm 30 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$	[12]
LSM (concrete)	1.9 ± 0.2 ppm	1.4 ± 0.2 ppm	$77 \pm 13 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$	[12]
LSC	$2.2 \cdot 10^{-2} \gamma \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$			[13]
IUS	70 ppb	125 ppb	1130 ppm	[9]
CUPP	$27.8\text{-}44.5 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$	$4.0\text{-}18.7 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$	$267\text{-}625 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ (^{40}K)	[10]

E. Bellotti, M. Buraschi, E. Fiorini and C. Liquori:
NEW MEASUREMENT OF ROCK CONTAMINATIONS AND NEUTRON
ACTIVITY IN THE GRAN SASSO TUNNEL

TABLE II - Activity of various materials in the Gran Sasso tunnel (in Bq/Kg).

<u>Material</u>	<u>Activity or 95 c.l. limit</u>			
	^{232}Th	^{238}U	^{40}K	^{214}Bi
Rock Lab.A, pos.a (infiltration)	8.8±.3	84.7±8.4	224±6	41.9±.6
" Lab.A, pos.b (infiltration)	7.7±.4	66.8±7.1	256±13	41.7±.9
" Lab.A, pos.c (infiltration)	9.5±.4	122±13	264±13	56.6±1.4
" Lab.A, pos.d (normal)	<0.5	<8	<5	1.0±.2

Background Measurements in the Gran Sasso Underground Laboratory

M. Haffke, L. Baudis, T. Bruch, A.D. Ferella, T. Marrodán Undagoitia, M. Schumann*, Y.-F. Te, A. van der Schaaf

Physik-Institut der Universität Zürich
Winterthurerstrasse 190
8057 Zürich, Switzerland

arXiv:1101.5298 [astro-ph.IM]

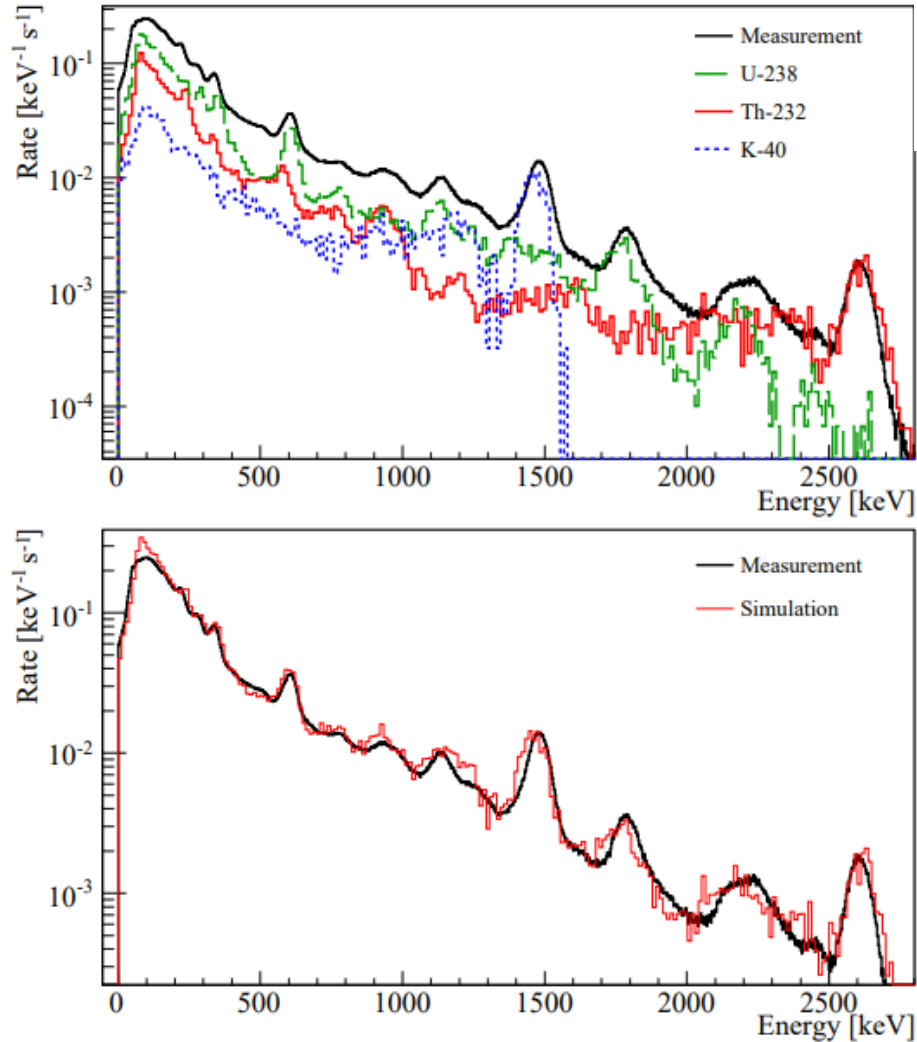


Figure 3: Gamma spectrum of LNGS hall A (location 1). Top: Measured data and the individual contributions of ^{238}U , ^{232}Th , and ^{40}K from of a Monte Carlo simulation of the setup. Bottom: Measured data and Monte Carlo sum spectrum agree very well over a very large energy range.

Table 2: Gamma activities of the primordial isotopes (in Bq/kg) as determined from measurements with a 3" NaI(Tl) detector.

Location	^{238}U	^{232}Th	^{40}K
1. Hall A	11.7 ± 3.9	14.8 ± 2.8	62 ± 14
2. Hall B	19.6 ± 4.9	13.2 ± 2.7	52 ± 10
3. Interferometer	37.8 ± 7.3	10.9 ± 2.8	206 ± 37
4. LVD CF	1.2 ± 0.4	0.34 ± 0.07	1.04 ± 0.32
Concrete (Floor) ^a	26 ± 5	8 ± 2	170 ± 27
Concrete (Wall) ^a	15 ± 2	3.8 ± 0.8	42 ± 6

^aThese concrete samples taken from the interferometer tunnel were screened in a HPGe detector in order to directly measure the radioactive contamination. They are to be compared to the NaI(Tl) results for location 3. *Interferometer*.

Gamma background measurements in the Gran Sasso National Laboratory

Dariusz Malczewski · Jan Kisiel · Jerzy Dorda

ments in the Gran Sasso National Laboratory

753

Table 5 Dolomitic limestone and concrete ^{40}K , ^{232}Th , and ^{238}U concentrations

^{40}K (Bq kg $^{-1}$)	^{232}Th (Bq kg $^{-1}$)	^{238}U (Bq kg $^{-1}$)
Dolomitic limestone (parent rock)		
26(2)	1.5(1)	1.8(1)
^{40}K (10 $^{-6}$ g g $^{-1}$)	^{232}Th (10 $^{-6}$ g g $^{-1}$)	^{238}U (10 $^{-6}$ g g $^{-1}$)
Dolomitic limestone (parent rock)		
0.10(1)	0.36(2)	0.14(1)
^{40}K (Bq kg $^{-1}$)	^{232}Th (Bq kg $^{-1}$)	^{238}U (Bq kg $^{-1}$)
Concrete		
70(2)	3.7(2)	9.5(3)
^{40}K (10 $^{-6}$ g g $^{-1}$)	^{232}Th (10 $^{-6}$ g g $^{-1}$)	^{238}U (10 $^{-6}$ g g $^{-1}$)
Concrete		
0.27(1)	0.90(5)	0.76(2)

Измеренная скорость
счета событий
(имп/сек/сч, 10^{-3}) с
энергией выше 5 МэВ во
внутренних/внешних
счетчиках

0.46 | 1.5
0.34 | 1.5
0.74 | 1.5

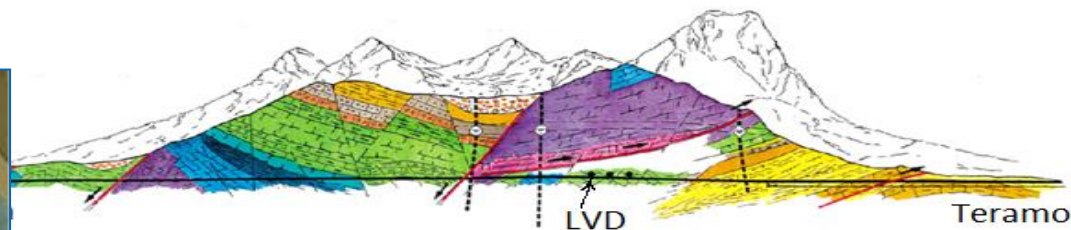
47.3 | 236
50.1 | 214
71.2 | 268

Измеренная скорость счета
событий (имп/сек/сч) с
энергией выше 0.5 МэВ во
внутренних/внешних
счетчиках.

71.8 | 273
67.2 | 237
67.5 | 244

Рассчитанная скорость счета
событий (имп/сек/сч) с
энергией выше 0.5 МэВ во
внутренних/внешних
счетчиках.

Детектор Большого Объема LVD



Длина × Ширина × Высота	22.7 × 13.2 × 10 м
Масса железа	1020 т
Масса сцинтиллятора	1008 т
Число сцинт. счетчиков	840
Число PMTs (ФЭУ)	2520
Средняя глубина (минимальная)	3620 м в.э. (3000 м в.э.)
Средняя энергия мюонов	280 ГэВ
E_{μ} на уровне моря (мин.)	1.3 ТэВ
Скорость счета мюонов (на 1 башню)	~ 120 ч ⁻¹
ϵ_{th} порог	4 МэВ (0.5 МэВ)

Основная задача – **регистрация нейтрино от коллапсов звездных ядер**

<http://radiopurity.in2p3.fr/>

1 Bq U-238/kg	=	81 ppb U	(81 x 10 ⁻⁹ gU/g)
1 Bq Th-232/kg	=	246 ppb Th	(246 x 10 ⁻⁹ gTh/g)
1 Bq K-40/kg	=	32300 ppb K	(32300 x 10 ⁻⁶ gK/g)
1 Bq U-235/kg	=	1.76 ppm U	(1.76 x 10 ⁻⁶ gU/g)

- Underground Science
- Underground Laboratories
- Cosmogenic Activation
- Neutron Activation
- Radiopurity of Materials
- Shielding Materials
- Radiation Detection and Measurement
- Screening Facilities

Underground Science

Rare event searches and underground science have undergone considerable development over the last 3 decades, mostly dedicated to physics thematics such as the study of solar neutrinos, the search for dark matter and neutrinoless double beta decay. But more recently the study of the impact of cosmic rays and natural radioactivity on microelectronic components, on quantum circuits and even in cell biology is also growing.

- Dark Matter
- Double Beta Decay
- Solar Neutrinos
- Geo-Science
- Biology
- Deep Qubits
- ...

Related papers:

- "Underground Science" [Author: John Bahcall et al, 2001](#)
- "Operating in a deep underground facility improves the locking of gradiometric fluxonium qubits at the sweet spots" [Author: Daria Gusenkova, et al, 2022 arXiv:2201.09779v1](#)

