

Выпускная квалификационная
работа по теме
«Исследование источников фона
космогенного происхождения в
детекторе Darkside-20k»

Студент

Д. С. Голубков

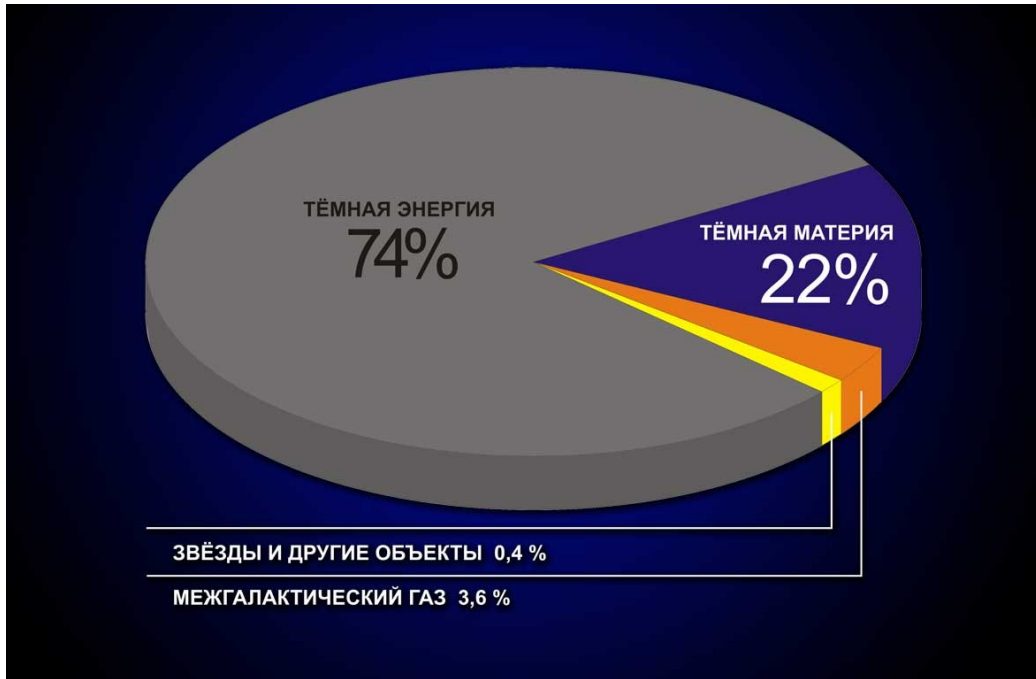
Руководитель НИР,
д.ф.-м.н., проф.

М. Д. Скорохватов

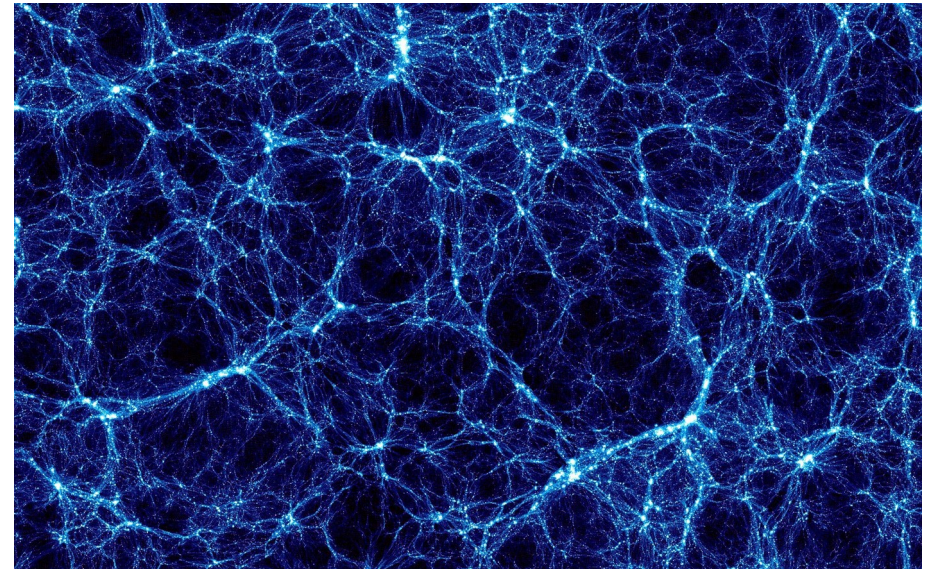
Научный консультант,
с.н.с. ОФН,
НИЦ "Курчатовский институт"

И. Н. Мачулин

Введение

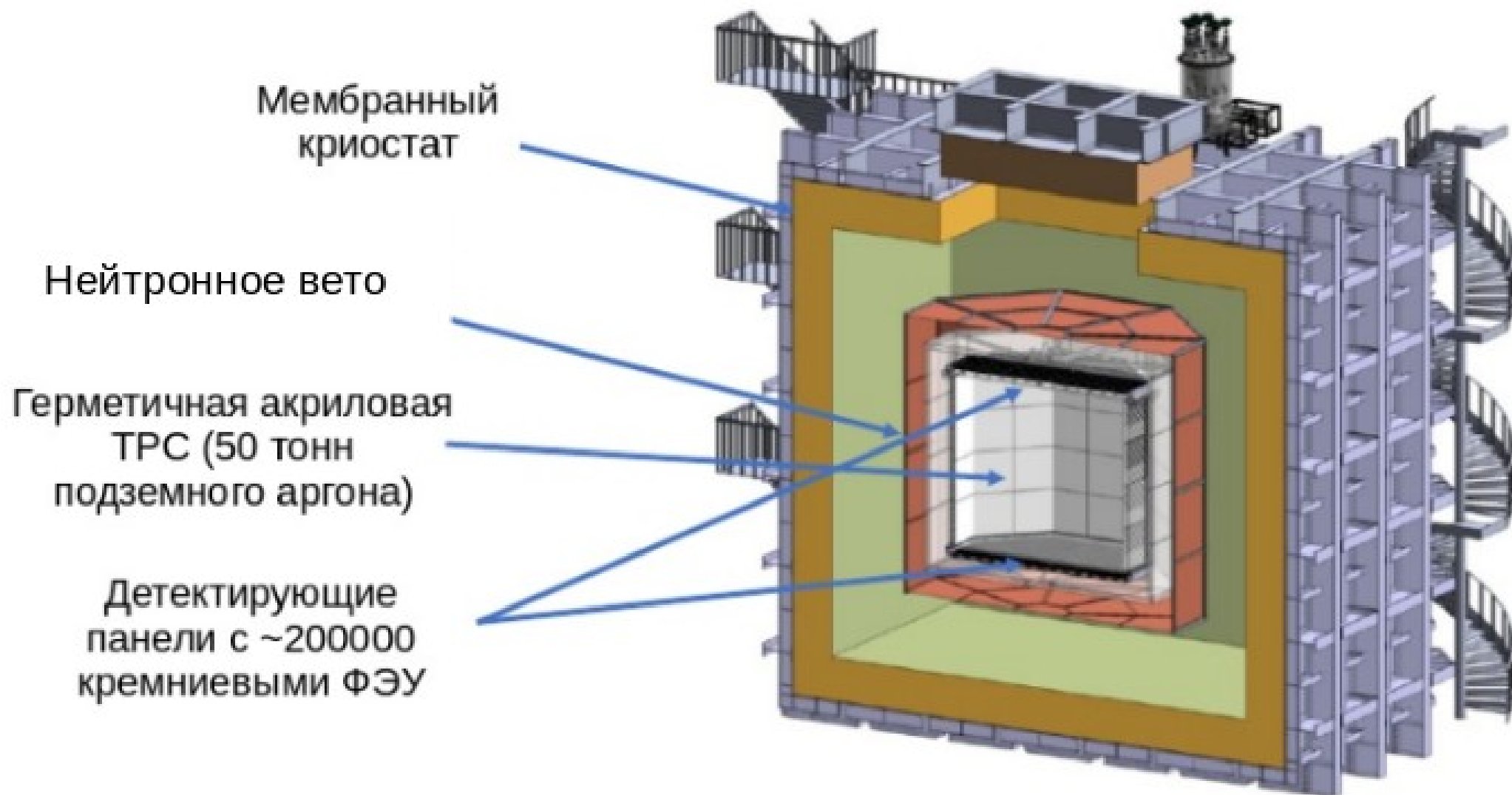


Существует много кандидатов гипотетических частиц скрытой массы. Одним из кандидатов является Weakly Interacting Massive Particles (WIMP).

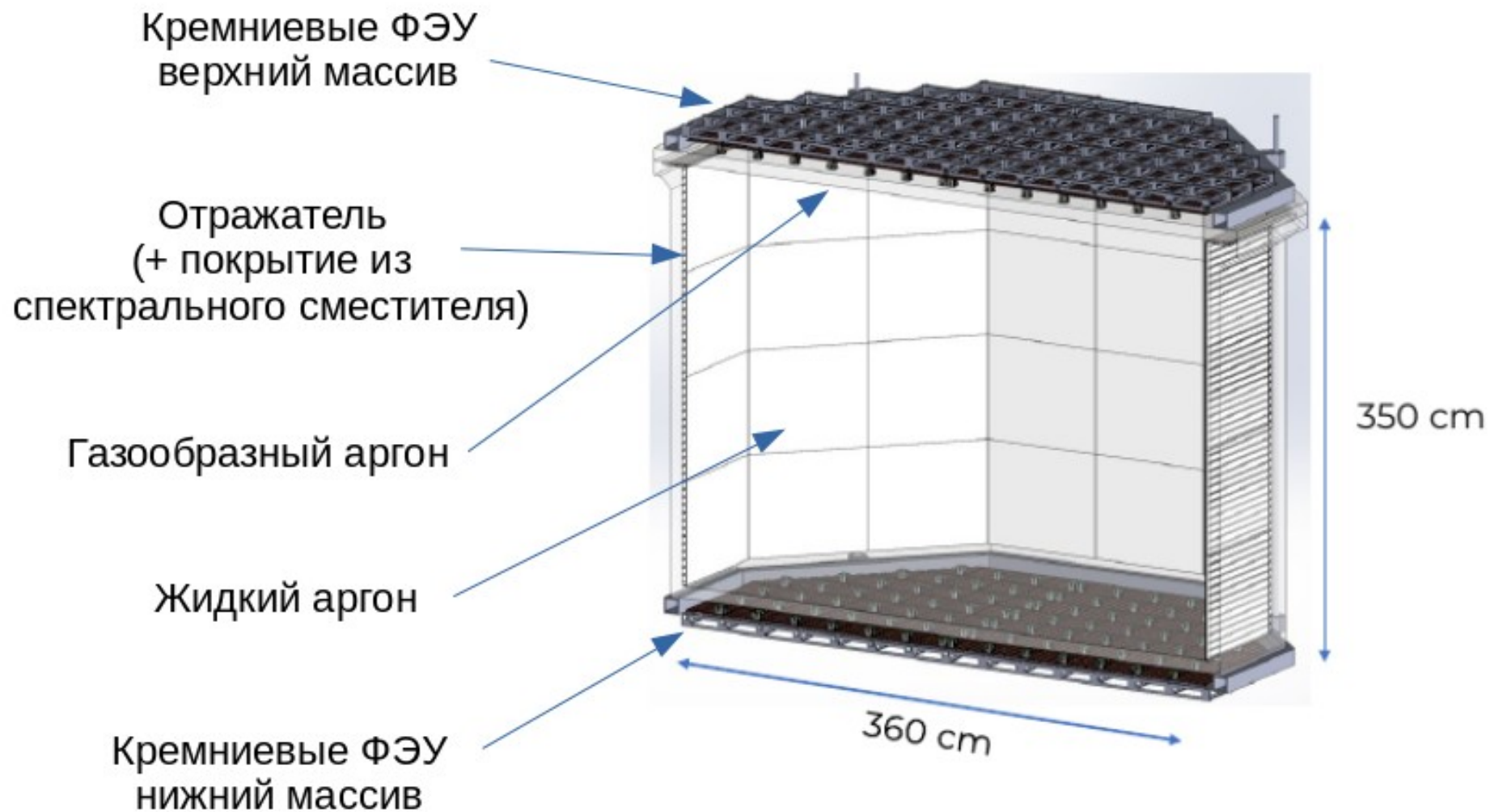


Наиболее убедительными экспериментальными фактами существования скрытой массы, полученными из астрономических наблюдений, являются результаты измерения скоростей слоёв галактик

Эксперимент Darkside-20k

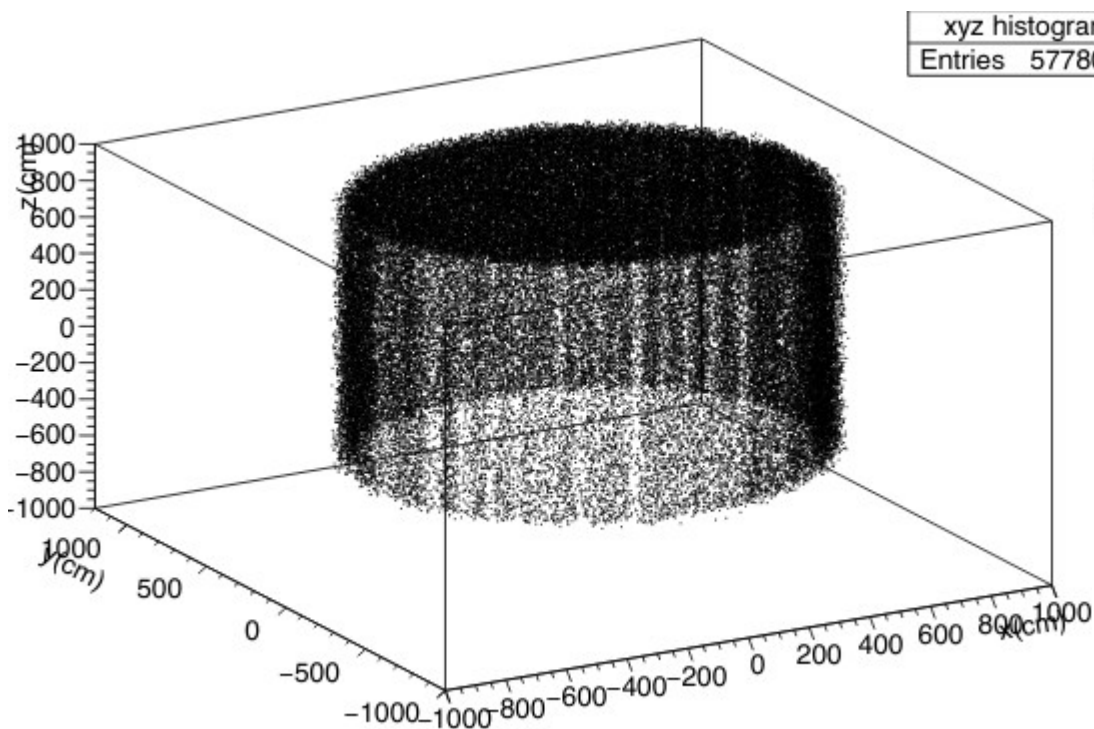


Временная проекционная камера (ТРС)

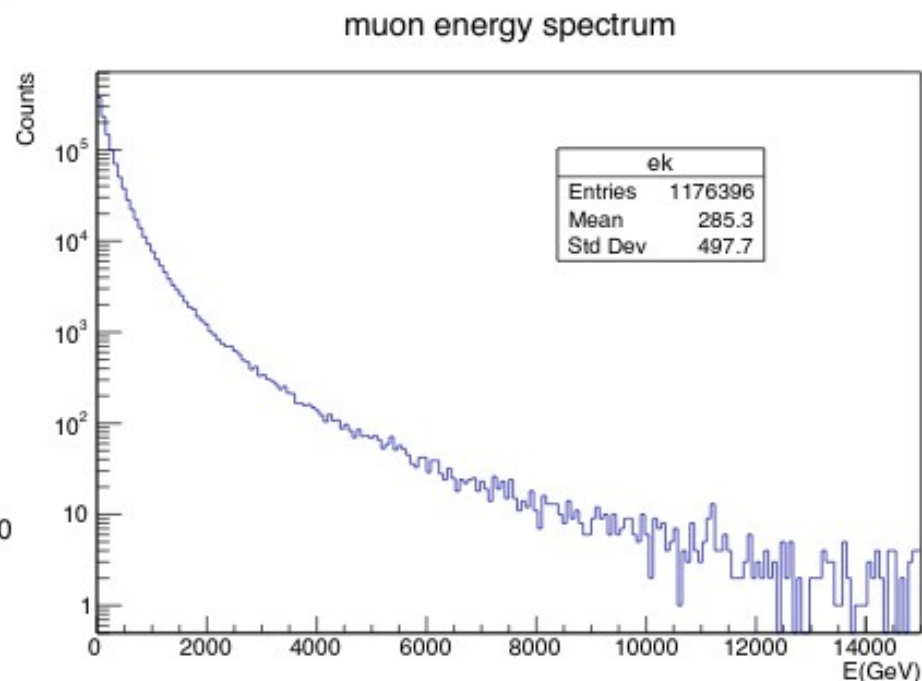


Космический фон

Поток мюонов f , в помещении Лаборатории Гран-Сассо равен: $f = 3.4 \cdot 10^{-4} \text{ [с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}]$



Расположения мюонов и вторичных частиц на поверхности цилиндра (радиуса 7 и высотой 14 метров)



Спектр энергий мюонов

- Мюоны космогенного происхождения и вторичные частицы вырабатывают радиоактивные изотопы в мишени детектора

- Нейтроны, образующиеся в результате взаимодействия космических мюонов, составляют значительную часть фона при поиске редких событий. Таким образом необходимо использовать имитационные исследования для проектирования защиты и прогнозирования уровней нейтронного фона в установке.
- Важным объектом исследований является образование beta-n изотопов в объёме детектора, так как нейтроны испускаемые при их распаде рассеиваются на ядрах мишени и имитируют частицы WIMP.

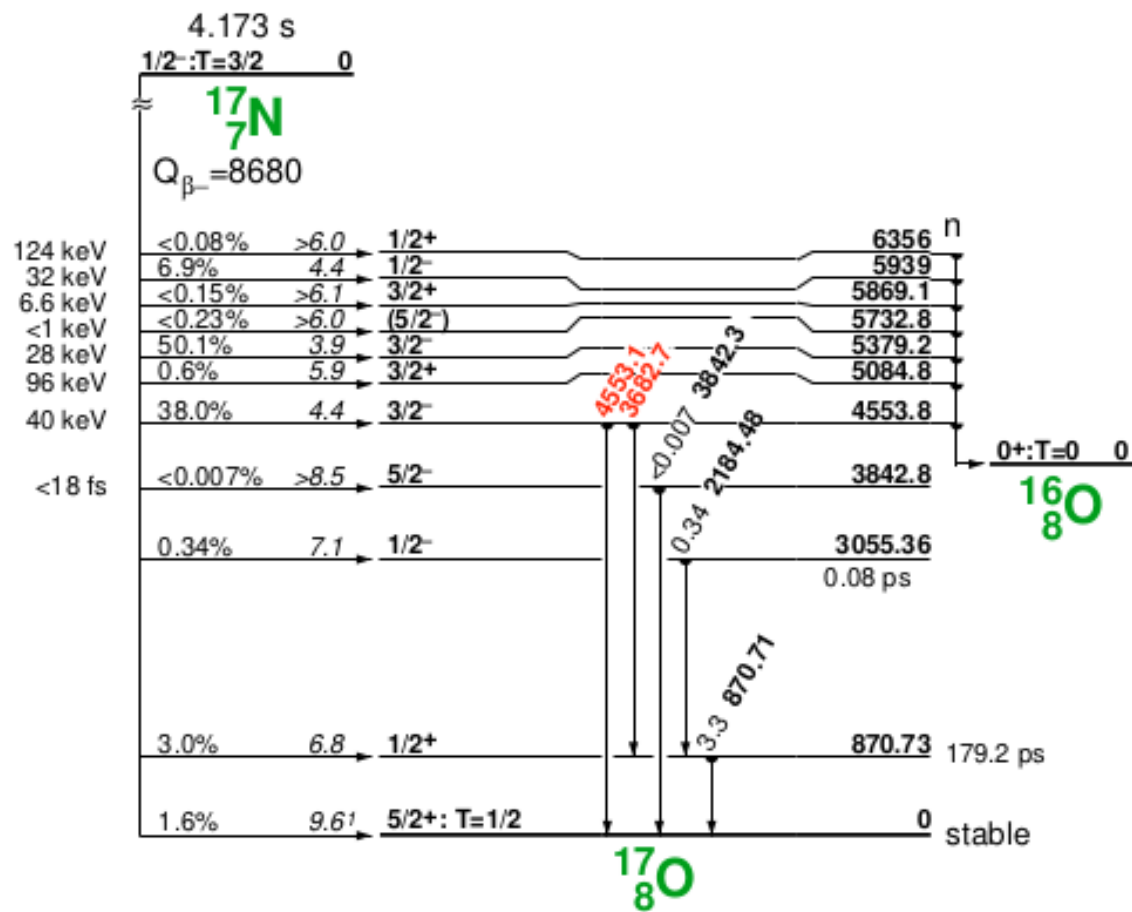
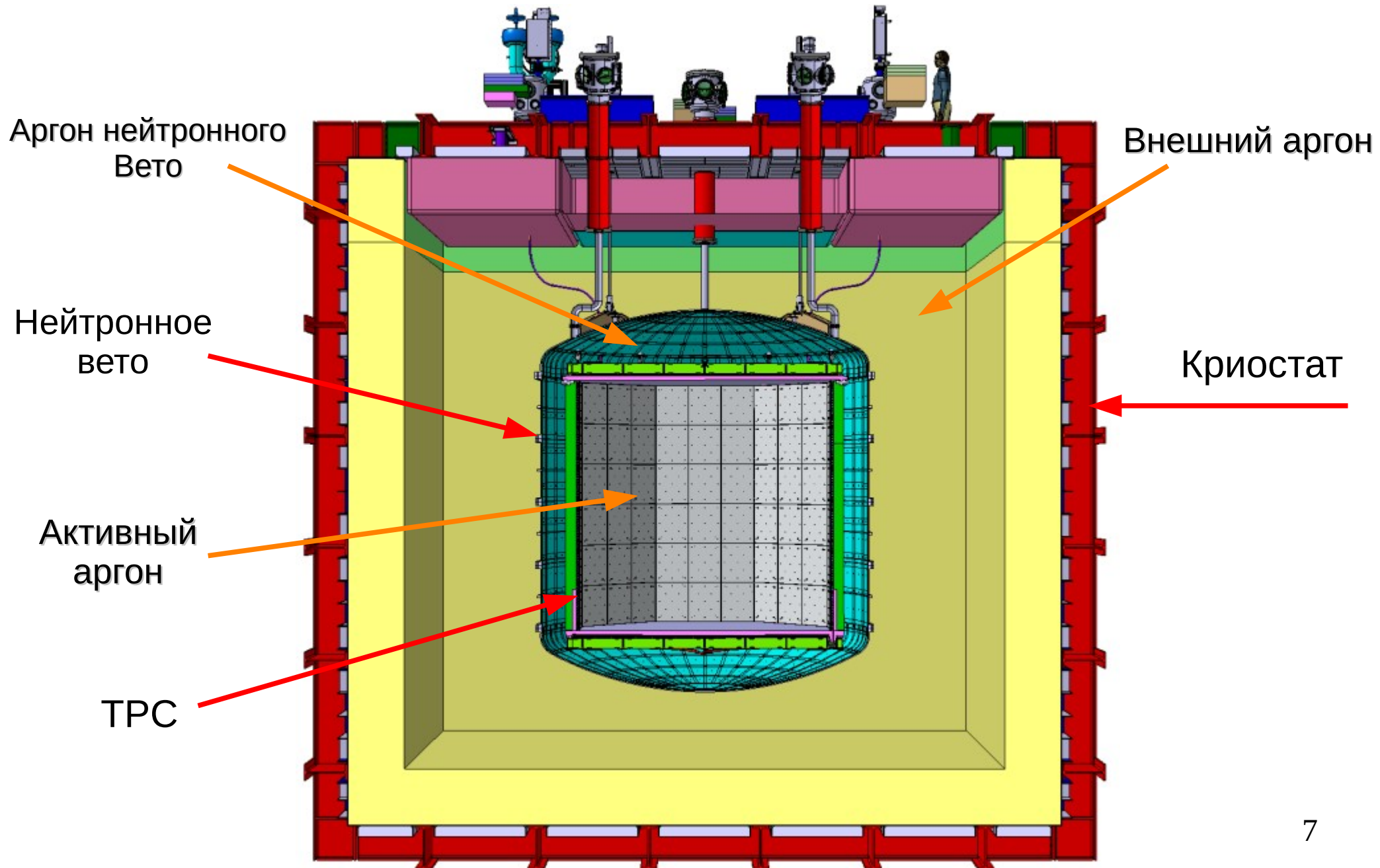


схема beta-n активного изотопа - ^{17}N

Внутренняя конструкция детектора DarkSide-20к, вид спереди



Выход β - n изотопов за 10 лет в Darkside-20k

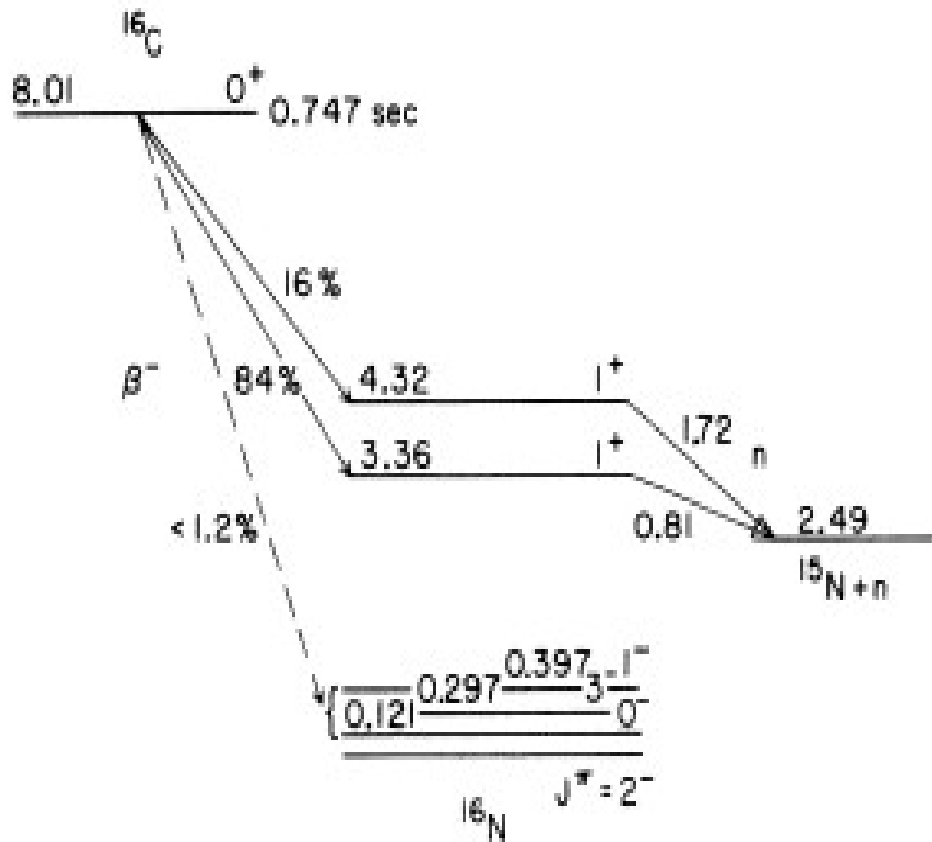
Isotope	Active UAr	Neutron Veto UAr	Outer UAr	All Ar	(β - , n)	(β - , 2n)	(β - , 3n)	Total number of neutrons	Half-life T1/2	Rejection (5 sec)	Rejection in ActiveLAR (5 sec)	Rejection in MiddleUAR (5 sec)	Rejection (2 sec)	Rejection in ActiveLAR (2 sec)	Rejection in MiddleUAR (2 sec)
P39	0,15	1,00	2,00	3,15	0,27			0,84	282 ms	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
P38	29,00	56,00	343,00	428,00	0,12			51,36	640 ms	0,23	0,02	0,03	5,89	0,40	0,77
Si37	3,00	3,00	21,00	27,00	0,17			4,59	90 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Si36	12,00	19,00	115,00	146,00	0,10			14,60	450 ms	0,01	0,00	0,00	0,67	0,06	0,09
Al36	0,10	0,32	2,00	2,42	0,31			0,75	90 ms	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Al35	1,00	6,00	15,00	22,00	0,38			8,36	37,2 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al34	4,00	3,00	28,00	35,00	0,26			9,10	56,3 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al33	6,00	12,00	72,00	90,00	0,09			7,65	41,7 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al32	23,00	43,00	256,00	322,00	0,01			2,25	33 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al31	93,00	159,00	1153,00	1405,00	0,02			22,48	644 ms	0,10	0,01	0,01	2,61	0,17	0,30
Mg34	1,00	0,64	3,00	4,64	0,27			1,26	20 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg33	1,00	1,00	8,00	10,00	0,14			1,40	95 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg32	2,00	1,00	13,00	16,00	0,06			0,88	86 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg31	1,00	1,00	26,00	28,00	0,06			1,74	326 ms	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
Mg30	8,00	17,00	91,00	116,00	0,00			0,07	313 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na33	0,05	0,16	1,00	1,21	0,47	0,13		0,88	8 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na32	0,05	0,16	1,00	1,21	0,24	0,08		0,48	12,9 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na31	0,05	0,16	1,00	1,21	0,37	0,01	0,00	0,47	17,35 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na30	0,05	0,16	1,00	1,21	0,30	0,01		0,39	48,4 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na29	1,00	1,00	7,00	9,00	0,26			2,33	44,1 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na28	3,00	4,00	36,00	43,00	0,01			0,25	30,5 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na27	13,00	30,00	188,00	231,00	0,00			0,30	301 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ne29	0,05	0,16	1,00	1,21	0,28	0,04		0,44	15 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ne28	0,05	0,16	1,00	1,21	0,12	0,04		0,23	20 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ne27	0,05	0,32	2,00	2,37	0,02			0,05	31,5 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ne26	0,50	2,00	15,00	17,50	0,00			0,02	197 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F25	0,10	0,32	2,00	2,42	0,23			0,56	80 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F24	2,00	5,00	19,00	26,00	0,06			1,53	384 ms	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01
F23	6,00	12,00	86,00	104,00	0,05			5,10	2,23 s	1,08	0,06	0,12	2,74	0,16	0,32
F22	33,00	50,00	340,00	423,00	0,08			35,74	4,23 s	15,75	1,23	1,86	25,76	2,01	3,04
O24	0,05	0,16	1,00	1,21	0,58			0,70	65 ms	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
O23	0,35	1,00	6,00	7,35	0,07			0,51	97 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
O22	2,00	3,20	18,00	23,20	0,01			0,23	2,25 s	0,05	0,00	0,01	0,13	0,01	0,02
N20	0,30	1,00	5,00	6,30	0,43			2,70	136 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N19	0,50	2,00	8,00	10,50	0,55			5,73	271 ms	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01
N18	5,00	6,00	72,00	83,00	0,07			5,81	619,2 ms	0,02	0,00	0,00	0,62	0,04	0,04
N17	20,00	34,00	220,00	274,00	0,95			260,30	4,173 s	113,45	8,28	14,08	186,72	13,63	23,17
C20	0,05	1,00	0,79	1,84	0,65	0,19		1,88	16,2 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C19	0,05	0,16	1,00	1,21	0,47	0,07		0,74	46,3 ms	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
C18	0,10	0,32	2,00	2,42	0,32			0,76	92 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C17	0,25	0,80	5,00	6,05	0,28			1,72	193 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C16	1,15	2,00	21,00	24,15	0,99			23,91	747 ms	0,23	0,01	0,02	3,74	0,18	0,31
B15	1,00	2,00	9,00	12,00	0,94	0,00		11,33	9,93 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B14	9,00	9,00	53,00	71,00	0,06			4,29	12,5 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B13	26,00	25,00	176,00	227,00	0,00			0,64	17,33 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Be14	0,10	1,00	1,00	2,10	0,98	0,01		2,09	4,35 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Be12	4,00	3,00	41,00	48,00	0,01			0,24	21,50 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Li11	1,00	3,00	6,00	10,00	0,86	0,04	0,02	10,02	8,75 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Li9	25,00	50,00	371,00	446,00	0,51			226,57	178,3 ms	0,00	0,00	0,00	0,10	0,01	0,01
He8	8,00	18,00	101,00	127,00	0,16			20,45	119,1 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Выход β – n изотопов за 10 лет в Darkside-20k

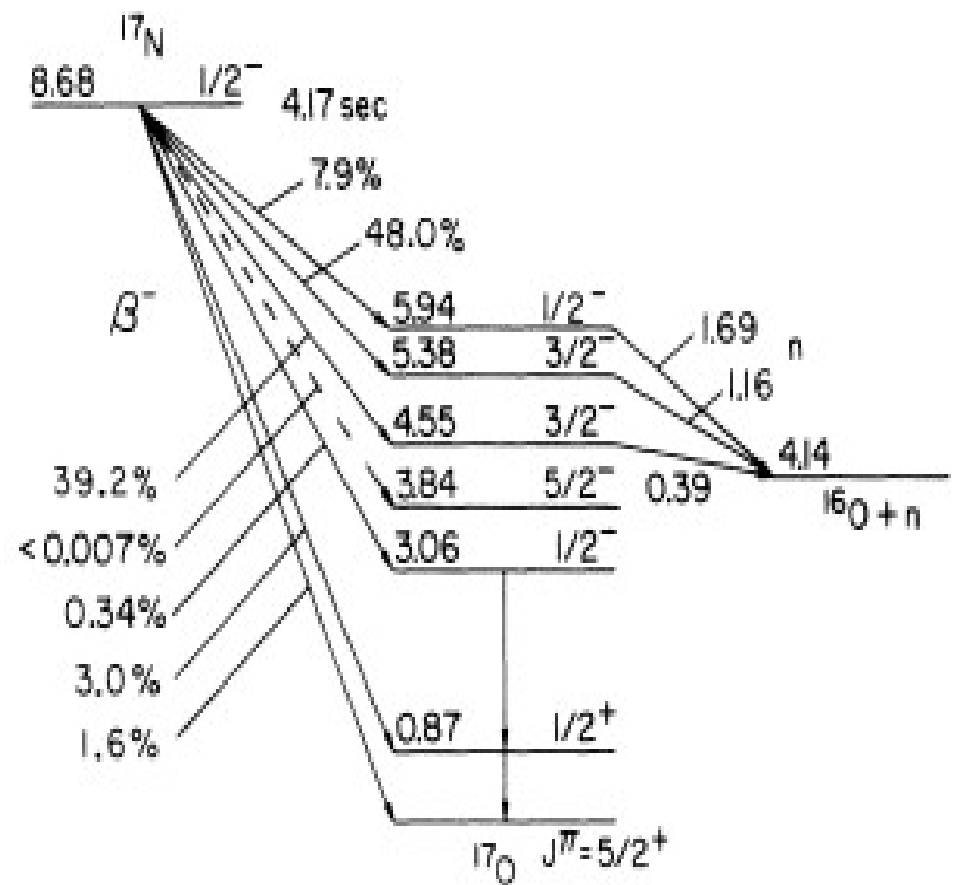
Isotope	Active UAr	Neutron Veto UAr	Outer UAr	All Ar	(β - , n)	(β - , 2n)	(β - , 3n)	Total number of neutrons	Half-life T1/2	Rejection (5 sec)	Rejection in ActiveLAr (5 sec)	Rejection in MiddleUAr (5 sec)	Rejection (2 sec)	Rejection in ActiveLAr (2 sec)	Rejection in MiddleUAr (2 sec)
P39	0,15	1,00	2,00	3,15	0,27			0,84	282 ms	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
P38	29,00	56,00	343,00	428,00	0,12			51,36	640 ms	0,23	0,02	0,03	5,89	0,40	0,77
Si37	3,00	3,00	21,00	27,00	0,17			4,59	90 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Si36	12,00	19,00	115,00	146,00	0,10			14,60	450 ms	0,01	0,00	0,00	0,67	0,06	0,09
Al36	0,10	0,32	2,00	2,42	0,31			0,75	90 ms	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Al35	1,00	6,00	15,00	22,00	0,38			8,36	37,2 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al34	4,00	3,00	28,00	35,00	0,26			9,10	56,3 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al33	6,00	12,00	72,00	90,00	0,09			7,65	41,7 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al32															0,00
Al31															0,30
Mg34															0,00
Mg33															0,00
Mg32															0,00
Mg31															0,00
Mg30															0,00
Na33															0,00
Na32															0,00
Na31															0,00
Na30															0,00
Na29															0,00
Na28															0,00
Na27															0,00
Ne29															0,00
Ne28															0,00
Ne27															0,00
Ne26															0,00
F25															0,00
F24															0,01
F23															0,32
F22															3,04
O24															0,00
O23															0,00
O22															0,02
N20															0,00
N19															0,01
N18															0,04
N17															23,17
C20															0,00
C19	0,05	0,16	1,00	1,21	0,47	0,07		0,74	46,3 ms	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
C18	0,10	0,32	2,00	2,42	0,32			0,76	92 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C17	0,25	0,80	5,00	6,05	0,28			1,72	193 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C16	1,15	2,00	21,00	24,15	0,99			23,91	747 ms	0,23	0,01	0,02	3,74	0,18	0,31
B15	1,00	2,00	9,00	12,00	0,94	0,00		11,33	9,93 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B14	9,00	9,00	53,00	71,00	0,06			4,29	12,5 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B13	26,00	25,00	176,00	227,00	0,00			0,64	17,33 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Be14	0,10	1,00	1,00	2,10	0,98	0,01		2,09	4,35 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Be12	4,00	3,00	41,00	48,00	0,01			0,24	21,50 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Li11	1,00	3,00	6,00	10,00	0,86	0,04	0,02	10,02	8,75 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Li9	25,00	50,00	371,00	446,00	0,51			226,57	178,3 ms	0,00	0,00	0,00	0,10	0,01	0,01
He8	8,00	18,00	101,00	127,00	0,16			20,45	119,1 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Изотопы	Выход, шт	$T_{1/2}$, с	Нейтроны, шт	После Вето 5 секунд, шт
P38	428	0.640	51.36	0.23
Si36	146	0.450	14.60	0.01
Al31	1405	0.644	22.48	0.10
F23	104	2.23	5.10	1.08
F22	423	4.23	35.74	15.75
O22	23	2.25	0.23	0.05
N17	274	4.17	260.30	113.45
C16	24	0.747	23.91	0.23
Всего	2827		413.72	130.89
Остальные	2078		343.02	0.02

Схемы распада β -n изотопов



$T_{1/2} = 747$ ms



$T_{1/2} = 4.173$ s

β -n переходы N17

Энергетические уровни

— энергия нейтрона,

бета-электрона :

Level 5.939

— $E_n = 1690$ keV

$E_{e^-,max} = 2741$ keV

Level 5.379

— $E_n = 1163$ keV

$E_{e^-,max} = 3301$ keV

Level 5.085

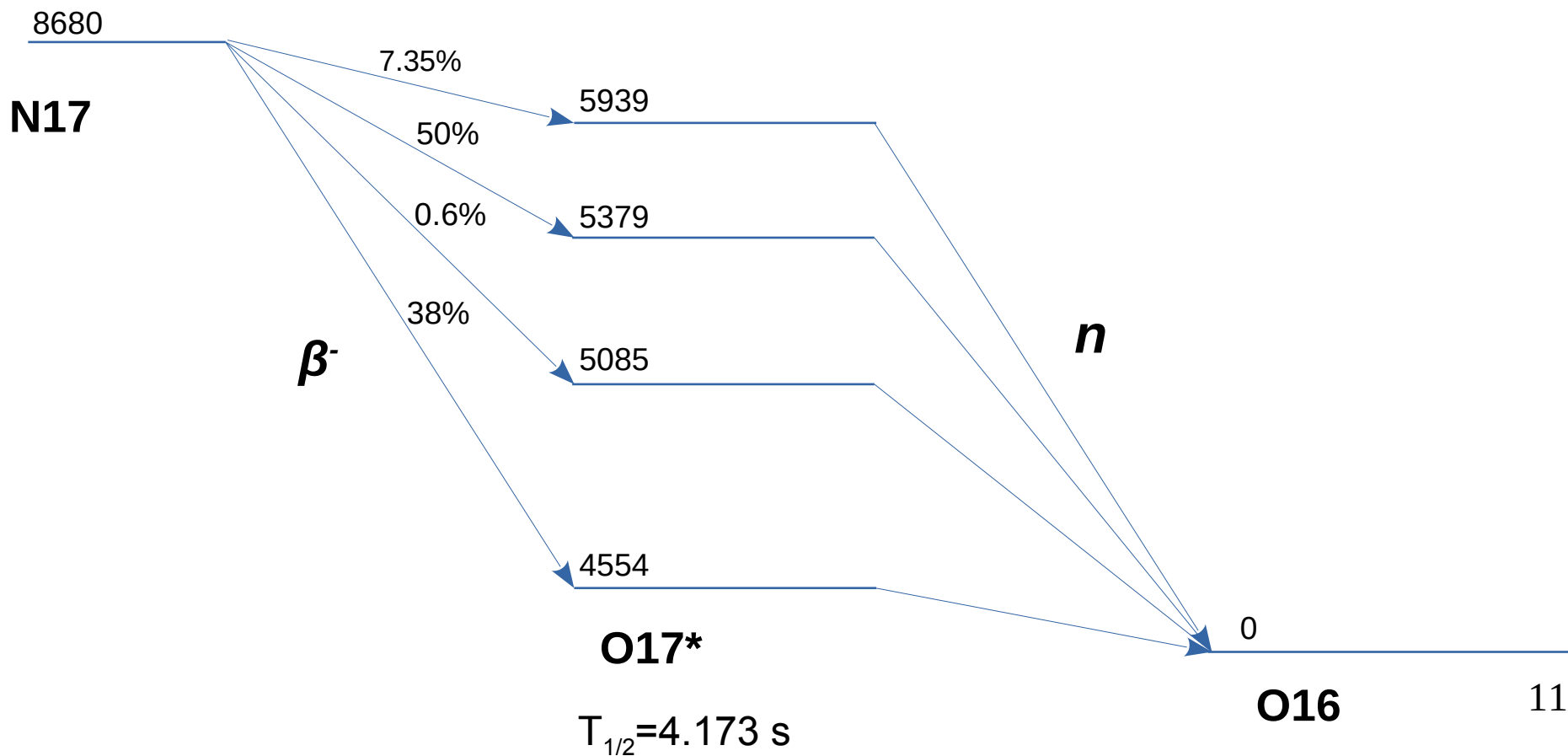
— $E_n = 886$ keV

$E_{e^-,max} = 3595$ keV

Level 4.554

— $E_n = 520$ keV

$E_{e^-,max} = 4126$ keV



Моделирование нейтронов от β -n распадов, имитирующих регистрацию WIMP в детекторе Darkside-20k

Критерии отбора WIMP-подобных событий:

- **NclusNR = 1**
(количество образованных кластеров ядерной отдачи равно единице)
- **IsFV20 = 1**
(область образования кластера ограничено центральным цилиндрическим объёмом массой 20 тонн)
- **abs(cl_z) < 100**
(координата кластера по Z меньше 100 см по модулю)
- **7.5 < cl_ene < 50**
(интересующая энергетическая область поиска WIMP от 7.5 кэВ до 50 кэВ)
- **cl_elec < cl_nucl**
(энергия электронных рассеяний меньше энергии ядерных)
- **EnergyER < 50**
(сумма энергии, выделяемой кластерами после захвата нейтрона, ниже порога 50 кэВ в TPC)
- **late_eneVeto_Ar < 200**
(сумма энергии, выделяемой кластерами после захвата нейтрона, ниже порога 200 кэВ в нейтронном вето)

Комбинированный отбор β - n распадов в активном объёме аргона, разыграно 100000 событий

Изотопы Критерии	C16	O22	F22	F23	N17	Al31	Si36	P38
(nclusNR == 1) && (IsFV20 == 1)	2509	3221	2655	1064	1642	534	13339	918
&& (abs(cl_z) < 100)	1468	1853	1459	597	905	294	9059	553
&& (7.5 < cl_ene < 50)	429	631	224	352	279	191	2	280
&& (cl_elec < cl_nucl)	424	631	209	351	278	184	< 1	264
&& (energyER < 50) && (late_eneVeto_Ar < 200)	3	104	28	4	2	29	< 1	2

Комбинированный отбор β - n распадов в среднем объёме аргона, разыграно 100000 событий

Изотопы Критерии	C16	O22	F22	F23	N17	Al31	Si36	P38
(nclusNR == 1) && (IsFV20 == 1)	353	329	279	366	806	389	193	371
&& (abs(cl_z) < 100)	222	212	177	226	712	238	117	241
&& (7.5 < cl_ene < 50)	17	5	2	15	104	17	< 1	16
&& (cl_elec < cl_nucl)	17	5	2	15	102	17	< 1	16
&& (energyER < 50) && (late_eneVeto_Ar < 200)	2	< 1	< 1	2	< 1	2	< 1	2

Отбор нейтронов по критериям от β -n распадов во внешнем объёме аргона, разыграно 4500000 событий

Изотопы	C16	N17	O22	F22	F23	Al31	Si36	P38
Доля отобранных нейтронов	2,23 · E-06	9,05 · E-07	2,16 · E-07	2,13 · E-07	3,58 · E-06	3,13 · E-06	< 2,13 · E-07	3,87 · E-06

Итоговое количество событий в активном аргоне

Изотопы	$T_{1/2}$, с	Выход изотопов в активном Ar за 10 лет	Выход нейтронов в активном Ar за 10 лет	Кол-во нейтронов в послеотсечки вето 5 с	Итоговое кол-во после отбора
C16	0,747	1,15	1,14	1,10E-02	3,30E-07
N17	4,173	20	19	8,28	1,66E-04
O22	2,25	2	0,02	4,29E-03	4,46E-06
F22	4,23	33	2,79	1,23	3,44E-04
F23	2,23	6	0,29	6,21E-02	2,49E-06
Al31	0,747	93	1,49	6,85E-03	1,99E-06
Si36	0,450	12	1,20	5,43E-04	<5,43E-09
P38	0,640	29	3,48	1,55E-02	3,10E-07
Всего		196,15	29,4	9,61	5,19E-04

Итоговое количество событий в объёме нейтронного вето

Изотопы	$T_{1/2}$, с	Выход изотопов в среднем Ar за 10 лет	Выход нейтронов в среднем Ar за 10 лет	Кол-во нейтроно в после отсечки вето 5 с	Итоговое кол-во после отбора
C16	0,747	2	1,98	1,91E-02	3,83E-07
N17	4,173	34	32,3	14,08	<1,41E-04
O22	2,25	3,2	0,032	6,86E-03	<6,86E-08
F22	4,23	50	4,23	1,86	<1,86E-05
F23	2,23	12	0,588	1,24E-01	2,49E-06
Al31	0,747	159	2,54	1,17E-02	2,34E-07
Si36	0,450	19	1,9	8,59E-04	<8,59E-09
P38	0,640	56	6,72	2,98E-02	5,98E-07
Всего		335	50,3	16,13	<1,63E-04

Итоговое количество событий от внешнего объёма аргона

Изотопы	$T_{1/2}$, с	Выход изотопов во внешнем Ar за 10 лет	Выход нейтронов во внешнем Ar за 10 лет	Итоговое кол-во после отбора
C16	0,747	21	20,8	4,64E-05
N17	4,173	220	209	1,89E-04
O22	2,25	18	0,18	3,88E-08
F22	4,23	340	28,7	6,11E-06
F23	2,23	86	4,21	1,51E-05
Al31	0,747	1153	18,5	5,78E-05
Si36	0,450	115	11,5	<2,45E-06
P38	0,640	343	41,2	1,59E-04
Долгоживущие		2296	334	4,76E-04
Остальные		1670	276	5,05E-04
Всего		3966	610	9,81E-04

Итоговое количество событий во всём объёме детектора Darkside-20k

Объёмы	Итоговое количество фоновых событий за 10 лет
Активный аргон	5,2E-04
Аргон нейтронного вето	<1,6E-04
Внешний аргон	9,8E-04
Всего	<1,7E-03

Итоговое количество событий

- Общее итоговое количество WIMP-подобных событий во всём объёме детектора от β - n распадов составляет $< 1,7 \cdot 10^{-3}$ событий для экспозиции 200 тонн·год, которое является наименьшей оценочной компонентой в общий вклад всего фона эксперимента Darkside-20k.

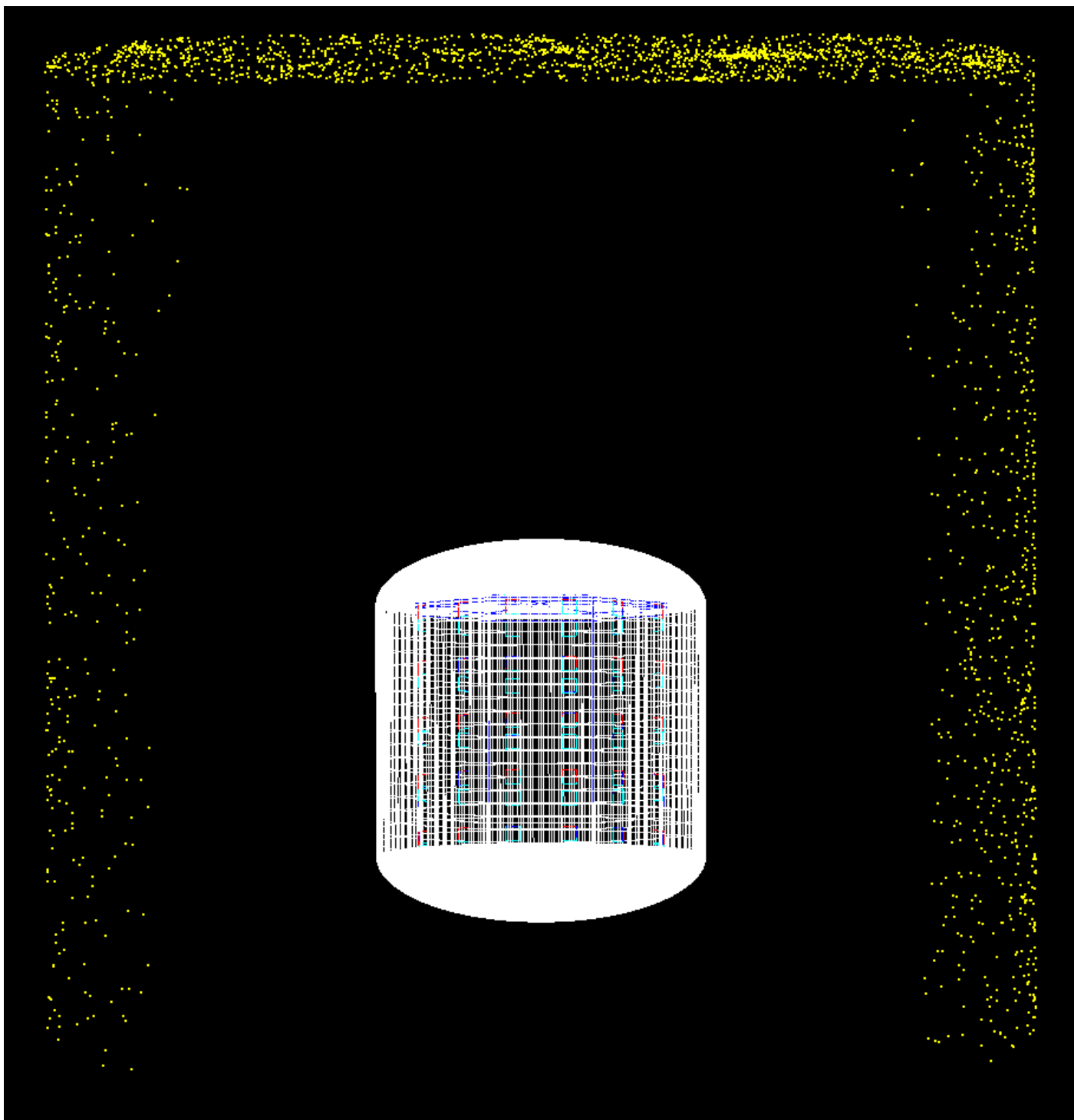
Тип фона	Фоновые события в ROI [200 тонн·год] ⁻¹
(α, n) нейтроны от ^{238}U , ^{235}U и ^{232}Th	9.5×10^{-2}
Мгновенные нейтроны от деления ^{238}U	$< 2.3 \times 10^{-3}$
Нейтроны от ^{222}Rn	$< 1.4 \times 10^{-2}$
Космогенные нейтроны	$< 6.0 \times 10^{-1}$
Нейтроны из горных пород	1.5×10^{-2}
Поверхностный α -распад + S2 совпадения	$< 5.0 \times 10^{-2}$
Коррелированные S1 + Черенков совпадения	$< 1.8 \times 10^{-2}$
Некоррелированные S1 + Черенков совпадения	$< 3.0 \times 10^{-2}$
^{39}Ar , космогенная активация и γ радиоактивность	$< 1.0 \times 10^{-1}$

Заключение

- В выпускной работе был изучен фон установки Darkside-20k, возникающий в результате образования космогенных изотопов.
- Была разработана программа в пакете Geant4, моделирующая прохождение мюонов и вторичных частиц космогенного происхождения через установку Darkside-20k, получен выход $\beta - n$ изотопов в детекторе за 10 лет эксплуатации.
- Было проведено моделирование $\beta - n$ распадов космогенного происхождения в установке Darkside-20k.
- Впервые получены результаты оценки фона от событий, имитирующих WIMP, возникших в результате взаимодействия запаздывающих нейтронов от $\beta - n$ изотопов, которая составила $< 1,7 \cdot 10^{-3}$ событий в детекторе для экспозиции 200 тонн·год. Полученные результаты будут использоваться в коллаборации Darkside для анализа общего фона детектора.

Спасибо за внимание

Расположение космических частиц (жёлтым) относительно объёма нейтронного вето (белым)



β -n переходы C16

Энергетические уровни

— энергия нейтрона,

бета-электрона :

Level 6.003

— $E_n = 3294.5$ keV

$E_{e^-,max} = 2009$ keV

Level 4.320

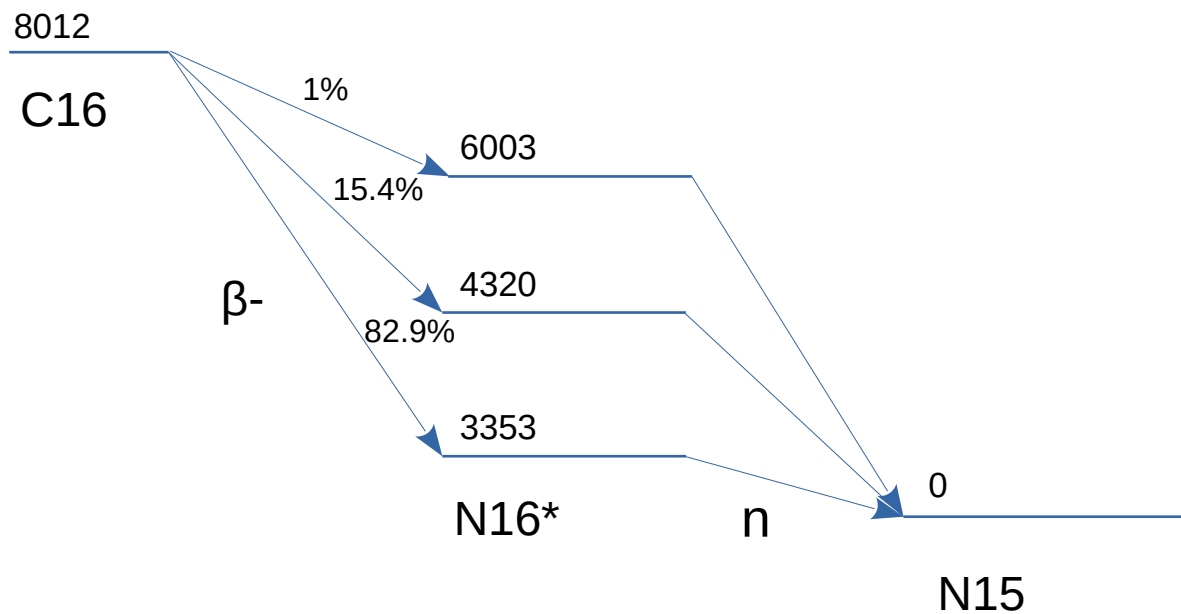
— $E_n = 1716.7$ keV

$E_{e^-,max} = 3692$ keV

Level 3.353

— $E_n = 810.1$ keV

$E_{e^-,max} = 4659$ keV

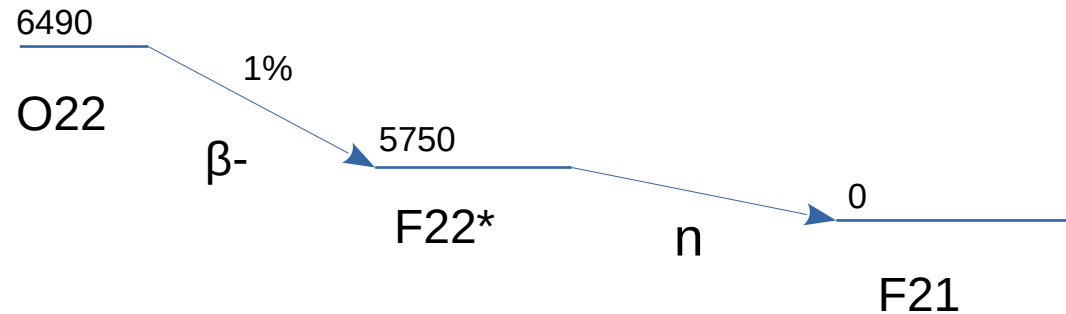


Возможный β -n переход O22

$S_n = 5230 \text{ keV}$ - энергия, необходимая для отделения нейтрона от F22

Возможный энергетический уровень F22 с наибольшей энергией излучаемого нейтрона $E = 5750 \text{ keV}$

$$E_n = 520 \text{ keV} \quad E_{e^-, \max} = 740 \text{ keV}$$

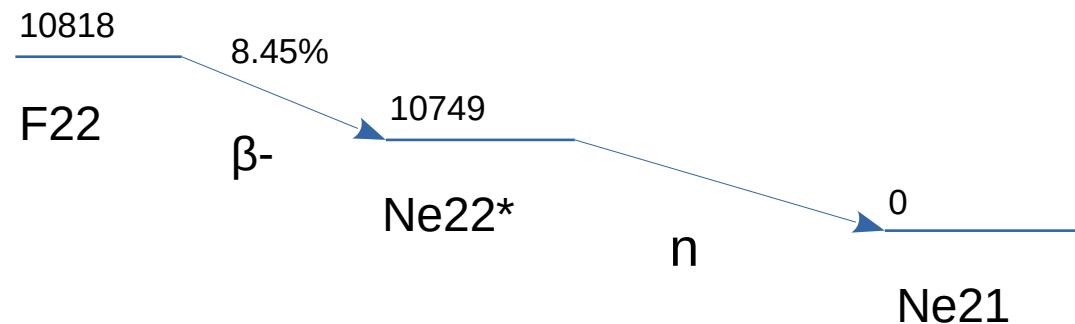


Возможный β -n переход F22

$S_n = 10364 \text{ keV}$ - энергия, необходимая для отделения нейтрона от Ne22

Возможный энергетический уровень Ne22 с наибольшей энергией излучаемого нейтрона $E = 10749 \text{ keV}$

$$E_n = 385 \text{ keV} \quad E_{e^-, \max} = 69 \text{ keV}$$

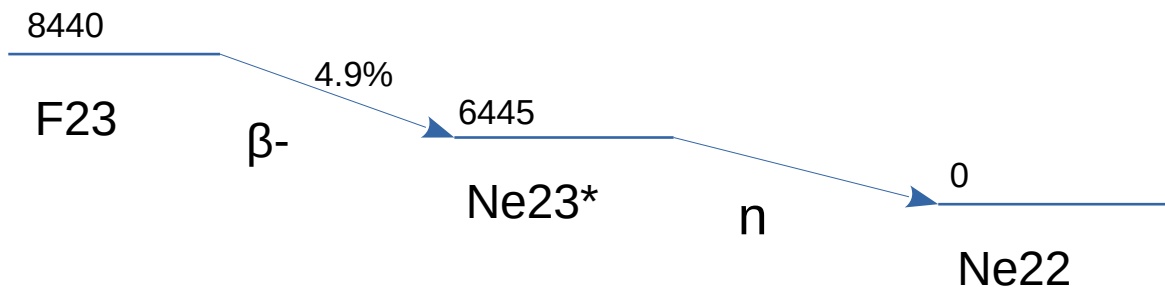


Возможный β -n переход F23

$S_n = 5201 \text{ keV}$ - энергия, необходимая для отделения нейтрона от Ne23

Возможный энергетический уровень Ne23 с наибольшей энергией излучаемого нейтрона $E = 6445 \text{ keV}$

$$E_n = 1244 \text{ keV} \quad E_{e-,max} = 1995 \text{ keV}$$

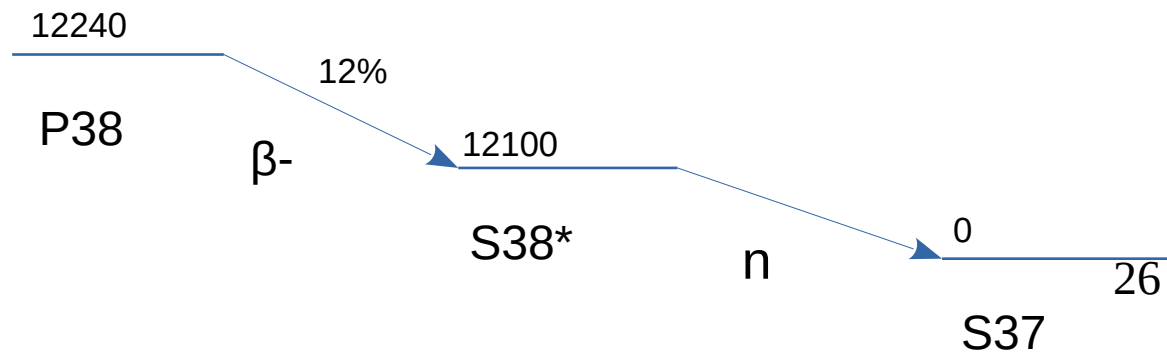


Возможный β -n переход P38

$S_n = 8036 \text{ keV}$ - энергия, необходимая для отделения нейтрона от S38

Нет возможного энергетического уровня S38 для отделения нейтрона

$$E_n = 4064 \text{ keV} \quad E_{e-,max} = 140 \text{ keV}$$



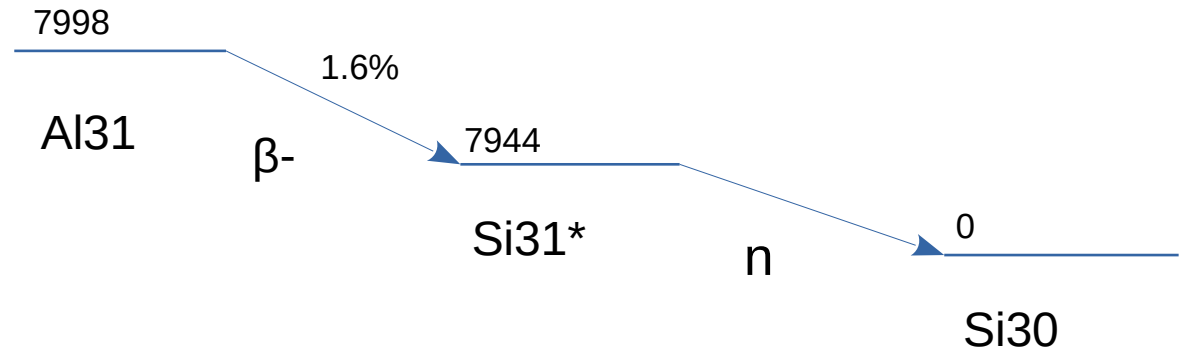
Возможный β -n переход Al31

$S_n = 6587 \text{ keV}$ - энергия, необходимая для отделения нейтрона от Si31

Возможный энергетический уровень Si31 с наибольшей энергией излучаемого нейтрона $E = 7944 \text{ keV}$

$$E_n = 1357 \text{ keV}$$

$$E_{e^-, \max} = 54 \text{ keV}$$



Возможный β -n переход Si36

$S_n = 3465 \text{ keV}$ - энергия, необходимая для отделения нейтрона от P36

Возможный энергетический уровень P36 с наибольшей энергией излучаемого нейтрона $E = 3630 \text{ keV}$

$$E_n = 165 \text{ keV}$$

$$E_{e^-, \max} = 4180 \text{ keV}$$

