

Новые пределы на вероятности непаулевских переходов в ядрах, полученные на данных эксперимента Борексино

А. Дербин, И. Мачулин, В. Муратова, О. Смирнов, Ю. Суворов, К. Фоменко



Детектор Борексино расположен под горной грядой Gran Sasso (Италия), обеспечивающей защиту от космического излучения на уровне 3500 м.в.э.

Ядро детектора (Inner Vessel): 278 тонн жидкого сцинтиллятора (PC+PPO) в нейлоновой оболочке радиуса 4.25 м

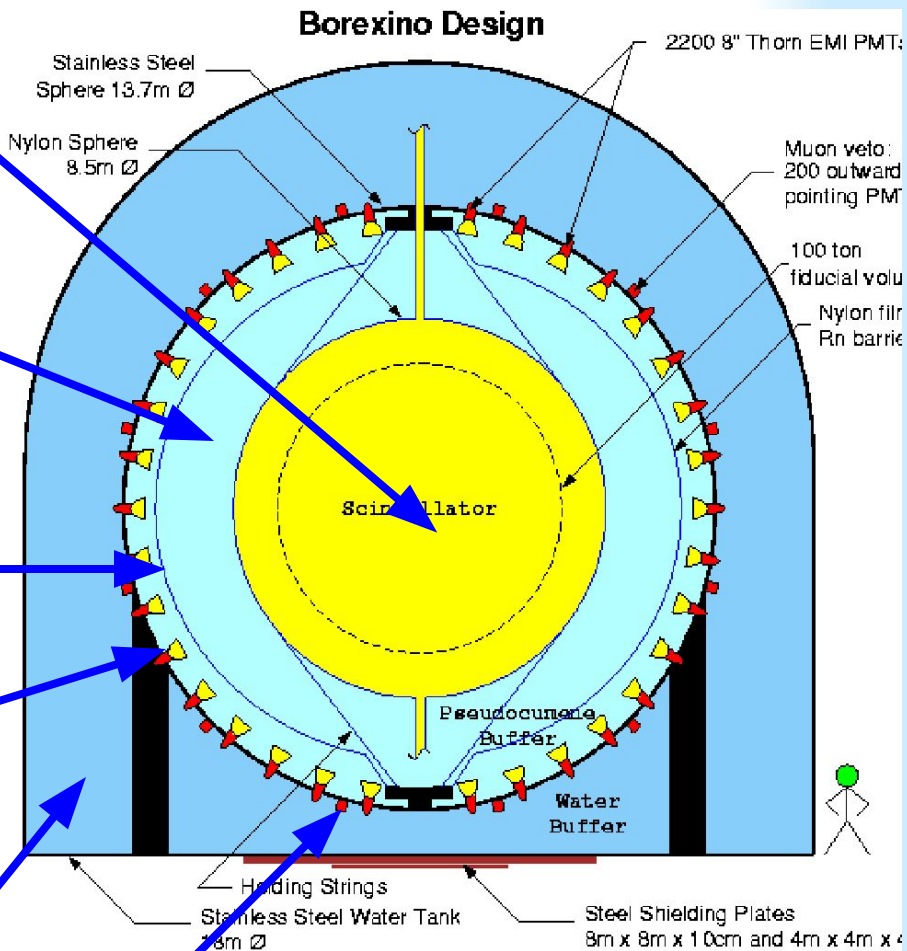
1^й барьер: 890 тонн сверхчистого буферного раствора (PC+гаситель) в стальной сфере (SSS) радиусом 6.75 м

Внешняя нейлоновая оболочка: защита от Rn, выделяемого SSS и ф.-умножителями

2212 фотоумножителей, направленных на внутреннюю область сцинтиллятора (1843 из них с оптическими концентраторами)

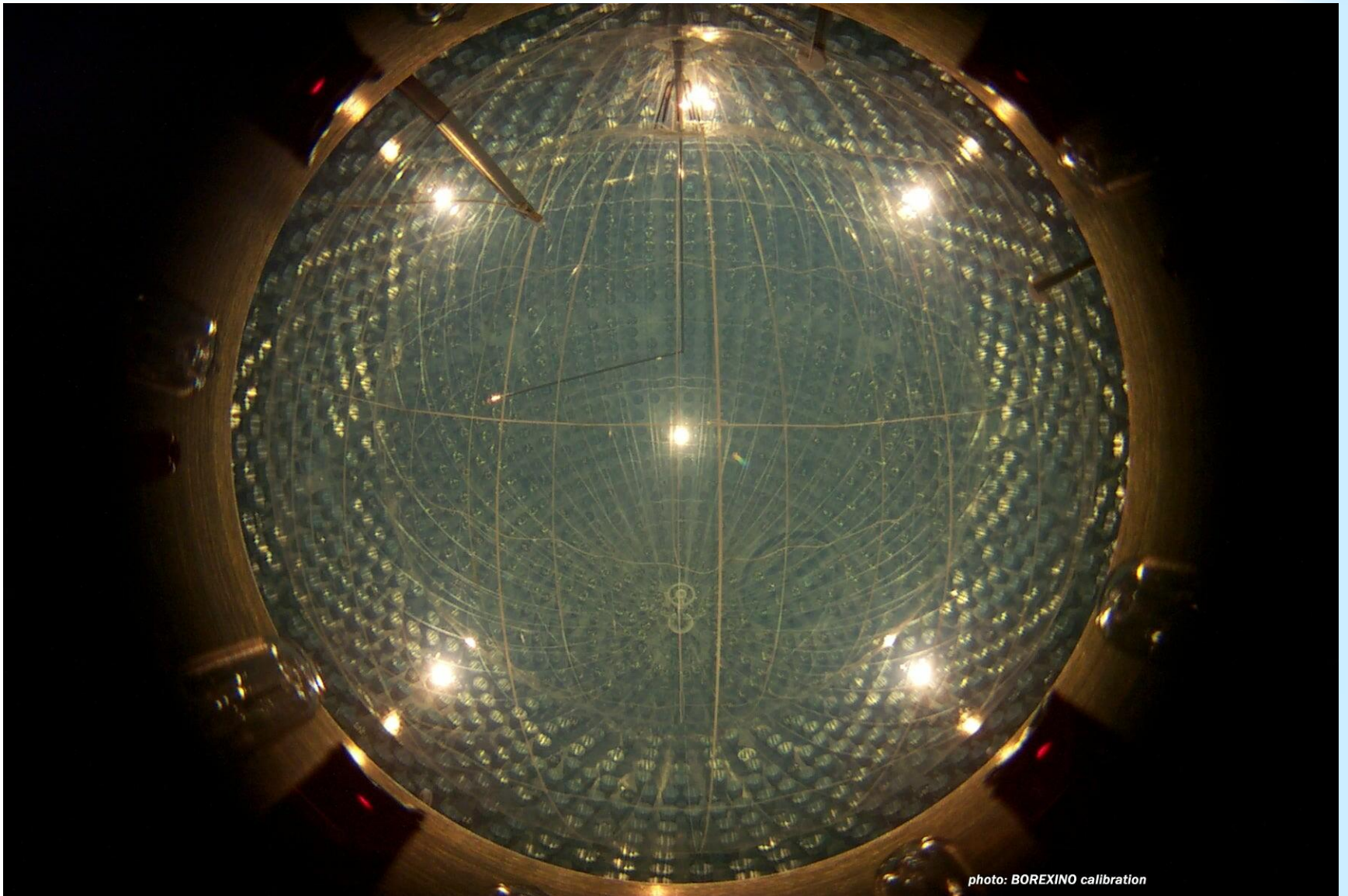
2^й барьер: 2100 тонн сверхчистой воды в цилиндрическом объеме

208 ф.-умножителей, направленных в воду для детектирования черенковского излучения от μ





Вид детектора изнутри (Inner and Outer Vessels)



25/11/2009



Принцип запрета Паули (ПП).

"There can never be two or more equivalent electrons in the atom. These are defined to be electrons for which ... the values of all quantum numbers ... are the same." W. Pauli, 1925

КМ: волновая функция системы электронов антисимметрична по отношению к перестановке координат (пространственных или спиновых) любых двух электронов (P. Dirac, 1930)

КТП: следует из факта антикоммутируемости операторов рождения/уничтожения фермионов

1930-1980 гг.:

Э. Ферми – обсуждение следствий "слабой" нетождественности электронов (1934)

В.Л. Любошиц, М.И. Подгорецкий – модель, в которой электрон есть суперпозиция большого числа почти вырожденных состояний с данной массой (1971)

Р. Амадо, Г. Примаков – указано на невозможность (в рамках квантовой механики) запрещенных переходов для тождественных частиц, даже если ПП нарушается (1980)

1987 г.:

А.Ю. Игнатъев, В.А. Кузьмин – первая модель с малым параметром, характеризующим степень нарушения (введение матриц 3×3 для операторов рождения/уничтожения фермионов)

Л.Б. Окунь, О. Гринберг, Р. Мохapatра (1987-89) – попытки обобщения модели Игнатъева-Кузьмина на случай бесконечного числа уровней (поле); однако А.Б. Говорков показал (1989), что в таких теориях существуют состояния с отрицательной нормой

=> "... невозможно построить свободную теорию поля с малым нарушением статистики Ферми или Бозе. Мы не думаем, что взаимодействия изменят ситуацию."

O.W. Greenberg, R.N. Mohapatra, Preprint University of Maryland, UM PP No. 89-030 (1999)

А.Д. Долгов, А.Ю. Смирнов (2005) – рассмотрение космологических следствий нарушения ПП



Основные эксперименты

*"В фундаментальной физике, если что-то может быть проверено, оно должно быть проверено."
Л.Б. Окунь*

ПОИСК АТОМОВ В АНОМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЯХ:

1989-91 Novikov et al., Nolte et al.

масс-спектрометрический поиск аномальных атомов Ne и Ar в образцах F и Cl

1990 Ramberg, Snow

поиск рентгеновского излучения от проводника (Cu) с током (улучшение методики планируется VIP Colab.)

1995 Deilamian et al.,

1996 Hilborn et al., M. de Angelis et al.

поиск атомов ^4He и ^{16}O в аномальном состоянии методами молекулярной и лазерной спектроскопии.

1998 Varabash et al.

поиск аномальных атомов C в образцах B (γ -активационный анализ)

2000 Javorsek et al.

поиск атомов Be с 4 электронами в 1s-состоянии

ПОИСК ЗАПРЕЩЕННЫХ ПЕРЕХОДОВ В АТОМАХ И ЯДРАХ:

1948 Goldhaber, Scharff-Goldhaber

поиск рентгеновского излучения от захвата β частиц в свинце

1974 Reines, Sobel

поиск рентгеновского излучения от переходов e^- с L-оболочки на K-оболочку

1979 Logan, Ljubicic

поиск γ -излучения при 2P-1S переходах нуклонов в ядрах ^{12}C

переходы с излучением γ :

Kamiokande, NEMO-II

переходы с излучением протонов:

Elegant-V, DAMA/LIBRA

переходы с излучением нейтронов:

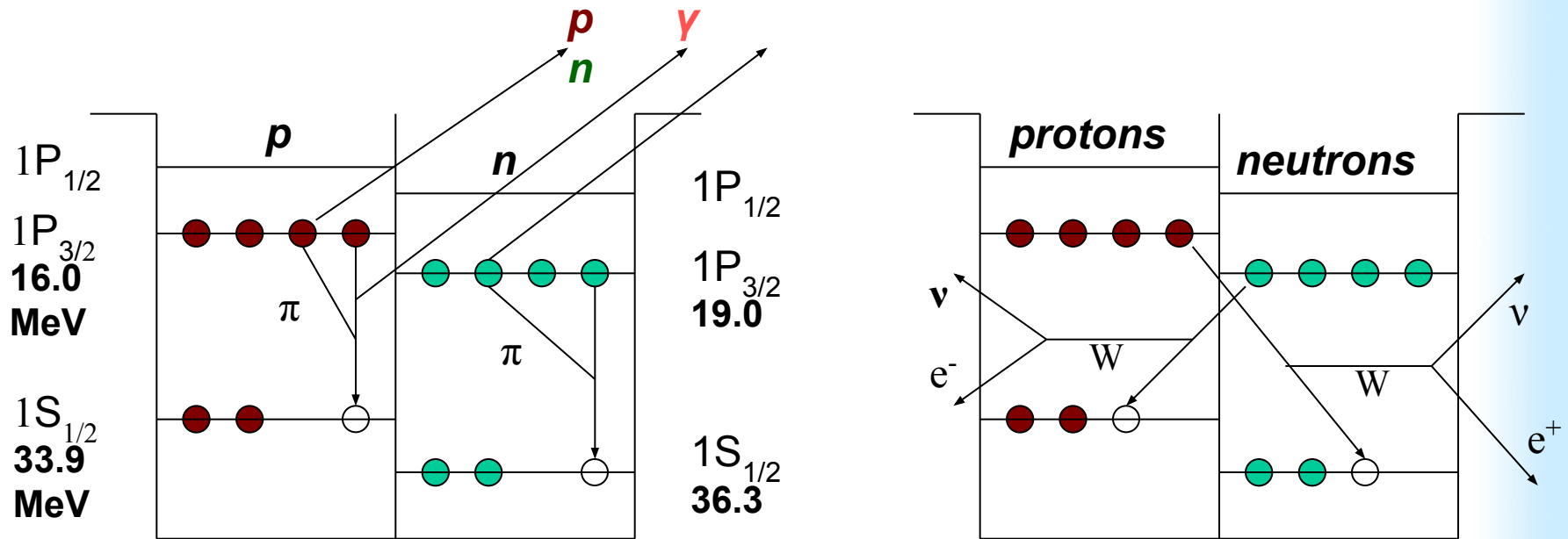
Koshimoto et al.

NP β^+ и β^- распады:

LSD, NEMO-II, Kekez et al.

Counting Test Facility (CTF)

Схема уровней ядра ^{12}C в оболочечной модели



Попытка наблюдения непаулевских (NP) переходов была предпринята для ядер ^{12}C , содержащихся в молекулах сцинтиллятора.

Переходы нуклонов с P-оболочки на заполненную S-оболочку приводят к образованию **непаулевских ядер $^{12}\text{C}^{\text{NP}}$ в возбужденном состоянии**. Энергия возбуждения $^{12}\text{C}^{\text{NP}}$ сравнима с энергиями отделения нуклонов, разрядка ядер может идти с **излучением γ , p , n , d , α , ...** Также были рассмотрены **непаулевские переходы для β^\pm - процессов**.

В работе осуществлена попытка наблюдения γ , n , и p , испускаемых при NP переходах, а также запрещенных ПП β^\pm - распадов.



Реакции с $Q > 0$

Реакция	Q, MeV	E, MeV
$^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{C}^{\text{NP}} + \gamma$	16.4÷19.4	16.4÷19.4
$^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B}^{\text{NP}} + p$	5.0÷9.0	4.6÷8.3
$^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{C}^{\text{NP}} + n$	3.5÷7.9	3.2÷7.3
$^{12}\text{C} \rightarrow ^8\text{Be}^{\text{NP}} + \alpha$	3.0÷7.0	0.07÷0.25
$^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{N}^{\text{NP}} + e^- + \nu$	18.9 ± 2	0.0÷18.9
$^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{B}^{\text{NP}} + e^+ + \nu$	17.8 ± 2	0.0÷17.8

E.M.

STRONG

WEAK

Переходы с $Q < 0$:

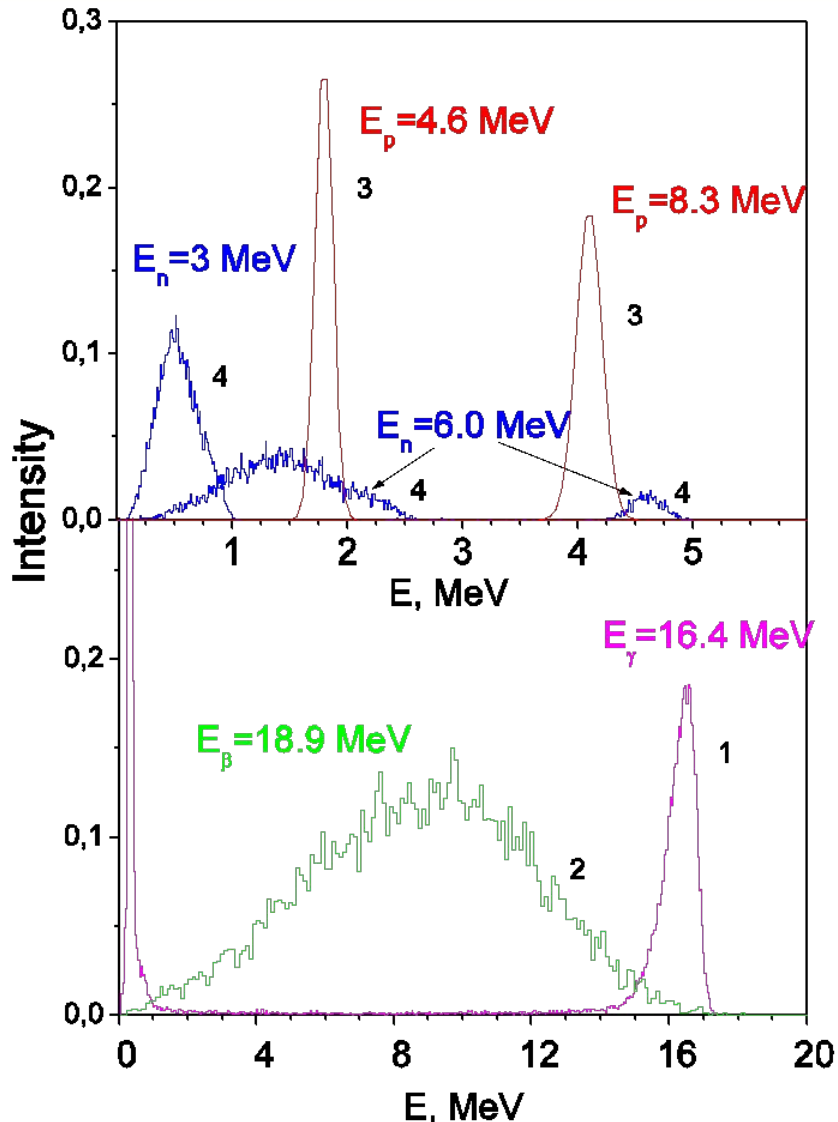
Признаком NP-перехода с двумя частицами в конечном состоянии является **гауссов пик** в измеряемом спектре. Для реакций с нейтрино регистрируются **β^\pm спектры**.

При расчете энергии регистрируемой частицы следует учесть энергию ядра отдачи. Количество образующихся фотонов зависит от коэффициента гашения (quenching factor)

$^{12}\text{C} \rightarrow ^{10}\text{B}^{\text{NP}} + d$	-(0.6÷1.5)
$^{12}\text{C} \rightarrow ^9\text{B}^{\text{NP}} + t$	-(4÷5)
$^{12}\text{C} \rightarrow ^9\text{Be} + ^3\text{He}$	-(13÷15)
$^{12}\text{C} \rightarrow ^6\text{Li} + ^6\text{Li}^{\text{NP}}$	-(6÷9)
$^{12}\text{C} \rightarrow ^6\text{Li}^{\text{NP}} + ^4\text{He} + d$	-(12÷14)



Функции отклика и калибровка детектора



1. $^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{C}^{\text{NP}} + \gamma$ (16.4 MeV)
Inner Vessel плюс 1 м буфера
2. $^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{N}^{\text{NP}} + e^- + \nu$ (18.9 MeV)
Inner Vessel
3. $^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B}^{\text{NP}} + p$ (4.6 and 8.3 MeV)
Fiducial Volume
4. $^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{C}^{\text{NP}} + n$ (3.0 and 6.0 MeV)
Inner Vessel

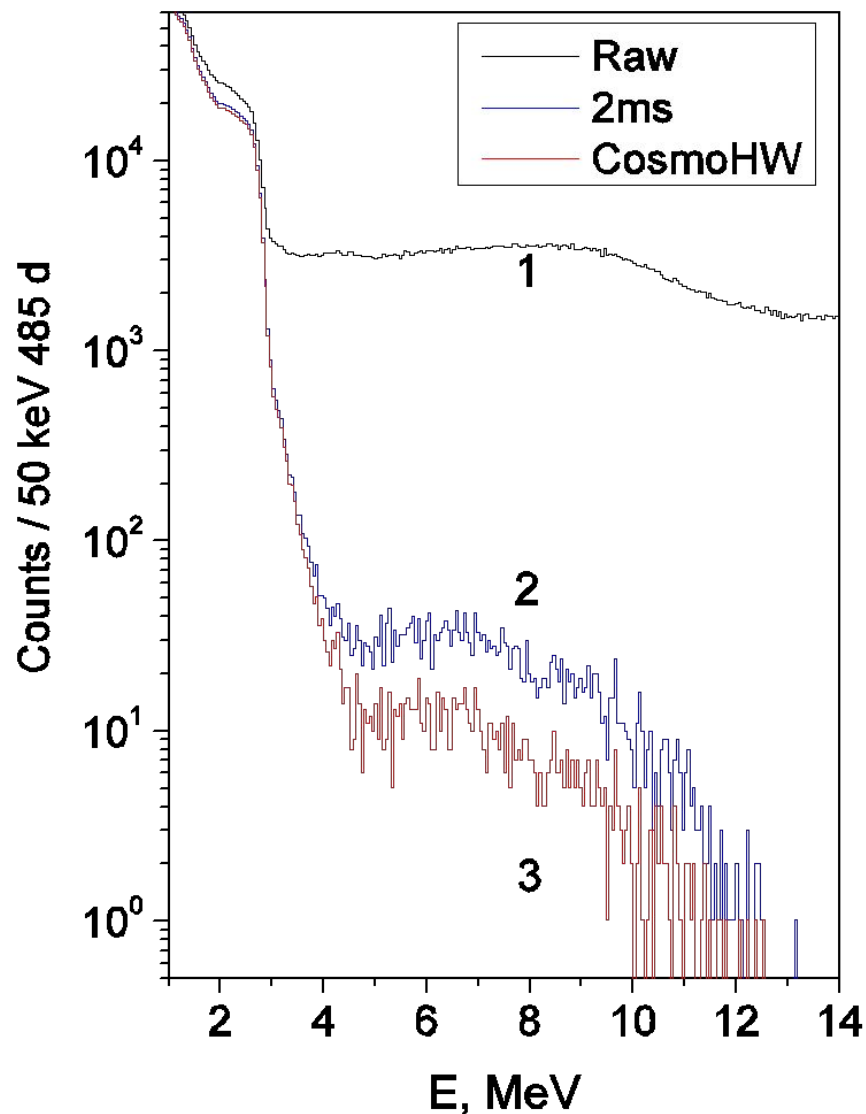
Измерения с источником $^{241}\text{Am}^9\text{Be}$:

$$E = 0.00209 \times q - 0.029$$

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{0.058 + 1.1 \times 10^{-3} E}{\sqrt{E}}$$



Спектр высокоэнергетических событий



1. Все события за 485 дней

2. С вычитанием событий в интервале 2мс после мюона

3. С вычитанием событий в интервале 0.7с после мюонов пересекших SSS (суммарное "мертвое" время – 16 дней):
⁹Li (178 мс), ⁸He (119 мс)

События с $E > 12.5$ MeV
ОТСУТСТВУЮТ



$$\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{C}^{\text{NP}} + \gamma) \geq 5.0 \cdot 10^{31} \text{ лет}$$

Предел на вероятность перехода $^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{C}^{\text{NP}} + \gamma$ установлен исходя из экспериментального результата - **не было зарегистрировано ни одного события с энергией более 12.5 MeV** (не коррелированного с сигналом мюонного вето). Нижний предел на время жизни для перехода нуклона с Р-оболочки на заполненную $1S_{1/2}$ -оболочку составляет:

$$\tau \geq \varepsilon_{\Delta E} \frac{N_N N_{p+n}}{S_{\text{lim}}} T = 5.0 \times 10^{31} \text{ лет} \quad (90\% \text{ у.д.})$$

$\varepsilon_{\Delta E} \approx 0.50$ эффективность регистрации события в интервале энергий ΔE ;
 $N_N = 2.37 \cdot 10^{31}$ (**533 т**) число атомов ^{12}C в рассматриваемом объеме;
 $N_{p+n} = 8$ число нуклонов, для которых возможны непаулевские переходы;
 $T = 467.8$ **дней** время набора данных ("живое" время);
 $S_{\text{lim}} = 2.44$ верхний предел на число возможных событий при 90% у.д.

G.L. Feldman, R.D.Cousins, PRD57, 3873 (1998)

детектор	масса, т	время, дней	$\varepsilon_{\Delta E}$	Фон, $(\text{keV } 100 \text{ тонн год})^{-1}$ при 2 MeV
CTF	4.2 / 2.9	29	0.042	420
BOREXINO	533 / 100	485	0.50	2.2

Предел, установленный на детекторе Борексино, на 4 порядка величины сильнее, чем предел, установленный на прототипе Борексино – CTF.



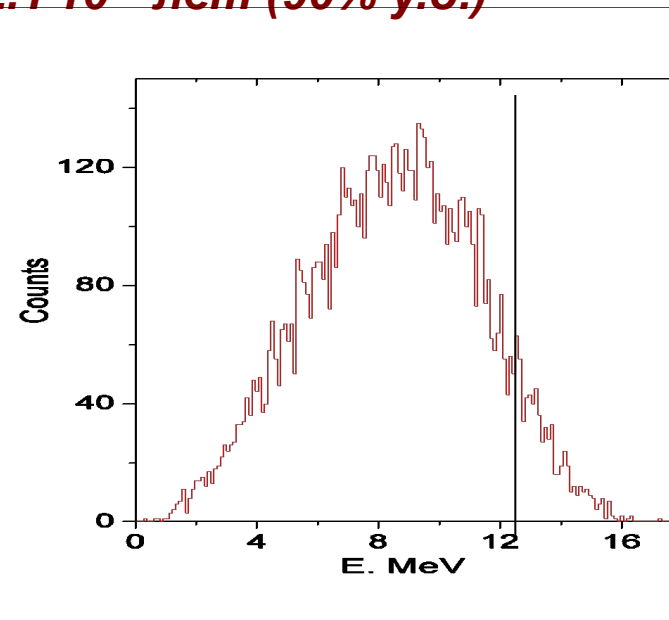
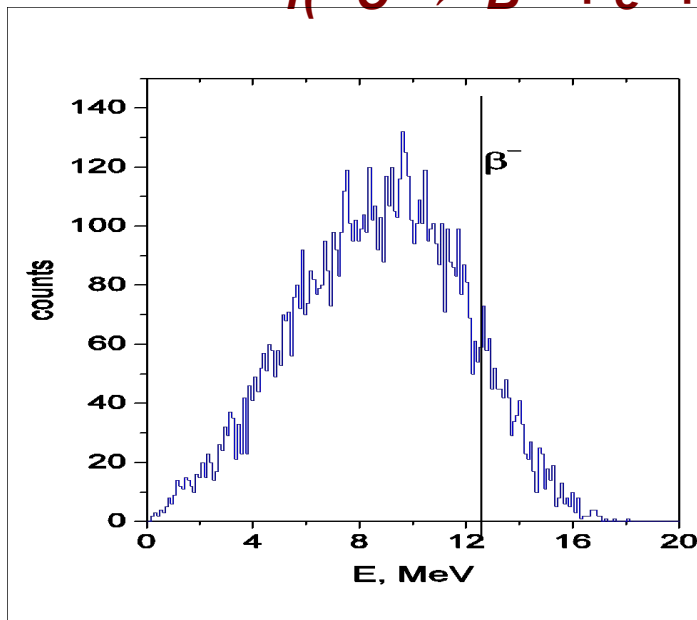
$$\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{N}^{\text{NP}} + e^- + \nu) \geq 3.1 \cdot 10^{30} \text{ л}, \quad \tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{B}^{\text{NP}} + e^+ + \nu) \geq 2.1 \cdot 10^{30} \text{ л}$$

Пределы, устанавливаемые на вероятности NP β^\pm - переходов, основываются на факте **отсутствия событий с энергией выше 12.5 MeV**.

Вероятности регистрации β^\pm -частиц с энергией $E > 12.5 \text{ MeV}$ были определены с помощью метода МК и составляют $\epsilon_{\Delta E} \approx 0.23$ и $\epsilon_{\Delta E} \approx 0.16$ для реакций $^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{N}^{\text{NP}} + e^- + \nu$ и $^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{B}^{\text{NP}} + e^+ + \nu$, соответственно. Полученные пределы на времена жизни:

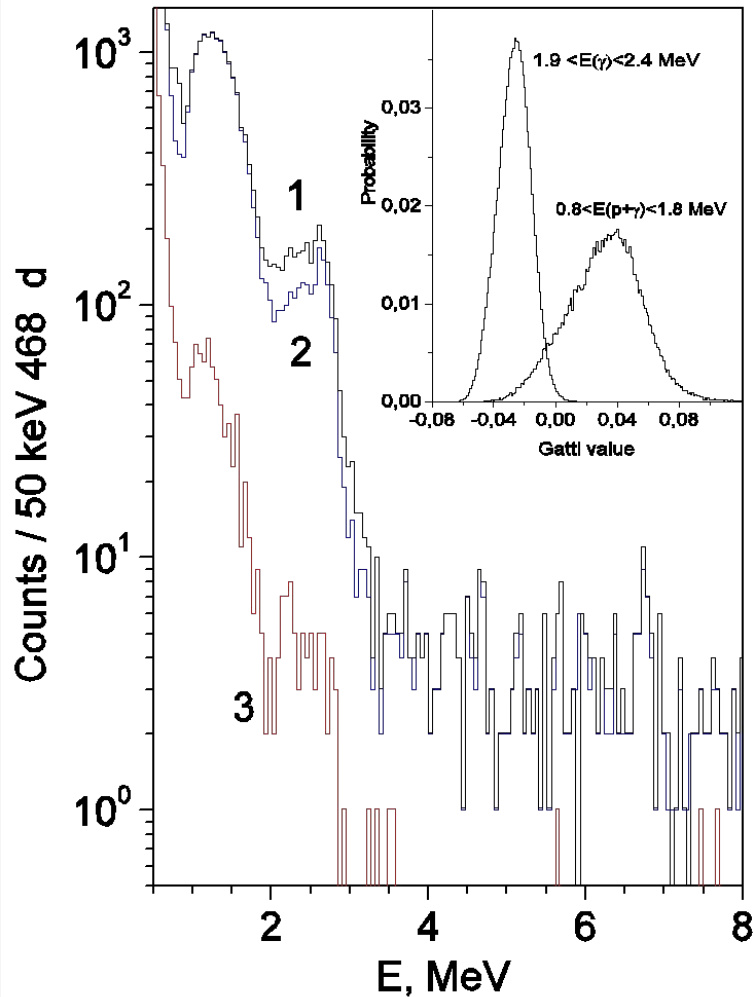
$$\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{N}^{\text{NP}} + e^- + \nu) \geq 3.1 \cdot 10^{30} \text{ лет (90\% у.д.)}$$

$$\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{B}^{\text{NP}} + e^+ + \nu) \geq 2.1 \cdot 10^{30} \text{ лет (90\% у.д.)}$$





Энергетический спектр в интервале 0.5-8.0 МэВ



1. Спектр событий внутри FV.
Удалены события в интервале $\Delta t = 0.7$ с после прохождения μ^-
2. Удалены пары коррелированных событий (с интервалом между сигналами $\Delta t \leq 2$ мс)
3. Оставлены события только с положительным значением параметра Гатти (протоны)

На вставке показаны значения параметра Gatti для протонов и γ (2.2 MeV), полученные с $AmBe$ источником



$$\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B}^{NP} + p) \geq 2.1 \cdot 10^{30} \text{ лет}$$

- **Положение пика:** 4.6-8.3 MeV (90% CL), соответствует 1.8-4.1 MeV по e^- шкале
- **Подгонка спектра после обрезания по FV:**
измеренный спектр подгонялся полиномиальной (фон) + гауссовой (сигнал) функциями; за исключением 2.614 MeV γ -пика от ^{208}Tl , мы получаем $S_{\text{lim}} = 52$ (90% CL), что для $M(\text{FV}) = 100$ тонн ($N_N = 4.45 \cdot 10^{30}$) дает:

$$\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B}^{NP} + p) \geq 8.9 \cdot 10^{29} \text{ лет}$$

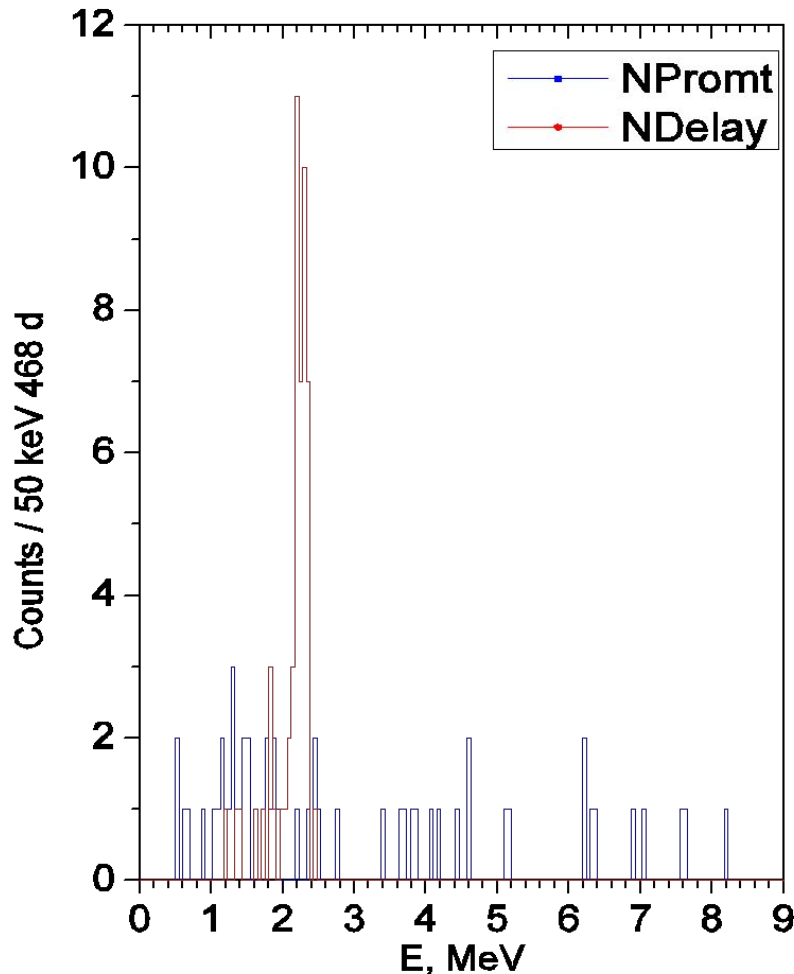
- **Подгонка спектра после выделения сигналов, связанных с протонами:**
эффективность выделения, определенная при измерениях с AmBe источником, составляет $\varepsilon = 0.89$. Процедура подгонки, аналогичная предыдущей, дает нижний предел на время жизни:

$$\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B}^{NP} + p) \geq 2.1 \cdot 10^{30} \text{ лет (90% у.д.)}$$



$$\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{C}^{NP} + n) \geq 3.4 \cdot 10^{30} \text{ лет}$$

- **Начальная энергия:** 3.2-7.3 MeV (90% у.д.), среднее время жизни $\tau \approx 250$ мкс; сечение захвата $n+p \rightarrow d+\gamma$ ($E_\gamma = 2.2$ MeV) составляет 0.33 барна (для ^{12}C – 3.5 мбарна, $E_\gamma = 4.95$ MeV)



- **Подгонка 2.2 MeV γ -пика:** положение и ширина (90 keV) пика хорошо известны, подгонка гауссом дает $S_{\text{lim}} = 57$:

$$\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{C}^{NP} + n) \geq 8.1 \cdot 10^{29} \text{ лет}$$

- **Пары коррелированных событий:**
 $E_p \geq 0.5$ MeV, 1.0 MeV $\leq E_d \leq 2.4$ MeV;
 20 мкс $\leq \Delta t \leq 1.25$ мс, $\Delta r \leq 2$ м;
 $r_p \leq 4.75$ м, $r_d \leq 4.75$ м; мертвое время
0.7 сек после μ для prompt-событий
52 пары, 33 из них – в пределах
возможного интервала энергий:

$$\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{C}^{NP} + n) \geq 3.4 \cdot 10^{30} \text{ лет} \\ (90\% \text{ у.д.})$$



Новые пределы, полученные Борексино

Реакция	E_0 , MeV	T_{lim} , лет BOREXINO	T_{lim} , лет CTF	Предыдущие пределы
$^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{C}^{\text{NP}} + \gamma$	17.5	$5.0 \cdot 10^{31}$	$2.1 \cdot 10^{27}$	$4.2 \cdot 10^{24}$ NEMO-II
$^{16}\text{O} \rightarrow ^{16}\text{O}^{\text{NP}} + \gamma$	21.8	-	$2.1 \cdot 10^{27}$	$1.0 \cdot 10^{32}$ Kamiokande
$^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B}^{\text{NP}} + p$	4.8-8. 2	$8.9 \cdot 10^{29}$	$5.0 \cdot 10^{26}$	$1.7 \cdot 10^{25}$ ELEGANT V. $6.9 \cdot 10^{24}$ DAMA (Na+I)
$^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{C}^{\text{NP}} + n$	2.2	$3.4 \cdot 10^{30}$	$3.7 \cdot 10^{26}$	$1.0 \cdot 10^{20}$ Kishimoto et al
$^{12}\text{C} \rightarrow ^8\text{Be}^{\text{NP}} + \alpha$	1.0-3. 0	-	$6.1 \cdot 10^{23}$	-
$^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{N}^{\text{NP}} + e^- + \nu_e$	18.9	$3.1 \cdot 10^{30}$	$7.6 \cdot 10^{27}$	$3.1 \cdot 10^{24}$ NEMO-II $\sim 8 \cdot 10^{27}$ LSD
$^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{B}^{\text{NP}} + e^+ + \nu_e$	17.8	$2.1 \cdot 10^{30}$	$7.7 \cdot 10^{27}$	$2.6 \cdot 10^{24}$ NEMO-II

Ограничения на вероятности NP переходов в ^{12}C с испусканием p-,n- и β^\pm -частиц – лучшие на настоящее время.

Ограничения на вероятности NP переходов в ^{12}C с испусканием γ сравнимы с результатами аналогичных тестов для ядер ^{16}O эксперимента Kamiokande.



Относительные напряженности NP-переходов

Пределы, полученные для времен жизни, могут быть выражены через скорости ($\lambda^{NP} = 1/\tau^{NP}$) и относительные напряженности NP-переходов по сравнению с нормальными ($\delta^2 = \lambda^{NP}/\lambda^{NT}$).

Реакция (канал)	$\lambda^{NP}, s^{-1}(^{12}C)$	$\Gamma^{NT} = \hbar\lambda^{NT}$	$\lambda^{NT}, s^{-1}(^{12}C)$	$\lambda^{NP}/\lambda^{NT}$	Предыд.
$^{12}C \rightarrow ^{12}C^{NP} + \gamma$	$5.0 \cdot 10^{-39}$	0.0015 MeV	$2.3 \cdot 10^{18}$	$\leq 2.2 \cdot 10^{-57}$	$2.3 \cdot 10^{-57}$
$^{12}C \rightarrow ^{11}B(C)^{NP} + p(n)$	$7.4 \cdot 10^{-38}$	12 MeV	$1.8 \cdot 10^{22}$	$\leq 4.1 \cdot 10^{-60}$	$3.5 \cdot 10^{-55}$
$^{12}C \rightarrow ^{12}N(B)^{NP} + e^{\pm} + \nu$	$4.1 \cdot 10^{-38}$	$1.4 \cdot 10^{-18}$ eV	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$\leq 2.1 \cdot 10^{-35}$	$6.5 \cdot 10^{-34}$

Ширина ядерного уровня для E1 γ -перехода с P- на S-оболочку, согласно оценке по формуле Вайскопфа – $\Gamma_{\gamma} \sim 1.5$ keV. Отношение $\lambda^{NP}/\lambda^{NT} \leq 2.2 \cdot 10^{-57}$ (90% у.д.)

Ширина уровня, связанная с излучением нуклонов, на 2-3 порядка больше. Измеренная ширина S-уровня для ^{12}C в реакциях (p,2p) и (p,pn) составляет $\Gamma_h \approx 12$ MeV. Предел на отношение скоростей распада - $\lambda^{NP}/\lambda^{NT} \leq 4.1 \cdot 10^{-60}$.

NP β_{\pm} -переходы являются запрещенными переходами первого порядка. Для таких переходов значения $\log(ft_{1/2})$ лежат в диапазоне от 6 до 9. Консервативная оценка для $\log(ft_{1/2}) = 9$ соответствует времени жизни $\tau_{\beta} \sim 500$ сек или ширине уровня $\Gamma_{\beta} = \hbar/\tau = 1.4 \cdot 10^{-18}$ eV. В результате - $\lambda^{NP}/\lambda^{NT} \leq 2.1 \cdot 10^{-35}$.

Полученные пределы на относительные напряженности NP переходов являются наиболее строгими в настоящее время.



Выводы

Уникальные характеристики детектора Борексино – рекордно низкий уровень фона, большая масса сцинтиллятора и низкий порог регистрации – позволили установить новые пределы на вероятности запрещенных переходов нуклонов с $1P_{3/2}$ -оболочки на $1S_{1/2}$ -оболочку в ядрах ^{12}C с испусканием γ , n , p и β^\pm частиц:

$$\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{C}^{\text{NP}} + \gamma) > 5.0 \cdot 10^{31} \text{ лет},$$

$$\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B}^{\text{NP}} + p) > 8.9 \cdot 10^{29} \text{ лет},$$

$$\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{C}^{\text{NP}} + n) > 3.4 \cdot 10^{30} \text{ лет},$$

$$\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{N}^{\text{NP}} + e^- + \nu) > 3.1 \cdot 10^{30} \text{ лет},$$

$$\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{B}^{\text{NP}} + e^+ + \nu) > 2.1 \cdot 10^{30} \text{ лет},$$

все пределы на 90% уровне достоверности

Данные пределы на NP переходы в ядрах ^{12}C с испусканием γ -, p -, n - и β^\pm являются наиболее строгими в настоящее время.



Borexino Collaboration



**Kurchatov
Institute
(Russia)**



**Jagiellonian U.
Cracow
(Poland)**



Genova



**Heidelberg
(Germany)**



Perugia



**APC
Paris**



Princeton University



Virginia Tech. University



**Munich
(Germany)**



**Dubna JINR
(Russia)**



Энергетический баланс NP переходов

Q реакции есть разница между энергиями связи E_b ядер в конечном и начальном состояниях. Обозначая непаулевское ядро X^{NP} , $Y = \gamma, p, n, d, \alpha \dots$:

$$Q(^{12}\text{C} \rightarrow X^{NP} + Y) = M(^{12}\text{C}) - M(X^{NP}) - M(Y) = E_b(X^{NP}) + E_b(Y) - E_b(^{12}\text{C})$$

Энергия связи непаулевского ядра $E_b(X_{p,n}^{NP})$ с 3 протонами или 3 нейтронами на S-оболочке может быть оценена через энергию связи нормального ядра $E_b(X)$ и разницу между энергией связи нуклонов на S-оболочке $E_{p,n}(1S_{1/2})$ и энергией отделения нуклона от ядра $S_{p,n}(X)$:

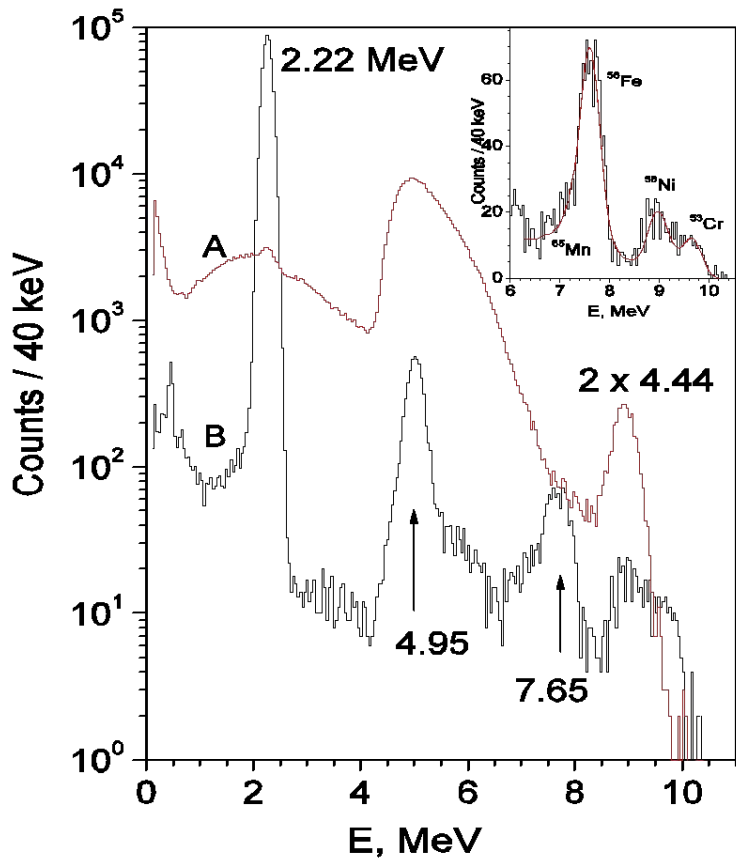
$$E_b(X_{p,n}^{NP}) \approx E_b(X) + E_{p,n}(1S_{1/2}) - S_{p,n}(X)$$

Энергии связи $E_b(X)$ ядер и энергии отделения нуклонов $S_{p,n}(X)$ хорошо известны. Энергии связи нуклонов на P- и S-оболочках легких ядер были измерены в реакциях $(p, 2p)$ и (p, np) рассеяния протонов с энергией 1 GeV.

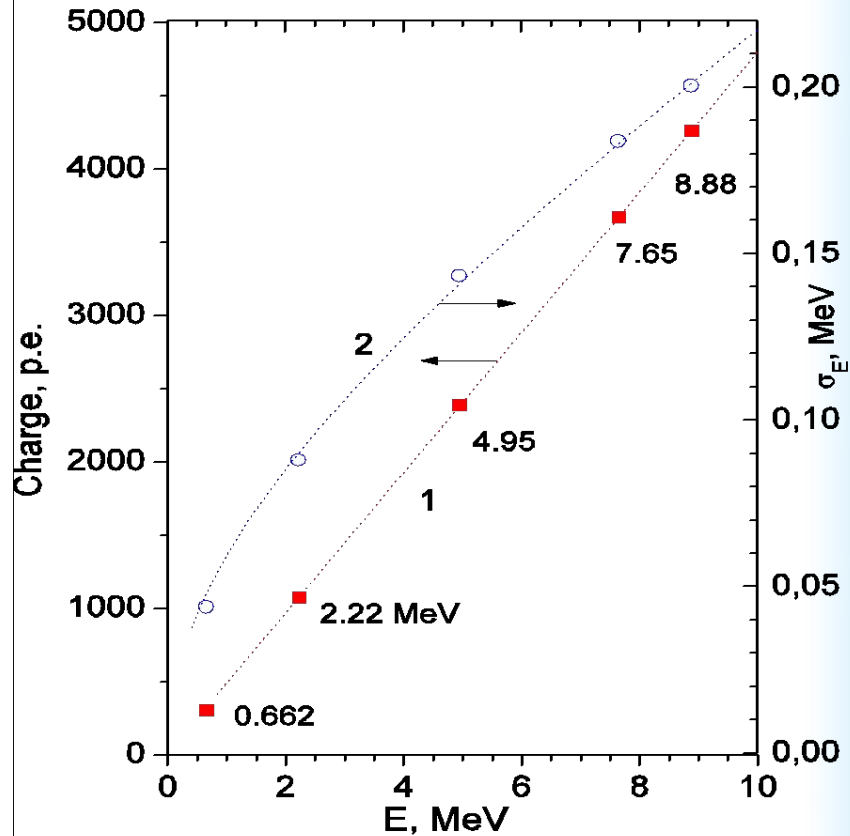
Belostotskii et al., Sov. J. of Nucl. Phys. 41, 903 (1085)



Калибровка: измерения с источником $^{241}\text{Am}^9\text{Be}$



$$E = 0.00209 \times q - 0.029$$



$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{0.058 + 1.1 \times 10^{-3} E}{\sqrt{E}}$$