

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

С. Б. Борзаков

**ЛНФ им. И.М. Франка, ОИЯИ,
Дубна, Россия**

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

- Введение. Нуклон-нуклонное взаимодействие при очень низких энергиях.
- Теория эффективного радиуса.
- Описание NN взаимодействия с помощью модели R-матрицы.
- Теоретические предсказания.
- Поиск синглетного дейтрона в радиационном захвате нейтронов протонами.
- Эксперименты по поиску динейтрона и нейтральных ядер.
- Возможные эксперименты.

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

Нуклон-нуклонное взаимодействие при очень низких энергиях.

Полный спин двух нуклонов: $\vec{J} = \vec{S}_1 + \vec{S}_2 + \vec{L}$

Если $\vec{L} = 0$, то возможны $\vec{J} = \vec{S}_1 + \vec{S}_2 = 1$ триплетное: $[np(^3S_1)]$

2 состояния:

или

$\vec{J} = \vec{S}_1 + \vec{S}_2 = 0$ синглетное: $[nn, np(^1S_0), pp]$

Полное сечение рассеяния:

$$\sigma = \frac{2 \cdot J^+ + 1}{2 \cdot (2 \cdot I + 1)} \sigma_+ + \frac{2 \cdot J^- + 1}{2 \cdot (2 \cdot I + 1)} \sigma_- = \frac{3}{4} \sigma_t + \frac{1}{4} \sigma_s$$

$$\sigma_{scat} = 4 \cdot \pi \cdot |F|^2$$

$$\sigma = \frac{3}{4} \sigma_t + \frac{1}{4} \sigma_s = \pi \cdot \left(3 \cdot |F_t|^2 + |F_s|^2 \right)$$

F – амплитуда рассеяния.

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

Нуклон-нуклонное взаимодействие при очень низких энергиях.

Амплитуда рассеяния (при $E_n \longrightarrow 0$):

$$F = \frac{1}{p \cdot \operatorname{ctg} \delta - i \cdot p} = \frac{1}{g(k) - i \cdot p}$$

$p = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2 \cdot \mu \cdot E}$ — импульс нейтрона.

$\mu = \frac{m_n \cdot m_p}{m_n + m_p}$ — приведённая масса

S - матрица:
$$S = 1 + 2ipF(p)$$

Нуклон-нуклонное взаимодействие при очень низких энергиях.

“Effective range theory”.

Н.А. Bethe, “Theory of effective Range in Nuclear Scattering”, Phys. Rev. v. 76, No.1, p. 38-50, 1948.

- Амплитуда рассеяния:

$$F = \frac{1}{-\frac{1}{a} + \frac{1}{2}rp^2 - ip} = \frac{1}{g(p) - ip}$$

$$p = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2 \cdot \mu \cdot E}$$

- neutron impulse.

$$g(k) = -\frac{1}{a} + \frac{1}{2}rp^2 + Pp^4 + Qp^6$$

a – длина рассеяния;

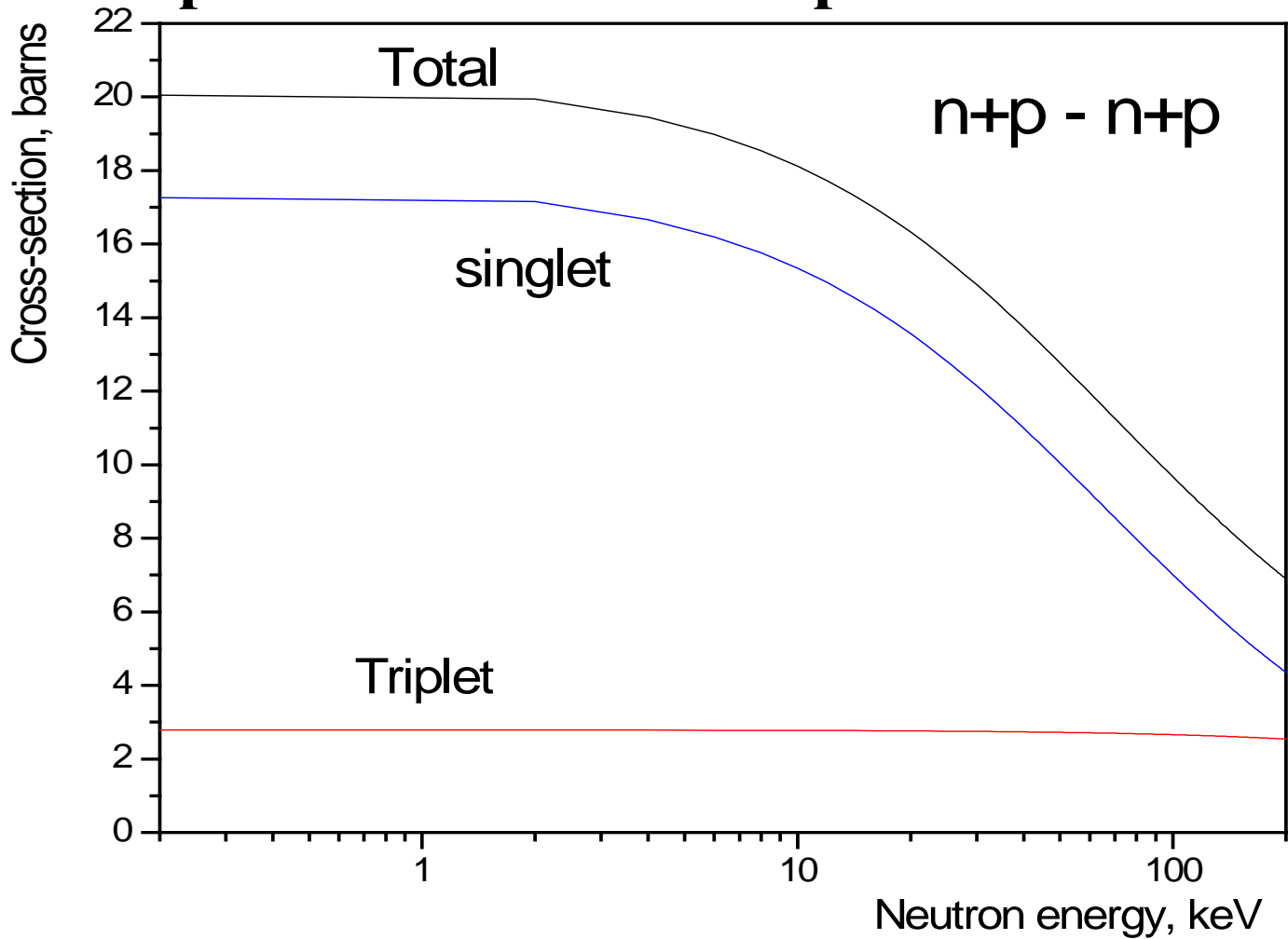
r – эффективный радиус.

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

Экспериментальные значения параметров рассеяния.

<i>NN</i>	Длина рассеяния, Фм.	Эффективный радиус, Фм.	P	Q
<i>pp</i>	$-7,822 \pm 0,004$	$2,83 \pm 0,017$	$0,051 \pm 0,014$	$0,028 \pm 0,013$
<i>np(¹S₀)</i>	$-23,719 \pm 0,013$	$2,76 \pm 0,05$		
<i>nn</i>	$-18,7 \pm 0,6$ $-16,5 \pm 0,9$			
<i>np(³S₁)</i>	$5,414 \pm 0,005$	$1,75 \pm 0,05$	$0,13 \pm 0,09$	

Нуклон-нуклонное взаимодействие при очень низких энергиях.



Сечение рассеяния нейтронов протонами.

NN взаимодействие при низких энергиях

n – p – cross section

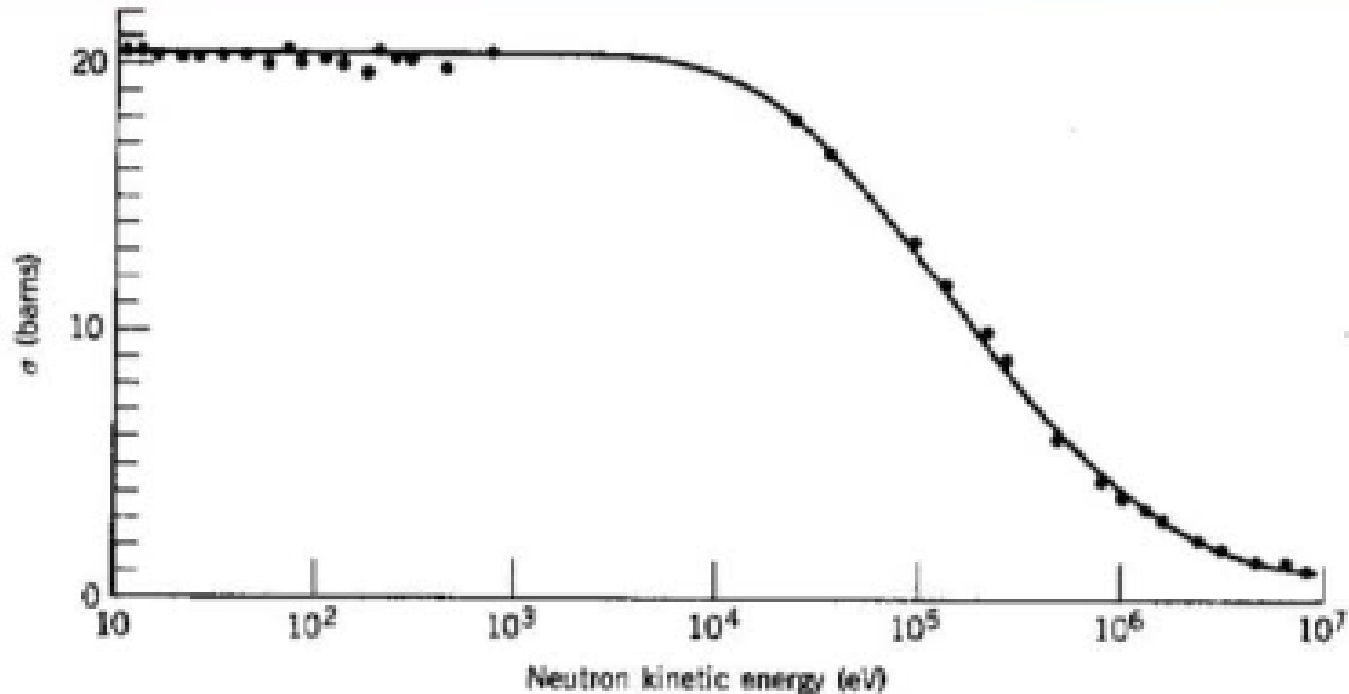


Figure 4.6 The neutron–proton scattering cross section at low energy. Data taken from a review by R. K. Adair, *Rev. Mod. Phys.* **22**, 249 (1950), with additional recent results from T. L. Houk, *Phys. Rev. C* **3**, 1886 (1970).

Нуклон-нуклонное взаимодействие при очень низких энергиях.

S-matrix

$$S = 1 + 2ipF$$

При отрицательной энергии: $E < 0 \Rightarrow p = i\kappa$ (κ – действительное число)

Полюса S- матрицы:

$$-\frac{1}{a} - \frac{1}{2} r\kappa^2 + \kappa = 0$$

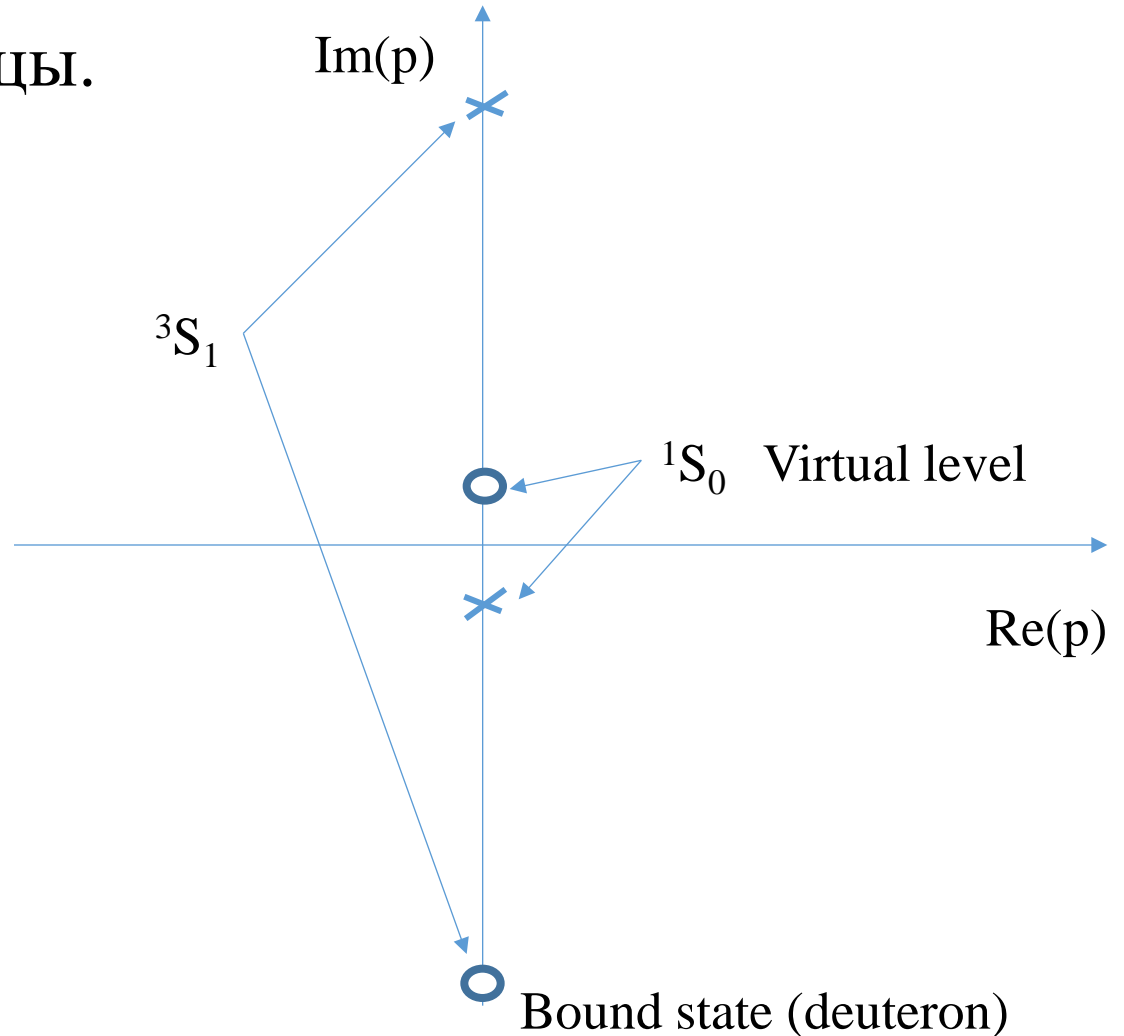
Два полюса для каждого
спинового состояния:

$$\kappa_{1,2} = \frac{1}{r} \pm \sqrt{\frac{1}{r^2} - \frac{2}{ar}}$$

State	κ , 1/Fm	E, MeV	Comment
3S_1 $a_t > 0$	0.232	- 2.225	Deuteron
	0.911	- 34.4	?
1S_0 $a_s < 0$	- 0.044	- 0.080	Virtual level
	0.68	- 19.2	?

NN взаимодействие при низких энергиях

Полюса S – матрицы.



Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

Вопросы.

- Как измерить энергию виртуального уровня?
- Какой физический смысл других полюсов S - матрицы?
- Как проявляется виртуальный уровень в электромагнитных взаимодействиях?
- Реакция радиационного $n\gamma$ захвата происходит из синглетного состояния. Как учесть в теории эффективного радиуса радиационный захват?
-

Для тепловых нейтронов: $\sigma_{n\gamma} = 334 \pm 0.5mb$

Interpretation of the Virtual Level of the Deuteron

S. T. MA*

Division of Physics, National Research Council, Ottawa, Canada

$$E_r = \frac{2}{ar} \frac{h^2}{2\mu}$$

”Only if there is no bound state capable to account for the low-energy cross section one is entitled to give definite statements about the existence of antibound states”

V. de Alfaro, T. Regge, ”Potential scattering”,
North-Holland Publishing Company - Amsterdam, 1965, p. 72.

***NN* взаимодействие при низких энергиях**

G.M. Hale, L.S. Brown, M.W. Paris, “Effective field theory as a limit of R-matrix theory for light nuclear reactions”, Phys. Rev. C89, 014623, 2014.

$$R(E, a) = \frac{\gamma^2(a)}{E_\lambda(a) - E}$$

$$e^{2i \cdot \delta_0(E)} = e^{-2i \cdot p \cdot a} \frac{1 + i \cdot p \cdot a \cdot R(E, a)}{1 - i \cdot p \cdot a \cdot R(E, a)}$$

$$g^2 = a \cdot \gamma^2$$

$$p \cdot \cot \delta_0(E) = \frac{1}{g^2} (E_\lambda - E)$$

$$a \longrightarrow 0 \quad E_\lambda = -1.27 \text{ MeV}$$

NN взаимодействие при низких энергиях

Два канала (упругое рассеяние и захват) : $A = a - ib$

Сечение захвата: $\sigma_c = \frac{4\pi b}{v}$ (закон $1/v$)

Сечение радиационного захвата тепловых нейтронов протонами:

- Прямой переход $^1S_0(\text{continuum}) - ^3S_1(\text{ground state})$
(энергия связи дейтрона 2224.56 кэВ).

$$\sigma_{n\gamma} = 334 \pm 0.5mb \quad b = 2.7 \cdot 10^{-4} \text{ ФМ.}$$

$$\sigma_{n\gamma 0}(M1) = 2\pi\alpha \frac{c}{v_n} (\mu_n - \mu_p)^2 \left(\frac{B_d}{Mc^2} \right)^{5/2} (\gamma^{-1} - a_s)^2$$

NN взаимодействие при низких энергиях

Виртуальный уровень или резонанс?

$$F = \frac{1}{-\frac{1}{a-ib} + \frac{1}{2}rp^2 - ip} = \frac{1}{2p} \frac{\frac{4}{r}p}{p^2 - \frac{2}{ra} - i\frac{1}{2}\left(\frac{4p}{r} + \frac{4b}{ra^2}\right)}$$
$$= \frac{1}{2p} \frac{\Gamma_n}{E - E_r - i\frac{1}{2}(\Gamma_n + \Gamma_\gamma)}$$

(формула Брейта - Вигнера)

Энергия резонанса.

$$E_r = \frac{2}{ar} \frac{\hbar^2}{2\mu}$$

Нейтронная ширина

$$\Gamma_n = \frac{4 \cdot p}{r} \frac{\hbar^2}{2 \cdot \mu} \propto \sqrt{E_n};$$

Радиационная ширина

$$\Gamma_\gamma = \frac{4 \cdot b}{r \cdot a^2} \frac{\hbar^2}{2 \cdot \mu} \quad \left(\frac{\hbar^2}{2\mu} = 41.47 \text{ MeV} \cdot \text{Fm}^2\right)$$

S.T. Ma, Rev. Mod. Phys., v.25, p.853, 1953.

С.Б. Борзаков, "Взаимодействие нейтронов низкой энергии с протонами и возможность существования резонанса с $J^\pi = 0^+$ ", Сообщения ОИЯИ, Р15-93-29, Дубна, 1989;

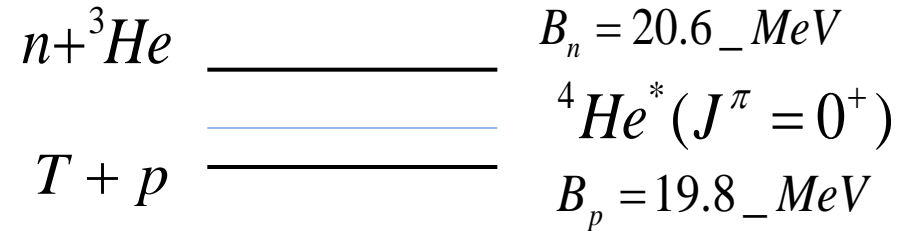
С. Б. Борзаков, Ядерная физика, т. 57, с. 517, 1994.

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

Аналогия: $n + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{He} + n$; $n + {}^3\text{He} \rightarrow T + p$;

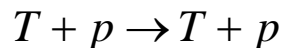
Для тепловых нейтронов: $\sigma_{th}(n + {}^3\text{He} \rightarrow T + p) \approx 5400 \text{ }_b$

А.А. Бергман, А.И. Исаков,
Ю.П. Попов, Ф.Л. Шапиро,
ЖЭТФ, 33, 1957, 9.



С.Б. Борзаков, Х. Малецки, Л.Б. Пикельнер,
М. Стэмпински, Э.И. Шарапов, “Особенности
отклонения от закона $1/v$ сечения реакции
 $n + {}^3\text{He} \rightarrow T + p$. Возбуждённый уровень ${}^4\text{He}$.
ЯФ, т. 35, вып. 3, с. 532, 1982.

Проявляется в реакции



NN взаимодействие при низких энергиях

F.J. Dyson, N. H. Xuong, Phys. Rev. Lett. v. 13, No. 26, 1964.

$Y = 2$ STATES IN SU(6) THEORY*

Freeman J. Dyson† and Nguyen-Huu Xuong

Department of Physics, University of California, San Diego, La Jolla, California

(Received 30 November 1964)

VOLUME 13, NUMBER 26

PHYSICAL REVIEW LETTERS

28 DECEMBER 1964

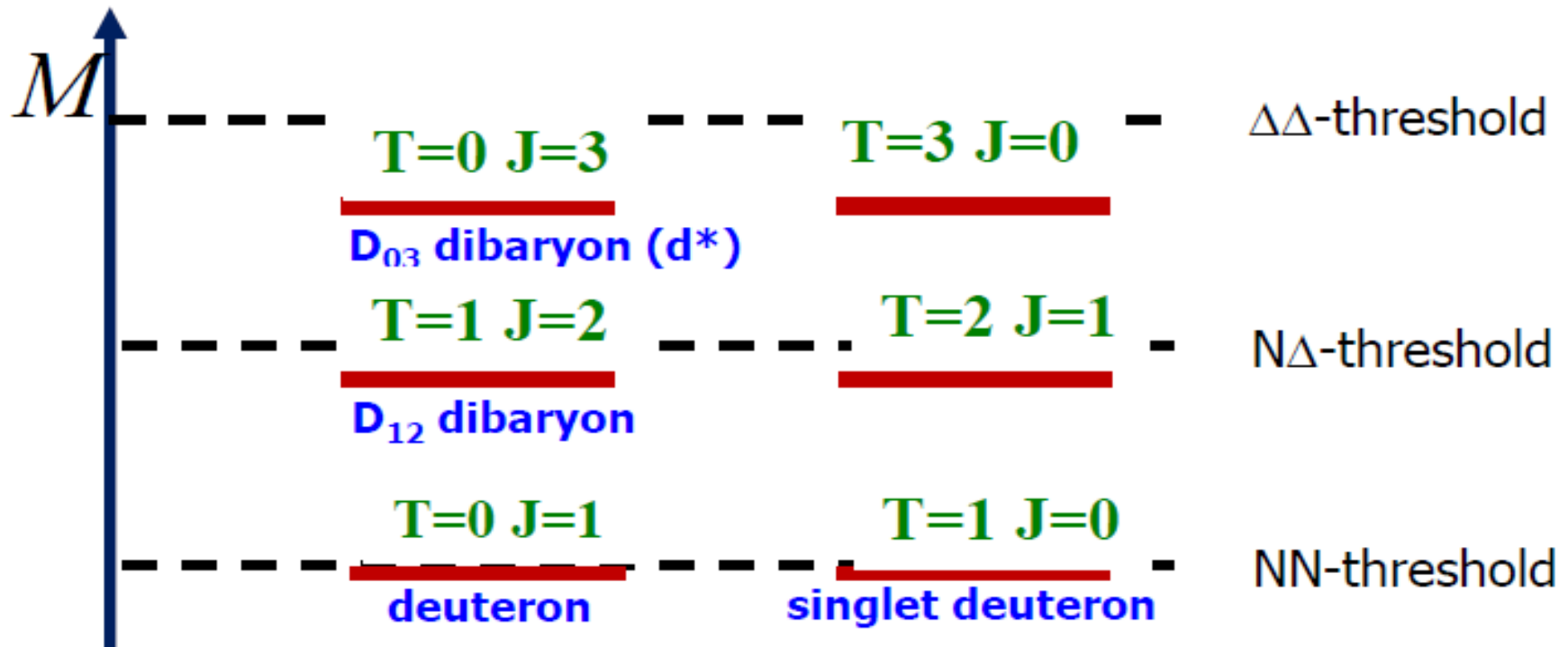
Table I. $Y = 2$ states with zero strangeness predicted by the $\underline{490}$ multiplet.

Particle	T	J	SU(3) multiplet	Comment	Predicted mass
D_{01}	0	1	$\underline{10^*}$	Deuteron	A
D_{10}	1	0	$\underline{27}$	Deuteron singlet state	A
D_{12}	1	2	$\underline{27}$	S-wave $N-N^*$ resonance	$A + 6B$
D_{21}	2	1	$\underline{35}$	Charge-3 resonance	$A + 6B$
D_{03}	0	3	$\underline{10^*}$	S-wave N^*-N^* resonance	$A + 10B$
D_{30}	3	0	$\underline{28}$	Charge-4 resonance	$A + 10B$

NN взаимодействие при низких энергиях

6q states with the baryon number $B=2$

1. F.J. Dyson and N.-H. Xuong, PRL **13**, 815 (1964)



From report of O.A. Rubtsova et. al.

***NN* взаимодействие при низких энергиях**

- **F.J. Dyson, N. H. Xuong, Phys. Rev. Lett. v. 13, No. 26, 1964.**
- **K. Maltman, N. Isgur, Phys. Rev., D29, No. 5, p.952, 1984.**

“Nuclear physics and the quark model: Six quarks with chromodynamics”,

Binding energies: $B_d = 2.9 \text{ МэВ}$ $B(^1S_0) = (0.4 \pm 0.4) \text{ MeV}$

- **A.N. Ivanov, M. Cargnelli, M. Faber, H. Fuhrmann, V.A. Ivanova, J. Marton, N.I. Trotskaya, J. Zmeskal, “Quantum field theoretic model of metastable resonant spin-singlet state of the np pair”,
e-Arxiv: nucl-th/0407079, 2004.** $E_S = -79 \pm 12 \text{ keV}$

- **R. Hackenburg, Preprints BNL, BNL-77482-2007-IR; BNL-77483-2007-JA;
e-arXiv:1710.01803 [nucl-th], 2017.**

$$\sigma(n + p \rightarrow d + 2\gamma) = 27 \mu\text{b}$$

$$E_{\gamma 1} = 66 \text{ keV}; E_{\gamma 2} = 2157 \text{ keV}$$

NN взаимодействие при низких энергиях

T. Yamazaki, Y. Kuzamashi, A. Ukawa, Phys. Rev. D84, 054506, 2011.

We address the issue of bound state in the two-nucleon system in lattice QCD. Our study is made in the quenched approximation at the lattice spacing of $a = 0.128$ fm with a heavy quark mass corresponding to $m_\pi = 0.8$ GeV. To distinguish a bound state from an attractive scattering state, we investigate the volume dependence of the energy difference between the ground state and the free two-nucleon state by changing the spatial extent of the lattice from 3.1 fm to 12.3 fm. A finite energy difference left in the infinite spatial volume limit leads us to the conclusion that the measured ground states for not only spin triplet but also singlet channels are bounded. Furthermore the existence of the bound state is confirmed by investigating the properties of the energy for the first excited state obtained by a 2×2 diagonalization method. The scattering lengths for both channels are evaluated by applying the finite volume formula derived by Lüscher to the energy of the first excited states.

$$-\Delta E_\infty = \begin{cases} 7.5(0.5)(0.9) \text{ MeV} & \text{for } {}^3S_1 \\ 4.4(0.6)(1.0) \text{ MeV} & \text{for } {}^1S_0 \end{cases},$$

Синглетный дейтрон, динейтрон и нейтральные ядра.

- S.R. Beane, E. Chang, W. Detmold, H.W. Lin, T.C. Luu, K. Orginos, A. Parreno, M.J. Savage, A. Torok, A. Walker-Loud,
"Deuteron and exotic two-body bound states from lattice QCD",
Phys. Rev. D85, 054511, 2012.
- $m_\pi = 390 \text{ MeV}$; $B_d = 11 \pm 5 \pm 12 \text{ MeV}$;
- $B_{nn} = 7.1 \pm 5.2 \pm 7.3 \text{ MeV}$

Синглетный дейтрон, динейтрон и нейтральные ядра.

Дибарионные резонансы.

- Кукулин В.И. (МГУ)
- Масса дибариона в дейтроне, то есть в каналах 3S_1 - 3D_1 , а также в синглетном канале 1S_0 должна быть очень близка массе двух нуклонов (1.88 ГэВ), тогда как масса голых дибарионов в этих каналах совсем другая, и составляет, вероятно, 2.1 – 2.2 ГэВ. Благодаря мезонным и барионным петлям, масса “одетого” дибариона сдвигается вниз к экспериментальному значению, соответствующему энергии связи дейтрона или синглетного дейтрона.

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

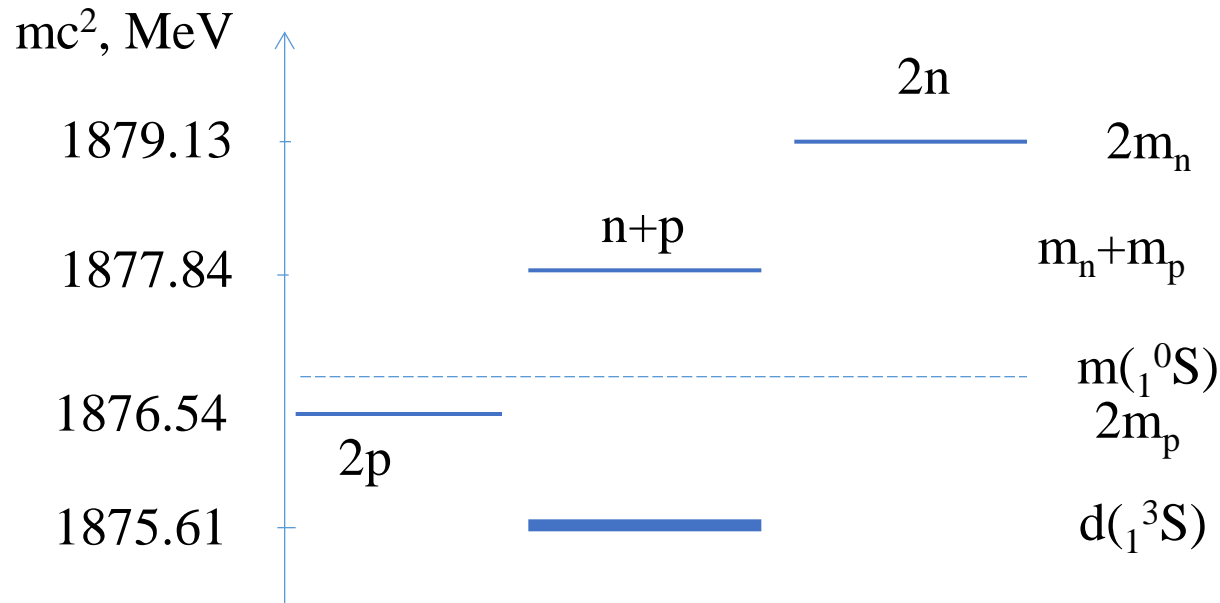
Dibaryon resonances.

H. Clement, “On the history of dibaryons and their final observation”,
Progress in Particle and Nuclear Physics 93, 2017, p. 195-242.

Виртуальный уровень = дибарионный резонанс.

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

Массы двух нуклонов.



Виртуальный уровень или дибарионный резонанс?

Масса нейтрона больше массы протона на 1.293 МэВ.

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

Поиск синглетного дейтрона в радиационном n - p захвате

Радиационный захват.

$$M = \int \psi_f ({}^1S_0) \hat{M}1 \cdot \psi_i ({}^3S_1) dr$$

$$\psi_i = \chi_s \sin(kr + \delta_s) / k$$

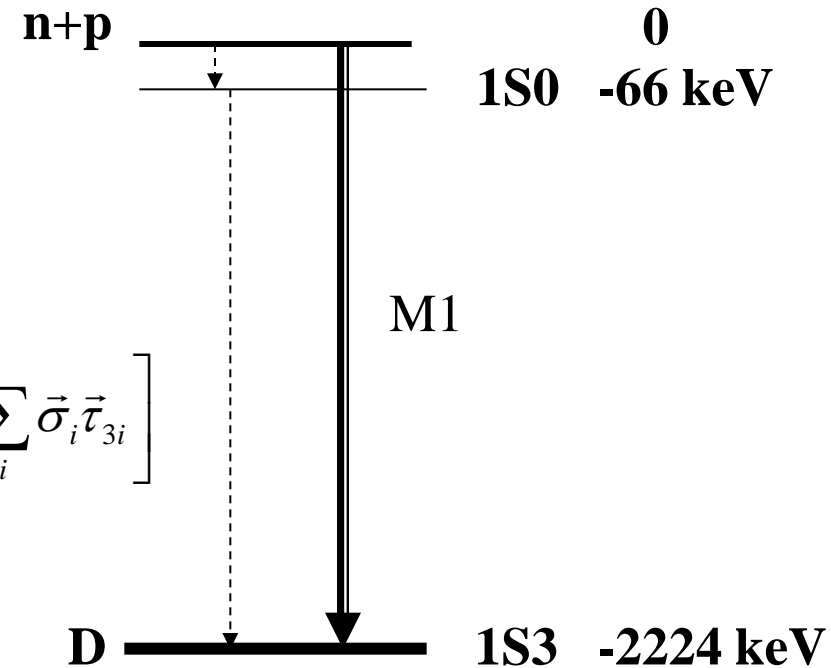
$$\psi_f = \chi_s C_f \exp(-\gamma_s r)$$

$$\hat{M}1 = \left(\frac{e\hbar}{2mc} \right) \left[\frac{1}{2} (\mu_p + \mu_n) \sum_i \vec{\sigma}_i + \frac{1}{2} (\mu_p - \mu_n) \sum_i \vec{\sigma}_i \vec{\tau}_{3i} \right]$$

$$\frac{\sigma_{2\gamma}}{\sigma_\gamma} = \frac{(\gamma_s - a_t^{-1})^2 (k + a_s^2)}{(k^2 + a_t^2)(\gamma - a_s^{-1})^2}$$

$$\frac{\sigma_{2\gamma}}{\sigma_\gamma} = 10^{-3} - 10^{-4}$$

Для тепловых нейтронов: $\sigma_\gamma = 334 \pm 0.5 mb$



**T. Belgya, S.B. Borzakov, M. Jentschel, B. Maroti, Yu. N. Pokotilovski,
L. Szentmiklosi, Phys. Rev. C99, 044001, 2019, “Experimental Search for the
Bound State Singlet Deuteron in the Radiative n - p Capture”**

Идея эксперимента: поиск радиационного захвата с вылетом каскада из двух гамма квантов.

Основной переход - энергия гамма кванта 2223.25 кэВ.

Установка для анализа по мгновенным гамма квантам

Будапештского Нейтронного центра;

Поток нейтронов 10^7 n/(сек·см²);

Мишень – полиэтилен (диаметр 2 см);

HPGe детектор с антикомптоновской защитой.

Search for the two step gamma transition $^3S_1(\text{continuum}) - ^1S_0(\text{metastable}) -$
- $^3S_1(\text{ground state})$ in addition to the direct one $^1S_0(\text{continuum}) - ^3S_1(\text{ground state})$
with the energy 2223 keV.

Experimental Search for the Bound State Singlet Deuteron in the Radiative n - p Capture

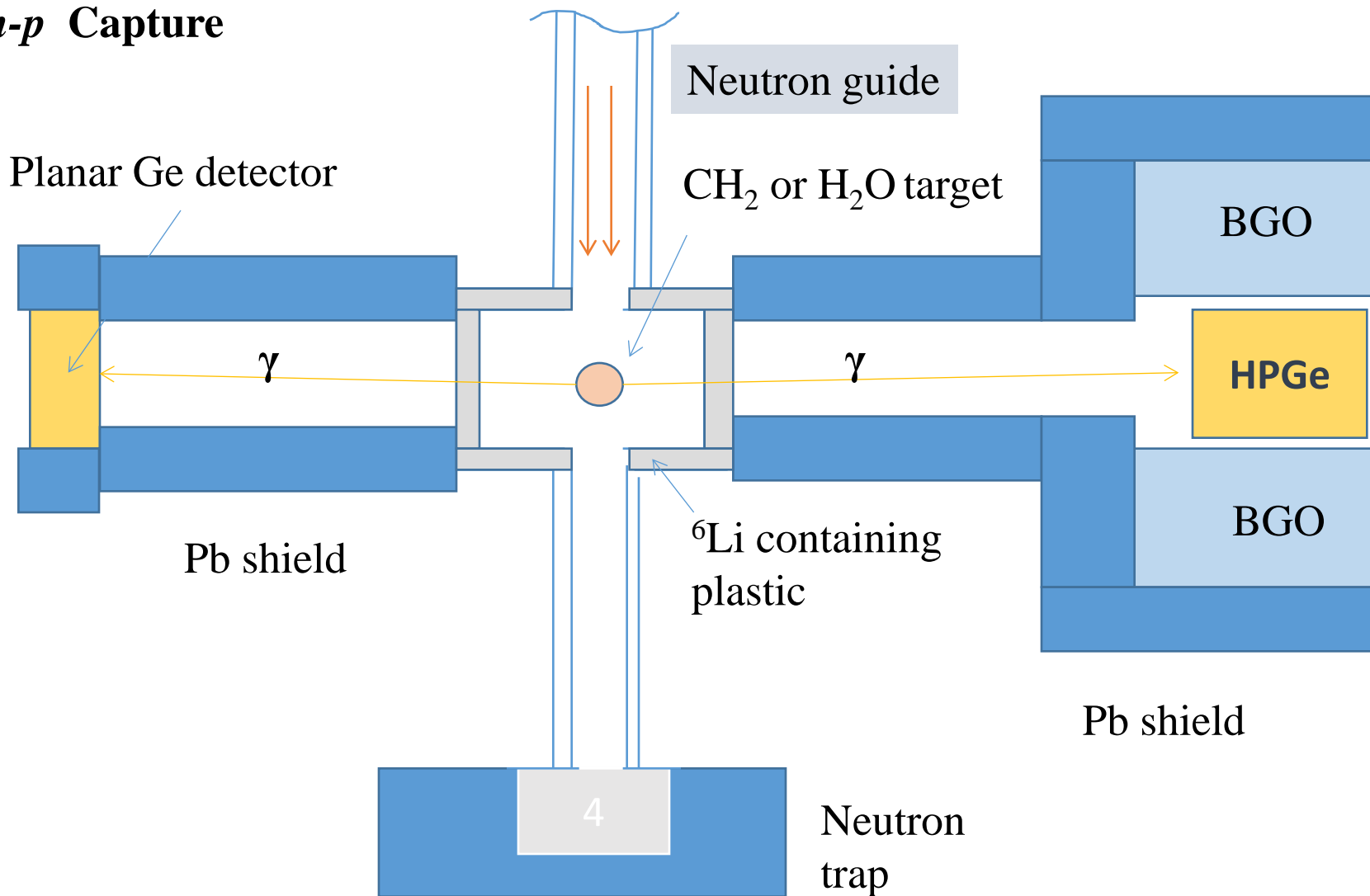
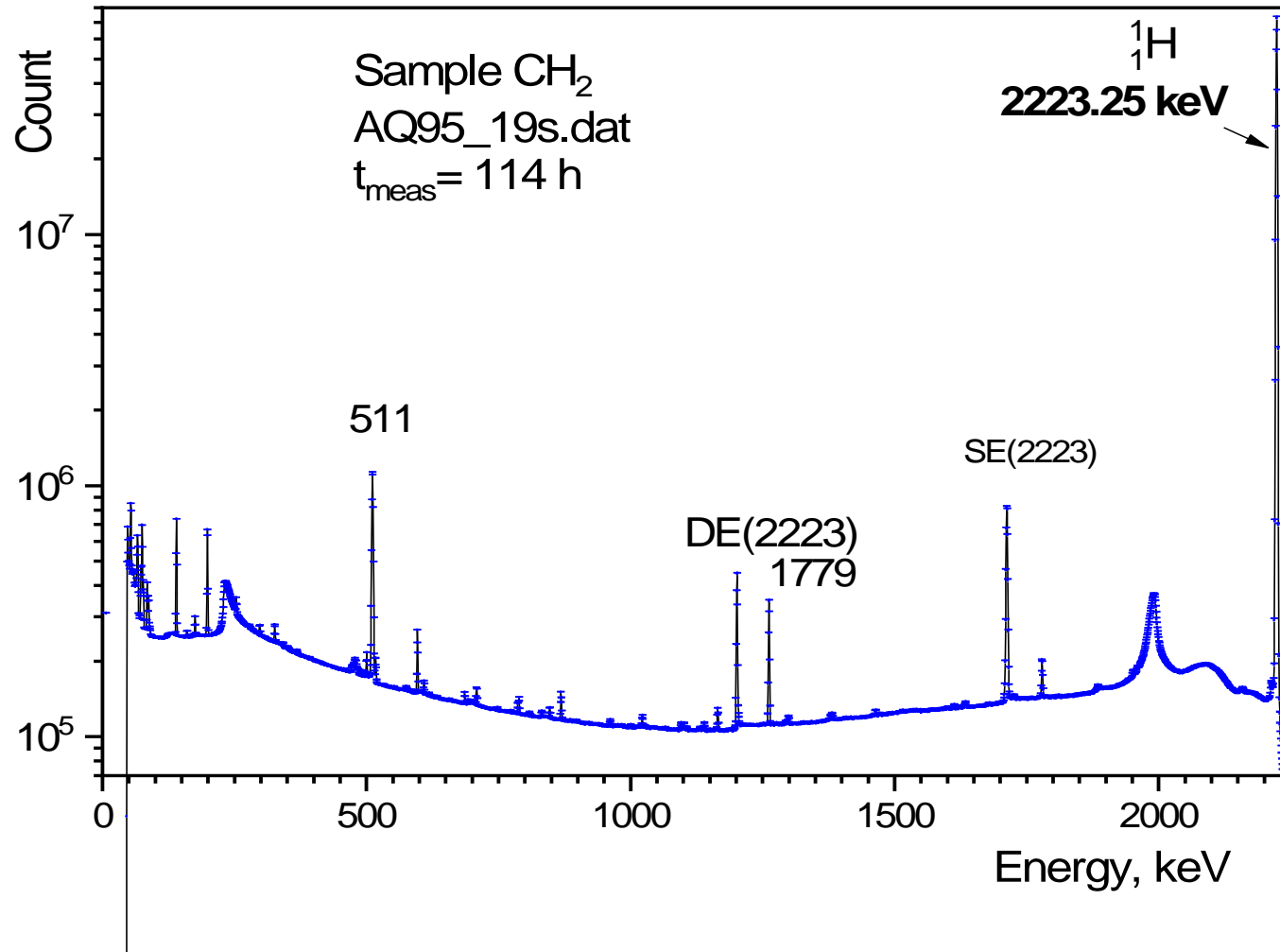
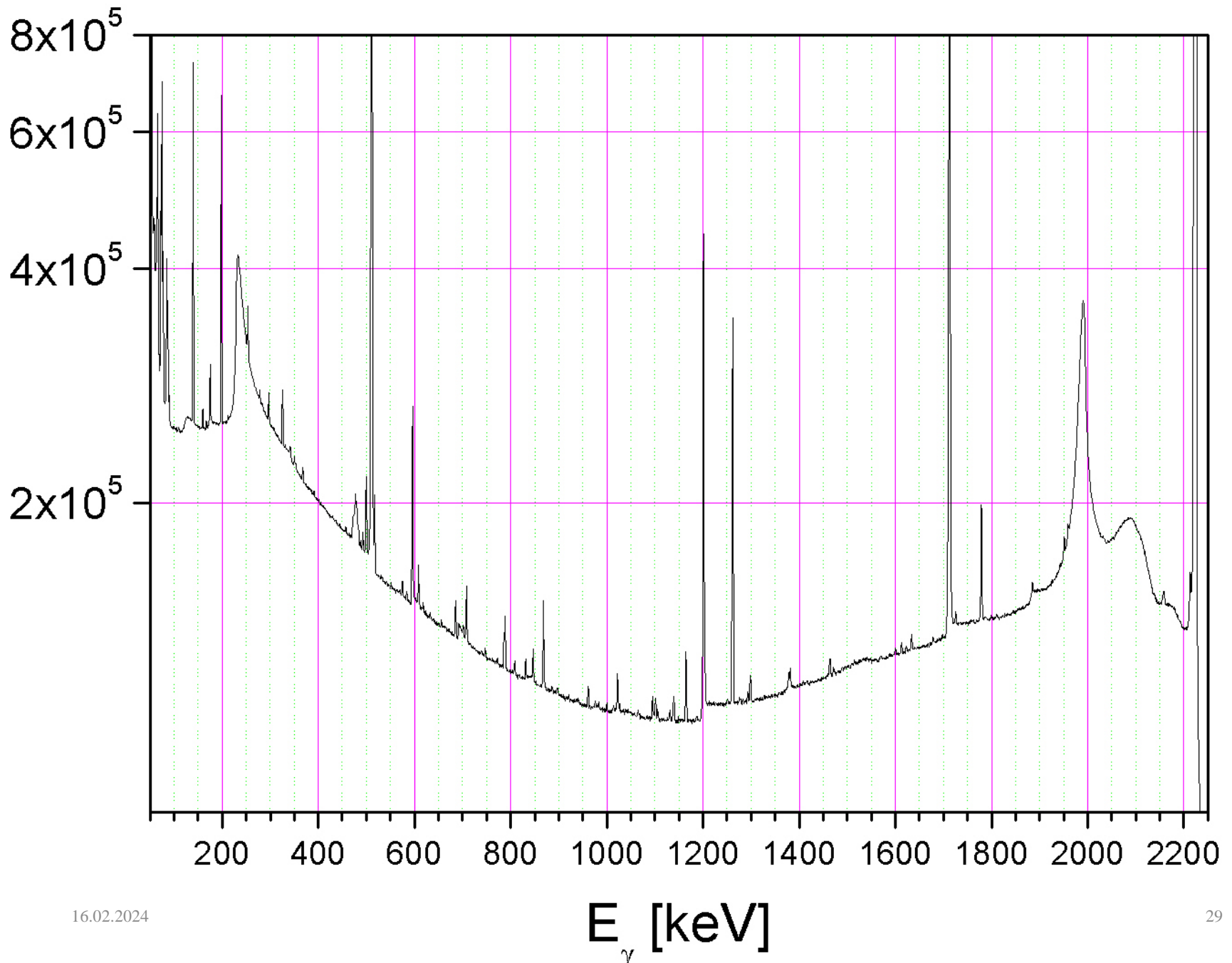


Схема эксперимента.

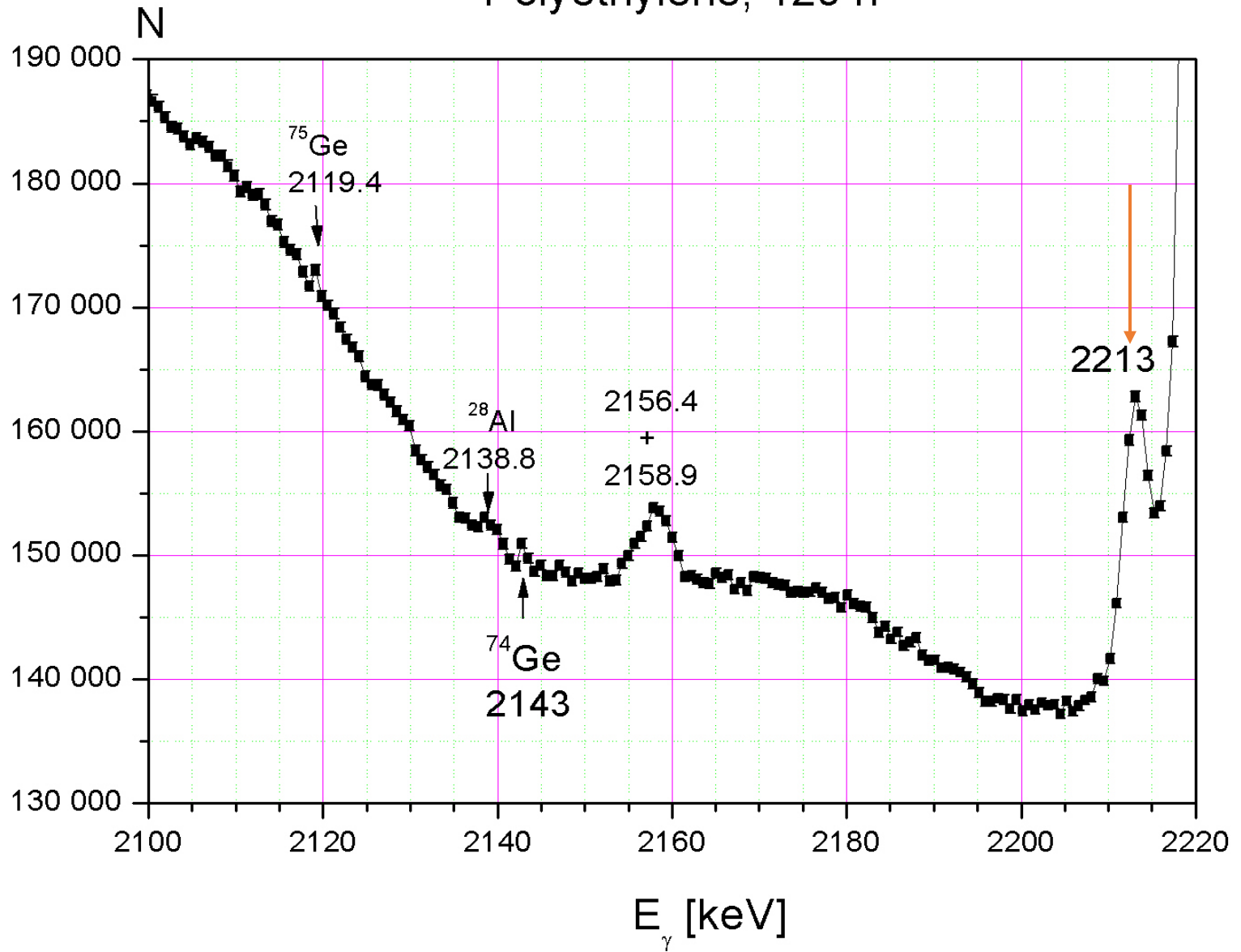
Experimental Search for the Bound State Singlet Deuteron in the Radiative n - p Capture



Polyethylene, 120 h



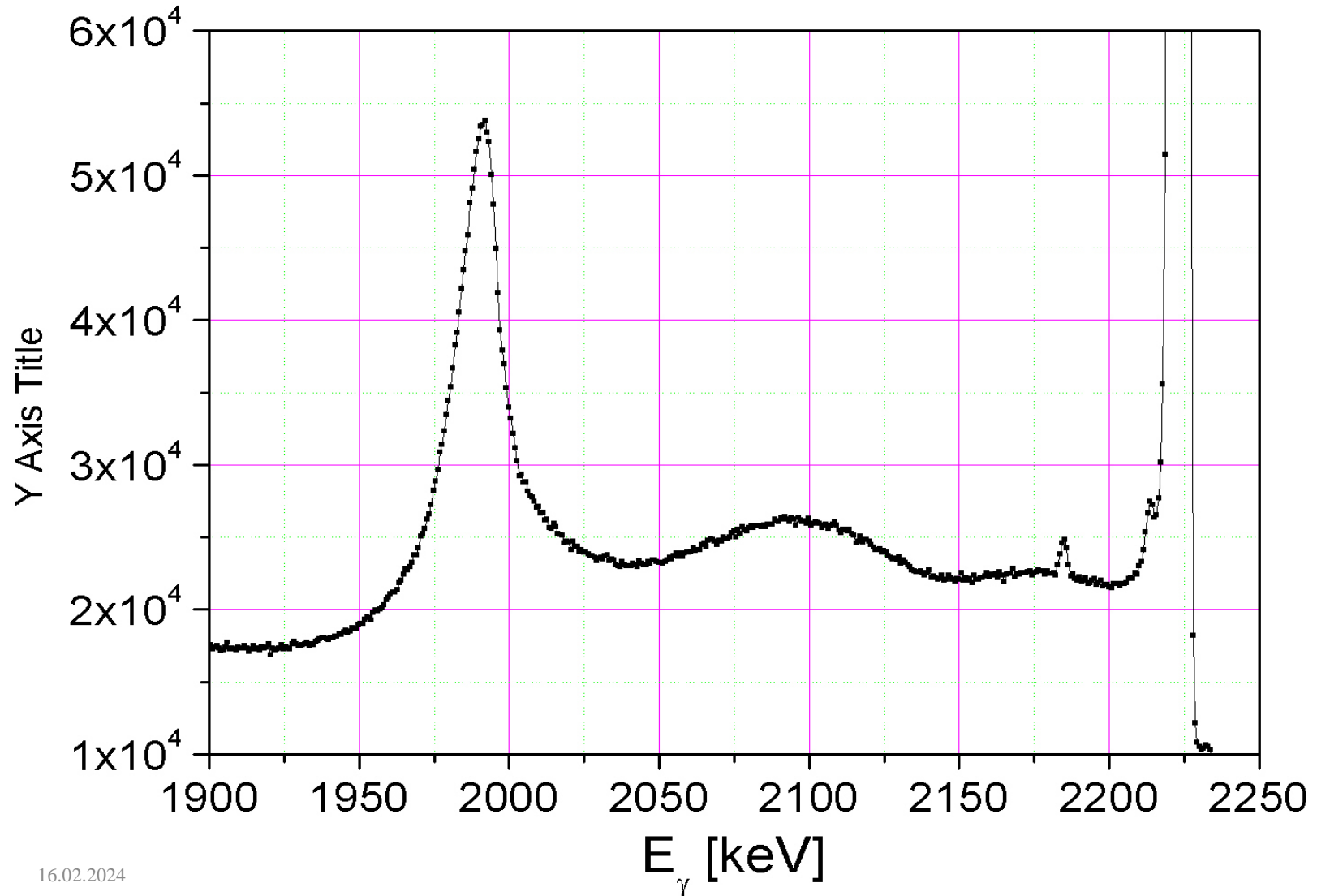
Polyethylene, 120 h



Experimental Search for the Bound State Singlet Deuteron in the Radiative n - p Capture

H_2O target.

measur. time 117194 s = 32h 55 min



Experimental Search for the Bound State Singlet Deuteron in the Radiative n - p Capture.

Основной переход: $S(2223.25 \text{ keV}) = 2.8 \cdot 10^8$ отсчётов.

$$\sigma_{2\gamma} = \frac{3 \times \sqrt{N_2}}{N_1} \sigma_{\gamma} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$$

$\sigma_{2\gamma} < 2 \mu\text{b}$ В интервале 2099 – 2209 кэВ для энергии гамма квантов (соответствует интервалу 15 – 125 для энергии связи).

**Обнаружена неизвестная линия с энергией 2212.9 кэВ!
Probably it is that line which we are searching for.**

Отношение “площадей” пиков: $R = \frac{S(2213)}{S(2223)} = 2.5 \cdot 10^{-4}$

Experimental Search for the Bound State Singlet Deuteron in the Radiative $n-p$ Capture

The possible explanation of the line 2212.9 keV is the next process:
as a result of photoeffect an X-rays appear which fly out of the detector
and 10 keV is lost. But the probability of such process is very small.
We tested this effect on our detector with help of very active Na-24 and
found nothing at the level 10^{-5} .

Experimental Search for the Bound State Singlet Deuteron in the Radiative n - p Capture

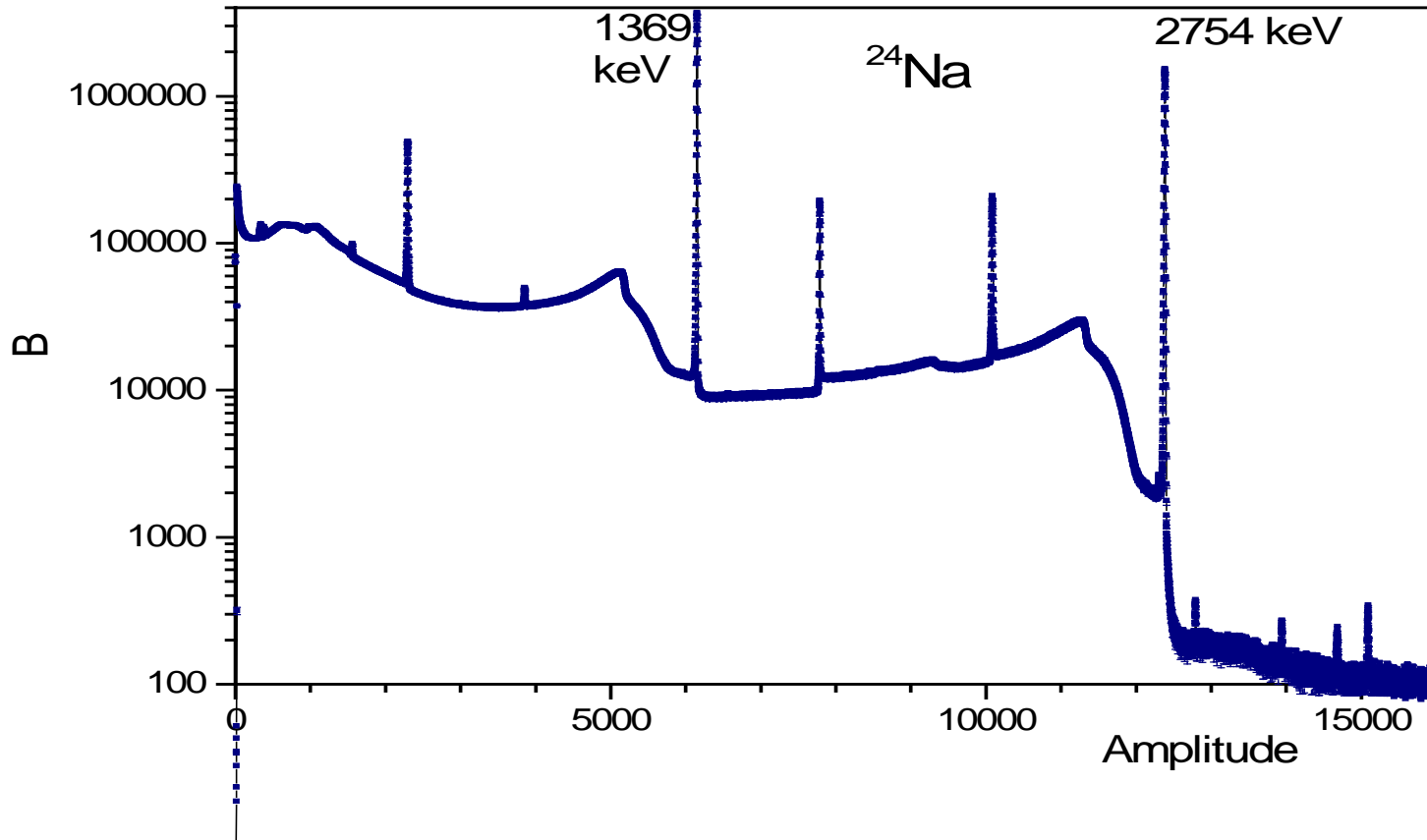
Our result implies that there is no evidence for two-proton transition in the np capture with one of gamma-rays in the region 2100 – 2209 keV with branching ratio $R < 6 \cdot 10^{-6}$ or with the cross-section $\sigma_{n2\gamma} < 2 \mu\text{b}$ (two standard deviations)

There is no nuclide which gives the gamma quanta with the energy 2212.9 keV! Probably this line is from hydrogen.

We must find second line with the energy approximately 10.4 keV.

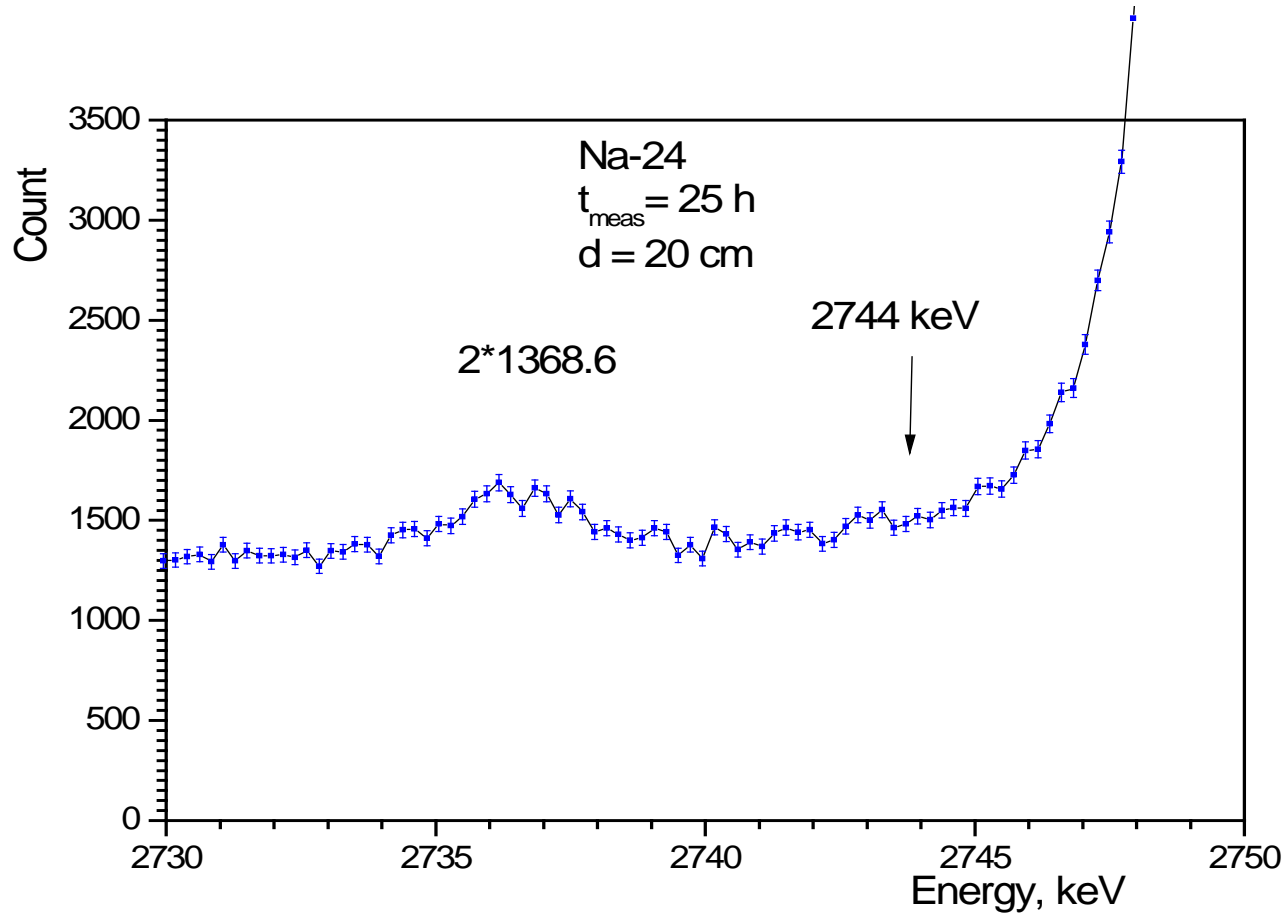
Необходимо провести эксперимент по поиску каскада 2-х гамма квантов с использованием совпадений!

Experimental Search for the Bound State Singlet Deuteron in the Radiative n - p Capture



Gamma quanta spectrum from ^{24}Na source.

Experimental Search for the Bound State Singlet Deuteron in the Radiative $n-p$ Capture



Часть спектра гамма квантов от источника ^{24}Na .

Проверка ...

Динейтрон и легчайшие нейтральные ядра.

N. Feather, Nature (London), “Properties of a Hypothetical Dineutron”, 162, p. 213, 1948.

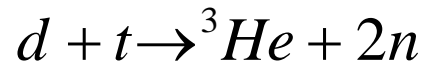
- 1. Возможное время жизни 1-5 сек.**
- 2. Максимальная энергия связи динейтрона определяется из условия, что динейтрон распадается на дейтрон, электрон и антинейтрино.**

Учитывая, что масса нейтрона больше массы протона на 1.293 МэВ, можно вычислить максимальную энергию связи динейтрона:

$$B_2 = 2m_n - m(^2n) \leq m_n - m_p + B_d - m_e = 3.01 \text{ MeV}$$

Динейтрон и легчайшие нейтральные ядра.

M. Sakisaka, M. Tomita, “Experiments on Possible Existence of a Bound Di-Neutron”, J. Phys. Soc. Japan, v. 16, p. 2597-2598, 1961.



Использовался активационный метод. В качестве индикатора использовался ${}^{27}\text{Al}$.

При захвате динейтрона должна наблюдаться активность ${}^{29}\text{Al}$.

Тритий-титановая мишень бомбардировалась дейтронами с энергией 160-185 кэВ.

Мишень была окружена защитой, содержащей парафин или воду. Образец из Al находился на расстоянии 12.5-27.5 см от мишени и был окружен Cd фольгой толщиной 1 мм. После облучения была обнаружена наведенная активность с периодами полураспада 6.6 минут и 18 мин. Авторы сделали вывод, что активность с 6.6 мин. обусловлена распадом ${}^{29}\text{Al}$, который появился в результате захвата динейтрона и оценили энергию связи $E(2n) = 2.90 - 3.01$ МэВ.

Синглетный дейтрон, динейтрон и нейтральные ядра.

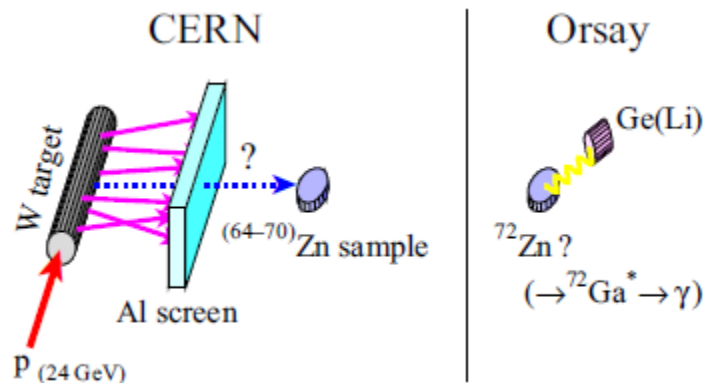
C. Detraz, “Possible existence of bound neutral nuclei”, **Phys. Lett.**, 1977, 66B, p. 333.

$p + W$ Синхротрон ЦЕРН, $E_p = 24$ ГэВ.

Индикатор: ${}^{64,66,67,68,70}\text{Zn}({}^A n, xn){}^{72}\text{Zn}$ ${}^{72}_{30}\text{Zn} \rightarrow {}^{72}_{31}\text{Ga} + e^- + \tilde{\nu}_e$

${}^{72}\text{Ga}$: $T_{1/2} = 14.10(2)$ h. Обнаружены 5 линий в спектре гамма квантов.

Возможна реакция ${}^2n + {}^{70}\text{Zn} \rightarrow {}^{72}\text{Zn}$.



Синглетный дейтрон, динейтрон и нейтральные ядра.

К.К. Seth, В. Parker, “Evidence for dineutrons in extremely neutron-rich nuclei”, Phys. Rev. Lett., 66(19), p. 2448 - 2451, 1991.

•Сет и Паркер исследовали взаимодействие мезонов с ядрами ${}^6\text{Li}$ и ${}^9\text{Be}$. В эксперименте измерялись спектры мезонов и протонов, образующихся в результате следующих реакций:

а) ${}^6\text{Li} (\pi^-, \pi^+) {}^6\text{H}$; б) ${}^9\text{Be} (\pi^-, p) {}^8\text{He}$; в) ${}^6\text{Li} (\pi^-, p) {}^5\text{H}$.

•Измерения проводились при энергии налетающих мезонов 220 МэВ (для реакции *a*) и 125 МэВ (реакции *b* и *c*). Конечным продуктом всех трех реакций являются нестабильные ядра. Выход регистрируемых частиц в зависимости от эффективной массы лучше согласуется с экспериментальными данными, если предположить образование **динейтрона**. Энергия связи динейтрона предполагалась равной нулю.

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

Письма в ЖЭТФ, том 42, вып. 7, стр. 303 – 305

10 октября 1985 г.

ЭМИССИЯ "ДИНЕЙТРОНА"

ИЗ ВОЗБУЖДЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЯДРА ${}^6\text{He}$

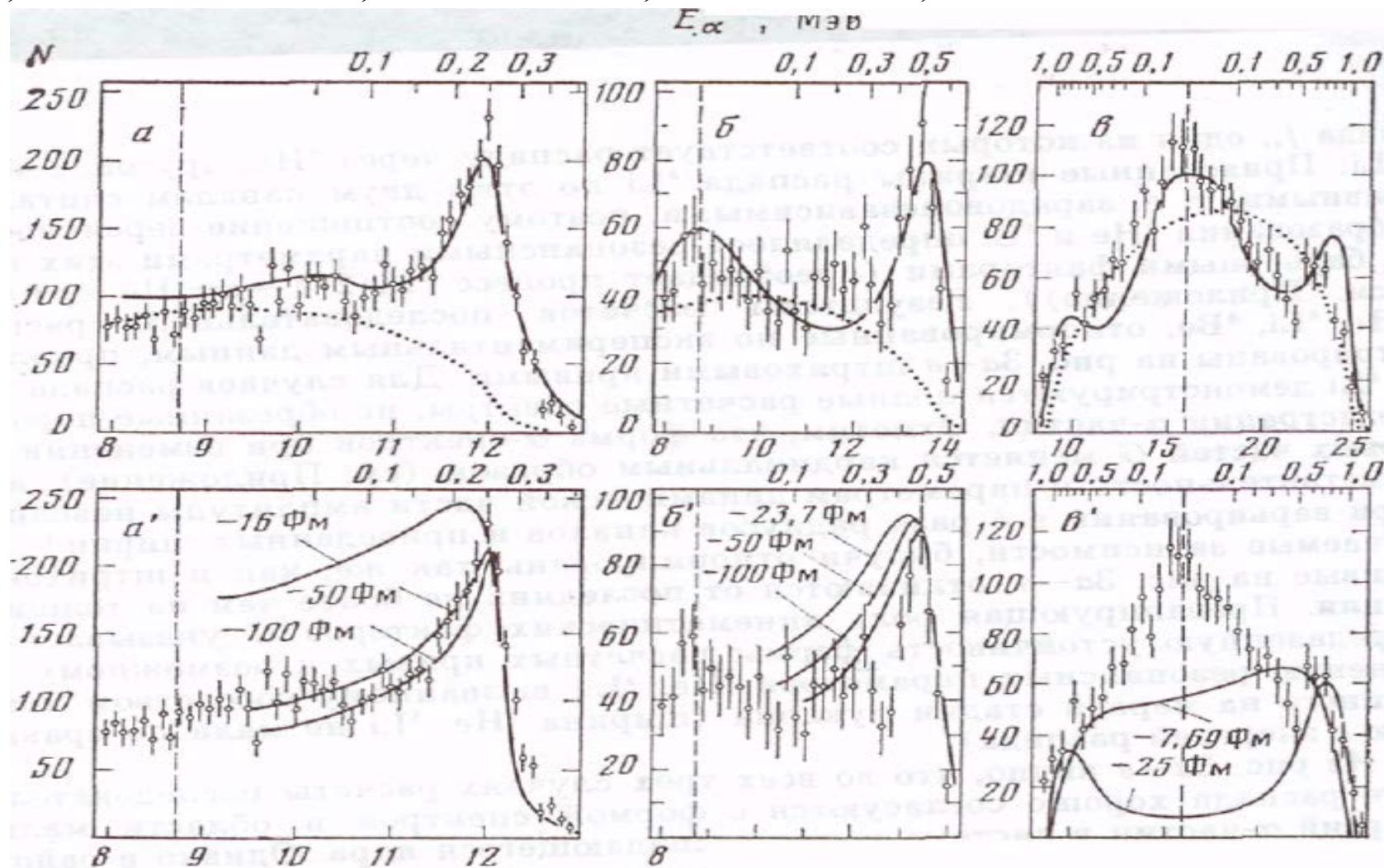
*О.В.Бочкарев, А.А.Коршенинников, Е.А.Кузьмин,
И.Г.Муха, А.А.Оглоблин, Л.В.Чулков, Г.Б.Яньков*

В работе экспериментально исследовался распад возбужденного состояния 2^+ ядра ${}^6\text{He}$, образованного в реакции ${}^7\text{Li}(d, {}^3\text{He}){}^6\text{He}^*$ при энергии дейтронов 30,5 МэВ. Показано, что механизм эмиссии динейтрона 2n ($T = 1, S = 0$) объясняет 45% случаев распада.

Bochkarev O.V. ... Physics of Atomic Nuclei (ЯФ), v. 46, No. 1(7), 1987.

ТРЕХЧАСТИЧНЫЙ РАСПАД СОСТОЯНИЯ 2+ ЯДЕР ${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^6\text{Be}$

БОЧКАРЕВ О. В., КОРШЕНИННИКОВ А. А., КУЗЬМИН Е. А., МУХА И. Г., ОГЛОБЛИН А. А., ЧУЛКОВ Л. В., ЯНЬКОВ Г. Б.,



Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

- Two-neutron exchange observed in the ${}^6\text{He} + {}^4\text{He}$ reaction.
Search for the "di-neutron" configuration of ${}^6\text{He}$

G.M. Ter-Akopian¹, A.M. Rodin, A.S. Fomichev, S.I. Sidorchuk, S.V. Stepanov,
R. Wolski, M.L. Chelnokov, V.A. Gorshkov, A.Yu. Lavrentev, V.I. Zagrebaev,
Yu.Ts. Oganessian

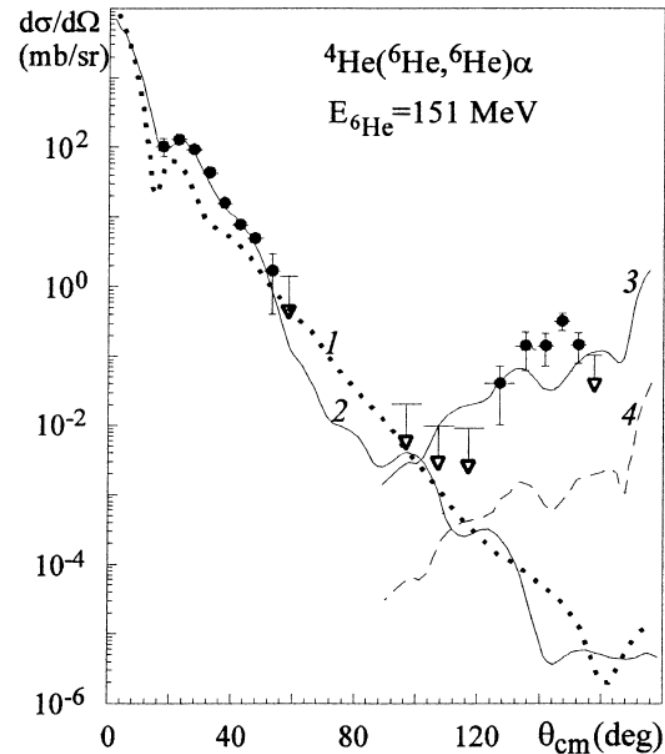


Fig. 4. Experimental data (symbols) and theoretical calculation (lines) for the elastic scattering ${}^6\text{He}(151 \text{ MeV}) + {}^4\text{He}$.

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

A. Siepe et al.

“Neutron-proton and neutron-neutron quasifree scattering in the n - d breakup reaction at 26 MeV”, Phys. Rev. C65, 034010, 2002,

Источник нейтронов: ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$

$E_d = 27.3 \text{ MeV}$; $E_n = (26 \pm 4) \text{ MeV}$

Исследуемая реакция:

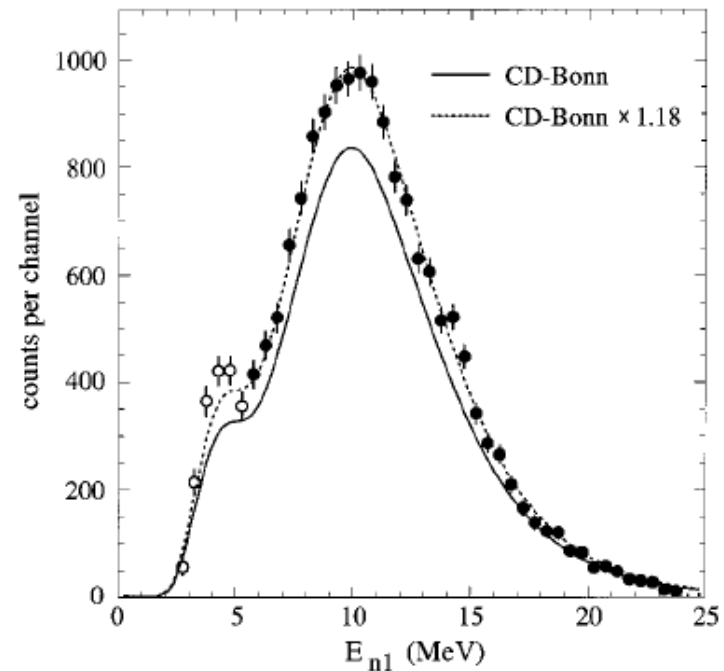
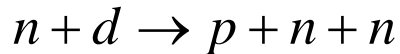


FIG. 4. HE data of Fig. 3, projected onto the E_{n1} axis. The solid curve represents the finite-geometry Monte Carlo prediction using CD-Bonn, the dotted line is the MC result normalized to the experiment by multiplication with a factor of 1.18. Only events with E_{n1} and $E_{n2} > 6$ MeV have been included in the analysis.

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

PHYSICAL REVIEW C **83**, 034004 (2011)

The nn quasifree nd breakup cross section: Discrepancies with theory and implications for the 1S_0 nn force.

H. Witała, W. Glöckle

Large discrepancies between quasifree neutron-neutron (nn) cross section data from neutron-deuteron (nd) breakup and theoretical predictions based on standard nucleon-nucleon (NN) and three-nucleon ($3N$) forces are pointed out. The nn $1S_0$ interaction is shown to be dominant in that configuration and has to be increased to bring theory and data into agreement. Using the next-to-leading order 1S_0 interaction of chiral perturbation theory, we demonstrate that the nn quasifree scattering cross section depends only slightly on changes of the nn scattering length but is very sensitive to variations of the effective range parameter. In order to account for the reported discrepancies one must decrease the nn effective range parameter by $\approx 12\%$ from its value implied by charge symmetry and charge independence of nuclear forces.

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

H.W. Hammer, S. König, “Constraints on a possible dineutron state from pionless EFT”, Phys. Lett. B736, 208-213, 2014.

We investigate the sensitivity of the three-nucleon system to changes in the neutron–neutron scattering length to next-to-leading order in the pionless effective field theory, focusing on the triton– ^3He binding energy difference and neutron–deuteron elastic scattering. Due to the appearance of a proton–deuteron three-body counterterm at this order, the triton– ^3He binding energy difference remains consistent with the experimental value even for large positive neutron–neutron scattering lengths while the elastic neutron–deuteron scattering phase shifts are insensitive. **We conclude that a bound dineutron cannot be excluded to next-to-leading order in pionless EFT.**

Low energy NN interaction.

L.P. Kok, “Accurate Determination of the Ground State Level of the ^2He nucleus”, Phys. Rev. Lett., 45, 427, 1980.

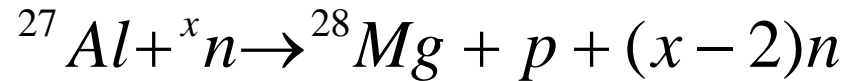
$$p + p \rightarrow p + p \quad E_r = -0.140 - i \cdot 0.467 \text{ MeV}$$

Resonance.

$$p + p \rightarrow p + p \quad E_r = 0.4 \text{ MeV}; \quad \Gamma = 0.15 \text{ MeV}$$

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

D.V. Aleksandrov et al. Исследовали испускание нейтральных ядер в спонтанном делении. Они использовали источник ^{252}Cf интенсивностью 10^7 актов деления в секунду. Облучались образцы ^{26}Mg (с массами от 0.1 до 6 г), которые были помещены were placed at 3 mm distance from the source were used as indicators.



Спектр гамма квантов измерялся с помощью HPGe детектора объемом 120 см^3 . Была обнаружена линия с энергией 1342.27 keV .

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

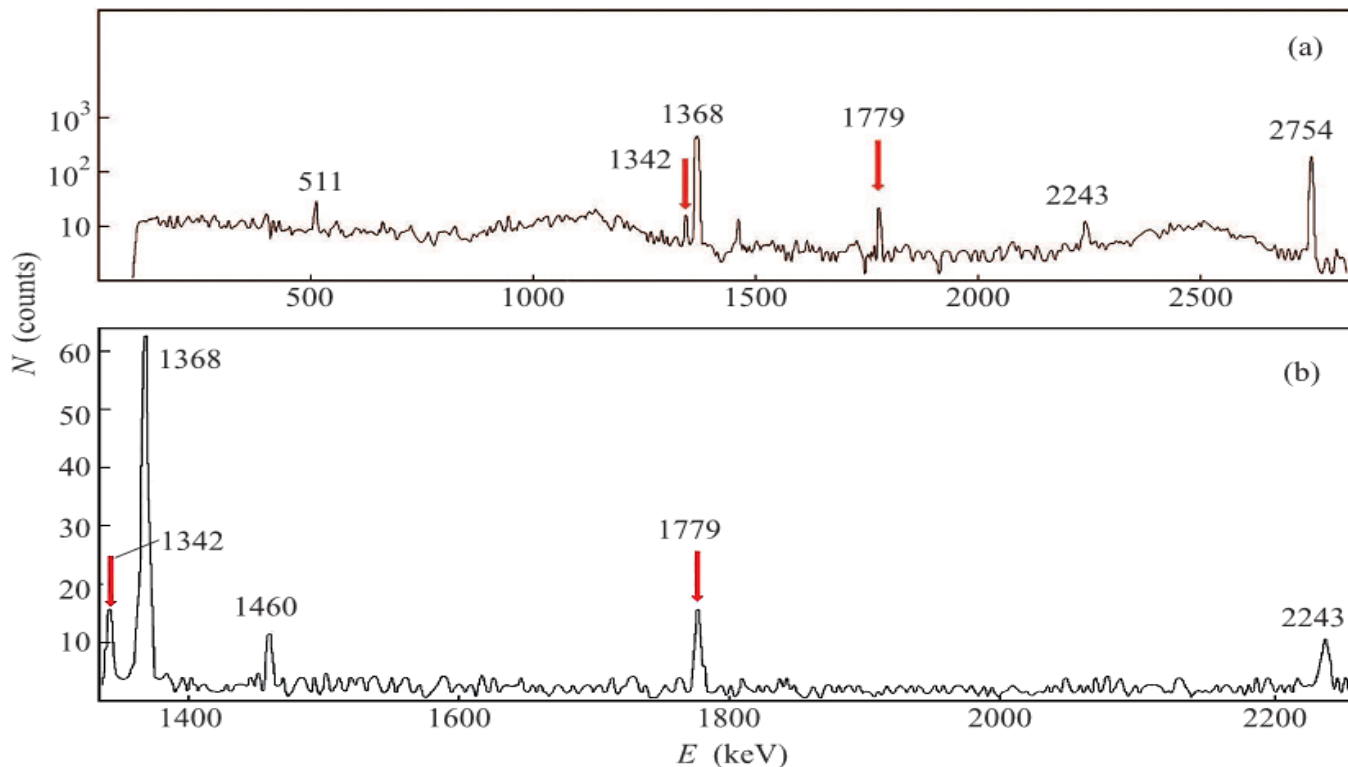


Рис. 2. (а) – Энергетический спектр γ -квантов активируемого образца ^{27}Al , облученного продуктами вынужденного деления ^{238}U α -частицами. (б) – Выделенный участок γ -спектра в диапазоне энергий 1330–2250 кэВ. Стрелками отмечены γ -линии, сопровождающие β -распад ядер ^{28}Mg (1342 кэВ) и ^{28}Al (1779 кэВ)

Динейтрон и нейтральные ядра.

Experiments with radioactive nuclei.

F.M. Marques et al. have observed 6 events when tetra-neutrons appeared. В этом эксперименте пучок ядер ^{14}Be .

F.M. Marques et al., Phys. Rev. C65 (2002) 044006.

A. Spyrou et al. наблюдали распад ^{16}Be с одновременным вылетом двух нейтронов.

A. Spyrou et al., Phys. Rev. Lett. 108, 102501 (2012)

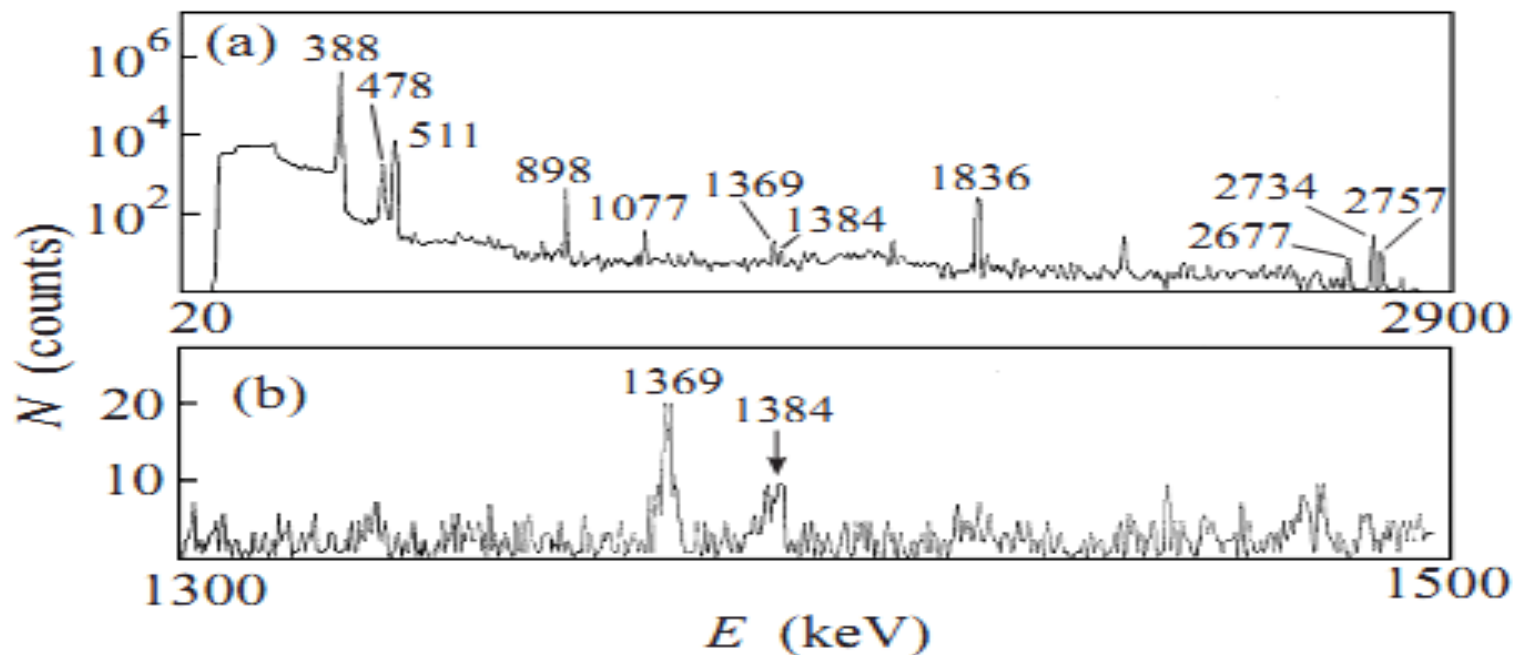
Analogous process have been observed in the reaction
 $^{26}\text{O} \rightarrow ^{24}\text{O} + 2n$.

Theory:

N.K. Timofeyuk, “Do multineutrons exist?”, J. Phys. G29, L9 – L14, 2003.

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

Б.Г. Новацкий, Е.Ю. Никольский, С.Б. Сакута, Д.Н. Степанов,
“Возможное обнаружение легких нейтронных ядер в делении ^{238}U α -частицами”, Письма в ЖЭТФ, т. 96, вып. 5, с. 310-314, 2012.



$$T_{1/2} = 2.71 \text{ h}$$

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

Динейтрон и легчайшие нейтральные ядра.

I. Kadenko, “Possible observation of the dineutron in the $^{159}\text{Tb}(n,2n)^{158g}\text{Tb}$ nuclear reaction ”, Europhys. Lett., 114, 42001, 2016.

$$E_n < B_{thr}(n,2n)$$

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

Statistically significant observation of and cross sections for a new nuclear reaction channel on ^{197}Au with bound dineutron escape

IHOR M. KADENKO ^{1(a)}, BARNA BIRÓ², ANDRÁS FENYVESI²

¹ *International Nuclear Safety Center of Ukraine; Department of Nuclear Physics, Taras Shevchenko National University of Kyiv – St. Volodymyrs'ka, 64/13, 01601, Kyiv, Ukraine*

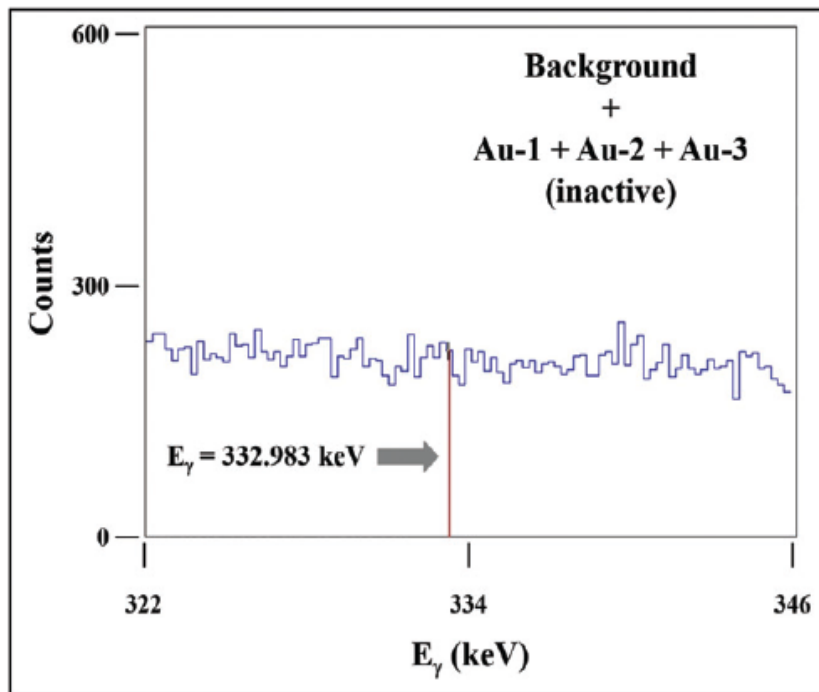
² *Institute for Nuclear Research, Hungarian Academy of Sciences (MTA Atomki), Bem tér 18/c, H-4026 Debrecen, Hungary*

PACS 21.45.Bc - Two-nucleon system

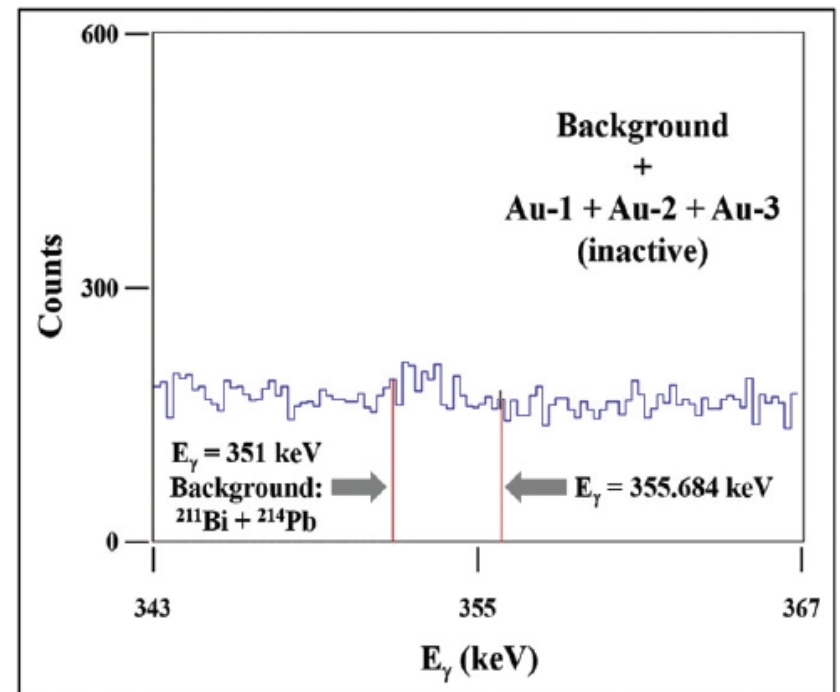
PACS 25.90.+k - Other topics in nuclear reactions: specific reactions

PACS 27.10.+h - $A \leq 5$

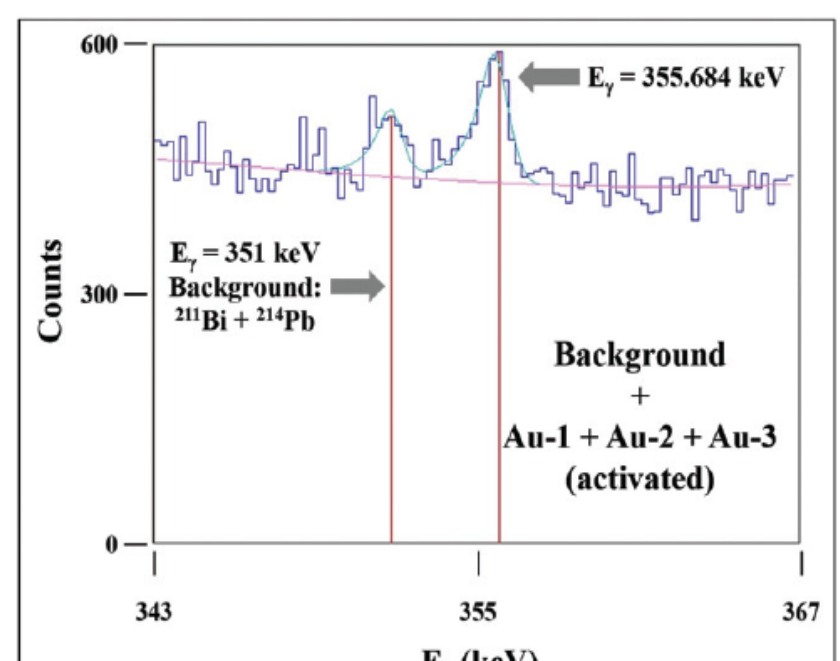
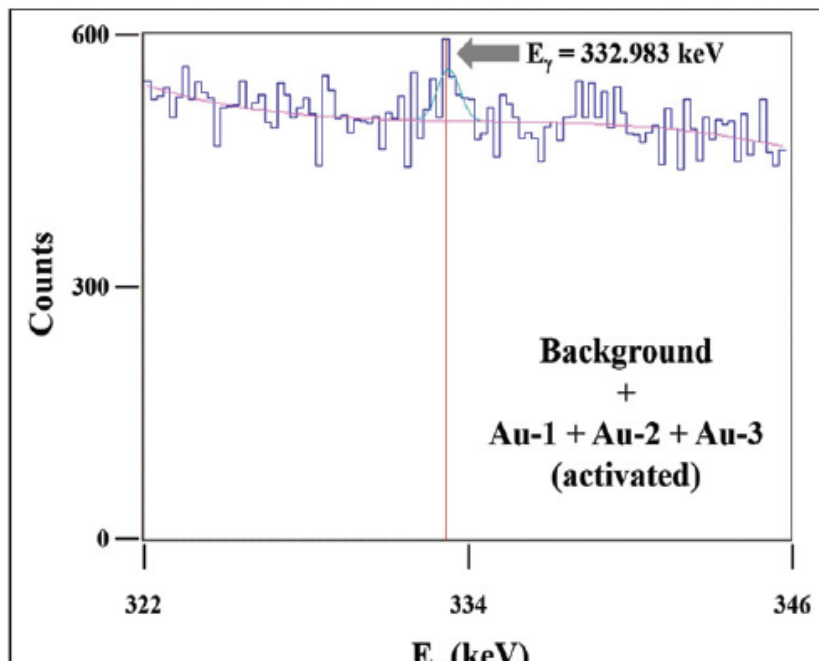
Abstract – A new nuclear reaction channel on ^{197}Au with the neutron as a projectile and a bound dineutron (2n) in the output channel is considered based on available experimental observations. The dineutron is assumed to be formed as a particle-satellite, separated from the volume but not from the potential well of ^{196}Au nucleus. The dineutron was identified by statistically significant radioactivity detection due to decay of ^{196g}Au nuclei. Cross sections for the $^{197}\text{Au}(n,^2n)^{196g}\text{Au}$ reaction are determined as $180 \pm 60 \mu\text{b}$ and $37 \pm 8 \mu\text{b}$ for [6.09-6.39] and [6.175-6.455] MeV energy ranges, correspondingly. Possible outcomes of dineutron detection near the surface of deformed nuclei are also raised and discussed.



(a)

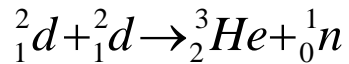


(a)



Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

I.M. Kadenko, B. Biro, A. Fenyvesi, “Statistically significant observation of and cross sections for a new nuclear reaction channel on ^{197}Au with bound dineutron escape”, EPL, 2020, v. 131, No. 5, 52001.



Порог реакции ${}^{197}\text{Au}(n, 2n){}^{196g}\text{Au}$ $E_{\text{thr}} = 8.11372 \text{ МэВ}$.

$$T_{1/2} = 6.183D$$

Nuclide	E_γ , keV	I_γ , %	$S \pm \Delta S$	σ , μb
${}^{196}\text{Au}$	332.983	22.9 ± 0.5	307 ± 119	180 ± 60
	355.684	87	867 ± 133	

2-е облучение: $\sigma = 37 \pm 8 \text{ } \mu\text{b}$

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

Поиск динейтрона в реакции $n + d \rightarrow {}^2n + p$.

Первый эксперимент по поиску динейтрона в реакции $n+d - n+d$ был проведён Д.В. Глазгоу и Д.Г. Фостером. Они измерили сечение реакции рассеяния $n+d$ в интервале энергий нейтронов 2.25-15 МэВ (в лабораторной системе; 241 точка, точность 1.2-5.6%). Получен верхний предел на сечение реакции с вылетом динейтрона 100 - 1000 микробарн.

Расчёт: R. Alzetta, G.C. Ghirardi, A. Rimini, Phys.Rev., v. 131, p. 1740, 1963.

Эксперимент: Glasgow D.W., Foster D.G., Phys. Rev., v. 157, p. 764, 1967.

Примечание: не были точно известны длины рассеяния нейтронов на дейтронах.

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

Лёгкие нейтральные ядра.

Б.Г. Новацкий, Е.Ю. Никольский, С.Б. Сакута, Д.И. Степанов, “Возможное обнаружение легких нейтральных ядер в делении ^{238}U α -частицами”, Письма в ЖЭТФ, т. 96, вып. 5, с. 310-314, 2012.

Б.Г. Новацкий и др. наблюдали лёгкие нейтральные ядра, возникающие в реакции деления ^{238}U альфа частицами с энергией 62 МэВ. Образец ^{88}Sr служил индикатором. Авторы предполагали передачу 4 нейтронов. Регистрировались нестабильные ядра ^{92}Sr .

Б.Г. Новацкий, С.Б. Сакута, Д.Н. Степанов, “Обнаружение легких нейтральных ядер в делении ^{238}U α -частицами методом активации изотопа ^{27}Al ”, Письма в ЖЭТФ, т. 98, вып. 11, с. 747-751, 2013.

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

The group from Tomsk Polytechnic Institute investigated the decay of ^{252}Cf and observed ^{232}U , which can appear as result of the **octaneutron** emitting only.

Arguments for Detecting Octaneutrons in Cluster Decay of ^{252}Cf Nuclei

G.N. Dudkin, A.A. Garapatskii and V.N. Padalko

Tomsk Polytechnic University, 634050 Tomsk, Russia

E-mail: dudkin@tpu.ru

Abstract

A new method of searching for neutron clusters (multineutrons) composed of neutrons bound by nuclear forces has been introduced and implemented. The method is based on the search for daughter nuclei that emerge at the nuclei cluster decay of ^{252}Cf to neutron clusters. The effect of long-time build-up of daughter nuclei with a high atomic number and long half-life was utilized. As a result, the cluster decay of ^{252}Cf to a daughter nucleus ^{232}U (half-life of $T_{1/2} = 68.9$ years) was discovered. It is assumed that the emergence of ^{232}U nuclei is attributed to emission of neutron clusters consisting of eight neutrons - octaneutrons. The emission probability of octaneutrons against α -decay probability of ^{252}Cf is defined equal to $\lambda_c/\lambda_\alpha = 1.74 \cdot 10^{-6}$.

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

Возможные эксперименты.

1. $n + p \rightarrow d + \gamma_1 + \gamma_2 \quad E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2} = 2224 \text{ кэВ} \quad (0 < E_{\gamma_1}, E_{\gamma_2} < 2224 \text{ кэВ})$

2. Резонансное рассеяние гамма квантов: $\gamma + d \rightarrow d^*(^1_0S) \rightarrow d + \gamma$.

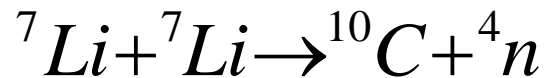
3. $n + d \rightarrow ^2n + p$

4. $^2_1d + ^3_1t \rightarrow ^3_2\text{He} + ^2_0n$

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

T. Faestermann, A. Bergmaier, R. Gernhauser, D. Koll, M. Mahgoub,

“Indications for a bound tetraneutron”, Phys. Lett. B 824, 136799, 2022.



$$B({}^4n) = 0.42 \pm 0.16 \text{ MeV}$$

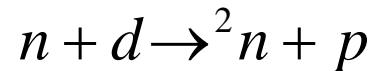
M. Duer et al., “Observation of a correlated free four-neutron system”,

Nature, 606, p. 678, 2022.

ПОИСК ДИНЕЙТРОНА ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НЕЙТРОНОВ С ДЕЙТРОНАМИ

С. Б. Борзаков, Ц. Пантелеев, А. В. Стрелков

Письма в ЭЧАЯ, № 2[111], с. 45, 2002.



Использовался пропорциональный счётчик с газовой смесью, которая состояла из 1.5 атм. D₂, 0.5 атм. Ar и 10⁻² мм. рт. ст. ³He.

Энергия протона: $E_p = \frac{2}{3}(B_d - B_n + E_n)$

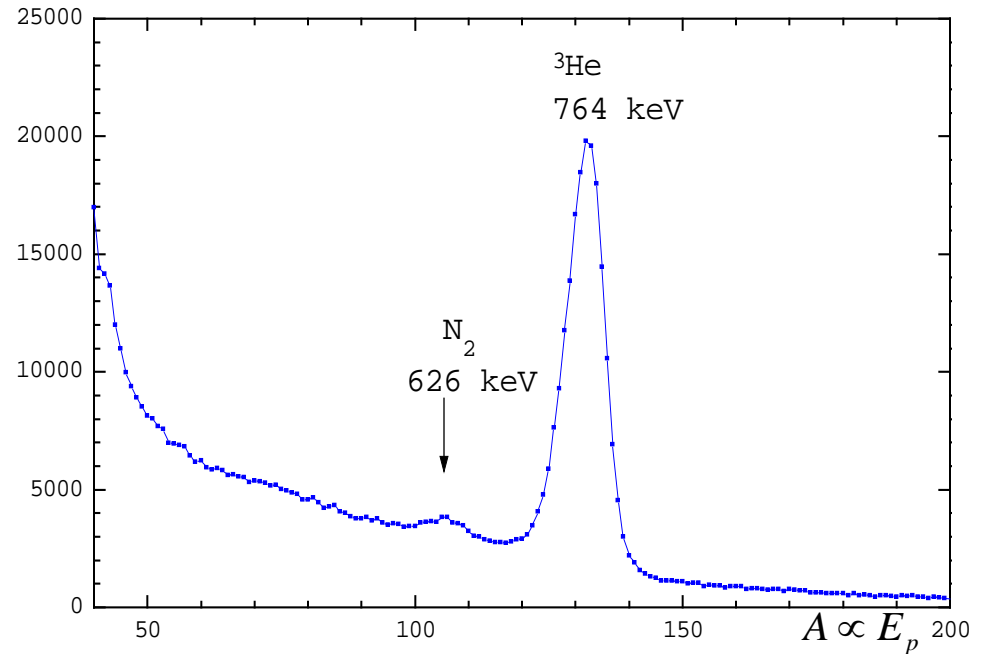
$$N_p = \Phi_n n_d \sigma_d t \varepsilon \quad N_3 = \Phi_n n_3 \sigma_3 t \varepsilon \quad \sigma_d = \frac{n_3 \sigma_3}{n_d} \frac{N_d}{N_3}$$

Для определения нейтронного потока в детектор добавляется небольшое количество ³He (n + ³He - T + p).

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

$$\sigma_{\text{din}} \leq 0.2 \text{ mb}$$

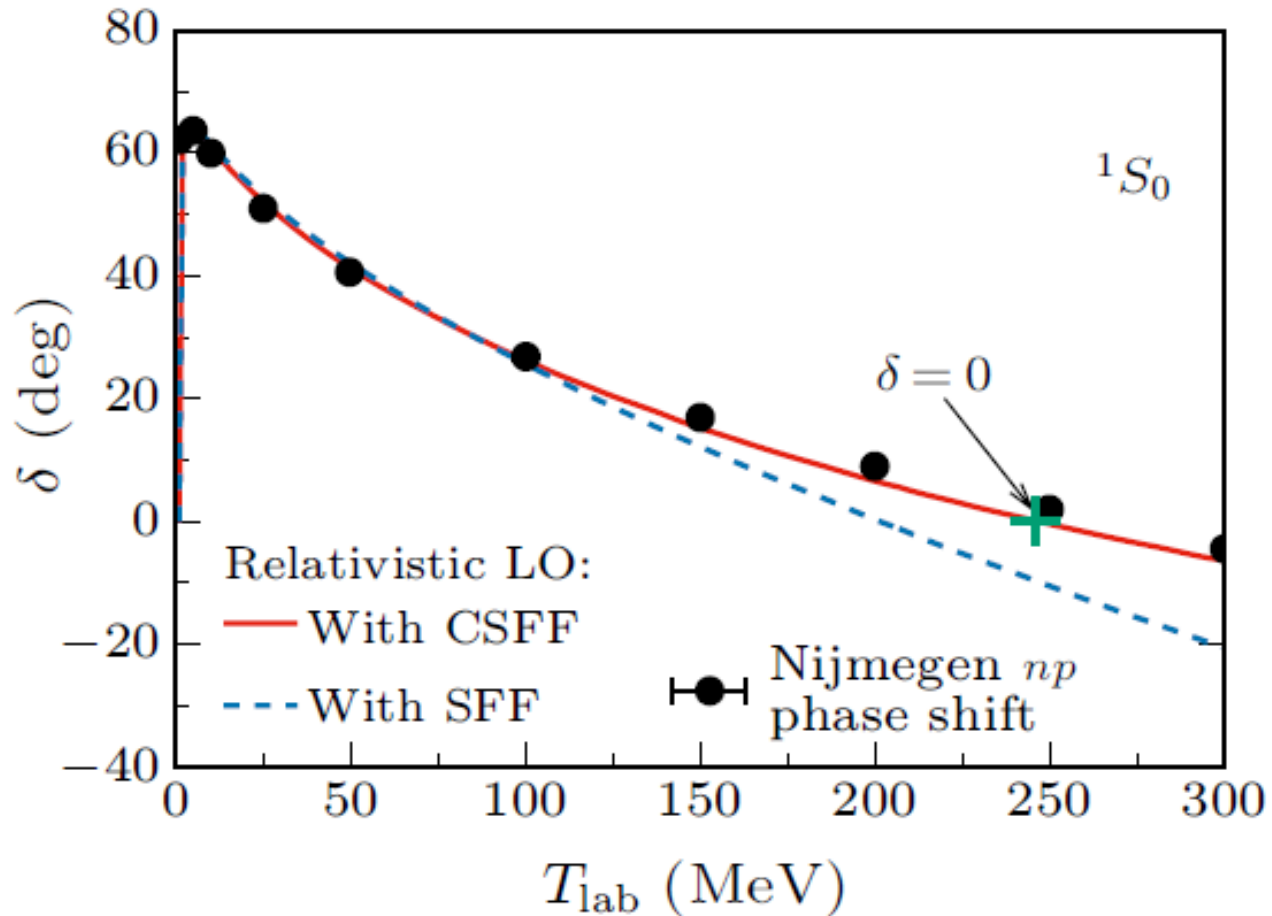
$$2.67 \leq B(^2n) \leq 3.01 \text{ MeV}$$



Амплитудный спектр заряженных частиц.

Thank you for your attention!

Легчайшие нейтральные ядра.



Фаза рассеяния нейтронов протонами в синглетном состоянии.

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер

$$n + p \rightarrow n + p$$

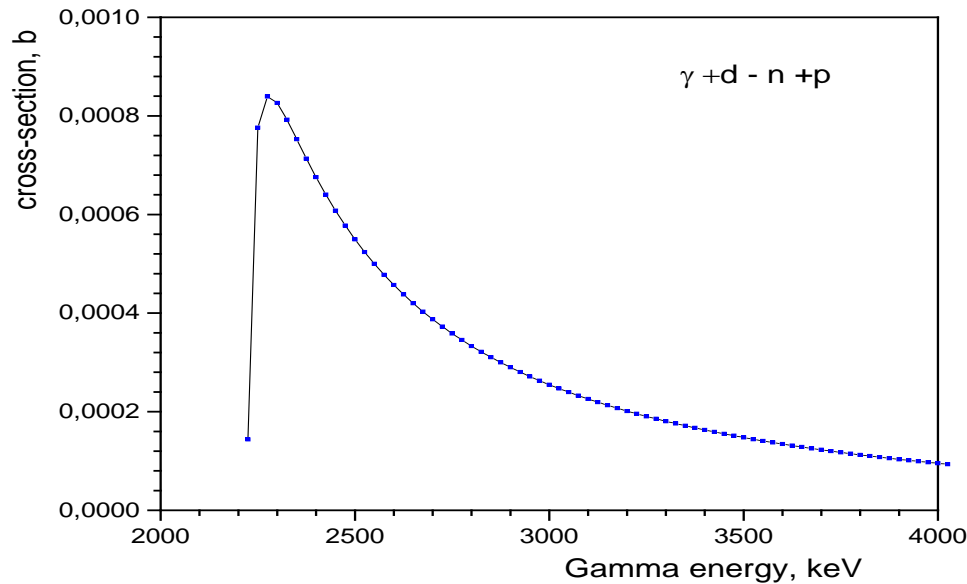
$$n + p \rightarrow d + \gamma$$

$$\gamma + d \rightarrow n + p$$

$$\gamma + d \rightarrow d + \gamma$$

1. Ross M.H., Shaw G.L., “Scattering Length and Effective Range Theory for Multichannel Processes”, Annals of Phys., V. 9, p. 391, 1960.

Возможные эксперименты по поиску синглетного дейтрона и проблема существования нейтральных ядер



Сечение фоторасщепления дейтрона.

Параметры:

$$\Gamma_n(1eV) = 9334 _ eV \quad \Gamma_\gamma = 28.8 _ eV \quad E_{res}^* = 937 _ keV$$