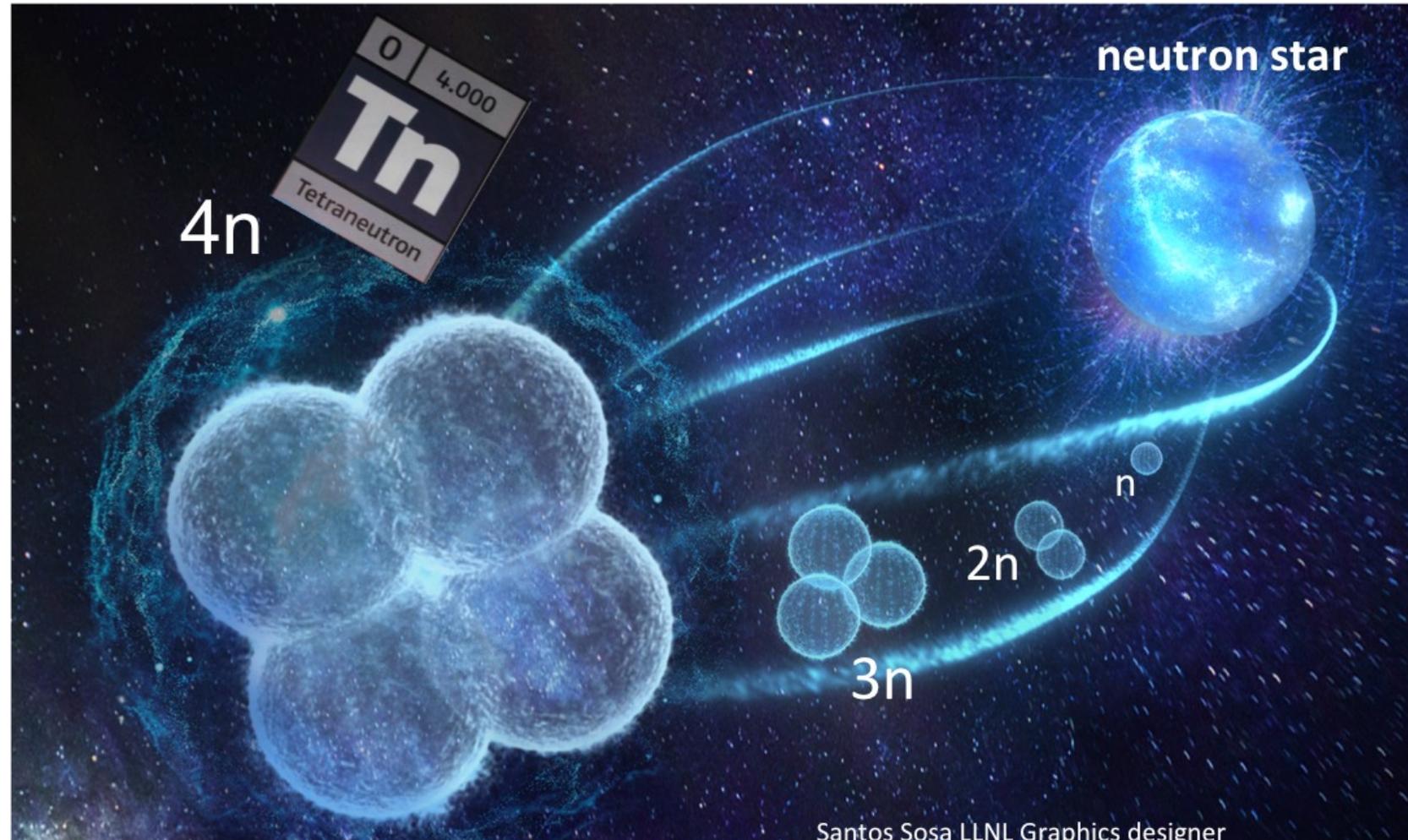


Предсказание резонанса тетранейтрона на основе теории *ab initio* легких ядер

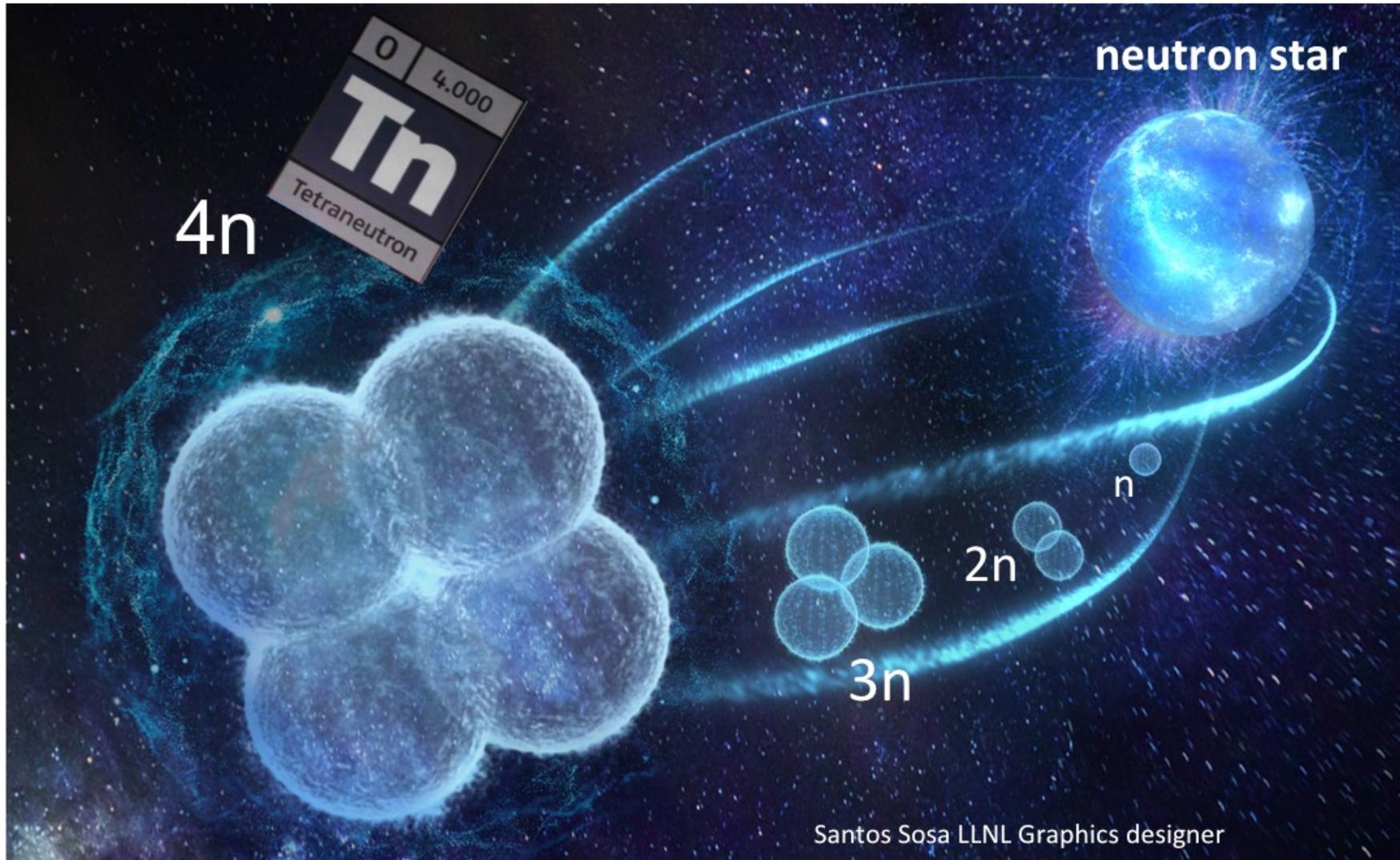
А. М. Широков

ОФАЯ

Neutron & neutron star
Is there anything in between?



Чем интересен тетранейтрон?



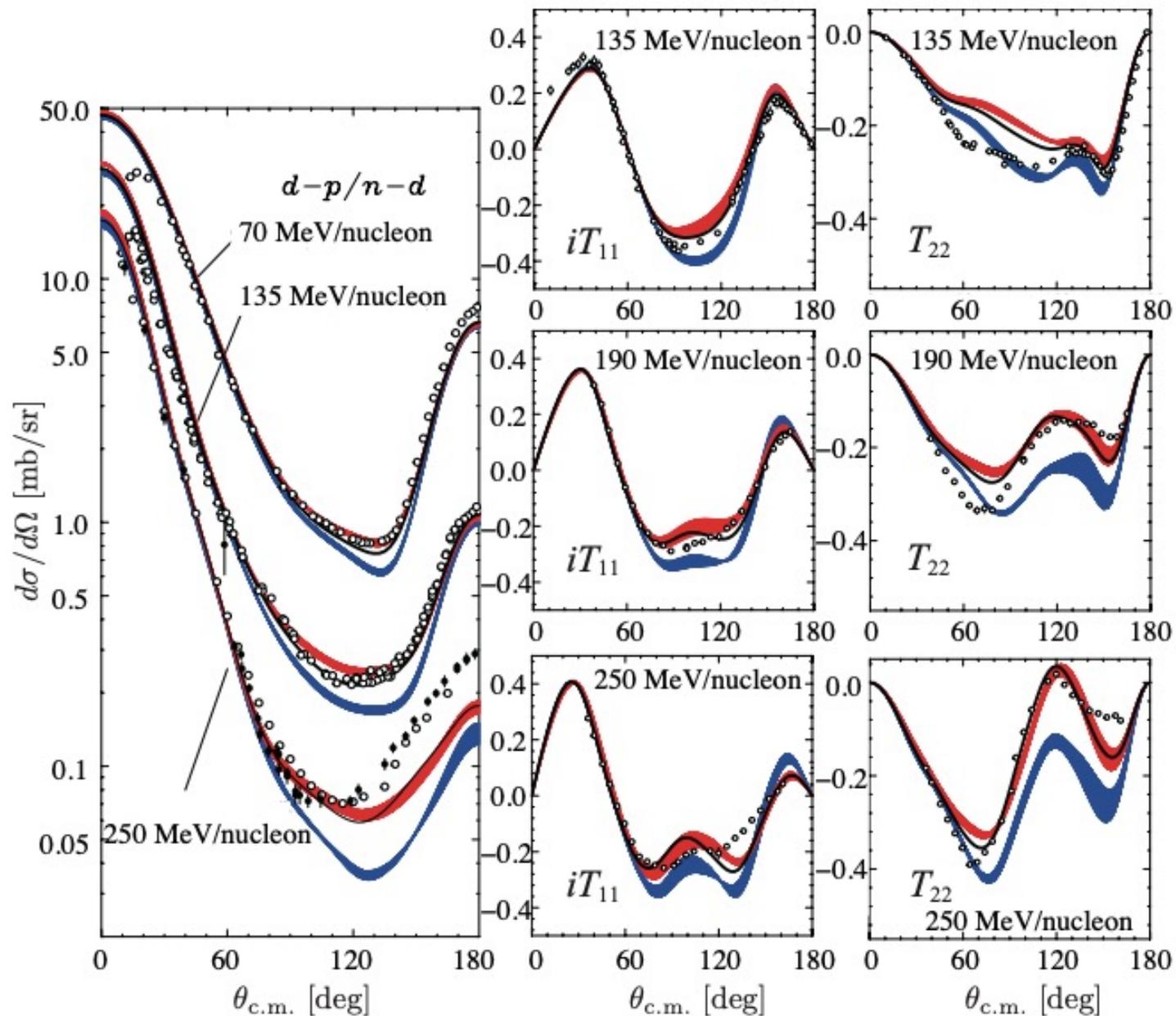
Neutron & neutron star
Is there anything in between?

Чем интересен тетранейтрон?

- Граница стабильности ядер, ядра на границе стабильности и вблизи ее, в том числе и за ее пределами
- Нейтронная материя, в том числе и с небольшим числом нейтронов
- Взаимодействие нейтронов друг с другом, в том числе и трехчастичные (есть данные по pp - и pn -рассеянию, прямых данных по nn -взаимодействию нет)
- Экспериментальные поиски тетранейтрона велись около 60 лет, окончательно обнаружен резонанс тетранейтрона в 2022 г.

N-d рассеяние

- Из статьи Kimiko Sekiguchi в трудах NTSE-2018



План:

- История исследований тетранейтрона, наше предсказание и экспериментальное подтверждение
- Легкие ядра в теории *ab initio* – краткое описание цикла наших работ, на основе которых предсказан тетранейтрон

История исследований тетранейтрона

- Первые эксперименты (начиная с 1963 г.): реакция ${}^4\text{He}(\pi^+, \pi^-)4n$ и исследование деления тяжелых ядер – ни связанных, ни резонансных не найдено
- Начиная с 1980 г. развивается теория демократического распада на 4 частицы, когда ни одна из подсистем не имеет связанных состояний (Р. Джибути, Р. Кезерашвили, К. Сигуа и др.)
- Начиная с конца 1980-х исследования с тяжелыми ионами:
 ${}^7\text{Li}({}^{11}\text{B}, {}^{14}\text{O}) {}^4n$, ${}^7\text{Li}({}^7\text{Li}, {}^{10}\text{C}) {}^4n$ и др.

История исследований тетранейтрона

- Первые эксперименты (начиная с 1963 г.): реакция ${}^4\text{He}(\pi^+, \pi^-)4n$ и исследование деления тяжелых ядер – ни связанных, ни резонансных не найдено
- Начиная с 1980 г. развивается теория демократического распада на 4 частицы, когда ни одна из подсистем не имеет связанных состояний
(Р. Джибути, Р. Кезерашвили, К. Сигуа и др.)
- Начиная с конца 1980-х исследования с тяжелыми ионами: ${}^7\text{Li}({}^{11}\text{B}, {}^{14}\text{O}) {}^4n$, ${}^7\text{Li}({}^7\text{Li}, {}^{10}\text{C}) {}^4n$ и др.
- 2002 г.: F. M. Marqués et al., Phys. Rev. C **65**, 044006 (2002) – в реакции ${}^{12}\text{C}({}^{14}\text{Be}, {}^{10}\text{Be}) {}^4n$ получен связанный тетранейтрон (6 событий)!

История исследований тетранейтрона

- 2002 г.: F. M. Marqués et al., Phys. Rev. C **65**, 044006 (2002) – в реакции $^{12}\text{C}(^{14}\text{Be}, ^{10}\text{Be})^4n$ получен связанный тетранейтрон (6 событий)!

История исследований тетранейтрона

- 2002 г.: F. M. Marqués et al., Phys. Rev. C **65**, 044006 (2002) – в реакции $^{12}\text{C}(^{14}\text{Be}, ^{10}\text{Be})^4n$ Получен ли связанный тетранейтрон?
В последовавших исследованиях результат не подтвержден

История исследований тетранейтрона

- 2002 г.: F. M. Marqués et al., Phys. Rev. C **65**, 044006 (2002) – в реакции $^{12}\text{C}(^{14}\text{Be}, ^{10}\text{Be})^4n$ Получен ли связанный тетранейтрон?
В последовавших исследованиях результат не подтвержден
- Эта работа вызвала ряд теоретических исследований. Общий вывод: современные модели взаимодействия между нуклонами в ядре не допускают образование связанной системы 4 нейтронов
- Изучена возможность образовать связанный тетранейтрон за счет трёхнуклонных сил с изоспином $T = \frac{3}{2}$ – это приводит к невозможности описать ядра с числом частиц $A \geq 4$.

История исследований тетранейтрона

- 2002 г.: F. M. Marqués et al., Phys. Rev. C **65**, 044006 (2002) – в реакции $^{12}\text{C}(^{14}\text{Be}, ^{10}\text{Be})^4n$. *В последовавших исследованиях связанный тетранейтрон не подтвержден*
- Подробно теоретически исследовался вопрос о возможности образования резонансного состояния тетранейтрона при низких энергиях и достаточно узкого, чтобы его было возможно наблюдать экспериментально, с различными NN - и NNN -взаимодействиями и в разных подходах (уравнения Фаддеева–Якубовского, гамовская модель оболочек, метод комплексного скейлинга, аналитическое продолжение по константе связи и др.). Вывод: узкие резонансы не получаются.
- Следует отметить, что теория распада резонансного состояния на 4 частицы фактически не разработана и с такими распадами фактически ранее не встречались.

История исследований тетранейтрона

Единственное указание на возможный резонанс тетранейтрона:

VOLUME 90, NUMBER 25

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
27 JUNE 2003

Can Modern Nuclear Hamiltonians Tolerate a Bound Tetra-neutron?

Steven C. Pieper*

Physics Division, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439, USA

(Received 18 February 2003; published 27 June 2003)

I show that it does not seem possible to change modern nuclear Hamiltonians to bind a tetra-neutron without destroying many other successful predictions of those Hamiltonians. This means that, should a recent experimental claim of a bound tetra-neutron be confirmed, our understanding of nuclear forces will have to be significantly changed. I also point out some errors in previous theoretical studies of this problem.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.90.252501

PACS numbers: 21.30.-x, 21.45.+v, 21.60.Ka, 27.10.+h

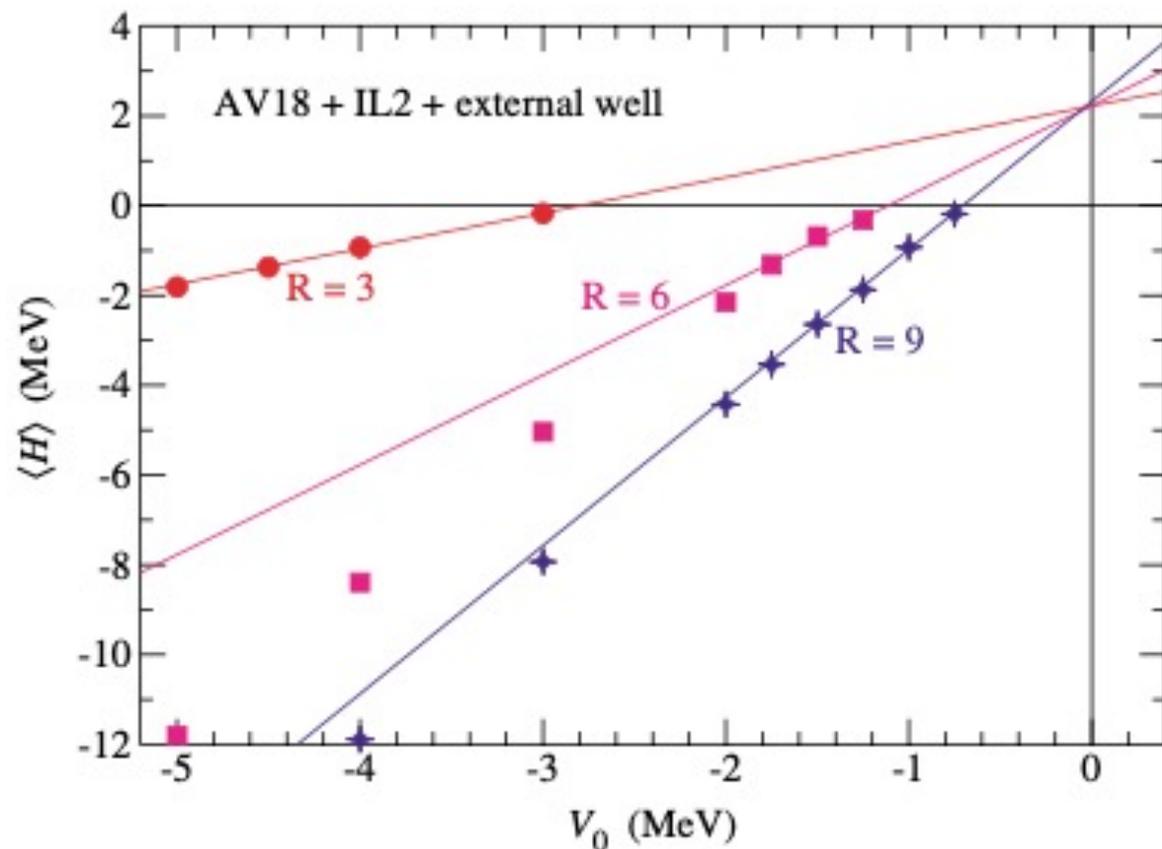
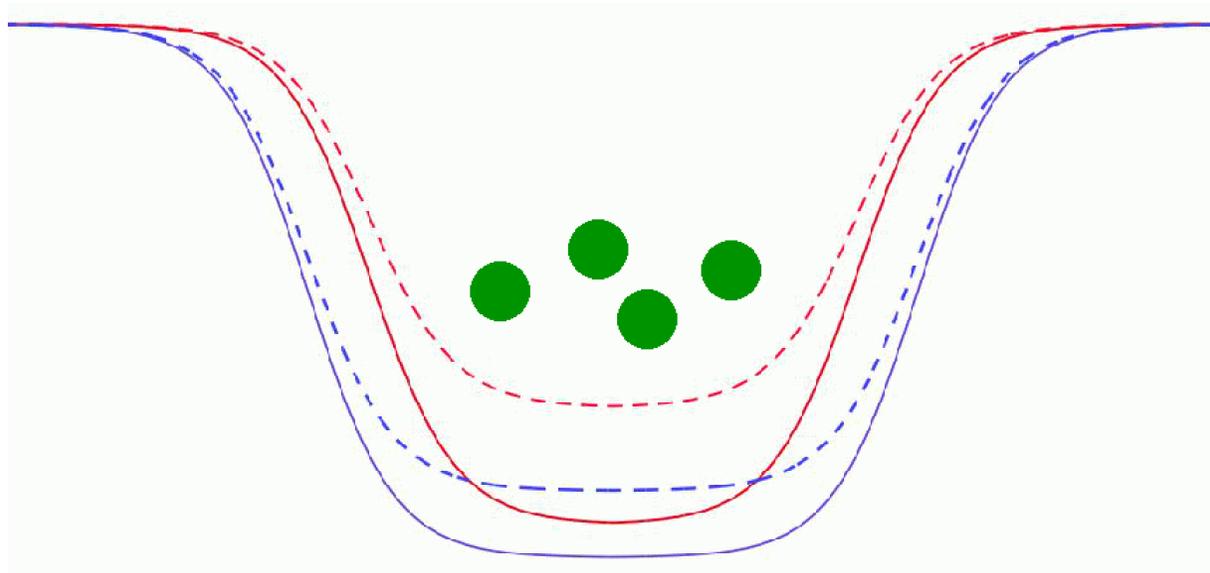
An experimental claim of the existence of a bound

GFMC starts with a trial wave function Ψ_T , which

История исследований тетранейтрона

Единственное указание на возможный резонанс тетранейтрона: S. Pieper, Phys. Rev. Lett., **90**, 252501 (2003)

4 нейтрона помещены в притягивающие потенциалы Вудса-Саксона разной ширины, за счет чего образуют связанное состояние. Глубины потенциалов уменьшают до нуля. Расчет в GFMC с NN и NNN -силами.



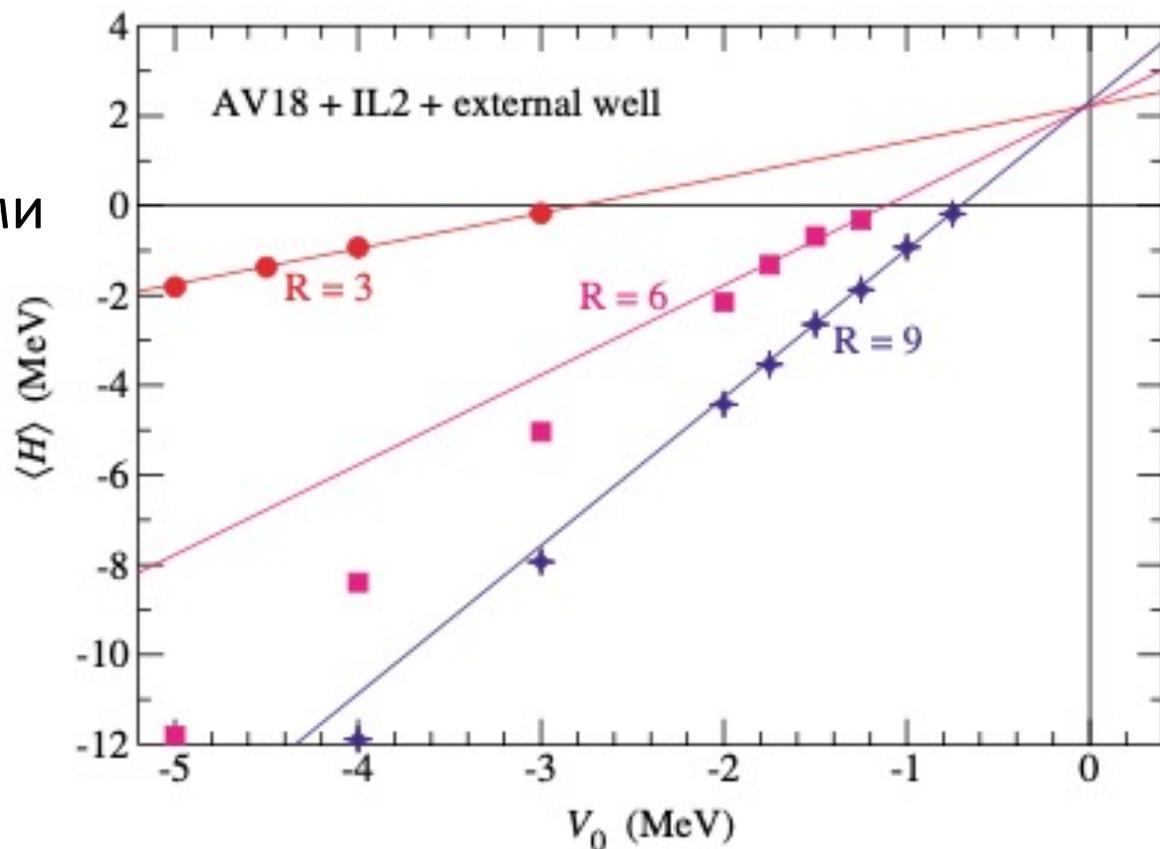
История исследований тетранейтрона

Единственное указание на возможный резонанс тетранейтрона: S. Pieper, Phys. Rev. Lett., **90**, 252501 (2003).

4 нейтрона помещены в притягивающие потенциалы Вудса-Саксона разной ширины, за счет чего образуют связанное состояние. Глубины потенциалов уменьшают до нуля. Расчет в GFMC с NN и NNN -силами.

Экстраполяции прямой линией до нулевой глубины энергий, полученных с потенциалами разной ширины, сходятся примерно в одной точке при энергии около 2 МэВ. Это намек, но никак не доказательство резонансного состояния с энергией 2 МэВ.

Теоретически более обоснованный метод аналитического продолжения по константе связи (R. Lazauskas и J. Carbonell) не дал резонанса.



История исследований тетранейтрона

Работа Л. Григоренко, Н. Тимофеюк и М. Жукова, Eur. Phys. J. A 19, 187 (2004)

Eur. Phys. J. A **19**, 187–201 (2004)

DOI 10.1140/epja/i2003-10124-1

**THE EUROPEAN
PHYSICAL JOURNAL A**

Broad states beyond the neutron drip line

Examples of ${}^5\text{H}$ and ${}^4\text{n}$

L.V. Grigorenko^{1,2,a}, N.K. Timofeyuk³, and M.V. Zhukov⁴

¹ GSI, Planckstrasse 1, D-64291, Darmstadt, Germany

² Russian Research Center “The Kurchatov Institute”, 123182 Moscow, Russia

³ Department of Physics, University of Surrey, Guildford GU2 7XH, UK

⁴ Department of Physics, Chalmers University of Technology and Göteborg University, S-41296 Göteborg, Sweden

Received: 9 April 2003 / Revised version: 21 August 2003 /

Published online: 26 January 2004 – © Società Italiana di Fisica / Springer-Verlag 2004

Communicated by G. Orlandini

Abstract. Theoretical studies of broad states in the few-body systems beyond the neutron drip line have been performed. We introduce a theoretical model which allows to incorporate the initial structure of colliding nuclei, reaction mechanism, few-body effects and final-state interactions in studies of broad unbound

История исследований тетранейтрона

Работа Л. Григоренко, Н. Тимофеюк и М. Жукова, Eur. Phys. J. A 19, 187 (2004)

Рассмотрена реакция ${}^8\text{He}(p; {}^4\text{He}, p) {}^4n$. Описание быстрого выбивания ${}^4\text{He}$ из ${}^8\text{He}$ описывается уравнением Шрёдингера с источником:

$$(H_4 - E)\Psi_4^{(+)} = F_{4n}^0,$$
$$\Psi_4^{(+)} = G^+(E)F_{4n}^0,$$

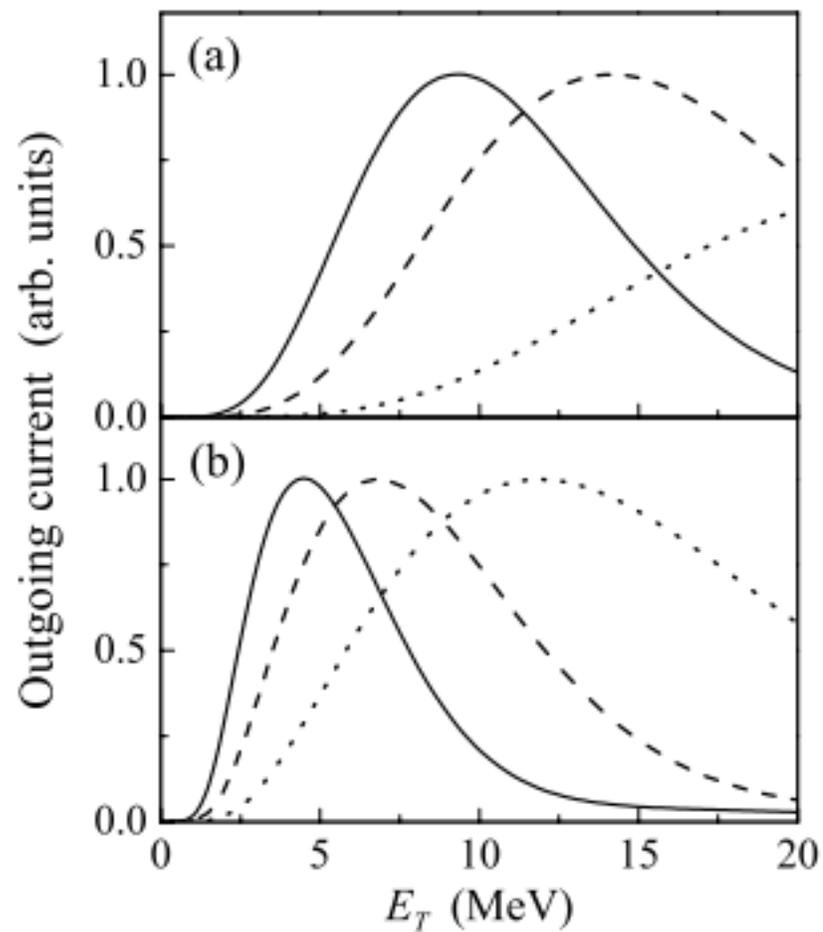
где F_{4n}^0 — волновая функция 4 нейтронов в исходном ядре ${}^8\text{He}$. ${}^8\text{He}$

описывается COSMA, $\Psi_4^{(+)}$ — гиперсферическими функциями. Резонанса в системе 4n нет, но за счет начального распределения 4 нейтронов в ${}^8\text{He}$ при быстром выбивании ${}^4\text{He}$ образуется широкая кривая с максимумом при достаточно больших энергиях.

История исследований тетранейтрона

Работа Л. Григоренко, Н. Тимофеюк и М. Жукова, Eur. Phys. J. A 19, 187 (2004)

Рассмотрена реакция ${}^8\text{He}(p; {}^4\text{He}, p) {}^4n$.



История исследований тетранейтрона

- В 2012-2013 гг. три группы из RIKEN, GANIL и Дармштадта начинают готовить эксперименты по поиску резонанса тетранейтрона на пучке ^8He в RIKEN. Экспериментаторы из Дармштадта обращаются в нашу теоретическую группу из Iowa State Univ. и НИИЯФ МГУ с вопросом, не можем ли мы дать какие-то предварительные результаты о существовании этого резонанса и его энергии и ширине. Мы пробовали разные модели: гамовскую модель оболочек, метод аналитического продолжения по константе связи и др. – в этих расчетах получить резонанс тетранейтрона не удалось.
- Я в это время начал разрабатывать метод SS-HORSE для описания резонансов на основе расчетов *ab initio* в модели оболочек без инертного кора (МОБИК = No-core Shell Model), которыми мы активно занимались. Этот не доработанный и не апробированный метод мы обобщили на случай демократического распада и на основе расчетов в МОБИК в 2014 г. передали экспериментаторам предварительные цифры: резонанс с энергией около 0.8 МэВ и шириной около 1.4 МэВ.

История исследований тетранейтрона

Эксперимент дармштадтской группы предполагал регистрацию 4 нейтронов на совпадении с p и ${}^4\text{He}$. Фирма, которая строила детектор нейтронов обанкротилась, эксперимент задержался.

Мы доводили до ума метод SS-HORSE, отлаживали его на модельных задачах и в расчетах рассеяния $n + {}^4\text{He}$ на основе МОБИК. В 2016 г. параллельно с расчетами резонансов в системе $n + {}^4\text{He}$ были опубликованы наши предсказания для тетранейтрона: $E_\gamma = 0.844$ МэВ, $\Gamma = 1.378$ МэВ (А. М. Широков, G. Papadimitriou, A. I. Mazur, I. A. Mazur, R. Roth, J. P. Vary, Phys. Rev. Lett. **117**, 182502 (2016)).

История исследований тетранейтрона

Эксперимент дармштадтской группы предполагал регистрацию 4 нейтронов на совпадении с p и ${}^4\text{He}$. Фирма, которая строила детектор нейтронов обанкротилась, эксперимент задержался.

Мы доводили до ума метод SS-HORSE, отлаживали его на модельных задачах и в расчетах рассеяния $n + {}^4\text{He}$ на основе МОБИК. В 2016 г. параллельно с расчетами резонансов в системе $n + {}^4\text{He}$ были опубликованы наши предсказания для тетранейтрона: $E_r = 0.844$ МэВ, $\Gamma = 1.378$ МэВ (А. М. Широков, G. Papadimitriou, A. I. Mazur, I. A. Mazur, R. Roth, J. P. Vary, Phys. Rev. Lett. **117**, 182502 (2016)).

За несколько месяцев до нас – эксперимент японцев (K. Kisamori, et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 052501 (2016)), где обнаружен резонанс тетранейтрона: $E_r = 0.83 \pm 0.65(\text{stat}) \pm 1.25(\text{syst})$ МэВ, $\Gamma < 2.6$ МэВ (4 события!)

История исследований тетранейтрона

Японский эксперимент 2016 г.: $E_\gamma = 0.83 \pm 0.65(\text{stat}) \pm 1.25(\text{syst})$ МэВ, $\Gamma < 2.6$ МэВ (4 события!): (K. Kisamori et al., Phys. Rev. Lett. 116, 052501 (2016)).

Мы (теория) 2016 г.: $E_\gamma = 0.844$ МэВ, $\Gamma = 1.378$ МэВ.

Шум в прессе, только про нашу статью не менее 20 публикаций (Phys.org, International Business Times, Вести-24 и др.).

Продолжаются многочисленные безуспешные попытки разных авторов получить резонанс тетранейтрона теоретически в разных подходах и с разными взаимодействиями. Нарастает скептицизм относительно японского эксперимента (4 события!).

- 2019 г.: Единственное кроме нас теоретическое описание резонанса тетранейтрона в гаммовской модели оболочек— J. G. Li, N. Michel, B. S. Hu, W. Zuo, F. R. Xu, Phys. Rev. C **100**, 054313 (2019): $E_\gamma = 2.64$ МэВ, $\Gamma = 2.38$ МэВ

История исследований тетранейтрона

Японский эксперимент 2016 г.: $E_r = 0.83 \pm 0.65(\text{stat}) \pm 1.25(\text{syst})$ МэВ, $\Gamma < 2.6$ МэВ (4 события!): (K. Kisamori et al., Phys. Rev. Lett. 116, 052501 (2016)).

Мы (теория) 2016 г.: $E_r = 0.844$ МэВ, $\Gamma = 1.378$ МэВ.

Шум в прессе, только про нашу статью не менее 20 публикаций (Phys.org, International Business Times, Вести-24 и др.).

Продолжаются многочисленные безуспешные попытки разных авторов получить резонанс тетранейтрона теоретически в разных подходах и с разными взаимодействиями. Нарастает скептицизм относительно японского эксперимента (4 события!).

- 2019 г.: Единственное кроме нас теоретическое описание резонанса тетранейтрона в гаммовской модели оболочек— J. G. Li, N. Michel, B. S. Hu, W. Zuo, F. R. Xu, Phys. Rev. C **100**, 054313 (2019): $E_r = 2.64$ МэВ, $\Gamma = 2.38$ МэВ
- 2022 г.: Эксперимент дармштадской группы – M. Duer et al., Nature **606**, 678 (2022): $E_r = 2.37 \pm 0.38(\text{stat}) \pm 0.44(\text{syst})$ МэВ, $\Gamma = 1.75 \pm 0.22(\text{stat}) \pm 0.30(\text{syst})$ МэВ.

Observation of a correlated free four-neutron system

<https://doi.org/10.1038/s41586-022-04827-6>

Received: 4 August 2021

Accepted: 28 April 2022

Published online: 22 June 2022

Open access

 Check for updates

M. Duer^{1✉}, T. Aumann^{1,2,3}, R. Gernhäuser⁴, V. Panin^{2,5}, S. Paschalis^{1,6}, D. M. Rossi¹, N. L. Achouri⁷, D. Ahn^{5,16}, H. Baba⁵, C. A. Bertulani⁸, M. Böhmer⁴, K. Boretzky², C. Caesar^{1,2,5}, N. Chiga⁵, A. Corsi⁹, D. Cortina-Gil¹⁰, C. A. Douma¹¹, F. Dufter⁴, Z. Elekes¹², J. Feng¹³, B. Fernández-Domínguez¹⁰, U. Forsberg⁶, N. Fukuda⁵, I. Gasparic^{1,5,14}, Z. Ge⁵, J. M. Gheller⁹, J. Gibelin⁷, A. Gillibert⁹, K. I. Hahn^{15,16}, Z. Halász¹², M. N. Harakeh¹¹, A. Hirayama¹⁷, M. Holl¹, N. Inabe⁵, T. Isobe⁵, J. Kahlbow¹, N. Kalantar-Nayestanaki¹¹, D. Kim¹⁶, S. Kim^{1,16}, T. Kobayashi¹⁸, Y. Kondo¹⁷, D. Körper², P. Koseoglou¹, Y. Kubota⁵, I. Kuti¹², P. J. Li¹⁹, C. Lehr¹, S. Lindberg²⁰, Y. Liu¹³, F. M. Marqués⁷, S. Masuoka²¹, M. Matsumoto¹⁷, J. Mayer²², K. Miki^{1,18}, B. Monteagudo⁷, T. Nakamura¹⁷, T. Nilsson²⁰, A. Obertelli^{1,9}, N. A. Orr⁷, H. Otsu⁵, S. Y. Park^{15,16}, M. Parlog⁷, P. M. Potlog²³, S. Reichert⁴, A. Revel^{7,9,24}, A. T. Saito¹⁷, M. Sasano⁵, H. Scheit¹, F. Schindler¹, S. Shimoura²¹, H. Simon², L. Stuhl^{16,21}, H. Suzuki⁵, D. Symochko¹, H. Takeda⁵, J. Tanaka^{1,5}, Y. Togano¹⁷, T. Tomai¹⁷, H. T. Törnqvist^{1,2}, J. Tscheuschner¹, T. Uesaka⁵, V. Wagner¹, H. Yamada¹⁷, B. Yang¹³, L. Yang²¹, Z. H. Yang⁵, M. Yasuda¹⁷, K. Yoneda⁵, L. Zanetti¹, J. Zenihiro^{5,25} & M. V. Zhukov²⁰

A long-standing question in nuclear physics is whether chargeless nuclear systems can exist. To our knowledge, only neutron stars represent near-pure neutron systems, where neutrons are squeezed together by the gravitational force to very high densities. The experimental search for isolated multi-neutron systems has been an ongoing quest for several decades¹, with a particular focus on the four-neutron system called the tetra-neutron, resulting in only a few indications of its existence so far^{2–4}, leaving the tetra-neutron an elusive nuclear system for six decades. Here we report on the observation of a resonance-like structure near threshold in the four-neutron system that is consistent with a quasi-bound tetra-neutron state existing for a very short time. The measured energy and width of this state provide a key benchmark for our understanding of the nuclear force. The use of an experimental approach based on a knockout reaction at large momentum transfer with a radioactive high-energy ⁸He beam was key.

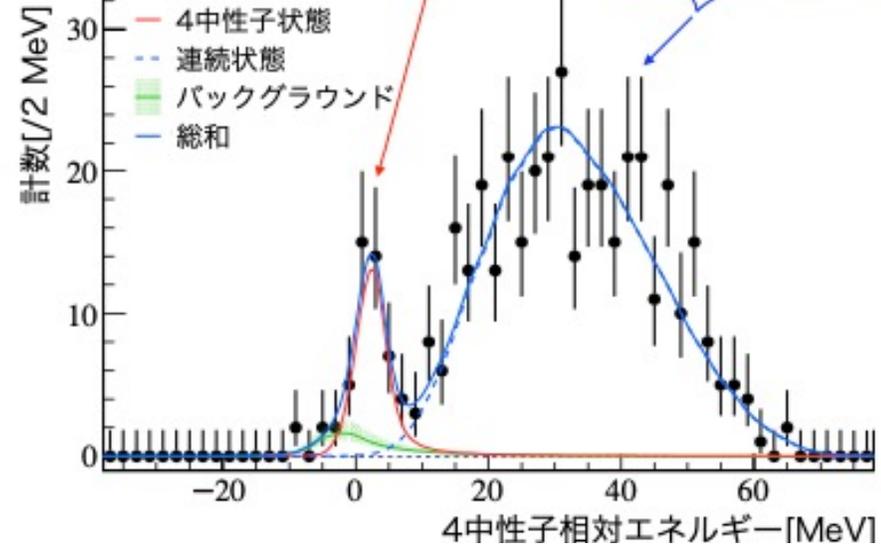
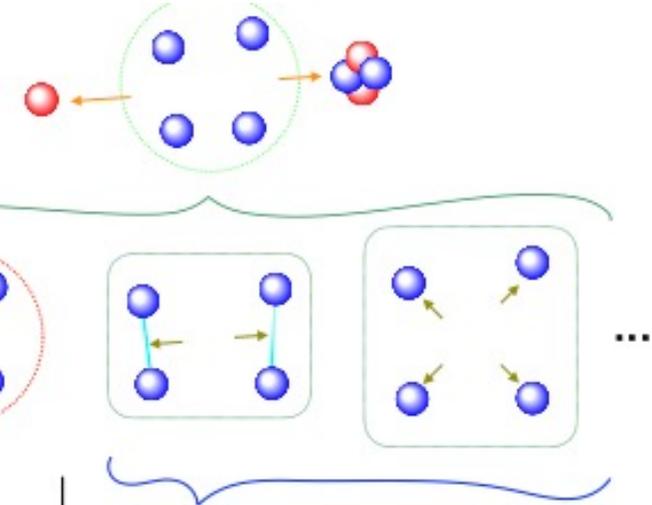
Эксперимент:

Открытие тетранейтрона

Эксперимент

$^8\text{He}(p,p^4\text{He})$ 反応結果

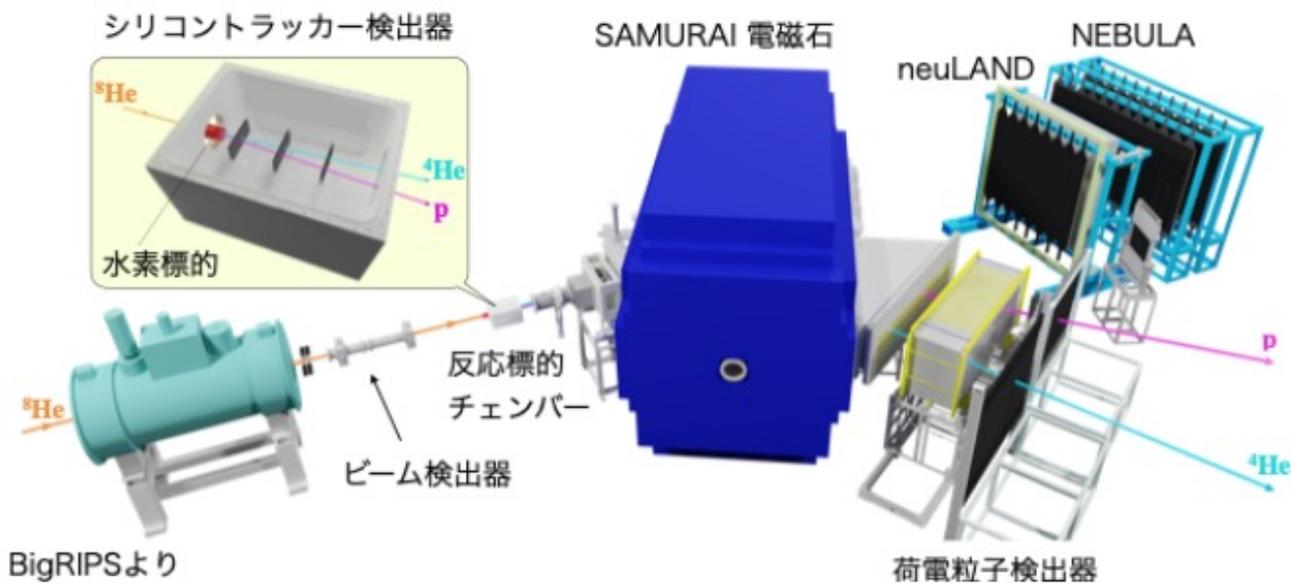
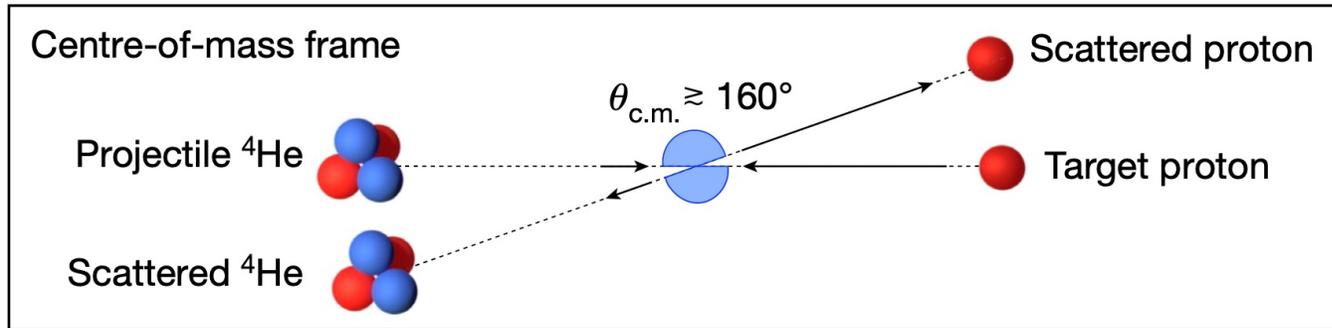
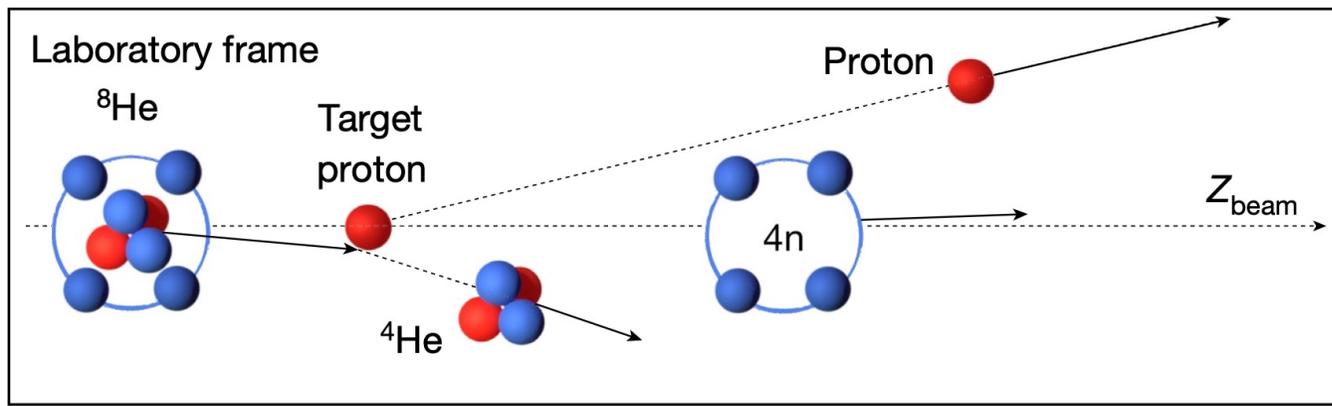
とその解釈



$$E_r = 2.37 \pm 0.38(\text{stat.}) \pm 0.44(\text{sys.}) \text{ MeV},$$

$$\Gamma = 1.75 \pm 0.22(\text{stat.}) \pm 0.30(\text{sys.}) \text{ MeV}.$$

corresponding lifetime of $(3.8 \pm 0.8) \times 10^{-22} \text{ s}$.

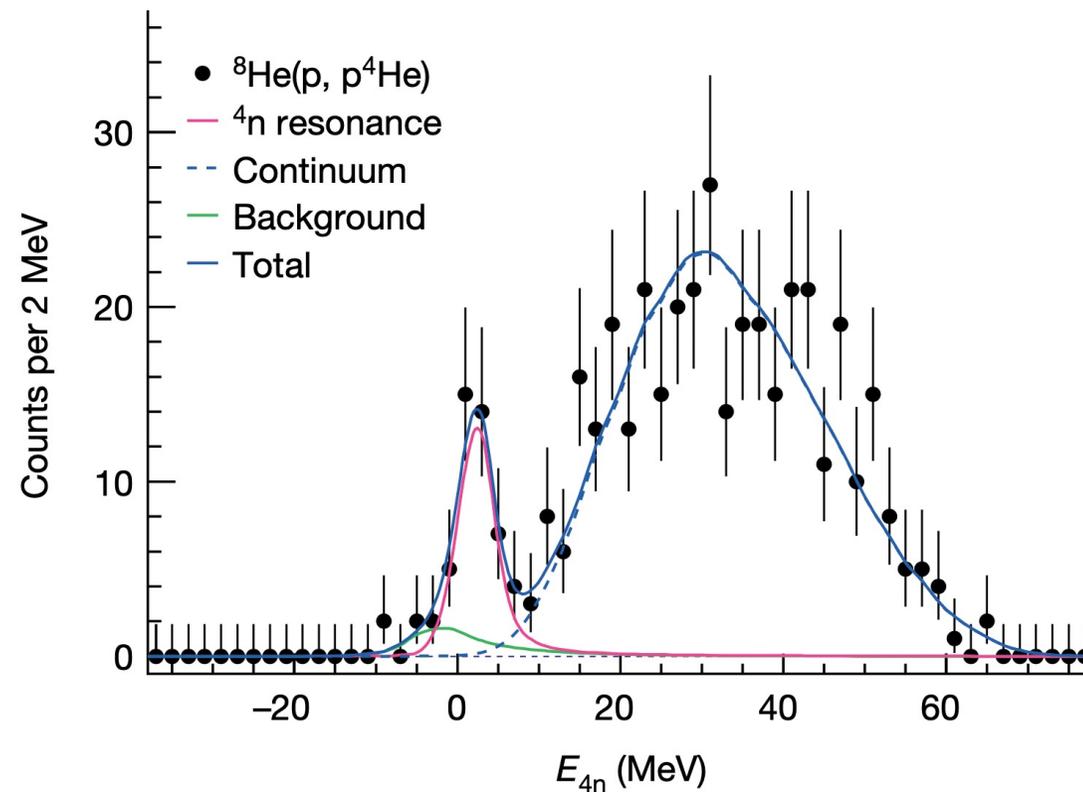
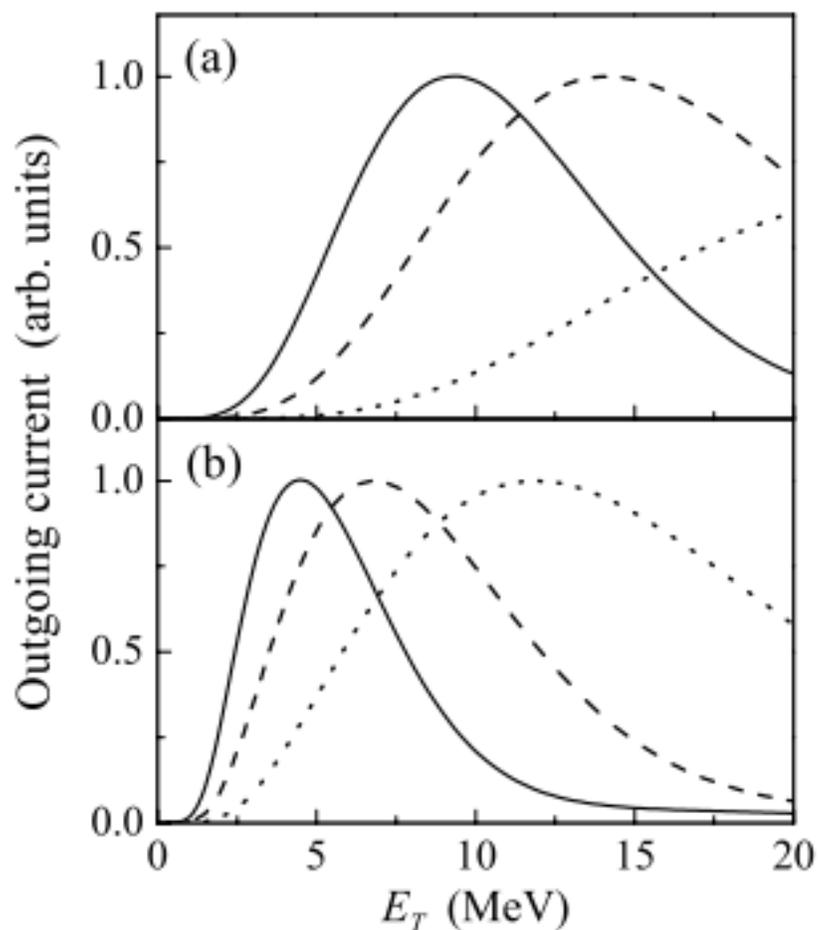


BigRIPSより

История исследований тетранейтрона

Работа Л. Григоренко, Н. Тимофеюк и М. Жукова, Eur. Phys. J. A 19, 187 (2004)

Рассмотрена реакция ${}^8\text{He}(p; {}^4\text{He}, p) {}^4n$.

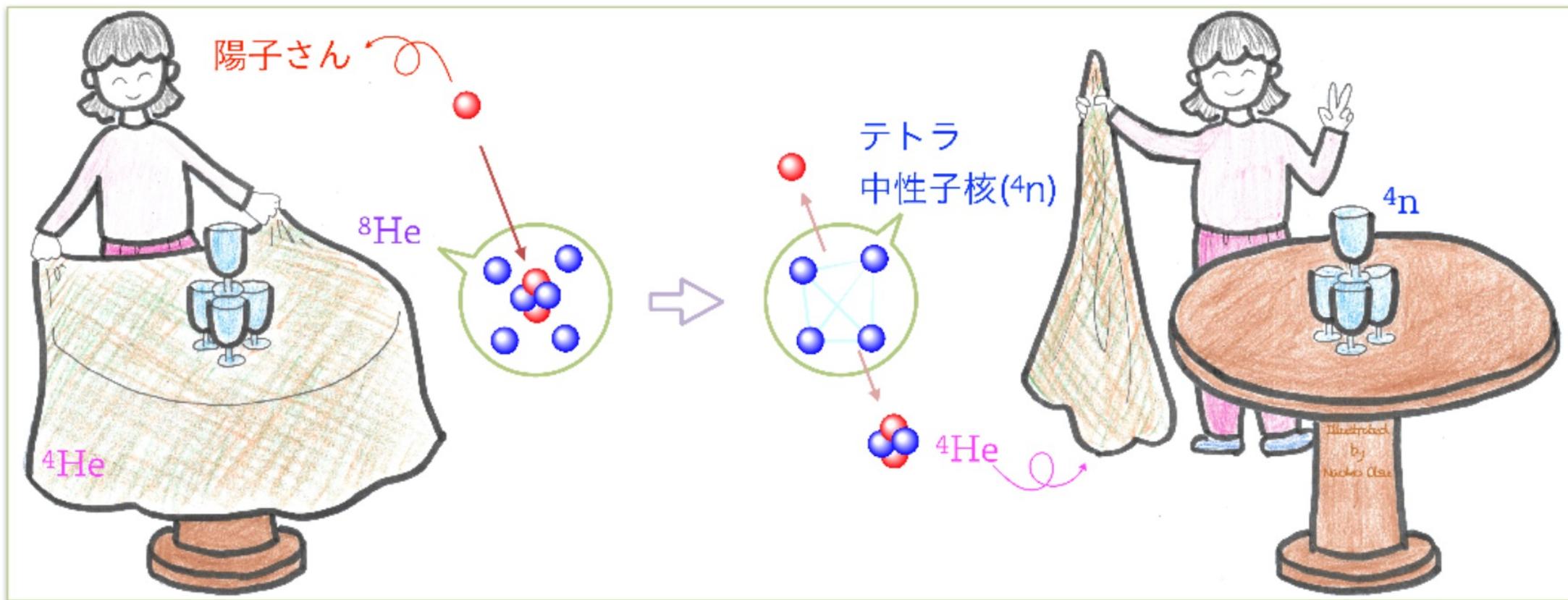


Синяя пунктирная кривая на рис. из эксперимента 2022 г. взята из работы Григоренко и др. 2004 г.

PRESS RELEASE

2022年6月22日

理化学研究所、ダルムシュタット工科大学
東京大学大学院理学系研究科、東京工業大学



Prediction for a Four-Neutron Resonance

A. M. Shirokov,^{1,2,3,*} G. Papadimitriou,^{4,†} A. I. Mazur,³ I. A. Mazur,³ R. Roth,⁵ and J. P. Vary^{2,‡}

¹*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

²*Department of Physics and Astronomy, Iowa State University, Ames, Iowa 50011-3160, USA*

³*Pacific National University, 136 Tikhookeanskaya Street, Khabarovsk 680035, Russia*

⁴*Nuclear and Chemical Science Division, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California 94551, USA*

⁵*Institut für Kernphysik, Technische Universität Darmstadt, 64289 Darmstadt, Germany*

(Received 20 July 2016; revised manuscript received 9 September 2016; published 28 October 2016)

We utilize various *ab initio* approaches to search for a low-lying resonance in the four-neutron ($4n$) system using the JISP16 realistic NN interaction. Our most accurate prediction is obtained using a J -matrix extension of the no-core shell model and suggests a $4n$ resonant state at an energy near $E_r = 0.8$ MeV with a width of approximately $\Gamma = 1.4$ MeV.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.117.182502](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.182502)

With interest sparked by a recent experiment [1] on the possibility of a resonant four-neutron ($4n$) structure (see also [2] for a recent communication) and while awaiting forthcoming experiments on the same system [3–5], we search for $4n$ (tetra-neutron) resonances using the high-precision

knocking out ${}^4\text{He}$, it is expected that the tetra-neutron will disintegrate very fast due to its anticipated large width.

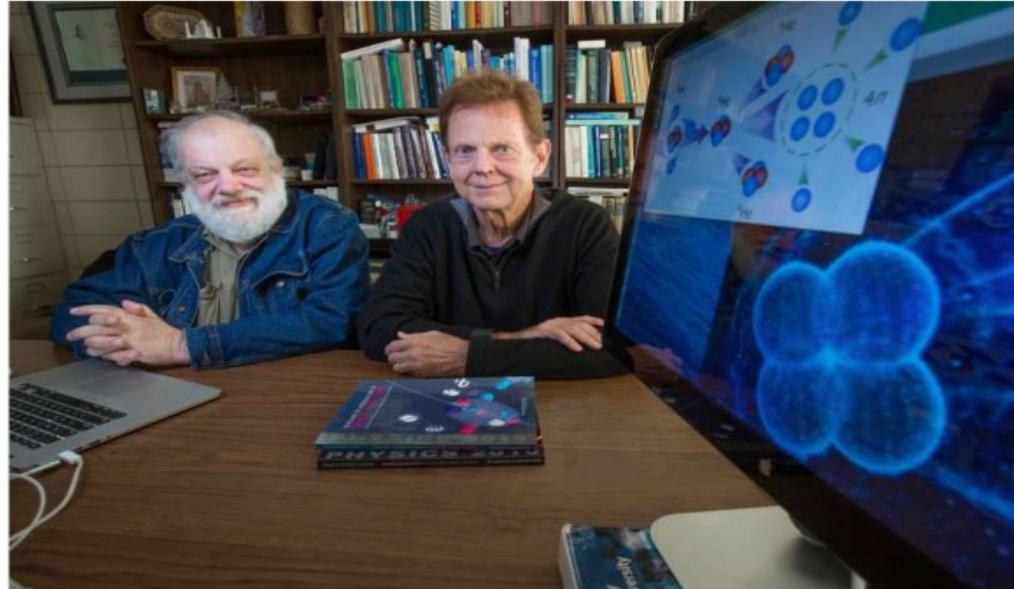
There is also a work [16] where the continuum response of the tetra-neutron was studied. The outcome was that there exists a resonantlike structure at around 4–5 MeV above the



🕒 JUNE 22, 2022

Theoretical calculations predicted now-confirmed tetraneutron, an exotic state of matter

by Iowa State University



Andrey Shirokov, left, of Moscow State University in Russia, who has been a vi...

James Vary has been waiting for nuclear physics experiments to confirm the reality of a "tetra-neutron" that he and his colleagues theorized, predicted and first announced during a presentation in the summer of 2014, followed by a research paper in the fall of 2016.

"Whenever we present a theory, we always have to say we're waiting for experimental confirmation," said Vary, an Iowa State

Тетранейтрон и теория *ab initio* легких ядер

- Описание резонанса тетранейтрона – это вершина айсберга в наших многолетних исследованиях и построении безмодельной (*ab initio*) теории легких ядер.
- Можно выделить следующие направления:
- Модель оболочек без инертного кора (МОБИК = No-core Shell Model, NCSM): расчеты на суперкомпьютерах в МОБИК, ее развитие, описание свойств конкретных ядер
- Развитие реалистических (описывающих данные по NN -рассеянию и свойства дейтрона) моделей NN -взаимодействия JISP16 и Daejeon16, обеспечивающих хорошее описание легких ядер
- Методы экстраполяции результатов МОБИК на случай бесконечного базиса, феноменологический и на основе обучения искусственных нейронных сетей
- Развитие формализма HORSE (Harmonic oscillator representation of scattering equations), метод описания непрерывного спектра ядер на основе МОБИК, SS-HORSE –МОБИК
- Переход к описанию более тяжелых ядер в модели оболочек с кором, где эффективное взаимодействие в валентной оболочке получается методом *ab initio*

МОБИК

- Я сотрудничаю с группой J. Vary из Iowa State University (США) с конца 1990-х гг., когда J. Vary опубликовал первые статьи, где была введена МОБИК. С тех пор мы опубликовали много работ в этом подходе, развивали его, рассчитано много легких ядер.

- Структура МОБИК:

- Гамильтониан:
$$H_A = \sum_i^A \frac{p_i^2}{2m} + \sum_{i<j}^A V_{NN}(\vec{r}_i - \vec{r}_j) \quad \left(+ \sum_{i<j<k}^A V_{ijk}^{NNN} \right)$$

- Волновая функция – суперпозиция базисных многочастичных функций:

$$\Psi_A = \sum_{\alpha} a_{\alpha} \Psi_A^{\alpha}$$

- Ψ_A^{α} – антисимметризованное произведение одночастичных осцилляторных функций (детерминанты Слэтера) для Z протонов и N нейтронов:

- $$\Psi_A^{\alpha} = \mathcal{A} \varphi_1(\vec{r}_1) \varphi_2(\vec{r}_2) \dots \varphi_A(\vec{r}_A) = \det \begin{pmatrix} \varphi_1^p(\vec{r}_1) & \dots & \varphi_1^p(\vec{r}_Z) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_Z^p(\vec{r}_1) & \dots & \varphi_Z^p(\vec{r}_Z) \end{pmatrix} \det \begin{pmatrix} \varphi_1^n(\vec{r}_1) & \dots & \varphi_1^n(\vec{r}_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_N^n(\vec{r}_1) & \dots & \varphi_N^n(\vec{r}_N) \end{pmatrix}$$

МОБИК

- $\Psi_A^\alpha = \mathcal{A} \varphi_1(\vec{r}_1) \varphi_2(\vec{r}_2) \dots \varphi_A(\vec{r}_A) = \det \begin{pmatrix} \varphi_1^p(\vec{r}_1) & \dots & \varphi_1^p(\vec{r}_Z) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_Z^p(\vec{r}_1) & \dots & \varphi_Z^p(\vec{r}_Z) \end{pmatrix} \det \begin{pmatrix} \varphi_1^n(\vec{r}_1) & \dots & \varphi_1^n(\vec{r}_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_N^n(\vec{r}_1) & \dots & \varphi_N^n(\vec{r}_N) \end{pmatrix}$

- Используется m -scheme: каждая одночастичная функция $\varphi_i(\vec{r}_j)$ характеризуется l, j, m_j ; детерминант Слэтера характеризуется проекцией $M = \sum_j m_j$, но не имеет определенного полного момента J – метод Лонцоша позволяет диагонализировать матрицу гамильтониана с меньшей затратой ресурсов, чем построить полный базис с определенным J . Состояния с определенным J формируются динамически при диагонализации гамильтониана.
- Матрица гамильтониана $H_{\alpha\alpha'}^A$ сильно разрежена, что позволяет при использовании современных суперкомпьютеров диагонализировать матрицу $H_{\alpha\alpha'}^A$ размером $\sim 2 \cdot 10^{10} \times 2 \cdot 10^{10}$.

МОБИК

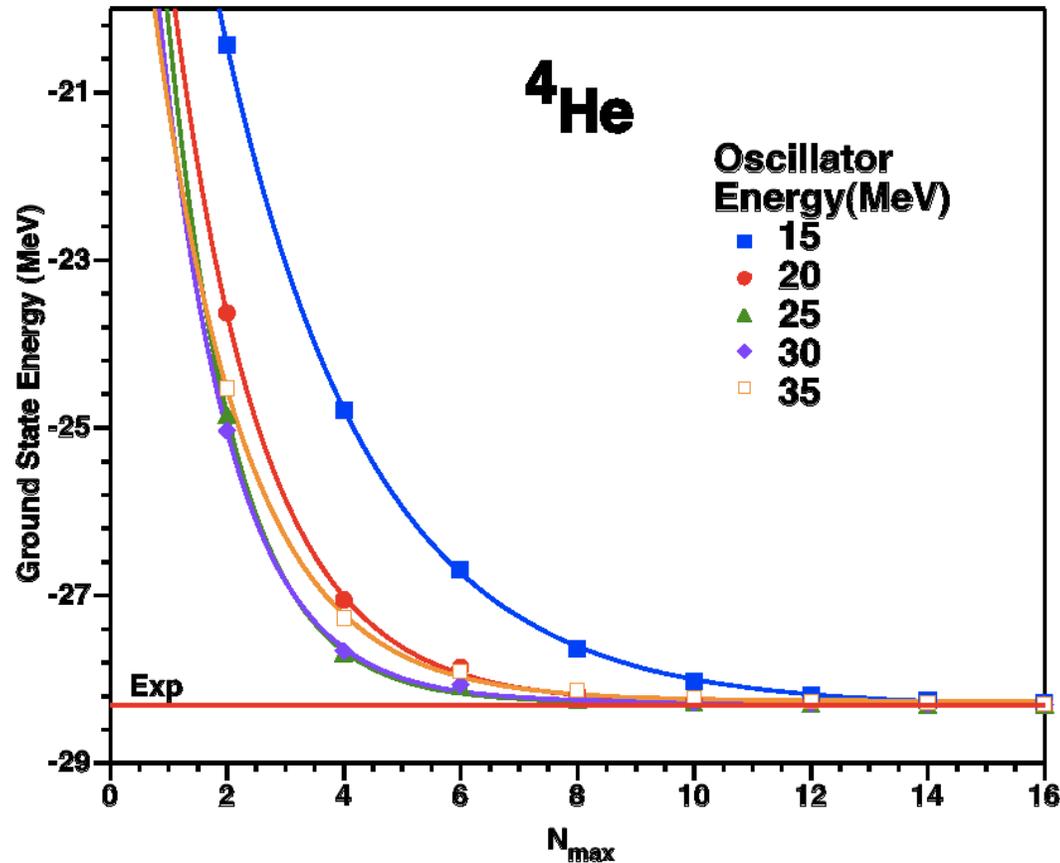
- Обрезание базиса по числу осцилляторных квантов возбуждения N_{\max} системы $A = Z + N$ частиц, что позволяет выделить движение центра масс:
- $\Psi_A = \Psi_{CM}(\vec{R})\Psi_{rel}(\{\vec{r}_i\})$, где $\Psi_{CM}(\vec{R})$ – осцилляторная функция с 0 квантов.
- Выделение $\Psi_{CM}(\vec{R})$ осуществляется методом Липкина-Лоусона:
- $H \rightarrow H + \lambda(H_{CM} - \frac{3}{2}\hbar\Omega)$.
- Нас интересуют нижайшие состояния, а возбужденные по центру масс уходят вверх по энергии.

Уточнение МОБИК: экстраполяция энергий

- Феноменологическая экстраполяция:

- $E_{gs}(N_{max}) = ae^{-bN_{max}} + E_{gs}(\infty)$

- Пример:



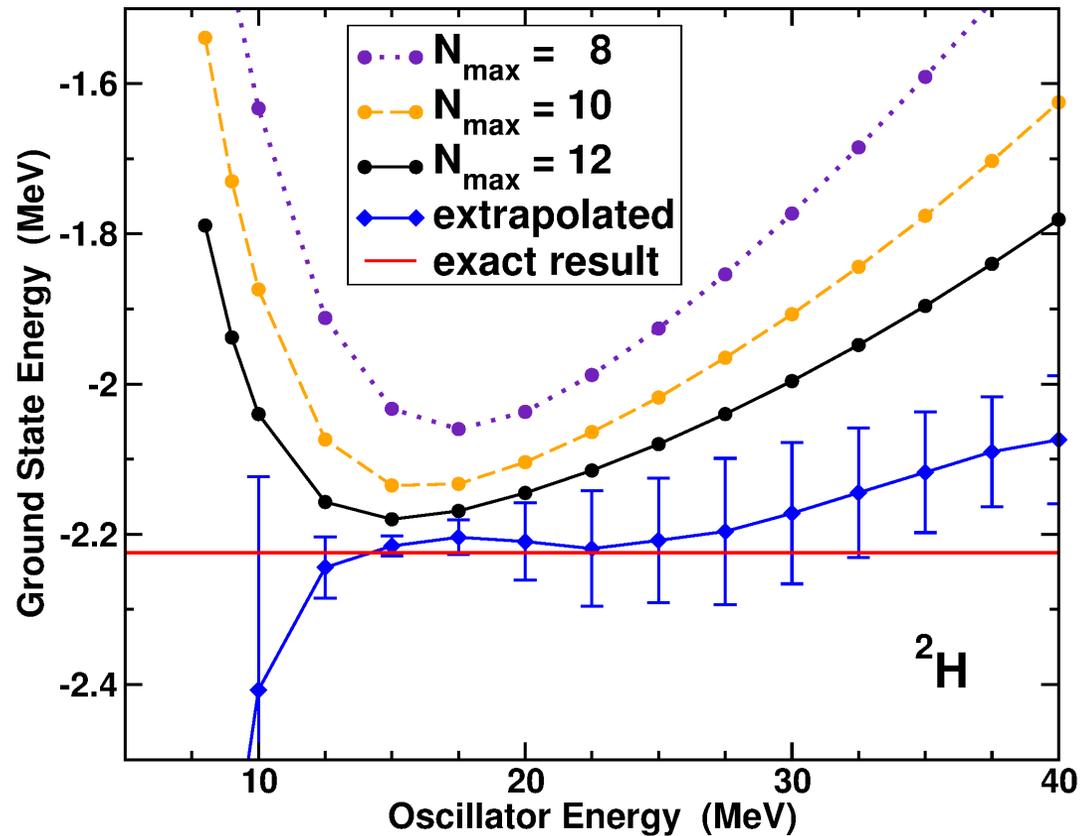
P. Maris, J. P. Vary, A. M. Shirokov,
Phys. Rev. C **79**, 014308 (2009)

Уточнение МОБИК: экстраполяция энергий

- Феноменологическая экстраполяция:

- $E_{gs}(N_{max}) = ae^{-bN_{max}} + E_{gs}(\infty)$

- Пример:

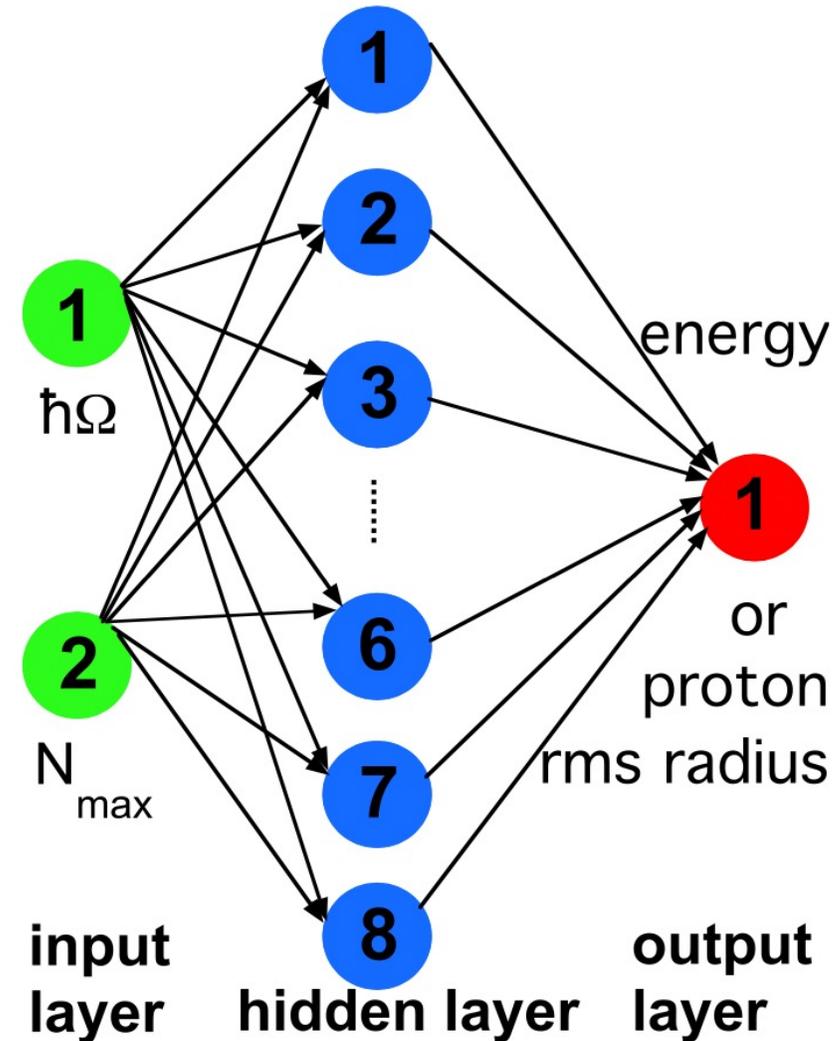


Важно: дается оценка погрешности экстраполяции, т. е. фактически всего расчета *ab initio* в МОБИК

P. Maris, J. P. Vary, A. M. Shirokov,
Phys. Rev. C **79**, 014308 (2009)

Уточнение МОБИК: экстраполяция энергий и других наблюдаемых

- Разрабатывается экстраполяция на основе обучения нейронных сетей:
- G. A. Negoita, J. P. Vary, G. R. Luecke, P. Maris, A. M. Shirokov, I. J. Shin, Y. Kim, E. G. Ng, C. Yang, M. Lockner, and G. M. Prabhu, Phys. Rev. C **99**, 054308 (2019).



HORSE

- HORSE = Harmonic oscillator representation of scattering equations. HORSE – частный случай формализма J-матрицы, где используются и другие базисы, но осцилляторный базис задает особенности и упрощения общего формализма J-матрицы.
- Волновая функция непрерывного спектра Ψ раскладывается в бесконечный ряд по осцилляторным функциям ϕ_{nl} :
- $\Psi_l = \sum_{n=0}^{\infty} a_{nl} \phi_{nl}$.

HORSE

- HORSE = Harmonic oscillator representation of scattering equations. HORSE – частный случай формализма J-матрицы, где используются и другие базисы, но осцилляторный базис задает особенности и упрощения общего формализма J-матрицы.
- Идея HORSE – использовать факт, что в осцилляторном базисе быстро растут матричные элементы кинетической энергии:

$$T_{nn'}^l = 0 \quad \text{if } |n - n'| > 1,$$

$$T_{nn}^l = \frac{\hbar\omega}{2} (2n + l + 3/2),$$

$$T_{n+1, n}^l = T_{n, n+1}^l = -\frac{\hbar\omega}{2} \sqrt{(n+1)(n+l+3/2)},$$

- Поэтому в гамильтониане $H = T + V$ можно пренебречь матричными элементами потенциала при больших n :

$$\tilde{V}_{nn'}^l = \begin{cases} V_{nn'}^l & \text{if } n \text{ and } n' \leq N; \\ 0 & \text{if } n \text{ and/or } n' > N. \end{cases}$$

HORSE

$T + V$

Конечная система линейных уравнений при $n \leq N - 1$:

$$\sum_{n'=0}^N (T_{nn'}^l + V_{nn'}^l - \delta_{nn'} E) a_{n'l}(E) = 0, \quad n \leq N - 1$$

Сшивка при $n = N$:

$$\sum_{n'=0}^N [(T_{Nn'}^l + V_{Nn'}^l - \delta_{Nn'} E) a_{n'l}(E)] + T_{N,N+1}^l a_{N+1,l}(E) = 0$$

$T_{nn'}^l \gg V_{nn'}^l$ при больших n и n' :

T

$$\sum_{n'=0} (T_{nn'}^l - \delta_{nn'} E) a_{n'l}(E) = 0, \quad n \geq N + 1$$

$$T_{n,n-1}^l a_{n-1,l}(E) + (T_{nn}^l - E) a_{nl}(E) + T_{n,n+1}^l a_{n+1,l}(E) = 0$$

Эта задача имеет точное решение и выглядит как естественное обобщение МОБИК

Single-State HORSE (SS-HORSE)

- SS-HORSE – упрощенная версия HORSE, удобная для использования совместно с МОБИК. Фазы рассеяния $\delta(E_\lambda)$ рассчитываются в собственных энергиях E_λ гамильтониана МОБИК с разными параметрами ($\hbar\Omega$ и N_{\max}), по набору $\delta(E_\lambda)$ параметризуется S -матрица $S(E)$, численно ищутся полюсы S -матрицы, которые определяют энергии и ширины резонансных состояний

Тетранейтрон

- Демократический распад (нет связанных подсистем)
- Метод гиперсферических гармоник в МОБИК + SS-HORSE

$$\Psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_A) = \Phi(\rho) \mathcal{Y}_{k\nu}(\Omega), \quad \rho = \sqrt{\sum_{i=1}^A (\mathbf{r}_i - \mathbf{R})^2},$$

$$\Phi_{nK} \equiv \Phi_n^{\mathcal{L}}(\rho) = \rho^{-(3A-4)/2} \varphi_{nK}(\rho), \quad \mathcal{L} = K + \frac{3A-6}{2};$$

$$\frac{\hbar^2}{2m} \left[-\frac{d^2}{d^2\rho} + \frac{\mathcal{L}(\mathcal{L}+1)}{\rho^2} \right] \Phi_n^{\mathcal{L}}(\rho) + \sum_{\mathcal{L}'} V_{\mathcal{L},\mathcal{L}'} \Phi_n^{\mathcal{L}'}(\rho) = E \Phi_n^{\mathcal{L}}(\rho).$$

- Приближение: учтен открытый канал с $\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\min} = K_{\min} + 3 = 5$.
- Но все возможные каналы учтены в МОБИК как закрытые каналы

NN-взаимодействия

- Я приехал в Iowa с идеей построить реалистические NN-взаимодействия, описывающие свойства ядер без NNN-сил. Учет NNN-сил существенно увеличивает необходимые ресурсы для расчетов в МОБИК.

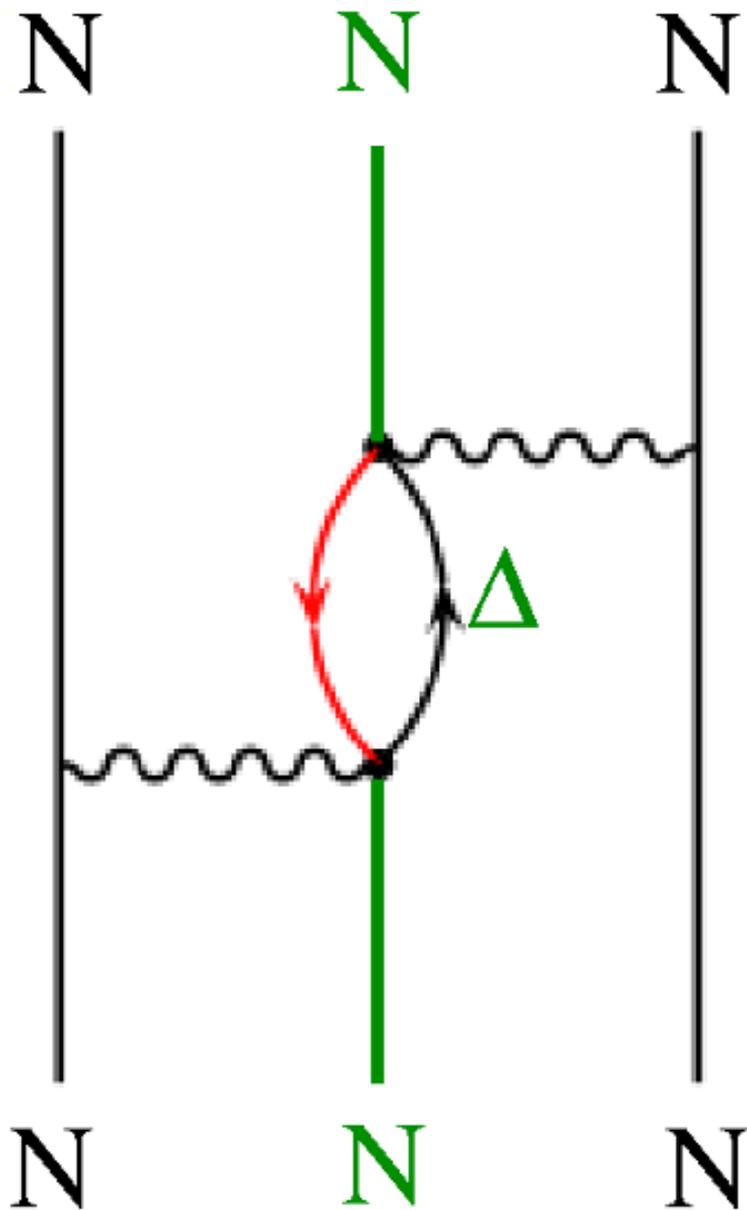
NN-взаимодействия

- Я приехал в Iowa с идеей построить реалистические NN-взаимодействия, описывающие свойства ядер без NNN-сил. Учет NNN-сил существенно увеличивает необходимые ресурсы для расчетов в МОБИК.

Память, необходимая для расчетов

Ядро	N_{\max}	Базис	NN	NNN	NNNN
${}^6\text{Li}$	12	$4.9 \cdot 10^6$	0.6 GB	33 TB	590 TB
${}^{12}\text{C}$	8	$6.0 \cdot 10^8$	4 TB	180 TB	4 PB
${}^{12}\text{C}$	10	$7.8 \cdot 10^9$	80 TB	5 PB	140 PB
${}^{16}\text{O}$	8	$9.9 \cdot 10^8$	5 TB	300 TB	5 PB
${}^{16}\text{O}$	10	$2.4 \cdot 10^{10}$	230 TB	12 PB	350 PB
${}^8\text{He}$	12	$4.3 \cdot 10^8$	7 TB	300 TB	7 PB
${}^{11}\text{Li}$	10	$9.3 \cdot 10^8$	11 TB	390 TB	10 PB
${}^{14}\text{Be}$	8	$2.8 \cdot 10^9$	32 TB	1100 TB	28 PB
${}^{20}\text{C}$	8	$2 \cdot 10^{11}$	2 PB	150 PB	6 EB
${}^{28}\text{O}$	8	$1 \cdot 10^{11}$	1 PB	56 PB	2 EB

NNN -взаимодействие



Вклад NNN -сил в энергию связи ядер обычно менее 10%

Вклад $4N$ -сил считается малым

NN-взаимодействия

- Я приехал в Iowa с идеей построить реалистические NN-взаимодействия, описывающие свойства ядер без NNN-сил. Учет NNN-сил существенно увеличивает необходимые ресурсы для расчетов в МОБИК.
- Формализм HORSE был развит для решения обратной задачи рассеяния. Используя параметризацию Неймегенской группы фаз NN-рассеяния и параметры дейтрона, получен исходный потенциал NN-взаимодействия ISTP в виде конечной матрицы в осцилляторном базисе. Описание NN-рассеяния с $\chi^2 = 1.05$.
- Идея адаптации этого потенциала для описания легких ядер – использовать фазово-эквивалентные преобразования, построенные в формализме HORSE.

NN-взаимодействие JISP16

- JISP16 – *J*-matrix inverse scattering potential, подогнанный для описания ядер до массы $A = 16$. Получен путем фазово-эквивалентных преобразований ISTP в многочисленных расчетах легких ядер в МОБИК.
- Потенциал использовался нами и другими группами во многих задачах. В работе [A. M. Shirokov, V. A. Kulikov, P. Maris, J. P. Vary, in *NN and 3N Interactions*, edited by L. D. Blokhintsev and I. I. Strakovsky \(Nova Science, Hauppauge, NY, 2014\), Chapter 8, p. 231](#) представлены расчеты с JISP16 в МОБИК всех ядер *s*- и *p*-оболочки, кроме зеркальных – энергий связи и возбужденных уровней небольшой ширины. Использовался метод экстраполяции.

Образец страницы из книги *MM* and *3N* interactions

	(J^π, T)	N_{\max}^M	A	B	C	Av. $\hbar\Omega$	Av. N_{\max}	AV18/IL7	Exp.	Width
^3H	$(\frac{1}{2}^+, \frac{1}{2})$	20	8.368(1)	8.369(2)	8.368($^{+0.022}_{-0.001}$)	–	–	8.47(0)	8.482	12.32 years
^4He	$(0^+, 0)$	18	28.299(4)	28.299(0)	28.300(0)	–	–	28.43(0)	28.296	stable
^6He	$(0^+, 1)$	18	28.80(5)	28.803(6)	28.706(3)	–	–	29.20(3)	29.269	807 ms
^6He	$(2^+, 1)$	18	2.2(1)	2.26(12)(6)	2.39($^{+0.01}_{-0.03}$)	2.55(4)	2.63(2)	–	1.80(3)	0.113
^6Li	$(1^+, 0)$	16	31.47(9)	31.49(6)	31.42(5)	–	–	31.93(3)	31.995	stable
^6Li	$(3^+, 0)$	16	2.56(4)	2.552(65)(5)	2.60($^{+0.04}_{-0.05}$)	2.550(5)	2.50(1)	2.34(3)	2.186(2)	0.024
^6Li	$(0^+, 1)$	16	3.8(1)	3.68(8)(3)	3.72(6)	3.75(2)	3.75(2)	3.50(3)	3.563	$8.2 \cdot 10^{-6}$
^7Li	$(\frac{3}{2}^-, \frac{1}{2})$	14	38.6(1)	38.6(1)	38.42(8)	–	–	39.0(1)	39.245	stable
^7Li	$(\frac{1}{2}^-, \frac{1}{2})$	14	0.5(2)	0.52(6)(2)	0.6(1)	0.60(1)	0.73(2)	0.1(1)	0.478	73 fs
^7Li	$(\frac{3}{2}^-, \frac{1}{2})$	14	5.2(2)	5.25(10)(2)	5.4(1)	5.288(7)	5.26(1)	4.9(1)	4.630(9)	0.093
^7Li	$(\frac{5}{2}^-, \frac{1}{2})$	14	7.1(4)	7.1(2)(1)	7.4(1)	7.45(6)	7.88(7)	6.5(1)	6.68(5)	0.88
^7Li	$(\frac{7}{2}^-, \frac{1}{2})$	14	8.0(5)	8.10(20)(5)	8.4(1)	8.36(5)	8.53(3)	7.7(2)	7.46(1)	0.089
^7Li	$(\frac{3}{2}^-, \frac{3}{2})$	14	12.2(2)	12.1(2)(1)	12.3(2)	11.60(4)	11.1(2)	–	11.24(3)	0.26
^8He	$(0^+, 2)$	14	29.9(2)	29.9(2)	29.4(2)	–	–	31.06(15)	31.409	119 ms
^8Li	$(2^+, 1)$	12	40.3(3)	40.3(3)	40.1(4)	–	–	41.5(2)	41.278	840 ms
^8Li	$(1^+, 1)$	12	1.5(4)	1.50(20)(5)	1.6(4)	1.71(5)	1.96(6)	1.4(2)	0.981	8.2 fs
^8Li	$(3^+, 1)$	12	2.8(3)	2.77(20)(1)	2.8(4)	2.752(7)	2.65(2)	3.0(3)	2.255(3)	0.032
^8Li	$(4^+, 1)$	12	7.1(5)	7.1(2)(1)	7.3(5)	7.59(8)	8.1(1)	6.7(3)	6.53(2)	0.035
^8Li	$(0^+, 2)$	–	–	–	–	–	–	–	10.822	<0.012
^8Be	$(0^+, 0)$	10 [12]	55.2(5)	55.35(3) [55.5(3)]	54.8(9)	–	–	56.3(1)	56.500	$6 \cdot 10^{-6}$
^8Be	$(2^+, 1?)$	10 [12]	16.8(5)	16.86(30)(4) [16.7(1)]	16.7(9)	16.66(1)	16.49(4)	16.8(2)	16.626(3)	0.108
^8Be	$(2^+, 0?)$	10 [12]	17.2(7)	17.1(5)(2) [17.3(5)]	17.4(9)	17.40(3)	17.47(2)	16.8(2)	16.922(3)	0.074
^8Be	$(1^+, 1?)$	10 [12]	18.3(7)	18.23(50)(7) [18.2(2)]	18.3(9)	18.60(7)	18.69(5)	17.5(2)	17.640(1)	0.0107
^8Be	$(1^+, 0)$	10 [12]	18.9(9)	18.7(7)(4) [18.8(3)]	19(2)	20.1(2)	20.9(2)	18.0(2)	18.150(4)	0.138
^8Be	$(3^+, 1?)$	10 [12]	19.5(5)	19.6(3)(1) [19.5(1)]	19.5(8)	19.33(3)	19.05(7)	19.4(2)	19.07(1)	0.271
^8Be	$(3^+, 0?)$	10 [12]	21(1)	20.0(9)(3) [19.8(2)]	21.1(8)	21.7(2)	22.0(3)	19.9(2)	19.24(1)	0.227
^8Be	$(0^+, 2)$	–	–	–	–	–	–	–	27.494	0.0055
^9Li	$(\frac{3}{2}^-, \frac{3}{2})$	12	43.6(3)	43.7(3)	43.4(4)	–	–	45.2(3)	45.342	178 ms
^9Be	$(\frac{3}{2}^-, \frac{1}{2})$	10 [12]	57.0(6)	57.09(5) [57.2(3)]	56.8(6) [57.0(2)]	–	–	58.1(2)	58.167	stable
^9Be	$(\frac{5}{2}^-, \frac{1}{2})$	10 [12]	2.82	2.9(4)(1) [2.8(1)]	2.9(6)	2.960(9)	3.12(3)	2.4(2)	2.429(1)	0.001
^9Be	$(\frac{3}{2}^-, \frac{3}{2})$	10	15.1(6)	15.26(33)(5)	15.4(7)	14.96(5)	14.5(1)	–	14.392(2)	$365 \cdot 10^{-6}$
^{10}Li	$(1^+, 2?)$	10	42(1)	42.0(2)	41(1)	–	–	–	45.11(4)	0.1
^{10}Be	$(0^+, 1)$	10	64.1(5)	64.0(4)	64.0(4)	–	–	64.1(3)	64.979	$1.5 \cdot 10^6$ years
^{10}Be	$(2^+, 1)$	10	3.5(6)	3.53(30)(4)	3.6(5)	3.69(2)	3.89(4)	3.4(3)	3.368	125 fs
^{10}Be	$(2^+, 1)$	10	6.2(9)	6.1(6)(2)	7(1)	7.2(1)	8.3(2)	5.3(3)	5.958	< 55 fs
^{10}Be	$(0^+, 1)$	–	–	–	–	–	–	–	6.179	1 ps
^{10}Be	$(2^+, 1)$	10	9.5(7)	9.6(5)(1)	9.1(3)	10.13(5)	11.2(2)	–	7.542	0.006
^{10}Be	$(2^+, 1?)$	10	11(1)	10.8(9)(7)	12(2)	11.2(5)	10.5(4)	–	9.560	0.141

Образец страницы из книги *MM* and *3N* interactions

¹⁰ B	(3 ⁺ , 0)	10 [8]	63.8(5) [63(1)]	63.7(3) [64.0(2)]	63.6(4) [63(2)]	–	64.8(9)	64.753	stable
¹⁰ B	(1 ⁺ , 0 [?])	10	0.4(8)	0.9(2.4)(0.9)	1(1)	2.4(8) 5.3(7)	0.7(8)	0.718	0.707 ns
¹⁰ B	(0 ⁺ , 1 [?])	8	2(1)	1.78(1.5)(0.03)	2(1)	2.3(2) 2.4(1)	2.2(2)	1.74	4.9 fs
¹⁰ B	(1 ⁺ , 0 [?])	10	2(1)	–	2.9(9)	3.4(4) 4.5(4)	3.0(6)	2.154	1.48 ps
¹⁰ B	(2 ⁺ , 0 [?])	10	3.4(8)	3.8(8)(4)	3.7(5)	4.30(6) 5.9(2)	3.9(5)	3.587	102 fs
¹⁰ B	(3 ⁺ , 0)	10	6(1)	5.7(9)(5)	6.2(8)	7.3(2) 9.0(2)	–	4.774	8 · 10 ⁻⁶
¹⁰ B	(2 ⁺ , 1)	8	6(1)	5.3(2.0)(0.3)	5(2)	6.1(1) 6.30(9)	5.8(3)	5.164(1)	2 · 10 ⁻⁶
¹⁰ B	(1 ⁺ , 0 [?])	–	–	–	–	–	–	5.182(8)	0.11
¹⁰ B	(2 ⁺ , 0)	10	5(1)	5.2(9)(5)	5(1)	7.0(6) 10.1(7)	–	5.920	0.006
¹⁰ B	(4 ⁺ , 0 [?])	10	5.3(7)	5.7(4)(1)	5.5(6)	5.72(8) 6.5(1)	5.6(5)	6.025	0.00005
¹⁰ B	(3 ⁺ , 0)	10	9(1)	9.5(9)(6)	9.1(7)	7.0(6) 10.1(7)	–	7.004(5)	0.098
¹⁰ B	(2 ⁺ , 1)	–	–	–	–	–	–	7.470(4)	0.065
¹⁰ B	(0 ⁺ , 1)	–	–	–	–	–	–	7.5599(4)	0.003
¹⁰ B	(2 ⁺ , 1 [?])	8	8(3)	8.2(2.4)(0.5)	9(2)	10.3(3) 11.2(2)	–	8.895	0.039
¹¹ Li	($\frac{3}{2}^+$, $\frac{5}{2}$)	8	42(3)	42.4(1)	40(2)	–	–	45.65(2)	8.75 ms
¹¹ Be	($\frac{3}{2}^+$, $\frac{5}{2}$)	11 [9]	[62(3)]	63.3(8)	60(3)	–	–	65.483	13.8 s
¹¹ Be	($\frac{1}{2}^+$, 0 [?])	10	64.0(9)	64.0(6)	63(1)	–	–	65.163	115 fs
¹¹ Be	($\frac{3}{2}^+$, 0 [?])	10	3(1)	2.7(7)(2)	4(2)	3.36(7) 3.61(8)	–	2.33(1)	0.206
¹¹ Be	($\frac{5}{2}^+$, 0 [?])	10	–	–	–	–	–	3.080(6)	0.122
¹¹ Be	($\frac{7}{2}^+$, 0 [?])	10	–	–	–	–	–	3.635(1)	0.01
¹¹ Be	($\frac{9}{2}^+$, 0 [?])	10	3.4(9)	3.53(40)(5)	3(1)	3.2(1) 3.1(1)	–	4.935(3)	0.45
¹¹ Be	($\frac{11}{2}^+$, 0 [?])	10	–	–	–	–	–	7.70(2)	0.23
¹¹ Be	($\frac{13}{2}^+$, 0 [?])	10	6(1)	10(3)(2)	9(2)	8.9(4) 10.4(4)	–	8.49(3)	0.2
¹¹ Be	($\frac{15}{2}^+$, 0 [?])	10	9(1)	9.2(5)(2)	9(1)	9.69(2) 10.2(1)	–	10.27(5)	0.21
¹¹ B	($\frac{3}{2}^+$, $\frac{1}{2}$)	10 [8]	76.0(4) [75(1)]	76.1(4) [76(1)]	76.1(8) [75(2)]	–	–	76.206	stable
¹¹ B	($\frac{1}{2}^+$, 0 [?])	10	0.8(6)	0.7(4)(1)	1(1)	1.41(7) 2.5(2)	–	2.125	3.8 fs
¹¹ B	($\frac{3}{2}^+$, 0 [?])	10	3.2(6)	3.2(4)(1)	2.9(7)	3.73(4) 4.6(2)	–	4.445	0.82 fs
¹¹ B	($\frac{5}{2}^+$, 0 [?])	10	4.3(7)	4.3(4)(2)	4(1)	5.7(1) 7.4(3)	–	5.020	0.24 fs
¹¹ B	($\frac{7}{2}^+$, 0 [?])	10	5.9(6)	5.9(4)(1)	6(1)	6.57(6) 7.6(2)	–	6.743(2)	15 fs
¹¹ B	($\frac{9}{2}^+$, 0 [?])	8	10(2)	10.0(1.0)(0.4)	10(3)	11.8(2) 13.1(3)	–	8.920(2)	0.82 fs
¹¹ B	($\frac{11}{2}^+$, 0 [?])	8	12(2)	12(4)(1)	13(3)	14.1(1) 15.7(4)	–	10.262(8)	0.163
¹¹ B	($\frac{13}{2}^+$, 0 [?])	–	–	–	–	–	–	10.33(1)	0.112
¹¹ B	($\frac{15}{2}^+$, 0 [?])	–	–	–	–	–	–	11.89(1)	0.194
¹¹ B	($\frac{17}{2}^+$, 0 [?])	8	12(2)	11.3(2.8)(0.7)	12(3)	13(1) 14(1)	–	12.92(1)	0.23
¹² Be	(0 ⁺ , 2)	10 [8]	66.9(8) [66(4)]	67(1) [67(2)]	65.2(4) [64(1)]	–	–	68.651	21.3 ms
¹² Be	(2 ⁺ , 2)	8	3(3)	3.03(3.20)(0.02)	2(3)	2.78(9) 2.64(7)	–	2.102(12)	?
¹² B	(1 ⁺ , 1)	10 [8]	[79(2)]	80.0(5) [80(2)]	78.80(7) [79(3)]	–	–	79.577(2)	20.2 ms
¹² B	(2 ⁺ , 1 [?])	10 [8]	[-0.2(1.6)]	0.2(7)(3)	-0.3(4)	-1.0(2) -1.5(2)	–	0.953	180 fs
¹² B	(2 ⁺ , 1 [?])	10 [8]	[3(2)]	3.1(1.2)(0.4)	3.2(3)	3.9(1) 5.4(2)	–	3.759(6)	0.040
¹² B	(1 ⁺ , 1 [?])	8	4(2)	3.3(1.8)(0.5)	4(4)	5.32(8) 6.7(3)	–	5.00(2)	0.050
¹² B	(3 ⁺ , 1 [?])	8	6(2)	5.1(3.1)(0.7)	6(4)	7.5(1) 8.9(3)	–	5.612(8)	0.110
¹² B	(1 ⁺ , 1 [?])	8	7(3)	7.4(1.3)(0.7)	7(4)	11.3(4) 13.5(6)	–	6.600	0.140
¹² B	(0 ⁺ , 2)	6	–	17(3)(1)	18(5)	20.9(8) 21.9(7)	–	12.75(5)	0.085
¹² C	(0 ⁺ , 0)	10 [8]	94.9(4) [94.1]	94.8(4) [95(3)]	95.3(3) [95(2)]	–	93.3(4)	92.163	stable
¹² C	(2 ⁺ , 0)	10	3.8(5)	3.86(40)(6)	3.7(3)	4.19(3) 5.1(2)	3.9(9)	4.439	10 ⁻⁸
¹² C	(0 ⁺ , 0)	–	–	–	–	–	10.4(5)	7.654	8.5 · 10 ⁻⁶
¹² C	(1 ⁺ , 0)	10	12.7(5)	12.76(60)(6)	12.7(4)	12.91(6) 14.0(3)	–	12.710(6)	18 · 10 ⁻⁶
¹² C	(4 ⁺ , 0)	10	13.5(8)	13.6(9)(2)	13.3(5)	14.95(9) 17.4(4)	–	14.083	0.258
¹² C	(1 ⁺ , 1)	10	17.8(7)	17.5(6)(3)	18(1)	19.2(2) 20.6(3)	–	15.110(3)	44 · 10 ⁻⁶
¹² C	(2 ⁺ , 1)	10	17(3)	18.6(1.0)(0.9)	17.8(8)	18.0(2) 19.2(2)	–	16.106(1)	0.005
¹² C	(0 ⁺ , 1)	10 [8]	[19(2)]	[18(5)(1)]	20(1)	20.9(6) 24.0(6)	–	17.76(2)	0.08
¹² C	(2 ⁺ , 1)	8	21(2)	20.3(2.9)(0.7)	24($\frac{+3}{-5}$)	24.4(4) 26.2(5)	–	18.80(4)	0.1
¹² C	(1 ⁺ , 1)	–	–	–	–	–	–	–19.69	0.23
¹² C	(0 ⁺ , 2)	–	–	–	–	–	–	27.595(24)	0.08
¹³ B	($\frac{3}{2}^+$, $\frac{3}{2}$)	8	85(2)	87(4)	86(3)	–	–	84.455(1)	17.33 ms
¹³ C	($\frac{1}{2}^+$, $\frac{1}{2}$)	8 [6]	101(1)	102(3) [98(5)]	102(3) [99(6)]	–	–	97.110	stable
¹³ C	($\frac{3}{2}^+$, $\frac{1}{2}$)	8	4(1)	3.2(5.2)(0.5)	4(1)	6.0(2) 7.5(3)	–	3.685	1.10 fs

Предсказание 2009 г.: ядро ^{14}F

- 1 990 061 078 базисных состояний МОБИК с $N_{\text{max}} = 8$
- Расчет каждой точки с данным $\hbar\Omega$ занимал от 2 до 3 часов на 30 504 процессорах суперкомпьютера Jaguar в ORNL.
- NN -взаимодействие JISP16

Nucleus	Extrapolation A	Extrapolation B	Experiment
^{13}O	$-75.7(2.2)$	$-77.6(3.0)$	-75.556
^{14}B	$-84.4(3.2)$	$-86.6(3.8)$	-85.423
^{14}F	$-70.9(3.6)$	$-73.1(3.7)$?

Предсказание 2009 г.: ядро ^{14}F

- 1 990 061 078 базисных состояний МОБИК с $N_{\text{max}} = 8$
- Расчет каждой точки с данным $\hbar\Omega$ занимал от 2 до 3 часов на 30 504 процессорах суперкомпьютера Jaguar в ORNL
- NN -взаимодействие JISP16

Nucleus	Extrapolation A	Extrapolation B	Experiment
^{13}O	$-75.7(2.2)$	$-77.6(3.0)$	-75.556
^{14}B	$-84.4(3.2)$	$-86.6(3.8)$	-85.423
^{14}F	$-70.9(3.6)$	$-73.1(3.7)$	$74.00(0.04)$



Contents lists available at ScienceDirect

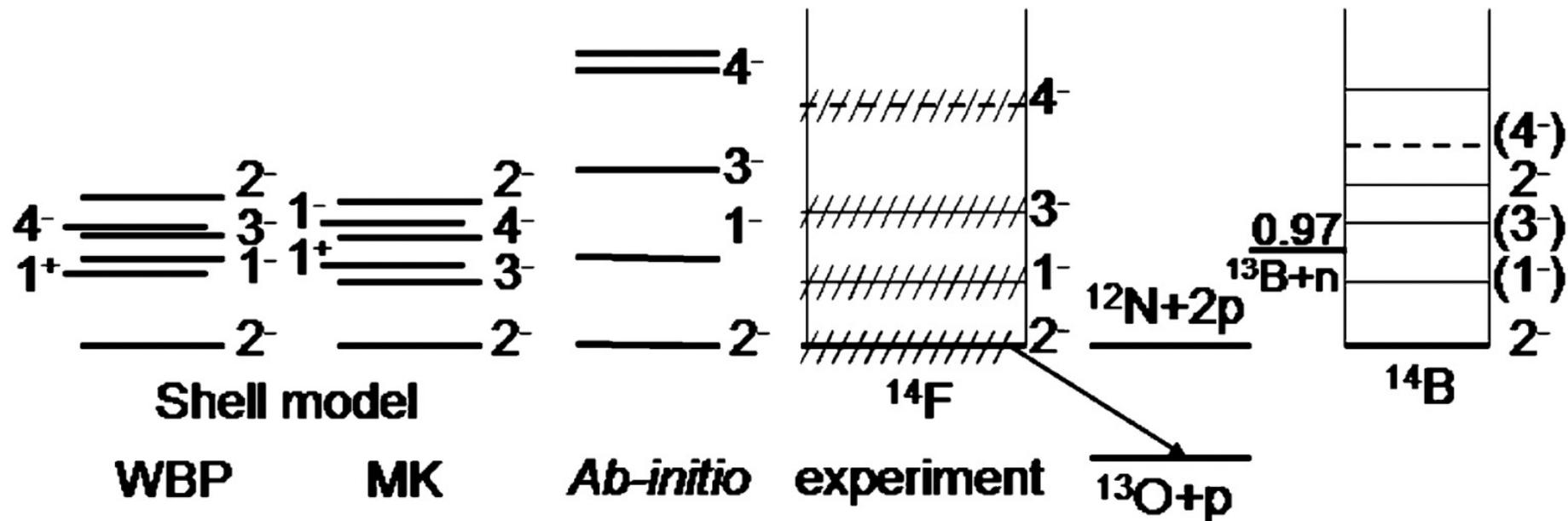
Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb

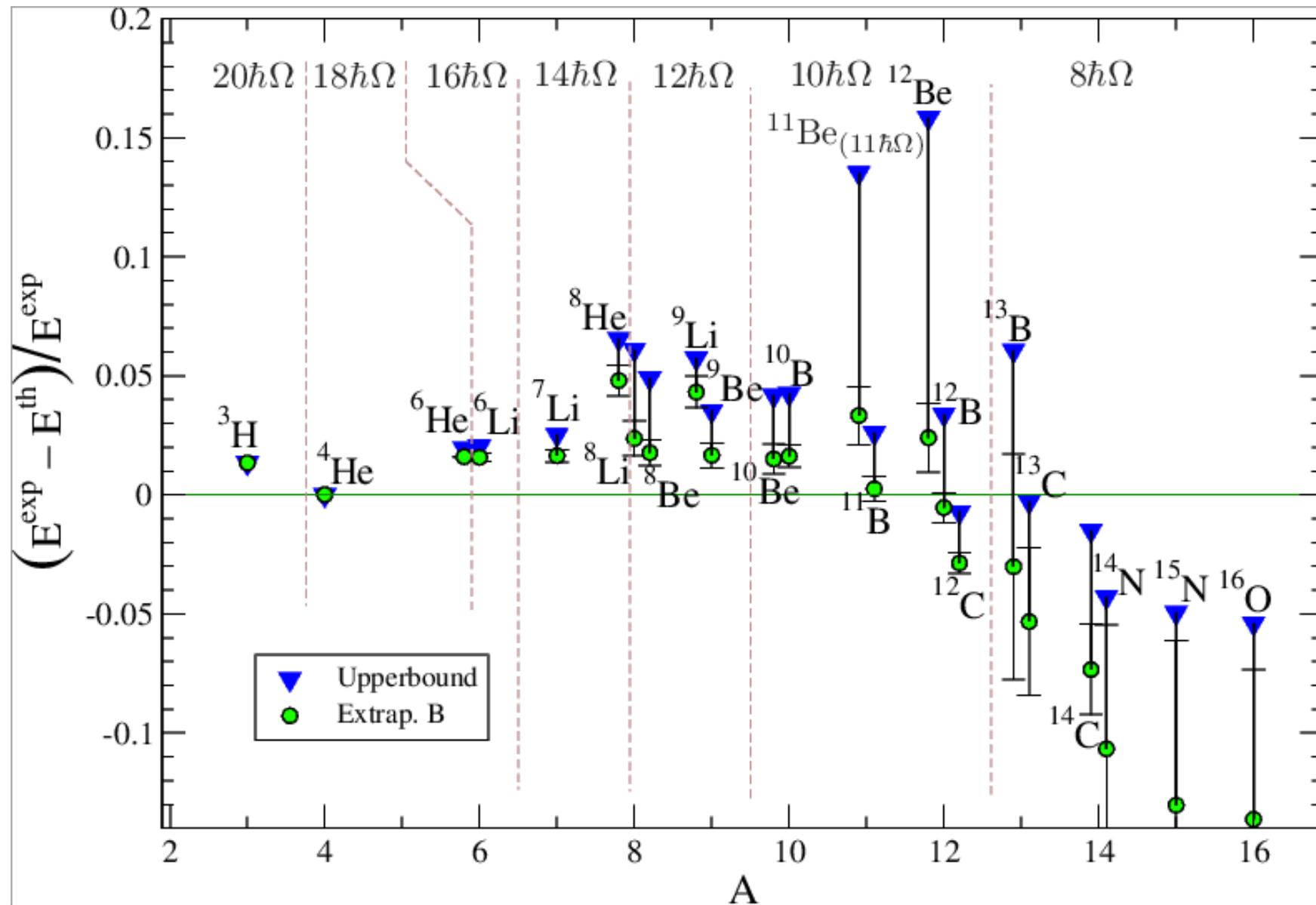


First observation of ^{14}F

V.Z. Goldberg^{a,*}, B.T. Roeder^a, G.V. Rogachev^b, G.G. Chubarian^a, E.D. Johnson^b, C. Fu^c,
 A.A. Alharbi^{a,1}, M.L. Avila^b, A. Banu^a, M. McCleskey^a, J.P. Mitchell^b, E. Simmons^a,
 G. Tabacaru^a, L. Trache^a, R.E. Tribble^a



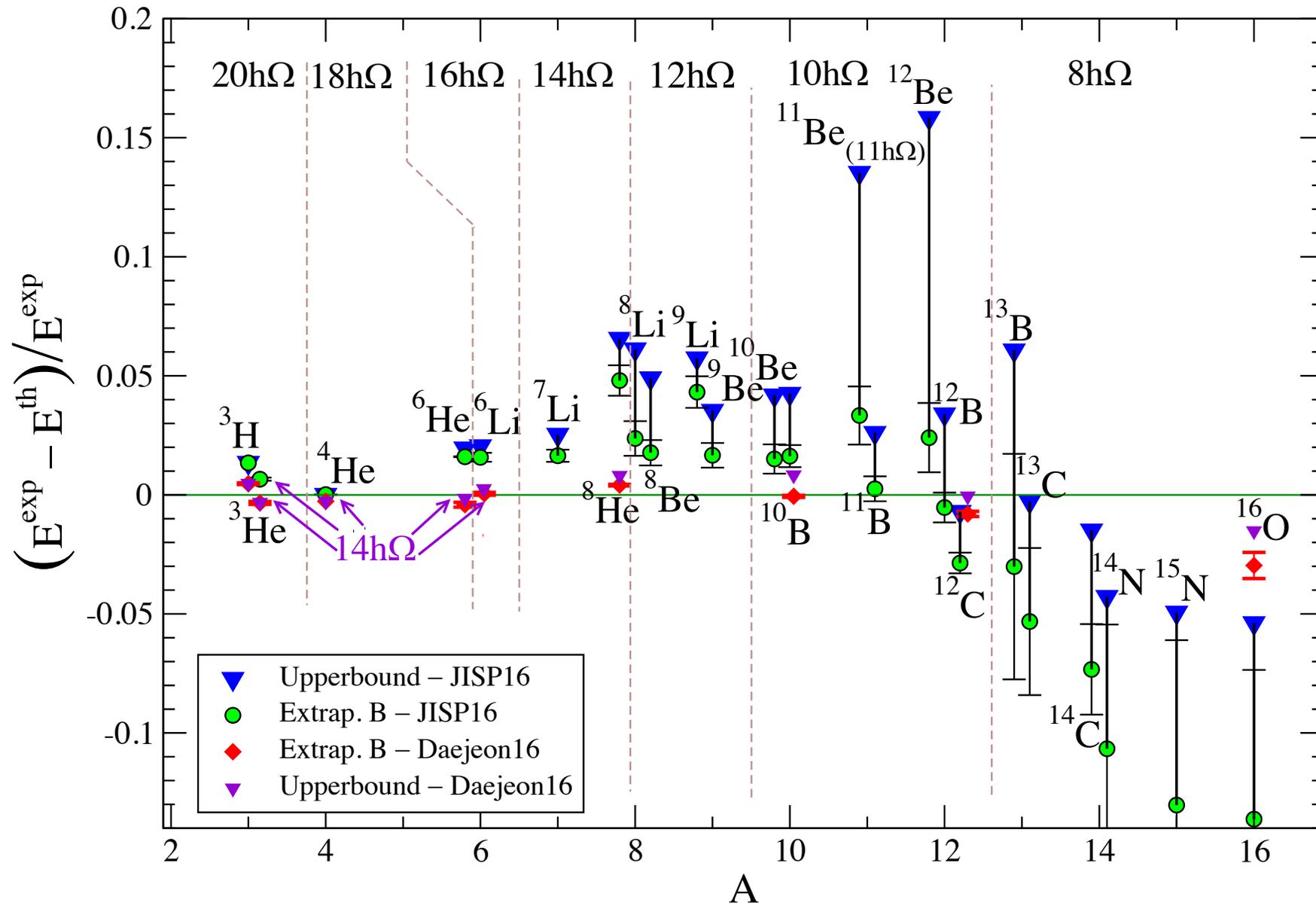
Энергии связи ядер с JISP16



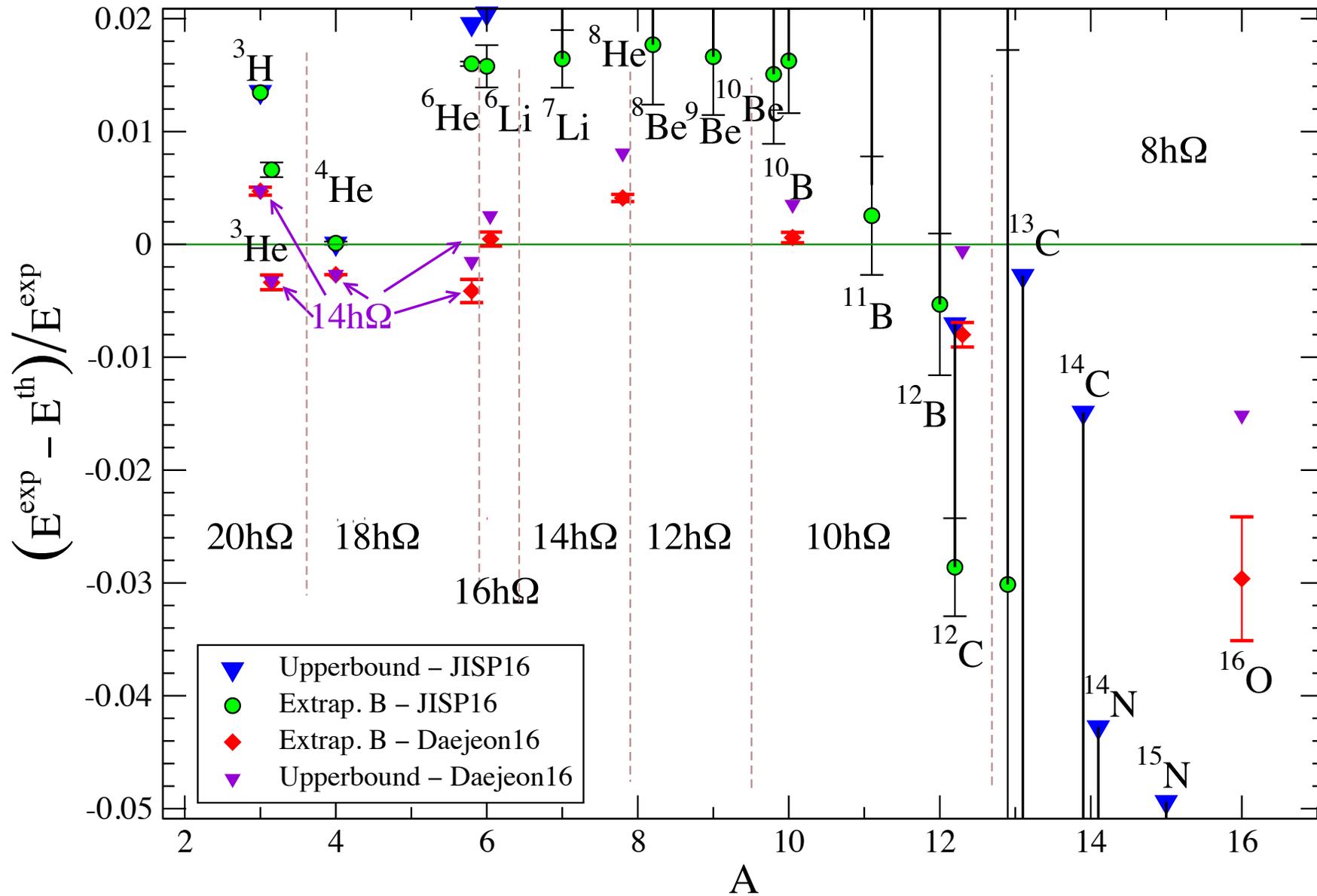
Daejeon16

- JISP16 пересвязывает ядра в конце p -оболочки.
- Новое взаимодействие Dejeon16 получено из NN -взаимодействия киральной эффективной теории поля в приближении N³LO и «смягчено» преобразованием SRG. Обеспечивает более быструю сходимость расчетов в МОБИК, чем JISP16, и лучше описывает свойства ядер.
- A. M. Shirokov, I. J. Shin, Y. Kim, M. Sosonkina, P. Maris, J. P. Vary, Phys. Lett. B **761**, 87 (2016).

Энергии связи ядер: JISP16 vs Daejeon16



Энергии связи ядер: JISP16 vs Daejeon16

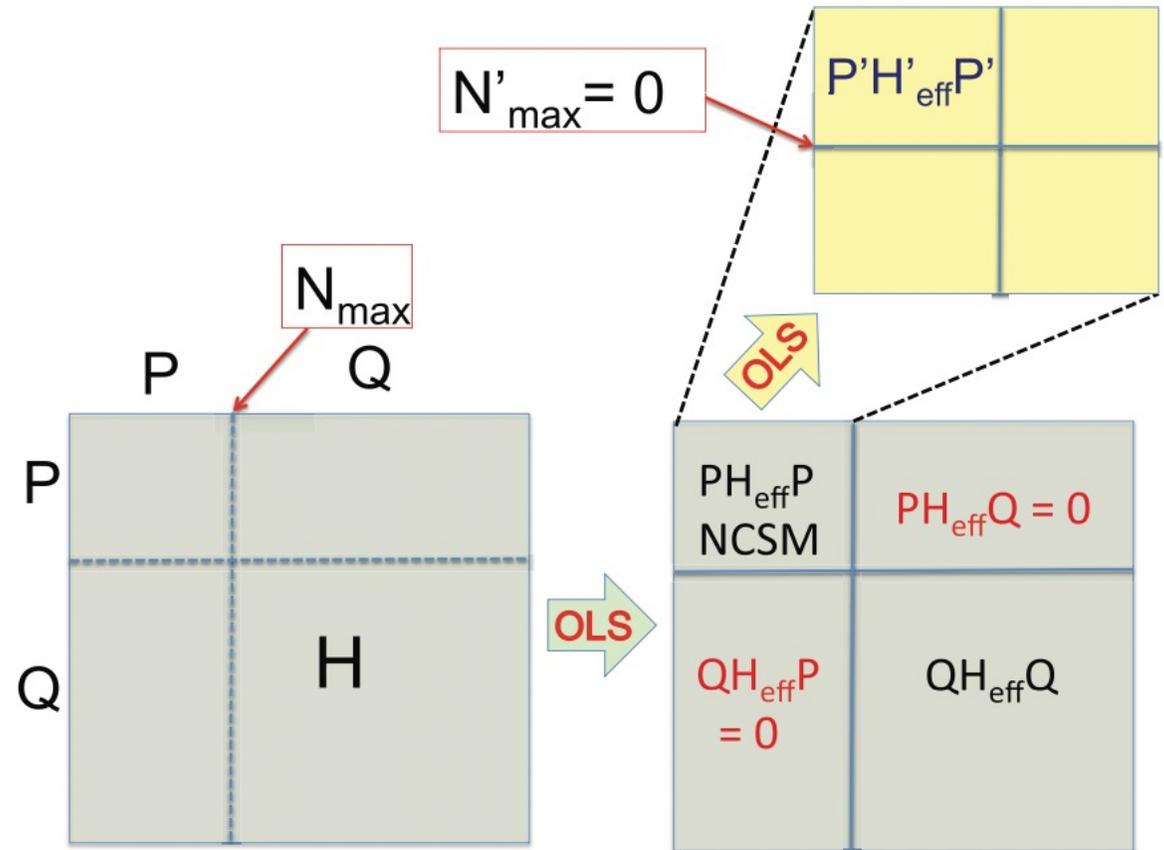


“No-core shell model with a core”

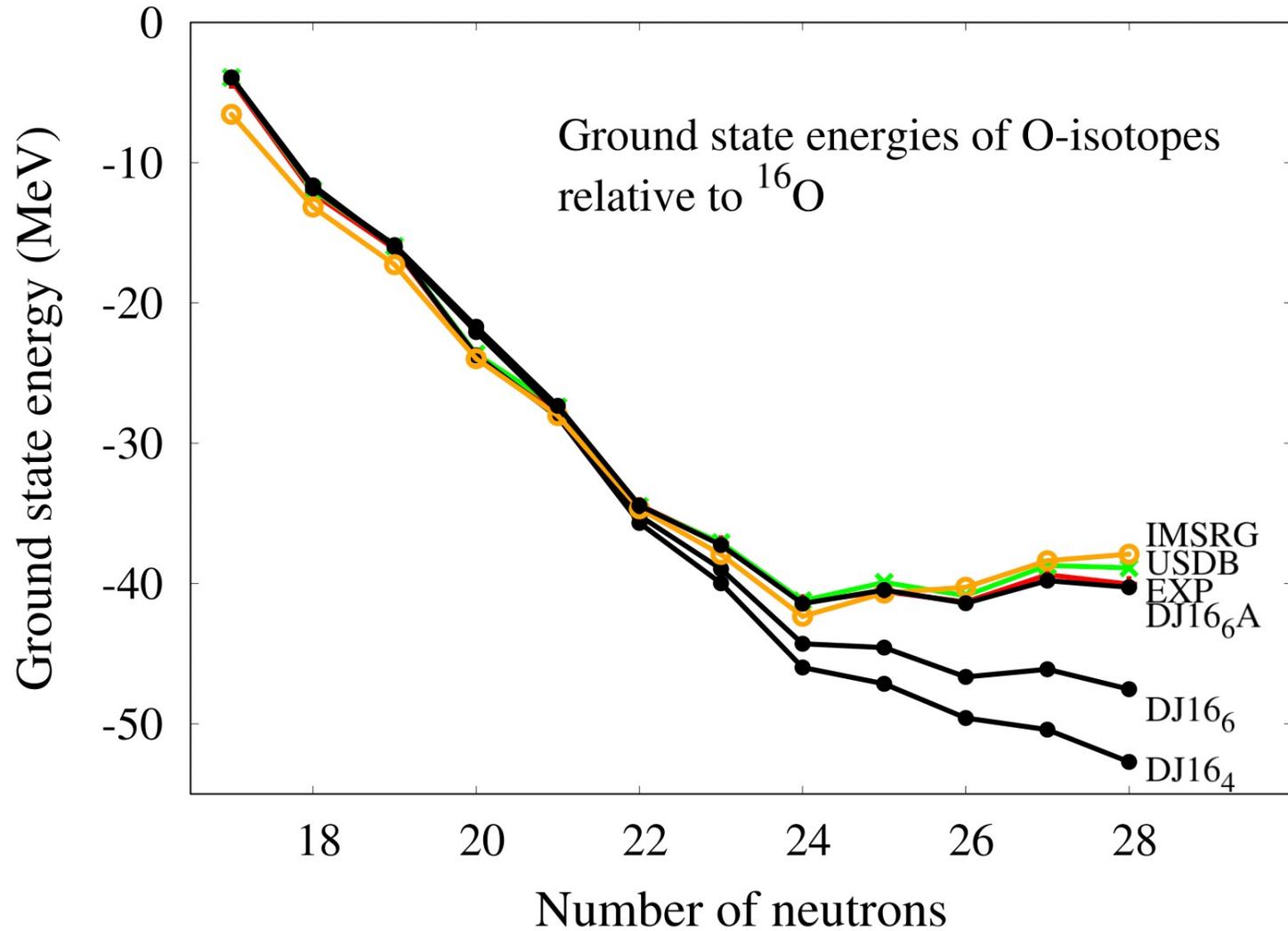
- В МОБИК с разумной точностью можно рассчитать ядра с числом частиц до $A \approx 20$. Более тяжелые ядра обычно рассчитывают в модели оболочек с кором, например, с кором ^{16}O для ядер sd -оболочки.
- На основе расчетов *ab initio* в МОБИК развит метод построения эффективного взаимодействия валентных нуклонов в модели оболочек с кором ^{16}O .

E. Dikmen, A. Lisetskiy, B. Barrett, P. Maris, A. Shirokov, and J. Vary, Phys. Rev. C **91**, 064301 (2015).

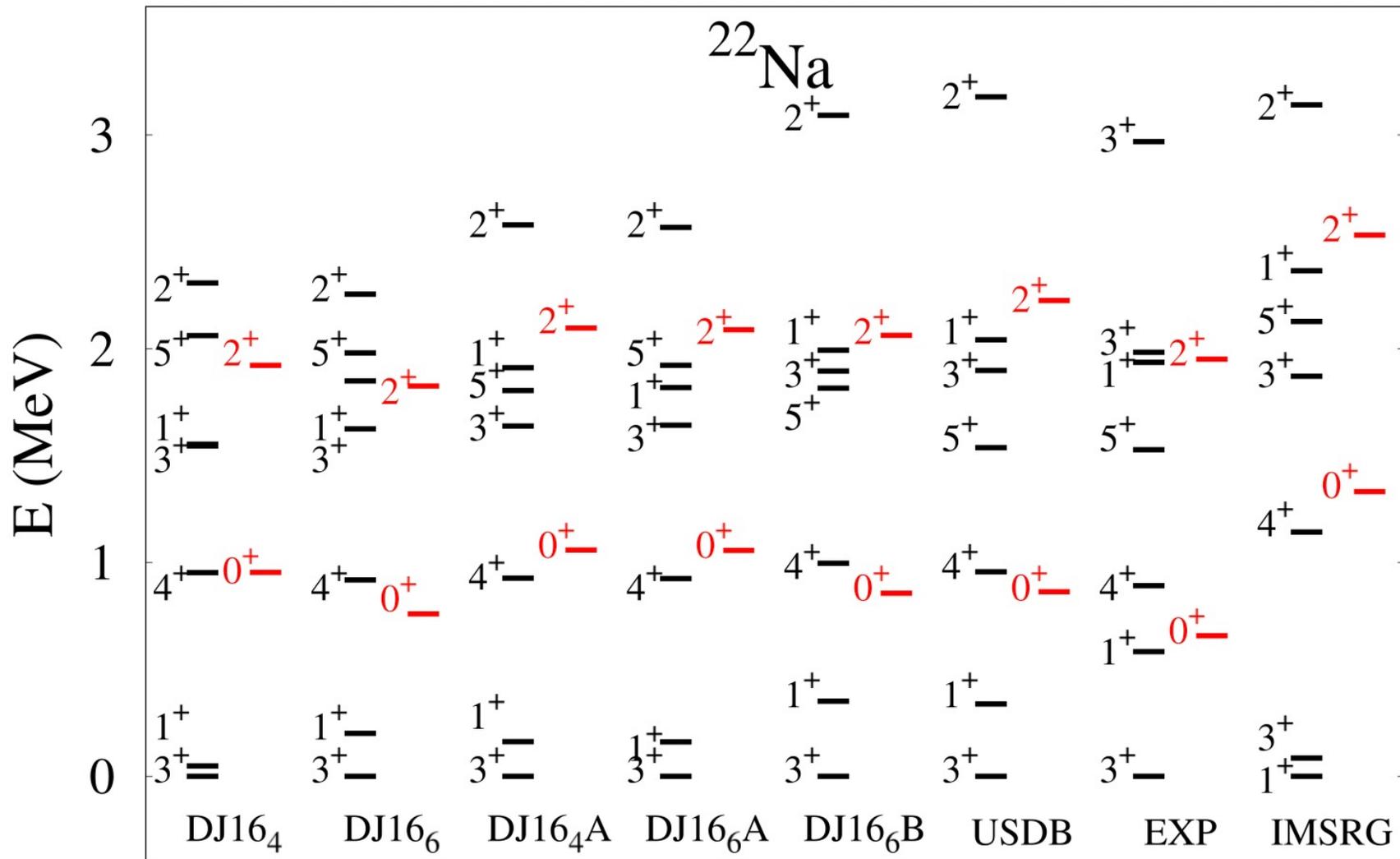
N. Smirnova, B. R. Barrett, Y. Kim, I. J. Shin, A. M. Shirokov, E. Dikmen, P. Maris, and J. P. Vary, Phys. Rev. C **100**, 054329 (2019).



“No-core shell model with a core”



“No-core shell model with a core”



Summary

Развита безмодельная (*ab initio*) теория легких ядер, обеспечивающая хорошее описание наблюдаемых связанных и резонансных состояний и имеющая предсказательную силу.

В частности, за последние 10 лет получено:

- Проведены расчеты всех известных связанных и узких состояний ядер вплоть до ^{16}O в МОБИК с JISP16
- Предложен метод экстраполяции результатов МОБИК на основе обучения искусственных нейронных сетей
- Предложен реалистичский *NN*-потенциал Daejeon16, обеспечивающий хорошее описание легких ядер
- Разработан метод микроскопического построения эффективного взаимодействия валентных нуклонов на основе реалистичских *NN*-взаимодействий для расчетов ядер *sd*-оболочки; рассчитаны спектры несколько десятков ядер *sd*-оболочки
- Разработан метод SS-HORSE описания энергий и ширин резонансных состояний в легких ядрах на основе расчетов *ab initio* в МОБИК; исследованы резонансы в ядрах ^5He и ^5Li
- Предсказан резонанс в системе 4-х нейтронов (тетранейтрон)

Проблемы описания тетранейтрона

Существование резонанса тетранейтрона подтверждено.

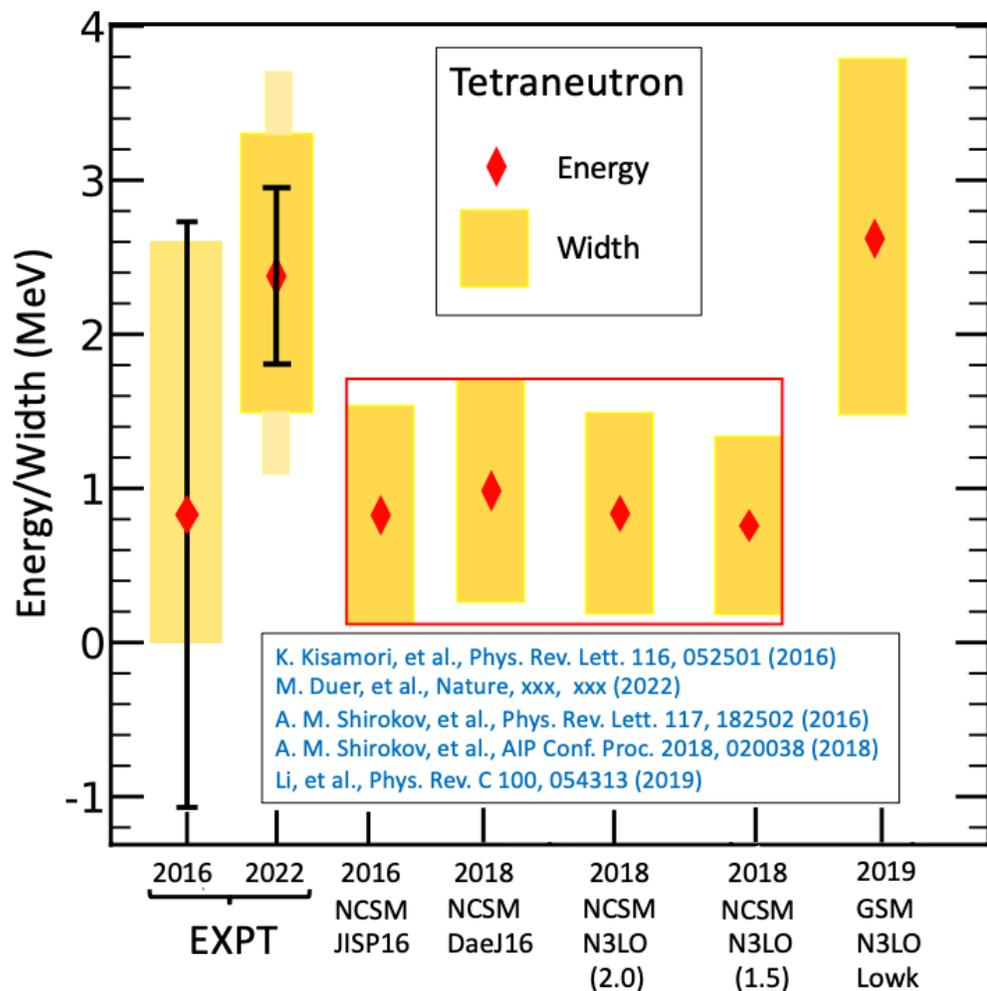
В чем проблема теоретического описания?

Видимо,

- 1) метод описания распада резонанса на 4 частицы;
- 2) взаимодействие нейтронов друг с другом

Проблемы описания тетранейтрона

Взаимодействие нейтронов друг с другом в описании резонанса 4n :



На данный момент резонанс тетранейтрона получен только с этими NN -взаимодействиями. JISP16, Daejeon16: мягкие взаимодействия, предложенные нами, не требуют NNN -сил; остальные взаимодействия, искусственно смягченные, требуют NNN -силы. Например, с NN -взаимодействием N3LO без смягчения резонанс тетранейтрона не получается

Публикации цикла работ

- 24 публикаций, в том числе:
- Phys. Rev. Lett. – 1
- Phys. Lett. B – 1
- Phys. Rev. C – 9
- J. Phys. G – 1 (review)
- ЯФ – 5
- Phys. Part. Nucl. (ЭЧАЯ) – 2
- и др.

На эти работы имеется 270/297 (WOS/Scopus) ссылок; самая цитируемая работа (предсказание тетранейтрона) имеет 49/47 (WOS/Scopus) ссылок

Соавторы:

- Iowa State University: J. Vary, P. Maris, G. Papadimitriou, A. G. Negoita
- Тихоокеанский гос. Университет: А. И. Мазур, И. А. Мазур
- Technische Universität Darmstadt: R. Roth
- Institute for Basic Science, South Korea: Y. Kim, I. J. Shin
- Université de Bordeaux: N. A. Smirnova
- Old Dominion University: M. Sosonkina
- НИИЯФ МГУ: Л. Д. Блохинцев, В. А. Куликов, Д. А. Савин
- и другие...

- Спасибо

за

ваше терпение!