

XI Международная конференция
"Суперкомпьютерные дни в России"

Семинар Квантовые вычисления

Москва, 30 сентября 2025 г.

Постулат фон Неймана

для коллапса (редукции) волновой функции.

Экспериментальная верификация и обобщение.

Живая материя.

А.В. Ланкин, Г.Э. Норман



План.

1. Постулаты Борна (1926) и фон Неймана (1932)

2. Обобщение постулата фон Неймана
для одночастичных состояний

Interaction-free/Negative-result/Null measurements
(Дике 1981, Леггетт-Гарг 1985, Porraati and Putterman 1987)

3. Экспериментальная верификация

Квантовый эффект Зенона-Халфина (1957, 1990)

Неравенства Леггетта-Гарга (1985, 2011, 2024)

4. Живая материя

Выводы

1. Постулаты Борна (1926) и фон Неймана (1932)

Уравнение Шредингера для волновой функции(1926)

Постулат Борна для измерения (1926)

пусть $\Psi = c_1 \Psi_1 + c_2 \Psi_2$, $|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$
где $\Psi_1 \rightarrow A_1$, $\Psi_2 \rightarrow A_2$

однократное
измерение $\rightarrow \begin{cases} A_1 & \text{с вероятностью } |c_1|^2 \\ A_2 & \text{с вероятностью } |c_2|^2 \end{cases}$

Постулат фон Неймана

коллапса волновой функции при измерении (1932)

многократное
измерение $\hat{M}\Psi = \begin{cases} \Psi_1, A_1 & \text{с вероятностью } |c_1|^2 \\ \Psi_2, A_2 & \text{с вероятностью } |c_2|^2 \end{cases}$

Оператор $\hat{M}$ – второй оператор эволюции Ψ во времени,
действует мгновенно, случайно, не описывается ур. Шредингера

Копенгагенская интерпретация

– содержит два постулата,

описывающих динамику квантовой системы:

уравнение Шредингера и

постулат фон Неймана о коллапсе волновой функции,

– включает (уже у Борна)

квантовую систему и наблюдателя

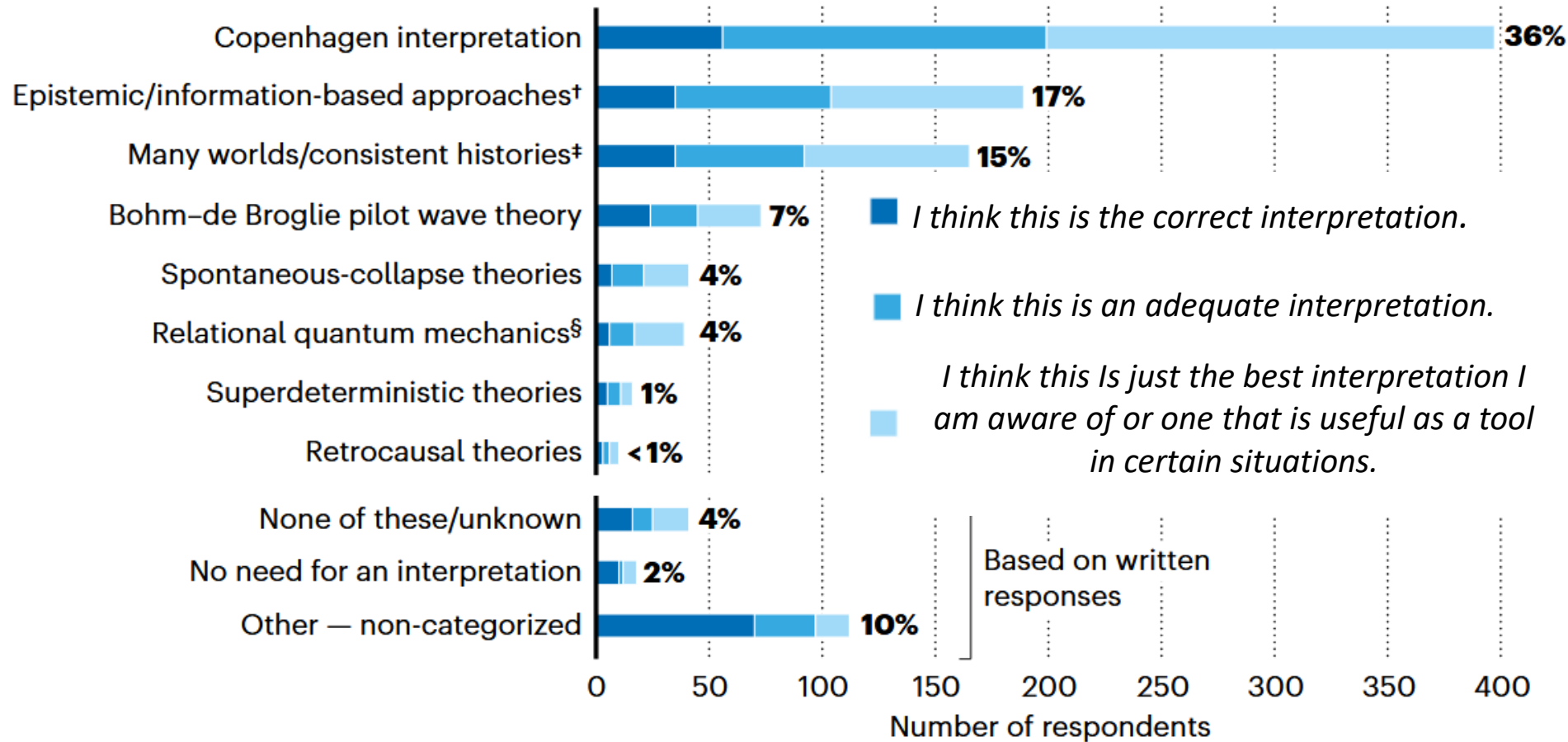
как две различные сущности

В 2025 году вышла статья в *Nature**

E. Gibney. “Physicists disagree wildly
on what quantum mechanics says about reality,
Nature survey shows”.

* <https://www.nature.com/articles/d41586-025-02342-y>

ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫЕ ОБЪЯСНЕНИЯ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ



Отношение к постулату фон Неймана

С постулатом фон Неймана в XX веке согласились
лишь отдельные физики.

Постулат не был признан физическим сообществом,
не стал рабочим инструментом,
подвергался многим ревизиям,
на него даже не ссылались.

Причины – в его необычности
и в длительном отсутствии
экспериментального подтверждения.

Между тем появились новые варианты
коллапса волновых функций:
Interaction-free (Дике 1981),
Negative-result (Легgett и Гарг 1985)
Null (Porrati and Putterman 1987)
measurements

Interaction-free quantum measurements

Понятие о interaction-free quantum measurements
введено Robert H. Dicke (1916-1997) в

R. H. Dicke. Interaction-free quantum measurements: A paradox.
Am. J. Phys, 49 (10) p. 925-930 (1981)

Основывался на Heisenberg's discussion of the
measurement of a particle's position using a Microscope:

W. Heisenberg. Über den anschaulichen Inhalt der
quantentheoretischen Kinematik und Mechanik.
Z. Phys. 43, pp. 172-198 (1927)

**Dicke (35 формул) не пользуется коллапсом(редукцией),
не сослался на книгу фон Неймана.**

С. П. Вятчанин, Ф. Я. Халили,
“Измерение “без взаимодействия”:
возможности и ограничения”,
УФН, 174:7 (2004), 765–777

Negative-result measurements

А.А. Leggett и А. Garg предложили неравенства, которые соответствуют принципу макроскопического реализма.

А.А. Leggett, А. Garg. Quantum mechanics versus macroscopic realism:
Is the flux there when nobody looks?
Phys. Rev. Letters. 54 (9) 857–860 (1985)

По ходу своих рассуждений
ввели идею о negative-result measurements.
Также основывались на Heisenberg's "invention"
of the " γ -ray microscope".

**Leggett и А. Garg не ссылаются на Dicke,
не пользуются коллапсом(редукцией) и
не упоминают фон Неймана.**

Null measurements

M. Porрати and S. Putterman.

Wave-function collapse due to null measurements:

The origin of intermittent atomic fluorescence.

Phys. Rev. A 36, 929 (1987)

Here we describe the theory of a quantum system
where the collapse of Ψ is brought about
by a succession of null observations.

In contrast with other models of null measurements [17]
successive measurements on the shelveable atom continuously modify Ψ
[17] R. H. Dicke, Am. J. Phys. 49, 925 (1981)

Статья кончается благодарностью

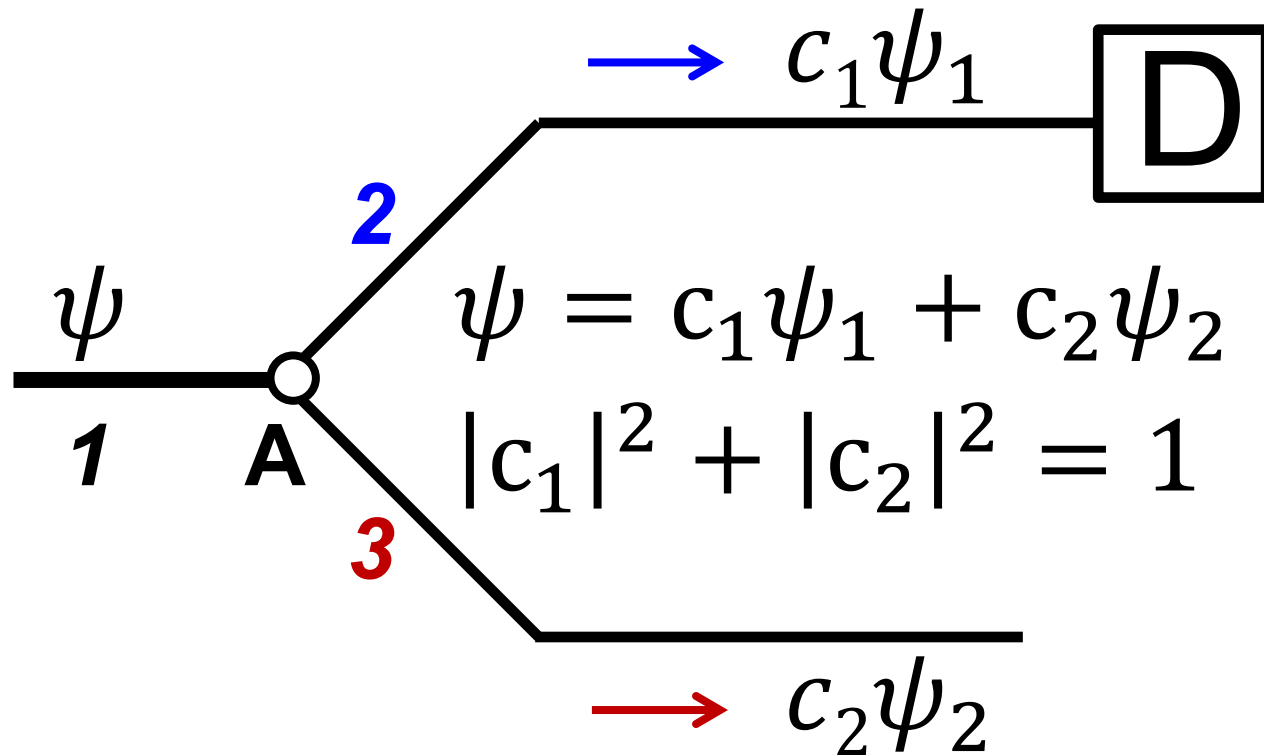
One of use (S.P.) wishes to acknowledge a discussion with A. J. Leggett
who emphasized the role of continuous observation.

Но нет ссылки на работу Леггетта-Гарга

Нет ссылки на фон Неймана

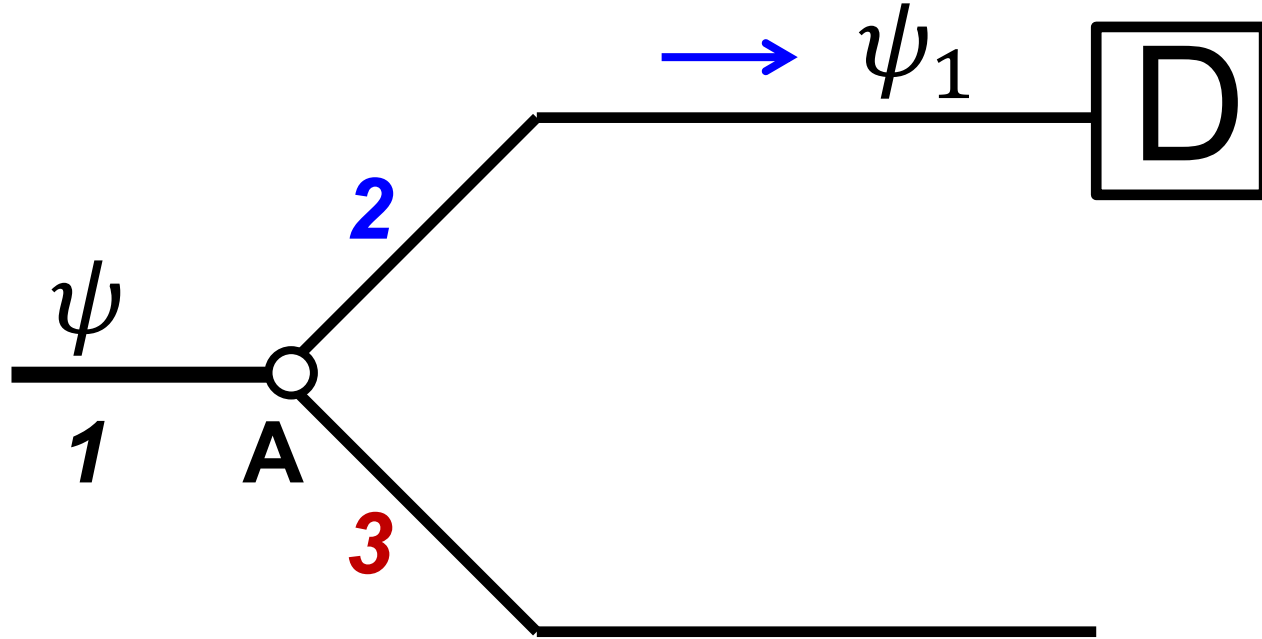
2.Обобщение
постулата фон Неймана на
Interaction-free/Negative-result/Null
измерения
одночастичных состояний

Одночастичное состояние до измерения



Датчик **D** измеряет
всю волновую функцию ψ

Первый исход измерения: датчик выбирает $c_1\psi_1$

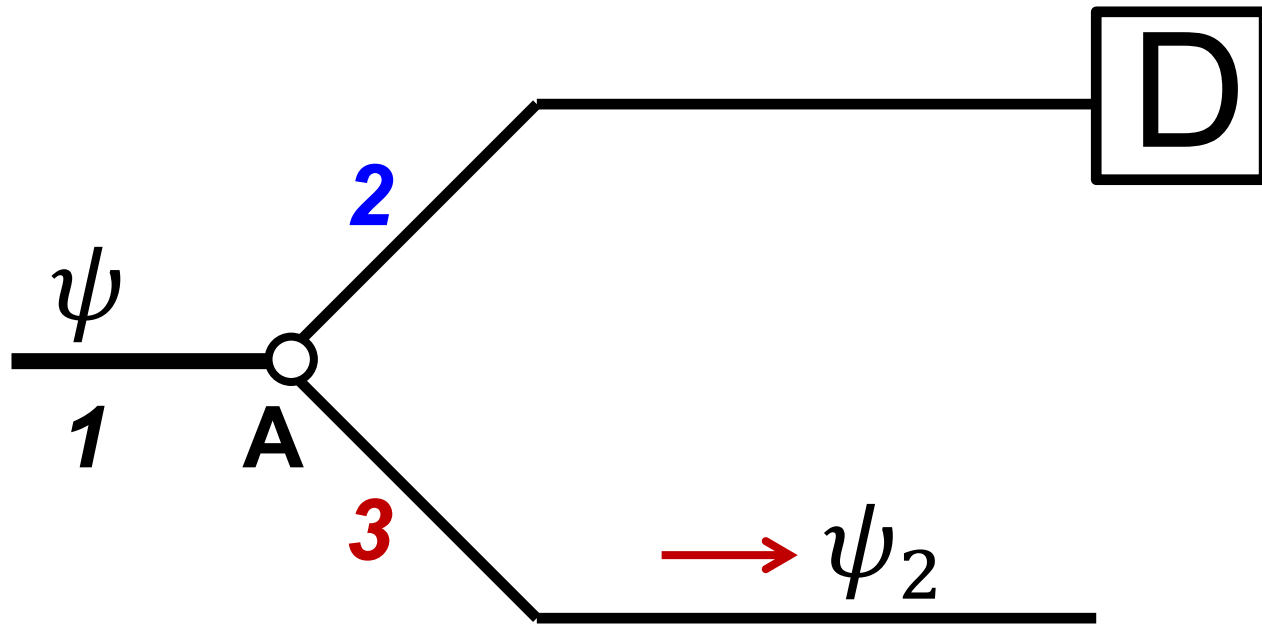


Датчик **D** срабатывает с вероятностью $|c_1|^2$

ψ коллапсирует до ψ_1 в канале **2**, где поглощается датчиком,
а ψ_2 исчезает в канале **3**, поскольку частица одна.

Измерение инвазивное, однократное.

Второй исход измерения: датчик выбирает $c_2 \psi_2$



Датчик **D** не срабатывает с вероятностью $|c_2|^2$
 ψ коллапсирует до ψ_2 в канале **3**,
 ψ_1 исчезает в канале **2**, поскольку частица одна.
Измерение Interaction-free/Negative-result/Null
с продолжением эволюции волновой функции ψ_2

Три названия одного и того же эффекта

Dicke, Leggett & Garg и **Porrati & Putterman** рассмотрели один и тот же процесс измерения, но подчеркнули разные стороны в своих названиях процесса измерения.

Dicke обращает внимание на то, что частица как бы не взаимодействовала с датчиком и движется свободно.
Отсюда Interaction-free measurement.

Leggett & Garg и **Porrati & Putterman** акцентируют внимание на том, что датчик не зафиксировал частицу в первом канале, т.е. результат измерения можно назвать отрицательным.
Отсюда Negative-result / Null measurement.

Все названия имеют один и тот же смысл:
interaction-free wave function collapse (interaction-free collapse)
коллапс волновой функции без взаимодействия с датчиком
(измерение / коллапс без взаимодействия)

Подчеркнём!

При Interaction-free/ Negative-result/ Null measurements
*коллапс волновой функции вызывается
не взаимодействием квантовой системы и датчика,
а фактом получения наблюдателем
дополнительной информации о квантовой системе!*

3. Экспериментальная верификация Постулата фон Неймана и его обобщений

3.1. Квантовый эффект Зенона-Халфина

1957-1968 Леонид Халфин (1932 – 1998)

– 1977 Misra and Sudarshan

– 1990 первый эксперимент Itano et al

1990 – первый эксперимент

Itano W.M., Heinzen D.J., Bollinger J.J., Wineland D.J.

Quantum Zeno effect

Phys. Rev. A. V. 41. No. 5. P. 2295 (1990).

The quantum Zeno effect (or paradox) is the inhibition of transitions
between quantum states by frequent measurements [1-7].

Misra and Sudarshan [1] were the first, to call the effect by that name,
but closely related work was done much earlier [8].

[1] B. Misra and E. C. G. Sudarshan, J. Math. Phys. 18, 756 (1977).

[2] C. B. Chiu, E. C. G. Sudarshan, and B. Misra, Phys. Rev. D 16, 520 (1977).

[3] G. C. Ghirardi, C. Omero, T. Weber, and A. Rimini, Nuovo Cimento 52A, 421 (1979).

[4] A. Peres, Am. J. Phys. 48, 931 (1980).

[5] E. Joos, Phys. Rev. D 29, 1626 (1984).

[6] K. Kraus, Found. Phys. 11, 547 (1981).

[7] D. Home and M. A. B. Whitaker, J. Phys. A 19, 1847 (1986).

[8] L. A. Khalfin, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 33, 1371 (1957) [Sov. Phys.—JETP 6, 1053 (1958)];

R. G. Winter, Phys. Rev. 123, 1503 (1961); W. Yourgrau, in Problems in the Philosophy of Science,
edited by I. Lakatos and A. Musgrave (North-Holland, Amsterdam, 1968), pp. 191 and 192.

Квантовый эффект Зенона-Халфина.

Эксперимент. Постановка задачи.

$$\hat{U}(0, \tau) \rightarrow \hat{M} \rightarrow \hat{U}(\tau, 2\tau) \rightarrow \hat{M} \rightarrow \dots \rightarrow \hat{U}((N-1)\tau, N\tau) \rightarrow \hat{M}$$

$\hat{U}$ – унитарный оператор

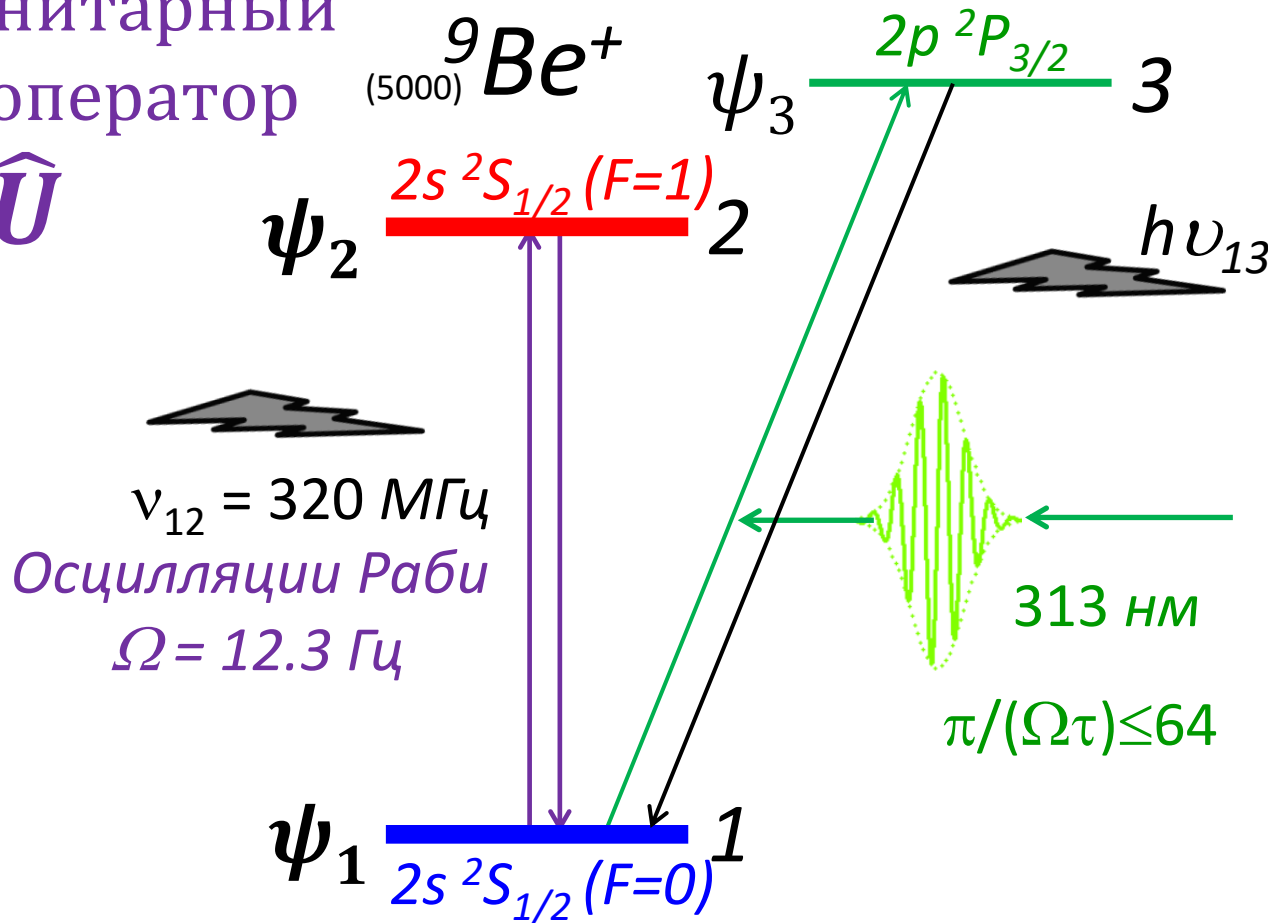
$\hat{M}$ – оператор чёткого измерения

Квантовый эффект Зенона-Халфина. Эксперимент 1990 г.

$$\hat{U}(0, \tau) \rightarrow \hat{M} \rightarrow \hat{U}(\tau, 2\tau) \rightarrow \hat{M} \rightarrow \dots \rightarrow \hat{U}((N-1)\tau, N\tau) \rightarrow \hat{M}$$

Унитарный
оператор
 $\hat{U}$

Измерение
 $\hat{M} = \hat{M}_1 \hat{U}_1$



Два случая в эксперименте 1990 года
Itano W.M., Heinzen D.J., Bollinger J.J., Wineland D.J.

Измерения начинаются

- 1) в начальный момент периода осцилляции Раби,
когда все атомы находятся в нижнем состоянии.
- 2) в момент максимума периода осцилляции Раби,
когда все атомы находятся в верхнем состоянии.

Измерения длятся в течение четверти периода.

Л.А. Халфин. Квантовый эффект Зенона.
УФН, 1990, том 160, вып. 10, с. 185-188

3.2. Неравенства Леггетта-Гарга

Принцип макроскопического реализма (Легgett, Гарг, 1985)

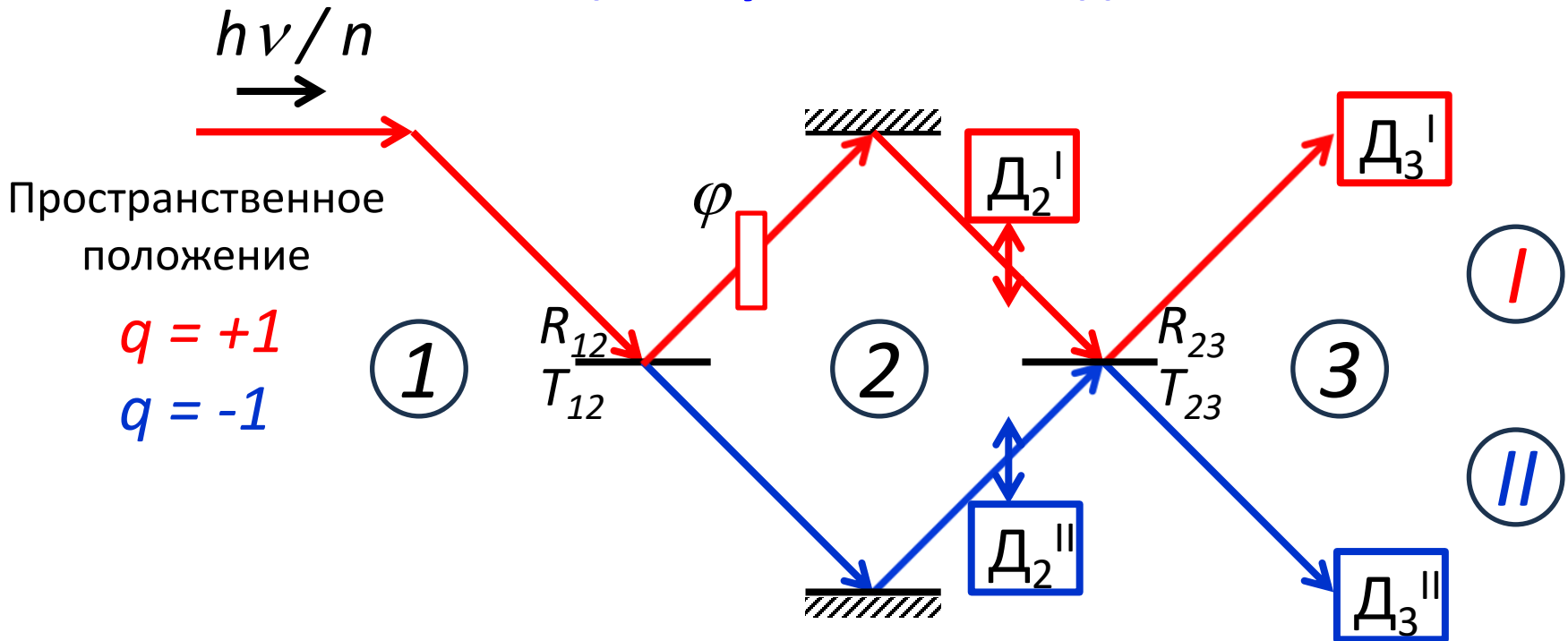
(А) Система, которая может находиться в двух макроскопически различных состояниях, в любой момент времени будет находиться только в одном из них.

(Б) Над макроскопической системой всегда можно произвести неинвазивное измерение, т.е. такое, воздействие которого на измеряемую систему будет достаточно мало, чтобы при рассмотрении дальнейшей динамики изучаемой системы им можно было бы полностью пренебречь.

Неравенства Леггетта-Гарга.
Теория.
(1985)

"Оптическая" схема для фотонов, нейтронов и др.

Частицы запускаются по одиночке



Верхний, **красный** канал I, нижний, **синий** канал II. Три секции.

При работе схемы ставятся один из двух датчиков D_2^I или D_2^{II} .

Измеряются корреляторы для трёх пар секций

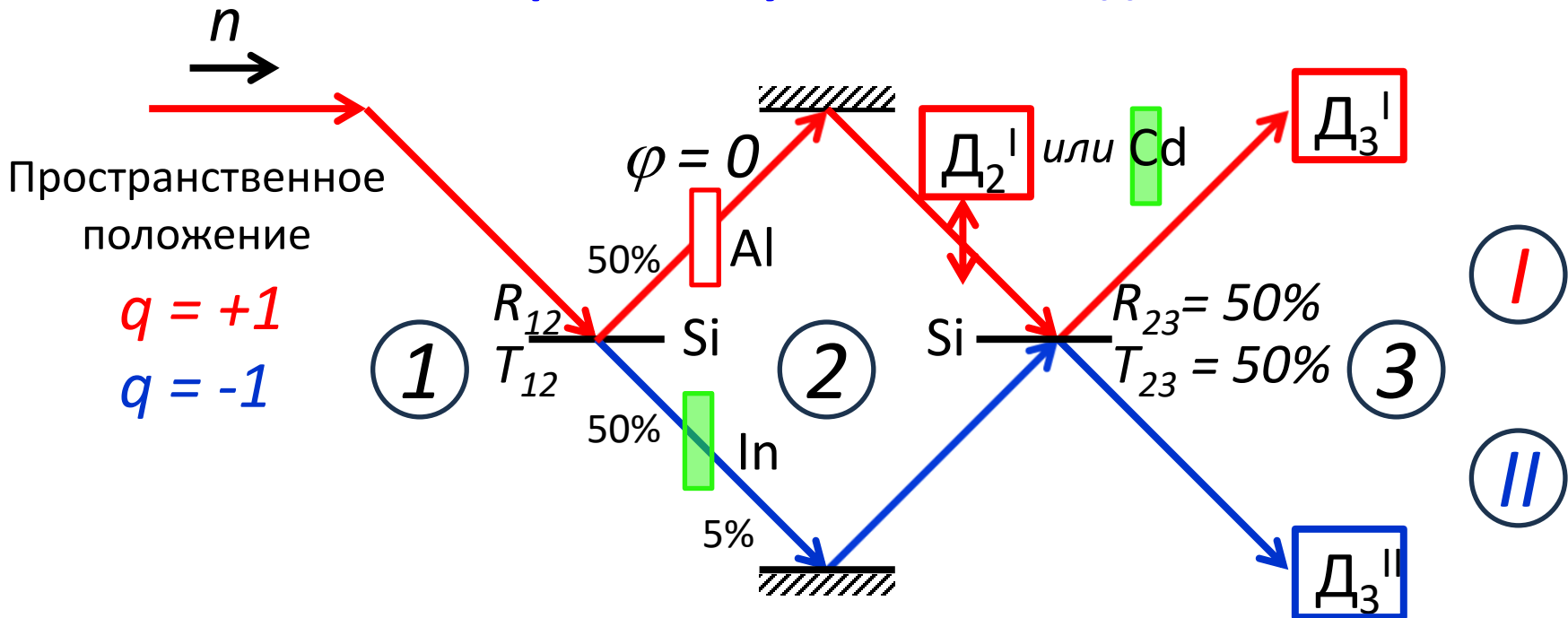
$$K_{12} = \langle q_1 q_2 \rangle \equiv \langle q_2 \rangle \quad K_{13} = \langle q_1 q_3 \rangle \equiv \langle q_3 \rangle \quad K_{23} = \langle q_2 q_3 \rangle$$

Нарушение
второго неравенства Леггетта-Гарга.
Эксперимент.
(2024)

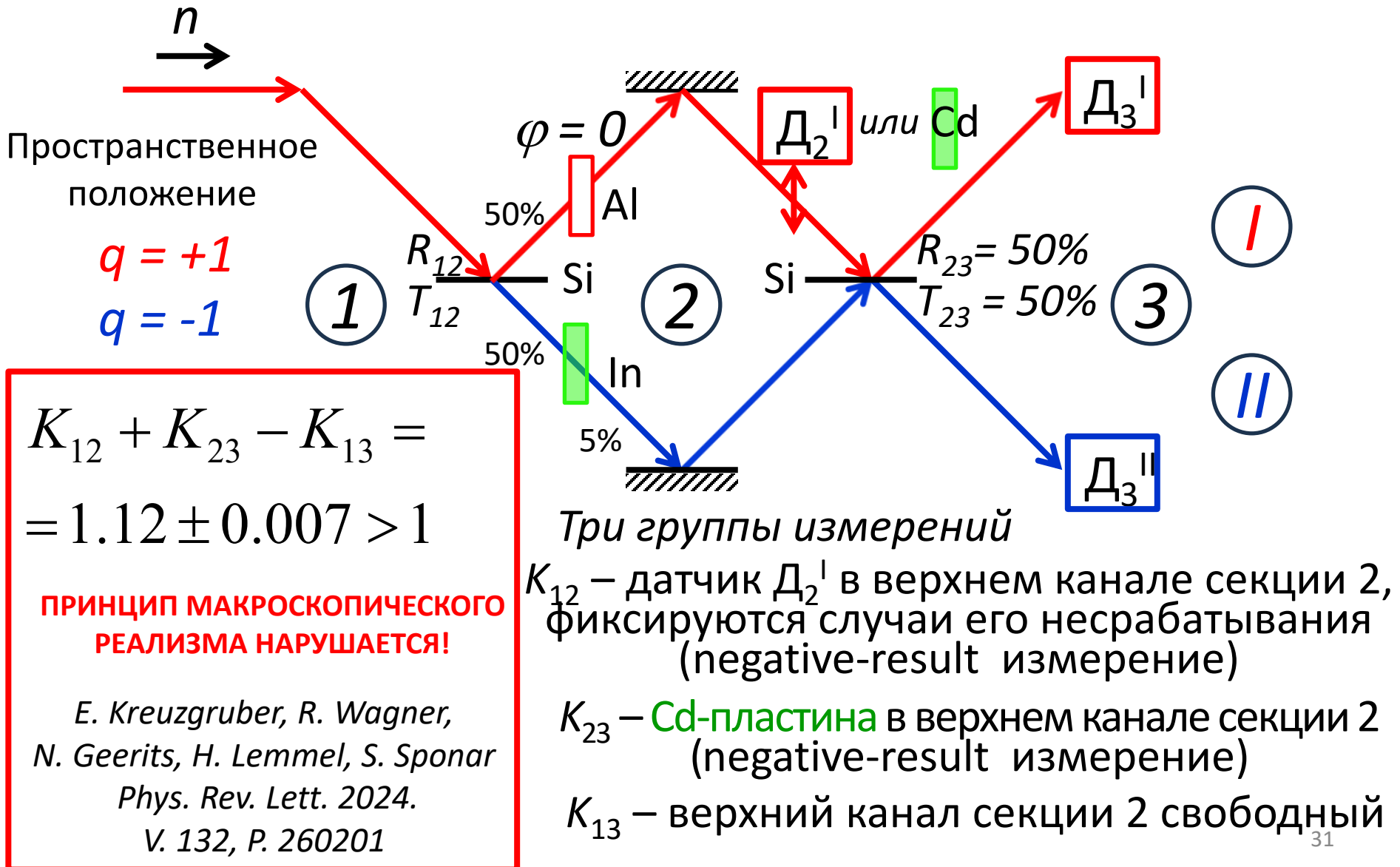
$$-3 \leq K_{12} + K_{23} - K_{13} \leq 1$$

Схема установки.

Нейтроны запускаются по одиночке



Результаты измерений.



4. Живая материя

Введение наблюдателя (уже у Борна) проложило
мостик к живой материи.

Согласно *Nature* 2025 с введением наблюдателя
согласны, хоть и с оговорками, 65 % физиков.

Фон Нейман был первым и
единственным физиком в XX веке,
кто задался вопросом (ещё в 1932 году),
где у человека происходит коллапс волновой функции.

При Interaction-free/Negative-result/Null измерениях
коллапс волновой функции имеет место,
когда информация о частице получена наблюдателем
без явного взаимодействия между частицей и прибором.

Вообще, коллапс волновой функции вызывается
не взаимодействием квантовой системы и датчика,
а фактом получения наблюдателем
дополнительной информации о ней!

Получение и обработка информации –
неотъемлемая способность живых организмов.
Можно ввести постулат, что коллапс волновой функции
есть качество, присущее живой материи,
т. е. это качество, отличающее живую материю от неживой
Каклюгин А.С., Норман Г.Э. Иерархический подход – обобщение витализма и
редукционизма. Российский химический журнал. 44(3), 7-20 (2000)

Подробнее см. нашу книгу и две статьи,
заказанные редакцией Журнала физической химии
по материалам нашей книги для своей англоязычной версии.

A.V. Lankin, G.E. Norman. Introduction to Quantum Mechanics of Living Matter.
Russian Journal of Physical Chemistry A, **99**, No 6 (июнь), pp. 1416–1445 (2025).
DOI: 10.1134/S0036024425700785

A.V. Lankin, G.E. Norman.
Quantum mechanics as a radical change in paradigm in the history of human thought.
Russian Journal of Physical Chemistry A, **99**, No 11 (ноябрь), pp. 2833–2904 (2025)
DOI: 10.1134/S0036024425702322

Выводы.

1. Проведено обобщение постулата фон Неймана на Interaction-free/Negative-result/Null измерения одночастичных состояний.
2. Кратко рассмотрен постулат, что коллапс волновой функции есть качество, присущее живой материи, отличающее живую материю от неживой

Замечание относительно измерения

Набор операторов проектирования $\{\hat{M}_k\}$,
удовлетворяющий условию нормировки, $\sum_k \hat{M}_k \hat{M}_k^* = \hat{I}$
задает физически осуществимое измерение.

Если набор $\{\hat{M}_k\}$ ортогональный, т.е.

$$\hat{M}_i \hat{M}_j = \delta_{ij} \hat{M}_j$$

то говорят о четких (проективных) измерениях,
т.е. измерениях с взаимоисключающими альтернативами
и достоверным результатом.

Если набор $\{\hat{M}_k\}$ не ортогональный, т.е. $\hat{M}_i \hat{M}_j \neq \delta_{ij} \hat{M}_j$
то говорят о нечетких измерениях,
т.е. измерениях с ограниченной точностью и достоверностью.

История квантового эффекта Зенона-Халфина

1957-1968 Леонид Халфин (1932 – 1998)

В 1977 г. американские физики Б. Мисра и Дж. Сударшан
опубликовали статью,
в которой повторили работы Халфина 1957-1968 гг.
Они не сослались на Халфина, ограничившись ссылками
на три промежуточные работы 1968-1971 гг. других авторов.
Заявили о своих претензиях на
a more general and mathematically rigorous setting.
При этом они дали эффекту имя Зенона.
Вероятно, сделали это,
чтобы эффект не получил имя Халфина.

1990 – первый эксперимент

Itano W.M., Heinzen D.J., Bollinger J.J., Wineland D.J.

Quantum Zeno effect

Phys. Rev. A. V. 41. No. 5. P. 2295 (1990).

The quantum Zeno effect (or paradox) is the inhibition of transitions
between quantum states by frequent measurements [1-7].

Misra and Sudarshan [1] were the first, to call the effect by that name,
but closely related work was done much earlier [8].

[1] B. Misra and E. C. G. Sudarshan, J. Math. Phys. 18, 756 (1977).

[2] C. B. Chiu, E. C. G. Sudarshan, and B. Misra, Phys. Rev. D 16, 520 (1977).

[3] G. C. Ghirardi, C. Omero, T. Weber, and A. Rimini, Nuovo Cimento 52A, 421 (1979).

[4] A. Peres, Am. J. Phys. 48, 931 (1980).

[5] E. Joos, Phys. Rev. D 29, 1626 (1984).

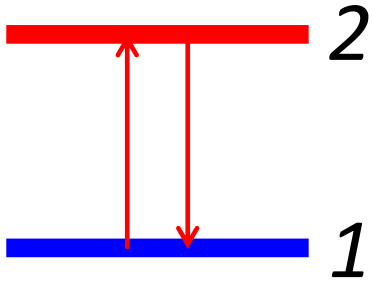
[6] K. Kraus, Found. Phys. 11, 547 (1981).

[7] D. Home and M. A. B. Whitaker, J. Phys. A 19, 1847 (1986).

[8] L. A. Khal'fin, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 33, 1371 (1957) [Sov. Phys.—JETP 6, 1053 (1958)];

R. G. Winter, Phys. Rev. 123, 1503 (1961); W. Yourgrau, in Problems in the Philosophy of Science,
edited by I. Lakatos and A. Musgrave (North-Holland, Amsterdam, 1968), pp. 191 and 192.

Квантовый эффект Зенона-Халфина. Теория.



$$\hat{U}(0, t)\psi(0) = c_1(t)\psi_1 + c_2(t)\psi_2$$

$$\hat{U}(k\tau, (k+1)\tau) = \exp(-i\hat{H}\tau/\hbar) = \hat{I} - i\hat{H}\tau/\hbar + o(\tau)$$

При малых τ на каждом шаге

$$p = p_{1 \rightarrow 2} = p_{2 \rightarrow 1} = |H_{12} / \hbar|^2 \tau^2 \ll 1$$

$$p_{1 \rightarrow 1} = p_{2 \rightarrow 2} = 1 - p \quad (\text{четкое измерение})$$

Вероятность k переходов в цепочке из N шагов

$$P_k^N = C_k^N p^k (1-p)^{N-k}$$

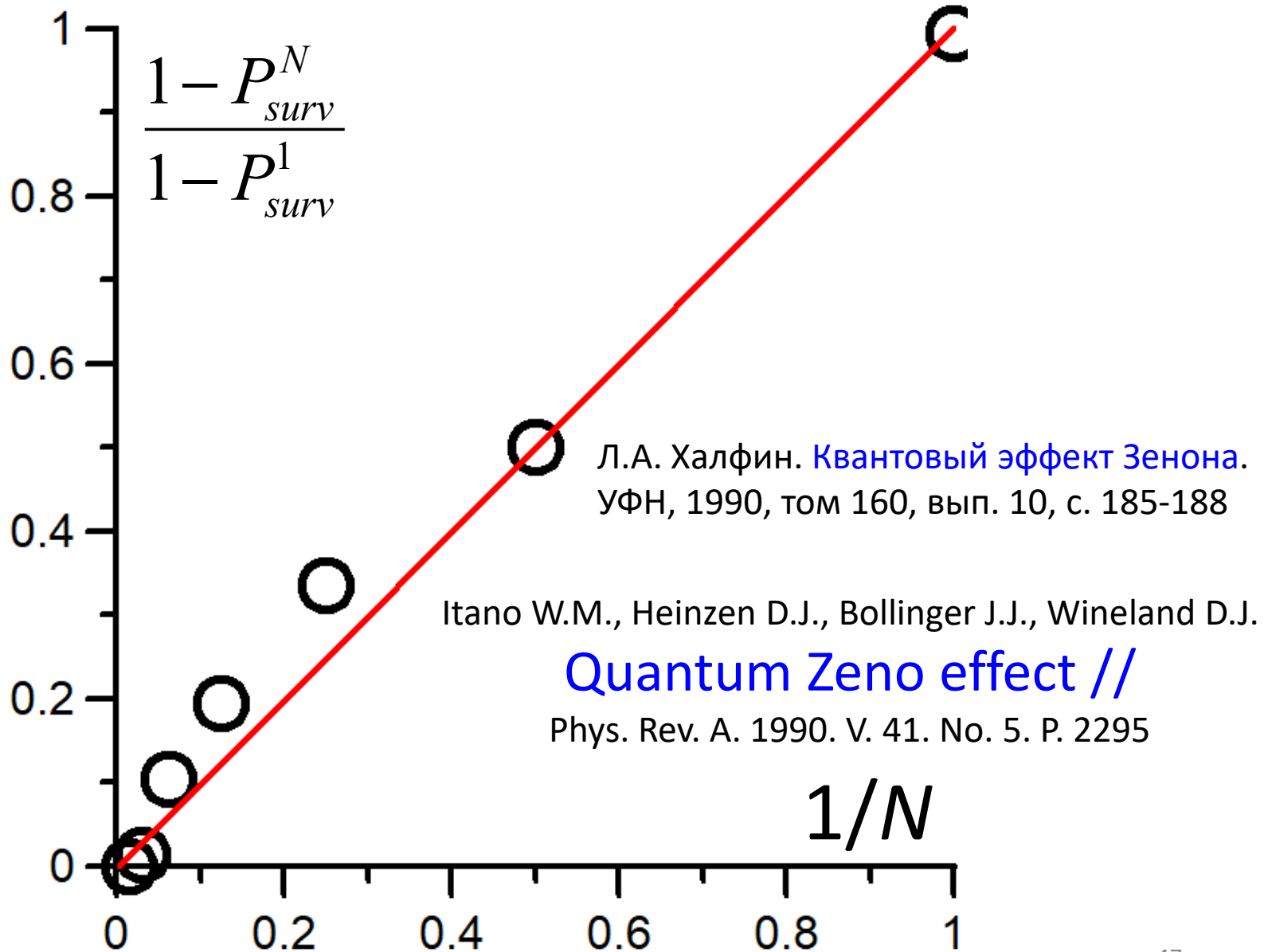
Квантовый эффект Зенона-Халфина. Теория.

Полная вероятность сохранения состояния

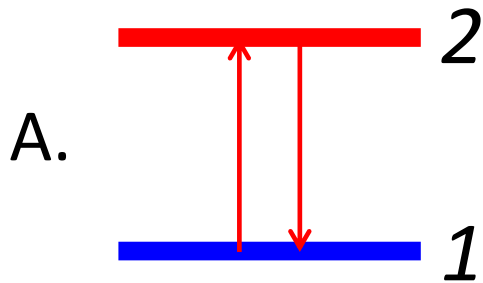
$$P_{surv} = \sum_{k-\text{четное}} P_k^N = \frac{1}{2} \left[1 + (1 - 2p)^N \right]$$
$$\lim_{N \rightarrow \infty} P_{surv} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \left[1 + \left(1 - 2 \frac{|H_{12} / \hbar|^2 T^2}{N^2} \right)^N \right] =$$
$$= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \left[1 + \exp \left(-2 \frac{|H_{12} / \hbar|^2 T^2}{N} \right) \right] = 1$$

*При четком непрерывном измерении
($\tau \rightarrow 0$, $T = \tau N = \pi/2\Omega = \text{const}$)
квантовое состояние замораживается!*

Квантовый эффект Зенона. Эксперимент 1990 г.



Условия возникновения квантового эффекта Зенона-Халфина.



Наличие двух или более дискретных
различимых состояния.

Б. $\hat{U}$

Унитарная эволюция во времени с
недиагональным гамильтонианом ($H_{12} \neq 0$)

В. $\hat{M}$

Четкое многократное измерение любой природы,
которое может включать унитарные преобразования

*Общая природа квантового эффекта Зенона -Халфина
обусловлена квадратичным уменьшении вероятности перехода p
при линейном уменьшении интервала между измерениями τ .*

Отношение к постулату фон Неймана в XX веке

С постулатом фон Неймана в его годы согласились
лишь отдельные физики.

Постулат не был признан физическим сообществом,
не стал рабочим инструментом,
главная "муть в основе" (по Л.В.Келдышу 2001),
подвергался многим ревизиям,
на него даже не ссылались.

Причины – в его необычности
и в длительном отсутствии
экспериментального подтверждения.

После 1990 – только 2001, 2011,
далее эксперименты пошли.

Эксперименты по эффекту Зенона-Халфина

M. C. Fischer, B. Gutiérrez-Medina, and M. G. Raizen.

[Observation of the Quantum Zeno and Anti-Zeno Effects in an Unstable System.](#)

Phys. Rev. Lett. 87, 040402 (2001)

J. M. Raimond, P. Facchi, B. Peaudecerf, S. Pascazio, C. Sayrin, I. Dotsenko, S. Gleyzes, M. Brune, and S. Haroche. [Quantum Zeno dynamics of a field in a cavity.](#)

Phys. Rev. A 86, 032120 (2012)

Schäfer, F., Herrera, I., Cherukattil, S. C. Lovecchio, F.S. Cataliotti, F. Caruso & A. Smerzi.
[Experimental realization of quantum Zeno dynamics.](#)

Nat Commun 5, 3194 (2014).

K Kakuyanagi, T Baba, Y Matsuzaki, H Nakano, S Saito and K Semba.

[Observation of quantum Zeno effect in a superconducting flux qubit.](#)

New J. Phys., Volume 17, 063035 (2015)

Patil Y.S., Chakram S., Vengalattore M.

[Measurement-induced localization of an ultracold lattice gas](#)

Phys. Rev. Lett., 115:140402, 2015.

Замысел квантового эффекта Зенона-Халфина.

Квантовый эффект Зенона-Халфина
первоначально был задуман
для замораживания нестабильного состояния.
(случай 2 эксперимента 1990 года).

Впоследствии был распространен и на другие случаи:

замораживание состояния,
находящегося в возмущающем поле
(случай 1 эксперимента 1990 года);

замораживание одного из равноценных состояний,
в которых может находиться система
(замораживание туннелирования, 2015).

Случай 2 эксперимента 1990 года

Itano W.M., Heinzen D.J., Bollinger J.J., Wineland D.J.

Измерения начинаются

в момент максимума периода осцилляции Раби,
когда все атомы находятся в верхнем состоянии.

Измерения длятся в течение четверти периода.

Квантовый эффект Зенона-Халфина. Эксперимент 1990 г.

Случай 2

$$\hat{U}(0, \tau) \rightarrow \hat{M} \rightarrow \hat{U}(\tau, 2\tau) \rightarrow \hat{M} \rightarrow \dots \rightarrow \hat{U}((N-1)\tau, N\tau) \rightarrow \hat{M}$$

Унитарный оператор

$\hat{U}$

$\rightarrow \psi_2$

${}^9\text{Be}^+$

$2s\,{}^2S_{1/2}(F=1)$

ψ_3

$2p\,{}^2P_{3/2}$

3

Измерение

$$\hat{M} = \hat{M}_1 \hat{U}_1$$

$\hat{M}_1$

Зондирующий

импульс

не рассеивается

на ионах,

но состояние

замораживается

(interaction-free измерения)

$\nu_{12} = 320\text{ МГц}$

Осцилляции Раби

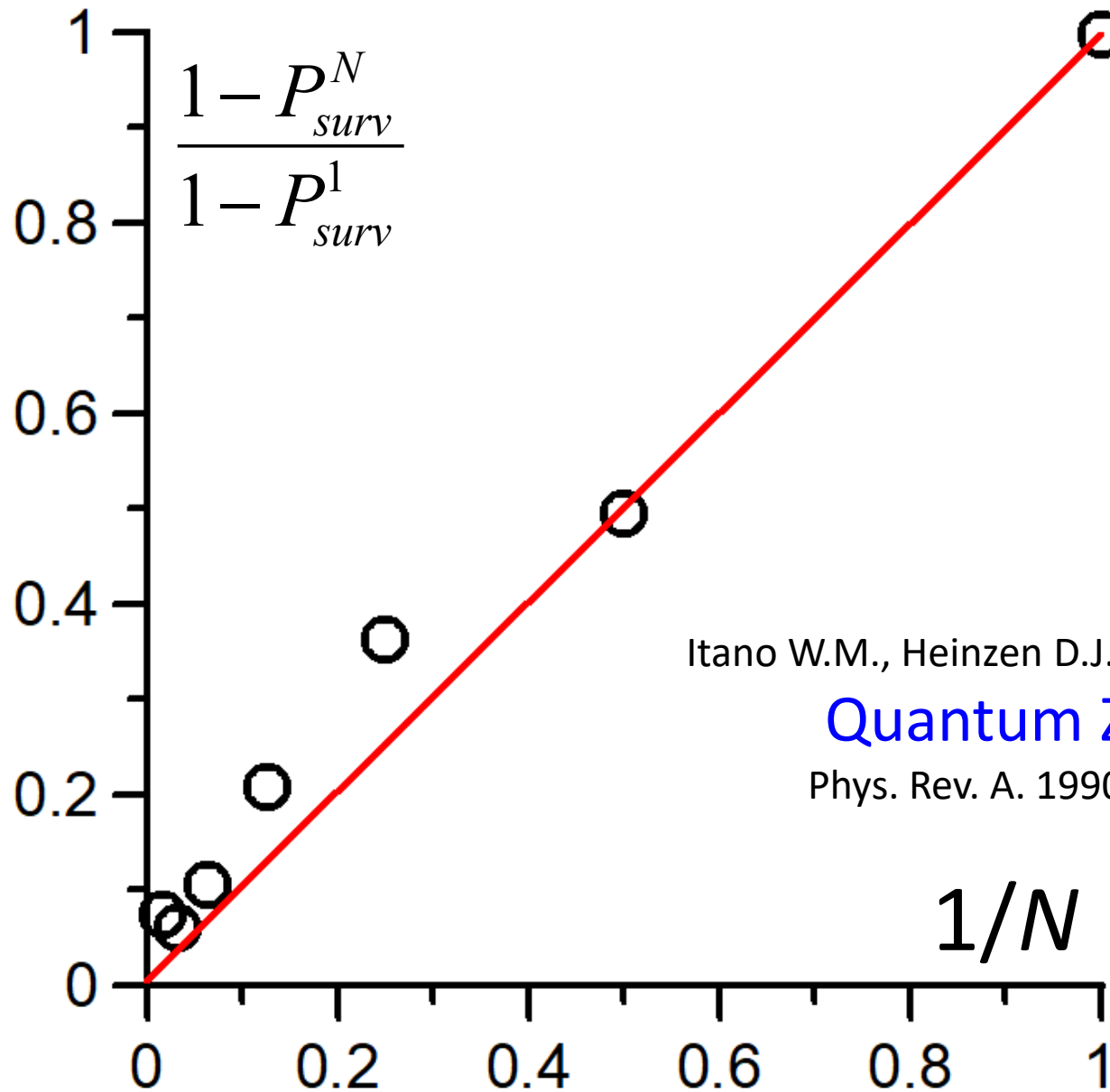
$\Omega = 12.3\text{ Гц}$

ψ_1 $2s\,{}^2S_{1/2}(F=0)$ 1

313 нм

$\pi/(\Omega\tau) \leq 64$

Квантовый эффект Зенона-Халфина. Эксперимент 1990 г.
Случай 2



Itano W.M., Heinzen D.J., Bollinger J.J., Wineland D.J.

Quantum Zeno effect //

Phys. Rev. A. 1990. V. 41. No. 5. P. 2295

3.2. Неравенства Леггетта-Гарга

Парные и тройная функции вероятности.

Если верен принцип макроскопического реализма,

то парные функции вероятности

$$\rho(q_1, q_2), \rho(q_2, q_3), \rho(q_1, q_3)$$

и тройная $\rho(q_1, q_2, q_3)$

должны **существовать** и быть **самосогласованными**:

$$\sum_{q_1=\pm 1} \rho(q_1, q_2, q_3) = \rho(q_2, q_3) \quad \sum_{q_2=\pm 1} \rho(q_1, q_2, q_3) = \rho(q_1, q_3)$$

(1)

$$\sum_{q_3=\pm 1} \rho(q_1, q_2, q_3) = \rho(q_1, q_2)$$

Первое неравенство Леггетта-Гарга.

$$1 + K_{12} + K_{13} + K_{23} =$$

$$= 1 + \sum_{q_1=\pm 1} \sum_{q_2=\pm 1} q_1 q_2 \rho(q_1, q_2) + \sum_{q_1=\pm 1} \sum_{q_3=\pm 1} q_1 q_3 \rho(q_1, q_3) + \sum_{q_2=\pm 1} \sum_{q_3=\pm 1} q_2 q_3 \rho(q_2, q_3) =$$

Подставляя **(1)**, находим

$$= \sum_{q_1=\pm 1} \sum_{q_2=\pm 1} \sum_{q_3=\pm 1} \rho(q_1, q_2, q_3) (1 + q_1 q_2 + q_2 q_3 + q_1 q_3)$$

$$\rho(q_1, q_2, q_3) \geq 0$$

$$1 + q_1 q_2 + q_2 q_3 + q_1 q_3 \geq 0 \text{ при любых } q_1 = \pm 1, q_2 = \pm 1, q_3 = \pm 1.$$



$$1 + K_{12} + K_{13} + K_{23} \geq 0$$

Второе неравенство Леггетта-Гарга.

$$K_{12} + K_{23} - K_{13} =$$

$$= \sum_{q_1=\pm 1} \sum_{q_2=\pm 1} q_1 q_2 \rho(q_1, q_2) + \sum_{q_2=\pm 1} \sum_{q_3=\pm 1} q_2 q_3 \rho(q_2, q_3) - \sum_{q_1=\pm 1} \sum_{q_3=\pm 1} q_1 q_3 \rho(q_1, q_3) =$$

$$= \sum_{q_1=\pm 1} \sum_{q_2=\pm 1} \sum_{q_3=\pm 1} \rho(q_1, q_2, q_3) (q_1 q_2 + q_2 q_3 - q_1 q_3)$$

$$q_1 q_2 + q_2 q_3 - q_1 q_3 = \pm 1 \quad \text{или} \quad -3 \quad \text{при любых } q_1 = \pm 1, q_2 = \pm 1, q_3 = \pm 1.$$

$$\rho(q_1, q_2, q_3) \geq 0$$

$$\sum_{q_1=\pm 1} \sum_{q_2=\pm 1} \sum_{q_3=\pm 1} \rho(q_1, q_2, q_3) = 1$$



$$-3 \leq K_{12} + K_{23} - K_{13} \leq 1$$

Другие неравенства Леггетта-Гарга

V. Athalye, S. S. Roy, and T. S. Mahesh,

Investigation of the Leggett-Garg Inequality for Precessing Nuclear Spins.

Phys. Rev. Lett. 107, 130402 (2011).

C. Emary, N. Lambert and F. Nori.

Leggett–Garg inequalities.

Rep. Prog. Phys. 77, 016001 (2013).

Пусть $K_n = K_{12} + K_{23} + K_{34} + \dots + K_{n-1,n} - K_{1n}$

тогда, если n – нечетное, то

$$-n \leq K_n \leq n - 2$$

а если n – четное, то

$$-(n - 2) \leq K_n \leq n - 2$$

Докажем первое неравенство

$$-n \leq K_n \leq n-2$$

(n – нечетное)

При $n = 3$

$$-3 \leq K_{12} + K_{23} - K_{13} \leq 1$$

доказано выше

(второе неравенство Леггетта-Гарга).

Пусть при $n - 2$ – неравенство верно.

$$-(n-2) \leq K_{n-2} \leq n-4$$

Докажем, что неравенство верно и при n .

Начинаем доказательство

$$K_n = K_{n-2} + K_{1,n-1} + K_{n-1,n-2} + K_{n-1,n} - K_{1n}$$

При любых n , чётных и нечётных

$$\begin{aligned} & K_{1,n-1} + K_{n-1,n-2} + K_{n-1,n} - K_{1n} = \\ &= \sum_{q_1=\pm 1} \sum_{q_2=\pm 1} \dots \sum_{q_n=\pm 1} \rho(q_1, q_2, \dots, q_n) (q_1 q_{n-2} + q_{n-1} q_{n-2} + q_{n-1} q_n - q_1 q_n) = \\ &= \sum_{q_1=\pm 1} \sum_{q_2=\pm 1} \dots \sum_{q_n=\pm 1} \rho(q_1, q_2, \dots, q_n) (q_1 (q_{n-2} - q_n) + q_{n-1} (q_{n-2} + q_n)) \\ & \quad -2 \leq q_1 (q_{n-2} - q_n) + q_{n-1} (q_{n-2} + q_n) \leq 2 \\ & \quad \downarrow \\ & -2 \leq K_{1,n-1} + K_{n-1,n-2} + K_{n-1,n} - K_{1n} \leq 2 \end{aligned}$$

$$K_n = K_{n-2} + K_{1,n-1} + K_{n-1,n-2} + K_{n-1,n} - K_{1n}$$

По предположению:

$$-(n-2) \leq K_{n-2} \leq n-4$$

Выше доказано, что

$$-2 \leq K_{1,n-1} + K_{n-1,n-2} + K_{n-1,n} - K_{1n} \leq 2$$



$$-n \leq K_n \leq n-2$$

Далее по индукции для любых n .

Цепочка при нечетных n – доказана.

Докажем второе неравенство

$$-(n-2) \leq K_n \leq n-2$$

$(n - \text{четное})$

При $n = 4$

$$K_4 = K_{12} + K_{23} + K_{34} - K_{14} =$$

$$= \sum_{q_1=\pm 1} \sum_{q_2=\pm 1} \sum_{q_3=\pm 1} \sum_{q_4=\pm 1} \rho(q_1, q_2, q_3, q_4) (q_1 q_2 + q_2 q_3 + q_3 q_4 - q_1 q_4) =$$

$$= \sum_{q_1=\pm 1} \sum_{q_2=\pm 1} \sum_{q_3=\pm 1} \sum_{q_4=\pm 1} \rho(q_1, q_2, q_3, q_4) (q_1 (q_2 - q_4) + q_3 (q_2 + q_4)) =$$

$$-2 \leq q_1 (q_2 - q_4) + q_3 (q_2 + q_4) \leq 2$$



$$-2 \leq K_4 \leq 2$$

При $n = 4$ неравенство доказано.

Пусть n - четное,
и при $(n - 2)$ – неравенство верно.

$$-(n - 4) \leq K_{n-2} \leq n - 4 \quad (1)$$

Докажем для n

$$K_n = K_{n-2} + K_{1,n-1} + K_{n-1,n-2} + K_{n-1,n} - K_{1n}$$

$$-2 \leq K_{1,n-1} + K_{n-1,n-2} + K_{n-1,n} - K_{1n} \leq 2 \quad (2)$$

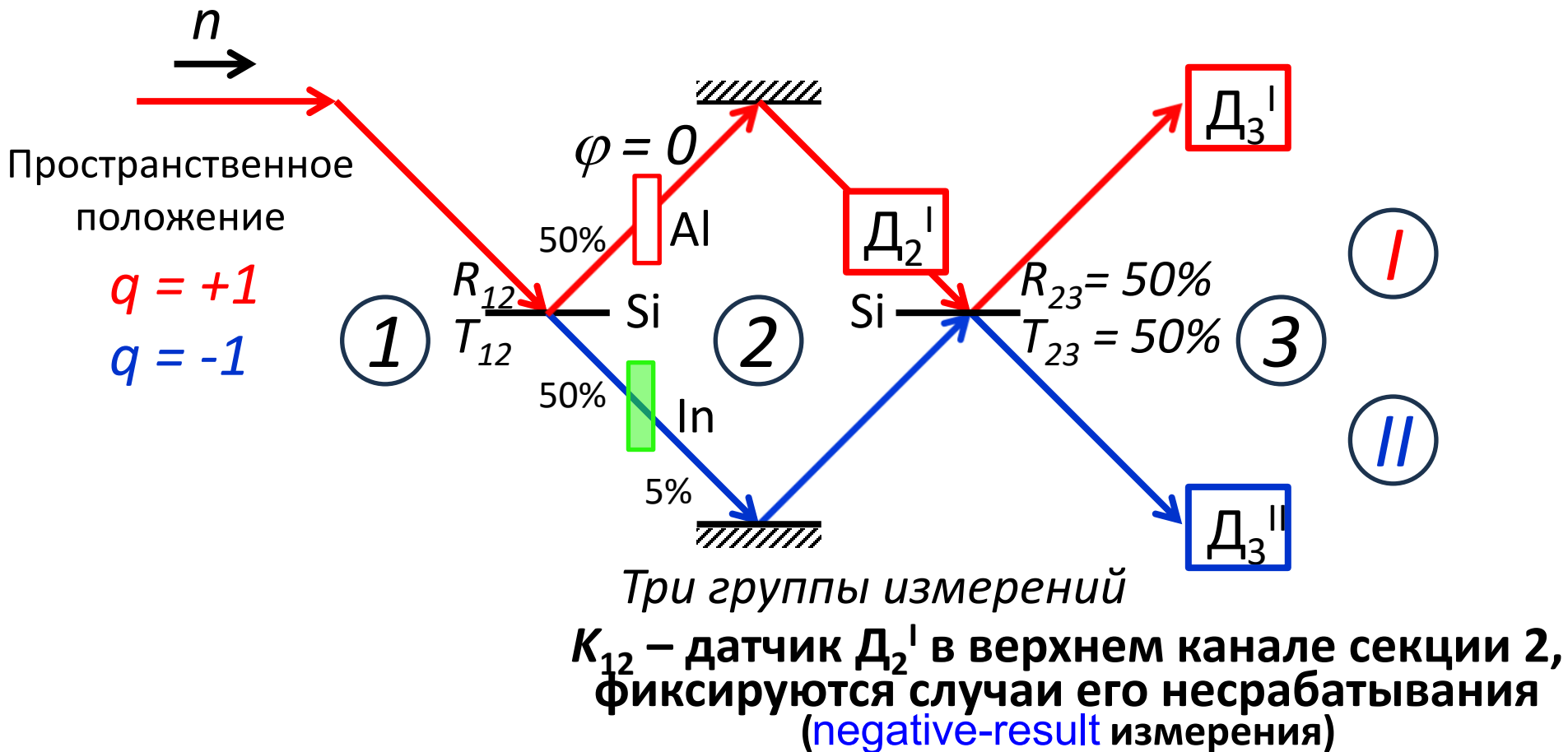


$$-(n - 2) \leq K_n \leq n - 2$$

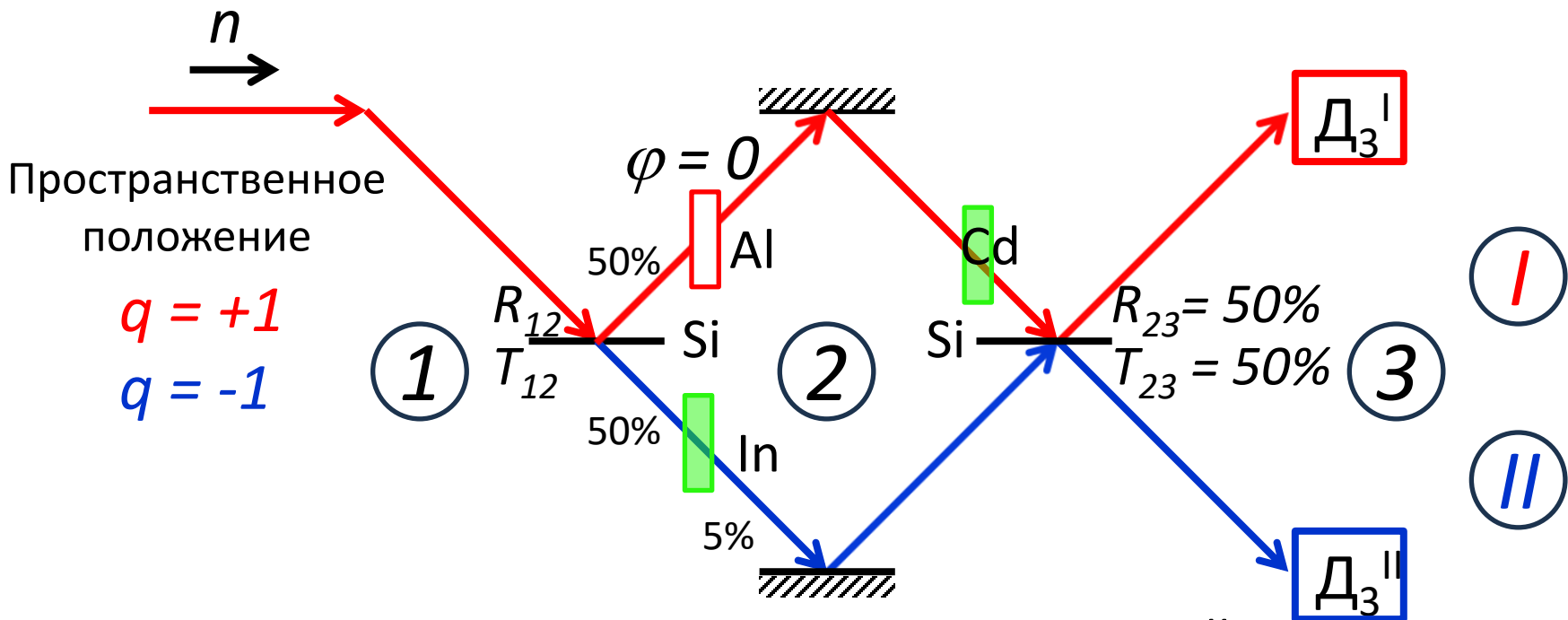
Далее по индукции для любых n .

Цепочка при четных n – доказана.

Измерение K_{12} .



Измерение K_{23} .

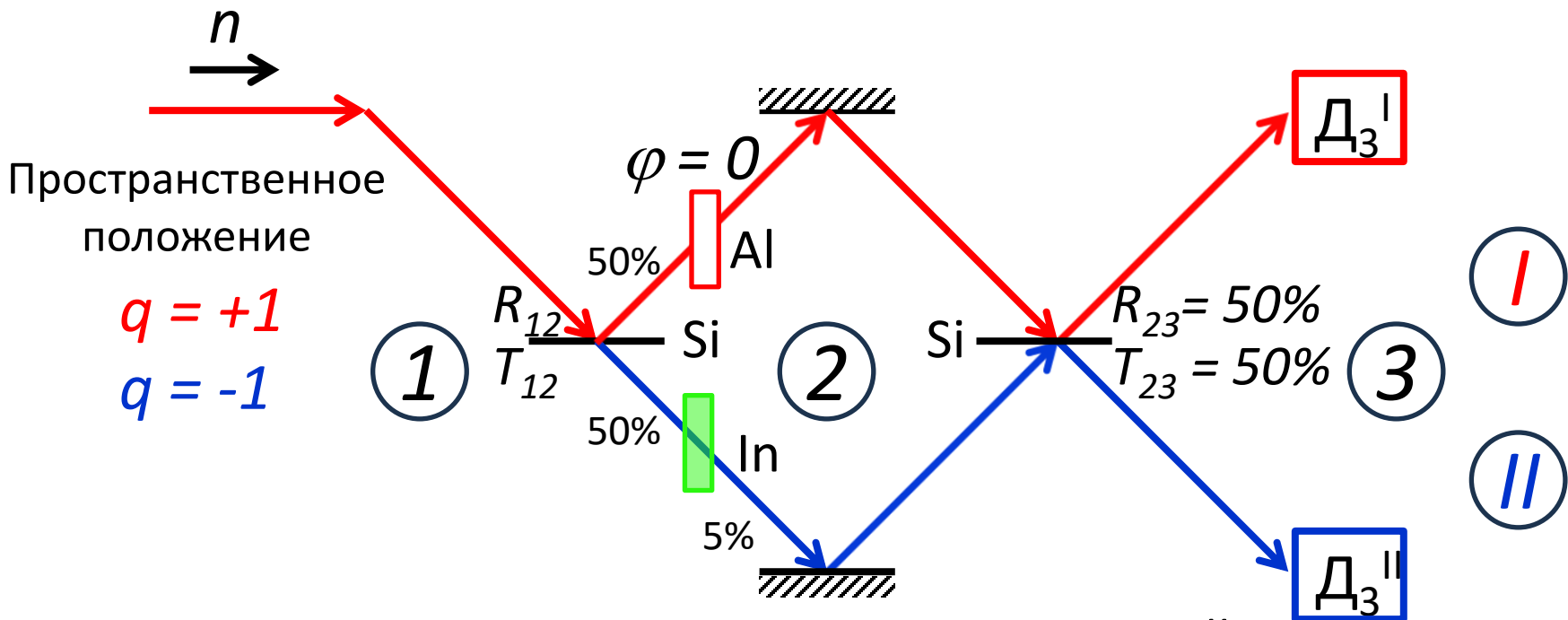


Три группы измерений

K_{12} – датчик D_2^I в верхнем канале секции 2, фиксируются случаи его несрабатывания (negative-result измерения)

K_{23} – Cd-пластина в верхнем канале секции 2 (фиксируются только negative-result измерения)

Измерение K_{13} .



Три группы измерений

K_{12} – датчик D_2^I в верхнем канале секции 2, фиксируются случаи его несрабатывания (negative-result измерения)

K_{23} – Cd-пластина в верхнем канале секции 2 (фиксируются только negative-result измерения)

K_{13} – верхний канал секции 2 свободный

Особенности эффекта нарушения неравенств Леггетта-Гарга.

- Эффект возникает для *одиононой* частицы.
- Может наблюдаться не только для фотонов, но и для *массивных фермионов (нейтронов)*.
- Имеет место, когда информация о частице получена наблюдателем *без явного взаимодействия между частицей и прибором* (interaction-free/negative-result measurement).

Нелокальность квантовой механики

Эволюция волной функции
при коллапсе фон Неймана
фундаментально нелокальная.

В случае interaction-free измерений
нелокальность становится очевидной
даже для **одинокых** частиц
в отсутствии квантовых корреляций.

Квантовая механика нелокальна в своей основе,
поскольку нелокальность существует
уже для одночастичных состояний,
когда нет переплетённых (entangled) состояний.

Выводы.

1. Благодаря экспериментам по квантовому эффекту Зенона-Халфина и по нарушению неравенств Леггетта-Гарга постулат фон Неймана для коллапса/редукции волновой функции при измерении получил диверсифицированную экспериментальную основу.

2. Проведено обобщение постулата фон Неймана на *interaction-free/negative-result* измерения одночастичных состояний.

3. Следуя фон Нейману, квантовую механику можно рассматривать как новую физическую теорию со своей аксиоматикой, двумя базовыми постулатами которой являются: первый – зависящее от времени уравнение Шредингера и второй – для однократных измерений постулат Борна, для многократных измерений постулат фон Неймана и его обобщение для *interaction-free/negative-result* коллапса.

Контрафактные квантовые технологии.

Существующие квантовые технологии основаны на цепочке унитарных преобразований квантового состояния с последующим однократным измерением, подчиняющимся постулату Борна.

Отдельного упоминания заслуживают
квантовые коды коррекции ошибок
и однонаправленные вычисления.

Контрафактные квантовые технологии основаны на цепочке унитарных преобразований квантового состояния, перемежающихся многократными interaction-free измерениями, служащими не для получения информации о квантовой системе, а для манипуляции квантовым состоянием.

*Пусть система удовлетворяет
некоторому набору априорных условий.
и отсутствие взаимодействия датчика с системой
в совокупности с этими априорными условиями
позволяет получить какую-то
дополнительную информацию о квантовой системе,
то это вызывает коллапс волновой функции
в равной степени, как и реальное взаимодействие
датчика и квантовой системы.*

*Коллапс волновой функции вызывается
не взаимодействием квантовой системы и датчика,
а фактом получения наблюдателем
дополнительной информации о ней!*