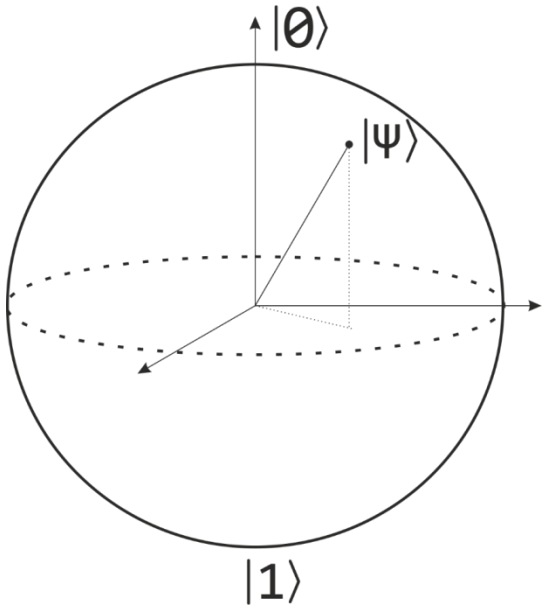
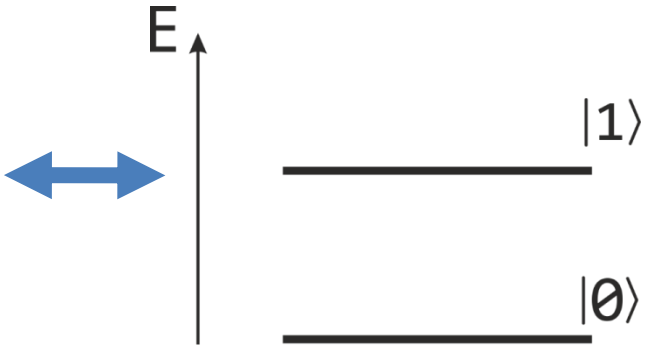
Ионный квантовый вычислитель

Основные идеи квантового вычислителя

Квантовый бит





$\underbrace{|01100..10\rangle}_{\text{N кубит}}$

2^N размерное пространство

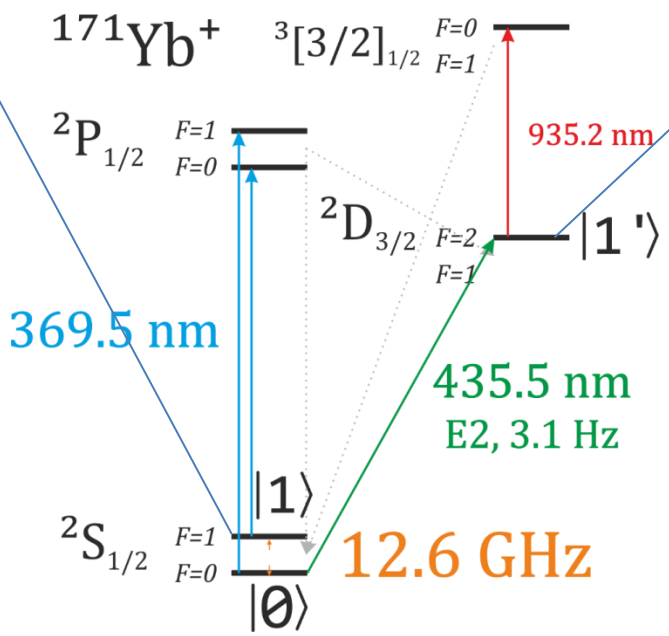
Требования к кубитам

	Ионные кубиты	**Кубиты на сверхпроводниках**
Большие времена когерентности	До **10 минут [1]**	До **320 мксек** [4]
Эффективное приготовление и считывание состояний	Ошибка для одного кубита **3.8×10^{-5} [2]**	Ошибка для одного кубита **10^{-3}** [5]
Идентичность	Обеспечена физическими законами	Зависит от качества изготовления
Масштабируемость	**5** кубитный универсальный вычислитель [3]	**20** кубитный универсальный вычислитель

Типы ионных кубитов

Радиочастотный кубит

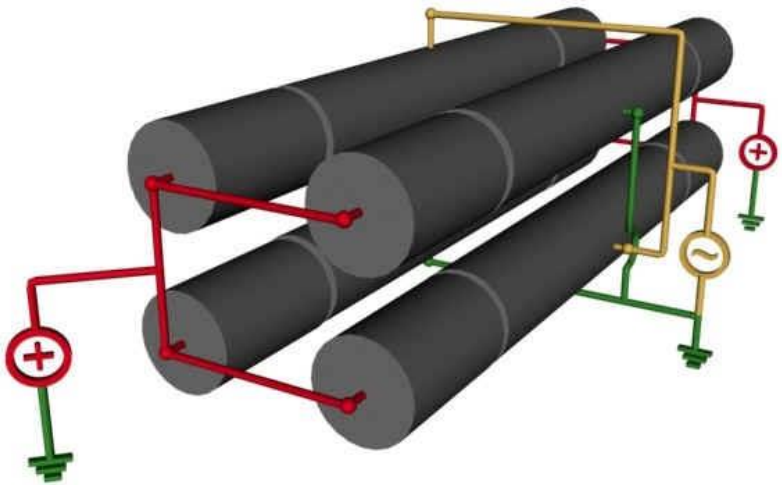
Частоты порядка ГГц
+ Время жизни до 10 минут
+ Ошибка для одного кубита $3{,}8 \times 10^{-5}$
-Для манипуляции требуется реализовывать стимулированный Рамановский процесс



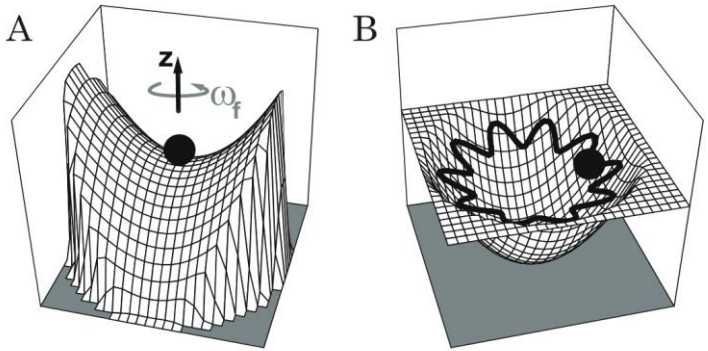
Оптический кубит

Частоты порядка 10^{15} Гц
-Требуется лазер с очень узкой спектральной линией (порядка герца)

Локализация и удержание ионов

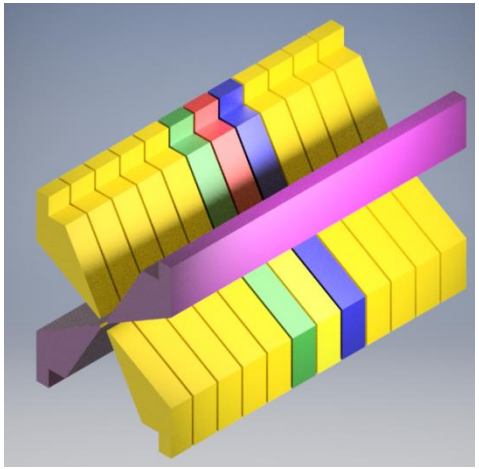


$$\Phi_{ps}(\mathbf{x}) = \frac{Q^2}{m\omega_{rf}^2}\left(\frac{V_{rf}}{2r_0^2}\right)^2 (x^2 + y^2)$$



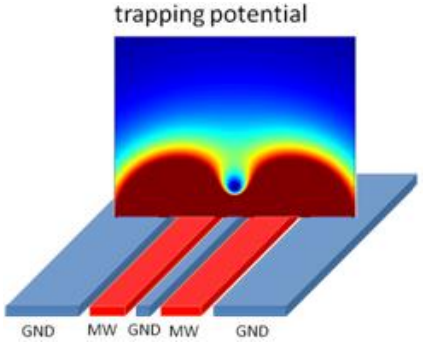
Типы ионных ловушек

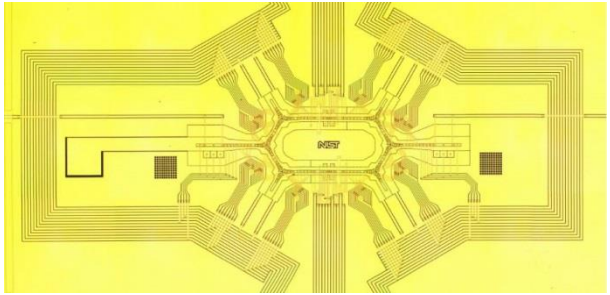
Линейная квадрупольная ловушка



+ Большие глубины потенциалов (до 10 эВ)
+ Высокая гармоничность потенциала
- Ограничения по геометрии

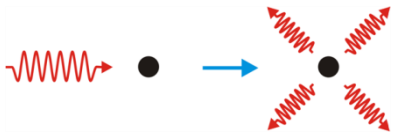
Планарные ловушки (на чипе)





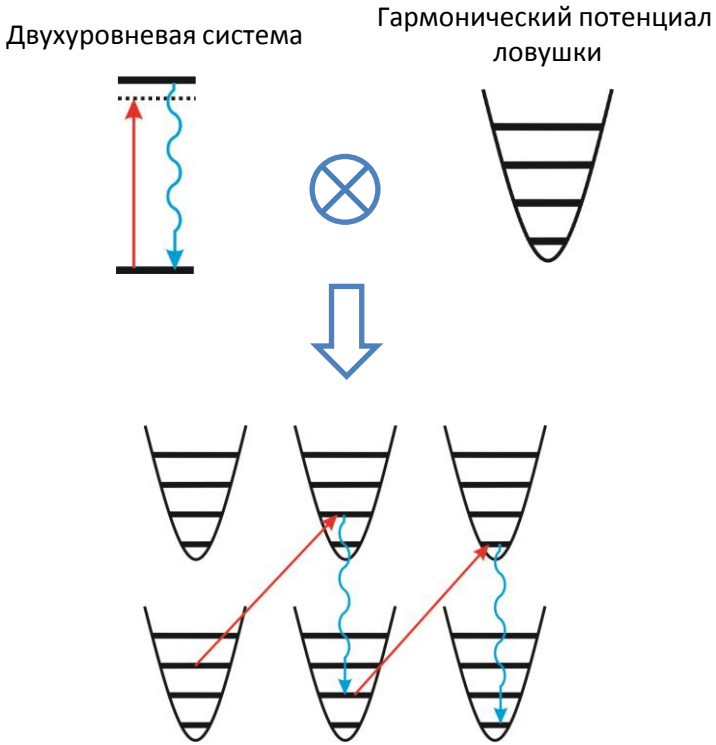
+ возможны очень сложные геометрии
+ хороший оптический доступ
- Низкая гармоничность потенциала
- Сравнительно низкие глубины потенциалов (порядка 0.01 эВ)

Доплеровское охлаждение



- Сильный циклический переход
- Красная отстройка
- Достаточно освещать с одного не ортогонального колебательным модам направления
- Характерная спектральная ширина перехода 50 МГц
- Доплеровский предел ~3 мК

Субдоплеровское охлаждение на боковых частотах



- Охлаждение до основного колебательного состояния

Квантовый гейт C-NOT

Управляющий кубит

Управляемый кубит

$$|\varepsilon_1\rangle|\varepsilon_2\rangle \rightarrow |\varepsilon_1\rangle\,|\varepsilon_1 \oplus \varepsilon_2\rangle \qquad \varepsilon_{1,2} \in \{0,1\}$$

Начальные состояния

Конечные состояния

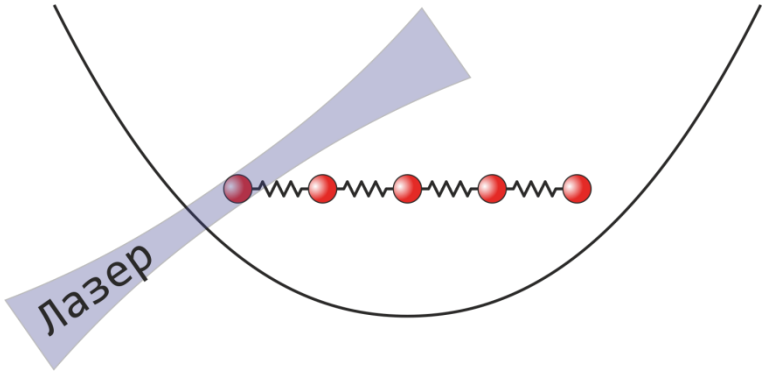
$$\begin{array}{c|cccc} & |00\rangle & |01\rangle & |10\rangle & |11\rangle \\ \hline |00\rangle & 1 & 0 & 0 & 0 \\ |01\rangle & 0 & 1 & 0 & 0 \\ |10\rangle & 0 & 0 & 0 & 1 \\ |11\rangle & 0 & 0 & 1 & 0 \end{array}$$

C-NOT между кубитами
Произвольные вращения кубитов

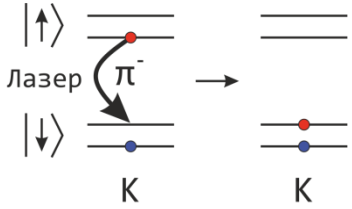
Универсальный квантовый вычислитель

Архитектура Сирака-Цоллера

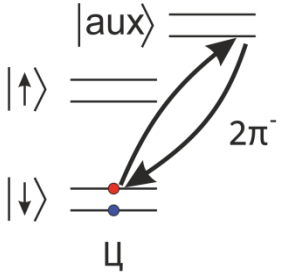
- Кубиты кодируются электронными состояниями ионов
- Перепутывание посредством общих колебательных степеней свободы
- Манипуляция кубитами при помощи сфокусированных лазерных пучков



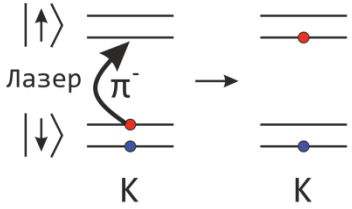
Реализация двухкубитного гейта, аналогичного C-NOT



Отображение состояния контрольного кубита на колебательную степень свободы



Одноионный гейт, аналогичный C-NOT (управляется колебательным состоянием)

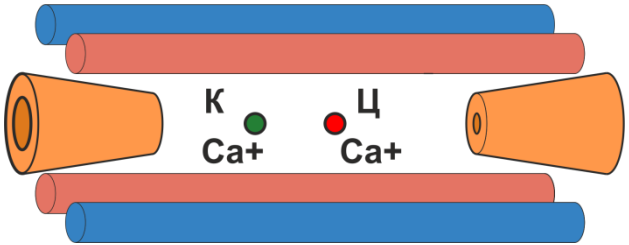


Возвращение контрольного кубита в исходное состояние

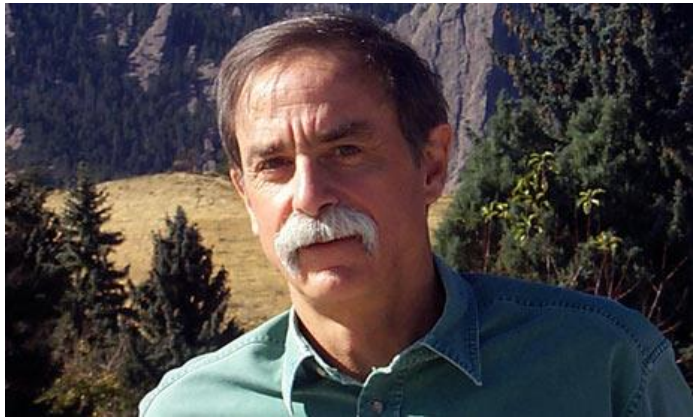
Первая реализация двухкубитного гейта C-NOT[6]

Отображение кубита К на колебательное состояние → Одноионный гейт C-NOT на кубите Ц (управляется колеб. состоянием) → Восстановление состояния кубита К

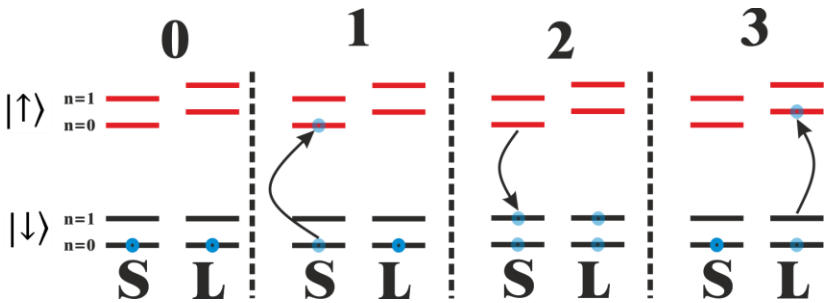
- Fidelity квантовой операции достигало 80%
- В отличие от оригинальной архитектуры Сирака-Цоллера не требуется вспомогательное состояние для одноионного CNOT гейта

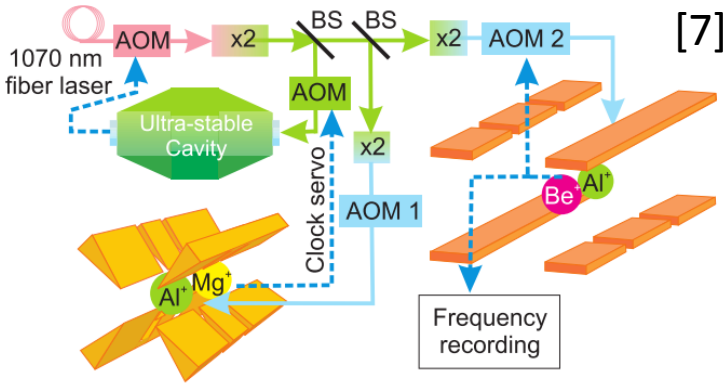


QND и спектроскопия методом квантовой логики



David Wieland
NIST, USA
Нобелевская премия по физике 2012

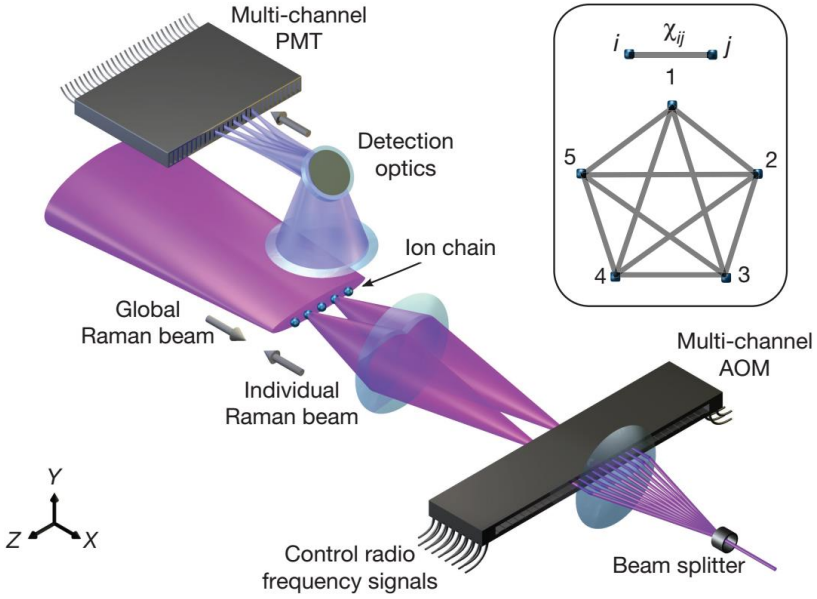




[7]

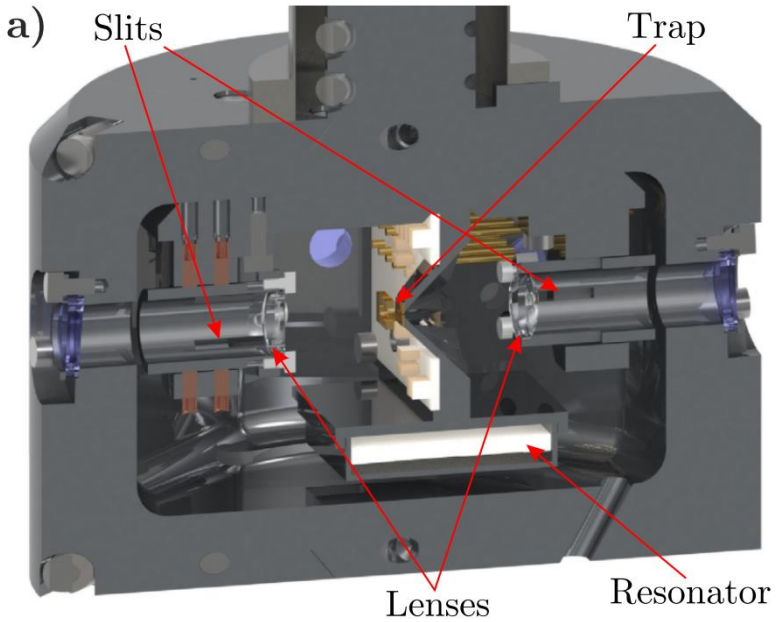
- Симпатическое охлаждение иона Al+ при помощи Mg+
- Считывание состояния иона Al+ путем проекции его на ион Mg+

5 кубитный универсальный вычислитель



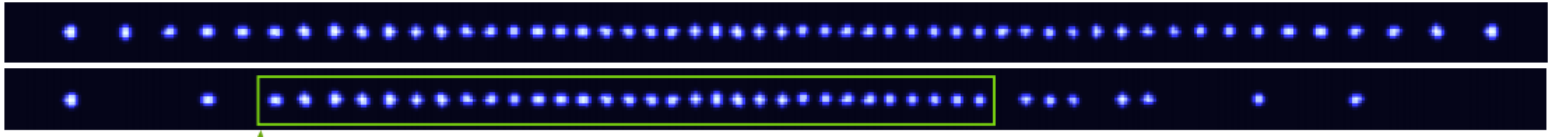
- Радиочастотные кубиты на ионе $^{171}Yb^{+}$
- Линейная ловушка Пауля
- Оптическая адрессация при помощи мультиканального АОМа
- Реализованы алгоритмы Deutsch–Jozsa, Bernstein–Vazirani, Когерентный квантовый алгоритм Фурье
- Fidelity порядка 90%
- Аналогичные результаты получены на оптическом кубите $^{40}Ca^{+}$ также реализована факторизация числа 15[8]

Криогенные планарные ловушки [9]

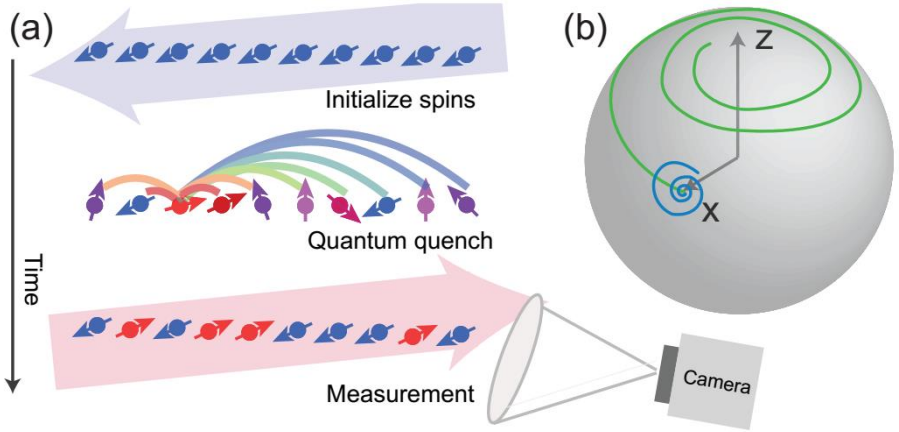


- Уменьшается число столкновений с остаточным газом -> увеличивается время когерентности
- Эффективная защита от магнитного поля
- Сверхпроводяшие электроды ловушки -> уменьшаются нагревы из-за патчевых зарядов

53 кубитный ионный симулятор[10]

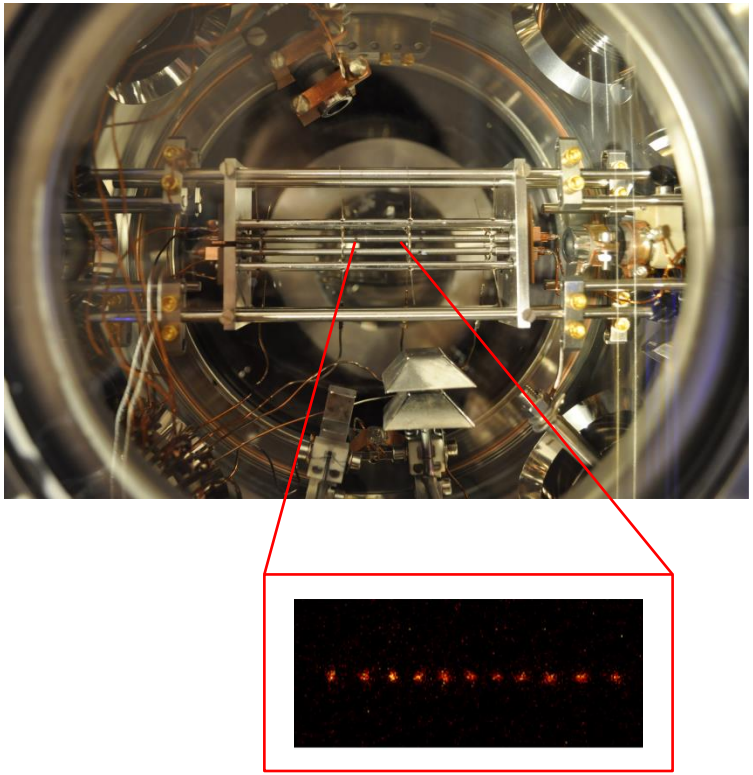


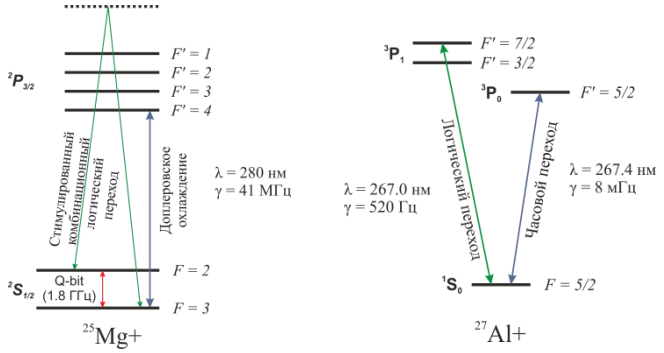
- Моделирование неравновесного фазового перехода в модели Изинга для поперечного поля
- Кубиты-спины ионов
- Использовано 53 кубита
- Измерение каждого кубита с эффективностью 99%
- Возможность менять силу взаимодействия в модели Изинга



Ионный эксперимент ФИАН

- Создаются оптические часы на $^{27}Al+$ со спарринг-ионом $^{25}Mg+$
- Осуществлено лазерное охлаждение ионов $^{25}Mg+$
- Осуществлена манипуляция квантовым состоянием кубита на магнии при помощи микроволнового поля
- Ведутся работы по охлаждению ионов до основного колебательного состояния

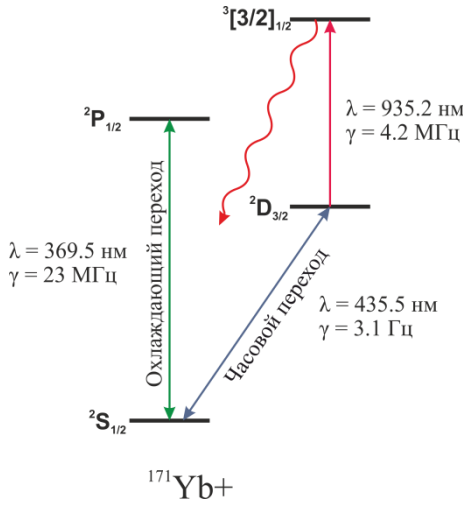




Проект ИБИС

Бортовой компактный ионный стандарт частоты на ионе $^{171}Yb^{+}$

- 300 кг
- 1 м^3



Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

РКС
РОССИЙСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ

Skoltech
Сколковский институт науки и технологий

Ссылки

[1] Wang, Y., Um, M., Zhang, J., An, S., Lyu, M., Zhang, J. N., … Kim, K. (2017). *Nature Photonics*, *11*(10), 646–650.
[2] Gaebler, J. P., Tan, T. R., Lin, Y., Wan, Y., Bowler, R., Keith, A. C., … Wineland, D. J. (2016). *Physical Review Letters*, *117*(6), 1–5.
[3] Debnath, S., Linke, N. M., Figgatt, C., Landsman, K. A., Wright, K., & Monroe, C. (2016). *Nature*, *536*(7614), 63–66.
[4] Ofek, N., Petrenko, A., Heeres, R., Reinhold, P., Leghtas, Z., Vlastakis, B., … Schoelkopf, R. J. (2016). *Nature*, *536*(7617), 441–445.
[5] Chen, Z., Kelly, J., Quintana, C., Barends, R., Campbell, B., Chen, Y., … Martinis, J. M. (2016). *Physical Review Letters*, *116*(2).
[6] Schmidt-Kaler F., Häffner H., Riebe M., Gulde S., Lancaster G. P. T., Deutschle T., … Blatt R. (2003). *Nature*, *422*(27), 408–411.
[7] Chou C. W., Hume D. B., Koelemeij J. C. J., Wineland D. J., & Rosenband T. (2010). *Physical Review Letters*, *104*(7), 8–11
[8] Monz, T., Nigg, D., Martinez, E. A., Brandl, M. F., Schindler, P., Rines, R., … Blatt, R. (2016). *Science*, *351*(6277), 1068–1070.
[9] Brandl, M. F., Van Mourik, M. W., Postler, L., Nolf, A., Lakhmanskiy, K., Paiva, R. R., … Blatt, R. (2016). Review of Scientific Instruments, 87(11).
[10] Zhang, J., Pagano, G., Hess, P. W., Kyprianidis, A., Becker, P., Kaplan, H., … Monroe, C. (2017). *Nature*, *551*, 601.