



# 2017

**BREAKTHROUGHS**  
*of the YEAR*

**Наиболее значимые (прорывные)  
достижения мировой науки 2017**



# Cosmic convergence

On 17 August, scientists around the world witnessed something never seen before:

“One hundred and thirty million light-years away, two neutron stars spiraled into each other in a spectacular explosion that was studied by observatories ranging from gamma ray detectors to radio telescopes. The blast confirmed several key astrophysical models, revealed a birthplace of many heavy elements, and tested the general theory of relativity as never before. That first observation of a neutron-star merger, and the scientific bounty it revealed is

***Science's 2017 Breakthrough of the Year***

## Проект LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)



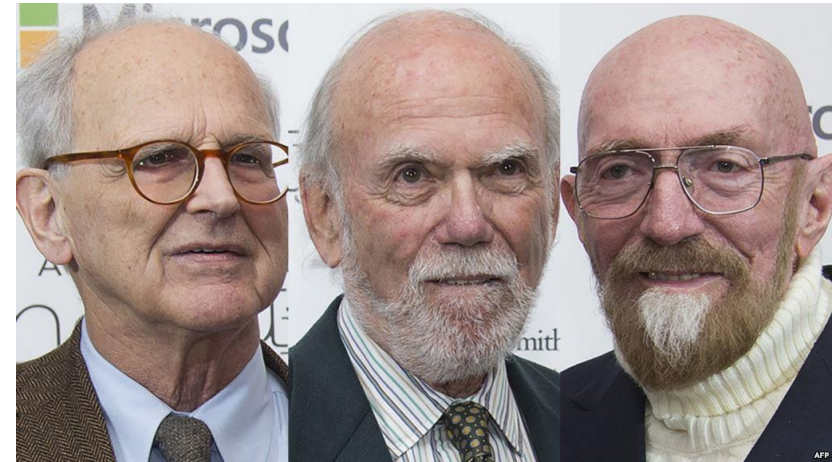
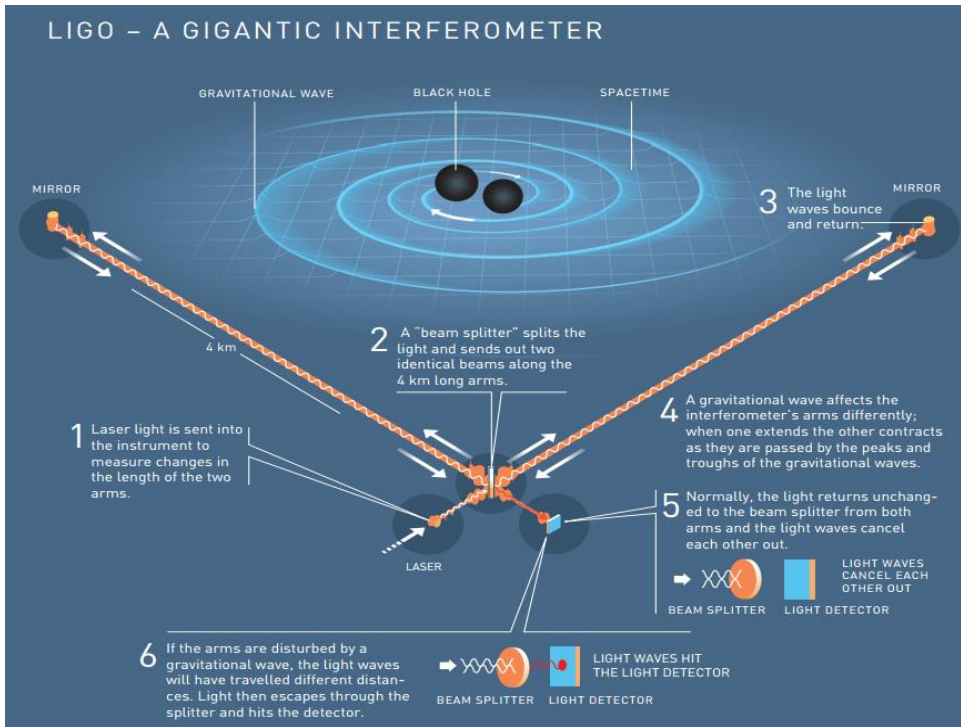
Ливингстон ( Луизиана)



Хэнфорд (шт. Вашингтон)



VIRGO (Пиза ( Италия))



Райнер  
Вайсс  
р. 1932

Барри  
Бэриш  
р. 1936

Кип Стивен  
Торн  
р. 1940 р

Нобелевская премия по физике 2017



# FIRST COSMIC EVENT OBSERVED IN GRAVITATIONAL WAVES AND LIGHT

Colliding Binary Neutron Star PSR B1913+16

Collision creates light across the entire electromagnetic spectrum. Joint observations independently confirm Einstein's General Theory of Relativity, help measure the age of the Universe, and provide clues to the origins of heavy elements like gold and platinum

Gravitational wave lasted over 100 seconds

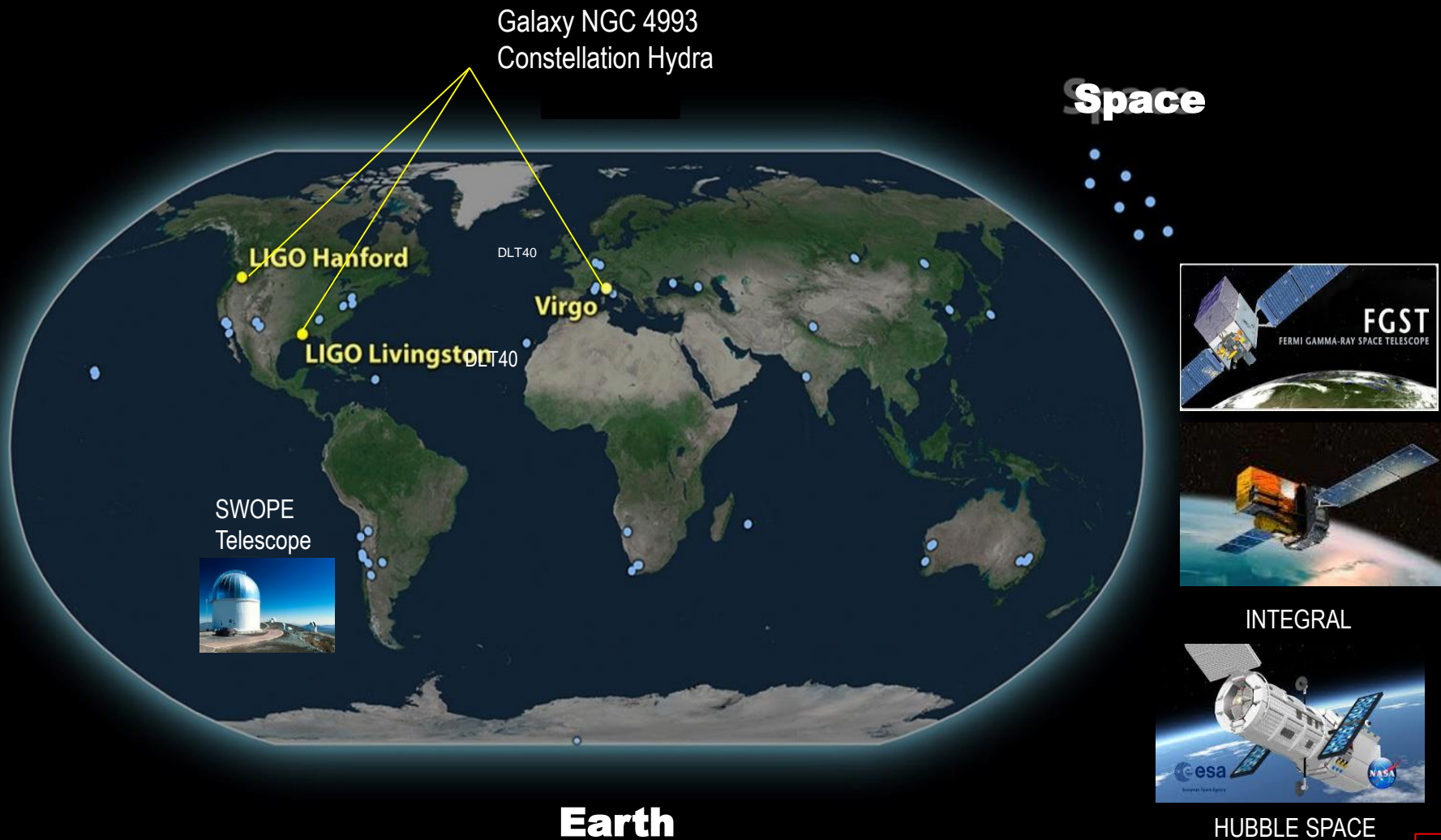
On August 17, 2017, 12:41 UTC, LIGO (US) and Virgo (Europe) detect gravitational waves from the merger of two neutron stars, each around 1.5 times the mass of our Sun. This is the first detection of spacetime ripples from neutron stars.

Within two seconds, NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope detects a short gamma-ray burst from a region of the sky overlapping the LIGO/Virgo position. Optical telescope observations pinpoint the origin of this signal to NGC 4993, a galaxy located 130 million light years distant.



# Слияние нейтронных звезд наблюдали 70 мировых обсерваторий в интервале от радиоволн до $\gamma$ -излучения

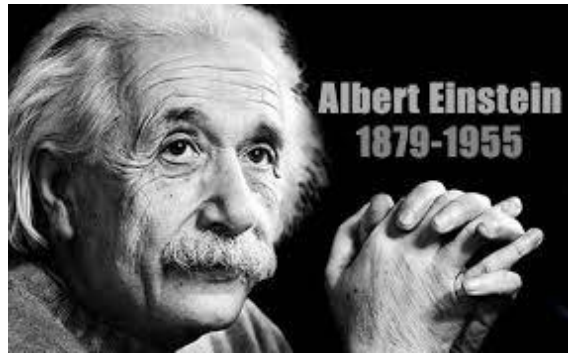
*Событие зафиксировано 3674 исследователями из 953 институтов*



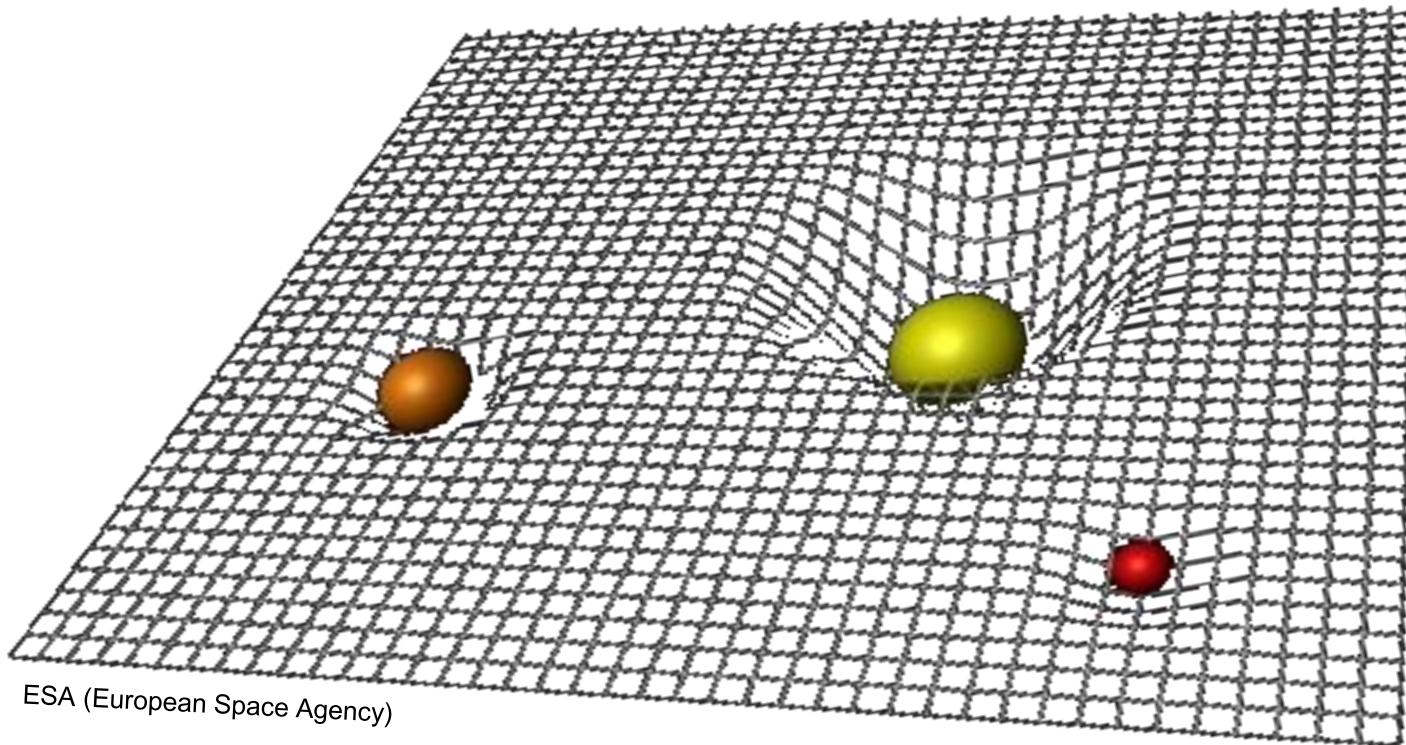




# Триумф общей теории относительности



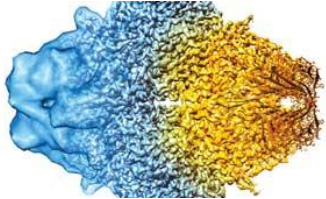
1915, 1916 гг  
Создание общей теории  
относительности.  
Предсказание существования  
гравитационных волн



ESA (European Space Agency)

ИСКРИВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО (*SPACETIME*) КОНТИНУУМА





Биомолекулы и биологические структуры на атомном уровне.  
Крио-ЭМ



Миниатюрный детектор рассеяния нейтрино на ядрах



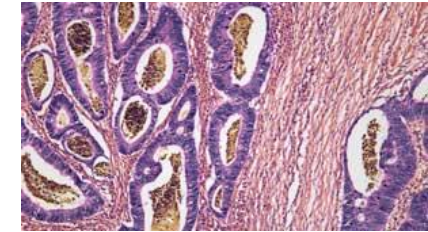
Точечное редактирование пар геномной ДНК



Самые древние (~ 300 000лет) останки *H Sapiens* (Марокко)



Свободный обмен препринтами статей по биологии



*Pembrolizumab* - лекарство от рака, действующее на генетику раковых клеток



Орангутангу  
*Pongo tapanuliensis*

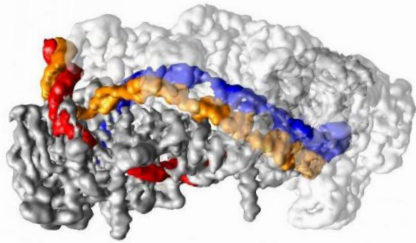


Лед из Антарктики, замерзший 2.7 миллиона лет тому назад



Генная терапия спинальной мышечной атрофии





Harvard Medical School

Биомолекулы и биологические  
структуры на атомном уровне.  
Криоэлектронная микроскопия



Фото: Juan Collar / uchicago.edu

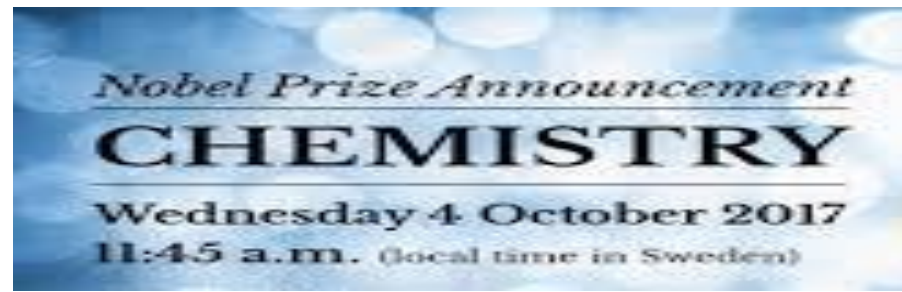
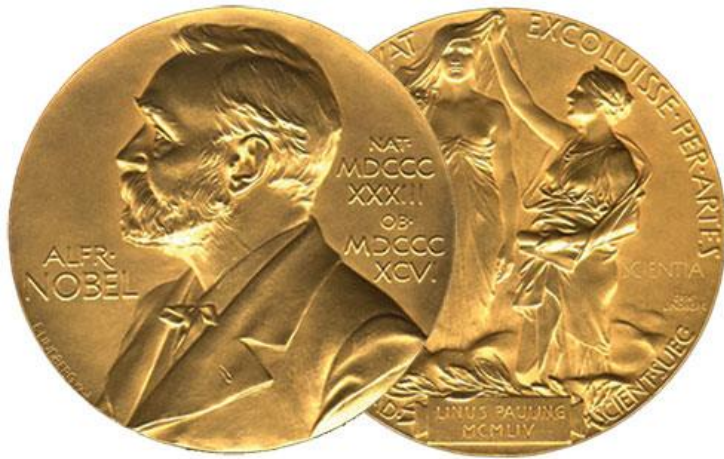
Нейтрино ( $e$ ,  $\mu$ ,  $\tau$ )  
Миниатюрный детектор  
рассеяния нейтрино на ядрах



Nature, Vol. 551, p. 464, 23 November 2017

Точечное редактирование  
пар геномной ДНК

Квантовые компьютеры и прогресс в вычислениях  
Металлический водород и другие новые материалы



**“for the development of cryo-electron microscopy, which both simplifies and improves the imaging of biomolecules”**

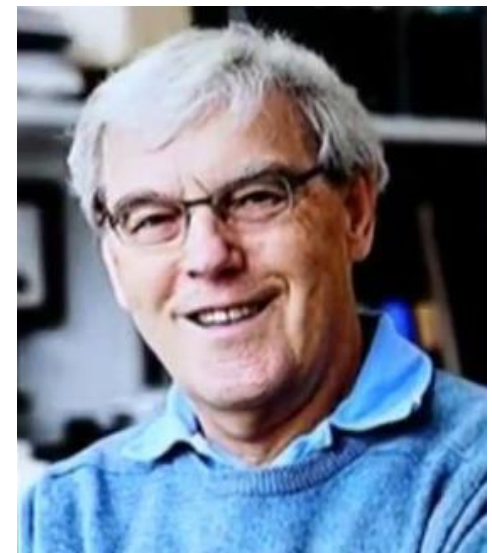
---



Jacques Dubochet (b.1940)  
University of lausanne (Switzerland)



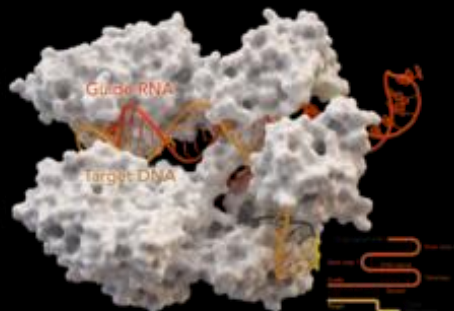
Joachim Frank (b.1940)  
Columbia University (USA)



Richard Henderson (b. 1945)  
Lab. Molecular Biology/ Cambridge (UK)



# Основные методы определения строения биомолекул и биоструктур

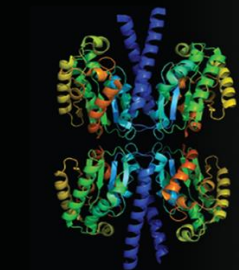


## X-Ray Crystallography

Необходим кристаллический образец

Размер молекул не ограничен

Атомное разрешение, но кристаллизация может длиться больше года, и образец может разрушиться



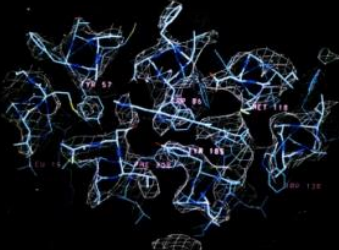
## Nuclear Magnetic Resonance

Небольшие молекулы

Реальные структуры протеинов, но многоатомные структуры плохо разрешимы



NMR Bruker Avance 600  
ЮФУ



## Electron microscopy

Нет особенных ограничений

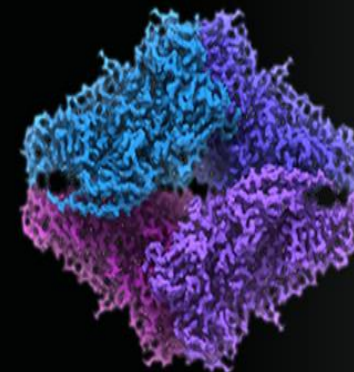
Образцы любого размера

Разрешение до 2-3 Å:

$$\lambda = h/p = h/2emU$$



TEM Tecnai G<sup>2</sup> Spirit BioTWIN  
ЮФУ



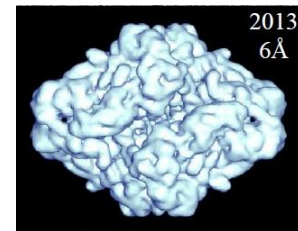
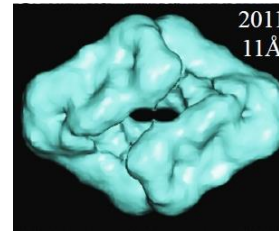
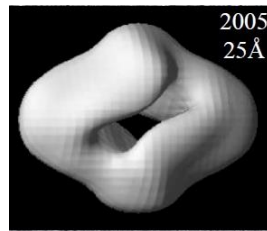
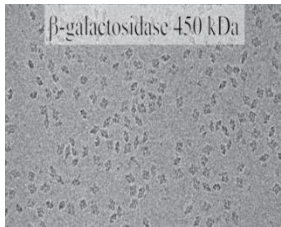
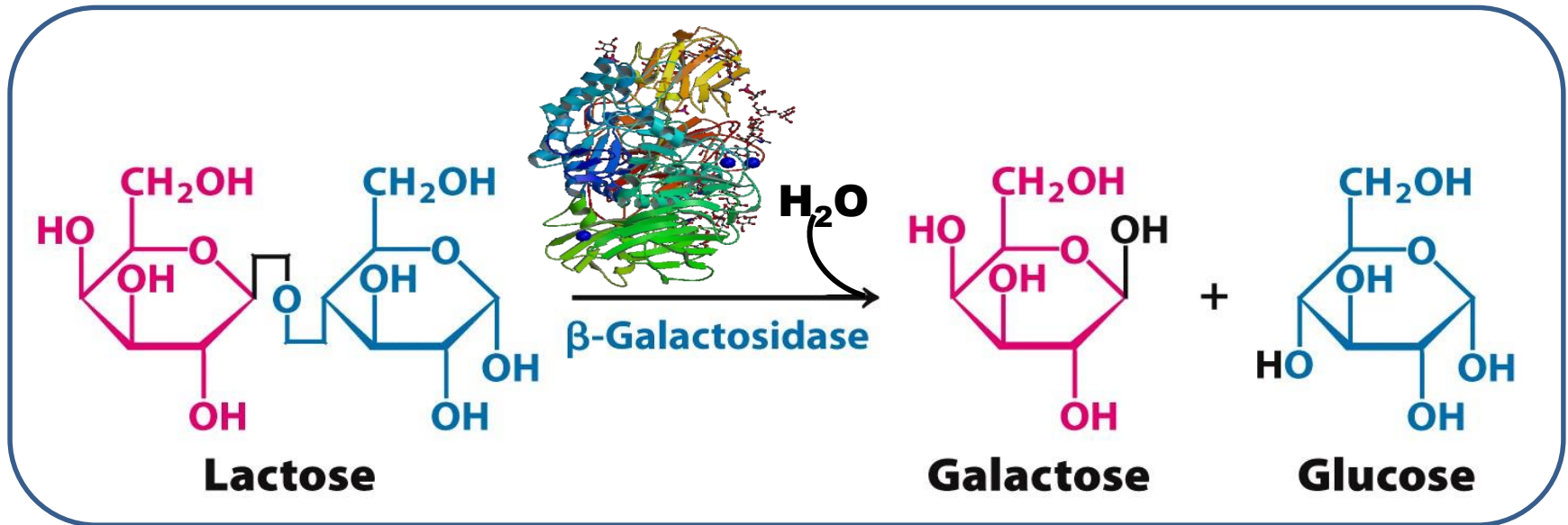
## Cryo-Electron Microscopy

Образец замораживается в естественном состоянии

Большие молекулы

Практически атомное разрешение, быстрое приготовление образца

# Развитие метода КриоЭМ. Структура фермента бета-галактозидаза

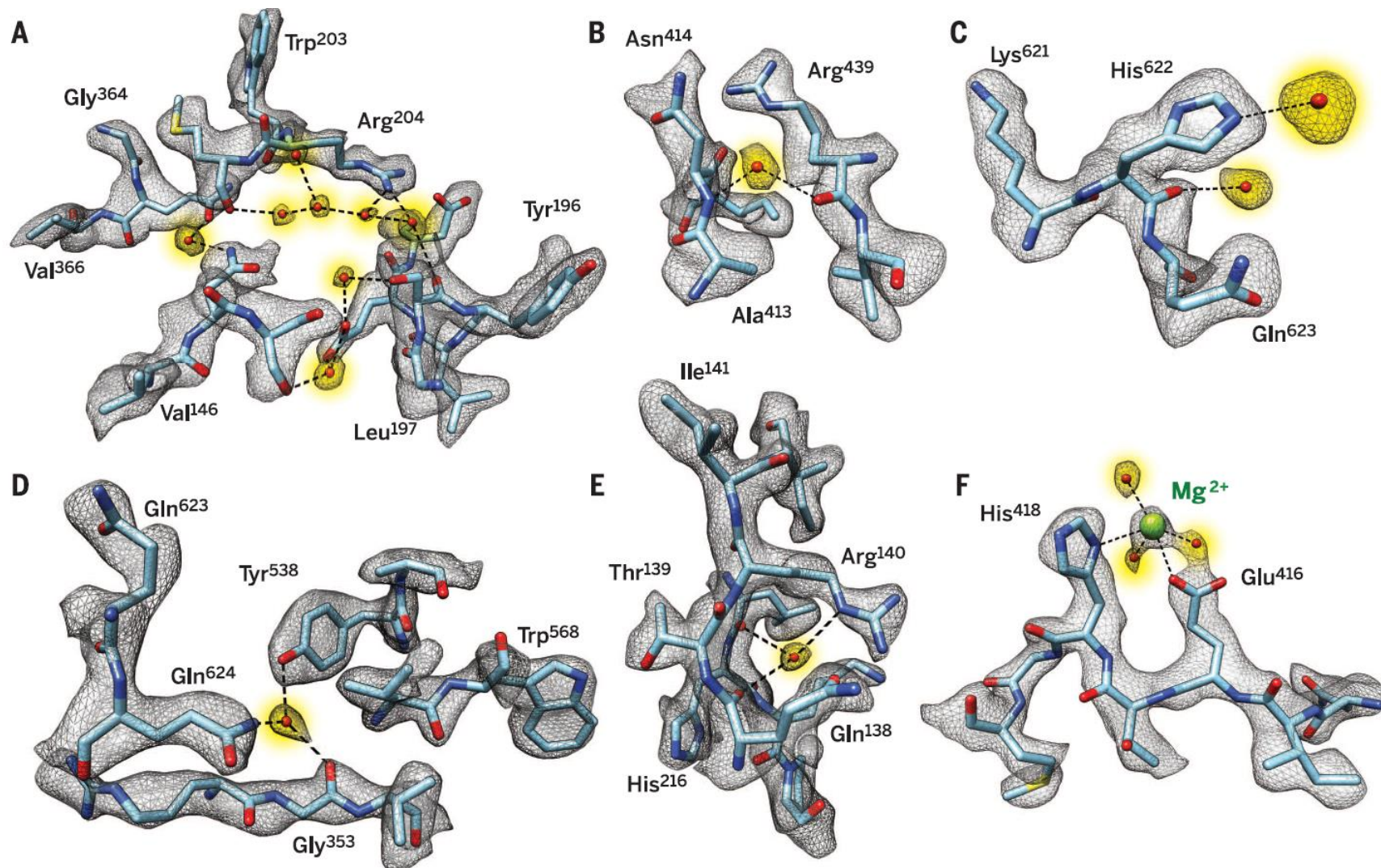
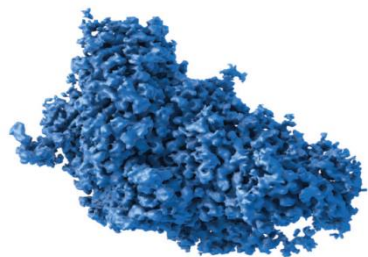


TMITDSLAVV LQRRDWENPG VTQLNRLAAH PPFASWRNSE EARTDRPSQQ LRSLNGEWR FAWFPAPEAVP ESWLECDLPE ADTVVPSNW QMHGYDAPIY  
 TNVTYPITVN PPFVPTENPT GCYSLTFNVD ESWLQEGQTR IIFDGVNSAF HLWCNGRWVG YGQDSRLPSE FDLSAFLRAG ENRLAVMVL RWS DGSYLEDQ  
 DMWRMSGIFR DVSL LHKPTT QISDFHVATR FNDDFSRAVL EAEVQMC GEL RDYLRVTVSL WQGETQV ASG TAPFGGEIID ERGGYADRVT LRLNVPK L  
 WSAEIPNL YR AVVELHTADG TLIEAEACDV GFREVRIENG LLLLNGKPLL IRGVNRHEHH PLHGQVMDEQ TMVQDILLMK QNNFNAVRCS HYPNHPLWYT  
 LCDRYGLYVV DEANIETHGM VPMNRLTDDP RWLPAMSERV TRMVQRDRNH PSVIIWSLGN ESGHGANHDA LYRWIKSVDP SRPVQYEGGG ADTTATD IIC  
 PMYARVDEDQ PFPAPVKWSI KKWLSLPGET RPLILCEYAH AMGNSLGGFA KYWQAFRQYP RLQGGFVWDW VDQSLIKYDE NGNPWSAYGG DFGDTPNDRQ  
 FCMNGLVFAD RTPHPALTEA KHQQQFFQFR LSGQTIEVTS EYLF RHDNE LLHWMVALDG KPLASGEVPL DVAPQGKQLI ELPQLPQES AGQLWLTVRV  
 VQP NATAWSE AGHISAWQQW RLAENLSVTL PAASHAIPHL TTSEMDFCIE LGNKRWQFNR QSGFLSQMWI GDKKQLLTPL RDQFTRAPLD NDIGVSEATR  
 IDPNAWVERW KAAGHYQAEA ALLQCTADTL ADAVLITTAH AWQHOGKTLF ISRKTYRIDG SGQMAITVDV EVASDTPHPA RIGLNCQLAQ VAERVNWLGL  
 GPQENYPDRL TAACFDRWDL PLSDMYTPYV FPEENGLRCG TRELNYGPHQ WRGDFQFNIS RYSQQQLMET SHRHLLHAE E GTWLNIDGFH MGIGGDDSW S  
 PSVSAEFQLS AGRYHYQLVW CQK

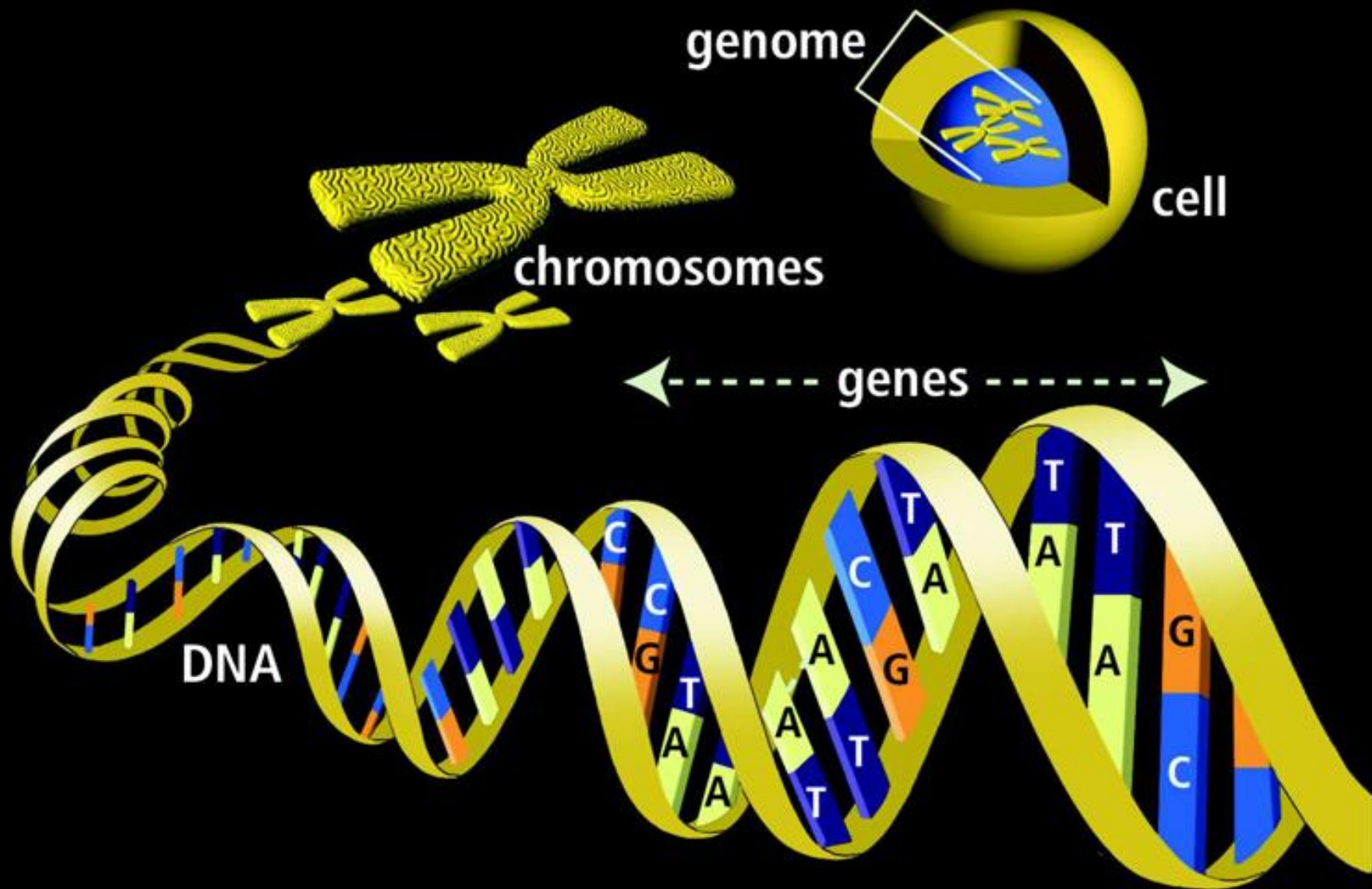


## 2.2 Å resolution cryo-EM structure of $\beta$ -galactosidase in complex with a cell-permeant inhibitor.

A. Bartesaghi, A. Merck, S Banerjee, D. Matthless, X. Wu, J. Milne, S. Subramanian  
*Science*. 2015, vol. 348. Issue 6239, 1147-1151



# Точечное редактирование пар геномной ДНК



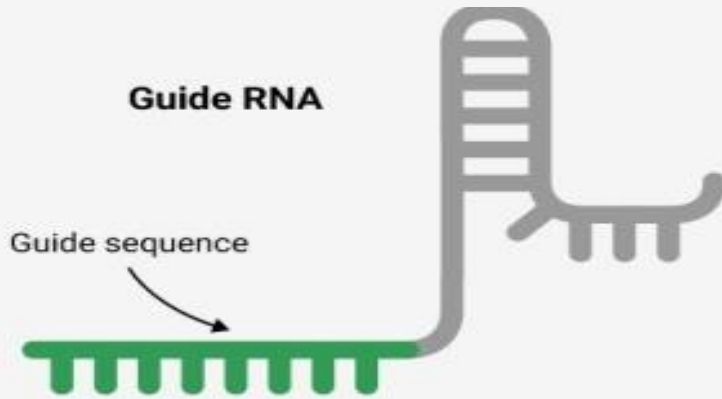




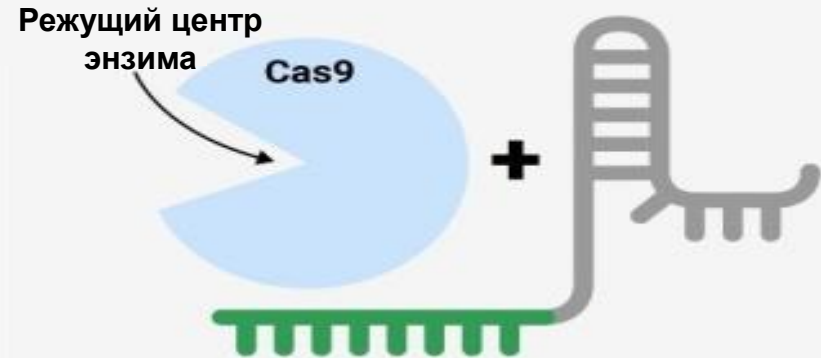
# Редактирование генома

(*CRISPR* - Clustered Regularly-Interspaced Short Palindromic Repeats)

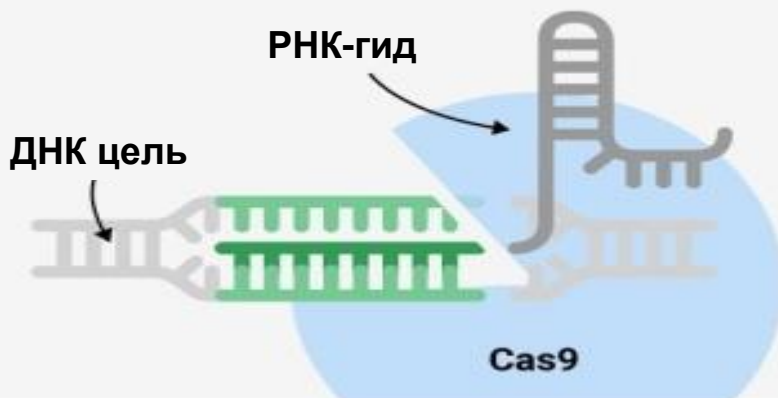
- 1** Создается генетическая последовательность, называемая РНК-гид, комплементарная участку ДНК, который должен быть исправлен



- 2** Эта последовательность вводится в клетку в виде комплекса с протеином Cas9, действующим как ножницы, разрезающие ДНК



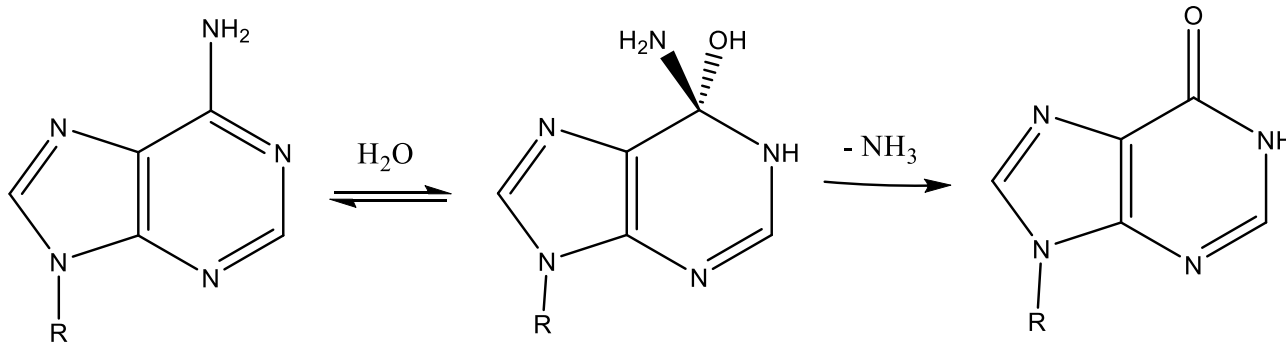
- 3** РНК-гид подстраивается к намеченному для исправления участку ДНК, и Cas9 вырезает этот участок. Затем РНК-гид и Cas9 покидают участок



- 4** Другой фрагмент ДНК занимает место прежней ДНК, и энзимы починяют разрезы. Дефектная ДНК исправлена!

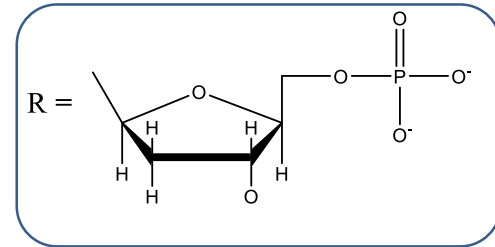


# Programmable base editing of A - T to G - C in genomic DNA

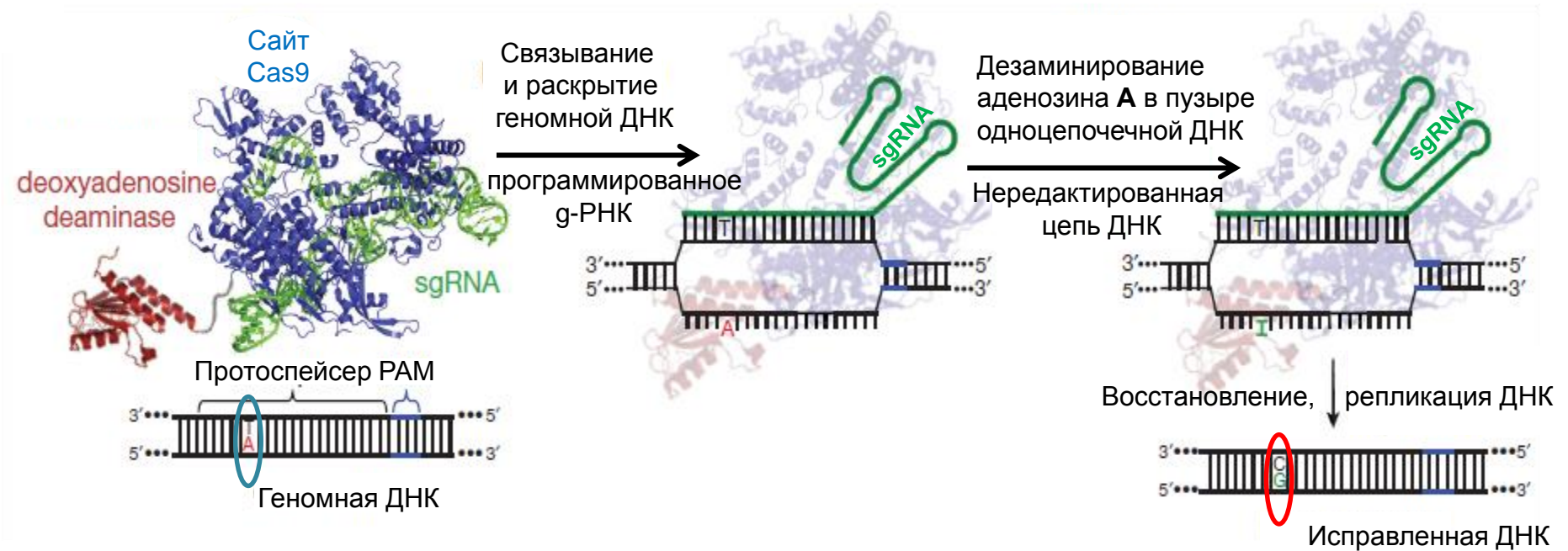


Adenosine  
**(A)**

Inosine  
**(I)**



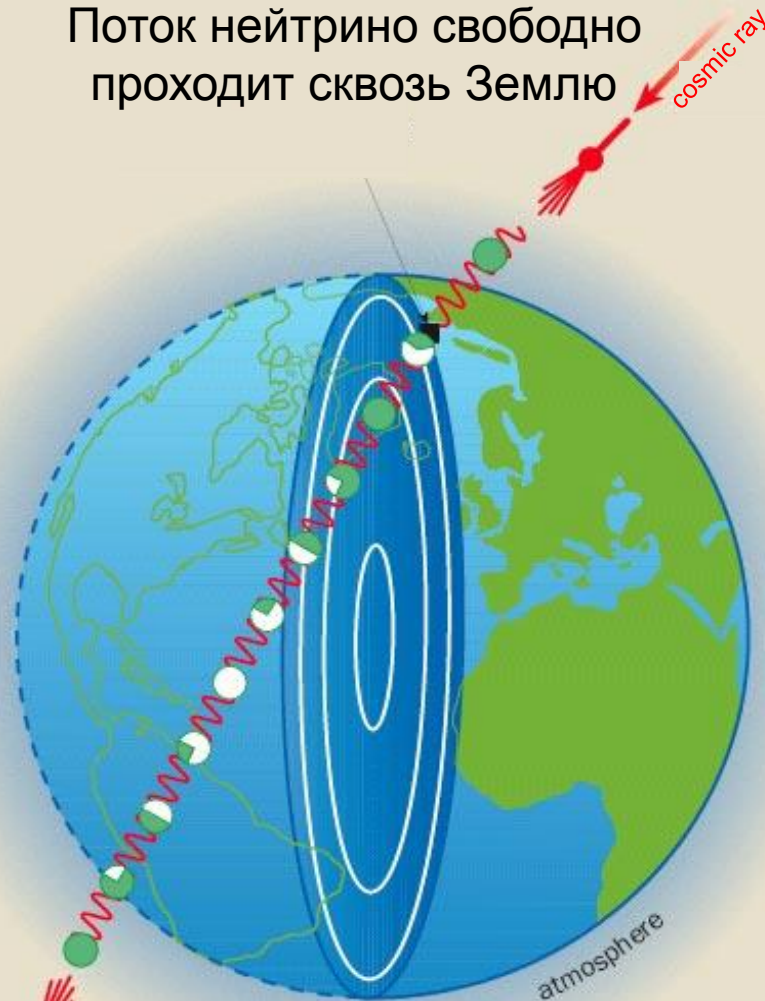
**(I)** read as **(G)** by polymerase





# Нейтрино

Поток нейтрино свободно  
проходит сквозь Землю



1945, 1995,  
2015

Nobel  
Prize



Wolfgang Pauli

**1931**

*Постулировал образование  
нейтрино при  $\beta$ -распаде*



Frederic Reines

**1995**

*"for the detection of the neutrino"*



Takaaki Kajita



Arthur McDonald

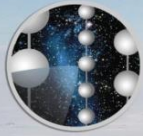
**2015**

*"for the discovery of neutrino oscillations,  
which shows that neutrinos have mass"*

Каждую секунду десятки тысяч нейтрино  
пронизывают ваше тело



# Нейтринная обсерватория Ice Cube (1 km<sup>3</sup> of ice)



**ICECUBE**  
SOUTH POLE NEUTRINO OBSERVATORY

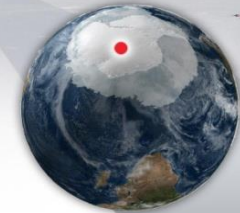
49 institutions in 12 countries: 26 U.S. and Canada, 19 Europe and 4 Asia Pacific

50 m

IceTop



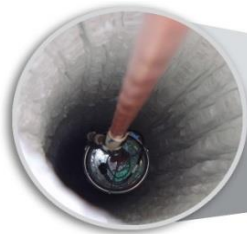
**IceCube Laboratory**  
Data is collected here and sent by satellite to the data warehouse at UW-Madison



**Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica**  
A National Science Foundation-managed research facility

1450 m

86 strings of DOMs,  
set 125 meters apart



**Digital Optical Module (DOM)**  
5,160 DOMs  
deployed in the ice

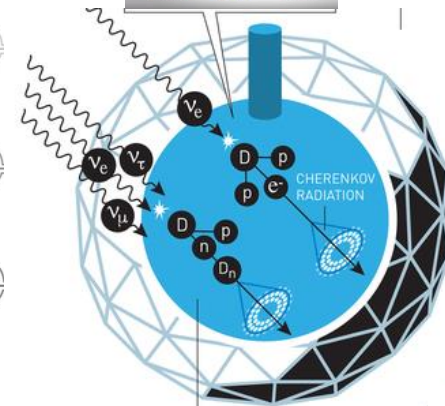
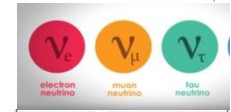
2450 m

IceCube  
detector

DeepCore

DOMs  
are 17  
meters  
apart

60 DOMs  
on each  
string



Antarctic bedrock



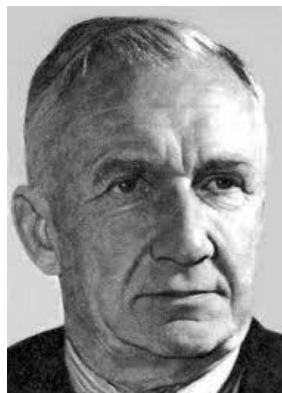
# Нобелевская премия по физике

## 1958

*«за открытие и истолкование эффекта Черенкова»*



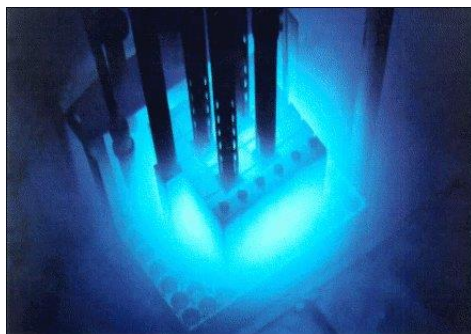
Павел Алексеевич  
Черенков  
1904-1990



Игорь Евгеньевич  
Тамм  
1895-1971



Илья Михайлович  
Франк  
1908-1990



$$v > v_{phase} = c/n$$

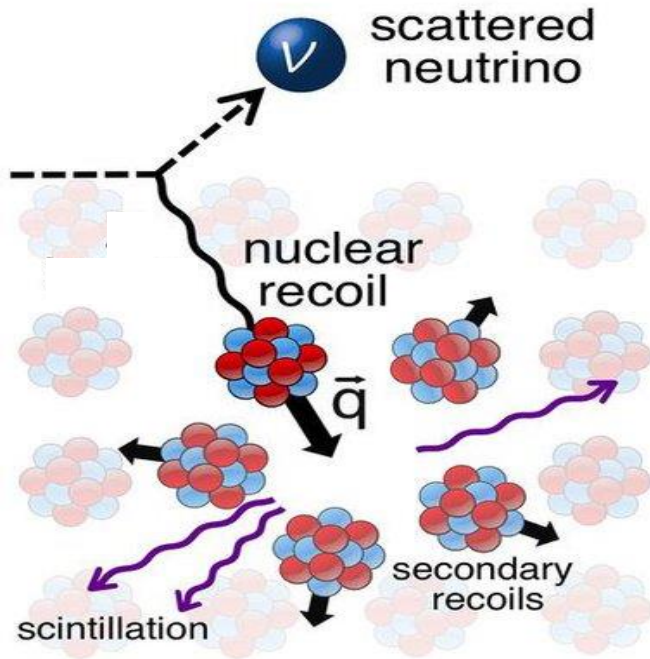




# Упругое когерентное рассеяние нейтрино на ядрах атомов

D. Akimov et al., Science, 10.1126/science.aao0990 (2017)

**D. Akimov**,<sup>1,2</sup> J. B. Albert,<sup>3</sup> P. An,<sup>4</sup> C. Awe,<sup>4,5</sup> P. S. Barbeau,<sup>4,5</sup> B. Becker,<sup>6</sup> **V. Belov**,<sup>1,2</sup> A. Brown,<sup>4,7</sup> **A. Bolozdynya**,<sup>2</sup> B. Cabrera-Palmer,<sup>8</sup> M. Cervantes,<sup>5</sup> J. I. Collar,<sup>9\*</sup> R. J. Cooper,<sup>10</sup> R. L. Cooper,<sup>11,12</sup> C. Cuesta,<sup>13†</sup> D. J. Dean,<sup>14</sup> J. A. Detwiler,<sup>13</sup> A. Eberhardt,<sup>13</sup> Y. Efremenko,<sup>6,14</sup> S. R. Elliott,<sup>12</sup> E. M. Erkela,<sup>13</sup> L. Fabris,<sup>14</sup> M. Febraro,<sup>14</sup> N. E. Fields,<sup>9</sup> W. Fox,<sup>3</sup> Z. Fu,<sup>13</sup> A. Galindo-Uribarri,<sup>14</sup> M. P. Green,<sup>4,14,15</sup> M. Hai,<sup>9</sup> M. R. Heath,<sup>3</sup> S. Hedges,<sup>4,5</sup> D. Hornback,<sup>14</sup> T. W. Hossbach,<sup>16</sup> E. B. Iverson,<sup>14</sup> L. J. Kaufman,<sup>3</sup> S. Ki,<sup>4,5</sup> S. R. Klein,<sup>10</sup> **A. Khromov**,<sup>2</sup> **A. Kononov**,<sup>1,2,17</sup> M. Kremer,<sup>4</sup> **A. Kumpan**,<sup>2</sup> C. Leadbetter,<sup>4</sup> L. Li,<sup>4,5</sup> W. Lu,<sup>14</sup> K. Mann,<sup>4,15</sup> D. M. Markoff,<sup>4,7</sup> K. Miller,<sup>4,5</sup> H. Moreno,<sup>11</sup> P. E. Mueller,<sup>14</sup> J. Newby,<sup>14</sup> J. L. Orrell,<sup>16</sup> C. T. Overman,<sup>16</sup> D. S. Parno,<sup>13</sup> S. Penttila,<sup>14</sup> G. Perumpilly,<sup>9</sup> H. Ray,<sup>18</sup> J. Raybern,<sup>5</sup> D. Reyna,<sup>8</sup> G. C. Rich,<sup>4,14,19</sup> D. Rimal,<sup>18</sup> D. Rudik,<sup>1,2</sup> K. Scholberg,<sup>5</sup> B. J. Scholz,<sup>9</sup> G. Sinev,<sup>5</sup> W. M. Snow,<sup>3</sup> **V. Sosnovtsev**,<sup>2</sup> **A. Shakirov**,<sup>2</sup> S. Suchyta,<sup>10</sup> B. Suh,<sup>4,5,14</sup> R. Tayloe,<sup>3</sup> R. T. Thornton,<sup>3</sup> I. Tolstukhin,<sup>3</sup> J. Vanderwerp,<sup>3</sup> R. L. Varner,<sup>14</sup> C. J. Virtue,<sup>20</sup> Z. Wan,<sup>4</sup> J. Yoo,<sup>21</sup> C.-H. Yu,<sup>14</sup> A. Zawada,<sup>4</sup> J. Zettlemoyer,<sup>3</sup> A. M. Zderic<sup>13</sup> **COHERENT Collaboration**



“The coherent elastic scattering of neutrinos off nuclei has eluded detection for four decades, even though its predicted cross-section is the largest by far of all low-energy neutrino couplings. This mode of interaction provides new opportunities to study neutrino properties, and leads to a miniaturization of detector size, with potential technological applications.”



# ЮФУ в проекте Мегасайенс



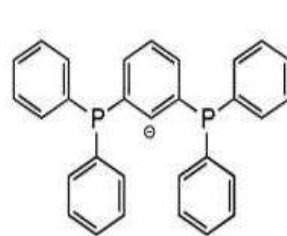
Фото: European XFEL / Heiner Muller-Elsner

## XFEL - x-ray free electron laser

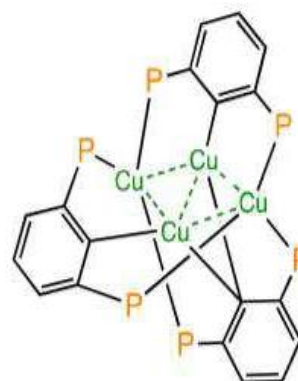
Вспышек в секунду	27 000	В $10^9$ раз выше, чем в существующих источниках.
Длина волны	0.05 – 4.7 нм	Атомное разрешение
Продолжительность импульса	Менее 100 фс 1 фс = $10^{-15}$ с	Химическая реакция Фазовый переход
Яркость	$1.6 \cdot 10^{25}$ фотонов/с/мм <sup>2</sup>	В $10^4$ выше всех доступных источников



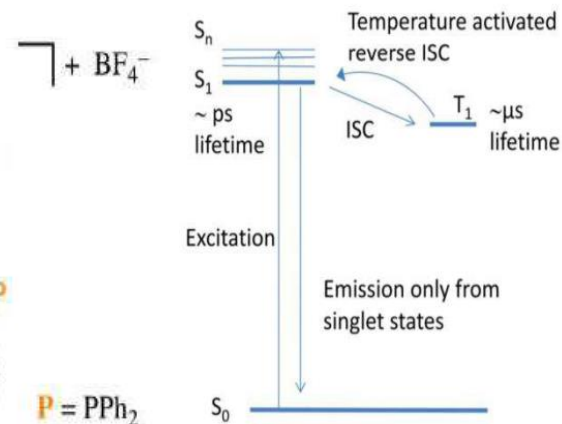
[2052] Singlet excited state of Cu-based material for Organic Light Emitting Diodes probed with pump-probe X-ray scattering and emission



PCP



P = PPh<sub>2</sub>



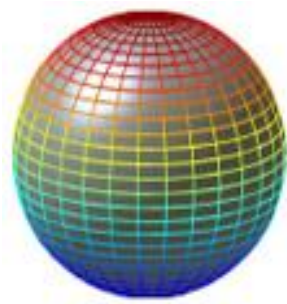
Первый российский эксперимент в программ XFEL предложен группой сотрудников МИЦ ЮФУ  
Григорием Смоленцевым и Александром Гудой

# Квантовые компьютеры

Бит

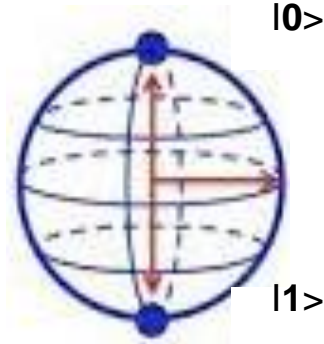


0



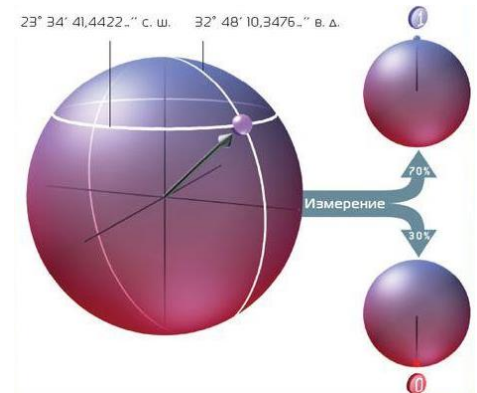
1

Кубит



$$|\Psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$$

L qubits -  $2^L$  состояний



D-Wave (Канада)

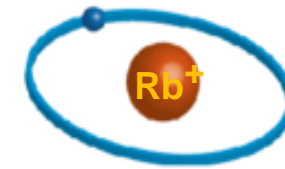
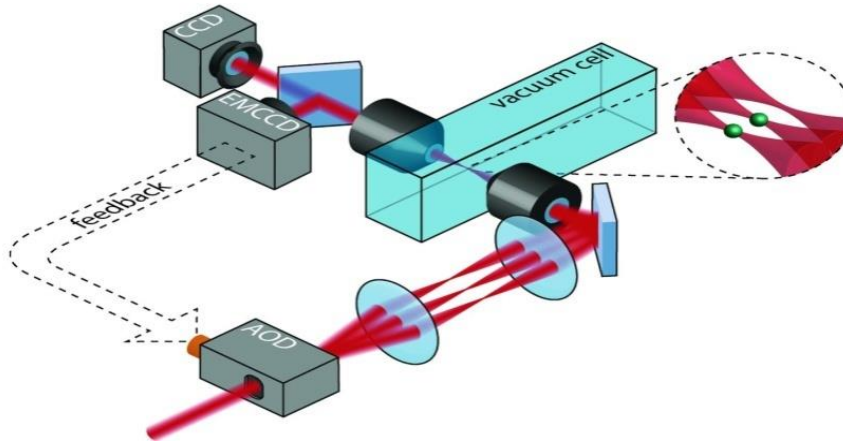
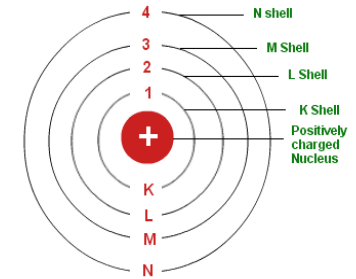
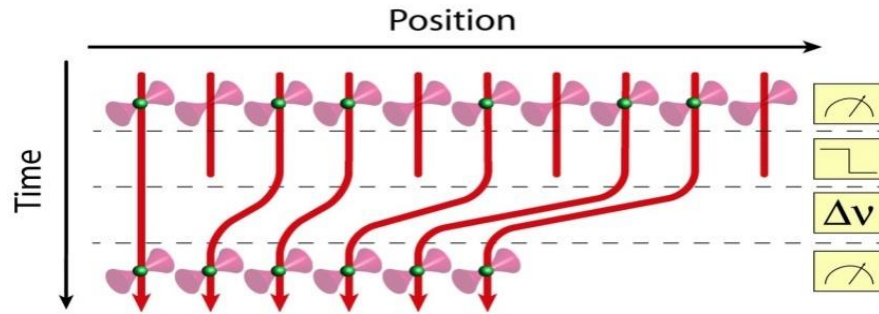
Первый коммерческий (~ \$ 11 млн) квантовый компьютер



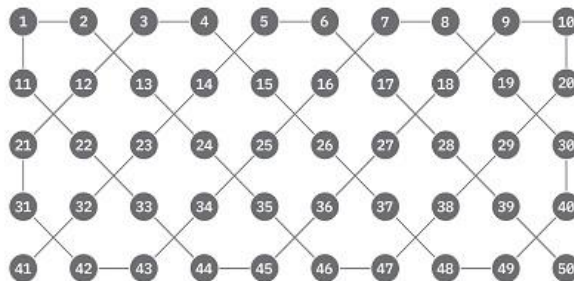
5-кубитовый компьютер IBM

Первый квантовый компьютер для всеобщего пользования

# Принцип работы квантового компьютера (Google, Harvard, MIT) на Ридберговских атомах Rb

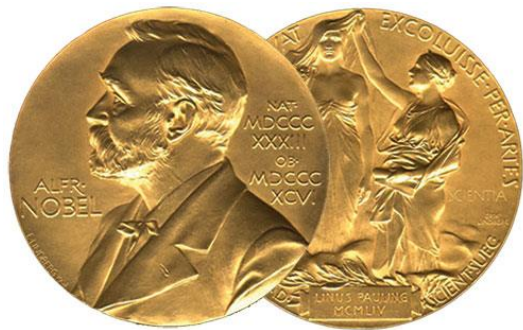


$|0\rangle (n=1)$



$|1\rangle (n=50-1000)$





# Нобелевская премия по физике

## 1997

**«за создание методов охлаждения и улавливания атомов лазерным лучом»**



Клод Коэн-Таннуджи  
р. 1933  
Франция



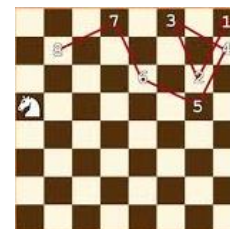
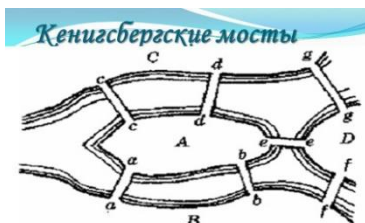
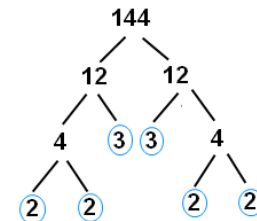
Стивен Чу  
р. 1948  
США



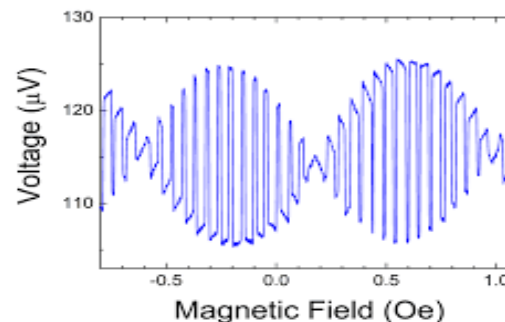
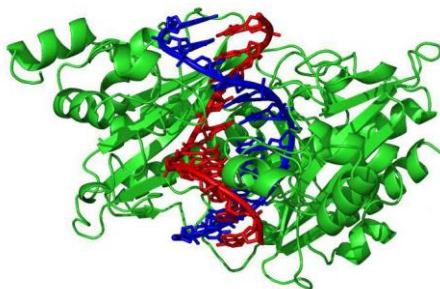
Уильям Филлипс  
р. 1948  
США

# Что лучше всего могут делать квантовые компьютеры и квантовые симуляторы

- Факторизация. Разложение чисел на простые множители
- NP (*non deterministic polynomial*) задачи. Оптимизация поиска. Нахождение глобального минимума

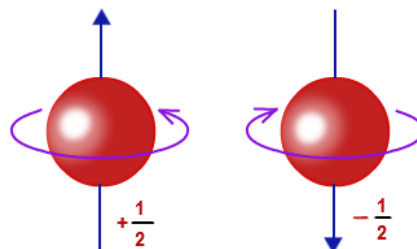
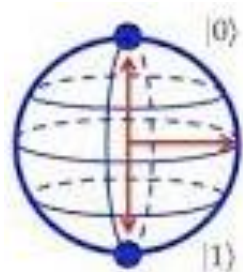


- Моделирование сложных физических систем

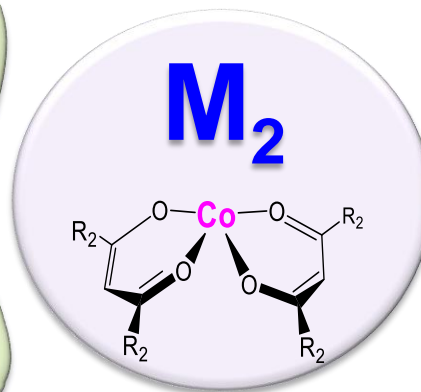
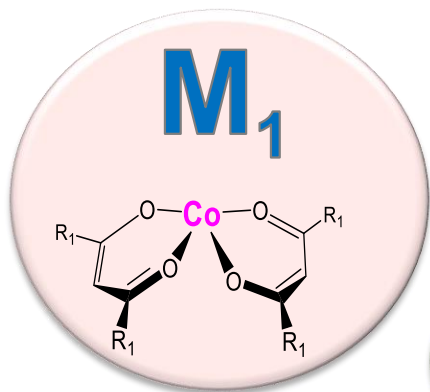


- Развитие квантовой информации (можно передавать, но нельзя дублировать)
- Проблема больших данных: преимущество  $2^L$

# Квантовые биты (кубиты) на основе молекул



## Молекулярный двухкубитовый квантовый вентиль $M_1$ -L- $M_2$



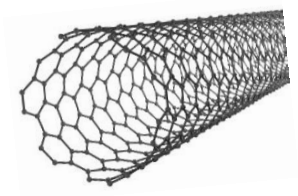
Д.х.н А.Г. Стариков  
К.х.н А.А. Старикова

- не менее двух парамагнитных во всех состояниях центров;
- оба металлоцентра способны к переключению спиновых состояний (спин-кроссовер, ВТ)
- между парамагнитными центрами имеются слабые обменные взаимодействия - **квантовая запутанность**
- соответствие критериям Ди Винченцо

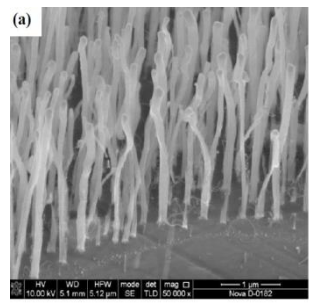




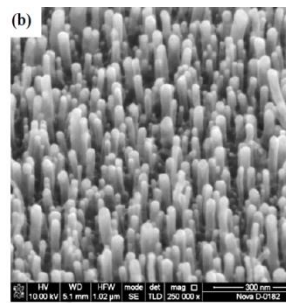
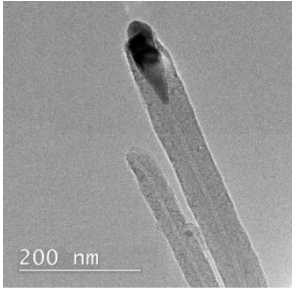
# Стрэйнтроника – новый подход к созданию устройств обработки и хранения информации



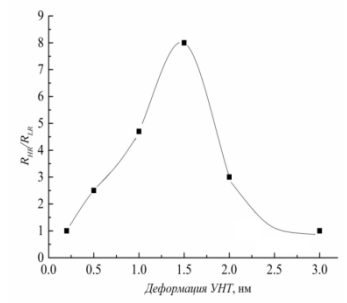
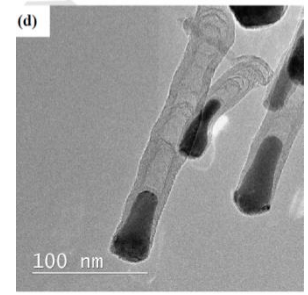
## Углеродные нанотрубки



Сканирующая ЭМ



Просвечивающая ЭМ



$R = f(\text{deform})$



M.V. Il'ina, O.I. Il'in, Y.F. Blinov, V.A. Smirnov, A.S. Kolomyitsev, A.A.Fedotov, B.G. Konoplev, O.A. Ageev.  
«Memristive switching mechanism of vertically aligned carbon Nanotubes». *Carbon* (2017), doi: 10.1016/j.carbon.2017.07.090

# Металлический водород

---



Джон Бернал  
1901-1971



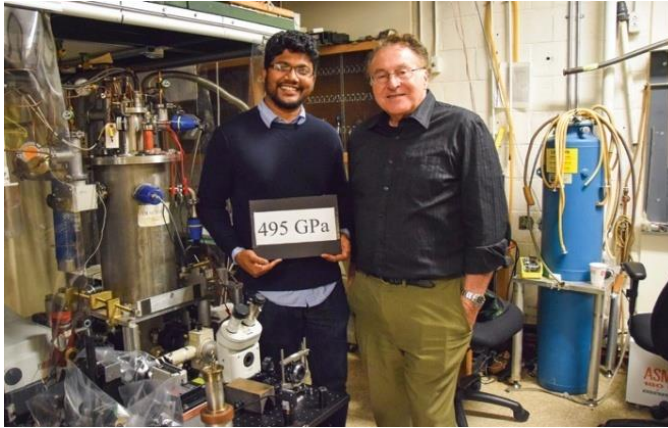
Юджин Вигнер  
1902 -1995

**1930, 1935**

Гипотеза о возможности металлического состояния водорода  
при давлении ~ 250 тыс. ат.

Wigner, E. & Huntington, H. B. *J. Chem. Phys.* **3**, 764–770 (1935)

# Металлический водород



Ranga Dias, Isaac F. Silvera. Harvard University

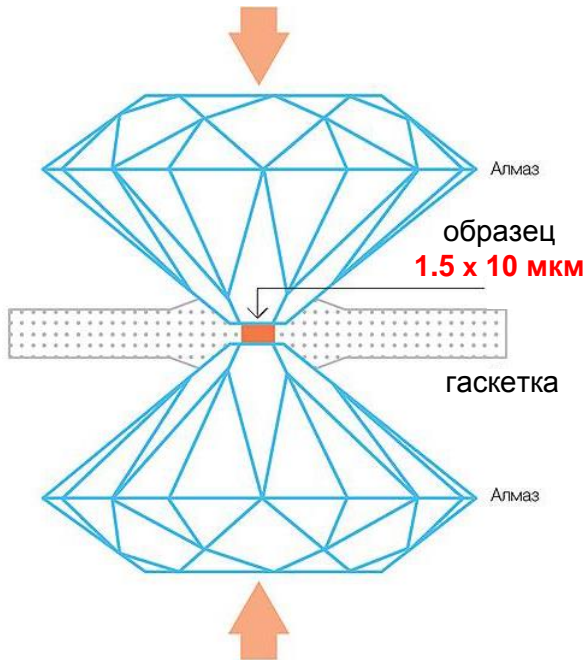
Dias, R.; Silvera, I. F.

"Observation of the Wigner-Huntington Transition to Solid Metallic Hydrogen"

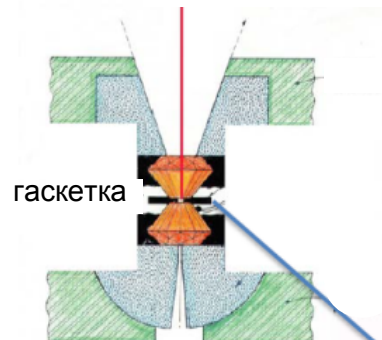
*Science*. **355**: 715–718

(2016) [arXiv:1610.01634](https://arxiv.org/abs/1610.01634) [[cond-mat](#)].

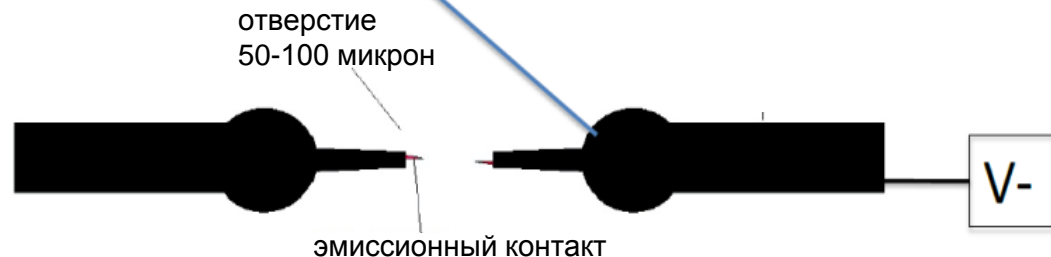
495 ГПа  $\cong$  5 000 000 ат



ND:YAG лазер (1064 нм)

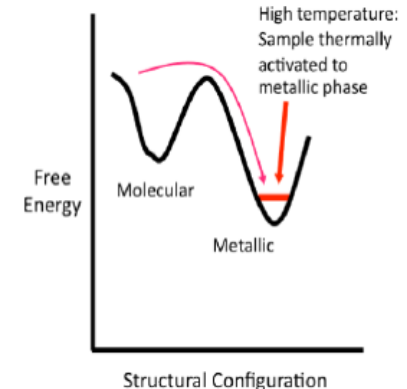
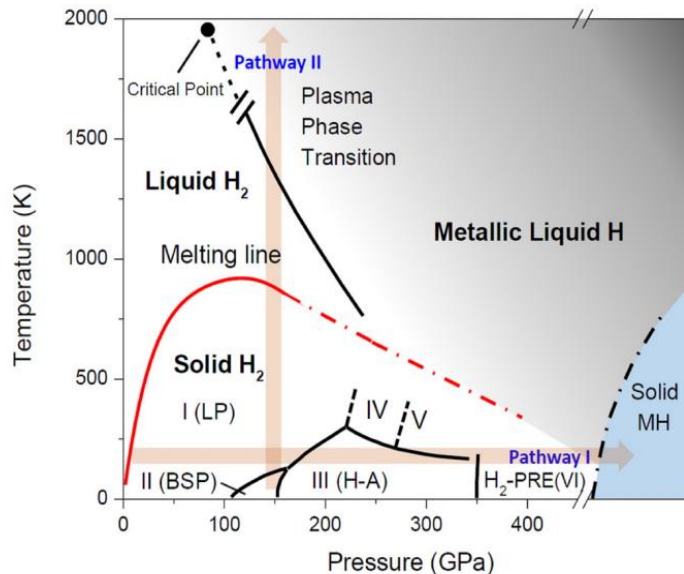
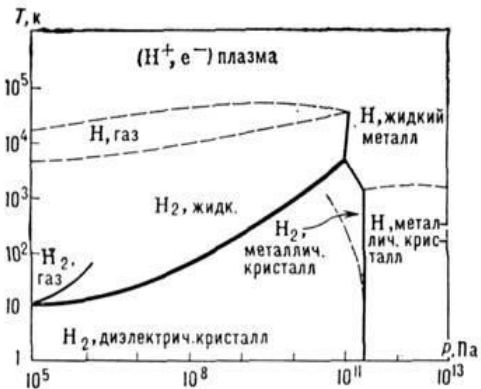
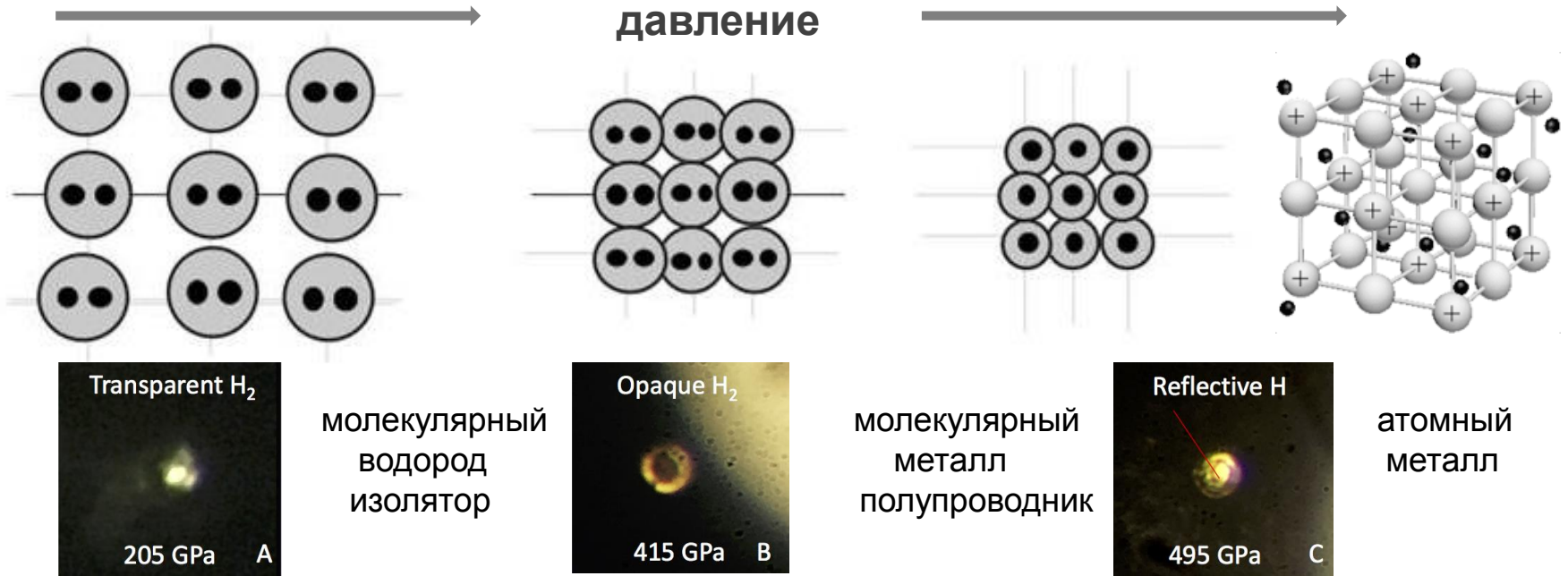


напряжение  $V$  создает высокое электрическое поле на миниатюрных контактах и эмитирует  $\sim 10^{12}$  электронов в секунду в находящийся под давлением образец жидкого водорода





# Металлический водород





# Some Remarkable Properties of Metallic Hydrogen

**Metallic Hydrogen:  
A Game Changing Rocket  
Propellant**

Isaac F. Silvera  
Lyman Laboratory of Physics  
Harvard University, Cambridge, MA 02138

- Recombination of hydrogen atoms releases 216 MJ/kg
- Hydrogen/Oxygen combustion in the Shuttle: 10 MJ/kg
- TNT 4.2 MJ/kg

## •Theoretical Specific Impulse, Isp

•Metallic Hydrogen 1000-1700s

•Molecular hydrogen/oxygen ~460 s (space shuttle)



Академик Александр Михайлович Сергеев  
Президент Российской Академии Наук

**«Не будет у нас фундаментальной науки — это будет  
большая беда, потому что по многим  
направлениям — военным и другим —  
научно-технический задел исчерпан. Он может  
восстанавливаться только фундаментальной наукой»**

А.М. Сергеев в ходе встречи с членами Совета Федерации. 31.10.17



**С НАСТУПАЮЩИМ**



**8 ФЕВРАЛЯ**

**ДНЕМ РОССИЙСКОЙ НАУКИ!**

# THE PAPER MOUNTAIN

If you were to print out just the first page of every item indexed in Web of Science, the stack of paper would reach almost to the top of Mt Kilimanjaro. Only the top metre and a half of that stack would have received 1,000 citations or more, and just a centimetre and a half would have been cited more than 10,000 times. All of the top 100 are cited more than 12,000 times, besting some of the most recognizable scientific discoveries in history.

Height  
6,000 m

100-999 CITATIONS  
(1,066,046 papers)

5,500 m

5,000 m

4,500 m

4,000 m

3,500 m

3,000 m

2,500 m

2,000 m

1,500 m

1,000 m

500 m

0 m

10-99 CITATIONS (13,104,875 items)

1-9 CITATIONS (18,280,005 items)

0 CITATIONS (25,532,701 items)

1,000-9,999 CITATIONS (1,4351 items)

TOP-100 PAPERS

Watson and Crick  
on structure of  
DNA (1953)  
5,207 citations

Farman, Gardiner &  
Shanklin discover the  
ozone hole (1985)  
1,871 citations

Hirsch proposes  
the h index to  
measure scientific  
productivity (2005)  
1,797 citations



10,000+  
CITATIONS  
(148 papers)



Light aircraft  
cruising  
altitude  
3,000 m



Burj  
Khalifa  
828 m



Eiffel  
Tower  
301 m

## TOP-10 PAPERS

Just 3 papers have received more than 100,000 citations, putting them well ahead of the rest. These runaway hits all cover biological lab techniques, which in general dominate the list of most-cited literature, including 7 of the top 10.



Data provided by Thomson Reuters/Web of Science. Individual paper citation figures extracted 7 October 2014. Distribution of citations in database: 19 September 2014

Nature-top-100 papers

Infographic

V2-30.10.14