

# Национальная ускорительная лаборатория SLAC

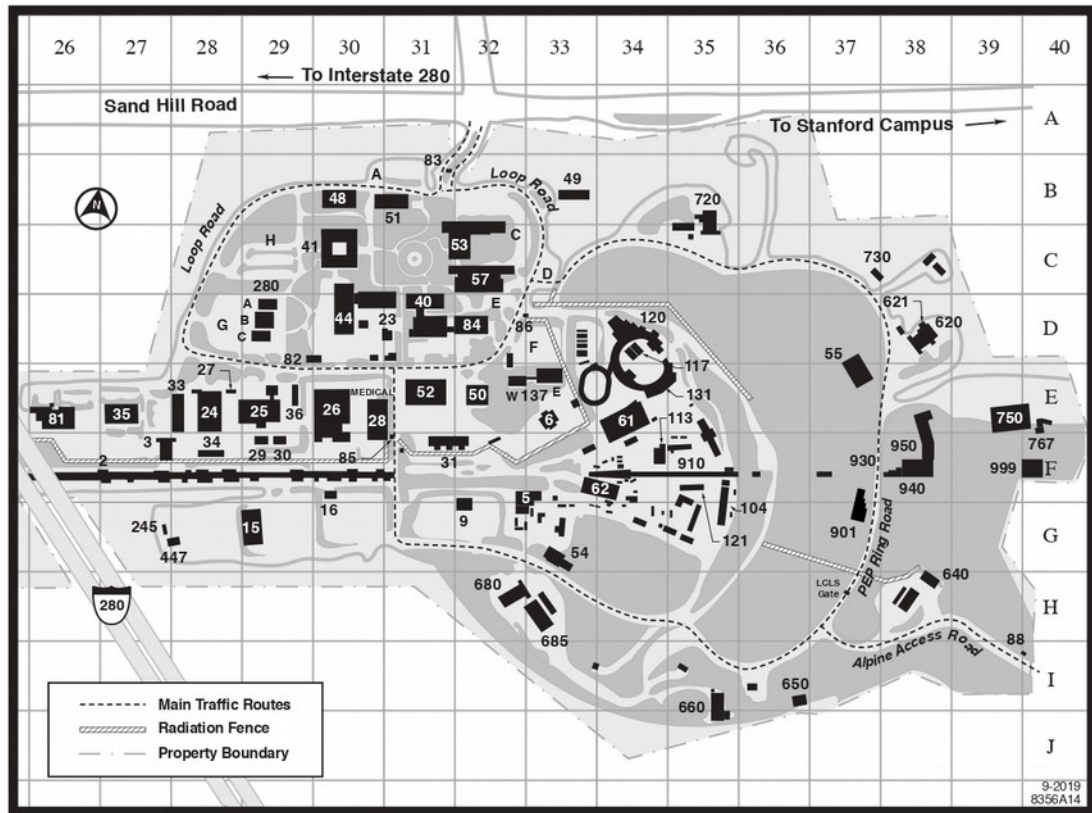
Реферат составил Бобылев Д., группа 113М.

2021 г.

# Содержание

История лаборатории.....	4
Ранние линейные ускорители.....	4
Установки SLAC.....	6
CBX.....	6
Стэнфордский линейный ускоритель.....	7
SPEAR.....	7
PEP.....	8
SLC.....	8
PEP-II.....	8
LCLS.....	8
FACET.....	9
NLCTA.....	9
«Микро-ускоритель».....	9
Использованные источники:.....	11

Национальная ускорительная лаборатория SLAC (до 2008 года — Центр Стэнфордского линейного ускорителя, SLAC) — одна из семнадцати национальных лабораторий Министерства энергетики США, оператором которой является Стэнфордский университет, осуществляющий исследования по программе Агентства по науке Министерства энергетики США.



### SLAC Area Map

Building Number	Grid Number	Building Number	Grid Number
Administration and Engineering Building (A&E)	41 30-C	Main Control Center (MCC)	52 30-C
Alpine Gate Entrance (automated gate badge required)	88 40-I	Main Gate (Information Booth)	83 31-B
Arrillaga Recreation Center	55 37-D	Master Substation	16 30-F
Arrillaga Science Center	57 32-C	Medical (room 11)	28 30-E
Auxiliary Control Building	3 27-F	Metal Stores Shelter	29 29-F
Beam Switch Yard Access	9 32-G	Orientation Theater	53 32-C
Central Hazardous Waste Management Area	245 27-G	Operations Support Building	53 28-E
Central Laboratory	40 31-D	Panofsky Auditorium	53 32-C
Central Laboratory Annex	84 32-D	Parking Lots	A and C to H
Central Utility Building	23 31-D	PEP Beam Facility/SSRL	650 36-I
Chemical Storage Building	36 29-E	PEP Beam Facility/SSRL	730 37-C
Cleaning Facility Building	30 29-F	PEP Control Room	685 33-H
Collider Experimental Hall (CEH)	750 39-E	PEP Interaction Region 2 (IR-2)	620 38-D
Communications Office	53 32-C	PEP Interaction Region 4 (IR-4)	640 38-H
Computer Building (SCS)	50 32-E	PEP Interaction Region 6 (IR-6)	660 35-I
Control Building	34 28-F	PEP Interaction Region 8 (IR-8)	680 32-H
Cryogenics Laboratory	6 33-E	PEP Interaction Region 12 (IR-12)	720 35-B
End Station A (ESA)	61 34-E	Physics and Engineering Building	280 29-D
End Station B (ESB)	62 34-F	Plant Maintenance and Utilities	35 27-E
Environmental Safety and Health (ES&H)	24 28-E	Power Conversion	15 29-G
Experimental Facilities Department Shops (EFD)	104 35-F	Research Office Building (ROB)	48 30-B
Gate 17 (automated gate badge required)	86 33-D	Research Support Building	52 31-E
General Services Building (Shipping & Receiving)	81 26-E	Science User Support Building (SUSB)	53 32-C
Hazardous Waste Storage Area	447 28-G	Sector 30 Guard House (automated gate badge required)	85 31-F
Heavy Fabrication Building	26 30-E	Security	53 32-C
International Services Office	53 32-C	SLAC Café	53 32-C
Kavli Building	51 31-B	Smart Grid Lab	27 28-E
Klystron Gallery (Visitors Alcove, Sector 27)	2 27-F	SPEAR Control Room	117 34-D
Laboratory Offices and Shops (LOS)	137 33-E	Stanford Guest House	49 33-B
LCLS Beam Transport Hall	910 33/34/35-F	Stanford Research Computing Facility	54 33-G
LCLS Far Experimental Hall	999 40-F	Stanford Synchrotron Radiation Lab (SSRL)	120 34-D
LCLS Far Experimental Hall Tunnel Entrance	767 40-E	Stanford Synchrotron Radiation Lab (SSRL)	131 34-E
LCLS Gate	37-H	Test Beam Facility	121 35-F
LCLS Near Experimental Hall	930/940/950 37/38-F	Test Laboratory	44 30-D
LCLS Office Building	901 37-G	User Support	53 32-C
Light Assembly Building	33 28-E	Vacuum Assembly Building	31 31-F
Light Fabrication Building	25 29-E	Visitor, User, Employee Center (VUE)	53 32-C

Рис. 1. Схема части комплекса SLAC.

## История лаборатории

Лаборатория основана в 1962 году на территории Стэнфордского университета.

Учёные в SLAC были награждены тремя Нобелевскими премиями по физике:

- 1976: Открытие С-кварка и  $J/\psi$ -мезона (Бертон Рихтер)
- 1990: Изучение структуры кварков внутри протона и нейтрона (Ричард Тейлор)
- 1995: Открытие Тау-лептона (Мартин Перл)

## Ранние линейные ускорители

В 1940-х годах возникли линейные ускорители электронов, которые привели к созданию 2-мильного ускорителя в Стэнфордском центре линейных ускорителей. На рис. 2-4 показана серия ускорителей под названием Mark I-IV.

Стэнфордский линейный ускоритель электронов на бегущей волне Mark I длиной 3,6 м смог разогнать электроны до энергии 6 МэВ.



Рис. 2. Секция ускорителя Mark I.

За Mark I в 1949 году последовал Mark II, который был прототипом одной из частей запланированной, гораздо более крупной машины Mark III. Mark II был впервые успешно запущен в октябре 1949 года. Опытный образец ускорителя Mark II работал с новыми компонентами, в том числе с новым мощным клистроном.

Mark III впервые заработал 30 ноября 1950 года. В то время был собран 30-футовый ускоритель, снабженный тремя клистронами. Каждый клистрон

обеспечивал в среднем восемь мегаватт микроволновой мощности, и эта операция обеспечила электронный пучок энергии около 75 МэВ.

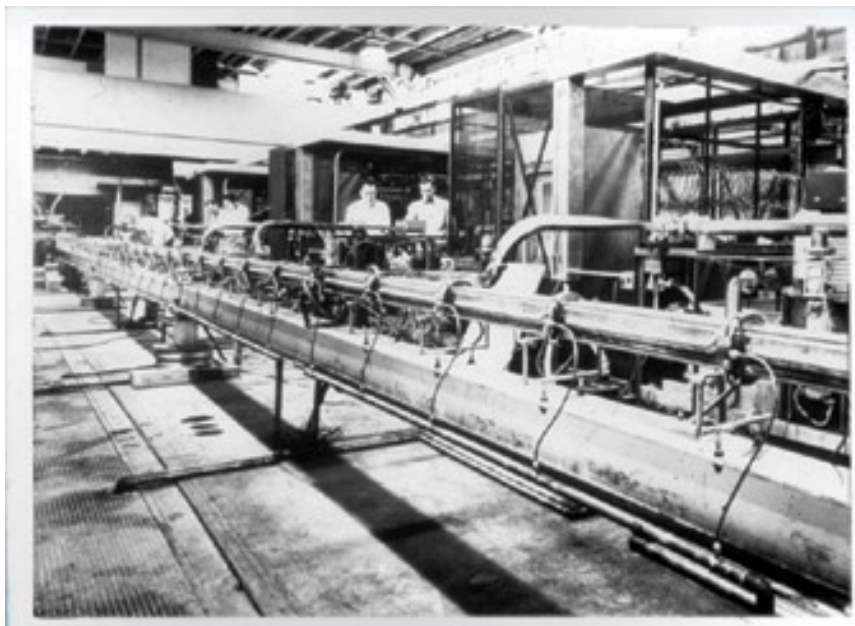


Рис. 3. Ускоритель Mark III: первые секции ускорителя Mark III в Стэнфорде.

В 1954 году при поддержке Комиссии по атомной энергии США Стэнфорд начал строительство 20-футового исследовательского ускорителя с энергией 80 МэВ. В начале 1960-х годов Mark IV широко использовался в качестве прототипа двухмильного ускорителя и для тестирования некоторых его компонентов.



Рис. 4. Ускоритель Mark IV.

## Установки SLAC

### СВХ

Princeton-Stanford Colliding Beams eXperiment — один из первых в мире коллайдеров (наряду с AdA в Италии и ВЭП-1 в СССР), который начал сооружаться совместными усилиями физиков Принстонского и Стэнфордского университетов ещё до учреждения лаборатории SLAC. СВХ представляет собой двухколечный электрон-электронный коллайдер на энергию 500 МэВ, работавший в 1963-1967 годах для проверки экспериментов на встречных пучках.

В 1957 году Джерард О'Нил из Принстона посетил лабораторию SLAC и предложил построить установку со встречными пучками электронов. В 1958 году Вольфганг Панофский сумел добиться выделения финансирования в размере 800 тыс. долларов от подразделения Министерства обороны Office of Naval Research, и в 1959 году началось сооружение установки. В 1962 году все системы коллайдера были собраны воедино. Основными участниками работ были В. Gittelman, W.C. Barber, Б. Рихтер и Д. О'Нил.

СВХ представлял собой два соприкасающихся слабофокусирующих электронных синхротрона на энергию до 550 МэВ. Каждое кольцо состояло из четырёх 90-градусных магнитов с градиентом поля и четырёх прямолинейных промежутков, один из которых был общим для колец, где происходили столкновения пучков электронов. Инжекция пучков производилась из существовавшего линейного ускорителя MARK-III. Одной из самых сложных систем оказалась вакуумная камера, на тот момент самый большой в мире объём сверхвысокого вакуума ( $\sim 2 \text{ м}^3$ ,  $< 10^{-9}$  торр).

Первые наблюдения рассеянных электронов появились летом 1963 года, результаты опубликованы в 1965 году, на год позже публикации результатов коллайдера ВЭП-1. В 1967 году экспериментальная программа СВХ была завершена. Лаборатория сосредоточилась на создании большого электрон-позитронного коллайдера SPEAR.

Достижения СВХ:

- Основным назначением была проверка квантовой электродинамики вплоть до малых расстояний, а также возможности использования встречных пучков для экспериментов по физике высоких энергий. Обе задачи были успешно выполнены.
- Максимальный накопленный ток в сгустке (в режиме без столкновений) достигал 600 мА, что до сих пор, возможно, не превзойдено.



- На СВХ впервые наблюдались когерентные неустойчивости взаимодействующих встречных сгустков.

## Стэнфордский линейный ускоритель

Линейный ускоритель электронов и позитронов длиной 2 мили (3.2 км) на энергию до 50 ГэВ, запущен в 1966 году.

Для достижения энергии в 50 ГэВ частицы проходят около 80 000 ускоряющих промежутков. Этот ускоритель работал в режиме коллайдера, когда пучок электронов с энергией 50 ГэВ сталкивается с пучком позитронов такой же энергии.

Расположен под землёй на глубине 9 м, на поверхности над тоннелем находится клистронная галерея, считающаяся самым длинным зданием США. Ускоритель в разное время использовался для множества разнообразных экспериментов по физике частиц.



Рис. 5. Стэнфордский линейный ускоритель.

## SPEAR

Электрон-позитронный коллайдер SPEAR (англ. *Stanford Positron Electron Asymmetric Rings*) на энергию до 3,5 ГэВ работал с 1972 по 1990 годы. После модернизации преобразован в источник синхротронного излучения SPEAR2, затем SPEAR3.

Первый проект коллайдера был представлен в 1964 году командой под руководством Бёртона Рихтера. Первоначально коллайдер должен был представлять собой два кольца с асимметричным столкновением. В течение последующих лет вследствие серии отказов в финансировании проект урезался, и превратился в одно кольцо на энергию до 2.4 ГэВ. Строительство началось в 1970 году, и было завершено в течение 20 месяцев в 1972 году. В следующем 1973 году начался набор данных. Максимальная светимость машины достигала  $1.2 \times 10^{31} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . В 1980 году в лаборатории SLAC был запущен коллайдер PEP на энергию 29 ГэВ в пучке, и некоторое время коллайдеры работали параллельно. Физическая программа SPEAR была завершена к 1990 году, что совпало с запуском нового, линейного коллайдера SLC.

На SPEAR в ноябре 1974 года был открыт  $J/\psi$ -мезон, за что Нобелевской премией (1976) был отмечен Рихтер. Одновременно и независимо этот мезон был открыт в Брукхейвенской лаборатории. В 1995 году за открытие тау-лептона на коллайдере SPEAR Нобелевская премия была вручена Мартину Перлу.

С самого начала на кольце коллайдера был заложен вывод синхротронного излучения (СИ) из поворотного магнита для экспериментов по материаловедению в "паразитном" режиме. После обнаружения  $J/\psi$ -мезона работа коллайдера была долгое время сосредоточена вокруг энергии 1.55 ГэВ, что было далеко от максимальной энергии синхротрона, на которую рассчитывала команда СИ. С 1990 накопитель перешёл полностью на работу для пользователей СИ, для чего был модернизирован (т.н. источник СИ 2-го поколения) и получил название SPEAR2. В 2004 году после глубокой модернизации начал работу обновлённый синхротрон SPEAR3. Энергия пучка 3 ГэВ, ток 500 мА, эмиттанс 18 нм.

### **PEP**

Positron-Electron Project — электрон-позитронный коллайдер на энергию 29 ГэВ в пучке, работал в 1980-1990 годах, параллельно со SPEAR. На коллайдере в период расцвета работало до 6 детекторов одновременно.

### **SLC**

SLC, Stanford Linear Collider — единственный в мире линейный электрон-позитронный коллайдер, работавший в 1988-1998 годах. Энергия позволяла изучать Z-бозон с массой 90 ГэВ. Однако в те же годы в ЦЕРНе заработал Большой электрон-позитронный коллайдер в том же диапазоне энергий, но с более высокой светимостью.

### **PEP-II**

Электрон-позитронный коллайдер, состоявший из двух колец с асимметричной энергией, на очень высокую энергию, т.н. В-фабрика. Начал сооружаться в 1994 году, работал в 1999-2008 с детектором BaBar, в конкуренции с В-фабрикой KEKB в Японии.

### **LCLS**

Linac Coherent Light Source — первый в мире рентгеновский лазер на свободных электронах, основанный на явлении самоусиления спонтанного излучения (SASE). LCLS использует часть основного линейного ускорителя лаборатории, первая генерация получена в 2009 году. В настоящее время идёт модернизация LCLS-II, с заменой линейного ускорителя на сверхпроводящие ускоряющие модули.



## **FACET**

Facility for Advanced Accelerator Experimental Tests — установка, использующая часть основного линейного ускорителя SLAC с энергией до 20 ГэВ, для проведения ряда экспериментальных работ, в том числе по плазменному ускорению. Работала в 2012-2016 годах. Как FACET-II будет функционировать вместе с LCLS-II после модернизации.

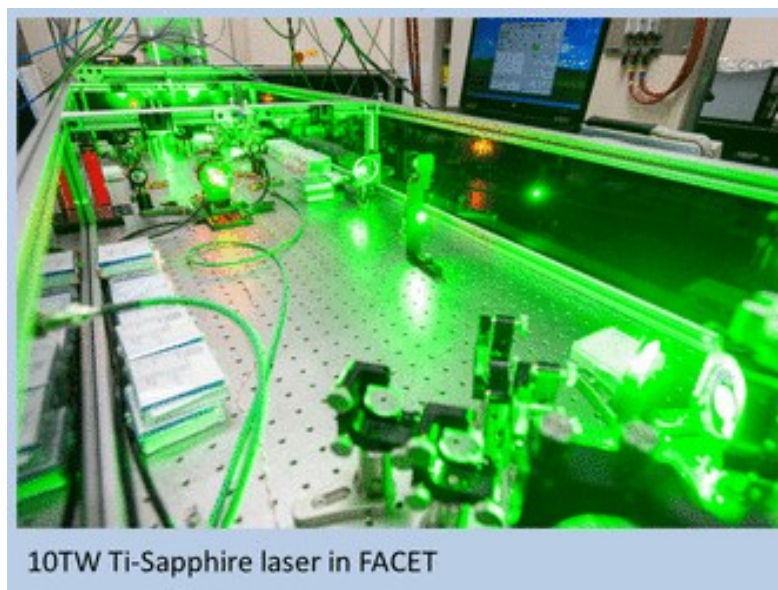


Рис. 6. Титан-сапфировый лазер FACET.

## **NLCTA**

Next Linear Collider Test Accelerator — электронный линейный ускоритель на энергию до 120 МэВ для экспериментов по физике ускорителей.

### **«Микро-ускоритель»**

В 2020 году в Стэнфордском университете разработан принципиально новый ускоритель частиц, который помещается на микрочипе. Его длина составляет 30 мкм. Ускоритель представляет собой трубку нанометровых размеров, сделанную из кремния, окружённую слоем вакуума. Электроны в трубке ускоряются импульсами инфракрасного лазера.

Энергия, которую приобретают электроны, составляет около 1 МэВ.

Главное преимущество данного ускорителя – малый размер и малая площадь облучения. Ускоритель может использоваться для различных медицинских операций, например, для лечения раковых опухолей.

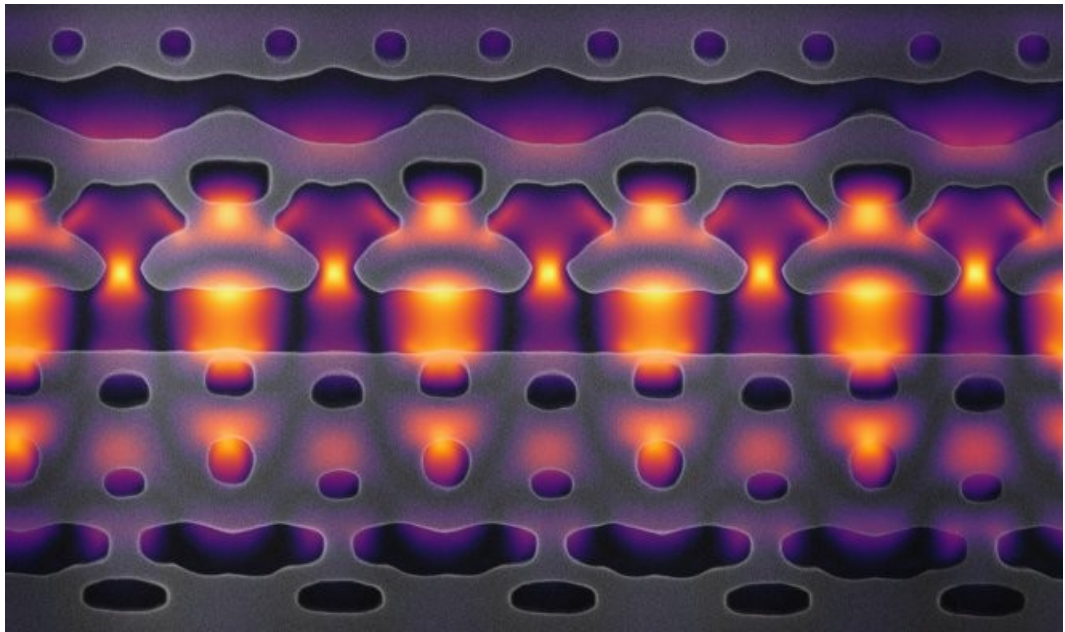
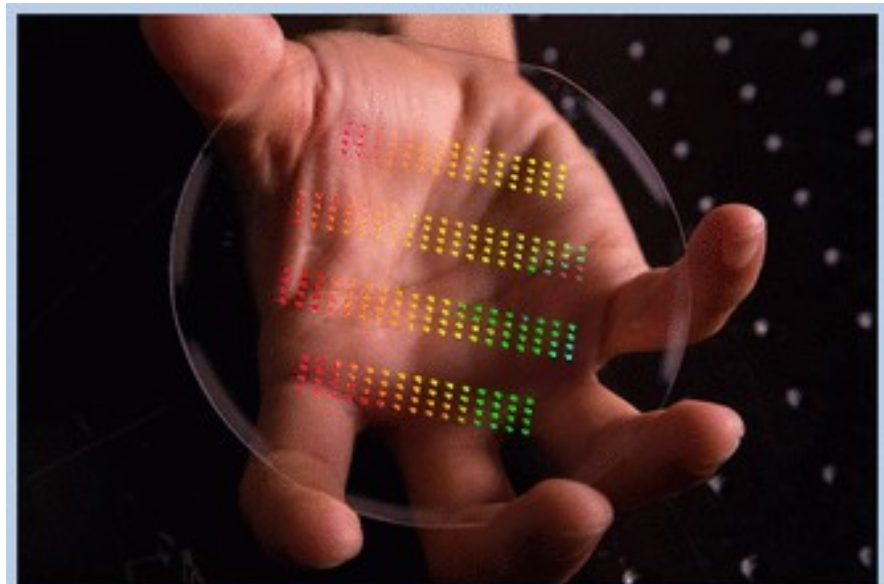


Рис. 7. Схематичное изображение «микро-ускорителя».



Accelerator on a chip arrays prior to assembly

Рис. 8. «Микро-ускоритель».

## Использованные источники:

- 1) [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F\\_%D1%83%D1%81%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F\\_%D0%BB%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%83%D1%81%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BB%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F) SLAC (Национальная ускорительная лаборатория SLAC, Материал из Википедии — свободной энциклопедии).
- 2) [https://portal.slac.stanford.edu/sites/ard\\_public/facet/Pages/default.aspx](https://portal.slac.stanford.edu/sites/ard_public/facet/Pages/default.aspx) (SLAC).
- 3) [http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/accelerators/linear\\_ac.htm](http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/accelerators/linear_ac.htm) (Линейный ускоритель, ядерная физика в Интернете).
- 4) <https://www.techcult.ru/science/7750-uskoritel-chastic-kotoryj-umeshaetsya-na-mikrochipe> («В Стэнфорде разработали ускоритель частиц, который умещается на микрочипе», 2020).
- 5) <https://lenta.ru/news/2014/11/05/slac/> («Физики предложили в 150 раз сократить длину ускорителя частиц», 2014).