



中山大學理學院
Sun Yat-sen University School of science



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

粒子加速器原理

中山大学理学院

授课教师团队介绍

- | | |
|-----------------|--------|
| • 毕远杰 教授级正高级工程师 | 课程负责人 |
| • 黄永盛 教授 | 课程授课教师 |
| • 邵佳航 研究员 | 课程授课教师 |
| • 刘星光 副研究员 | 课程授课教师 |
| • 苑尧硕 副研究员 | 课程授课教师 |

课程负责人：毕远杰



毕远杰，女，中共党员，籍贯内蒙赤峰，中山大学教授级正高级工程师。主要研究方向加速器物理与辐射剂量学，注册核安全工程师；中国辐射防护学会粒子加速器分会理事；中国辐射防护学会青年委员会委员

- **教育背景**

- 2005年9月 – 2011年6月，清华大学工程物理系，工学博士
- 2009年1月 – 2010年1月，瑞士保罗谢尔研究所(Paul Scherrer Institut)，访问学者
- 2001年9月 – 2005年7月，清华大学工程物理系，工学学士
-

- **工作经历**

- 2022年10月 - 至今 中山大学理学院正高级工程师
- 2011年7月 - 2022年9月，中国原子能科学研究院，研究员，2022年1月起任辐射防护研究室党支部副书记兼副主任（主持全面工作），2022年7月起任辐射防护研究室主任兼党支部书记

授课教师简介



- 教授、博导，中山大学理学院副院长
- 客座研究员，中国科学院高能物理研究所
- 深圳湾实验室同舟学者
- 浙江德倍斯科技有限公司，首席科学家
- MRE编委

研究领域：

- ✓ 超短超强激光等离子体相互作用
- ✓ 世界首台光子对撞机
- ✓ 产业化：EUV光源、加速器驱动核药制备系统、
闪放癌症治疗等；

- 2001.08-2005.07: 清华大学，学士，
- 2005.08-2009.07: 清华大学，博士，导师：王乃彦院士、高喆教授
- 2009.08-2017.06: 中国原子能科学研究院，助理研究员、副研究员，
- 2015.08-2016.06: 中国原子能科学研究院，实验室副主任（主持工作）
- 2017.07-2021.06: 中国科学院高能物理研究所，研究员，北京试验束负责人。
- 2021.06-现在: 副院长，教授，博导，中山大学理学院

荣誉与奖项



➤ 荣誉

- 2021, 广东省重大人才工程引进杰出人才
- 2021 中山大学百人计划领军人才
- 2019 中国科学院高能物理研究所客座研究员
- 2017 中国科学院高能研究所引进杰出人才
- 2015年 中国光学工程学会理事
- 2009 年 清华大学优秀博士毕业生, 清华大学

➤ 奖项

- 2023 中国发明协会 创新创业奖 二等奖 (1/5)
- 2017 中核集团科学技术奖 三等奖 (第一完成人)
- 2013 第十二届北京青年优秀科技论文三等奖, 相对论激光离子加速解析理论, 北京市科学技术协会
- 2009 蔡诗东等离子体物理奖, 周培源基金会、蔡诗东等离子体物理奖委员会、中科院物理所
- 2009 清华大学研究生学术新秀
- 2008 清华大学工程物理系学术新秀

授课教师简介

- 2007.9-2011.7 清华大学 电子工程系
 - ❖ 工学学士

- 2011.9-2016.7 清华大学 工程物理系
 - ❖ 工学博士

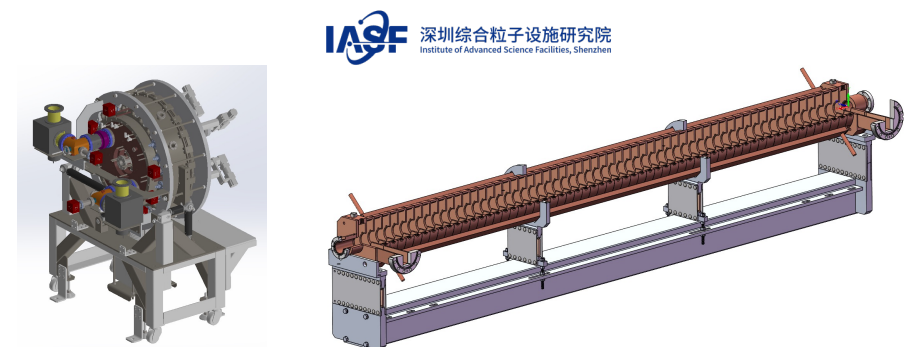
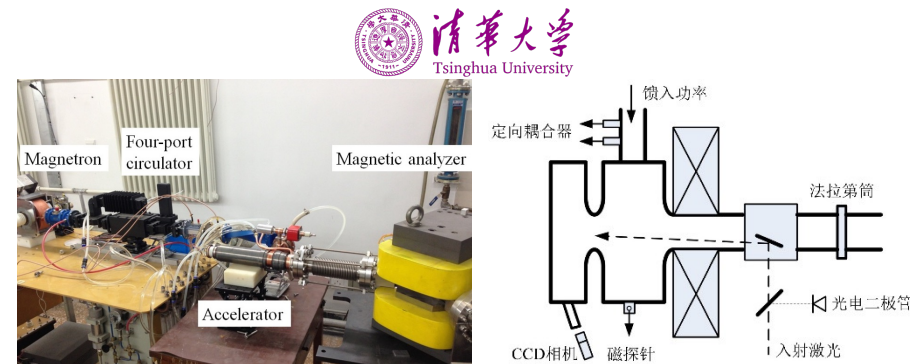
- ❖ 研究方向：高梯度加速结构中的射频击穿现象



- 2016.10-2021.5 美国阿贡国家实验室 高能物理部
 - ❖ 博士后、助理研究员
 - ❖ 研究方向：尾场加速、场致发射阴极

- 2021.5 至今 深圳综合粒子设施研究院 自由电子激光项目经理部
 - ❖ 研究员
 - ❖ 研究方向：自由电子激光装置中的常温微波结构

- 2021.8 至今 南方科技大学 理学院
 - ❖ 访问学者



授课教师简介

刘星光

高能物理研究所东莞研究部加速器技术部

国科大主页: <https://people.ucas.edu.cn/~liuxg>



2004 – 2008	清华大学 工程物理系	学士	科研项目
2008 – 2010	工程物理研究院流体物理研究所	研究实习员	强流电子加速器注入器研制
2010 – 2015	(日本) 东京工业大学 (日本) 高能加速器研究机构 (KEK)	博士	感应同步加速器 /次世代癌症治疗验证装置
2016 – 2018	(日本) 理化学研究所 (RIKEN)	博士后	基于核嬗变的 高放射性废料的减少和资源化
2018 – 2020	(瑞士) 欧洲核子研究中心 (CERN)	Senior Fellow	CompactLight CLIC
2020.9 –	高能物理研究所东莞研究部	特聘青年研究员	中国散裂中子源二期工程 南方先进光源物理设计 电子枪与加速结构平台建设

授课教师简介 苑尧硕

中国科学院高能物理研究所东莞研究部（中国散裂中子源）

国科大主页 <https://people.ucas.edu.cn/~ysyuan>



2005 – 2009	东北师范大学	学士	小型中子发生器产额分布研究
2009 – 2014	中国科学院高能物理研究所	硕士	中国散裂中子源纵向束流动力学研究与模拟程序开发
2014 – 2018	（德国）达姆施塔特工业大学	博士	同步环行加速器强流束流集体不稳定性理论研究
2018 – 2021	（德国）重离子物理研究所（GSI）	博士后	欧洲反质子与离子研究装置束团的强流效应与束团压缩设计
2022 – 今	中国散裂中子源	特聘青年研究员	中国散裂中子源二期强流效应研究与高功率运行模式设计

课程设置

黄永盛	2	课程介绍、教师介绍
刘星光	14	历史、束流动力学基础及加速器概览
苑尧硕	24	束流动力学及环形加速器
邵佳航	16	射频直线加速器
刘星光/苑尧硕/ 邵佳航/黄永盛/ 毕远杰	课程重点回顾、大作业点评、考试安排	

课程考核

出勤与课堂讨论	10
平时作业	30
大作业	20
期末考试	40
	100

《加速器物理学》，2006年[复旦大学出版社](#)出版图书，S.Y.李

荷电粒子加速器原理,桂伟燮,清华大学出版社

习题讲解与答疑安排：	日常作业重点讲解与答疑按需安排在每次课程内15min左右			
	其他答疑以邮件为主			
助教需求	按人数需求建议安排助教1~2人			
助教职责	协助日常教学管理，学生作业汇总等工作			
大作业相关	(1)	按个人独立完成设置		
	(2)	提供多个选题在4~6周左右开放选题		
	(3)	以简单数值模拟和调研类为主		
考试相关：	期末考试以开卷方式进行			

粒子加速器及其应用

- 粒子加速器是20世纪早期人们的一大发明，至今已有近100年的历史。
- 从上世纪二十年代第一台加速器开始，加速器研究的焦点就一直是提高粒子的能量。这就是所谓的“能量前沿”（Energy Frontier），也是人们常说的“科学发现的引擎”（Engines of Discovery）。它服务的对象是基础研究，即高能物理。一开始的高能物理是核物理（十几到几十 MeV），现在的高能物理是粒子物理（几个，几十个 GeV 到 十几 TeV）。
- 在这个过程中，
 - 一方面有一系列基础研究中的重大发现（诺贝尔物理奖的三分之一都给了粒子物理）
 - 另一方面又引伸出一大批实际应用（Spin-off），这些应用又一个个相继形成了新的，属于它们自己的科学技术领域前沿。
 - 同步辐射光源，自由电子激光，和散裂中子源就是三个很好的例子。

第一台同步辐射光源 – SPEAR

- SPEAR 大家并不陌生，它是一台做高能物理实验的正负电子对撞机，1974年 Burt Richter 用它发现了 J/Ψ 粒子，与丁肇中（用 AGS，另一台高能物理加速器）一起得了诺贝尔物理奖。
- 但很多人不知道，正是这台用来研究高能物理的机器，是世界上第一台同步辐射光源，（Stanford U. Bill Spicer 和 Seb Doniach 对 Richter 的建议 “revolutionize Condensed Matter physics”）常称为第一代光源（1st Generation, 1G）
- 后来 SPEAR 改造为专用光源（2G，另还有 Aladdin 等），又拿到三个诺贝尔化学奖（Roger Kornberg 2006, Ada Yonath 2009 and Brian Kobilka 2012）
- 80年代开始建造第三代光源（3G），特点是有插入件（insertion devices），包括 APS, ALS, ESRF, Spring-8, 和国内的合肥光源, 上海光源, 及正在建的北方光源, 筹建中的南方光源等。

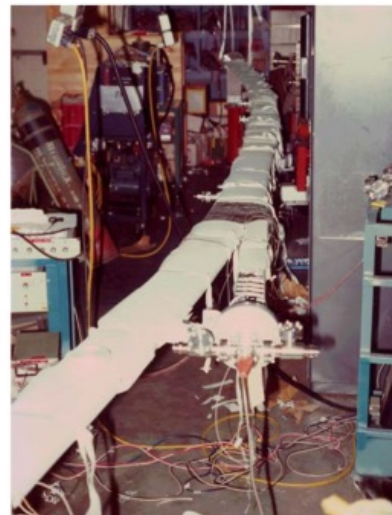
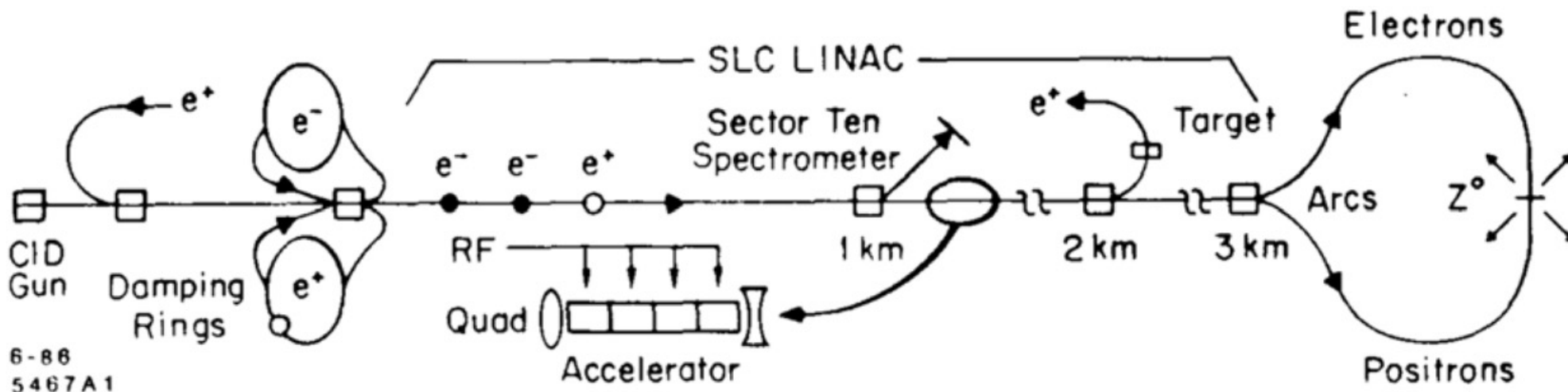
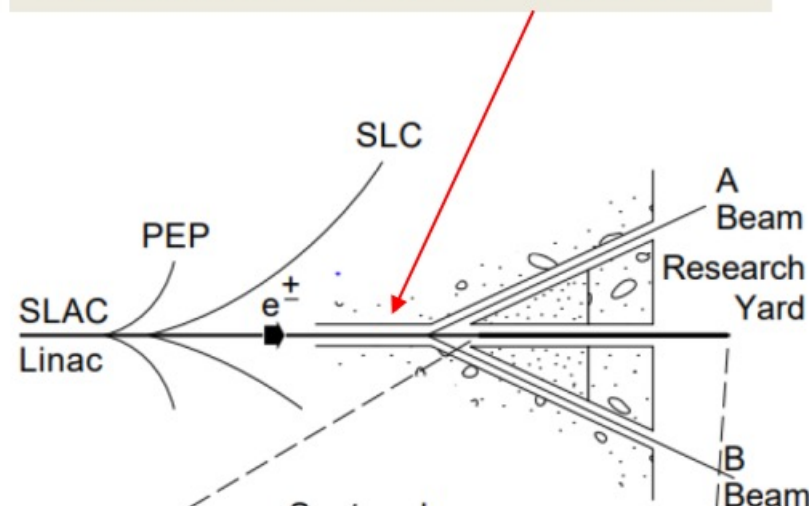


Figure 24. SPEAR bending magnet vacuum chamber with the 1st port to extract synchrotron radiation for experiments (Herman Winick collection).

第一台自由电子激光是基于直线对撞机的技术

- SLC 是第一台（也是到目前为止唯一的一台）直线对撞机，作为 Z 工厂，研究粒子物理。
- 正是在这台机器上积累的经验，研发的加速器技术和培养的专业队伍，为后来把它改造为世界上第一台 X 射线自由电子激光 LCLS 打下了基础（4G）。
- 现在又进一步使用超导技术，发展为 LCLS2，上海在建的 SHINE 就是以它为借鉴。

LCLS 将这一段改为 undulator



散裂中子源是基于高能物理固定靶实验的技术

- 高能质子打在固定靶上，产生二次粒子，是粒子物理的重要实验手段。丁肇中当年就是在 AGS 上发现了 J/Ψ 粒子。
- 高能物理学家感兴趣的二次粒子是自然界中看不到的粒子，除了 J/Ψ 之外，还有 π ， μ ，kaon，正电子，反质子，等。
- 为了得到大量二次粒子，高强度高功率的质子加速器技术发展。
- 正是在这个技术基础上，引伸出了散裂中子源 - 即是在固定靶上产生大量中子作为二次粒子，应用于凝聚态物理，核物理，材料科学，生物科学等各方面。
- 与光源一样，一开始散裂中子源是高能物理的附属部分，但后来就有了专用的，如 ESS，SNS，J-PARC，及国内新建的 CSNS。

Fermilab 三条固定靶束流线



其他还有很多例子

- 超导技术的迅速发展是由于 Fermilab 建造 Tevatron，世界上第一台使用超导磁铁的对撞机。它使用的超导材料数量是如此之大，当时全世界所有生产的铌钛合金都不够它用。这就带动了超导材料工业的发展。
- 不但如此，它的超导磁铁技术还带动了医学上核磁共振（MRI）的发展和广泛应用。
- 电子直线加速器是医学上放射治疗的基础。
- 用加速器产生正电子的技术，是今天 PET scan 的基础。
- 为高能质子加速器而发明的 RFQ 已广泛应用在半导体工业上。
- 为交换高能物理实验数据而发明的 Internet，在全世界引起了一场信息革命，则是完全出于发明者意外的。

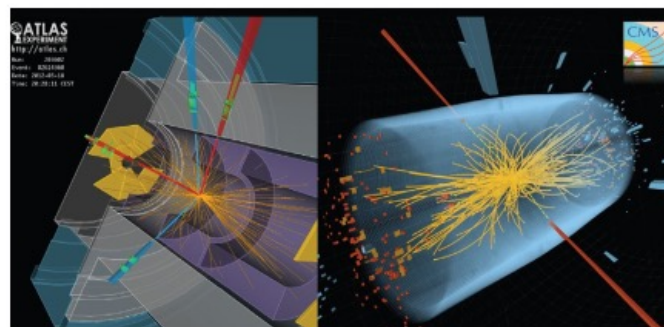


小结

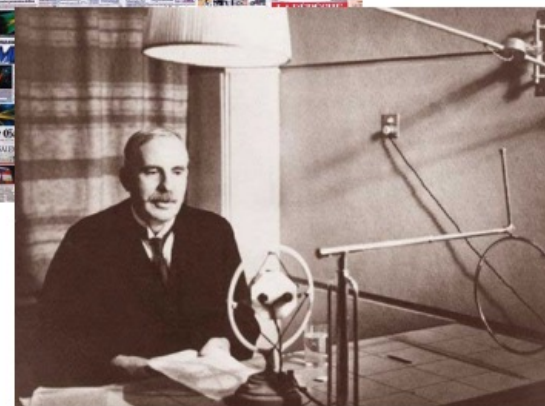
- 加速器技术的发展，一直是由基础研究的需要带动的。这些基础研究，有它自己的科学目标和物理意义。
- 但在加速器技术发展的过程中，它又找到很多实际的应用，有些是事先已想到的，有些是完全没有预料到的。
- 以加速器为例，基础研究对实际应用的贡献主要有三方面：
 - 打下技术基础
 - 积累操作经验
 - 培养专业队伍
- 希望我们今天讨论的伽玛对撞机，能成为下一个基础研究带动实际应用的例子。

从 0 到 1，第一个（第一次）是零的突破

- 特别刺激，特别兴奋，是个冒险，有强烈的挑战性，成功后会长期留在人们记忆中
- 今年4月10日 EHT 发布第一个黑洞照片
- 2016年 LIGO 第一次“听”到引力波
- 2012年 LHC 第一次找到希格斯粒子

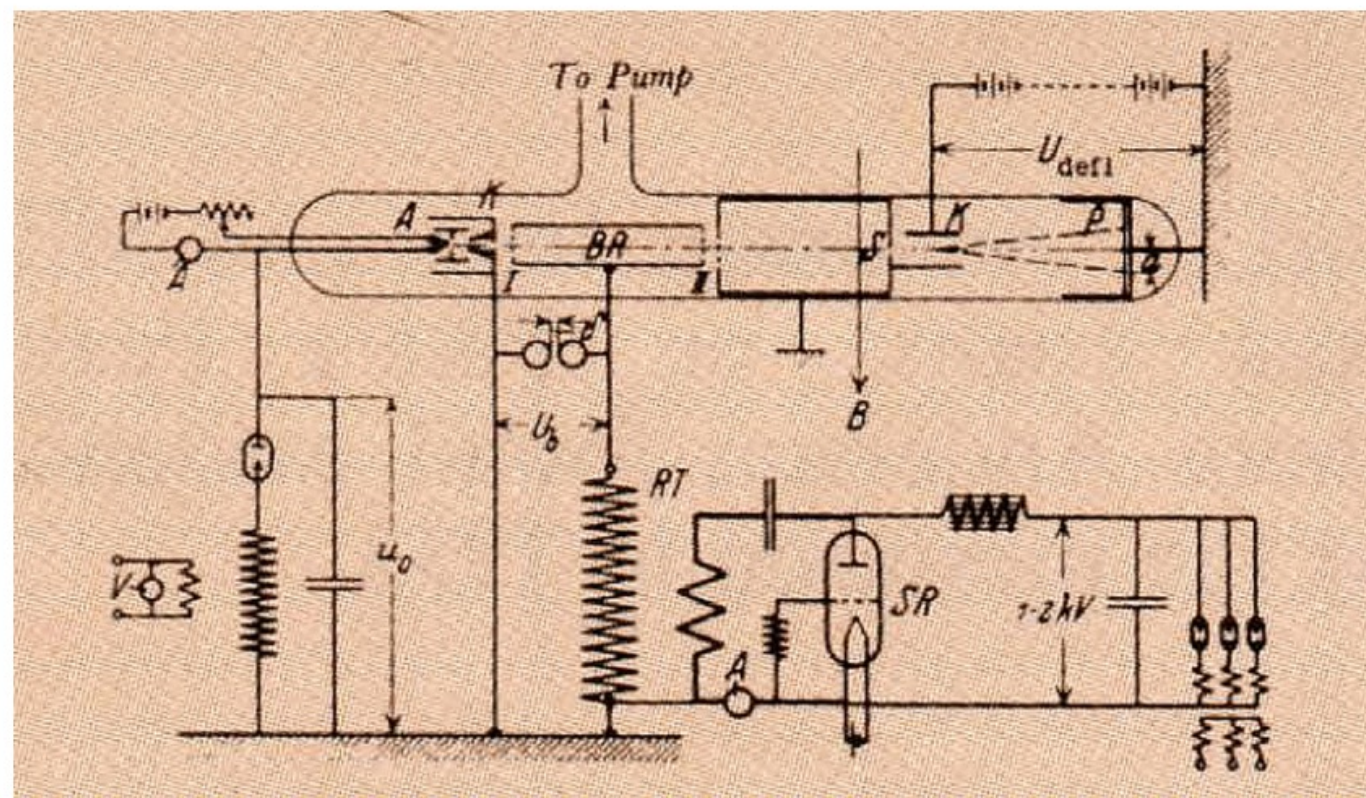


- 1919年卢瑟福第一次把原子核打碎



从 0 到 1，第一台小而简单 (1)

第一台直线加速器，1928年， Rolf Wideröe,
88 cm glass tube linac



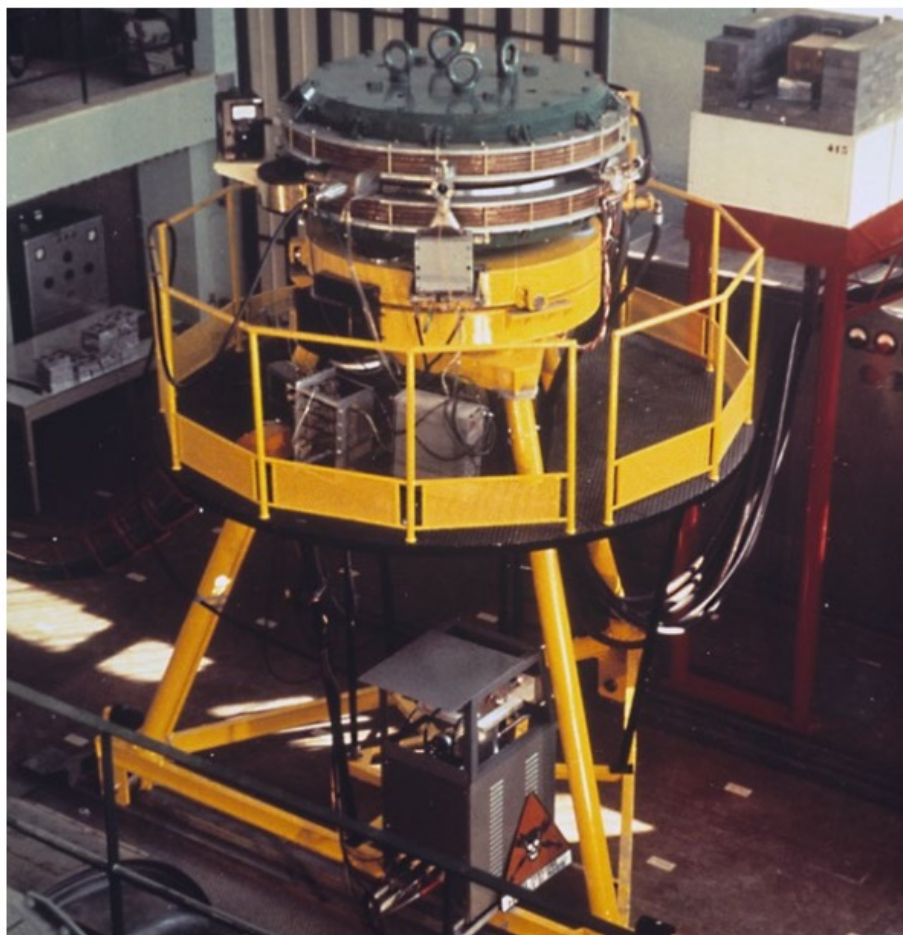
从 0 到 1，第一台小而简单 (2)

第一台环形加速器，1930年， Ernest Lawrence
手掌大小， 4" cyclotron



从 0 到 1，第一台小而简单 (3)

第一台环形对撞机，1961年， Bruno Touschek
直径 1.6 m， AdA



有了 1, 就有 2, 3, ...

1943: Synchrotron



1944: Phase stability



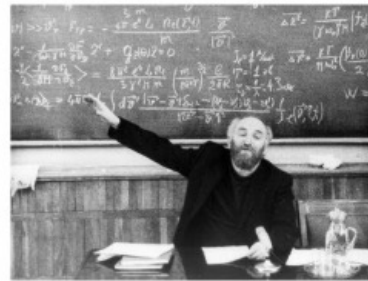
1952: Strong focusing



1959: AGS



1966: Electron cooling



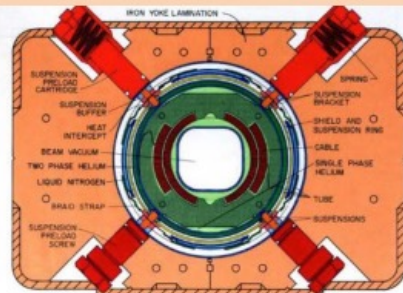
1968: Stochastic cooling



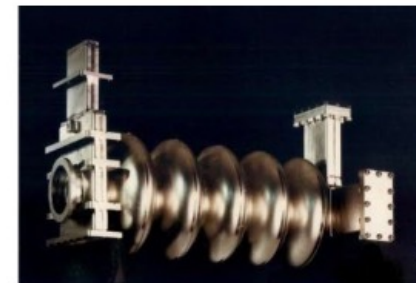
1969: 1st hadron collider



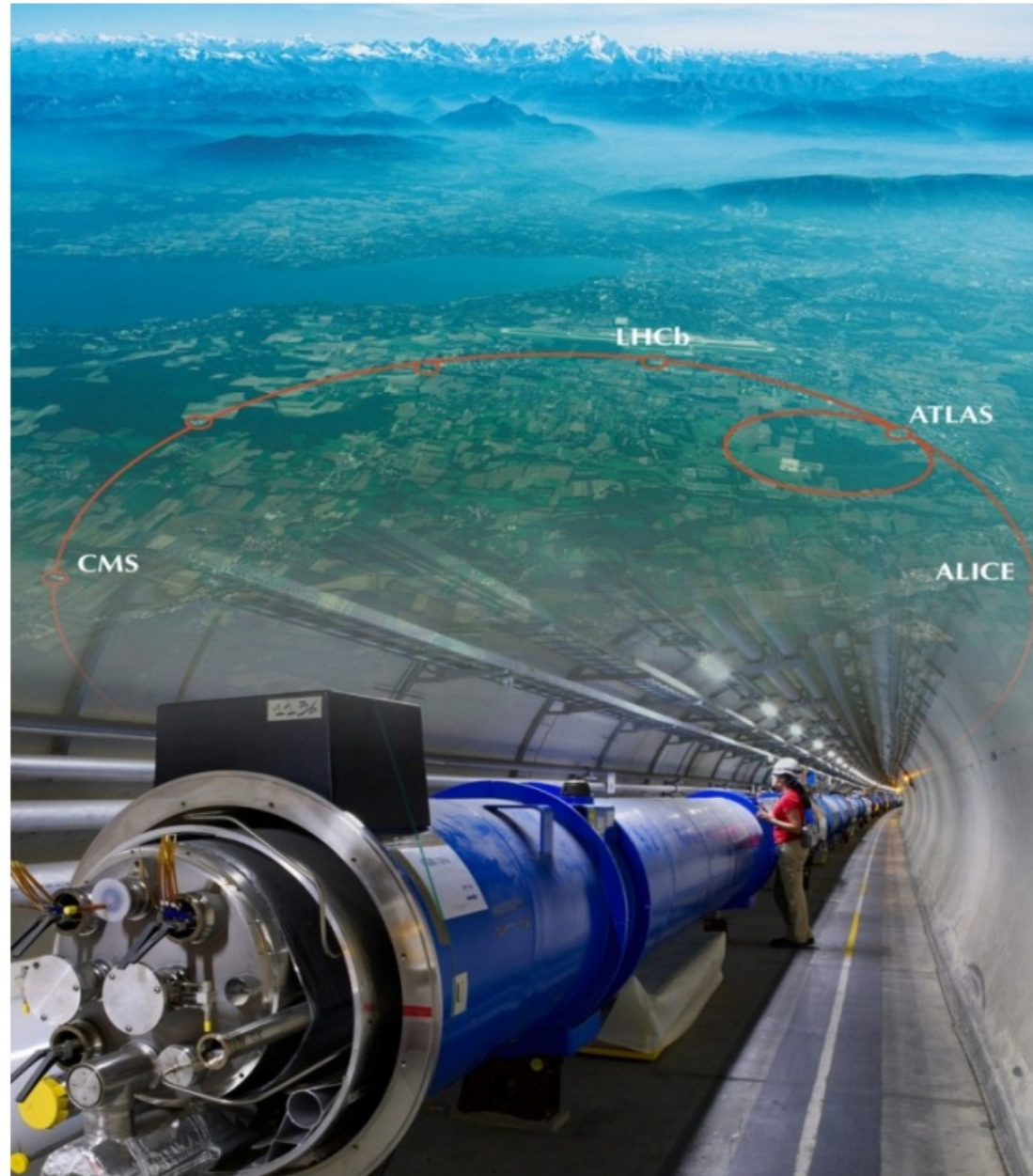
1983: SC magnet



1994: Superconducting RF



World's Largest Collider – LHC (27 km)



A BRIEF HISTORY OF PARTICLE ACCELERATORS



Cyclotron

Ernest Lawrence invents the cyclotron at the University of California, Berkeley. He and his student Stanley Livingston build a cyclotron only 4 inches in diameter.



The birth of an era

Ernest Rutherford discovers the nuclear disintegration by bombarding elements with alpha particles from natural radioactive elements. Later he calls for "a copious supply" of particles more energetic than those from natural sources. The particle accelerator era is born.



Cockcroft-Walton accelerator
John Cockcroft and Ernest Walton invent the Cockcroft-Walton electrostatic accelerator at the Cavendish Laboratory. This accelerator produces the first man-made nuclear reaction.



Synchrotron
Markus Oliphant develops the concept for a new type of accelerator. Later named the synchrotron by Edwin McMillan.



Drift tube linac
Luis Alvarez builds the first drift tube linac for accelerating protons at the University of California, Berkeley.



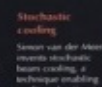
FRAG
The first Fixed-Field Alternating-Gradient accelerator is commissioned at the Midwestern Universities Research Association. The concept is invented independently by Ettore Orefano, Arden Rahnemond, and Keith Symon. An earlier variation is conceived by Uwe Grosse in 1938.



Induction linac
Adrian, the first induction linac proposed by Nicholas Christofilos for nuclear fusion, is built at a branch of the Lawrence Radiation Laboratory. Later renamed the Lawrence Livermore National Laboratory.



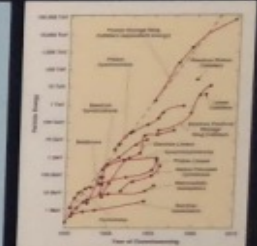
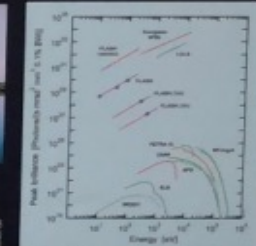
Electron cooling
Gersh Budker invents electron beam cooling at the Institute for Nuclear Physics in Russia.



Stochastic cooling
Simon van der Meer invents stochastic beam cooling, a technique enabling cooling of antiproton beams. The proton-antiproton collisions in the SppS in 1981 at CERN lead to the discovery of the Z and W bosons.



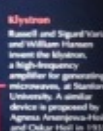
Superconducting magnet technology
The Svedberg, the first large accelerator using superconducting magnet technology, is commissioned at Fermilab.



The "Livingston chart" shows the steady growth of accelerator energy for megajoule colliders. The increase is a factor of ten every seven years.



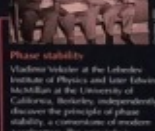
World's first accelerator
Clinton Dunning develops the concept of a linear particle accelerator. Four years later, Rolf Widerberg builds the world's first linear, an 18-cm long glass tube in Aachen, Germany.



Mysteron
Russell and Sigurd Varian invent the Mysteron, a high-frequency amplifier for generating microwaves, at Stanford University. A similar device is proposed by Agnes Pogonin-Fill and Oskar Hart in 1935.



Betatron
Donald Kerst at the University of Illinois constructs the first betatron, proposed by Joseph Slogar and others in the 1920s.



Phase stability
Vladimir Veksler at the Leningrad Institute of Physics and later Edwin McMillan at the University of California, Berkeley independently discover the principle of phase stability, a cornerstone of modern accelerators. The principle is first demonstrated in a modified cyclotron in 1946 at Berkeley.



Synchrotron radiation
Frank Conrad constructs the first electron synchrotron in the U.S. This is followed by one built by General Electric in the U.S. where synchrotron radiation is first observed, opening a new era of accelerator-based light sources.



Strong focusing
Ernest Courant, Stanley Livingston and Howard Kohn at Brookhaven National Laboratory and, independently, Nicholas Christofilos earlier in 1930 in Geneva discuss the principle of strong focusing, strong focusing and phase stability form the foundation of all modern high-energy accelerators.



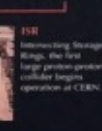
Colliders
Auke, the first electron-positron collider is built at Frascati, Italy. It is followed by two electron-positron colliders, Princeton-Stanford Collider in the U.S. and VEPP in Russia, leading to a continuing evolution of electron-positron colliders and factories around the world.



Modern synchrotron
The first two proton synchrotrons using strong focusing — PS at CERN and AGS at BNL — are built. An electron synchrotron using strong focusing is built earlier in 1964 at Cornell University.



RFQ
Vladimir Teplov and the Soviet Union invent the superconducting quadrupole linac. The first RFQ is built in 1972 at the Institute of High Energy Physics in Russia.



Superconducting storage rings
Intersecting Storage Rings, the first large proton-proton collider begins operation at CERN.



Linear colliders
SLC, the first linear collider proposed by Barton Richter, is built at SLAC. The linear collider concept is developed by Maury Tigner in 1965.



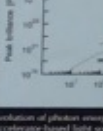
Superconducting RF technology
CEBAF, the first large accelerator using superconducting radio frequency technology, is built at the facility later named Jefferson Laboratory.



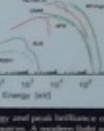
Rise and fall of SSC
Construction of the Superconducting Super Collider, planned to be the largest accelerator in the world, begins in 1989. The project is canceled by the U.S. Congress in 1991.



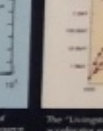
X-ray FEL
SLAC, the first VUV and soft x-ray free electron laser user facility is built at DESY in Germany.



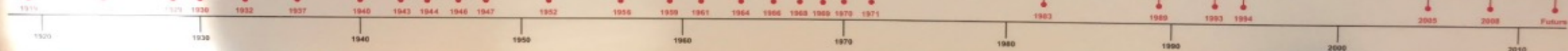
World's largest accelerator — LHC
The Large Hadron Collider at CERN, with 27 km circumference, begins operation.



Advanced concepts
Plasma and laser acceleration techniques meet imagination. An acceleration gradient 1000 times higher than that of conventional systems has been demonstrated. These advanced concepts challenge future accelerator builders.



Future



25 Nobel Prizes in Physics that had direct contribution from accelerators

(courtesy: A. Chao)

Year	Name	Accelerator-Science Contribution to Nobel Prize-Winning Research
1939	Ernest O. Lawrence	Lawrence invented the cyclotron at the University of Californian at Berkeley in 1929 [12].
1951	John D. Cockcroft and Ernest T.S. Walton	Cockcroft and Walton invented their eponymous linear positive-ion accelerator at the Cavendish Laboratory in Cambridge, England, in 1932 [13].
1952	Felix Bloch	Bloch used a cyclotron at the Crocker Radiation Laboratory at the University of California at Berkeley in his discovery of the magnetic moment of the neutron in 1940 [14].
1957	Tsung-Dao Lee and Chen Ning Yang	Lee and Yang analyzed data on K mesons (θ and τ) from Bevatron experiments at the Lawrence Radiation Laboratory in 1955 [15], which supported their idea in 1956 that parity is not conserved in weak interactions [16].
1959	Emilio G. Segrè and Owen Chamberlain	Segrè and Chamberlain discovered the antiproton in 1955 using the Bevatron at the Lawrence Radiation Laboratory [17].
1960	Donald A. Glaser	Glaser tested his first experimental six-inch bubble chamber in 1955 with high-energy protons produced by the Brookhaven Cosmotron [18].
1961	Robert Hofstadter	Hofstadter carried out electron-scattering experiments on carbon-12 and oxygen-16 in 1959 using the SLAC linac and thereby made discoveries on the structure of nucleons [19].
1963	Maria Goeppert Mayer	Goeppert Mayer analyzed experiments using neutron beams produced by the University of Chicago cyclotron in 1947 to measure the nuclear binding energies of krypton and xenon [20], which led to her discoveries on high magic numbers in 1948 [21].
1967	Hans A. Bethe	Bethe analyzed nuclear reactions involving accelerated protons and other nuclei whereby he discovered in 1939 how energy is produced in stars [22].
1968	Luis W. Alvarez	Alvarez discovered a large number of resonance states using his fifteen-inch hydrogen bubble chamber and high-energy proton beams from the Bevatron at the Lawrence Radiation Laboratory [23].
1976	Burton Richter and Samuel C.C. Ting	Richter discovered the J/Ψ particle in 1974 using the SPEAR collider at Stanford [24], and Ting discovered the J/Ψ particle independently in 1974 using the Brookhaven Alternating Gradient Synchrotron [25].
1979	Sheldon L. Glashow, Abdus Salam, and Steven Weinberg	Glashow, Salam, and Weinberg cited experiments on the bombardment of nuclei with neutrinos at CERN in 1973 [26] as confirmation of their prediction of weak neutral currents [27].
1980	James W. Cronin and Val L. Fitch	Cronin and Fitch concluded in 1964 that CP (charge-parity) symmetry is violated in the decay of neutral K mesons based upon their experiments using the Brookhaven Alternating Gradient Synchrotron [28].
1981	Kai M. Siegbahn	Siegbahn invented a weak-focusing principle for betatrons in 1944 with which he made significant improvements in high-resolution electron spectroscopy [29].
1983	William A. Fowler	Fowler collaborated on and analyzed accelerator-based experiments in 1958 [30], which he used to support his hypothesis on stellar-fusion processes in 1957 [31].
1984	Carlo Rubbia and Simon van der Meer	Rubbia led a team of physicists who observed the intermediate vector bosons W and Z in 1983 using CERN's proton-antiproton collider [32], and van der Meer developed much of the instrumentation needed for these experiments [33].
1986	Ernst Ruska	Ruska built the first electron microscope in 1933 based upon a magnetic optical system that provided large magnification [34].
1988	Leon M. Lederman, Melvin Schwartz, and Jack Steinberger	Lederman, Schwartz, and Steinberger discovered the muon neutrino in 1962 using Brookhaven's Alternating Gradient Synchrotron [35].
1989	Wolfgang Paul	Paul's idea in the early 1950s of building ion traps grew out of accelerator physics [36].
1990	Jerome I. Friedman, Henry W. Kendall, and Richard E. Taylor	Friedman, Kendall, and Taylor's experiments in 1974 on deep inelastic scattering of electrons on protons and bound neutrons used the SLAC linac [37].
1992	Georges Charpak	Charpak's development of multiwire proportional chambers in 1970 were made possible by accelerator-based testing at CERN [38].
1995	Martin L. Perl	Perl discovered the tau lepton in 1975 using Stanford's SPEAR collider [39].
2004	David J. Gross, Frank Wilczek, and H. David Politzer	Gross, Wilczek, and Politzer discovered asymptotic freedom in the theory of strong interactions in 1973 based upon results from the SLAC linac on electron-proton scattering [40].
2008	Makoto Kobayashi and Toshihide Maskawa	Kobayashi and Maskawa's theory of quark mixing in 1973 was confirmed by results from the KEKB accelerator at KEK in Tsukuba, Ibaraki Prefecture, Japan, and the PEP II at SLAC [41], which showed that quark mixing in the six-quark model is the dominant source of broken symmetry [42].
2013	Francois Englert and Peter W. Higgs	Englert's and Higgs's theory of the Higgs particle in 1960s was confirmed by the ATLAS and CMS experiments at CERN's LHC in 2012.

Tens of Thousands Accelerators were built

Light Sources



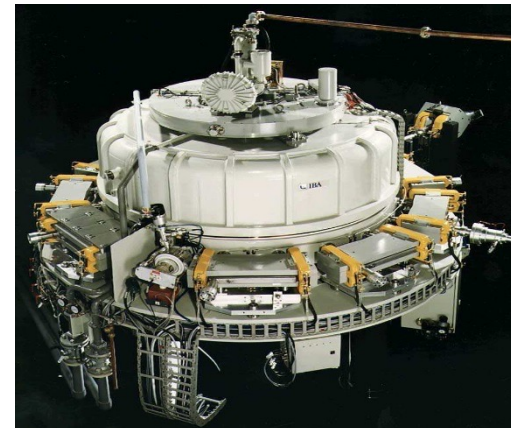
Neutron Sources



Medical Accelerators

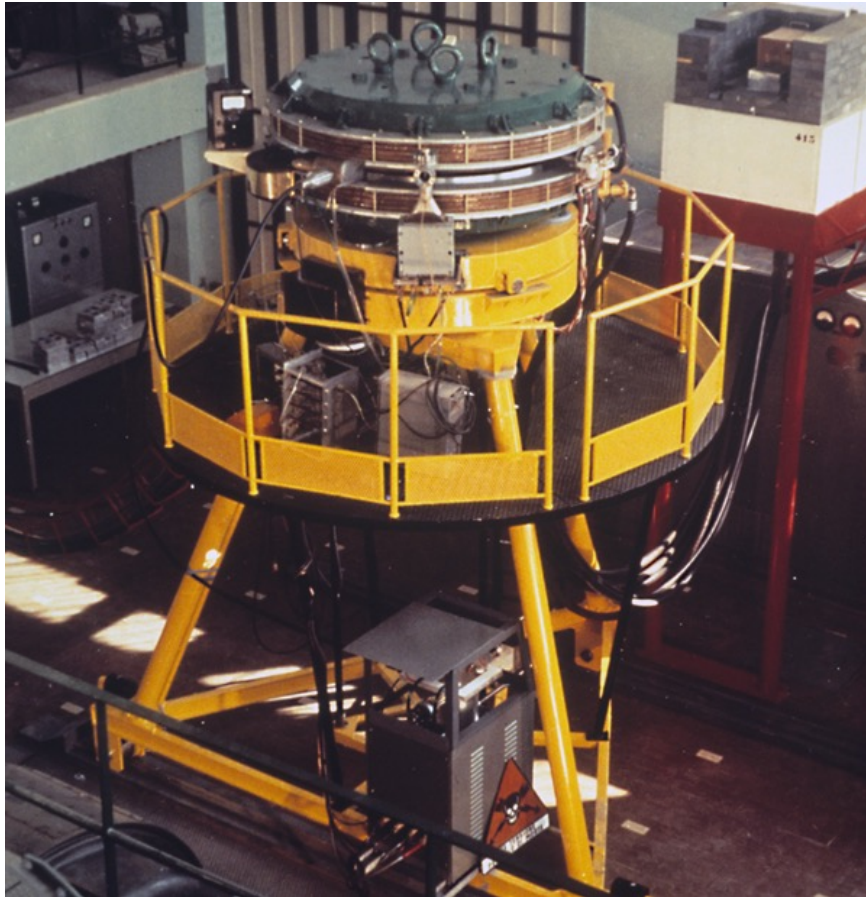


Industrial Accelerators



First Generation of Colliders – 1960s

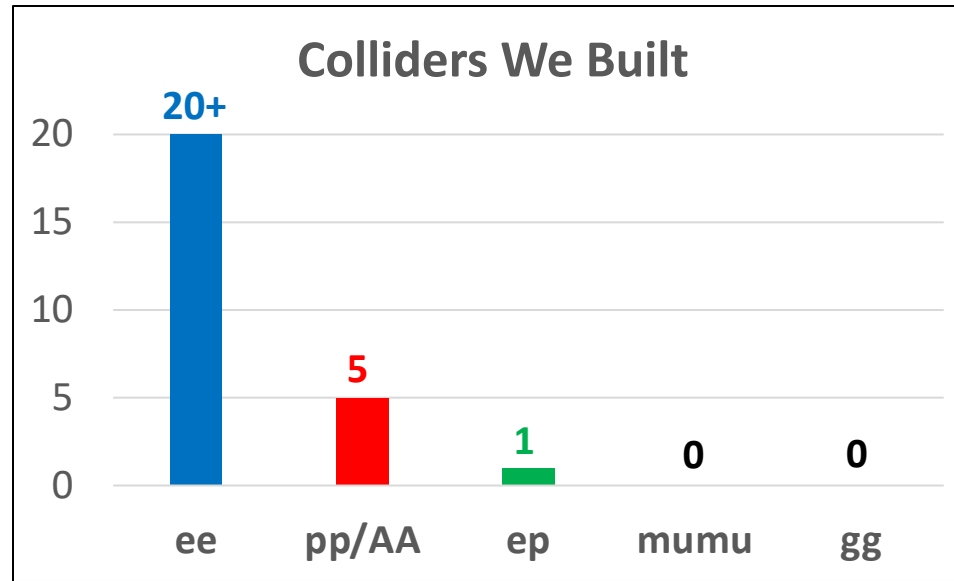
1961: AdA first lepton collider



1969: ISR first proton collider



Scores of Colliders were built



- In the past 50 years,
 - we built more than 20 e+e- colliders
 - we built 5 hadron colliders (pp and ion-ion)
 - we built one ep collider
- **However, we have never built any $\gamma\gamma$ collider**