



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



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

伽玛光子对撞机及综合束流设施

黄永盛

中山大学理学院
2022年08月10日



项目组成与国际国内合作单位

- **伽玛光子对撞机研究小组:**
 - **中山大学：黄永盛、毕远杰、王为、贺远强、张晋、郑立洋、赵耀、苏伟、刘洋、蒋先涛**
 - **高能所：周为仁，张闯，郑志鹏，吕军光，裴国玺，刘渭滨，李京祎、李煜辉、孟才**
 - **武汉大学：陈沅**
 - **清华：唐传祥，鲁巍，杜应超**
 - **北京大学：颜学庆，余金清，陆元荣**
 - **北师大：王乃彦，张丰收，谢柏松，桑海波，韩德俊，苏俊，廖斌，张春雷**
 - **西华师范大学：兰小飞**
 - **北航：沈成平，孙保华**
 - **日本广岛大学：高桥彻 (Hiroshima U.: Tohru Takahashi)**
 - **中科大：安琪，刘树彬**
 - **上海光机所：李儒新，冷雨欣，彭宇杰，赵成强**
 - **上海应物所：沈文庆，王宏伟**
 - **复旦大学：马余刚**
 - **国防科大：余同普，银燕**
 - **西安交通大学：栗建兴**
- **International collaborators:**
 - **Japan: Kaoru Yokoya, K. Homma**
 - **Italy: Illya Drebot, Luca Serafini, Vittoria Petrillo, Massimo Ferrario**
 - **France: Amplitude Technology Co.**
 - **USA: Chris Barty, Bob Byer, Almantas Galvanauskas, Russell Wilcox , Mayda Velasco**
 - **Russia: Valery Telnov**

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。

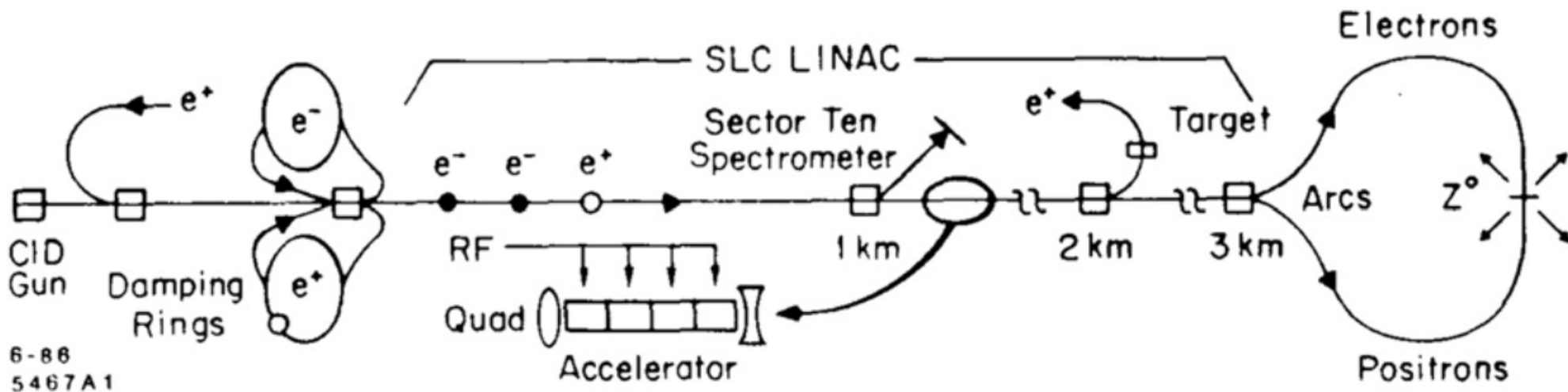
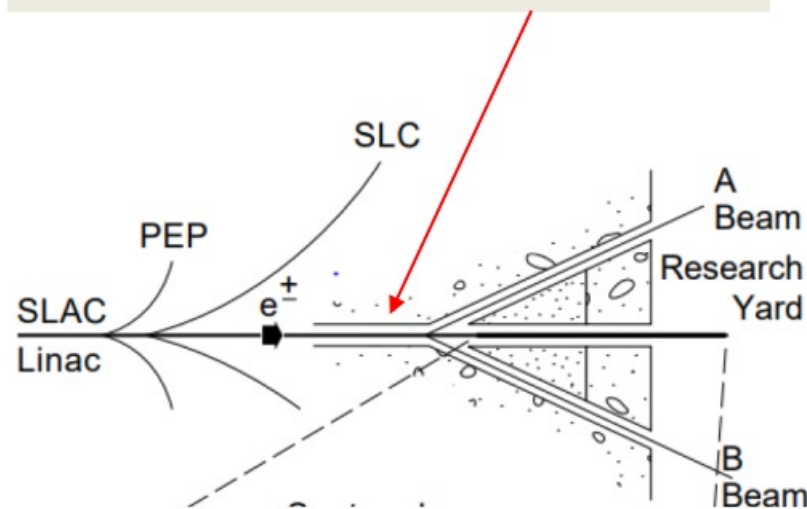


Figure 24. SPEAR bending magnet vacuum chamber with the 1st port to extract synchrotron radiation for experiments (Herman Winick collection)

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

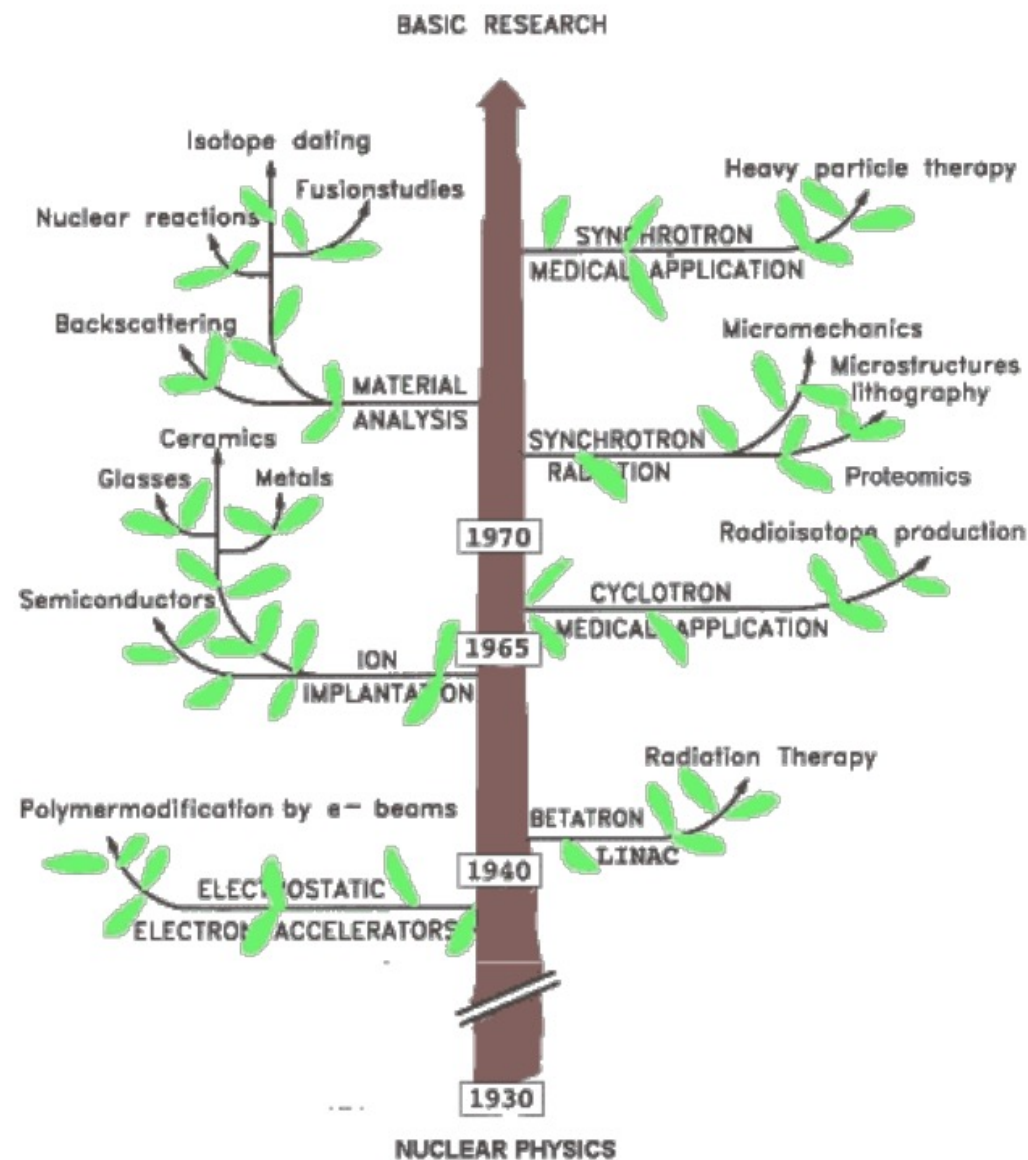
- 高能质子打在固定靶上，产生二次粒子，是粒子物理的重要实验手段。丁肇中当年就是在 AGS 上发现了 J/Ψ 粒子。
- 高能物理学家感兴趣的二次粒子是自然界中看不到的粒子，除了 J/Ψ 之外，还有 π ， μ ，kaon，正电子，反质子，等。
- 为了得到大量二次粒子，高强度高功率的质子加速器技术发展。
- 正是在这个技术基础上，引伸出了散裂中子源 - 即是在固定靶上产生大量中子作为二次粒子，应用于凝聚态物理，核物理，材料科学，生物科学等各方面。
- 与光源一样，一开始散裂中子源是高能物理的附属部分，但后来就有了专用的，如 ESS，SNS，J-PARC，及国内新建的 CSNS。

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。

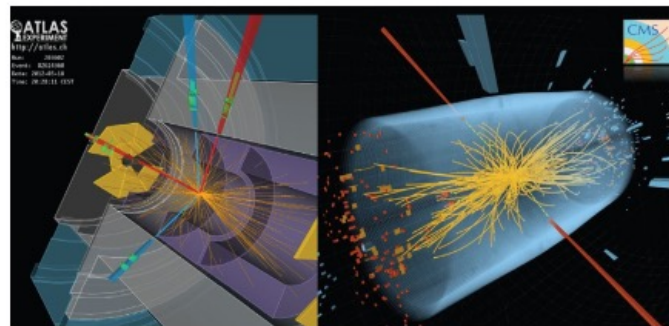


小结

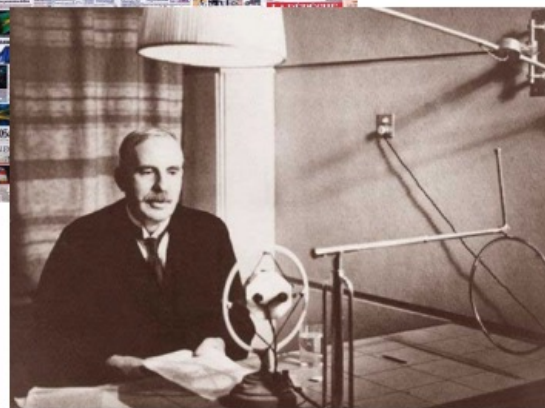
- 加速器技术的发展，一直是由基础研究的需要带动的。这些基础研究，有它自己的科学目标和物理意义。
- 但在加速器技术发展的过程中，它又找到很多实际的应用，有些是事先已想到的，有些是完全没有预料到的。
- 以加速器为例，基础研究的对实际应用的贡献主要有三方面：
 - 打下技术基础
 - 积累操作经验
 - 培养专业队伍
- 希望我们今天讨论的伽玛对撞机，能成为下一个基础研究带动实际应用的例子。

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

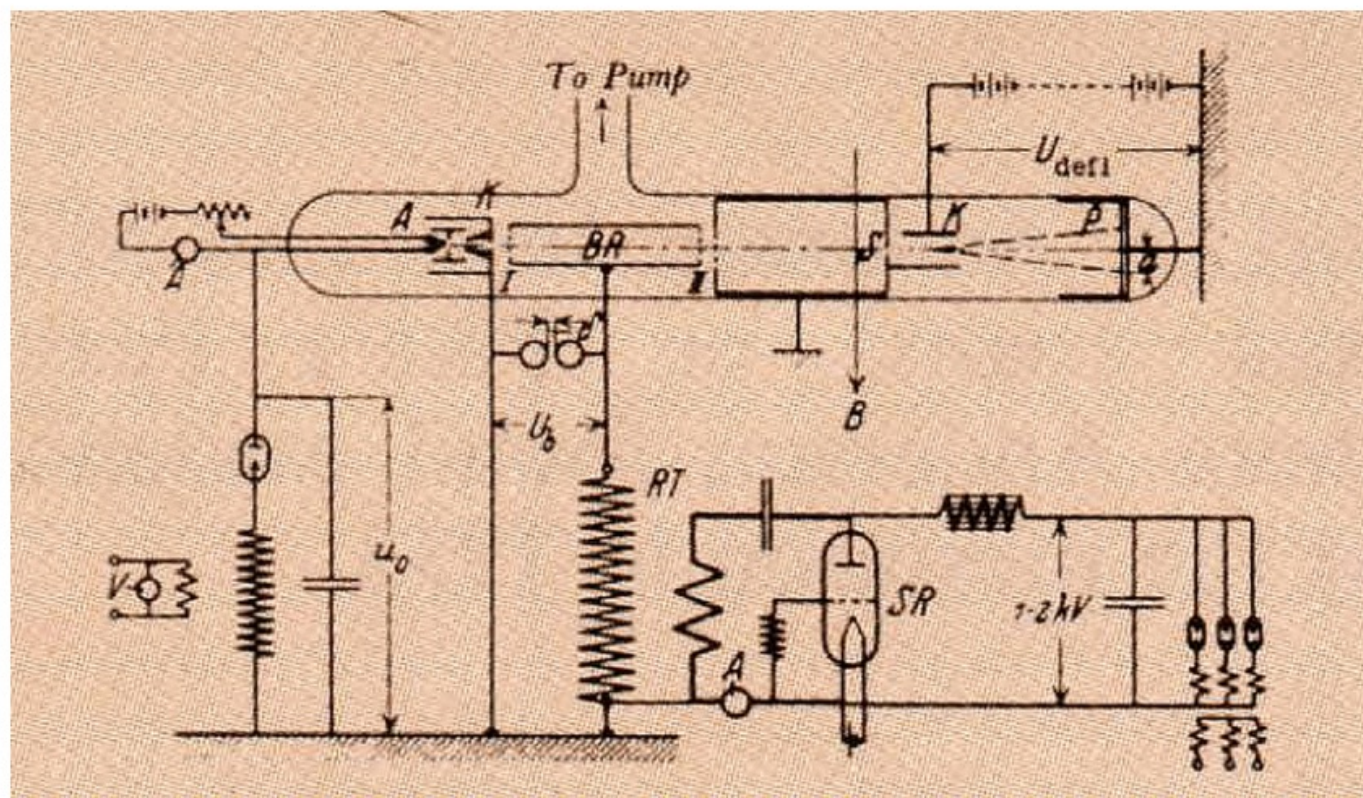


- 1919年卢瑟福第一次把原子核打碎



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



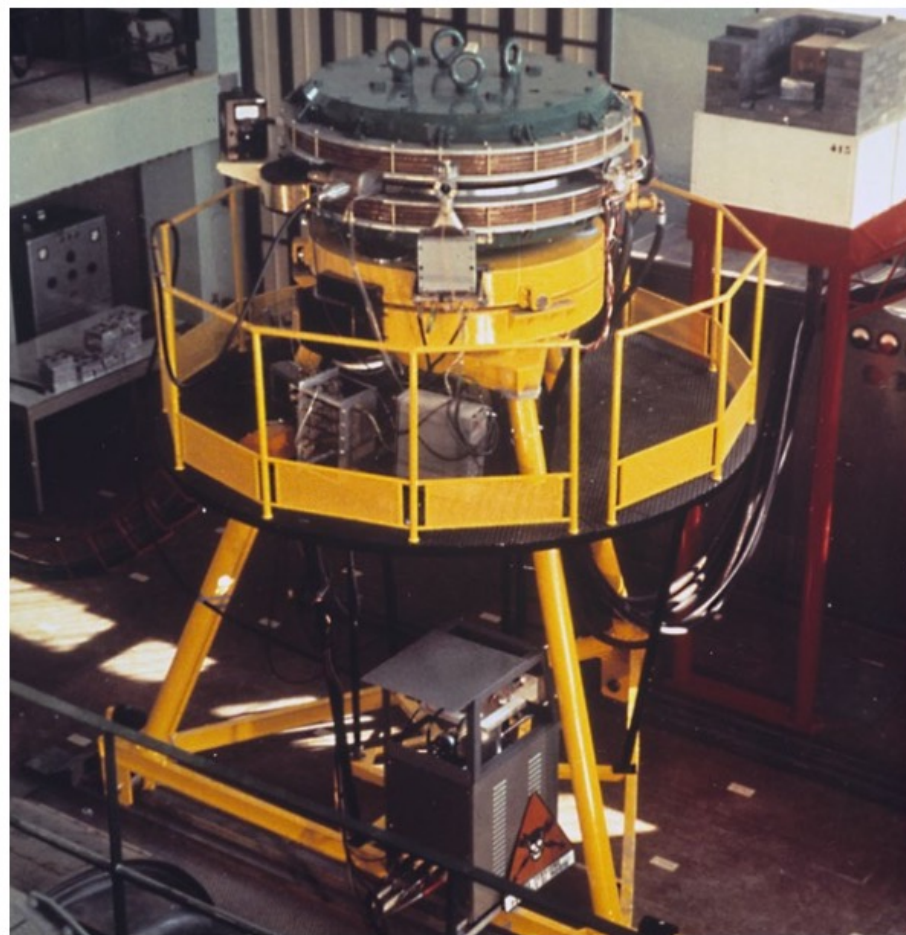
从 0 到 1，第一台小而简单 (2)

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



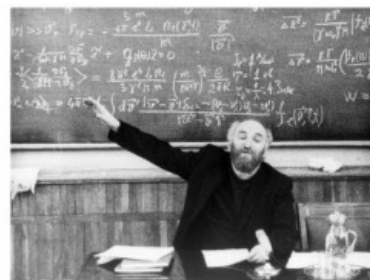
1952: Strong focusing



1959: AGS



1966: Electron cooling



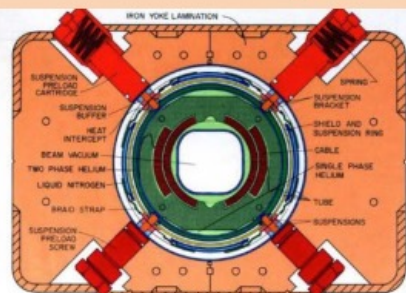
1968: Stochastic cooling



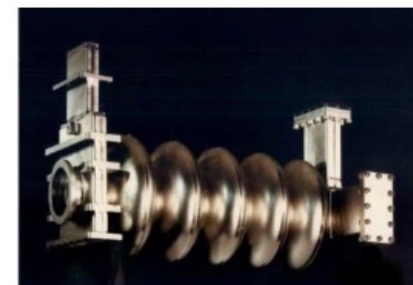
1969: 1st hadron collider



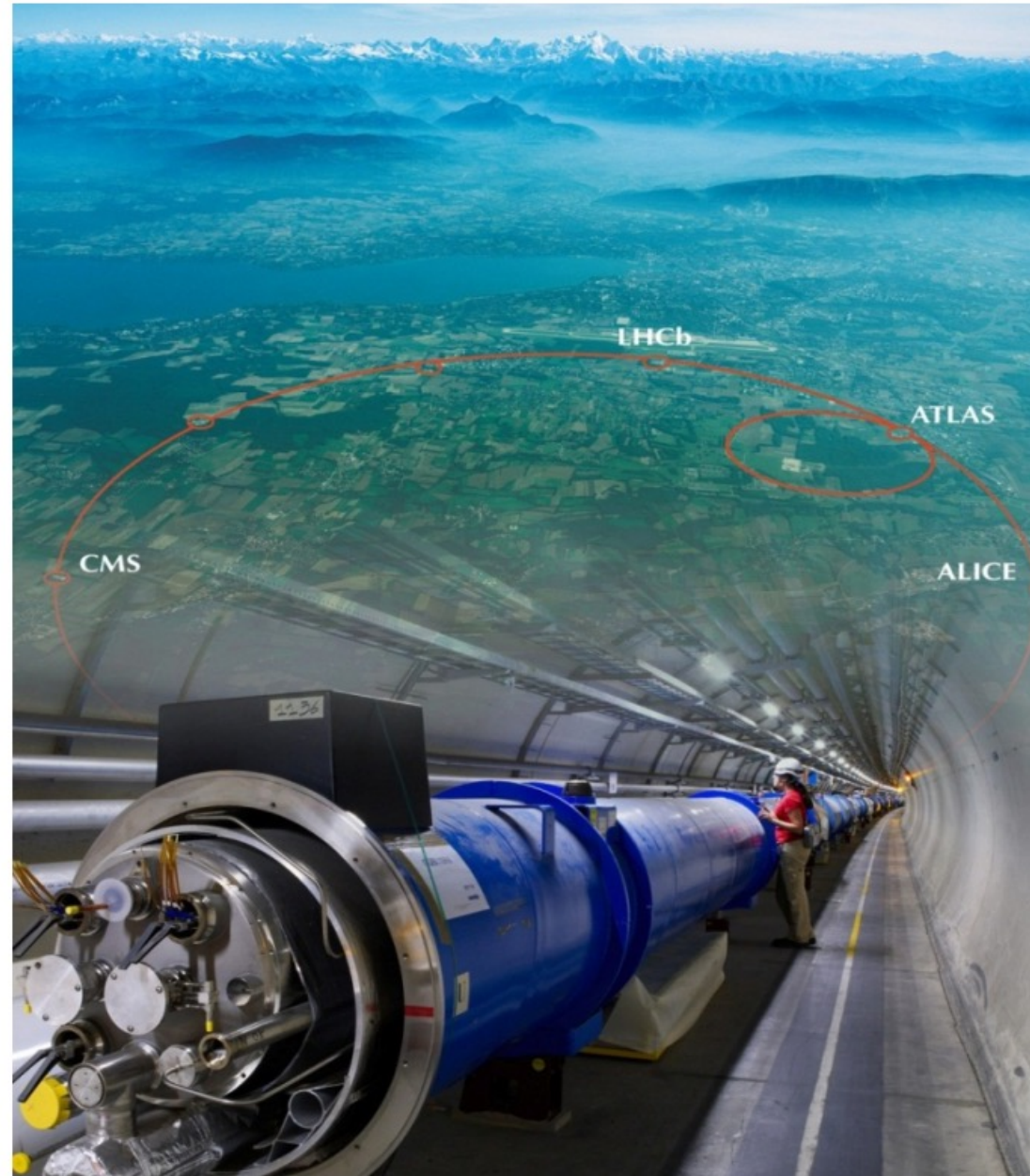
1983: SC magnet



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
Martin Orling develops the concept for a new type of accelerator, later named the synchrotron by Edwin McMillan.



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



FFAG
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 Uwebrock Thomas 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.



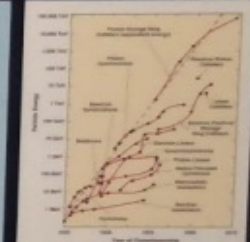
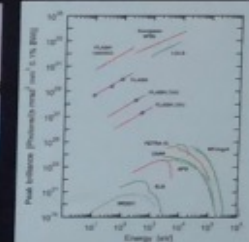
Electron cooling
Gersh Budker invents electron beam cooling at the Institute for Nuclear Physics in Russia.



Stochastic cooling
Simon van der Meer invents stochastic beam cooling, a technique enabling cooling of antiproton beams. The proton-antiproton collisions in the 1970s at CERN lead to the discovery of the Z and W bosons.



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



Evolution of photon energy and peak brilliance of accelerator-based light sources. A modern light source can take crystal clear images at the angstrom scale ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ meters}$) with femto-second resolution ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ seconds}$).

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



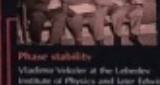
World's first accelerator
Carlton King develops the concept of a linear particle accelerator (linac). Four years later, Rolf Widerøe builds the world's first linac in an 88 cm long glass tube in Aachen, Germany.



Mysteron
Russell and Sigurd Varian and William Hansen invent the mysteron, a high-frequency amplifier for generating microwaves, at Stanford University. A similar device is proposed by Agnes Ferguson-Fell and Oskar Holt in 1935.



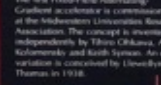
Phase stability
Vladimir Veksler at the Leningrad Institute of Physics and later Edwin McMillan at the University of California, Berkeley, independently discover the principle of phase stability, a cornerstone of modern accelerators. The principle is first demonstrated on a modified cyclotron in 1946 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 Harold Sacher at Brookhaven National Laboratory and, independently, Nicholas Christofilos earlier in 1930 in Greece discover the principle of strong focusing, strong focusing and phase stability form the foundation of all modern high-energy accelerators.



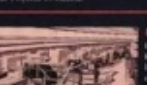
Modern synchrotron
The first two proton synchrotrons using strong focusing — PS at CERN and AGS at BNL — are built. An electron synchrotron using strong focusing is built earlier in 1964 at Cornell University.



Collider
ADON, the first electron-proton collider is built at Frascati, Italy. It is followed by two electron-electron colliders, Princeton-Stanford Collider in the U.S. and VEPP-1 in Russia, leading to a continuing evolution of electron-proton colliders and factories around the world.



RFQ
Vladimir Teplyaev and Yuri Kaprinets invent the radio-frequency quadrupole linac. The first RFQ is built in 1972 at the Institute of High Energy Physics in Russia.



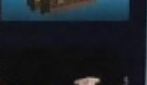
Linear collider
S.L.C., the first linear collider proposed by Burton Richter, is built at SLAC. The linear collider concept is developed by Martin Tigner in 1965.



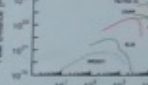
Superconducting RF technology
CEBAF, the first large accelerator using superconducting radio frequency technology, is built at the facility later named Jefferson Laboratory.



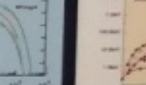
Wise and tall of SSC
Construction of the Superconducting Super Collider, planned to be the largest accelerator in the world, begins in 1989. The project is canceled by the U.S. Congress in 1991.



FEL
Min Maierly invents and builds the first free electron laser at Stanford University.



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



Future
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.



Van de Graaff generator
Robert Van de Graaff invents the Van de Graaff generator at Princeton University. He also constructs the first tandem accelerator. Two generators in tandem in 1959 at Chalk River.



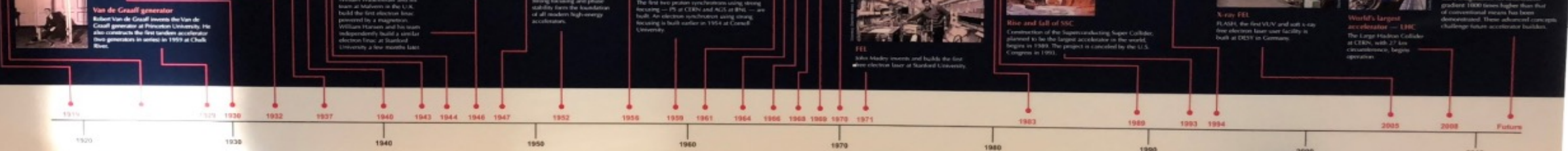
Donald Kerst at the University of Illinois constructs the first betatron, proposed by Joseph Slogar and others in the 1920s.



Electron linac
William Workman and his team at Michigan in the U.S. build the first electron linac, proposed by a magnetron. William Hansen and his team independently build a similar electron linac at Stanford University a few months later.



Milestones
Timeline of key events in the history of particle accelerators from 1920 to 2010.



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



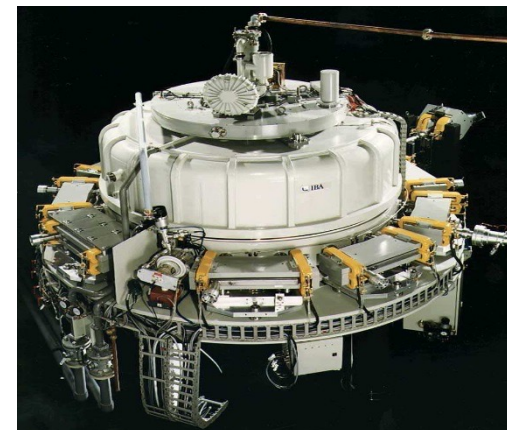
Neutron Sources



Medical Accelerators

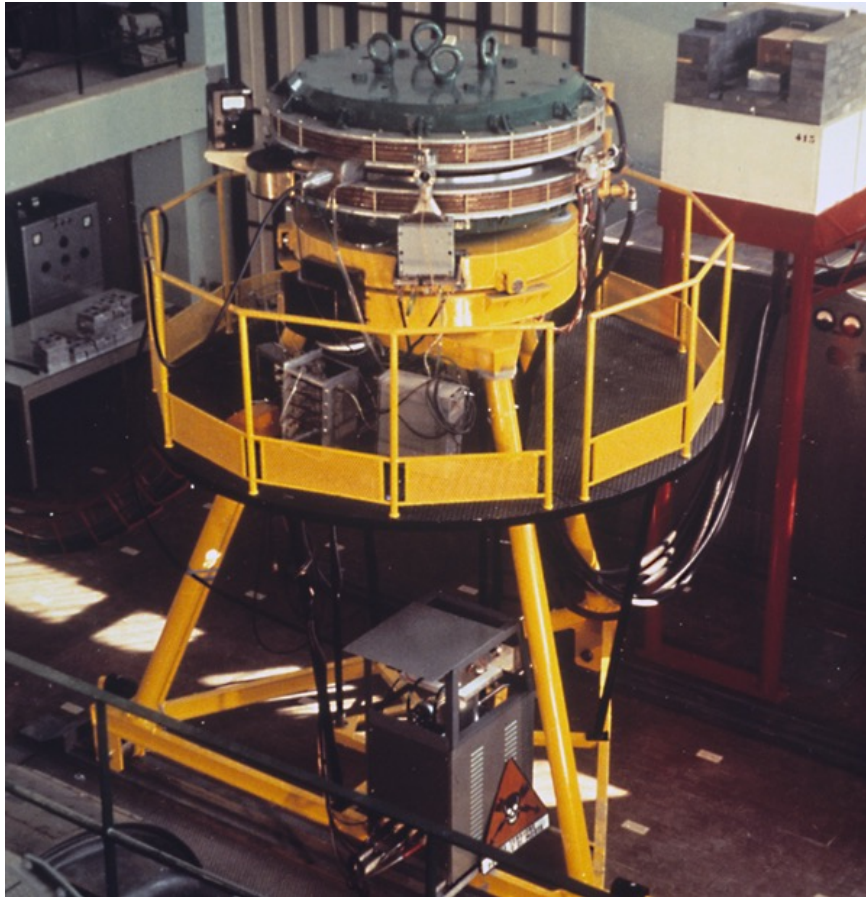


Industrial Accelerators



First Generation of Colliders – 1960s

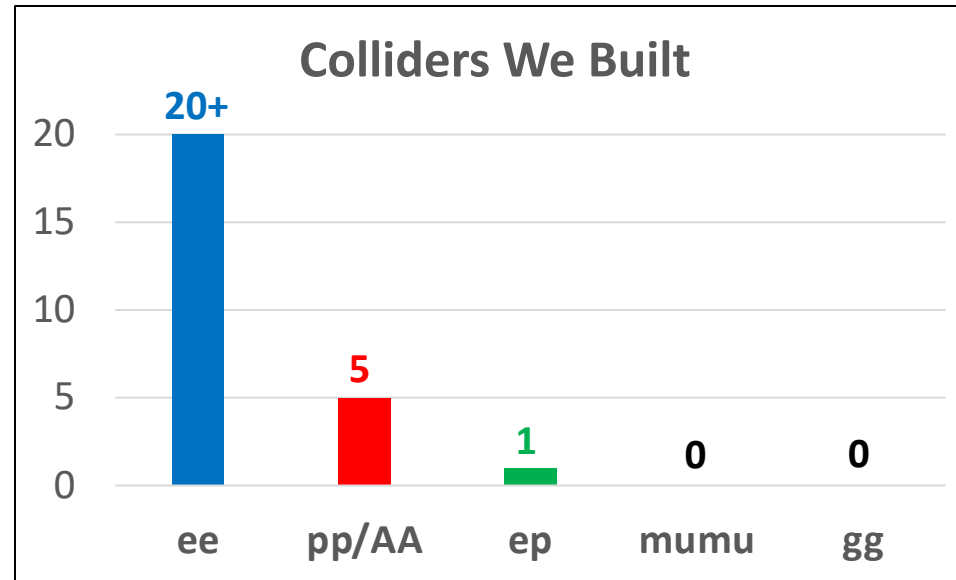
1961: AdA first lepton collider



1969: ISR first proton collider

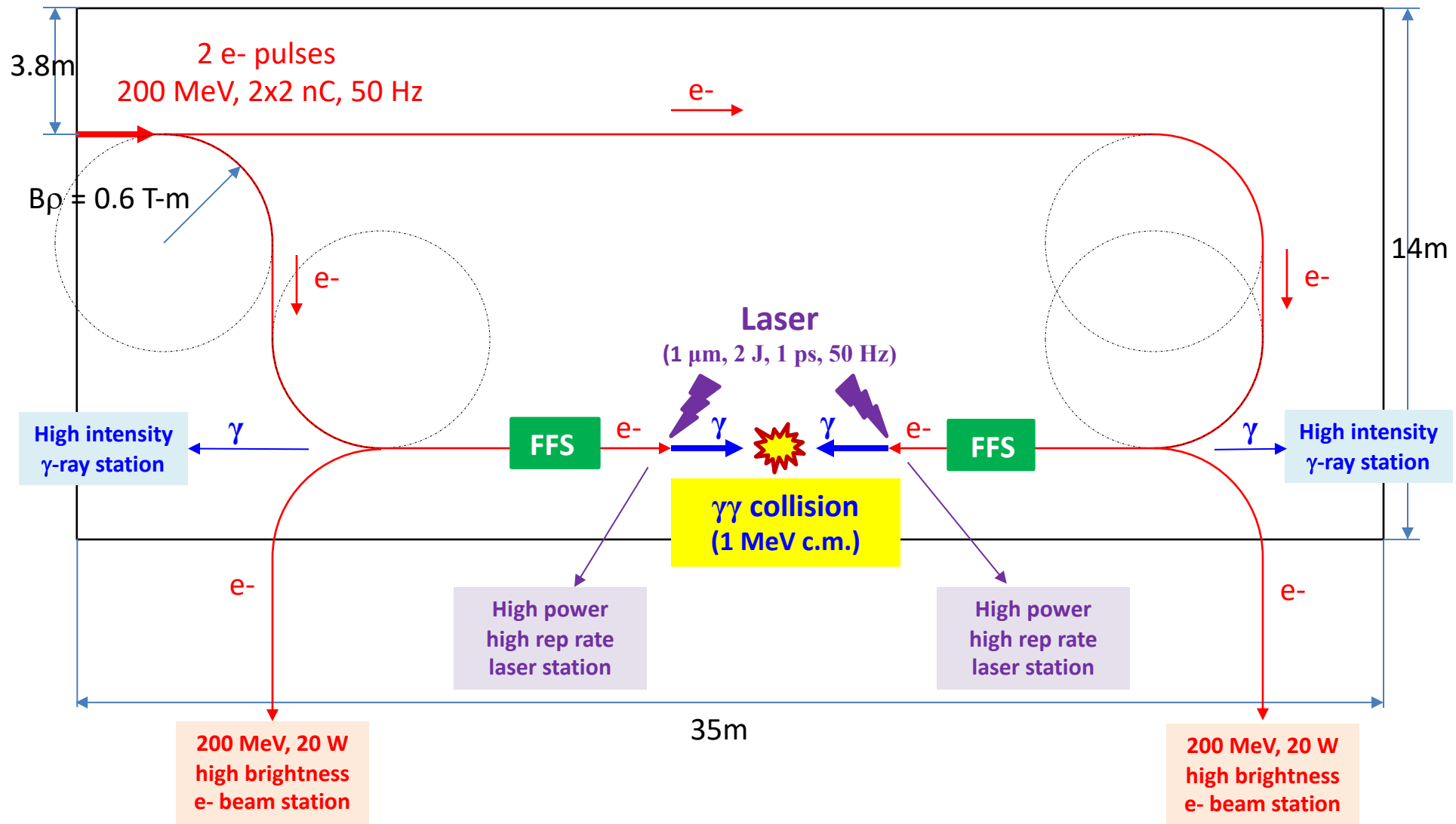


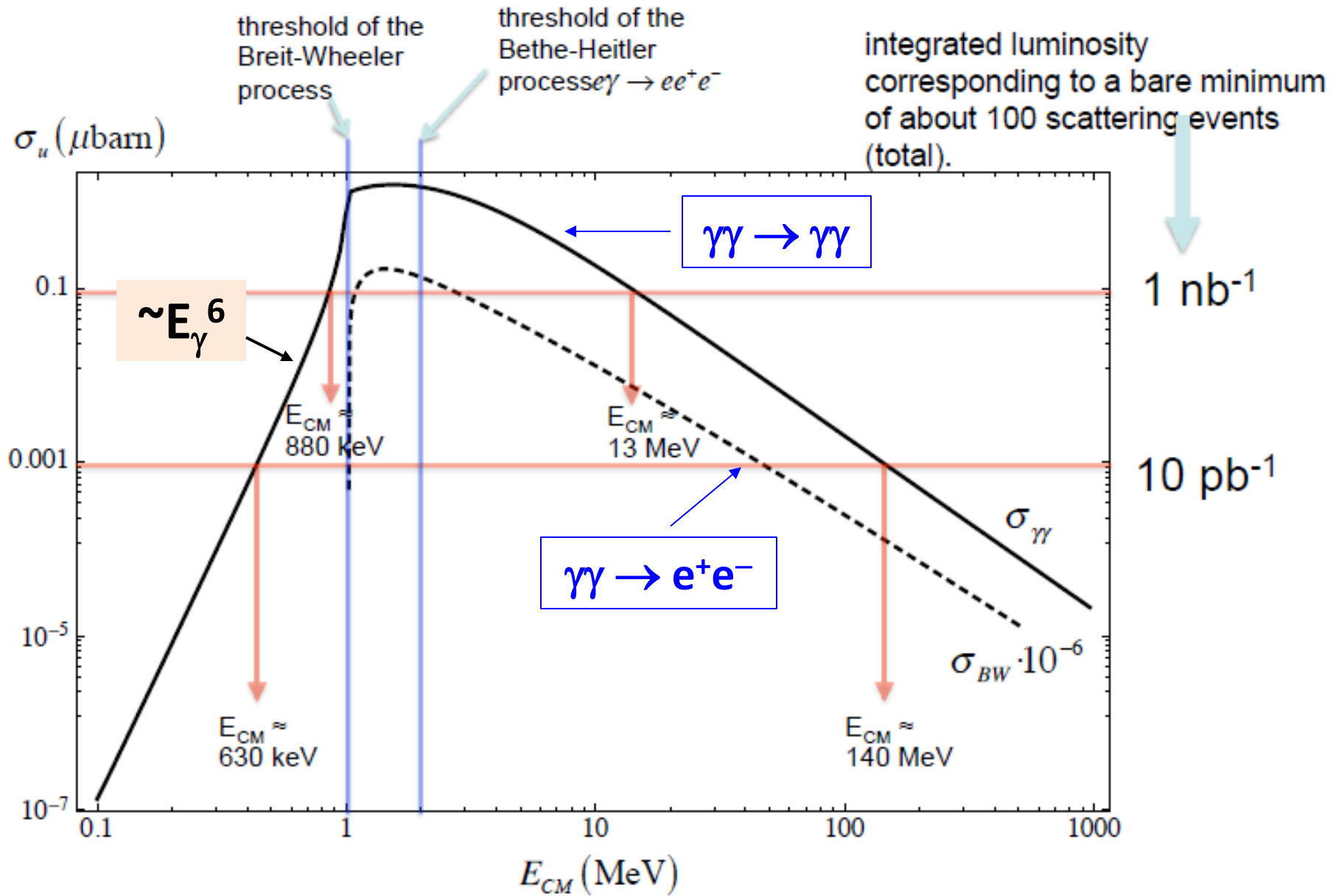
Scores of Colliders were built



- 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**

伽马光子对撞机及综合束流设施

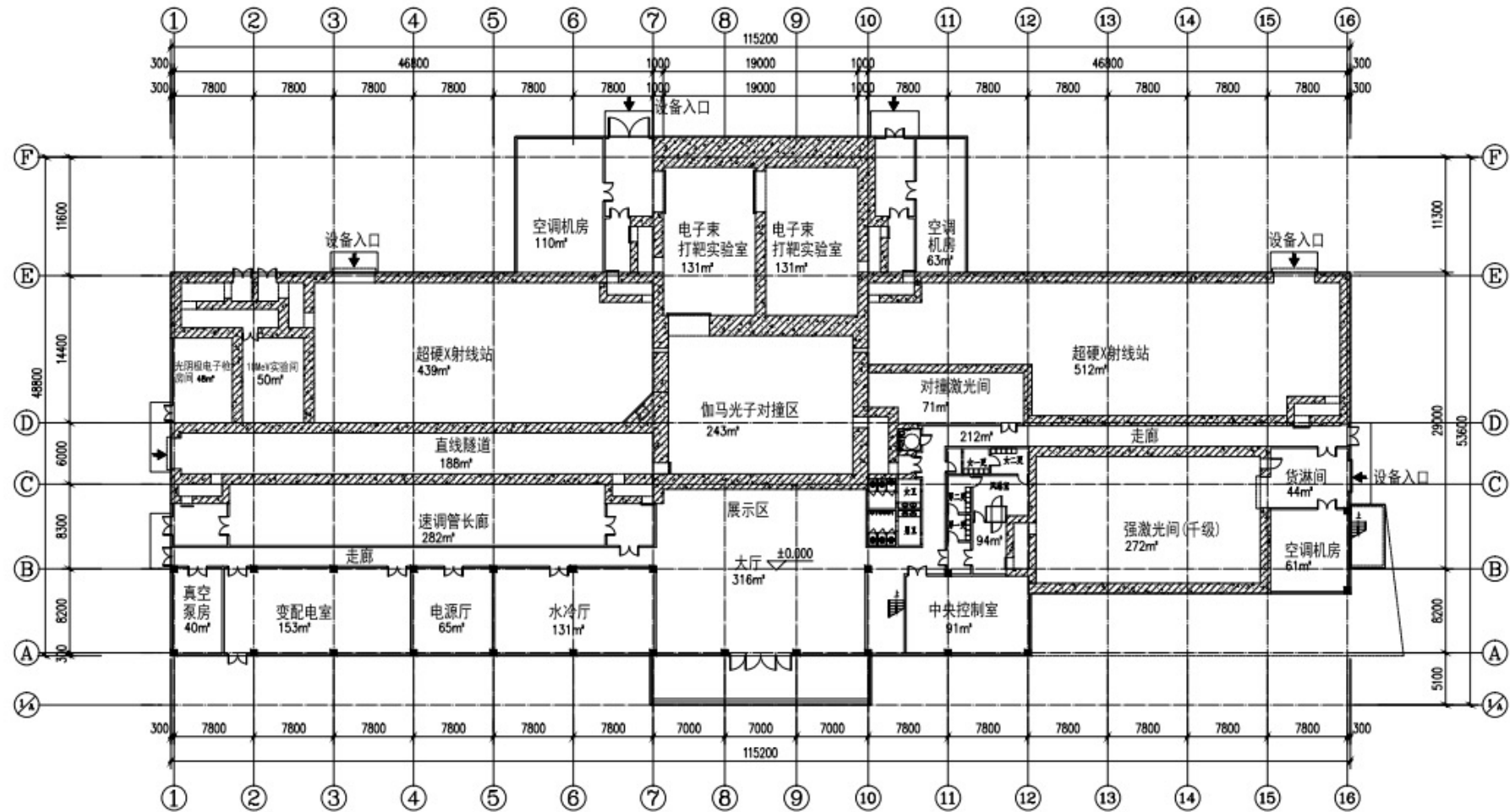




17/04/13

Edoardo Milotti - LNF/IRIDE
Edoardo Milotti - LNF/IRIDE

Edoardo Milotti (LNF-IRIDE)



1#装置楼一层平面图

1F建筑面积4870m²

1#装置楼面积指标

一层建筑面积	4870m²
二层建筑面积	630m²
总建筑面积	5500m²



主要技术经济指标表

名称	单位	规划指标
总用地面积	m ²	39367
建筑基底面积	m ²	6908
总建筑面积	m ²	11550
其中		
地上	m ²	11550
地下	m ²	0
容积率	—	0.29
建筑密度	%	17.55%
绿地面积	m ²	13779
绿地率	%	35.00
停车位(地上机动车)	个	24

建筑单体面积明细表

名称	建筑 面积(m ²)	建筑 层数	建筑 高度(m)
1#伽马光子装置楼	5500	1F/2F	16.8
2#实验中心	5000	4F	21.0
3#动力中心	1050	1F	8.8
合计	11550		



鸟瞰图

伽马光子对撞机及综合平台：FLASH医疗及单色CT

世界上第一台伽玛光子对撞机

真空到底是什么？
有没有暗光子-暗物质？
光子有没有结构？

- 世界首次在实验室中观察和测量实光子与实光子之间的对撞和散射
- 世界首次在实验室中观察和测量从纯能量(γ)到纯物质($e+e^-$)的转化

高亮度 γ 束平台×2
600keV

发动机叶片探伤？
金属相变过程-液滴凝固？
海水腐蚀机理？
FLASH医疗，单色CT

- γ 静态成像：6cm厚钢材，1-5微米分辨率
- γ 动态成像：50帧/s，金属液滴凝固过程，材料腐蚀过程研究

高性能电子束平台
×2

高温超导体的机理？
极端环境的材料相变？

- 材料辐照
- 几十fs超快动力学成像
- 电子照相
- VHEE电子闪放治疗

强激光束流平台×2

“人造太阳”中的未知物理？
材料表面改性，抗腐蚀？

- 强激光与物质相互作用
- 高能量密度物理
- 惯性约束聚变物理
- 超快脉冲中子源 ps $10^{6-7}/s$
- 金属材料表面处理

伽马光子对撞机及综合束流设施：材料、医学等

学科优势

- **世界首台伽玛光子对撞机**
- **世界首次**在实验室中观察和测量实光子与实光子之间的对撞和散射
- **世界首次**在实验室中观察和测量从纯能量(γ)到纯物质($e+e^-$)的转化
- 探索**暗光子、光子量子结构、正负电子偶素**等新物理；
- **蕴含并建立**加速器、强激光、核探测器与核电子学、等离子体、材料应用开发、医学物理等**重要学科**

科学前沿应用

- **高亮度伽玛束平台**： γ 静态成像：6cm厚钢材，1-5微米分辨率； γ 动态成像：50帧/s, 金属液滴凝固过程，材料腐蚀过程研究
- **高性能电子束平台**：材料辐照；几十fs超快动力学成像；电子照相
- **强激光等离子体平台**：强激光与物质相互作用；高能量密度物理；惯性约束聚变物理；超快脉冲中子源 ps $10^{6-7}/s$ ；金属材料表面处理

产业化应用延展

- **高亮度单色 γ CT**：材料无损探伤、医用单色 γ CT，FLASH医疗；
- **强流电子加速器核药制备**：Mo99-Tc99m；Ac226，Cu64，Cu67等；
- 强流电子加速器**FLASH医疗设备**；
- **新型高精度高分辨快速SPECT-CT**：50微米分辨，>1000Hz成像频率；
- **桌面化台式x、 γ 光源**；
- **激光脉冲中子源**等。

伽马光子对撞机及多束流平台参数及运行指标

高性能电子束平台
×2

平台指标：
200MeV, 50Hz, 2ps, 2nC

电子束	
能量E	200 MeV
电荷Charge	2 nC
束斑半径 $\sigma(x,y)$	2 μm
发射度 ϵ	6.4 nm
横向振荡 β^*	626 μm
纵向束长 $\sigma(z)$	2 ps
重复频率Rep rate	50 Hz
对撞亮度L	1.6×10^{28}

强激光束流平台×2

平台指标：2J, 50Hz, 2ps / 1-2J 30fs 30TW

激光束	
波长 λ	1.054 μm
束腰Waist	5 μm
瑞丽长度 Rayleigh	298 μm
脉冲能量 Pulse energy	2 J
脉冲长度 Pulse length	1 ps
频率Rep rate	50 Hz
非线性强度 a_0	0.45

高亮度 γ 束平台×2

平台指标：
600keV, $5 \times 10^{11}/s$, 50Hz, 2ps, 束斑1-5 μm

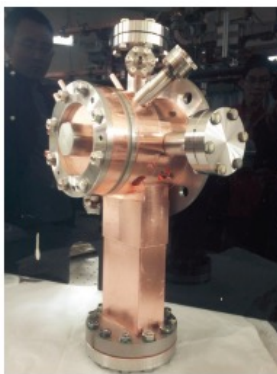
世界上第一台伽马光子对撞机

伽玛束/ 伽玛对撞参数	
能量E(c.m., 峰值)	1 MeV (2 x 0.5)
光通量N (total)	$2 \times 10^{11} /s$
频率	50 Hz
束斑半径 $\sigma(x,y)$	2 μm
对撞亮度L	$\frac{1}{1} \times 10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
事例率	7 /小时
	30,000 /年

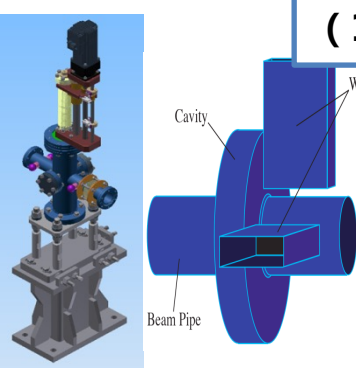
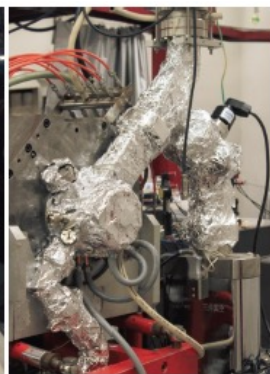
伽马光子对撞机及综合束流平台组成部分及关键技术

- 加速器200MeV 50Hz 2ps：束流测试、真空系统、磁铁
- 高平均功率激光：2J 50Hz 2ps
- 对撞机谱仪与靶室：1302通道 1GHz采样
- 时空同步系统 1ps 1微米

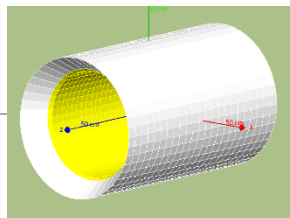
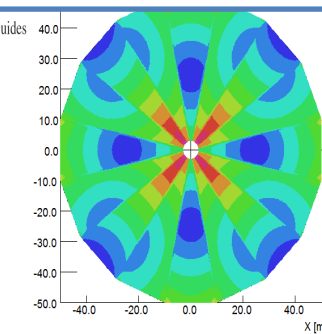
- 超高梯度紧凑型永磁铁技术
- 紧聚焦型高亮度伽玛光源技术：紧聚焦(4-5微米)，焦点处亮度 $2.55 \times 10^{16} / (mm^2 s) @ 2.5 mrad$
- 高分辨率伽玛成像技术：1-5微米分辨率，cm量级的钢材等高密度成像
- 几十fs超快动力学过程成像技术
- 多粒子综合探测技术：多通道(1300)高采样频率(1GHz)的，动量能量耦合



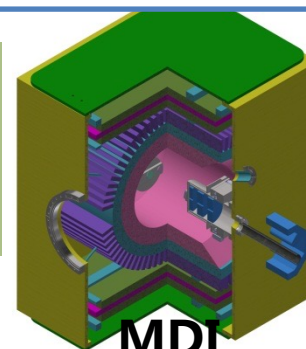
光阴极枪



束测系统



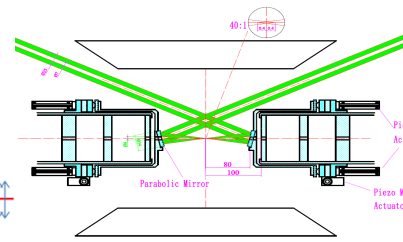
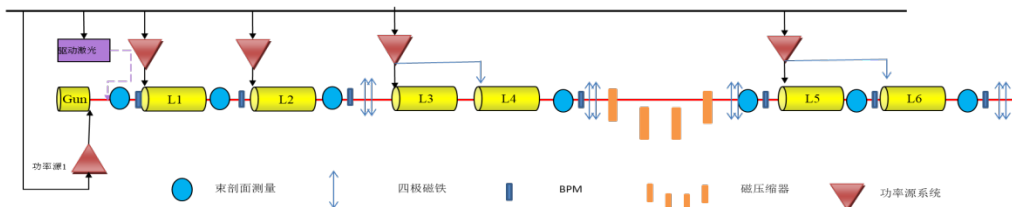
干路探测器



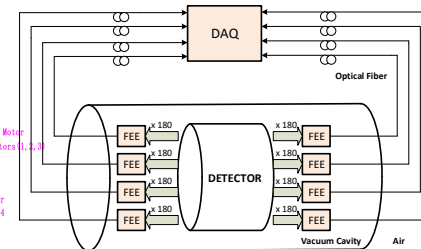
MDI

➤ 600T/m, 近2T

直线加速器



对撞区设计



快速ADC电子学

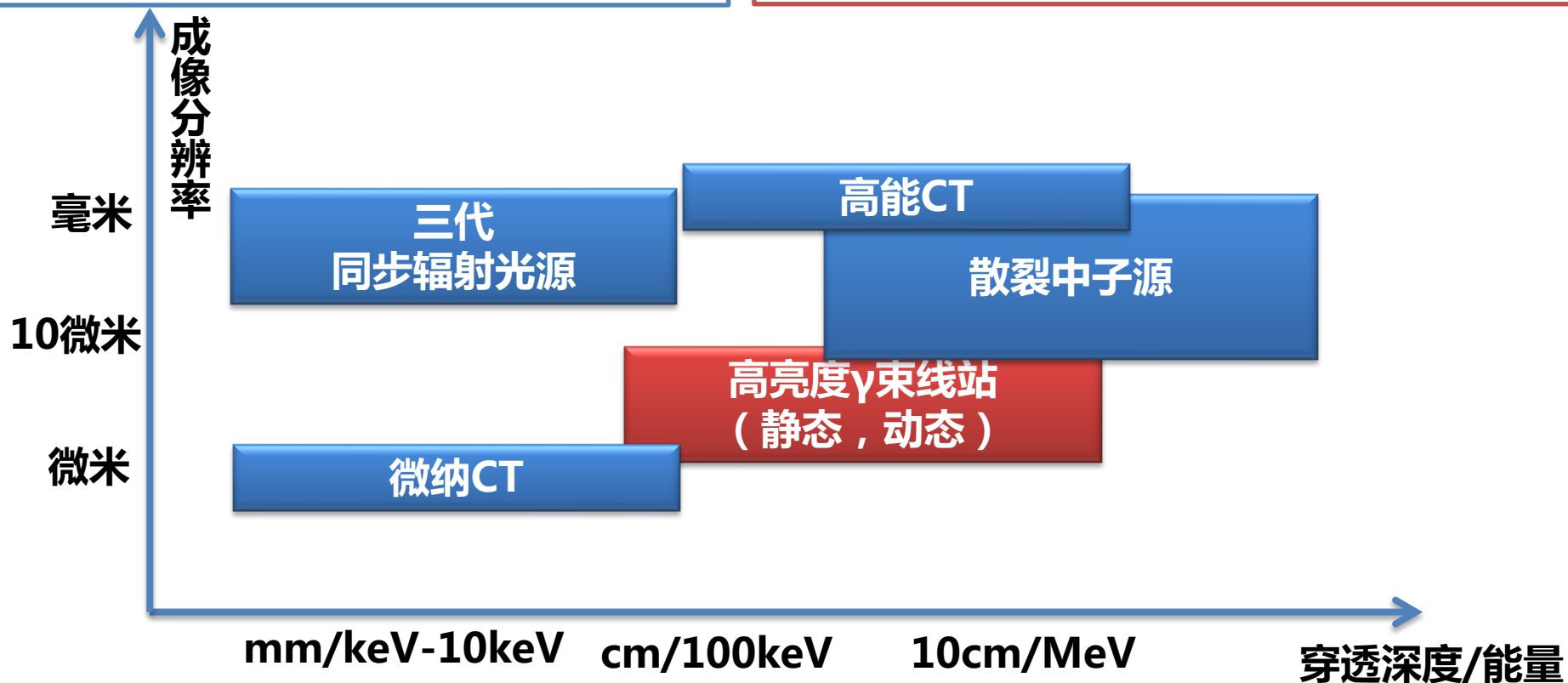
高亮度 γ 束线站

与同步辐射源、散裂中子源、工业CT优势互补：

7.5cm钢材穿透，1-5微米分辨率，准直性好2.5mrad

静态成像---发动机叶片探伤：6cm厚钢材，1-5微米分辨率

动态成像---金属相变过程-液滴凝固/海水腐蚀机理：50帧/s, 6cm厚钢材，1-5微米分辨率



★ 产业需求



中国航天



中钢集团

宝钢集团广东韶关钢铁有限公司



中核集团



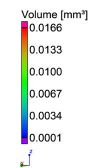
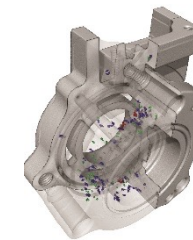
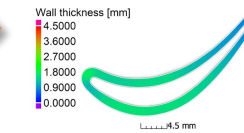
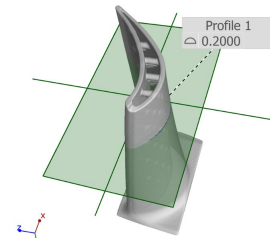
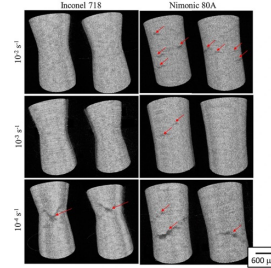
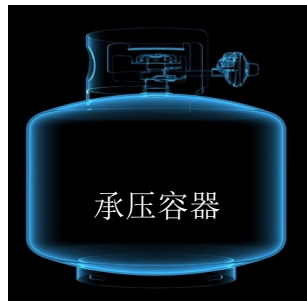
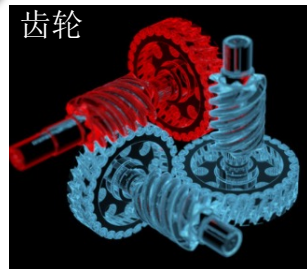
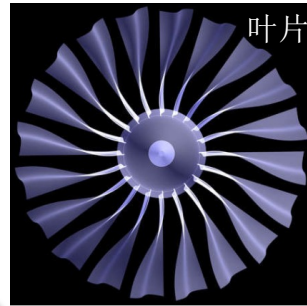
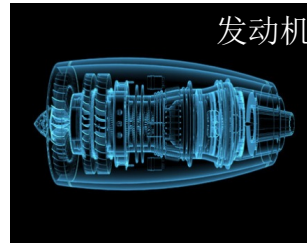
中国航天科工集团
有限公司



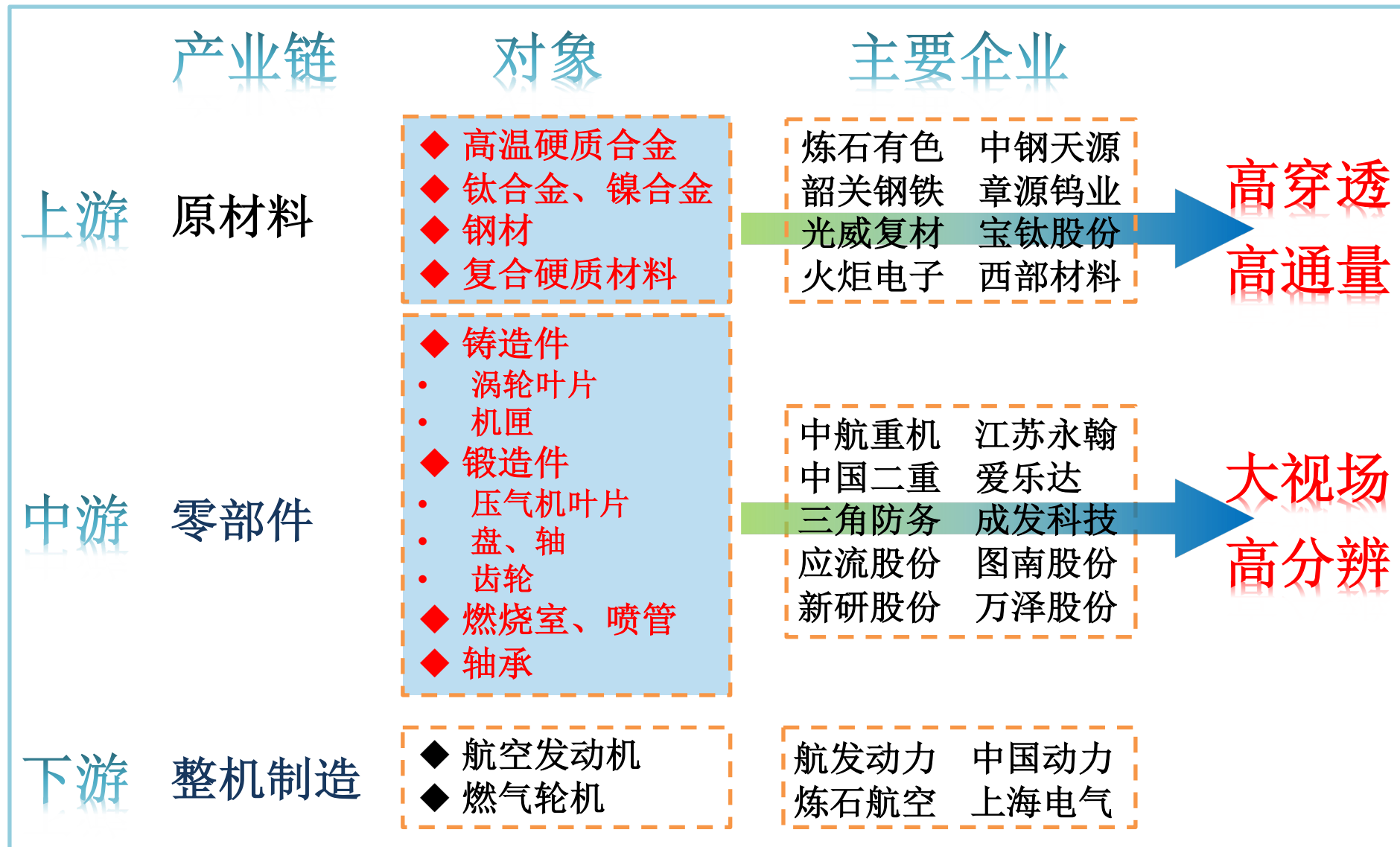
美铝（广州）航空材料有限公司
AA(Guangzhou)Aviation Materials Co.,LTD



GEI 格林美
资源有限 循环无限
Recycling for future!



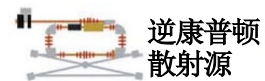
需求分析—以航空发动机和燃气轮机（“两机”）为例



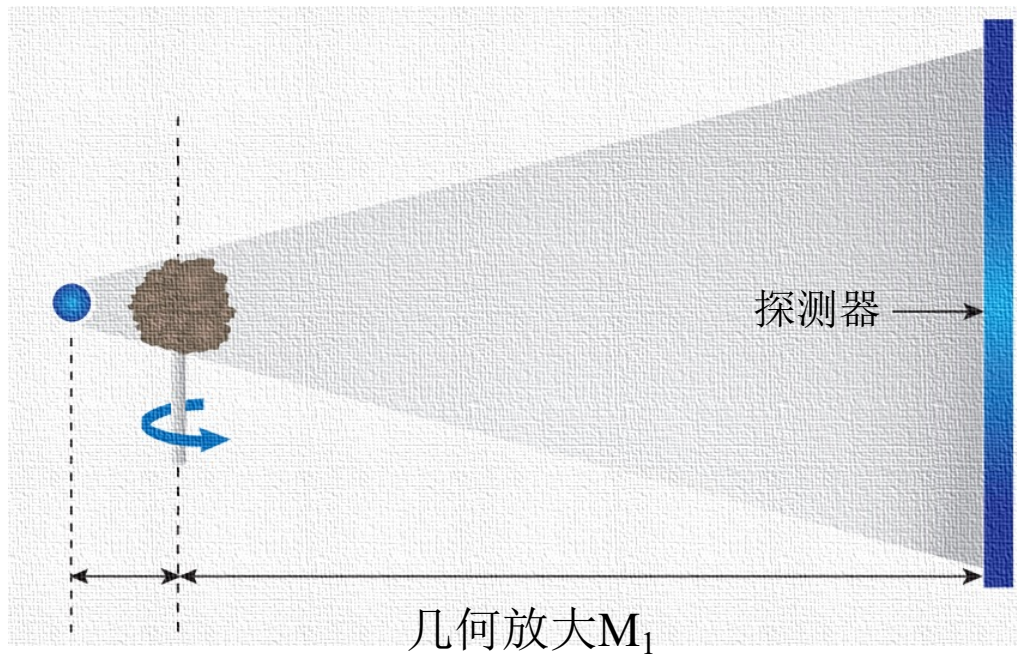
逆康普顿散射源特点:

- 通量高
- 能区高
- 谱宽较窄
- 发射度较低
- 建造难度较低
- 成本适中
- ✓ 弥补同步环在超
高能区的不足
- ✓ 光束品质接近同
步光
- ✓ 建设性价比高

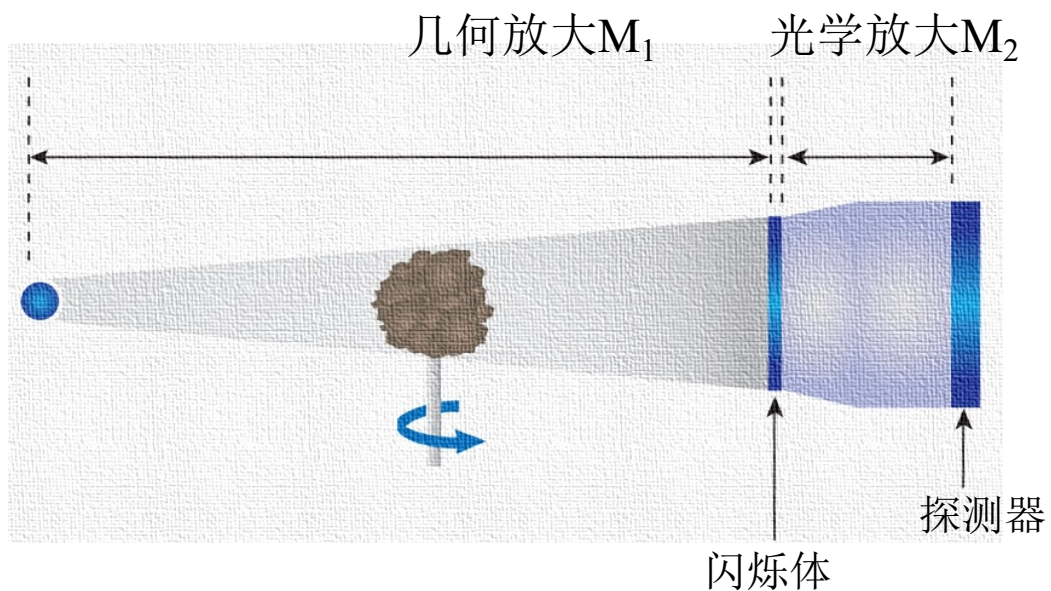
总通量	低				高
束斑	小				大
能区	低				高
谱宽	窄				宽
发射度	小				大
获取方式	容易				难
基础设施	有限				高端
成本	低				高



实验站1: 侧重**大视场**



实验站2: 侧重**高分辨**

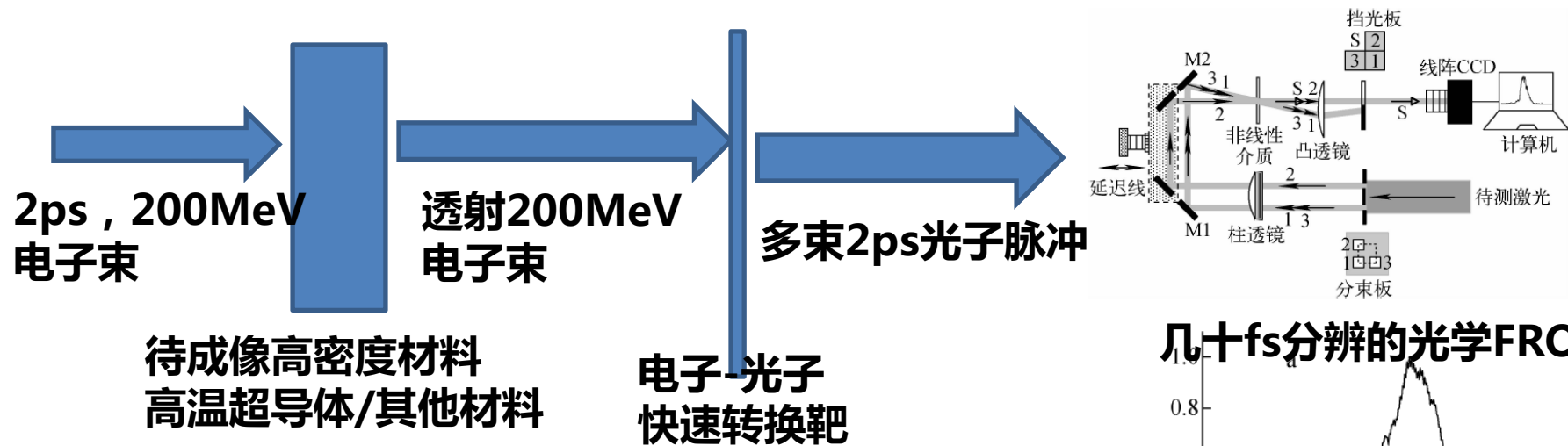


实验站1设计参数

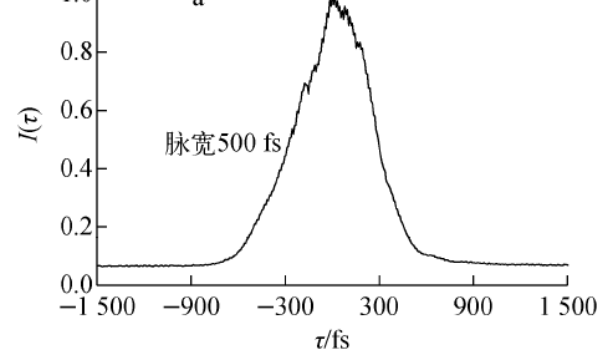
空间分辨率:
$$\sigma = \frac{\sqrt{\left(\frac{p}{M_2}\right)^2 + [s(M_1 - 1)]^2}}{M_1}$$

高品质电子束线站

➤ 高温超导体的机理、极端环境的材料相变：几十fs超快动力学成像



几十fs分辨的光学FROG系统



高品质电子束线站

- 电子照相：物态方程，相变分析，mm 铝穿透，5-10微米分辨
- 材料辐照改性

对于爆轰物理、材料动载响应、高能量密度物理中的物理机制的把握，需要发展从微观、介观到宏观的不同时空尺度的实验诊断技术。

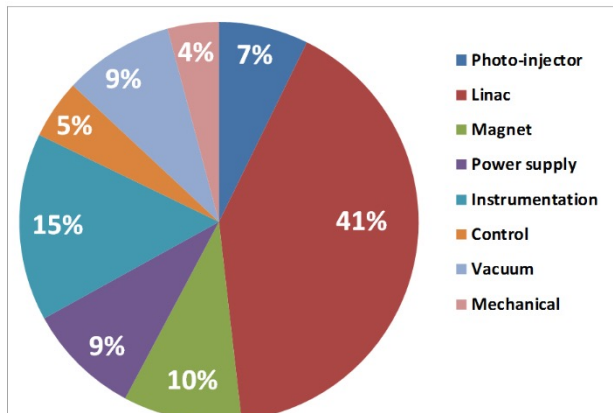
	X光机	同步辐射	电子透镜	本项目高能电子照相
粒子种类	X 光	光子	e-	e-
能量	~100keV	<100keV	100keV量级	200MeV
能谱	宽谱+特征谱	宽谱	单能	单能
成像方式	透射、 动态	透射、衍射、 静态	透射、 静态	透射、 动态
焦斑	~1mm	数十μm	/	/
样品厚度	<1g/cm ²	<1g/cm ²	100~500nm	0.3g/cm ² (1g/cm²)
空间分辨率	100~200μm	~μm	~nm	10μm (50μm)

注：0.3g/cm²的样品等效厚度约为1mm厚的铝材料。

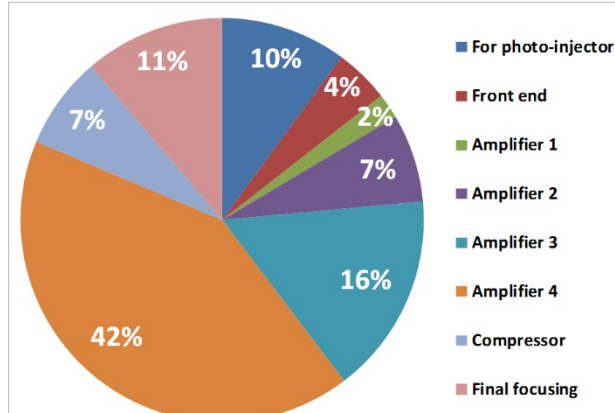
伽马光子对撞机及多束流平台预算（不含土建）

设备与分束线站	26,319(万元)
加速器 (*)	5,230
激光器 (**)	5,950
探测器	1,634
对撞区	105
同步系统	
物理分析	100
伽玛束线站	4500
电子束线站	5000
强激光束线站	3500

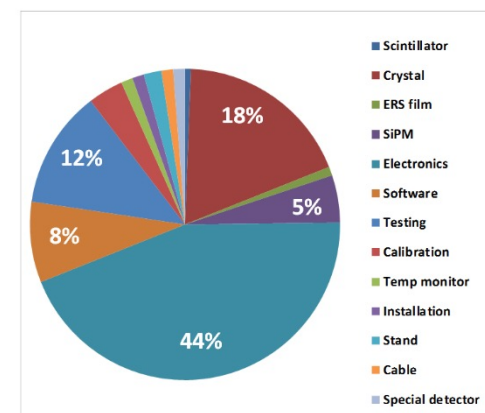
Accelerator Cost Breakdown (03/20/2019)



Laser Cost Breakdown (03/20/2019)



Detector Cost Breakdown (03/20/2019)



伽玛对撞机发展规划：产学研医一体化协同发展

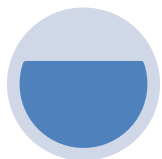


1、扬帆起航

2022年10月-2023年12月31日

——完成120MeV电子直线加速器建造

并利用该加速器凝聚人才，吸引并建立加速器相关的人才队伍，开展加速器应用于：农业辐照育种、核药制备验证、医学闪放治疗、材料辐照胶联以及韧致辐射成像等交叉研究。



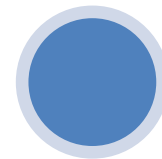
2、扎实推进

2024年1月-2025年6月

——建成单条高亮度伽玛束线

借助首台电子加速器建造，推动整个伽马光子对撞机立项，从广东省发改、深圳发改，获得部分经费，启动高零度伽马束线的建设；

建成国内紧凑型高亮度逆康普顿散射伽马光源，开展材料无损探伤、辅助高端装备制备、医学器官高清成像（人脑深入研究）等交叉研究；



3、开花结果

2025年7月-2027年12月31日

——建成世界首台伽马光子对撞机

建成世界首台伽马光子对撞机，开展世界首次光光弹散、双实光子BW过程的实验验证，获得关键一手数据，实现学科融通；

进一步开启产业化之路！

扬帆起航：120MeV电子直线加速器

推动立项

为整个项目立项奠定坚实基础，为争取**教育部、广东省以及深圳市立项经费**提供重要支撑

学科建设

推进**加速器物理与设计、医学物理、材料相关学科建设与交叉融合**，可筹建**省市重点实验室**

凝聚队伍

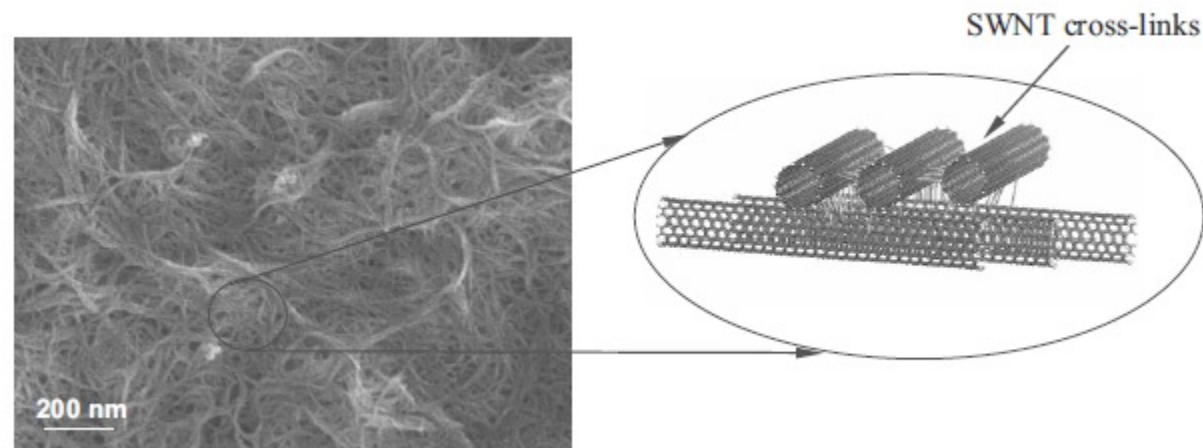
平台集聚相关人才，培养**加速器以及医学物理、材料相关人才**

促进融资

作为**闪存医疗关键原理验证样机**，可启动**天使轮以及Pre-A轮融资**，促进**高端医疗设备研发**，成立**地校联合实验室**

与农学、材料、医学、生态等结合：模拟太空辐射环境

- 利用电子束对材料进行辐照，被辐照物质的物理性质和化学组成发生变化，用于材料分析，改性（半导体、纳米材料、磁性材料、生物材料等）
- 辐照加工
- 辐照损伤试验
- 材料分析等
- 生物医学领域
- 优点：易控制，效率高，无化学污染，可带包装，冷加工等



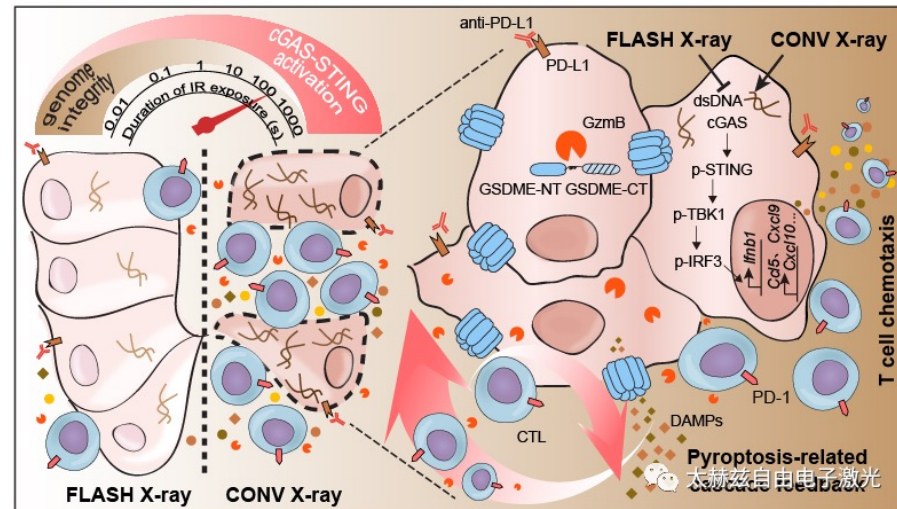
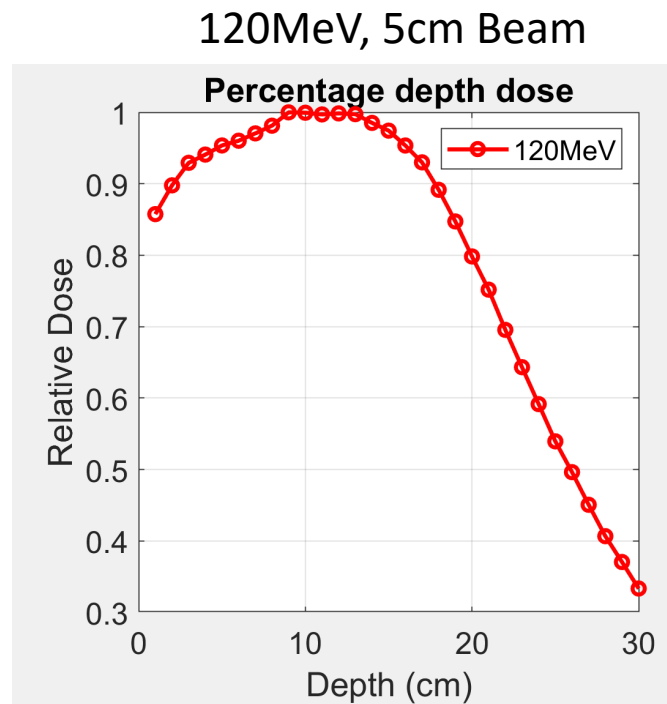
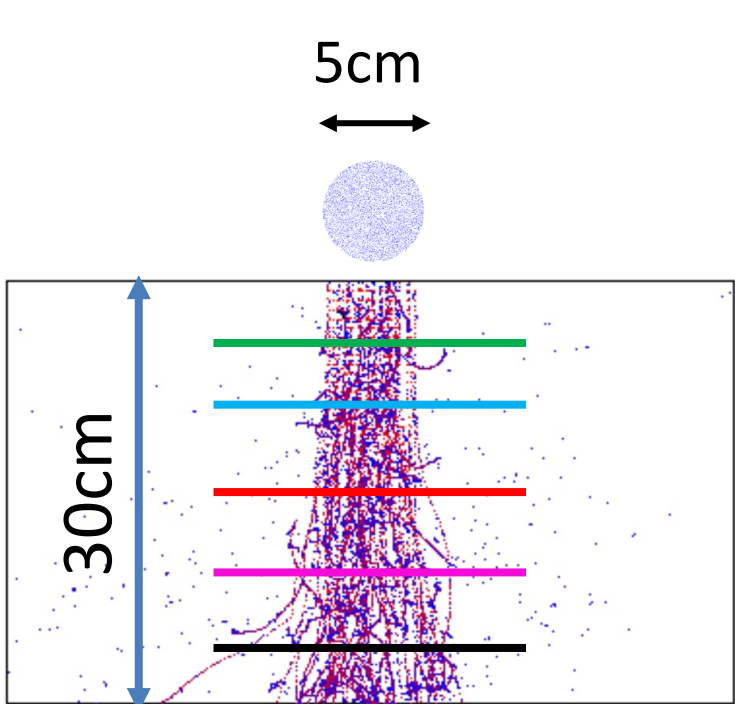
碳纳米管辐照交联
(通过化学键连接形成网状结构)



3年内不生虫、霉变；
延长保存期6~12个月

重点与医学结合：开展中型动物闪放研究

- 闪放机理开放课题，待解
- 开展猫狗等动物的闪放机理研究



“FLASH X-ray spares intestinal crypts from pyroptosis initiated by cGAS-STING activation upon radioimmunotherapy”为题，2022-10月发表于PNAS杂志

该团队提出了全新的“DNA完整性”假说，以解释FLASH效应；相较于常规剂量率X射线，平均剂量率为110-120 Gy/s的FLASH光子照射显著缓解了免疫检查点PD-L1敲除小鼠的肠道损伤，显著提高了小鼠的生存率

- 一般放疗仪中低能电子 (<20MeV) 穿透能力小，不能治疗深度肿瘤；
- 一般放疗仪中X射线在10cm处的剂量为最大值的75%；
- 高能120MeV电子束的能量在10cm处达到最大值，适合治疗深度肿瘤。

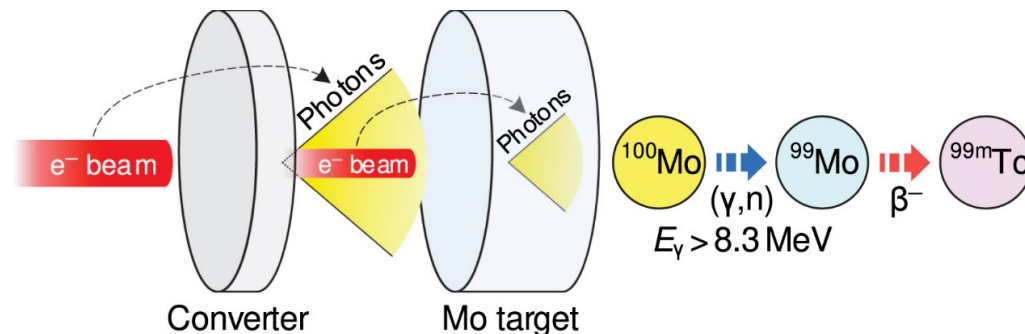
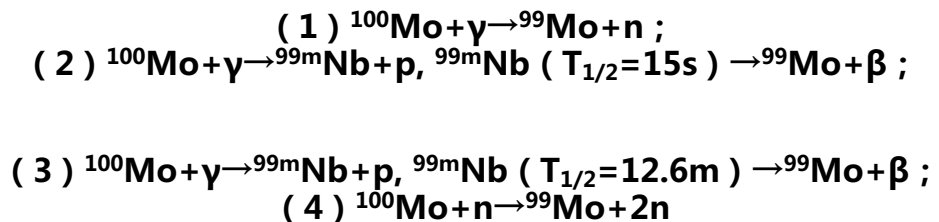
重点与医学结合：开展放射性药物研究

•规划以习近平总书记关于健康中国的重要指示精神为指引，依据《“健康中国2030”规划纲要》，结合核工业发展实际，坚持问题导向和需求牵引，明确了指导思想、主要原则、发展目标、重点任务以及保障措施，将用于指导“十四五”和今后一段时期内我国医用同位素的发展。

•医用同位素中长期发展规划（2021—2035年）规划从自主到走出去

•计划推动符合条件的核药纳入医保

1. 一台强流电子直线加速器，以高流强轰击靶靶，获得足够地区医院使用的 ^{99}Mo 同位素产量。
2. 先进的自动化靶靶系统，提高同位素转化及生产效率。
3. 辐照后同位素从靶件上的分离，提纯与封装技术，保证辐射安全及满足医疗使用条件。



项目负责人：

黄永盛 13811814119 (微信手机同号)
huangys82@ihep.ac.cn/huang_y_s@163.com



中山大学理学院教授、博导、副院长
百人计划领军人才
广东省重大人才工程引进杰出人才
深圳湾实验室同舟学者

- 在超强激光驱动等离子体强场加速离子及短寿命缪子束瞬时加速机制、
- 世界首台伽玛光子对撞机及中国未来正负电子对撞机等大科学装置前沿研究
- 极紫外光源和加速器核药制备以及闪放癌症治疗等前沿技术产业化均有重要成果。

➤ **教育经历**

- ✓ 2001.08-2009年07：清华大学工程物理系 本科、直博，导师：王乃彦院士、高喆教授

➤ **工作经历**

- ✓ 2009年08-2017年06：中国原子能科学院研究院 副研究员，历任研究室主任助理、副主任主持工作
- ✓ 2017年07-2021.06：中国科学院高能物理研究所引进优秀人才，实验物理中心，研究员，北京试验束负责人。
- ✓ 2021.06-现在：中山大学理学院 副院长，教授，博导
- ✓ 2008年-09-2021.07：核工业研究生部兼职讲师、副教授、教授
- ✓ 2018年08-2021.07：中国科学院大学兼职教授
- ✓ 2021.07-现在 中国科学院高能物理研究所 客座研究员
- ✓ 2022.04-现在 Matter and Radiation at Extremes 编委
- ✓ 2015年-现在高能量密度物理青年论坛学术委员会 委员
- ✓ 2022年-现在 深圳湾实验室同舟学者

数学、物理学两个一级学科， 产学研一体化，实现理学院跨越式发展 助理中国跨越中等收入陷阱



中山大学 理学院
SCHOOL OF SCIENCE, SUN YAT-SEN UNIVERSITY



加速器束流物理、磁铁、
真空、机械、辐射防护等
加速器相关专业

加速器物理
与技术

强场激光技术、
等离子体加速、
新型强辐射源、
超导超强激光技术
等激光等离子体
相关专业

应用数学、
统计学

等离子体
物理

核医学诊断、
治疗，辐射剂
量计算与探测
等相关专业

医学物理

粒子物理
理论与实验

理论物理、粒子
物理实验数据分
析、成像和数据
获取软件设计等
粒子物理相关
专业

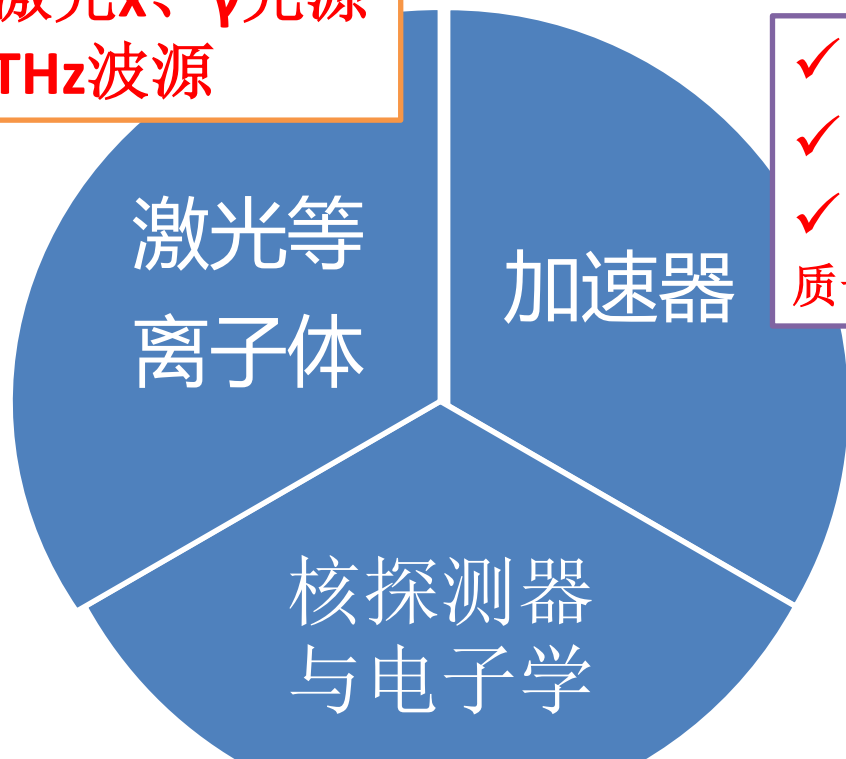
粒子物理探测器、新型探测
器技术、核电子学等核探测
器与核电子学相关专业

核探测器
与核电子学



理学院——产学研一体化

- ✓ 强激光脉冲中子源
- ✓ 桌面强激光x、 γ 光源
- ✓ 强激光THz波源

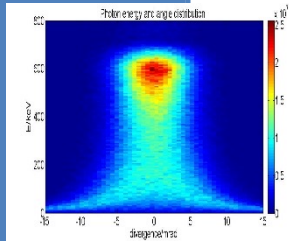


- ✓ 核药制备
- ✓ CT诊断
- ✓ 癌症治疗
质子束治疗、BNCT

- ✓ 高可靠抗辐照电子学芯片
- ✓ 高灵敏高分辨快速新型SPECT/CT
- ✓ 高效灵敏中子、伽玛探测器

- 实现路径（聚焦十四五）：**
- 与地方研究院、相关企业成立联合研发中心，激活企业对高科技的需求，反哺理学院的教学和科研**
- **粒子医疗联合实验室（推进中）**
 - **中大学科融合：中法核学院、物理学院、药学院、医学院、中大第七附属医院等**
 - **与深圳湾实验室联合成立：粒子医疗研发中心（意向）**
 - **正在与深圳其他科研院所商讨可能的合作开发模式（推进中）**

筹备成立大湾区粒子医疗技术发展联盟，打造世界 一流医疗设备研发高地！



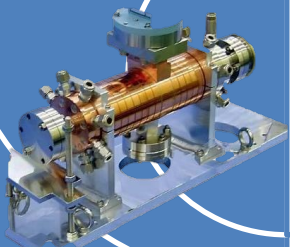
医用单色CT

- 高清诊断,结合功能影像SPECT\PET
- 图像引导治疗
- <50微米高分辨,kHz以上快成像



闪放医疗

- 电子束，伽玛束
- 质子束、重离子束
- **辐解氧耗竭假设？炎症免疫反应？其他？**



核药制备&中子BNCT

- 强流电子束加速器，Mo-Tc^{99m}，Ac225
- 强流质子加速器-F¹⁸，Ga⁶⁸等，中子产生