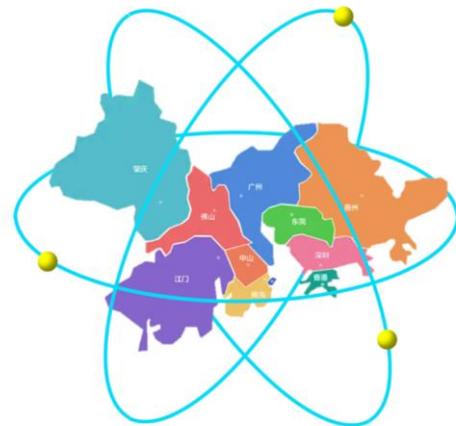




中山大學理學院
Sun Yat-sen University School of science



德才双修顶天立地，知行合一勇立潮头

伽玛光子对撞机及综合束流设施

扎根中国大地，打造一流教育高地

面向国家战略需求、人民健康，产学研一体化

黄永盛 中山大学理学院

2022年07月03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、王为、贺远强、
 - 高能所: 周为仁, 张闯, 郑志鹏, 吕军光, 裴国玺, 刘渭滨, 陈沅
 - 清华: 唐传祥, 鲁巍, 杜应超
 - 北京大学: 颜学庆, 余金清
 - 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
 - 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, 马余刚, 王宏伟
 - 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

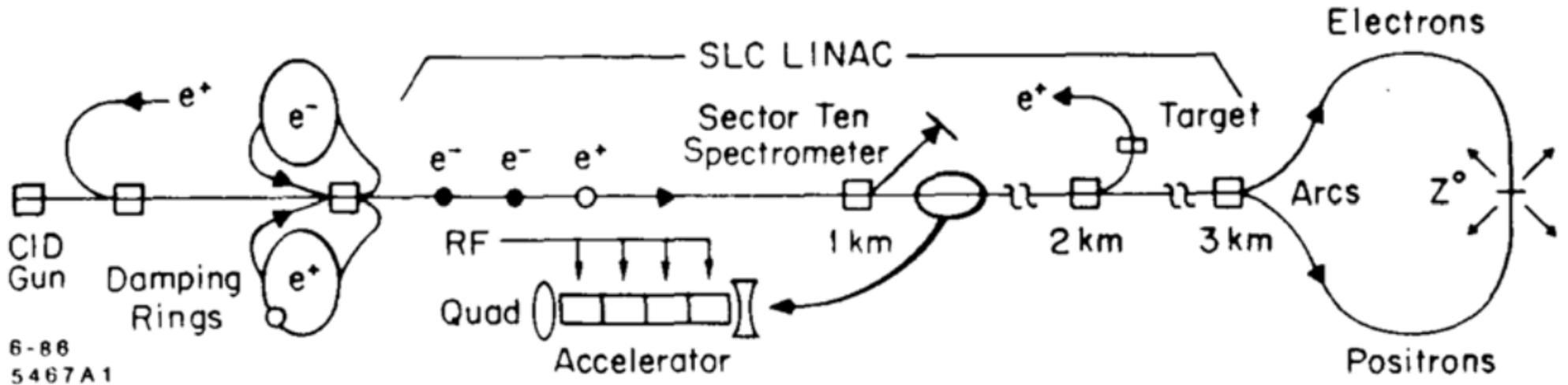
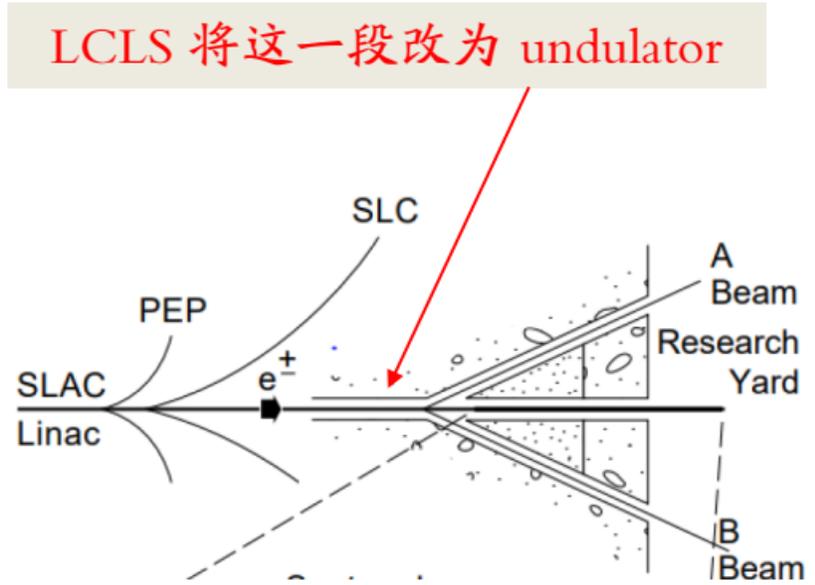
- SPEAR 大家并不陌生，它是一台做高能物理实验的正负电子对撞机，1974年 Burt Richter 用它发现了 J/Ψ 粒子，与丁肇中（用 AGS，另一台高能物理加速器）一起得了诺贝尔物理奖。
- 但很多人不知道，正是这台用来研究高能物理的机器，是世界上第一台同步辐射光源，（Stanford U. Bill Spicer 和 Seb Doniach 对 Richter 的建议 “revolutionize Condensed Matter physics”）常称为第一代光源（1st Generation, 1G）
- 后来 SPEAR 改造为专用光源（2G，另还有 Aladdin 等），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。



散裂中子源是基于高能物理固定靶实验的技术

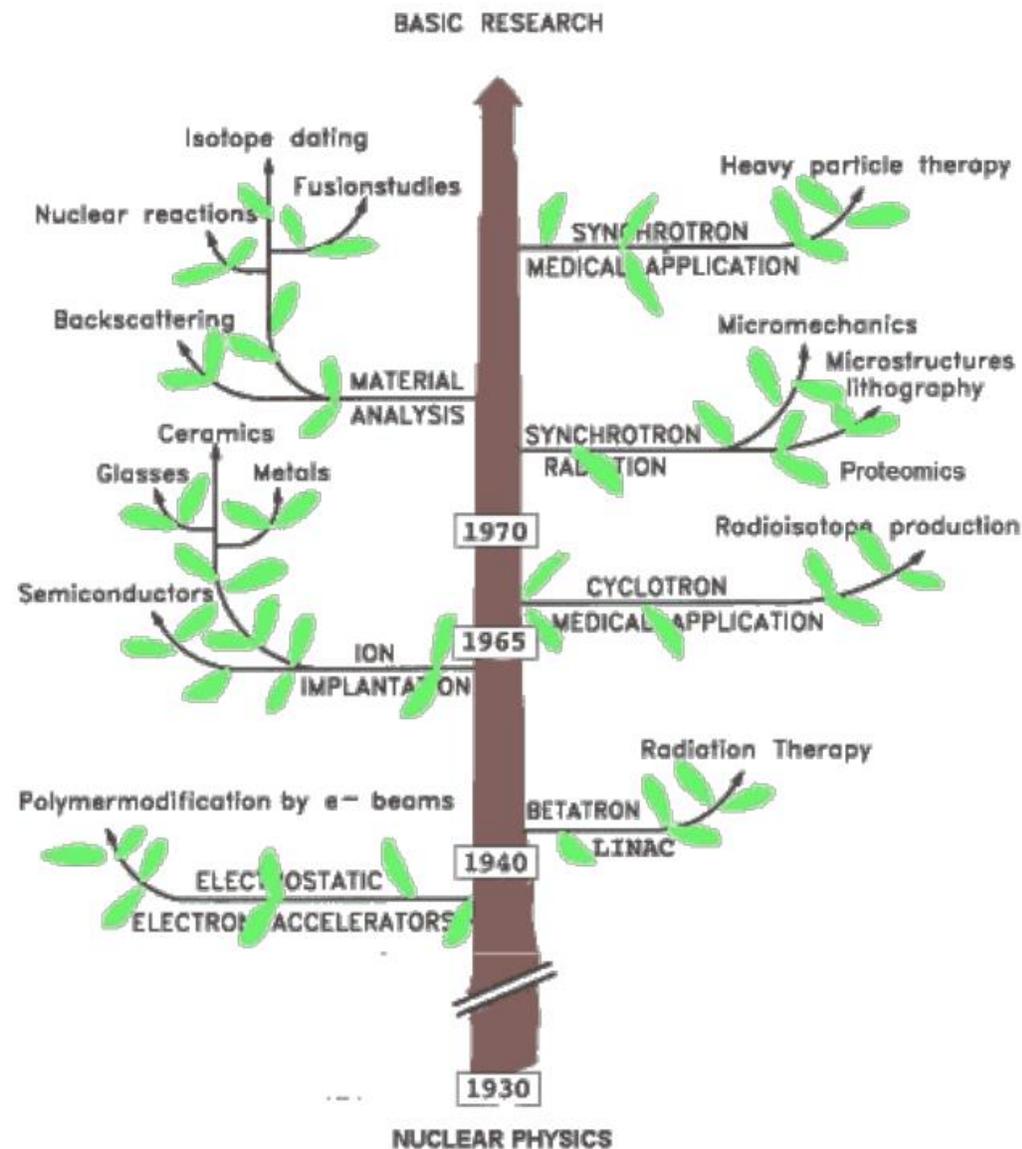
- 高能质子打在固定靶上，产生二次粒子，是粒子物理的重要实验手段。丁肇中当年就是在 AGS 上发现了 J/Ψ 粒子。
- 高能物理学家感兴趣的二次粒子是自然界中看不到的粒子，除了 J/Ψ 之外，还有 π ， μ ，kaon，正电子，反质子，等。
- 为了得到大量二次粒子，高强度高功率的质子加速器技术发展。
- 正是在这个技术基础上，引伸出了散裂中子源 - 即是在固定靶上产生大量中子作为二次粒子，应用于凝聚态物理，核物理，材料科学，生物科学等各方面。
- 与光源一样，一开始散裂中子源是高能物理的附属部分，但后来就有了专用的，如 ESS，SNS，J-PARC，及国内新建的 CSNS。

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。

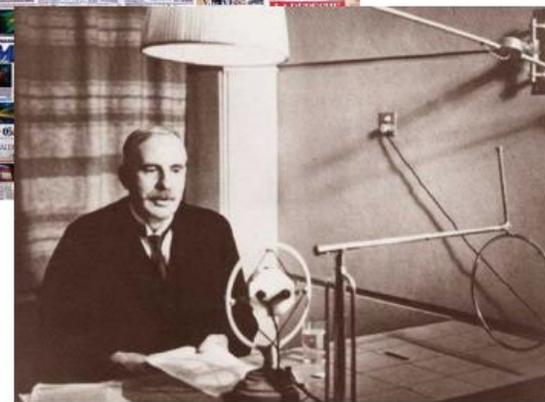
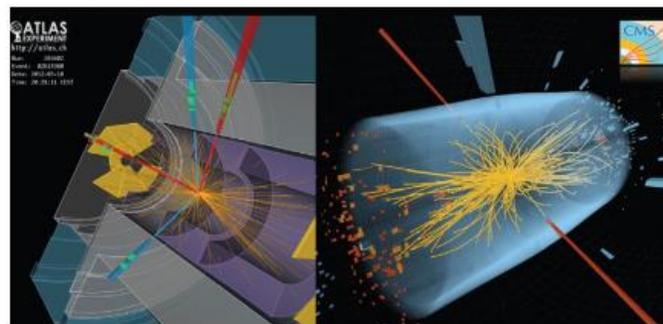
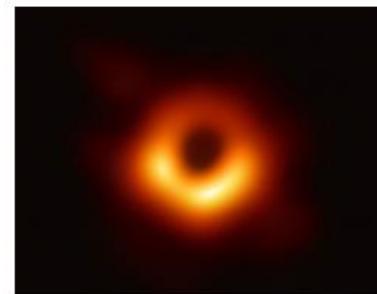


小结

- 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

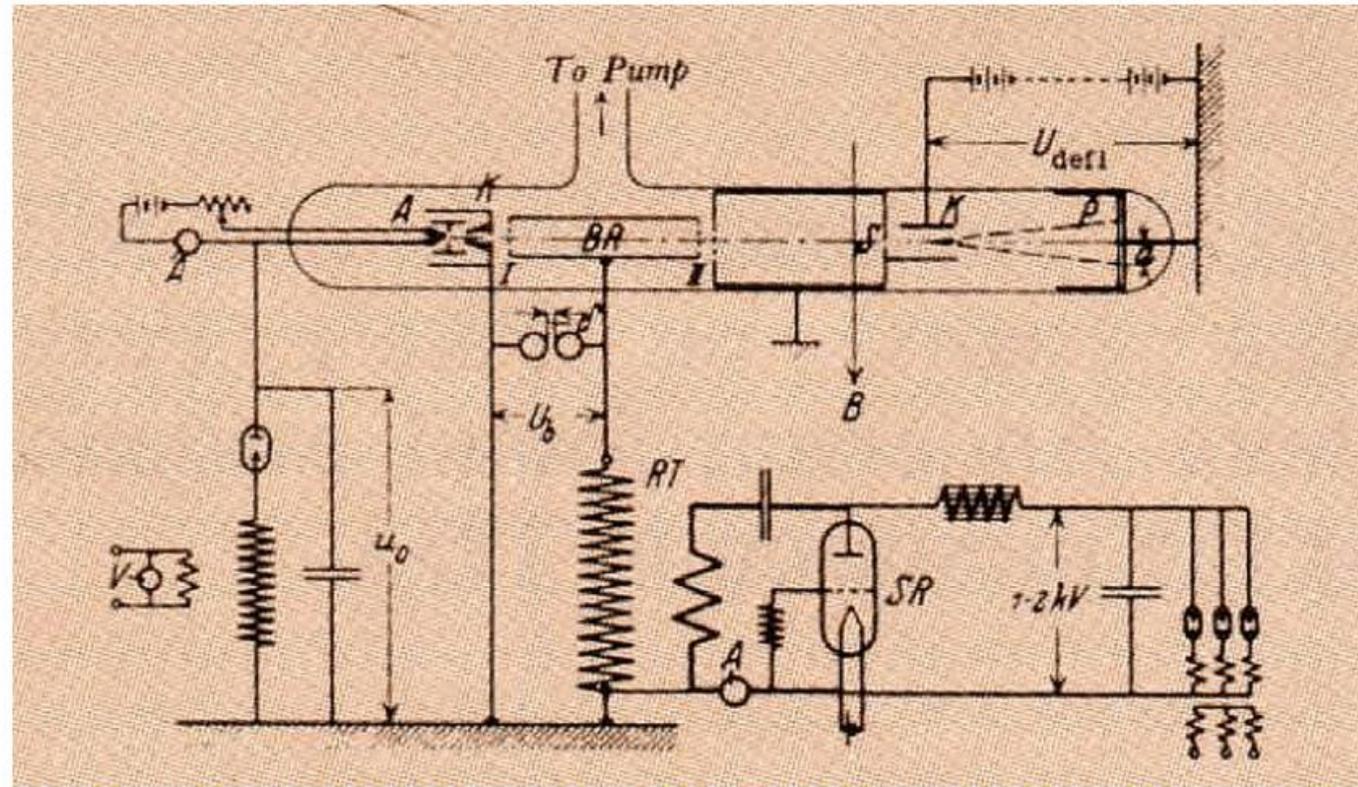
- 特别刺激，特别兴奋，是个冒险，有强烈的挑战性，成功后会长期留在人们记忆中
- 今年4月10日 EHT 发布第一个黑洞照片
- 2016年 LIGO 第一次“听”到引力波
- 2012年 LHC 第一次找到希格斯粒子



- 1919年卢瑟福第一次把原子核打碎

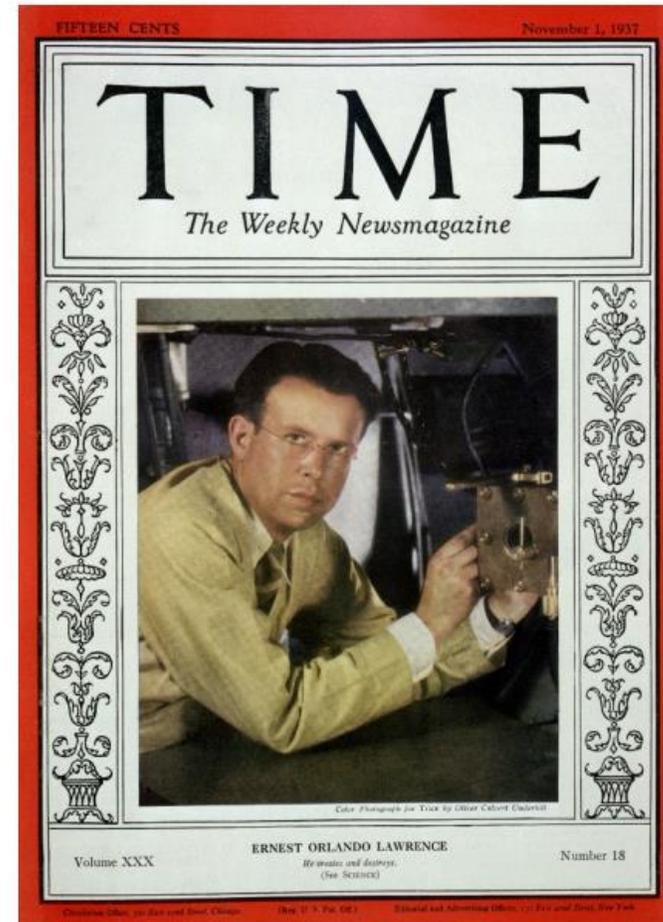
从 0 到 1，第一台小而简单 (1)

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



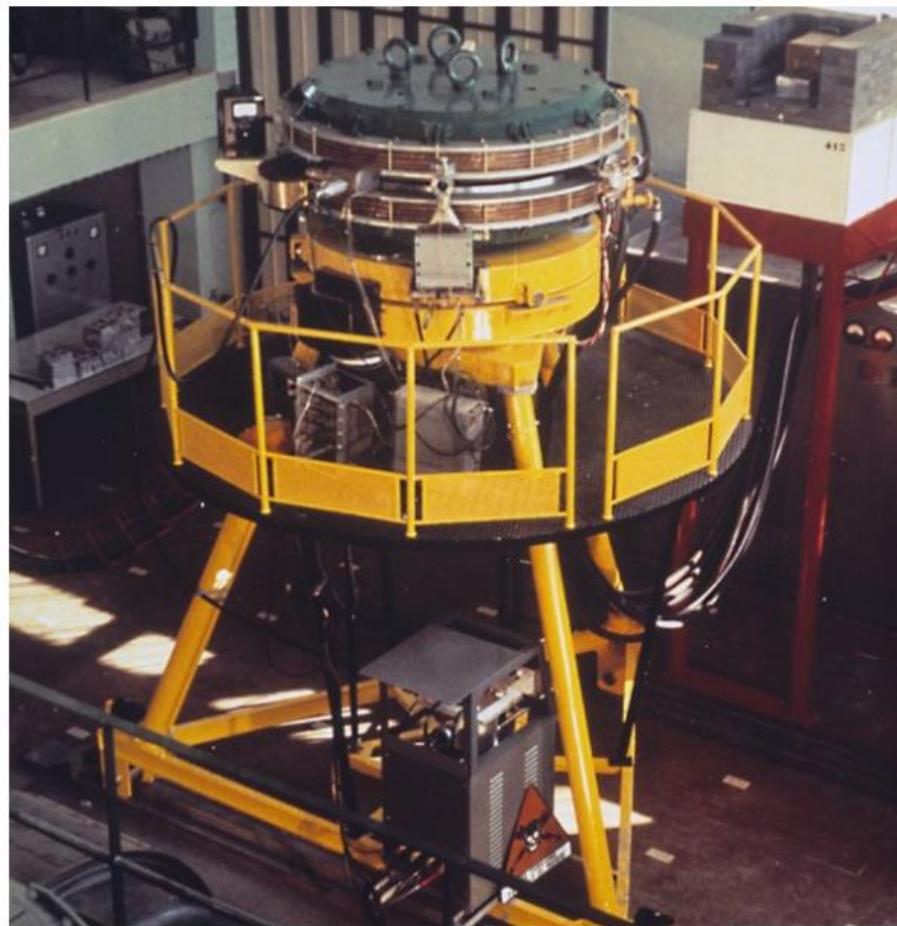
从 0 到 1，第一台小而简单 (2)

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



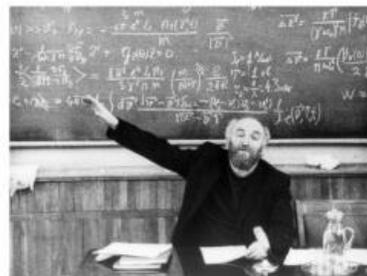
1952: Strong focusing



1959: AGS



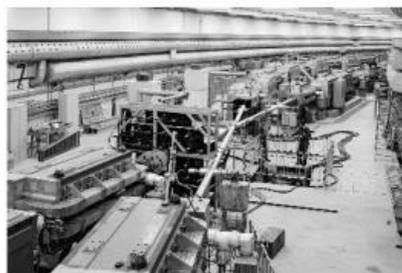
1966: Electron cooling



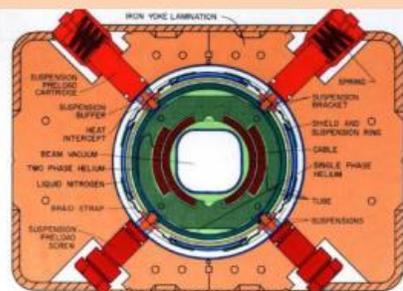
1968: Stochastic cooling



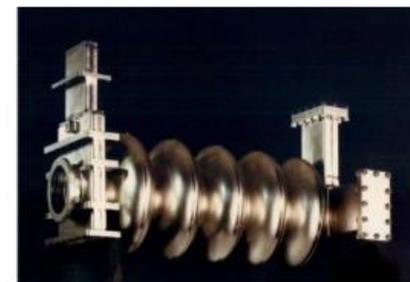
1969: 1st hadron collider



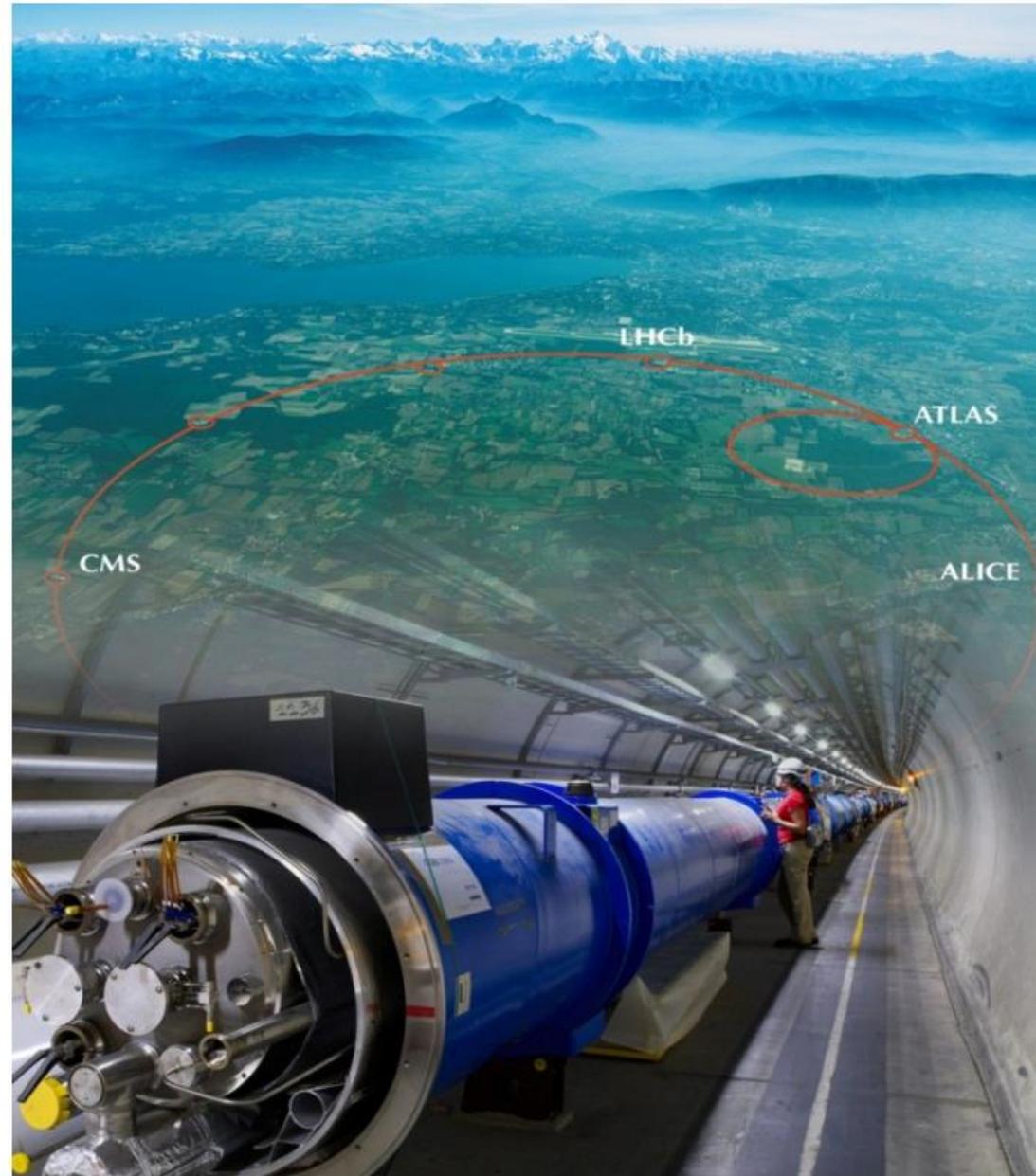
1983: SC magnet



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 Francis Cockcroft build a cyclotron only 1 meter in diameter.



The birth of an era

Ernest Rutherford discovers the nuclear disintegration by bombarding elements with alpha particles from natural radioactive materials. 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. The accelerator produces the first man-made nuclear reaction.



Synchrotron
Martin Opgenheimer 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.



FZAN
The first Fixed Field Alternating Gradient accelerator is commissioned at the Midwestern Universities Research Association. The concept is invented independently by Thero Orlans, Arthur Rosenbluth, and Keith Symon. An earlier variation is conceived by Lindeberg Thomas in 1938.



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



MADNET cyclotron
The first proton synchrotron using strong focusing, being focusing and phase stability, is built outside in 1964 at Cornell University.



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



ISR
Intersecting Storage Rings, the first large proton-proton collider for high-energy operation at CERN.



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



100m collider
M.C. the first linear collider proposed by Barbara Richter, is built at SLAC. The linear collider concept is developed by Martin Tigner in 1965.



Superconducting magnet technology
The Tevatron, 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 ($1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ meters) with femtosecond resolution ($1 \text{ fs} = 10^{-15}$ seconds).



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



World's largest accelerator — EAC
The 7.3 km Proton Collider at CERN, with 27 km circumference, begins operation.



Future



Advanced concepts
Plasma and laser-driven linear facilities meet's imagination. An acceleration gradient 1000 times higher than that of conventional linacs has been demonstrated. These advanced concepts challenge future accelerator builders.



World's largest accelerator — EAC
The 7.3 km Proton Collider at CERN, with 27 km circumference, begins operation.



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 ($1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ meters) with femtosecond resolution ($1 \text{ fs} = 10^{-15}$ seconds).



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



Work's first accelerator
Carlson King develops the concept of a linear particle accelerator (linac). Four years later, Will Westcott builds the world's first linac in an 18-in-long glass tube in Austin, Texas.



Miktron
Russell and Sigurd Koster and William Thomson invent the Miktron, a high-frequency amplifier for generating microwaves, at Stanford University. A similar device is proposed by Agnes Berggren-Hell and Oskar Hell in 1935.



Phase stability
Vladimir Veksler at the Laboratory of Physics and Leo Isidor 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 practical cyclotron in 1946 at Berkeley.



Strong focusing
Ernest Courant, Martin Livingston and Howard Kohn of Brookhaven National Laboratory and, independently, Vladimir Cherenkov earlier in 1939 in Geneva discover the principle of strong focusing, being focusing and phase stability, forms the foundation of all modern high-energy accelerators.



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



Van de Graaff generator
Robert Van de Graaff invents the Van de Graaff generator at Princeton University. He also constructs the first tandem accelerator. These generators are used in 1939 at Clark, Texas.



MADNET cyclotron
The first proton synchrotron using strong focusing, being focusing and phase stability, is built outside in 1964 at Cornell University.



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



ISR
Intersecting Storage Rings, the first large proton-proton collider for high-energy operation at CERN.



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



100m collider
M.C. the first linear collider proposed by Barbara Richter, is built at SLAC. The linear collider concept is developed by Martin Tigner in 1965.



Superconducting magnet technology
The Tevatron, 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 ($1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ meters) with femtosecond resolution ($1 \text{ fs} = 10^{-15}$ seconds).



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



World's largest accelerator — EAC
The 7.3 km Proton Collider at CERN, with 27 km circumference, begins operation.



Future



Advanced concepts
Plasma and laser-driven linear facilities meet's imagination. An acceleration gradient 1000 times higher than that of conventional linacs has been demonstrated. These advanced concepts challenge future accelerator builders.



World's largest accelerator — EAC
The 7.3 km Proton Collider at CERN, with 27 km circumference, begins operation.



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 ($1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ meters) with femtosecond resolution ($1 \text{ fs} = 10^{-15}$ seconds).



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



World's largest accelerator — EAC
The 7.3 km Proton Collider at CERN, with 27 km circumference, begins operation.



Future



Advanced concepts
Plasma and laser-driven linear facilities meet's imagination. An acceleration gradient 1000 times higher than that of conventional linacs has been demonstrated. These advanced concepts challenge future accelerator builders.



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



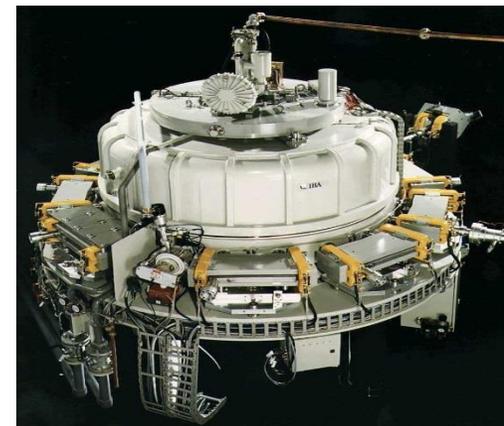
Neutron Sources



Medical Accelerators

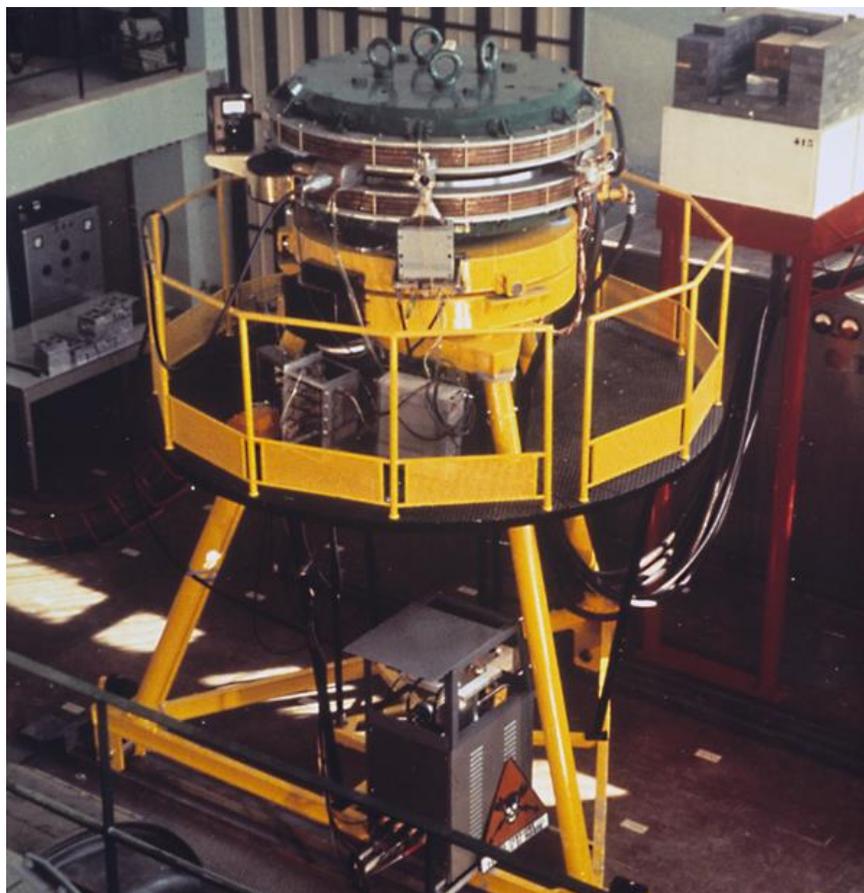


Industrial Accelerators

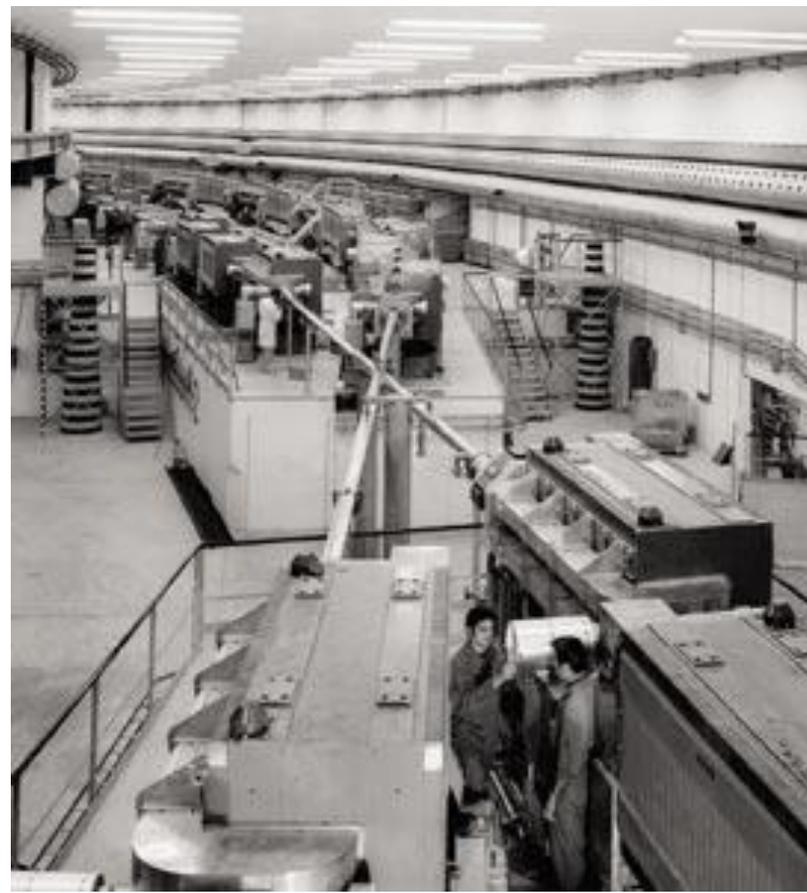


First Generation of Colliders – 1960s

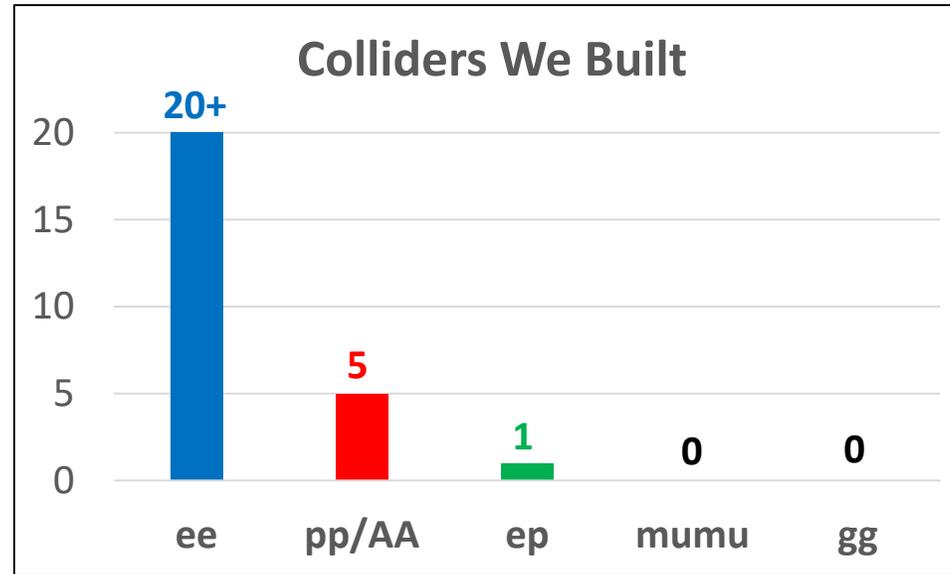
1961: AdA first lepton collider



1969: ISR first proton collider

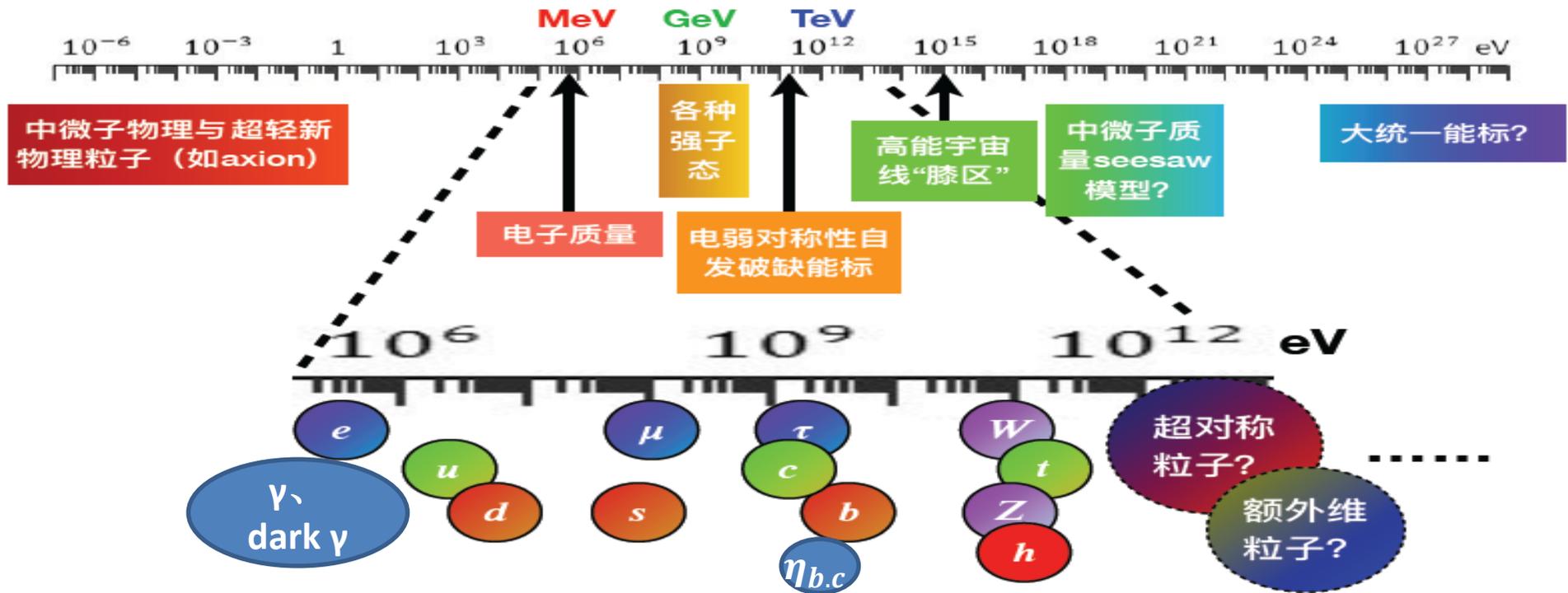


Scores of Colliders were built

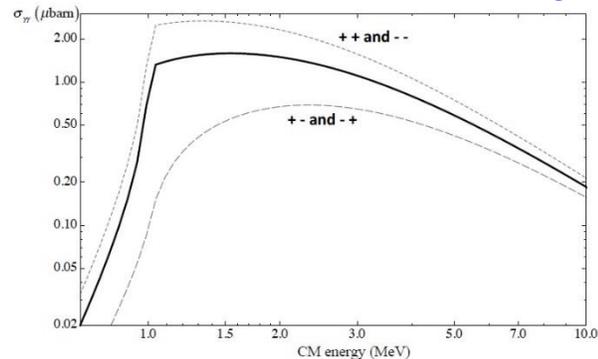


- In the past 50 years,
 - we built more than 20 e+e- colliders
 - we built 5 hadron colliders (pp and ion-ion)
 - we built one ep collider
- **However, we have never built any $\gamma\gamma$ collider**

伽玛对撞机与物理-能区



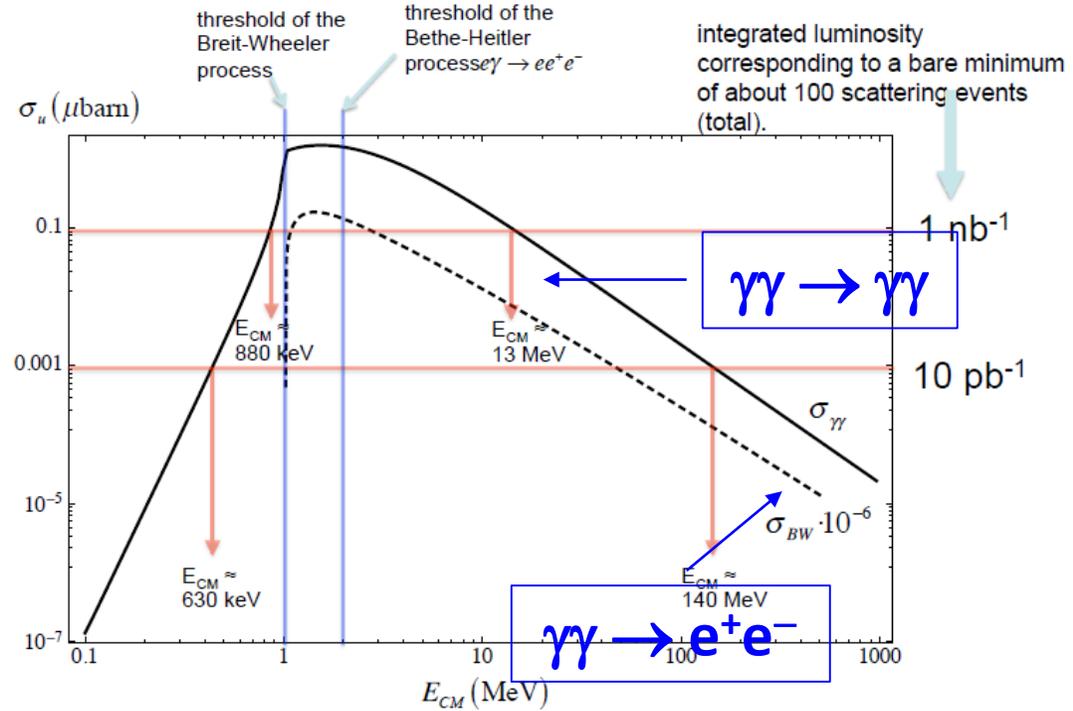
- 精确检验量子电动力学。
- 欧拉-海森堡相互作用 (QED)



- 不同质心能量的 γ 光子对撞机有丰富的物理学。
- 标准模型框架下新的复合粒子共振态。
- 标准模型预言, 但尚未被实验检验的现象。
- 标准模型中已有粒子的新相互作用。
- 其他意外?

MeV能区

- 极化的光光散射实验观测
- 真空BW pair production实验观测
- Dark photon
- the QED structure of the photon? (5 *Eur. Phys. J. C* 11, 409–425 (1999),) QED structure functions and the differential cross-section
- Positronium



17/04/13
 Edoardo Milotti - LNF/IRIDE
 Edoardo Milotti - LNF/IRIDE

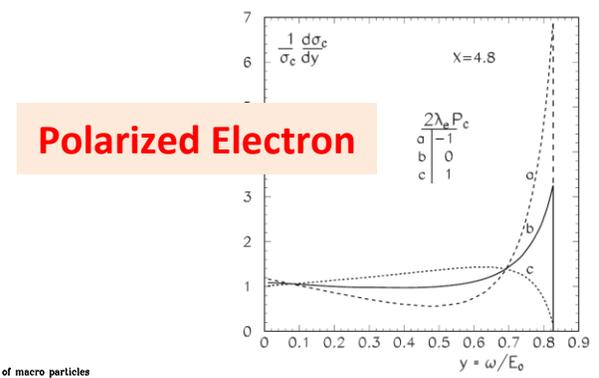
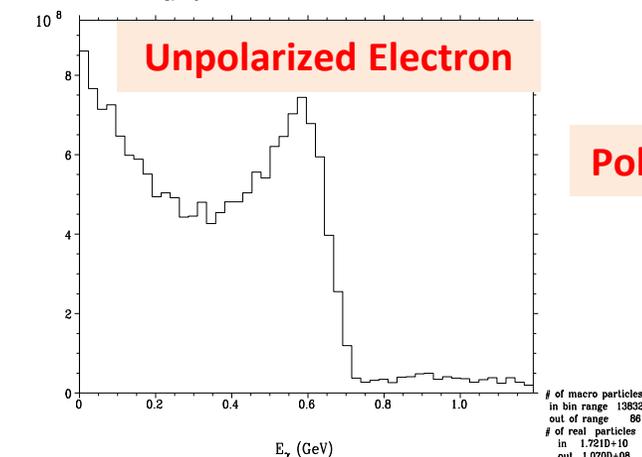
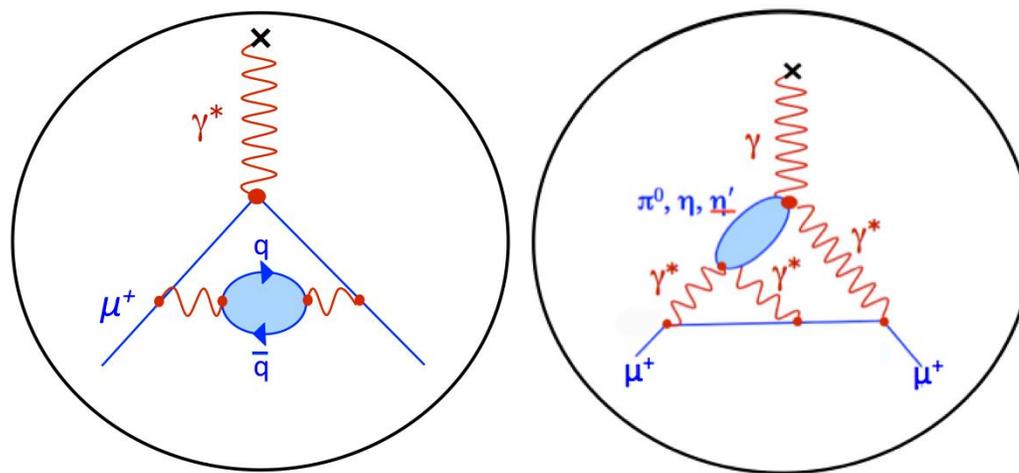
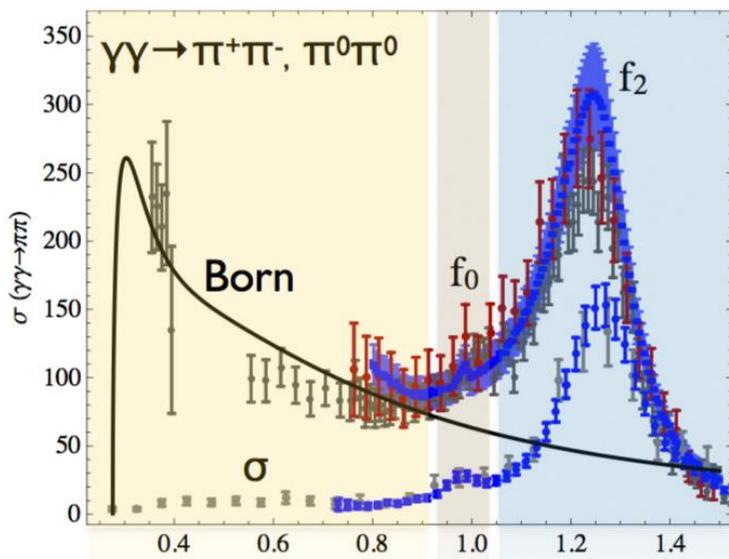


Figure 1.3.1: Spectrum of the Compton scattered photons for different polarisations of the laser and electron beams.

百MeV能区(郭玉萍, uni-mainz)

μ 反常磁矩, τ 反常磁矩

- μ 反常磁矩: $a_l \equiv \frac{g_l - 2}{2}$, 对 γ 光子对撞机 (MeV-GeV) :
新物理非常敏感
- 未来实验测量精度提高4倍 (Fermilab, JPARC)
- 理论计算精度受限于hadronic贡献 (真空极化+光子-光子散射)
- 为光子-光子散射理论计算输入提供新的实验手段
- 提高强子 $\gamma\gamma$ 衰变分宽度测量精度
- 利用极化束流提供特定helicity分量 $\gamma\gamma$ 反应截面测量



Hadronic Vacuum Polarization : Hadronic Light-by-Light

理论计算模型依赖, 模型引入的误差难以估计

伽玛光子对撞机测量 $\eta_b \rightarrow \gamma\gamma$ 宽度的优势

Example: $\gamma\gamma \rightarrow \eta_b$.

取自 Valery Telnov 的报告 European XFEL photon collider

There was attempt to detect this process at LEP-2 ($2E=200$ GeV, $L=10^{32}$, but only upper limit was set.

$$N = \frac{dL_{\gamma\gamma}}{dW_{\gamma\gamma}} \frac{4\pi^2 \Gamma_{\gamma\gamma} (1 + \lambda_1 \lambda_2)}{M_x^2} \left(\frac{\hbar}{c} \right)^2 t$$

For our collider $\frac{dL_{\gamma\gamma} 2E_0}{dW_{\gamma\gamma} L_{ee}} \approx 0.5$, so

$$N \sim \frac{\pi^2 \Gamma_{\gamma\gamma} (1 + \lambda_1 \lambda_2)}{E_0 M_x^2} \left(\frac{\hbar}{c} \right)^2 (L_{ee} t) \sim 8 \cdot 10^{-27} \frac{\Gamma_{\gamma\gamma}}{E_0 M_x^2 [\text{GeV}^2]} (L_{ee} t)$$

For $\Gamma_{\gamma\gamma}(\eta_b) = 0.5$ keV, $E_0 = 17.5$ GeV, $M(\eta_b) = 9.4$ GeV, $\lambda_{1,2} = 1$, $L_{ee} = 1.1 \cdot 10^{33} - 2.2 \cdot 10^{34}$,

$$t = 3 \cdot 10^7 \text{ s}$$

we get $N(\eta_b) \approx 10^5 - 2 \cdot 10^6$ and measure its $\Gamma_{\gamma\gamma}$

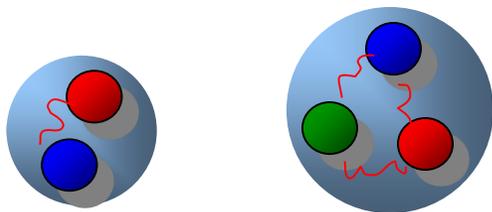
Production rate is higher than was at LEP-2 (in central region) $\sim 500 - 10^4$ times!

Such photon collider has very rich physics, incl. 4-quark (or molecular) states. Many such states with unclear nature have been discovered recently.

Just for information. η_b is detected in radiative decays of $Y(nS)$. Babar has detected $\sim 30000 \eta_b$, this was not sufficient to detect its decay to $\gamma\gamma$, because $\text{Br} \sim 7 \cdot 10^{-5}$. Such decay can be observed at Super-B. LHC with 300 fb^{-1} will produce $5 \cdot 10^9 \eta_b$.

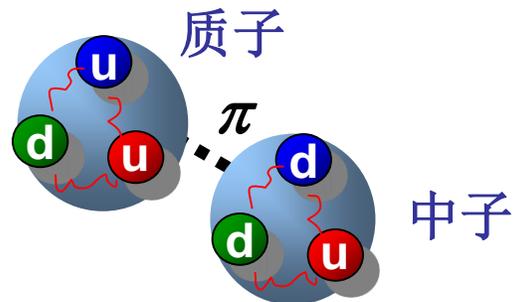
$\gamma\gamma$ 对撞机可以用来寻找 $C=+$ 的奇特强子态： 比如，通过 $\gamma\gamma \rightarrow J/\psi \phi$ 过程 (贾宇)

传统强子态



介子

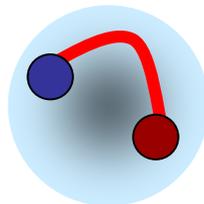
重子



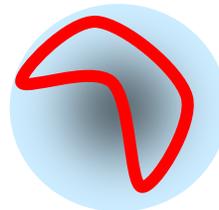
氘核：质子-中子分子态

奇特强子态

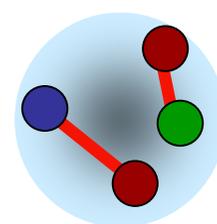
混杂态



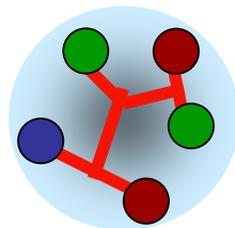
胶球



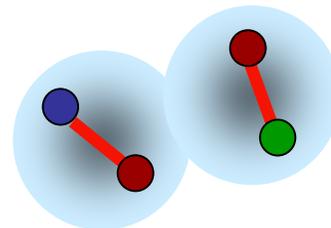
四夸克态



五夸克态



强子分子态

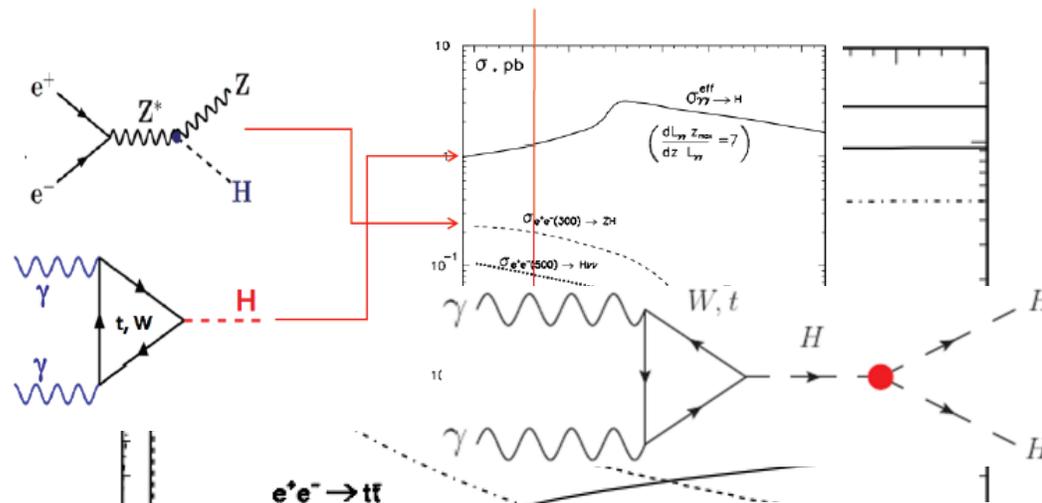


最近各种类粲偶素X,Y,Z态被认为
可以归类为所谓的奇特强子态

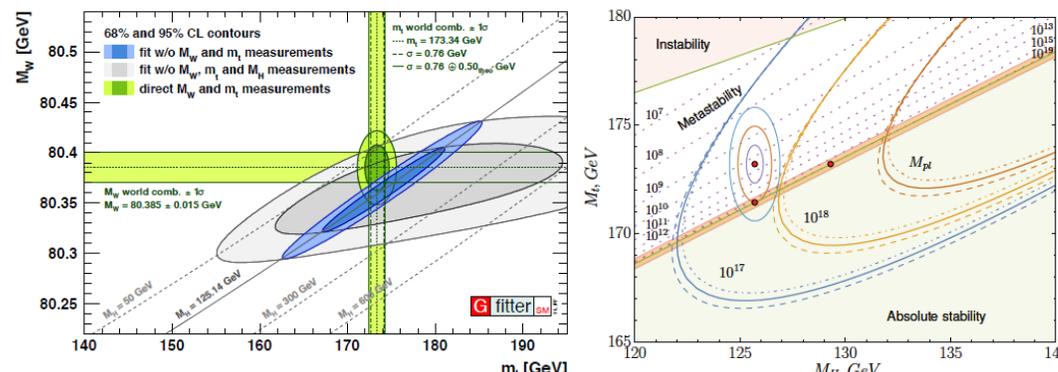
电弱对称性自发破缺能区 (张昊, 631次香山会议)

• Higgs物理

- ✓ Higgs的单独产生
- ✓ 初态光子极化与Higgs玻色子宇称的精确测量。
- ✓ Higgs玻色子的对产生

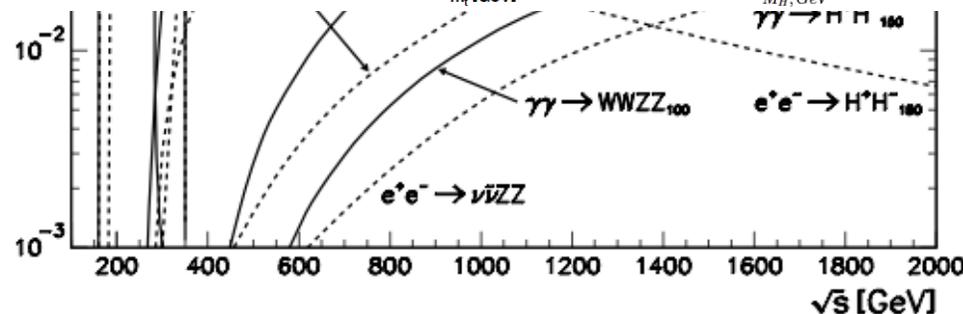


• 顶夸克质量、电弱精确观测量与真空稳定性

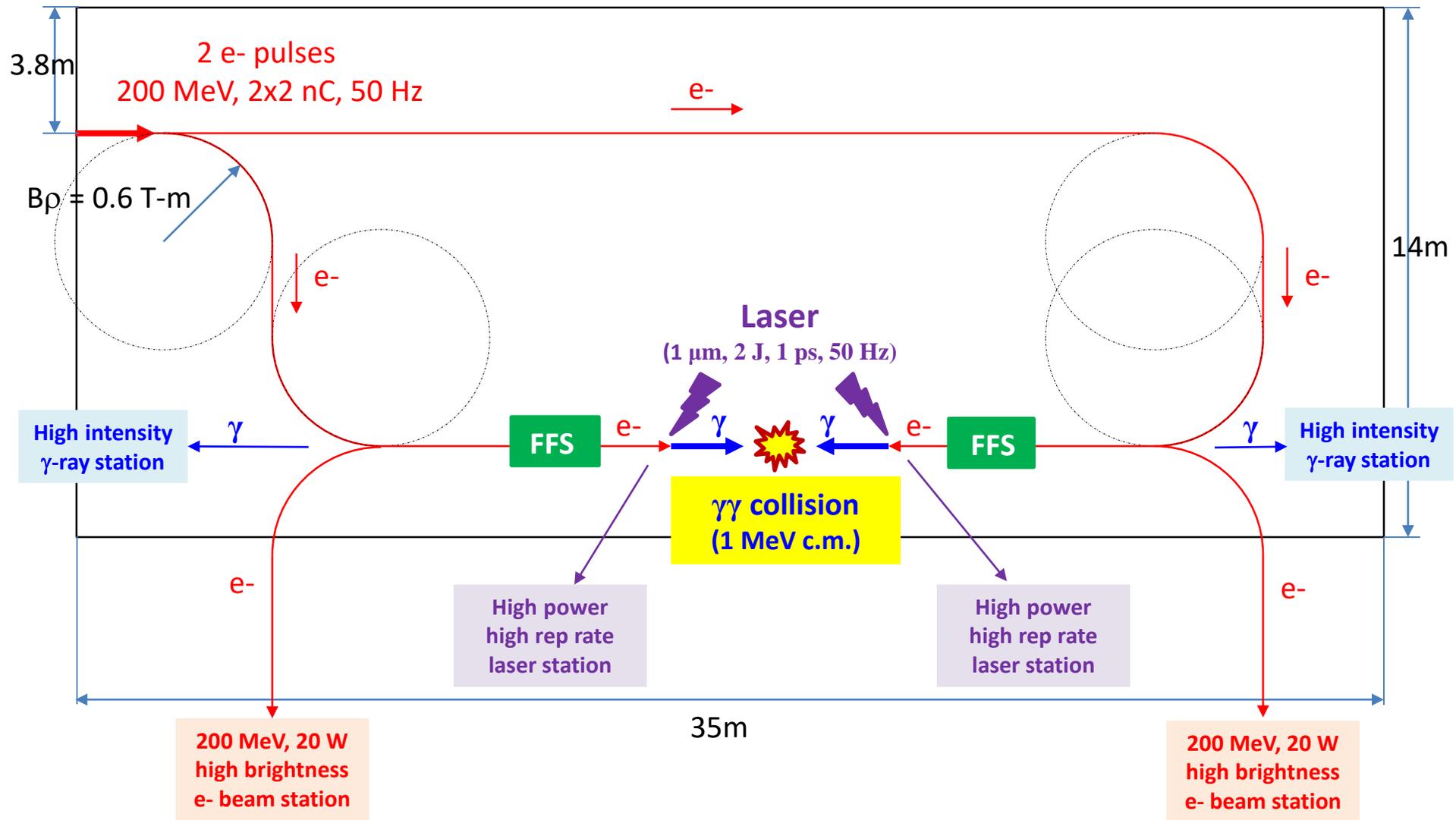


• 规范玻色子散射

- ✓ 检验电弱对称性破缺与规范玻色子散射的么正性。
- ✓ 在标准模型有效场论框架内寻找高量纲相互作用。



伽马光子对撞机及综合束流设施



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

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

世界上第一台伽玛光子对撞机

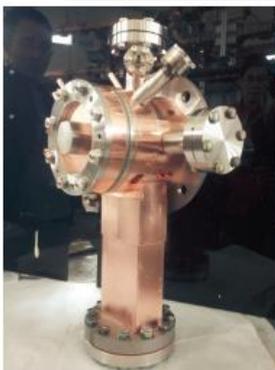
平台指标:
600keV, $5 \times 10^{11}/s$, 50Hz,2ps,束斑1-5 μm

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	$1 \times 10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
事例率	7 /小时
	30,000 /年

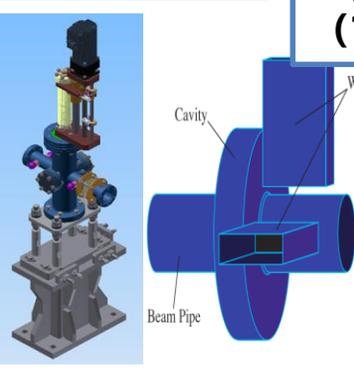
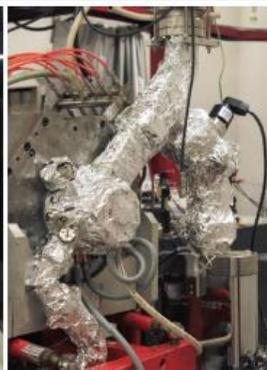
伽马光子对撞机及综合束流平台组成部分及关键技术

- 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

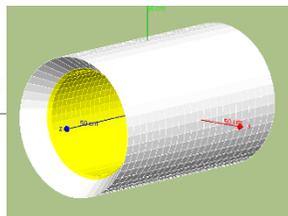
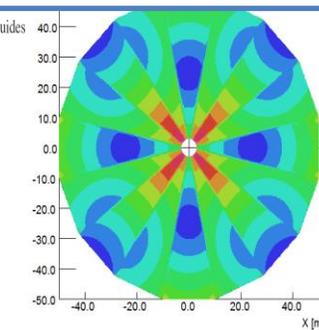
- 超高梯度紧凑型永磁铁技术
- 紧聚焦型高亮度伽玛光源技术: 紧聚焦 (4-5微米), 焦点处亮度 $2.55 \times 10^{16} / (\text{mm}^2 \text{s}) @ 2.5 \text{mrad}$
- 高分辨率伽玛成像技术: 1-5微米分辨率, cm量级的钢材等高密度成像
- 几十fs超快动力学过程成像技术
- 多粒子综合探测技术: 多通道 (1300) 高采样频率 (1GHz) 的, 动量能量耦合



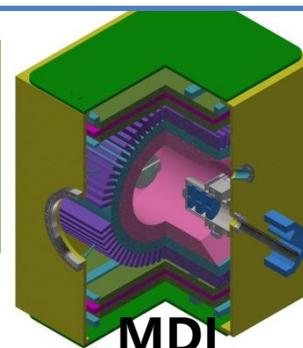
光阴极枪



束测系统



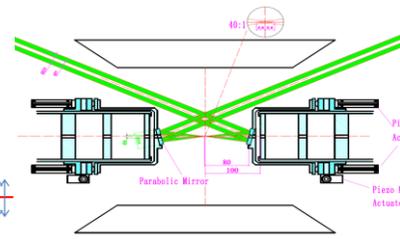
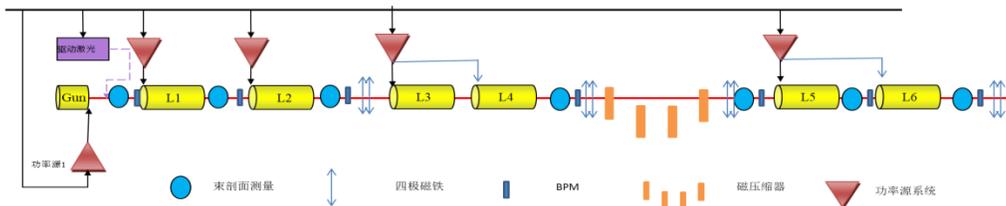
干路探测器



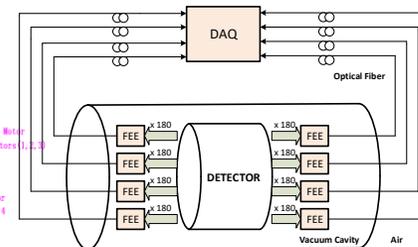
MDI

➤ 600T/m, 近2T

直线加速器



对撞区设计



快速ADC电子学

Signal processing for $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ (高橋徹, cont' d)

No. of pile-up	Laser rep rate (Hz)	Run time for 5 σ (sec)	Sigma after 10^7 sec run
0.1 (0.42 J /pulse)	100	3.7×10^6	8.5σ
	50	7.4×10^6	5.9σ
	25	15×10^6	4.9σ
1.0 (1.32 J /pulse)	100	0.93×10^6	17σ
	50	1.9×10^6	12σ
	25	3.9×10^6	8.5σ

- $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ (Breit-Wheeler) has large cross section and should be observed immediately after machine starts running
- But $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ has small cross section and strong background. From the table, for 1 pile-up per crossing and at 50 Hz, 5 σ significance (i.e., discovery) can be achieved in 1.9×10^6 sec, or about 2 months.

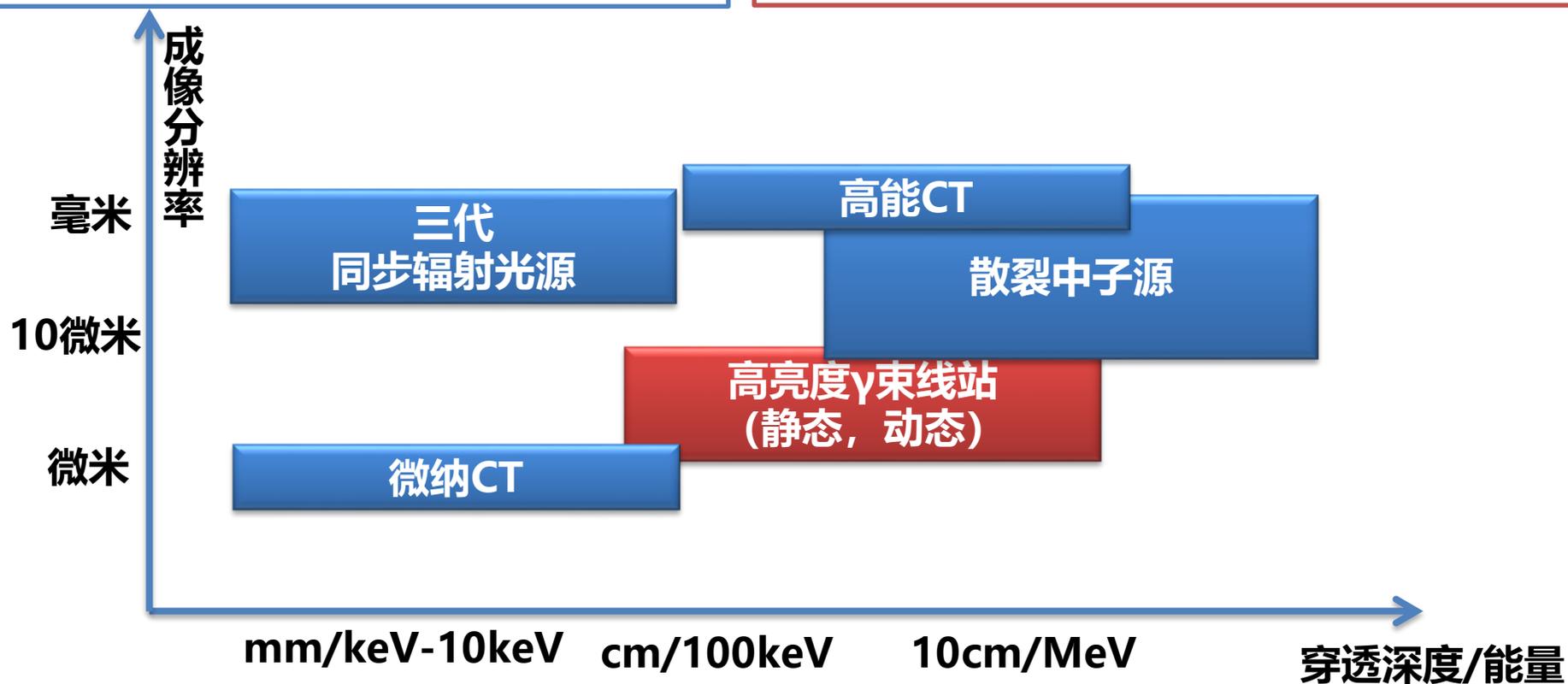
高亮度 γ 束线站

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



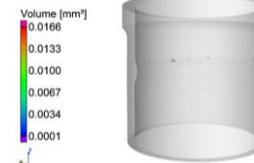
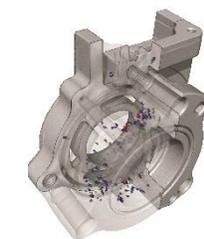
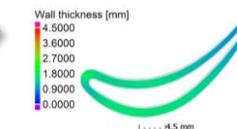
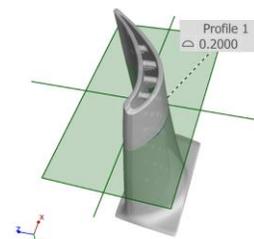
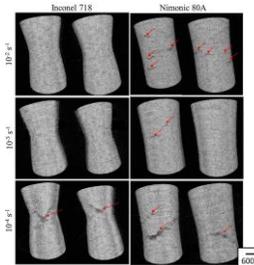
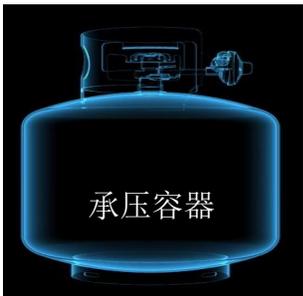
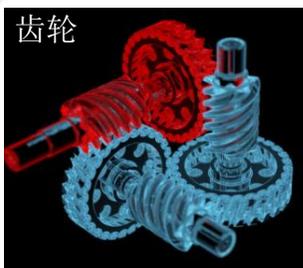
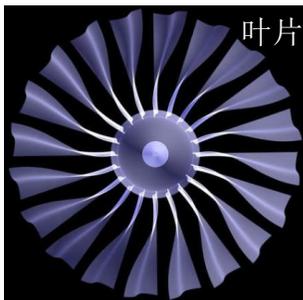
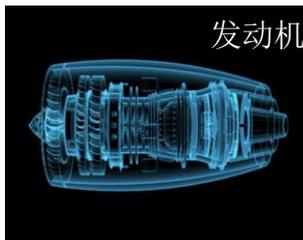
中国航天科工集团
有限公司



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!



高亮度 γ 束实验平台 MeV-35MeV

何建军, 王宏伟, 张焕乔, 张春雷, 王乃彦

➤ $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 圣杯反应

在所有 $M > 0.55 M_{\odot}$ 恒星的演化中都起着关键作用, 其反应截面对上至铁的中等质量核素的合成和大质量恒星后期的演化进程有决定性的影响, 被誉为核天体物理的“圣杯”。

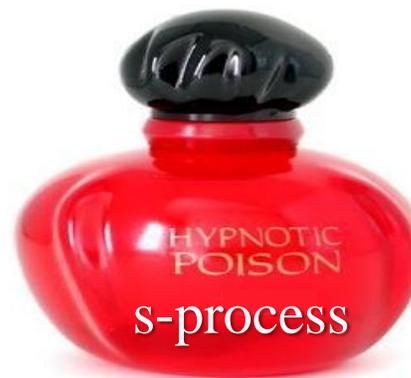
- 慢中子俘获 s 过程中的毒药
- 偶极激发的核共振荧光 (NRF) 实验研究
- 核巨共振相关的 (γ, n) 及 (γ, p) 反应截面数据缺乏
- 奇异核性质研究: 矮共振 a “mini” giant dipole resonance it is often called pygmy dipole resonance (PDR).
- γ 束辅助反应堆研究——嬗变后时代 (王乃彦院士) !



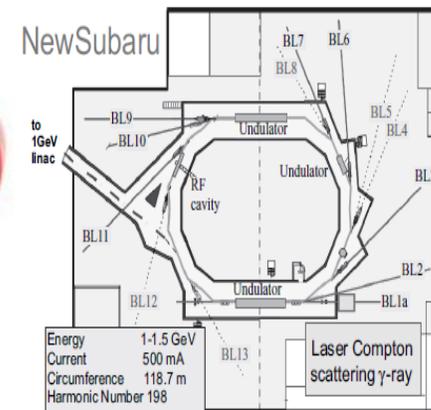
圣杯 (Hoyle grail)



第1瓶



第2瓶



二、LCS伽玛光源的特点 (马余刚, 香山会议)

核与光子的相互作用:

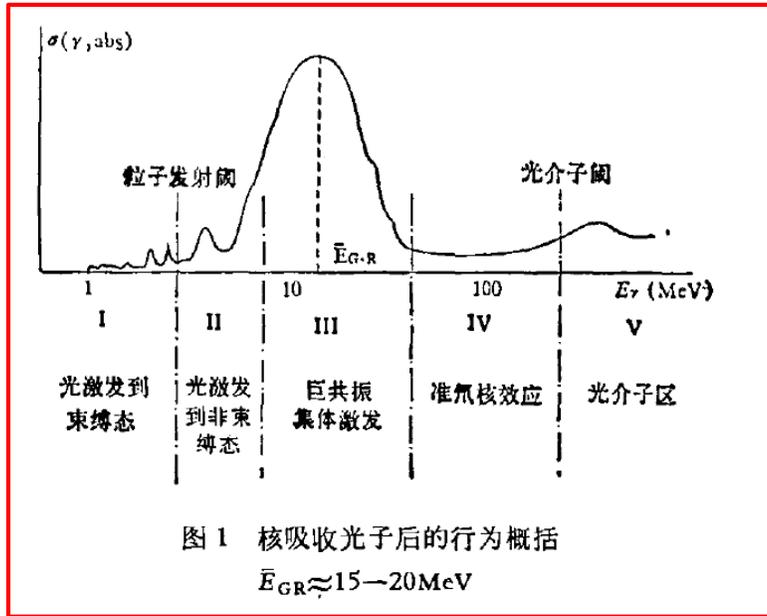


图1概括了原子核吸收光子后的典型行为,分区说明如下:

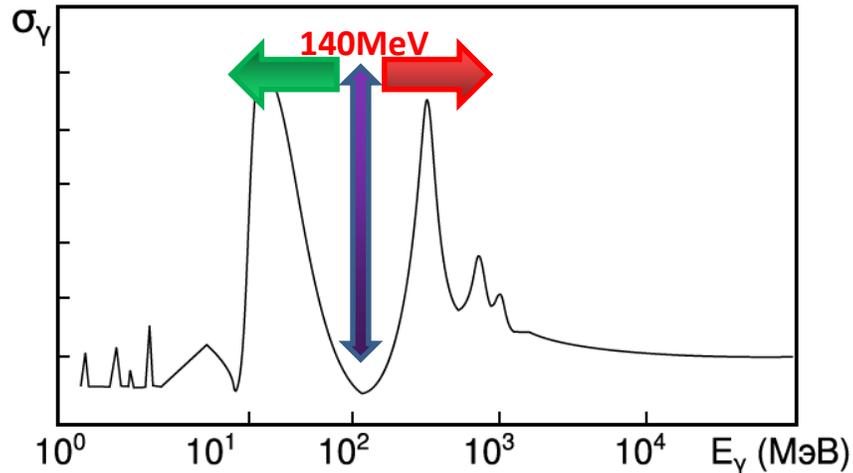
(1) $E_\gamma \leq 9\text{MeV}$ 是单粒子束缚态和非束缚态的激发. 微观性质可用壳层模型描述.

(2) $10-30\text{MeV}$ 是巨共振区,是集体模型的系统激发. 除了氘核外,所有的核都是如此.

(3) 巨共振区以上,光介子阈($\sim 140\text{MeV}$)以下为准氘核吸收区.

(4) $\sim 140\text{MeV}$ 以上,在这区域光产生 π^+ 介子,达到核子共振区.

顾复华, 光核反应研究概况, 《物理》1982年第02期

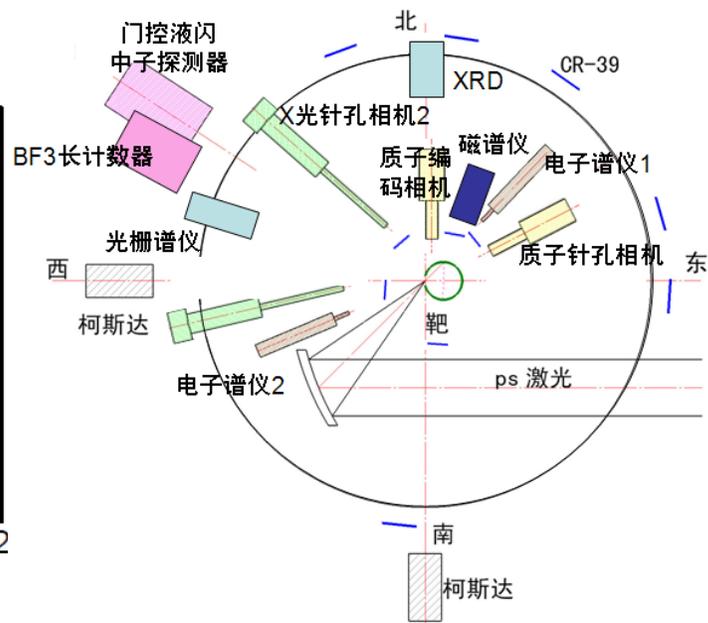
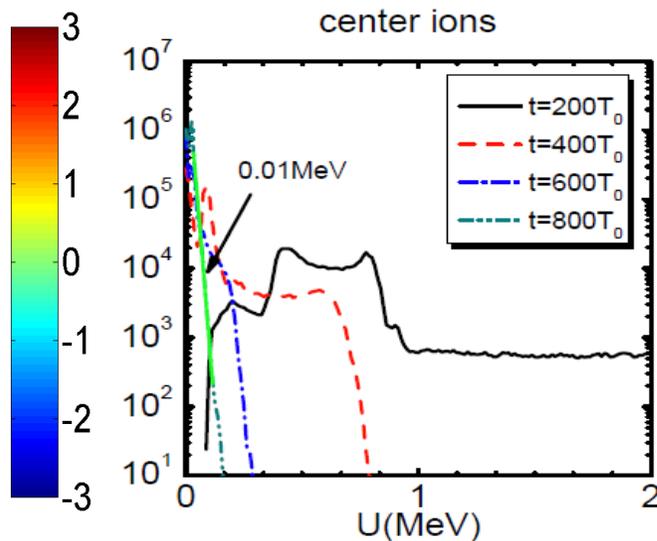
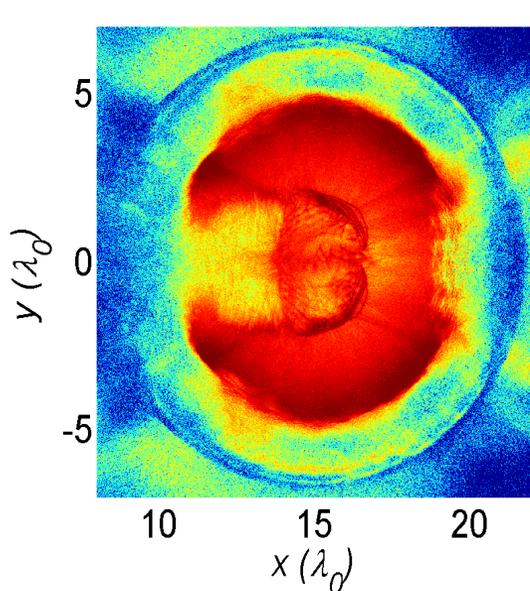


(别尔金, 张礼等, 《低能光核过程》清华大学, 1960年)

- (1) $< 30\text{MeV}$, 低能范围
- (2) $30\text{MeV} \sim 140\text{MeV}$, 中能范围
- (3) $140\text{MeV} \sim 1100\text{MeV}$, 高能范围
- (4) $> 1100\text{MeV}$, 超高能范围

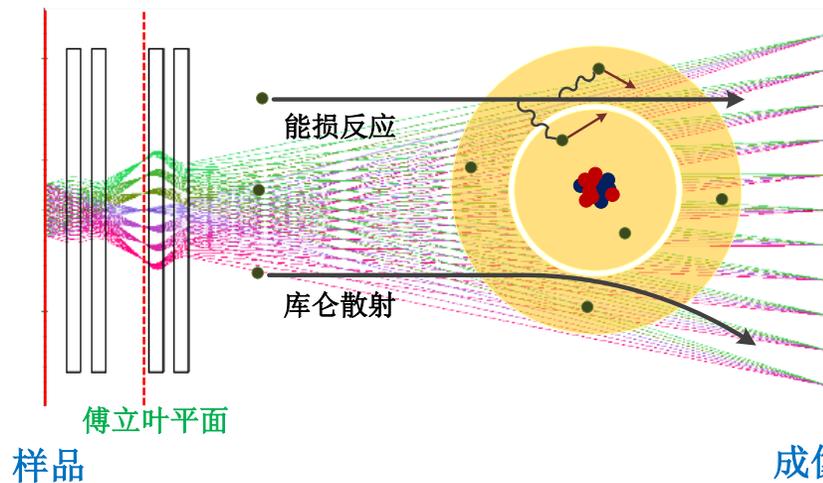
超短超强激光实验平台

- 催生了“高能量密度物理”，可开展极端物态条件等离子体环境下的聚变、核物理等新兴物理的研究
- **超短超强激光脉冲中子源**：1ps, 10^7 /pulse
- **激光等离子体相互作用**：可开展激光等离子体不稳定性等研究，陡峭密度温度条件下能量输运，新型聚变机理等。



高品质电子束的一些典型应用

- 电子照相
- 探测器研究
高能物理及极高能宇宙线 (10^{15} - 10^{20} eV, or even higher) 探测器的性质 (线性、动态范围 up to 10^{18} eV、分辨等) HERD
- 电子束辐照
- 电子束中子源
- 放射性核素靶
- 潜在应用研究
- ...



高能电子与样品的相互作用主要包括电离能损、韧致辐射、库仑散射。

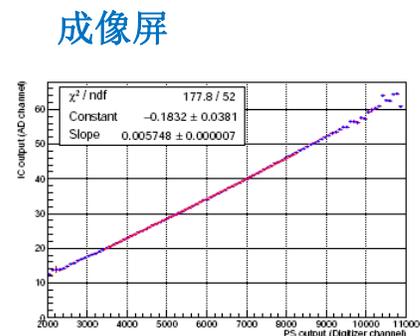
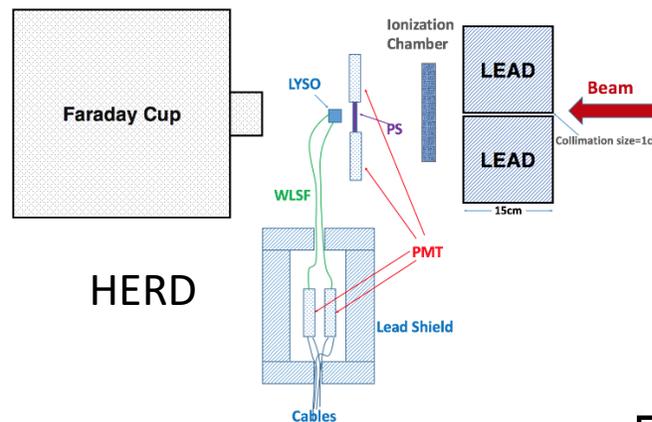


Fig. 8: PS calibration, the x axis represents PS output (Digitizer channel); the y axis is IC output (ADC channel), the histogram shows good linearity.

碳纳米管辐照交联 (通过化学键连接形成网状结构 cross-links)

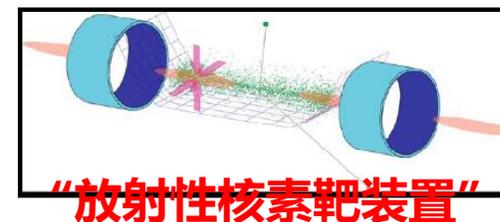
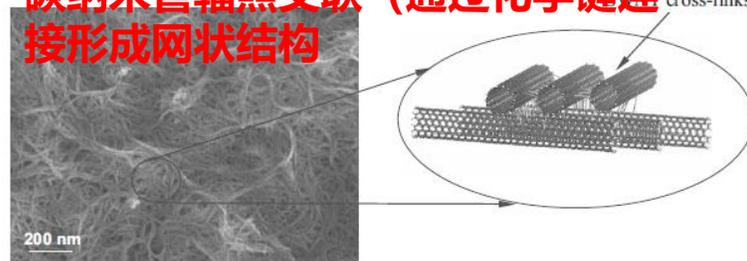


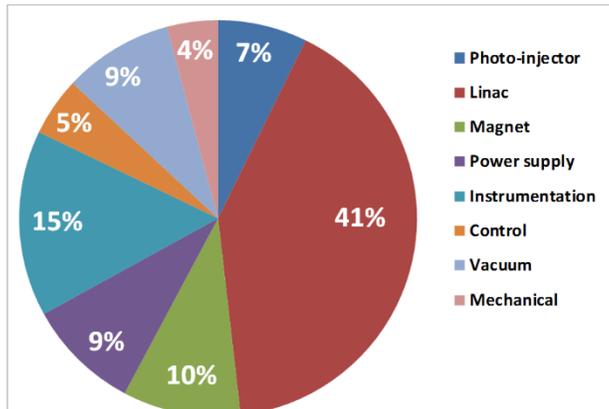
图 1 利用 SCRIT 方法所形成的放射性核素靶与电子散射示意图

Fig.1 Sketch map about SCRIT method.

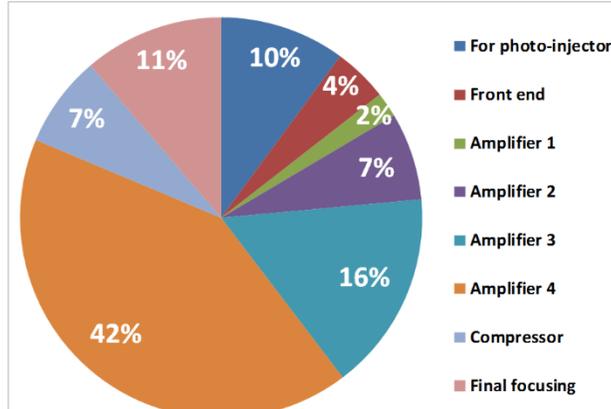
伽马光子对撞机及多束流平台预算（不含土建）

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

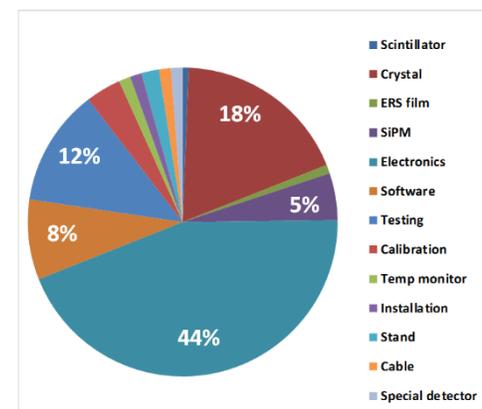
Accelerator Cost Breakdown (03/20/2019)



Laser Cost Breakdown (03/20/2019)



Detector Cost Breakdown (03/20/2019)



粤港澳大湾区——一流人才体系建立

(1) 一流的人才培养体系和土壤的建立是粤港澳大湾区建设国家乃至世界科学中心的核心问题。这样的人才体系一定要成规模，绝对不是靠短平快人才引进可以解决。短平快的人才引进模式，对于小而精的科技企业 and 产业孵化确实非常奏效，但是对于大科学装置的建设反而是欲速则不达！

这就需要践行“扎根中国大地办教育”的“南天一柱”——中山大学急国家之所急，发挥中流砥柱的作用，建立理工结合的健康规模化的培养体系。

伽玛对撞机正是这样的大背景下能够花费不多培养多个学科人才的极好的科学装置，又能够面向学术前沿，实现多个世界第一，又能够面向国家战略需求——建立关键结构件研发的眼睛：超硬x射线成像线站。

面向学术前沿

(2) **第一台伽玛光子对撞机** (Gamma collider based on electron interacting with laser, 简称 Genie, 或奇霓) 的建立将有望实验上**国际首次**对量子场论预言的**光光散射**、**双实光子真空能量转换为物质** $m = E/c^2$ 等进行直接的实验检验。

并探究**正负电子偶素**、**光子的量子结构**、**暗光子暗物质**等更多新的物理，并为将来建造更高能量的 γ 对撞机提供宝贵的技术基础。

面向国家战略需求：极具价值的光束线站

(3) 综合设施将同时建成两条超硬X射线（工件探伤）线站，可提供**超高穿透性的高能X射线、以微米分辨X射线成像**为主要方法，可以满足**粤港澳地区制造产业中大尺寸、厚样品材料的高分辨探伤需求，为产业用户构建材料设计-结构-性能一体化的自反馈体系**。与散列中子源、同步辐射光源、x射线自由电子激光优势互补，不可或缺。

可广泛服务于**中国航空发动机集团、航亚科技、深圳航天科技创新研究院、亚太卫星、美铝航空材料有限公司**等航空产业企业；也可为**比亚迪、广汽集团**等汽车产业提供技术支持；以及服务于深圳绿色制造行业，如**格林美股份有限公司（钴镍钨回收与硬质合金制造）**等

培育领先于世界的年青优秀人材

伽玛光子对撞机及综合粒子束流设施可满足**粤港澳大湾区科学中心对教育、人才、科学、技术以及产业的迫切需求。**

由于伽马光子对撞机是世界上第一台新型的粒子对撞机，此项目能培养训练出一批在这个领域中**领先于世界的年青优秀人材！**

项目负责人:

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

- 2001年09月-2005年7月 清华大学工程物理系 工学学士;
指导教师: 王乃彦院士、黄文会研究员。
- 2005年09月-2009年7月 清华大学工程物理系 工学博士
导师: 王乃彦院士、高喆研究员。
- 2009年08月- 2016年7月中国原子能科学研究院核技术应用研究所高功率准分子激光实验室 助理研究员, 2011年底
聘为副研究员, 主任助理, 副主任 (主持工作)
- 2017年7月-2021年6月 中国科学院高能物理研究所, 研
究员, 北京试验束负责人, 主攻方向: 高亮度激光康普顿 γ
光源; CEPC同步辐射光源应用开拓; CEPC束流能量标定;
 $\gamma\gamma$ 对撞机总体方案设计。负责协调高能所计量资质认证工作
开展。
- 2021年7月-现在 中山大学深圳校区理学院副院长主管科研,
主持伽马对撞机项目论证和建设



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

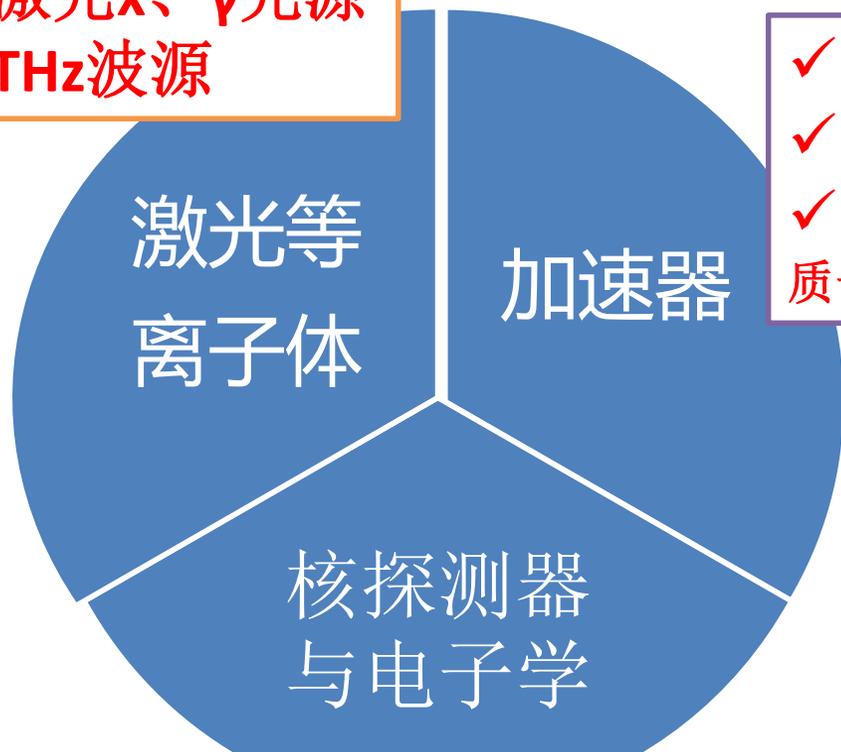
粒子物理探测器、新型探测
器技术、核电子学等核探测
器与核电子学相关专业

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）

中山大学理学院 诚邀全球英才加盟

招聘岗位

百人计划引进人才

领军人才 从事具有重大创新性、发展前景以及关键共性技术研究工作，并取得具有重要创新和重大影响的标志性成果。在国内外具有重要影响力、学术地位和学术水平与此相当，年龄不超过50周岁。

中青年杰出人才

具有特别优秀的科学研究和技术创新潜能，研究方向具有重要创新前景，获得国内外认可的专业成就，取得国内外公认的科研成果。理工科类，年龄不超过40周岁。

青年学术骨干

具有活跃的创新思维、较强的创新能力和突出的发展潜力，取得高水平、创新性的专业成就。理工科类，年龄不超过35周岁。

青年优秀人才

教育科研背景良好，具有活跃的创新思维和较好的发展潜力，需取得最高学历不满3年，年龄不超过35周岁。

专职研究人员

在国内外高校、研究机构具有博士后、讲师或者助理教授工作经历的人员；原则上取得不少于3项的代表性成果，成果特别突出者数量可适当减少；有主持或参与省部级以上项目经历申请者优先考虑。年龄不超过38周岁。

特聘研究员

在国内外高校、研究机构经历过严格的学术训练，具有较大学术潜力；原则上取得不少于2项代表性成果，成果特别突出者数量可减少到1项；年龄不超过38周岁。

特聘副研究员

博士后

年龄在35岁以下，获得博士学位不超过3年，具备较高的学术水平和较强的科研能力的国内外优秀博士。

招聘学科方向

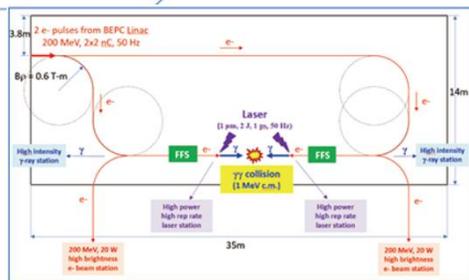
加速器束流物理、磁铁、真空、机械、辐射防护等加速器相关专业

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

核医学诊断、治疗，辐射剂量计算与探测等相关专业

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



伽马对撞机及综合束流设施示意图



200TW激光等离子体研发平台示意图



扫一扫上面的二维码图案 加我微信



扫一扫上面的二维码图案，加我微信

联系方式

联系人：裴老师

联系邮箱：peidan3@mail.sysu.edu.cn

联系电话：86-755-23260090

联系地址：广东省深圳市光明区中山大学理学院



中山大学理学院
微信公众号