高能物理前沿与未来
—及中国的机会与贡献

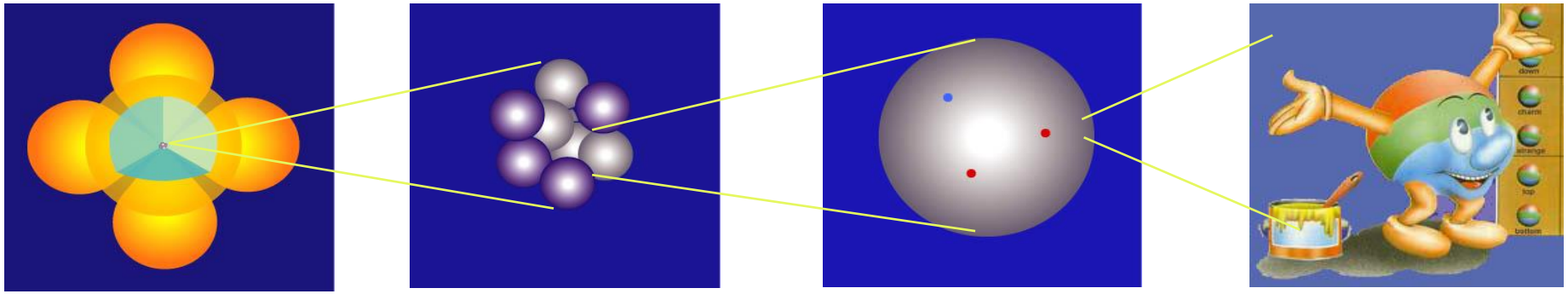
王贻芳

中国科学院高能物理研究所

国科大，2022.10.14

粒子物理

粒子物理，也称高能物理，是对分子(➔化学)、原子(➔原子物理、凝聚态物理)、原子核（➔ 核物理）研究的自然发展与深化



Atom
原子
10^{-10} m

nucleus
原子核
10^{-14} m

nucleon
核子(质子、中子)
10^{-15} m

quark
夸克
$<10^{-17}$ m

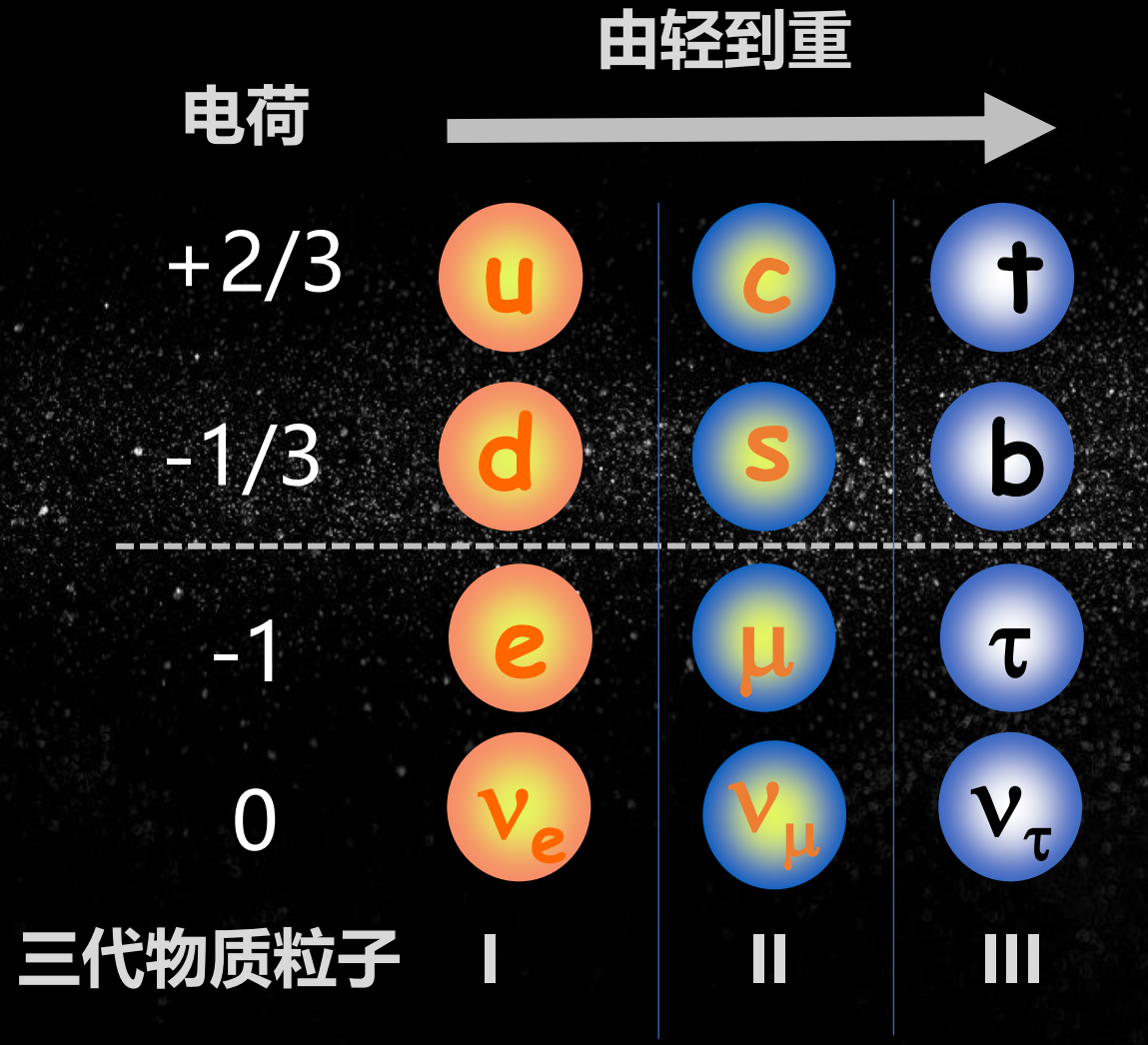
对物质世界的基本组分及其相互作用研究是近代科学发展的根本动力之一

粒子物理研究的内容与目标

在量子物理和原子核物理研究的基础上，上世纪五十年代粒子物理成为一门独立学科

- **构成物质世界的最基本粒子**
- **基本粒子之间的相互作用**
- **基本粒子的各种性质**
- **理解宇宙起源与演化**

基本粒子：构成物质世界的基本“砖块”



1964年，盖尔曼等提出夸克模型

1974年，丁肇中、B. 里克特发现 J/Ψ 粒子
$(c\bar{c})$, $m_c \sim 1.5GeV$

1977年，L. 莱德曼发现 ϒ (9.5GeV)
$(b\bar{b})$, $m_b \sim 5GeV$

1995年，美国费米实验室 CDF、D0实验发现 Top 夸克
(t)，$m_t \sim 173GeV$

除夸克之外，还存在着另一类基本粒子：轻子

1897年， J.J. 汤姆逊等发现电子

1936年，C.D. 安德森等发现 μ 轻子

1956年， F. 莱因斯等发现 ν_e

1962年， L. 莱德曼等发现 ν_μ

1975年， M. 珀尔等发现 τ 轻子

2000年，美国DONUT实验发现ν_τ

1989-1990年，SLC和LEP发现，基本粒子只有3代

基本粒子的标准模型：“砖块”+“水泥”

- 物质由三代轻子与夸克构成:

$$\begin{pmatrix} e & \mu & \tau \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} u & c & t \\ d & s & b \end{pmatrix}$$

- 传递相互作用的粒子:

光子	—	电磁作用	→ 电弱统一理论
$W^{\pm}$ 和 Z	—	弱作用	
胶子	—	强作用	→ 量子色动力学(QCD)

- 质量起源

Higgs

粒子物理的辉煌成就

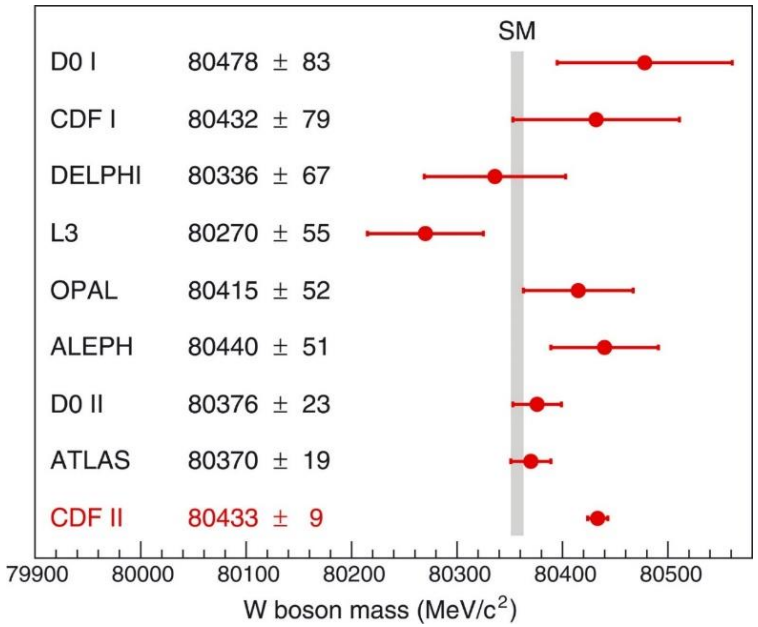
中国科学家错过了上个世纪粒子物理学的大多数成就。现在我们能提出问题并给出解决问题的思路吗?

- **50年代以来，粒子物理研究取得了辉煌成就**
- 标准模型的理论取得了巨大成功（*8次诺贝尔奖*）
- 发现了构建物质世界的所有“基本粒子”，其性质与标准模型预言符合（*9次诺贝尔奖*）
- 加速器与探测器技术得到广泛应用（*3次诺贝尔奖*）
- 对宇宙起源与演化及其标准模型的建立做出了重要贡献（*3次诺贝尔奖*）

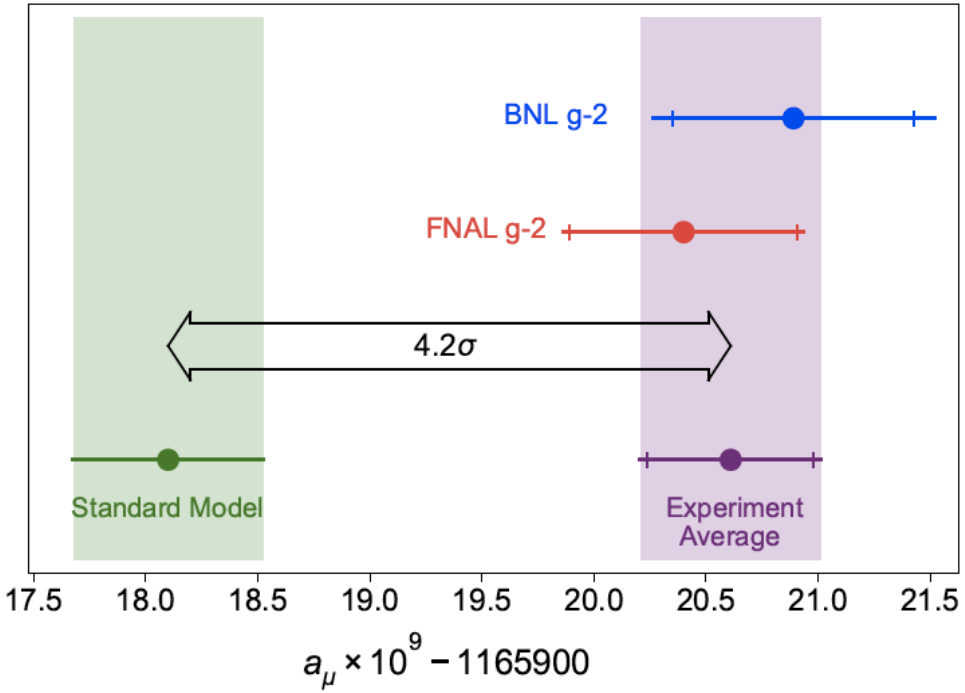
粒子物理到了尽头了吗？

标准模型与实验结果的“偏离”

- 中微子质量不为零
- W质量偏离标准模型的预言
- g-2偏离标准模型的预言



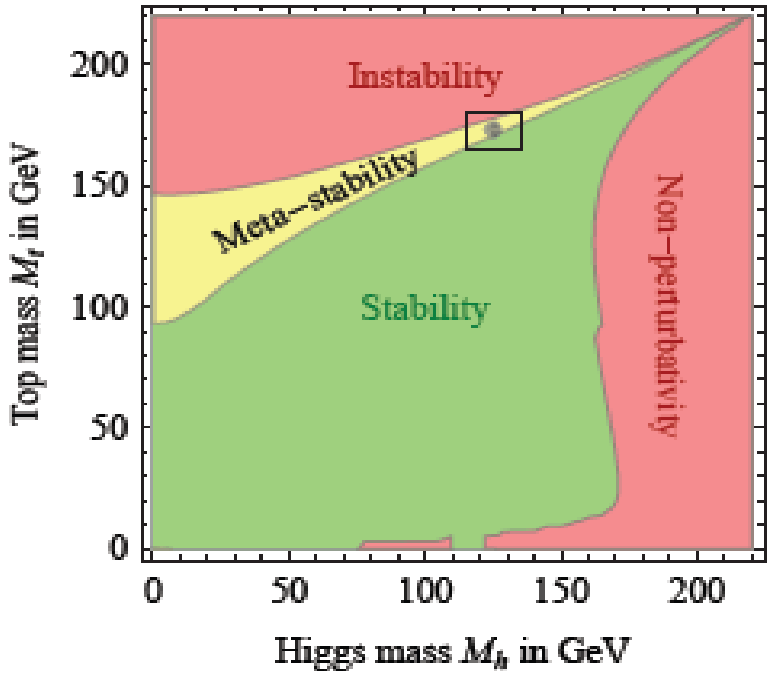
W粒子质量与标准模型的预言偏差7.0 σ



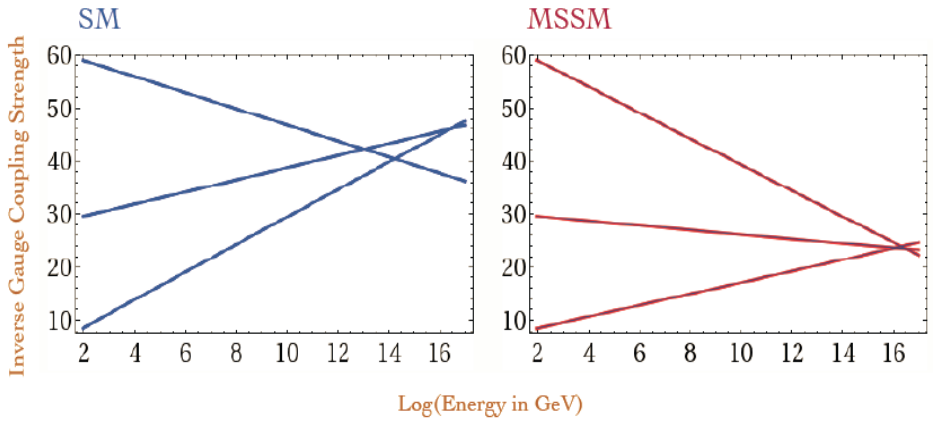
缪子反常磁矩与标准模型偏差4.2 σ

标准模型上空的“乌云”

- **实验**
  - 上述实验迹象
- **理论：**
  - 真空不稳定
  - 味对称
  - 耦合常数不相交：弱电与强相互作用不能统一
  - 希格斯粒子质量来源
  - 基本粒子质量的巨大差距
  - 参数的精细调节
  - 暗物质粒子的位置
  - CP破坏（物质反物质不对称）



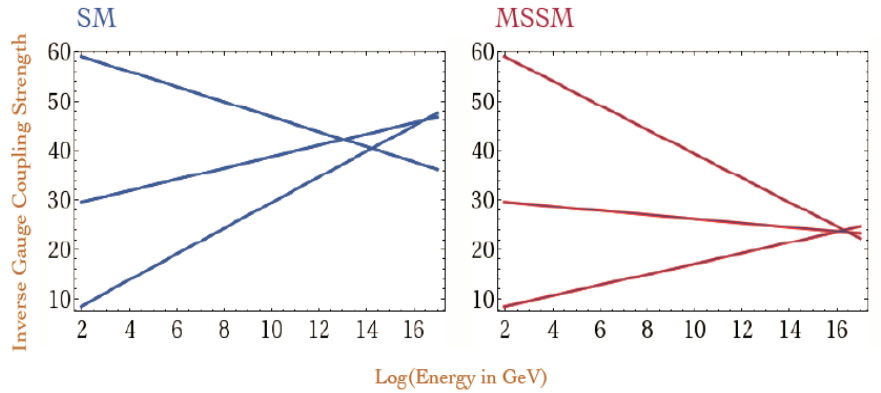
$$\begin{pmatrix} e & \mu & \tau \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} u & c & t \\ d & s & b \end{pmatrix}$$

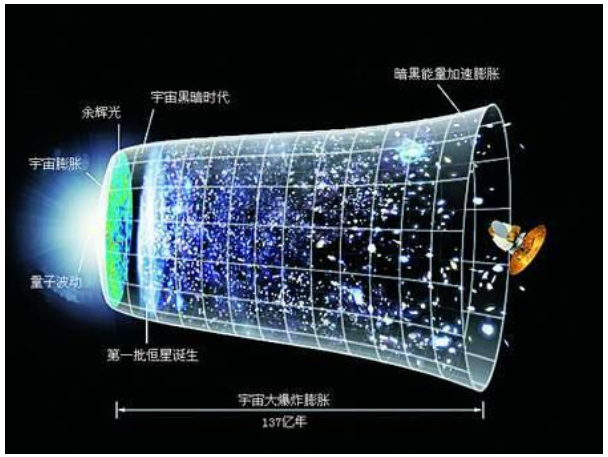


粒子物理的未来发展方向

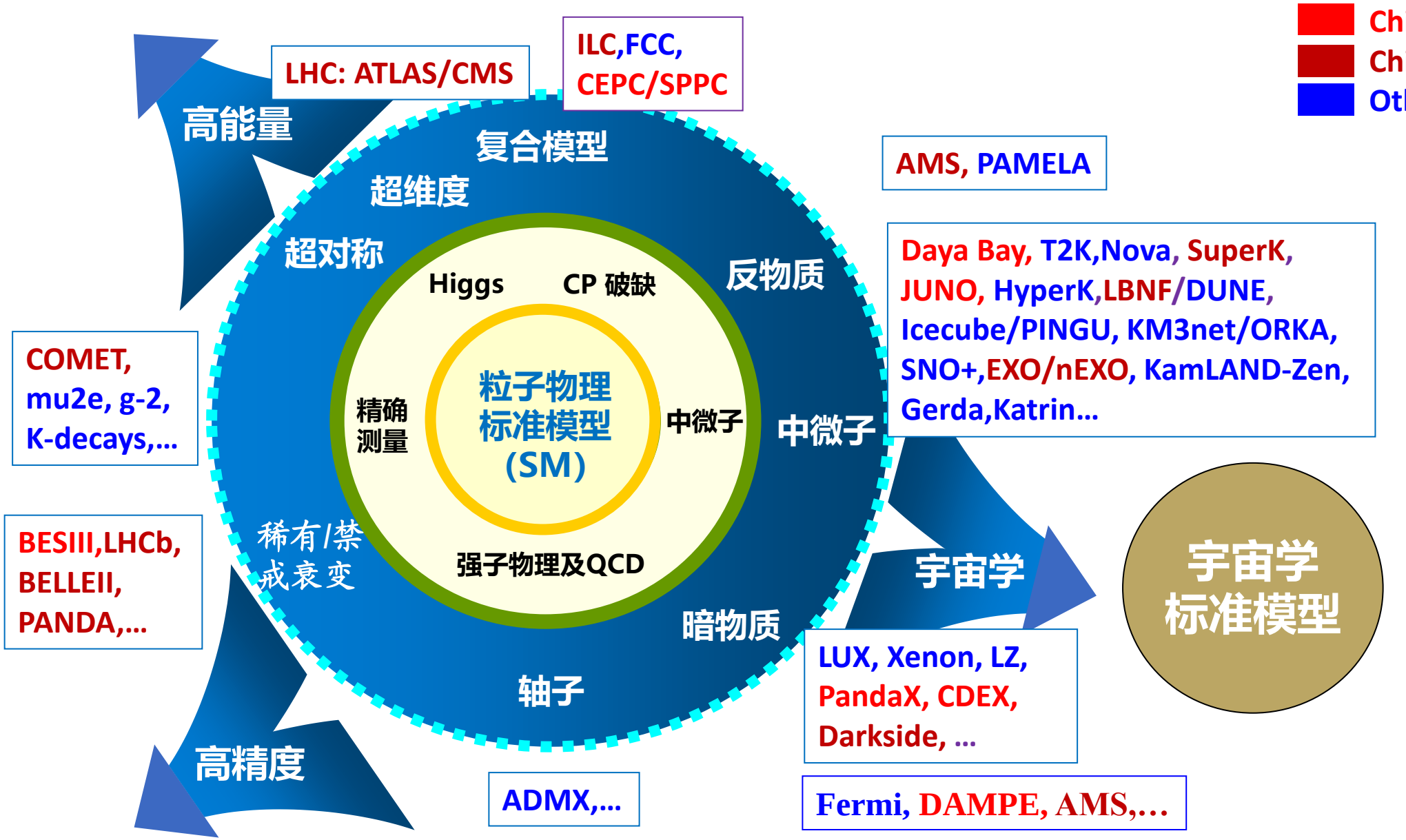
- **构成物质世界的基本粒子**
  - 夸克如何构成强子？如何构成质子的质量、半径、自旋等？
    如何构成奇特强子态：多夸克态、混合态、胶子球？
  - 中微子质量？Dirac 或 Majorana？轻子CP破坏？
  - 更深层次的基本粒子世界？
- **基本粒子之间的相互作用**
  - 希格斯粒子的质量、耦合、内部结构？
  - 希格斯质量导致真空不稳定，标准模型对吗?
  - 大统一？
  - 标准模型的高精度检验：g-2, μ-e conversion,…
- **理解宇宙起源与演化**
  - 暗物质粒子？➔ 新的玻色子？
  - 反物质粒子？➔ 轻子CP破坏？

$$\begin{pmatrix} e & \mu & \tau \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} u & c & t \\ d & s & b \end{pmatrix}$$



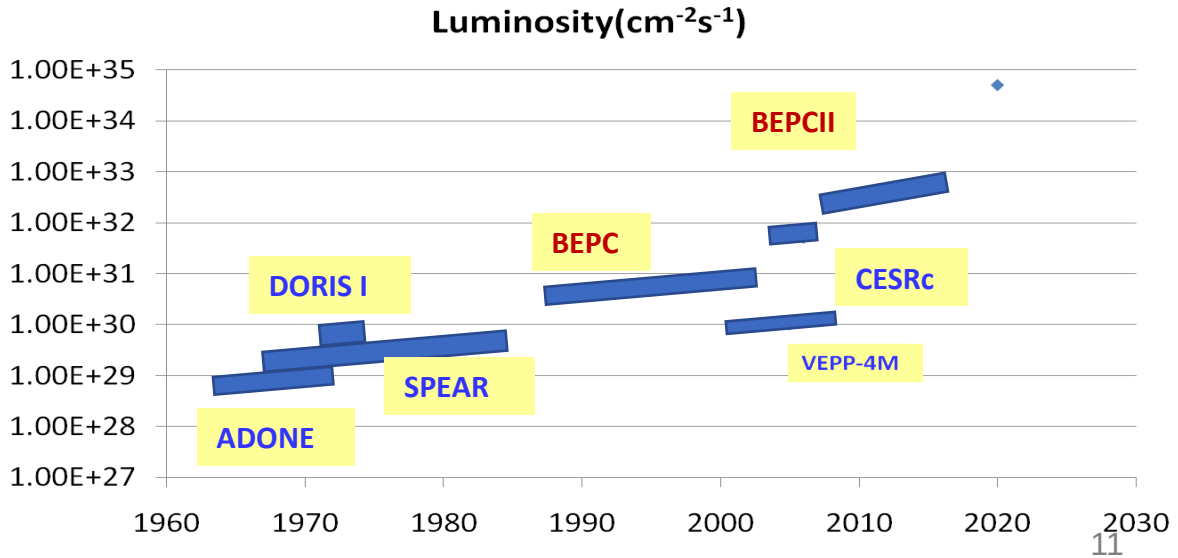


全球粒子物理实验图谱


China-based
China-participated
Others
高能量
LHC: ATLAS/CMS
ILC,FCC,
CEPC/SPPC
复合模型
超维度
超对称
Higgs
CP 破缺
反物质
精确
测量
粒子物理
标准模型
(SM)
中微子
中微子
稀有/禁
戒衰变
强子物理及QCD
暗物质
轴子
高精度
ADMX,...
AMS, PAMELA
Daya Bay, T2K,Nova, SuperK,
JUNO, HyperK,LBNF/DUNE,
Icecube/PINGU, KM3net/ORKA,
SNO+,EXO/nEXO, KamLAND-Zen,
Gerda,Katrin...
COMET,
mu2e, g-2,
K-decays,...
BESIII,LHCb,
BELLEII,
PANDA,...
宇宙学
宇宙学
标准模型
LUX, Xenon, LZ,
PandaX, CDEX,
Darkside, ...
Fermi, DAMPE, AMS,...

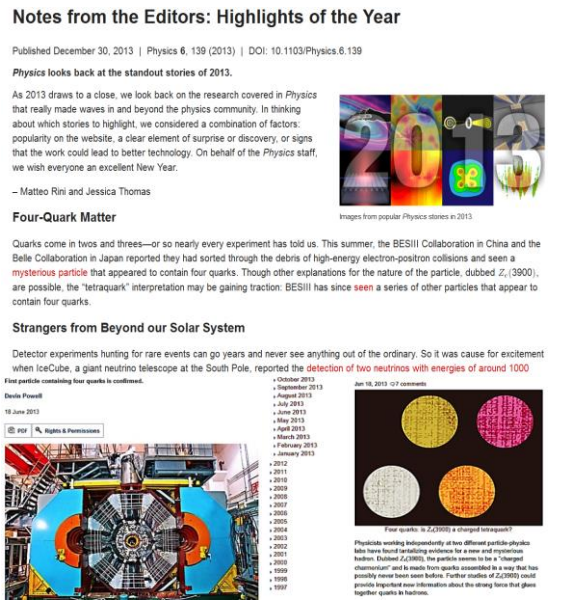
物质结构之夸克：北京正负电子对撞机（BEPC)

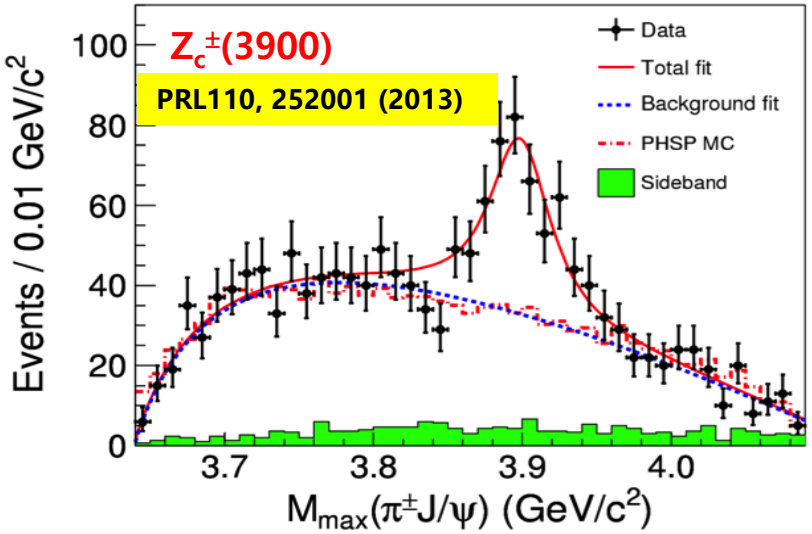
- 中国的粒子物理实验的开端
- 北京正负电子对撞机1984年开工，1988年实现对撞
- 北京正负电子对撞机重大改造工程（BEPCII）2009年完成

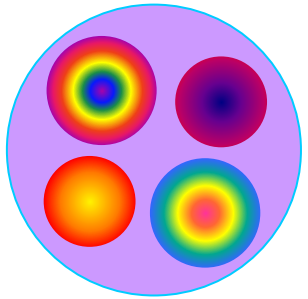


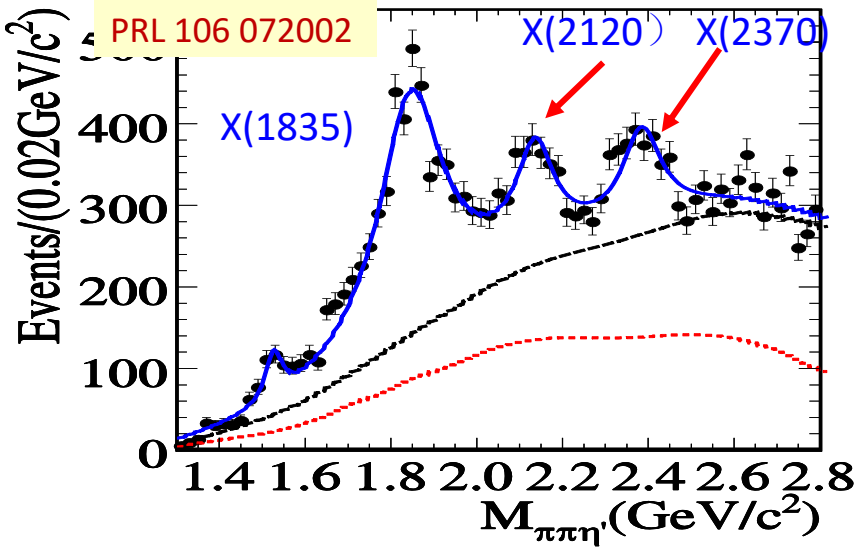
北京谱仪（BESIII）的重大成果：新型强子态

- 过去50年，人们一直在寻找超出传统夸克模型的新型强子态
- BESIII实验2013年发现了4夸克态$Z_c^{\pm}(3900)$，其后又发现了其伴随态$Z_c^0(3900)$和$Z_c^0(4020)$，最近又发现了$Z_{cs}(3985)$，提供了奇特强子态存在的有力证据
  - 国外科学杂志广泛报道，《物理》杂志发表评论文章
  - 入选美国物理学会《物理》杂志2013年国际十一项国际重要成果之首，2013年度“中国科学十大进展”



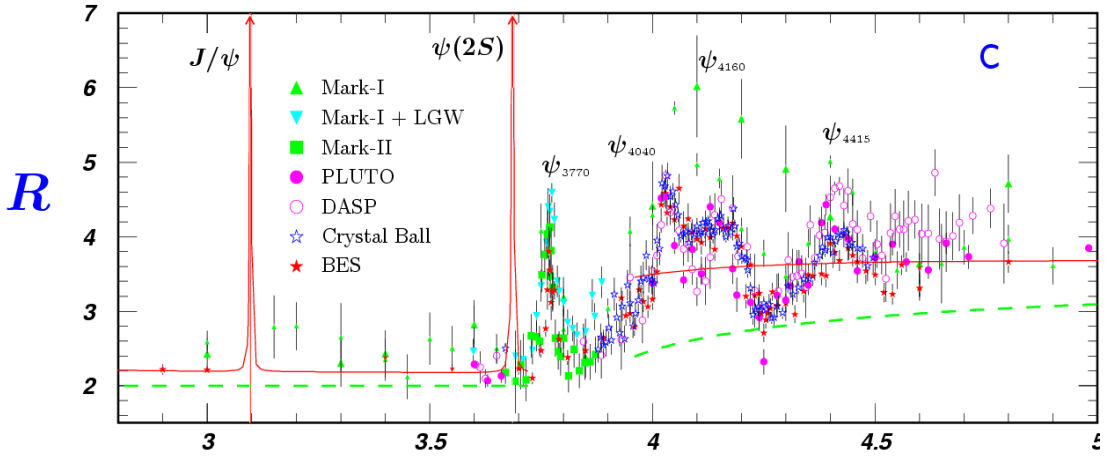


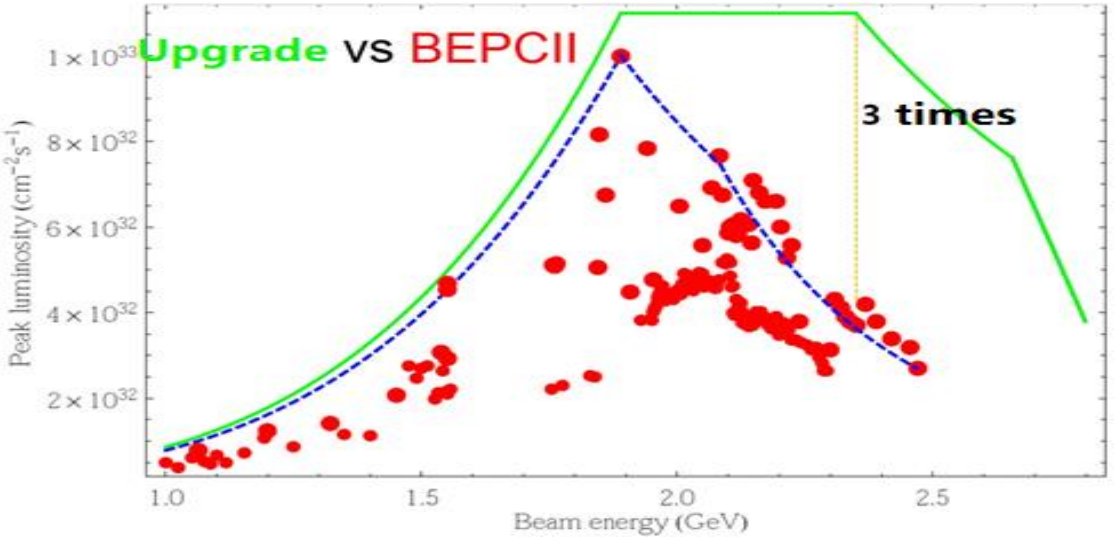




BEPCII/BESIII的未来

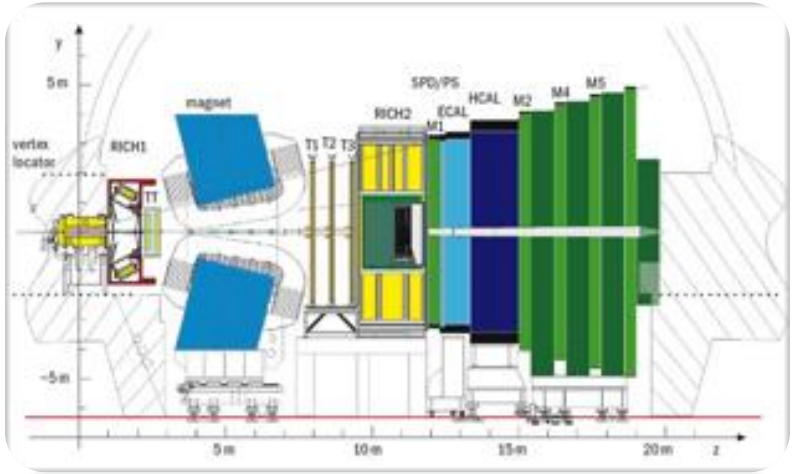
- τ-粲能区具有丰富的物理，将继续运行10年以上：
  - 各种共振态 ➔ 新强子态，新衰变道。。。
  - 阈值效应 ➔ 量子态确定(量子纠缠)，标准模型精确检验
  - 微扰与非微扰交界 ➔ 格点量子色动力学检验
- 计划：2024年之前将BEPCII升级改造，运行至2030年
  - 将亮度升级~3倍 （1年等于~3年）
  - 将束流能量从最高2.45 GeV 提高至2.8 GeV
- 方案（最小扰动与变更）：
  - 增加新的超导腔
  - 新的超导磁体
- 从1981年开始建设，到2030年退役，科学寿命50年！

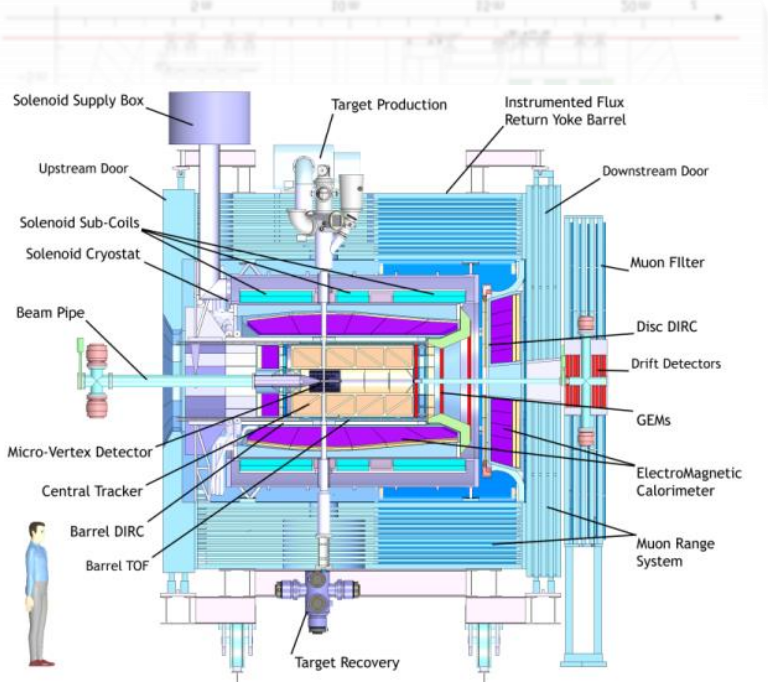




BEPCII/BESIII的国际竞争

- 运行在欧洲大型强子对撞机(LHC)上的LHCb实验(p打靶)
  - 能量高，强子产额高，本底高
    - DDbar混合
  - 清华大学、国科大等参加，取得一系列重大发现：
    - 多个5夸克态、四夸克态、全粲四夸克态、双粲重子等
    - 被选为英国《物理世界》、美国《物理》等年度重要成果，中国科学十大进展。。。
- 即将完成的德国PANDA实验(ppbar对撞)
  - 强子产额高，本底高，高能所、近物所、中科大等参加
- 正在进行的日本BELLE II实验（e^+e^-对撞@~10 GeV）
  - 能量高，强子产额高，高能所、国科大等参加
- 正在进行的美国GlueX实验等



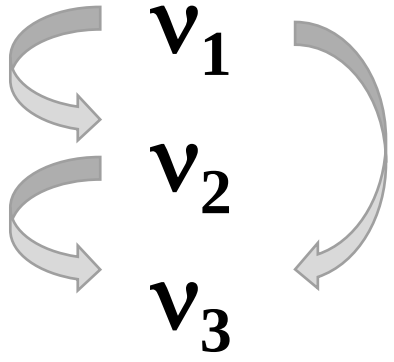


BESIII的未来面临激烈竞争和挑战

物质结构之中微子：大亚湾实验

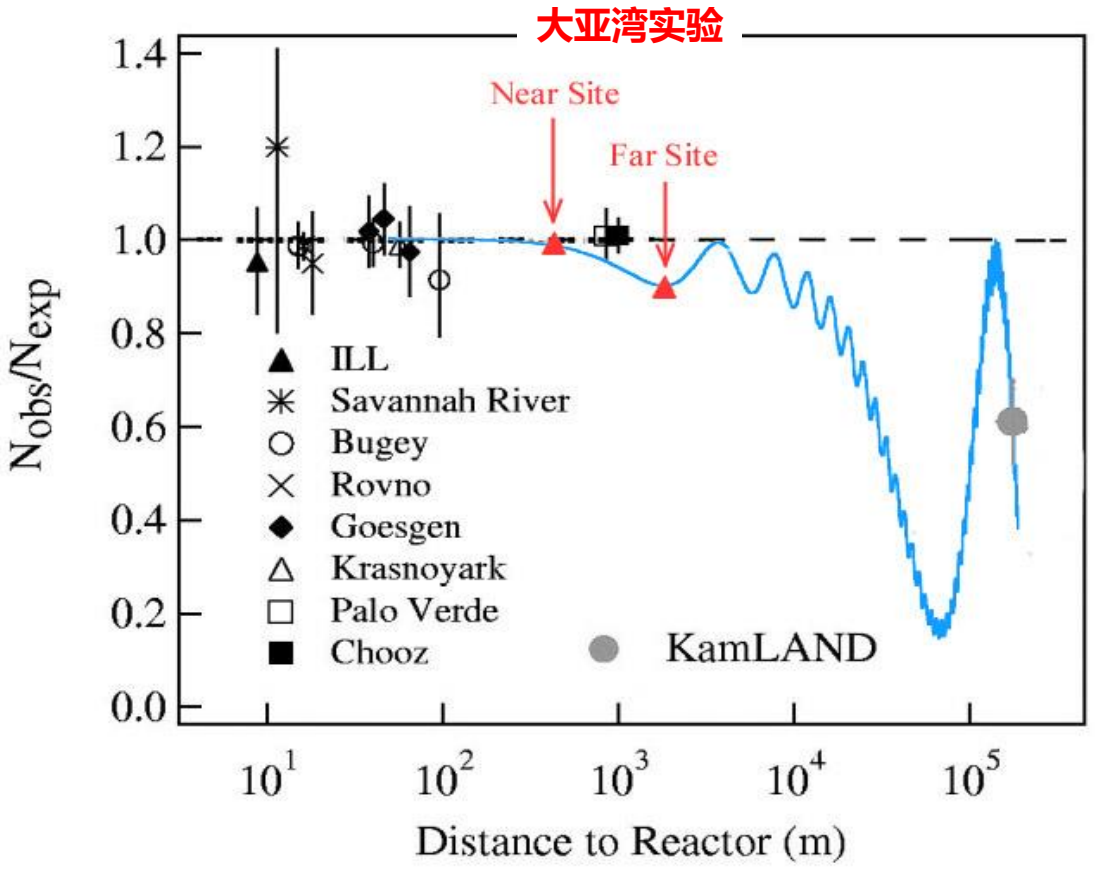
θ_{12} 太阳中微子振荡

θ_{23} 大气中微子振荡



θ_{13} ?

- 基本物理规律：完整的振荡图像
- 基本物理参数：标准模型的28个参数之一
- 决定未来中微子物理研究的方向
  - 如果θ_{13}太小，无法测量中微子的CP破坏



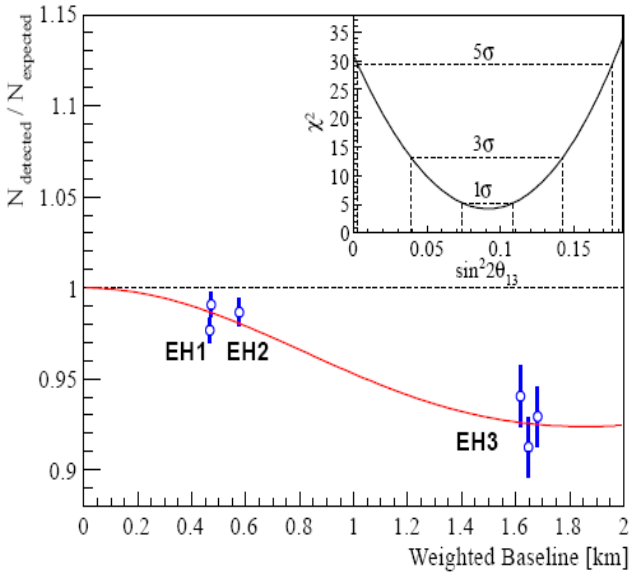
物质与反物质衰变速率不同，可以解释宇宙中为什么没有反物质！

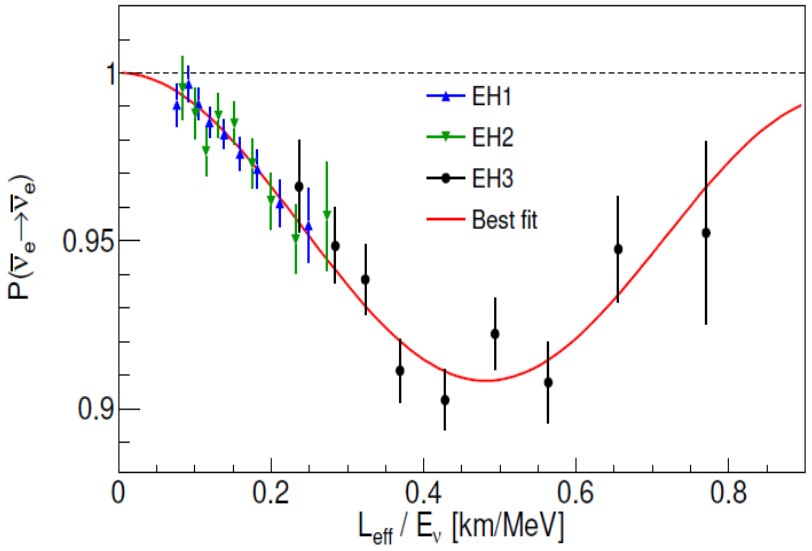
大亚湾实验发现新的中微子振荡

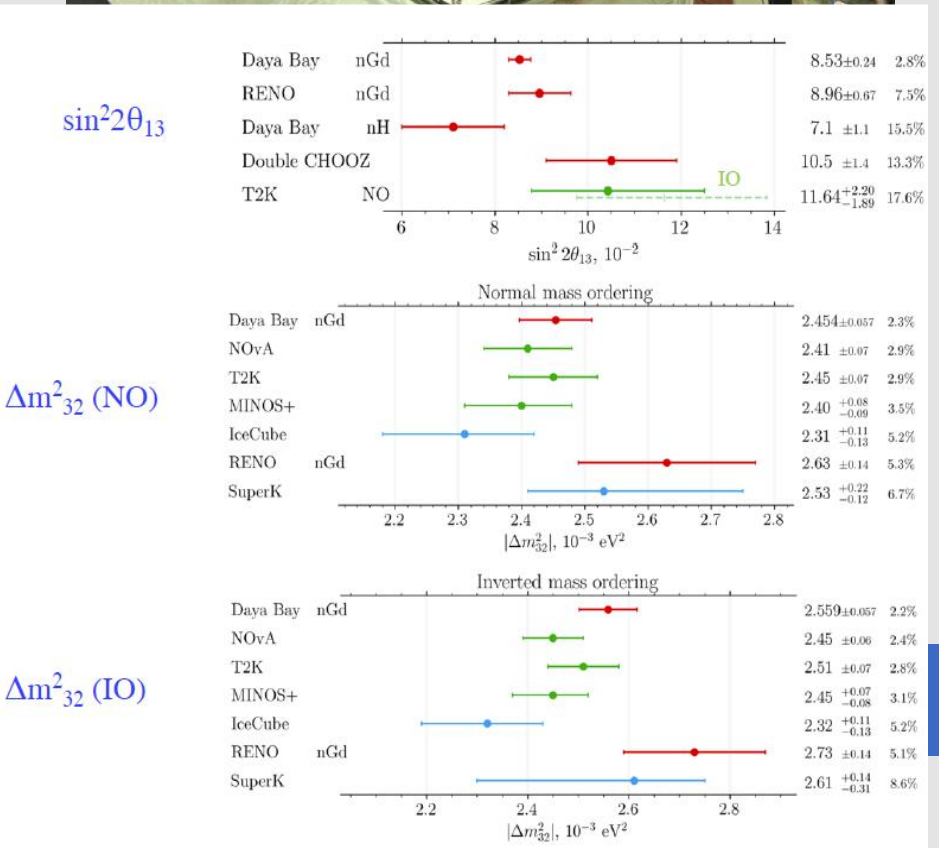
- 2012年3月8日发现新的中微子振荡模式

$Sin^2 2\theta_{13}=0.092\pm0.016(stat)\pm0.005(syst)$
5.2 倍标准偏差，θ_{13}为零的几率为千万分之一

F.P. An et al., Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 171803



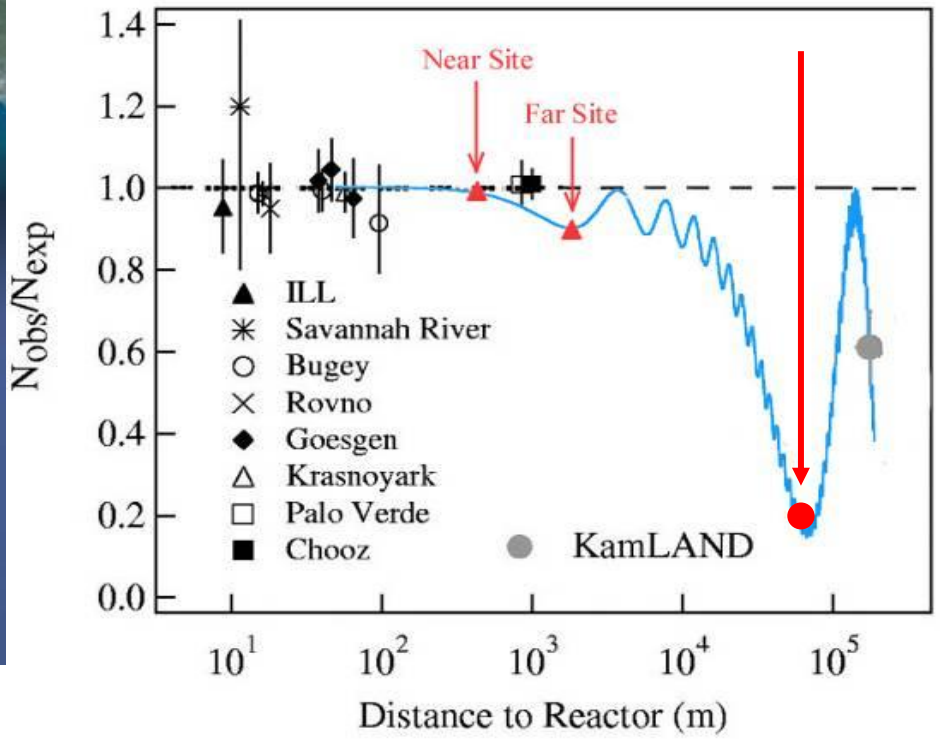




下一步：江门中微子实验

- 继续利用液体闪烁体和反应堆，研究中微子性质
- 利用阳江和台山两个反应堆群，在等距 ~ 53 公里处，建设世界最大的反应堆中微子实验
- 2013年批准，2015年开建，2023年建成

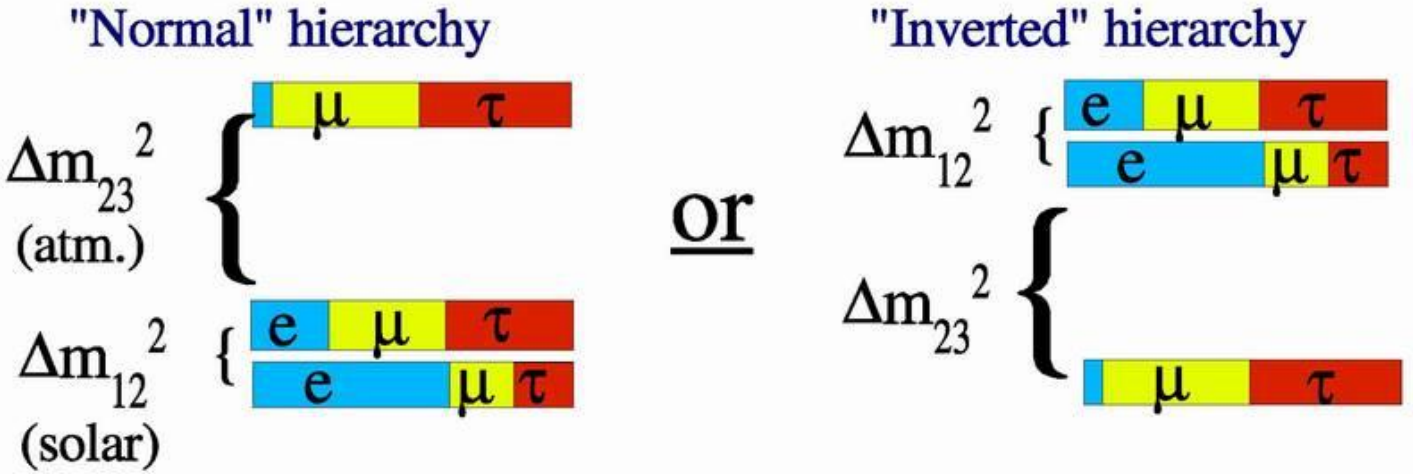
Talk by Y.F. Wang at ICFA seminar 2008, Neutel 2011;
L. Zhan et.al, PRD78:111103,2008; PRD79:073007,2009



江门中微子实验科学目标

科学目标

- 质量顺序（>4σ）
- 混合参数精确测量
- 超新星中微子
- 地球中微子
- 大气中微子
- 不活跃中微子
- ……



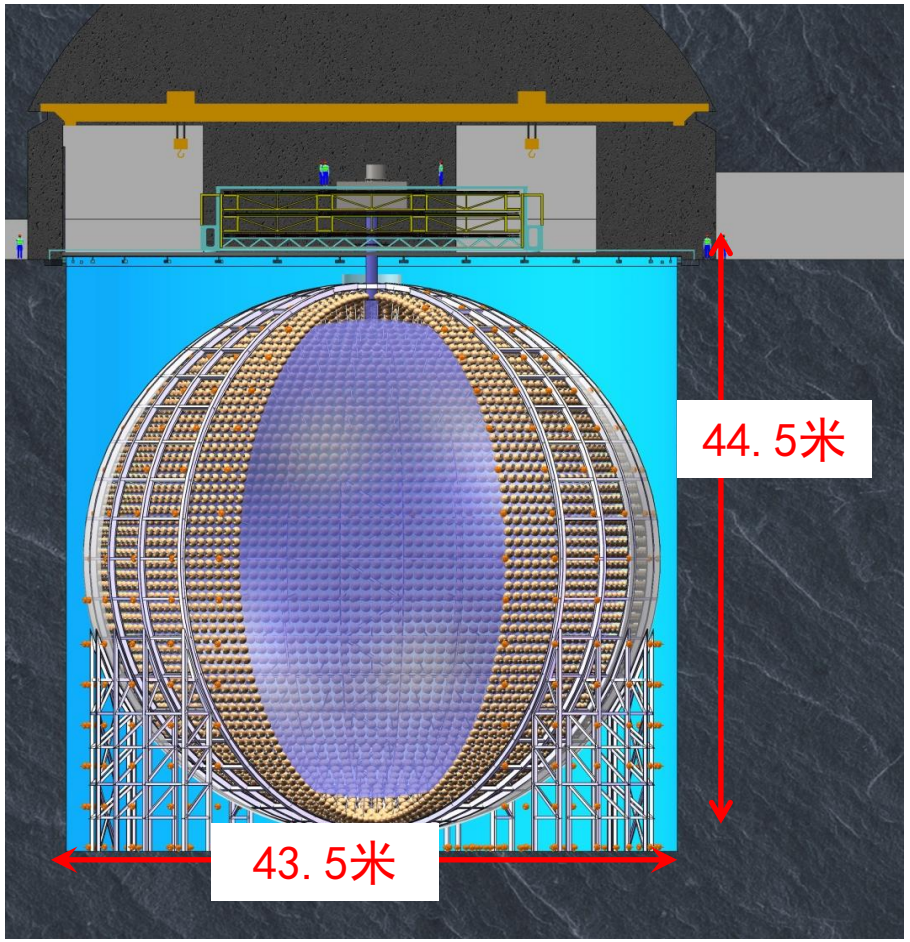
	Current (PDG2020)	JUNO （100 d)	JUNO (6 y)
Δm^2_{31} Δm^2_{32}	1.3%	0.8%	0.2%
Δm^2_{21}	2.4%	1.0%	0.3%
$\sin^2\theta_{12}$	4.2%	1.9%	0.5
$\sin^2\theta_{13}$	3.2%	47.9%	12.1%

未来可以升级为世界最高灵敏度0νββ实验：

- 测量中微子绝对质量
- 判定中微子是否是其自身的反粒子 ➔ 确定标准模型中如何描述中微子

JUNO探测器及其技术挑战

- 世界上最大的液体闪烁探测器➔KamLAND X 20， Borexino X 40
- 性能最好 ➔ 光产额 Borexino X 2，KamLAND X 5



关键技术挑战：

科学的发现首先需要技术的领先

国内跨度最大的地下洞室

- ~ 50米 × 70米

世界上最大的有机玻璃球

- 直径35.4米 (SNO实验是13米)

世界上最大的液体闪烁探测器： 2万吨

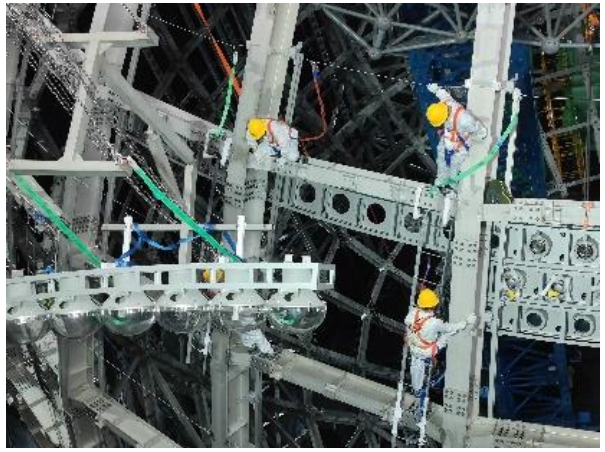
- 透明度世界最好：衰减长度25m (大亚湾实验是15米)

20000个20吋光电倍增管

- 探测效率世界最高: 30%*100% = 30% (超级神冈是25%*60%=15%)

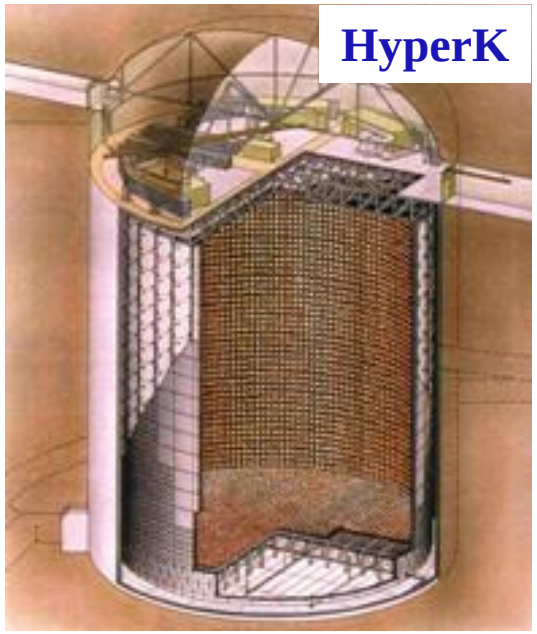
JUNO实验进展

- 地面和地下土建工作基本完成
- 探测器安装方案可行，安装进展顺利，特殊的有机玻璃球粘接工艺得到验证
- 核心关键部件基本完成生产，技术难题得到解决，光电倍增管和液体闪烁体指标国际领先
- 核心指标如中微子能量分辨率 <3%@1MeV,液体闪烁体的洁净度(U/Th量)<10^{-17} g/g 等预计可以实现



中微子物理的未来

- 10年以后，中微子振荡将不再是问题：
  - Nova+T2K+JUNO+ORCA+DUNE 将测定质量顺序
  - DUNE+T2HK/HyperK 将测定CP相角
- 未来的关键问题：
  - 中微子绝对质量 ？
  - 中微子是Majorana粒子吗？无中微子双ββ衰变存在吗 ？

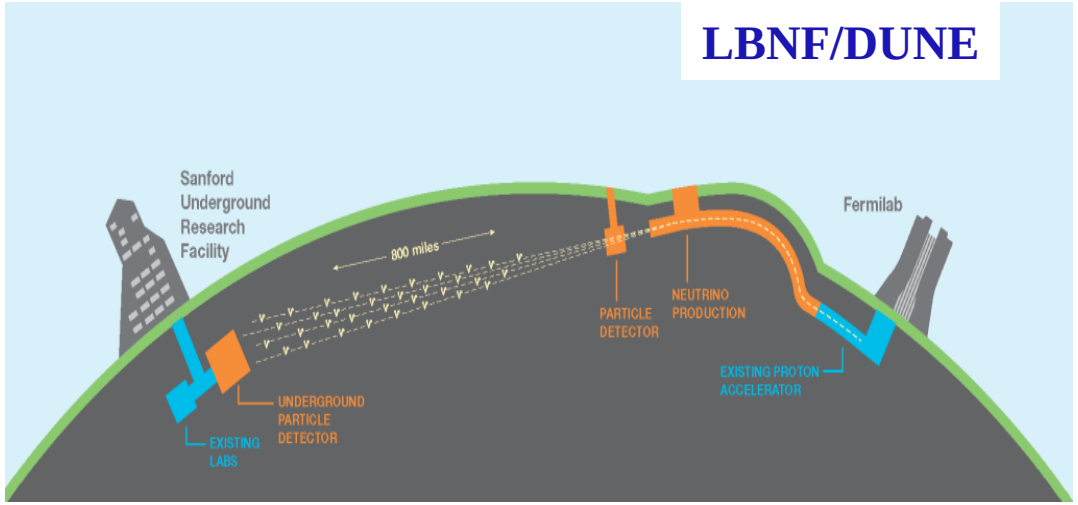


- 从宇宙学: $\Sigma_i\, m_{\nu_i} < \sim 0.1$ eV@95% CL
- 从中微子振荡: $m_{\nu_1} \sim 1$ meV
- 从β衰变, Katrin 将达到 ~ 0.2 eV

$$(m_{\nu_e})^{eff} = [\Sigma_i\, |U_{ei}|^2\, m^2_{\nu_i}]^{1/2}$$

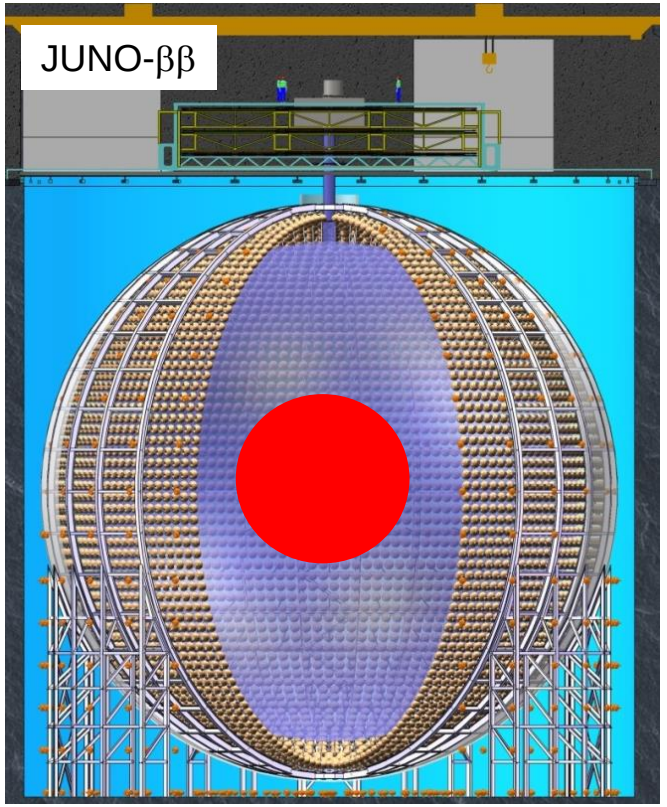
- 0ν ββ 衰变有望实现目标 ~ 1 meV

$$\langle M_{ee} \rangle = |\Sigma_i\, (U_{ei})^2\, m_{\nu_i}|$$



ββ decays: Future Prospects

	Isotope	Mass(t)	$<m_{\beta\beta}>$,meV
SNO+	^{130}Te	8	19-46
KamLAND2-Zen	^{136}Xe	1	~20
NEXT-HD	^{136}Xe	1	14-40
nEXO	^{136}Xe	5	7-22
Darwin/Panda-nT	^{136}Xe	3-5	7-22
LEGEND-1000	^{76}Ge	1	10-40
AMoRE-II	^{100}Mo	0.1	12-22
CUPID	^{100}Mo	0.24	12-20
CUPID-1T	^{100}Mo	1	4-7
JUNO-ββ	^{136}Xe	50	4-10
	^{130}Te	100	3-14



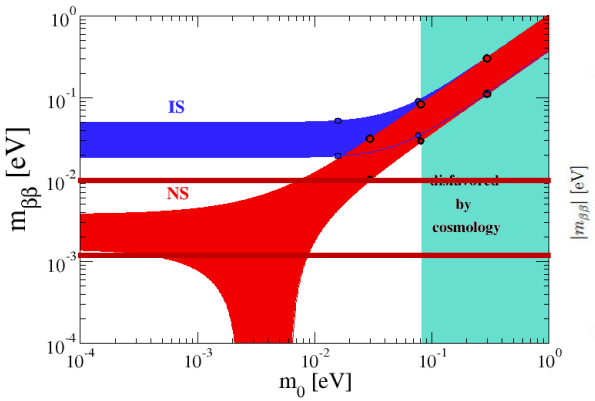
We may be very close to 1 meV

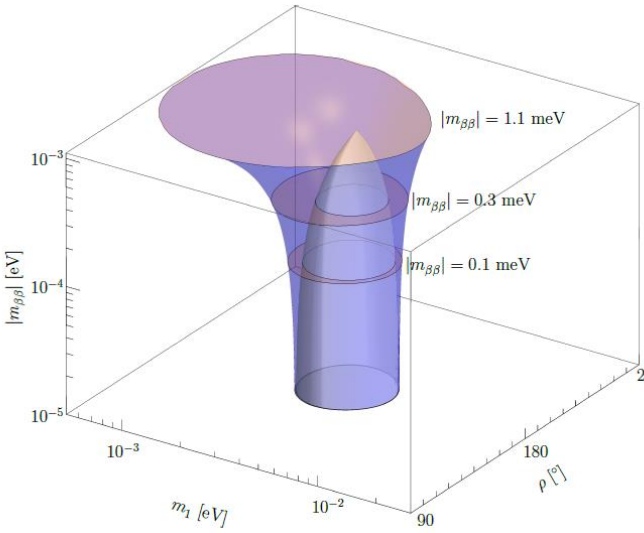
Zhao et al., arXiv: 1610.07143, CPC 41（2017）5

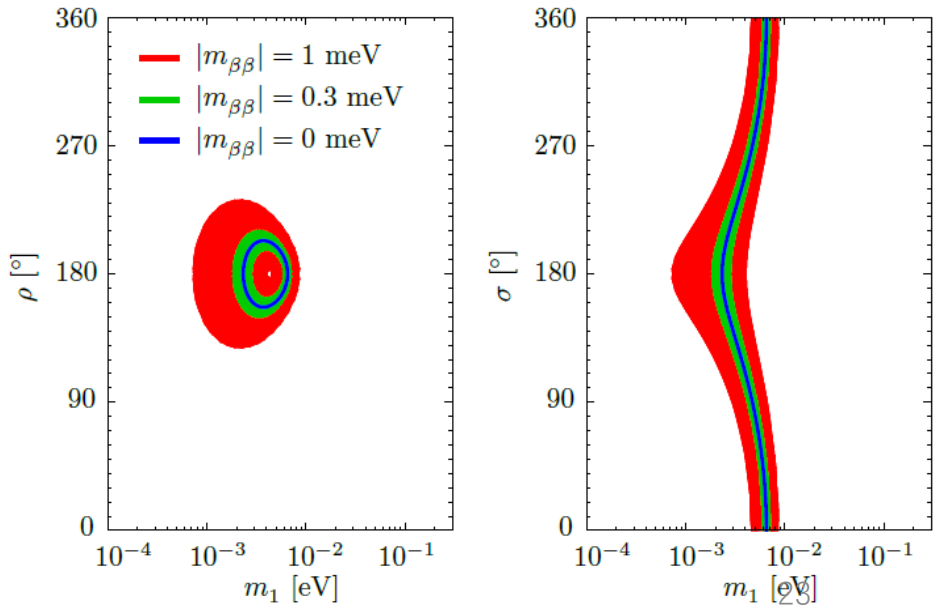
YFW: Exp. Outlook @ Neutrino 2022

Goals of 0νββ Sensitivities

- Goal 1: $|M_{\beta\beta}|$ ~ 0.01 eV covering IO region, achievable in 10 years
  - Target mass ~ 1 T
- Goal 2: $|M_{\beta\beta}|$ ~ 0.001 eV to determine the absolute mass of the lightest neutrino and the Majorana phase ρ, achievable in 20 years ?
  - Increase the target mass by a factor of 10 to 100 ➔ 10-100 t target mass
- Goal 3: $|M_{\beta\beta}|$ ~ 0.0001 eV to cover (almost) all possible parameters space of Majorana neutrinos to prove or dis-prove Majorana neutrinos, achievable ?
  - Increase the target mass by another factor of 10 to 100 ➔ 100-10000 t target mass



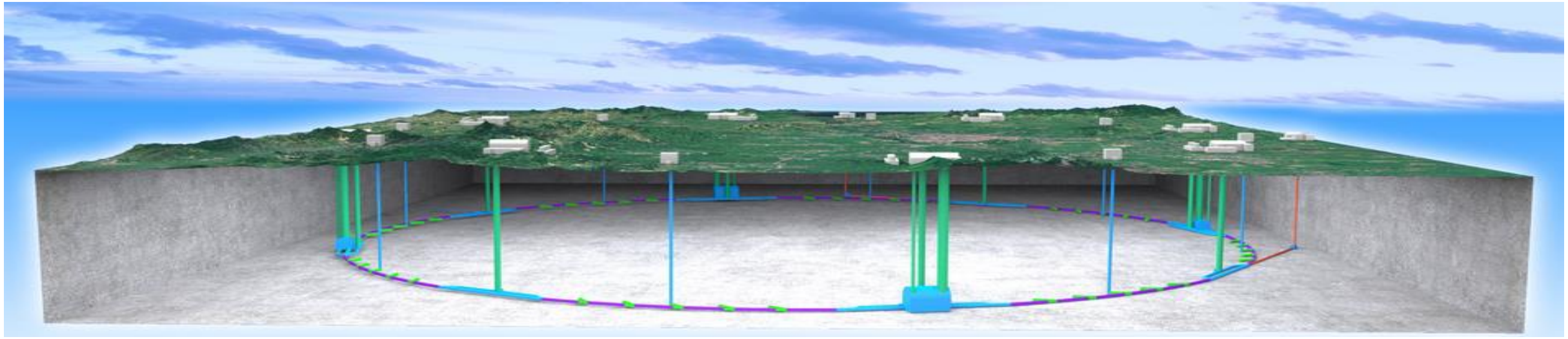




J. Cao et al., arXiv:1908.08355

相互作用之希格斯粒子：下一代高能加速器CEPC

- 对基本粒子及其相互作用的进一步认识需要新的加速器
- 发展路径及技术选择：直线正负电子对撞机（ILC、CLIC）、环形正负电子对撞机（CEPC、FCC-ee）、质子对撞机（SPPC、FCC-hh）、muon对撞机？
- 2012年，我们首先认识到Higgs粒子是未来发展的最重要窗口；对较低质量的希格斯粒子，应该建设环形正负电子对撞机（CEPC）
- 这个方案具有未来升级的可能性: 质子对撞, 电子-质子对撞, 重离子对撞, …
- CERN在我们之后开始了 FCC-ee/FCC-hh 方案研究

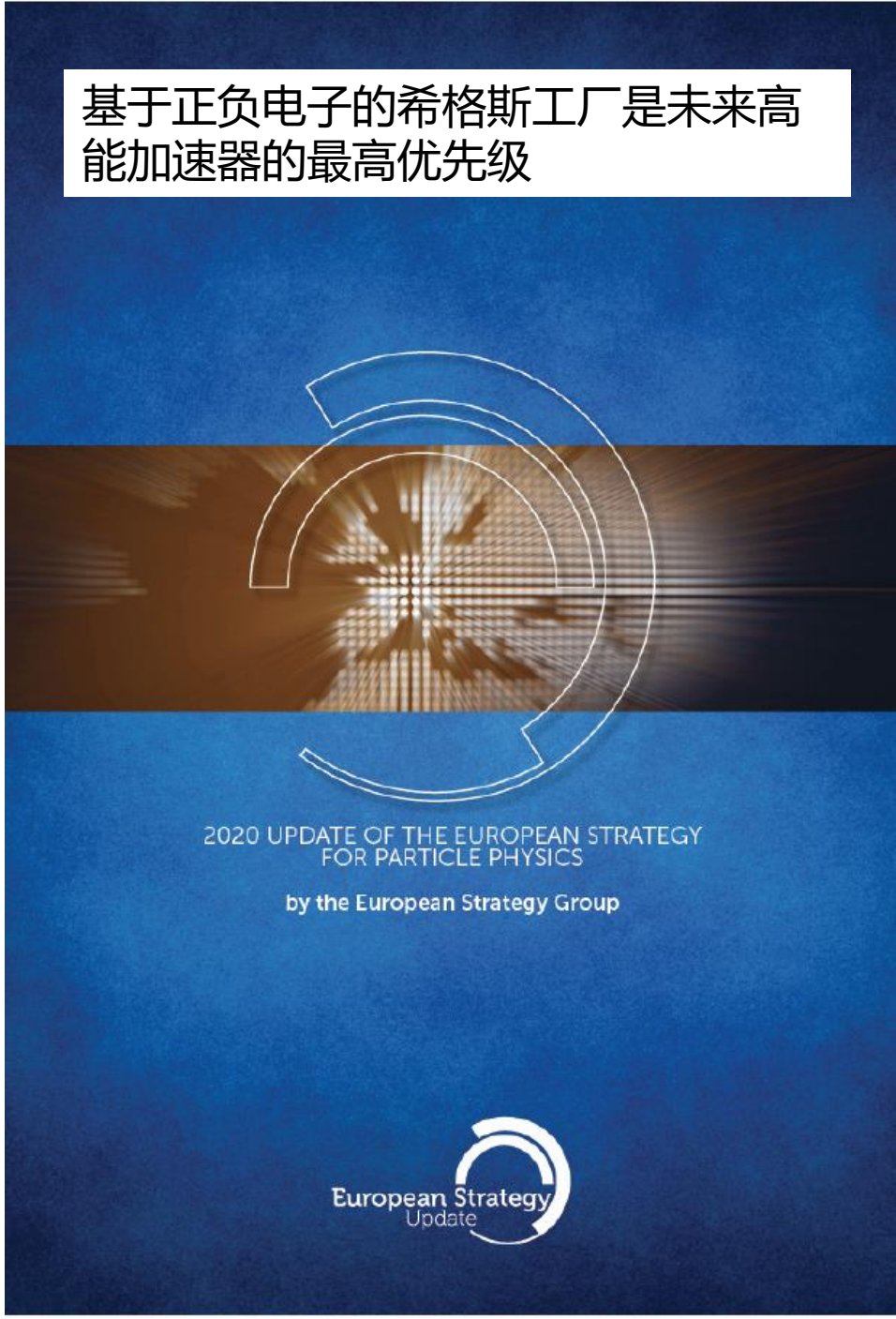


为什么要研究希格斯粒子？

- 希格斯粒子是基本粒子吗？
  - 自旋为零的基本粒子从来没见过
  - 希格斯势的形式跟超导中的朗道-金兹堡势形式一样 ➔ BCS理论和Copper对
- 希格斯粒子赋给所有粒子质量，但其自身的质量从那里来的？
- 希格斯质量导致真空不稳定，标准模型对吗?
- 其质量值极不自然（需要理论的精细调节）
- 与暗物质粒子耦合？
- 宇宙早期如何演化?

需要有新模型、新观念和新证据 ➔ 下一代实验

基于正负电子的希格斯工厂是未来高能加速器的最高优先级



未来高能加速器的可能选项及各国计划

- e^+e^-
  - Linear Collider：
    - ILC: 250 GeV, 1×10^{34} $cm^{-2}s^{-1}$，~7B$, ~2025/2035
    - CLIC: 380 GeV, 1×10^{34} $cm^{-2}s^{-1}$，~7B$, ~2030/2040
  - Circular Collider
    - FCC-ee: 90-350 GeV, 8×10^{34} $cm^{-2}s^{-1}$，~10B$, ~2030/2040
    - CEPC: 90-250 GeV, 5×10^{34} $cm^{-2}s^{-1}$，~5B$, ~2025/2035
- PP
  - FCC-hh: 100 TeV, ~1×10^{35} $cm^{-2}s^{-1}$, ~20B$, ~2050/2060
  - FCC-hh(Low), 40 TeV, ~1×10^{35} $cm^{-2}s^{-1}$, ~10+5B$, ~2030/2040
  - SPPC: 100 TeV, ~1×10^{35} $cm^{-2}s^{-1}$, ~10B$, ~2045/2055
- ep
- $\mu^+\mu^-$
  - Proton driver: muon cooling ?
  - e^+: enough intensity ?
- wake-field acceleration
  - Beam quality, power efficiency, …
  - may be used by CEPC(ILC & CLIC ?) as injectors

欧洲：

- 首选FCC-ee，FCC-hh 作为升级
- CLIC as an option

日本：

- ILC
- HyperK

美国：

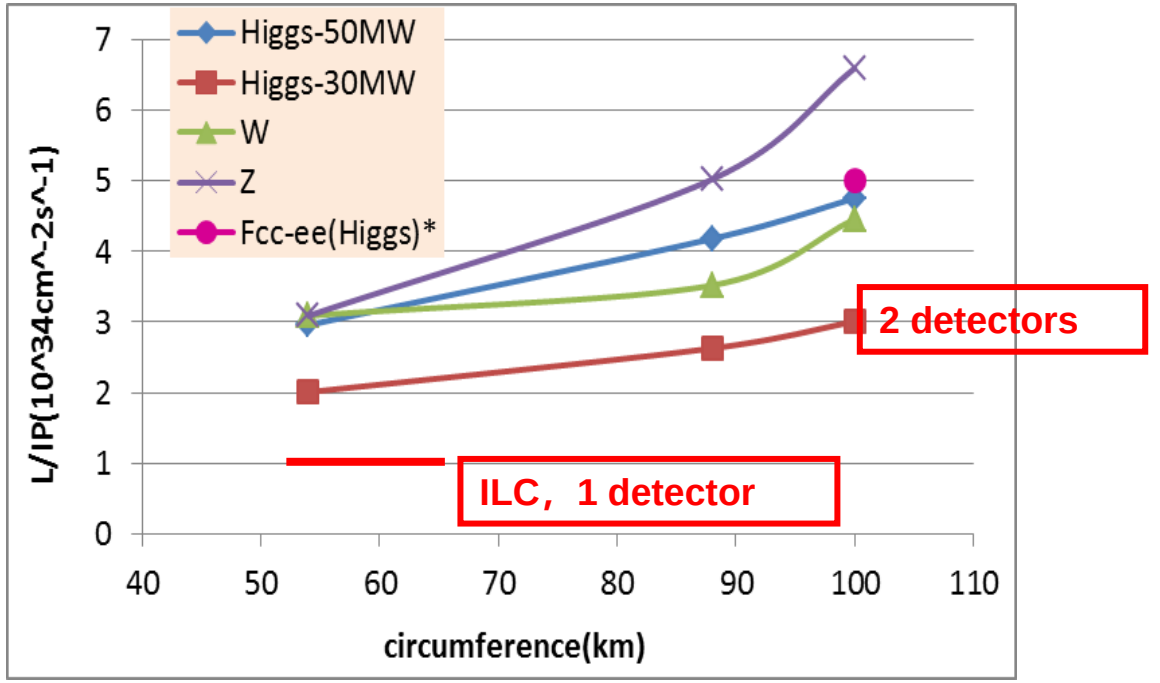
- 中微子 PIPII/DUNE
- Snowmass 提出C3直线对撞机

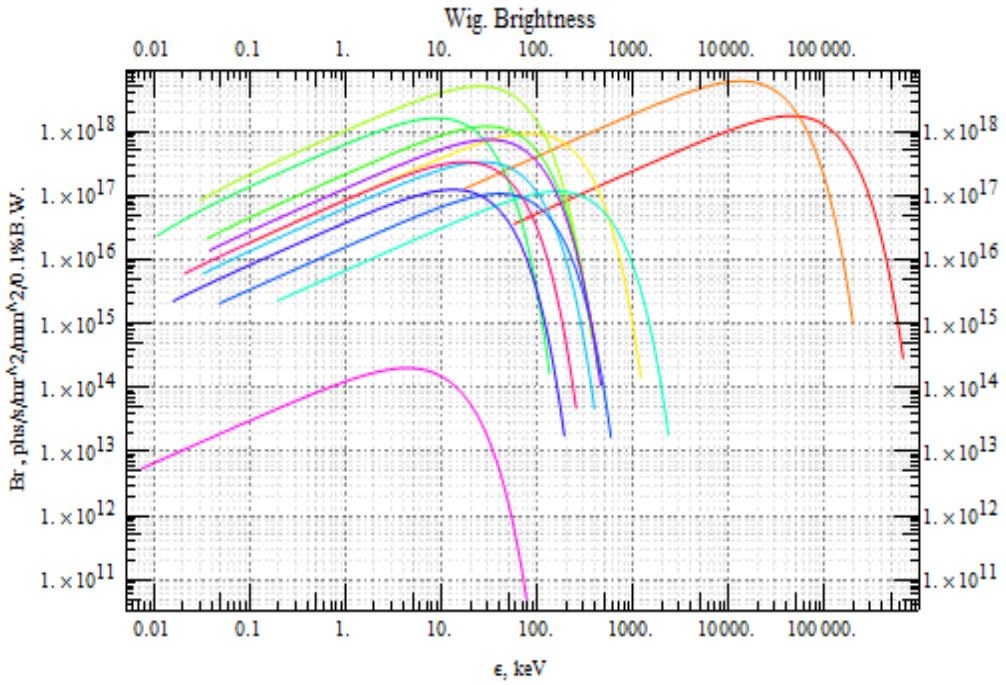
中国：

- JUNO
- CEPC，SPPC 可以作为升级

CEPC：高亮度、多用途、可升级

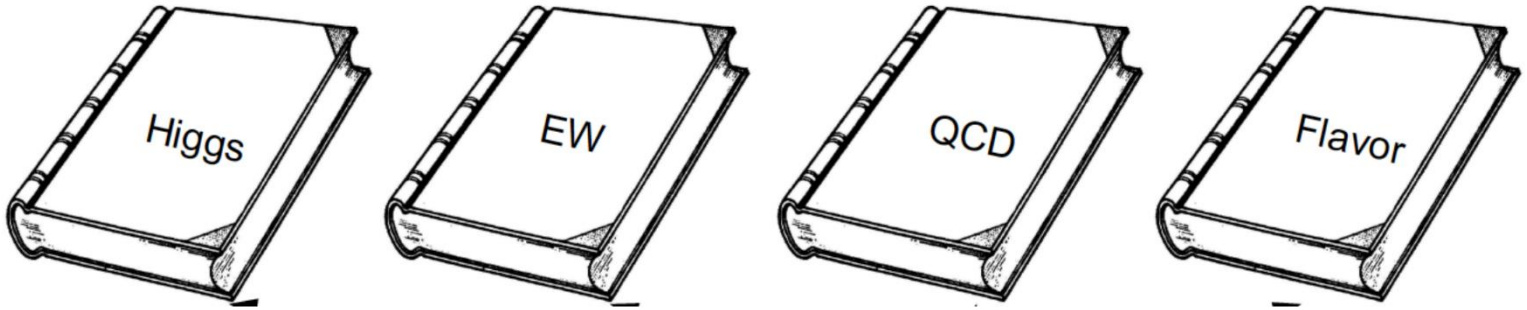
- 高能同步辐射光子能量可以超过100MeV
- 前所未有的MeV级同步辐射光源
  - 核物理、国防、材料结构及缺陷、微加工、极端条件、高压、辐照改性、育种。。。





- 同样造价，CEPC每年可以获得6倍的希格斯粒子 (+ 可用于质子对撞的隧道)

Toward Physics White Papers



. . .

Chinese Physics C Vol. 43, No. 4 (2019) 043002

Precision Higgs physics at the CEPC*

Fenfen An(安芬芬)[4,23] Yu Bai(白羽)[9] Chunhui Chen(陈春晖)[23] Xin Chen(陈新)[5] Zhenxing Chen(陈振兴)[3]
Joao Guimaraes da Costa[4] Zhenwei Cui(崔振崴)[3] Yaquan Fang(方亚泉)[4,6,34;1)] Chengdong Fu(付成栋)[4]
Jun Gao(高俊)[10] Yanyan Gao(高艳彦)[22] Yuanning Gao(高原宁)[5] Shaofeng Ge(葛韶锋)[15,29]
Jiayin Gu(顾嘉荫)[13;2)] Fangyi Guo(郭方毅)[1,4] Jun Gu
Hongjian He(何红建)[11,10] Xianke He(何显科)[10] X
Shih-Chieh Hsu(徐士杰)[32] Shan Jin(金山)[8] Maoqiang J
Chia-Ming Kuo(郭家铭)[21] Peizhu Lai(赖培筑)[21] Boyang I
Haifeng Li(李海峰)[12] Liang Li(李亮)[10] Shu Li(李数)[11,10]
Zhijun Liang(梁志均)[4] Libo Liao(廖立波)[4] Bo Liu
Zhen Liu(刘真)[26,30;4)] Xinchou Lou(娄辛丑)[4,6,33,34] Lianli
Mila Pandurovic[16] Jianming Qian(钱剑明)[24;5)]
Manqi Ruan(阮曼奇)[4;6)] Alex Schuy[32] Lianyou Shan(
Shufang Su(苏淑芳)[25] Dayong Wang(王大勇)[3]
Yifang Wang(王贻芳)[4,6] Yuqian Wei(魏虽寒)[4] Yue Xu(
Weiming Yao(姚为民)[28] Dan Yu(于丹)[4] Kaili
Mingrui Zhao(赵明锐)[2] Xianghu Z

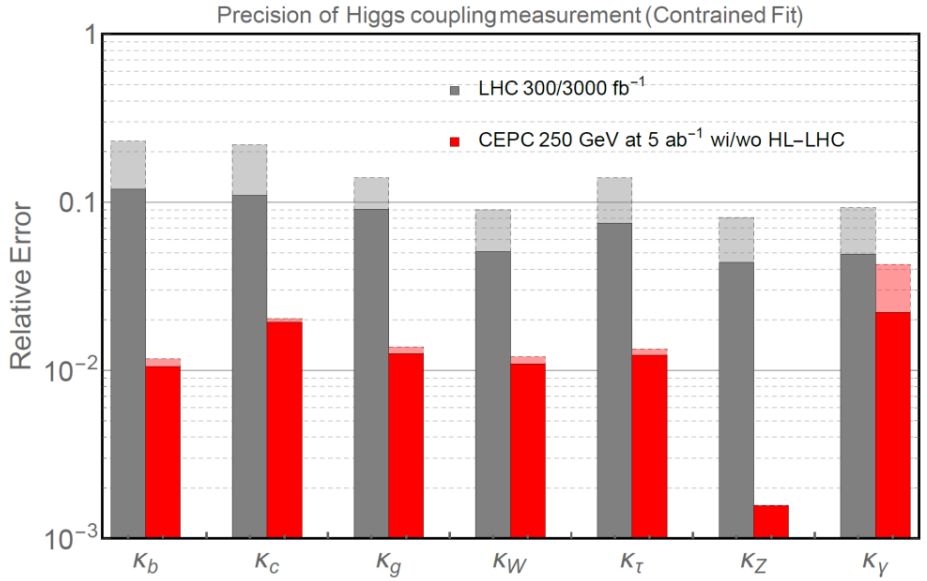
At LHC:

Direct searches: M ~ 1 TeV

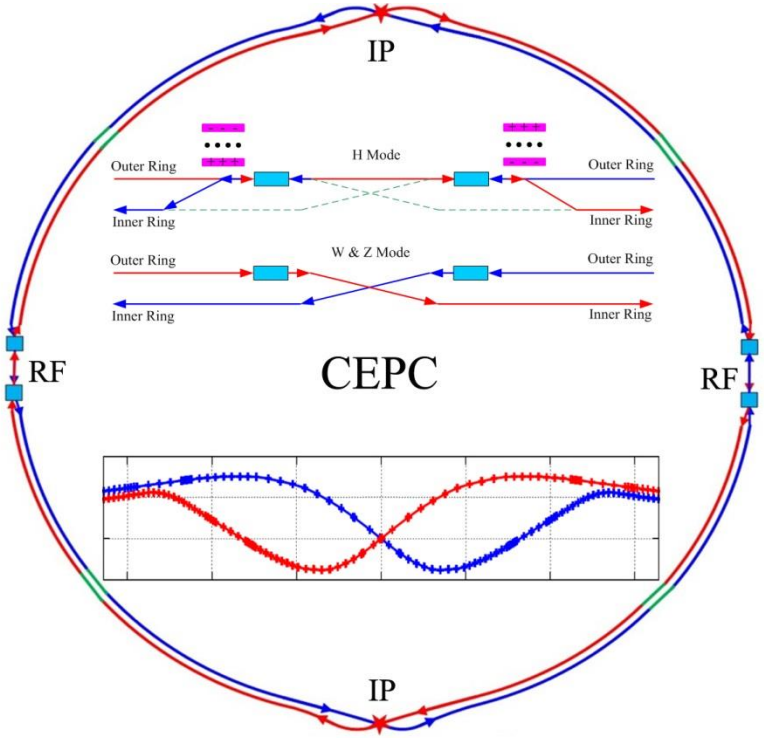
10% precision: M ~ 1 TeV

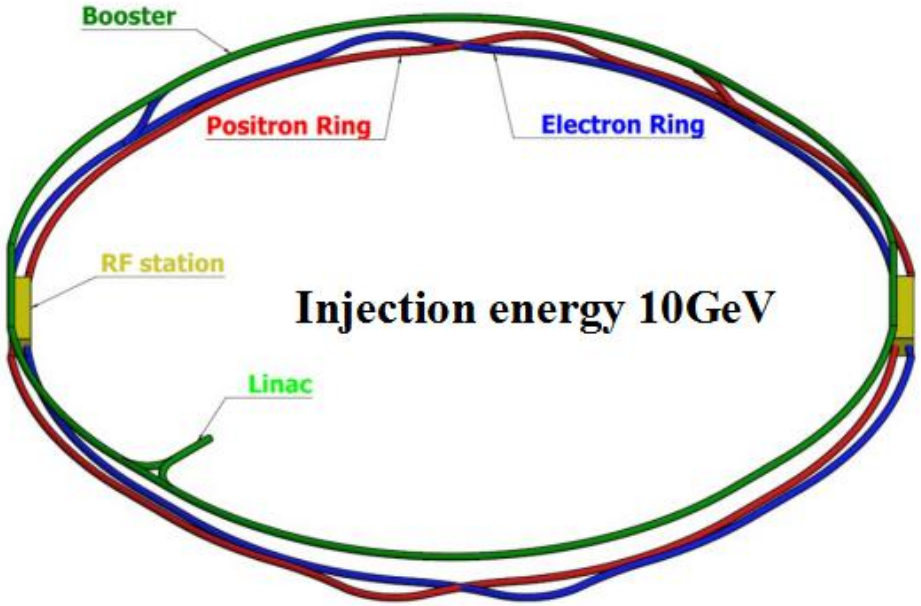
At CEPC:

1% precision ➔ M ~10 TeV

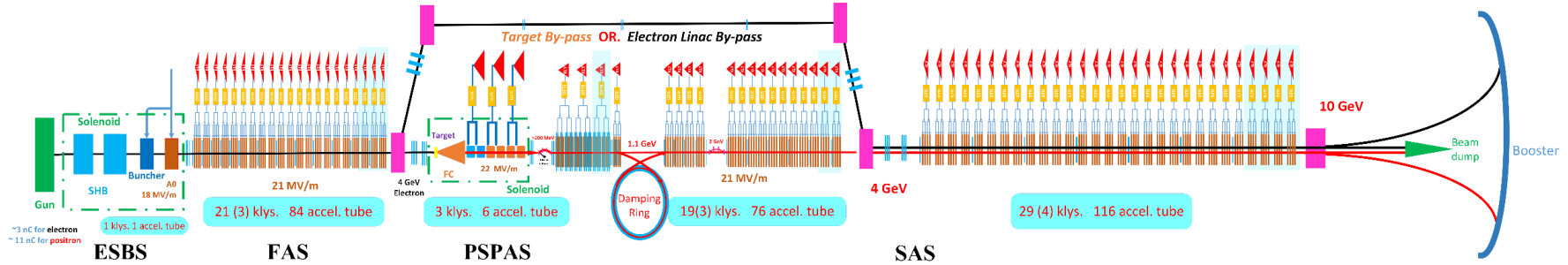


CEPC CDR Basseline Layout





Collider ring | Linac injector | Booster ring



Baseline: 100 km, 30 MW; Upgradable to 50 MW, High Lumi Z
Try all means to cut cost down

CEPC对技术发展的巨大推动作用

国内已有的技术更上一层楼	国内没有的技术实现国产化	变革性的关键技术突破
精密机械、超高真空、高精度磁铁、高功率微波、高速电子学、自动控制、大数据、AI、计算机与网络。。。	超导高频腔、微波功率源、低温制冷、超导磁铁、抗辐照集成电路芯片	• 高温超导 • 新型加速原理实用化：等离子体加速

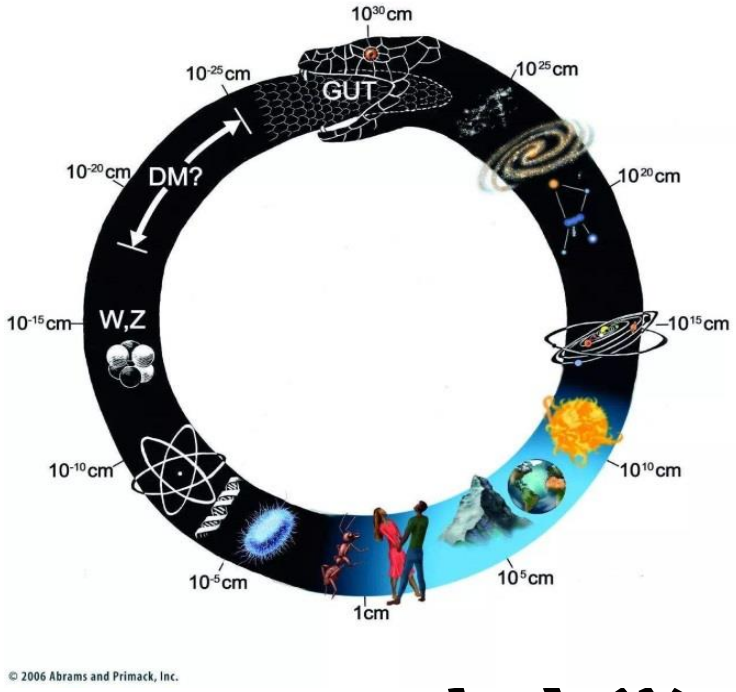
- 设备国产化率可达90%以上
- 不仅仅为实现国产化，而是要国际领先，成为反制“卡脖子”的手段。使一批企业占领国际市场，引领行业发展

➤ **辐射影响力：高端需求牵引；广泛的技术领域；研发能力的提高；研发人才培养**

理解宇宙起源和演化

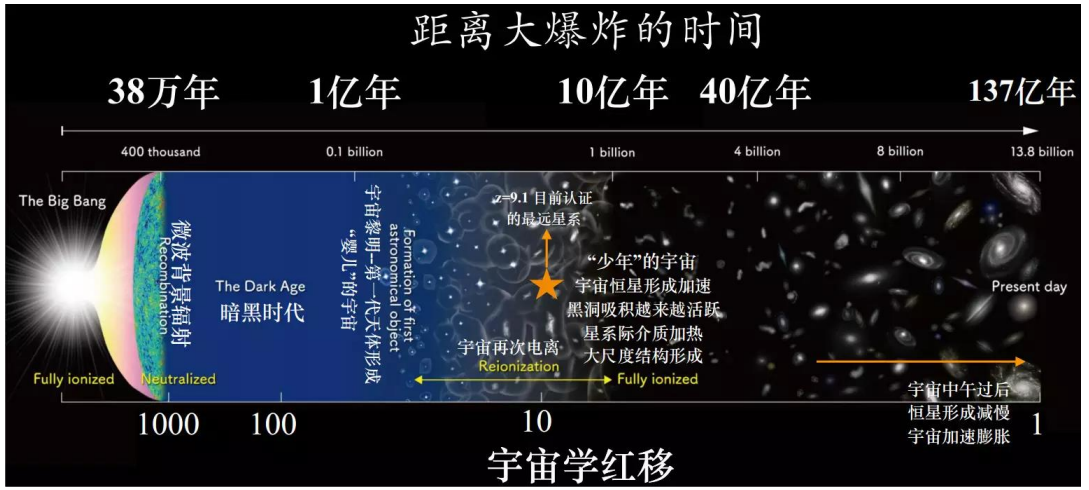
粒子物理 ⟷ 小尺度

物质内部结构：打碎它



高能量

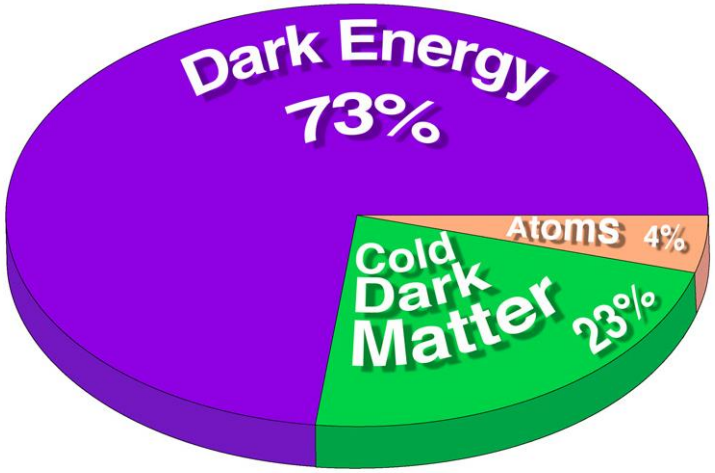
高温度



宇宙学, 大尺度 ⟷ 早期宇宙, 大爆炸

暗物质、暗能量和反物质

超新星、大尺度结构、微波背景辐射等多种观测显示：暗能量占73%，暗物质23%，普通物质4%

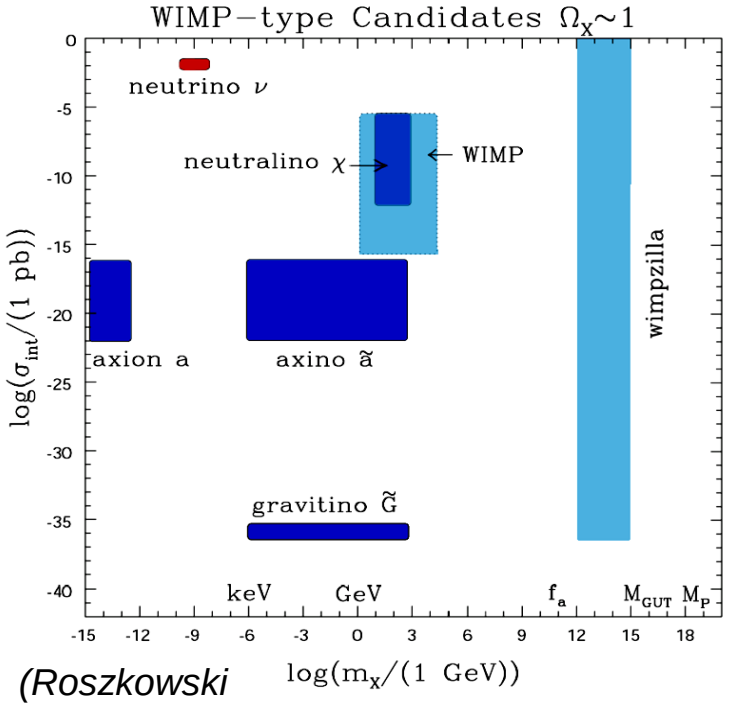


反物质到哪里去了？

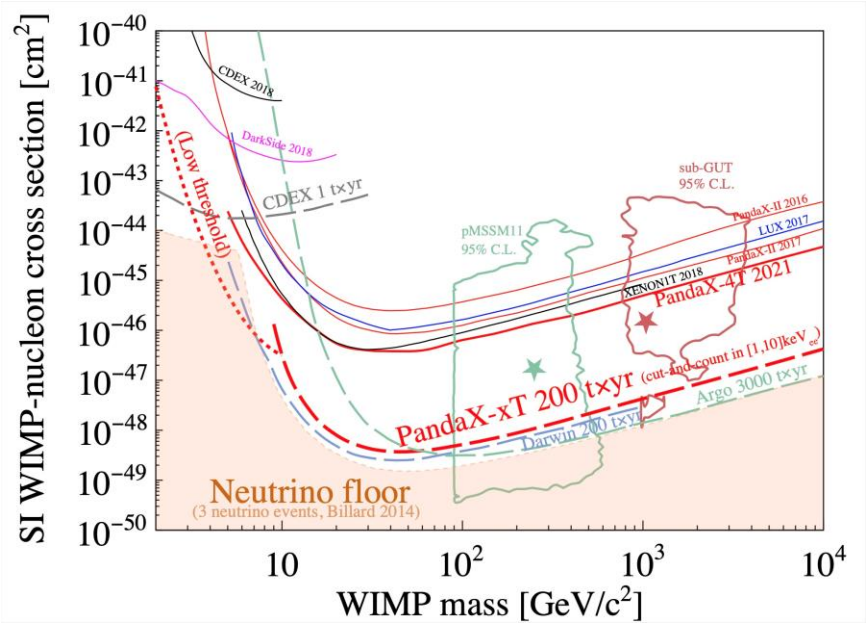
- 粒子物理的标准模型虽然取得了巨大成功，但只能解释宇宙成分的 4%

暗物质

- 实验依据：星系旋转曲线、宇宙中大尺度结构的形成、气体密度，引力透镜等 ➔ 引力相互作用
- 物理学家的解决方案：
  - （新的）引力相互作用（MOND）？
  - 暗物质粒子？（标准模型中没有其位置）
- 实验寻找暗物质粒子：
  - WIMP（假设具有弱相互作用）
  - Axion（“可以”同时解决强相互CP问题）
  - 其它
- 国内的发展路径
  - 参与加速器上寻找WIMP（ATLAS，CMS）
  - 地下实验寻找WIMP（CDEX，PandaX）
  - 空间实验寻找WIMP（AMS、“悟空”、HERD。。。）

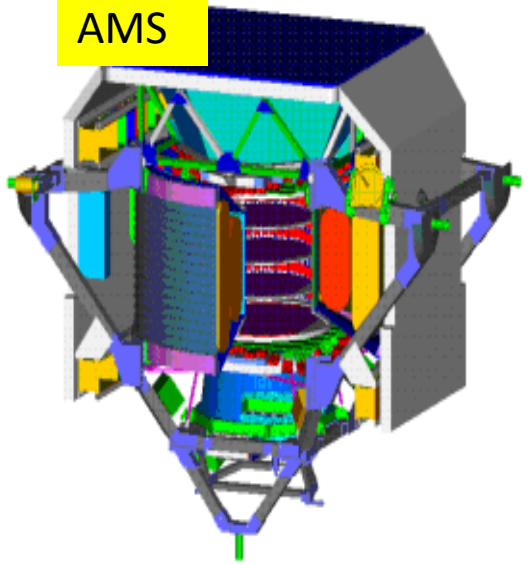


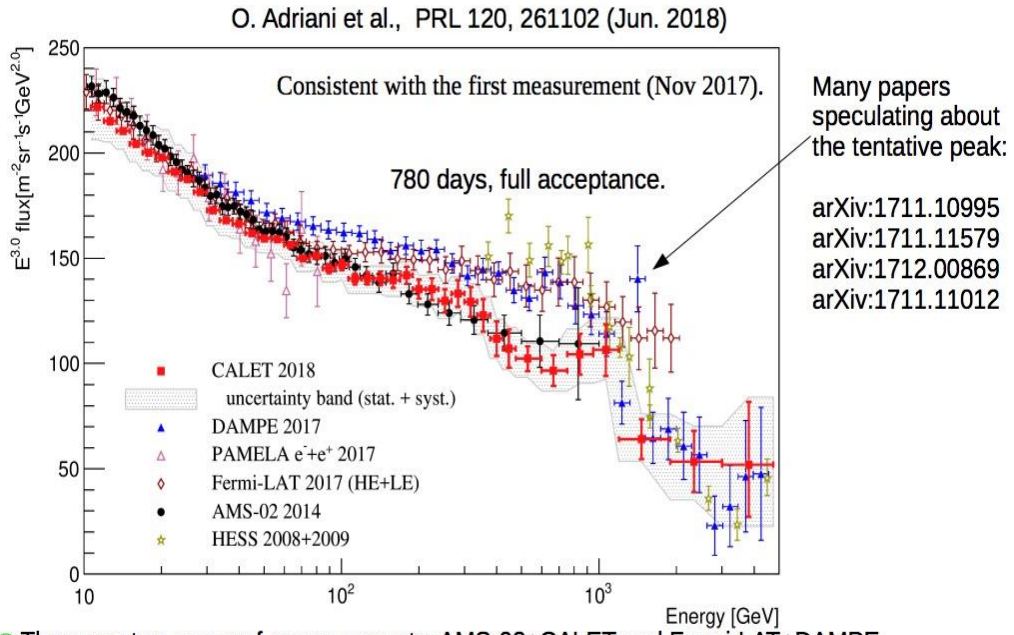
(Roszkowski 2004)



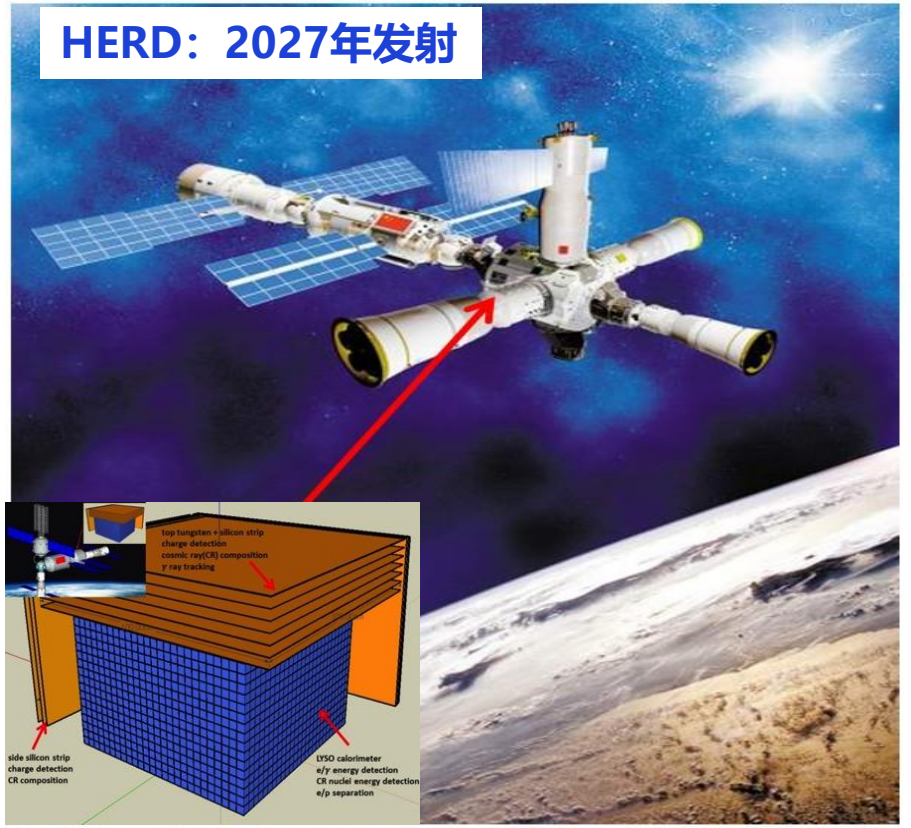
空间暗物质和宇宙线实验

AMS





There are two group of measurements: AMS-02+CALET and Fermi-LAT+DAMPE.

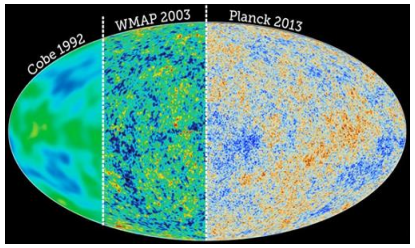


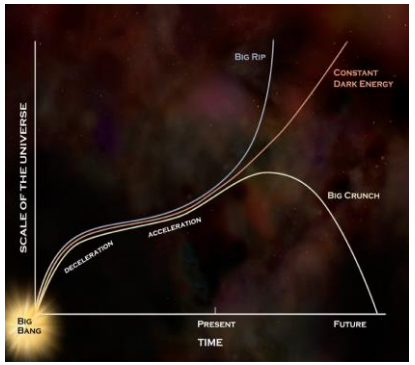
	X0(λ)	ΔE/E for e	e/p sep	e GF m^2sr @ 200GeV	p GF m^2sr @100TeV
HERD (2020)	55(3)	1%	10^{-6}	3.1	2.3
Fermi (2008)	10	12%	10^{-3}	0.9	--
AMS02 (2011)	17	2%	10^{-6}	0.12	--
DAMPE (2015)	31	1%	10^{-4}	0.3	--
CREAM (2015)	20(1.5)	--	--	--	0.2

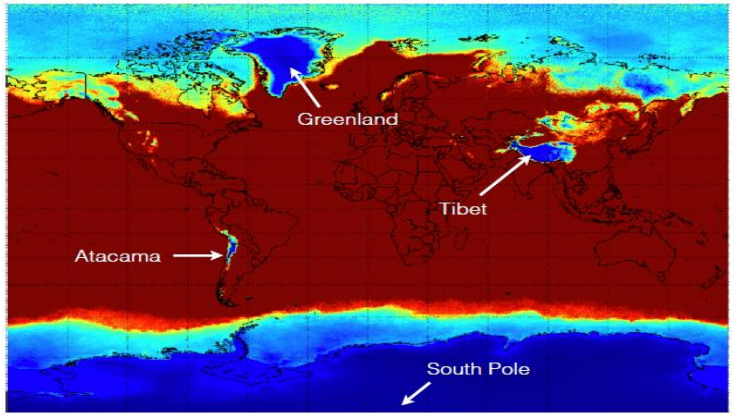
- 采用了三维成像、五面灵敏量能器的创新设计，在有效接受度、能量分辨、能量上限、探测精度等方面有成量级的提升

暗能量

- 实验依据：超新星天文观测，占宇宙能量的~72%
  - 新的（引力）相互作用？ 标准模型中没有其位置
- 实验研究
  - 超新星 （DESI）
  - 微波背景辐射 （ALICPT，BICEPx）
- 西藏阿里是北半球开展CMB观测研究的最佳场所，和南极与智利形成互补
  - 海拔5100米左右，云量少、水汽低、透明度高，可以看到65%以上的天区
- 高能所通过国际合作，开展CMB观测研究，期望能较快进入国际一流阵列



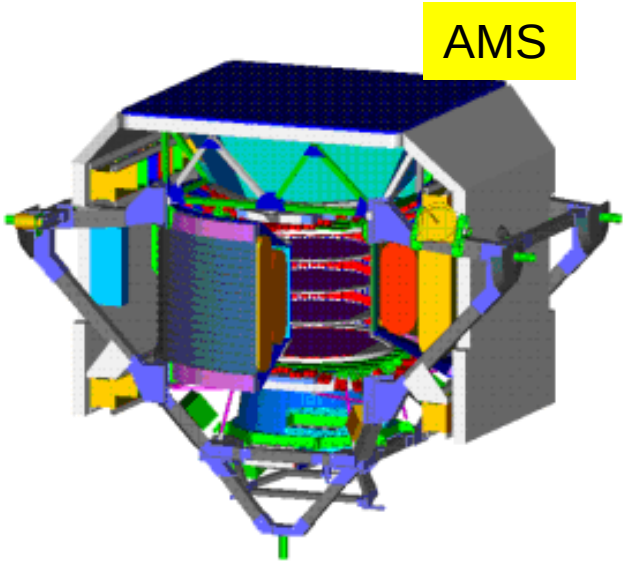




反物质

- **反物质在离我们很远的地方**
  - AMS 实验 ➔ 到空间去，更远、更灵敏、新能区。。。
- **反物质不存在 ➔早期宇宙中的反物质衰变完了**
  - 必须满足萨哈罗夫三原则，其中两个宇宙学的假设基本被实验证实
  - 物理学的一个假设原则上正确：存在CP破坏。但定量上不对，无法解释为什么现在完全没有反物质
  - 中微子的CP破坏如果足够大，可以解释反物质之谜

通过加速器中微子振荡实验测量
如果θ_{13}为零，永远无法测量

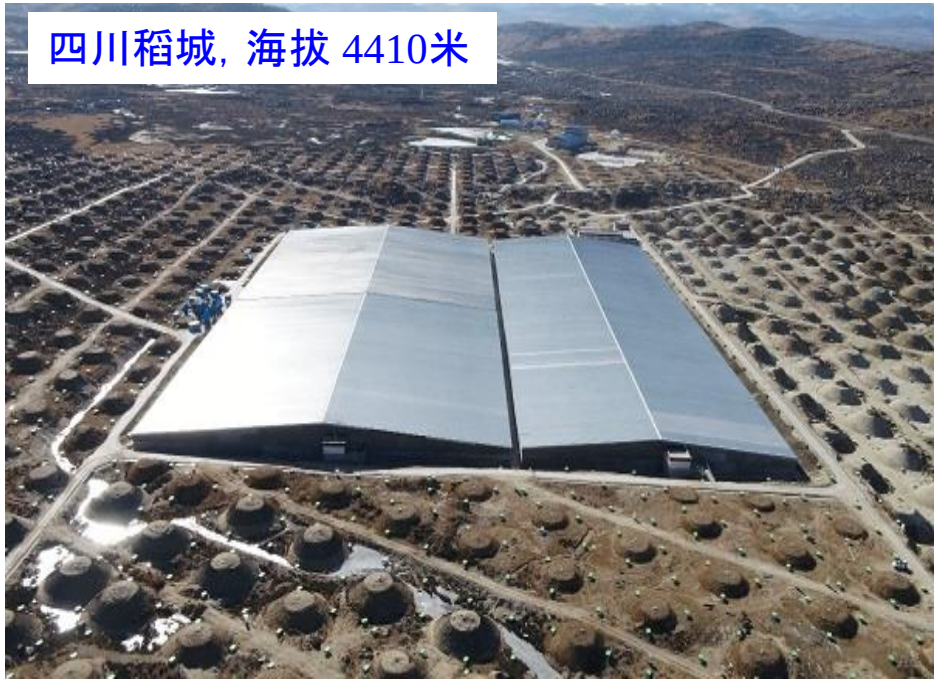


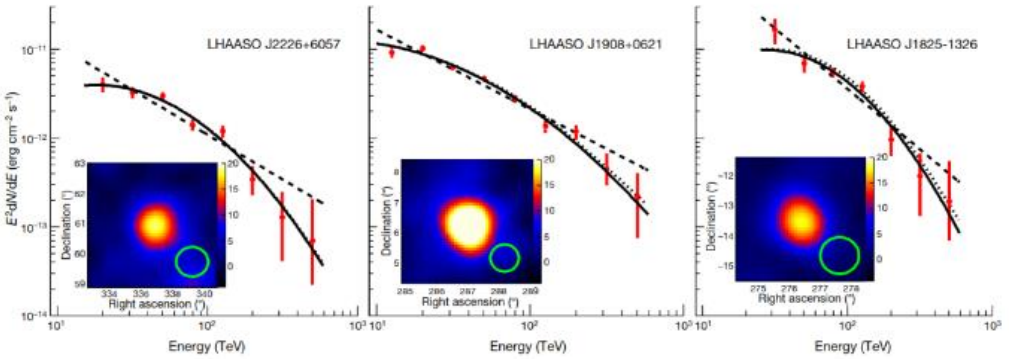
国内外下一代“AMS”设计：

- 高磁场：高温超导
- 高接收度：多面接收
- 最佳几何设计、多探测器组合。。。

宇宙线

- **世纪之谜**：宇宙线从哪里来？如何被加速的？宇宙线的成分、能谱是什么？
- **观测办法：**
  - 空间实验
  - 地面探测器阵列
  - 地面望远镜阵列
  - 南极冰下、地中海水下
- **我国的宇宙线研究：**
  - 自50年代开始高山宇宙线观测
  - LHAASO实验2021年完成建设，是世界领先的宇宙线和γ-天文探测装置
    - 发现12个银河系的高能γ源，能量高达1PeV ➔ PeV加速器
    - 发现银河系中能量高达1.4 PeV γ光子





有望揭示宇宙线起源和加速之谜！

高能物理相关技术的应用

北京高能同步辐射光源，开工建设

中国散裂中子源，刚刚完成

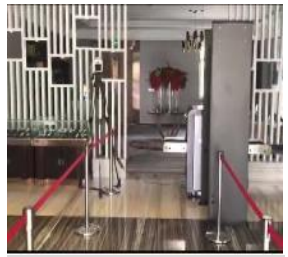
全球大约 ~35000 台加速器，一半在医院

- 医用加速器：放射性同位素生产、检查与治疗
  - 伽马、质子，重离子，中子（BNCT）治癌
- 辐照加速器：消毒、改性、育种。。。
- 安全检查
- 加速器驱动核嬗变

探测器

- 医疗检查：PET, CT, MRI，...
- 石油测井，安全检查，科学研究。。。

北京地铁



新疆口岸

深圳海关

粒子物理催生了WWW技术和互联网经济

高能所建成中国第一条国际计算机通讯线路，向国外发出中国第一封Email，建立中国第一个WWW网站

1989年

蒂姆·伯纳斯·李 在CERN发明了万维网WWW (World Wide Web)，使高能物理学家能共享数据、程序、结果等各种信息

1991年

WWW技术发布：世界首个WWW网站，网页浏览器，。。。

1993年

CERN向全世界开放了WWW技术，放弃了知识产权，促进了WWW和互联网的蓬勃发展

今天世界上有18.4亿个WWW网站

互联网技术彻底颠覆了我们的生活方式，带来了无法估量的经济效益

新思想、新方法、新技术

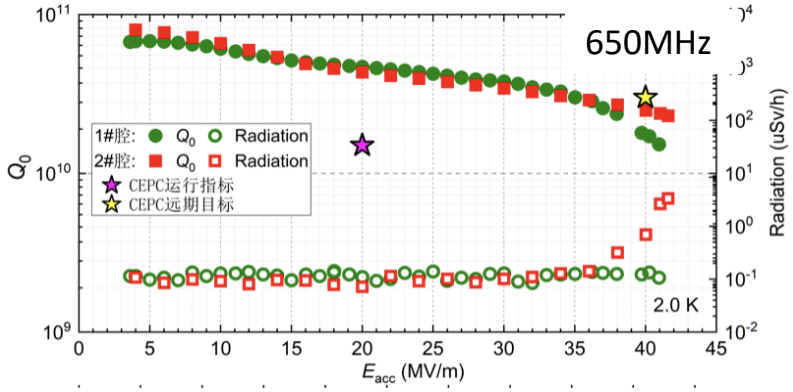
- 新的物理思想：
  - 复合模型、大统一、超对称、超弦、超空间（extra-dimension）。。。
- 新的计算方法：
  - 量子计算应用于格点量子色动力学，实验数据分析
  - 散射振幅等
- 新的实验技术和方法
  - 新的高能加速器：muon加速器，TeV直线加速器。。。
  - 新加速原理：等离子体尾场加速
  - 新探测技术（材料、无线通讯技术、计算存储与网络技术。。。）
  - 新的实验方法：Axion、中微子、长寿命粒子、。。。

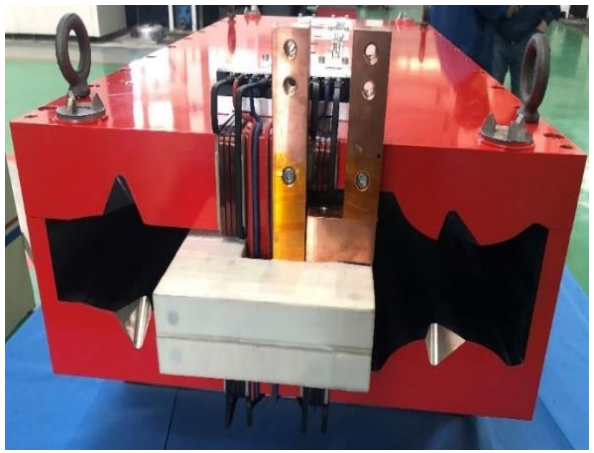
不断追求创新
永远走在潮头

技术领先：CEPC加速器

加速器队伍质的飞跃

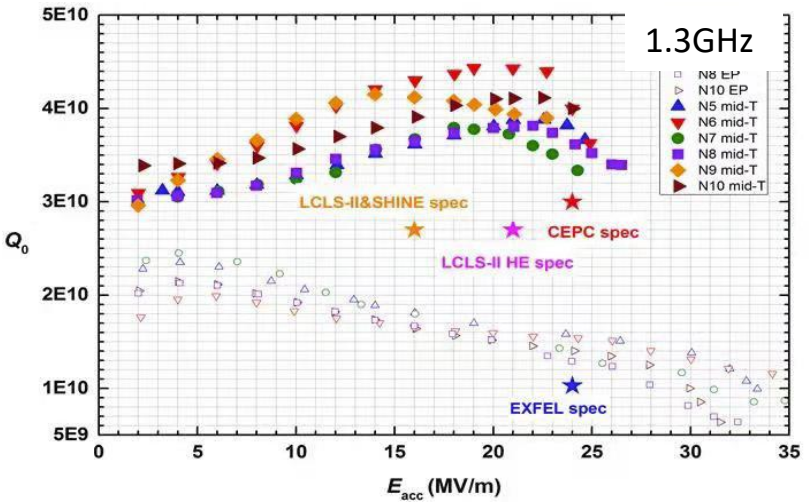
- 设计：
  - 世界上规模最大、最复杂、指标最高的加速器
  - 新型超导高频系统可实现不同能量（H/W/Z)自由切换
- 超导高频腔：
  - 自行研发的中温退火工艺实现国际领先指标，满足CEPC要求
  - 650 MHz 单cell腔有望成功 ➔双cell腔可以改为单cell腔
- 第一台速调管效率达到62%，国际先进；第二台速调管效率达到70%，国际最高；目标77%
- 新型准直系统、磁铁、电源、真空管、束流监测等



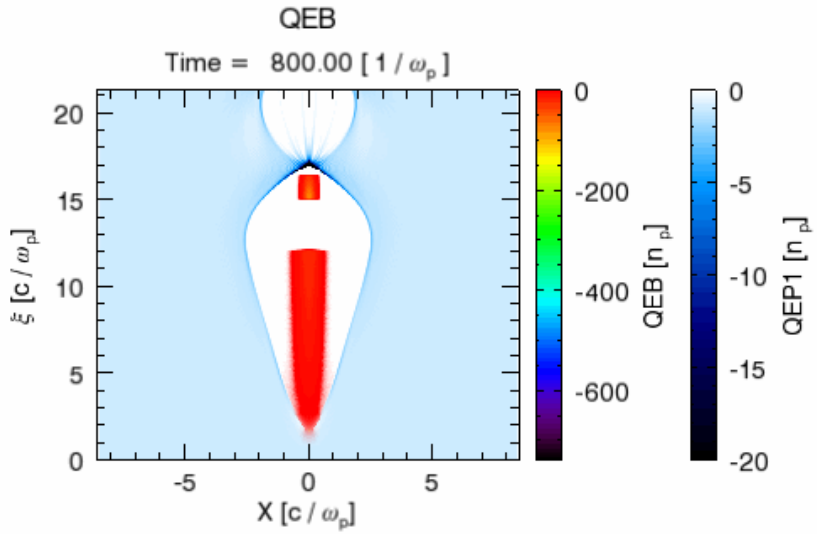


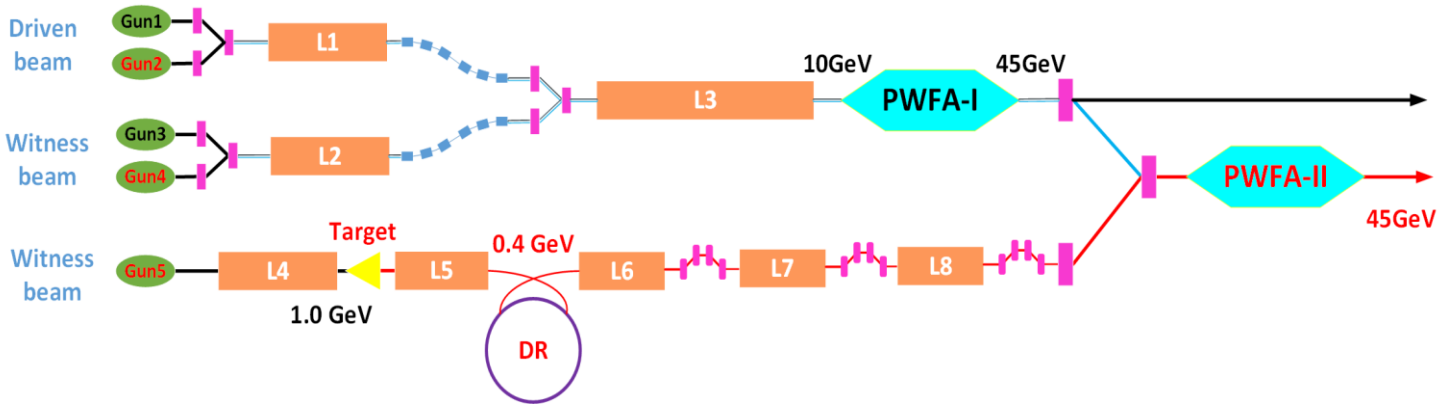
magnets

Klystrons



基于等离子体加速的CEPC注入器

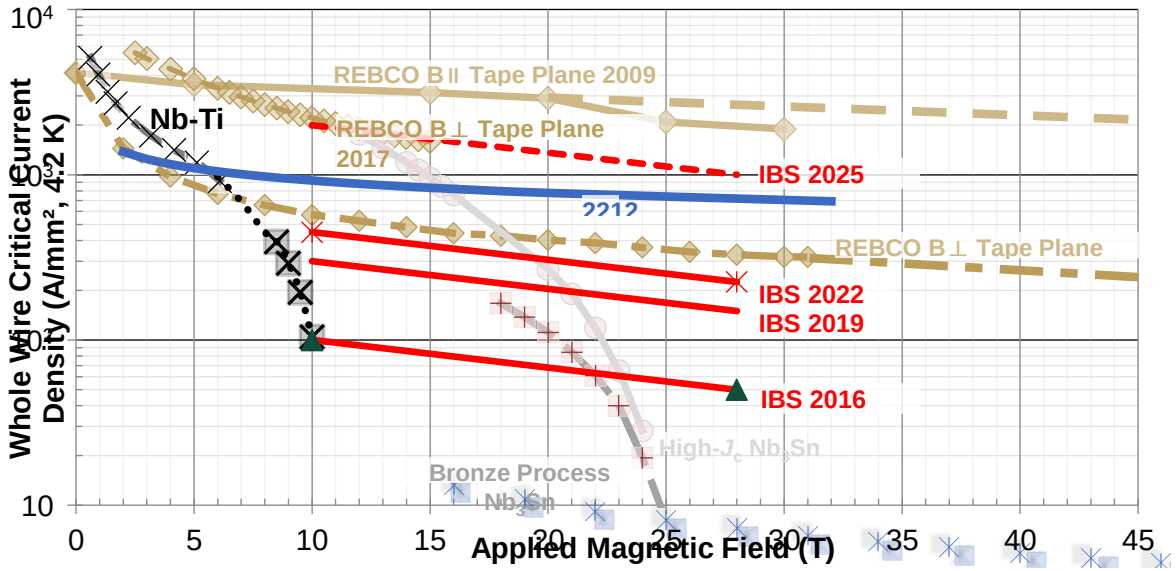




- 国际上等离子体加速研究还在实验室阶段，还没有实现真正应用，更没有用于高能加速器
- 我们的创新：将传统加速器与等离子体加速器结合，克服各自的缺点：
  - 用传统加速器给出高束流品质，用等离子体将束流能量加(3-6)倍,再用传统加速器整理束流品质
    ➔ 提高注入器能量，简化增强器设计，大大降低造价
- 如果成功可以有许多应用：光源注入器、小型桌面光源、EUV光源、自由电子激光。。。

开展高温超导磁体研究，为未来的SPPC做准备

- 超导的应用范围极其广阔，但受限于低温、高成本，潜能远远未能发挥
- 我们在国际上首次提出未来的高能质子加速器（其能量受限于让粒子“拐弯”的磁场强度）应该采用高温超导磁铁，特别是铁基超导 ➔ 场强可以比低温超导提高1倍以上
  - 目标1：超导电缆的电流密度↑10 倍，价格↓10倍 ➔ 性价比↑100 倍
  - 目标2：极大地推动超导技术发展，就像当年Tevatron推动了MRI技术发展一样
- 2016年10月成立“实用化高温超导材料产学研合作组”，成员包括高能所、物理所、电工所、中科大、合肥物质院、清华、南大、西部超导、上海超导、上创超导、统力电工等
  - 目标：实用化超导材料，~ 20元/千安米
  - 铁基：各向同性、金属、制造简单、成本低
    - 基础研究国际领先：最高温度材料
    - 导线制备国际领先
- 成果：
  - 导线电流密度提高了4倍
  - 制成国际首个铁基超导线圈，性能优越
  - 证明铁基超导磁体方案可行



一个全新的探测器概念设计（4th concept)

Scint Glass/Steel PFA HCAL

Advantage: Higher sampling ratio for better energy resolution ~ 35%/√E
Challenges: Light yield, transparency, mass production.

Solenoid Magnet (3T / 2T)

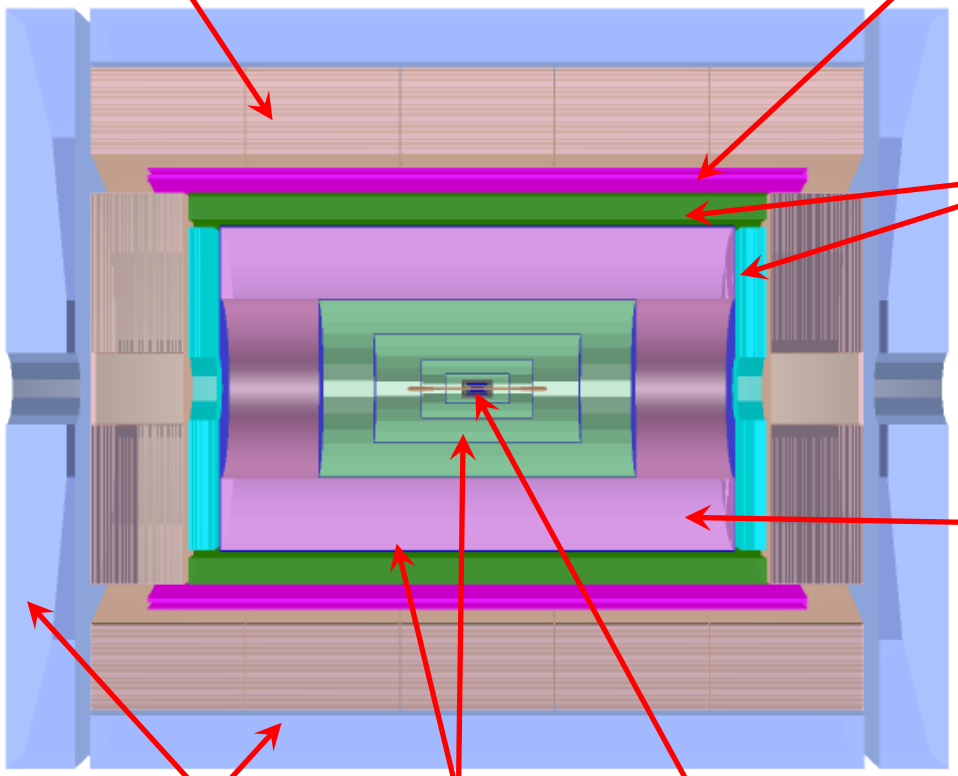
Advantage: HCAL absorbers act as the return yoke.
Challenges: thin enough magnet not to affect the jet resolution; stability

Transverse Crystal bar ECAL

Advantage: good e/γ energy resolution ~ 3%//√E, 2D readout + timing for 3D PFA capabilities
Challenges: 3D shower reconstruction for PFA

A Drift chamber optimized for PID

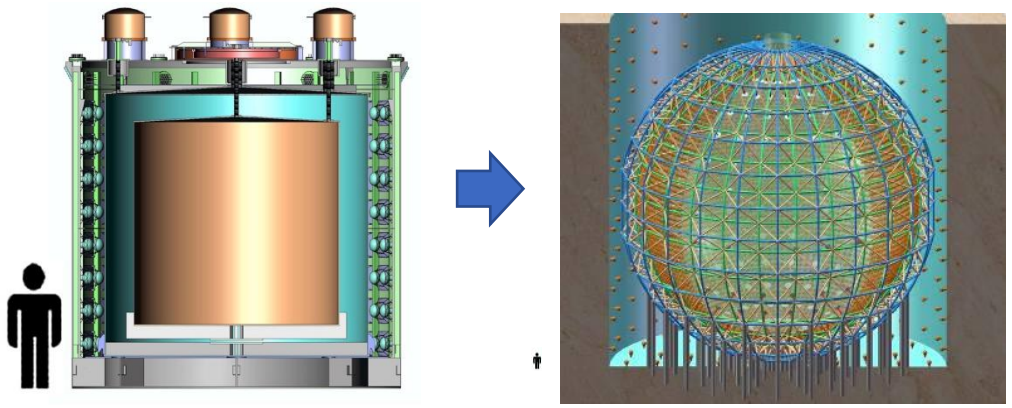
Advantage: improve Si tracking, good PID
Challenges: suitable for high event rate; good dN/dx for sufficient PID power



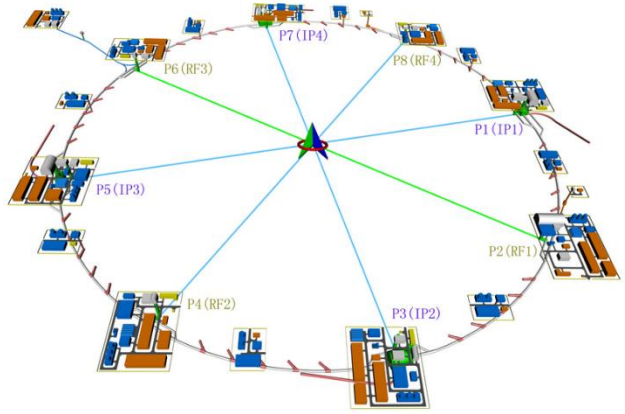
Muon+Yoke **Si Tracker** **Si Vertex**

中国粒子物理的机会与未来

- 我国的粒子物理研究从夸克起步，通过北京正负电子对撞机（BEPC）奠定了物理、加速器、探测器等各方面的基础，在国际上有了“一席之地”
- 从大亚湾到江门，我国的中微子研究走到了国际最前沿，有望实现领跑
- 宇宙线、暗物质、国际合作等各方面成绩斐然，有望领先国际
- CEPC可以让我们在希格斯研究中国际领先，走到国际粒子物理舞台的中央



250米周长



100公里周长

结语

- 粒子物理标准模型是人类文明史上最激动人心的科学成果之一
  - 但它尚不完备，也不完全自洽，还有许多其不能解释的实验现象
- 我们没有机会对它的建立做贡献，但也许可以对它的修改、发展、升华做贡献
- 科学的发展是无止境的，不会以个人的意志为转移
  - 开尔文勋爵：“物理大厦已经落成，…现在它的美丽而晴朗的天空出现两朵乌云…”
  - 普朗克的老师菲利普·冯·约利教授曾忠告他，“物理学基本是一门已经完成了的科学”
  - 迈克耳孙：“当然无法绝然肯定物理科学不再会有像过去那么惊人的奇迹，但非常可能的是大部分宏伟的基本原理业已确立，而今后的进展仅在于将这些原理严格地应用于我们所关注的现象上。…物理科学未来的真理将在小数点后六位数上求索”
  - 1899年，美国专利局局长Charles Duell断言，“所有能够发明的，都已经发明了”
  - 《Heisenberg in the Atomic Age》by Cathryn Carson: “Heisenberg has always, his colleague suggested, shown a ‘certain dislike for accelerators’, … and had written letters to block DESY’s funding”; “His expectations for the machine’s payoff drew from his sense of the future of particle physics”
  - 60年代有物理学家预言粒子物理的问题无法解决，并离开了这个领域。他们离开了标准模型

给年轻人的几句话

- 不要迷信权威
- 机会只会留给乐观的人，因为悲观的人早就离开了
- 要勇于挑战重大问题，不满足于有经费、有饭吃
- 对自己的领域要追求“博古通今”，要拒绝平庸，追求创造性
- 相信机遇，时刻准备着

你们中间一定有人会远远超过我们这代人
中国的科学在你们手上一定会走到世界前列
欢迎参加我们的队伍