

HIAF上高能核物理研究

--从电子离子对撞机到埃塔介子工厂

陈旭荣

中科院 近代物理研究所

第一届“粤港澳”核物理论坛，2022年7月2日- 6日 广东 珠海，2022. 7. 2

提纲

第1部分 HIAF大科学装置和高能核物理研究

第2部分 电子-离子对撞机 质子质量结构

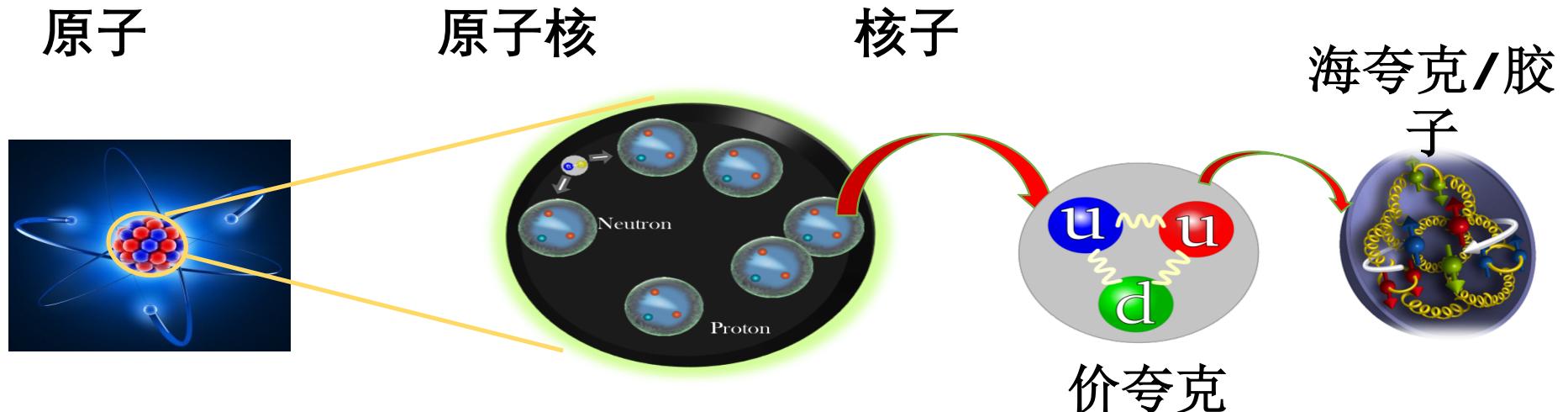
第3部分 强子谱和超核物理 埃塔介子工厂

第4部分 总结和展望

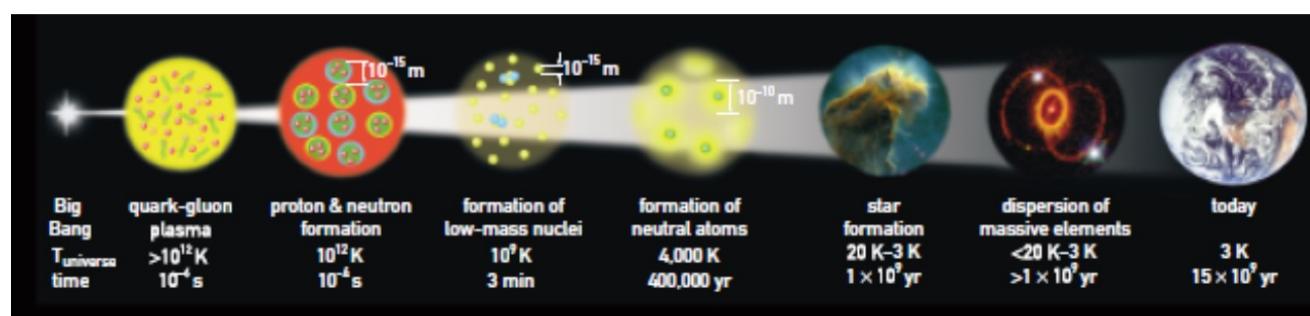
第1部分 HIAF大科学装置和高能核 物理研究

($p, 2 - 9 \sim 25 \text{ GeV}$)

强相互作用物理和核子内部结构

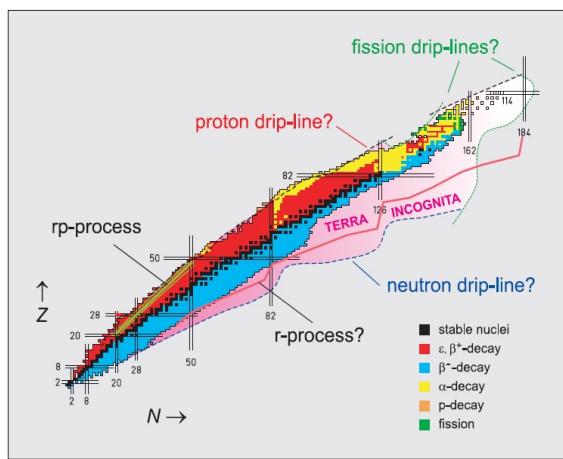


- 我们对物质结构的了解已经深入到了核子(质子和中子的统称) 的内部：夸克和胶子
- 强相互作用物理和核子内部结构的研究是粒子物理和核物理的重要的前沿课题
- 量子色动力学 (QCD) 描述核子的夸克结构



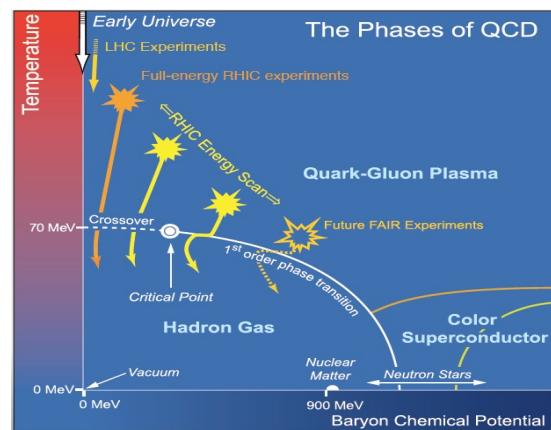
第一部分 HIAF大科学装置

原子核结构



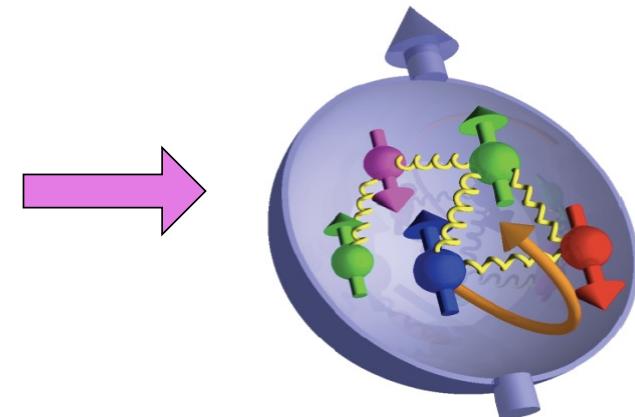
CSR

QCD相结构



CEE (CSR External Target) and HIAF

强子结构



强子谱仪 缪物理、
eta物理、EicC

HIAF装置

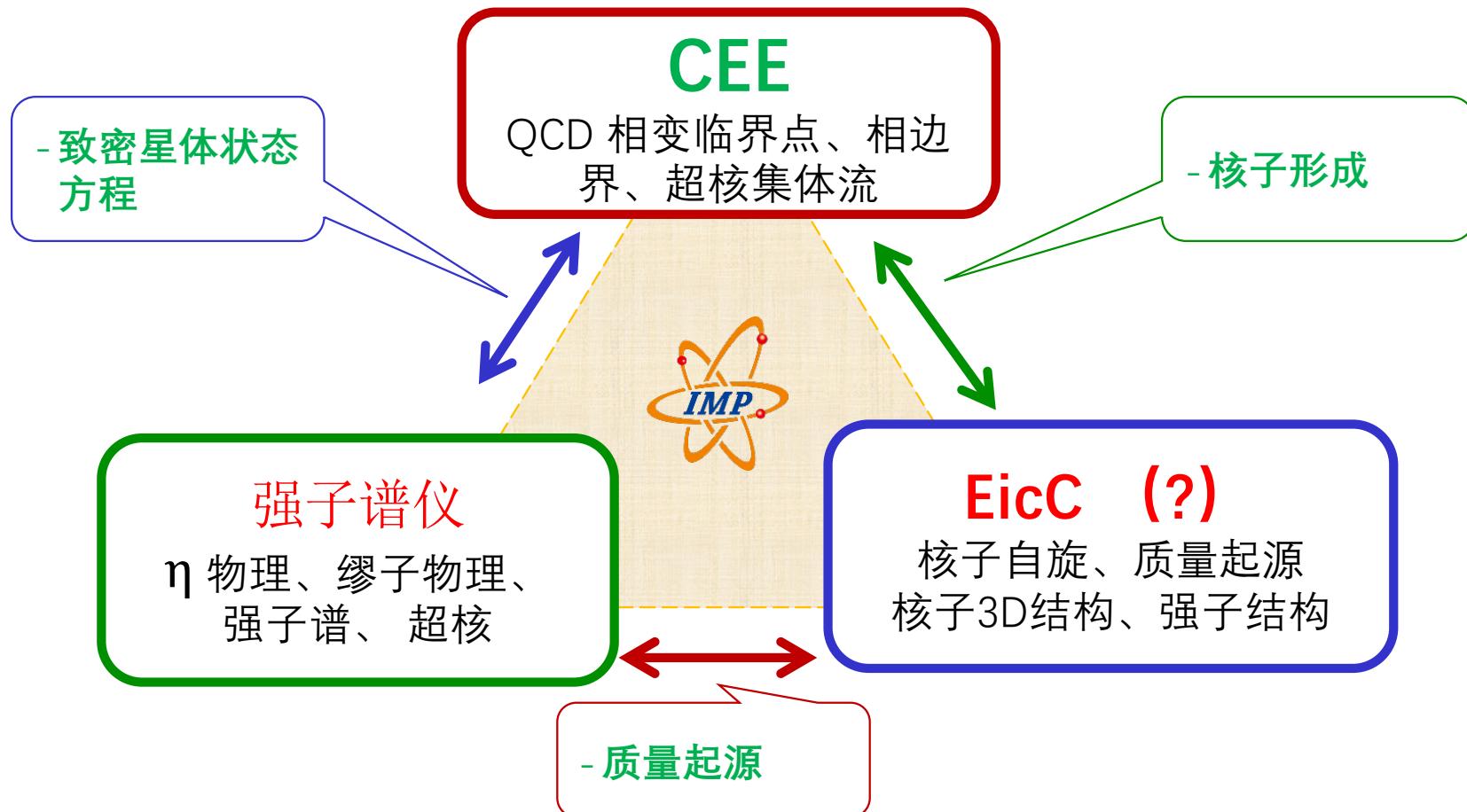


近物所惠州办公区

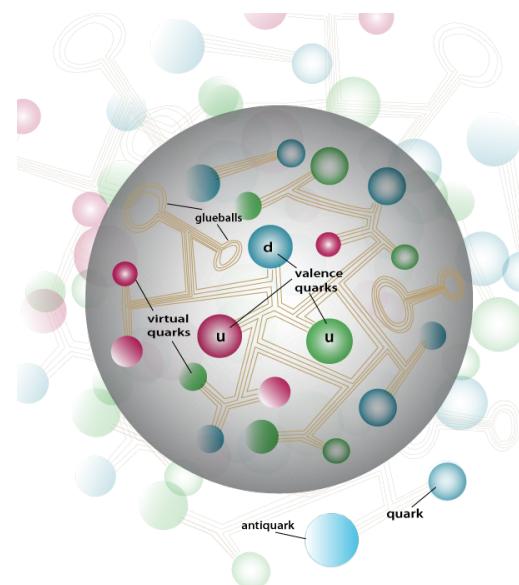


国家两大科学装置HIAF、CiADS总部暨中科院近物所**惠州**研究部园区正式启用，2022

HIAF高能核物理研究

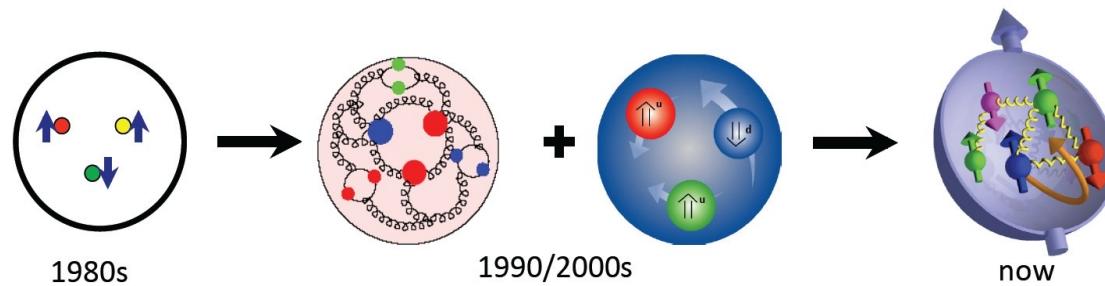


第2部分 电子-离子对撞机 质子质量结构



EIC:必要性与重要性

- 核子内部结构非常复杂，除了有3个价夸克，还有海夸克和胶子，是高能核物理最前沿的研究领域之一，还有许多根本性的具有挑战性的问题有待研究，比如：**自旋危机、质量起源和夸克禁闭等**
- 电子-离子对撞机(EIC)可视为“**超级多维电子显微镜**”，通过对核子进行“断层扫描成像”，探测核子内部清晰图像，这将从根本上解决目前关于核子性质的疑难，深化人们对核子结构的微观认识，为核子结构领域研究做出重大发现提供极佳的机会



EIC物理和技术是高能核物理界竞争非常激烈的研究领域，属于国际科学研究主流方向的前沿性研究，将揭示核子结构的三维乃至全息图像

EIC: 强相互作用研究的下一个前沿领域

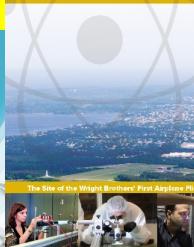
Nucleon Structure:

- Origin of Spin, 3-D imaging of nucleon
- origin of mass

USA: ECCE CD0/CD2/CD3 in 2023

2015

REACHING FOR

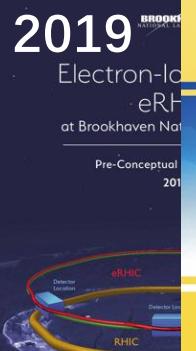


LONG RANGE PLAN
for NUCLEAR SCIENCE

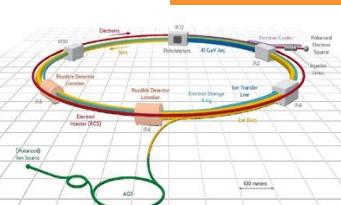
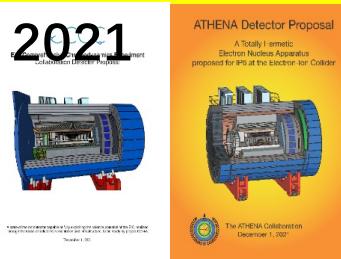


that binds us all

SECOND EDITION



2020



2022年3月：
探测器方案
→ECCE

美国电子 - 离子对撞机 (EIC) 质心能量~140 GeV

2005: 领域内开始讨论

2007, 2015: 美国核科学长程计划

2015: EIC 白皮书

2018: 美国科学院重申EIC物理重要性

2019.12 : EIC 立项

2020: EIC 黄皮书和概念设计

2021: EIC 探测器方案建议书

2032: 计划开始运行 ?

高能核物理、粒子物理重要方向

参加人员：1200 研究人员, 230 单位, 31 国家

美国国家实验室: ANL, BNL
LANL, LBNL, ORNL

EicC历史

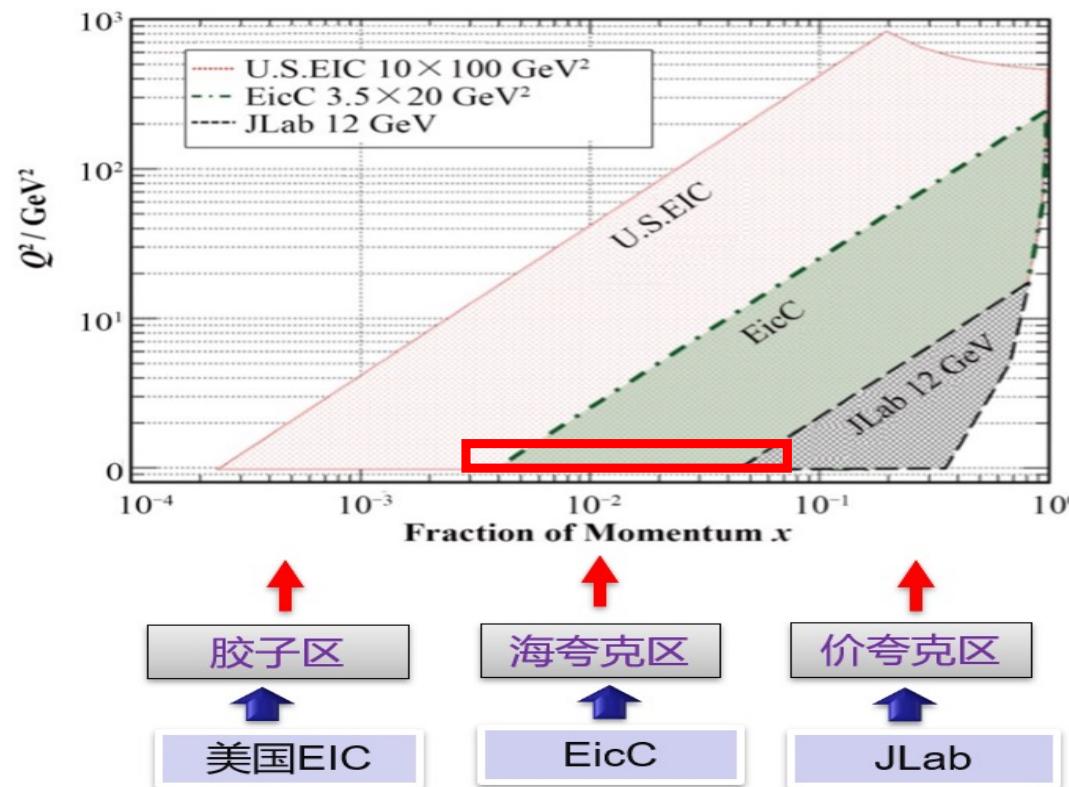
➤ 近物所从2012年7月提出HIAF@EIC计划

根据EicC时间窗口和能量窗口，确定出初步的方案和目标

➤ 先后召开多次国内和国际EIC讨论会，包括：

- 2013年3月底，兰州，核子结构会议（会议期间确定了EicC最主要物理目标）
- 2013年7月，威海，EIC物理研讨会
- 2014年3月，北京，高能物理学会会议
- 2014年5月，北京，EicC专题讨论会(发改委)
- 2014年3月，美国，EIC14，国际4个EIC装置讨论会
- 2014年7月，兰州，第六届中美高能物理会议
- 2018年—今，每年多次EicC研讨会、模拟、白皮书

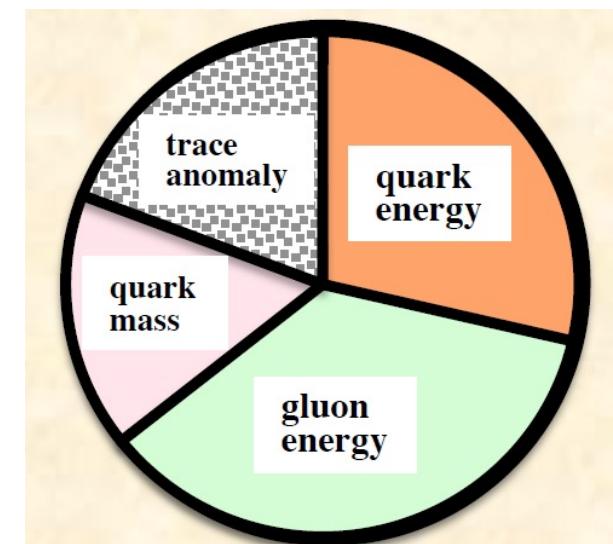
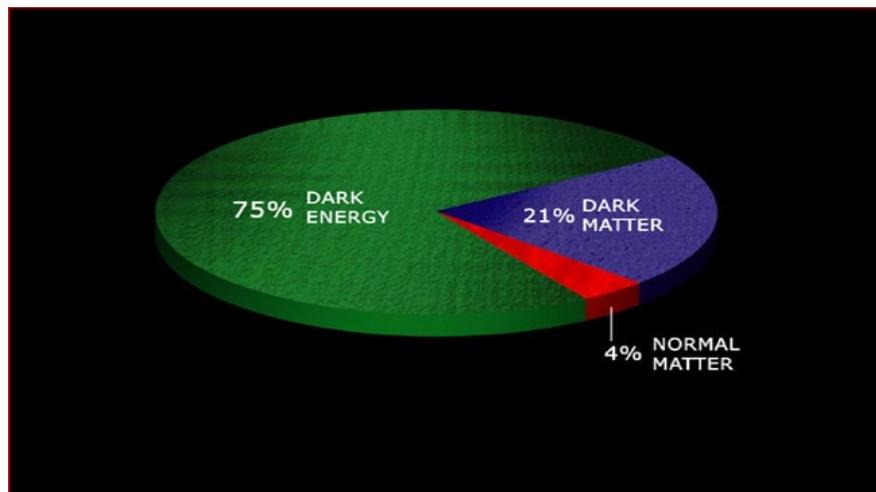
EIC vs. EicC



- 核子结构的研究：夸克胶子层次理解核子的结构和基本性质
- EicC可能优势：低Q2的海夸克能区 =>> 质子质量结构研究

质子质量的QCD结构

- 质量是粒子的最基本性质之一
- 解决质子质量的组成问题，是核与粒子物理中一个非常基本的问题
- 目前，质子质量最不清楚的部分是迹反常部分



质子质量：迹反常参数b

PROTON MASS: REST-FRAME DECOMPOSITION

Disentangling the proton mass in its rest frame

- Proton mass is the matrix element of the QCD Hamiltonian in the proton rest frame

$$H_{\text{QCD}} = \int d^3x T^{00}(0, \vec{x}) \\ = \underbrace{H_q}_{\text{green}} + \underbrace{H_m}_{\text{orange}} + \underbrace{H_g}_{\text{red}} + \underbrace{H_a}_{\text{blue}}$$

At leading order:

$$\underbrace{M_q}_{\text{green}} = \frac{3}{4} \left(a - \frac{b}{1 + \gamma_m} \right) M$$

$$\underbrace{M_m}_{\text{orange}} = \frac{4 + \gamma_m}{4(1 + \gamma_m)} b M$$

$$\underbrace{M_g}_{\text{red}} = \frac{3}{4} (1 - a) M$$

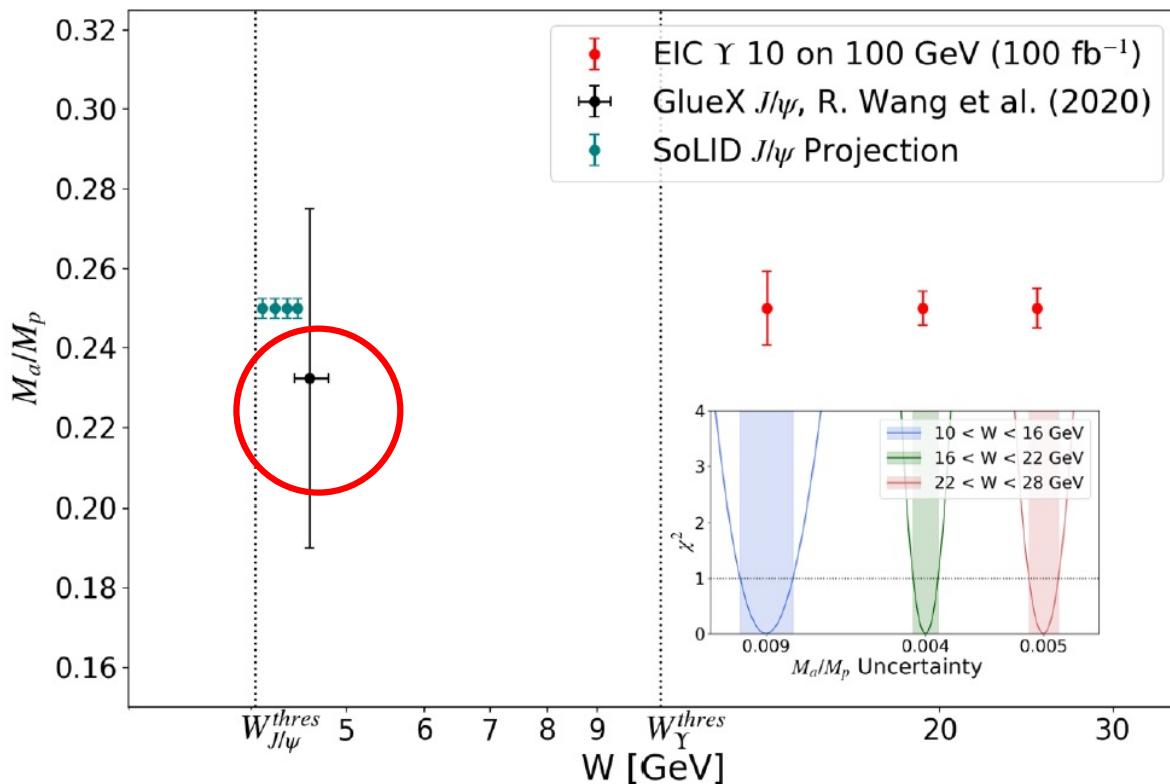
$$\underbrace{M_a}_{\text{blue}} = \frac{1}{4} (1 - b) M$$

迹反常项

$a(\mu)$ related to PDFs,
well constrained

$b(\mu)$ related trace anomaly,
unconstrained

质子质量结构实验测量



- 我们团队在2020年首次利用JLab GlueX实验的J/Psi数据提取QCD迹反常参数

R. Wang, J. Evslin, X. Chen, The origin of proton mass from J/ψ photo-production data, Eur. Phys. J. C 80 (6) (2020) 507

- 被美国EIC黄皮书(2021)引用

质子半径 - 质量半径： QCD能动张量的分解

- 质量分布是任何物理对象的基本属性，对于质子的质量半径知之甚少

$$\langle p_2 | \hat{T}_{\mu\nu}^q | p_1 \rangle = \bar{U}(p_2) \left[M_2^q(t) \frac{P_\mu P_\nu}{M} + J^q(t) \frac{i(P_\mu \sigma_{\nu\rho} + P_\nu \sigma_{\mu\rho}) \Delta^\rho}{2M} + d_1^q(t) \frac{\Delta_\mu \Delta_\nu - g_{\mu\nu} \Delta^2}{5M} \right] U(p_1)$$

- $M_2(t)$: Mass/energy distribution inside the nucleon
- $J(t)$: Angular momentum distribution
- $d_1(t)$: Forces and pressure distribution
- 由夸克和胶子的能动张量矩阵元给出的形状因子，称之为引力形状因子（这是因为它是强子内部引力的来源）
- 将强子的“引力形状因子”参数化已成为一种常见的做法
- 前面提到的质子质量是 T^{00} 这一项

探测质子结构和性质

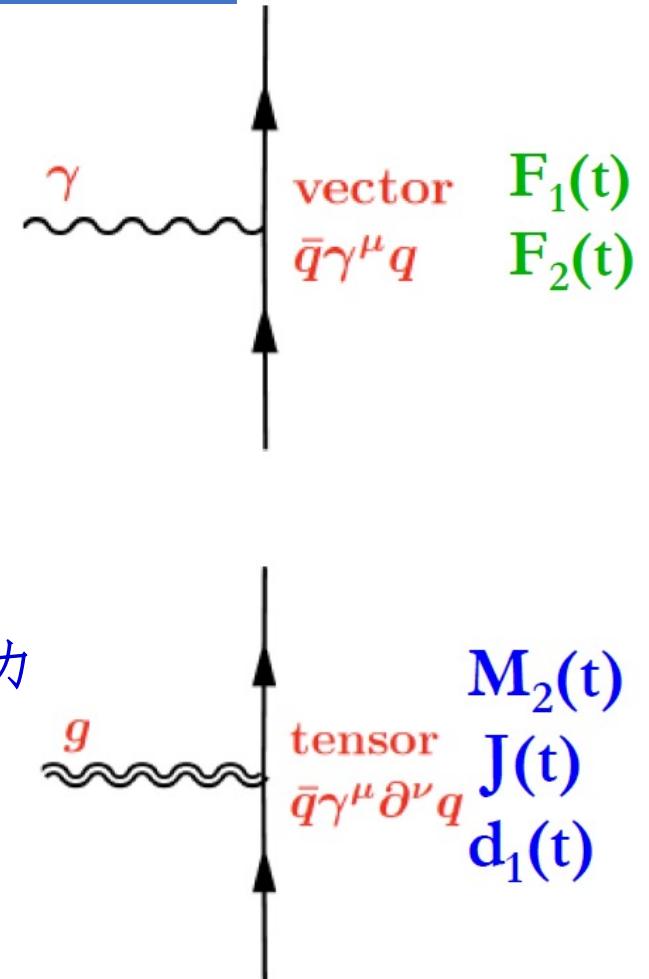
◆ 电磁性质：光子探测

- Charge -electromagnetic form factors, inelastic structure functions, proton charge radius, charge and current densities.

- Magnetic moment

◆ 引力性质：引力子探测

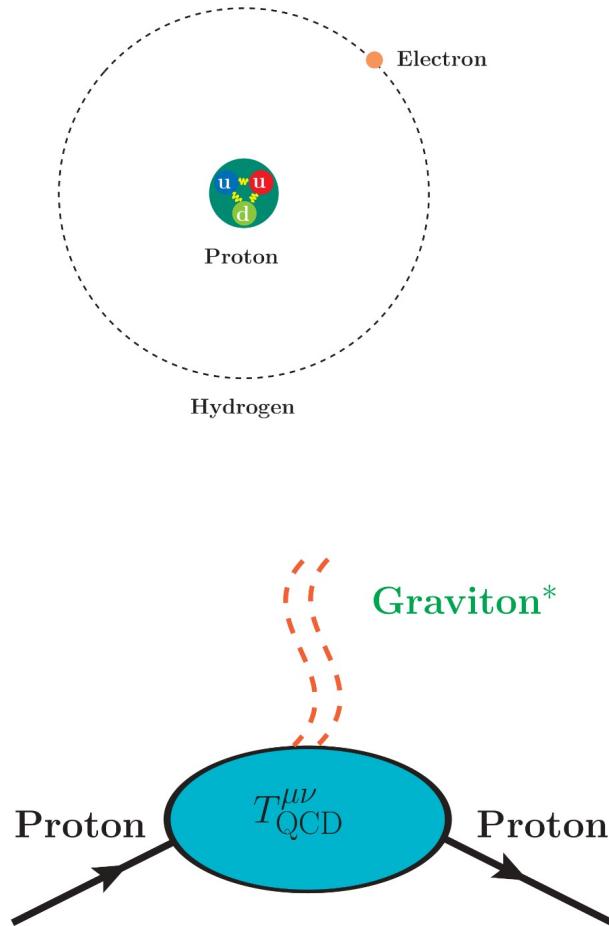
- Mass: energy and mass densities
- Spin: angular momentum distribution
- D-term: dynamical stability, normal and shear: 压力
- **Gravitational Interaction of Fermions**, Yu. Kobzarev and L.B. Okun, JETP 16, 5 (1963)
- **Energy-Momentum Structure Form Factors of Particles**, Pagels, Phys. Rev. 144 (1966) 1250 - 1260



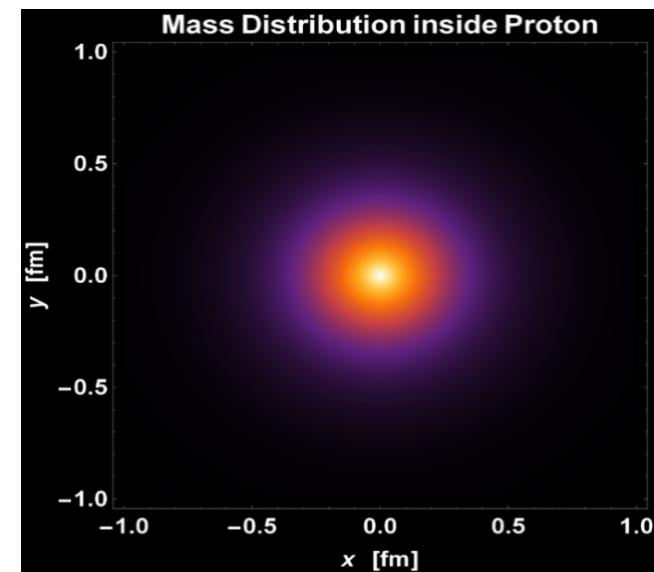
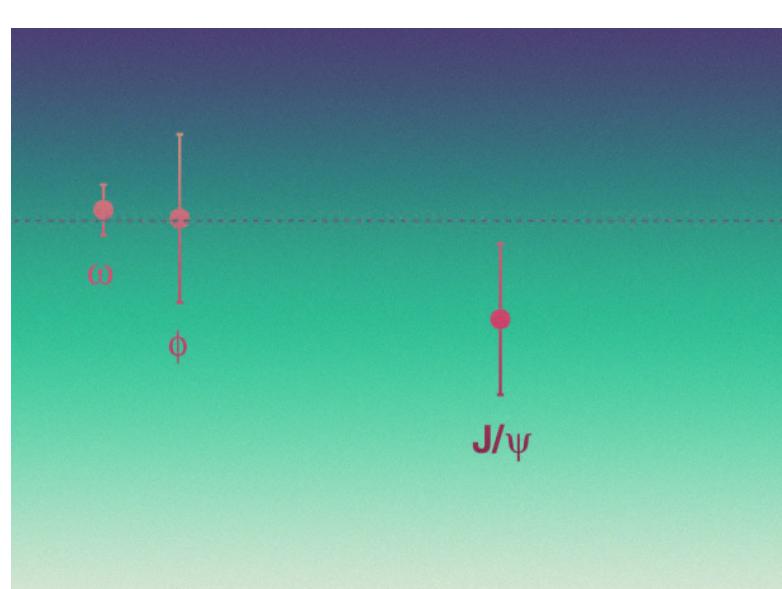
引力探针？

- 我们可以通过研究引力子和质子的散射来研究质子内部质量分布
- 引力子和质子散射的相互作用非常的弱，远远超出目前人类的测量极限
- 另外，由于强相互作用色禁闭效应，也无法直接处理被束缚的夸克胶子和引力子散射
- 美国物理学家 Pagels 在 1966 年的一篇论文中描述了这一过程，同时也排除了它的实际可能 (“... , there is very little hope of learning anything about the detailed mechanical structure of a particle, because of the extreme weakness of the gravitational interaction” (H. Pagels, 1966))
- 出路？

测量质子质量半径



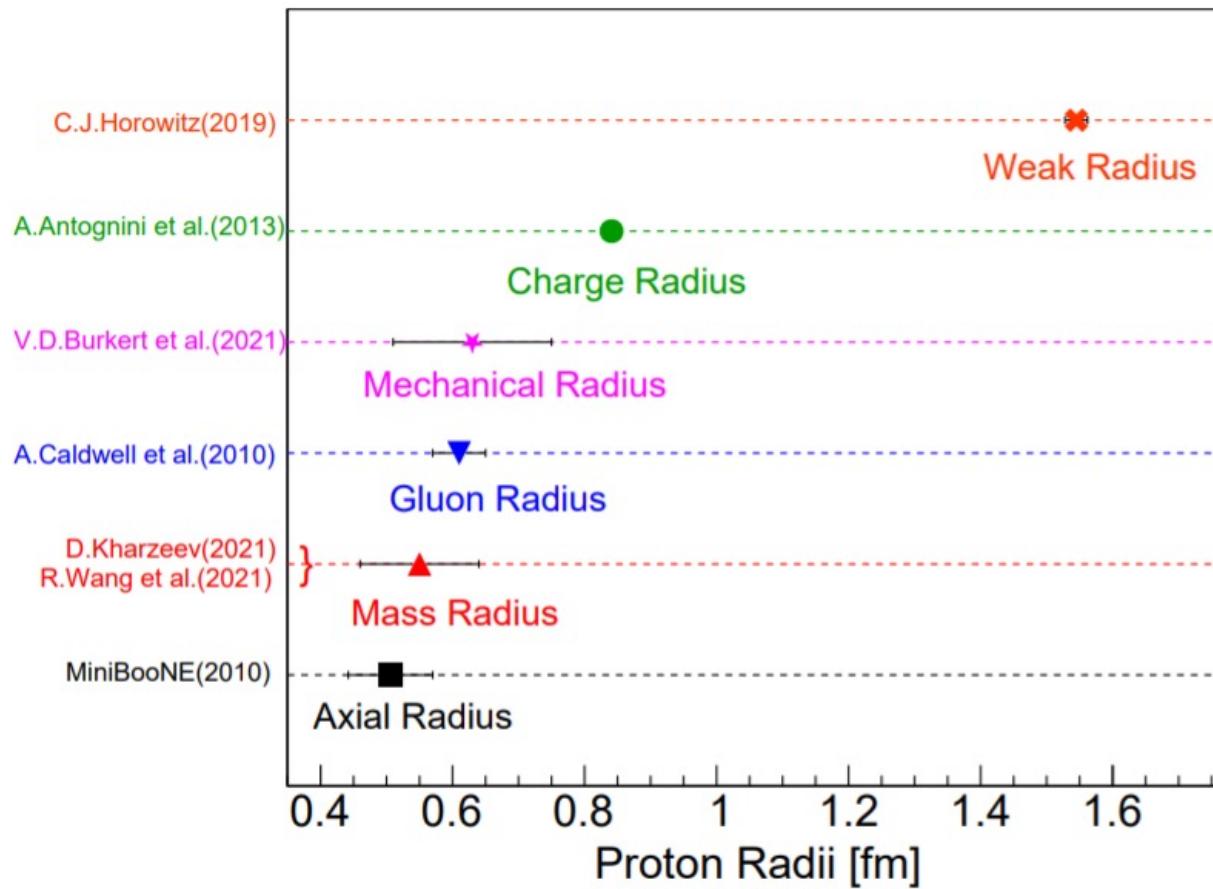
- 利用光生和电生过程矢量介子在阈值附近产生的三组实验数据，算出的质子质量半径为 0.67 ± 0.03 飞米 (PRD(Letter) 2021)
- 美国纽约州立大学石溪分校的核物理理论家Dmitri Kharzeev教授通过美国JLab实验室的实验数据，得到的质子质量半径为 0.55 ± 0.03 飞米



新闻报道 (2021)

- <https://www.media.inaf.it/2021/05/14/raggio-massa-protone/> google翻译:
● 中国科学院(CAS)近代物理研究所(IMP)的一个研究小组本周在《物理评论 D》上发表了这一测定结果，该小组估计质子的质量半径为 0.67 ± 0.03 飞米——一个飞米等于十亿分之一米的百万分之一，或 10^{-15} 米——这个值明显小于质子的电荷半径。与此同时，石溪大学的理论物理学家 Dmitri Kharzeev 使用 GlueX 数据取得了类似的结果。他估计的质子质量半径为 0.55 ± 0.03 飞米。“这两个结果可能是有史以来第一个有实验证据的质子质量半径值。
- 质量分布的实验确定是理解质子结构的一大进步。。。。。
- 仍然存在许多问题：“较小的质量半径意味着质量分布与质子的电荷分布显着不同，”IMP 研究员陈旭荣解释说。科学家们现在正试图更清楚地了解质子的质量半径及其结构。杰斐逊实验室的 GlueX 实验将在不久的将来提供更多数据。此外，未来美国和中国的电子离子对撞机将提供 η 矢量介子产生的数据，以更好地理解这些问题。
- 季向东VIEW and PERSPECTIVE 2021，“Proton mass decomposition: Naturalness and interpretations” <https://journal.hep.com/fop/EN/pdf/10.1007/s11467-021-1065-x>

质子的各种半径



第3部分 强子谱和超核物理 埃塔介子工厂

第3部分 强子谱和超核物理 埃塔介子工厂

强子谱实验

	N*	奇异重子	轻介子	c味强子	b味强子
PANDA	✓	✓	✓	✓	
COSY	✓	✓	✓		
JLab	✓	✓	✓		
MAMI	✓				
BES	✓	✓	✓	✓	
Belle			✓	✓	✓
BarBar			✓	✓	✓
HIAF	✓	✓	✓	✓	

HIAF 质子束流打固定质子靶: 对于b味介子, 至少 55 GeV. 对于b味重子, 至少62 GeV

实验条件和物理目标

- HIAF提供质子束流9 - 25 GeV打固定靶
- 累能区: 需质子能量12 GeV以上
- 底能区: 对于b介子, 至少55 GeV. 对于b重子, 至少62 GeV
- 强子谱研究:
 1. 丰富的介子谱
 2. 核子共振态: 寻找“失踪”共振态特别是 Δ^{*++} 重子激发态
 3. 双重子态: 验证 $d^*(2380)$, 寻找更多的双重子态和六夸克态
 4. 重子内的五夸克成分及隐奇异核子共振态
 5. 超核物理: 研究超核性质、超子-核子以及超子-超子相互作用
(超核工厂)
 6. 对称性研究: eta稀有衰变 (eta工厂)

邹冰松院士: COSY有多个探测器, 但都有局限性。兰州 CEE@CSR/HIAF在重子谱研究方面大有可为。....其中 $pp \rightarrow n K^+ \Sigma^+$ 为寻找与 $\rho^+ p$ 及 $K^+ \Sigma^+$ 耦合强的“失踪”的 Δ^{*++} 重子激发态, 完善(uuu) 重子谱, 可起到国际上独一无二的作用

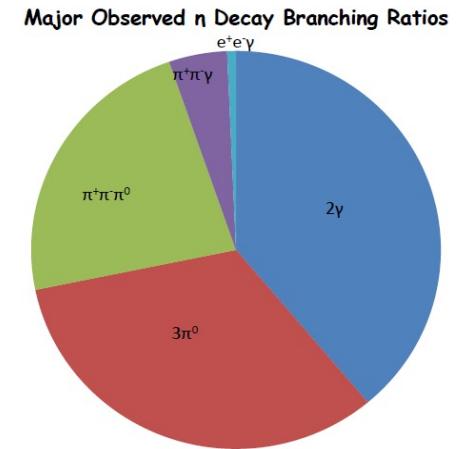
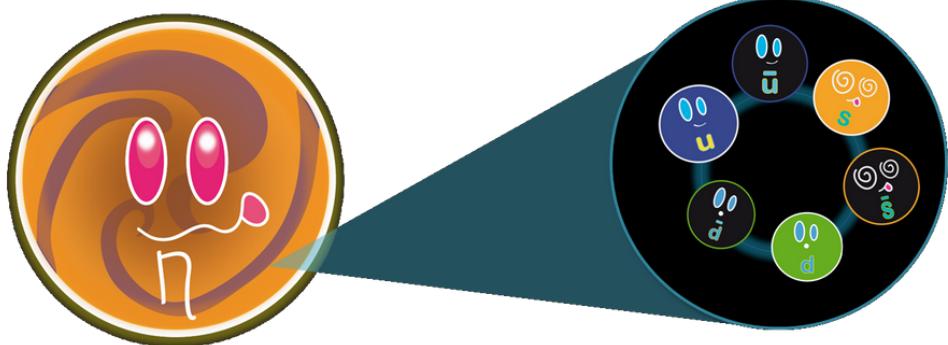
(@首届HIAF强子谱和n工厂研讨会: 2020年12月28日) .

埃塔介子工厂 – 低能希格斯工厂

Beyond the Standard Model Physics Opportunities
at HIAF

η 介子

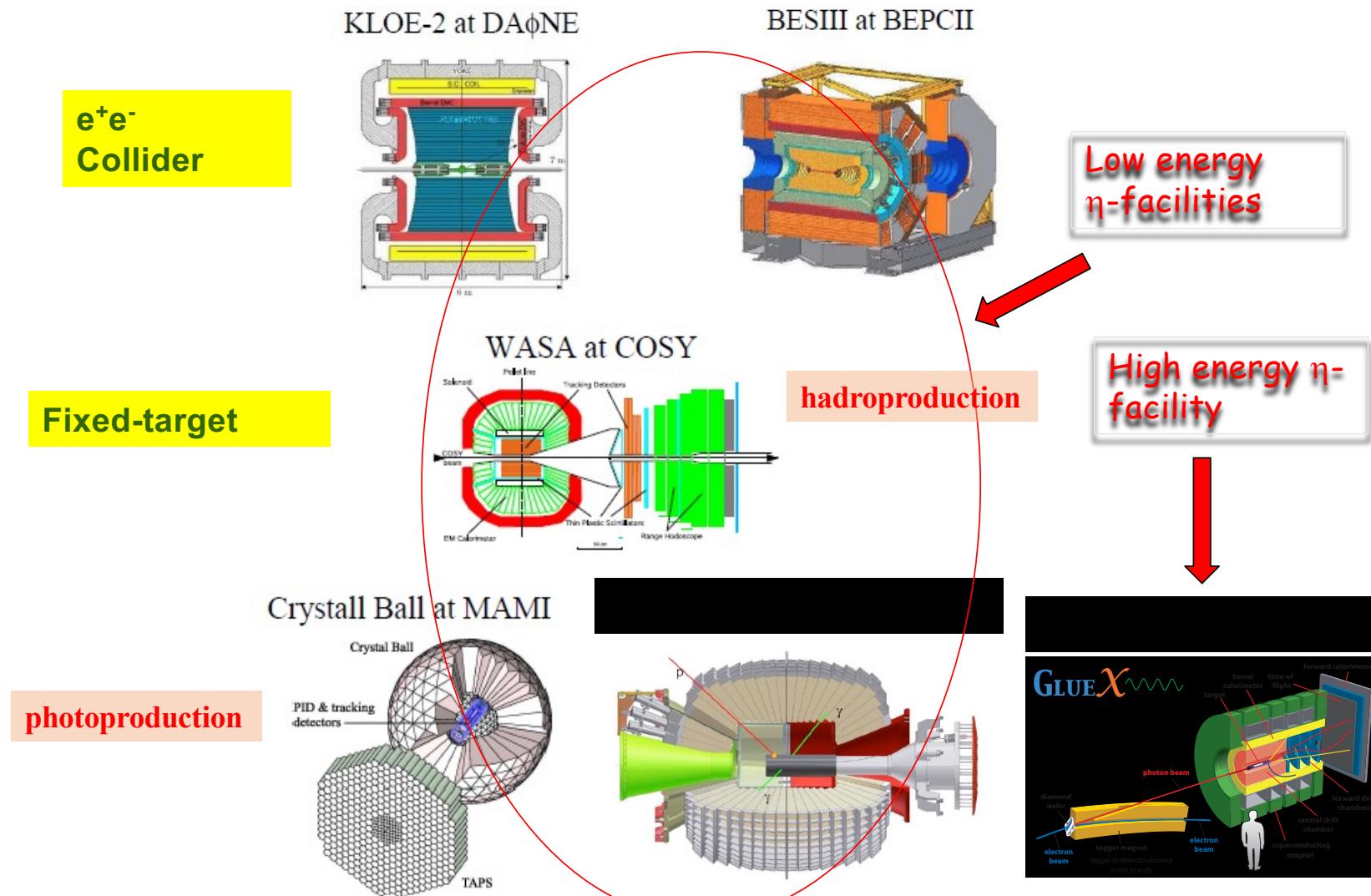
Mass = 547 MeV



浅蓝色代表衰变分支比为0.7%， 其他所有稀有衰变在图中没有显示

- η 介子由上夸克、下夸克和奇异夸克及其反夸克混合而成，是由Pevsner等人于1961年在实验中发现的。 η 介子的质量是547 MeV, 寿命是一万亿亿分之二秒
- η 介子在粒子宇宙中几乎是独一无二的，它是戈德斯通玻色子，同时， η 介子是全零量子数的粒子，这使得它与真空或希格斯玻色子相同（除了宇称）。所以，有人称 η 介子工厂为“低能希格斯工厂”
- η 介子的特殊性质引起了科学家们的好奇，对 η 介子精确的实验和理论研究，将有助于我们理解低能QCD手征对称性及其破缺机制

现有相关实验



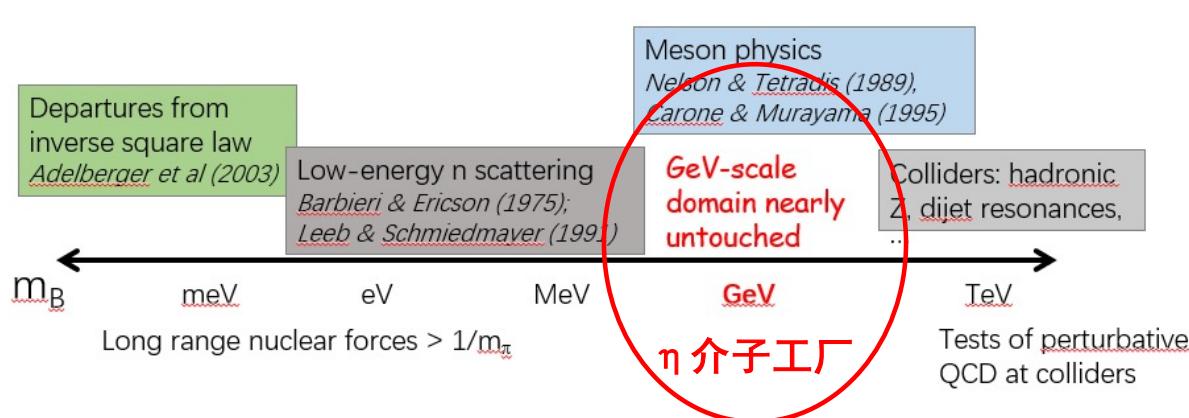
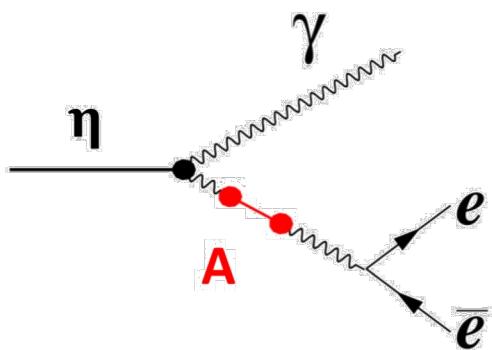
HIAF η 工厂的优势

实验	η 介子产量/年产率	备注
KLOE	10^8	$e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \gamma\eta$
KLOE-II	3×10^8	$e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \gamma\eta$
COSY	5×10^8	$pp \rightarrow pp\eta$
MAMI	2.5×10^8	$ep \rightarrow ep\eta$
BESIII	10^6	$e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \gamma\eta$
GlueX/JEF	$4.5 \times 10^7/\text{年}$	$\gamma p \rightarrow p\eta$
REDTOP (plan)	$10^{13}/\text{年}$	Proton beam, low- z Li/Be target
HIAF η factory (plan)	$5 \times 10^{13}/\text{年}$	Proton beam (10^{13} pps), Be target

HIAF η 工厂的物理目标1：寻找超出标准模型的新物理

✓ 寻找暗光子A

$$\eta \rightarrow \gamma A \rightarrow \gamma e^+ e^-$$



✓ 新的规范玻色子B

$$\eta \rightarrow \gamma B \rightarrow \gamma\gamma\pi^0$$

✓ 类轴子a

$$\eta \rightarrow \pi\pi a, \quad a \rightarrow e^+e^-/\gamma\gamma$$

✓ 轻标量粒子S

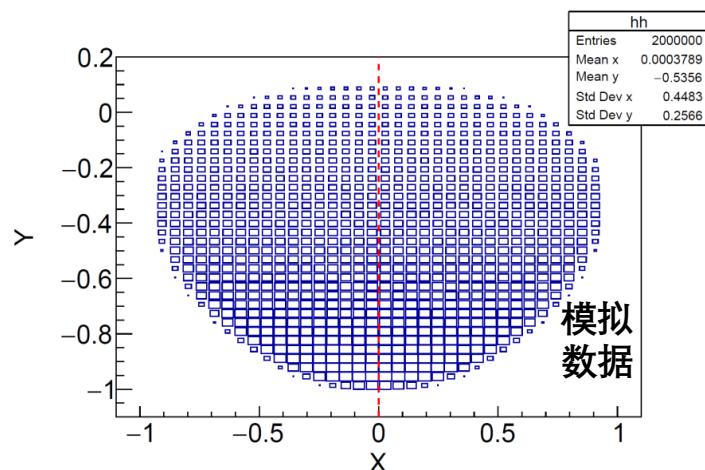
$$\eta \rightarrow \pi^0 S, \quad S \rightarrow e^+e^-/\gamma\gamma/\pi\pi$$

[arXiv:2007.00664;
arXiv:2203.07651]

- 在MeV – GeV量级如果能发现重大物理结果，应该会在eta这个反应道（它和Higgs类似，但是更容易产生和研究）

HIAF η 工厂的物理目标2：寻找CP对称性的破缺

$\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 衰变道的Dalitz图



关于 $X=0$ 的不对称性是CP对称性破缺的证据！

$$|A(X, Y)|^2 \simeq N(1 + aY + bY^2 + cX + dX^2 + eXY + fY^3 + gX^2Y + hXY^2 + lX^3 + \dots)$$

$$c = (-4.34 \pm 3.39) \times 10^{-3}$$

$$e = (2.52 \pm 3.20) \times 10^{-3}$$

$$h = (1.07 \pm 0.90) \times 10^{-2}$$

$$l = (1.08 \pm 6.54) \times 10^{-3}$$

(KLOE-II最新的数据还未发现CP破缺。)

HIAF η 工厂的物理目标3

- 精确测量 $\eta - \eta'$ 混合角，精确检验低能QCD理论/手征微扰论

辐射衰变道的宽度测量：

$$\eta \rightarrow \gamma\gamma, \quad \eta' \rightarrow \gamma\gamma$$

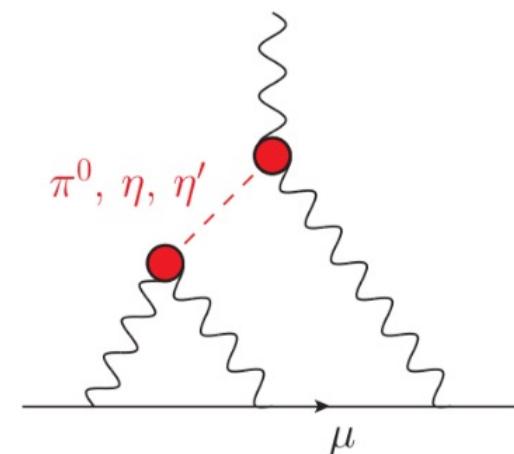
$$\Gamma(P \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{\pi \alpha_{\text{em}}^2 M_P^3}{4} |F_{P\gamma\gamma}|^2$$

$$F_{\eta\gamma\gamma} = \frac{1}{12\pi^2} \left[\frac{5 \cos \phi}{F_q} - \frac{\sqrt{2} \sin \phi}{F_s} \right],$$

$$F_{\eta'\gamma\gamma} = \frac{1}{12\pi^2} \left[\frac{5 \sin \phi}{F_q} + \frac{\sqrt{2} \cos \phi}{F_s} \right]$$

- 精确测量 η 介子的电磁跃迁形状因子，提高缪子反常磁矩的理论计算精度

$$\text{衰变道 : } \eta \rightarrow l^+l^-l^+l^-, \quad \eta \rightarrow \gamma l^+l^-$$





η介子工厂现在正逢一个非常合适的时间窗口和物理窗口，有望作出一批有重大物理意义的成果，将为我们提供一个非常好的理解标准模型低能性质和探索超出标准模型新物理的机会

候选加速器

- 目前，世界各国科学家正在提议 η 介子工厂计划
- 利用 2.0 GeV 以上能量的质子束流打固定靶
- 产生高统计量的 η 和 η' 介子，期望每年能收集超过 10 万亿个以上的 η 介子
- 这样的 η 介子工厂，可以在一个小时 内产生目前世界上所有 η 和 η' 介子实验数据
- 五个可能适合建设 η 介子工厂的地方（排名不分先后）：美国费米实验室(Fermilab) 和 布鲁克海文实验室(BNL)、德国重离子研究中心(GSI)、欧洲核子中心(CERN) 和 HIAF (第一期计划在 2025 年左右建成，质子束流能量高达 9 GeV)
- 比较：1) BNL，近期主要做 EIC；2) GSI 的束流品质不太好；3) Fermilab 能量偏高而且重点在中微子物理上；4) LHC 能量过高
- HIAF 几个优势：1) 能量流强适合；2) 加速器的时间表和探测器研发时间表契合
- η 谱仪：~2 亿元？

第4部分：总结和展望

- HIAF装置：缪子物理(缪子催化核聚变)、强子谱和超核、 η 工厂、Kaon工厂等等
- 强子谱和超核：丰富的介子谱、核子激发态、奇特态等
- η 工厂：世界上基于高功率质子加速器的 η 物理实验研究刚起步， η 超级工厂有丰富的物理，科学意义重大
- *HIAF could host the world leading meson (η , K, p) factories. Muon experiments possible, but require careful design. (C. Gatto - INFN & NIU 报告 2022)*
- 这些研究将打开一个新的物理窗口，提供探索超出标准模型新物理的一个非常好的机会，将产生一大批近物所在低能强子结构方面的重大成果，为我国强子结构和QCD理论基础研究提供新的动力
- 近代物理所十五五(2026– 2030)HIAF升级 – 缪子物理、eta物理
 谢谢大家！请大家批评指正！