

中科大交叉学科理论研究中心 – Colloquium
彭桓武高能基础理论研究中心



格点量子色动力学与高能物理高精度前沿

冯旭

北京大学

2023年4月28日



物格无止境，理运有常时

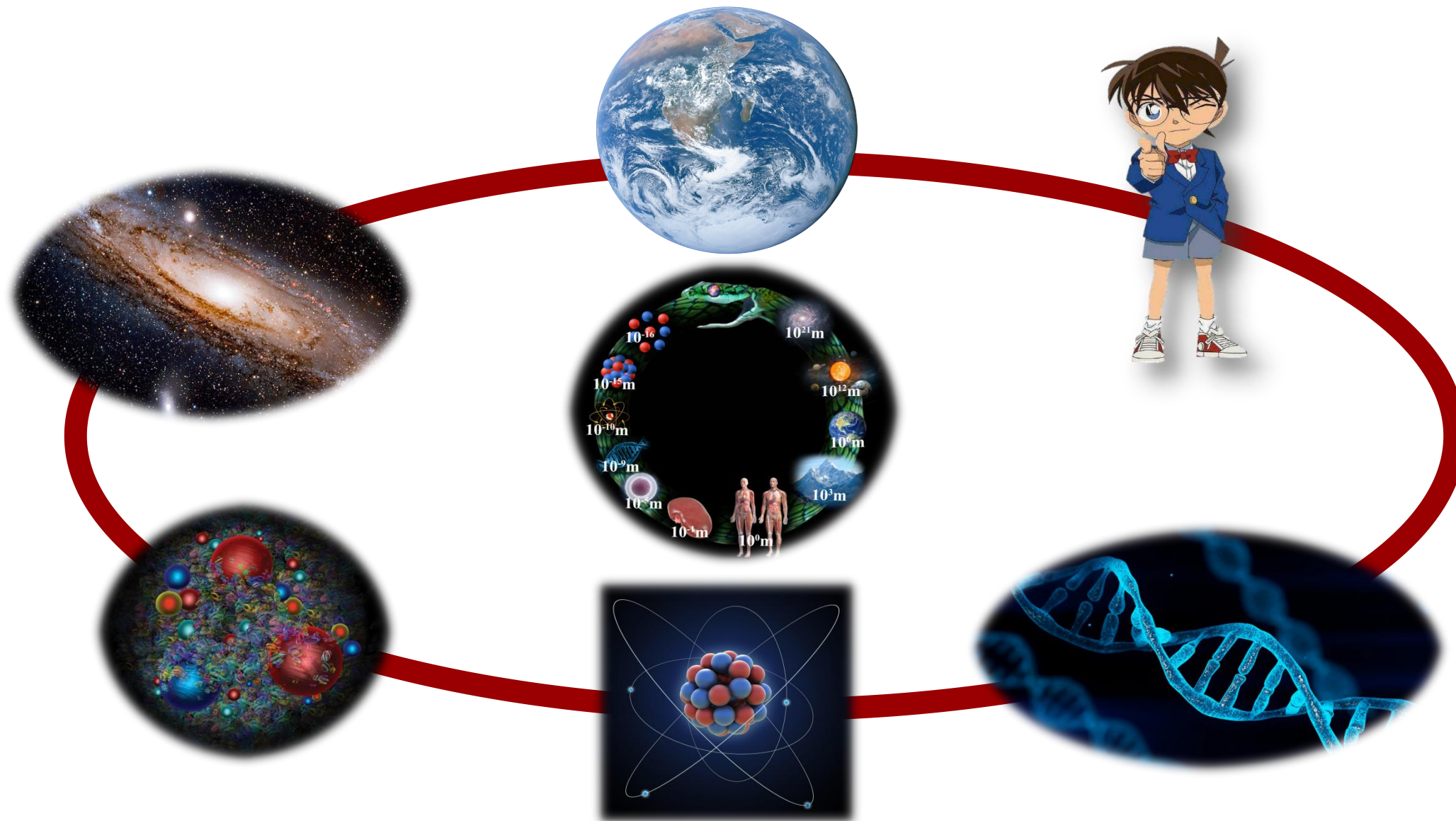
1 / 47



致知在格物，物格而后知至
所谓致知在格物者.....在即物而穷其理也

——《礼记·大学》

构成世界的基本单元是什么？



古中华文明

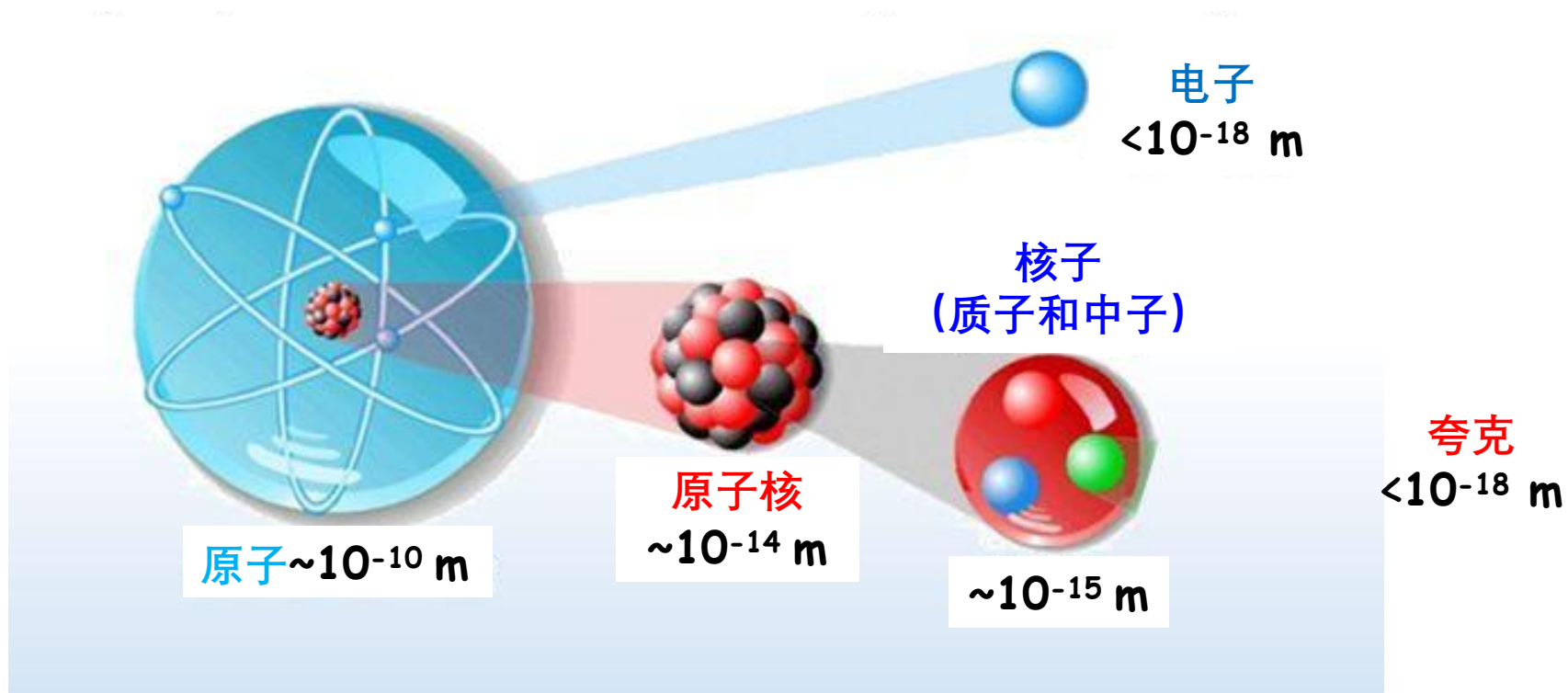


《庄子·杂篇·天下》：
一尺之棰，日取其半，万世不竭

古希腊文明



德谟克里特《原子论》：
Atom源于希腊语Atomos，意为uncuttable



分子
(化学)



原子
(原子物理、凝聚态物理)



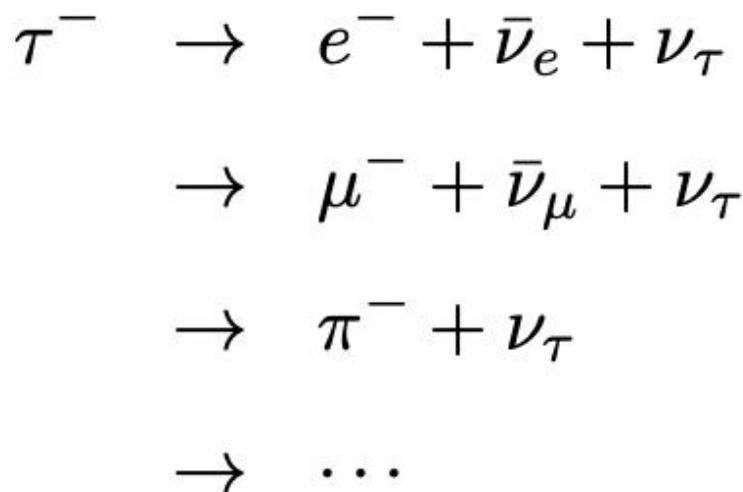
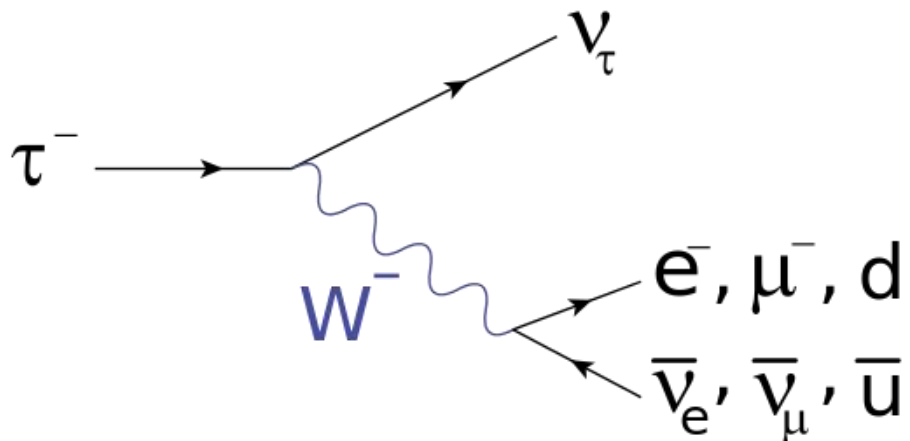
原子核
(核物理)



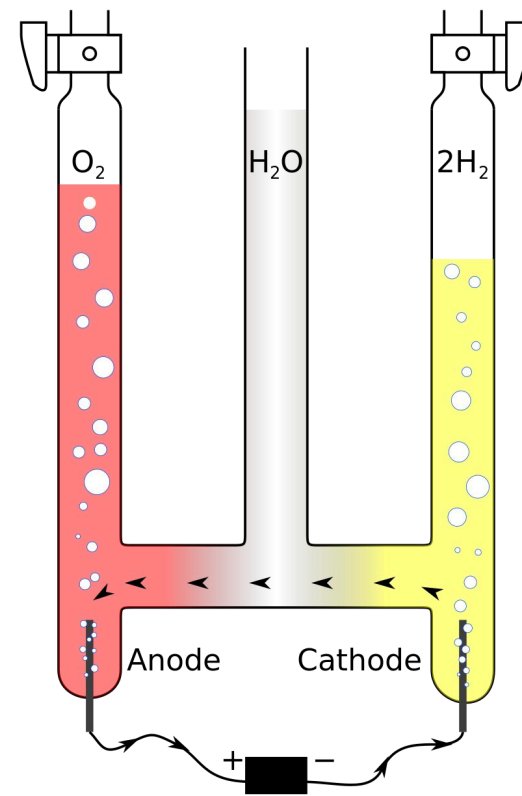
夸克
(粒子物理)

粒子物理是对物质结构研究的自然发展和深化

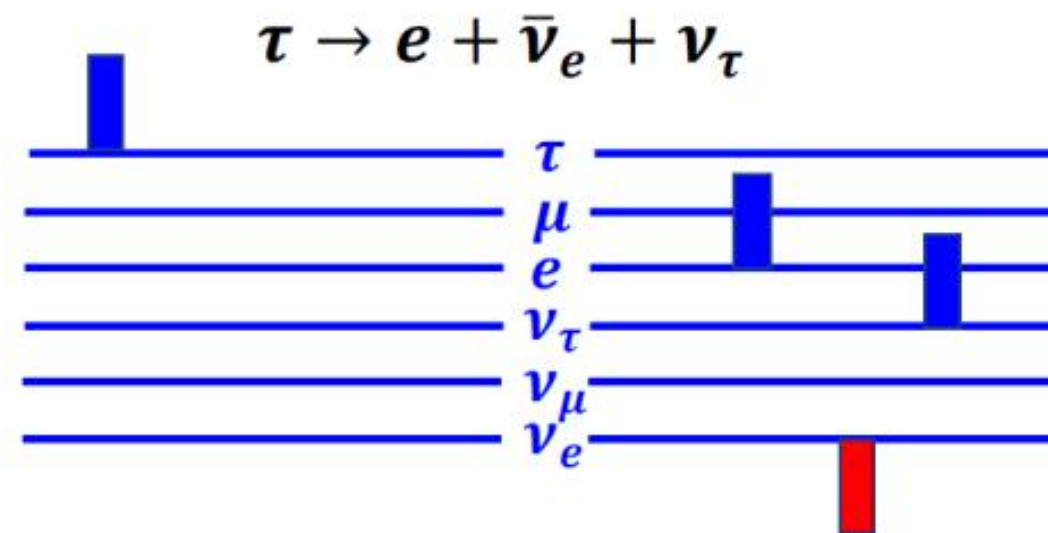
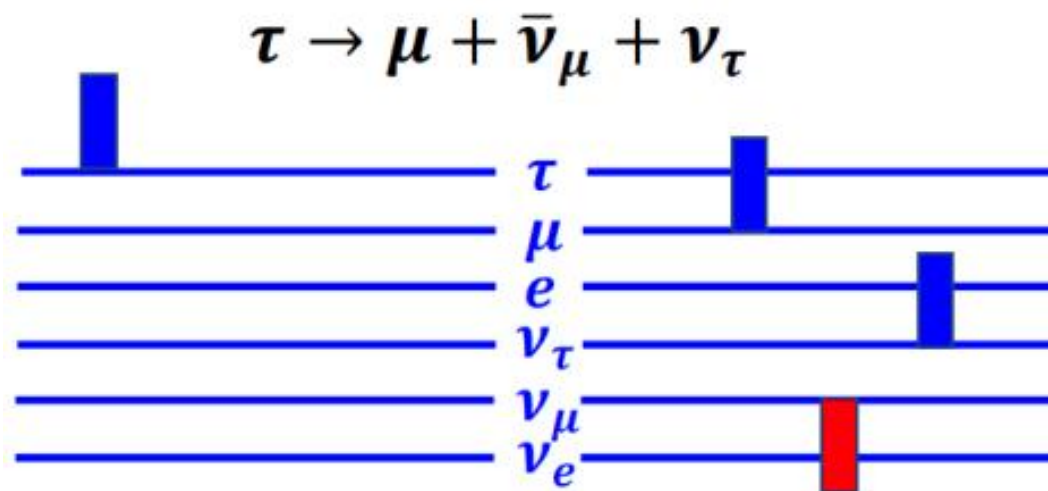
一个粒子衰变的启示



对比



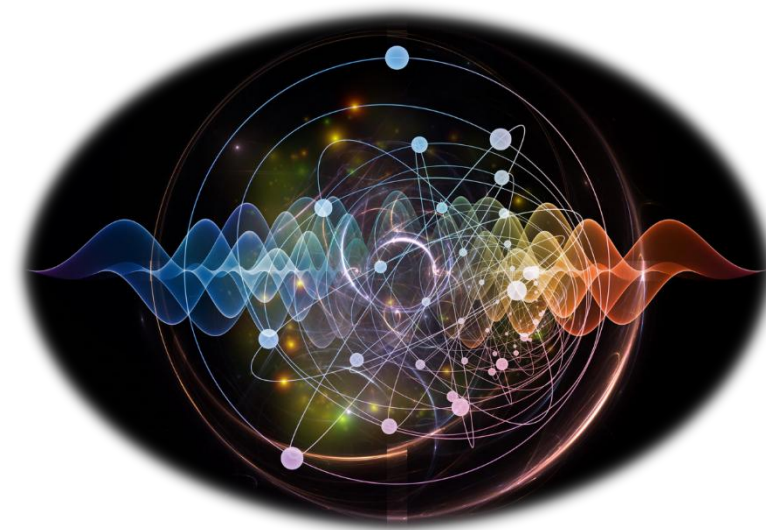
- 每种粒子对应一种场
- 场的能量最低态为基态，激发态表现为相应粒子
- 真空并非空无一物，只是所有场处于能量最低态，无法释放能量从而给出物理信号



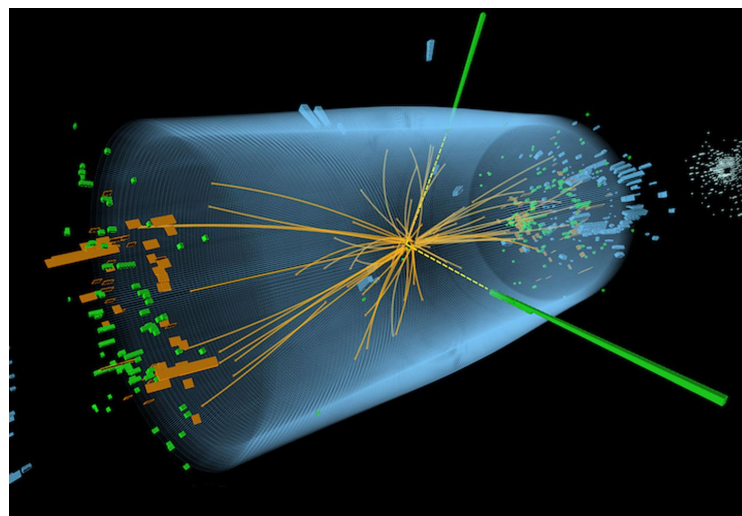
相对论与量子力学的碰撞



接近光速 \rightarrow 相对论效应 $E=mc^2$



达到原子尺度 \rightarrow 量子效应 $E=\hbar \omega$ \blacklozenge



基本粒子的特征：
既在微观尺度，又在高速运动
会有粒子的产生和湮灭



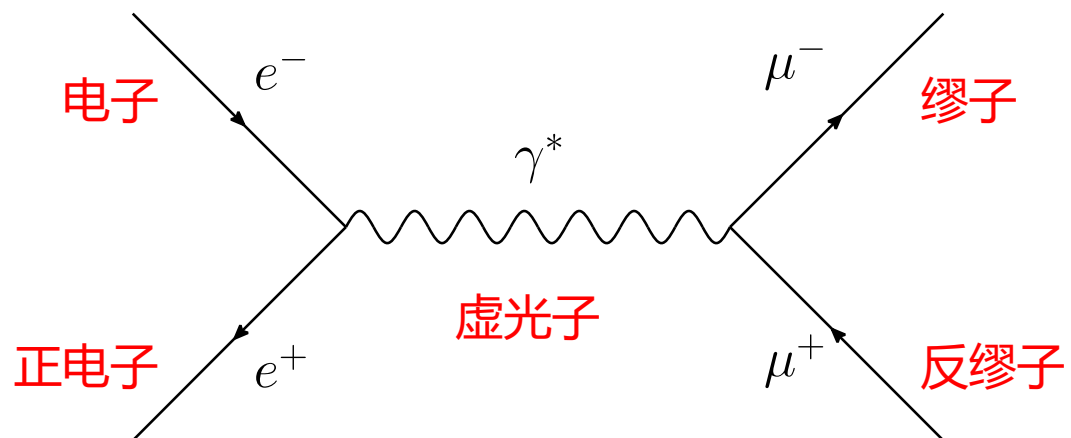
用量子场论来刻画

费曼图 - 把量子场论图形化



费曼

➤ 正负电子对撞产生正负缪子



- 海森堡不确定性原理

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$$

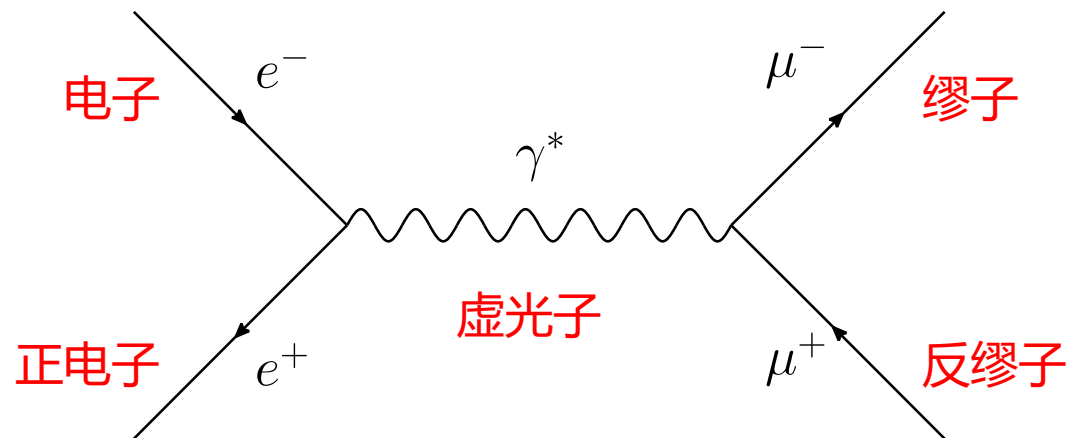
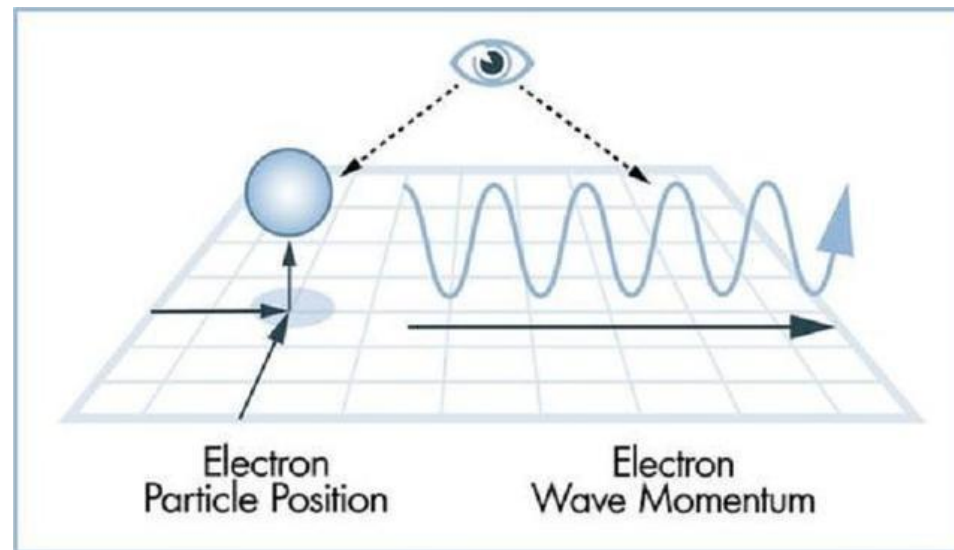
能量可以在很短的时间内有大幅涨落

- 狭义相对论

$$E = mc^2$$

能量和质量可以互相转化

- 当大幅能量转变为质量，新粒子就诞生了



➤ 海森堡不确定性原理

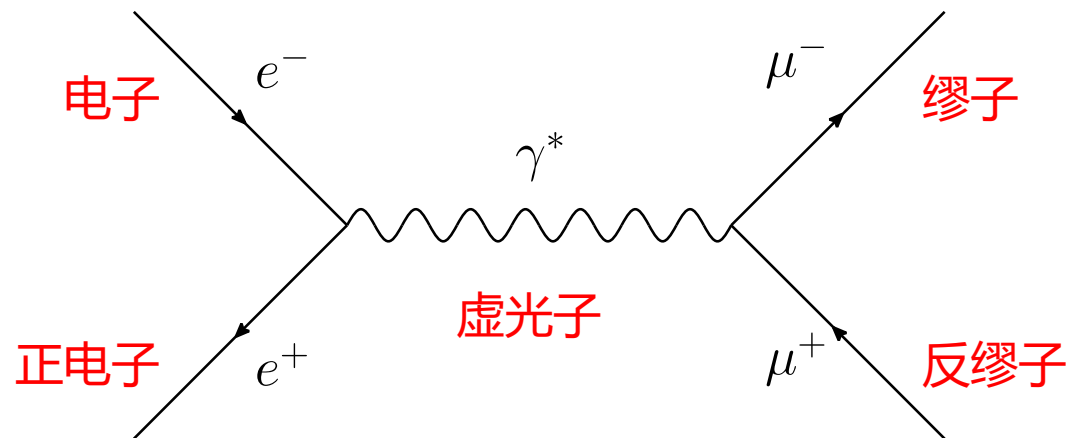
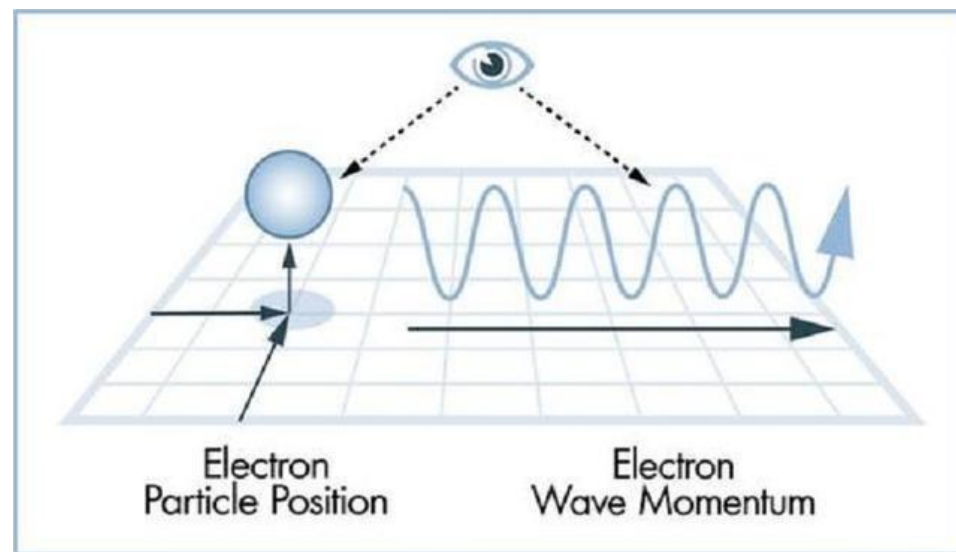
$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$$

能量可以在短时间内有大幅涨落

➤ 量子涨落会破坏能量守恒吗？

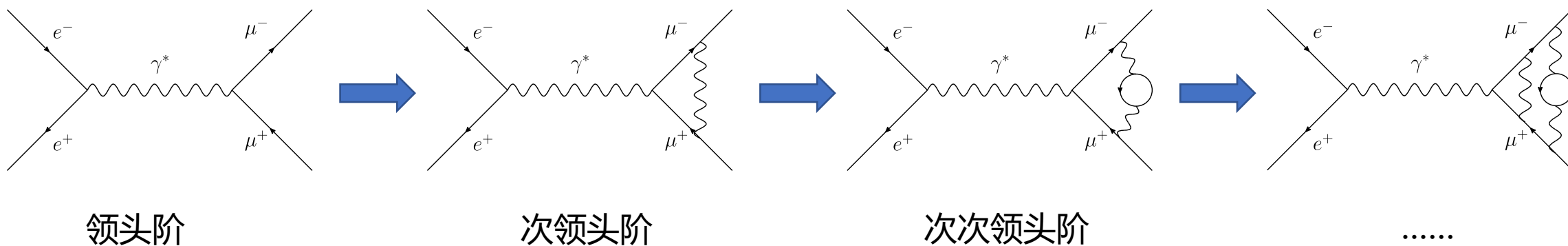
如果利用高能量产生了新粒子，但是在满足不确定性原理给出的最短时间内把能量还回去，就不会有破坏能量守恒定律的事情被观测到

➡ 这样产生的粒子称为虚粒子



➤ 量子涨落中还可以有量子涨落

➤ 虚粒子自己还产生其他虚粒子

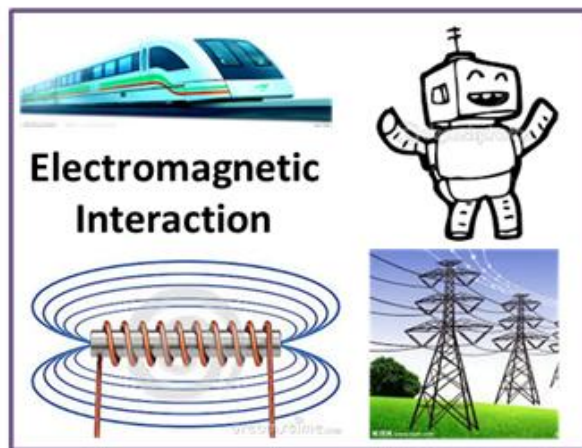


如果相互作用强度足够小，则可以微扰计算

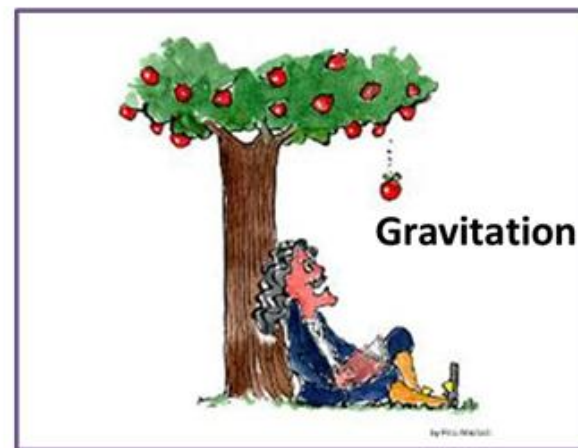
四种基本相互作用



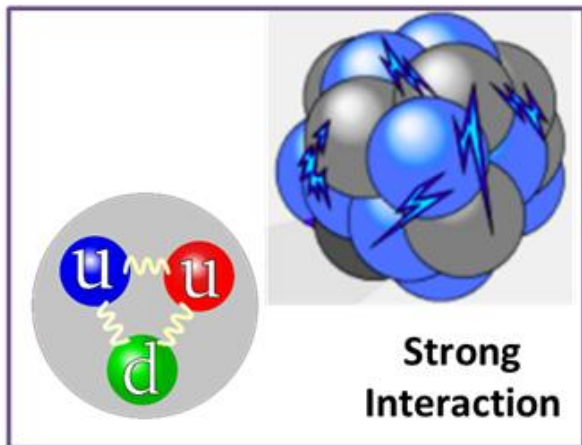
Photon



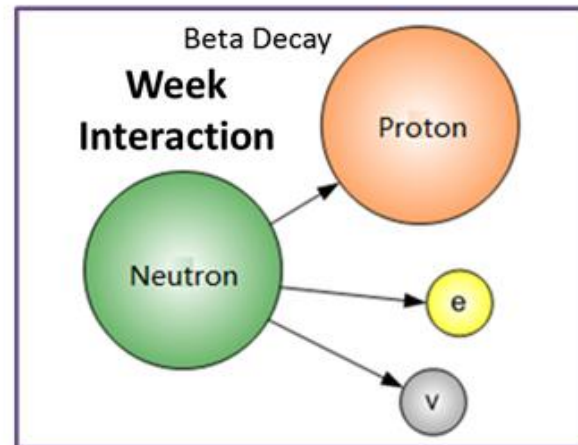
Graviton



Gluon



W&Z Bosons



相对强度： 强相互作用 \gg 电磁相互作用 \gg 弱相互作用 \gg 引力相互作用

$O(1)$

$O(10^{-2})$

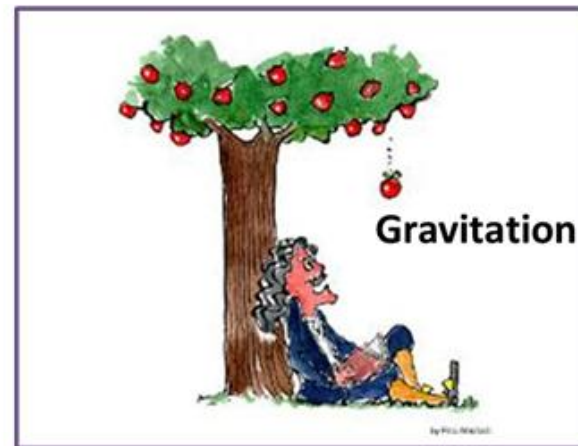
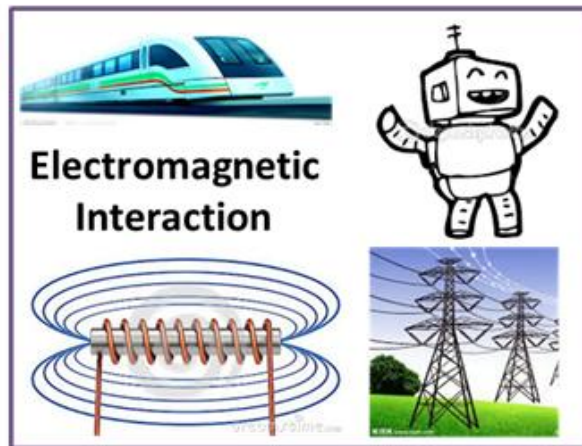
$O(10^{-13})$

$O(10^{-39})$

四种基本相互作用



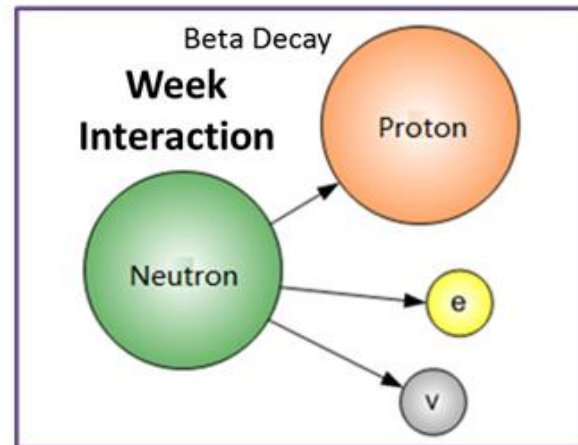
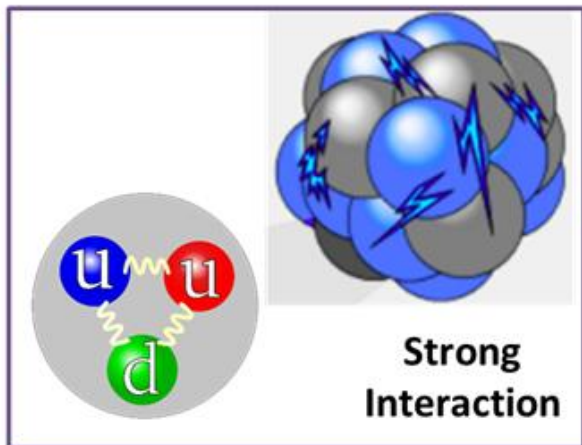
Photon



Graviton



Gluon



W&Z Bosons

关注强相互作用:

如果不能做微扰展开, 需要把所有阶的贡献全部考虑, 有办法吗?

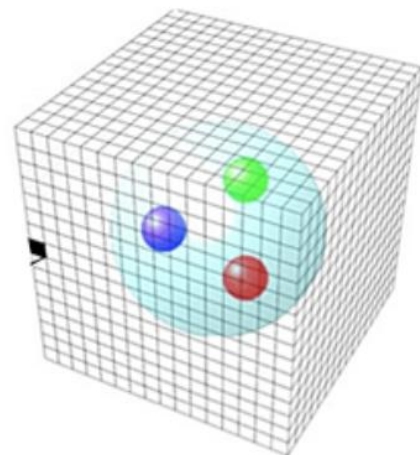
格点QCD应运而生

- 夸克和胶子间的强相互作用由量子色动力学(QCD)描述
- 当能量变小，相互作用变强，QCD进入非微扰能区
- 格点QCD：从第一性原理出发进行非微扰能区的精确计算

诺贝尔奖得主Wilson于1974年创立格点QCD



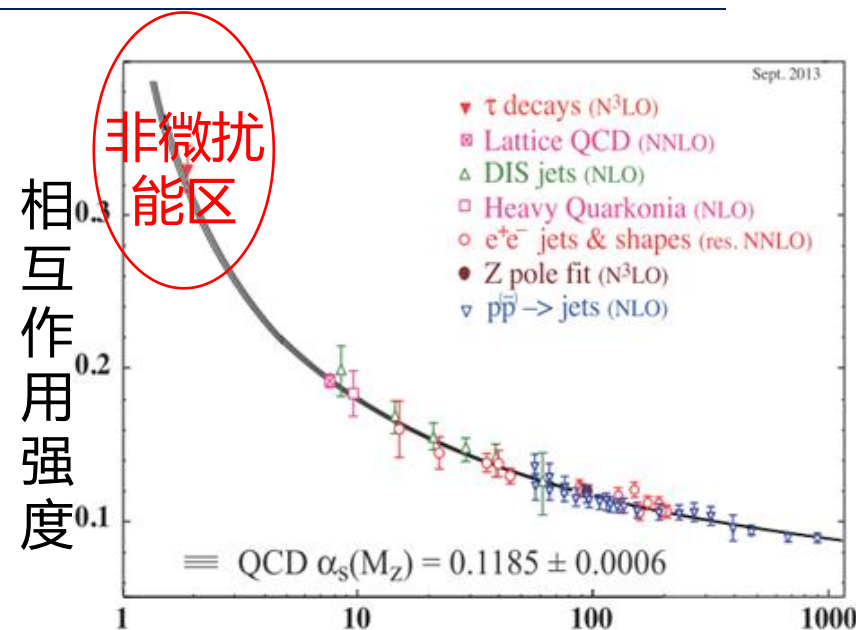
K. G. Wilson



格点QCD



超算实现精确计算



第一性原理 非微扰 精确计算 误差可控

- 最早由诺贝尔奖获得者 K. G. Wilson 在 1974 年提出
- 计算机上的第一个数值模拟由 M. Creutz 在 1979 年实现
- 格点QCD首个轻强子谱计算由 H. Hamber 和 G. Parisi 在 1981 年完成

VOLUME 47, NUMBER 25

PHYSICAL REVIEW LETTERS

21 DECEMBER 1981

Numerical Estimates of Hadronic Masses in a Pure SU(3) Gauge Theory

H. Hamber

Department of Physics, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973

and

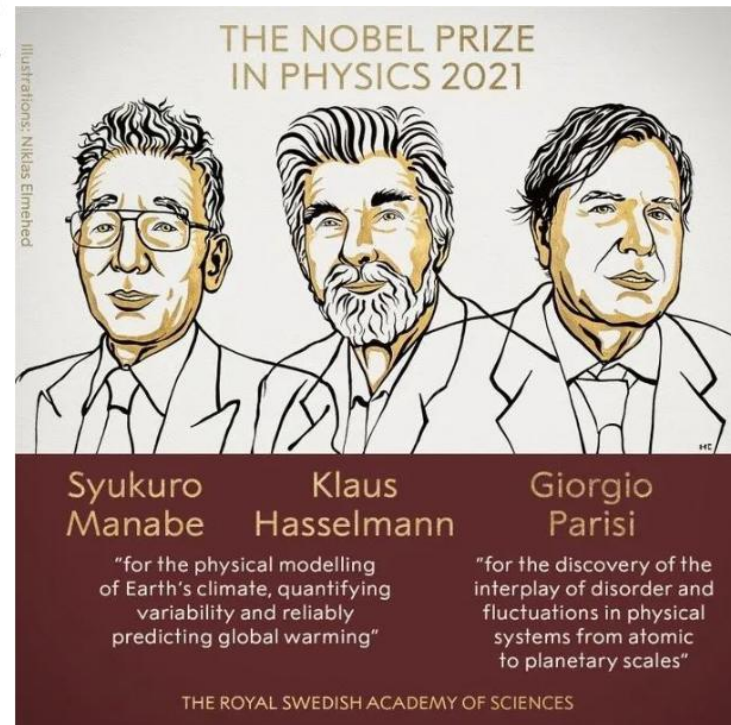
G. Parisi

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Frascati, Italy, and Istituto di Fisica della Facoltà di Ingegneria, Rome, Italy

(Received 2 October 1981)

In lattice quantum chromodynamics, the hadronic mass spectrum is evaluated by computer simulations in the approximation where closed quark loops are neglected. Chiral symmetry is shown to be spontaneously broken and an estimate of the pion decay constant is given.

PACS numbers: 12.70.+q, 11.10.Np, 11.30.Jw, 12.40.Cc



- QCD 超级计算机 1983 - 2011

Matrix Multiplier



1Mflops 1983

16-Node



256 Mflops 1985

64-Node



1.0 Gflops 1987

256-Node



16 Gflops 1989

QCDSF



600 Gflops 1998

QCDOC



20 Tflops 2005

LLNL Sequoia, IBM



20 Pflops 2011

- 2012 – 2022, 超级计算机进入 **Eflops** 时代, 每秒进行**百亿亿次**浮点运算

大国重器 – 中国的超级计算机

我国的神威·太湖之光曾4次蝉联世界超级计算机500强榜首；天河二号曾6次蝉联榜首



计算速度达到每秒 $0.93 \cdot 10^{17}$ 次浮点运算

计算速度达到每秒 $0.34 \cdot 10^{17}$ 次浮点运算



| 排行 | 品牌 | 地点 | 发布时间 | 分数 |
|----|------|---------------|------|-----------|
| 1 | 日本 | 日本理化研究所 | 2020 | 537212.00 |
| 2 | 美国 | 美国德州农工大学实验室 | 2018 | 200794.90 |
| 3 | 美国 | 美国芝加哥大学国家实验室 | 2018 | 125712.00 |
| 4 | 中国 | 国家超级计算无锡中心 | 2015 | 125435.90 |
| 5 | 中国 | 国家超级计算广州中心 | 2013 | 100678.70 |
| 6 | 美国 | 美国阿贡国家实验室 | 2021 | 89794.50 |
| 7 | 美国 | 美国 | 2020 | 79215.00 |
| 8 | 德国 | 德国于利希研究中心 | 2020 | 70980.00 |
| 9 | 沙特阿美 | 沙特阿美 | 2020 | 55423.60 |
| 10 | 日本 | 日本产业技术综合研究所 | 2021 | 54341.00 |
| 11 | 意大利 | 意大利埃尼石油公司 | 2020 | 51720.80 |
| 12 | 美国 | 美国奥德亚国家实验室 | 2015 | 41461.20 |
| 13 | 美国 | 俄罗斯莫斯科先进计算机中心 | 2019 | 38745.90 |
| 14 | 日本 | 日本产业技术综合研究所 | 2018 | 32576.60 |
| 15 | 意大利 | 意大利INECA超算中心 | 2020 | 29354.00 |
| 16 | 美国 | 劳伦斯伯克利国家实验室 | 2017 | 27880.70 |
| 17 | 瑞士 | 瑞士国家超级计算中心 | 2013 | 27154.30 |

2021年5月全球TOP500超算

2022全球超算TOP500公布： 美国百亿亿次超算Frontier登顶



美国首台E级超算为何登顶全球？外媒：中国E级超算已运行一年多，不参加国际排名了

分享到：



69

456

2022-05-31 14:06:15

字号： A- A A+

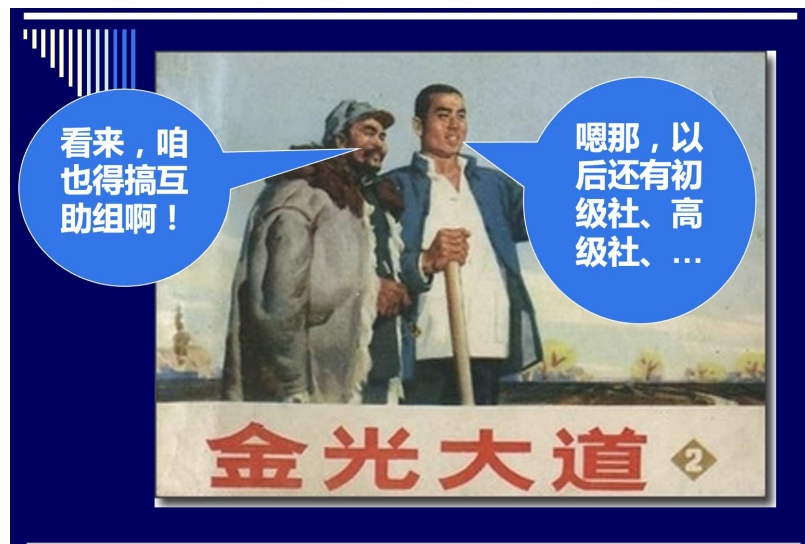
来源：观察者网

阅读 333098

最后更新：2022-06-02 22:53:35

【导读】 亚洲技术信息项目（Asian Technology Information Program）主任大卫·卡哈纳最近发布的报告显示，中国首台E级超算已经运行一年多，第二台E级超算也已开始运行，但都没有参与全球超算排名，也没有正式亮相。

英国《金融时报》：中国更关注国内竞争，而不是国际对手在做什么



刘川, 2006

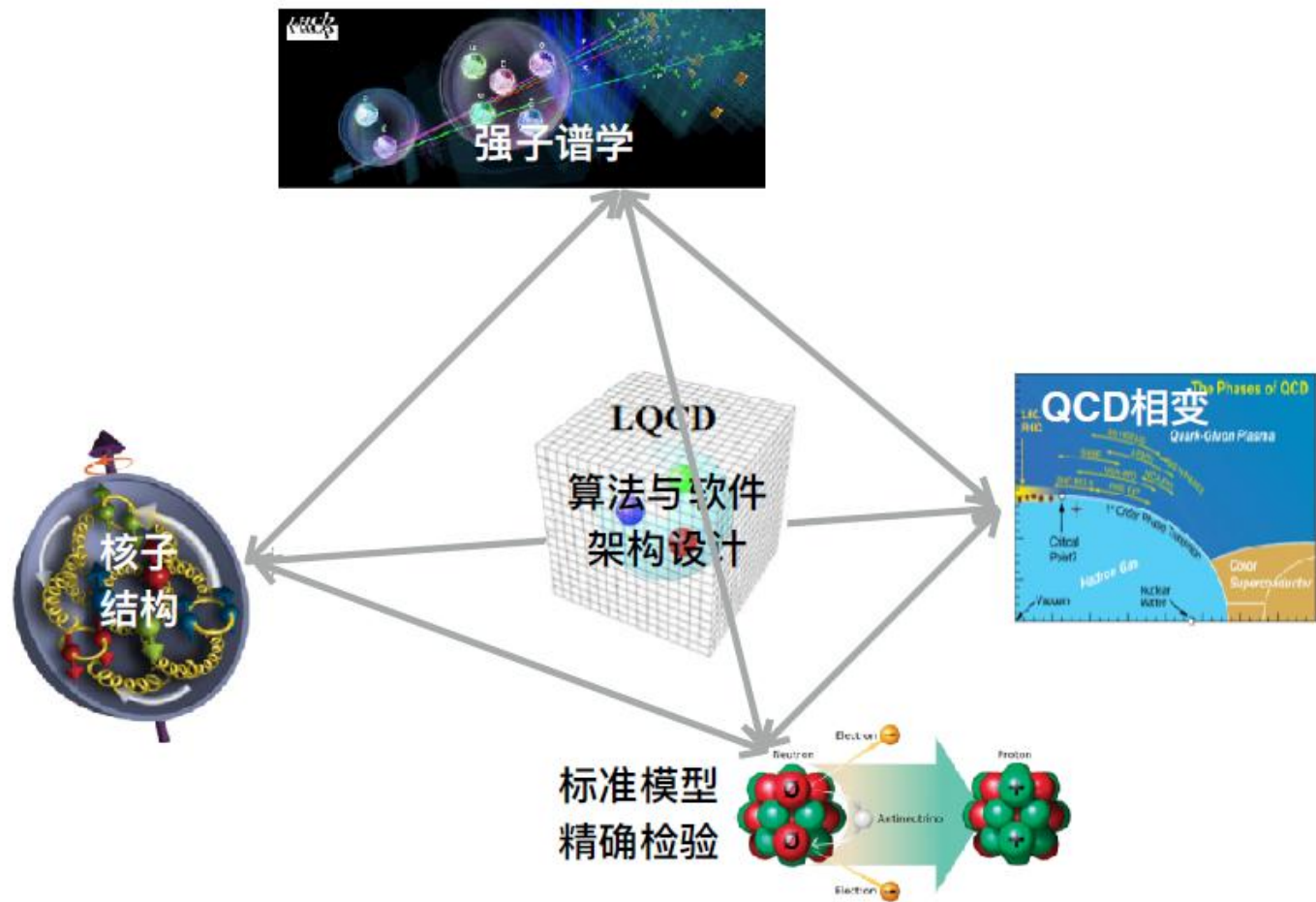
中国物理学会高能物理分会
第七届学术年会大会报告

展望：以后还有初级社、高级社 ...



2023

北大、北航、北师大、湖南师大、华南师大、
华中师大、江苏大学、南开大学、上海交大、
四川大学、西安工大、浙江大学、郑州大学、
中科院大学/高能所/近物所/理论所 ...



对强相互作用非微扰性质的理解提高到一个新的层次

P. I.

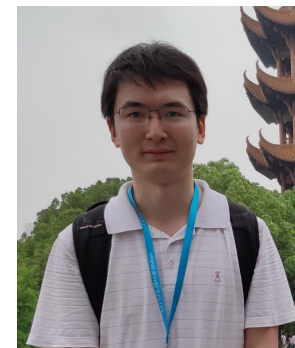


冯旭
教授



刘川
教授

主要合作者



靳路昶
康涅狄格大学
助理教授

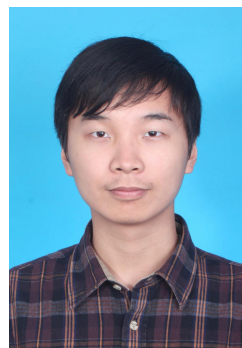
团队成员
(部分)



傅杨 2018博



脱心宇 2018博



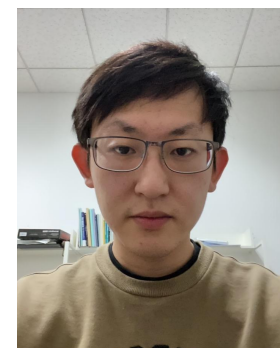
王子毓 2019博



王啸洋 2019博



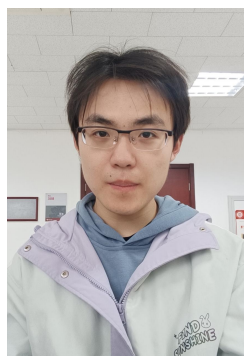
马鹏翔 2020博



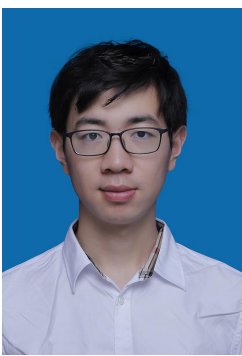
王选贺 2020博



高钰圣 2021博



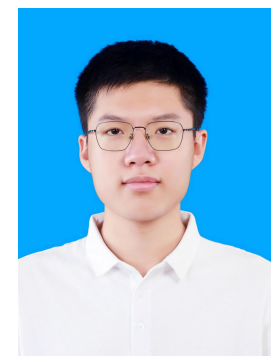
王腾 2021博



林天 2022博



陆辰飞 2022博



范淙灵 2019本



张兆龙 2019本

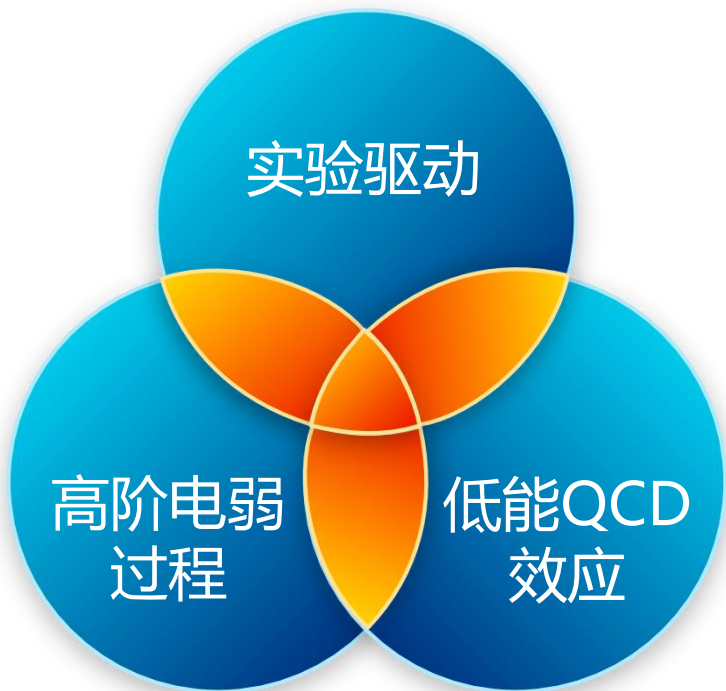


2005年，《科学》杂志纪念创刊125周年，发布125个重要科学问题

- 32、正物质为何多于反物质？
- 33、质子会衰变吗？
- 34、引力的本质是什么？
- 35、时间为何不同于其他维度？
- 36、是否存在比夸克更小的基本粒子？
- 37、中微子是其自己的反粒子吗？

回答这些基本科学问题将帮助我们理解宇宙万物存在的奥秘，也将影响未来科学的发展

- 寻找标准模型以外的新物理 { 直接寻找——高能量前沿, LHC、CEPC等各种大型对撞机
间接寻找——高精度前沿, 各种高精度、中小型实验装置
- 高精度前沿



超冷中子衰变
美国LANL实验室



缪子反常磁矩
美国费米实验室



稀有K介子衰变
欧洲核子研究中心



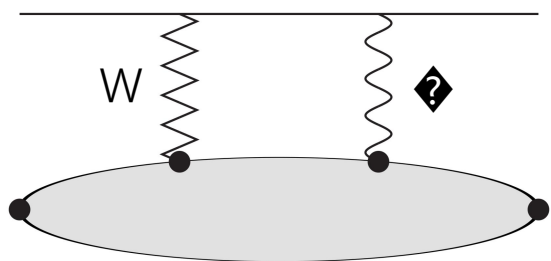
无中微子双贝塔衰变
中国锦屏地下实验室

低能强相互作用贡献显著

◆ CKM矩阵是标准模型中的最基本参数

高精度前沿的重要目标之一，就是精确确定 V_{ud} 等CKM矩阵元

但是...



光子-W玻色子圈图(◆W圈图)
⇒贡献了最主要的理论误差

A. Sirlin, Rev.Mod.Phys. 50 (1978) 573

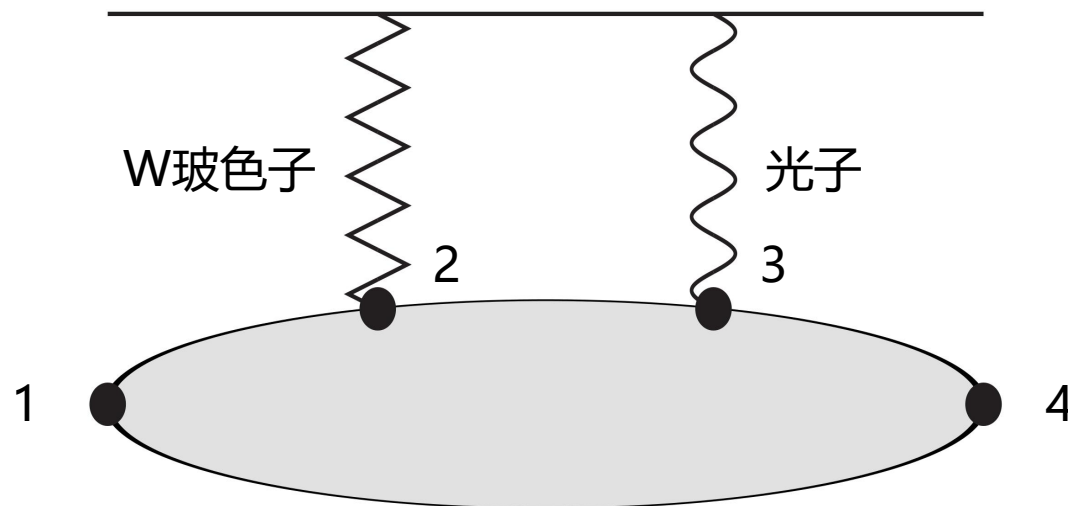


Cabibbo Kobayashi Maskawa

- 早在1970年代末，人们就已经知道◆W圈图的重要性
- 由于非微扰QCD效应在◆W圈图中占重要贡献，微扰计算的方法失效
- 理论计算仍然基于一定的唯象模型假设

困扰CKM物理领域四十多年的精确计算难题

格点计算的核心问题 – 四点函数

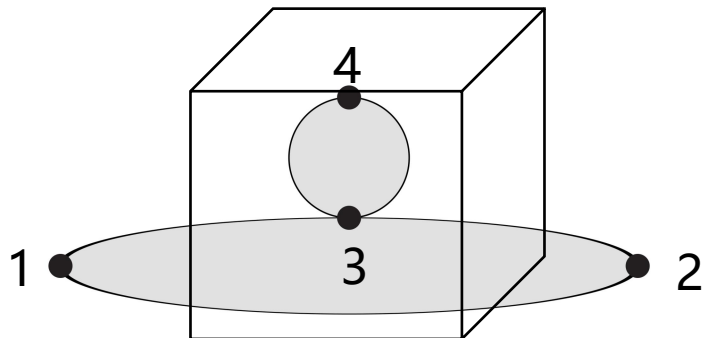


- 传统的格点QCD计算围绕两点和三点函数展开
 - 根据FLAG Review总结报告，像衰变常数、形状因子等，格点计算精度已达到0.2%
- 领域的迅速发展带来新的机遇和挑战
 - 当计算精度优于1%时，标准模型精确理论预言必然要求在QCD中引入电磁修正
 - 高精度前沿寻找新物理，要求从第一性原理出发计算高阶电弱过程中的QCD贡献
 - 轻子核子散射过程，需要理论上从强子张量中提取核子结构信息，为EicC等实验提供对比

这些重要前沿领域的研究，都需要解决四点函数难题

- 四点函数计算无法依靠超算能力的提升来完成，必须要在物理理论上实现突破

四点函数难题之一：有限体积困难



- 有限体积困难来源于多强子中间态
- 有限体积下，多强子态的能级是离散的
- 四点函数中含有一个能级差的因子

$$\frac{1}{\text{中间态能级} - \text{初态能级}} \sim \frac{1}{0}$$

- 体积越大，发散越厉害，计算越不可靠

破解难题

分析多强子态所受有限体积的影响

发掘普适性的规律

提出有限体积误差的修正公式

N. Christ, XF, A. Portelli, et al. PRD 93 (2016) 114517

Z. Bai, N. Christ, XF, et al, PRL 118 (2017) 252001

修正后有限体积误差随体积增大指数衰减

问题的解决源于多年系统研究有限体积下多强子态

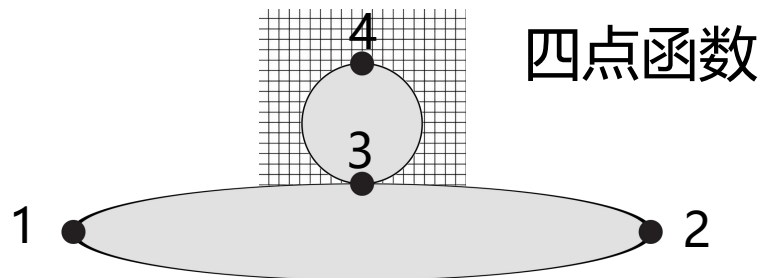
N. Christ, XF, G. Martinelli, et al, PRD 91 (2015) 114510

XF, S. Aoki, S. Hashimoto, et al. PRD 91 (2015) 054504

XF, K. Jansen, D. Renner, PRD 83 (2011) 094505

XF, K. Jansen, D. Renner, PLB 684 (2010) 268

四点函数难题之二：短程发散困难



- 所有的格点计算都是在非零的格距下进行的
- 真正的物理存在于格距趋于零的连续极限下
- 对于四点函数，当3、4两点靠近，小于格距 a 时

误差为 $1/a^2$ 或者 $\log(a^2)$

- 格距越小，格距误差越大

称之为短程发散

提出两算符重整化方案

N. Christ, XF, A. Portelli, et al. PRD 93 (2016) 114517
Z. Bai, N. Christ, XF, et al, PRL 118 (2017) 252001

格点上传统的算符重整化方案

针对三点函数进行的单算符相乘性重整化

我们率先提出相加性的两算符重整化方案

- 将四点函数分成长程和短程两部分
- 长程部分保留格点非微扰的计算结果
- 短程部分用微扰论的计算结果代替

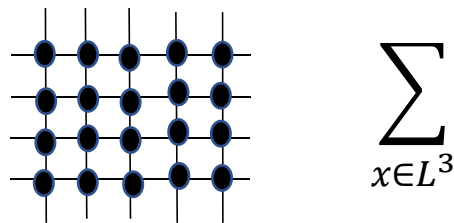
方法对于处理四点函数具有普适性

重整化后，格距误差随格距变小平方压低

短程发散困难得到解决

四点函数难题之三：计算量显著增长

- 格点计算要对每个格点都进行全空间求和



- 从三点函数跨越到四点函数



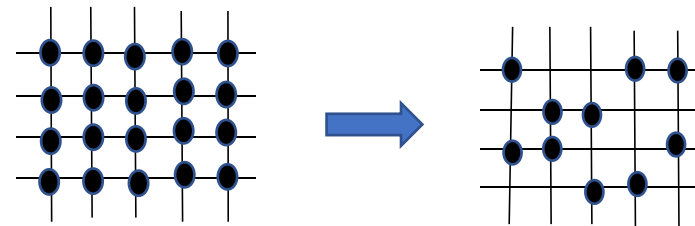
三点函数： L^6 求和

四点函数： L^9 求和

每增加一个点，计算量增长超10万倍！
无法通过增加计算资源解决问题.....

提出普适性的稀疏场方法

Y. Li, S. Xia, XF, L. Jin, C. Liu, PRD 103 (2021) 014514

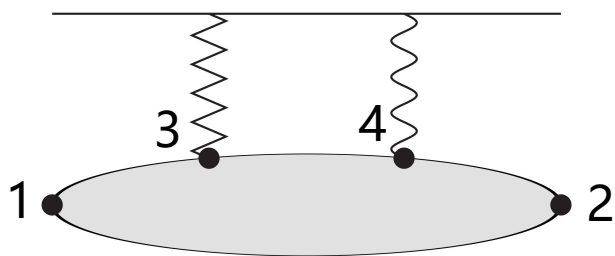


- 常规理解：求和格点的减少会导致精度的下降
- 我们发现：格点与格点之间存在强关联，将求和格点数量减少1000倍，并不会降低精度
- 应用到不同的物理过程证实了方法普适性

采用稀疏场方法

- 在保持精度不变的情况下，将计算量减少1000倍！

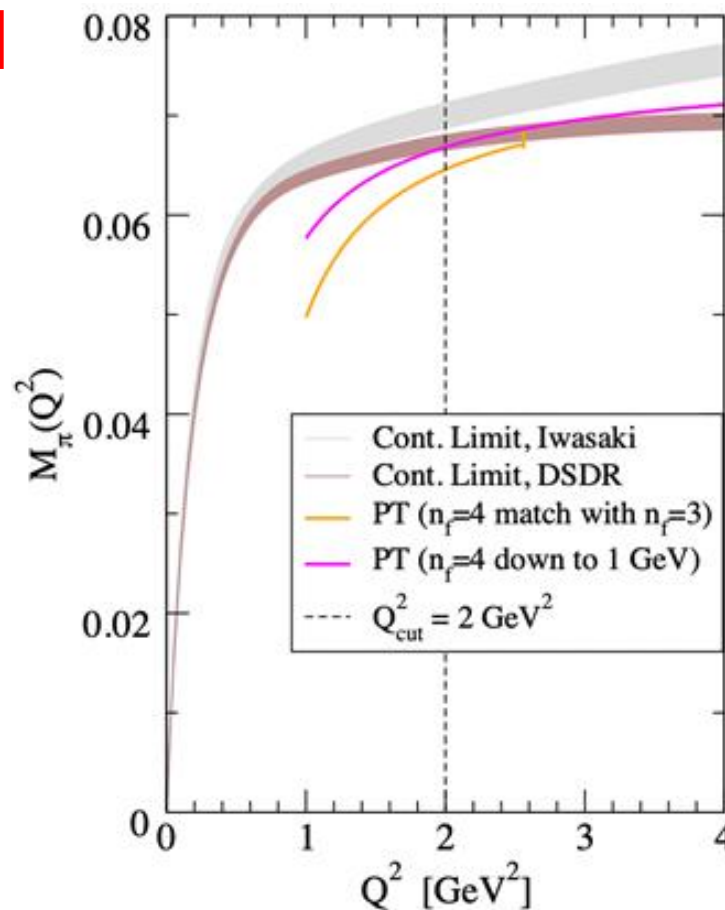
◆ 我们从第一性原理出发精确计算 ◆ W圈图



π 介子衰变的 ◆ W圈

应用格点函数技术计算 π 介子的 ◆ W圈图

- 非微扰QCD部分的理论误差减小了10倍
- 整体理论误差减小了3倍



马鹏翔 (博士三年级)

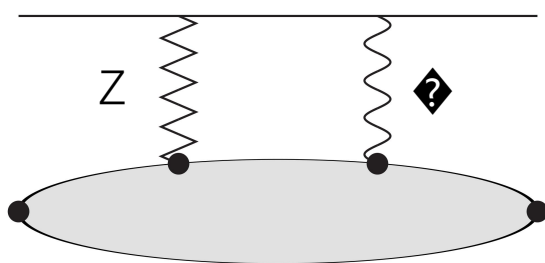
XF, M. Gorchtein, L. Jin, P. Ma, C. Seng, PRL 124 (2020) 19, 192002

通过格点计算，我们解决了高精度CKM物理中核心的 ◆ W圈图难题

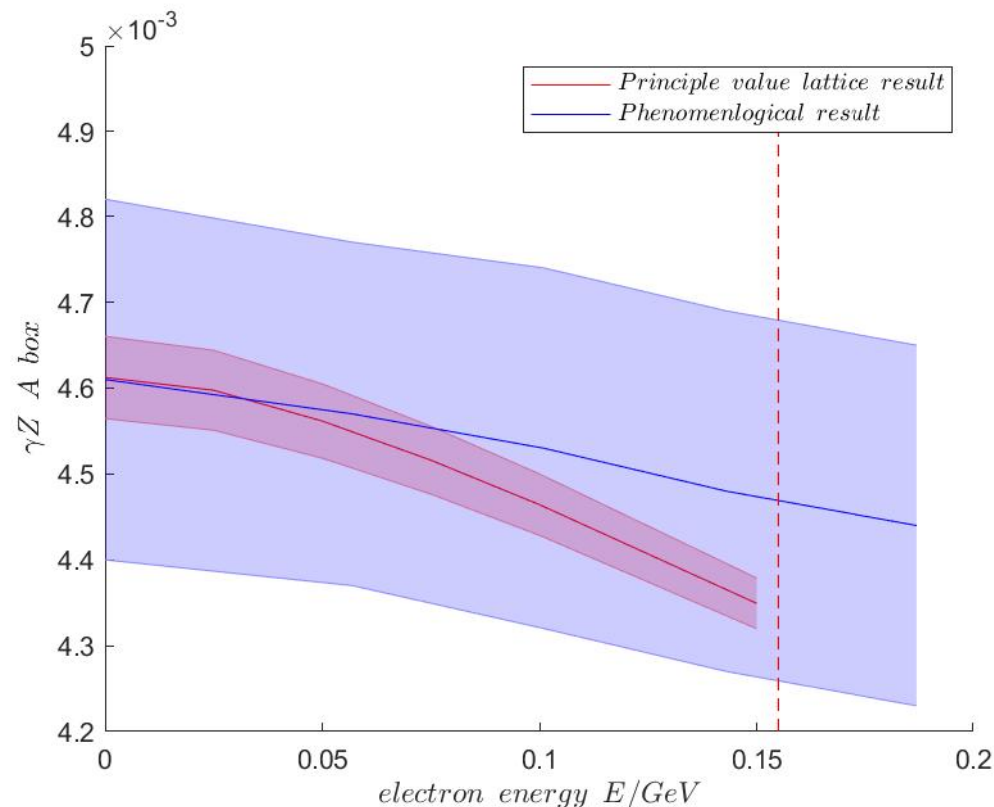
宇称破坏电子质子散射- 确定Weinberg角

- ◆ Q_{weak} 实验@JLab: 极化电子与非极化质子散射
对弱相互作用非常敏感, 可用于精确确定Weinberg角

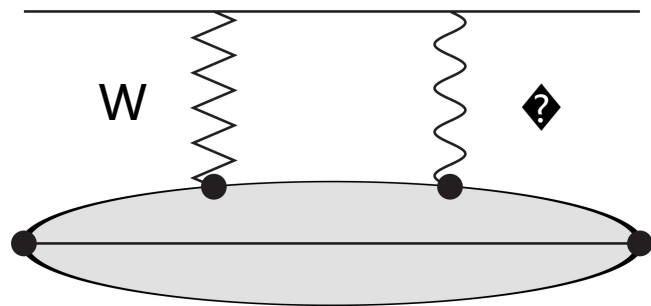
格点初步结果——◆ Z圈图贡献随电子能量变化



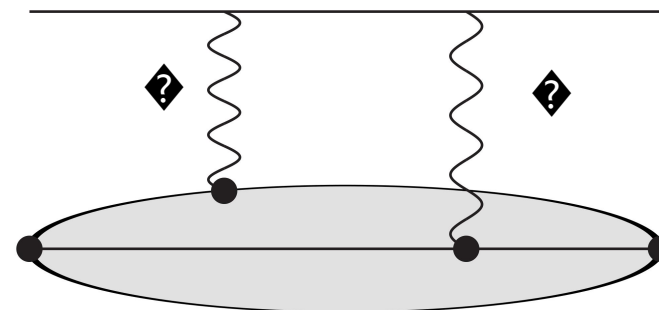
光子-Z玻色子圈图(◆ Z圈图)
⇒ 精确得到弱荷的必经之路



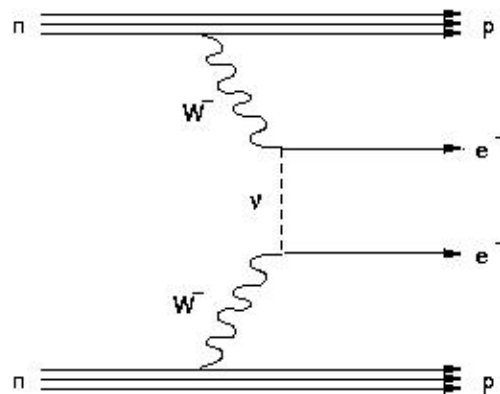
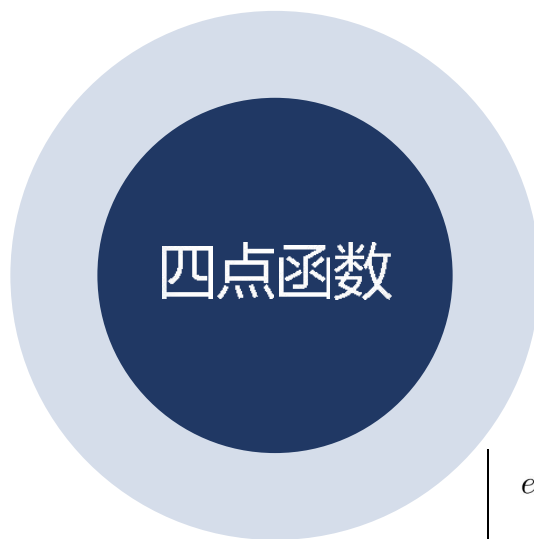
张兆龙 (本科四年级)



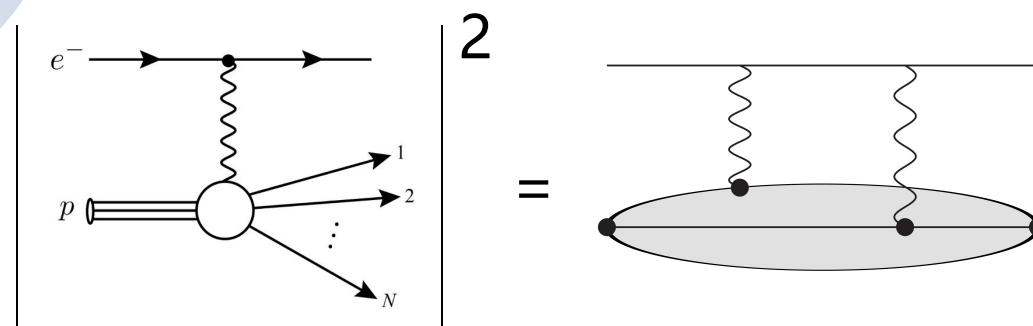
贝塔衰变中的 \diamond W圈图 (1)



缪氢原子光谱 (2)



无中微子双贝塔衰变 (3)



轻子核子散射 (4)

➤ 自然界中的光谱



牛顿分光镜揭示了彩虹的成因



➤ 生产生活中的光谱



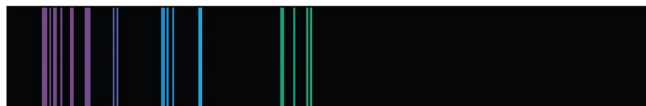
古代青铜冶炼，根据火焰颜色判断炉温高低

➤ 原子光谱学

CARBON



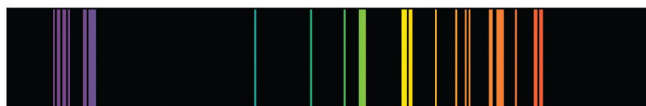
OXYGEN



NITROGEN



IRON



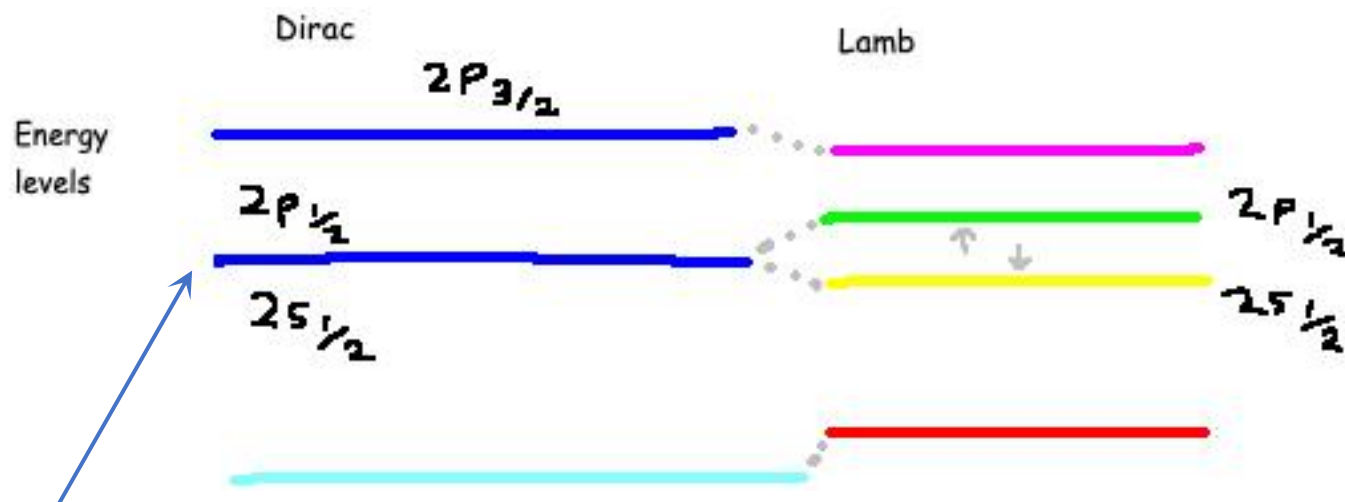
不同的原子具有不同的光谱



利用光谱揭示原子内部结构

【玻尔原子模型 - 1922年诺贝尔奖】

➤ 重要的光谱学量 - 兰姆位移



根据狄拉克理论, 光谱中 $2P_{1/2}$ 与 $2S_{1/2}$ 态简并

1947年兰姆发现能级并不简并



兰姆位移

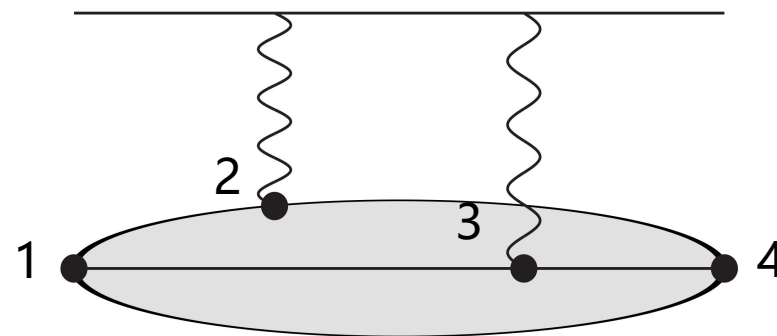


1955

- 兰姆位移的成因可以用量子电动力学解释, 本质是电磁场量子涨落
- 当兰姆位移测量达到高精度, 还可以用于探测量子色动力学效应, 提取核子结构信息, 比如质子的大小

- 2010年：缪氢原子光谱实验，质子的电荷半径与之前全球实验平均值偏差超过 5σ

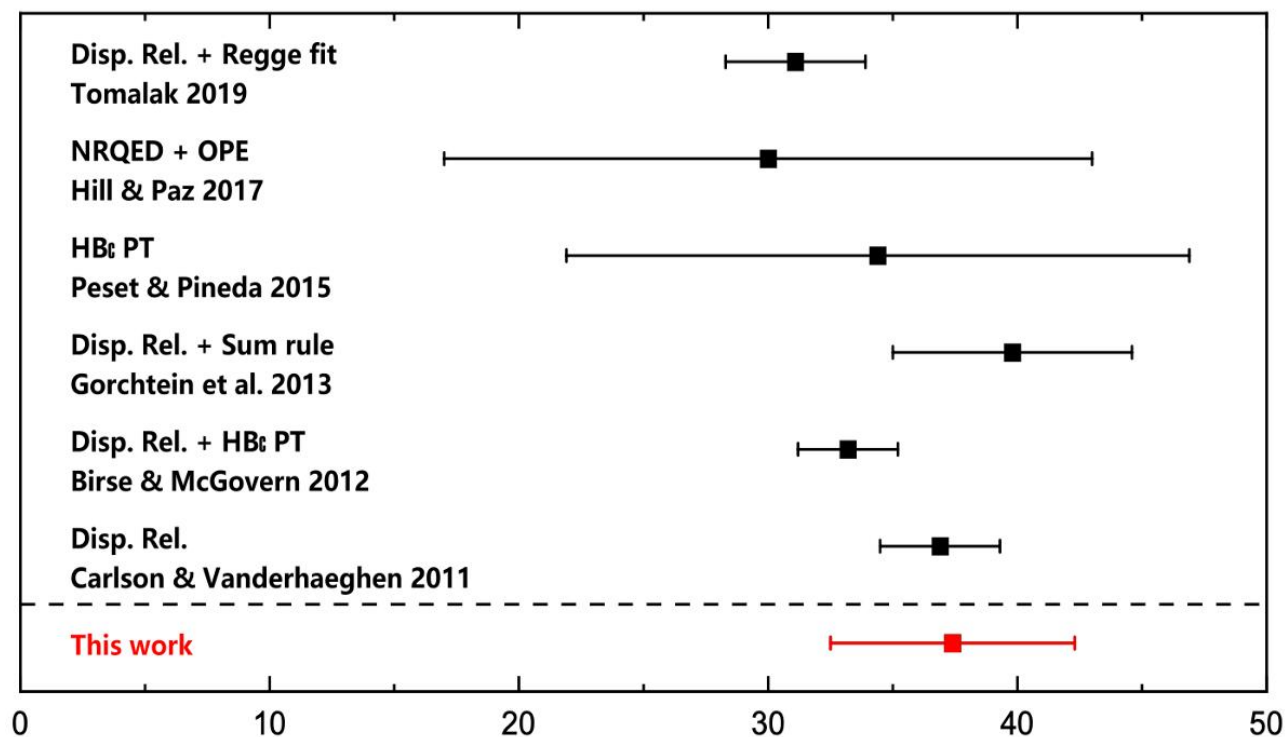
→这就是所谓的“质子大小之谜”



- 缪氢原子光谱提供了最精确的测量值
- 其最主要理论误差来源于双光子交换费曼图

用四点函数计算双光子交换费曼图

➤ 传统的理论计算利用色散关系、实验数据及一定的唯象模型



双光子交换贡献 [μeV]

Y. Fu, XF, L. Jin, C. Lu, PRL 128 (2022) 17, 172002



傅杨
(博士五年级)
→ MIT 博士后

- 格点的计算结果与唯象学的结果一致

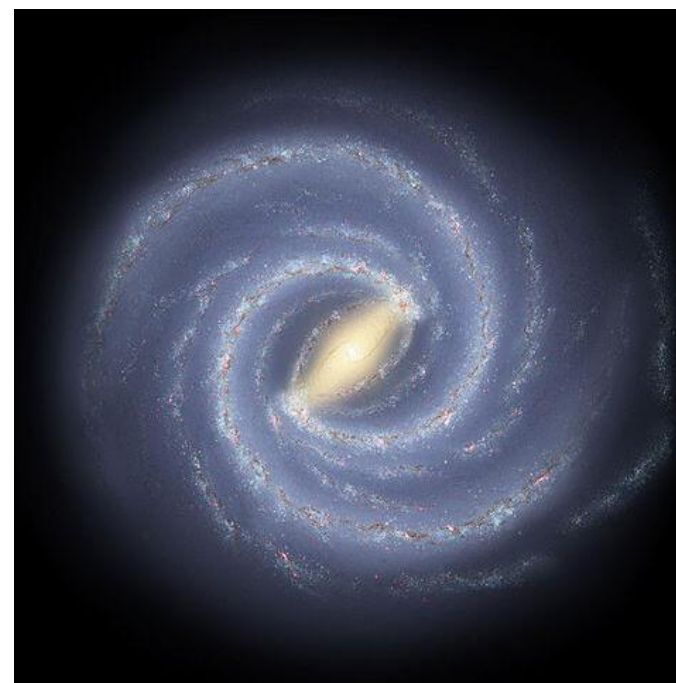
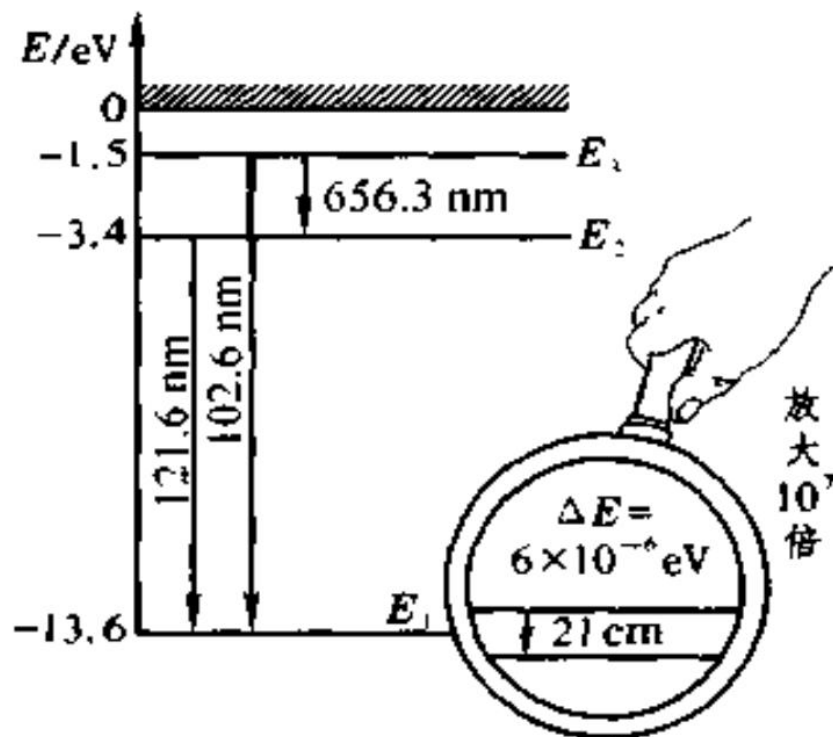
$$\Delta E_{\text{TPE}} = 37.4(4.9) \mu\text{eV}$$

- 未来需要进一步提高统计精度，采用更小的格距等控制各项系统误差

目标：结合未来的缪氢实验，更好地回答“质子究竟有多大”这一基本科学问题

➤ 超精细劈裂与轻子-质子自旋磁矩耦合有关

➤ 氢原子 21 cm 谱线就来源于超精细劈裂



- 1952年, J. Oort 组利用 21 cm 谱线发现银河系旋臂结构
- 极大地推动了射电天文学和宇宙学的发展

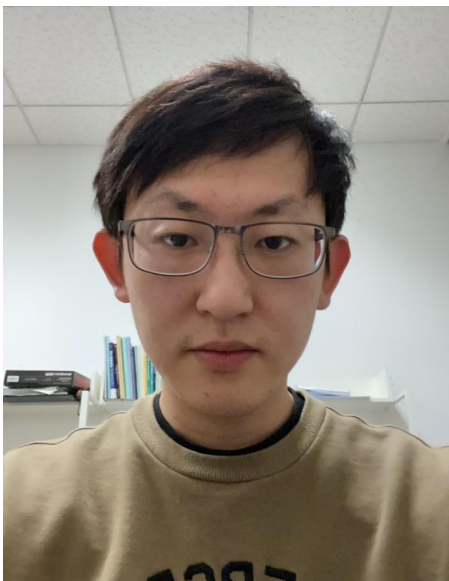
➤ 超精细劈裂的最大理论误差也来源于双光子交换费曼图

➤ 拓展格点QCD研究至原子光谱学

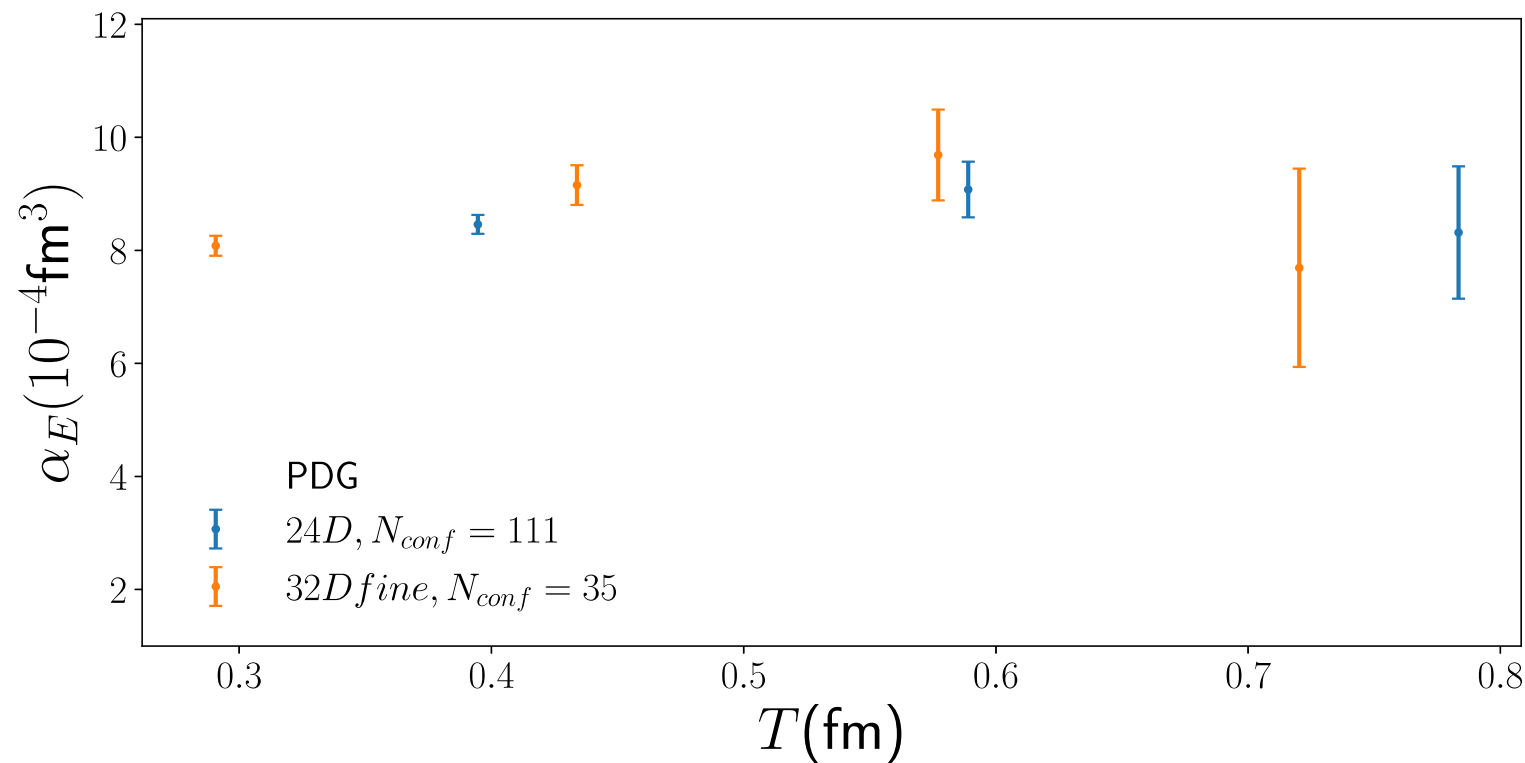


为核子尺度的高能物理学研究和高精度的原子光谱学研究构建跨学科的桥梁

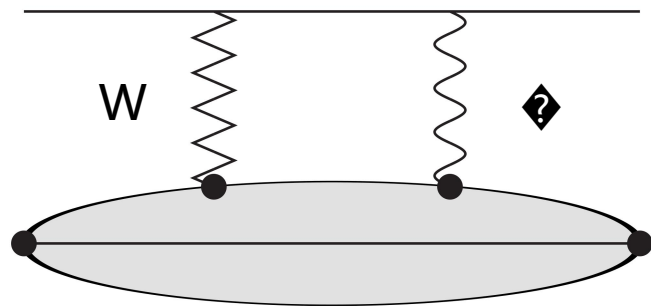
- 核子电磁极化率反映了核子对于外加电磁场所产生的响应
 - 提供了关于核子结构的重要信息
 - 是用来描述核子康普顿散射等过程的关键物理量



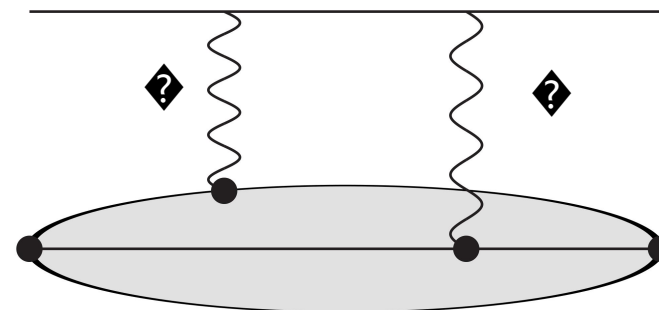
王选贺 (博士四年级)



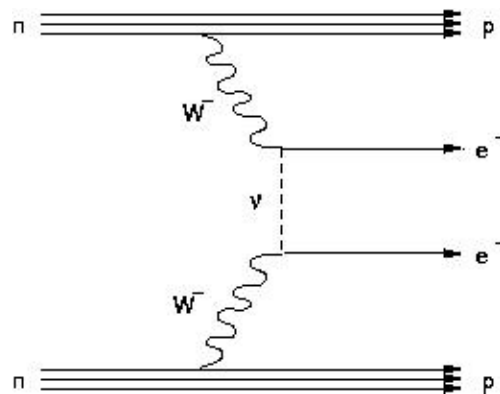
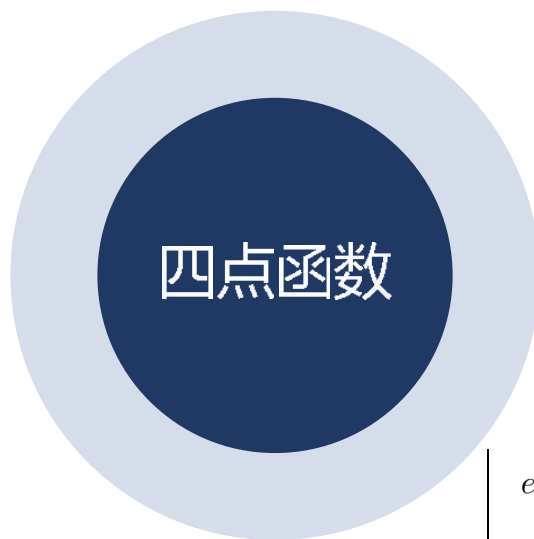
质子电磁极化率的格点计算结果



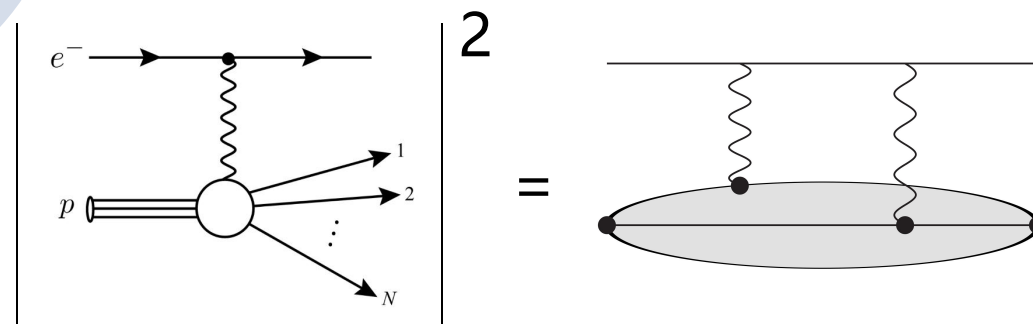
贝塔衰变中的 \diamond W圈图 (1)



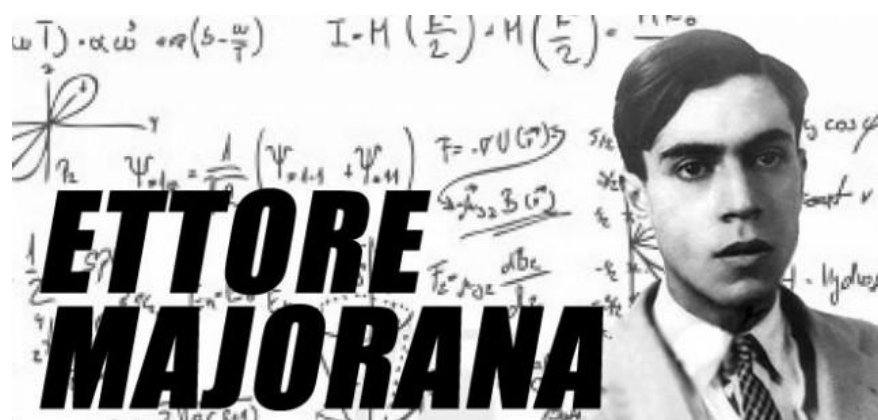
缪氢原子光谱 (2)



无中微子双贝塔衰变 (3)



轻子核子散射 (4)

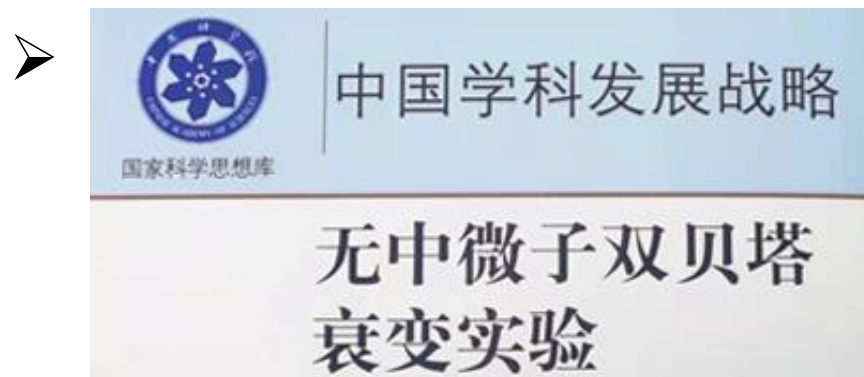


无中微子双贝塔($0\nu 2\beta$)衰变一旦被探测到

——确认马约拉纳粒子的存在
(中性费米子, 粒子=反粒子)

⇒ 带给人类对于自然界的全新认识
给基础粒子物理学带来重大突破

➤ $0\nu 2\beta$ 实验被列为美国2015年《核科学十年规划》新建项目第一位



中国锦屏地下实验室自然条件优越

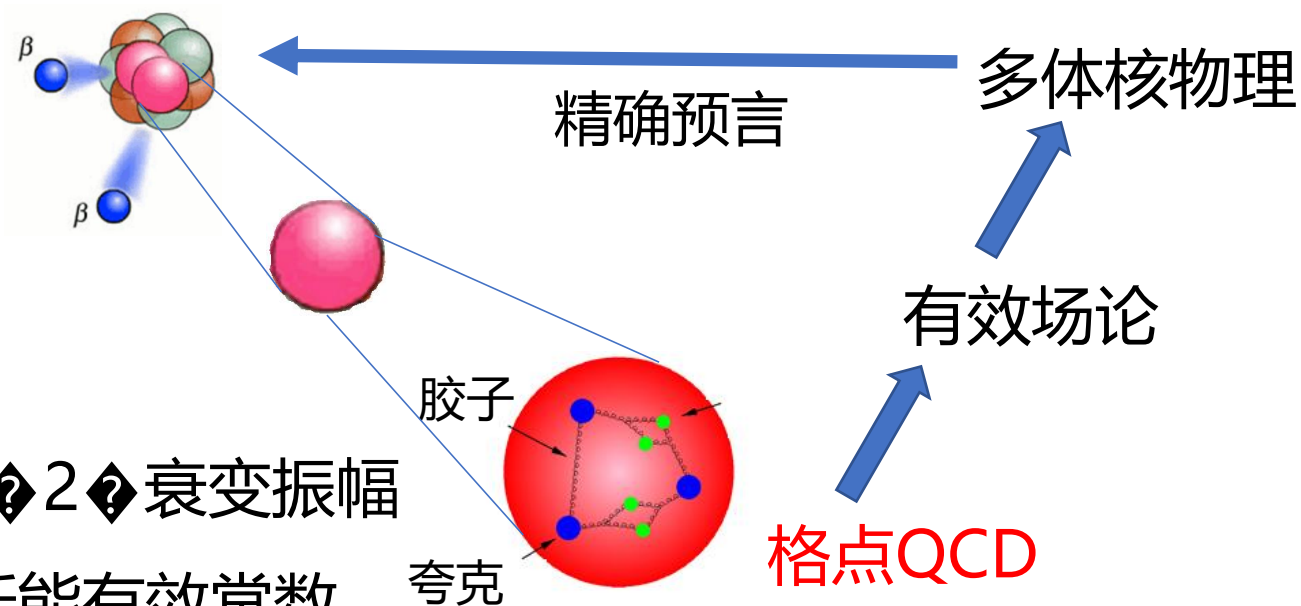


国内多家单位正在积极开展该实验

- 多个理论研究领域交叉
- 目标：建立夸克到核尺度的无缝衔接

- 格点QCD是起点

- 格点计算 π 介子以及双核子系统的 $0^+ \rightarrow 2^+$ 衰变振幅
⇒ 为有效场论提供 $g_v^{\pi\pi}$ g_v^{NN} 等低能有效常数
- 国际上三个格点组同时进行理论计算



北京大学



伯克利实验室



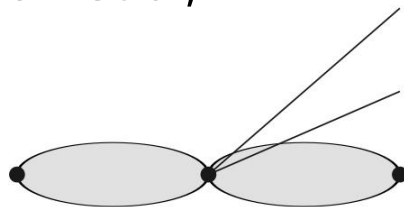
麻省理工学院

率先完成无中微子双贝塔衰变四点函数计算



伯克利实验室

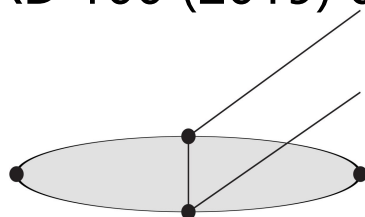
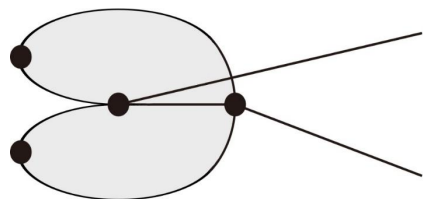
三点函数计算 A. Nicholson et al, PRL 121 (2018) 172501



四点函数计算, 项目开始于2018年初

arXiv:1809.10511, XF, L. Jin, X. Tuo, et.al. PRL 122 (2019) 022001

arXiv:1909.13525, X. Tuo, XF, L. Jin, PRD 100 (2019) 094511



$$\pi^- \pi^- \rightarrow ee \quad g_v^{\pi\pi} = -12.0(3) \quad \pi^- \rightarrow \pi^+ ee \quad g_v^{\pi\pi} = -10.9(3)(7)$$



脱心宇 (博士五年级)
→ BNL 博士后



北京大学

四点函数计算

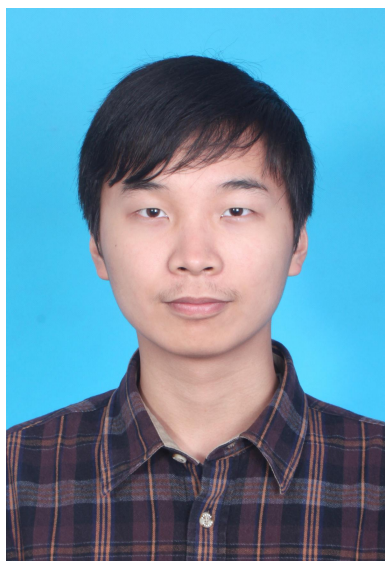
W.Detmold, D. Murphy, arXiv:2004.07404, $g_v^{\pi\pi} = -10.8(1)(5)$

验证了我们前两个工作的结果

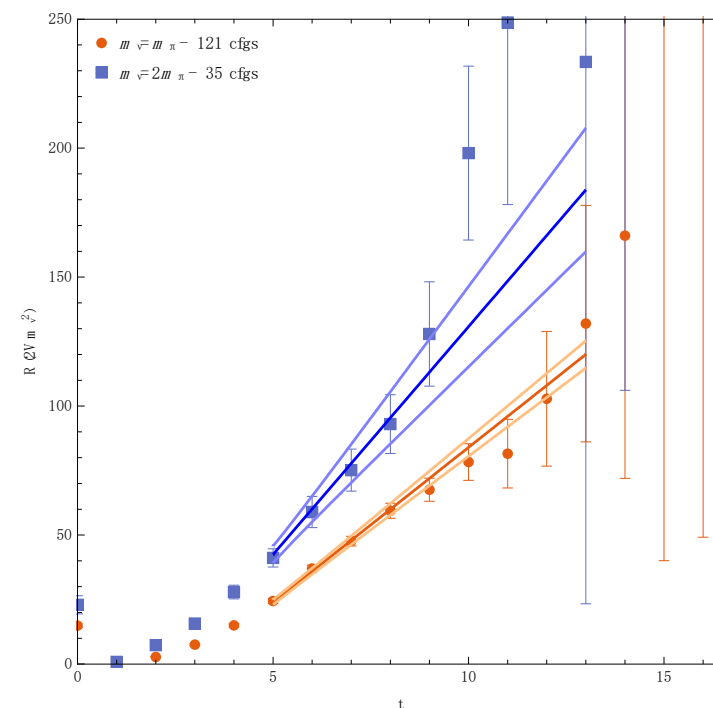
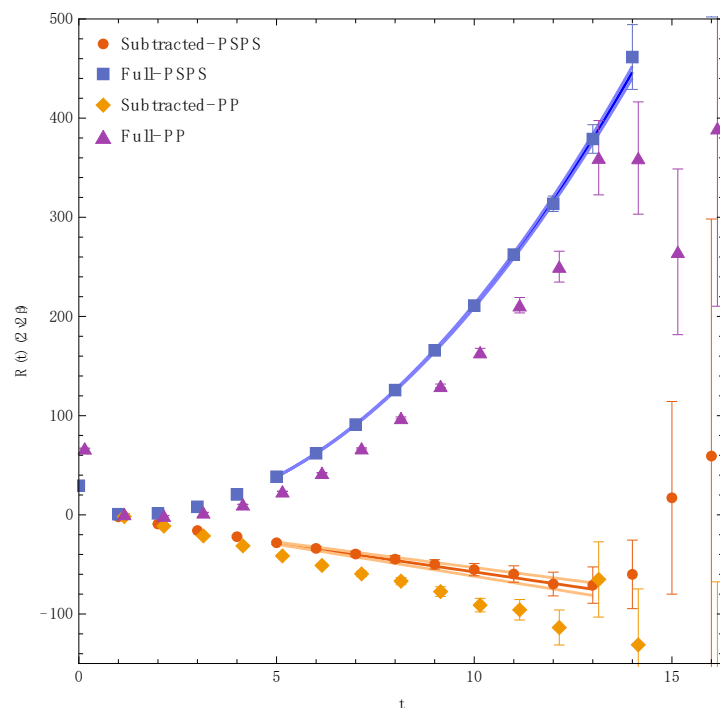


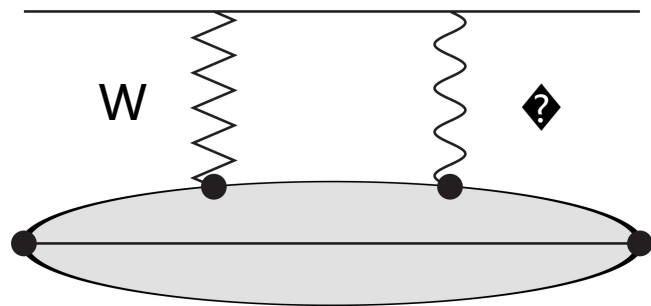
麻省理工学院

双核子系统 $2\nu 2\beta$ 衰变 (左) 和 $0\nu 2\beta$ 衰变 (右) 矩阵元计算

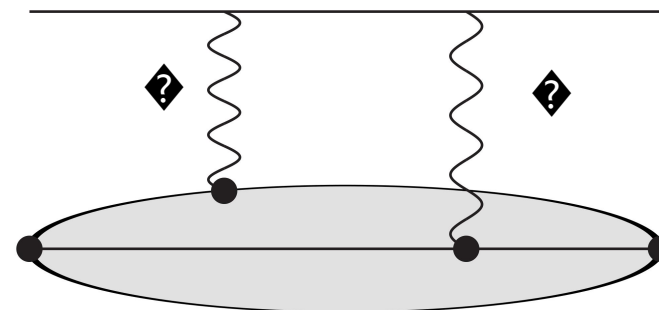


王子毓 (博士四年级)

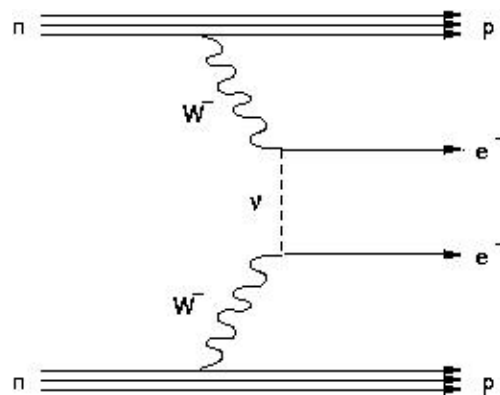
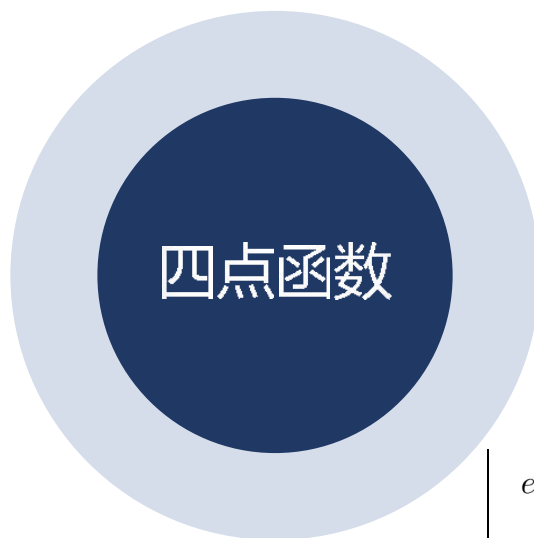




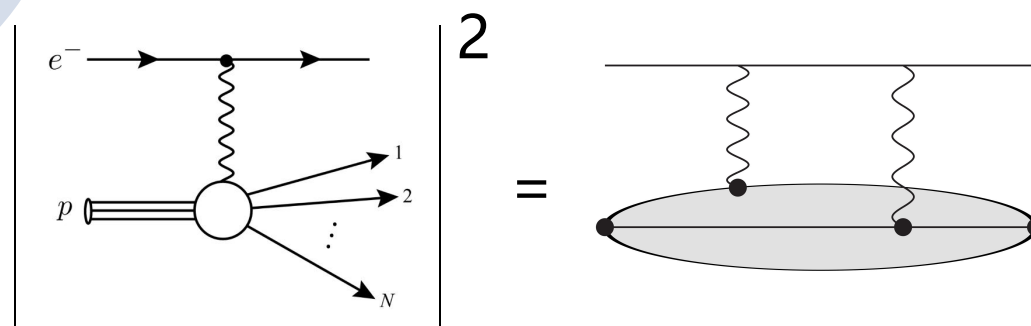
贝塔衰变中的 \diamond W圈图 (1)



缪氢原子光谱 (2)



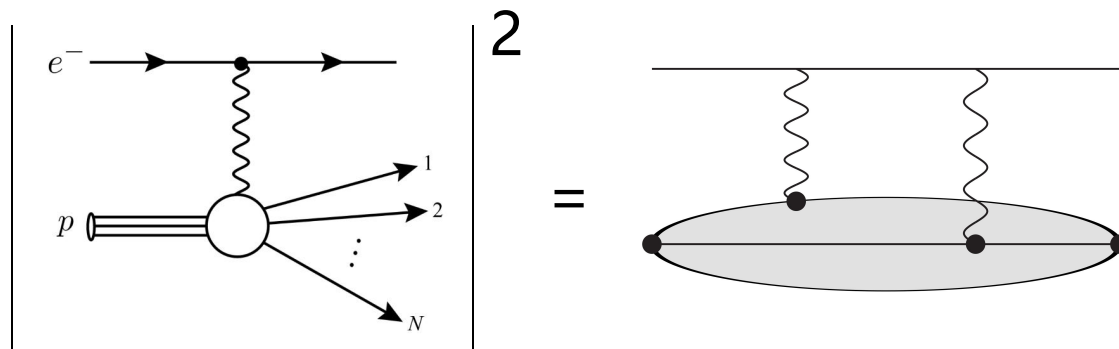
无中微子双贝塔衰变 (3)



轻子核子散射 (4)

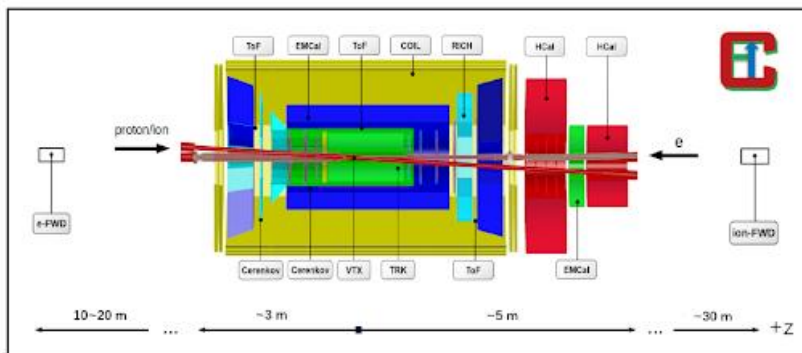
- 格点QCD计算核子四点函数，获取强子张量

从中提取核子电磁极化率、部分子分布函数等核子结构信息

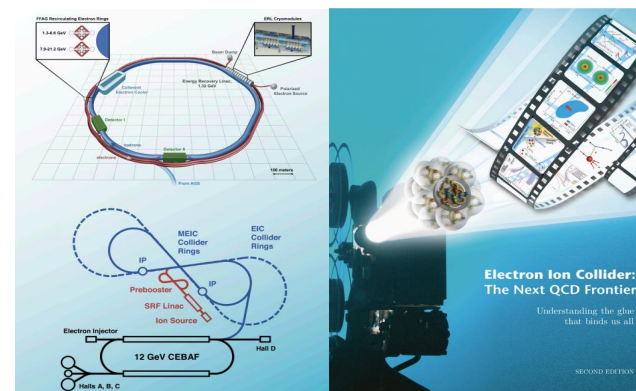


- 计划建设的下一代大科学装置——电子-离子对撞机

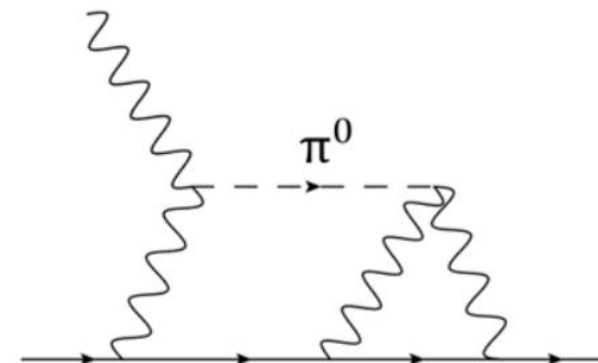
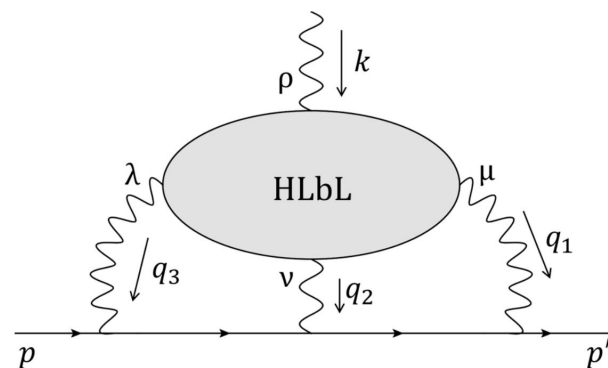
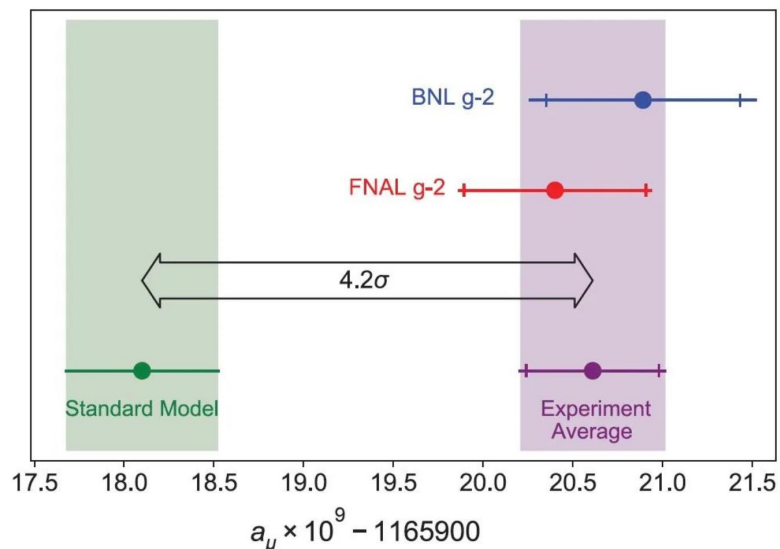
中国EicC



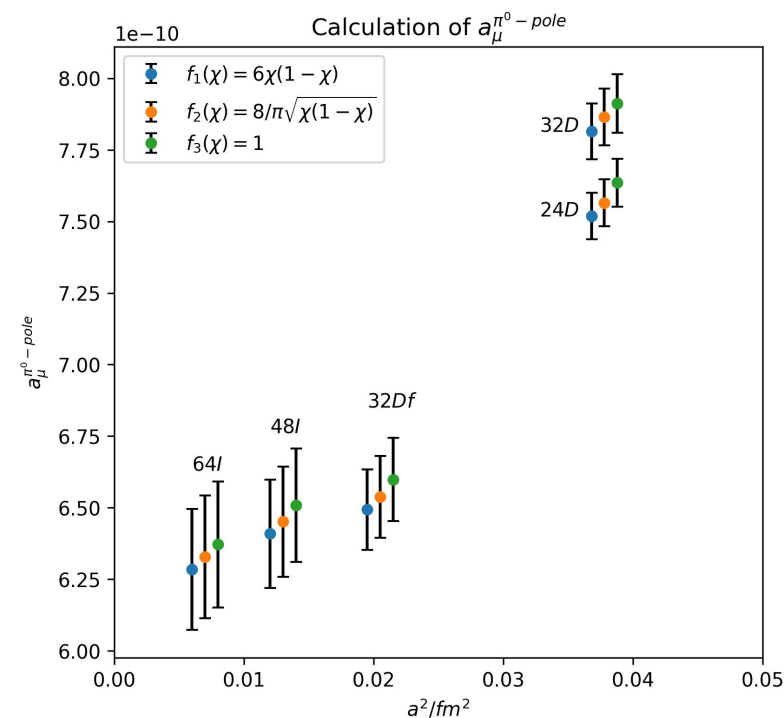
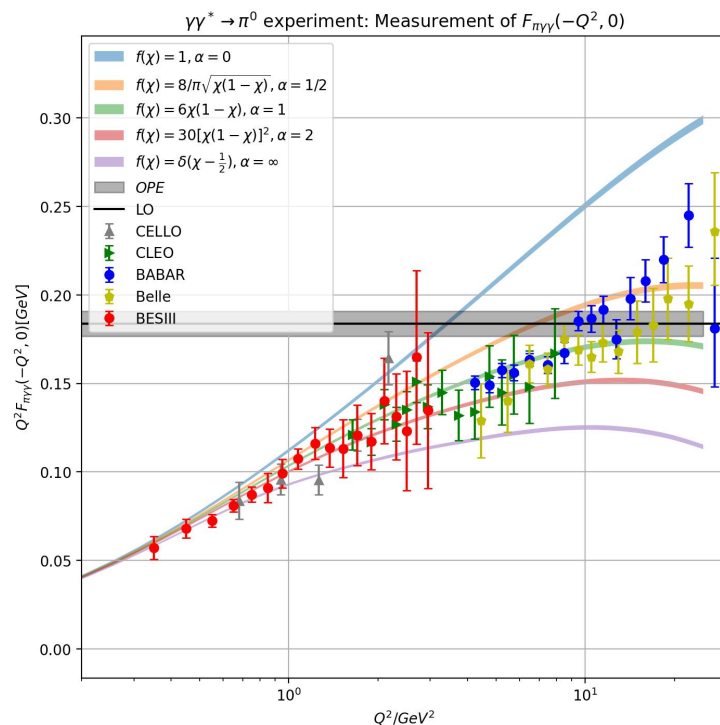
美国EIC



繆子反常磁矩: hadronic light-by-light



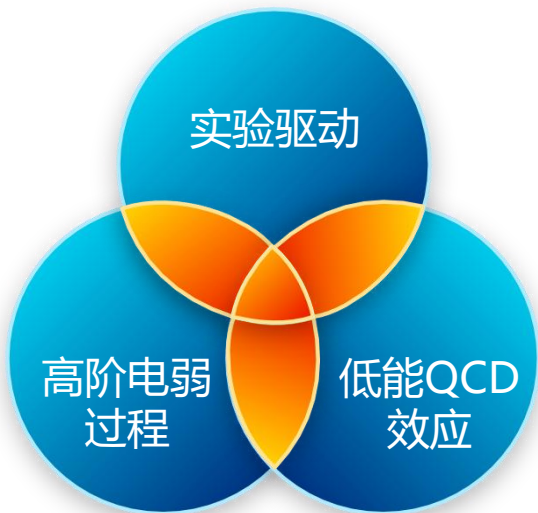
林天 (博士一年级)



➤ 高能物理有众多未解之谜



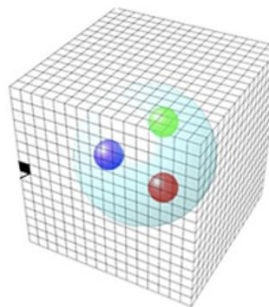
➤ 高精度前沿



➤ 格点 QCD



K. G. Wilson

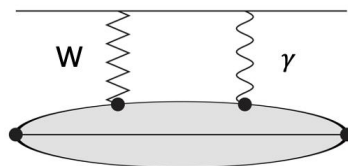


格点QCD

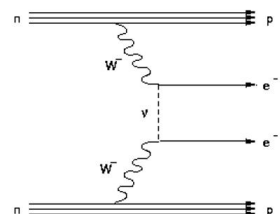


超算实现精确计算

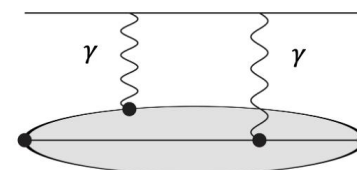
第一性原理 非微扰 精确计算 误差可控



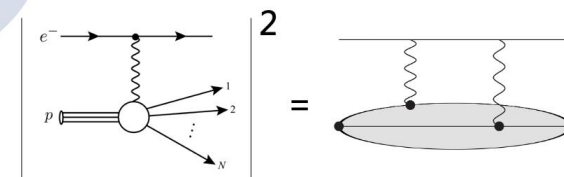
贝塔衰变中的 γW 圈图
(1)



无中微子双贝塔衰变
(3)



缪氢原子光谱
(2)



轻子核子散射
(4)