

布鲁克海文的新($g-2$)实验[■]

冯文荃

(南京大学物理系 南京 210008)

摘 要 布鲁克海文的 E821 是一个新的测量 μ 介子反常磁矩的高精度实验. 要求达到的精度为 0.35 ppm, 比 CERN 的实验精度高 20 倍. 精度的提高将提供对 TeV 质量范围虚粒子的敏感性及为发现标准模型以外新物理打开一个重要的窗口. 同时 E821 的超高精度在技术及物理上提出了不寻常的挑战.

关键词 反常磁矩 超铁储存环 超导偏转器 弹踢器 量能器 增强器

分类号 Q572.33

1 引 言

电子和 μ 介子的 g 或 a 值 [$g=2(1+a)$] 在发展近代量子电动力学(QED)及粒子物理中已经扮演了核心角色. 已确定的电子, a_e 的理论及实验值精度高达 10 ppb. 但是, 对 μ 介子所确定的 a_μ 实验值的精度仅仅为 7 ppm^[1]. 由于 μ 介子的质量 m_μ 比电子的质量 m_e 大得多, 较重的粒子, 如强子或弱矢量玻色子通过虚过程对 a_μ 的贡献比对 a_e 的贡献大得多, 这种对反常磁矩的相对贡献是以 $(m_\mu/m_e)^2=4\times 10^4$ 来标度的.

CERN 的一次实验清楚地确立了存在 μ 介子 g 值的强子辐射修正. E821 实验基本目标之一就是达到一个灵敏度能够建立存在来自单圈 W^\pm 及 Z 的弱辐射修正. 实验的目标精度为 0.35 ppm, 这是根据来自弱辐射修正对 μ 介子反常磁矩的贡献为 1.7 ppm 的预言确定的, 比 CERN 高 20 倍. 这一测量结果将提供对弱电统一理论的重整化约定的清楚试验.

μ 介子反常磁矩已经为新粒子物理理论提供了精确的试验. 因为任何与 μ 介子耦合的新粒子或新场都必定对 a_μ 有贡献, 而贡献的大小是一个粒子与 μ 介子耦合强度及粒子本身质量的定量问题.

为了得到比现有标准模型更深一步且更

少随意性的粒子物理理论, 提出的很多新理论包括了新粒子, 如附加规范玻色子、超对称粒子及受激轻子. 有些理论包括轻子、规范玻色子的结构或夸克. 所有这些对标准模型的修改都将改变 a_μ 的理论值, 这种理论值的改变, 可以通过测量 a_μ 到 0.35 ppm 精度来检验. μ 介子反常 g 值能作为任何新理论的试验标准; 而这样精确的实验是对最高能加速器寻找新粒子的补充.

历史上, 兰姆(Lamb)移动及电子与 μ 介子($g-2$)值在发现与建立近代量子电动力学中已经起到了关键作用. 精确测量氢、 μ 介子素及正电子素的超精细间隔和塞曼(Zeeman)效应已经为量子电动力学的束缚态理论和基本粒子的磁矩值提供了重要的试验. 高能物理实验通过直接产生 W 、 Z^0 及其他粒子来探索基本粒子物理, 这无疑是识别能量所及范围新粒子与新物理的决定性方法.

另一方面在这些高能实验中难以去研究无法由加速器产生的更大质量的粒子的性质. 原则上, 更大更重粒子的存在可以通过它们的虚辐射过程对较轻的被观察粒子的行为来检测. 精密和灵敏实验, 如 μ 介子($g-2$)实验, 将给人们一个重要机会去洞察高能实验现在还不可能进入的领域. 在这个意义上, 低能高精度实验对高能对撞机实验起着辅助作用. 美国 SSC 的下马从一个侧面反映了低

能高精度实验的重要性及可行性。

高精度测量的基本物理量，如 μ 介子的 (g-2) 值(这些物理量精确值可以通过理论计算)可以为近代粒子理论提供重要的校验窗口。这不仅对现代加速器能量范围以外的更高能有价值，而且在现代加速器能量范围内通过这种高精度测量可能揭露出新的及更深层次方面的物理本质。

2 基本原理

在布鲁克海文的新 μ 介子(g-2)实验的原理与 CERN 最近一次实验^[1]相同。图示为它的一般安排的示意图。储存环是由半径为 7.112 m, 30°扇形单块“C”形磁铁组成；磁场是由四个超导线圈激励的。像一切电子与 μ 介子(g-2)实验一样，粒子的自旋进动频率与轨道回旋频率之间的差频是在均匀磁场中测量的，从而确定 a_μ 之值。自旋进动频率、回旋频率及(g-2)频率的基本方程为

$$\omega_s = \frac{eB}{mc\gamma} + \frac{e}{mc}a_\mu B \quad (1)$$

$$\omega_c = \frac{eB}{mc\gamma} \quad (2)$$

$$\omega_a = \omega_s - \omega_c = \frac{e}{mc}a_\mu B \quad (3)$$

极化的 μ 介子将由一电四极场提供的垂直聚焦储存在 μ 介子储存环内。当电磁场均存在时， ω_a 的方程将成为

$$\vec{\omega}_a = \frac{e}{mc}[a_\mu \vec{B} + (a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1})\vec{\beta} \times \vec{E}] \quad (4)$$

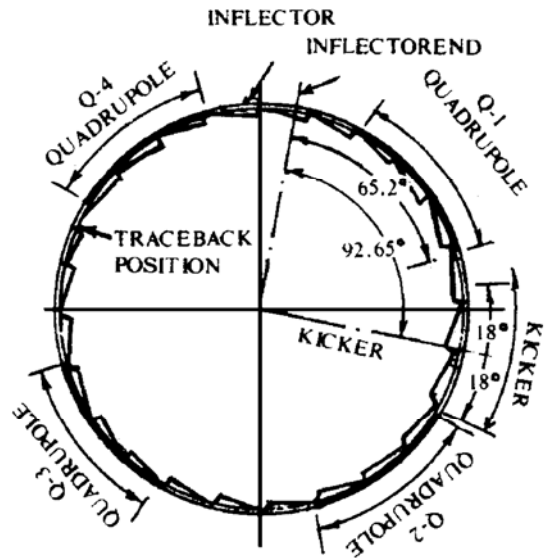
当 $\gamma = 29.3$ 或 $P_\mu = 3.094 \text{ GeV}/c$, $\vec{\beta} \times \vec{E}$ 的系数 $(a - \frac{1}{\gamma^2 - 1})$ 将消失，(4)式将退化为(3)式，这时 ω_a 仅依赖于 \vec{B} ，而与 \vec{E} 无关。

在 π 介子或 μ 介子注入环以后，储存在环中的 μ 介子衰变为电子是时间的函数，利用分布在环内侧的电子量能器进行监测。由于衰变电子的角分布相对于 μ 介子自旋方向

是不对称的，被观察到的时间分布 $N(t)$ 将受 μ 介子(g-2)频率 ω_a 的调制。假如，除衰变外 μ 介子没有其他损失，则有

$$N(t) = N_0 e^{-t/\gamma\tau} [1 - A \cos(\omega_a t + \Phi)] \quad (5)$$

式中， N_0 是归一化常数； $\gamma\tau$ 是 μ 介子的实验室寿命， τ 是 μ 介子在静止系统中的平均寿命； A 是 μ 介子衰变不对称参数，它等于储存的 μ 介子的极化强度(在 E821 实验中好于 95%)与被探测的衰变电子的平均不对称性之积。这种不对称性依赖于电子的实验室能量，对最高能量电子其值最大为 1，当电子能量为 1.2 GeV 时下降为零。



图示 μ 介子储存环示意图

由被观测的电子的分布，可以给出 ω_a 的相对统计误差

$$\frac{\Delta\omega_a}{\omega_a} = \frac{\sqrt{2}}{\omega_a A \gamma \tau \sqrt{N_e}} \quad (6)$$

式中， N_e 是被观测到的电子总数。

为了完成(g-2)实验，将一短脉冲的 μ 介子束注入储存环，然后用紧靠在储存区真空盒外面的探测器记录衰变电子。由于衰变电子能量较低，它们将螺旋形的进入探测器。对于每一个到达的电子，既记录它的能量，又记录到达的时间。假如构成一个电子数对时间的直方图，那么就可观察到指数式 μ 介子寿命，并受频率 ω_a 的调制。

3 新实验的特点与有关参数

在布鲁克海文 AGS 部正在建造的 E821 工程将完成新一代 μ 介子($g-2$)测量. 实验技术是最近一次 CERN 测量技术的精炼与提高, 采用弱聚焦储存环($n=0.135$), 并运行在 $\gamma=29.3$. 为了实现 0.35 ppm 实验精度, 在实验的各个领域都作了根本的改进.

3.1 质子束流强度的极大增加及直接 μ 介子注入

在布鲁克海文, 采用具有增强器(Booster)的交变梯度同步加速器(AGS), 每一束质子将包含达 5×10^{12} 个(约为 CERN 的 200 倍). 12 个射频束能提供达 6×10^{13} 个质子. 次级束线将包括一条 72 m 长的 π 介子衰变道, 这就允许采用 π 介子注入或直接 μ 介子注入储存环. 预计, 若采用 π 介子注入, 每次填充将有 1×10^4 个 μ 介子储存到环中. 若采用直接 μ 介子注入, 每次填充将有 6×10^4 个 μ 介子储存到环中. μ 介子直接注入不仅增加了储存的 μ 介子数, 而且可以消除未衰变 π 介子与储存环材料作用产生的大量强子背景. 因此, 在新实验中, 可以用较短的运行时间, 实现必需的统计精度.

为了实现直接 μ 介子注入, 必须建造一快速弹踢器, 使 μ 介子偏转 10 mrad 进入稳定储存轨道. 但是快速弹踢磁场将会在真空盒中感应出涡流, 涡流剩余场将会叠加到主磁场上, 为了达到 0.35 ppm 的测量精度, 要求涡流剩余场在测量时刻(μ 介子注入后 10 μ s)对于主磁场的影响小于 0.1 ppm. 这给快速弹踢器的设计及制造提出了严格的要求.

3.2 超导偏转器

由 AGS 产生的 π/μ 束通过一超导偏转器引入储存区. 这是个直流非铁合金超导双 $\cos\theta$ 隔膜磁铁. 利用直流可以消除由脉冲装置(如 CERN 所用脉冲同轴装置)带来的瞬态效应, 同时允许调整偏转器避免它的端部场泄漏进入储存区. 对其要求为: (1) 在 1.7m 长范围内产生均匀的二级场; (2) 用静磁调整法

保证它的杂散场低到可接受的程度.

3.3 储存环主磁场的高度均匀性及可控性

为了得到高度均匀及稳定的主磁场, 相当大的努力是去设计与制造储存环磁铁. 磁场是由单块“C”形磁铁提供的. 这种超铁储存环磁铁产生的磁场均匀度在储存区将达到 1 ppm. 为了达到高稳定度, 选用四组 ~ 14 m 直径的超导线圈产生 1.45 T 的磁场. 这样, 磁场的均匀度主要由铁结构决定, 而极化钢是高质量的低碳钢, 较大的磁间隙及磁铁结构的方位角对称性对主磁场均匀性是很重要的. 通过几种有源及无源联合磁场调整, 将使整个磁场在 μ 介子储存区的均匀度达到 1 ppm.

利用超导线圈有利于场的稳定性. 这是因为线圈温度是极稳定的, 而磁铁与线圈的温度是相互隔离的, 而且线圈具有长的时间常数, 来自电源纹波的影响不是麻烦问题.

3.4 磁场测量精度达 0.1 ppm

除掉在真空盒外面设置 360 个固定 NMR 探针外, 还有一装在可移动小车上的 NMR 探针在真空盒内定期地测量整个储存区的磁场图, 这时不用关闭磁铁或去掉真空盒. 此外, 随小车还有 10 个插入式探针作交叉校正, 还有固定绝对校正探针. 所有这一切都是为了确保磁场测量精度达 0.1 ppm.

3.5 增加探测器系统的接收能力

扇形真空盒使电子预簇射减到最少. 24 个探测站被等间隔(~ 1.8 m)放置在环的内侧周围, 这使对($g-2$)频率 ω_a 有最有用信息的高能电子接收能力最大. 每个站的任务是高质量的提供有关衰变电子的到达时间及其能量. 在每一个探测站, 位置灵敏探测器紧靠在电子输出真空窗上, 电子量能器紧挨其后. 电子量能器由灌封在 Pb-Bi 低熔点合金中的闪烁纤维构成, 它的长度约 1 cm, 分辨率 $\sigma = (10-13)\% / \sqrt{E}$. 对探测器的特殊要求将使它能处理高瞬态速率而不产生电荷积累(包括大的起始本底情况)及测量时间间隔精度达 ~ 20 ps.

3.6 储存 μ 介子束的精确监测

决定进动频率 ω_a 的磁场 B 是在储存区内 μ 介子分布区平均所得的磁场, 因此, 实验中清楚地知道 μ 介子的分布是极重要的.

在束注入时束流底宽小于 10 ns, 采用闪烁纤维探测器监测束包络. 随后束逐渐散开, 最后将均匀地散布在环的储存区内. 在束从注入到散开的过程中, 采用耦合电极(由八块 1 m 长的板构成的圆柱形电极)测量 μ 介子的动量分布. 在散束情况下, 由放在一段非标准真空盒内的一组丝室测量衰变电子的轨迹, 由对电子时间谱的富利叶分析得到 μ 介子的动量分布.

由于新实验中质子束流强度的大大提高及采用 μ 介子直接注入, 使所测 ω_a 的预计统计误差可能小于 0.3 ppm, 而 CERN 则达 7.0 ppm. 而 μ 介子储存环磁铁的改进及 NMR 系统使 B 的系统误差约为 0.1 ppm. 由于监测系统及电子学系统的改进, 整个系统的系统误差约为 0.12 ppm. 而 CERN 由于 B 的不定性造成的系统误差就达 1.5 ppm.

新的($g-2$)实验, 除了能精确测量 a_μ 值外, 还将比较 a_{μ^+} 与 a_{μ^-} , 作为对 CPT 不变性的试验. 还将测量高能 μ^+ 及 μ^- 在储存环中的寿命, 以提供对爱因斯坦时间流逝变换因子

的校核. 由于系统误差的改进, 将使寻找 μ 介子的电二极矩(EDM)成为可能.

4 E821 工程目前概况

新的($g-2$)高精度实验是于 1984 年由一批物理学家提出来的. 1988 年开始启动, 估计 1997 年或稍后整个系统开始运行. 总经费估计为 1 500 万美元. 该项目得到美国能源部(DOE)和科学基金会(NSF)的支持, 由不少美国国家实验室及大学参加设计与研制. 还得到日本 KEK、德国汉堡大学和俄罗斯西伯利亚 Budker 核物理学院的支持和参与.

目前, 主磁铁的超导线圈已绕制完成, 并与致冷系统一起安装就位, 储存环磁铁正在建造中; 超导偏转器正在作低温测量; μ 介子注入快弹踢器已完成物理设计及工程设计; 束线、监测与控制系统等都在研制中; 电子探测器及其电子学线路已做成样机, 有的已在生产中; 数据处理系统及慢控制系统正在设计中; 束流动力学计算目前也已成熟.

参 考 文 献

- 1 Bailey J. Nucl Phys, 1979, B150:1
- 2 Design Report, BNL AGS E821, 1994

New Muon ($g-2$) Experiment at Brookhaven

FENG Wenquan

(Physics Department of Nanjing University, Nanjing 210008)

Abstract A new measurement of the muon anomalous magnetic moment (BNL E821) aims to obtain a precision of 0.35 ppm which is 20 times higher than that of CERN measurement. This increase in precision will provide a sensitivity to virtual particles into the TeV mass range and open a substantial window for the discovery of new physics beyond the standard model. Meanwhile the ultrahigh precision aimed for in the BNL experiment gives unusual challenges in physics and in technology.

Key Words anomalous magnetic moment superferric storage ring superconducting inflector kicker calorimeter booster