

τ 衰变中米歇尔(Michel)参数的测量*

白景芝	卞建国	柴正维	陈光培	陈宏芳 ¹	陈江川
陈雅清	陈宇	陈元柏	程宝森	崔象宗	丁慧良
董燎原	杜志珍	冯胜	高翠山	高美丽	高树琦
顾建辉	顾树棣	顾维新	顾以藩	过雅南	韩世温
韩纓	何景棠	何炬	何瑁 ²	胡贵云	胡海明
胡敬亮	胡琼辉	胡涛	胡晓庆	黄俊东	黄因智
姜春华	金艳	柯尊建	赖元芬	郎鹏飞	李灿国
李德	李海波	李金	李佩琴	李如柏	李蔚
李卫东	李卫国	李新华	李小南	刘怀民	刘靖
刘经华	刘荣光	刘延	吕峰	吕军光	鲁建业
卢兰春	罗春晖	马爱民	马恩成	马基茂	毛慧顺
毛泽普	孟祥承	聂晶	漆纳丁	祁向荣	钱诚德 ⁴
邱进发	屈云河	阙友昆	荣刚	邵毓莺	沈本蔚
沈定力	沈红	沈肖雁	盛华义	史焕章	宋晓非
孙舫	孙汉生	唐素秋	童国梁	王锋	王灵淑
王临洲	王曼	王萌	王佩良	王平	王少敏
王泰杰	王运永	魏诚林	吴义根	席德明	夏小米
谢佩佩	谢昱	谢跃红	熊伟军	徐春成	许国发
许明康 ³	许亚娣 ³	薛生田	颜洁	严武光	杨长友
杨春敏	杨杰	杨晓峰	叶铭汉	叶庆好 ⁴	叶树伟 ¹

1997-12-03收稿

* 国家自然科学基金资助;中国科学院重大基础研究项目

联系人:吴义根

叶云秀¹ 易 凯 于传松 喻纯旭 俞国威³ 虞炎华³
 余志堂 郁忠强 苑长征 袁 野 张炳云 张长春
 张达华 张德红 张会领 张 建 张家文 张锦龙
 张良生 张勤俭 张少强 张学尧² 张 羽 张月元
 赵棣新 赵海文 赵京伟 赵 萌 赵维仁 郑建平
 郑林生 郑志鹏 周光谱 周化十 周 莉 朱启明
 祝红国 祝玉灿 朱永生 庄保安

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

2(山东大学物理系 济南 250100)

3(杭州大学物理系 杭州 310028)

4(上海交通大学应用物理系 上海 200030)

摘要 分析北京谱仪(BES)收集的 4.03GeV 质心系能量下 e^+e^- 对撞数据, 选出 $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow e^\pm X^\mp \nu$'s 事例, X^\pm 可以为 $\mu^\pm, \pi^\pm, \rho^\pm$, 拟合 $\tau \rightarrow e\nu$'s 中电子的能谱, 得到 $\tau \rightarrow e\nu$'s 中 Michel 参数为 $\rho_{\tau \rightarrow e} = 0.705^{+0.055+0.027}_{-0.054-0.026}$, 此结果与标准模型的预言相符合.

关键词 北京谱仪 τ 衰变的电子能谱 米歇尔参数 弱顶点特征

1 引言

由 τ 衰变的电子(或 μ 子)能谱形状, 可以确定 Michel 参数 ρ ^[1] 的大小, 而 ρ 的数值又取决于 $\tau \rightarrow \nu_e W$ 的顶点耦合特征. 假如这种耦合是 $V-A$ 型的, ρ 就应当是 0.75, 否则预示着存在其它的耦合形态, 这是与标准模型相违背的. 许多实验组给出了 τ 衰变中 ρ 的测量值^[2], 最精确的结果是 $\rho_{\tau \rightarrow e} = 0.735 \pm 0.036 \pm 0.020$ ^[3]. 不同实验组的测量值之间相差比较大, 其精度也比 μ 衰变中的 $\rho_{\mu \rightarrow e} = 0.7518 \pm 0.0026$ ^[4] 为差.

本文分析在 4.03GeV 质心系能量下, 北京谱仪(BES)收集的 23.0pb^{-1} 积分亮度 e^+e^- 对撞数据, 从中选出 $\tau\tau \rightarrow e\mu, e\pi, e\rho$ 类事例, 得到 $\tau \rightarrow e\nu$'s 中的电子能谱, 拟合此能谱, 给出了 $\rho_{\tau \rightarrow e}$ 的测量结果. 有关北京谱仪的详细情况, 文献 [5] 中已有介绍.

2 事例选择

要想得到 $\tau \rightarrow e\nu$'s 中的电子能谱, 必须首先选出 $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 事例, 其中一个 τ 衰变到

电子, 另一个 τ 衰变为任何末态 (衰变产物简记为 X). 考虑到近 τ 产生阈能区 $\tau\tau$ 事例不能用单举方法选出^[6], 且 BES 对电子和非电子的识别能力较好, 为了减少本底, X 选用 μ 轻子类、 π 介子类和 ρ 介子类 (这三类衰变的分支比占 τ 衰变的一半以上) 等非电子类型的粒子. 这里之所以称之为 μ 轻子“类”等, 是因为在我们的处理过程中 X 为 μ 、 π 、 ρ 以及 K 、 a_1 等的严格区别并不重要, 重要的是 X 应不为电子, μ 、 π 、 ρ 只是作为标识非电子的选择条件, 而不是选择的最终目的. 这样在拟合电子能谱时, $\tau\tau$ 衰变模式中 $e\mu$ 、 $e\pi$ 、 $e\rho$ 以及 eK 、 ea_1 将不会视作互为本底.

下面给出这三类事例共同的选择条件:

(1) 电荷相反的两个带电粒子, 每个带电粒子的动量重建都较好.

(2) 每个带电粒子的动量范围为 $0.1\text{GeV} < p_i < 1.5\text{GeV}$, $i = 1, 2$, 且它们自对撞区的出射极角 θ_i 满足 $|\cos\theta_i| < 0.80$, 以保证有较好的粒子识别能力.

(3) 每个带电粒子都来自对撞区附近, 即顶点 (x, y, z) 满足 $|x| \leq 1.5\text{cm}$, $|y| \leq 1.5\text{cm}$, $|z| \leq 15\text{cm}$, 两个带电粒子间的飞行时间差小于 4ns , 以去除非 e^+e^- 对撞事例.

(4) 两个带电粒子的非共线角 θ_{acol} 和非共面角 θ_{acop} 满足 $5^\circ < \theta_{\text{acol}} < 175^\circ$, $\theta_{\text{acop}} > 5^\circ$, 以去除辐射 Bhabha 和双 μ 事例.

(5) 两个带电粒子中有一个被识别为电子, 另一个被识别为 μ 轻子或 π 介子. 粒子识别方法是: 利用 BES 中主漂移室 (MDC) 给出的 $\frac{dE}{dx}$ 信息, 飞行时间计数器 (TOF) 给出的飞行速度 β 以及桶部簇射计数器 (BSC) 给出的能量沉积 E 与 MDC 提供的动量 p 之比 $\frac{E}{p}$, 可以组合成函数 $SP = A_1 \frac{dE}{dx} + A_2\beta + A_3 \frac{E}{p}$, A_1 、 A_2 、 A_3 分别是与动量 p 有关的系数, 不同的动量区间它们均不相同. 由 SP 可以区分 e 、 π (或 μ), 再由 μ 计数器提供的击中层数可以区分 π 和 μ .

$e\mu$ 、 $e\pi$ 事例的选择条件还有: (1) 横动量与丢失动量之比 $P_{\text{TES}} = (p_1 + p_2)_{xy} / (E_{\text{cm}} - |p_1| - |p_2|) > 0.1$, 以去除双光子事例. (2) 孤立光子数为零. (3) 标识为 π 的带电粒子的动量满足 $0.52\text{GeV} < p_\pi < 1.4\text{GeV}$, 以尽可能减少由于 e/π 误判带来的 Bhabha 本底的影响. $e\rho$ 事例的选择条件还有: (1) 能重建出一个 π^0 . (2) 有一个带电粒子被识别为 π^\pm 介子, 且与 π^0 作 ρ^\pm 不变质量拟合, 其 $\chi_p^2 < 20$. 孤立光子和 π^0 的重建条件见文献 [6] 中的定义.

经过上述挑选, 从 23.0pb^{-1} 积分亮度 4.03GeV 能区 e^+e^- 对撞数据中共获得 $\tau\tau \rightarrow e\mu$ 事例 975 个, $\tau\tau \rightarrow e\pi$ 事例 1717 个, $\tau\tau \rightarrow e\rho$ 事例 743 个. 利用 Koralb、Lund 和其它产生子对 $\tau\tau$ 除 $e\mu$ 、 $e\pi$ 、 $e\rho$ 以及 eK 、 ea_1 以外其它末态产生的本底、辐射 Bhabha、双 μ 、强子 (含粲) 和双光子本底作模拟研究, 得到对应于 23.0pb^{-1} 积分亮度下 $e\mu$ 、 $e\pi$ 、 $e\rho$ 道的本底数分别为 64、209 和 94 个.

3 Michel 参数的拟合

忽略辐射修正, 实验室参照系中, τ 轻子衰变的电子 (或 μ 子) 能谱理论公式为^[7]:

$$\frac{d\Gamma}{dx} = \begin{cases} \frac{2}{\beta} \left\{ 1 - \frac{4x^2}{(1+\beta)^3} (3+3\beta-4x) - \frac{2}{9} \rho \left[1 - \frac{4x^2}{(1+\beta)^3} (9+9\beta-16x) \right] \right\}, & \frac{1-\beta}{2} \leq x \leq \frac{1+\beta}{2}; \\ \frac{32x^2}{(1-\beta^2)^3} \left[(3-2\rho)(1-\beta^2) + 2x \left(1 + \frac{\beta^2}{3} \right) \left(\frac{8}{3} \rho - 3 \right) \right], & 0 \leq x \leq \frac{1-\beta}{2}, \end{cases} \quad (1)$$

式中 $x = E_e / E_\tau$ 为归一化的电子(或 μ 子)能量, E_τ 为 τ 的能量, $\beta = \sqrt{1 - m_\tau^2 / E_\tau^2}$ 为 τ 的速度, ρ 是 Michel 参数. 简记(1)式为

$$\frac{d\Gamma}{dx} = g_1(x) + \frac{4}{3} \rho g_2(x), \quad (2)$$

式中 $g_1(x)$ 和 $g_2(x)$ 仅是 x 的函数, 与 ρ 无关.

考虑辐射修正, $g_1(x)$ 和 $g_2(x)$ 将发生变化, 由于 ρ 只反映弱顶点特征, 辐射修正不会影响 ρ 的理论值, 所以辐射修正后的电子能谱公式的形式仍将符合公式(2). 取 $\rho = 0$ 和 $3/4$

两种情况(分别对应于 $V+A$ 和 $V-A$ 耦合), 由公式(2)可以得到 $g_1(x) = \frac{d\Gamma_+}{dx}$, $g_2(x) = \left(\frac{d\Gamma_-}{dx} - \frac{d\Gamma_+}{dx} \right)$, $\frac{d\Gamma_+}{dx}$, $\frac{d\Gamma_-}{dx}$ 分别对应于 $V+A$ 和 $V-A$ 耦合时电子能谱理论公式, 因而(2)式可变为

$$\frac{d\Gamma}{dx} = \frac{d\Gamma_+}{dx} + \frac{4}{3} \rho \left(\frac{d\Gamma_-}{dx} - \frac{d\Gamma_+}{dx} \right). \quad (3)$$

由于辐射修正后的电子能谱公式的精确解析式比较复杂, 本文借助于用数值模拟方法作辐射修正处理的程序 Koralb 来给出其数值表达式, 其方法是: 将 x 在区间 (x_{\min}, x_{\max}) 中分成 M 段, 每一段的长度 $\Delta = (x_{\max} - x_{\min}) / M$, x_{\min} 最小可为 0, x_{\max} 最大只能是 $\frac{1+\beta}{2}$, 则落在第 i 段内的计数为:

$$N'_i = \int_{x_i - \Delta/2}^{x_i + \Delta/2} \frac{d\Gamma}{dx} dx = N_i^+ + \frac{4}{3} \rho (N_i^- - N_i^+), \quad (4)$$

式中 $N_i^+ = \int_{x_i - \Delta/2}^{x_i + \Delta/2} \frac{d\Gamma_+}{dx} dx$, $N_i^- = \int_{x_i - \Delta/2}^{x_i + \Delta/2} \frac{d\Gamma_-}{dx} dx$ 分别是由 Koralb 得到的 $V+A$, $V-A$ 耦合时落在第 i 段中的计数.

设 N_i 为实验测得的电子能谱中 x 在第 i 段中的计数, 则 N_i 的理论预期值应为:

$$N_i = \mathcal{L} \mathcal{E}_\alpha \{ A \mathcal{E}_i N'_i + n_{bi} \}$$

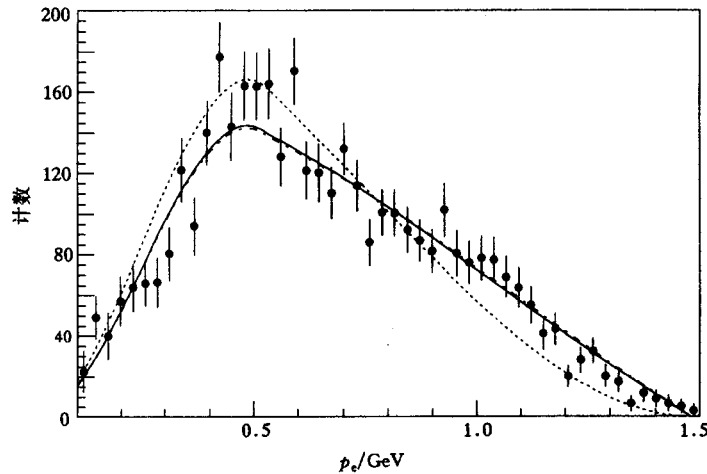
$$= \mathcal{L} \varepsilon_{\text{tr}} \left\{ A \varepsilon_i N_i^+ + \frac{4}{3} \rho (N_i^- - N_i^+) + n_{\text{bi}} \right\}, \quad (5)$$

式中 \mathcal{L} 是实验的积分亮度, 其值为 $23.0 \pm 0.9 \text{pb}^{-1}$; ε_{tr} 为触发效率和过滤效率的乘积, 估计为 $(99.0 \pm 1.0)\%$; ε_i 是 x 在第 i 段 Monte Carlo 电子样本与实际数据电子样本^[8]所得的电子选择效率之比; A 是归一化常数(待求); N_i^- 和 N_i^+ 分别是经过选择后所得的 Koralb 产生的 $V-A$ 、 $V+A$ 耦合 $\tau\tau$ 事例中电子能谱在第 i 段的计数; n_{bi} 是 Monte Carlo 计算得到的对应于 1.0pb^{-1} 积分亮度下第 i 段的本底事例数; ρ 是待求的 Michel 参数.

采用最大似然法拟合(5)式中 A 、 ρ , 所取 $x_{\text{min}} = 0.1 / 2.015$, $x_{\text{max}} = 1.5 / 2.015$, $M = 50$, 得到对应于 $e\mu$ 类、 $e\pi$ 类、 $e\rho$ 类以及 eX 类四组不同数据的 Michel 参数见表 1, 表中所列的误差仅是统计误差. 扣除本底后的实验数据电子能谱和 $V-A$ 、 $V+A$ 以及拟合出的 ρ

表 1 Michel 参数的拟合值

测量道	Michel 参数 $\rho_{\tau \rightarrow e}$ 的拟合值
$\tau\tau \rightarrow e\mu\nu/s$	$0.740^{+0.115}_{-0.109}$
$\tau\tau \rightarrow e\pi\nu/s$	$0.646^{+0.077}_{-0.076}$
$\tau\tau \rightarrow e\rho\nu/s$	$0.836^{+0.113}_{-0.112}$
$\tau\tau \rightarrow eX\nu/s$	$0.705^{+0.055}_{-0.054}$

图 1 $\tau \rightarrow e\nu/s$ 中电子能谱

● 实验数据(已扣本底); — 本文拟合能谱; - - - $V-A$ 理论能谱; ····· $V+A$ 理论能谱.

所对应的理论能谱见图 1, 图中显示出实验数据及其拟合出的能谱与 $V-A$ 预期值一致, 而与 $V+A$ 能谱明显不符.

4 误差分析和讨论

表 2 列出了系统误差的主要来源以及它们对系统误差的贡献. 从表中可以看出系统

误差主要来自电子选择效率和本底的影响,亮度的影响非常小,这是因为 Michel 参数只与能谱形状有关,而与能谱的绝对幅度关系不大.图 2 是实际数据与 Monte Carlo 数据 Bhabha 事例样本所得电子选择效率的比较,效率与动量有一定的依赖关系,它们对各道的

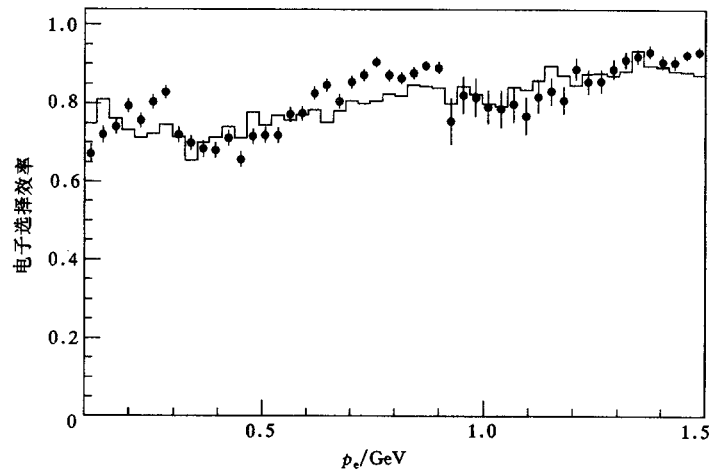


图 2 电子的选择效率

● 实验数据; — Monte Carlo 模拟.

表 2 系统误差的来源及贡献

来源	测量道			
	$e\mu$	$e\pi$	$e\rho$	eX
$\mathcal{L} \epsilon_d$	± 0.0035	+0.0051 -0.0050	± 0.0108	+0.0058 -0.0048
电子选择效率	+0.0243 -0.0219	+0.0176 -0.0174	+0.0196 -0.0192	+0.0187 -0.0183
本底	+0.0311 -0.0276	+0.0255 -0.0253	+0.0393 -0.0397	+0.0191 -0.0185
总计	+0.040 -0.035	± 0.031	± 0.045	+0.027 -0.026

系统误差的影响差不多.本底的影响对 $e\mu$ 、 $e\pi$ 、 $e\rho$ 道相对较大,对 eX 道较小.总的系统误差与统计误差相比要小得多,减小 Michel 参数的测量误差有待于统计量的增加.

结合表 1、表 2,可以得到 Michel 参数的测量值为 $\rho_{\tau \rightarrow e} = 0.705^{+0.055+0.027}_{-0.054-0.026}$,与 V-A 理论较好符合. $e\mu$ 、 $e\pi$ 、 $e\rho$ 道以及 eX 道所得 $\rho_{\tau \rightarrow e}$ 拟合值在误差范围内相符合,反映了本文所用方法的无偏性.

感谢 BEPC 运行组的精心运行,高能所计算中心的大力支持,感谢陈国明博士的有益讨论.

参 考 文 献

- [1] Michel L. Proc. Phys. Soc., 1950, A63:514
 [2] PDG. Review of Partical Properties, Phys. Rev., 1996, D54:272

- [3] Albrecht H et al. Phys. Lett., 1995, **B341**:441
 [4] Derenzo et al. Phys. Rev., 1969, **181**:1854
 [5] BES Coll. Nucl. Instr. & Meth., 1994, **A344**:319
 [6] BES Coll. High Energy Phys. and Nuclear Phys. (in Chinese), 1997, **21**:193
 (BES 合作组. 高能物理与核物理, 1997, **21**:193)
 [7] Ali A, Aydin Z Z. Nuovo Cimento, 1978, **A43**:270
 [8] Ye Suwei et al. High Energy Phys. and Nuclear Phys. (in Chinese), 1994, **18**:577
 (叶树伟等. 高能物理与核物理, 1994, **18**:577)

Measurement of Michel Parameter in τ Decay *

Bai Jingzhi Bian Jianguo Chai Zhengwei Chen Guangpei Chen Hongfang¹
 Chen Jiangchuan Chen Yaqing Chen Yu Chen Yuanbo Cheng Baosen
 Cui Xiangzong Ding Huiliang Dong Liaoyuan Du Zhizhen Feng Sheng
 Gao Cuishan Gao Meili Gao Shuqi Gu Jianhui Gu Shudi Gu Weixing
 Gu Yifan Guo Yanan Han Shiwen Han Ying He Jingtang He Ju
 He Mao² Hu Guiyun Hu Haiming Hu Jingliang Hu Qionghui Hu Tao
 Hu Xiaoqing Huang Jundong Huang Yinzhi Jiang Chunhua Jin Yan
 Ke Zunjian Lai Yuanfen Lang Pengfei Li Canguo Li De Li Haibo Li Jin
 Li Peiqin Li Rubo Li Wei Li Weidong Li Weiguo Li Xinhua Li Xiaonan
 Liu Huaimin Liu Jing Liu Jinghua Liu Rongguang Liu Yan Lu Feng
 Lu Junguang Lu Jianye Lu Lanchun Luo Chunhui Ma Aimin Ma Encheng
 Ma Jimao Mao Huishun Mao Zepu Meng Xiangcheng Nie Jing Qi Nading
 Qi Xiangrong Qian Chengde⁴ Qiu Jinfan Qu Yunhe Que Youkun Rong Gang
 Shao Yuying Shen Benwei Shen Dingli Shen Hong Shen Xiaoyan
 Sheng Huayi Shi Huanzhang Song Xiaofei Sun Fang Sun Hansheng
 Tang Suqiu Tong Guoliang Wang Feng Wang Linshu Wang Linzhou
 Wang Man Wang Meng Wang Peiliang Wang Ping Wang Shaomin
 Wang Taijie Wang Yunyong Wei Chenglin Wu Yigen Xi Deming
 Xia Xiaomi Xie Peipei Xie Yu Xie Yuehong Xiong Weijun Xu Chuncheng
 Xu Guofa Xu Mingkang³ Xu Yadi³ Xue Shengtian Yan Jie Yan Wuguang
 Yang Changyou Yang Chunmin Yang Jie Yang Xiaofeng Ye Minghan
 Ye Qinghao⁴ Ye Shuwei¹ Ye Yunxiu¹ Yi Kai Yu Chuansong Yu Chunxu
 Yu Guowei³ Yu Yanhua³ Yu Zhitang Yu Zhongqiang Yuan Changzheng
 Yuan Ye Zhang Bingyun Zhang Changchun Zhang Dahua Zhang Dehong

Received 3 December 1997

* Supported by the National Nature Science Foundation of China and the Chinese Academy of Science
 Corresponding author: Wu Yigen

Zhang Huiling Zhang Jian Zhang Jiawen Zhang Jinglong Zhang Liangsheng
Zhang Qinjian Zhang Shaoqiang Zhang Xueyao² Zhang Yu Zhang Yueyuan
Zhao Dixin Zhao Haiwen Zhao Jingwei Zhao Meng Zhao Weiren
Zheng Jianping Zheng Linsheng Zheng Zhipeng Zhou Guangpu
Zhou Huashi Zhou Li Zhu Qiming Zhu Hongguo Zhu Yucan
Zhu Yongsheng Zhuang Baoan

(*Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039*)

1(*Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

2(*Department of Physics, Shandong University, Jinan 2510100*)

3(*Department of Physics, Hangzhou University, Hangzhou 310028*)

4(*Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030*)

Abstract We have analysed the e^+e^- collision data collected with Beijing Spectrometer at the center-of-mass energy 4.03 GeV and selected $e^+e^- \rightarrow \tau^\pm \tau^\mp \rightarrow e^\pm X^\mp \nu'$ events, X^\pm required as μ^\pm , π^\pm and ρ^\pm . From fitting electron energy spectrum in $\tau \rightarrow e\nu'$ decay, the measurement value of Michel parameter is given as $\rho_{\tau \rightarrow e} = 0.705^{+0.055+0.027}_{-0.054-0.026}$, this result is in good agreement with the prediction of standard Model.

Key words Beijing Spectrometer, electron energy spectrum in τ decay, Michel parameter, nature of weak vertex