



2023年校园宇宙线观测暑期学校

探索宇宙 从宇宙线观测开始

8月24-27日 成都

主办单位

校园宇宙线观测联盟

承办单位

《现代物理知识》编辑部 西南交通大学物理科学与技术学院

支持单位



国科大关心下一代工作委员会



中国科学院大学教育基金会
University of Chinese Academy of Sciences Education Foundation



国家高能物理科学数据中心
National HEP Data Center

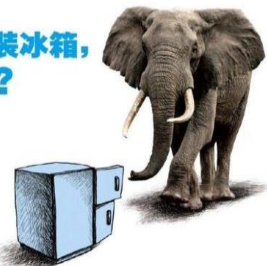
粒子也有寿命---缪子寿命测量

校园宇宙线暑期学校
高能物理研究所
刘佳



如何确定粒子ID

要把大象装冰箱，
需要几步？



→ *Dog*



→ *Cat*

外观：眼睛，耳朵，尾巴
叫声：汪，喵
习性：依赖人的程度
...

逻辑化

粒子也有他们的属性：

粒子的种类

- 玻色子
- 费米子

粒子的属性

- 质量
- 电荷
- 自旋
- 能量
- 动量
- 寿命

种类	名称	符号	静止质量 (MeV)	平均寿命
轻子	电子 / 正电子	e^- / e^+	0.511	$> 4.6 \times 10^{26}$ 年
	μ子 / 反μ子	μ^- / μ^+	105.6	2.2×10^{-6} 秒
	τ子 / 反τ子	τ^- / τ^+	1777	2.9×10^{-13} 秒
介子	中性π介子	π^0	135	8.4×10^{-17} 秒
	带电π介子	$\pi^\pm$		2.6×10^{-8} 秒
重子	质子 / 反质子	p^+ / p^-	938.3	$> 10^{29}$ 年
	中子 / 反中子	$n / \bar{n}$	939.6	885.7 秒
玻色子	W玻色子	W^+ / W^-	80,400	10^{-25} 秒
	Z玻色子	Z^0	91,000	10^{-25} 秒

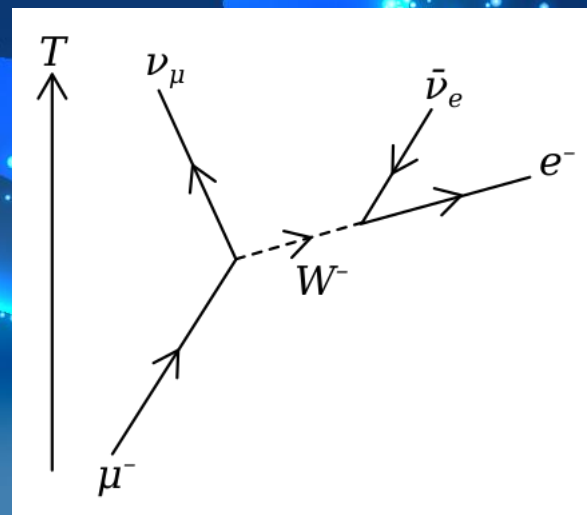
人类是很懒惰和偷懒的，怎么来，怎么便宜怎么来！！！！怎么简单，

μ子

- 1936年在宇宙线中发现，也是μ子唯一的天然来源
- 带有一个电荷，在同样速度时，偏转半径比电子大的多，但比质子小的多，被误认为是汤川理论预言的介子
- 真正强子π介子在1947年被发现
- μ子可以发生衰变，平均寿命约2.2微秒

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$





汤川秀树
获1949年
NOBEL奖

1947年 π 介子的发现

□1934年，汤川秀树猜测核子（质子，中子）间的相互作用通过“场”（如电磁场）来传递，并预言了“场”粒子质量在电子和质子之间。

□In 1947, Cecil Powell announced the discovery of a particle called the π -meson or pion (π) for short.



Cecil Powell
1903-1969
1950 Nobel
Prize winner

Pion (π)
comes to rest
here, and then
decays:

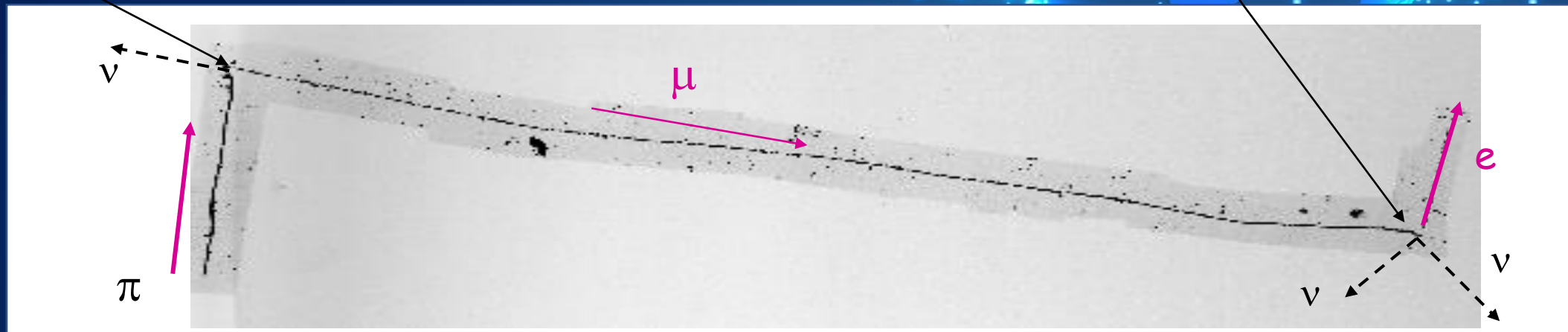
$$\pi \rightarrow \mu + \nu$$

A neutrino is also
produced but escapes
detection.

Muon (μ)
comes to rest
here, and then
decays:

$$\mu \rightarrow e + \nu + \nu$$

Two more neutrinos
are also produced but
also escape
undetected.



粒子寿命

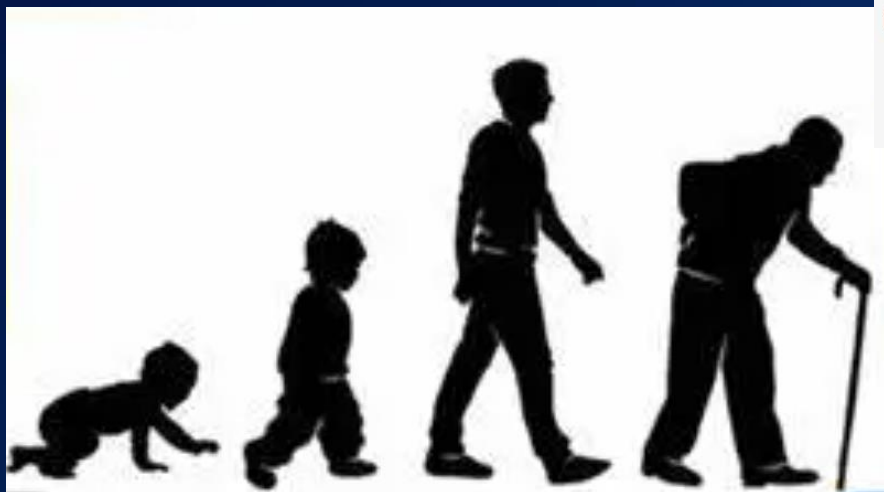
在粒子静止时，（高速运动会导致粒子寿命的相对论延长），大量相同粒子的平均寿命。

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

粒子寿命

从已知到未知

宏观世界

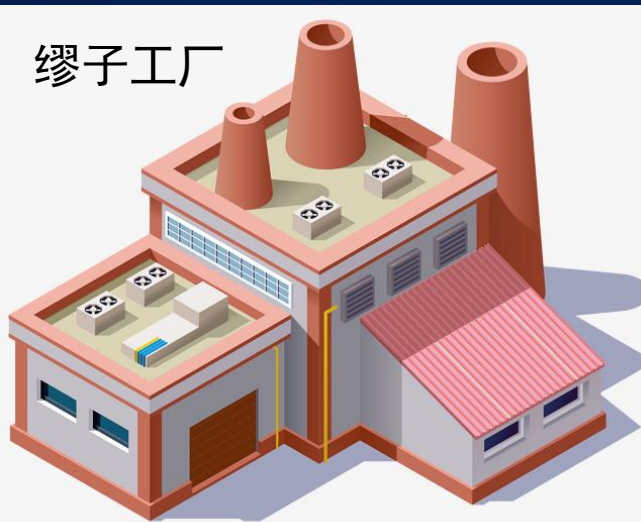


T1

T2

$$\Delta T = T2 - T1$$

人的寿命：从生到死



微观世界

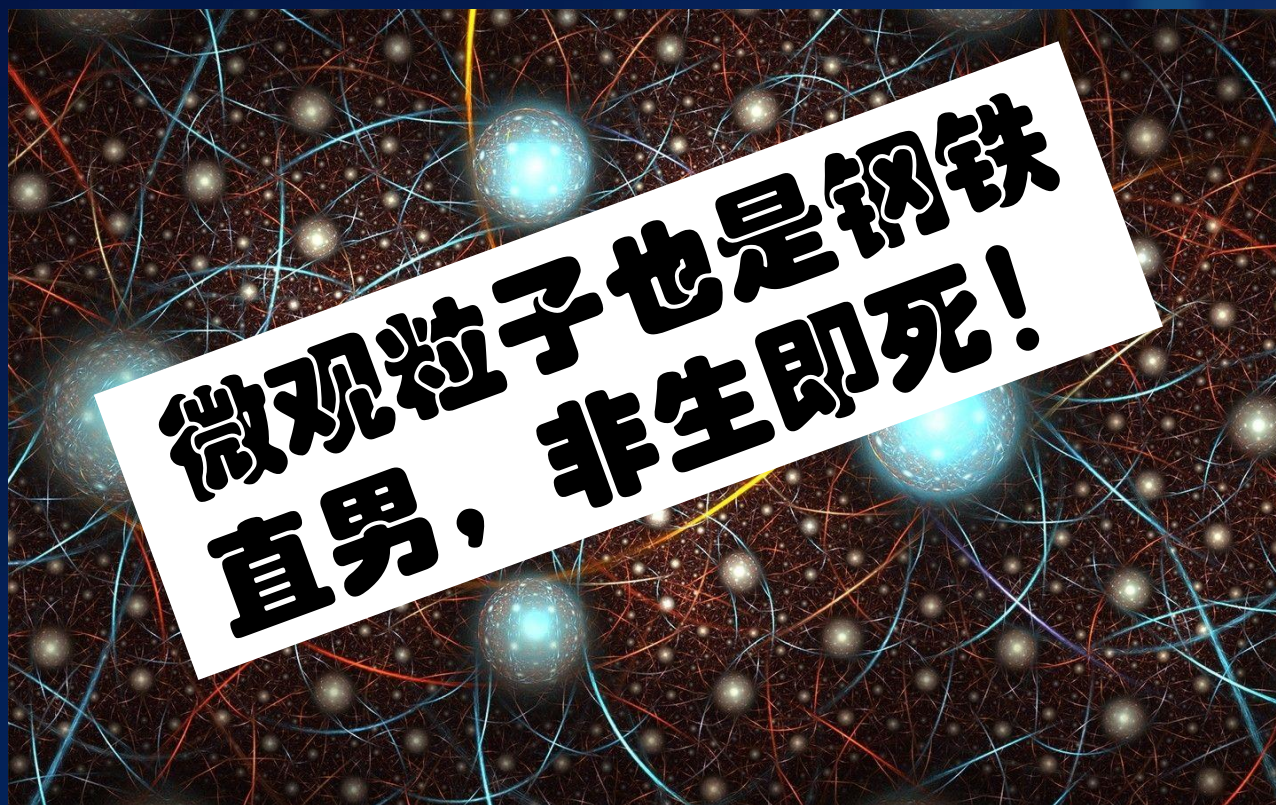


$$\Delta T = T2 - T1$$



开放，不固执

微观世界的奇妙



岁月在微观粒子
留不下痕迹

永葆青春

粒子寿命：从存在到衰变

数学是上帝创造世界的语言：

考虑 N 个不稳定粒子，其衰变概率不随时间变化

$$-\frac{dN}{dt} \propto N$$

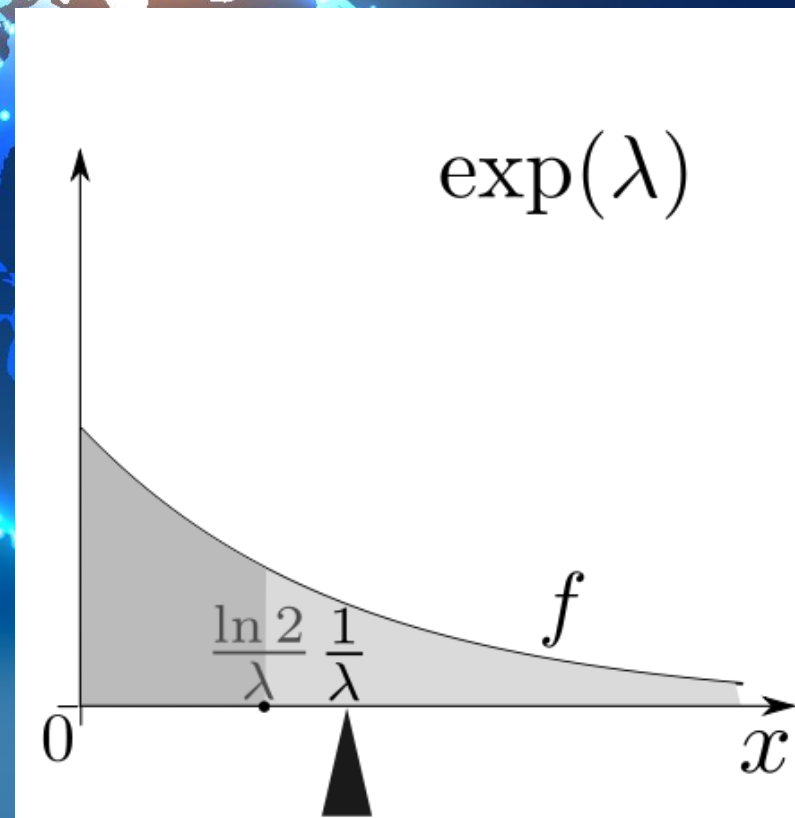
在数学上，“无记忆性”是指数分布的一个重要特性，即任意选择坐标原点，都得到相同的分布形式。

因
单
平均寿命

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

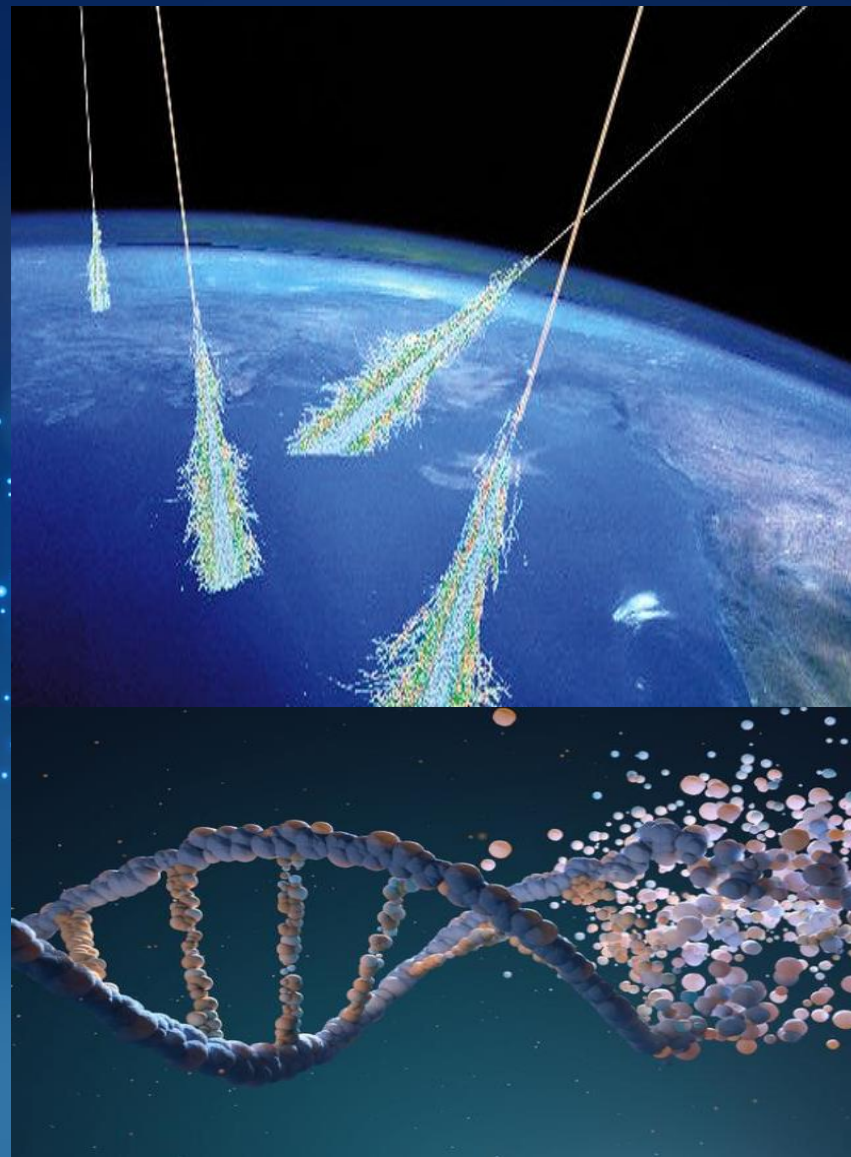
半衰期

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} = \tau \ln(2).$$

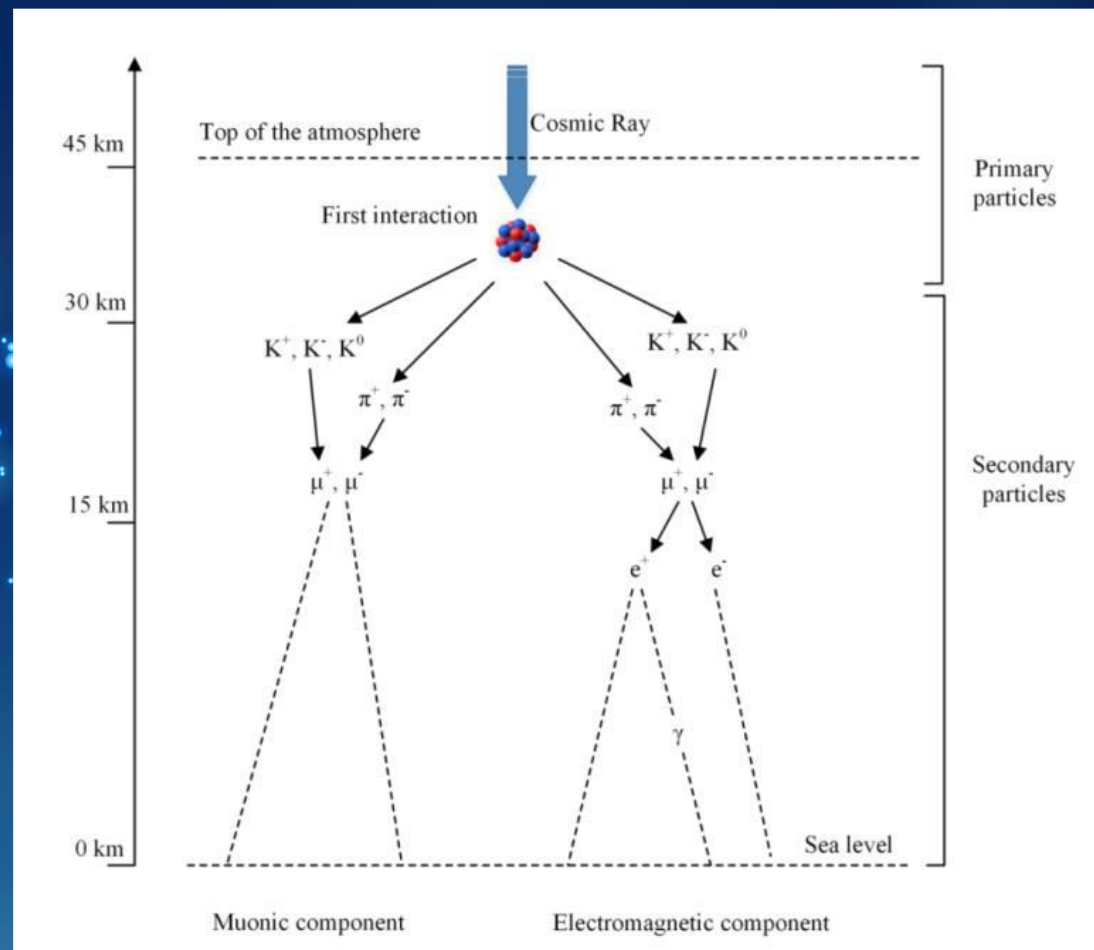
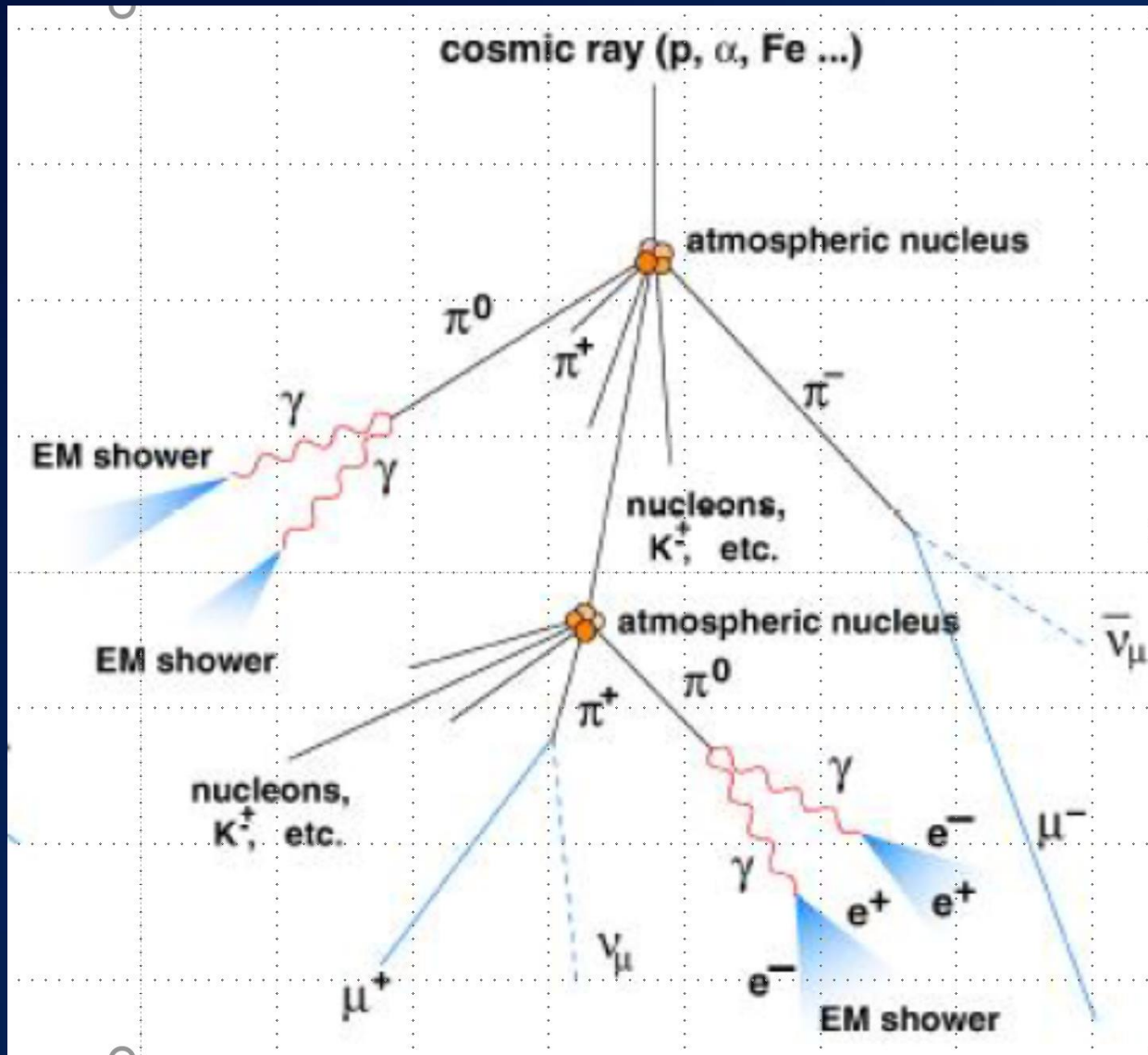


缪子从哪里来？ 宇宙线是缪子工厂的原料

- 高空飞机上的辐射量是地面的 30-60 倍；
- 近地航天器的辐射量竟高达地面的 100-150 倍；
- 地磁场抵挡了绝大多数的低能 ($<1\text{GeV}$) 宇宙线；
- 大气充当护盾；
- 原初宇宙线每秒每平方米 10^5 个粒子
- ~每秒每平方米160个粒子@海平面；

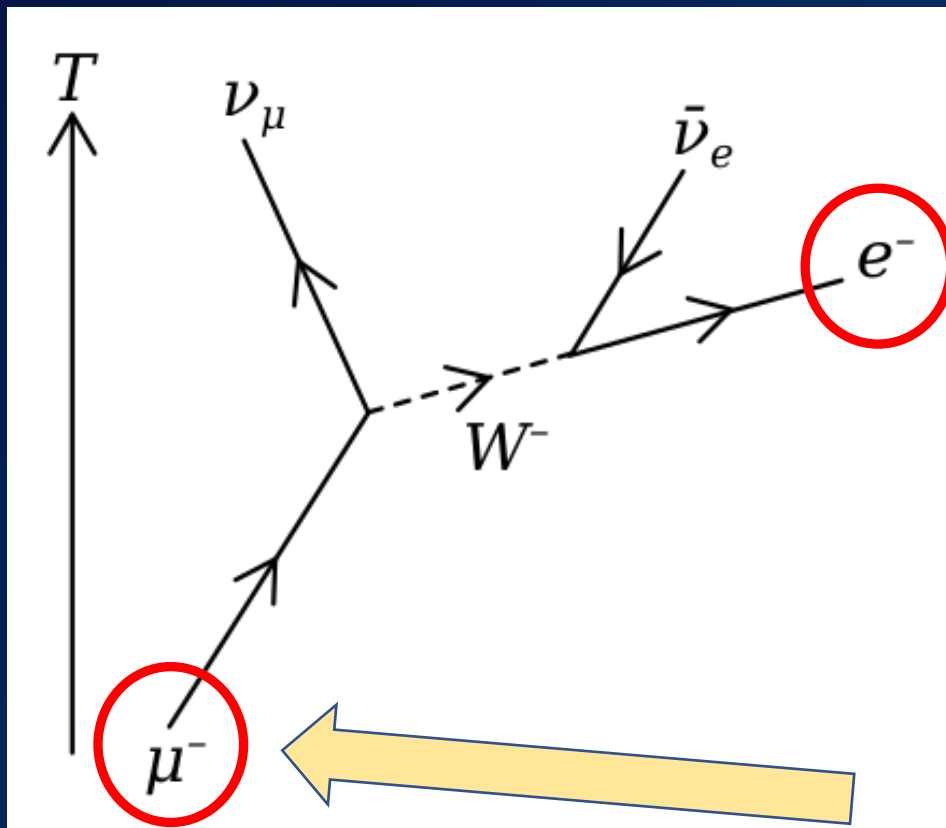


缪子从哪里来？



缪子寿命测量:

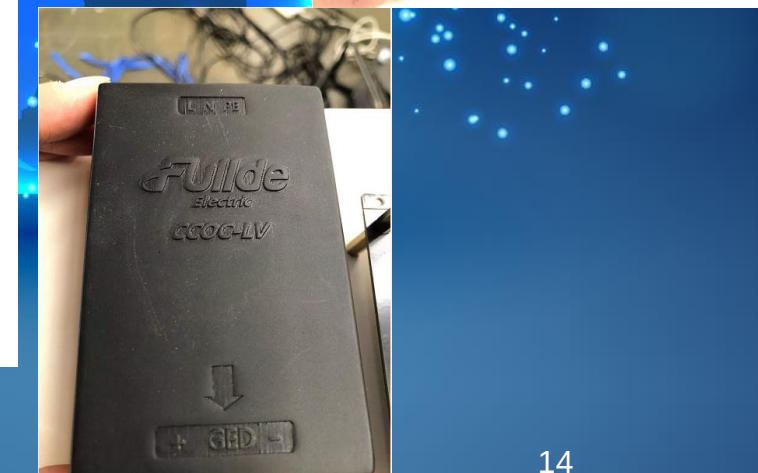
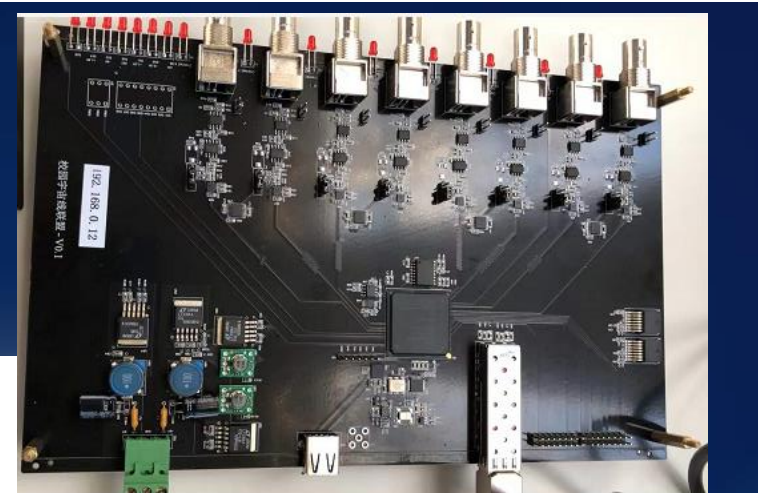
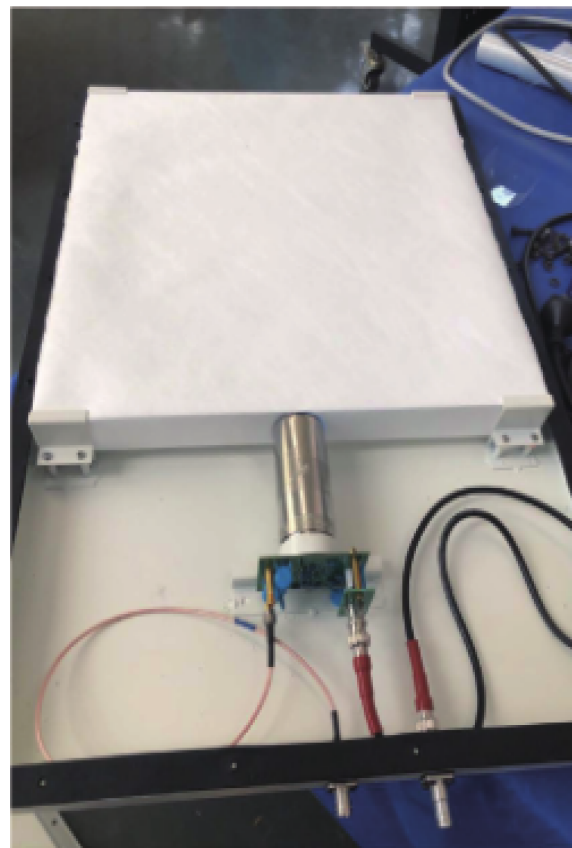
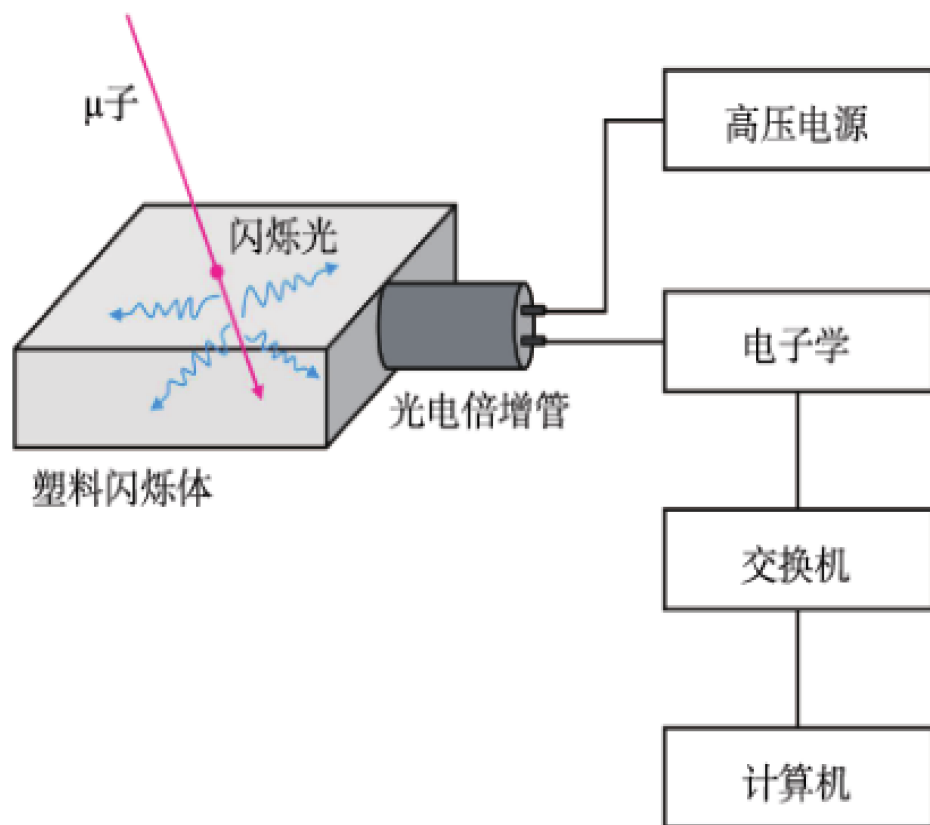
我们如何能够捕捉到这样的缪子衰变事例。



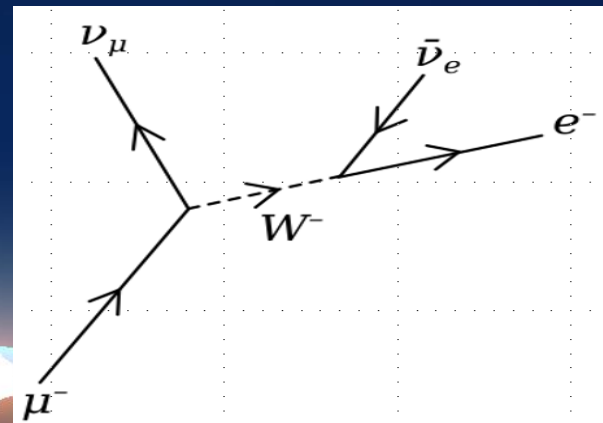
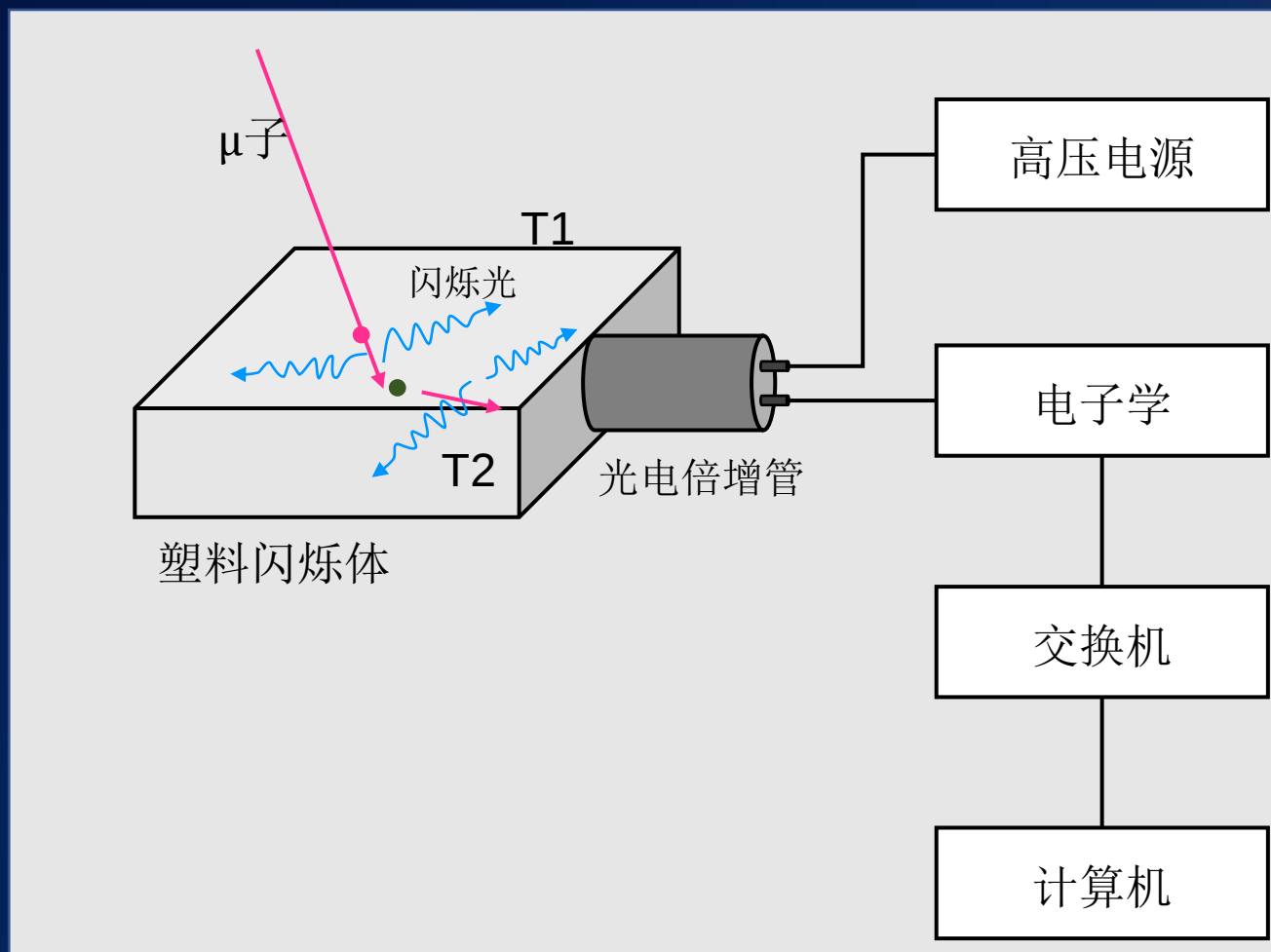
衰变后变成
电子的T2

缪子存在的T1

实验设备介绍:



实验原理：寻找缪子衰变信号



测量一个缪子存在信号T1，再测量一个缪子衰变后产物电子的信号T2，两者的时间差就是我们要测量的缪子寿命了。

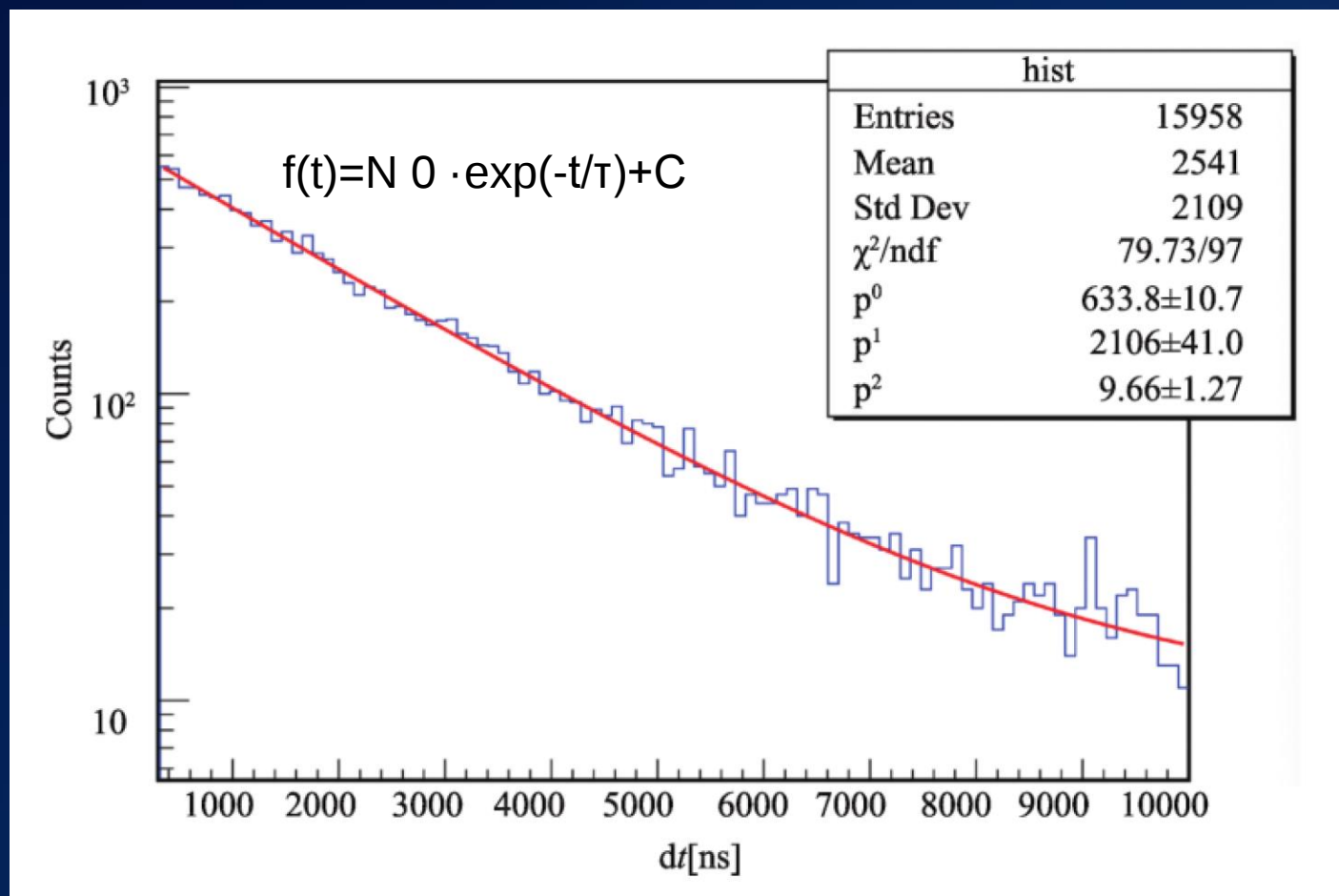
缪子寿命数据格式:

ID	ev_time_s	ev_time_ns	ch0_t2	t_ns	dt_ns
1	0	917479456	98	9.174796e+08	38231478
2	0	959548768	114	9.595489e+08	42069328
3	1	6858560	112	1.006859e+09	47309790
4	1	9723104	114	1.009723e+09	2864546
5	1	133530240	110	1.133530e+09	123807132
...	...	...	...	...	...
5867083	303142	480876736	122	3.031425e+14	68770040
5867084	303142	510179168	120	3.031425e+14	29302430
5867085	303142	573602208	128	3.031426e+14	63423048
5867086	303142	589112320	98	3.031426e+14	15510082
5867087	303142	612581664	112	3.031426e+14	23469358

5867087 rows x 5 columns



实验数据分析:



$$\tau = 2.11 \pm 0.04 \mu\text{s}$$

这个结果与 μ 子寿命的现代标准测量值(2.197微秒)非常接近。

μ子与狭义相对论

μ子在大气层顶部由宇宙线与大气分子碰撞产生

高度大约为几十km，即使按找光速计算，μ子在2.2微秒的寿命里，也只能飞行不到1000m的距离

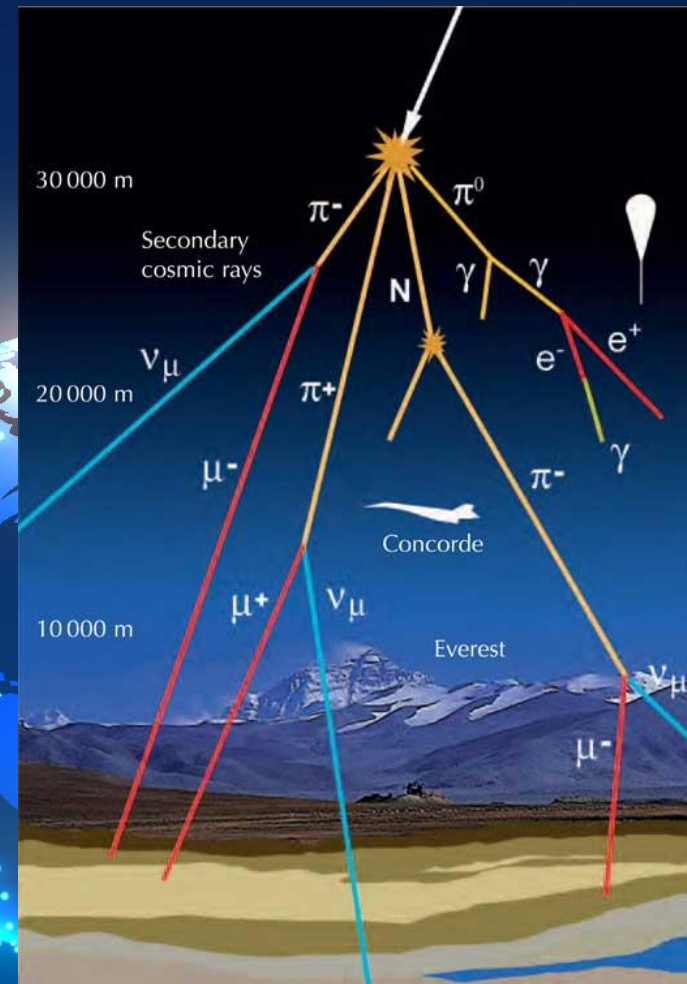
那么我们为什么在地面上也能观测到很多μ子呢？

- **钟慢效应：**以外部观察者的角度看，以接近光速飞行的μ子的时间会变慢，因此其实际寿命可以增加数百数千倍，足以穿透大气层

$$\Delta t' = \gamma \Delta t \quad \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

- **尺缩效应：**以μ子自身的角度看，虽然自己的时间不会变慢，但大气层的厚度缩短了，因此能够穿过

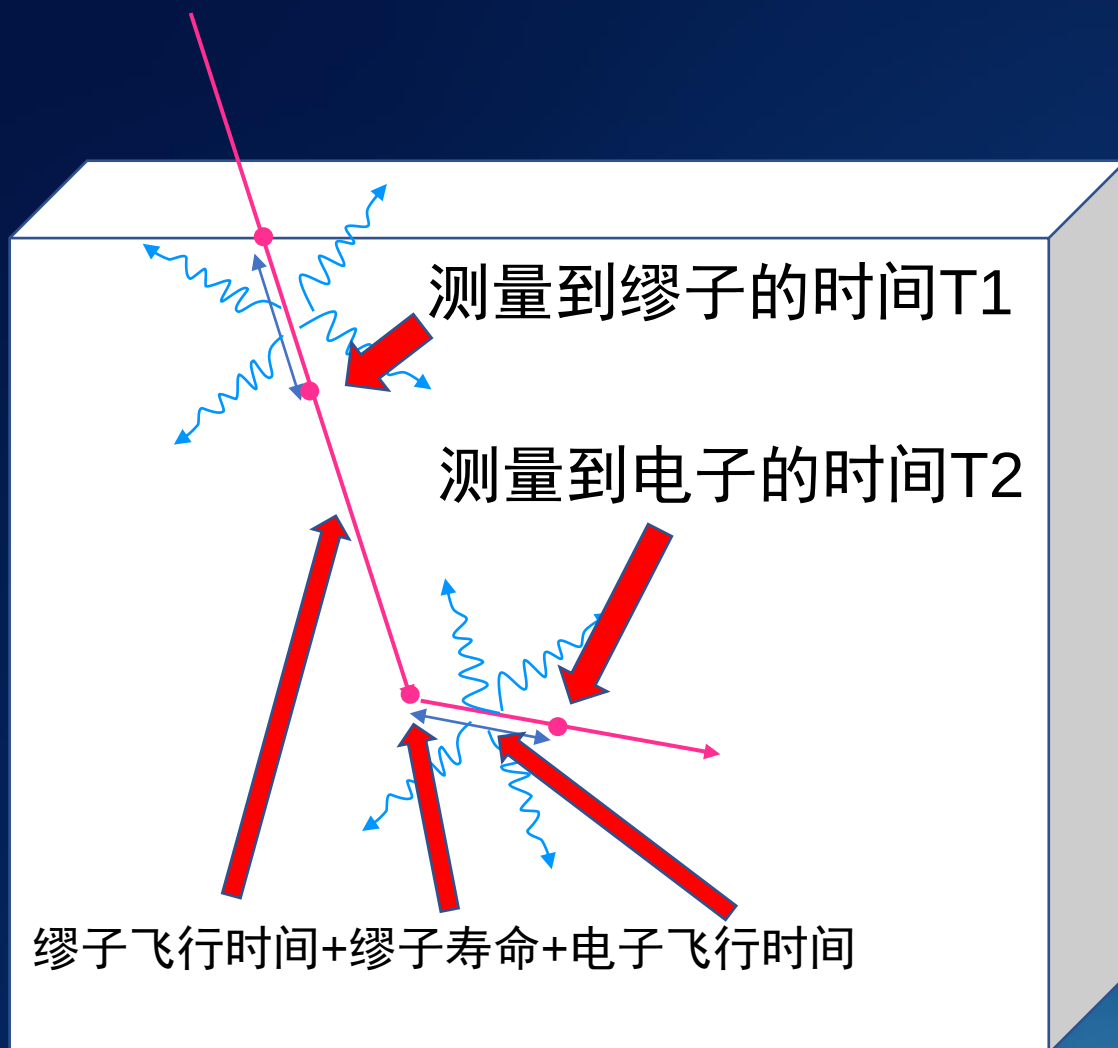
$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{\gamma}$$



培养科学思维：

上面实验设计是不是有问题？





$$E = \gamma m_0 c^2$$

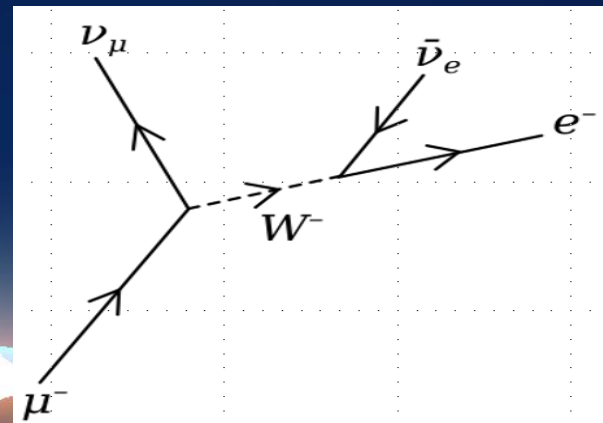
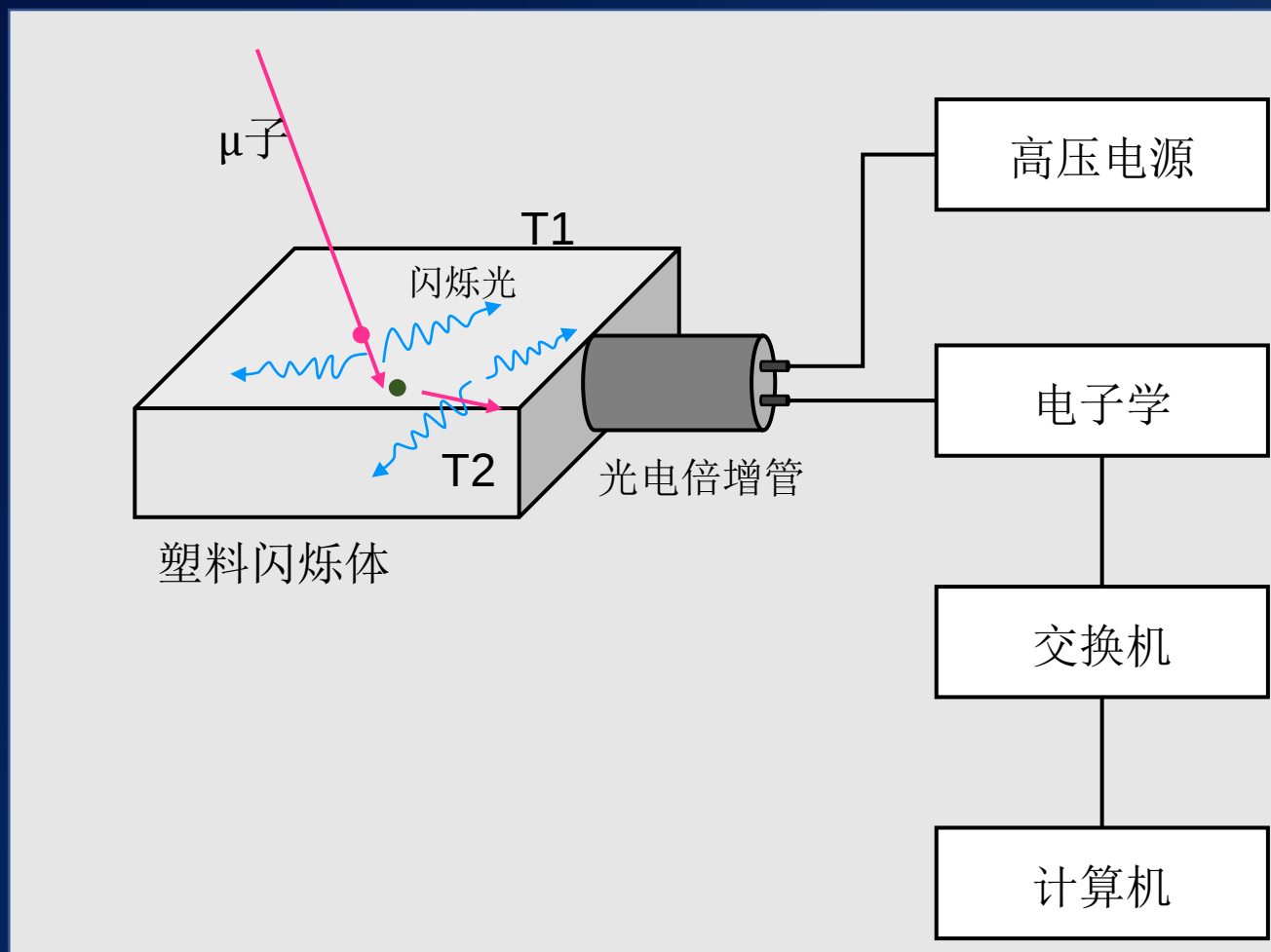
$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

~185MeV (105MeV)

$v \sim 0.8c$

$T_{\max} = L/v = 1.3\text{ns}$

实验原理：寻找缪子衰变信号



测量一个缪子存在信号 T1，再测量一个缪子衰变后产物电子的信号 T2，两者的时间差就是我们要测量的缪子寿命了。

即使是刚才的解释上，是否是故事的全部。。。。

我是不是还藏了点什么。。。。

即使我不藏着点什么了，上帝是不是还藏着点什么。。。。

谢谢大家！



课程设置与规划

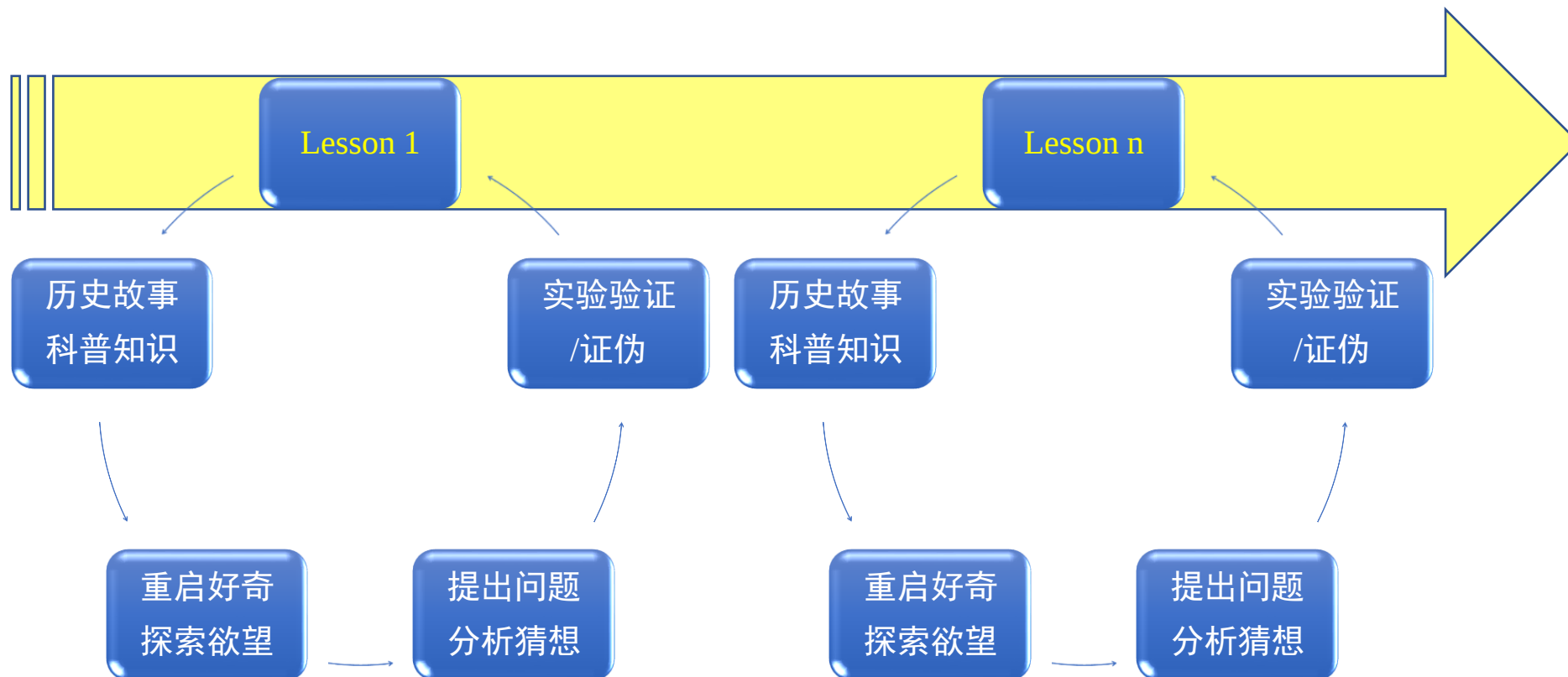
目标

- 重启好奇和兴趣
- 激发探究的欲望
- 培养质疑的精神
- 增强解决问题的信心
- 掌握基本的科学方法
- 培养发现性思维

宗旨

- 以一系列的问题为导向，通过学生在老师指导下自己拼装探测器、设计实验、实施实验、获得实验数据、分析实验数据来逐步验证猜想，引导学生探知宇宙线的世界，激发学生探索未知的兴趣，培养学生提出和发现问题、分析问题、自己动手解决问题的能力，培养学生的科学精神、科学素质和科学的思维能力，掌握一些科学的方法。

重走宇宙线发现之旅



重启好奇
探究欲望
质疑精神
增强信心
.....

探究性 科学实验

Exp 1
Exp 2
.....

科学素质
科学方法
发现思维
实验方法
.....

重走 宇宙线 发现之旅

Lesson 1
Lesson 2
.....

普及 科学知识

原子核物理
粒子物理
天文学
宇宙学
太阳物理
空间环境
....

介绍 工程技术

快电子学
高性能计算
时间测量
....

重温 高中知识

方程组
三角函数
几何
级数
excel
.....

引入一些 数学知识

微积分
最小二乘
误差传递
.....

课程主线 --- 重走宇宙线发现之旅

- “线” 如何被发现？为什么是从宇宙中来的？
- 地球上这些“宇宙线”（次级宇宙线）的强度是多少呢？每分钟有多少个宇宙线粒子穿过我们的身体？
- 地球上的“宇宙线”到底飞得有多快？
- 真的是一个个来自外太空的宇宙线粒子击中了，我们的身体吗，不是说大气会保护我们吗？
- 既然我们有了测量原初宇宙线的手段，那么我们来看看这些宇宙线到底是谁产生的？
- 我们知道了宇宙线是来自太阳系之外的天体，那就变得更加有趣了，这可是人类可以得到的来自太阳系外的唯一物质样本。作为一个粒子，就有电荷的性质，宇宙线是带电的还是不带电的？
- 既然我们知道了宇宙线绝大多数都是带电粒子，那么它是带正电还是负电呢？
- 我们可以从宇宙线测量中得到点什么，原初宇宙线流强，让我们来算算，银河系里的大怪兽要多有力量（源的强度），我们来看看银河系的总能量有多少？？？

使用和巩固已有知识和技能

- 初高中知识
 - 多元一次方程求解（EAS方向重建）
 - 几何算法
 - 级数
 - 三角函数（有效面积、立体角计算等）
- Excel用于数据分析
 - 数据导入
 - 一些计算（EAS方向重建）
 - 统计（分bin与频次）
 - 作图

进阶知识（optional）

- 最小二乘法
- 简单的误差传递
- 简单的微积分
- 简单的统计
-