



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

## 本科课程《核分析技术》

# 第四章 带电粒子弹性 散射分析

## 第一节 卢瑟福背散射分析原理

臧航 副教授

[zanghang@xjtu.edu.cn](mailto:zanghang@xjtu.edu.cn)

2

0

1

9

核科学与技术学院



# 目录

## 第一节 卢瑟福背散射分析原理

### 1 基本概念

### 2 运动学因子-质量分辨

### 3 散射截面-浓度分析

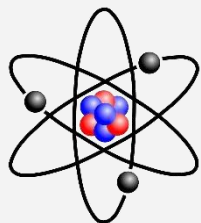
### 4 能量损失因子-深度分布



## 卢瑟福背散射分析发展史



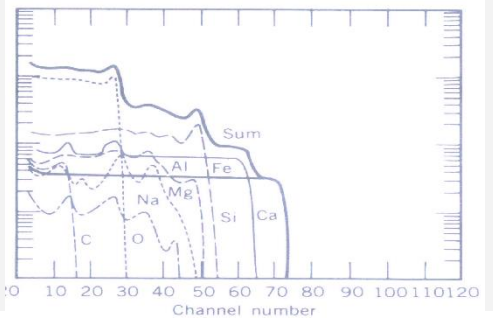
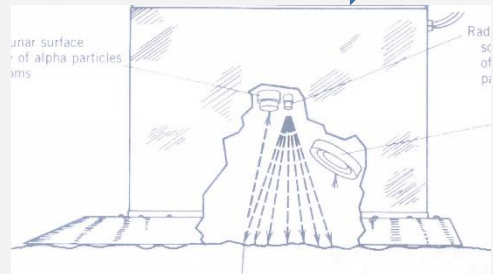
盖革和马斯顿  
观察到 $\alpha$ 粒子  
散射实验现象



卢瑟福  
揭示了  
该现象  
并确立  
原子的  
核式结  
构模型

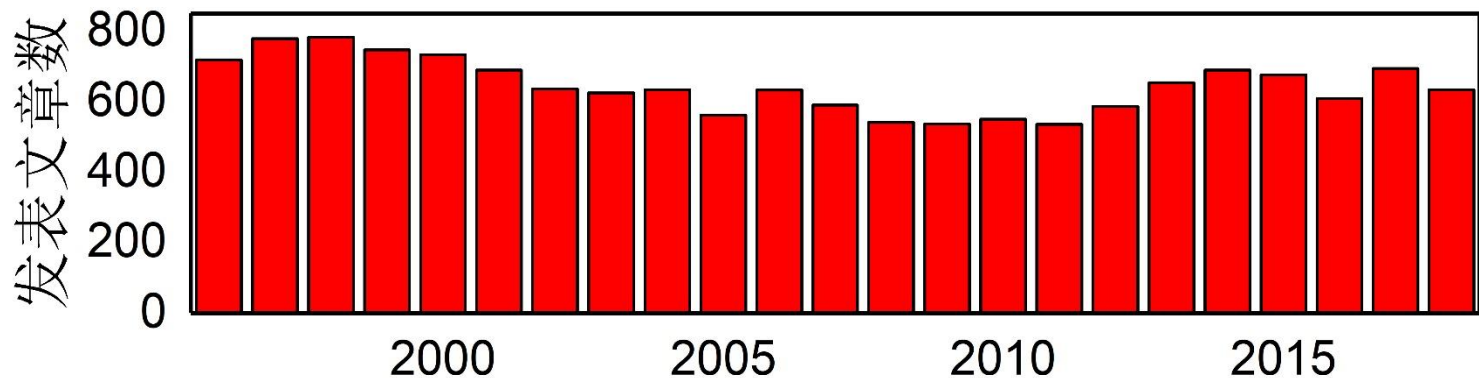
茹宾首次  
利用质子  
和氦束分  
析收集在  
滤膜上的  
烟尘粒子  
的成份

美国的测  
量员5号  
空间飞船  
发回月球  
表面土壤  
的背散射  
分析结果



Web of Science

Rutherford Backscattering Analysis / RBS

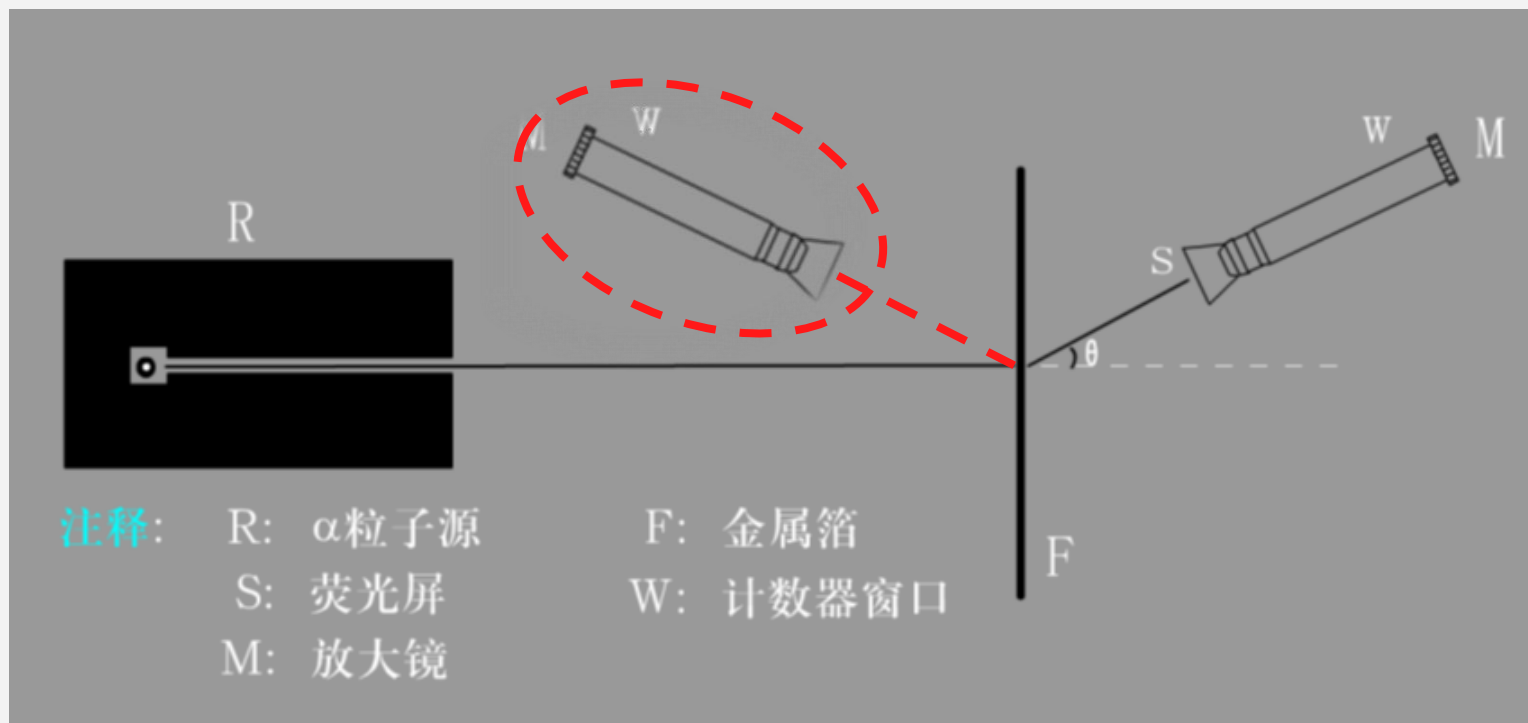


年份



# 1 基本概念

## 1909年盖革和马斯顿 $\alpha$ 粒子散射实验

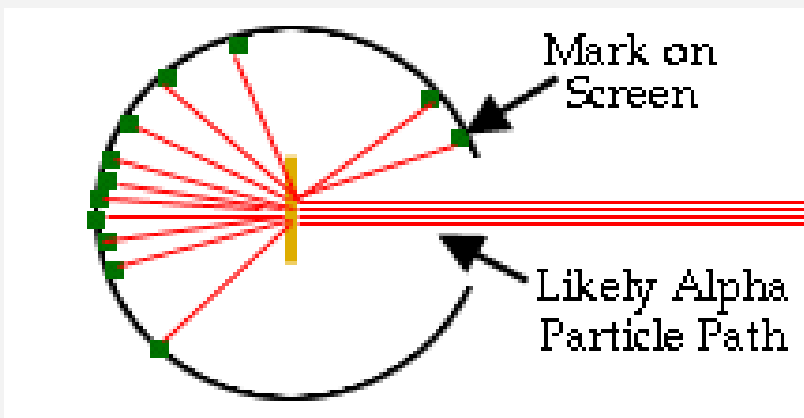


**实验现象:** 被散射的粒子大部分分布在小角度区域, 但是大约有  $1/8000$  的粒子散射角  $\theta > 90$  度, 甚至达到  $180$  度, 发生背反射。



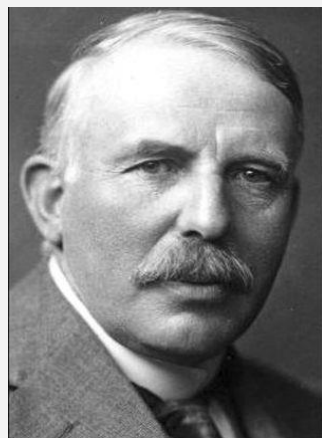
# 1 基本概念

## 1909年盖革和马斯顿 $\alpha$ 粒子散射实验



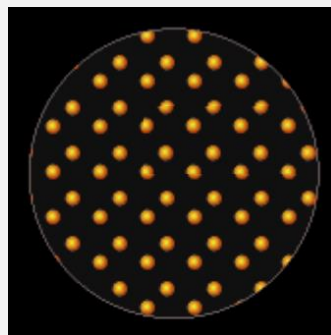
**实验现象：**被散射的粒子大部分分布在小角度区域，但是大约有 **1/8000** 的粒子散射角  $\theta > 90$  度，甚至达到 **180** 度，发生背反射。

**物理内涵：** $\alpha$  粒子发生这么大角度的散射，说明它受到的力很大。

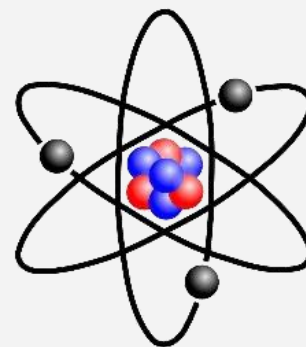


“就像一枚15英寸的炮弹打在一张纸上又被反射回来一样。”

卢瑟福  
(1871-1937)



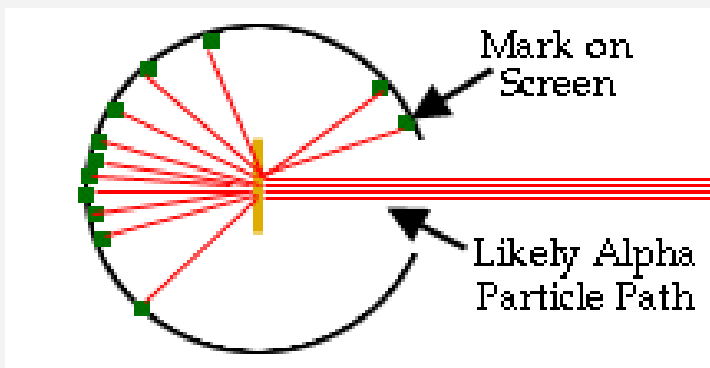
汤姆孙模型



核式结构模型

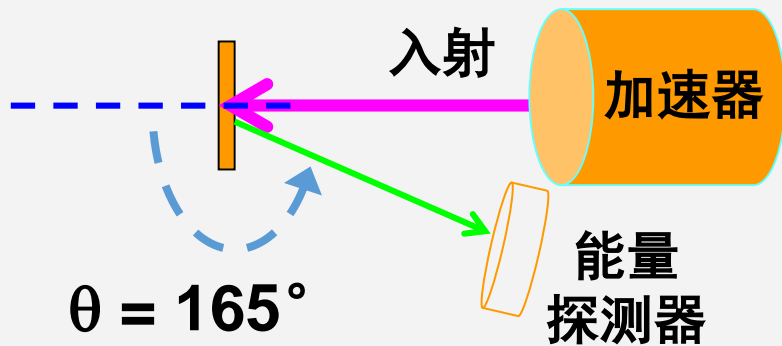


## 卢瑟福背散射



定义：当一束具有一定能量的离子入射到靶物质时，大部分离子沿着入射方向穿透进去，并与靶原子电子碰撞逐渐损失其能量；只有离子束中**极少部分**离子与**靶原子核**发生**大角度的库伦散射**而离开原来的入射方向。入射离子与靶原子核之间的大角度库伦散射称为卢瑟福背散射。

靶样品



$\theta = 165^\circ$

卢瑟福背散射分析示意图

## 卢瑟福背散射分析

定义：用探测器获得背向散射离子的能量信息，进而获得有关靶原子的**质量**、**含量**和**深度**分布信息的方法。

散射离子  
(同入射离子)

背向  
(大角度)

能量  
信息



# 目录

## 第一节 卢瑟福背散射分析原理

1 基本概念

2 运动学因子-质量分辨

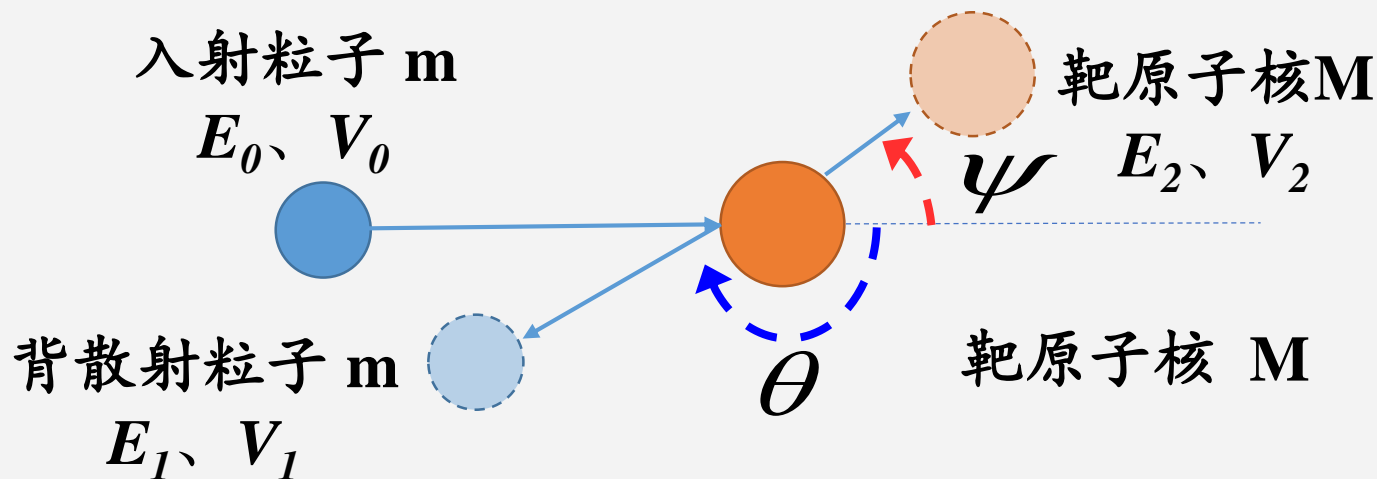
3 散射截面-浓度分析

4 能量损失因子-深度分布

## 2 运动学因子-质量分辨

### 物理前提

如果入射粒子的能量**远比原子在靶物质中的化学结合能大**，但其**能量又远不足以引起核反应和核共振**时，我们可以用简单的两个孤立的原子的**弹性碰撞**来描写它们之间的相互作用过程。



$$\frac{1}{2} mV_0^2 = \frac{1}{2} mV_1^2 + \frac{1}{2} MV_2^2$$
$$E_0 = \frac{1}{2} mV_0^2 \quad E_1 = \frac{1}{2} mV_1^2$$

$$mV_0 = mV_1 \cos \theta + MV_2 \cos \psi$$
$$0 = mV_1 \sin \theta - MV_2 \sin \psi$$





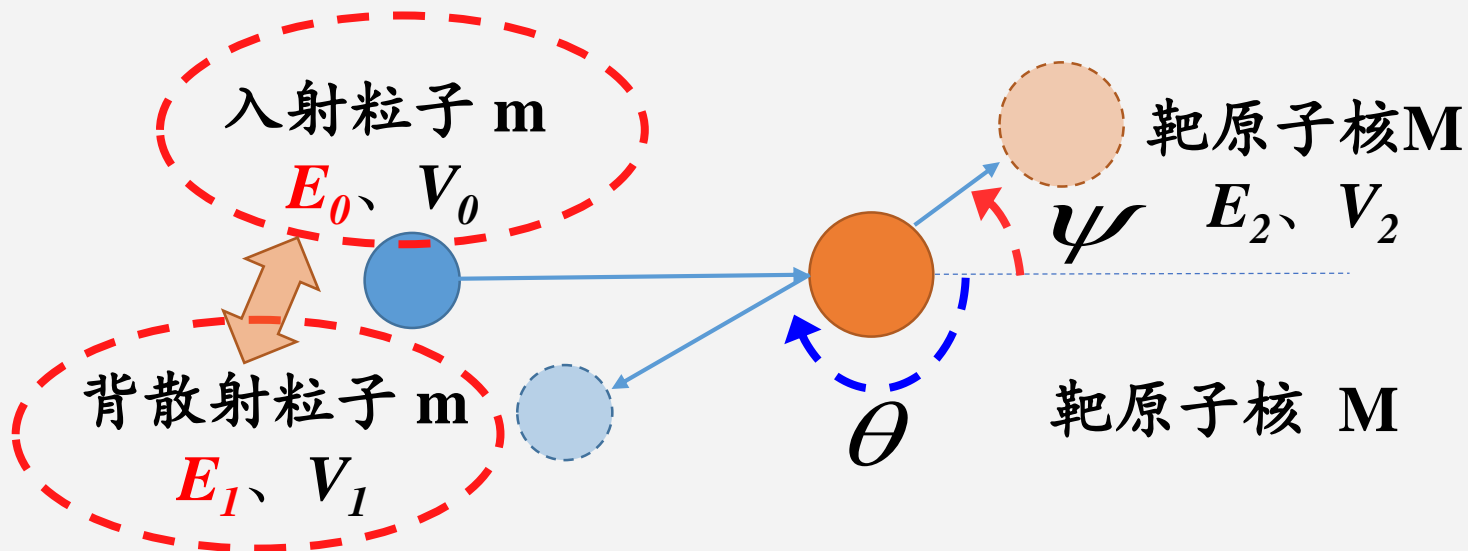
## 2 运动学因子-质量分辨

### 运动学因子 (K)

定义：离子碰撞后和碰撞前的能量之比

$$K = \frac{E_1}{E_0} = \left( \frac{m \cos \theta \pm \sqrt{M^2 - m^2 \sin^2 \theta}}{m + M} \right)^2$$

☞ 这是一个与两体弹性碰撞后**散射离子所带能量相关**的物理量，  
由**被分析元素的质量确定**。



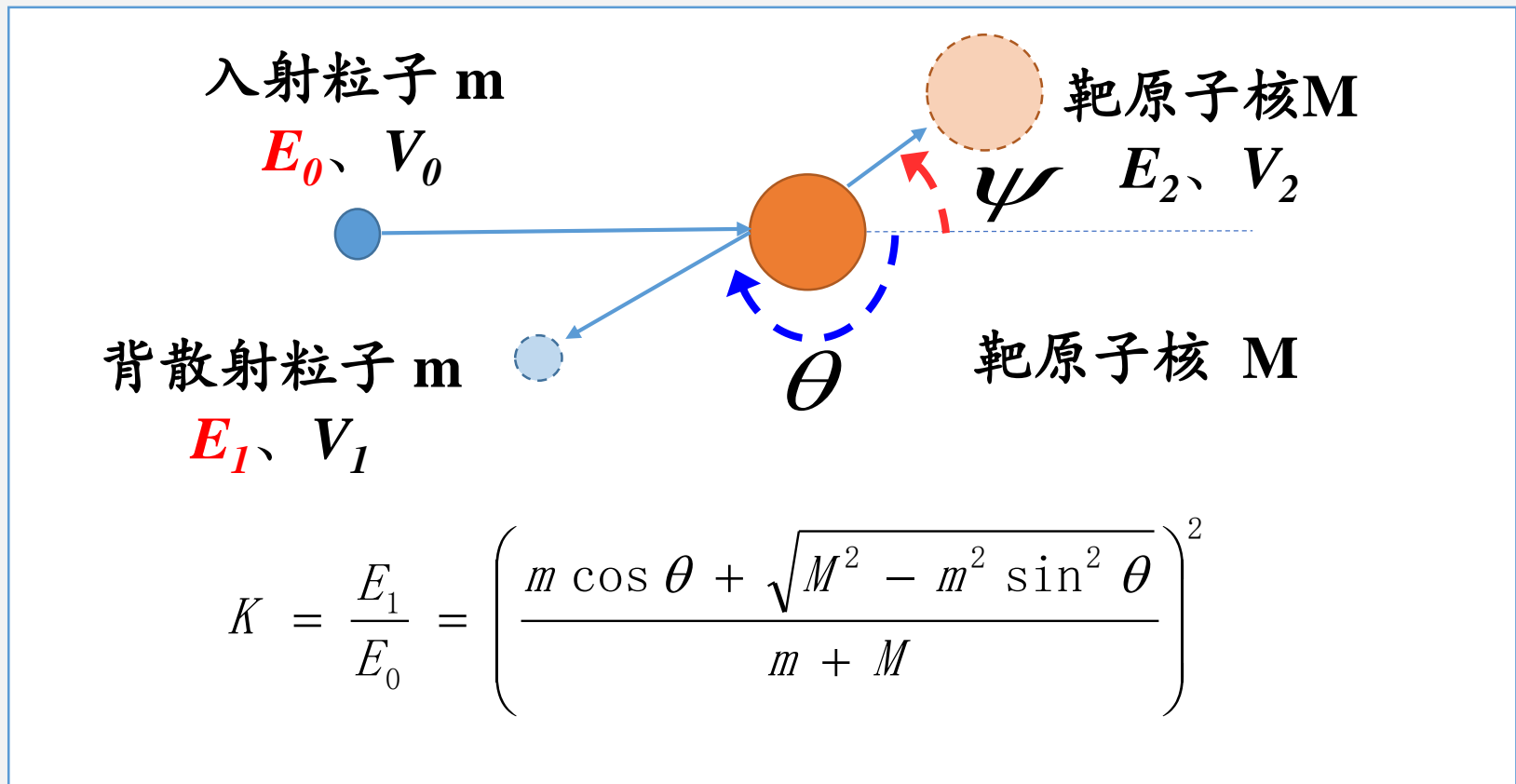


## 2 运动学因子-质量分辨

运动学因子 (K)

$$K = \frac{E_1}{E_0} = \left( \frac{m \cos \theta \pm \sqrt{M^2 - m^2 \sin^2 \theta}}{m + M} \right)^2$$

➤ 当  $m < M$



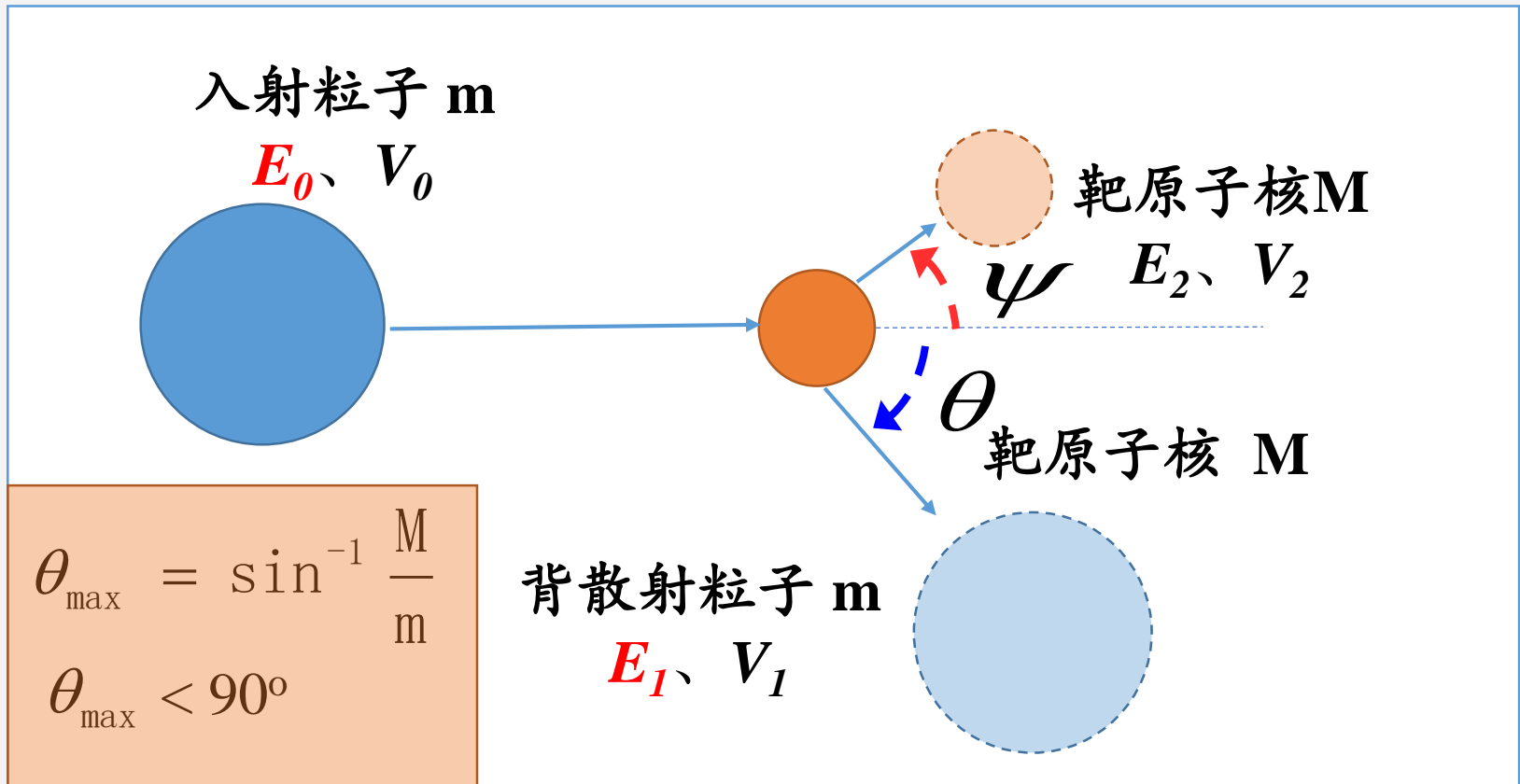


# 2 运动学因子-质量分辨

## 运动学因子 (K)

$$K = \frac{E_1}{E_0} = \left( \frac{m \cos \theta \pm \sqrt{M^2 - m^2 \sin^2 \theta}}{m + M} \right)^2$$

➤ 当  $m > M$





## 2 运动学因子-质量分辨

散射离子  
(同入射离子)

背向  
(大角度)

能量  
信息

$m < M$

$$K = \frac{E_1}{E_0} = \left( \frac{m \cos \theta + \sqrt{M^2 - m^2 \sin^2 \theta}}{m + M} \right)^2$$

例：当入射离子为  $\alpha$  粒子( $m=4$ )，且 $E_0=2\text{MeV}$ ， $\theta \approx 180^\circ$  时，对不同靶核计算 $E_1$ ，见下表：

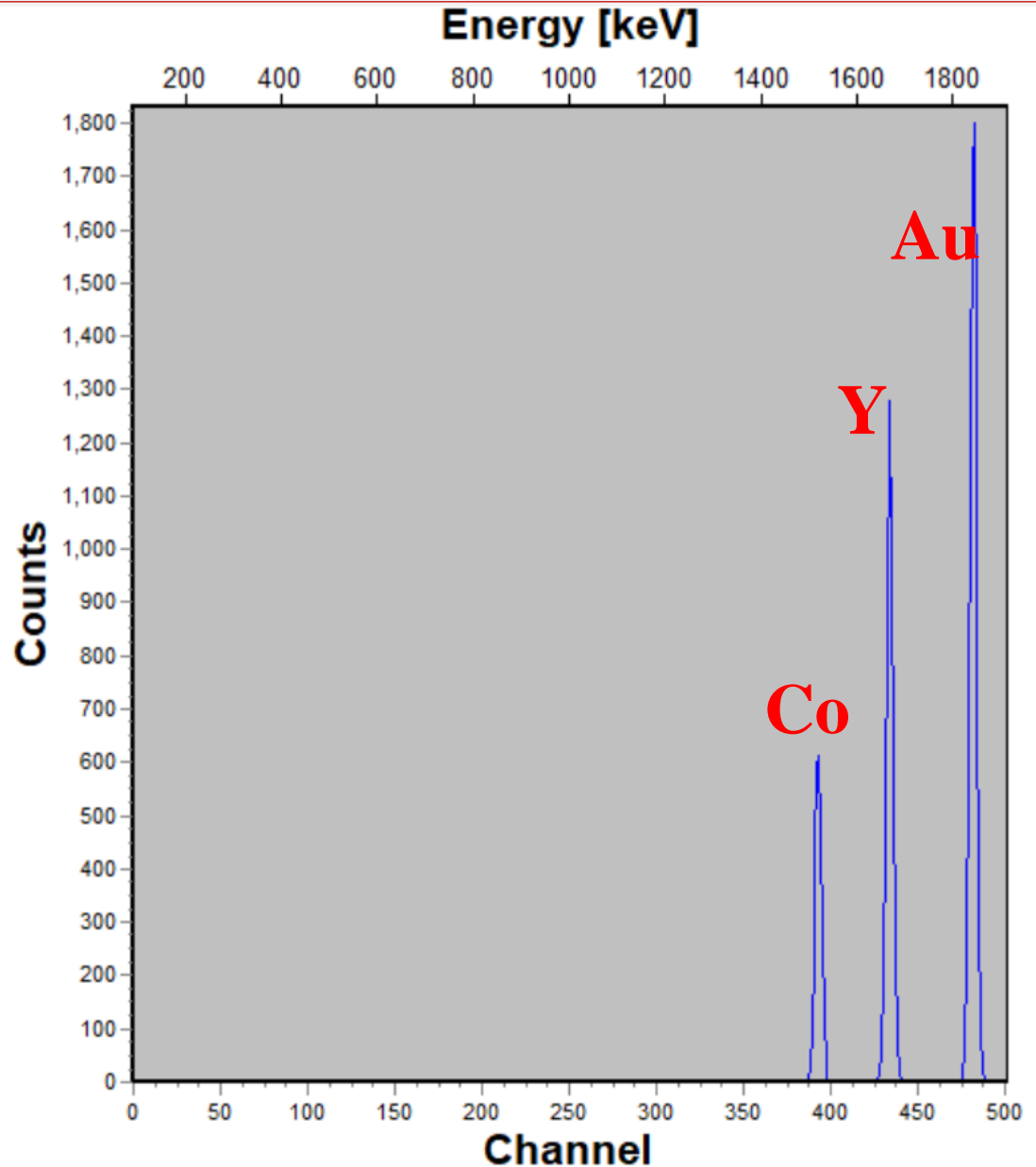
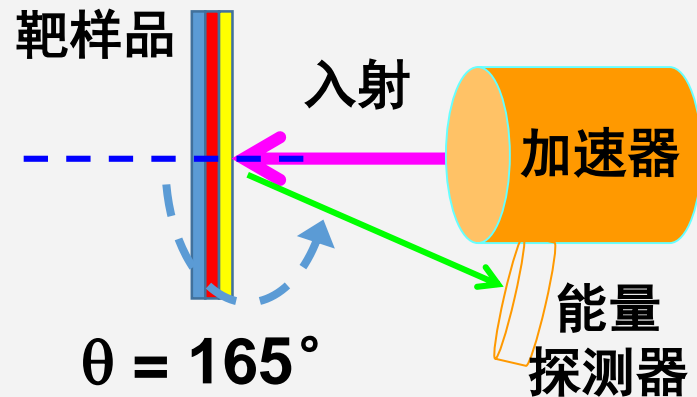
靶元素	M	$E_1$ (MeV)	K	靶元素	M	$E_1$ (MeV)	K
C	12	0.50	0.25	Mo	96	1.69	0.85
Si	28	1.12	0.56	Pd	106	1.72	0.86
Cu	63	1.55	0.78	Au	197	1.84	0.92



## 2 运动学因子-质量分辨

例：入射离子为  $\alpha$  粒子 ( $m=4$ ),  $E_0=2\text{MeV}$ ,  $\theta=165^\circ$  纳米多层膜

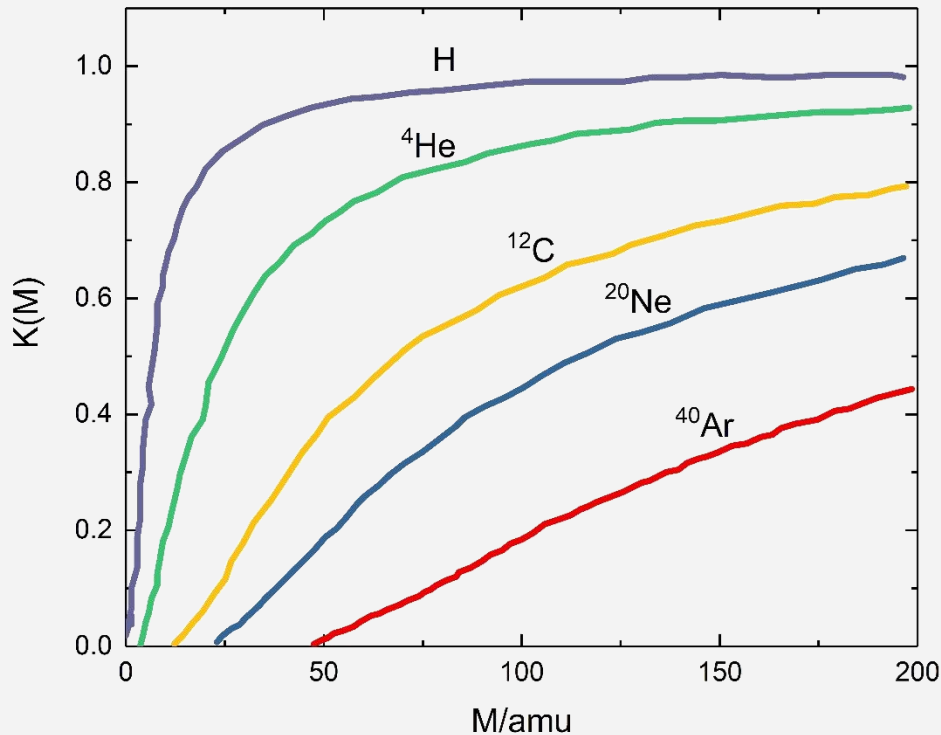
靶元素	M
Au	197
Y	88.9
Co	59





## 2 运动学因子-质量分辨

散射角度  $\theta$  为定值时，运动学因子K随入射粒子m和靶原子核M的变化：



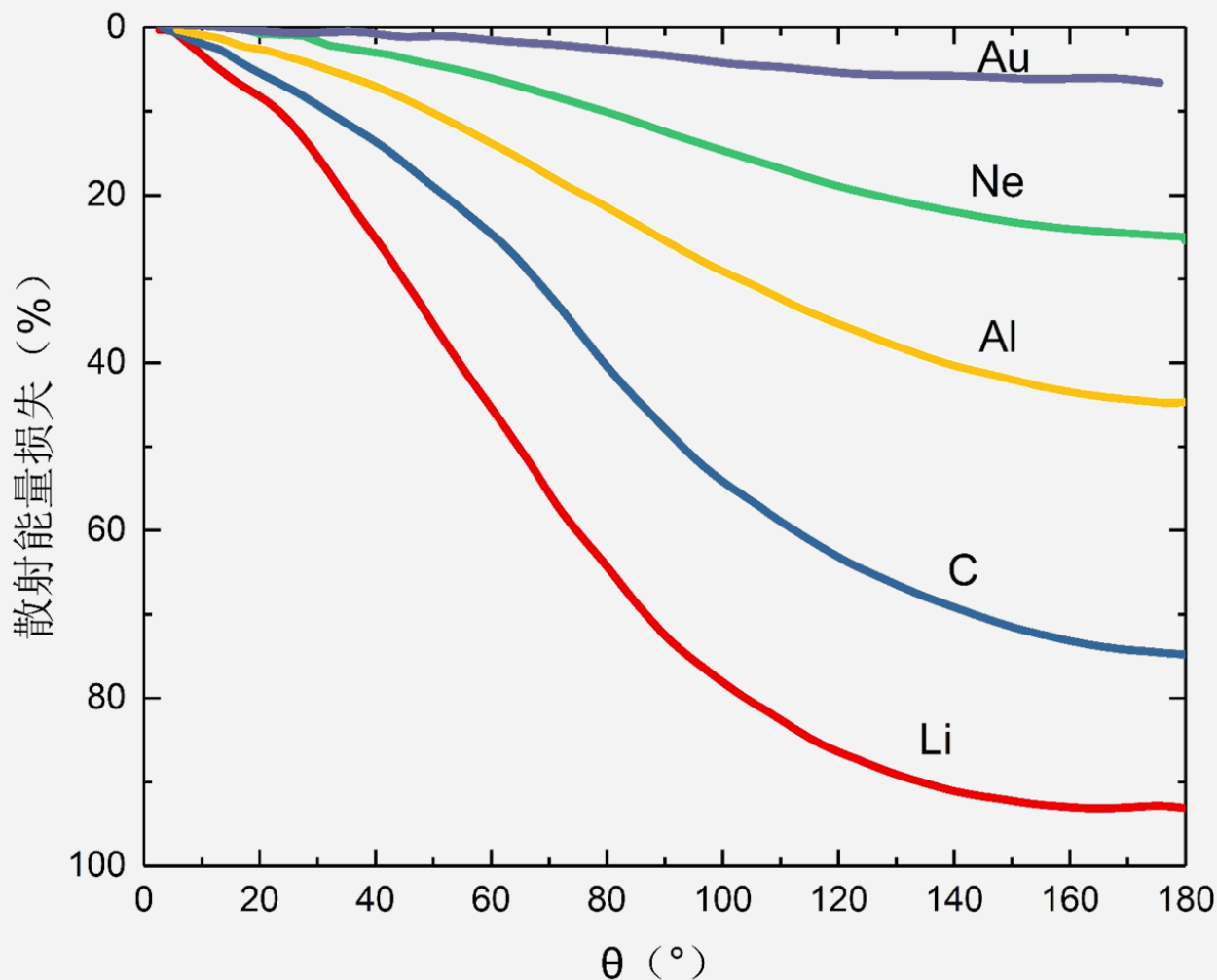
- ①对确定的m，K随M的增大而增大。
- ②对确定的m，M小时，K值的变化大，即对靶原子的质量分辨率好。
- ③对确定的m，M大时，K值的变化缓慢，即对靶原子的质量分辨率差。
- ④对于中等质量以下的轻元素(靶原子)，轻入射离子的K值变化大，对靶原子有比较好的质量分辨本领。
- ⑤对于重元素(靶原子)，重入射离子的K值变化大，对靶原子有比较好的质量分辨本领。

- H对轻元素 (D、T、He) 的分辨较好
- 重元素的高的质量分辨用重离子较好 (但重离子的能量分辨受制于探测器)
- He既能兼顾测量范围，也具有较好的重元素分辨



## 2 运动学因子-质量分辨

散射角度  $\theta$  和运动学因子K的关系      散射能量损失率 $= (E_0 - E_1) / E_0 = 1 - K$

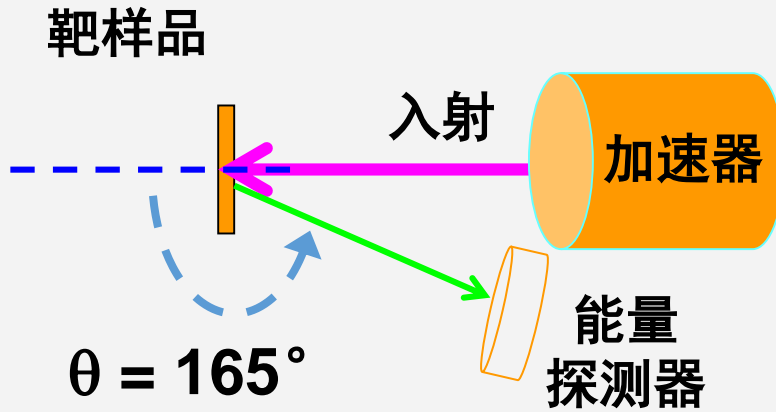


- ① 对确定的  $m$ 、 $M$ ， $K$  随  $\theta$  的增大而减小。
- ②  $\theta$  越大时，同一  $M$  的  $K$  值随  $\theta$  的变化越小，而不同  $M$  的  $K$  值差异相对地增大。因此，在  $180^\circ$  附近探测散射粒子最为有利。

( $165^\circ - 170^\circ$ )



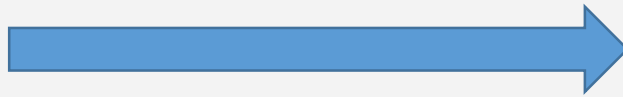
## 2 运动学因子-质量分辨



卢瑟福背散射分析示意图

定义：用探测器获得背向散射离子的能量信息，进而获得有关靶原子的**质量**、**含量**和**深度**分布信息的方法。

运动学因子  
K



与两体弹性碰撞后散射离子所带能量相关的物理量，由被分析元素的质量确定。**(质量分辨)**

散射角  $\theta$  不变的情况下  
运动学因子和入射粒子  $m$  的关系



入射粒子  $m$  越小，能分析元素越多  
轻元素的质量分辨率较高  
**He能兼顾测量范围和质量分辨**

入射粒子  $m$  已知的情况下  
运动学因子和靶原子核  $M$  的关系



散射角  $\theta$  越大， $M$  的运动学因子  $K$  随  $\theta$  的变化越小，且不同  $M$  的  $K$  值差异相对地增大。**(165°-170°)**



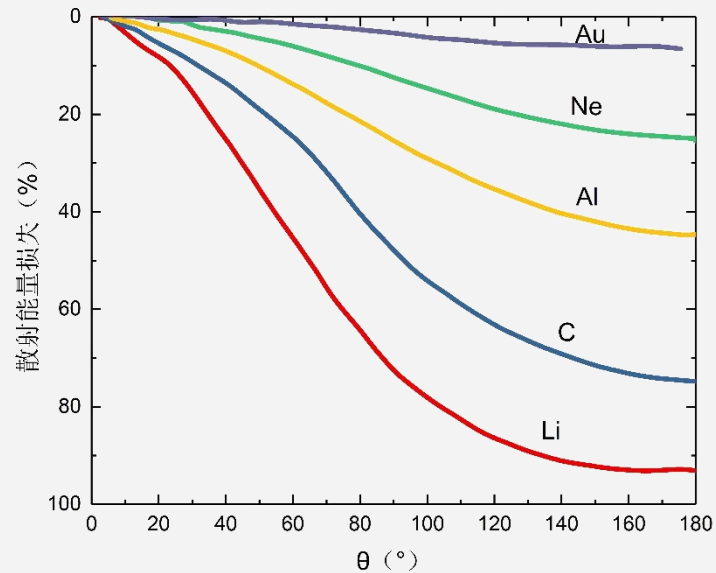
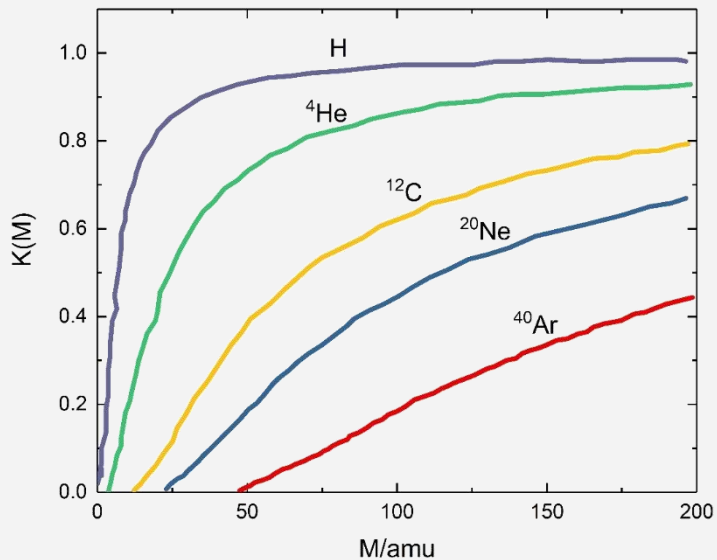


## 本小节知识点

- **定义:**

卢瑟福背散射、卢瑟福背散射分析、运动学因子

- **物理意义:**





西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



谢谢大家!

2

0

1

9