

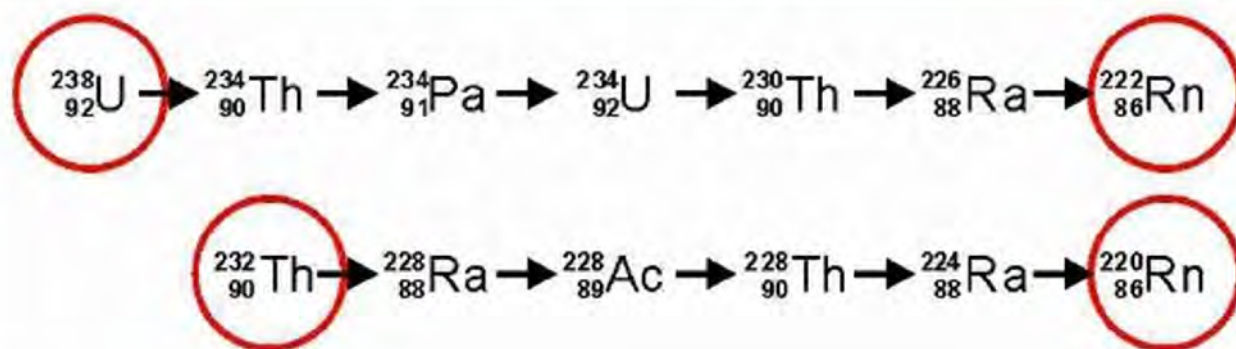


在1900年由F. Dorn发现

惰性气体，
无色，
无味，
放射性稀有气体。

氡

在30种同位素中，只有两种同位素在空气中的浓度达到了不可忽略的程度。



没有化学键。

没有表面附着（吸收，除煤以外）。

可以从固体发出。

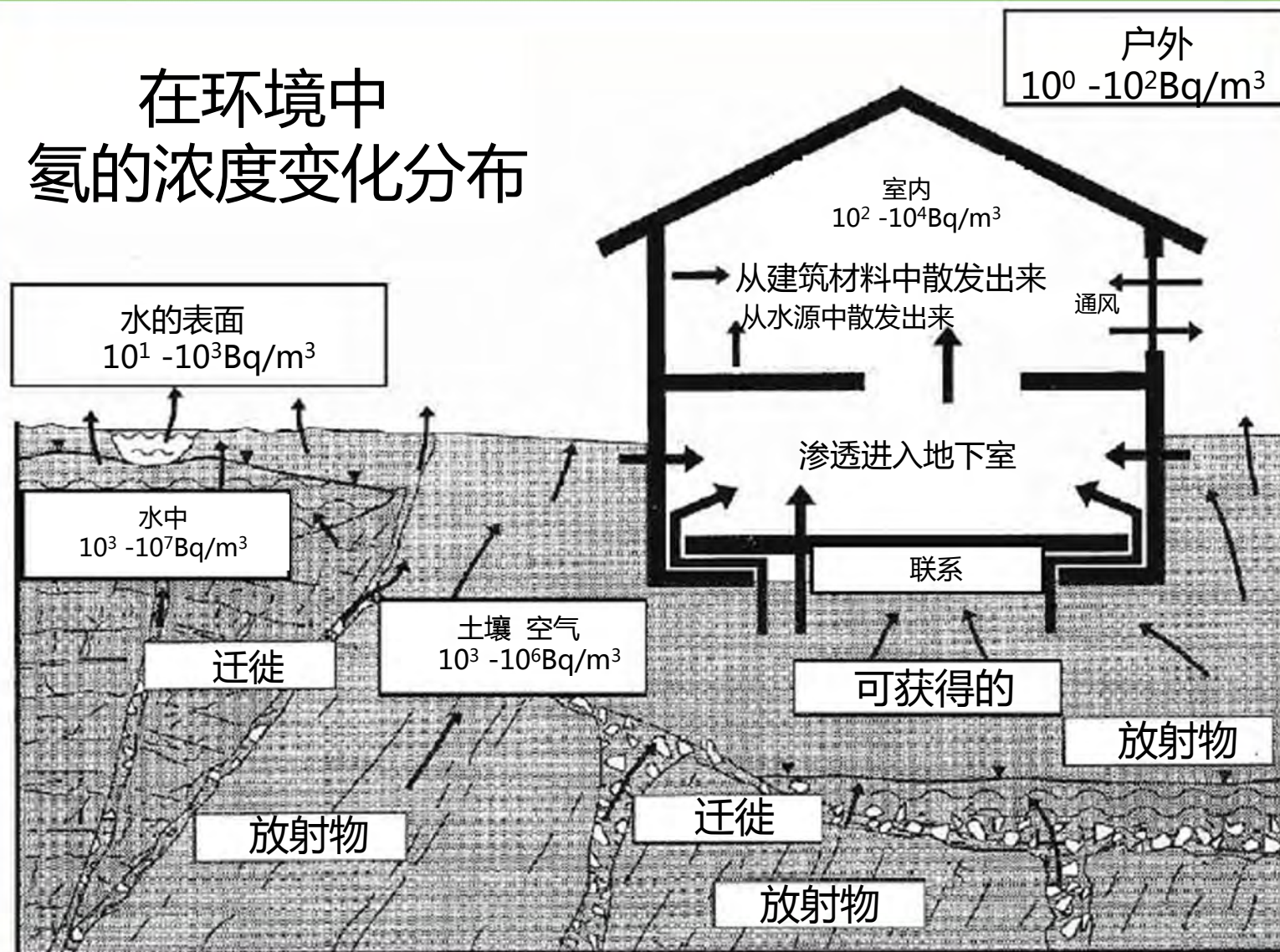
在大多数的材料中扩散较容易。

在空气中消失的很快。

将会产生一个放射性衰变链，而所有这些放射性材料均为重金属。

氡的起源及地理分布

在环境中 氡的浓度变化分布



空气中氡的衰变产物

氡-222

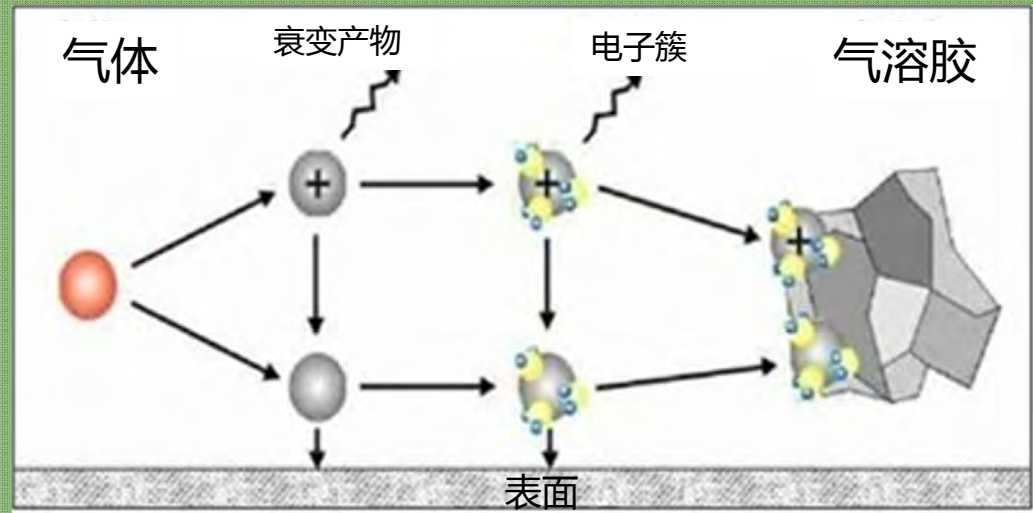
钋-218

铅-214 → 铋-214 → 钋-214

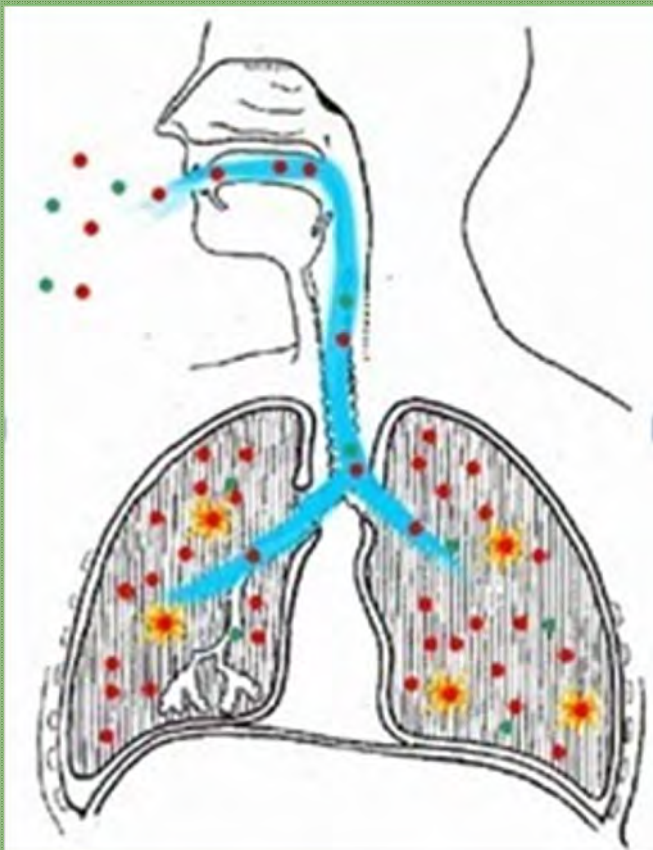
在空气中，氡产生携带有放射性衰变产物的气溶胶。

铅-210 → 铋-210 → 钋-210

铅-206



氡子体产物的危害



氡气本身并没有影响
但其子体会沉积在肺部
吸附在肺部上皮细胞立即衰变
产生 α 辐射损伤细胞
同时导致基因缺陷。

目标：
评定吸入氡的子体后产生的有
害影响

氡已经成为继吸烟后的第二大肺癌致病因素！

术语及定义

我们知道：一些氡的子体将会产生危险的 α 辐射



氡的衰变链



PAE (α 潜能)



PAEC (α 潜能浓度)



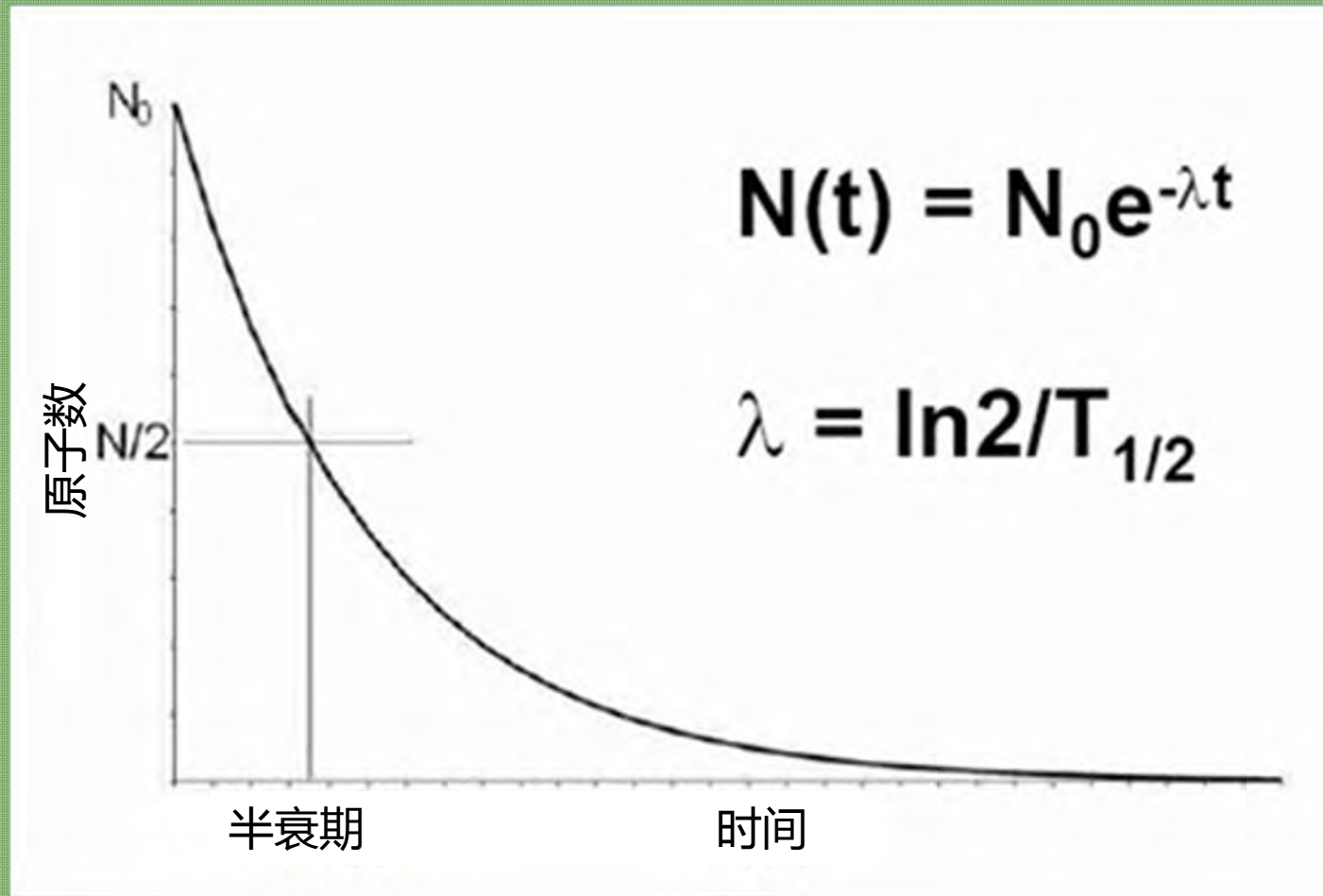
PAEE (α 潜能照射量)



等效剂量

我们需要：一个对于人体有害的影响值。

放射性衰变及活度



$$A = dN/dt = \lambda N = N \cdot \ln 2 / T_{1/2}$$

$$N = A \cdot T_{1/2} / \ln 2$$

放射性 α 衰变

特性：

- 分子具有较大质量数
- 静电力 > 核素引力
- 产生 α 衰变时，一个 α 粒子会从原子核中射出， α 粒子即是氦4核， He^{2+} ，即由2颗质子和2颗中子组成的原子核。
- 不同核素 α 衰变的半衰期分布，半衰期的长短同 α 粒子的能量有对应的从属关系。
- α 能的范围在4 ~ 9 MeV之间
- 剩余的原子将会离子化

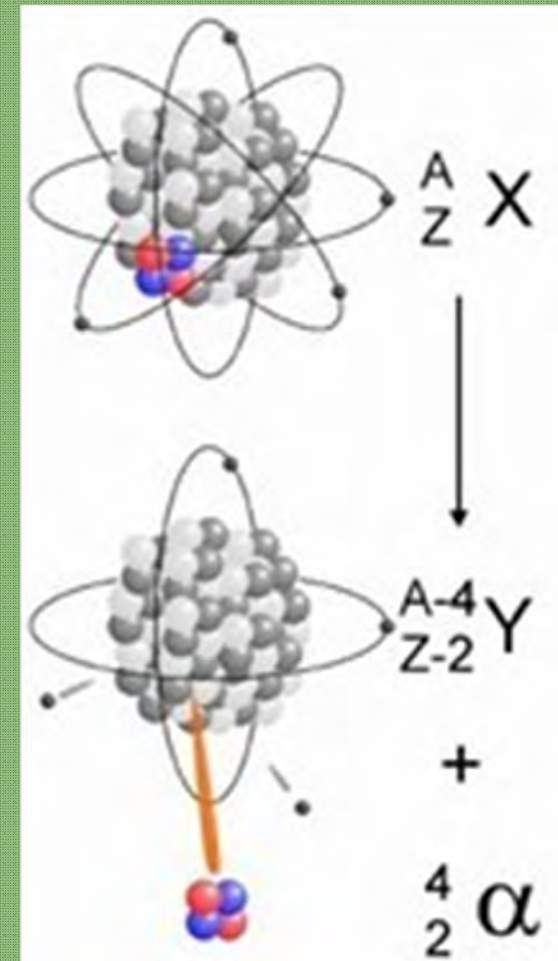
举例：

Po-218 在 8.785 MeV

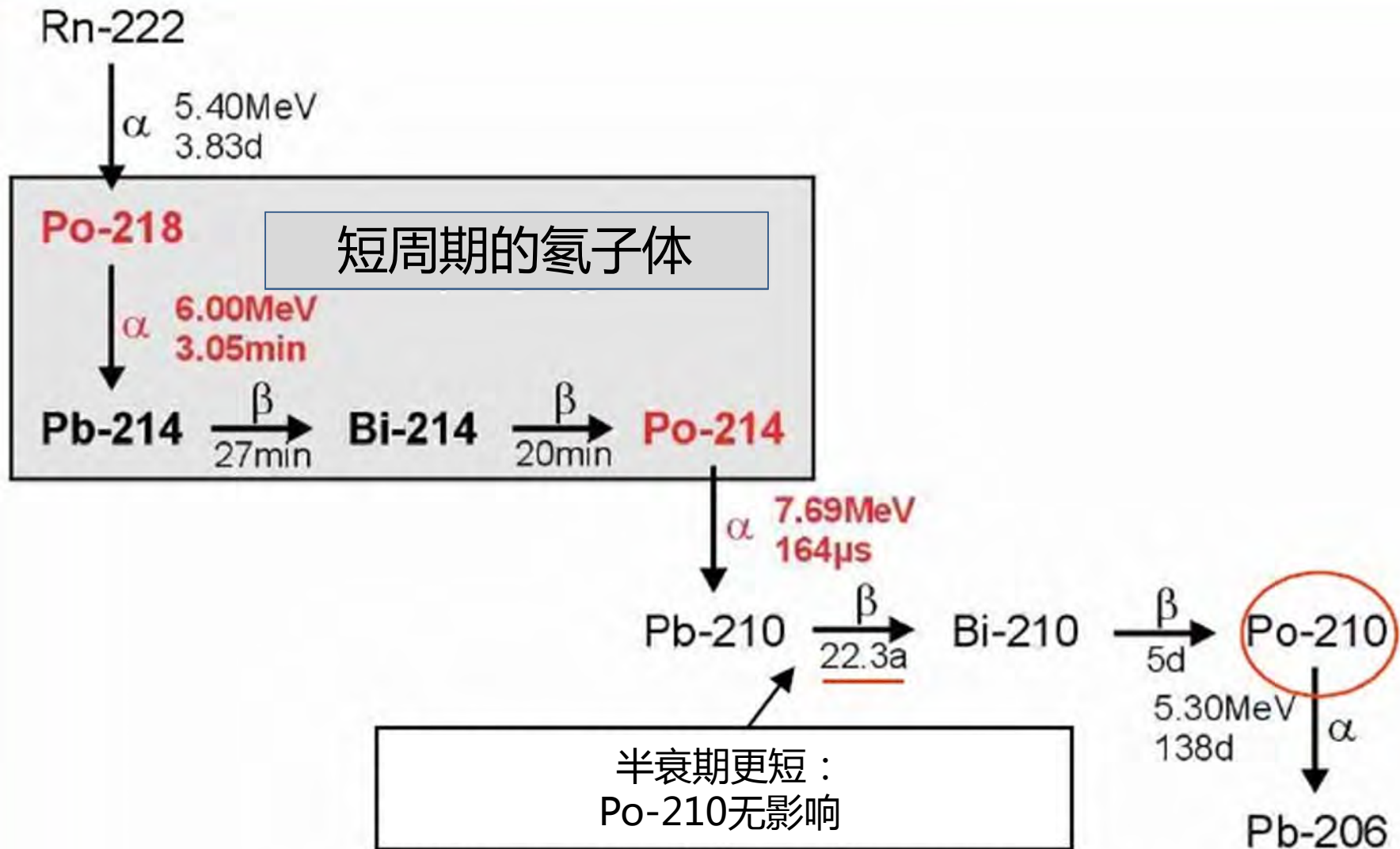
Am-241 在 5.485 MeV

U-238 在 4.197 MeV (77%)

以及 4.147 MeV (23%)

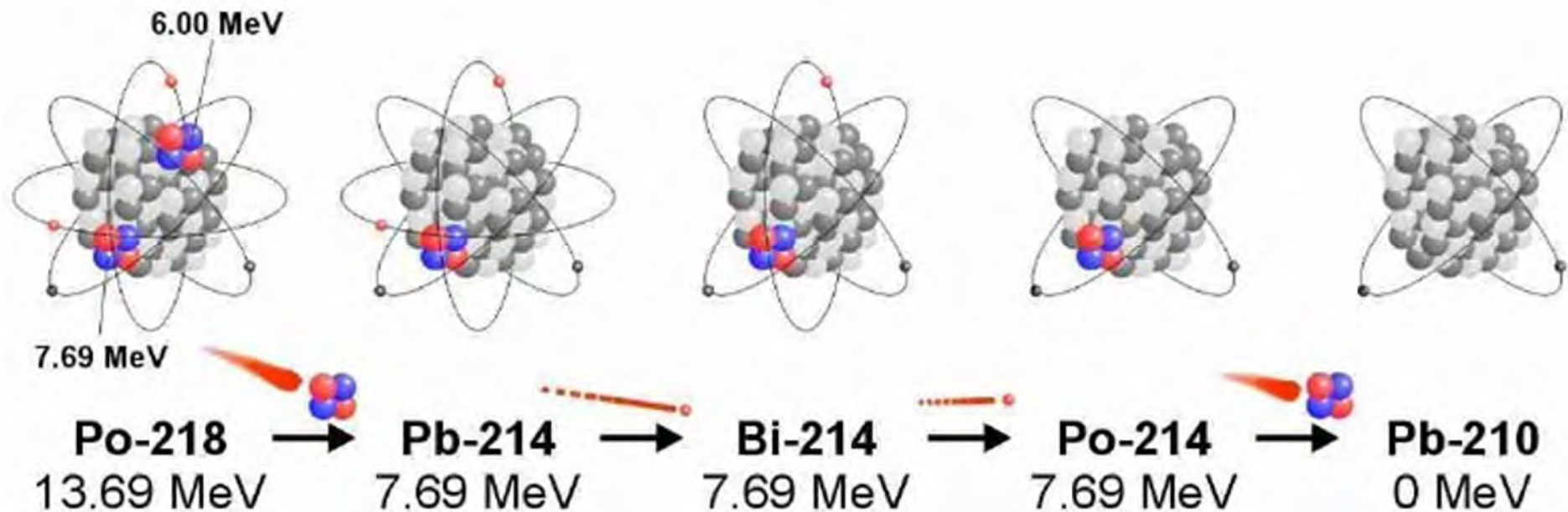


氡 (Rn222)衰变链

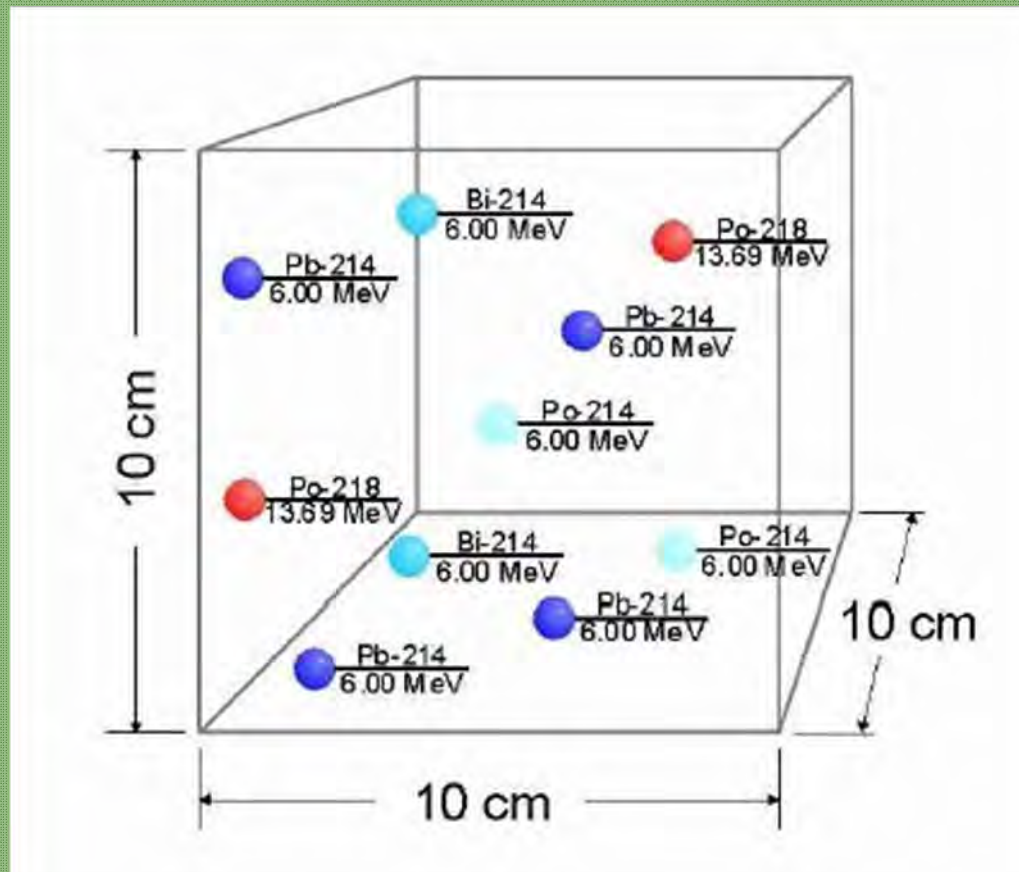


α 潜能-PAE

- ΣE_{α} (任何氦的子体 $\rightarrow$ 铅-210)



在空气中任何子体混合物的 α 潜能浓度



Bi-214, Po-214
 Σ (PAE)
Po-218, Pb-214
空气体积

α 潜能浓度 = 75.38 MeV/升

α 潜能照射量

吸入及沉积氡子体的数量一般取决于：

- 1.呼吸气体的 α 潜能浓度；
- 2.一个人暴露在 α 潜能照射量中的时间长短。

这个浓度可以用以下关系式表示：

$$\alpha\text{潜能照射量} = \alpha\text{潜能浓度} * \text{时间}$$

α 潜能照射量在个人肺部的沉积过程及影响与个体机能（呼吸频率以及个体的大小）以及粒径大小也有关。

剂量系数及剂量当量

剂量系数D定义如下：

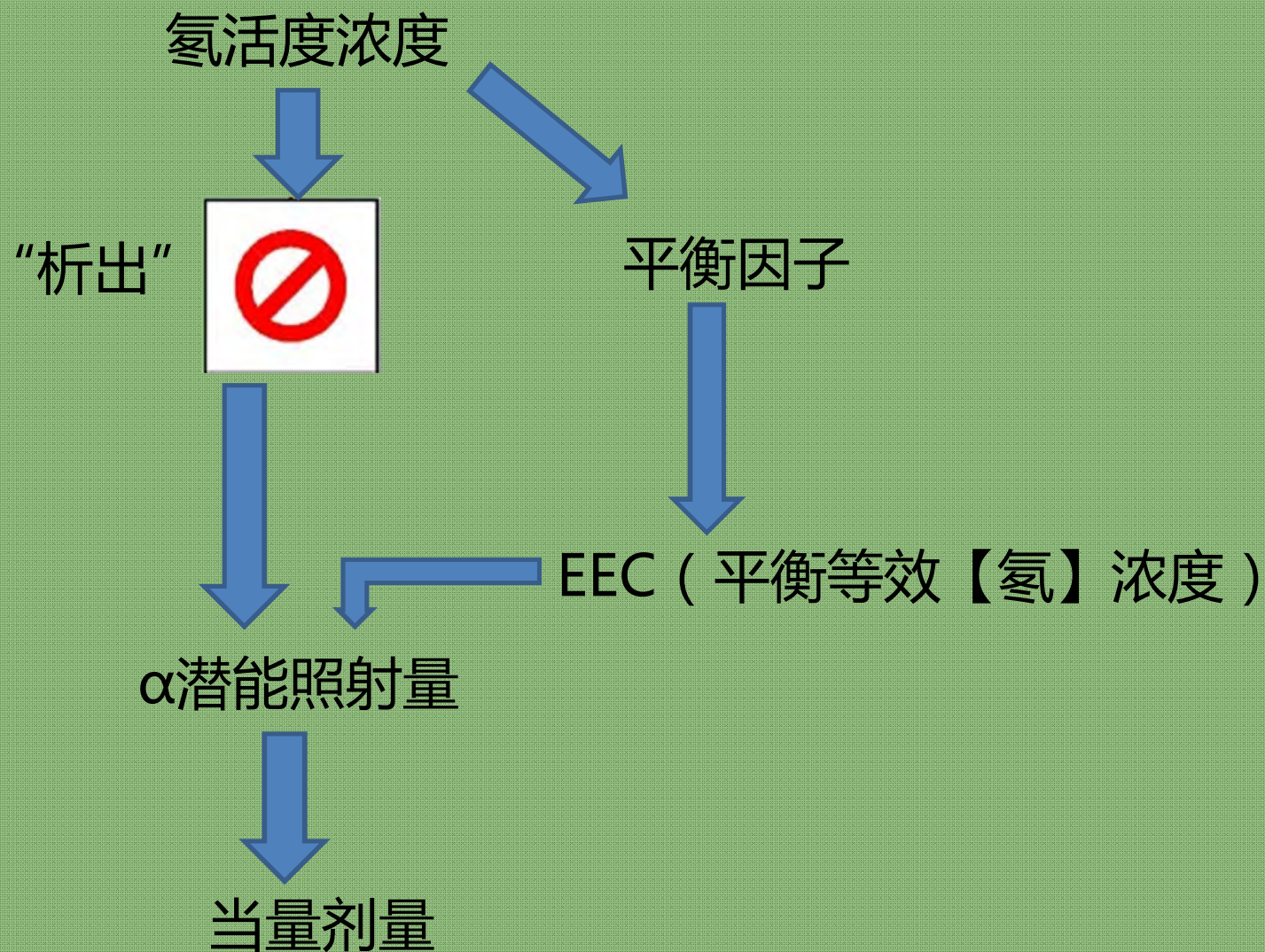
D是PAEE与生物影响之间的关系因子

它可以被以下关系所描述：

$$H = \alpha \text{潜能照射量} * D$$

对于个体而言，衡量影响的是剂量当量而不是仅考虑个体所受辐射的剂量

氡气体及子体



辐射当量

假设没有“析出”  氡及其子体的辐射当量则可以表示为：

任何具有衰变链核素的原子，必须经过4-5个具有最长半衰期核素的周期后，其生成数与衰变数达到平衡的条件，因为：

$$N = A * T_{1/2} / \ln 2$$

具有较长存在周期（半衰期）核素的粒子数N的增加与较短存在周期核素相当  由此可判断出不同的粒子数

对于一个氡子体与氡相等的环境中，由于每一个核素的原子数N可以计算，因此可以得出 α 潜能浓度。

平衡因子F及平衡当量氡浓度

辐射当量不会因为氡和它的子体而给出，因为有“析出”的影响。需要一个当量与非当量的关系。

$$C(\text{Radon}) * F = \text{EEC}$$

对于任何非当量环境真正氡的浓度
用PAEC

计算一个假设环境当中变动的氡浓度
(EEC) 与PAEC相同

F是在空气中氡与子体的比例

F的范围是从 0-1

F的典型值：

室内正常通风场合 0.3-0.6

有灰尘或雾的大房间 0.8

小值的通风场合 0.1

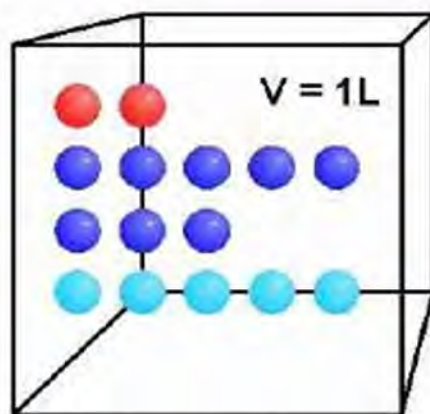
户外 0.7

平衡（当量）等效（氡） 浓度（EEC）

任何混合的氡
子产物的 α 潜能浓度

$$\frac{N_{\text{Po-218}}}{N_{\text{Pb-214}}} \neq \frac{1}{\frac{8.79}{6.53}}$$

混合物的当量等效浓度



PAEC = 105.5 MeV/L

=

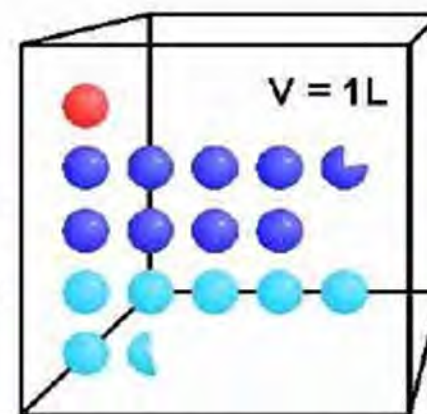
动态混合氡子产物
在辐射当量的 α 潜能浓度

$$\frac{N_{\text{Po-218}}}{N_{\text{Pb-214}}} = \frac{1}{\frac{8.79}{6.53}}$$

$$C_{\text{Po-218}} = C_{\text{Pb-214}} = C_{\text{Bi-214}}$$

例子

2x	Po-218	1x
8x	Pb-214	8.79x
5x	Bi-214	6.53x



PAEC = 105.5 MeV/L

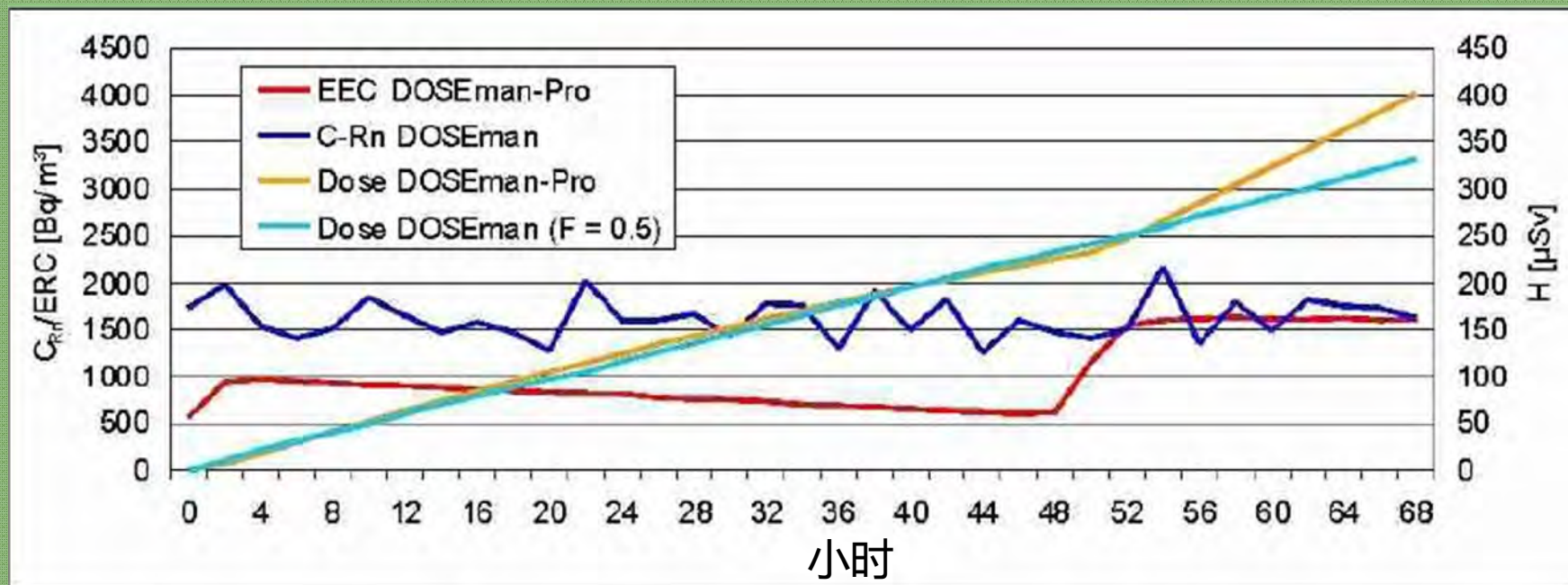
剂量的计算依据——氡还是氡子体？

子体测量

$$H = EEC * t * D$$

氡的测量

$$H = C_{Rn} * t * F * D$$



物理单位SI和US

放射性	Bq (贝克)	Ci (居礼)
放射性浓度	Bq/m ³	pCi/L
α潜能浓度	J/m ³ or MeV/m ³	WL
照射量	Jh/m ³	WLM
剂量	Sv (Sievert)	rem (mrem)
剂量系数	Sv/(Jh/m ³)	rem/WLM
单位转换	1 Bq = 27 pCi 1 Bq/m ³ = 0.027 pCi/L 1 J/m ³ = 6.24*10 ¹² MeV/m ³ = 4.8*10 ⁴ WL 1 Jh/m ³ = 282.35*10 ⁻⁶ WLM 1 Sv = 100 rem	

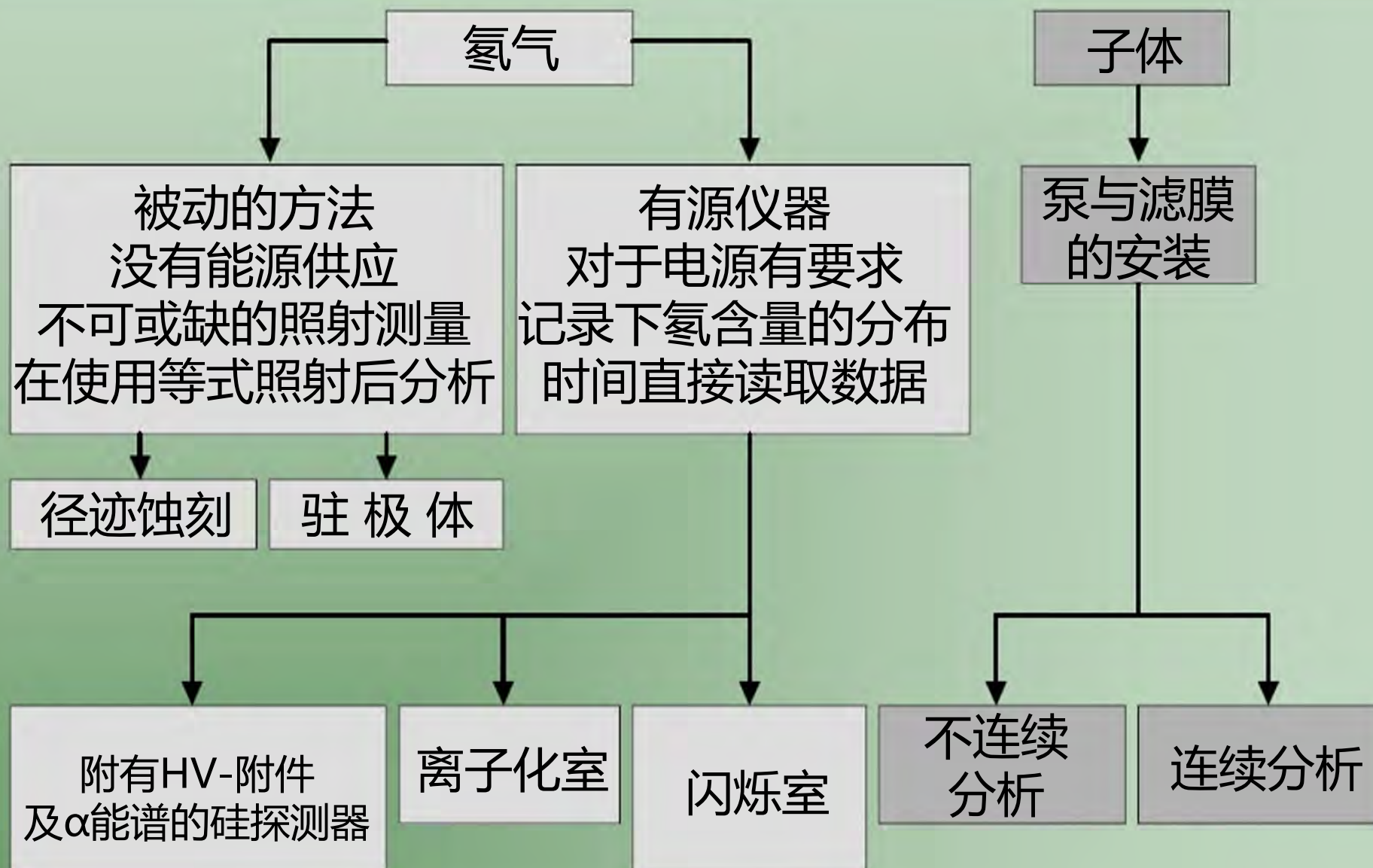
使用当量等效浓度

$$\begin{aligned}
 1 \text{ Bq/m}^3(\text{EEC}) &= 5.4 \cdot 10^{-9} \text{ J/m}^3 \\
 &= 270.27 \cdot 10^{-6} \text{ WL}
 \end{aligned}$$

国际对于氡照射的限制（例）

	住宅	工作场所
欧洲	200 Bq/m ³ (正在建造的建筑物) 400 Bq/m ³ (已建成的建筑物)	6*10 ⁶ Bqh/m ³ (WLM-月工作水平)
中国	200 Bq/m ³	
美国	4 pCi/L = 150 Bq/m ³ (EPA)	4 WLM (DOE, EPA)
国际辐射防护委员会	200...600 Bq/m ³ (1993)	4 WLM (1994)

氦及其子体的测量仪器



α 能谱—最先进的氡测量方式

- 对氡的高度敏感性
- 氡能完全校正钍的干扰
- 可以同时钍进行测量
- 对于动态浓度变化有快速的反应
- 不受钋-210的长期污染影响
- 无背景干扰修正的必要，测量的限制较低
- 在全范围的计数模式有100%的线性
- 由 α 能谱和计数总计保证的独立的测量过程和源级的质量
- 没有电磁和震动的干扰

α 射线的测量

与物质有较强的相互作用（质量，电子）

连续能量损失轨道

即使在很薄的表层也是100%的能量吸收

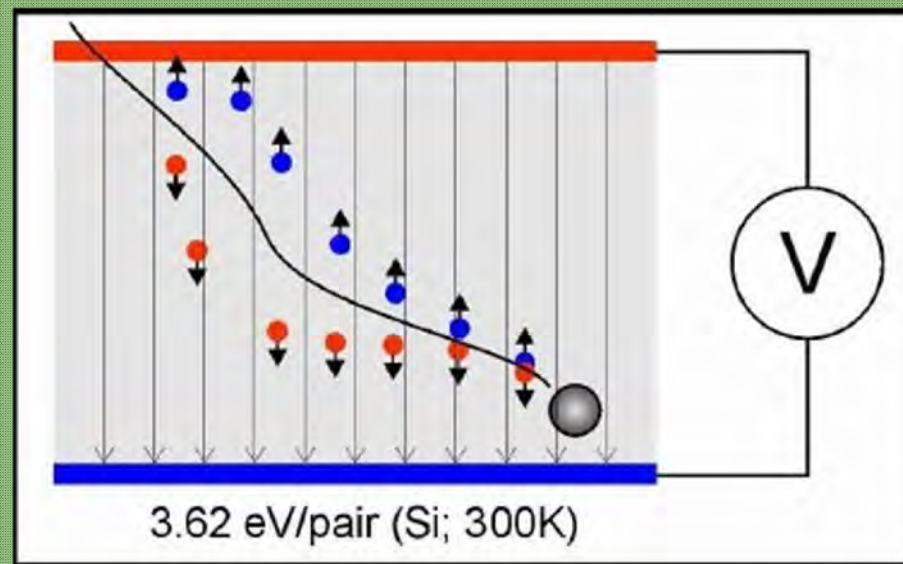
（80-100 μm 硅层）

半导体测量仪：

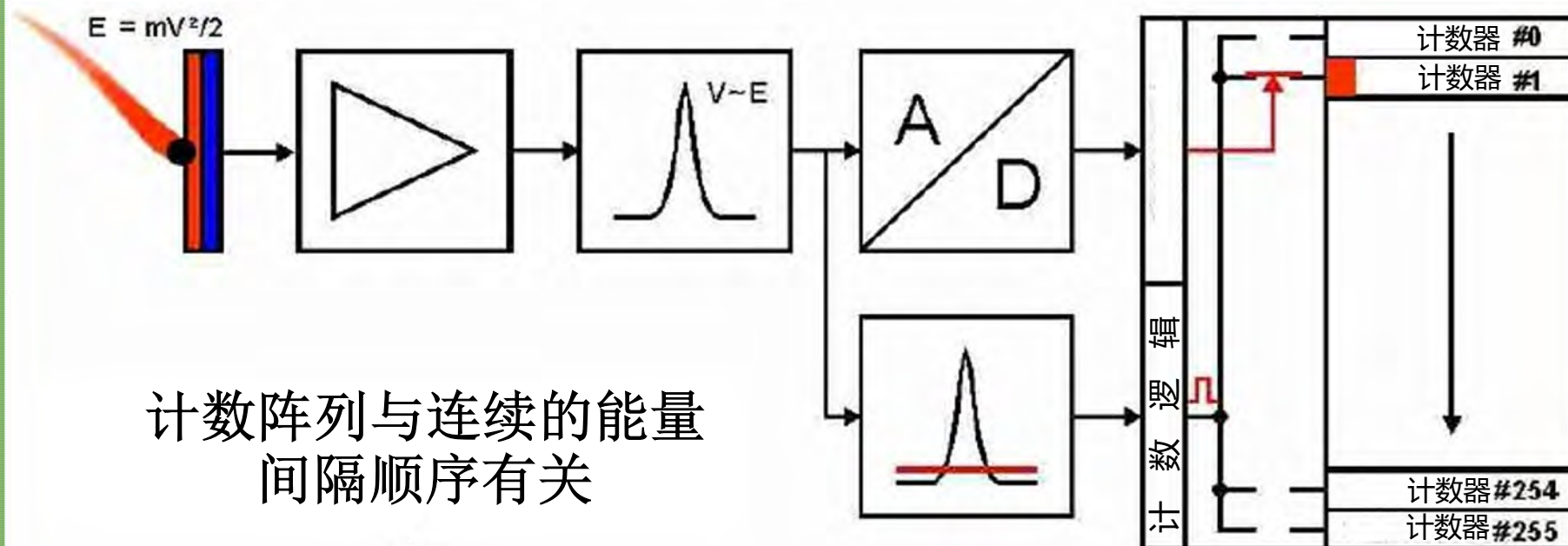
低能隙 $\longrightarrow$ 低电离能
由含有 α 粒子的静电相互作用使得电子从价带移动

到电导带，产生电子的数量/空穴对 $\sim$ 粒子能

由于电场，电子及空穴将会漂移到相对的电极



α 能谱



计数阵列与连续的能量
间隔顺序有关

α 粒子及能量的频率分布

α 能谱



理想及真实能谱

峰

由单能 α 所产生的
能谱的形状

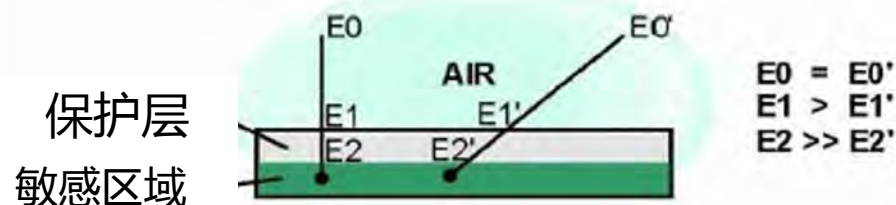
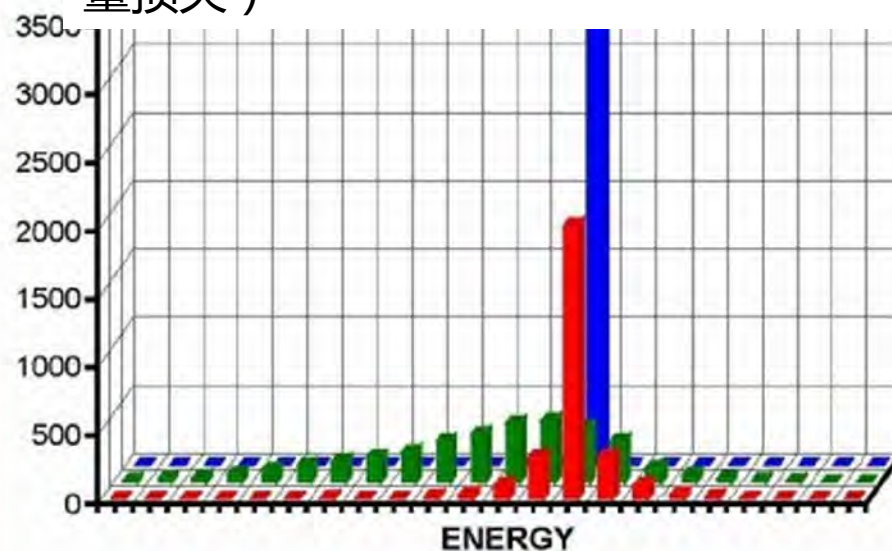
峰面积

在一个峰内的
计数数量（计数个数由
这个产生）

能谱·分辨率

随着波宽的减小而增大
（波峰间隔）

- 排放图谱（所有的粒子均有相同的能量）
- 理论测量仪反馈（电子噪音）
- 真正的能谱（在进入敏感区域之前的能量损失）



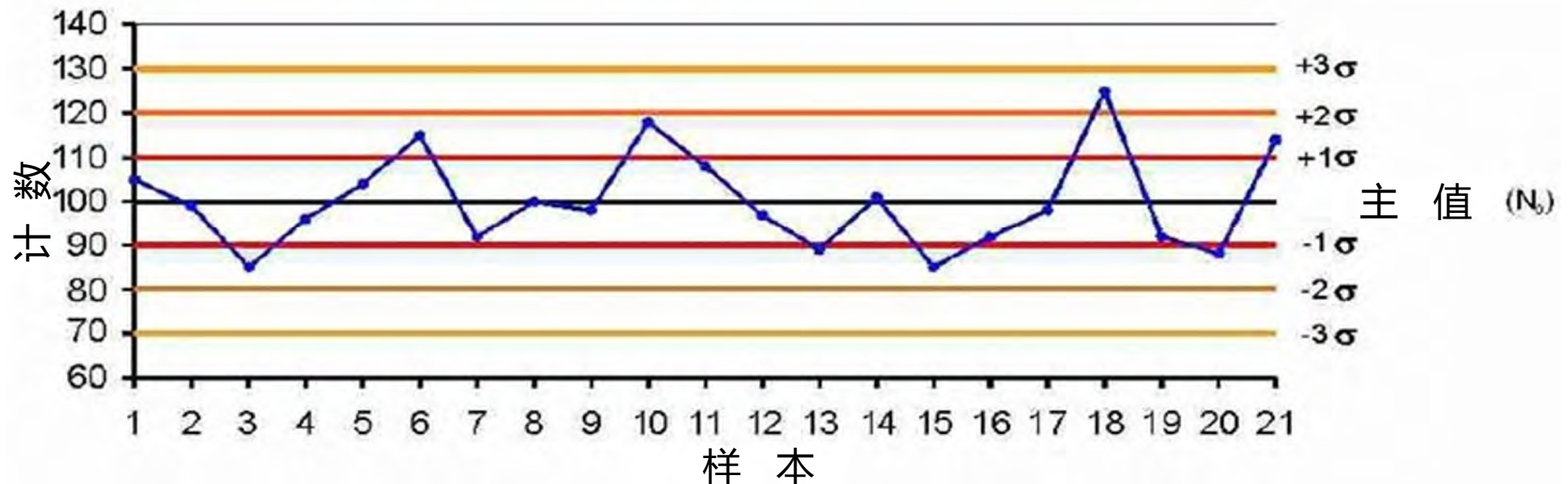
计数统计

核（活度）测量 → 计数经验

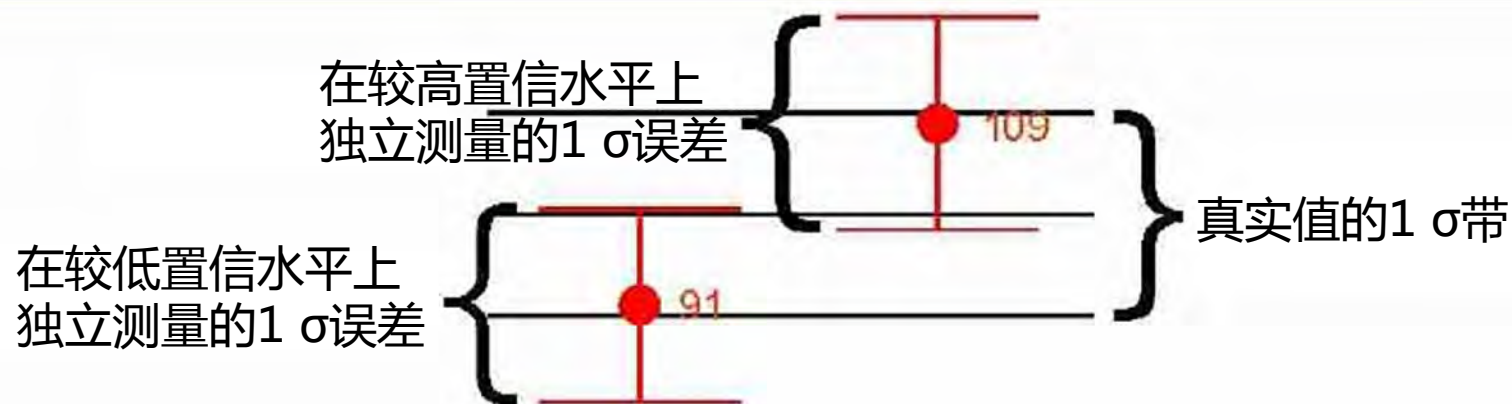
固定时间间隔检测到的计数数目是符合泊松分布的，

随即变量 $x = N_0$; $\sigma = \sqrt{N_0}$

N: 68% 在 $N_0 \pm 1\sigma$, 95% 在 $N_0 \pm 2\sigma$; 99.7% 在 $N_0 \pm 3\sigma$

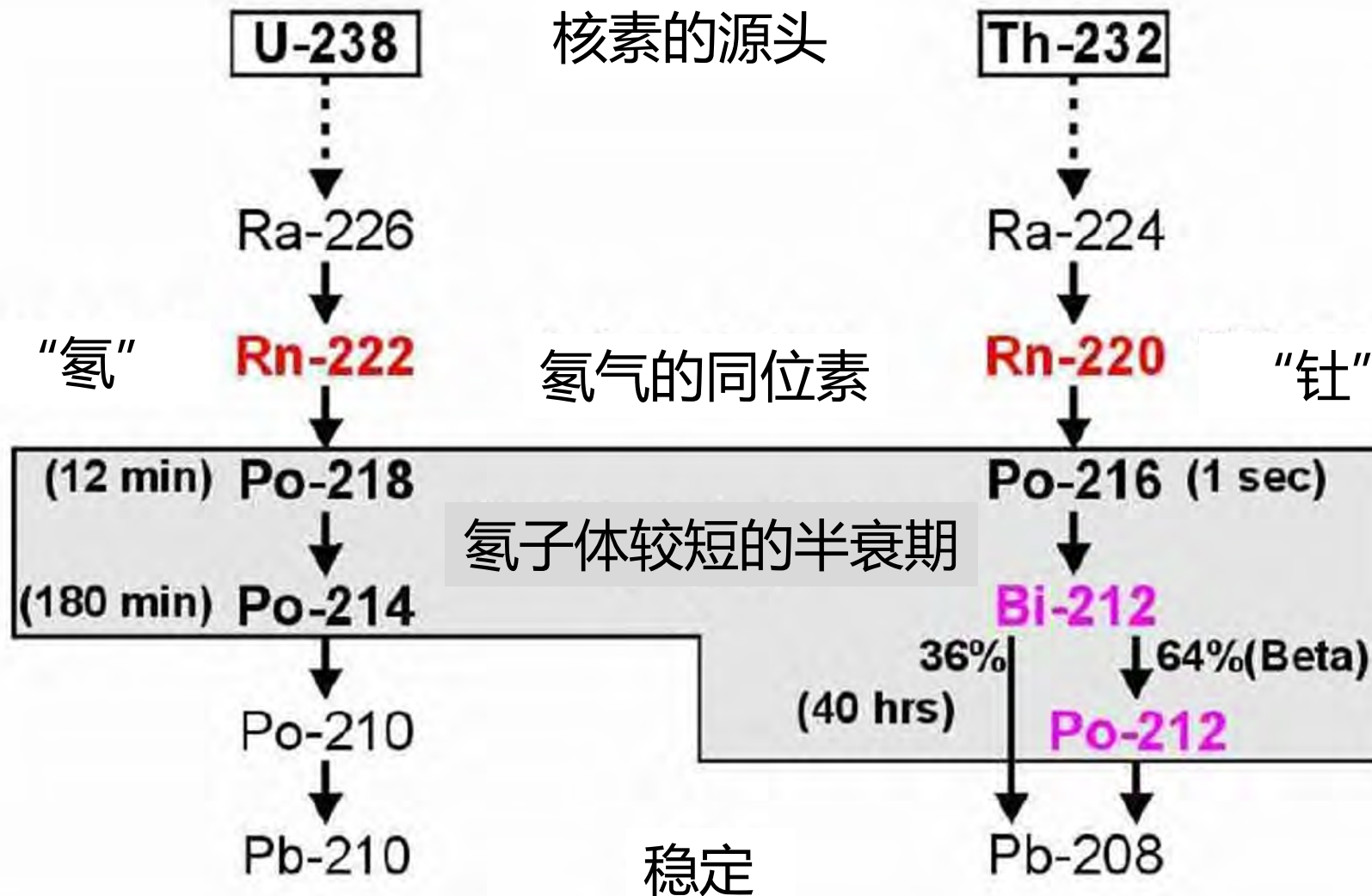


信号误差测量

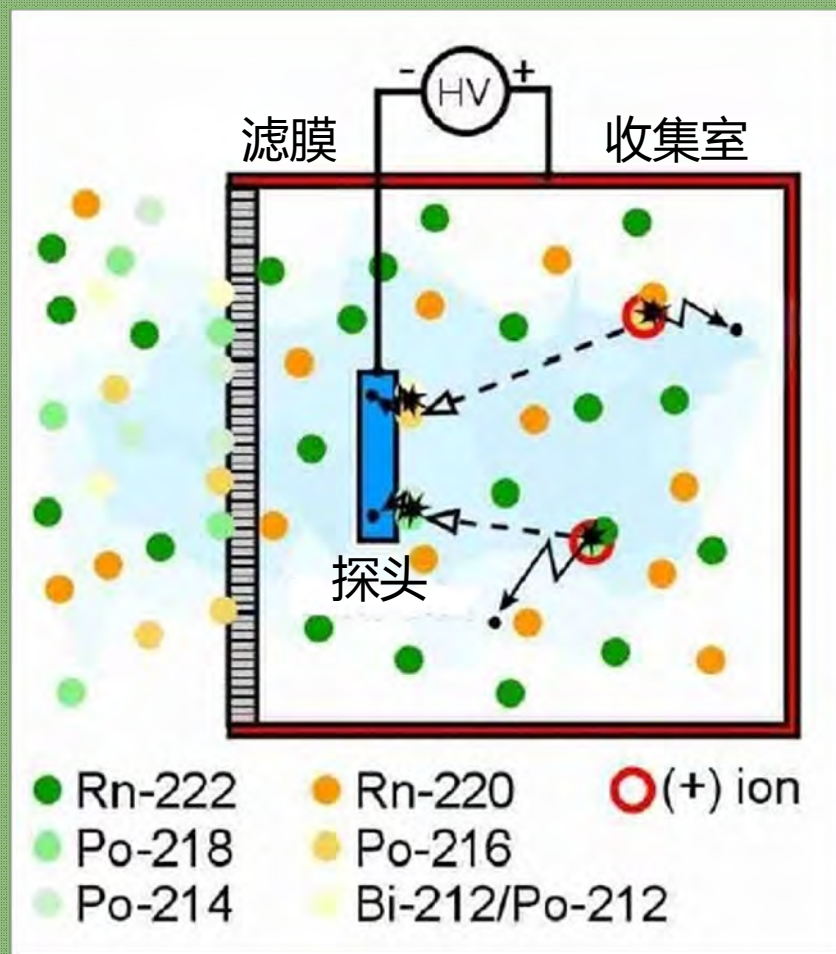


在1 σ 带中独立测量的平均值大约为68%
被1 σ 覆盖的独立测量误差的可能的真实值也为68%！
对于每一个测量的统计误差以及置信区间必须说明！
总的来说, 如果不另加说明, 核仪器使用的是1- σ 置信区间。

氦的自然衰变链



氡室的操作



滤膜的作用是防止氡子体从周边空气中进入。

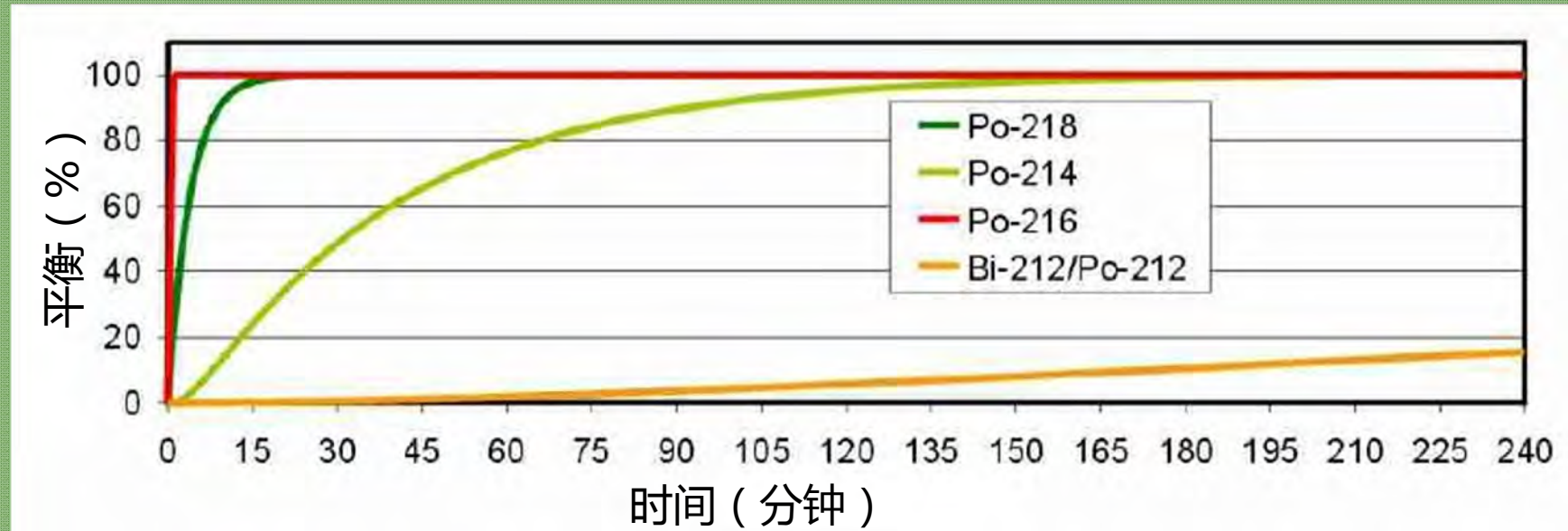
氡/钍的衰变产生了正电荷钋-218/钋-216 离子。

离子由电场力收集到探头表面
 α 粒子由钋-218/钋-216的衰变产生，同时他们的子体将有很高的机率被检测到。

对于每一个核素的收集和衰变过程需要4个半衰期之后才有当量平衡状态。

在探头表面上的子体活性与空气中氡/钍的浓度成正比。

氦室的响应步骤



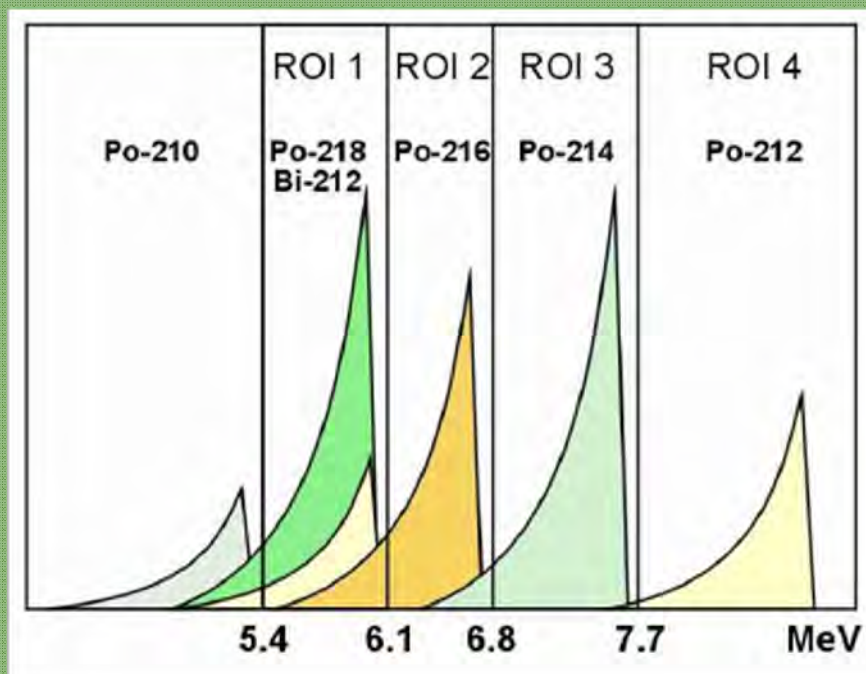
氦的计算仅基于钋-218（快速模式）或钋-218和钋-214（慢速模式）

由于铋-212及钋-212的衰变速度较长，钍的计算仅仅基于钋-216

快速模式：短的响应时间。

慢速模式：增加响应时间，但提供了双倍的统计计数。

α 能谱的核素分离



使用MCA（多道分析器）连接检测仪获取 α 能谱；
定义4个感兴趣区域以及对应核素；
每个感兴趣窗口区域内，记录所有衰变计数事件；
计算各个核素的计数总和，以及其左部的拖尾，以及Bi-212覆盖在感兴趣区域1内的部分。

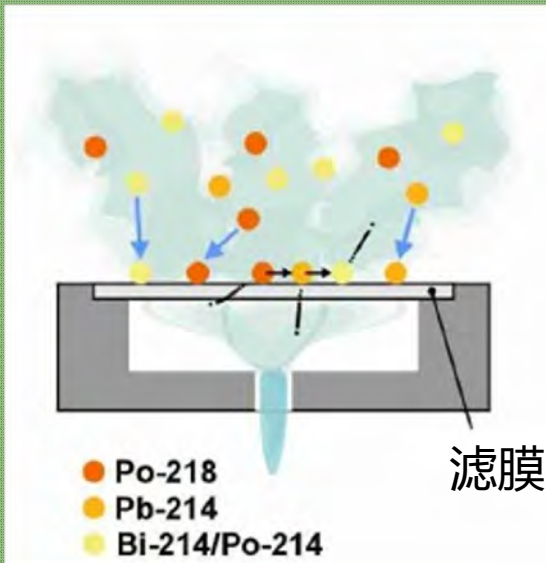
拖尾:

拖尾是一个在感兴趣区域中已知的部分，由于测量仪常数造成的干扰峰。这部分干扰峰应当从感兴趣区域中去除。

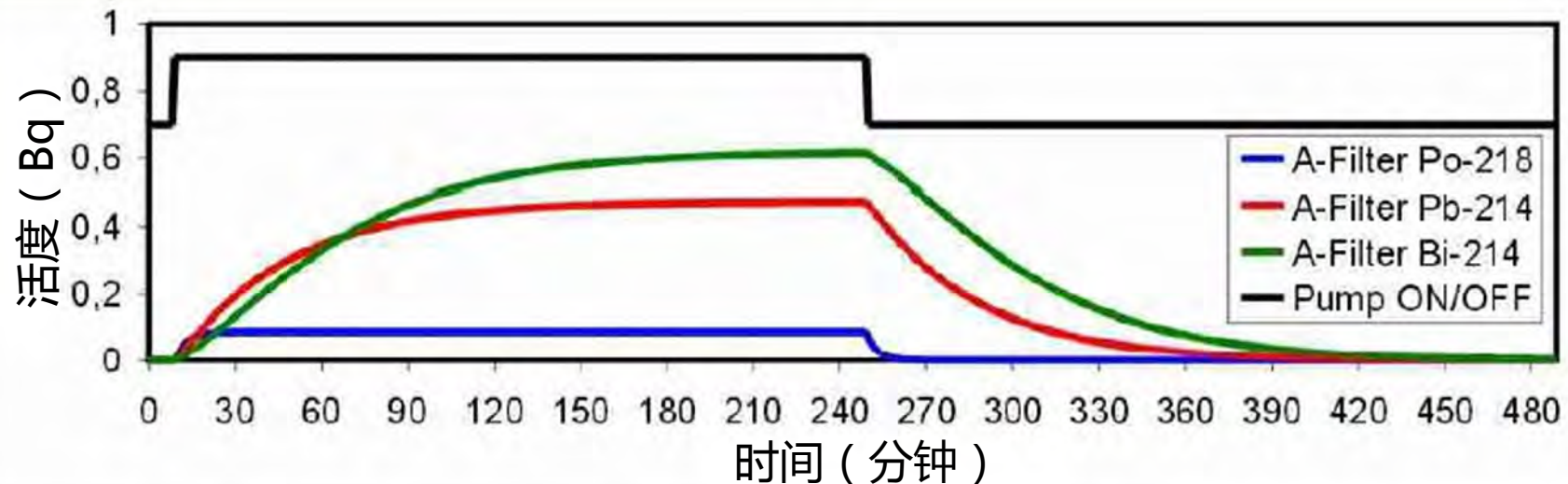
铋-212:

铋-212的总和将由不受影响的钋-212以及感兴趣区域4也可以在感兴趣区域1中除去的峰区来计算。（钋-212与铋-212的比例始终是1:1.78）

子体采样头的操作

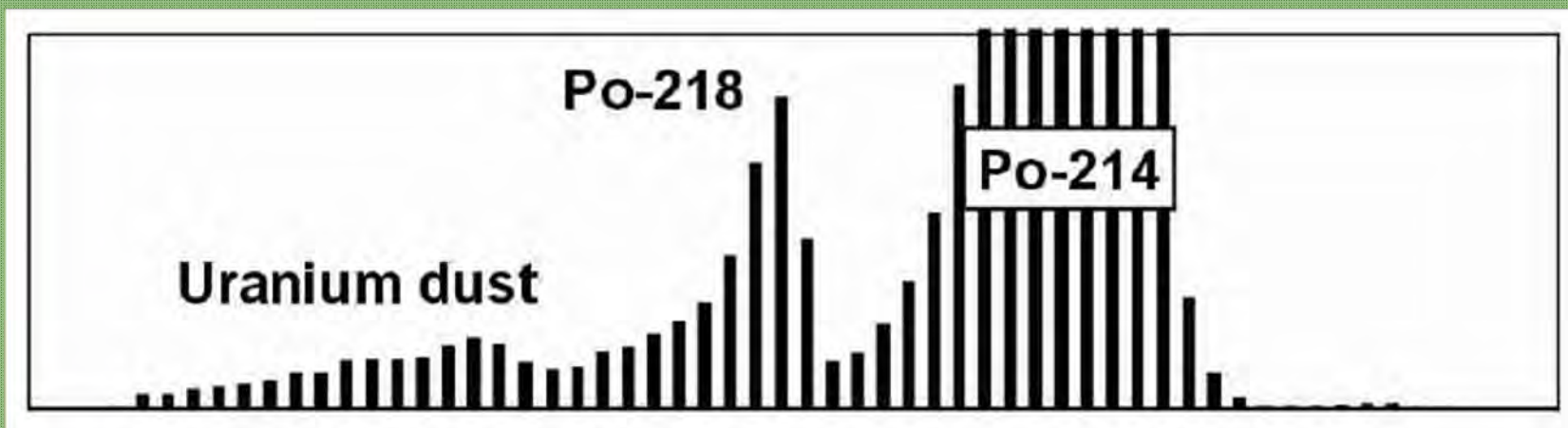


在滤膜上采集氡的子体；
在采集和衰变后约3小时达到平衡；
滤膜上所产生的 α 活度，钋-218以及钋-214将与 α 潜能浓度成比例（采集到的铅-214和铋-214构成钋-214的活性增加）



子体采样的几点说明

- Po-218是一种快速的同位素指示剂
Po-218 达到平衡需12分钟-这意味着可对 α 潜能浓度进行快速预警
- 关闭泵后再进行滤膜分析
...以保证所有收集到的气溶胶的照射量计算的100%精确性
- 利用滤膜形成能谱，进行LLRD（长半衰期衰变子体）的分析



氡的测量

在建筑物中的氡
(风险评估)

- 活性氡及其子体被动采集法的监测

在工作场所的氡
(放射量测定)

- 活性氡及其子体被动采集法的监测

空气质量检测

- 活性氡及其子体的监测

调查建筑物地面
特殊应用
(地理调查 , 搜源应用)

- 活性氡的监测

建筑物中的氡

问题:

氡的浓度是受外部因素影响的，比如通风、天气或者压力条件。即使100个因素中的一个变动也是有可能的。

“初步检查” (综合评述)

测量证明上升的氡照射量是否如期望值一样；

简要说明样品的采集地；

一小时到一天的样品收集时间；

氡的风险评估

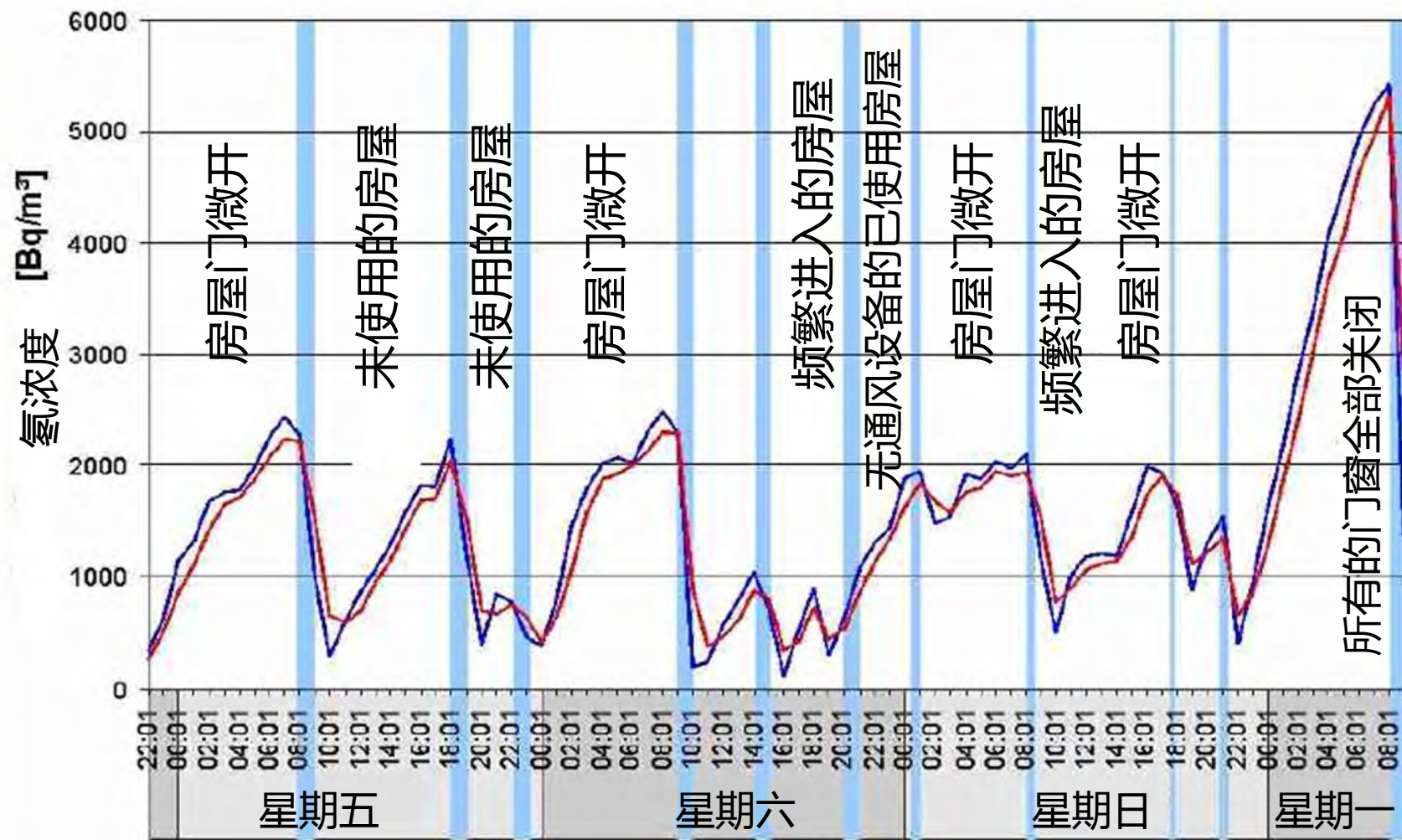
检定真实的年度照射量，包括考虑到外部因素；

找出降低氡的可能性；

若有必要，需要优化补救措施；

根据所有者的生活习惯进行多点长期测量。

氡对建筑物的影响实例

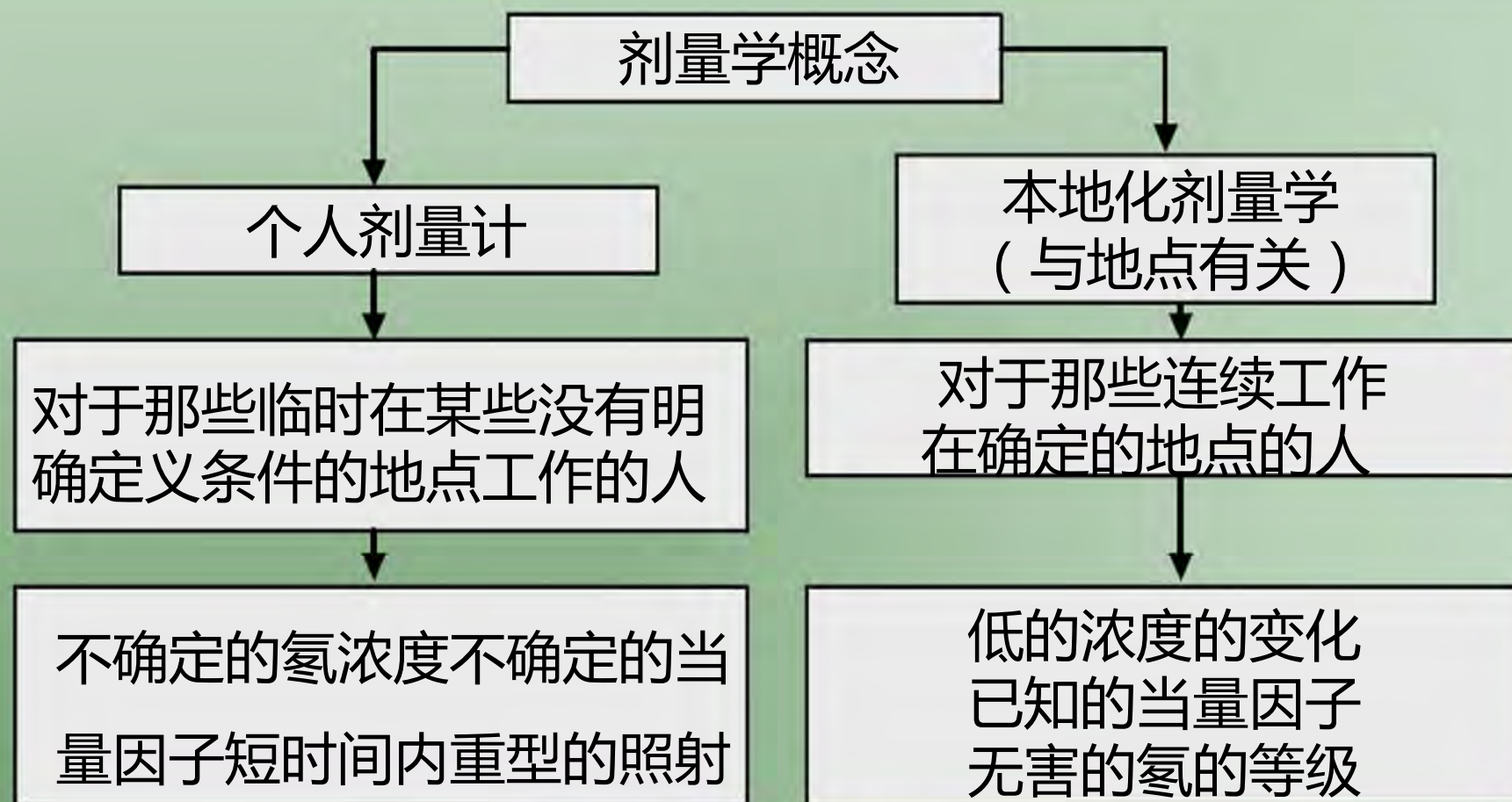


仪器选择要求

- 对于生活在建筑里的人居住生活不造成干扰
- 在测量过程中无需改动操作设备即可获得可靠数据
- 能够根据测量环境对于测量结果进行有意义的补偿
- 数据存储简便快捷，并且快速生成报告及文档
 - 没有噪音产生
 - 具备独立主电源
 - 可记录浓度的时间分布
 - 意外操作保护
 - 质量保证
 - 小巧轻便（方便邮寄最佳）
 - 价格低廉

氡对于工作场所的影响

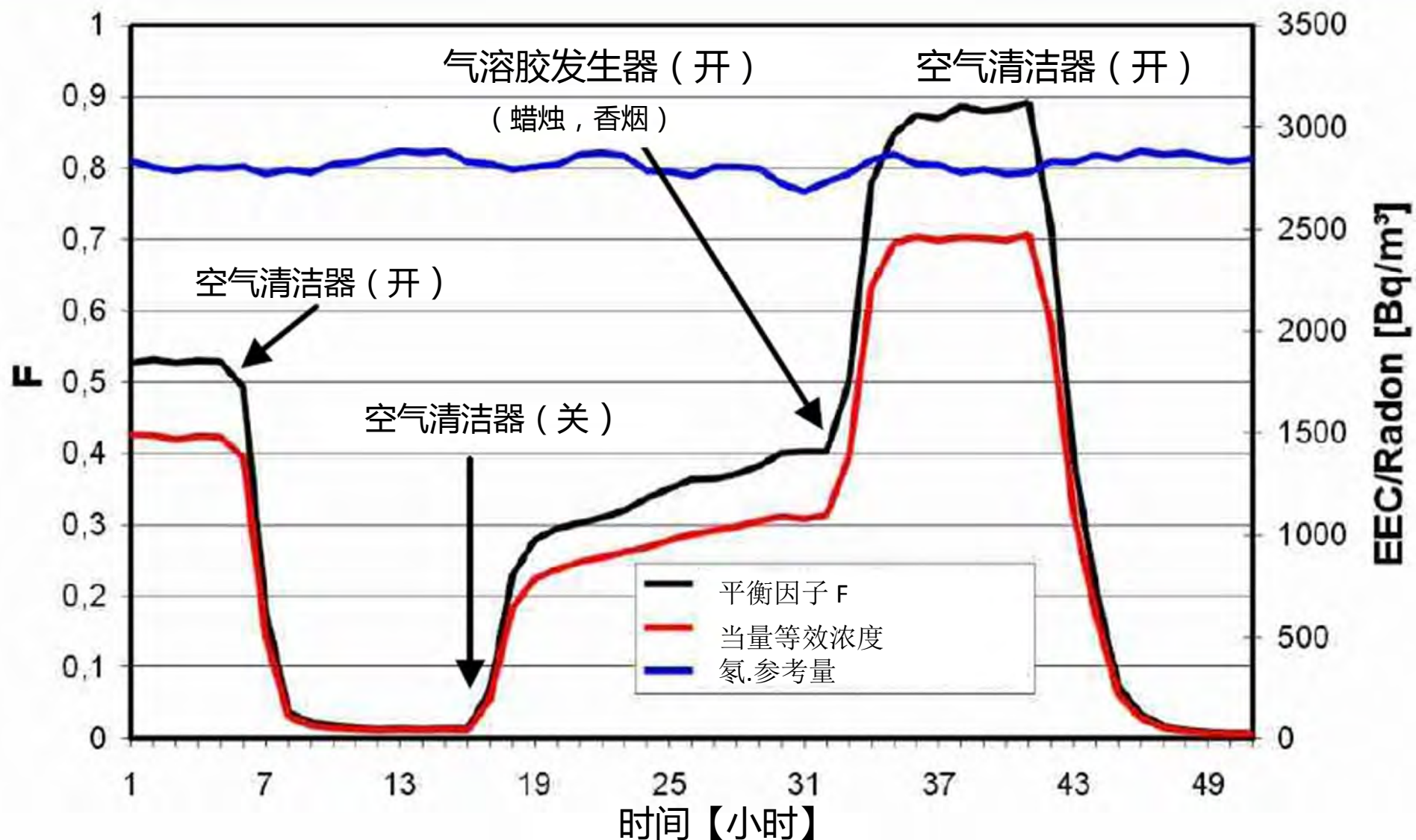
矿山，竖井，隧道，洞穴/显示洞穴，氡温泉，水利设施



氡的测量

氡及其子体的测量

条件改变的工作场所



建筑地下部分的评估

- 从地下土壤扩散到建筑物中是使氡浓度上升的最为普遍的原因，调查显示：从最开始就进行有关于氡的防护有助于减少花销；
须在土壤中钻孔1-2米深，在表面对坑洞进行密封，就可以测量氡的潜能；
要求在尽量短的时间内使用检测仪快速简单的得出不同的各种测量结果，建议使用一台有内置泵的仪器采集样品；
钍是土壤中较容易得到的物质，不要使用没有 α 能谱的仪器。

谁需要氡及其子体的测量

