

使用 RTM1688-2 进行钍射气测量

版本：2007.7

能谱法是目前唯一可实现氡/钍连续以及即时测量的方法，RTM1688-2 即是一台嵌入了能谱法的测量仪。

将短寿命子体吸收到半导体探头的表面，并根据其射线能量分辨单个核素。但与此同时也存在一些其他核素粒子影响仪器的测量结果，我们必须了解这些核素粒子以求对混合氡/钍气体进行精确测量。

物理知识背景

氡/钍气体衰变分别立即释放出带电粒子 Po-218 和 Po-216，使用静电场将带电粒子收集在半导体探测器表面，一小段时间后，探头表面的氡子体浓度将与采样空气中氡浓度取得平衡。在一次测量过程当中，氡/钍浓度可通过一段时间内收集的氡子体衰变计数信号计算得出（计算放射性强度）（可参考 AN-003）。然后采用 α 能谱分辨各种子体核素，能谱中将出现以下核素种类：

Rn-222 衰变链

Po-218，衰变粒子能量 6.002MeV

Po-214，衰变粒子能量 7.687MeV

Rn-220 衰变链

Po-216，衰变粒子能量 6.778MeV

Po-212，衰变粒子能量 8.785MeV

Bi-212，衰变粒子能量 6.050MeV 和 6.080MeV

能谱中将无法看到气体氡（5.49MeV）和钍（6.288MeV）的谱峰，因为他们并没有被收集在半导体表面。

理想能谱的单个核素应该为一条单能直线，也就是说在能谱中，所有计数都在一个道上；但是，实际情况却并非如此，实际谱是在多个道址形成峰形而不是一条直线，峰的形状与高

斯函数类似，在其左侧有明显的平滑上升曲线，我们称其为“Tailing” - 拖尾。

高斯形态是由探头和放大器的电子噪声产生的结果，由于其物理固有属性，不能完全剔除；Tailing 的形成要源于 α 粒子在运动过程中经过探头的非灵敏保护层时的能量损失。保护层的厚度及探头的尺寸决定了 Tailing 的形状。由于氡钍子体沉积在半导体探头表面，衰变粒子的射程取决于粒子进入灵敏区的发射方向。

为了给衰变的粒子分别分配计数区域，需预先定义每一个核素的感兴趣区 (ROI=region of interest)，ROI 上限值应该稍大于发射粒子的能量值，而 ROI 下限值则应该选择上一个具有更低能量的 ROI 的上限值，这样的定义方式能保证所考虑核素的绝大部分粒子都落在该 ROI 内，而且只有更高能量粒子的 Tailing 才对其计数有影响。

我们定义以下几种 ROI 及其对应核素：

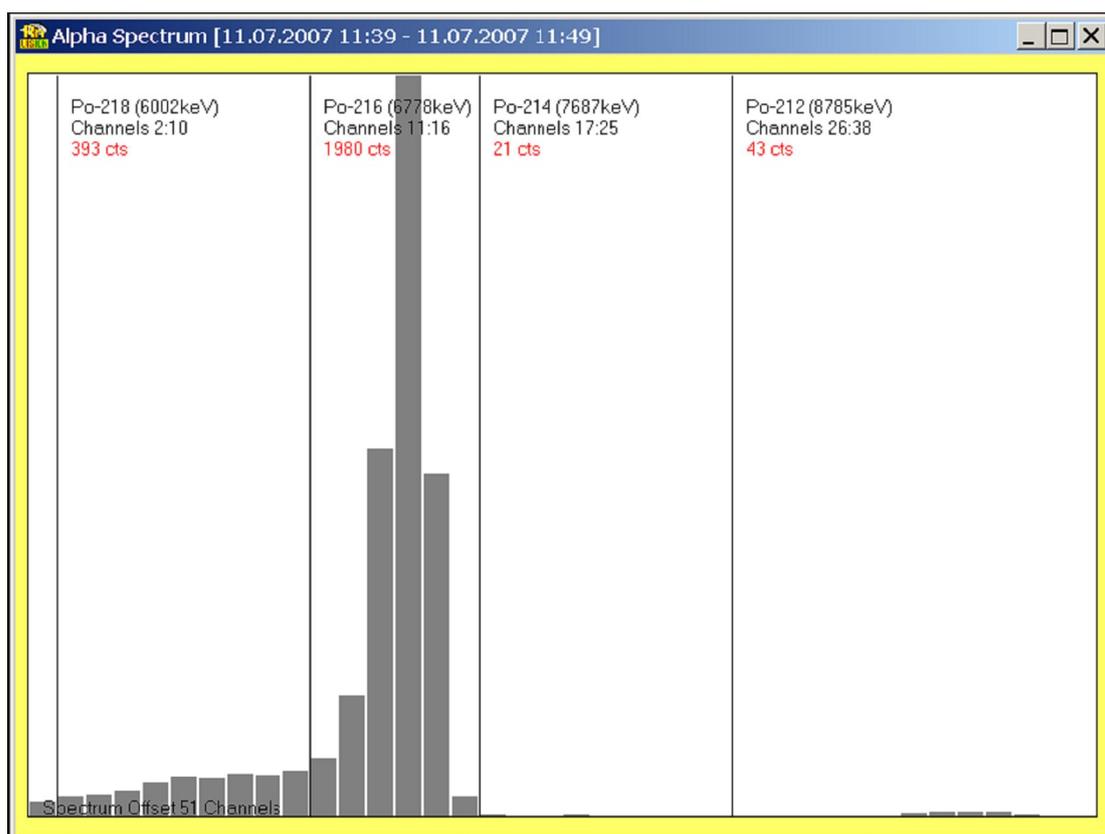
ROI Po-212：该 ROI 不会受到其他核素的影响，因为其包含了核素最高能量的区域，在氡/钍测量没有使用 Po-212 的数据，仅仅只是作为计算影响因素而存在。

ROI Po-214：除 Po-214 衰变粒子计数以外，Po-212 衰变粒子计数有 5% 落在此区域内，如果使用“slow”模式，在氡测量过程中，高 Po-212 衰变粒子计数将反映在本底中；

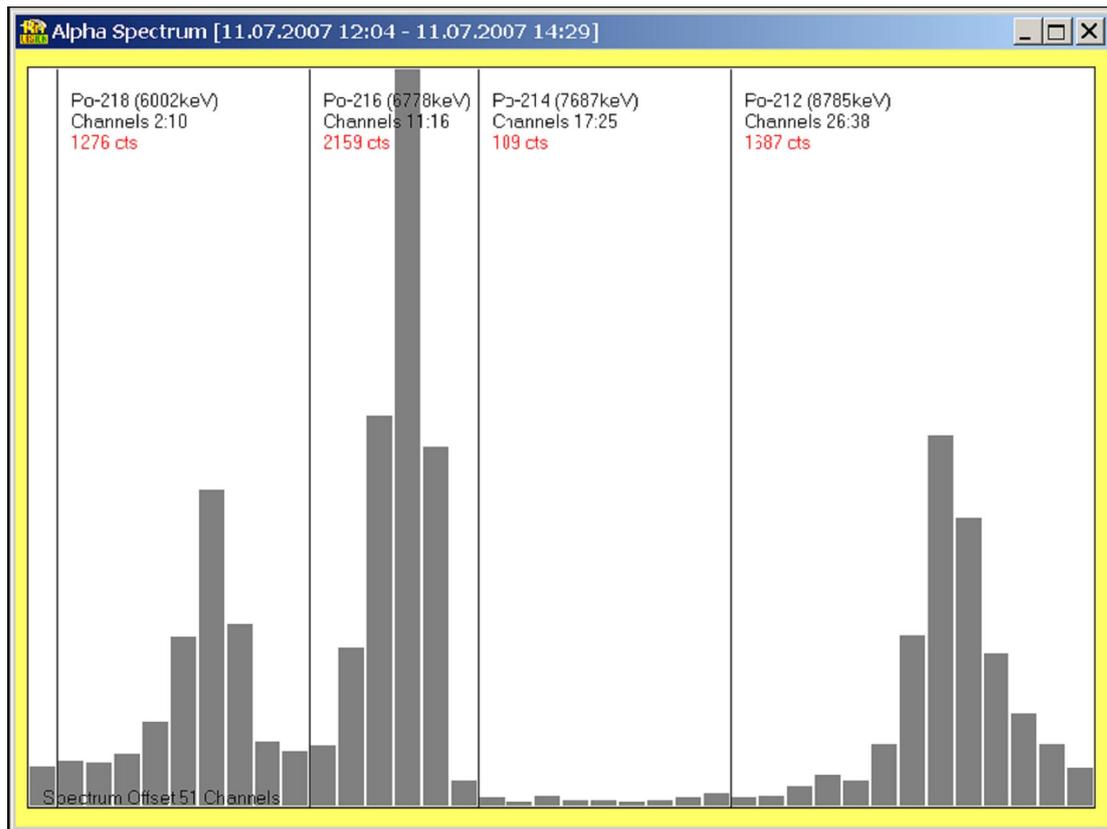
ROI Po-216：在此区域内，除了 Po-216 衰变粒子计数之外，另外还有 8% 的 Po-214 以及 2% 的 Po-212 衰变粒子计数落入此区域内，Po-214 和 Po-212 放射性的增大将影响钍的测量本底。

ROI Po-218：区域包含 Po-218 和 Bi-212 计数，两种衰变粒子能量几乎相等 (6.002MeV 和 6.050/6.089MeV)，因此想使用 α 能谱对其分辨是不可能的；另外，将有 20% 的 Po-216 衰变粒子计数落入此区域内，高强度的 Po-216 和 Bi-212 影响氡的测量本底。

以下图片充分描述了上述情况：

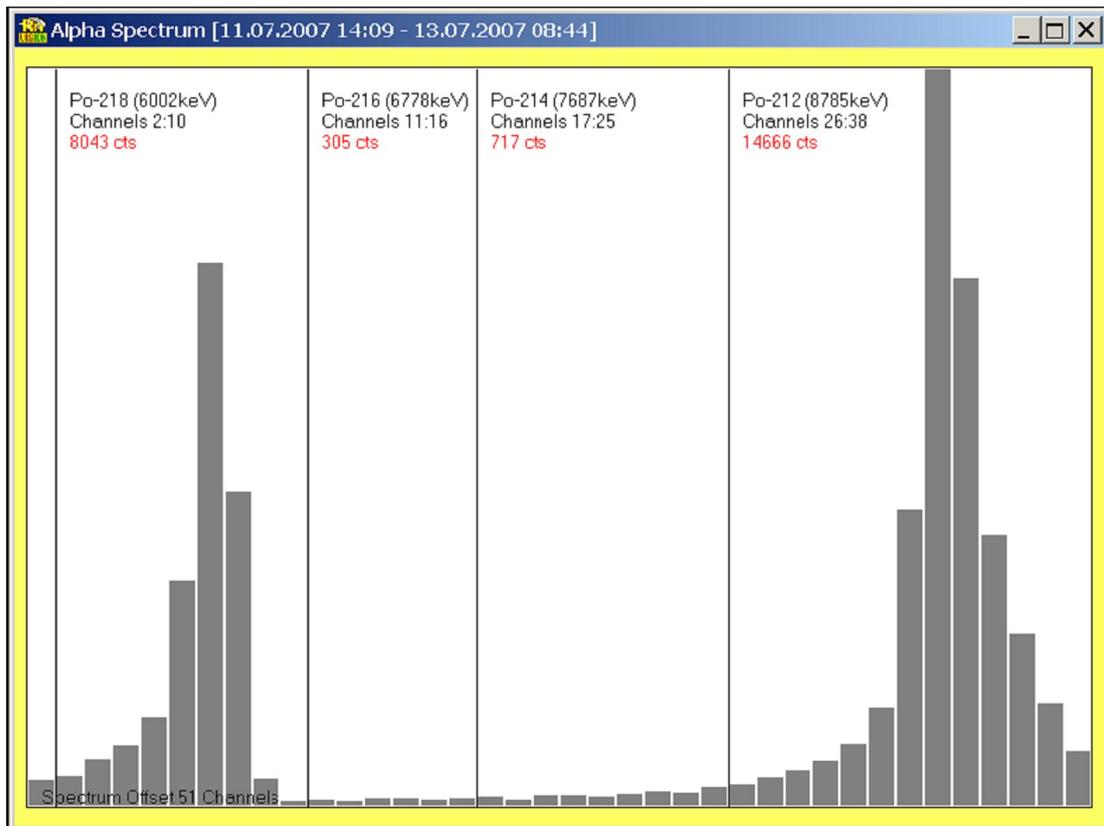


我们进行一次纯钷环境下的照射，上图为第一小时所收集的能谱。可见，只有 Po-216 的峰，这是由于在 Po-212 和 Bi-212 之前还有半衰期很长的 Pb-212 (10.6 小时)。Po-216 的谱峰所产生的拖尾，对于 Po-218 窗口的影响清晰可见。



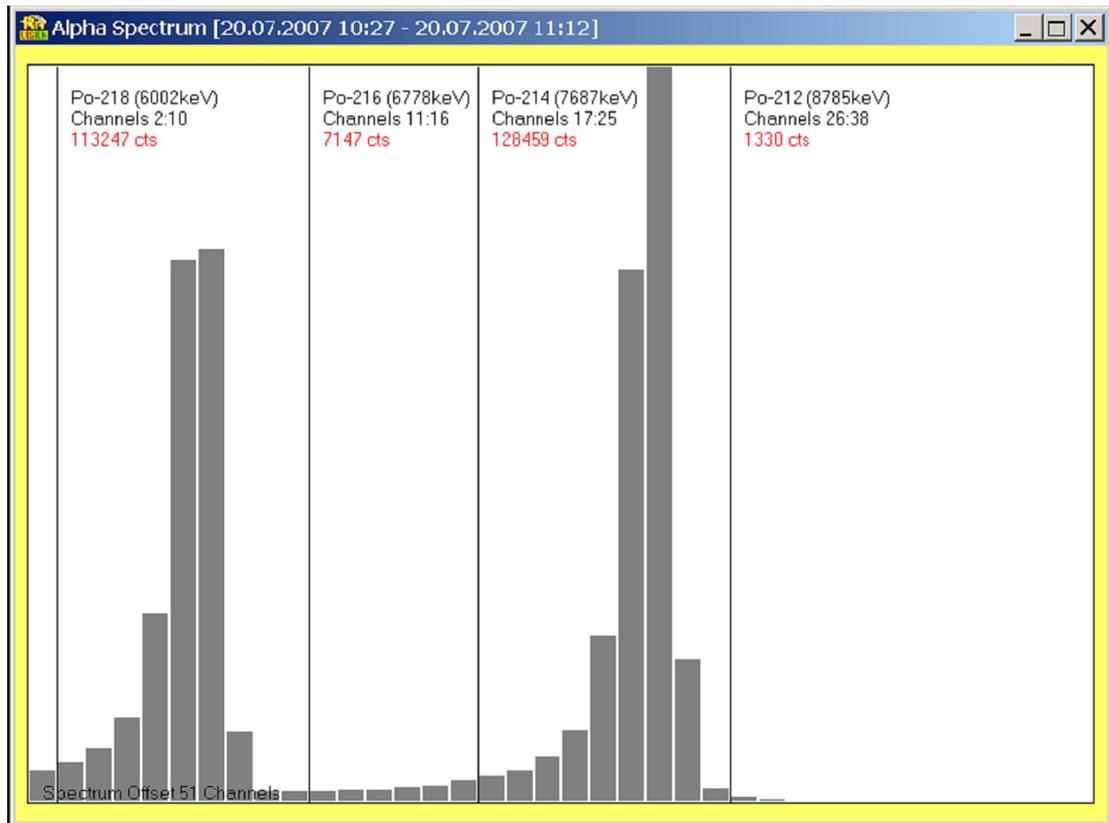
纯钍环境下的放射性平衡谱，可以清楚的看到 Po-212 和 Bi-212 的峰；并且十分容易观察到，Bi-214 衰变粒子所形成的谱峰很准确的位于 Po-218 ROI 的能量窗口区域内。

Po-212 峰右边侧的滑坡由 Bi-212 之前所发生的 β 衰变所形成。由于 Po-212 的衰变时间很短 ($0.3\mu\text{s}$)， α 和 β 衰变脉冲信号在此区域内重叠。



以上纯钷照射继续进行，完成后的谱图，Po-216 的峰完全消失，由于在钷照射的时间内 Pb-212 的累积效应，Po-212 和 Bi-212 的峰继续存在长达几天；Pb-212 的半衰期 10.6 小时，其子体为 Bi-212 和 Po-212。

谱中也可明显看出 Po-212 在 Po-216 和 Po-214 区域内的 Tailing。



对比平衡状态下氡及其子体能谱，Po-214 能谱影响 Po-216 的计数，Po-218 的能谱与 Bi-212 能谱相比更加靠左一些，因其能量更低。

我们可据此得出结论，在即时测量中，氡和钍之间相互干扰，需要采用适宜的修正程序。

修正程序

Tailing 可以看做是探头特定的仪器参数，在对每一台仪器进行刻度时，干扰核素对某一 ROI 的影响按照百分比例进行确定。

例如，Tailing 常数 “Tailing(Po-212 > Po-214)” 指定了在由 Po-212 引起的 Po-214 ROI3 的本底，仪器在纯钍的照射下刻度，该常数将具有足够高的精确度，在该种情况下，仅存在 Po-212 对 Po-214ROI 内的 Tailing 本底，而不存在 Po-214。

$$K_{212, 214} = 100\% * N(\text{ROI3}) / [N(\text{ROI3}) + N(\text{ROI4})]$$

N(ROI3)和 N(ROI4)实质上均为 Po-212 的计数， $K_{212, 214}$ 为 Tailing 常数。

在实际混合空气测量时，ROI3 包含了 Po-214 和一部分 Po-212 衰变粒子计数，为了分离出 Po-214 的真实计数，需要采用 ROI4 中不受影响的 Po-212 的计数进行相应计算然后进

行扣除：

$$N(\text{Po-214})=N(\text{ROI3})-\{K_{212,214}/(1-K_{212,214})\}N(\text{ROI4})$$

$N(\text{Po-214})$ 代表在 ROI3 区域内 Po-214 的真实衰变计数。

以上计算过程贯穿在所有的 ROI 计算中。

当 Bi-212 存在于 Po-218ROI 中时，则必须考虑到其固有物理关系，我们无法对两种核素进行有效分辨，但是，我们可以注意到 Po-212 和 Bi-212 之间比例恒为常数，他们由 Pb-212 的两种不同衰变方式产生而来，约 36%Bi-212 以 α 衰变的形式直接衰变，而其他 64%则以 β 的形式衰变为 Po-212；产生的 Po-212 随即以 0.298 μ s 的半衰期进行 α 衰变，因此，在任何时间内，Po-212 与 Bi-212 之间存在平衡关系，我们可以用下式计算 Bi-212 在 Po-218ROI 内产生的计数：

$$N(\text{Bi-212})=0.5625*N(\text{ROI4})$$

$N(\text{ROI4})$ 表示不受干扰的 ROI4 的 Po-212 计数。

修正的统计考虑——探测限值

由于核素的衰变具有统计特性，因此所有由于核素衰变造成干扰形成的本底均具有统计涨落，以上表达式仅表示在计数为无穷大时，得到的确定的干扰的平均值。在实际工作当中，我们所面对的是有限的计数，因此需要对计数的统计涨落进行评估，为了理清此问题，我们再次回到上一个举例中。

我们假设探头上不存在任何 Po-214 粒子，但是即使浓度、采样时间保持不变，在 Po-214ROI 内探测到的 Po-212 粒子数目也不尽相同；使用修正程序后，Po-214 计数依然有 50%的几率得到正或者负的结论，由于现实情况下不可能为负值，我们将对其修正为零；问题在于正值的部分，50%的采样周期结果显示 Po-214 计数为正值，而实际上这并不存在。

为了避免这种错误，需要通过统计误差规律计算本底的可能涨落，我们认为 ROI3 的 Po-214 的计数只有大于或等于统计涨落的范围时，才是可以接受并具有意义的。其他的正值可能出现 Po-214 计数，但却不是真实存在的。

涨落的统计性计算基于置信度的特性，置信度定义了 ROI3 区域内的 Po-212 计数不

会超过某一个值的几率，95%的置信度表示 95%的测量周期内测量的本底将低于或等于这个限值，而另外的 5%的测量周期内，落在 ROI3 内的 Po-212 计数将高于这个限值，这是很重要的：在这 5%的事件中，即使采用了修正程序，结果将依然为正数。当然，你也可以考虑扩大置信区间，但与此同时，探测到真实存在的 Po-212 的计数的几率将降低。

能够提供所需信号（本底涨落限值，在此以 Po-214 为例）的最小限值，我们称之为探测限值。

探测限值对实际测量的意义

我们将考虑以下三种情况：

案例 1：纯氦环境，不存在 Po-212/Bi-212。

Po-218 和 Po-214 的 ROI 均不受影响，每一个探测到的粒子均可以认为来自于其对应的核素，快速测氦模式下的探测限值为 Po-218 ROI 内有一个计数，慢速测氦模式下为 Po-218ROI 或 Po-214ROI 有一个计数。

Po-216ROI 由于受到 Po-214 的干扰，并且 Po-214 需要 3 小时才能与 Po-218 取得放射性平衡，与此同时，Po-216ROI 内本底涨落限值也同样升高，Po-216 的探测限值随着 Po-214 的浓度的升高而升高。

选择 95%的置信区间，就可以知道所有测量周期中实际不存在 Po-216 的贡献的事件几率为 5%。

也因此我们钷的测量限值提高了，因为钷的浓度计算基于 Po-216 的计数率。

实际不存在钷的情况下，将有约 5%的测量周期显示有钷的存在。

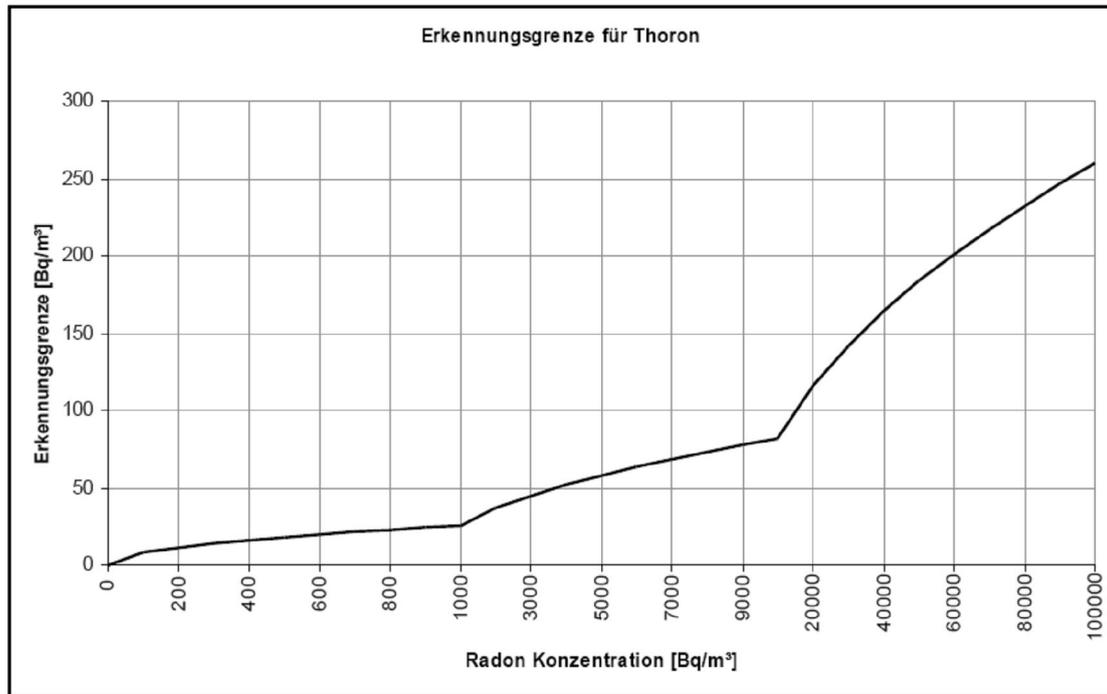


Fig. 1 Detection Threshold (2σ) for Thoron (RTM1688-2, 60 Minutes Sample Interval)

图 1. 钍测量的探测限值(2σ)(RTM1688-2,60 分钟周期)

X 轴-氡浓度, Y 轴-探测下限

案例 2 : 纯钍气体

在测量的开始阶段仅仅出现 Po-216 的能谱, 由于半衰期 10.64 小时的中间核素 Pb-212 的存在, Po-212 和 Bi-212 的能谱不会马上出现, Po-218ROI 受到来自 Po-216 的计数的 Tailing 影响, 与事件 1 类似, 随着 Po-216 计数的增大, Po-218 的探测限值将随之增大。

一段时间之后, 缓慢增长的 Po-212 在 Po-216ROI 和 Po-214ROI 中逐渐增长, 因此 Po-216 和 Po-214 的探测下限也随之增长。

但是, 最主要的问题出现在 Bi-212, 因为他的所有衰变均发生在 Po-218ROI 内, 这就意味着, Po-218 的探测下限相比 Po-216 和 Po-214 将会有很明显的上升。

我们可以得出结论: 对钍的测量来讲, 其受到来自于 Po-212 的 Tailing 影响, 探测下限将稍有上升; 而氡的测量探测下限则出现明显的上升, 对于选择快速测氡模式 (仅使用 Po-218 的信号) 是如此; 同样的情况也会发生在慢速测氡模式上, 因为其中 Po-218 的信号占据有一半的比例; 在这样的情况下, 使用 Po-214 的信号是更好的选择, 探测下限将会

相比之下低很多，因为仅仅只有 Po-212 的 Tailing 对其产生影响。RTM1688-2 在 Bi-212 的本底过高时将自动转换到该测量状态。

在对本底进行评估的过程中，我们将有 5% 的测量周期的测氡数据不为零，即使仅有钍存在。

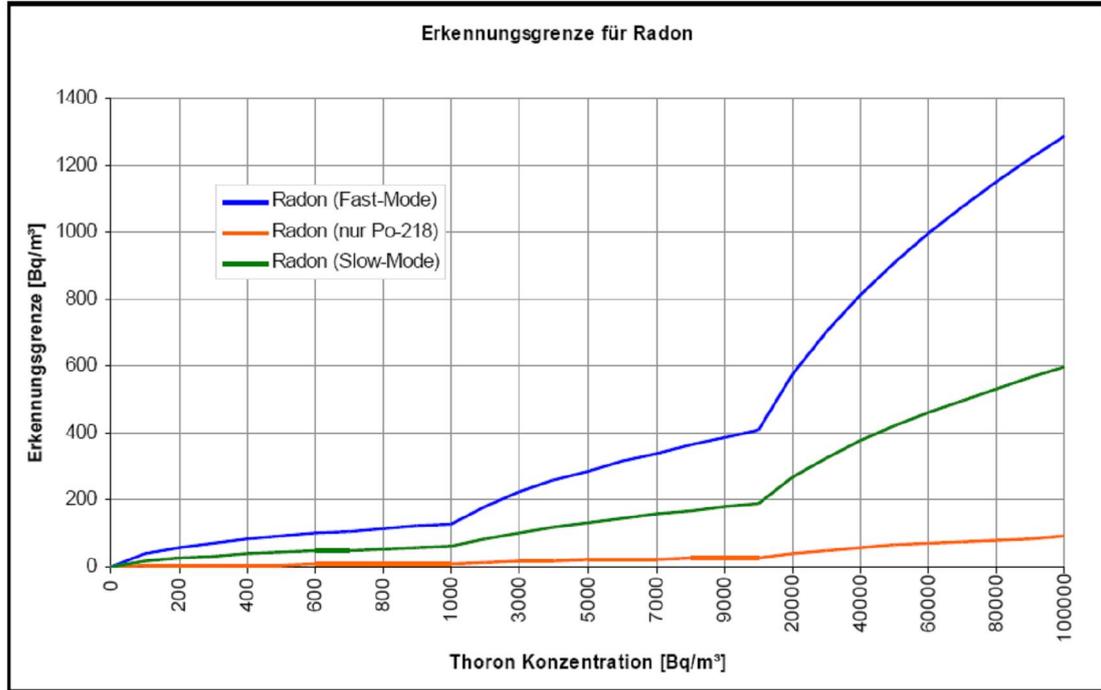


Fig. 2 Detection Threshold (2σ) for Radon (RTM1688-2, 60 Minutes Sample Interval)

图 2. 氡测量的探测限值(2σ)(RTM1688-2,60 分钟周期)

X 轴-钍浓度，Y 轴-探测下限

案例 3：混合空气（同时存在氡和钍）

一个基本的前提是，对于瞬时测量而言，氡和钍的浓度均高于探测下限，统计误差一方面取决于氡/钍之间的浓度比例，另一方面也与各个 ROI 中的总计数相关，后者与浓度水平、所选测量周期以及设备灵敏度有关；通过下图我们来讨论与浓度比例之间的关系。

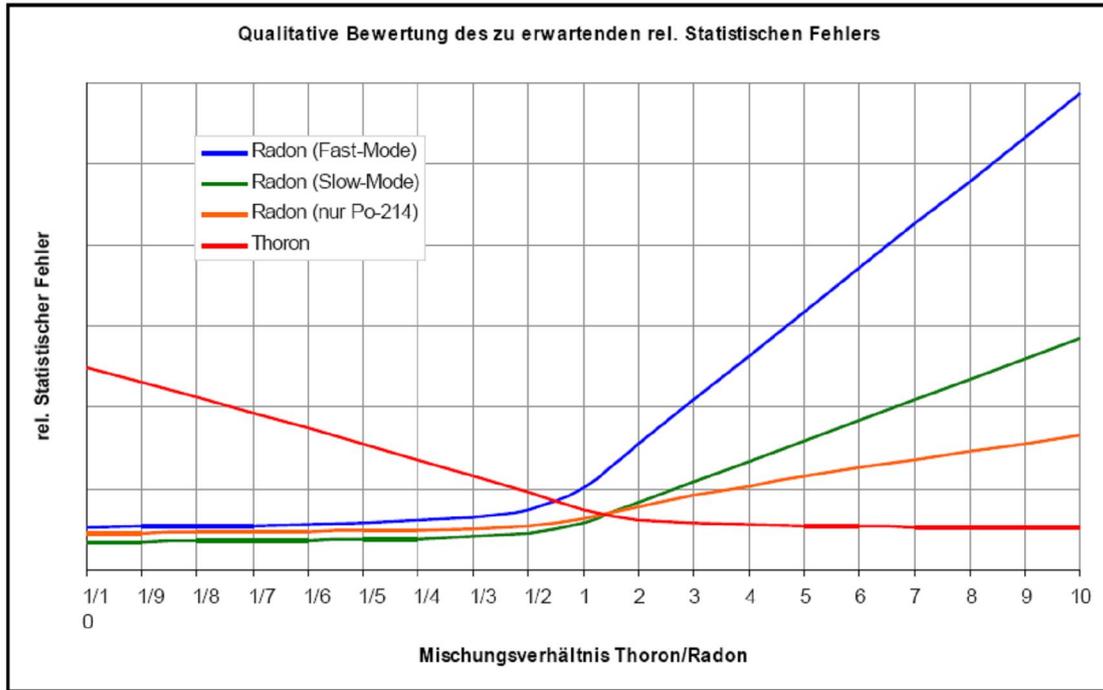


Fig. 3 Statistical Error of a mixed Atmosphere, qualitativ

图 3. 一个混合环境下的统计误差

X 轴-氡/钍混合比例, Y 轴-相对统计误差

X 轴为钍/氡比率, 取值 4 表示钍的浓度为 4 倍于氡浓度, 而 1/4 则表示氡浓度 4 倍于钍浓度。

在浓度比率取值为 1/2 ~ 2 之间, 相对误差比较小; 比值越小, 钍的误差越大, 因为其受到氡 (Po-214) 的影响; 而氡的误差则微弱减小。比值大于 2 时, 测氡误差根据测量方式不同有不同程度的上涨。

假如使用快速测氡模式 (仅使用 Po-218 信号) 因为 Bi-212 的存在 以及 Po-216 的 Tailing 的影响, 误差上升很快。

如果使用慢速测氡模式 (绿线), 误差偏小一些, 因为在计算中包含了 Po-214 的计数, 而 Po-214 的计数仅受到 Po-212 Tailing 影响。

而当仅使用 Po-214 的信号 (橙色线条) 时, 我们可获得最小的统计误差, 此时, 仅有来自于 Po-212 的本底影响, 与钍的曲线的反方向比较可看出, 橙色线的曲线上升速度更平缓, 原因在于受到 Po-212 的影响更小 (仅有 5%, 而 Po-214 对 Po-216 为 20%), 同时仅有 64% 的 Po-216 将在衰变链中变成 Po-212, 其他 36% 则衰变为 Bi-212。

混合空气下的仪器使用

如果执行长期的监测，氡/钍的相互干扰并不是一个问题，当混合比率超过 100 时，那么占比较小的成分从辐射防护的角度来说可以忽略不计；唯一的限制是为了保证统计误差而建议使用慢速测氡模式将延长响应时间。

图 4 显示在氡浓度高于钍浓度 100 倍时的统计误差，相关的钍浓度值（与绝对探测计数相关）以函数参数的形式给出。

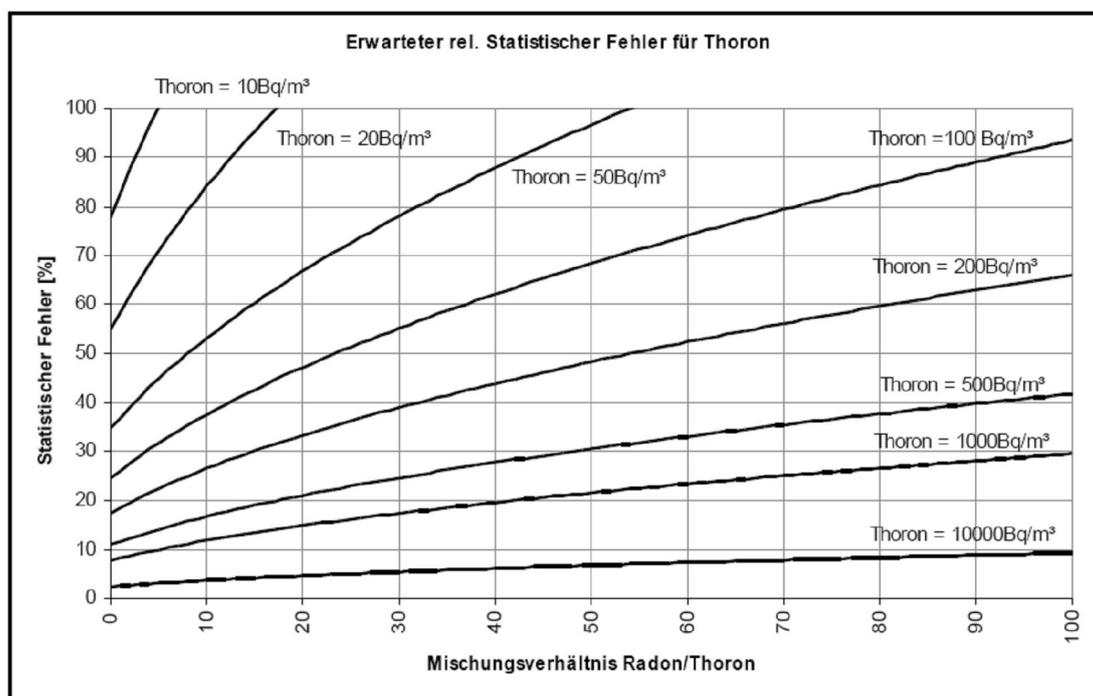


Fig. 4 Statistical Error (1σ) for Thoron (RTM1688-2, 60 Minutes Sample Interval)

图 4. 钍测量的统计误差(1σ)(RTM1688-2,60 分钟周期)

X 轴-氡/钍混合比例，Y 轴-统计误差

例如：

当钍浓度为 1000Bq/m^3 ，氡浓度为 40 倍至 40000Bq/m^3 时，结果的统计误差接近 20%。

图 5 显示当钍浓度为氡浓度 100 倍时的统计误差，相关的实际氡浓度值（与绝对探测计数有关）以函数参数的形式给出。

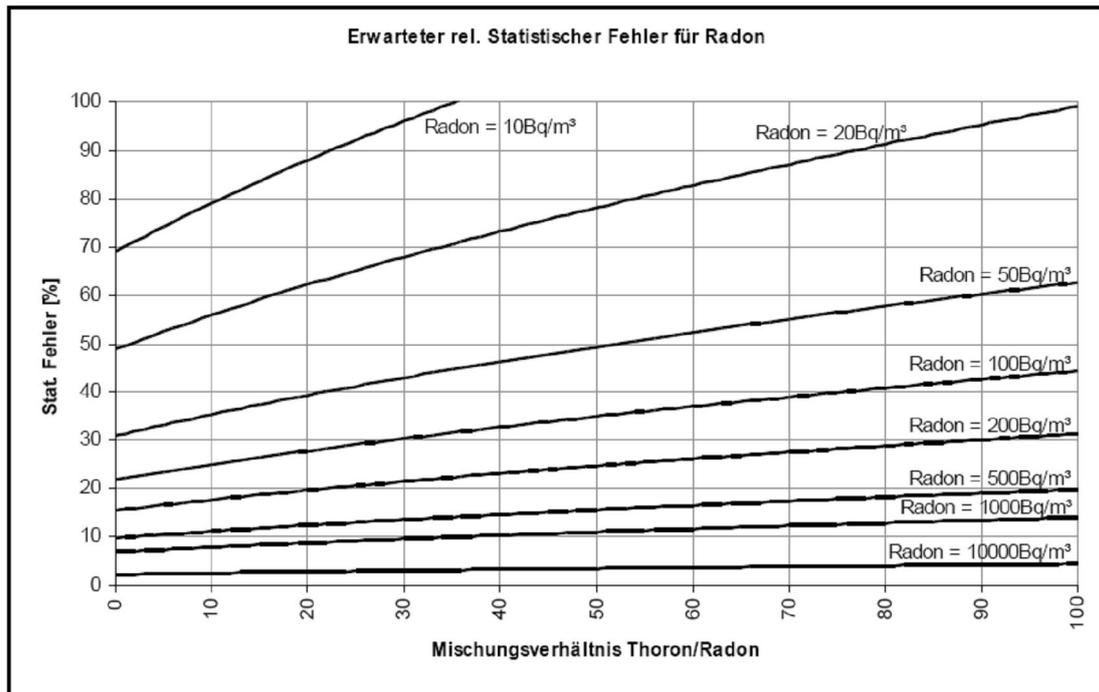


Fig. 5 Statistical Error (1σ) for Radon (RTM1688-2, 60 Minutes Sample Interval)

图 5. 氡测量的统计误差(1σ)(RTM1688-2,60 分钟周期)

X 轴-氡/钍混合比例, Y 轴-统计误差

例如：

当氡浓度为 200Bq/m^3 ，钍浓度为 20 倍至 4000Bq/m^3 时，结果的统计误差约为 20%。

在经过高浓度钍的测量后，此时测量低浓度氡时，问题出现了；经钍照射后，Pb-212 仍在驻留在探测器表面，并且以 10.64 小时的半衰期衰变，Pb-212 的子体 Bi-212 和 Po-212 不断被释放出来，Po-212 和 Bi-212 的衰变将形成氡的本底，即使此时钍已经不再存在于腔室内。

因此，请仔细留意以下内容：

在氡浓度预期最低的地点开始执行测量，在楼房内部，我们经常在底层发现较高的氡浓度，而在二层以上氡浓度将下降。

在每次测量结束时测量土壤氡浓度，并且测量过程越快越好，大多数情况下土壤氡的浓度很高，并且同时含有不少钍。

如果存在钍，保持采样时间越短越好，测量腔室在 5~6 分钟内腔室内气体更换即已完成，这段时间对于钍的测量已经足够，在此之后，可用软管将仪器进气口和出气口连接起来，然

后可以开始进行氡的测量。

如果可能的话，经过高钍浓度测量后，过几天再进行新的测量，在此期间，Po-212/Bi-212 应该已经完全衰减。

在一段时间的测量序列中，偶尔出现的一些浓度值通常被视做表明测量本底被升高。这一情况可以被理解为，并不存在真实的浓度值，而只是由于置信偏差的 5%的几率所引起的，测量本底的震荡。这些异常的浓度值，对其左右几个周期取平均值的话，通常是产生一个低于探测下限的结果。