

# 测量定向吸收剂量的外推电离室

陈丽姝 王连元 刘新华

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘要** 依据 ICRP 和 ICRU 最新推荐的外照射实用量的定义和概念, 研究了用平行平板外推电离室测量定向吸收剂量率的理论和方法。实验测量和理论计算的接触天然铀块的  $D'(d, 0)$  值与国外和国内著者的值进行了比较, 符合得很好。

**关键词** 定向吸收剂量, 实用量, 外照射防护, 外推电离室, 辐射量

## 1 外推电离室的理论基础

从事辐射工作的人员或管理人员, 应当遵守和贯彻有关的国际权威组织的合适建议, 以及本国政府职能部门根据这些建议制订的辐射防护规定。在辐射防护实践中, 为了检查安全措施是否恰当, 职业工作人员和公众中的成员所受的照射是否在国家标准规定的限值以下, 就要求以共同的尺度进行监测。然而, 基本限值中用的有效剂量和当量剂量<sup>[1]</sup>都是有受体量<sup>[2]</sup>, 在实践中是不可能直接测量的。因而需要规定一些能“逼近”这些量的实用量。

在国际上普遍要求有一种既可以提供有效的辐射防护, 在实际当中又可以测量到的“量”的情况下, 1977年 ICRU 成立了一个工作组, 名为“实际测定剂量当量起草报告委员会”。其任务是给出确定外照射剂量当量的方法。于是 1985年发行了 ICRU 第 39号报告, 题为“外部辐射源产生的剂量当量的测定”<sup>[3]</sup>。其中提出了四个辐射防护中实际可以测到的量; 周围剂量当量  $H^*(d)$ , 定向剂量当量  $H'(d)$ , 深部个人剂量当量  $H_p(d)$  和浅表个人剂量当量  $H_s(d)$ 。其后出版的 ICRU 第 47号报告《光子和电子外照射剂量当量的测定》<sup>[4]</sup>和 1994年出版的 ICRU 第 51号报告《辐射防护剂量学中的量和单位》<sup>[5]</sup>中除将深部个人剂量当量  $H_d(d)$  和浅表个人剂量当量  $H_s(d)$  合并成个人剂量当量  $H_p(d)$  外。其定义略有变动。其中关于定向剂量当量的最新定义为:

“辐射场中某一点处的定向剂量当量  $H'(d, \Omega)$  是相应的扩展场在 ICRU 球体内、指定方向  $\Omega$  的半径上、深度  $d$  处产生的剂量当量。”其单位是 J/kg。单位的专名是希沃特 ( $S_v$ )。

注: (1) 在提到定向剂量当量时, 应当说明参考深度  $d$  (以 mm 为单位) 和方向  $\Omega$ 。(2) 类似于定向剂量当量, 也可以用吸收剂量来定义定向吸收剂量  $D'(d, \Omega)$ 。

对弱贯穿辐射来说, 辐射的品质因数为 1, 因此在数值上剂量当量的量值与吸收剂量的量值等同。在弱贯穿辐射的外照射防护中, 通常认为最重要的器官除了眼晶体以外, 就是人体皮肤的基底细胞。国际放射防护委员会 (ICRP) 推荐的最小表皮防护层的参考值是  $7 \text{ mg/cm}^2$  (大约在皮肤表面下  $0.07 \text{ mm}$  处), 认为这里是辐射敏感区。穿透这种厚度的  $\alpha$  粒子的能量至少要  $7.5 \text{ MeV}$ , 而对  $\beta$  辐射而言, 至少需要有  $70 \text{ keV}$  的能量。能量低于  $15 \text{ keV}$  的光子亦属弱贯穿辐射。ICRU

本课题得到核工业基金的赞助, 项目号: Y 40201936501

收稿日期: 初稿 1995-02-14, 修改稿 1995-07-06

47号报告指出：对于适用于弱贯穿辐射外照射的定向剂量当量  $H'(d, \Omega)$ ，通常采用的  $d$  值为 0.07 mm 和 3 mm，它们分别对应于皮肤和眼晶体的深度。因此写成  $H'(0.07, \Omega)$  和  $H'(3, \Omega)$ 。报告还指出，能够测定平板组织等效材料中上述深度剂量的仪器，将适合于测量  $H'(0.07, \Omega)$  和  $H'(3, \Omega)$ 。因此，测定定向剂量当量的标准装置是平行平板组织等效外推电离室。本文关心的是用外推电离室测量 0 度方向的定向吸收剂量率  $D'(d, 0)$ 。其仪表角响应的研究将单独发表。

外推电离室是按照空腔电离理论和吸收剂量的定义建立起来的一种空腔电离室<sup>[6-8]</sup>。它已经成为绝对测量 X、 $\gamma$  射线、 $\beta$  射线、电子束以及中子等吸收剂量或  $\gamma$  照射量的一种重要手段。

空腔理论的任务就是为辐射授予这个不连续区(空腔)内气体的能量与授予空腔周围介质的能量建立准确的关系式。其要点是：在一个具有充气空腔的介质中，单位质量介质吸收的辐射能量  $D_m$  与单位质量气体中的电离量  $J_m$  之间有如下关系：

$$D_m = WJ_m ({}_mS_z / {}_mS_a) = 2.58 \times 10^{-4} WJ_v ({}_mS_z / {}_mS_a) \quad (\text{以 Gy/h 为单位})$$

$$J_v = 1.08 \times 10^{13} (CV/t_d) (P_0 T / PT_0)$$

式中， ${}_mS_z / {}_mS_a$  为介质 Z 相对于空腔内气体 a 的质量阻止本领比值对空腔内电子谱的平均值。 $W$  为在该气体中每形成一个离子对消耗的平均能量。对于 X、 $\gamma$  和电子在空气中  $W = 33.97 \pm 0.15 \text{ eV}$ 。 $J_v$  为单位体积空腔气体中的电离量。 $P_0$ 、 $T_0$  和  $P$ 、 $T$  分别为标准状态时和测量时的气压和温度。 $S$  和  $d$  是有效收集面积和极间距离。电离电流是用汤逊补偿法以振簧静电计作为指零装置测量的。 $C$ 、 $V$ 、 $t$  是电容、电压和补偿时间。

借助两个外推能够精确测定表面剂量和不同深度处的剂量：一个外推是改变电离室的灵敏体积，能够得到某点处的吸收剂量，另一个外推是改变电离室的壁厚，可得到表面剂量和深部剂量。因此，外推电离室是一种灵敏体积大小可变的平行平板空腔电离室。用于测量弱贯穿辐射时除了壁材料需要用等效那种待测吸收剂量的材料外，还应当满足下面 3 个条件：

- (1) 在辐射入射方向上空腔的线度必须远小于  $\beta$  射线在该空腔气体中的平均射程，空腔的存在不致改变穿过空腔界面的  $\beta$  谱分布，并使  $\beta$  射线穿过空腔时的减弱可以忽略不计。
- (2)  $\beta$  射线在空腔的界面上应当是均匀的，空腔处于均匀的辐射场中，即灵敏体积位于等剂量面上。
- (3) 电离室的后壁和侧壁厚度至少应当等于  $\beta$  粒子在该材料中最大射程的 1/2，使其测量值包括了反散射的贡献。

## 2 设计的主要特点

(1) 考虑到空腔理论用于测量人体软组织吸收剂量时，空腔周围材料在电子密度和密度等方面接近于人体软组织。此外还考虑了绝缘性能、机械强度和吸湿性等因素。本电离室用材选用了聚苯乙烯。表 1 列出了几种材料的特性，以便比较。

(2) 射线入口窗做成 7 和 300  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ，分别对应于皮肤和晶体所在的深度。其上均匀地涂上一薄层胶状石墨作为高压电极。

(3) 后壁和侧壁是用聚苯乙烯构成，厚度为 1 cm。有效收集极计入了绝缘槽沟的宽度，其值为 20.058 mm。

(4) 通过调节外螺纹支承体使前窗平行于收集电极移动。螺距为 1 mm，外沿刻有 100 等分格，因此极间距离最小改变量为 0.01 mm。

Tab 1. Physical properties of some materials and tissue

Name of material	Density /g cm <sup>-3</sup>	Electron density /10 <sup>23</sup> g <sup>-1</sup>	Mass/%					Effec. atomic number Z
			H	C	N	O	other	
Fat	0.92	3.38						5.92
Muscle	1.04	3.31						7.46
Bone	1.85	3.00						13.8
Graphite	1.7	3.01	—	100				6
Air	0.001293	3.03						7.68
Water	1.00	3.34	11.2			88.8		7.42
A-150	1.12	3.30	10.1	77.6	3.5	5.2	1.8	6.86
ICRU sphere	1.00	3.31	10.1	11.1	2.6	76.2		
Lucite	1.19	3.25	8.0	60.0	—	32.0		
Polystyrene	1.06	3.23	7.7	92.3	—	—		3.5
Benzhydryl polyethylene	1.38	3.13	4.2	62.5		33.3		
Diacid aliphatic polyethylene	0.92	3.43						

### 3 几个特性的测定

#### 3.1 饱和电压

平板电离室的饱和电压取决于所需的收集效率、剂量率、极板间距离以及离子的迁移率等。外推电离室通常工作在很小的极板间隔处, 故很容易达到饱和。如果加上过大的电压, 则由于电极间的静电引力使读数不稳。图1表明了在不同极间距离时测量150 cm<sup>2</sup>的<sup>90</sup>Sr + <sup>90</sup>Y面源时的伏安特性曲线。

#### 3.2 极间距离的刻度

按照平板[面积为S(cm)]电容公式, 用电容电桥测量了不同极间距离d<sub>i</sub>(cm)时平板电离室的电容C<sub>i</sub>(pf)。得到的真实极间距离为:

$$d = S / (4 \times 0.9 \pi \epsilon) = S / (3.6 \pi \epsilon)$$

极间距离和电容的关系示于图2。由电容测出的极间距离示于图3。与其由外推曲线(见图4)的外推零点等距离增加的距离相对偏差小于1%。

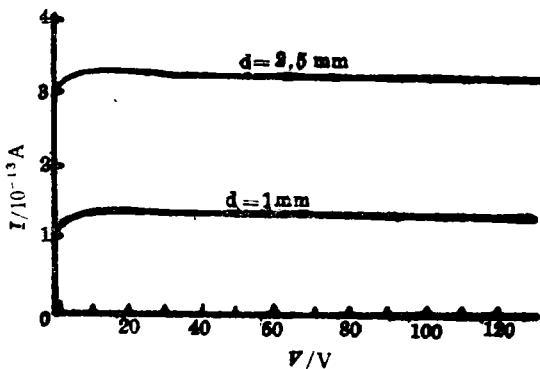


Fig 1. V-A characteristic curves at different distance of electrodes

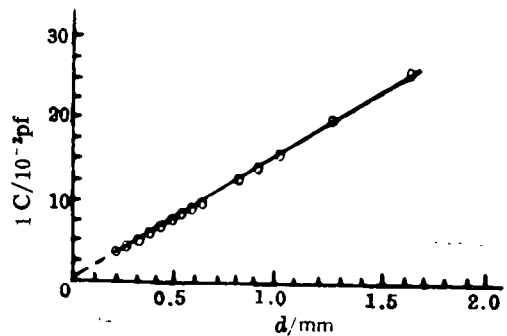


Fig 2. Relationship between the distance of electrodes and electric capacities

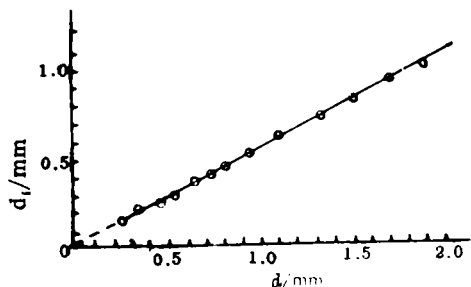


Fig 3. Calibration curve for distance of electrodes of the EIC

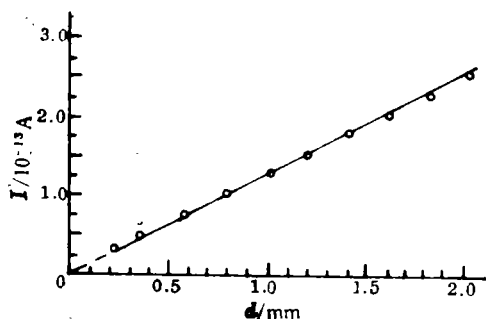


Fig 4. Extrapolation curve for sensitive volumes of the EIC

### 3.3 平行度的检查

二平行板电极间的不平行夹角 $<0.15^\circ$ 。

## 4 外照射常规刻度用天然铀块的 $D'(d, 0)$ 分布

活性区厚度相对于所发  $\beta$  粒子射程而言可视为无限厚的天然铀平板源是检验保健物理学仪器的稳定性和常规刻度的一种辐射源。用它作外照射定向吸收剂量刻度的参考源有如下优点：

(1) 半衰期长，(2) 只要铀块厚度大于最大能量  $\beta$  粒子在其中的射程(约 3 mm)就相当于无限厚源。其定向吸收剂量率  $D'(d, \Omega)$  与铀块厚度、大小和形状无关。(3) 这种源系纯物质，辐射场相当均匀而且不随时间变化，复现性好，故可作为参考标准源。(4) 与组织等效材料接触时  $7 \text{ mg/cm}^2$  处的剂量率的大小特别适合于以定向吸收剂量  $D'(0.07, \Omega)$  和浅表个人剂量  $D_p(0.07, \Omega)$  刻度辐射防护监测仪和个人剂量计。

利用组织等效外推电离室测量天然铀块照射聚苯乙烯时的深部剂量分布如图 5 所示。深度小于  $4.4 \text{ mg/cm}^2$  时，大部分的剂量是  $\alpha$  辐射所贡献的。随着穿透深度的增加，吸收剂量急剧下降。此后，吸收剂量主要是由最大能量为  $2.32 \text{ MeV}$  ( $E \sim 0.865$ , 占 98%) 的  $\beta$  射线造成的。其他还有最大能量为  $0.192 \text{ MeV}$  ( $E \sim 0.06$ , 占 65%) 和  $0.100 \text{ MeV}$  ( $E \sim 0.03$ , 占 35%) 的  $\beta$  射线的贡献。

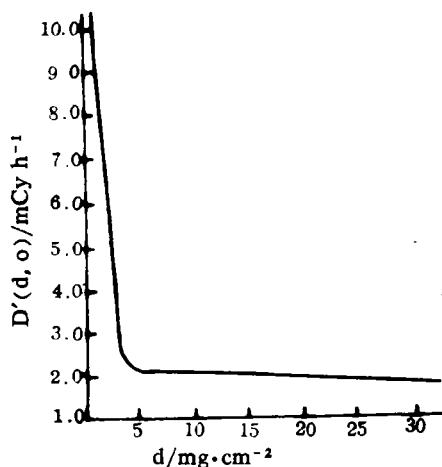


Fig 5. Distributions of  $D'(d, 0)$  from natural uranium Slab filtered by  $7 \text{ mg/cm}^2$

$4.4 \text{ mg/cm}^2$  以内的深度， $\alpha$  射线的吸收系数约为  $1 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{g}$ 。  $4.4 \text{ mg/cm}^2$  以下的深度， $\beta$  射线吸收系数为  $6.4 \text{ cm}^2/\text{g}$ 。它与根据 Roesch 理论算出的  $5.8 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，Loevinger 公式算出的  $5.9 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，以及前人得到的  $6.0$  和  $6.2 \text{ cm}^2/\text{g}$  很接近。实验测得在标准大气压 ( $101.325 \text{ kPa}$ ) 和温度 ( $273.15 \text{ K}$ ) 时，源表面距外推电离室窗的距离  $3 \text{ mm}$ ，深度为  $7 \text{ mg/cm}^2$  处的吸收剂量率为  $2.12 \text{ mGy/h}$ ，距离  $0 \text{ mm}$ ， $7 \text{ mg/cm}^2$  处的吸收剂量率为  $2.29 \text{ mGy/h}$ ，与其他作者所得结果是一致的(见表 2)。

根据铀及其平衡时的主要子体复杂的  $\beta$  谱、分支比、自吸收等等，并采用注量—吸收剂量转换系数估算的 0 距离处，无吸收时的  $\beta$  辐射剂量率为  $2.46 \text{ mGy/h}$ 。用上述实验得出

Tab 2. Comparison of  $D'(0.07, 0)$  value

Research worker	Measurement value
H. Brar <sup>[9]</sup> (1947)	228 mrep/h
H. D. Gale <sup>[10]</sup> (1963)	239 mrep/h
W. G. Cross <sup>[11]</sup> (1959)	230 mrep/h
K. O' Brien <sup>[12]</sup> (1964)	239 mrep/h(theoretical calculation)
I. M. Richard <sup>[13]</sup> (1958)	240 mrep/h
J. Fleeman <sup>[14]</sup> (1953)	201 mrep/h
W. C. Roesch <sup>[15]</sup> (1954)	2.10 mGy/h
R. F. Barker <sup>[16]</sup> (1970)	2.01 mGy/h
J. S. Krohmer <sup>[17]</sup> (1951)	2.19 mGy/h
M. R. Kennedy <sup>[18]</sup> (1957)	2.24 mGy/h
R. L. Coleman <sup>[19]</sup> (1983)	2.35 mGy/h
P.J. phillip <sup>[20]</sup> (1979)	2.29 mGy/h
present work(1964~1995)	2.29 mGy/h(distance 0 mm, d = 7 mg/cm <sup>2</sup> )
	2.12 mGy/h(distance 3 mm, d = 7 mg/cm <sup>2</sup> )
	2.40 mGy/h(distance 0 mm, d = 7 mg/cm <sup>2</sup> experimental value)
	2.46 mGy/h(distance 0 mm, d = 7 mg/cm <sup>2</sup> calculational value)

的吸收系数, 得出 0 距离时, 无  $\alpha$  辐射、无吸收时  $\beta$  剂量率为 2.40 mGy/h。Roesch 用年龄—扩散理论计算的经 7 mg/cm<sup>2</sup> 过滤时的值为 2.10 mGy/h。O'krien C 用一组迁移理论算出的值为 239 mrep/h。无吸收、0 距离时  $\beta$  剂量: 本工作实验值为 2.40 mGy/h, 理论计算值为 2.46 mGy/h。

此由此可见, 本工作的实验值与其他作者的测量值以及与理论计算值都是一致的。

## 5 本装置的特点以及与其他工作的比较

### 5.1 综合本仪器的指标为

- 1 测量的能量范围:  $\beta$  辐射  $E_{max}$  在 0.15~3 MeV;  $\alpha$  辐射全部能量范围
- 2 测量吸收剂量率范围:  $\sim 5 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^2$  Gy/h
- 3 空气空腔变化范围: 0.0~5.00 mm, 最小变化读数为 0.01 mm
- 4 灵敏体积最小可以做到  $\sim 0.05$  cm, 最小可变量  $\sim 3 \times 10^{-3}$  cm<sup>3</sup>
- 5 电离室壁厚可以任意增厚。最薄可以做到  $\sim 0.8$  mg/cm<sup>2</sup>
- 6 源—室距可调范围: 0~60 cm, 最小变化量为 0.1 mm
- 7 辐射入射角可调节: 在 0~180° 方向
- 8 平行平板之间的不平行度夹角约  $\leq 0.15^\circ$
- 9 漏电流  $< 2 \times 10^{-10}$  A
- 10 本底电流  $\sim 2 \times 10^{-16}$  A
- 11 一套供能量依赖性校准的  $\beta$  源: <sup>14</sup>C、<sup>45</sup>Ca、<sup>147</sup>Pm、<sup>32</sup>P、<sup>90</sup>Sr + <sup>90</sup>Y, 天然铀
- 12 测量值的系统不确定度  $\sim 3\%$ , 随机不确定度为 1% ( $a = 0.01$ ,  $K = 3$ )

### 5.2 本装置与其他装置的比较

拥有外推电离室的另外 8 个单位的实验室测量天然铀块的定向吸收剂量率  $D'(d, 0)$  的平均值与我们的测量结果在 1.3% 的误差内符合得相当好(见表 3)。每次检验外推电离室装置稳定性时测量铀块表面剂量率的结果都在报道的误差范围以内。

Tab 3. Comparisons on  $D'(0.07,0)$  of uranium slab from different Labs

No of Lab.	Thickness /mg cm <sup>-2</sup>	S-W distance /mm	D'(d,0) 3 mm(Air)/mGy h <sup>-1</sup>	Total uncertainty/%
1	7.19	3	2.10	8
2	7.06	1.25	2.12	4
3	7.0	0	2.13	10
4	6.73	6	2.18	6
5	6.63	5	2.13	5
6	7.07	3	2.14	7
7	7.16	6.5	2.21	4
8	7.01	3.64	2.17	8
	ava. Value		2.15	
	Corrected to d = 7 mg/cm <sup>2</sup> ,	S-W distance 0 mm,	2.32	
	present work d = 7 mg/cm <sup>2</sup>	S-W distance 0 mm,	2.29	3

天然铀定向吸收剂量率随距离的变化：用刻度架调节距离，在暗室把裸露胶片放在铀块中心轴上方不同距离处，测量定向吸收剂量率随距离的变化表明：在 1 cm 以内，距离每增加 1 mm，辐射场均匀区定向剂量率大约减小 0.056 mGy/h。这也许归结为吸收和胶片的角响应。由此可见，在近处即使距离的差异很小也会使测量值有所不同，这也许就成了各家测量结果略有不同的原因之一。

## 6 结 束 语

外推电离室所依据的空腔电离理论给辐射剂量的绝对测量提供了一种重要方法，复现照射量和吸收剂量量值准确度的提高，不仅取决于工业水平和测量技术，而且还取决于空腔理论对实际描述的逼真程度以及实际做法是否满足该理论的前提要求。在介质内放上任何一种探测器都可以看成是在介质内建立一个空腔，这种空腔不仅可以充气体物质，而且还可以是液态或固态物质。密度不仅可以比它周围介质稀，也可以比周围介质密，因此空腔理论现在已经不限于用于充气体的电离室，正比计数器等，还可以应用于液体和固体剂量计。在这方面一种新型的灵敏层大约只有几个微米厚的 BeO(石墨)热激外逸电子剂量计(TSEE)可望成为测量定向吸收剂量  $D'(d, \Omega)$  和浅表个人吸收剂量  $D_P(d, \Omega)$  的次级标准剂量计。

## 参 考 文 献

- 1 ICRP(1991), Annals of the ICRP, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Pergamon Press Oxford
- 2 ICRU, Conceptual Basis for the Determination of Dose Equivalent, Report No. 25, ICRU Bethesda Maryland, 1976
- 3 ICRU, Determination of Dose Quivalents Resulting from External Radiation Sources, Report No. 39, ICRU Bethesda Maryland, 1985
- 4 ICRU, Measurement of Dose Equivalent from External Photon and Electron Radiations, Report No. 47, ICRU Bethesda Maryland, 1992
- 5 ICRU, Quantities and Units of Radiation Protection Dosimetry, Report No. 51, ICRU Bethesda Maryland, 1994
- 6 Gray L H. Proc. Roy. Soc. London, 1936, A 156: 578
- 7 Failla G. Radiology, 1937, 29: 202
- 8 ICRU, Radiation Quantities and Units, Report No. 33, ICRU Bethesda Maryland, 1980
- 9 Brar H. CH-3880, 1947[4] Margarete Ehrlich, Radiation Protection Dosimetry, 1981, V. 1, N. 4, P. 271
- 10 Gale H J et al. AERE-R-4363
- 11 Cross W G. AECL-802, 1959
- 12 O'Brien K. Nucl. Sci. and Eng., 1964, 18: 90
- 13 Richard I M. J. Nucl Eng., 1958, 66: 331
- 14 Fleeman J et al. Atomics, 1953, spril, 91
- 15 Roesch W C. AEC report HW-32121, 1954
- 16 Robert F, Barker. LA-4400, 1970
- 17 Krohmer J S et al. Science, 1951, 113: 360
- 18 Kennedy M R. KAPL-A-HP-5, 1957
- 19 Coleman R L. Health phys, 1983, 44: 395
- 20 Phillip P J. J. App. Radiat. Iso., 1979, 30: 109

## AN EXTRAPOLATION IONIZATION CHAMBER MEASURING DIRECTIONAL ABSORBED DOSE

Chen Lishu    Wang Lianyuan    Liu Xinhua  
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

**ABSTRACT** The project has based the definition and conception on the new Recommendations of the ICRP and ICRU. The theory and method of measuring the Directional Absord Dose by an extrapolation ionization chamber with parallel plane have been researched. The results experamentally measured and culculated theoretically of the directional absorbed dose  $D'(d, 0)$  for a nature uranium slab have been compared with several authors.

**KEYWORDS** Directional absorbed dose, Operational quantities, Protection against external exposure, Extrapolation ionization chamber, Radiation quantities