

放射線計測

Radiometry

Christen T. Arch Roentgen Ray 19:201-9,1914/1915

放射線学では2つの異なる計測がある。すなわち、放射線の「質」と「量」である。より正確に言えば、「透過力」と「放射線エネルギー」の双方を計測する必要がある。

これら2つを混同しないことが非常に大切であるが、これはしばしば間違われ、最近の文献でもなお誤りが見受けられる。例えば、放射線の透過力を、透過するアルミニウムの厚さ (mm) で定義することがしばしば提案されているが、透過する厚さは、透過力の増大のみならずエネルギーの増大、すなわち放射線強度の増大でも大きくなることは容易に理解できよう。

透過力と強度を分類するためには常に、吸収物質を通過する入射光線の絶対量ではなく、割合 (%) を考える必要がある。例えば、光線のほとんど全てが吸収物質を通過する場合は、ほぼ 100% といえる。逆にほとんど全て吸収されれば、透過力は 0 に近づく。透過力は、この両極端のあらゆる程度を取り得る。本稿の目的は、実用的に十分正確かつ放射線強度とは完全に独立な、透過力の計測法を確立することにある。

放射線エネルギーが吸収物質を通過する割合は、3つの因子に依存する。

1. 光線の透過力 (硬度)
2. 透過する物質の性状
3. 吸収物質の厚さ

問題を簡単にするために、2番目の因子については標準計測用の物質として「水」を選ぶこととする。実際の実験では、水あるいはこれと同等の吸収力をもつ物質を使用する。

吸収を計測するには、所定の厚さの当該物質に吸収される比率よりも、所定の比率を吸収する物質の厚さを求める方が容易であることが分かっている。簡単のため、標準的な吸収率として 50% を任意に選んだ。従って放射線の透過力は、入射光線の 50% を吸収し、50% を通過させるような水の厚さで計測できることになる。

放射線の「半価層」 (half-value-layer) とは、入射光線のエネルギーが吸収されて正確に半分になるような水の厚さである。

この透過力の尺度が放射線の強度に依存しないことは容易にわかる。ある放射線が別の放射線の 100 倍強力であっても、同じ水の層がそれぞれを 50% 減じるのであれば、透過力は同等といえる。

従って、半価層は照射線エネルギー強度と全く独立な、透過力の尺度である。

均一性と不均一性

半価層による透過力の計測は、均一性 (homogeneity) の問題を扱う上で大きな利点があり、放射線の不均一性 (heterogeneity) を知る上で助けとなる。

まず均一性について述べると、均一な放射線は指数関数に従って吸収されることがわかっている。入射光線のエネルギーを E_0 、厚さ x の吸収層を通過した透過光線のエネルギーを E とするとき、

$$E_0 = E e^{ax} \quad (1)$$

ここで a は吸収係数 (図 1)、 e は自然対数の底である。

a が半価層であれば ($x = a$ のとき)、 E_0 は E の 2 倍となる。従って、

$$2 = e^{aa} \quad (2)$$

すなわち

$$aa = \ln 2 \quad (3)$$

結局 (1)、(3) から

$$E_0 = E 2^{x/a} \quad (4)$$

指数関数は、2つの形で書ける。すなわち、吸収係数を指数として含む形 (1)、あるいは半価層 a の概念による形 (4) である。この2つの式の関係は、(2)、(3) で与えられる。

これを理解することは容易である。cm で表わされる具体的な半価層の方が、 cm^{-1} で表わされる数学的、抽象的な吸収係数よりも簡単である。これが、実的に半価層を奨める理由である。

しかし、扱う放射線が均一でない場合は難しくなるが、放射線診断や放射線治療に使用する放射線はすべて複合的で、その成分には大きなばらつきがあることから、不均一な放射線の問題を避けて通ることはできない。

このような光線の透過力を吸収係数で扱うことは、非常に複雑である。不均一な放射線の吸収を表わす式は、

$$E = E_0 \frac{b_1 e^{-a_1 x} + b_2 e^{-a_2 x} + b_3 e^{-a_3 x} + \dots}{b_1 + b_2 + b_3 + \dots} \quad (5)$$

図で考えると、問題はずっと単純になる。図 2 には、半価層 a の均一な放射線の吸収を示す。横軸は吸収層の厚さ、縦軸は強度である。半価層はどこでも一定で

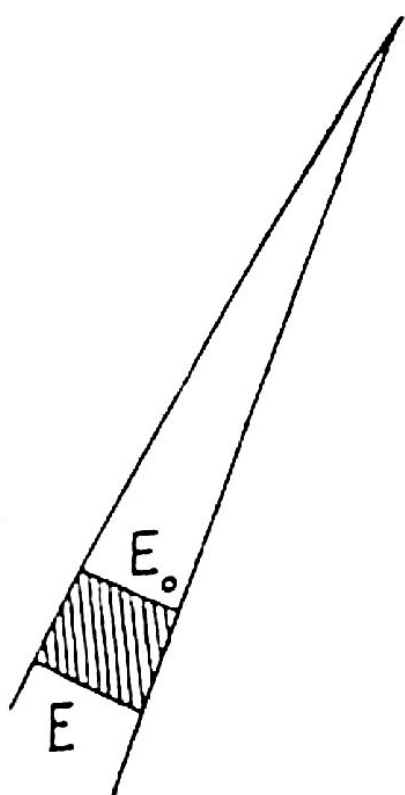


图 1

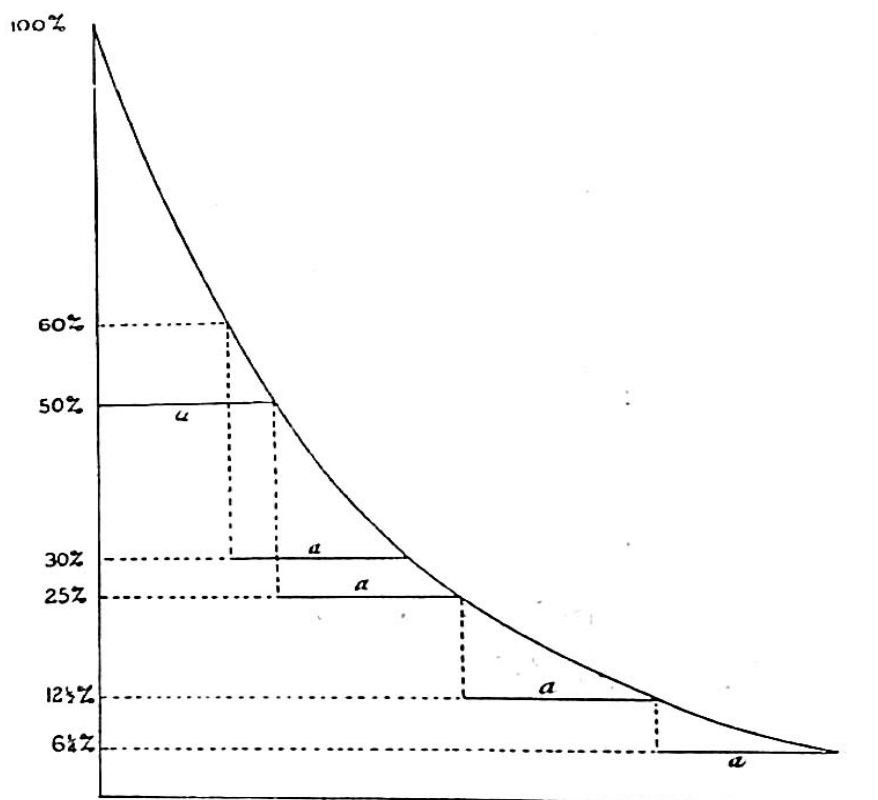


图 2

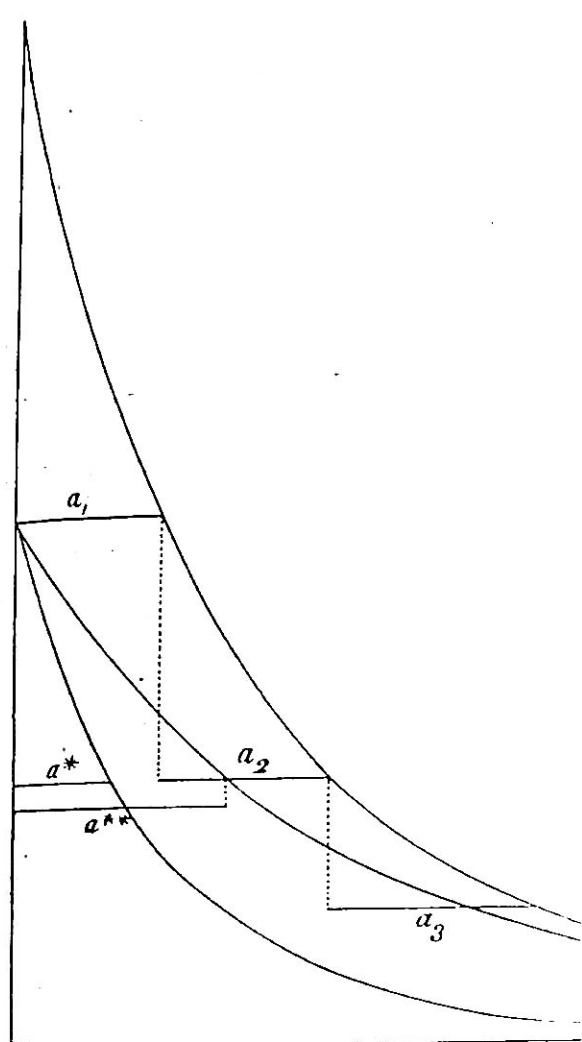


图 3

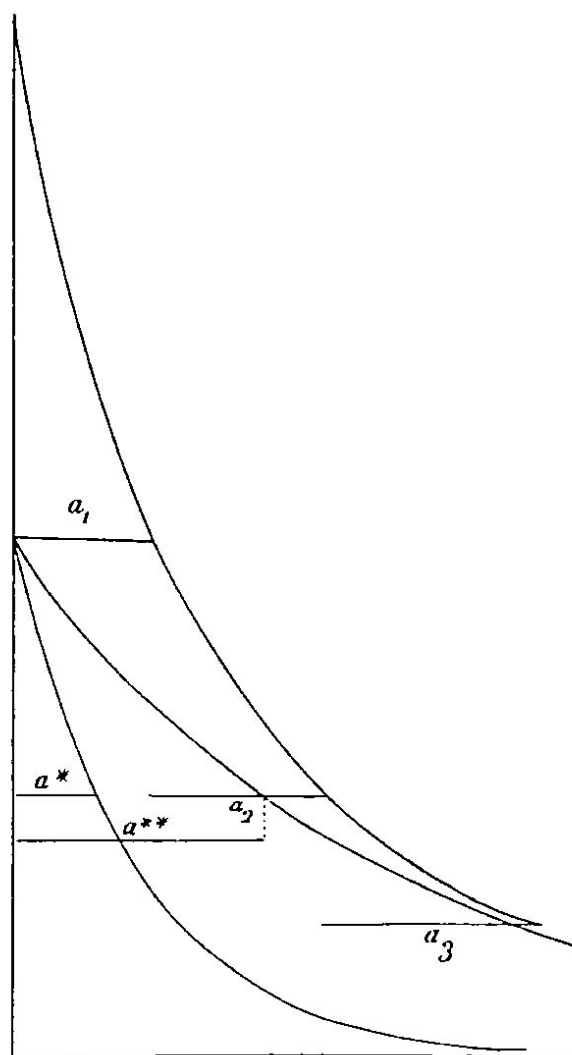


图 4

あることが分かる。100%と50%, 60%と30%, 50%と25%の水平距離は、それぞれ a でいずれも等しい。

不均一な放射線のグラフは、これと大きく異なる。レントゲンの法則 [1], すなわち吸収物質を追加すると、X線の平均透過力が増加することを思い出してほしい。レントゲンの法則は次のように言える：吸収物質の深部ほど、X線の半価層は大きい。

ここで図3を考える。半価層 a^* , a^{**} を持つ2つの均一な放射線から成る不均一な放射線の吸収を示す。複合放射線の第1半価層は、100%と50%の差で a_1 で示す。50%と25%の差が第2半価層 a_2 である。ただちに、 a_2 が a_1 より大きいことが分かる。第3半価層 a_3 は25%と12.5%の間で、 a_2 より大きい。以下同様である。

a_2 と a_1 の比を均等度 (index of inhomogeneity) と言う。 $h = a_2/a_1$ 。均一な放射線では $h = 1$ であるが、不均一になるほど h は増大する。図4に示す複合放射線は図3とは大きく異なり、 a^* と a^{**} の差が図3よりも大きい。それぞれの h を求めると、図3では $h=1.05$, 図4では $h=1.2$ である [2]。

このように、半価層には二重の利点がある。

1. 不均一な放射線では、成分が不定個数ありそれぞれ異なる吸収係数をもつことから「吸収係数」を論じることができない。しかし、いかなる不均一な放射線でも半価層を求めることはできる。不均一な放射線には式(4)を適用できないが、複合放射線がいかなる成分を持っていたとしても、実験的に入射エネルギーが50%減じる水の厚さを測れば半価層を求めることができる。

実際、すべての成分が同じ半価層を持ち、その総和を1つの数値で明確に表わすことができない究極の複合放射線が存在するかも知れないが、この問題は複合放射線を計測する全ての方法に共通するものである。Benoist や Wehnelt の一定の硬度は、究極の複合放射線に相当するものである。

2. 半価層では、光線がフィルターによって硬くなる率を表わす h によって光線の不均一さを知ることができる。

放射線治療においては可及的均一な放射線が必要とされることから、この均等度 h は非常に重要である。また実際的には、使用している放射線が理想的な状態からどの程度はずれているかを知る目安を与えてくれる。理想的な均一な光線は、その硬度にかかわらず $h=1$ である。

1. レントゲンの法則は、X線の不均一性で説明しうが、これが唯一の説明ではないことを知っておく必要がある。吸収層の厚さが増すと透過力が増大する、他の理由がおそらく存在する。

2. 不均一性の指標としては、 a_2/a_1 よりも、 a_3/a_1 あるいは a_4/a_1 の方が良いかも知れない。何れが実際的かは時間と経験を積まないと分からない。いずれを使用しても原理は同じである。

さらに正確さが必要であれば、吸収曲線全体から a_1 , a_2 , a_3 , ...などを全てを求めることができる。

本誌編集部の言葉に甘えて、半価層を直接測定するさまざまな装置の記載を繰り返すつもりはない。それよりも、X線のいわゆる「フィルター効果」に関する我々の見方を変えうる、容易に再現可能な実験の詳細について述べることにする。

これまで、いわゆる「フィルター」の線質硬化効果は、軟線が吸収され、硬線がそのまま通過するためであると考えられてきた。しかし、すべての軟線を捉えて、すべての硬線を通してすることはできないことを銘記する必要がある。フィルター内で複合X線の軟線の大部分を捉え、複通過する硬線の比率を増やすことができるだけである。「フィルター」という名称は相応しいものではない。放射線科医にとってのフィルターは、化学者にとってのフィルターとは基本的に異なるものである。化学のフィルターは、すべての沈澱物を捉えて、液体を完全に通過させるものである。

このような「フィルター」は、放射線治療医が最もよく利用している。これは複合放射線から軟線成分を除去するため、放射線治療医は透過力を増強するためにX線を好んで硬くするといえる。しかし我々はより正確な表現を求め、透過力がどの程度増強しているのか、すなわち半価層がどの程度増大しているかということを知りたいのである。

フィルターとして最もよく利用されるのはアルミニウム箔で、厚さは1ないし数mmと幅がある。アルミニウムはX線の透過力を計測するためにも使われており、アルミニウムは水の10倍の吸収力がある。すなわち、1mm厚のアルミニウムは、10~11mmの水と同等のX線を吸収する。

しかしこの比は、数mmのアルミニウムを通過した後のX線にはもはや通用しない。これを確認するには、写真効果を調べてみれば十分である。3mm厚のアルミニウムでフィルターされたX線は、1mmのアルミニウム、(10~11mmではなく)7~8mmの水で吸収されること分かっている。つまり、3mmのアルミニウムでフィルターしたX線の水透過性は、アルミニウム透過性の30%以下まで上昇するのである。

大部分の硬度計 (Benoist, および Walter & Wehnelt によるその改良型など) は、2つの箔、銀とアルミニウムの吸収に基づくものである。しかし、3mmのアルミニウムでフィルターされたX線の透過力は、特にアルミニウムに対して増強している。このためアルミニウム通過後には著しく透過性の高い成分を生じ、透過力は高めに計測される。

このため、筆者はアルミニウムの代わりにすべての装置でベークライトを使用している。ベークライトは、

水と同程度の吸収性をもつからである。

さらに我々は、単純な「フィルター効果」というものは存在しないことを知る必要がある。これは選択的吸収と理解すべきものである。しかしこのためには、非常に多くの「色」を想定する必要がある、いかなる選択的吸収も X 線強度を実際よりも減弱させることになる。これが、筆者が「フィルター」という言葉を廃し、吸収物質は、「フィルターする」のではなく「硬化させる」ものであるという意味で「変換装置」(transformator)あるいは硬化装置 (hardener) を使うことを提案する理由である。おそらくいずれは、この硬化過程の真の性質が明らかとなるであろう。

線量 (dosage)

線量の問題は、透過力の計測よりはるかに難しい。線量は、表面に到達する放射線エネルギーの量ではなく、「単位体積当りに吸収されるエネルギー量」である。一定のエネルギーが表面を照射する場合、その表面下で吸収されるエネルギーは X 線の透過力に依存し、透過力が大きいほど吸収量は少なくなり、被曝線量は減少する。全く吸収されないような著しく硬い X 線を作ることができれば、その生物学的効果は確実にゼロにすることができる。

さらに「時間」に対する議論も必要である。弱い放射線でも 3 倍の時間照射すれば、3 倍強い放射線と同じ吸収エネルギーになるからである。

簡単のため、「強度」(intensity) は単位時間あたり単位面積に照射される放射線エネルギー量とする。入射エネルギーを E 、照射時間を T 、照射面積を S とするとき、強度 I は

$$I = \frac{E}{S \cdot T} \quad (7)$$

あるいは

$$\frac{E}{S} = I \cdot T \quad (8)$$

である。

この E/S は、放射線計測において非常に重要な役割を果たし、表面エネルギーと呼ばれ、 F (Flächenenergie) で表わす。式 (8) から $I \cdot T$ が一定であれば F は、小さな強度で長時間照射する場合と、大きな強度で短時間照射する場合とで同じ値をとることがわかる。これは写真でも同じである。10 倍強い光で同じ写真効果を得るには、露光時間を 1/10 にする必要がある。

では、Sabouraud, Bordier, Kienböck ら、いずれの方法にせよ、既存の線量計測は何を見ているのであろうか？ 表面エネルギーであらうか？ 一見するとそのように思える。いずれも強度、時間に応じた試験物質の変色を見ており、強度と時間の積を計測している。しかし実際にはそうとは言えない。X 線が軟らかい場

合、より多くの放射線エネルギーが吸収されるからである。試験物質を通過する X 線は変色に与らず、吸収される X 線だけがこれに与る。

一般的な試験物質を考えると、吸収された放射線エネルギーを示す非常に薄い変色層が常に認められる。式 (4) から吸収された放射線エネルギー量を計算すると、

$$E_0 - E = E (2^{\frac{x}{a}} - 1) \quad (9)$$

ここで x は非常に小さいので、

$$2^{\frac{x}{a}} - 1 = \frac{x}{a} \log 2 \quad (10)$$

これは分析学の教科書に必ず出ている式である。式 (9) と (10) から、薄層により吸収されるエネルギーは、厚さ x に対して

$$E_0 - E = E \frac{x}{a} \log 2 \quad E = \frac{x}{a} 0.7 \quad (11)$$

照射される面積 S とすれば、吸収体積は $S \cdot x$ である。単位体積当りの吸収放射線エネルギーとして定義される線量 D は、

$$D = \frac{E_0 - E}{S \cdot x} \quad (12)$$

式 (11) と (8) から

$$D = \frac{E}{S \cdot a} 0.7 = \frac{F}{a} 0.7 \quad (13)$$

これはすなわち、「線量は、表面エネルギーの 7/10 をその放射線の半価層で除したものである」といえる (もちろん厳密には均一な放射線にのみ適用可能である)。

これ以上の詳細について読者を煩わすつもりはないが、これらの問題はすべて拙著 *Messung und Dosierung der Röntgenstrahlen* (X 線の計測と照射法) に書かれており、ここでは次の結論を述べるにとどめる。

一定の強さの均一な放射線において、その半価層が $0.7p$ の時、深さ p で最大線量が得られる。放射線治療に利用される通常の不均一な放射線では、半価層 p の時に深さ p で最大線量が得られる。

このことは、深部治療において放射線エネルギーを最大限に活用するには、組織の厚さと同じ厚さの水層によって強度が半減するような透過力の X 線を選択する必要があることを意味している。この時深部線量は表面線量のおよそ 1/2 となる (「およそ」をつけたのは、組織内を通過すると放射線の透過力がやや増大、吸収線量が低下するからである)。

この理論的な予測は、生物学的実験で確認されている。X 線の透過力を強くするほど、深部治療成績は向上するのである。卵巣のような深部放射線治療では、 $a=p$ の限界は未達成であるが、近い将来、より硬い X 線が使えるようになることを願うところである。透過力が $a=p$ を超えると、生物学的効果は再び減弱するであろうことは疑いがない。

さらに、試験物質は実際には透過力と無関係に線量を

計測していることを銘じておく必要がある。これらの試験物質はいずれも組織とは異なる吸収力をもつ。そこで、この半価層は a ではなく a^* で表わす必要がある。試験物質は組織の線量を計測しているのではなく、

$$D = \frac{F}{a} 0.7 \quad (13)$$

これとは別の「線量」であり

$$D^* = \frac{F}{a^*} 0.7 \quad (14)$$

ここから

$$D = D^* \frac{a^*}{a} \quad (15)$$

ここで考慮すべき大きな問題がある。比 a^*/a は、透過力が異なる全ての X 線について一定なのであろうか？ もしそうならば、補正項は不要である。しかし最近の論文から判断すると、Szilard, Grossmann らの電離に基づく計測装置で扱われている空気を例外として、一定ではないらしい。この問題は、現状で結論を出すほど十分な検討が加えられていない。しかし、 a^*/a がすべての半価層に対して一定の試験物質が得られれば、それによって透過力と無関係に線量を計測することができる。ここで我々は、放射線量を良く知られたエネルギー量で表示する Szilard 教授の非常にすぐれたアイデアに大きく負うところがある。Szilard は、照射によって発生するイオンの数を線量の単位とすることを提案した。正確にいえば、空気 1cc 当りに発生するイオン数で線量を計測する方法である。既に我々は単位体積の吸収エネルギーとして線量を定義しているので、この定義を追加することは絶対必要である。

Szilard は、メガ・メガ・イオン (mega-mega-ion), すなわち 10^{12} 個のイオンを用いて、15℃、標準気圧の空気 1cc が 10^{12} 個のイオンを産生する吸収線量を単位とした。

この Szilard の考え方が非常に有用であろうことは疑いのないところで、この新しい単位、メガ・メガ・イオンを「Szilard」と呼ぶことを提案したい。ただ一つ、 10^{12} 個のイオンを発生するエネルギーを erg で求める方が良いのではないかという点がある。その場合、線量の単位は erg/cc となる。

組織線量を求めるには、Szilard 線量に空気と水の半価層をそれぞれ乗ずる必要がある。Szilard はこの比を 800 としている。すなわち、1 インチの水が 800 インチの空気に等しい放射線を吸収することになる。この値が一定なのか、特に高透過力の放射線の場合に補正項が必要なのかという問題はなお未解決である。

以上の考察から、 a^*/a が透過力によって変化するような試験物質は、現在のところ値が不明な補正項なしには線量測定に使用できないことがわかる。Grossmann は、一致の透過力以上になると、銀の半価層は減少し、水の半価層は増加することを示した。ここで a^*/a は突然大きく減少する。この事実は、一部の放射線治療医が使用している著しく大きな Kienböck 値の放射線でも危険を伴わないことを説明するものである。

この他にも考慮すべき可能性がある。透過力にかかわらず全ての放射線を吸収するような試験物質があったとする。このような試験物質は、線量ではなく強度 I , あるいは表面エネルギー F を示す。Fürstenau の「強度計」(instensimeter) はこの条件を満たす可能性があるが、明確な証拠を欠いている。著者はこの装置は距離の逆二乗に比例する法則を満たしているので正確であると述べているが、これは他の計測器でも同様のので、計測の正確さの根拠とはならない。正確に目盛りされた計測器であればいずれも逆二乗の法則を満たし、これは放射線計測器の基本的な条件である。これを満たしたからといって透過力に依存しないとは言えない。Sabouraud, Holzknicht, Kienböck など、いずれの装置も逆二乗の法則を満たすが、透過力の異なる放射線を比較すると大きなばらつきを生ずる。従って、すべての要求に応える計測システムに到達するにはなお多くの解決すべき問題や疑問がある。放射線科医の喫緊の必要に、早急に応えるべき大きな問題である。

科学は国際的なものであり、これらの問題を研究し、最終的に国際的な放射線計測単位を確立すべく、国際放射線計測委員会 (International Committee of Radiometry) の創設が合意された。国際放射線計測機関 (International Radiometry Institute) は 2 つの役割を持つことになる。すなわち、国際単位を確立するために必要なすべての実験結果を委員会に提供すること、そして送られてきたすべての放射線計測装置を試験、校正することである。これによって、ますます増えつつある多くの単位や計測法を整理することができるであろう。この機関は、セーブルにある国際機関が長さ、重さについて行なっているのと同じく、放射線計測について役立つ作業を行なうことであろう。

委員は既に選出されており、まもなくその第一報が、その協力が不可欠な全ての国々の科学界に提示されるはずである。