

X線の性質に関する更なる観察

Weitere Beobachtungen über die Eigenschaften der X-Strahlen

Röntgen WC. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Erster Halbband: 576-592, 1897

1. X線を放出する放電装置 [1] と蛍光板の間に不透光な板を置いて、板の陰影が蛍光板全体を覆うようにしても、なおシアン化白金バリウムの蛍光が検出される。この蛍光は、蛍光板を板のすぐ上に置いても認められ、一見して板が透明であるように見える。しかし、板の上の蛍光板を重いガラス板で覆うと、蛍光はずっと弱くなり、ガラス板のかわりに 0.1cm 厚の鉛箔を筒状にした中に置き、その一端は不透光な板で閉鎖し、他端は観察者の頭部で閉鎖すると、蛍光は完全に消失する。

この現象は、波長が非常に長い光線の回折によるか、あるいは X線が放電装置を覆う物質、特に照射された空気から発生しているためと説明できる。

後者が正しいことは、特に以下の装置により証明することができる。図 1 は非常に厚いガラス製のベル型容器で、高さ 20cm、幅 10cm、厚い垂鉛板で密封されている。1 および 2 は、半円状の鉛板で、容器の断面の半分よりやや大きく、セルロイドフィルムで覆われた垂鉛板の開口部から入射する X線が、鉛板 2 の上方の空間に直達しないように遮蔽する。この鉛板の上方には、容器の断面積のほぼ全体を占める白金シアン化バリウム蛍光板が固定してある。従ってこの蛍光板には、直接 X線、あるいは容器のガラス面など固体による一次散乱線のいずれも到達しない。ガラス容器内は、事前に無塵の空気で充たされている。X線が容器内に照射されると、まず鉛板 1 で遮蔽され、2 の周辺に蛍光は観察されない。容器を傾けて直接線が 1 と 2 の間の空間に到達するようにすると、2 に覆われていない

部分の蛍光板半分が蛍光を発する。容器を吸引器につないで排気してゆくと、蛍光は次第に減弱する。空気を再び入れると蛍光は回復する。

このように、照射された空気に単に接触するだけでは、白金シアン化バリウムは発光しない。従って、この実験から空気は照射されると全方向に X線を放出すると結論できる。

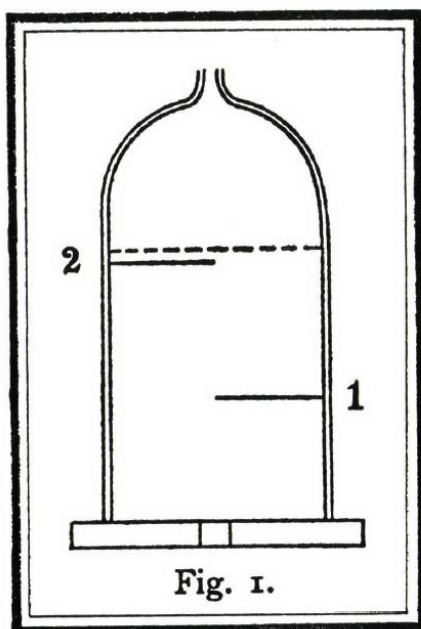
人間の目が通常的光線と同じように X線に感受性であったら、作動中の放電装置は、タバコの煙で充満した室内で燃える灯火のようにみえることであろう。また、直接的光線と、空気粒子からの光線は、色が異なるであろう。

照射された物質から出る X線と照射した X線が同じ性質か、言い換えれば、広範な反射、あるいは蛍光に類似の現象が、このような X線の原因か否か、という問題については答えることができない。空気から発生する X線が、写真効果を有することは容易に証明できる。実際、この現象はしばしば厄介な問題となる。これを防ぐために、特に露出時間が長い場合、写真乾板は適当な鉛容器に収納しておく必要がある。

2. 2本の放電管の光の強度を比較する実験などには、ブーゲ (Bouguer) 光度計に手を加えた方法を用いているが、以下これを光度計と呼ぶことにする。これは、高さ 35cm、長さ 150cm、幅 0.15cm の鉛の薄板を木版で支えて、長いテーブルの中央に垂直に置いたものである。その両側に放電管を置き、テーブル上で位置移動することができる。鉛板の一端に蛍光板を取り付け [2]、その半分ずつがそれぞれ 1つの放電管だけから光線を垂直に受光するようになっているので、それぞれの蛍光が同じ明るさになるように、調整すればよい。

この装置の使用について付言しておく。まず、X線源の不安定性のためしばしば調整が非常に困難であることを述べる必要がある。特に、ドプレ (Deprez) 断続器、フーコー (Foucault) 断続器などによる一次電流の遮断に際して放電管が不規則に動作するためである。従って、繰返し調整することが推奨される。

第 2 に、X線によって目で識別できないほど頻回に X線が衝突する蛍光板の輝度に影響する要因について指摘する必要がある。この輝度は、(1) 放電管の白金板から放出される放射線の強度、(2) 蛍光板に入射する光線の種類 (後述のように光線の種類が異なれば蛍光の程度は異なる)、(3) 蛍光板と線源の距離、(4) シアン化白



金バリウムに光線が到達するまでの吸収, (5) 毎秒の放電回数, (6) 各放電の持続時間, (7) シアン化白金バリウムの残光の時間と強度, (8) 放電管周囲の物質から発生して蛍光板に到達する放射線, などに依存する. 一般にこれらの条件は, 色が異なる2つの点滅光源を吸収性物質で被覆し, 混濁物質あるいは蛍光性物質内に置いて, 蛍光作用を比較する場合と似ていることを考えると間違いがないであろう.

3. 第1報 [3] の12項に書いた通り, 放電装置において陰極線が衝突する点がX線源であり, X線はここから「すべての方向」に拡がる. ここで興味深いことは, 方向によってX線強度が異なることである. この実験のためには, 滑らかに研磨した白金板に, 陰極線が45度の角度で入射する球形の放電装置が最も適している. 特に追加の装置がなくとも, 半球状のガラス壁から均一な明るい蛍光が見られ, 方向による大きな差はないことを見てとれる. 従って, ランベルト (Lambert) の法則[†] はここではあてはまらない. しかしこの蛍光は, 主に陰極線により発生していると考えられる.

いくつかの放電管から, 異なる方向に放出されるX線の強度を, 光度計でより高精度に測定する実験を行った. さらに同じ目的で, 放電装置の中心の白金板の周囲に, 写真乾板を直径25cmの半円状に曲げてX線に曝露した. いずれの実験でも, 放電管のガラス壁の厚さが場所によって異なり, このためX線の方向によって吸収の度合いが異なることが, 大きな問題であった. しかし, 薄いガラス板を置く事によってガラスの厚さを均一にすることで解決できた.

この実験の結果, 白金板を中心とする仮想的な半球内の放射線は, その辺縁部まで事実上均一であることがわかった. X線の放出角度が約80度を超える場合のみ, 放射線が減少したが, これも比較的小さなもので, 有意な変化は89~90度で認められた.

角度の差による放射線の種類の変化も, 観察されなかった.

以上のようなX線強度の分布から, 蛍光板あるいは写真乾板上で白金板からの画像は, ピンホールカメラ (あるいは細いスリット) で記録すると, 角度が80度を超えない範囲では, 白金板と蛍光板あるいは写真乾板の成す角度が大きいほど強くなると考えられる. このことは, 同一の放電管からの異なる角度の放射線による画像を同時に記録して比較できるような方法で, 確認することができた.

光学では, 蛍光について同様の放射線強度分布を見ることがある. 直方体の容器内の水にフルオレセインを数滴加え, これに白色あるいは紫色の光をあてると, 緩徐に下降する糸状のフルオレセインの辺縁部, すなわち蛍光の放出角度が最大の位置から, 最も明るい蛍

光が発生する. Stokes氏はすでに同様の実験について, この現象は, フルオレセイン溶液によって蛍光を惹起する光線が, 蛍光線そのものよりも多く吸収されるためであると説明している. X線を生成する陰極線も, 白金によってX線よりも多く吸収されることは注目すべきことであり, このことから, 光から蛍光への変換, 陰極線からX線への変換, という2つの現象間の関連性が示唆される. しかし, 現時点ではこの仮定に確たる証拠は存在しない.

さらに, 白金板から放出されるX線の強度分布の観察は, X線の陰影像を得る技術に関して重要な点を含んでいる. 前述のように, 画像を生成する光線が白金から放出される角度が, 80度を超えない範囲で最大となるような位置に放電管を置く事が推奨される. これにより, より鮮鋭な画像が得られ, 白金板が平坦, かつ放電管から斜めに放出される光線が垂直な光線にくらべて有意に厚いガラス壁を通過することがないような構造であれば, 前述のように配置された被写体に入る放射線は, 強度が減弱することがない.

4. 第1報にて, 「物質の透過性」を, 蛍光板を物体の直後に光線と垂直に置いた場合と, 同じ条件下で物体を置かない場合の, 蛍光板の輝度の比と定義した. ここで比透過性 (Spezifische Durchlässigkeit) を, 物体の単位厚さ当りに換算した透過性を示すものとする. 物体を横切るX線の方向に沿って計測した物体の厚さを d とするとき, 比透過性は, 透過性の d 乗根となる.

第1報以来, 透過性の計測には, 主に前述の光度計を使用してきた. 計測する物体の板 (アルミニウム, 錫, ガラスなど) を, 半分に分けられた同じ明るさ蛍光板のいずれか一方の前に置き, 光度の差が一致するように, 放電装置と物体を置いていない側の蛍光板の距離を長くするか, あるいはもう一方の蛍光板を近くに移動する. いずれの場合も, 放電装置の白金と, 移動前および移動後の蛍光板との距離の二乗の比が, 求める物体の透過性である. いずれの方法も同じ結果となる. 2枚目の物体の板を加えることにより, 1枚目の板を通過した光線に対する2枚目の板の透過性を, 同じように計測することができる.

前述の方法は, 蛍光板の輝度が, 線源からの距離の二乗に反比例することを前提としている. これは第1に, 空気がX線を吸収も発生もせず, 第2に, 蛍光の輝度がX線の強度に比例する場合のみ成り立つ. ここで, 第1の条件は明らかに満たされていない. 第2の条件にも疑問がある. 従ってまず, 第1報の10項に記載した実験を行って, 前述の比例則からのズレが充分小さく, この場合は無視しうることを確認した. X線は, 照射された物体からも発生することを考えると, 光度計で測定されるアルミニウム板の透過性は, 0.925mm厚のもの1枚と, 0.0299mm厚のものを31枚重ねた

もの (0.0299 × 31=0.927) には差がなかったこと、さらに蛍光板の輝度には、物体を蛍光板の直前に置く場合、ある程度離して置く場合とで、明らかな差は認められなかったことも述べておく必要がある。

このアルミニウムの透過性実験の結果を示す。

表. 垂直に入射する X 線に対する透過性

	放電管 2	放電管 3	放電管 4	放電管 2
1mm 厚のアルミ板, 1 枚目	0.40	0.45	-	0.68
1mm 厚のアルミ板, 2 枚目	0.55	0.68	-	0.73
2mm 厚のアルミ板, 1 枚目	-	0.30	0.39	0.50
2mm 厚のアルミ板, 2 枚目	-	0.39	0.54	0.63

この実験、およびガラス、錫を使った同様の実験から、以下の結論に達する。すなわち、検体物質を異なる厚さに分割して層状に重ね、平行光線に垂直に置く場合、各層は放射光に対して前の層よりも透過性が高い。言い換えれば、物体の比透過性は、厚さとともに増加する。

この結果は、第 1 報 4 項で述べた通り、錫箔を階段状に重ねた写真の実験とも完全に一致する。また、写真において薄い層状物体の陰影、例えば乾板を包む紙のようなものが、時に明瞭にみえることとも一致する。

5. 異なる 2 つの物質の板の透過性が等しい場合、それぞれの板の厚さを (その他の条件は変えずに)、同じ比率で変化させると、両者の等価性は失われる。この事実は、最も簡単には、白金とアルミニウムを並べたスケールで証明できる。このためには、0.0026mm 厚の白金箔を、0.0299mm 厚のアルミニウム箔を使用した。これを蛍光板あるいは写真乾板の前に置き、X 線を照射すると、例えば 1 層の白金と、6 層のアルミニウムは透過性が等しい。しかし 2 層の白金は、12 層ではなく 16 層のアルミニウムと等価となる。別の放電管では、1 層の白金と 8 層のアルミニウム、8 層の白金と 90 層のアルミニウムの透過性がそれぞれ等価であった。これらの実験から、同じ透過率を与える白金とアルミニウムの厚さの比は、それぞれの層が厚いほど小さいことがわかる。

6. 透過率が等しい 2 つの板の厚さの比は、その物体の厚さと材質に依存する。例えば、X 線が個々の板に到達する前に通過しなければならない放電装置のガラス壁にも依存する。

4 項および 5 項からも予測できるこの結論を証明するために、白金-アルミニウム窓と呼ぶ装置を使うことができるが、この方法は後述のように他の目的にも応用できる。これは、長方形の白金箔 (4.0cm × 6.5cm, 厚さ 0.0026cm) を、薄い紙の蛍光板に糊付けしたものに、直径 0.7cm の円い穴を 3 列に分けて 15 個あけたものである。この小さな窓は、アルミニウム箔の小さな円板 (0.0299mm 厚) で密閉されており、1 番目の窓には円板 1 枚、2 番目の窓の窓には 2 枚、というようになっており、15 番目の窓には 15 枚の円板が積み重なって

いる。この装置を蛍光板の前に置くと、あまり硬くない放電管 (下記参照) を使用すると、白金箔に等しい透過性を持つアルミニウム円板の数を、明瞭に知ることができる。この数を、便宜的に窓数 (Fensternummer) と呼ぶことにする。

例えば、X 線を直接照射した場合、窓数は 5 であった。2mm 厚のナトリウムガラス板を置くと、窓数は 10 となった。すなわち、放電管からの放射線を直接照射した場合と、2mm 厚のガラス板を通過した X 線とを比べると、等しい透過性を与える白金箔とアルミニウム箔の厚さの比は 1/2 に減じたといえる。証明終り。

もう一つの実験についてもここで述べておく。白金-アルミニウム窓を、12 枚の写真フィルムを入れた小箱の上に置く。窓の直下にあった 1 枚目のフィルムを現像すると窓数は 10、12 枚目のフィルムは 13、その他のフィルムは順次 10~13 の範囲にあった。

7. 4~6 項に記載した実験は、放電管から放出された X 線が異なる物質を通過する場合の変化に関するものであった。次に、異なる放電管から放出され、同じ物質、同じ厚さの物体を通過する X 線の透過性が異なることを示す。

この目的のために、異なる放電管において 2mm 厚のアルミニウム板の透過性を次表に示す。数値の一部は、4 項の表のものを使用している。

表. 2mm 厚のアルミニウム板に垂直に入射する X 線の透過性

放電管 1	放電管 2	放電管 3	放電管 4	放電管 2	放電管 5
0.0044	0.22	0.30	0.39	0.50	0.59

放電管は、構造、ガラス壁の厚さはほとんど変わらないが、主にガスの真空度、放電能力が、以下のように異なる。放電能力は、放電管 1 が最も低く、放電管 2 が最も高い。簡単に言えば、放電管 1 は最も軟らかく (weich)、放電管 2 は最も硬い (hart) と表現できる。全ての実験で、同じリウムコイルを放電管に直結し、断続器、一次電流も同じである。

実験した全ての他の物質についても、アルミニウムと同様の振る舞いがみられた。すなわち、いずれの物質も、硬い放電管の X 線の方が、軟らかい放電管の X 線よりも透過性が高かった [4]。この事実は、特に注目すべき事であると考えられる。

透過性が同等の異なる物質の厚さの比は、使用する放電管の硬さにも依存する。これは、白金-アルミニウム窓の実験 (5 項参照) から直ちに明らかとなる。たとえば、非常に軟らかい放電管では窓数 2 となるが、他の条件が同じ非常に硬い放電管では 15 でも不足なまでになる。このことは、透過性が等価な白金とアルミニウムの厚さの比は、放電管が硬いほど小さいこと、さらに上述の結果を考えると、X 線が硬いほど吸収が少ないことを意味するものである。

硬さが異なる放電管のふるまいは、もちろん手などの写真の上でも明らかである。非常に軟らかい放電管を使うと、暗い写真となり骨が不明瞭になる。硬い放電管を使うと、骨が隅々まで明瞭にうつるが軟部は相対的に淡い。さらに非常に硬い放電管では、骨もふくめて淡い陰影しかうつらない。この観察から、撮影する物体の性質に応じて放電管を選択する必要があることがわかる。

8. 同じ放電管から放射される X 線であっても、その質がいろいろな条件によって変化することに言及する必要がある。白金-アルミニウム窓の実験から、このような条件として以下のようなものが挙げられる。(1) 誘導装置に接続したドブレ断続器あるいはフーコー断続器の性能 [5]、すなわち一次電流回路。これに関連して、急速に放電を繰り返すと、特に強力で吸収性が異なる X 線が発生しうることを付言しておく。(2) 放電装置の 2 次回路の放電間隙。(3) 回路中のテスラ (Tesla) 変圧器 [6] の有無。(4) 放電管の真空度 (前述)。(5) 充分解明できていない放電管内の様々な現象。この内いくつかにについては、もう少し詳しく検討する必要がある。

未使用の排気されていない放電管を真空ポンプにつないで排気、加温し、一定の真空度になると、近傍の蛍光板が淡く光る程度の最初の X 線が発生する。放電管に並列に接続された放電間隙は長さ数 mm の火花を発生し、白金-アルミニウム窓の窓数は非常に小さく、X 線は非常に吸収されやすい。すなわち放電管は「非常に軟らかい」。放電間隙を直列にするか、あるいはテスラ変圧器を挿入すると、より強く、吸収性の低い X 線が放出される。放電間隙を直列に拡大することにより、窓数が 2.5 から 10 まで次第に変化した例もある。

(このことから、テスラ変圧器を使うことにより、放電管内圧がより高い状態でも X 線が発生するのではないかと考えた。これは実際にその通りで、ワイヤ状の電極を入れた細い放電管で、内部の空気圧が 3.1mmHg でも X 線が得られた。空気の代わりに水素を使用すると、さらに高圧とすることができる。空気中で X 線を発生しうる最低圧は決定できなかったが、いずれにせよ 0.0002mmHg 以下であり、X 線が発生しうる圧の幅はかなり広いことがわかる)。

誘導コイルに直接つないだ「非常に軟らかい放電管」をさらに排気すると、放射線はさらに強くなり、被写体の透過性が大きくなる。蛍光板の前にかざした手は、より透過性が増し、窓数も増加する。同時に、放電が放電管を通過するように並列につないだ放電間隙も大きくする必要がある。つまり放電管はより「硬く」なる。さらに排気するとさらに硬くなって、放電間隙を 20cm 以上にする必要があり、被写体は著しく透過性となる。蛍光板で検査すると、4cm 厚の鉄板も透過性

であった。

前述のような、誘導コイルに直接つないだ真空ポンプによる放電管の動作は正常なものであるが、放電そのものによって惹起される正常状態からの変異もしばしば発生する。放電管は、ときに全く予想外のふるまいをすることがある。

放電管が硬くなる理由は、ポンプによる持続的なによるものと考えられるが、別の理由もありうる。ポンプから遮断されている中等度に硬い放電管は、適正に使用していても次第に、管球の寿命という点では残念なことながら、それ自体で硬度を増し、従って X 線が白金にあたって、全くあるいはほとんど蛍光を発生しない状態になる。これは、緩徐な自然排気が起こるためである。

このように非常に硬くなってしまった放電管によって、二連式獵銃と内部の弾倉のとて美しい陰影を撮影することができた。弾倉の詳細、ダマスク鋼銃身の内部破損などが、極めて明瞭、鮮明に認められた。放電管の白金板と写真乾板の距離は 15cm、露出時間 12 分 (吸収性の低い X 線は写真効果が小さいので、露出時間は通常より長めである。後述参照)。ドブレ断続器はフーコー断続器に交換する必要があった。従前より大きな放射性能を発揮する放電管を製作することは興味深いことと思われる。

真空ポンプから遮断された放電管の硬化は、放電による自然排気であると前述したが、これだけではなく、電極の変化も同様な効果を持つ。その内部で何が起きているか、不明である。

放電管が硬くなりすぎた場合は、空気を入れる、過熱する、電流の向きを反対にする、あるいは非常に強力な放電を行うことによって軟らかくすることができる。ただしこの最後の方法を行うと、放電管はしばしば前述とは異なる性質を獲得する。例えば、非常に高い放電性能をもちながら比較的小さな窓数、大きな吸収性をもつ X 線を放出したりする。このような「非正規な」放電管のふるまいについてはこれ以上述べない。真空調整装置を備えた Zehnder 氏の手になる放電管は、私のところでは役立っている。

本項ならびにその他の項に記載した観察から、白金陰極を備えた放電管が放出する X 線の成分は、一次的には放電電流の持続時間に依存すると結論できる。真空度、硬度は、放電の形状がそれに依存するという点においてのみ影響を及ぼす。X 線の発生に必要な放電の形状をいかなる方法であれ得られる限り、比較的高圧でも X 線が発生することができる。

最後に、放電管から発生する線質は、断続器が常に同じように作動する限り、一次電流がかなり変化しても全く変化しないか、あるいは僅かな変化にとどまるこ

とを付言しておく。反対に、X線の強度は一定の範囲で一次電流の強さに比例する。このことは以下の実験からもわかる。一次電流を8A, 16A, 32Aと増加させるとき、白金シアン化バリウム蛍光板の蛍光がほとんど消失する放電管との距離はそれぞれ18.1m, 25.7m, 37.5mであった¹²。この距離の二乗の比は、電流の比にほぼ対応する。

9. 上記の5項目に記載したことは、いずれもそれぞれの実験に基づくものであるが、可視光線とX線の類似からの推測も含めてこれをまとめると、以下のようになる。

(a) 放電管から放出される放射線は、吸収度、強度の異なる成分が混在する光線である。

(b) その成分は主に放電流の経時的変化に依存する。

(c) 物質に吸収されやすい成分は、その物質によって異なる。

(d) X線は陰極線により発生し、両者は蛍光の発生、写真効果、電気効果、吸収性、強度の密度依存性などの点で共通の性質を備えているので、いずれも同種の現象であるという仮説が示唆される。この見解を無条件に受入れるわけではないが、前述の実験結果は、この仮説に対してこれまで投げかけられてきた反論を解決したと考える。それは、1つには、レーナルト氏の実験における陰極線の吸収とX線のそれとの間の大きな違いであり、もう1つは陰極線の物質透過性と密度との依存関係の法則が、X線の透過性のそれとは異なることである。

初めの問題については、2つの事実を考慮する必要がある。(1)7項において、吸収性が大きく異なるX線があることを見たが、ヘルツ氏、レーナルト氏の研究から、陰極線もその吸収性に差異があることが示されている。従って、7項で述べた「最も軟らかい」放電管の吸収性が、レーナルト氏の陰極線に及ばないとしても、さらに大きな吸収性をもつX線や、その一方でより小さな吸収性をもつ陰極線が存在するであろうことは疑問の余地がない。従って、さらに実験を重ねることにより、吸収性に関する限り、2つのタイプの光線を橋渡しするような光線が発見される可能性がある。(2)4項において、被写体が薄いほど比透過性が小さいことを見たが、レーナルト氏が用いたような薄い板を使用したならば、レーナルト氏の実験に近いX線吸収性が得られたであろう。

物質の密度がX線と陰極線の吸収に与える影響の違いについては、この違いはX線の吸収性が大きいほど小さく(7項, 8項)、また被写体が薄いほど小さい(5項)ことがわかった。しかし、2つの光線のふるまいの違いは、前述の問題と同じく、今後の実験で消失する可能性について言及しておく必要がある。

特に非常に硬い放電管から放出される陰極線と、非常に軟らかい放電管からのX線は、吸収性においては最も近い関係にある。

10. X線については、蛍光の発生に加えて、写真効果、電気効果などが知られているが、線源が変化する場合、これらがどの程度並行して変化するか、という点は興味深い問題である。ここではこの2つに的を絞って比較することとする。

ここでも白金-アルミニウム窓が非常に有用である。その1つを、被覆した写真乾板の上に置き、もう1つを蛍光板の前に置いて、両者を放電管から等距離とする。X線は、写真乾板と白金シアン化バリウムの感光面まで、正確に同じ媒体内を通過する必要がある。曝射中、蛍光板を観察して窓数を決定し、その後写真乾板を現像して窓数を決定し、両者を比較する。この結果、軟らかい放電管を使用する場合は、窓数に差はない(4~7)。硬い放電管を使用すると、写真乾板の窓数はやや小さいように思えるが、蛍光板に比較してせいぜい1単位の差である。ただし、この現象は繰返し確認したものの、蛍光板における大きな窓数は不確実なところがあるので、完全に確実とはいえない。しかし、絶対確実な結論は以下の通りである。2項に示した光度計で、硬い放電管と軟らかい放電管が蛍光板上で等輝度となるように調製し、蛍光板を写真乾板に替えてこれを現像すると、硬い放電管で照射した部分は、軟らかい放電管の照射部分よりも濃度が低い。すなわち、蛍光板を等輝度とする放射線の写真効果は異なる。

この結果を考えるにあたって、蛍光板、写真乾板いずれも、入射光線を完全には利用していないことを銘記する必要がある。従ってこの結果は、通常の厚さの写真乾板受光面、シアン化白金バリウム層についてのみ当てはまることである。

写真乾板の受光面が、X線に対していかに透過性かという点については、中等度に硬い放電管からのX線を用いて、96枚のフィルムを積み重ねて線源から25cmの位置に置き、鉛の遮蔽で全体を覆って空気中からの放射線を遮蔽した状態で、5分間曝射した実験でも証明されている。一番下のフィルムでも写真効果が明瞭に認められ、一番上は過露出の状態であった。このような観察から、いくつかの写真乾板製造業者に、通常の写真よりもX線写真に適した写真乾板を作れないものか尋ねたが、試供品は使用に耐えなかった。

8項で述べた通り、硬い放電管は、中等度に硬い放電管にくらべて同一条件でより長時間の曝射が必要であることを、多く経験してきた。これは、すべての物質は硬い放電管から放出されるX線についてより透過性である、という9項の結果を考えれば理解できることである。非常に軟らかい放電管で長時間を要することは、放射される光線の強度が小さいことで説明できる。

一次電流を増加させることによってX線の強度を増大する場合(9項), 写真効果は蛍光板の輝度と同程度に増強する。この実験あるいは前述の実験において, 蛍光板にあたるX線強度を線源からの距離によって変化させると, 蛍光板の輝度は, 放射線の強度に少なくとも大まかには比例して変化する。しかし, この法則は一般的には当てはまらない。

11. まとめとして, 細部に以下言及したい。軟らかすぎることのない, 適切に製造された放電管では, X線は白金電極が陰極線に当たる1~2mm大の点から発生する。しかし, ここだけが放出点ではない。電極全体, 放電管の壁の一部も, 小規模ながらX線を放出している。陰極線は陰極からあらゆる方向に放射される。しかしその強度は, 凹面鏡の軸の近傍でのみ有意な大きさで, それゆえに最も強いX線は, 鏡軸と白金板の交点から発生する。放電管が非常に硬く, 白金板が薄い場合は, 相当量のX線がピンホールカメラのように白金版の裏面からも放出されるが, 大部分は鏡軸の交点から発生する。

最も硬い放電管でも, 最大強度の陰極線は, 磁石によって白金板から偏向できる。軟らかいX線による実験の結果から, 更に良い装置を得てX線の磁石による偏向の問題をもう一度研究することとした。近いうちに実験結果を報告したい。

第1報で述べた, 結晶を異なる方向から同じ厚さに切り出した物質の透過性に関する実験を継続している。方解石, 石英, トルマリン, 緑柱石, 霰石, 燐灰石, 重晶石について実験したが, 結晶の方向が透過性に影響を及ぼすことはなかった。

G. Brandes氏により報告された, X線が目の網膜に光覚を惹起する現象を, 私も確認した。実験ノートの記録では, 1895年11月初旬, 完全に暗くした室内の, ヒットルフ管を反対側に置いてある木製扉の近くで, 放電時にかすかな光覚が視野全体に感じられた。この現象は1回しか経験しなかったことから, これは主観的なものと考え, その後これを経験していない理由としては, その後はヒットルフ管ではなく, 真空度がより低く, 白金陽極のない放電管を使ったことにあると考えた。ヒットルフ管は, 真空度が高いため吸収度の低いX線を発生し, また陰極線が衝突する陽極が白金であるため非常に強いX線を発生する。これらはすべて前述のような光覚の発生に好適な条件である。ヒットルフ管は, 短期間ですべて切れてしまったため, 他の放電管を使わざるを得なかった。

現在は硬い放電管を使っているので, Brandes氏の実験は容易に繰り返すことができる。以下に述べる実験は興味深いものと思われる。十分の数mm幅の垂直スリットのある金属板を, 開けた目あるいは閉じた目にできるだけ近づけて持ち, 黒い布をかぶった頭を放電

装置に近づけると, 少し練習することによって, 弱い, 不均一な明るさの光条が見えるようになる。これは眼前のスリットの位置によって, 直線, 曲線, 環状などに形が変化する。スリットをゆっくりと水平方向に動かすと, この形状が順に変化する。この現象は, 眼球を層状のX線が横断し, X線が網膜に蛍光を発生すると考えれば容易に説明しうる。

X線の研究を始めて以来, 回折現象を繰返し追求してきた。細いスリットを使った際に, 回折を思わせる現象が数回得られたが, その正確さを確認するために実験条件を変更したところ, いずれの場合も再現されず, 回折とは全く異なる現象であることを示すことができた。X線が回折すると確信をもって言える実験は, 一度も経験していない。

ヴェルツブルク大学物理学研究所
1897年3月10日

【脚注】

1. 以下に述べる放電管は, いずれも第2報, 20項に記載の原理に基づいたものである。その多くはGreiner & Friedrechs社(Stützerbach)のもので, 豊富かつ無料で提供されたことに多大な謝意を表すものである。
2. 本実験あるいはその他の実験において, エジソン(Edison)の蛍光板が非常に有用であった。これは立体鏡(ステレオスコープ)のような箱で, 光が漏れないように観察者の頭部に押し当てることができ, 反対側のボール紙の壁に白金シアン化バリウムが塗布されている。Edisonは白金シアン化バリウムではなくタンゲステン化合物を使用しているが, いくつかの理由で白金シアン化バリウムが優れている。
3. Sitzungsberichte der physik.-mediz. Gesellschaft zu Würzburg. Jahrg. 1895.
4. 非正規の放電管については, 8項を参照。
5. 性能のよいダブル断続器はフーコー断続器よりも安定しているが, フーコー断続器は一次電流をより有効に利用できる。
6. 放電間隙を直列にすることは, テスラ変圧器の使用と同様の効果があることは, 第2報のフランス語版で述べた。ドイツ語版では, この部分は不注意のため欠落している。

【訳注】[†]

1. Lambertの放射の余弦法則。完全拡散面(=物体への吸収が無く全て反射される理想的反射面)から放出される光の強度は, 面の法線と観測方向がなす角の余弦に比例する。
2. cmの誤りか。