目錄

自序 P.6

前言 P.10

第一章
牙科放射學入門

1.1 牙科X光的誕生至進化 P.14

1.2 如何判讀X光片？ P.21

1.3 我照的X光，是必要的嗎？ P.31

1.4 牙醫西醫，放射學大不同 P.39

1.5 難離難捨：牙科與放射學 P.46

1.6 牙科放射學是專科？ P.54

第二章
走進X光房

2.1 X光是怎樣鍊成的 P.64

2.2 細數輻射單位和量度方法 P.74

2.3 一照X光，健康一去不返？！ P.83

2.4 大大小小的牙科X光機器 P.92

2.5 X光片的乾坤 P.100

2.6 沖曬牙齒的X光片 P.108

2.7 我的X光片放在哪裡？ P.113

2.8 醫學與身邊的輻射比較 P.119

2.9 輻射的防護指引 P.126

第三章
牙科X光片透視出的理論和人情

3.1 時大時小：測顱X光片 P.138

3.2 隨機應變：環口X光片 P.144

3.3 屢敗屢試：牙根尖X光片 P.153

3.4 醫患互動：咬翼X光片 P.159

3.5 咬緊牙關：咬合X光片 P.166

3.6 鎮定自若：電腦掃描CBCT P.169

3.7 又照一次？常見的重照原因 P.178

後記 P.187

1.1

牙科 X 光的誕生至進化

早期牙科 X 光是這樣鍊成的

牙科 X 光的開端從 1896 年講起。那年 4 月，雅典舉辦了第一屆夏季現代奧林匹克運動會。對於牙醫們來說，那年焦點卻在於 1 月。1 月初，德國牙醫奧托・瓦爾克霍夫（Otto Walkhoff）得到物理學教授弗里德里希・奧斯卡・吉塞爾（Fritz Oskar Giesel）的幫忙，成功為自己的牙齒照了一張 X 光，歷時 25 分鐘[1]。如果說書人是史諾比，那第一張牙科 X 光誕生的歷史時刻一定是「在一個風雨交加的黑夜」。翻查很多文獻，找了很多網站，可惜我找不到那天是「風雨交加」還是「月黑風高」（黑旋風出動的時候），我甚至不知道當時是白天還是黑夜。只見很多資料引述當時瓦爾克霍夫說：「那真是一場折磨！但我看到那張 X 光，我超級高興呀！那一刻我就知道，威廉・倫琴發現的好東西對牙科非常重要呢。」現在大眾照牙科 X 光，牙醫會叫患者保持頭部和口腔固定，然後他按個鍵，一秒內就完成。就算照環口 X 光片都只需十秒八秒。當年他則不能動彈 25 分鐘，而且沒有收音機、電視、手機、智能平板陪伴。換著你是瓦爾克霍夫，你也會捧著那張製成品高呼「棒極了」吧。話說回來，究竟瓦爾克霍夫提到的威廉・倫琴是誰？

再倒帶兩星期。1895 年 12 月 22 日，德國物理學家威廉・倫琴（Wilhelm Röntgen）為他的妻子安娜照了一張 X 光。那是個創舉，被認為是史上第一張正式的人類 X 光。在這之前，他發現了 X 射線（俗稱 X 光），而且測試了很多種物質，看看哪些能夠阻擋和吸收 X 射線，形成影像（即 X 光片，也簡稱 X 光）。為了這個歷史時刻，倫琴選擇為安娜照一張手掌 X 光。如果你是倫琴，你會叫安娜擺什麼姿勢？換了是我，我可能會叫她豎起大拇指，或者拇指和食指交叉做個「手指心心」。倫琴卻正經八百，叫她五指張開，照了一個巴掌。沒什麼特別？此言差矣！那無名指上穿著一隻超大的戒指呢[2]！倫琴將關於 X 光的研究寫成報告，在 1895 年的最後幾天出版。兩星期後，瓦爾克霍夫就照了自己的牙齒，看到小臼齒和大臼齒的輪廓。身為牙醫，想必是因為他意識到牙齒 X 光片對他診症和醫治有幫助吧。倫琴因此於 1901 年獲得首屆諾貝爾獎的物理學獎。

既然瓦爾克霍夫照了大牙，不如我照一下門牙。於是又一個德國物理學家華特・柯尼希（Walter König）於 1896 年 3 月發表了報告，展出門牙和犬齒的 X 光。除此之外，還有英國牙醫法蘭克・夏理遜（Frank Harrison），他也將菲林切細成所需尺寸，用黑紙覆蓋，再用橡皮障（rubber dam）包裹，然後由夾子固定好，放進口腔內牙齒旁邊，叫病人咬實夾子。如是者，菲林就穩妥放置到合適位置，靜靜地等待幾分鐘就照好門牙或者大牙的 X 光了。他預

1 Pauwels, R. (2020). History of dental radiography: Evolution of 2D and 3D imaging modalities. *Med Phys Int, 8*(1), 235–77. Retrieved from http://mpijournal.org/pdf/2020-SI-03/MPI-2020-01-p235.pdf，見圖 3。

2 同註 1，http://mpijournal.org/pdf/2020-SI-03/MPI-2020-01-p235.pdf，見圖 2 左面。

期這些X光可以用作檢查牙套、杜牙根，甚至尚未冒出頭來的牙齒。

同時，他也發現及報告了初期X光實驗的危險性。事源他有個熱心的助手不單擔當操作員，也擔當病人的角色，兩星期內分幾次一共照了幾十張牙科X光，每次照10至40分鐘，以比較三部X光機的效能。那敬業樂業的助手過了這兩星期，臉開始又癢又痛，剃不了鬍鬚。再過幾天，臉變得又紅又腫，還開始脫髮！就像李時珍嘗百草，又像袁崇煥「頂硬上」，這些事情發表於1896年6月，成為一時熱話。（後面第二章會詳述X光對身體的影響。當代的牙科X光劑量降低了許多，對身體不會有大傷害。）

另一方面，被譽為「牙科放射學之父」的美國牙醫凱爾斯（C. Edmund Kells）找來自己的牙科助護來照牙科X光，還發明了一個特製的夾子來固定菲林，令那牙科助護咬著夾子時還可以吞口水，不必口吐白沫。過程歷時15分鐘。另外，不得不提同在美國的威廉・J・莫頓（William J. Morton）。他是個多才多藝的醫生，同樣在1896年找來一副頭骨，照了幾張細小的牙科X光片，還有一張全口X光片。一年後，他出版了一本X光教科書，而且發表了史上首張、一張過的全身X光片[3]。他爸爸威廉・T・G・莫頓（William T.G. Morton）是個很厲害的牙醫，在兒子照頭骨X光的

3 Mould, R. F. (2018). William James Morton (1845–1920). Author of America's first X-ray textbook. *Biuletyn Polskiego Towarzystwa Onkologicznego Nowotwory, 3*(3), 184–189. Retrieved from https://doi.org/10.5603/NJO.2018.0026，見圖4。

50年前（1846年）公開示範用乙醚去麻醉病人，完成拔除牙齒和腫瘤切除的手術。可惜在申請專利上被其他人捷足先登，聞說他因屢戰屢敗，意興闌珊。

一度受忽視的防護

據說初期照牙科X光的時候，雖然有十分原始的菲林夾或者固定器，但很多牙醫還是會親身上陣，用手指扶著菲林，把它固定在病人口腔合適的位置，覺得這樣比較方便和準確。結果重複被X光照射的手指日漸受損。上一段提及的凱爾斯也深受其害，左手拇指形成一個傷口，後來演變成皮膚癌並逐漸蔓延整個手掌。首先左掌廢了，後來整條左臂都要截肢了；再後來輪到右手。他整個牙醫生涯長達50年，儘管期間受皮膚癌折磨，後半期十分艱辛，他仍發明了很多劃時代的工具，包括現在牙醫每日都用的抽吸裝置（試想像沒有抽吸裝置為病人吸口水），一共獲得30項專利。走到生命的盡頭，他豪言壯語一番：「我會嗟歎命途多舛嗎？絕不！當我想到每天都有千千萬萬病人因為X光的應用而得益，我不能抱怨。總要有人吃點苦，才能造福百萬人。」看到這裡，我萬分感動，這是《無間道》裡韓琛「一將功成萬骨枯」的相反。凱爾斯果真是個勵志的英雄！

同為美國牙醫的威廉・羅林斯（William H. Rollins）於1896年開始研究牙科X光。前文介紹過當時他的同行都埋頭苦幹地研究如何照得清晰、照得方便，羅林斯則研究如何照得安全。例如他用

X光（當然是早期原始的設置，不是當代的）照射兩隻天竺鼠兩小時，發現牠們分別於八日和十一日後死亡，證明照射劑量過高的X光危害健康。可能你會說，他真殘暴不仁！

從1896年到1904年，九年之間他發表了183篇論文（很多科學家窮盡畢生精力，只能發表100篇以內的論文，因為要寫好每一篇都嘔心瀝血）。羅林斯似乎十分多產，卻絕不馬虎。他的研究建議很實用，例如X光機要妥善罩住，只能有一小片範圍允許X光射出，同時要瞄準病人需要照的地方，旁觀者和操作員亦需受保護以免吸收不必要的輻射。當然病人也要保護：身體無須檢查的地方就不必接受輻射，亦可以穿上防輻衣物作阻隔。業界一直忽視羅林斯的主張，直到其他人相繼因X光照射而受傷，他卻絲毫無損時，才驚覺他的真知灼見。

立體的口腔成像——錐狀射束電腦斷層掃描

1896年可謂群雄並起，引人入勝。現在一起跳到100年後。西醫用的電腦掃描早於1970年代問世，不過牙科用的錐狀射束電腦斷層掃描（cone-beam computed tomography, CBCT）發展得比較遲，要等到1996年才正式面世。當年，意大利團隊經過數年研究，終於發表了論文，描述相信是全球首部牙科CBCT：NewTom 9000。這部機器像個大冬甩，冬甩洞中還有一張床。病人躺在床上，頭頸部推送到冬甩中間，驟眼一看正如去醫院照電腦掃描或者磁力共振。日本團隊也經過一番研究，緊接於1999年推出了名為Ortho-CT的機器。兩個團隊，一東一西，努力研發CBCT，成為一時佳話。這些始祖型號都因為用上影像增強檢測器（image intensifier）而體積龐大。直到2003年，美國團隊成功使用輕巧的平板檢測器（flat-panel detector），推出了DentoCAT，病人只需坐在椅子上，兩塊相連的板一左一右，圍著病人的頭部繞一圈就行[4]。

自此，CBCT如雨後春筍般推陳出新，佔據每次牙科展覽的場地。到了2020年，市場上曾經出現過的CBCT已經多達279款，來自12個國家的47個廠商[5]。產地包括亞洲的中國、日本、韓國和泰國，北歐的丹麥和芬蘭，還有美國、法國、德國、意大利、斯洛伐克、巴西。為了搶佔市場，超過三分一的CBCT機都可以同時照測顱X光片（cephalogram）和環口X光片（panoramic）。這種「三合一」的設計很親切，令我想起小時候電視裡唱片公司推出「雜錦碟」的廣告：三CD單碟價，甚至九CD單碟價。

希望你覺得這歷史挺有趣，然後繼續翻去下一章。

4 Molteni, R. (2021). The way we were (and how we got here): fifty years of technology changes in dental and maxillofacial radiology. *Dentomaxillofacial Radiology, 50*(1), 20200133. Retrieved from https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7780828/，見圖9至11。

5 Gaêta-Araujo, H., Alzoubi, T., Vasconcelos, K. D. F., Orhan, K., Pauwels, R., Casselman, J. W., & Jacobs, R. (2020). Cone beam computed tomography in dentomaxillofacial radiology: a two-decade overview. *Dentomaxillofacial Radiology, 49*(8), 20200145.

2.5
X 光片的乾坤

X 光片看上去薄如紙，其實是公司三文治，共七層。最頂層和最底層是明膠（gelatin），裡面塗上秘製醬汁：含有鹵化銀晶體的乳液，然後是黏合劑，均有兩層，上下對稱；最中間是塑料板。所以從頂至底順次序是明膠、乳液、黏合劑、塑料板、黏合劑、乳液、明膠（圖 2.5.1）。

明膠作為保護膜，保護內裡的乳液層。所謂乳液，就是兩種不互溶的液體混合在一起的混合物，例如水溝油。乳液層裡的鹵化銀晶體和明膠均勻散佈，而鹵化銀晶體就是整張 X 光片的主角，吸收 X 光後會變色，形成影像。主角當然要處變不驚、屹立不倒，所以有黏合劑將之固定在塑料板。乳液層就好像上班時間地鐵裡人頭湧湧，因為空間有限只好勉強混在一起，但是你不想太靠近我，我也不想太靠近你，盡可能隔一條小空隙，不想觸碰到其他人。塑料板就是扶手或者座位，你坐下了或者緊握扶手了，就算列車突然拐彎變速，你都穩如泰山，要是加上黏合劑就更加巍然不動。那為什麼要兩層乳液呢？就是因為要加強菲林感光度。好像巴士空間不夠，要雙層才能容納足夠乘客。

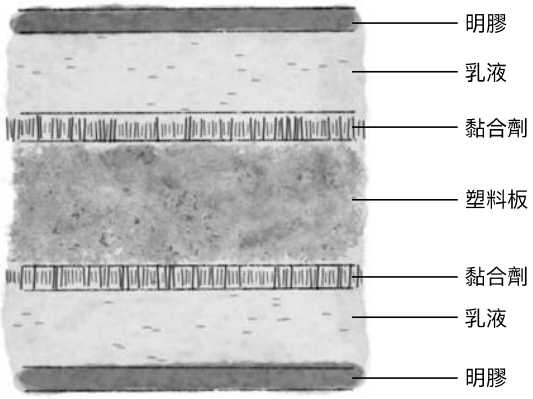

圖 2.5.1　X 光片的橫切面

讀取 X 光片的成像

X 光（或者可見光）射到乳液層，蘊藏的能量會將綠色的鹵化銀晶體拆散，變成帶正電的銀離子和帶負電的鹵離子。沖曬的時候，顯影劑就會將銀離子還原為黑色的銀金屬，潛藏的成像就會呈現。換言之，X 光片上顯示空氣的部分會因而變成黑色。至於牙齒的部分，會因為全部或者大部分的 X 光都被牙齒擋住，所以鹵化銀晶體全部或者大多數都沒有吸收能量，維持綠色，然後在定影的環節洗掉，變成白色或者稍稍變成灰色。

電子 X 光（或者數碼 X 光）的原理有點不同。電子 X 光成像並不取決於黑色的銀金屬的尺寸和分佈，而在於像素（pixel）和灰階（shades of grey）。像素就是圖像的組成單位，用放大鏡不斷

放大，最後會看到一顆顆或者一格格顏色，一顆就是一個像素（圖 2.5.2）。至於灰階，就是「有幾多種顏色」，雖然 X 光表面上看似黑白，其實中間還有深淺不一的灰色（圖 2.5.3）。早幾年課堂開始筆者總會問學生一個老掉牙的問題：「X 光成像裡不只黑和白，還有各種灰色。你猜猜牙科 X 光通常有幾多道灰階（How many shades of grey）？」學生們會歡呼大叫：「50 道！」因為 2015 年上映的著名電影《格雷的五十道陰影》英文名為 *Fifty Shades of Grey*。話說回來，50 度灰階的成像可能比較粗糙。根據說明書，我們用的系統是 16 bit，即是 2 的 16 次方，65,536 度灰階，比 50 度高出許多。至於像素尺寸則是 30 微米，即是 0.03 毫米，等同頭髮那麼幼細。

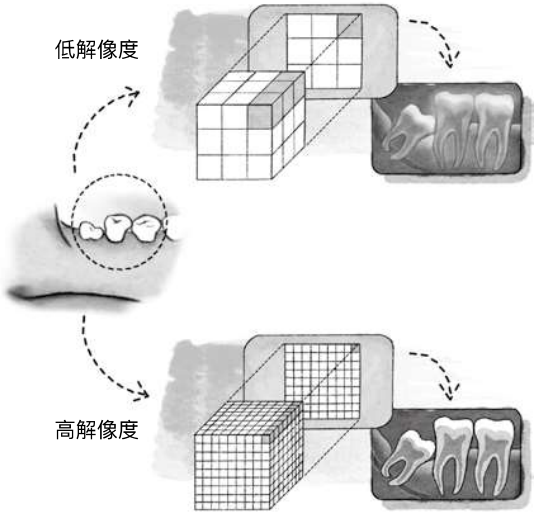

圖 2.5.2　像素的高低會影響成像的清晰程度

圖 2.5.3　灰階

生成電子 X 光要通過「模擬數碼轉換」。此轉換有兩個步驟，取樣和量化。取樣就是將小範圍上下的電壓數值統一。打個比喻，介紹遠足路線的書通常會有一幅圖，圖中有一條線高高低低地上落，代表路程裡的上坡下坡。這線條本來很平滑，如果要取樣，輪廓就會變成樓梯般一級一級，好像低清「起格仔」。取樣後便是量化，每個取樣的信號都指派一個數值。這個數值存在電腦內，熒幕會顯示對應的灰階，整個成像就出來了。

電子 X 光的接收器

電子 X 光不用菲林，取而代之有兩大類接收器：固態探測器（solid-state detector）和光激磷光板（PSP）。

固態探測器

前者可以再細分幾類：電荷耦合器件（charge-coupled device, CCD）、互補式金屬氧化物半導體（complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS）和平板檢測器（flat-panel detector, FPD）。它們的共通點是無須使用掃描器，成像直接顯示在電腦熒幕。X 光射到探測器會產生電荷，由探測器裡面的固態

半導體收集，轉化為成像。西醫放射學會稱這種照 X 光方法作 DR（digital radiography）。固態探測器在牙科通常簡稱為口內傳感器或者傳感器（intraoral sensor 或者 sensor，又稱 IO sensor），一般都比 PSP 和菲林厚。

光激磷光板

至於後者光激磷光板（PSP），經過 X 光照射會產生潛藏成像，需要用特製掃描器令成像顯現再傳到電腦熒幕；PSP 一般都薄如菲林。特製掃描器體積像一本厚厚的漢英大詞典，首先將 PSP 插進一條窄槽裡或者放到彈出來的平台上，然後慢慢推進機器裡。機器讀取成像後，PSP 存下的內容會被抹去，然後由機器彈出來。西醫放射學稱這種照 X 光方法做 CR（computed radiography）。牙科則不太拘泥，不管 CR 還是 DR 一律叫電子 X 光（digital imaging）。

PSP 這簡稱很厲害，令人聯想到手提遊戲機。PSP 採用能發出磷光的物質。什麼是磷光？磷光是「一種緩慢發光的光致發光現象」。你可能說，全部字分開看都明明白白，拼到一起就難以明白。什麼是「光致發光」？首先發光有兩大方法：白熾（incandescence）和冷發光（luminescence）。白熾就是加熱物質令它溫度升高直至發光。以其他方法令物質發光就歸類為冷發光，包括化學發光、結晶發光、電致發光、力致發光、輻射發光、光致發光和熱致光。精彩了，熱致光是冷發光的一種，腦袋進一步混亂！冷靜，沒事兒。熱致光與白熾原理不同。熱致光的物質，好像考古場地挖出來的某些礦物質和陶瓷，以前曾經吸收過電磁波，例如太陽光或者電離輻射，現在經過加熱將潛藏能量以發光形式釋放出來。簡單來說，不是熱到發光，而是熱到將潛藏能量發光釋放。

言歸正傳，什麼是「光致發光」？就是用電磁波（例如可見光）照射物質，物質吸收後發光回禮。如果停止照射，物質都維持發光多一會兒，就叫磷光。如果停止照射，物質馬上不發光，就叫螢光。聽完之後，只能不耐煩但不失禮貌地鼓掌，對不？

現在大家明白了什麼叫磷光。PSP 內能發出磷光的物質叫「銪摻雜氟鹵化鋇」（europium-doped barium fluorohalide）。銪吸收足夠 X 光，能量就會藏於電子內。掃描機用波長 600 納米的紅光照射，那些電子就會釋放潛藏能量，放出波長 300 至 500 納米的綠光。掃描機的光纖將綠光傳到機器內的光電倍增管，後者將光轉化成電能，再變成圖像。PSP 各部分吸收的 X 光量不一，綠光強度也因而不同，最後形成牙齒和骨頭等圖像。

雖然原理大相徑庭，可是一張 PSP 和菲林一樣，共七層。最頂層是保護層，接著是磷光體、反光層、導電層、聚酯纖維基層、光屏蔽層、保護層（後頁圖 2.5.4）。反光層的作用是掃描時將放出的光線放射到光電倍增管。導電層則避免靜電累積，造成偽影。光屏蔽層避免外來光在掃描前破壞潛藏的影像。正因如此，掃描 PSP 毋須黑房，它能在燈光底下「支撐」一會兒，不會「見光

死」。如果定要進黑房掃描，緊記不要開黑房內的紅燈——它的作用有如掃描機的紅光，給紅燈照射—會 PSP 就不用進掃描機了，因為「出師未捷身先死」。不過，PSP 必須在曝光後盡快掃描，因為潛藏能量的電子會隨時間逐漸釋放能量，24 小時後成像的質素會變得欠佳。菲林反而能放久些才沖曬。

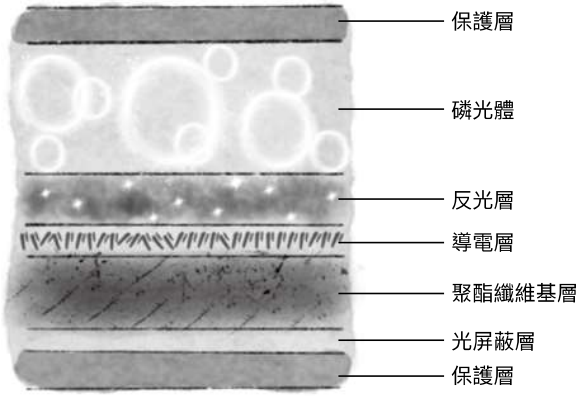

圖 2.5.4　PSP 的橫切面

菲林和各種電子 X 光，到底哪個優勝？像消委會測試市面上的食物或者電器，我們也做個表格，來個大比併。

但結論而言：各花入各眼。

項目	排行 *				原因
	菲林	CCD	CMOS	PSP	
空間解析度（「解像度」）	★★★	★★	★★	★	菲林的感光元素最精細，PSP 的最粗糙。
曝光寬容度 **	★	★★	★★	★★★	PSP 的感光元素寬容度最高，菲林最差。
接收器尺寸	★★★	★	★	★★★	CCD 和 CMOS 有電子零件包裹接收器，導致體積變大。
獲取成像的速度	★	★★★	★★★	★★	CCD 和 CMOS 只要一按鍵就完成，PSP 卻要幾秒時間掃描，菲林更要幾分鐘沖曬。
成像質素	★★★	★★	★★	★★	這個項目很主觀，如果以解像度考慮，菲林提供最高清成像，PSP 解像度最差但曝光寬容度高於 CCD 和 CMOS。
成像調整度	★	★★★	★★★	★★★	只有電子 X 光才能在熒幕上調整光暗和對比，而菲林不行。
成本	★	★★★	★★★	★★	通常電子 X 光系統在採購時都比較貴，後續成本視乎耗損折舊程度。
可靠度	★★★	★★	★★	★★	菲林壞了可以換另一張，沖曬用的化學劑也可以倒掉換新，比較容易。PSP 和固態探測器壞了也可以換，不過電腦和電腦程式壞了就令人頭大。
成像存取	不分先後				不管哪個系統，記得備份、備份、備份。
成像分享	★	★★★	★★★	★★★	例如當病人索賠保險要遞交病歷紀錄和 X 光給保險公司，電子 X 光比較方便。

*　以三星為最佳，一星最次。
**　指 X 光機的輻射量即使調校有錯（過多或者過少），成像仍然可以保持質素。

延伸閱讀：

White, S. C., & Pharoah, M. J. (2018). Chapter 7: Digital imaging. In: *White and Pharoah's Oral Radiology: Principles and Interpretation*. Elsevier Health Sciences.