

DOI: 10.58490/ctjump.2026i103.5167

CHỤP CẮT LỚP VI TÍNH ĐẾM PHOTON – NGUYÊN LÝ KỸ THUẬT, ƯU KHUYẾT ĐIỂM VÀ ỨNG DỤNG LÂM SÀNG

Lâm Đông Phong*

Trường Đại học Y Dược Cần Thơ

*Email: ldphong@ctump.edu.vn

Ngày nhận bài: 28/5/2026

Ngày phản biện: 19/6/2026

Ngày duyệt đăng: 25/9/2026

TÓM TẮT

Chụp cắt lớp vi tính đếm photon là một bước tiến mang tính cách mạng trong công nghệ chẩn đoán hình ảnh, dựa trên nguyên lý phát hiện và phân loại từng photon tia X thay vì tích hợp năng lượng như các hệ thống cắt lớp vi tính truyền thống. Bài tổng quan này nhằm trình bày toàn diện về nguyên lý kỹ thuật, ưu điểm, hạn chế và ứng dụng lâm sàng của cắt lớp vi tính đếm photon trong bối cảnh phát triển của hình ảnh học hiện đại. Về mặt kỹ thuật, cắt lớp vi tính đếm photon sử dụng đầu dò (detector) bán dẫn để chuyển đổi trực tiếp photon thành tín hiệu điện và phân loại theo các ngưỡng năng lượng, cho phép thực hiện chụp ảnh phổ liên tục và phân tích đặc hiệu vật liệu, bao gồm cả chụp ảnh bờ hấp thụ K (K-edge imaging). So với cắt lớp vi tính truyền thống và cắt lớp vi tính năng lượng kép, cắt lớp vi tính đếm photon có tiềm năng vượt trội về độ phân giải không gian, hiệu quả liều, giảm nhiễu và khả năng phân tích mô. Trong lâm sàng, cắt lớp vi tính đếm photon đã chứng minh giá trị trong nhiều lĩnh vực như tìm mạch, hô hấp, thần kinh, cơ xương khớp và ung thư, đặc biệt trong đánh giá mảng xơ vữa thành mạch, tổn thương mô kẽ ở phổi và định lượng thuốc cản quang I-ốt (iodine). Tuy nhiên, chi phí cao, thách thức kỹ thuật và thiếu chuẩn hóa vẫn là những rào cản đáng kể. Trong tương lai, cắt lớp vi tính đếm photon được kỳ vọng đóng vai trò trung tâm trong hình ảnh học chính xác và cá thể hóa, đặc biệt khi kết hợp với trí tuệ nhân tạo và các thuốc cản quang đa thành phần.

Từ khóa: Cắt lớp vi tính đếm photon, đầu dò đếm photon, cắt lớp vi tính năng lượng kép.

ABSTRACT

PHOTON-COUNTING CT: TECHNICAL PRINCIPLES, ADVANTAGES, LIMITATIONS AND CLINICAL APPLICATIONS

Lam Dong Phong*

Can Tho University of Medicine and Pharmacy

Photon-counting computed tomography (PCCT) represents a paradigm shift in computed tomography imaging by enabling direct detection and energy discrimination of individual X-ray photons, as opposed to energy integration in conventional computed tomography systems. This review provides a comprehensive overview of the technical principles, advantages, limitations, and clinical applications of photon-counting computed tomography in modern radiology. Technically, photon-counting computed tomography employs semiconductor detectors to directly convert photons into electrical signals and categorize them based on predefined energy thresholds, enabling continuous spectral imaging and material-specific characterization, including K-edge imaging. Compared with conventional computed tomography and dual-energy computed tomography, photon-counting computed tomography offers superior spatial resolution, improved dose efficiency, reduced electronic noise, and enhanced material decomposition capabilities. Clinically, photon-counting computed tomography has demonstrated significant advantages across cardiovascular, pulmonary, neurological, musculoskeletal, and oncologic imaging, particularly in plaque

characterization, interstitial lung disease assessment, and iodine quantification. Despite its promising performance, challenges such as high system cost, technical limitations, and lack of standardization remain. Future developments are expected to establish photon-counting computed tomography as a cornerstone of precision imaging, particularly with the integration of artificial intelligence and advanced multi-contrast agents.

Keywords: *Photon-counting computed tomography, photon-counting detector, dual-energy computed tomography.*

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong hơn bốn thập kỷ phát triển, chụp cắt lớp vi tính (CLVT) đã trở thành một trong những phương tiện chẩn đoán hình ảnh quan trọng nhất trong thực hành lâm sàng, với sự tiến hóa liên tục về công nghệ đầu dò, tốc độ quét và thuật toán tái tạo. Từ các hệ thống CLVT thế hệ đầu với đầu dò đơn dây đến CLVT đa dây (multidetector CT) và CLVT năng lượng kép (dual-energy CT), mỗi bước tiến đều nhằm cải thiện chất lượng hình ảnh, giảm liều tia X và mở rộng khả năng cung cấp thông tin mô học [1].

Tuy nhiên, nền tảng đầu dò của hầu hết các hệ thống CLVT hiện nay vẫn dựa trên nguyên lý tích hợp năng lượng (energy-integrating detector), trong đó các photon tia X được chuyển đổi gián tiếp thông qua chất phát quang (scintillator) thành ánh sáng, sau đó thành tín hiệu điện. Cơ chế này dẫn đến một số hạn chế cơ bản. Thứ nhất, tín hiệu thu được là tổng năng lượng của nhiều photon, không cho phép phân biệt từng photon theo mức năng lượng riêng lẻ [1]. Thứ hai, các photon năng lượng thấp, vốn mang nhiều thông tin tương phản, thường bị suy giảm bởi nhiễu điện tử và bị đánh trọng số thấp hơn trong quá trình tích hợp năng lượng [2]. Thứ ba, hiện tượng lan truyền ánh sáng trong chất phát quang làm giảm độ phân giải không gian [3].

Sự ra đời của CLVT năng lượng kép đã phần nào khắc phục hạn chế về thông tin năng lượng bằng cách sử dụng hai phổ tia X khác nhau, cho phép phân tích vật liệu và tạo ảnh đơn sắc ảo. Tuy nhiên, CLVT năng lượng kép vẫn bị giới hạn bởi số lượng phổ năng lượng hữu hạn và không cung cấp được thông tin phổ liên tục [4].

Trong bối cảnh đó, CLVT đếm photon nổi lên như một công nghệ đột phá với khả năng phát hiện và phân tích từng photon tia X. Nhờ sử dụng đầu dò đếm photon (photon-counting detector), CLVT đếm photon không chỉ cải thiện đáng kể chất lượng hình ảnh mà còn mở ra khả năng chụp ảnh phổ đa năng lượng với độ chính xác cao hơn. Điều này đặc biệt quan trọng trong xu hướng phát triển của y học chính xác, nơi việc đặc hiệu hóa mô và định lượng vật chất đóng vai trò then chốt [5].

Trong những năm gần đây, số lượng các nghiên cứu về CLVT đếm photon đã gia tăng nhanh chóng với nhiều kết quả khả quan trong các lĩnh vực tim mạch, thần kinh, ung thư, cơ xương khớp, lồng ngực và nhi khoa. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu hiện nay tập trung vào từng ứng dụng hoặc từng hệ cơ quan riêng lẻ, trong khi các bài tổng quan cập nhật một cách toàn diện về nguyên lý kỹ thuật, ưu điểm, hạn chế, ứng dụng lâm sàng và triển vọng phát triển của CLVT đếm photon còn tương đối hạn chế tại Việt Nam. Bên cạnh đó, nhiều vấn đề quan trọng như hiệu quả lâm sàng thực sự, tính chuẩn hóa của các thông số định lượng, hiệu quả chi phí, khả năng tích hợp vào quy trình làm việc thường quy và vai trò của CLVT đếm photon trong kỷ nguyên trí tuệ nhân tạo vẫn đang tiếp tục được nghiên cứu và thảo luận.

Bài viết này được thực hiện dưới hình thức tổng quan tường thuật (Narrative Review). Việc tìm kiếm tài liệu được tiến hành trên các cơ sở dữ liệu PubMed/MEDLINE,

Scopus và Web of Science đối với các bài báo bằng tiếng Anh được công bố trong giai đoạn từ tháng 01 năm 2018 đến tháng 03 năm 2026, sử dụng kết hợp các từ khóa: “photon-counting CT”, “photon-counting detector”, “dual-energy CT” và “clinical applications”. Các nghiên cứu gốc, bài tổng quan hệ thống, phân tích gộp, tuyên bố đồng thuận và hướng dẫn thực hành được đưa vào phân tích; trong khi đó, các bài xã luận (editorials), tóm tắt hội nghị, thư gửi ban biên tập, các bài báo trùng lặp và những nghiên cứu không liên quan trực tiếp đến chủ đề được loại trừ. Các tài liệu được lựa chọn sau đó được tổng hợp và phân tích có chọn lọc nhằm cập nhật các bằng chứng hiện có về nguyên lý công nghệ, ứng dụng lâm sàng, những hạn chế và triển vọng phát triển của CLVT đếm photon.

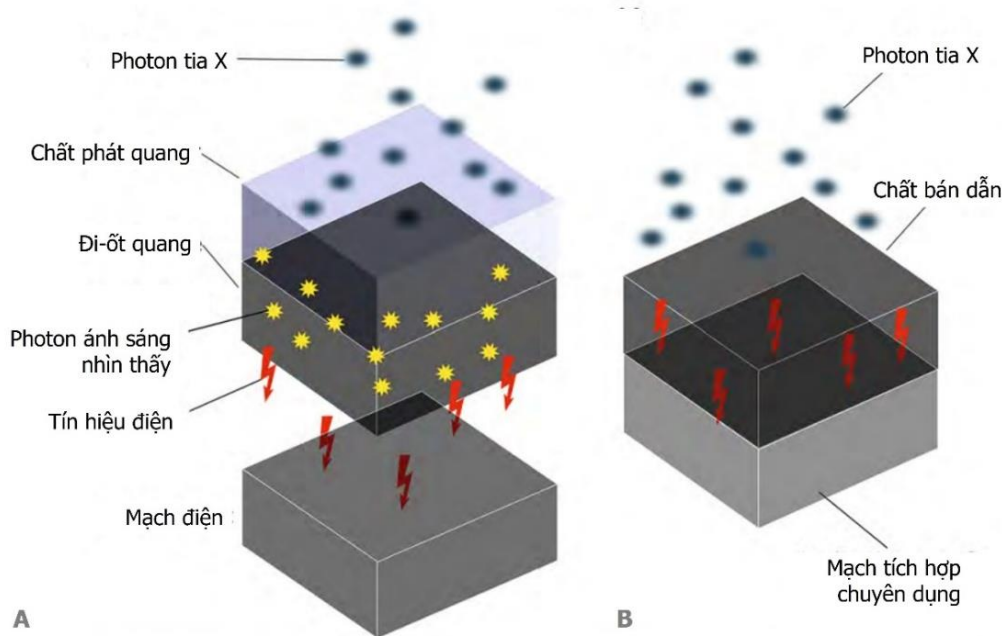
Trên cơ sở đó, bài tổng quan này nhằm hệ thống hóa các nguyên lý kỹ thuật căn bản của CLVT đếm photon, phân tích những ưu điểm và hạn chế so với các hệ thống CLVT sử dụng đầu dò tích hợp năng lượng, cập nhật các dữ liệu hiện có về ứng dụng lâm sàng trên các hệ cơ quan, đồng thời thảo luận những thách thức, xu hướng phát triển và tiềm năng ứng dụng của công nghệ này trong thực hành chẩn đoán hình ảnh hiện đại.

II. NỘI DUNG TỔNG QUAN

2.1. Nguyên lý kỹ thuật căn bản

Nguyên lý cốt lõi của CLVT đếm photon nằm ở khả năng phát hiện trực tiếp từng photon tia X và đo năng lượng của chúng. Không giống như đầu dò tích hợp năng lượng, đầu dò đếm photon sử dụng vật liệu bán dẫn như Cadmium telluride (CdTe) hoặc Cadmium Zinc telluride (CZT) để chuyển đổi photon tia X thành các cặp lỗ trống – điện tử (electron–hole pairs). Khi một photon tương tác với đầu dò, năng lượng của nó được chuyển đổi thành một xung điện có biên độ tỷ lệ với năng lượng photon [1]. Các xung điện này sau đó được so sánh với các ngưỡng năng lượng (energy thresholds) được thiết lập trước. Mỗi photon sẽ được phân loại vào một “ngưỡng/dải năng lượng” (energy bins) tương ứng, cho phép xây dựng phổ năng lượng của tia X tại từng phần tử khối (voxel). Đây là cơ sở của chụp ảnh phổ (spectral imaging) trong CLVT đếm photon [5]. Một điểm quan trọng là khả năng thực hiện chụp ảnh bờ hấp thụ K (K-edge imaging), trong đó các vật liệu có số nguyên tử cao như I-ốt hoặc Gadolinium thể hiện sự thay đổi đột ngột về hệ số hấp thụ tại một mức năng lượng đặc trưng (K-edge) [6]. CLVT đếm photon có thể khai thác đặc điểm này để phân biệt và định lượng các chất tương phản khác nhau trong cùng một lần chụp [7].

So với đầu dò tích hợp năng lượng, đầu dò đếm photon có nhiều ưu điểm về mặt vật lý. Do không sử dụng chất phát quang, hiện tượng lan truyền ánh sáng bị loại bỏ, giúp cải thiện độ phân giải không gian. Ngoài ra, nhiều điện tử có thể được loại bỏ bằng cách thiết lập ngưỡng năng lượng tối thiểu, do đó các photon năng lượng thấp không bị lấn át bởi nhiễu [5].



Hình 1. Hình minh họa nguyên lý hoạt động của đầu dò đếm photon so với đầu dò tích hợp năng lượng.

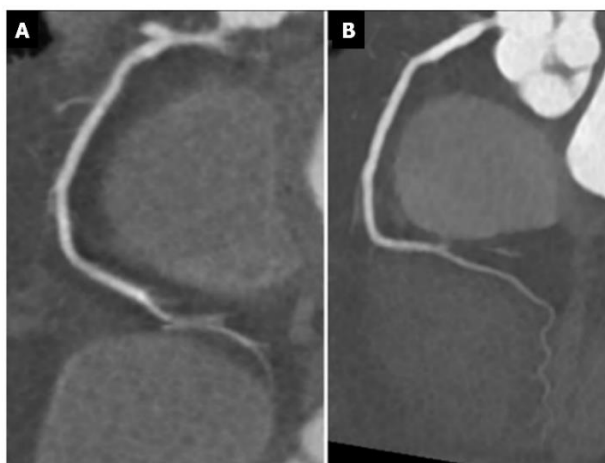
A. Đầu dò tích hợp năng lượng. Các đầu dò riêng lẻ được làm bằng chất phát quang như Gadolinium oxide hoặc Gadolinium oxysulfide (GOS) hấp thụ các photon tia X và chuyển đổi năng lượng của chúng thành ánh sáng nhìn thấy được. Sau đó, ánh sáng này được phát hiện bởi các điốt quang (photodiodes) đặt ở mặt sau của mỗi đầu dò và chuyển đổi thành dòng điện. Tín hiệu được phát hiện tỷ lệ thuận với tổng năng lượng photon mà không có khả năng phân biệt giữa các photon riêng lẻ. B. Trong đầu dò của máy CLVT đếm photon, một chất bán dẫn như Cadmium telluride hấp thụ các photon tia X. Điều này tạo ra các cặp lỗ trống - điện tử với số lượng tỷ lệ thuận với năng lượng photon được phát hiện, được tách ra trong một điện trường mạnh, dẫn đến sự chuyển đổi trực tiếp tín hiệu được phát hiện thành dòng điện. Với phương pháp này, các photon riêng lẻ có thể được đếm và năng lượng tương ứng của chúng có thể được đo. Nguồn [1]

2.2. Ưu điểm của cắt lớp vi tính đếm photon

CLVT đếm photon loại bỏ nhiễu điện tử và tối ưu hóa việc sử dụng photon năng lượng thấp. So với CLVT truyền thống sử dụng đầu dò tích hợp năng lượng, CLVT đếm photon mang lại những cải tiến mang tính bản chất về cả vật lý thu nhận tín hiệu lẫn chất lượng hình ảnh. Trong hệ thống đầu dò tích hợp năng lượng, tín hiệu đầu ra là tổng năng lượng của nhiều photon sau khi trải qua quá trình chuyển đổi hai bước (tia X → ánh sáng → điện), do đó thông tin về năng lượng của từng photon bị mất đi và tín hiệu dễ bị ảnh hưởng bởi nhiễu điện tử cũng như hiện tượng lan truyền ánh sáng trong đầu dò. Ngược lại, CLVT đếm photon sử dụng vật liệu bán dẫn để chuyển đổi trực tiếp photon tia X thành tín hiệu điện, cho phép ghi nhận riêng lẻ từng photon và xác định năng lượng của chúng [1],[5]. Cơ chế này giúp loại bỏ gần như hoàn toàn nhiễu điện tử nền, đặc biệt trong vùng năng lượng thấp, từ đó cải thiện đáng kể tỷ số tín hiệu trên nhiễu (Signal-to-Noise Ratio) và tỷ số tương phản trên nhiễu (Contrast-to-Noise Ratio), nhất là trong các khảo sát liều tia X thấp [5]. Một hệ quả quan trọng của việc loại bỏ nhiễu điện tử là khả năng tận dụng hiệu quả hơn các photon năng lượng thấp – vốn đóng vai trò chính trong việc tạo tương phản mô mềm.

Trong CLVT truyền thống, các photon năng lượng thấp thường bị loại bỏ hoặc bị “chìm” trong nhiễu, trong khi CLVT đếm photon có thể ghi nhận và khai thác tối đa thông tin từ các photon này. Điều này không chỉ cải thiện chất lượng hình ảnh mà còn cho phép giảm liều tia mà vẫn duy trì hoặc thậm chí nâng cao khả năng phát hiện tổn thương [8].

Một trong những ưu điểm nổi bật nhất của CLVT đếm photon là độ phân giải không gian cao. Do thiết kế đầu dò của CLVT đếm photon không sử dụng lớp chất phát quang nên loại bỏ hiện tượng lan truyền ánh sáng (light spread), vốn là nguyên nhân làm giảm độ phân giải không gian trong đầu dò tích hợp năng lượng. Nhờ đó, CLVT đếm photon có thể sử dụng các điểm ảnh với kích thước nhỏ hơn đáng kể, dẫn đến tăng độ phân giải không gian nội tại [1],[8]. CLVT đếm photon đạt được độ phân giải dưới 0,25 mm nên điều này đặc biệt có ý nghĩa trong việc phát hiện các cấu trúc nhỏ như mảng xơ vữa kích thước nhỏ, vi gãy xương hoặc các tổn thương sớm trong nhu mô. Ngoài ra, độ phân giải cao hơn còn giúp giảm hiệu ứng thể tích một phần (partial volume effect), góp phần cải thiện độ chính xác định lượng [8].



Hình 2. Chụp mạch vành bằng CLVT của một bệnh nhân 73 tuổi.

A. Hình CLVT năng lượng kép tái tạo đa mặt phẳng cong của động mạch vành phải (đầu dò tích hợp năng lượng thế hệ thứ 2). B. Hình CLVT đếm photon chụp cùng một mạch máu như hình A, cho thấy rõ độ phân giải cao hơn và chất lượng hình ảnh được cải thiện. Nguồn [1]

CLVT đếm photon giúp giảm đáng kể các loại nhiễu ảnh (artifacts) phổ biến như cứng chùm tia (beam hardening) và nhiễu nở rộng/vôi hóa (blooming/calcification) nhờ khả năng tái tạo ảnh đơn sắc và phân tích phổ. Điều này đặc biệt quan trọng trong đánh giá giá đỡ lòng mạch (stent) và mảng xơ vữa vôi hóa [9]. Ngoài ra, Trong CLVT truyền thống, sự kết hợp của hiệu ứng thể tích một phần và hàm phân tán điểm (Point Spread Function) dẫn đến hiện tượng nở rộng giả tạo (artificial broadening/blurring) của các cấu trúc có kích thước nhỏ, cấu trúc mỏng hoặc các cấu trúc có mật độ tương phản cao so với môi trường xung quanh, làm che lấp lòng mạch hoặc cấu trúc lân cận [10]. CLVT đếm photon, với độ phân giải cao hơn và đặc tính ghi nhận tín hiệu chính xác hơn, giúp giảm đáng kể hiện tượng này, từ đó nâng cao độ chính xác trong đánh giá hẹp động mạch vành cũng như tình trạng lòng giá đỡ [10]. Đây là một cải tiến có ý nghĩa trực tiếp đến quyết định lâm sàng, đặc biệt trong các trường hợp có vôi hóa lan tỏa hoặc đặt giá đỡ mạch máu có đường kính nhỏ.

Khi so sánh với CLVT năng lượng kép, CLVT đếm photon tiếp tục thể hiện ưu thế về khả năng phân tích phổ năng lượng. Trong CLVT năng lượng kép, dữ liệu phổ thường

được thu nhận từ hai mức năng lượng khác nhau (ví dụ: hai mức điện áp ống tia hoặc hai đầu dò khác nhau), do đó chỉ cung cấp thông tin phổ giới hạn và phụ thuộc vào các mô hình giả định để phân tích vật chất. Ngược lại, CLVT đếm photon cho phép phân loại photon vào nhiều “ngưỡng/dải năng lượng”, từ đó tái tạo phổ năng lượng gần như liên tục [5]. Điều này giúp nâng cao độ chính xác của CLVT đếm photon trong phân tích vật chất và cho phép phân biệt tốt hơn các thành phần có đặc tính suy giảm tương tự, như I-ốt, can-xi, axit uric hoặc các chất tương phản mới [1],[3],[5]. Đồng thời, CLVT đếm photon cho phép tái tạo ảnh đơn sắc ảo (virtual monoenergetic images) trên một ngưỡng/dải năng lượng rộng hơn, giúp tối ưu hóa tương phản hoặc giảm hiện tượng nhiễu ảnh tùy theo mục đích lâm sàng [3].



CLVT truyền thống

CLVT đếm photon
tiêu chuẩnCLVT đếm photon
130 keV

Hình 3. Hình ảnh minh họa bệnh nhân 85 tuổi được phẫu thuật kết hợp xương sau chấn thương cột sống cổ.

Tình trạng lỏng vít cuống sống bên phải ở đốt sống C5 rõ nhất trên ảnh CLVT đếm photon 130 keV, trong khi nhiều ảnh mạnh nhất trên ảnh CLVT truyền thống. Liều bức xạ thấp hơn đáng kể trong lần chụp CLVT đếm photon (CTDIvol 12,45 mGy so với 7,54 mGy). Nguồn [1]

Về mặt kỹ thuật, CLVT đếm photon cũng có ưu thế ở chỗ không cần thay đổi điện áp ống tia hoặc sử dụng hai nguồn tia như CLVT năng lượng kép. Điều này giúp đơn giản hóa thiết kế hệ thống, giảm các vấn đề liên quan đến đồng bộ phổ năng lượng và hạn chế các sai số do lệch thời gian hoặc chuyển động bệnh nhân giữa các lần thu nhận dữ liệu. Hệ quả là dữ liệu phổ trong CLVT đếm photon có tính đồng nhất và độ tin cậy cao hơn [8].

Hiệu quả liều là một ưu điểm quan trọng khác. Nhờ khả năng sử dụng toàn bộ phổ năng lượng và giảm lãng phí photon, CLVT đếm photon có thể giảm liều tia đáng kể mà vẫn duy trì chất lượng hình ảnh. Nhiều nghiên cứu đã chứng minh rằng CLVT đếm photon có thể giảm liều tia từ 20–50% so với CLVT truyền thống mà vẫn duy trì hoặc cải thiện chất lượng hình ảnh [5]. Điều này đạt được nhờ hiệu quả sử dụng photon cao hơn, loại bỏ nhiễu điện tử và khả năng tối ưu hóa phổ năng lượng. Việc giảm liều tia đặc biệt có ý nghĩa trong các nhóm bệnh nhân cần chụp lặp lại nhiều lần như bệnh nhân ung thư, bệnh lý mạn tính hoặc trong nhi khoa [3].

Tóm lại, những cải tiến của CLVT đếm photon so với CLVT truyền thống và CLVT năng lượng kép không chỉ mang tính kỹ thuật mà còn có ý nghĩa lâm sàng sâu sắc. CLVT đếm photon không đơn thuần là một bước tiến về chất lượng hình ảnh mà còn mở ra khả năng chuyển đổi CLVT từ một phương tiện chẩn đoán hình thái sang một công cụ cung cấp

thông tin định lượng và chức năng, góp phần nâng cao độ chính xác chẩn đoán và hỗ trợ y học cá thể hóa.

Bảng 1. So sánh các tiêu chí kỹ thuật trong việc tạo ảnh của CLVT truyền thống, CLVT năng lượng kép và CLVT đếm photon [1]-[10]

Tiêu chí	CLVT truyền thống	CLVT năng lượng kép	CLVT đếm photon
Nguyên lý đầu thu	Đầu thu tích hợp năng lượng	Đầu thu tích hợp năng lượng, thu nhận 2 phổ năng lượng khác nhau	Đầu thu đếm photon
Cách thu nhận tia X	Một phổ năng lượng	Hai phổ năng lượng (thấp và cao)	Đếm từng photon và phân loại theo năng lượng
Thông tin năng lượng	Không phân biệt năng lượng photon	Phân biệt 2 mức năng lượng	Phân biệt nhiều mức năng lượng
Độ phân giải không gian	Tốt	Tốt	Rất cao
Độ phân giải tương phản	Tốt	Cao hơn CLVT truyền thống	Cao nhất
Nhiều ảnh	Trung bình	Giảm nhẹ	Thấp nhất
Liều tia	Chuẩn	Tương đương hoặc thấp hơn CLVT thường	Thấp nhất (trong cùng chất lượng ảnh)
Hiện tượng nhiễu nở rộng	Nhiều	Giảm	Giảm rõ rệt
Hiện tượng cứng chùm tia	Dễ gặp	Giảm	Giảm đáng kể
Phân biệt vật chất	Hạn chế	Tốt (I-ốt, axit uric, can-xi...)	Rất tốt, đa vật chất
Định lượng I-ốt	Không	Có	Chính xác hơn

2.3. Ứng dụng lâm sàng của cắt lớp vi tính đếm photon

Sự chuyển đổi từ hệ thống đầu dò tích hợp năng lượng sang đầu dò đếm photon không chỉ mang lại cải thiện về mặt vật lý hình ảnh mà còn mở ra một hệ sinh thái ứng dụng lâm sàng hoàn toàn mới, nơi thông tin hình ảnh không còn giới hạn ở mức độ hình thái mà tiến tới định lượng, đặc hiệu hóa mô và thậm chí tiếp cận gần hơn với hình ảnh học phân tử. Các ứng dụng của CLVT đếm photon cần được hiểu không đơn thuần là “tốt hơn CLVT thường”, mà là sự thay đổi về bản chất của thông tin hình ảnh thu được, đặc biệt trong các bệnh lý mà phân tích thành phần mô và cấu trúc vi mô đóng vai trò quyết định trong chẩn đoán và điều trị.

2.3.1. Tim mạch

Trong lĩnh vực tim mạch, CLVT đếm photon được xem là một trong những ứng dụng có tiềm năng chuyển đổi thực hành lâm sàng rõ rệt nhất. Các hệ thống CLVT truyền thống, dù đã đạt đến độ phân giải cao, vẫn gặp khó khăn trong đánh giá động mạch vành ở những bệnh nhân có vôi hóa nặng hoặc đặt giá đỡ lòng mạch, chủ yếu do hiện tượng nhiễu nở rộng (blooming artifact) làm phóng đại kích thước mảng vôi và che lấp lòng mạch thực sự. Nhờ độ phân giải không gian có tiềm năng vượt trội và khả năng tái tạo phân tử khối nhỏ hơn đáng kể, CLVT đếm photon giúp giảm thiểu hiện tượng này, từ đó cải thiện độ chính xác trong đánh giá mức độ hẹp động mạch vành [10].

Quan trọng hơn, CLVT đếm photon cho phép phân tích thành phần mảng xơ vữa với độ chi tiết cao hơn so với CLVT truyền thống. Nhờ khả năng phân tích phổ năng lượng liên tục và tái tạo ảnh đơn sắc ở nhiều mức năng lượng khác nhau, CLVT đếm photon có thể

phân biệt tương đối chính xác các thành phần mỡ (lipid), xơ và vôi hóa trong mảng xơ vữa. CLVT đếm photon có ý nghĩa quan trọng trong đánh giá nguy cơ tim mạch, vì các mảng giàu lipid và có vỏ xơ mỏng (thin-cap fibroatheroma) liên quan chặt chẽ đến nguy cơ vỡ mảng xơ vữa và nhồi máu cơ tim [11].

Một ứng dụng nổi bật khác là đánh giá giá đỡ lòng động mạch vành. Với CLVT truyền thống, hiện tượng nhiễu ảnh nở rộng và nhiễu ảnh kim loại làm hạn chế đáng kể khả năng đánh giá lòng giá đỡ, đặc biệt với các giá đỡ kích thước nhỏ (<3 mm). CLVT đếm photon giúp giảm đáng kể nhiễu ảnh này thông qua kết hợp độ phân giải cao và tái tạo đơn sắc ở mức năng lượng cao, từ đó cải thiện khả năng đánh giá tái hẹp trong giá đỡ [12]. Một số nghiên cứu gần đây cho thấy CLVT đếm photon có thể đạt độ chính xác chẩn đoán tương đương hoặc vượt qua CLVT truyền thống trong đánh giá giá đỡ, đặc biệt trong các giá đỡ lòng mạch nhỏ và có mật độ kim loại cao [10], [11], [12].

Ngoài ra, CLVT đếm photon mở ra khả năng đánh giá tưới máu cơ tim dựa trên định lượng I-ốt với độ chính xác cao hơn [13]. Khả năng này không chỉ giúp phát hiện thiếu máu cơ tim mà còn có thể tích hợp với đánh giá giải phẫu trong cùng một lần chụp, tạo nên một phương pháp “one-stop-shop” (tạm dịch “tất cả trong một”) cho bệnh lý động mạch. Đây là một bước tiến quan trọng hướng tới cá thể hóa chẩn đoán và điều trị trong tim mạch.

Một hướng nghiên cứu mới là sử dụng dữ liệu CLVT đếm photon để ước tính các thông số chức năng như đánh giá dự trữ lưu lượng phân đoạn động mạch vành (fractional flow reserve). Nhờ chất lượng hình ảnh cao và dữ liệu phổ phong phú, CLVT đếm photon có thể cải thiện độ chính xác của các mô hình tính toán huyết động, mặc dù lĩnh vực này vẫn đang trong giai đoạn phát triển [15].

2.3.2. Hô hấp

Trong lĩnh vực hô hấp, CLVT đếm photon mang lại lợi ích rõ ràng khi đánh giá các bệnh lý nhu mô phổi, đặc biệt là bệnh phổi mô kẽ và các tổn thương nhỏ [16]. Bởi vì phổi có cấu trúc vi mô phức tạp và độ tương phản thấp giữa các thành phần nên việc nâng cao độ phân giải không gian cùng với giảm nhiễu trở nên rất quan trọng. CLVT đếm photon cho phép phát hiện các thay đổi sớm của bệnh phổi mô kẽ như dày vách liên tiểu thùy, tổn thương dạng kính mờ hoặc dạng lưới với độ rõ nét cao hơn so với CLVT truyền thống. Điều này có thể giúp chẩn đoán sớm và phân loại chính xác hơn các bệnh lý như xơ phổi vô căn hoặc viêm phổi mô kẽ liên quan bệnh hệ thống [17]. Đối với các nốt phổi nhỏ, đặc biệt là các nốt <3 mm, CLVT đếm photon cho thấy khả năng phát hiện vượt trội nhờ độ phân giải cao và giảm nhiễu. Điều này có ý nghĩa quan trọng trong sàng lọc ung thư phổi và theo dõi nốt phổi nhỏ [17]. Kỹ thuật CLVT đếm photon còn cho phép phân tích chi tiết các đặc điểm hình thái và bề mặt nốt, giúp cải thiện đáng kể độ chính xác trong việc phân loại tổn thương lành tính và ác tính [17],[18].

Một khía cạnh đáng chú ý là khả năng thực hiện hình ảnh chức năng. Bằng cách phân tích I-ốt và tạo bản đồ phân bố tưới máu, CLVT đếm photon có thể đánh giá sự phân bố thông khí – tưới máu trong phổi mà không cần sử dụng các kỹ thuật phức tạp như chụp cắt lớp vi tính phát xạ đơn photon (Single Photon Emission Computed) hoặc cộng hưởng từ [19]. Điều này mở ra hướng tiếp cận mới trong đánh giá các bệnh lý như thuyên tắc phổi hoặc bệnh phổi tắc nghẽn mạn tính.

2.3.3. Thần kinh

Trong thần kinh học, CLVT đếm photon mang lại những cải thiện quan trọng trong phát hiện các tổn thương nhỏ và phân biệt các thành phần mô có mật độ gần nhau. Một trong những ứng dụng nổi bật là phát hiện xuất huyết não nhỏ, nơi độ tương phản giữa máu và nhu

mô não rất thấp trong giai đoạn sớm. CLVT đếm photon, nhờ giảm nhiễu và cải thiện độ tương phản, có thể phát hiện các ổ xuất huyết nhỏ mà CLVT truyền thống có thể bỏ sót [20]. Quan trọng hơn, khả năng phân biệt I-ốt và máu giúp giải quyết một vấn đề lâm sàng thường gặp: phân biệt xuất huyết thực sự với thoát thuốc cản quang sau can thiệp mạch não [21].

Trong đột quỵ do thiếu máu não, khả năng phát hiện sớm các thay đổi nhu mô như giảm đậm độ nhẹ hoặc phù tể bào có thể được cải thiện với CLVT đếm photon. Công nghệ này cho phép phân tách phổ năng lượng của tia X, từ đó cải thiện độ tương phản giữa vùng thiếu máu cục bộ và mô não bình thường so với CLVT thông thường [22]. Đặc biệt, khả năng đếm photon từng ngưỡng/mức năng lượng giúp loại bỏ nhiễu điện tử và cho phép tạo ảnh đơn sắc tối ưu, từ đó tăng độ nhạy trong việc chẩn đoán các dấu hiệu thiếu máu não giai đoạn sớm mà các hệ thống đầu dò tích hợp năng lượng truyền thống thường bỏ sót [23].

Ngoài ra, CLVT đếm photon còn có tiềm năng trong đánh giá vi cấu trúc não và phân tích thành phần mô, ví dụ phân biệt chất xám và chất trắng hoặc đánh giá myelin [24]. Đây là những hướng nghiên cứu mới có thể mở rộng ứng dụng của CLVT đếm photon trong các bệnh lý thoái hóa hoặc viêm nhiễm hệ thần kinh.

2.3.4. Cơ xương khớp

Trong lĩnh vực cơ xương khớp, CLVT đếm photon mang lại khả năng đánh giá vi cấu trúc xương với độ chi tiết rõ ràng hơn. Điều này đặc biệt quan trọng trong các bệnh lý như loãng xương, nơi mật độ khoáng xương không phản ánh đầy đủ nguy cơ gãy xương. CLVT đếm photon có thể cung cấp thông tin về cấu trúc bề xương, giúp đánh giá toàn diện hơn chất lượng xương [25]. Ngoài ra, CLVT đếm photon cải thiện đánh giá các tổn thương xương nhỏ, gãy xương vi thể và tổn thương sụn, đặc biệt trong các khớp nhỏ như cổ tay hoặc bàn chân [26].

Một ứng dụng lâm sàng quan trọng là trong bệnh gút (gout). CLVT đếm photon, với khả năng phân tích phổ năng lượng, có thể phân biệt chính xác tinh thể urat (urate) với canxi (calcium) mà không cần sử dụng CLVT năng lượng kép [26]. Điều này giúp chẩn đoán bệnh gút với độ chính xác cao hơn và có thể theo dõi đáp ứng điều trị thông qua định lượng gánh nặng tinh thể (quantification of crystal burden).

2.3.5. Ung thư

Trong ung thư học, CLVT đếm photon mở ra một hướng tiếp cận mới trong đặc hiệu hóa khối u và theo dõi điều trị. Khả năng phân tích vật liệu và định lượng I-ốt cho phép đánh giá tưới máu khối u, một yếu tố quan trọng trong phân biệt u lành – ác và đánh giá đáp ứng điều trị [27].

CLVT đếm photon cũng cho phép tạo ảnh đơn sắc tối ưu cho từng loại tổn thương, giúp cải thiện độ tương phản giữa khối u và mô lành [28]. Ngoài ra, khả năng phân tích phổ liên tục có thể giúp phát hiện các thay đổi nhỏ trong thành phần mô, ví dụ hoại tử hoặc xơ hóa sau điều trị [27],[28].

Một hướng phát triển quan trọng của CLVT đếm photon là sử dụng các thuốc cản quang đa thành phần kết hợp với chụp ảnh bờ hấp thụ K để theo dõi nhiều mục tiêu sinh học cùng lúc, ví dụ đồng thời đánh giá tưới máu và biểu hiện thụ thể [7],[29].

2.3.6. Nhi khoa

Trong nhi khoa, CLVT đếm photon mang lại lợi ích đặc biệt quan trọng do khả năng giảm liều tia trong khi vẫn duy trì chất lượng hình ảnh cao. Trẻ em nhạy cảm hơn với bức xạ và thường cần chụp lặp lại nhiều lần, do đó việc giảm liều là ưu tiên hàng đầu [30]. CLVT đếm photon cho phép giảm liều đáng kể nhờ hiệu quả sử dụng photon cao hơn và giảm

hiều. Đồng thời, độ phân giải cao giúp đánh giá tốt các cấu trúc nhỏ trong tim bẩm sinh hoặc dị tật bẩm sinh khác [31].

2.4. Thách thức và hạn chế

Các hạn chế của CLVT đếm photon hiện nay không chủ yếu nằm ở chất lượng hình ảnh, mà ở khả năng chuyển đổi từ một công nghệ ưu việt về mặt kỹ thuật sang một công nghệ mang lại lợi ích lâm sàng và kinh tế rõ ràng. Nói cách khác, CLVT đếm photon đã chứng minh được ưu thế về độ phân giải, giảm nhiễu, khả năng phân tích phổ và định lượng, nhưng để trở thành tiêu chuẩn trong thực hành thường quy, công nghệ này vẫn cần vượt qua các thách thức lớn: chứng minh giá trị lâm sàng vượt trội thông qua cải thiện chẩn đoán, điều trị và kết cục bệnh nhân; chuẩn hóa quy trình và các chỉ số định lượng để đảm bảo tính nhất quán giữa các hệ thống và trung tâm; giảm chi phí và mở rộng khả năng tiếp cận, giúp CLVT đếm photon khả thi về mặt kinh tế; tích hợp hiệu quả với trí tuệ nhân tạo và quy trình làm việc số hóa, nhằm khai thác tối đa lượng dữ liệu phổ phong phú mà CLVT đếm photon tạo ra.

CLVT đếm photon mang lại giá trị khá cao trong các tình huống mà chất lượng hình ảnh là yếu tố giới hạn chẩn đoán, như mạch máu nhỏ, cấu trúc xương tinh vi, vật liệu kim loại hoặc khi cần phân tích phổ và định lượng. Ngược lại, ở những bệnh lý mà chuẩn chẩn đoán phụ thuộc vào thông tin chức năng, sinh học mô hoặc hình ảnh mô mềm (ví dụ cộng hưởng từ trong thần kinh và cơ xương, chụp X quang mạch máu số hóa xóa nền trong can thiệp mạch) hoặc khi CLVT đa dãy hiện nay đã đạt hiệu năng chẩn đoán rất cao thì lợi ích gia tăng của CLVT đếm photon có thể không tương xứng với chi phí và độ phức tạp [1],[3]. Đây cũng là lý do xu hướng hiện nay không phải là "thay thế toàn bộ CLVT thông thường bằng CLVT đếm photon", mà là ứng dụng có chọn lọc trong các chỉ định mà CLVT đếm photon chứng minh được giá trị lâm sàng, cải thiện quyết định điều trị hoặc mang lại hiệu quả chi phí rõ ràng.

Hiện nay, CLVT đếm photon không thay thế CLVT truyền thống ngay lập tức. CLVT truyền thống vẫn đáp ứng phần lớn nhu cầu, chẳng hạn chụp CLVT sọ não cấp cứu, bụng thường quy, ngực tầm soát u phổi, chấn thương. Trong các trường hợp này, CLVT đếm photon chỉ cải thiện vừa phải [8]. Do đó, không phải mọi bệnh lý đều cần chụp CLVT đếm photon. Mặt khác, phần lớn chuyên gia không xem CLVT đếm photon chỉ là một bản nâng cấp của CLVT truyền thống hay CLVT năng lượng kép, mà là một sự thay đổi nền tảng (paradigm shift) trong công nghệ chụp cắt lớp vi tính. Tuy nhiên, tốc độ phổ cập sẽ phụ thuộc vào việc tích lũy bằng chứng về lợi ích lâm sàng, hiệu quả chi phí và khả năng tích hợp vào quy trình thực hành thường quy [2], [4], [8].

Mặc dù CLVT đếm photon mang lại nhiều lợi ích tiềm năng vượt trội, việc triển khai rộng rãi công nghệ này vẫn đối mặt với nhiều khó khăn. Trước hết là chi phí đầu tư cao, bao gồm cả phần cứng đầu dò và hệ thống xử lý dữ liệu phức tạp [1], [8]. Điều này hạn chế khả năng tiếp cận tại nhiều cơ sở y tế, đặc biệt ở các nước đang phát triển, trong đó có Việt Nam.

CLVT đếm photon cũng đối mặt với một số thách thức kỹ thuật. Hiện tượng chia sẻ điện tích (charge sharing) xảy ra khi điện tích từ một photon lan sang các điểm ảnh (pixel) lân cận, làm sai lệch đo năng lượng [1], [3], [6]. Hiện tượng chồng xung (pulse pile-up) xảy ra khi nhiều photon đến trong thời gian rất ngắn, dẫn đến chồng tín hiệu và mất thông tin năng lượng [1], [3], [6], [9]. Chúng có thể ảnh hưởng đến độ chính xác của đo năng lượng và phân tích vật liệu. Ngoài ra, việc hiệu chuẩn đầu dò và ổn định ngưỡng/dải năng lượng theo thời gian là một thách thức kỹ thuật đáng kể, rất quan trọng để đảm bảo độ chính xác của dữ liệu phổ [1], [6], [8]. Một vấn đề khác là thiếu chuẩn hóa trong thu nhận và xử lý dữ

liệu CLVT đếm photon. Các thuật toán tái tạo, phân tích vật liệu và hiển thị hình ảnh vẫn chưa được chuẩn hóa giữa các nhà sản xuất, gây khó khăn trong việc so sánh và áp dụng rộng rãi [3], [5], [8].

2.5. Hiện tại, tương lai và xu hướng phát triển

Hiện nay, đa số nghiên cứu chứng minh cho ảnh đẹp hơn, độ phân giải cao hơn, ít nhiễu hơn. Tuy nhiên, câu hỏi quan trọng là liệu CLVT đếm photon có góp phần cải thiện tiên lượng bệnh nhân? Tác giả bài viết nghĩ rằng hiện vẫn cần thêm nhiều nghiên cứu đa trung tâm, nghiên cứu ngẫu nhiên, theo dõi dài hạn và phân tích hiệu quả chi phí (cost-effectiveness) để chứng minh lợi ích lâm sàng vượt trội của CLVT đếm photon. Ngoài ra, trong giai đoạn hiện nay CLVT đếm photon nên được xem là một công nghệ chuyển đổi (transformative technology) với tiềm năng rất lớn, nhưng vẫn đang trong quá trình tích lũy bằng chứng để chuyển từ "ưu thế kỹ thuật" sang "ưu thế lâm sàng" và "ưu thế về hiệu quả chi phí".

Trong tương lai, CLVT đếm photon được kỳ vọng sẽ đóng vai trò trung tâm trong hệ sinh thái hình ảnh học hiện đại. Sự kết hợp giữa CLVT đếm photon và trí tuệ nhân tạo có thể giúp tối ưu hóa tái tạo hình ảnh, giảm nhiễu và tự động phân tích vật liệu [8],[30]. CLVT đếm photon và trí tuệ nhân tạo sẽ phát triển song hành, có thể tự động phát hiện tổn thương, phân loại mô, phân tích phổ, định lượng, tạo bản mô tả tổn thương và đưa ra chẩn đoán sơ bộ ban đầu. Các bác sĩ sẽ tập trung nhiều hơn vào việc tích hợp thông tin và ra quyết định lâm sàng.

Định lượng sẽ trở thành xu hướng chính. Bản mô tả kết quả CLVT có thể chuyển từ mô tả định tính sang định lượng với các chỉ số như: nồng độ I-ốt, thể tích I-ốt, bản đồ số nguyên tử hiệu dụng, mật độ điện tử. Điều này giúp tăng tính khách quan trong chẩn đoán bệnh và tăng khả năng theo dõi diễn tiến bệnh theo thời gian.

Một hướng phát triển quan trọng là hình ảnh học phân tử, trong đó CLVT đếm photon kết hợp với các thuốc cản quang đa thành phần để theo dõi các quá trình sinh học ở mức phân tử [2],[3]. Điều này có thể mở ra kỷ nguyên mới trong chẩn đoán và điều trị cá thể hóa.

Trong 5–10 năm tới, việc mở rộng ứng dụng CLVT đếm photon nhiều khả năng sẽ diễn ra theo từng lĩnh vực chuyên sâu (đặc biệt là tim mạch, thần kinh, cơ xương và ung thư) thay vì đồng loạt trên mọi chỉ định CLVT. CLVT đếm photon có tiềm năng trong đánh giá tưới máu cơ tim, phân tích vi cấu trúc mô và theo dõi đáp ứng điều trị ung thư [13], [27], [28]. Khi chi phí giảm và công nghệ dần hoàn thiện, CLVT đếm photon có thể dần thay thế CLVT truyền thống trong nhiều ứng dụng lâm sàng.

III. KẾT LUẬN

Cắt lớp vi tính đếm photon không chỉ là một sự cải tiến về chất lượng hình ảnh mà còn là một nền tảng công nghệ mới có khả năng thay đổi cách thức thu nhận, phân tích và khai thác dữ liệu CLVT trong thực hành chẩn đoán hình ảnh. Mặc dù còn tồn tại nhiều thách thức về kỹ thuật, lâm sàng và kinh tế, những bằng chứng hiện nay cho thấy CLVT đếm photon có tiềm năng trở thành một trong những công nghệ chủ đạo của chẩn đoán hình ảnh hiện đại. Việc tiếp tục chuẩn hóa quy trình kỹ thuật, xây dựng các hướng dẫn đồng thuận quốc tế, thực hiện các nghiên cứu đa trung tâm quy mô lớn và đánh giá hiệu quả lâm sàng cũng như hiệu quả chi phí sẽ là những yếu tố then chốt quyết định tốc độ và phạm vi ứng dụng của công nghệ này trong những năm tới.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Thomas Stein, Alexander Rau, Maximilian Frederik Russe, Philipp Arnold, Sebastian Faby et al. Photon-Counting Computed Tomography – Basic Principles, Potenzial Benefits, and Initial Clinical Experience. *Fortschr Röntgenstr.* 2023. 195(8), 691-698, doi: 10.1055/a-2018-3396.
2. Judith van der Bie, Thom van der Laan, Marcel van Straten, Ronald Booij, Daniel Bos et al. Photon-counting CT: An updated review of clinical results. *European Journal of Radiology.* 2025. 190, 112-189, <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2025.112189>
3. Yingyi Wu, Zheng Ye, Jie Chen, Liping Deng, Bin Song. Photon Counting CT: Technical Principles, Clinical Applications, and Future Prospects. *Acad Radiol.* 2023. 30(10), 362-2382, doi: 10.1016/j.acra.2023.05.029.
4. Megan C Jacobsen, Sara L Thrower, Rachel B Ger, Shuai Leng, Laurence E Court et al. Multi-energy computed tomography and material quantification: Current barriers and opportunities for advancement. *Med Phys.* 2020. 47(8), 3752-3771. doi: 10.1002/mp.14241.
5. Chantelle Lachance, Jennifer Horton. Photon-Counting CT: High Resolution, Less Radiation: Emerging Health Technologies. *Canadian Agency for Drugs and Technologies in Health.* 2024.
6. Yuko Nakamura, Toru Higaki, Shota Kondo, Ikuo Kawashita, Isao Takahashi. An introduction to photon-counting detector CT (PCD CT) for radiologists. *Jpn J Radiol.* 2023. 41(3), 266-282. doi: 10.1007/s11604-022-01350-6.
7. D. Richtsmeier, C.A.S. Dunning, K. Iniewski and M. Bazalova-Carter. Multi-contrast K-edge imaging on a bench-top photon-counting CT system: acquisition parameter study. *Journal of Instrumentation.* 2020. 15(10), DOI:10.1088/1748-0221/15/10/P10029.
8. Ao Liu, Yixuan An, Zhi Kang Ng, Shuang Bai, Ruijun Wang. Clinical Advances and Challenges in Photon Counting CT: A State of the Art Review. *Advances in Computed Tomography.* 2025. 14(1), 1-11, DOI: 10.4236/act.2025.141001.
9. Yannik Christian Layer, Dmitrij Kravchenko, Tatjana Dell, Daniel Kütting. CT technology: photon-counting detector computed tomography. *Radiologie (Heidelb).* 2023. 63(7), 497-506, doi: 10.1007/s00117-023-01166-z.
10. Çağdaş Topel 1, Furkan Ufuk. Revolutionizing cardiac imaging: how photon-counting computed tomography is redefining coronary artery stent assessment. *Diagn Interv Radiol.* 2025. 31(4), 340-341, doi: 10.4274/dir.2025.253274.
11. Riccardo Cau, Luca Saba, Antonella Balestrieri, Antonella Meloni, Lorenzo Mannelli. Photon-Counting Computed Tomography in Atherosclerotic Plaque Characterization. *Diagnostics (Basel).* 2024.14(11), 1065, doi: 10.3390/diagnostics14111065.
12. Doosup Shin, Rick H J A Volleberg, Roosha Parikh, Christopher Chieh Yang Koo, Sarah Malik et al. Photon-counting detector computed tomography for the assessment of coronary stents and in-stent restenosis. *EuroIntervention.* 2025. 21(19), e1137-e1146, doi: 10.4244/EIJ-D-25-00257.
13. Giuseppe Tremamunno, Akos Varga-Szemes, Dmitrij Kravchenko, Andrea Laghi, Fabian Bamberg et al. Accuracy of photon-counting detector CT-based iodine maps for myocardial late enhancement detection. *Eur Radiol.* 2025. 35(11), 7074-7083, doi: 10.1007/s00330-025-11622-0.
14. Rafail A Kotronias, Betty Raman, Vanessa Ferreira, Stefan Neubauer, Charalambos Antoniadis. Photon-counting computed tomography: 'one-stop shop' for coronary stenosis, inflammation, and myocardial assessment in ST-segment elevation acute coronary syndrome. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging.* 2024. 25(6). e165, doi: 10.1093/ehjci/jeae003.
15. Wenbing Jiang, Yibin Pan, Yumeng Hu, Xiaochang Leng, Jun Jiang, et al. Diagnostic accuracy of coronary computed tomography angiography-derived fractional flow reserve. *Biomed Eng Online.* 2021. 20(1), 77, doi: 10.1186/s12938-021-00914-3.
16. Joel G Fletcher 1, Akitoshi Inoue 1, Alex Bratt 1, Kelly K Horst 1, Chi Wan Koo. Photon-counting CT in Thoracic Imaging: Early Clinical Evidence and Incorporation Into Clinical Practice. *Radiology.* 2024. 310(3), e231986, doi: 10.1148/radiol.231986.

17. Salim Aymeric Si-Mohamed, Jade Miaillhes, Pierre-Antoine Rodesch, Sara Boccalini, Hugo Lacombe, *et al.* Spectral Photon-Counting CT Technology in Chest Imaging. *J Clin Med.* 2021. 10(24), 5757, doi: 10.3390/jcm10245757.
18. Felix K Kopp, Heiner Daerr, Salim Si-Mohamed, Andreas P Sauter, Sebastian Ehn, *et al.* Evaluation of a preclinical photon-counting CT prototype for pulmonary imaging. *Sci Rep.* 2018. 8(1), 17386, doi: 10.1038/s41598-018-35888-1.
19. Sarah C Scharm, Cornelia Schaefer-Prokop, Hinrich B Winther, Carolin Huisinga, Thomas Werncke, *et al.* Regional Pulmonary Morphology and Function: Photon-counting CT Assessment. *Radiology.* 2023. 308(1), e230318, doi: 10.1148/radiol.230318.
20. Arosh S Perera Molligoda Arachchige, Gabriel Amorim Moreira Alves, Daniil Fedorov, Gaia Ressa, Luca Cappellini, *et al.* Neuroimaging with photon-counting computed tomography: A review of clinical applications. *World J Radiol.* 2025. 17(11), 113701, doi:10.4329/wjr.v17.i11.113701.
21. Denise Schoenbeck, Alexander Sacha, Julius Henning Niehoff, Christoph Moenninghoff, Jan Borggrefe, *et al.* Imaging of intracranial hemorrhage in photon counting computed tomography using virtual monoenergetic images. *Neuroradiology.* 2024. 66(5), 729-736, doi: 10.1007/s00234-024-03308-z.
22. Fei Liu, Ying Yao, Bingcheng Zhu, Yue Yu, Reng Ren, *et al.* The novel imaging methods in diagnosis and assessment of cerebrovascular diseases: an overview. *Front Med (Lausanne).* 2024. 10(11), 1269742. doi: 10.3389/fmed.2024.1269742.
23. Chang-Lae Lee, Key Jo Hong, Namwoo Kim, Kwanhee Han, Dongkyu Kim, *et al.* Feasibility study of portable multi-energy computed tomography with photon-counting detector for preclinical and clinical applications. *Sci Rep.* 2021. 11(1), 22731, doi: 10.1038/s41598-021-02210-5.
24. Anna Novoseltseva, Gulce Kureli, Shuaibin Chang, Jiarui Yang, Precious Dominique Antinew, *et al.* Imaging myelin degradation in ex vivo prefrontal cortex tissue blocks in Alzheimer's disease and chronic traumatic encephalopathy. *Alzheimers Dement.* 2025. 21(8), e70582, doi: 10.1002/alz.70582.
25. Felix Sebastian Leo Thomsen, Sebastian Horstmeier, Julius Henning Niehoff, Jaime Andrés Peña, Jan Borggrefe. Effective Spatial Resolution of Photon Counting CT for Imaging of Trabecular Structures is Superior to Conventional Clinical CT and Similar to High Resolution Peripheral CT. *Invest Radiol.* 2022. 57(9), 620-626, doi: 10.1097/RLI.0000000000000873.
26. Charbel Mourad, Lucia Gallego Manzano, Anaïs Viry, Ronald Booijs, Edwin H G Oei, *et al.* Chances and challenges of photon-counting CT in musculoskeletal imaging. *Skeletal Radiol.* 2024. 53(9), 1889-1902, doi: 10.1007/s00256-024-04622-6.
27. Elisa Bruno, Anna Palmisano, Enrico Camisassa, Davide Vignale, Carlo Tacchetti, *et al.* Photon-counting detector CT in oncology: a new era of cancer imaging. *Insights Imaging.* 2026. 17(1), 15, doi: 10.1186/s13244-025-02176-2.
28. Arosh S Perera Molligoda Arachchig, Anna Dashiell, Anton Shiraan Jesuraj, Antonia Immacolata D'Urso, Benedetta Fiore, *et al.* Applications of photon-counting CT in oncologic imaging: A systematic review. *World J Radiol.* 2025. 17(8), 107732, doi: 10.4329/wjr.v17.i8.107732.
29. Martin V Rybertt, Leening P Liu, Pooyan Sahbaee, Tristan Nowak, Manoj Mathew, *et al.* K-Edge Imaging Using a Clinical Dual-Source Photon-Counting CT System. *medRxiv.* 2025. 08(21), 25333798, doi: 10.1101/2025.08.21.25333798.
30. Markus Benedikt Krueger, Thomas Werncke, Marcel Eicke, Nicolaus Schwerek, Jan Eckstein, *et al.* Photon-counting Detector CT Enables Pediatric Low-dose Chest Imaging With Further Reduction of Radiation Exposure. *Invest Radiol.* 2026. 61(5), 318-325, doi: 10.1097/RLI.0000000000001234.
31. Arosh S Perera Molligoda Arachchige, Yash Verma. Role of photon-counting computed tomography in pediatric cardiovascular imaging. *World J Clin Pediatr.* 2025. 14(1), 99288, doi: 10.5409/wjcp.v14.i1.99288.