

# La scoperta e la sintesi dei “punti quantici”: una pietra miliare nel colorato futuro delle nanoscienze e della tecnologia

Alberto Bossi\*

SUNTO – Il 4 ottobre 2023 l’Accademia Reale Svedese delle Scienze ha assegnato a Moungi G. Bawendi (Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, USA), Louis E. Brus (Columbia University, New York, NY, USA), Aleksey Yekimov (Nanocrystals Technology Inc., New York, NY, USA) il Premio Nobel per la Chimica. I tre scienziati, tra gli anni ’80 e ’90 del secolo scorso, hanno contribuito allo studio, alla sintesi riproducibile, e allo sviluppo dei *quantum dots* (o punti quantici), QD, “piantando i primi semi” che hanno portato alla fioritura del ricco e colorato mondo delle nanoscienze. I loro risultati sperimentali hanno permesso di verificare i principi fisici che legano i fenomeni quantici in nano-oggetti. Grazie alle loro modulabili proprietà ottiche, i QD sono oggi impiegati dall’industria elettronica per generare la luce policromatica che viene emessa dai monitor e schermi di dispositivi *smart* e TV, mentre medici e biochimici li utilizzano per mappare e seguire lo sviluppo di processi biologici e la crescita di tessuti. Questi sono alcuni tra gli aspetti trattati in questa nota insieme a quelli più prettamente fisici e chimici che regolano le proprietà di questi affascinanti nano-oggetti.

PAROLE CHIAVE – Nobel Chimica 2023; *Quantum dots*; Dispositivi a emissione di luce; Sistemi diagnostici.

ABSTRACT – On October 4, 2023, the Royal Swedish Academy of Sciences awarded Moungi G. Bawendi (Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, USA), Louis E. Brus (Columbia University, New York, NY, USA), Aleksey Yekimov (Nanocrystals Technology Inc., New York, NY, USA) the Nobel Prize in Chemistry. The

\* Istituto di Scienze e Tecnologie Chimiche “G. Natta” del CNR, CNR-SCITEC; Photoactive Molecular Materials & Devices Lab, via Fantoli 16/15, 20138 Milano. E-Mail: alberto.bossi@cnr.it. Relazione tenuta il 17 ottobre 2024.

three scientists, between the 80s and 90s of the last century, contributed to the study, reproducible synthesis, and development of quantum dots, QD, “planting the first seeds” that led to the flowering of the rich and colorful world of nanoscience. Their experimental results made it possible to verify the physical principles that bind quantum phenomena in nano objects. Thanks to their modular optical properties, QDs are now used by the electronics industry to generate the polychromatic light that is emitted by monitors and schematics of smart devices and TVs, while doctors and biochemists use them to map and follow the development of biological processes and tissue growth. These will be some of the aspects that will be covered during the seminar together with the more purely physical and chemical ones that regulate the properties of these fascinating nano-objects.

KEYWORDS – Nobel Prize in Chemistry 2023; Quantum dots; Light-emitting devices; Diagnostic systems.

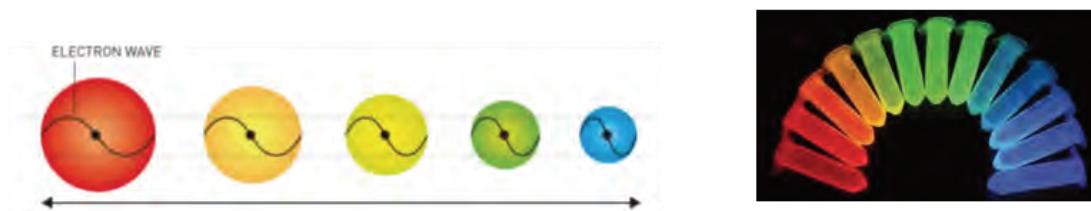
## INTRODUZIONE

Il Premio Nobel per la Chimica del 2023 è assegnato agli scienziati Moungi G. Bawendi, Lewis E. Brus e Aleksey I. Yekimov per, citando il documento originale, «the discovery and synthesis of nanometre-sized semiconductor crystals, the properties of which are determined by quantum size effects. Referred to as quantum dots (QDs), such nanoparticles are so small that their physical size determines the quantum mechanical states of the material's charge carriers» (The Royal Swedish Academy of Sciences-The Nobel Committee for Chemistry, 2023). Il Premio Nobel per la Chimica riconosce «la scoperta e la sintesi di cristalli semiconduttori di dimensioni nanometriche, le cui proprietà sono determinate dagli effetti quantistici. Queste nanoparticelle, chiamate punti quantici, sono così piccole che la loro dimensione fisica determina gli stati quantomeccanici dei portatori di carica del materiale».

Le nanostrutture, come i nanocristalli o le nanoparticelle, sono oggetti di dimensioni nell'ordine di  $10^{-9}$  metri di diametro e sono costituiti al massimo da qualche migliaio di atomi. Per avere un'idea del loro rapporto dimensionale, si può immaginare che la grandezza di un nanocristallo rispetto a un pallone da calcio è circa la stessa che il pallone ha rispetto alla Terra (Fig. 1).

Proprio le ridotte dimensioni di queste particelle conferiscono loro proprietà uniche, che dipendono dalla grandezza dell'oggetto, piuttosto che dalla sua composizione chimica. Tra le caratteristiche più rilevanti della funzione delle dimensioni vi sono l'assorbimento e l'emissione della luce. Come

illustrato in Fig. 1, le nanoparticelle più piccole appaiono colorate e assorbono principalmente la luce blu, mentre quelle di dimensioni maggiori tendono ad assorbire la luce rossa. Analogamente, l'emissione luminosa varia con la dimensione della particella: le più piccole emettono luce blu, che progressivamente vira verso il verde e infine al rosso con l'aumento del diametro. E sono queste le caratteristiche che ne hanno poi determinato l'ampia diffusione odierna in vari settori.



Assorbimento di luce = *colore*

Emissione di luce = *luminescenza*

Fig. 1 – Nanocristalli, il colore e la luminescenza in base alle dimensioni. © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences, © Milad Abolhasani/NCSU.

Le ricerche condotte da Bawendi, Brus e Yekimov, che hanno portato all'assegnazione del Premio Nobel per la Chimica, si sono svolte nell'arco di poco più di un decennio, dagli inizi degli anni '80 fino al 1993. Yekimov fu il primo a osservare effetti quantistici in semiconduttori inorganici dispersi in matrici vetrose, mentre Brus, quasi contemporaneamente, rilevò fenomeni simili nei semiconduttori colloidali ottenuti in soluzione acquosa. Bawendi, invece, fu il principale artefice della prima sintesi efficiente e riproducibile di questi materiali (Fig. 2).

## 1. LE PREMESSE STORICHE

I fenomeni quantistici osservati dai ricercatori premiati erano già stati teorizzati nel XX secolo per spiegare il comportamento delle particelle su scala atomica e subatomica. In particolare, le principali basi scientifiche si basano sui principi del dualismo onda-particella, sviluppati da Max Planck e Albert Einstein.

Questi ultimi introdussero l'idea che le particelle possano comportarsi sia come onde sia come particelle e suggerirono che la luce fosse composta da foton con energia quantizzata.

Un contributo fondamentale fu l'effetto fotoelettrico, per il quale Einstein vinse il Premio Nobel nel 1921: egli dimostrò che una radiazione luminosa incidente su una superficie metallica può provocare l'emissione di elettroni dalla superficie stessa e che l'energia necessaria per promuovere il fenomeno dipende dalla frequenza della luce, non dalla sua intensità.

Un altro concetto chiave particolarmente rilevante nel contesto dei nanocristalli è quello di *confinamento quantistico*. Questo principio, descritto teoricamente da Herbert Fröhlich nel 1937, si basa sul modello di un gas di elettroni liberi all'interno di un metallo e dimostra che le proprietà di un materiale possono variare drasticamente quando le sue dimensioni diventano estremamente ridotte. In particolare, quando il metallo ha dimensioni  $L$  paragonabili alla lunghezza d'onda di de Broglie  $\lambda$ , il suo comportamento fisico cambia significativamente.

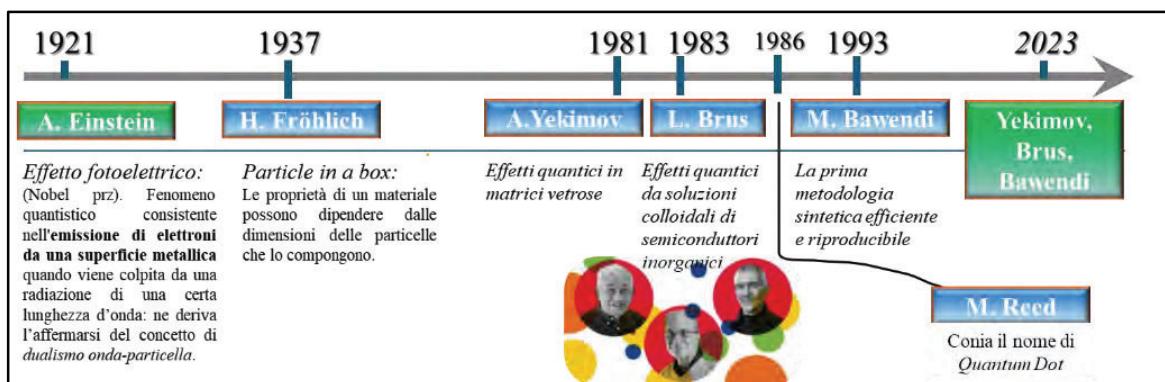


Fig. 2 – Eventi che hanno portato al Premio Nobel. Immagine prodotta dall'autore.

L’osservazione sperimentale di questi fenomeni richiese alcuni anni, con i primi studi condotti tra gli anni ’60 e ’70 del secolo scorso grazie allo sviluppo della microelettronica, che permise la realizzazione di semiconduttori in forma di film, ovvero strati, estremamente sottili, detti bidimensionali. Tuttavia, non si trattava ancora di veri e propri sistemi puntuali.

## 2. IL CONTRIBUTO DI ALEXEI YEKIMOV, LOUIS BRUS E MOUNGI BAWENDI

Durante la cerimonia di premiazione del Premio Nobel 2023,<sup>1</sup> sono state illustrate le fasi che hanno portato alla scoperta dei materiali semiconduttori che mostrano proprietà quantistiche. Alcuni recenti manoscritti, riportati nella seguente nota,<sup>2</sup> descrivono queste scoperte.

Nel 1981, mentre lavorava in Unione sovietica presso il Vavilov State Optical Institute, Yekimov studiava i filtri ottici ed era interessato a comprendere perché lo stesso composto, quando disperso nel vetro fuso, potesse modificare il colore. In realtà, già ai tempi dell’antica Roma (come dimostra la famosa Coppa di Licurgo,<sup>3</sup> Fig. 3), la colorazione dei vetri era nota, sebbene in una forma “alchemica”. Nel Medioevo, i maestri vetrari perfezionarono inconsapevolmente l’uso della nanotecnologia, sviluppando tecniche raffinate per ottenere vetri colorati. Un processo che consisteva nell’inclusione di sistemi colloidali di elementi, leghe o composti finemente dispersi nel vetro fuso, seguito da trattamenti termici a temperature e tempi specifici.

Yekimov concentrò il suo studio su semiconduttori inorganici a base di cadmio e rame (CdS, CdSe, CuCl e CuBr), dispersi in vetro fuso a temperature comprese tra 500 e 700°C, con tempi di trattamento variabili da 1 a 96 ore (Ekimov *et al.*, 1981). Analizzando in dettaglio il CuCl disperso nel vetro, osservò che la banda ottica si spostava verso energie maggiori man mano che i cristalli nel vetro diminuivano di dimensione, fornendo così una chiara evidenza del confinamento quantistico.

<sup>1</sup> Si veda il video disponibile all’url: <https://youtu.be/upKNyxNIXfA?t=5796> [consultato il 18 settembre 2023].

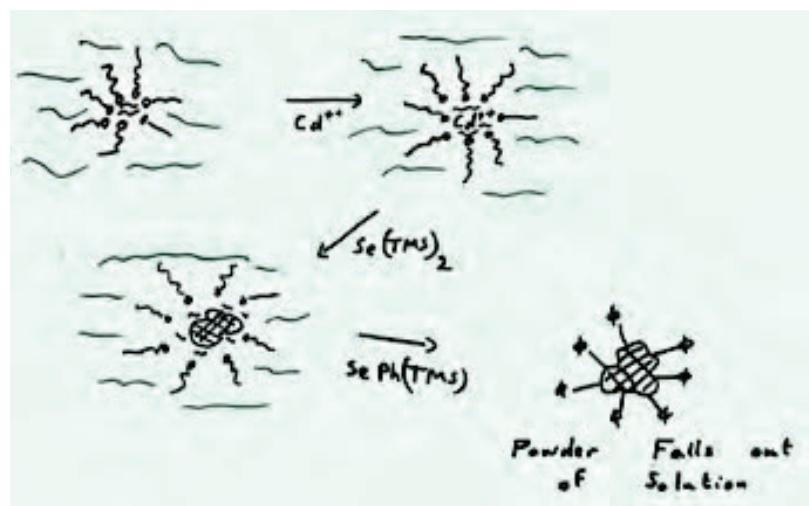
<sup>2</sup> Per la storia del premio si veda l’url: <https://cen.acs.org/people/nobel-prize/Three-quantum-dot-researchers-awarded-Nobel-Prize-in-Chemistry/101/web/2023/10> [consultato il 18 settembre 2025]. Si veda altresì: Montanarella and Kovalenko (2022). Per le applicazioni in medicina: Abdellatif *et al.* (2022). *Review articles*: Yekimov (2021); Efros and Brus (2021).

<sup>3</sup> Si veda la presentazione del British Museum, disponibile all’url: [https://www.britishmuseum.org/collection/object/H\\_1958-1202-1](https://www.britishmuseum.org/collection/object/H_1958-1202-1) [consultato il 18 settembre 2025].

Quasi contemporaneamente a Yekimov, ma negli Stati Uniti presso i Bell Labs di New York, Brus studiava processi photocatalitici applicati alla sintesi chimica. Questa linea di ricerca, avviata nel decennio precedente da pionieri come Bard, Graetzel e Hanglein, aveva portato a importanti scoperte nel campo della conversione dell’energia solare mediante semiconduttori inorganici.

Brus, considerando che l’efficacia dei catalizzatori eterogenei dipende dall’area superficiale disponibile per le reazioni chimiche, cercò di produrre photocatalizzatori sempre più piccoli. Infatti, a parità di quantità, la riduzione delle dimensioni delle particelle aumenta significativamente la superficie attiva. Per questo motivo iniziò a sintetizzare nanoparticelle di solfuro di cadmio ( $\text{CdS}$ ) con diametri fino a poche decine di nanometri, utilizzando un metodo noto come *arrested precipitation*. Questo approccio prevedeva la preparazione di soluzioni colloidali acquose contenenti i precursori ionici del  $\text{CdS}$ . Durante questi esperimenti, Brus notò che lo spettro UV dei nanocristalli variava in funzione del tempo di invecchiamento delle soluzioni (Brus L. E. *et al*, 1983).

Per controllare meglio la crescita dei nanocristalli, insieme ai suoi collaboratori Paul Alivisatos e Michael Steigerwald, perfezionò il metodo delle “micelle inverse”, utilizzandole come microreattori di crescita. Questo sistema consentiva di regolare la nucleazione e la crescita lenta dei cristalli attraverso l’aggiunta controllata dei reagenti necessari. Inoltre, la passivazione superficiale reversibile dei nanocristalli permetteva un controllo più preciso della loro dimensione e delle loro proprietà ottiche.



*Fig. 3 – Sintesi di Brus tramite micelle inverse.* Immagine adattata dall’autore.

Bawendi lavorò come *postdoc* sotto la direzione di Brus tra il 1988 e il 1990, concentrandosi sull'ottimizzazione della sintesi dei QD. Durante questo periodo, studiò diversi fattori chiave, tra cui il riscaldamento della miscela di reazione, la presenza di basi di Lewis e l'uso di agenti templanti per controllare la dimensionalità dei nanocristalli.

Tuttavia, fu nel 1993, dopo aver intrapreso la carriera accademica al MIT di Boston, che sviluppò la cosiddetta *hot injection synthesis*. Questo metodo prevede l'iniezione rapida dei reagenti in una soluzione calda contenente agenti templanti. Questo processo favorisce la nucleazione controllata e permette un'elevata precisione nella distribuzione dei diametri delle particelle grazie al raffreddamento rapido della miscela (Bawendi M.G.*et al.*, 1993).

Un esempio significativo di questa tecnica è illustrato nel video dedicato al Premio Nobel, al minuto 1h 36min e 40sec.<sup>4</sup>

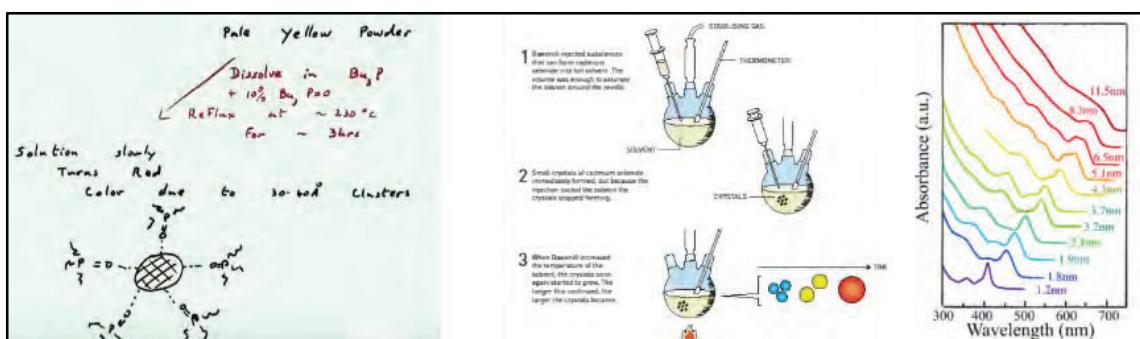


Fig. 4 – Schematizzazione del processo sviluppato da Bawendi, © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences.

### 3. GLI SVILUPPI E LE APPLICAZIONI

Negli anni successivi, la ricerca sui QD ha conosciuto una crescita esponenziale, guidata da due principali necessità: stabilizzare i QD sintetizzati e renderli più versatili e multifunzionali.

Per affrontare queste sfide, sono stati sviluppati i *core-shell QD*, in cui il nucleo del *quantum dot* è rivestito da un guscio otticamente “trasparente”. Questo rivestimento non altera le proprietà ottiche del sistema, ma protegge il nucleo centrale dalla degradazione, migliorandone stabilità e durata. Parallelamente, sono stati introdotti i *functional QD*, in cui la superficie dei

<sup>4</sup> Si veda *infra*, nota 2.

nanocristalli è funzionalizzata con composti organici specifici, conferendo loro proprietà chimiche mirate.

Anche la gamma di materiali impiegati si è ampliata: oggi esistono *quantum dots* basati su strutture cristalline omo-atomiche, etero-diatomiche e terinarie, come illustrato in Fig. 5. Inoltre, sono stati studiati sistemi con forme diverse da quella pseudosferica, aprendo nuove possibilità per applicazioni avanzate. Tutti questi sistemi hanno richiesto caratterizzazioni sempre più approfondite (Nelson K.A. *et al.*, 2017; Qu J. *et al.*, 2019), comprendenti studi strutturali e morfologici tramite diverse tecniche, tra cui:

- Microscopia elettronica a trasmissione (TEM) e microscopia elettronica a scansione (SEM) per l’analisi della struttura e della morfologia
- Dynamic Light Scattering (DLS) per la determinazione delle dimensioni e della distribuzione delle particelle
- Diffrazione di raggi X su polveri e spettroscopia EXAFS per lo studio della struttura cristallina

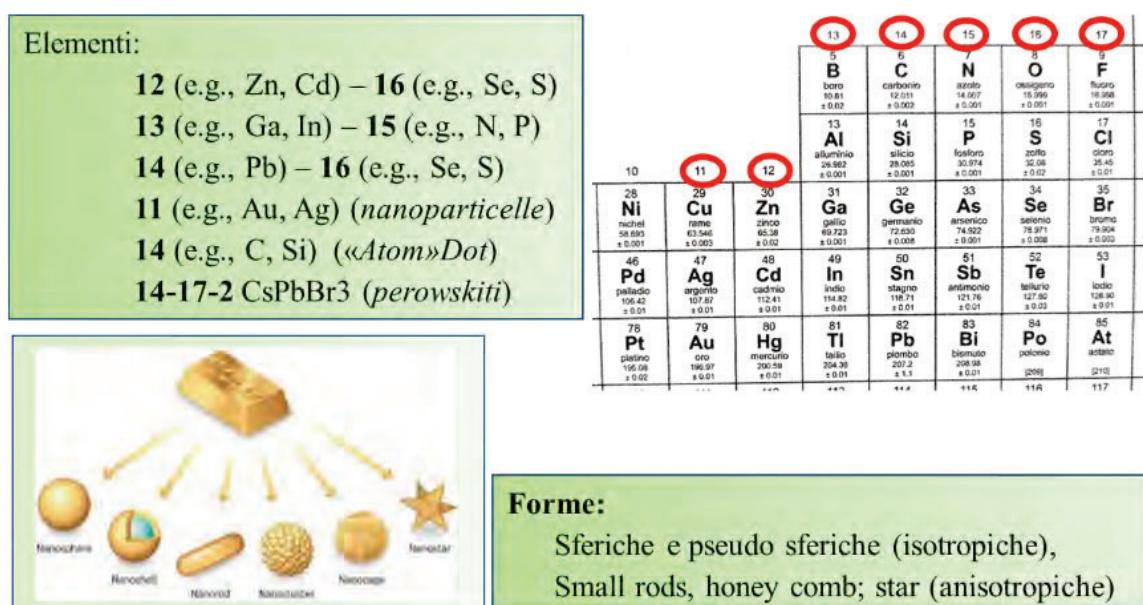


Fig. 5 – Esempi di QD di diversa composizione atomica e diversa forma. Immagine prodotta dall’autore.

Oltre alle proprietà morfologiche e strutturali, sono stati analizzati anche gli aspetti chimico-fisici mediante:

- Spettroscopie elettroniche XPS e UPS per la caratterizzazione degli stati di ossidazione e delle proprietà elettroniche
- Spettroscopia a dispersione di energia (EDS) per la mappatura degli elementi
- Spettroscopia UV-VIS e luminescenza per lo studio dell'assorbimento e dell'emissione ottica
- Tecniche elettrochimiche per l'analisi delle proprietà redox
- Spettroscopia FT-IR per l'identificazione delle funzionalizzazioni chimiche
- Microscopia confocale per applicazioni in ambito biologico

Recentemente, è stata effettuata una mappatura degli utilizzi dei QD nei vari settori, evidenziandone la straordinaria versatilità (Fig. 5) (García de Arquer *et al.*, 2021).

Tra questi, uno degli ambiti più promettenti riguarda la tecnologia dei display e dell'illuminazione, dove i QD hanno rivoluzionato il settore grazie allo sviluppo dei primi Q-LED multicolore da parte di Sony, successivamente migliorati e commercializzati da Samsung. In questi dispositivi, una luce blu viene filtrata dai QDs e riemessa a una lunghezza d'onda adatta per ottenere sia luce bianca che colori altamente naturali e vividi. In futuro si prevede di usare i QD stessi come elementi elettroni-attivati nei display senza necessità di retroilluminazione.

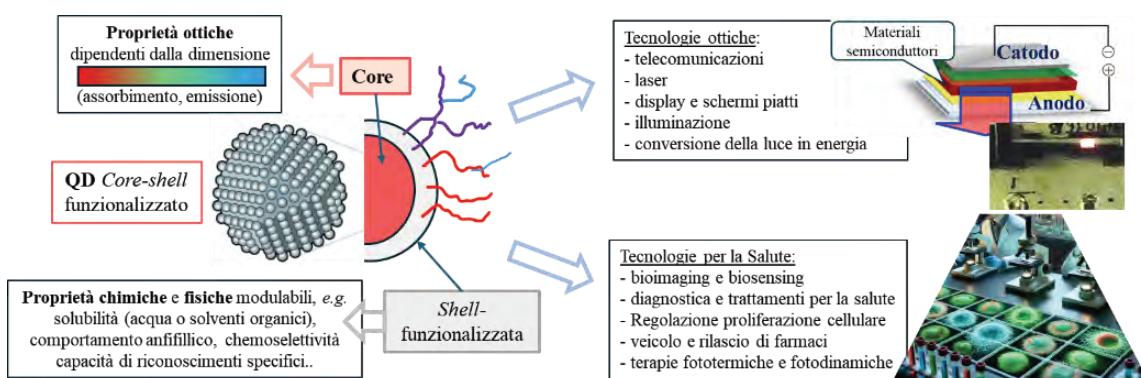


Fig. 6 – Possibili applicazioni dei QDs. Immagine prodotta dall'autore.

Un altro campo di grande interesse è la biomedicina (Weiss S. *et al.*, 1998; Barik e Mondal, 2022) con i lavori pionieristici di Paul Alivisatos, che riuscì a marcare fibroblasti di topo utilizzando QD fluorescenti. Questa scoperta ha aperto la strada a svariate applicazioni, tra cui:

- *Bioimaging* e *biosensing*, per la visualizzazione e l’analisi di cellule e tessuti
- Applicazioni teranostiche, combinando diagnostica e terapia
- *Drug delivery*, per il rilascio mirato di farmaci
- Terapie fotodinamiche e termodinamiche, sfruttando la risposta ottica dei QD per trattamenti innovativi

## RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano il Comitato di Presidenza dell’Istituto Lombardo, Accademia di Scienze e Lettere, e in particolare il Presidente, Professor Stefano Maiorana.

Per lo scambio di idee sulla organizzazione degli argomenti trattati nella presentazione si ringrazia la Dottoressa Laura Polito CNR-SCITEC, il supporto e la revisione della nota si ringrazia la Dottoressa Gabriella Di Carlo (Istituto per lo Studio dei Materiali Nanostrutturati del CNR – CNR-ISMN).

I collaboratori e le persone che hanno contribuito allo sviluppo di alcune delle ricerche presentate, Dottoressa Marta Penconi, Clara Baldoli, Mattia Manzotti, Daniele Marinotto, Davide Ceresoli (Istituto di Scienze e Tecnologie Chimiche del CNR); Professoressa Emanuela Licandro (Dipartimento di Chimica, Università degli Studi di Milano); Professor Francesco Paolucci (Università degli Studi di Bologna) e Professor Antonino Licciardello (Università di Catania).

Si ringraziano, per il supporto economico alla ricerca, il MUR, progetto PRIN2017 3D-FARE Prot. 2017FJCPEX; PRIN2022 MEET-Mechanism Enhanced Electrochemiluminescent Technology, Prot. 20225P4EJC; Smart-MatLab Center; Samsung GRO progetti PolDegOLED e PRIORITY.

## BIBLIOGRAFIA

- Abdellatif A.A.H., Younis M.A., Alsharidah M., Al Rugaie O. and Tawfeek M.H. (2022). *Biomedical applications of quantum dots: overview, challenges, and clinical potential.* In: «Int J Nanomed», 17: 1951-1970.
- Barik P., Mondal S. (2022). Ed. *Application of quantum dots in biology and medicine, recent advances.* Berlin: Springer.
- Bawendi M.G. et al. (1993). *Synthesis and characterization of nearly monodisperse CdE (E = sulfur, selenium, tellurium) semiconductor nanocrystallites.* In: «J. Am. Chem. Soc.», 115(19): 8706-8715.
- Brus L.E. et al (1983). *Quantum size effects in the redox potentials, resonance Raman spectra, and electronic spectra of CdS crystallites in aqueous solution.* In: «J. Chem. Phys», 79(2): 1086-1088.
- Efros A.L., Brus L.E. (2021). *Nanocrystal quantum dots: from discovery to modern development.* In: «ACS Nano», 15 (4): 6192-6210.
- Ekimov A.I. et al. (1981). *Quantum size effect in 3D microscopic semiconductor crystals.* In: «JETP Lett», 34: 345-349.
- García de Arquer F.P., Talapin D.V., Klimov V.I., Arakawa Y., Bayer M. and Sargent E.H. (2021). *Semiconductor quantum dots: technological progress and future challenges.* In: «Science», 373: 640.
- Montanarella F. and Kovalenko M.V. (2022). *Three millennia of nanocrystals.* In: «ACS Nano», 16(4): 5085-5102.
- Nelson K.A. et al. (2017). *Terahertz-driven luminescence and colossal Stark effect in CdSe-CdS colloidal quantum dots.* In: «Nano Letters», 17(9): 5375-5380.
- Qu J. et al. (2019). *Green emitted CdSe@ZnS quantum dots for FLIM and STED imaging applications.* In: «J. Innov. Opt. Health Sciences», 12(05): 1940003.
- The Royal Swedish Academy of Sciences-The Nobel Committee for Chemistry (2023). *Scientific background to the Nobel Prize in Chemistry 2023. Quantum dots – Seeds of nanoscience,* 4 october 2023. Testo disponibile all’url: <https://www.kva.se/en/news/the-nobel-prize-in-chemistry-2023/> [consultato il 18 settembre 2025].
- Weiss S. et al. (1998). *Semiconductor nanocrystals as fluorescent biological labels.* In: «Science», 281 (September, 25): 2013-2016.
- Yekimov A.I. (2021). *Optical-properties of semiconductor quantum dots in glass matrix.* In: «Phys Scripta», T39: 217-222.

Copyright © FrancoAngeli.

This work is released under Creative Commons Attribution Non-Commercial – No Derivatives License.  
For terms and conditions of usage please see: <http://creativecommons.org>.