

L'OCCHIO ELETTRONICO I RIVELATORI CCD (CHARGE-COUPLED DEVICE) PREMIO NOBEL E UNA LEZIONE DI VITA

di Catalina Curceanu (Petrascu)

1. MENTRE SI ANDAVA SULLA LUNA...

Gli anni '60 sono stati anni indimenticabili per conquiste in tutti i settori della conoscenza. L'entusiasmo di quegli anni era incontenibile e ci ha spinti fino ad arrivare sulla Luna. E mentre si stava progettando il viaggio sulla Luna, in una corsa al cardiopalma per come era stata impostata come acerrima competizione fra le due grandi potenze, nei vari laboratori del mondo si stavano facendo i primi passi verso nuove tecnologie che avrebbero rivoluzionato il mondo: la trasmissione della luce attraverso le fibre ottiche e l'invenzione dei sensori elettronici (digitali) per le immagini, *Charge-Coupled Device*, CCD.

Nel lontano 1966, Charles K. Kao ha fatto una scoperta che ha portato ad una vera rivoluzione nell'utilizzo delle fibre ottiche. Il prof. Kao ha inizialmente calcolato la possibilità di trasmettere la luce su lunghe distanze attraverso le fibre ottiche. Utilizzando vetro purissimo per le fibre, sarebbe stato possibile trasmettere segnali su distanze sopra i 100 km, rispetto ai soltanto 20 metri con le fibre disponibili agli inizi degli anni '60. L'entusiasmo del Prof. Kao ha rapidamente contagiato altri scienziati, che hanno condiviso il suo ottimismo nelle potenzialità di tale tecnologia. Le fibre ultrapure sono state fabbricate a quattro anni di distanza, nel 1970.

Ad oggi, le fibre ottiche costituiscono praticamente un sistema linfatico attraverso cui ci scambiamo ogni forma d'informazione. Utilizziamo fibre ottiche nella trasmissione a banda larga per Internet. La luce attraversa le fibre ottiche, con una perdita infinitesimale, e porta i nostri messaggi, raggiungendo i posti più remoti. Testi, musica, messaggi d'amore, registrazioni video (e qui entra in gioco l'altra tecnologia, le CCD, di cui ci occuperemo in seguito) viaggiano da un posto all'altro in frazioni di secondo. Mai siamo stati più vicini – anche quando siamo lontani! Se potessimo concatenare tutte le fibre ottiche che avvolgono la Terra arriveremmo ad una lunghezza di più di un miliardo di chilometri! Questo lungo filo pulsante di vita circonderebbe la

Terra per più di 25 mila volte, e sta aumentando di 1000 km ogni ora.

Come già accennato, gran parte del traffico sulle fibre ottiche è costituito da immagini digitali. Nel 1969 Willard S. Boyle e George E. Smith hanno per primi inventato una tecnologia per la registrazione delle immagini utilizzando sensori elettronici (digitali), i cosiddetti *Charge-Coupled Device* (CCD). Il funzionamento dei sensori CCD si basa sull'effetto fotoelettrico, per cui Einstein ha ricevuto il premio Nobel nel 1921. Attraverso questo effetto la luce è trasformata in un segnale elettrico. La sfida che Boyle e Smith hanno vinto era di immaginare e realizzare sensori capaci di misurare questi segnali elettrici su una superficie con un numero molto grande di micro-sensori (pixel) che avrebbe permesso la costruzione dell'immagine in tempi ragionevoli.

Le CCD rappresentano i nostri occhi digitali. La loro invenzione ha rivoluzionato vari settori della scienza e della vita, a partire dalla fotografia. La tecnologia CCD è oggi ampiamente utilizzata anche in medicina, come vedremo in seguito. Inoltre, le CCD, installate sui satelliti, ci portano immagini di posti nell'Universo che fino ad oggi non ci sognavamo nemmeno di esplorare. E siamo ancora soltanto all'inizio.

Le due tecnologie che ci hanno cambiato la vita, nell'arco di tempo di una generazione, sono il risultato della ricerca fondamentale, e, da questo punto di vista, sono una vera dimostrazione, ci fosse bisogno, e, ultimamente, è sempre più spesso opportuno ricordarlo, di come paga fare scienza, di come la ricerca è nell'interesse di tutti e, come tale, va finanziata non come una cenerentola, bensì come un'opportunità, un investimento nel nostro futuro.

Più di 40 anni dalle loro scoperte, il premio Nobel in Fisica per il 2009 è stato assegnato dalla Royal Swedish Academy of Sciences ai tre scienziati: Charles K. Kao, Standard Telecommunication Laboratories, Harlow, UK and Chinese University of Hong Kong (per la metà) e Willard S. Boyle e George E. Smith, Bell Laboratories, Mur-

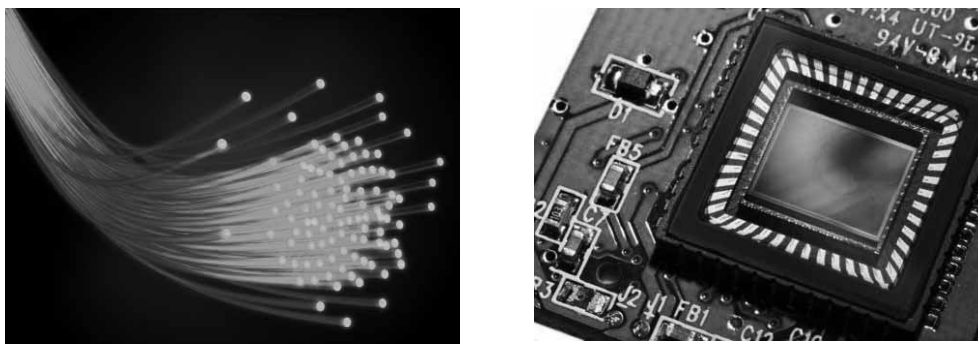


Fig. 1 Fibre Ottiche (sinistra) e rivelatore CCD (destra) (Credit: Fibers: iStockphoto/Henrik Jonsson, CCD: iStockphoto/Sergii Shcherbakov)

ray Hill, NJ, USA (per l'altra metà), per avere inventato e/o perfezionato le due tecnologie che hanno rivoluzionato sia la scienza moderna, che

la nostra vita di tutti i giorni: la trasmissione della luce attraverso le fibre ottiche e i sensori Charge-Coupled Device (CCD).



Photo: Richard Epworth
Charles K. Kao
1/2 of the prize



Copyright © National Academy of Engineering
Willard S. Boyle
1/4 of the prize



Copyright © National Academy of Engineering
George E. Smith
1/4 of the prize

Fig. 2: Gli scienziati che hanno ricevuto il Nobel 2009 per la Fisica

In quanto segue, ci occupiamo più in dettaglio dei rivelatori CCD, il principio di funzionamento e le loro applicazioni, in quanto pochi sono gli esempi al mondo di una tecnologia che ha trovato applicazioni dalla fisica fondamentale nei settori micro e macro alla vita di tutti i giorni, non fosse altro che quasi tutti noi possediamo una CCD – nella camera digitale oppure nel telefonino. Chiuderemo con una riflessione su quanto paga la scienza...e chi la fa.

2. ELEMENTI DI BASE SUL FUNZIONAMENTO DEI RIVELATORI CCD

Un rivelatore/sensore CCD rappresenta un dispositivo semiconduttore di tipo MOS

(*metal-oxide semiconductor*) che può essere utilizzato per immagazzinare immagini in un formato elettronico, offrendo, l'esempio più noto, un'alternativa moderna alla pellicola fotografica.

La superficie della CCD è costituita da una matrice di celle (pixel) sensibili alla luce (fotoni), Fig. 3. Ogni pixel è costituito da una capacità MOS (che corrisponderebbe ad un granello nell'emulsione fotografica). Quando un fotone arriva nel pixel è convertito in uno o più fotoelettroni (attraverso l'effetto fotoelettrico), Fig. 3; questi elettroni sono imprigionati nel pixel in cui vengono generati, il loro numero essendo proporzionale all'energia del fotone incidente (intensità della luce). Di conseguenza, la distribuzione delle cariche nei

vari pixel è una rappresentazione elettronica dell'immagine. La lettura del contenuto (di

carica) dei vari pixel ci permette la ricostruzione dell'immagine

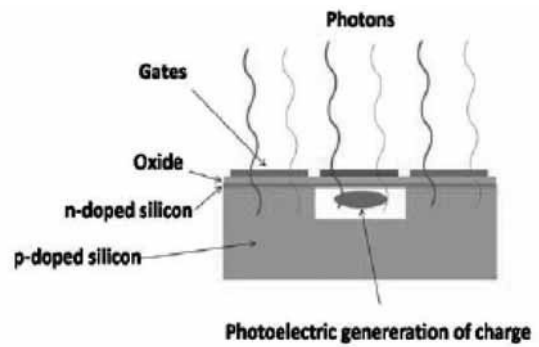
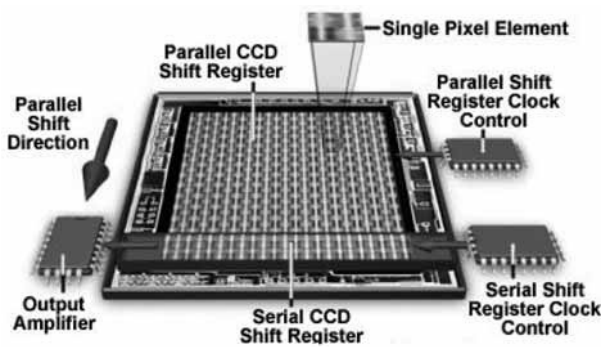


Fig. 3: Struttura a pixel di un rivelatore CCD (sinistra) e una capacità MOS utilizzata per la rivelazione dei fotoni – il processo alla base del funzionamento delle CCD (rilascio dei fotoelettrici nel singolo pixel)

Una volta immagazzinata la carica nel rivelatore che, d'abitudine, contiene milioni di pixel, la lettura avviene trasportando il segnale, con opportune variazioni dei segnali su elettrodi che definiscono i pixel, in verticale, una colonna alla volta, sino ad un cosiddetto "Analog soft register", un linea orizzontale (perpendicolare alle colonne), dove il segnale viene ulteriormente trasportato verso un'uscita dove

viene letto in modo seriale (un segnale dietro l'altro). In uscita il segnale viene amplificato e trasformato da analogico in un segnale digitale, fig 4. Alla fine del processo l'intero contenuto delle CCD, fig. 5, viene convertito in una matrice di numeri che rappresentano l'intensità integrata della luce in ogni pixel e può essere utilizzata in qualunque momento per la ricostruzione dell'immagine.

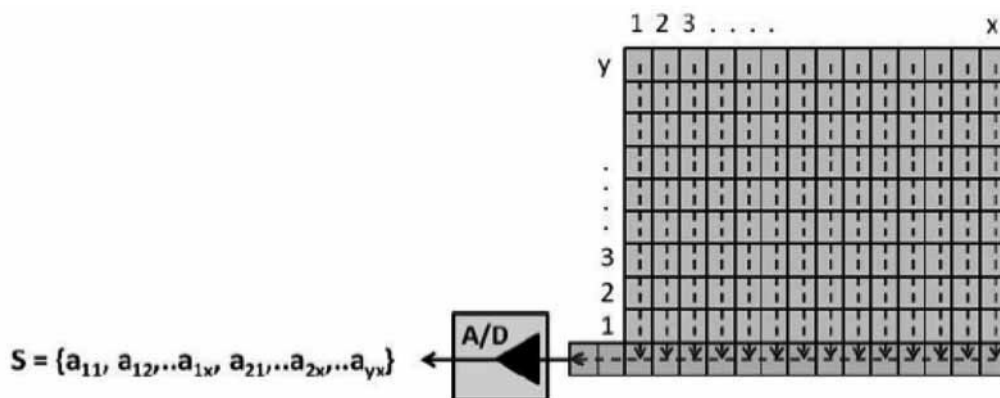


Fig. 4: Il principio di lettura delle CCD: il trasporto e la lettura seriale del contenuto di carica in ogni pixel.

Più informazioni sulla tecnologia di costruzione delle CCD e sul loro funzionamento si trovano nel documento contenente la motivazione scientifica del premio Nobel 2009 per la fisica

(http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/sciback_phy_09.pdf), da dove sono state riprodotte anche le figure 3 destra e 4.

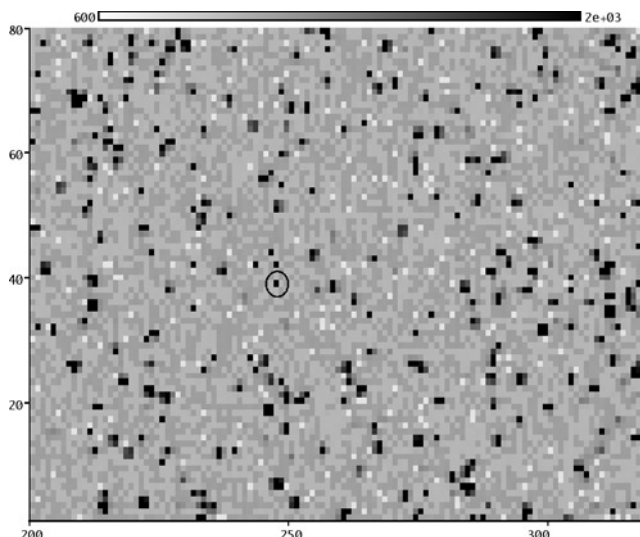


Fig 5: Immagine di una CCD e dell'informazione contenuta nei pixel: scala grigio – nero: proporzionale alla carica registrata in ogni pixel

3. CCD – NEGLI ACCELERATORI, SOTTO LA MONTAGNA E SUI SATELLITI

Se è abbastanza facile reperire le informazioni sul funzionamento delle CCD nelle camere digitali e nei telefonini per la registrazione delle immagini a colori, è un po' meno conosciuto il loro utilizzo nella ricerca fondamentale. A volte sembra che chi ha inventato le CCD l'abbia fatto con l'unico obiettivo da darci le fotografie digitali. Il loro utilizzo invece è molto esteso nella ricerca fondamentale in quanto i rivelatori CCD vengono utilizzati in esperimenti di fisica fondamentale dei più vari: principi primi, fisica atomica e nucleare, studi di astronomia e astrofisica, per fare alcuni esempi. Ovviamente, ognuna di queste applicazioni richiede l'utilizzo di rivelatori CCD dedicati, spesso costruiti con tecnologie di avanguardia, in quanto impongono richieste estreme, come la rivelazione di fotoni di alta energia (raggi X) al posto di fotoni nel visibile, oppure alta velocità di risposta o grande superficie. La ricerca nel settore della tecnologia CCD non è mai cessata ed è tutt'oggi un campo di indagine aperto e molto affascinante, motivato da richieste da parte dei fisici sperimentali sempre più spinte e complesse.

In seguito diamo tre esempi di utilizzo di rivelatori CCD, senza la pretesa di esaurire il campo del loro utilizzo.

3.1 MISURE DI RAGGI X IN TRANSIZIONI DI ATOMI ESOTICI

I rivelatori CCD sono stati utilizzati con successo per misure di raggi X generati nelle transizioni

che avvengono in atomi esotici, in particolare nell'idrogeno kaonico, nell'ambito dell'esperimento DEAR sull'acceleratore DAFNE ai Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN. Tale transizioni hanno un'energia intorno a 6 keV, dunque un migliaio di volte più alta di quella dei fotoni della luce visibile. Per rivelare tali fotoni, le CCD utilizzate hanno un strato sensibile con uno spessore molto più alto delle CCD utilizzate nelle camere digitali, e richiedono una tecnologia per la loro fabbricazione molto particolare.

Le misure degli atomi onici sono misure fondamentali per capire aspetti dell'interazione forte (descritta dalla teoria cromodinamica quantistica) a basse energie, dove ci sono ancora tanti misteri che hanno bisogno di dati sperimentali per essere svelati. Uno di questi misteri è la cosiddetta rottura della simmetria chirale che dovrebbe spiegare meccanismi che danno la massa dei nucleoni, dunque, gran parte della massa dell'universo visibile – inclusa la nostra.

Nella Fig. 6 riportiamo l'apparato DEAR, che ha come rivelatore di raggi X le CCD.

Per più informazioni sull'esperimento DEAR, nonché per un'ampia presentazione del caso scientifico, consigliamo la lettura della referenza [1].

3.2 PRINCIPI PRIMI: STUDIO DELLA VIOLAZIONE DEL PRINCIPIO DI ESCLUSIONE DI PAULI CON RIVELATORI CCD

Un altro esempio di utilizzo dei rivelatori CCD nella fisica fondamentale è il loro utilizzo per misure di eventuale violazione di uno dei

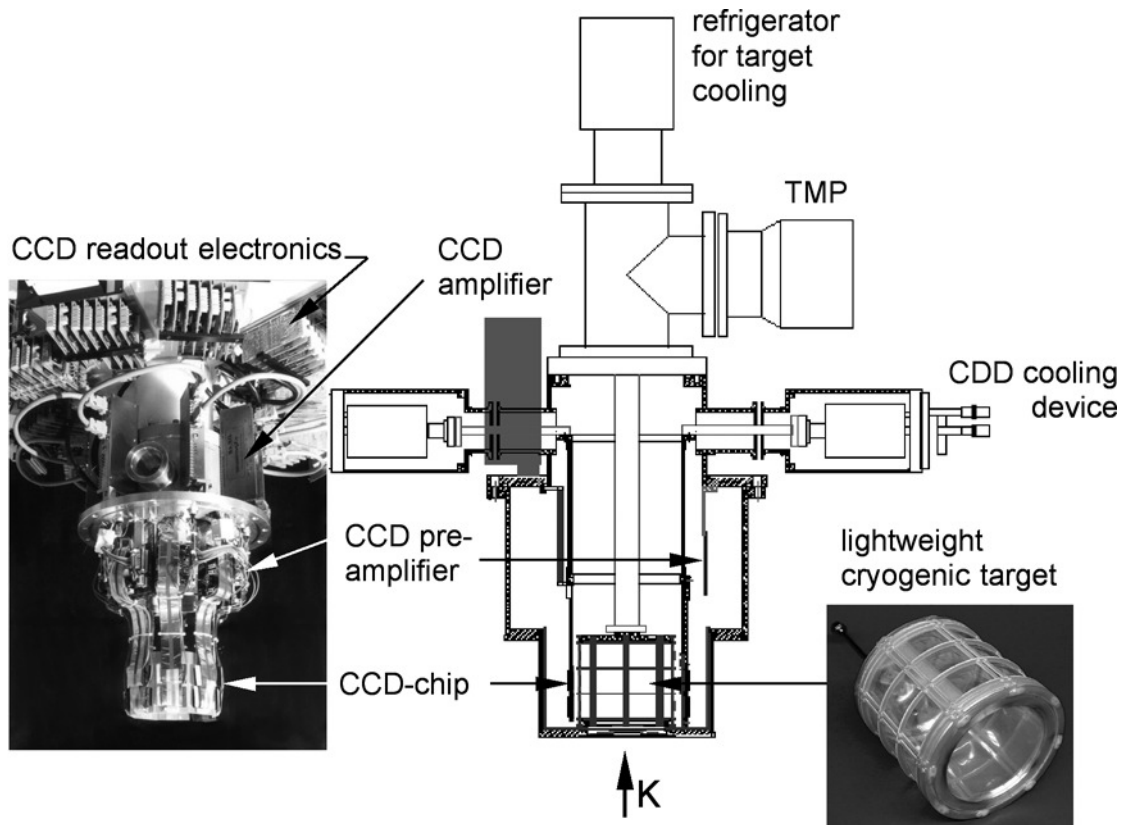


Figura 6: Schema dell'apparato DEAR: al centro il setup completo; a sinistra i rivelatori Charge-Coupled Device (CCD) con l'elettronica di lettura del segnale; a destra il bersaglio di idrogeno.

principi fondamentali della fisica moderna, il Principio di Esclusione di Pauli (PEP). La ricerca dell'eventuale violazione di PEP per elettroni (una delle particelle considerate come fondamentali ad oggi, cioè non composta da qualcosa'altro) è effettuata nell'ambito dell'esperimento VIP (Violation of the Pauli Exclusion Principle)

in presa dati ai Laboratori sotterranei di Gran Sasso (LNGS-INFN).

Nell'ambito di VIP si misurano eventuali transizioni atomiche proibite dal PEP in rame: transizioni dal livello $n=2$ al livello fondamentale ($n=1$) con quest'ultimo già occupato dal numero massimo (2) di elettroni, Fig. 7.

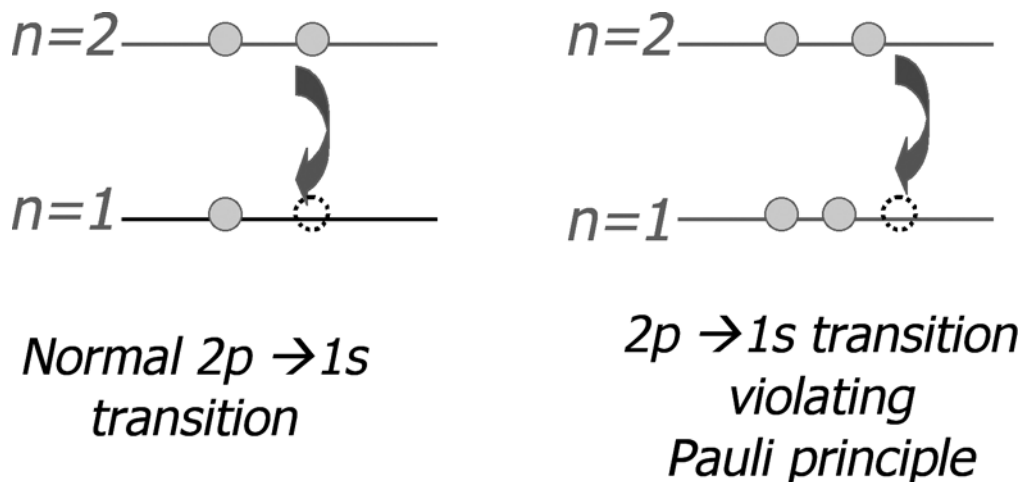


Fig 7: Transizioni che violano in principio di esclusione di Pauli (destra) a confronto con quelle normali (sinistra)

L'apparato VIP è un riutilizzo di quello di DEAR, in cui il bersaglio è stato sostituito da un cilindro in rame. I rivelatori CCD misurano i raggi X emessi sia da un'eventuale violazione del PEP (che comunque ad oggi non è stata misurata) che da altri eventi di fondo. VIP ha già ottenuto il miglior limite al mondo su un'eventuale violazione del PEP, tradotto in probabilità per una violazione limitata a 4.5×10^{-28} . L'esperimento è ancora in presa dati presso i LNGS, con l'obiettivo di migliorare tale limite di 1-2 ordini di grandezza. Per ulteriori dettagli facciamo riferimento alla pubblicazione [2].

3.3 ISTANTANEE DELL'UNIVERSO

Le CCD hanno trovato, com'era naturale, un'ampio utilizzo nell'astronomia e nell'astrofi-

sica, dove fotografare l'universo è diventato uno degli esperimenti su scale infinitamente grandi. Uno dei rivelatori CCD più grandi mai costruiti per applicazioni scientifiche (per PAN-STARRS, in Hawaii) contiene alcune camere digitali con un mosaico di CCD con un numero di miliardi di pixel.

Il famoso telescopio spaziale Hubble contiene alcune CCD. Una delle immagini famose prese da Hubble con le CCD WFPC2 è l'immagine di un cluster di galassie (Abell 2218), dove si notano effetti di lente gravitazionale predetti dalla relatività generale (gli anelli visibili nell'immagine), utilizzati per la stima della quantità di massa presente nel cluster, evidenziando la necessità dell'esistenza di grande quantità di materia oscura, fig. 8.



Fig. 8: Il cluster di galassie Bel 2218 (immagine WFPC2, Hubble Space Telescope, NASA)

Per il futuro sono in costruzione rivelatori CCD con un numero di pixel ancora più grande e con una capacità di rivelazioni di segnali molto deboli, nell'ambito del Large Synoptic Survey Telescope (LSST), che verrà installato in Cile, ad un'altezza di circa 2600 metri ed effettuerà misure che hanno, tra l'altro, l'obiettivo di capire aspetti della materia oscura e dell'energia oscura attraverso misure su grande scala. Tra l'altro, le informazioni raccolte verranno, come sempre accade, scambiate fra ricercatori di tutto il mondo attraverso Internet, dunque facendo affidamento sull'altra scoperta da Nobel 2009.

4. CCD – UNA LEZIONE DALLA RICERCA FONDAMENTALE

L'utilizzo delle CCD è stato esteso nell'ambito della medicina – immagini di tessuti e di cellule prese al microscopio, oppure immagini in serie di processi che avvengono nei tessuti e che aiutano i ricercatori a capire meglio le eventuali anomalie. Tecniche di immagini registrate con le CCD e le fibre ottiche sono ormai entrate anche nell'ambito dell'endoscopia e guidano il medico nei piccoli e grandi interventi. Ci sono tecniche endoscopiche basate su una o più (bundle) fibre

ottiche con la lettura del segnale con rivelatori CCD e la trasmissione di tipo wireless. Ci sono altresì tantissime applicazioni in vari campi dell'industria, nell'arte (analisi non distruttive) e nel settore della sicurezza, com'è facile immaginare, e tante altre applicazioni vengono trovate in continuazione.

Le fibre ottiche e i sensori CCD hanno cambiato e trasformato la nostra società, non soltanto nell'ambito della scienza, ma, e per la maggior parte, soprattutto, nel modo di vivere, nei costumi, nel bene e nel male, della società moderna. La stanno continuando a cambiare anche attraverso i risultati delle ricerche fondamentali, di cui abbiamo fatto alcuni esempi; capire il mondo

è per tanti una necessità, è quel qualcosa senza di cui non si può fare a meno – è una risposta alla nostra innata curiosità.

Le CCD sono una lezione di vita, una lezione da cui possiamo imparare sul ruolo chiave che la scienza fondamentale ha, oppure di cui possiamo disinteressarci, come individui e, peggio, come società, e allora, la prossima scoperta, motivata dal desiderio di conoscere il mondo, porterà il Nobel a qualcun'altro e, insieme al Nobel, il prestigio e...anche i soldi che potrebbero arrivare, a qualcuno che è più lungimirante, che investe di più nella ricerca fondamentale e nei giovani che la fanno.

Bibliografia essenziale:

[1] Atomi kaonici a DAFNE: recenti successi e future sfide, C. Curceanu e C. Guaraldo, Analysis, No. 2-3, 2008, p. 85 e tutte le referenze contenute

[2] New experimental limit on the Pauli Exclusion Principle violation by electrons, S. Bartalucci et al. (the VIP Collaboration), Phys. Lett. B641 (2006) p.18.

CATALINA CURCEANU (PETRASCU)

Primo Ricercatore dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). Ha svolto il dottorato di ricerca nell'ambito dell'esperimento OBELIX (CERN) nel campo della spettroscopia dei mesoni esotici. Ha coordinato il gruppo dei LNF-INFN nell'esperimento DEAR. Attualmente è responsabile nazionale dell'esperimento SIDDHARTA; spokesperson dell'esperimento VIP (LNGS) e coordinatore INFN per tre progetti di ricerca nell'ambito dell'Iniziativa Integrata fra Infrastrutture di Ricerca (I3) "HadronPhysics2" del VII Programma Quadro dell'EU. Coordinatore del progetto EOS - Researchers' Night 08, Support Actions FP7.

I suoi interessi di ricerca comprendono: fisica atomica, adronica e nucleare a bassa e media energia in particolare spettroscopia mesonica e studio degli atomi esotici; meccanica quantistica.

È autore di circa 150 pubblicazioni; organizzatore di varie conferenze ed editor dei proceedings; svolge attività di divulgazione scientifica e formazione.

Contatti:

INFN Laboratori Nazionali di Frascati
Tel: 06 9403 2321 Fax: 06 9403 2559

Via Enrico Fermi 40 00044 Frascati (RM)
Email: petrascu@lnf.infn.it