

LNF-73/52

5 Settembre 1973

G. Baldacchini: GOCCE DI ECCITONI. -

G. Baldacchini: GOCCE DI ECCITONI. -

1. - INTRODUZIONE. -

In questi ultimi anni un nuovo campo della fisica dei semiconduttori è stato aperto alla indagine degli studiosi: la condensazione di un gas di eccitoni.

Un numero sempre maggiore di ricercatori si è interessato all'argomento e vi ha apportato nuovi contributi. In Italia però, per quanto a mia conoscenza, non c'è nessuno che vi lavori ed anzi a molti è addirittura sconosciuto.

Proprio per ovviare a questo inconveniente, che è tanto più grave quando si considerano le connessioni tra la condensazione eccitonica e problemi fondamentali della Fisica quali la condensazione di Bose, la Superconduttività e le Transizioni di Fase, ho deciso di pubblicare questo scritto che avevo precedentemente abbozzato per un seminario alla Scuola Nazionale di Struttura della Materia, CNR-GNSM, l'Aquila 20 Agosto - 8 Settembre 1973.

Per il carattere che ad essa deriva dall'essere stata scritta per un seminario, questa breve nota non ha la pretesa di essere un completo articolo di "Review", ma solamente una guida per coloro che intendono venire a conoscenza dell'argomento ed eventualmente approfondirlo.

Per questo motivo il lavoro si articola in una prima parte, paragrafi 2 e 3, essenzialmente storica nel senso che ho seguito gli avvenimenti cronologicamente ed in una seconda parte, paragrafi 4 e 5, in

2.

cui una indagine critica è avviata sull'intero argomento utilizzando anche alcuni dei più recenti risultati teorici.

2. - PREISTORIA E SCOPERTA DELLE GOCCE DI ECCITONI. -

Secondo teorie generali dei solidi, un cristallo con un numero dispari di elettroni per cella deve essere un buon conduttore. In pratica questa condizione non sempre è verificata, per esempio in alcuni ossidi "metallici", tra cui CaO.

Sir N.F. Mott⁽¹⁾, studiando l'intera situazione, giunse alla conclusione che il numero dispari di elettroni non è una condizione sufficiente per la conducibilità elettrica di un cristallo. Infatti un'altra condizione deve essere verificata. Nel caso specifico dell'Idrogeno solido la distanza interatomica a di un reticolo cubico deve essere minore di un certo valore critico a_c :

$$(1) \quad a \lesssim a_c = 4.5 a_0$$

in cui a_0 è il raggio della prima orbita di Bohr ($a_0 = 0.53 \text{ \AA}$)^(x). La condizione (1) è valida anche per altri composti sempre che ad a_0 venga sostituito il raggio dell'orbita elettronica dell'atomo o del complesso di atomi in questione. In pratica se la distanza reticolare a di un cristallo non conduttore, ma con un numero dispari di elettroni per cella, viene diminuita gradualmente, ci si aspetta ad un certo punto una transizione isolante-metallo. Questa transizione, detta anche di Mott, è stata realmente osservata in VO_2 , NbO_2 etc. al variare della temperatura nell'intervallo $200 \div 500^\circ\text{K}$. Nel caso dell'idrogeno è stato calcolato⁽²⁾ che una simile transizione può avvenire a $\sim 20^\circ\text{K}$ con una pressione esterna di $\sim 3 \cdot 10^6$ atmosfere^(o).

E' chiaro quindi che, a parte un ristretto numero di sostanze per le quali è possibile avere la transizione isolante-metallo al variare della temperatura, lo studio della transizione di Mott in genere è reso arduo dalle difficoltà sperimentali che si riscontrano nell'uso di alte pressioni.

(x) - Per una semplice ed elegante derivazione della (1) vedasi C. Kittel in "Introduction to Solid State Physics", IV Edizione pag. 723-725.

(o) - E' interessante notare che ad una tale pressione la densità dell'Idrogeno è di 1.15 gr/cm^3 da confrontare con la normale densità dello Idrogeno solido $\sim 0.076 \text{ gr/cm}^3$. Incidentalmente la distanza interatomica, a , varia di un fattore ~ 2.5 nell'intero processo.

Esiste comunque un sistema fisico che si presta assai bene a questo tipo di studi ed è un gas di eccitoni in un semiconduttore.

Un eccitone diffuso (odi Mott) è un sistema costituito da una buca, h , e da un elettrone, e , che formano una specie di atomo idrogenoide la cui energia e raggio nello stato fondamentale sono rispettivamente

$$(2) \quad E_{ec} = E_0 \frac{\mu}{m \varepsilon}, \quad a_{ec} = a_0 \frac{\varepsilon m}{\mu}$$

E_0 ed a_0 rappresentano la energia e il raggio per un atomo di Idrogeno, m è la massa classica dell'elettrone, μ la massa ridotta del sistema $e-h$ ed ε la costante dielettrica del semiconduttore ospite. Poichè per molti semiconduttori $\varepsilon \geq 10$ e $\mu/m \lesssim 0.1$, si ha che $E_{ec} \lesssim 10^{-2}$ eV e $a_{ec} \gtrsim 50 \text{ \AA}$. Se si tiene presente che con sistemi di pompaggio ottico si possono avere fino a 10^{18} eccitoni per cm^3 in semiconduttori a gap indiretta, si capisce come sia possibile variare in modo continuo la distanza tra eccitoni da ∞ fino a valori di $\sim 1/(10^{18})^{1/3} = 100 \text{ \AA}$. E' quindi chiaro che, avendo a_{ec} sostituito a_0 in (1), un gas di eccitoni rappresenta un ottimo e semplice sistema sul quale verificare la transizione di Mott. Naturalmente esperienze di questo tipo devono essere condotte a basse temperature in modo da evitare la ionizzazione degli eccitoni, cioè deve essere $KT \ll E_{ec}$. (Ricordo che a temperatura ambiente $KT \approx 0.025$ eV maggiore di E_{ec}).

Avendo in mente tutto ciò due ricercatori russi, Asnin e Rogachev(3), misurarono la conducibilità elettrica nel Germanio in funzione della concentrazione eccitonica g . Per valori di g maggiori di 10^{15} cm^{-3} venne osservato un brusco aumento della conducibilità, che fu attribuito ad una transizione di Mott, dato che la condizione (1) era ampiamente verificata.

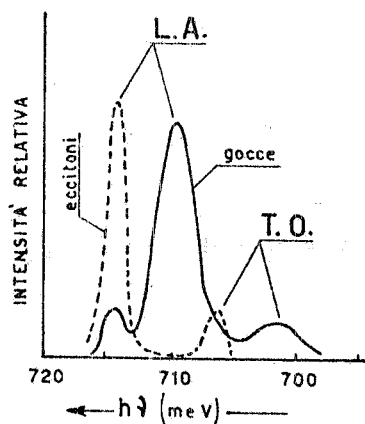


FIG. 1

Contemporaneamente Keldysh(4) suggerì che l'aumento di conducibilità fosse dovuto ad una condensazione del gas eccitonico in "gocce" metalliche $e-h$.

L'anno seguente Pokrovskii e collaboratori(5) misurano uno shift verso le basse energie del picco eccitonico del Germanio in emissione pari a 4.6 MeV. La Fig. 1 mostra la emissione eccitonica per bassi valori di g , curva tratteggiata, e la nuova riga di emissione ad alti valori di g , curva continua, che è stata ed è attribuita alle gocce.

4.

In un semiconduttore a gap indiretta le transizioni ottiche sono possibili generalmente solo se assistite da un fonone, quindi ogni riga è ripetuta tante volte quanti sono i fononi a disposizione. In Fig. 1 sono riportate le righe dovute al fonone Ottico Trasversale (T.O.) ed Acustico Longitudinale (L.A.).

Gli stessi autori formularono una semplice teoria⁽⁶⁾, basata sul modello di condensato in gocce, sulla quale vorrei soffermarmi brevemente, sia perchè essa riesce a spiegare quasi tutte le caratteristiche della nuova emissione, sia perchè in embrione contiene tutti gli ingredienti di teorie più complete sviluppate in seguito.

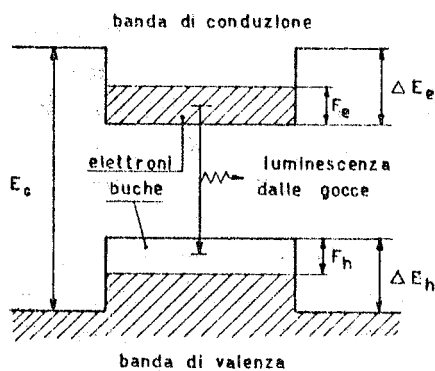


FIG. 2

Come è noto l'energia della gap tra banda di conduzione e banda di valenza, E_G diminuisce in presenza di un gas degenere e-h. Questa diminuzione è data dalla somma delle energie di scambio e di correlazione degli elettroni, ΔE_e , e delle buche, ΔE_h , vedi Fig. 2. L'energia totale della coppia e-h, tenuto conto delle loro energie cinetiche F_e , F_h , può essere scritta:

$$(3) \quad E_{\text{tot}}(e, h) = F_e + F_h - \Delta E_e - \Delta E_h$$

nella (3) tutte le grandezze sono esprimibili in funzione della densità di coppie e-h nel condensato, n_0 . Quindi, se E_{tot} ha un minimo in funzione di n_0 , uno stato condensato è fisicamente passibile. Detto minimo esiste per valori di n_0 pari a:

$$(4) \quad n_0 = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ (Ge)}; \quad n_0 = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3} \text{ (Si)}$$

Con questo semplice modello si spiega facilmente lo shift del picco di energia eccitonico pari a: $\Delta E_e + \Delta E_h - [(F_e - F_h)/2] - E_{ec}$, e la larghezza della nuova riga di emissione $\sim F_e + F_h$, molto più larga della riga eccitonica, vedi Fig. 1. Non solo, ma facendo un bilancio dettagliato tra gli eccitoni che entrano nella goccia, quelli che ne evaporano e quelli che vi si annichilano con vita media τ , si può arrivare alla seguente relazione:

$$(5) \quad g = \frac{4 A T^{3/2} e^{-\varphi/KT}}{V \tau}$$

tra la concentrazione degli eccitoni gassosi g e la temperatura $T(^{\circ}\text{K})$ a

cui avviene la transizione gas-liquido. A è una costante, V la velocità termica degli eccitoni gassosi e φ la energia che bisogna fornire ad una carica e o h per farla evaporare dallo stato liquido. Inoltre da questo stesso modello si ricava che la intensità della nuova riga di emissione varia come g^3 per bassi valori di g , mentre la intensità della riga eccitonica è proporzionale a g .

Tutte queste proprietà sono state realmente verificate sperimentale dagli stessi autori nel Germanio ed in seguito nel Silicio⁽⁷⁾. Ad onor del vero la nuova riga di emissione nel Silicio era stata rivelata da altri⁽⁸⁾ in precedenza ma attribuita alla formazione di bieccitoni (ritornerò nel seguito sui complessi eccitonici).

3. - CONFERME DIRETTE DELLA ESISTENZA DI GOCCE ED ALCUNE LORO CARATTERISTICHE, -

Come abbiamo visto nel precedente paragrafo una nuova riga di emissione in Ge e Si è stata attribuita alla condensazione di eccitoni in forma di gocce. Malgrado i risultati sperimentali siano stati interpretati con una teoria basata su uno stato condensato, ciò non costituisce una prova definitiva per la sua esistenza. Conferme dirette sono infatti venute da esperimenti di altro tipo.

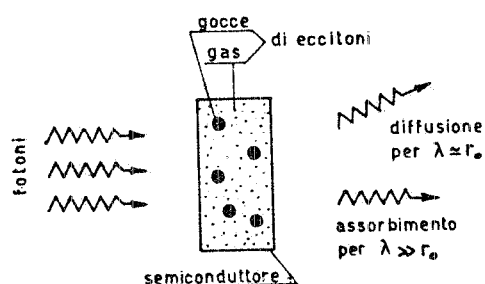


FIG. 3

Se un'onda e. m. viene inviata su una goccia e-h di raggio r_0 , essa in parte viene assorbita ed in parte diffusa, il secondo processo essendo dominante rispetto al primo se $\lambda \approx r_0$, vedi Fig. 3. Entrambi questi fenomeni sono stati osservati. Nel primo caso^(9, 10) è stato misurato in Ge un forte assorbimento a 100μ , che corrisponde alla frequenza di plasma del sistema e-h:

$$(6) \quad \omega_p(e-h) = \left(\frac{4\pi e^2 n_0}{\epsilon \mu} \right)^{1/2}$$

Il valore di n_0 ricavato dalla (6) è risultato in accordo con quello calcolato precedentemente (4) ed inoltre la costanza di ω_p (e quindi di n_0) in funzione di g assicura realmente che lo stato in questione è "liquido" (è una caratteristica di un liquido avere una densità praticamente indipendente dalla pressione che vi si esercita). Dai dati sperimentali si è potuto ricavare anche il raggio delle gocce, $r_0 \sim 10 \mu$.

In ogni caso una delle determinazioni più eleganti e più accurate

6.

di r_0 è stata eseguita⁽¹¹⁾ misurando la distribuzione di onde e. m. diffuse a piccoli angoli e di 3.39μ di lunghezza d'onda. Si è determinato così che il raggio r_0 è dell'ordine di qualche μ e che esso dipende, come ci si aspettava, dal valore di g .

Un'altra utile informazione sulle gocce, il numero di e o h che le compongono, è stata ricavata utilizzando una giunzione p-n⁽¹²⁾. È noto infatti che alle giunzioni esistono dei forti campi elettrici i quali possono ionizzare facilmente tutti gli aggregati e-h esistenti in un semi conduttore, eccitoni, bieccitoni e gocce. Nel caso di sistemi semplici come eccitoni o bieccitoni, la corrente misurata ai capi della giunzione è praticamente continua nel tempo, ma se vi sono gocce, allora quando una di esse si rompe sulla giunzione, un grosso impulso di corrente deve essere misurato. L'esperimento effettuato in Ge ha chiaramente mostrato, per valori di g sufficientemente alti, la esistenza di picchi di corrente random dai quali è stato possibile ricavare un numero di $\sim 3 \cdot 10^{17}$ cariche per goccia. Questo valore corrisponde ad una goccia di raggio $\sim 2 \mu$ con la nota densità n_0 (4). Questo tipo di esperienza suggerisce una spiegazione per i risultati ottenuti da Asnin et al.⁽³⁾. Infatti l'aumento della conducibilità in Ge non può essere spiegata dalla sola presenza di gocce, che sono degli oggetti neutri, ma piuttosto dalla loro rottura, con conseguente liberazione di cariche, nei contatti elettrici effettuati sul campione.

Un valore indipendente di n_0 e in accordo con i precedenti è stato determinato in Ge tramite effetti oscillanti della luminescenza⁽¹³⁾ in funzione del campo magnetico (effetto Shubnikov-de Haas). Inoltre anche le energie di Fermi degli elettroni e delle buche, vedi Fig. 2, sono state estratte da queste misure, $F_e \simeq 2.3 \text{ MeV}$ e $F_h \simeq 3.3 \text{ MeV}$.

La degenerazione delle buche e degli elettroni all'interno delle gocce ha per conseguenza che la interazione media per coppia e-h con i fononi del reticolo è molto minore che per un eccitone gassoso. Infatti gli elettroni e le buche sono quantizzati, come gli elettroni in un metallo, con una energia di Fermi di $\sim 2 \div 3 \text{ MeV}$. Poichè $KT \simeq 0.1 \text{ meV}$ per $T \simeq 2^\circ \text{K}$, solo la piccola frazione $KT/F_{e,h} < 0.1$ di elettroni o buche può interagire con i fononi del bagno. Questo ha per conseguenza che la goccia è isolata termicamente dal bagno fononico e che la sua mobilità è molto più alta del previsto. Interpretando la radiazione emessa dalla goccia con la legge di Kirchoff⁽⁹⁾ si è potuti risalire alla sua temperatura, T (goccia) $\simeq 10\text{-}15^\circ \text{K}$, di molto superiore a quella del bagno; bisogna aggiungere però che vi è qualche dubbio⁽¹⁴⁾ sul significato da dare a tale risultato. Per quello che riguarda la mobilità, le prime misure⁽¹⁵⁾ hanno subito dimostrato la facilità di accelerare le gocce con l'applicazione di tensioni, fino a 10^3 Kgr/cm^2 . In questo modo è stato determinato che la "diffusion length" è molto maggiore che per gli eccitoni. La misura

definitiva⁽¹⁶⁾ del coefficiente di diffusione in Ge ha dato il valore $D \simeq 150 \text{ cm}^2/\text{sec}$ da confrontarsi con quello dell'eccitone⁽¹⁷⁾ $D_{ec} \simeq 1500 \text{ cm}^2/\text{sec}$. Se si pensa al fatto che la goccia è un oggetto macroscopico, si può capire come il suo coefficiente di diffusione sia enormemente grande.

4. - DISPUTA SULLA NATURA DEL CONDENSATO E STATO ATTUALE DELLA TEORIA. -

Alla fine del secondo paragrafo avevo accennato al problema dei complessi molecolari eccitonici in connessione con una riga di emissione nel Si, che precedentemente era stata attribuita alla formazione di bieccitoni⁽⁸⁾ ed in seguito al condensato e-h⁽⁷⁾. La questione sembrava completamente risolta quando gli stessi autori⁽³⁾, che con la misura della conducibilità in Ge avevano aperto questo nuovo campo di indagine, con una serie di lavori sulla luminescenza^(18,19,20) attribuiscono la nuova riga di emissione in Ge alla formazione di bieccitoni prima e di un condensato di bieccitoni poi. Una pesante critica viene rivolta al modello cinetico di cui si è accennato nel paragrafo 2 e sperimentalmente si dimostra che la dipendenza della luminescenza del condensato dipende dalle condizioni delle superfici del cristallo. Quindi la conferma sperimentale della dipendenza cubica da g prevista dal modello cinetico era da considerarsi puramente fortuita.

Questi lavori come c'era da aspettarsi posero nuovamente in discussione la natura della nuova riga di emissione in Ge e Si, anche se nel frattempo si erano avute altre conferme sperimentali per il modello di condensato e-h nel Si^(21,22).

Per chiarire questo punto si fece uso di una nuova tecnica sperimentale, le microonde. Da misure di assorbimento di microonde viene dedotto⁽²³⁾ che al variare di g si ha prima la formazione di eccitoni poi di bieccitoni e quindi di un condensato in Si e Ge. D'altro canto da misure di conducibilità alla frequenza delle microonde⁽²⁴⁾ si deduce una transizione di Mott nel sistema eccitonico (dielettrico-metallo).

Come si vede dal punto di vista sperimentale non c'è un accordo completo, anzi alcuni dati sono in contraddizione con altri. Vediamo ora quale è la situazione per quel che riguarda la teoria.

Prima di tutto è stato dimostrato che sotto certe condizioni due o più eccitoni si attraggono reciprocamente tramite l'interazione di Vander Waals⁽²⁵⁾ o la polarizzazione nel vuoto⁽²⁶⁾; ciò può condurre alla formazione di un condensato la cui natura può essere eccitonica, bieccitonica o metallica (gocce e-h). Nel caso specifico del Ge e del Si è possibile l'esistenza di complessi molecolari del tipo $(ec)_8$ e $(ec)_{12}$ ⁽²⁷⁾; ciò è dovuto alla presenza di 4 e 6 minimi equivalenti nella zona di

Brillouen rispettivamente per il Ge e il Si. Tali complessi molecolari non sono mai stati individuati direttamente, ma la loro esistenza non è in contraddizione con una parte dei risultati sperimentali fin qui ottenuti (18, 19, 20, 23, 24). Studi teorici più approfonditi hanno comunque dimostrato (28) che le forze tra molecole o complessi molecolari sono repulsive e quindi all'aumentare della loro densità tali complessi diventano instabili e tendono a rompersi. Se la densità cresce ancora di più, allora l'intero sistema subisce una transizione di fase del primo ordine verso uno stato condensato e-h (28, 29). È interessante a questo punto sottolineare un risultato caratteristico a tutti i calcoli teorici eseguiti fino ad ora. Lo stato metallico e-h è stabile in Ge e Si grazie alla anisotropia ed alla struttura a molti minimi e massimi delle bande.

I calcoli eseguiti per una struttura simmetrica e con un solo minimo e massimo danno una energia di legame e-h nello stato metallico inferiore a quella relativa all'eccitone libero. In Fig. 4 la energia, in unità E_{ec} , dello stato condensato e-h (28) è riportata in funzione della distanza tra elettroni espressa in unità a_{ec} .

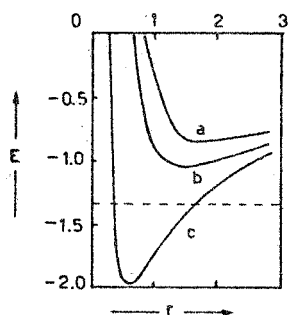


FIG. 4

che concordano molto bene con i vecchi e nuovi (14, 30, 31) dati sperimentali.

Prima di chiudere questa breve parentesi di carattere teorico vorrei richiamare un paio di punti di fondamentale importanza.

Entrambi i lavori teorici (28, 29) partono dal presupposto che lo stato condensato sia "metallico" anche se questo non è stato ancora definitivamente stabilito. Il procedimento usato per il calcolo delle energie di legame è analogo a quello descritto sommariamente nel paragrafo 2, l'unica differenza tra i due lavori essendo l'approssimazione usata nel calcolo della energia di correlazione. Malgrado questa differenza i risultati finali sono molto simili tra loro.

5. - CONSIDERAZIONI GENERALI E CONCLUSIONE. -

Malgrado il grande numero di esperimenti eseguiti in Ge e Si a tutt'oggi i pareri degli studiosi sono ancora divisi per quello che riguarda la esatta natura del condensato: Bieccitoni, o Gocce e-h?

L'opinione più corrente è che, al variare della concentrazione g , si passi da un gas di eccitoni ad un gas di bieccitoni o complessi molecolari e quindi a gocce e-h. Questo punto di vista è suffragato dal fatto che con esso si riesce a spiegare la stragrande maggioranza dei risultati sperimentali ed inoltre c'è un completo accordo con i dati teorici sin qui disponibili.

E' necessario però sottolineare l'importanza che le impurità presenti nel semiconduttore hanno sull'intero processo. E' noto da lungo tempo che la presenza di impurità favorisce la formazione di bieccitoni e complessi molecolari. E' stato dimostrato in Ge⁽³²⁾ e Si⁽¹⁷⁾ che le stesse impurità fungono in secondo tempo da centri di condensazione per le gocce e-h. Anzi per basse concentrazioni di impurità il fenomeno della condensazione viene favorito, mentre per valori maggiori di 10^{16} impurità/cm³ la condensazione non avviene più. In questo ultimo caso molto probabilmente il processo si ferma alla formazione di complessi molecolari^(x).

Per quello che riguarda i bieccitoni è necessario aggiungere che dal punto di vista teorico si incontrano grosse difficoltà nel calcolare le energie di legame. Questa è una conseguenza del fatto che le buche e gli elettroni posseggono quasi la stessa massa e quindi non si possono separare le coordinate elettroniche da quelle delle buche, applicando il teorema di adiabaticità. Inoltre anche dal punto di vista sperimentale la stessa esistenza di bieccitoni è talvolta messa in dubbio. Ad esempio ultimamente nessuna evidenza di bieccitoni è stata rivelata in Cu₂O⁽³³⁾, malgrado precedenti esperimenti ne avevano dimostrato l'esistenza.

Fino ad ora solo il Ge e il Si sono stati studiati estensivamente anche se, come si è detto precedentemente, rimangono alcuni dubbi e qualche esperienza andrebbe ripetuta. Non a caso gli esperimenti sono stati condotti su questi due semiconduttori; essi infatti hanno una gap indiretta e per conseguenza la vita media degli eccitoni è di $\sim 10^{-6}$ sec abbastanza grande da permettere con pompaggi ottici accessibili una elevata densità eccitonica.

L'unico esperimento, a mia conoscenza effettuato su un semiconduttore a gap diretta è quello relativo al GaAs⁽³⁴⁾. Malgrado la vita media eccitonica sia $\sim 10^{-9}$ sec, gli autori sostengono di aver rivelato

(x) - Recentemente il Prof. R. Sauer della Università di Stoccarda ha rivelato in Si drogato con impurità di Fosforo la esistenza di complessi polieccitonici legati. Più precisamente all'aumentare della intensità di pompaggio, e quindi di g , egli ha osservato aggregati di eccitoni sempre più complessi. (Phys. Rev. Letters 31, 376 (1973)).

uno stato condensato con una densità $n_0 \approx 1.1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

Una sostanza che da un punto di vista generale sembra prestarsi a questo genere di esperimenti, dato che ha una gap indiretta ed una struttura a bande analoga al Ge e Si , è il GaP ⁽³⁵⁾. Io stesso ho provato a studiarne la luminescenza variando l'intensità di pompaggio, ma con esito negativo. Lo spettro di luminescenza risulta essere composto di decine di picchi la cui natura non è stata ancora completamente chiarita, anche se si conosce che alcune righe provengono da complessi eccitonici intrappolati su atomi di N_2 (queste righe danno luogo ad una luminescenza nel verde). La concentrazione di impurità nel campione usato era di $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. E' chiaro quindi che finchè non si avranno a disposizione cristalli più puri non sarà possibile osservare alcuna condensazione in GaP .

Prima di concludere questo scritto vorrei dare alcuni cenni ad una problematica che è strettamente connessa con la formazione di gocce e-h.

Da molto era stata suggerita la ipotesi di una possibile condensazione di Bose di un gas di eccitoni^(36,37) ed anche se le condizioni sperimentali sembravano favorevoli in molti materiali, non si era mai avuta alcuna prova fino a qualche tempo fa. Ultimamente⁽³⁸⁾ alcuni ricercatori giapponesi hanno annunciato di avere osservato la condensazione di Bose in un gas di bieccitoni in CdSe . Costoro hanno rivelato un picco di emissione di larghezza "zero" (proveniente quindi da uno stato $k=0$) per qualche picosecondo dopo aver eccitato il cristallo con un laser pulsato ad una frequenza di $\sim 2 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$. Anche se non ci sono state altre conferme fino ad ora, la cosa è sicuramente di importanza fondamentale, anche perchè gli stessi autori hanno dimostrato teoricamente che i bieccitoni sono dei complessi stabili anche se per un tempo molto breve.

Secondo alcuni autori^(39,40) non c'è nessuna ragione contraria ad una transizione metallo-superconduttore per il condensato e-h. Qualitativamente la forza necessaria per legare due elettroni o due buche in coppia può essere fornita dalla interazione di due elettroni con una buca o con le vibrazioni della densità del liquido.

Per concludere possiamo dire che la tematica di questo nuovo campo della fisica dei semiconduttori si annuncia estremamente interessante se non altro per le possibili connessioni con problemi fondamentali come la Superfluidità e Superconduttività. A causa dei dubbi che ancora esistono molto lavoro sperimentale resta da fare. Sicuramente di grande importanza è lo studio delle Transizioni di Fase del primo e secondo ordine subite dal gas eccitonico o bieccitonico. In conclusione possiamo dire con Ginzburg⁽⁴⁰⁾ "che nei prossimi anni questo nuovo campo sarà al centro delle attenzioni della fisica dei semiconduttori", una profezia che parzialmente si è già avverata.

BIBLIOGRAFIA. -

- (1) - N.F. Mott, *Phil. Mag.* 6, 287 (1961).
- (2) - G.F. Chapline Jr., *Phys. Rev.* B6, 2067 (1972).
- (3) - V.M. Asnin et al., *JETP Letters* 7, 360 (1968).
- (4) - L.V. Keldysh, *Proc. 9th Int. Conf. on Physics of Semiconductors*, Moscow (1968), p. 1303.
- (5) - V.E. Pokrovskii et al., *JETP Letters* 9, 261 (1969).
- (6) - V.E. Pokrovskii et al., *Sov. Phys. Semicon.* 4, 409 (1970).
- (7) - A.S. Kaminski et al., *JETP Letters* 11, 255 (1970).
- (8) - J.R. Haynes, *Phys. Rev. Letters* 17, 860 (1966)
- (9) - V.S. Vavidov et al., *JETP Letters* 10, 192 (1969).
- (10) - V.S. Vavidov et al., *Proc. 10th Intern. Conf. on Physics of Semiconductors*, Cambridge (Mass.) (1970), p. 509.
- (11) - V.E. Pokrovskii et al., *JETP Letters* 13, 212 (1971).
- (12) - C. Benoit à la Guillaume et al., *C.R. Acad. Sci. Paris* 272B, 236 (1971).
- (13) - V.S. Bagaev et al., *JETP Letters* 16, 83 (1972).
- (14) - Ya. Pokrovskii, *Phys. Stat. Sol. (a)* 11, 385 (1972).
- (15) - V.S. Bagaev et al., *JETP Letters* 10, 195 (1969).
- (16) - C. Benoit et al., *Phys. Rev. Letters* 27, 1214 (1971).
- (17) - V.E. Pokrovsky et al., *Proc. 10th Intern. Conf. on Physics of Semiconductors*, Cambridge (Mass.) (1970), p. 504.
- (18) - V.M. Asnin et al., *Sov. Phys. Semiconductors*, 5, 1607 (1972).
- (19) - V.M. Asnin et al., *Sov. Phys. Sol. State* 14, 332 (1972).
- (20) - V.M. Asnin et al., *Sov. Phys. JETP* 35, 390 (1972).
- (21) - B.M. Ashkinadze et al., *Phys. Stat. Sol. (b)* 46, 495 (1971).
- (22) - K. Betzler, *Phys. Rev. Letters* 28, 1562 (1972).
- (23) - B.M. Ashkinadze, *JETP Letters* 16, 190 (1972).
- (24) - P.S. Gladkov, *Sov. Phys. Semiconductors* 6, 1649 (1973).
- (25) - P.H. Handel, C. Kittel, *Preprint PNAS* (1972).
- (26) - P.W. Anderson et al., *J. Phys. C: Sol. State Phys.* 5, L119 (1972).
- (27) - C. Kittel et al., *Phys. Letters* 42A, 189 (1972).
- (28) - W.F. Brinkman et al., *Phys. Rev.* B7, 1508 (1973).
- (29) - M. Combescot et al., *J. Phys. C: Sol. State Phys.* 5, 2369 (1972).
- (30) - C. Benoit et al., *Phys. Rev.* B7, 1723 (1973).
- (31) - J.C. Hensel, *Phys. Rev. Letters* 30, 227 (1973).
- (32) - V.S. Bagaev et al., *Proc. 10th Intern. Conf. on Physics of Semiconductors*, Cambridge (Mass.) (1970), p. 500.
- (33) - Y.R. Shen et al., *Phys. Rev. Letters* 29, 1558 (1972).
- (34) - V.S. Bagaev et al., *JETP Letters* 15, 360 (1972).
- (35) - Willardson Beer, *Semiconductors+Semimetals* 8, pp. 38-54 (1972).
- (36) - J.M. Blatt et al., *Phys. Rev.* 126, 1691 (1962).
- (37) - L.V. Keldysh, *Sov. Phys. JETP* 5, 190 (1967).
- (38) - E. Hanamura et al., *Sol. Sta. Comm.* 12, 533 (1973).
- (39) - L.V. Keldysh, *Uspekhi* 13, 292 (1970).
- (40) - V.L. Ginzburg, *Uspekhi* 14, 25 (1971).