

# 物性研だより

第23卷  
第6号  
1984年3月

## 目 次

○さまよいの記	小林浩一	1
物性研究所短期研究会報告		7
○中性子星の物性的諸問題		7
世話人	小田 稔, 蓬茨靈運, 中嶋貞雄	
○直鎖状ポリエン構造の光励起状態		30
世話人	国府田隆夫, 櫛田孝司, 鈴木英雄	
	白川英樹, 那須奎一郎	
○人工格子合金		51
世話人	新庄輝也, 安岡弘志, 遠藤康夫	
物性研究所談話会		62
物性研ニュース		
○昭和58年度後期短期研究会予定		63
○人事異動		64
○テクニカルレポート新刊リスト		64
編集後記		

東京大学物性研究所

ISSN 0385-9843

## さまよいの記

小林 浩一

私の生れた函館は、海にも山にも恵まれた土地で、そこに少年時代を過すことのできたのは、何にもまして幸運であった。街から僅かに歩けば透明な水の洗う岩礁の海岸で、夏には貝や海胆を探し魚を追った。冬になれば晴れた日曜日にはスキーをつけて街の北側を限る山々にさまよい、霧氷の疎林をぬって夕暮に家に帰りついた。春には鈴蘭をつみ草原をあてもなく歩き、秋には丘の上から海峡をへだてて遠く紫の内地の山々を眺めくらした。そしてそのような時には自分が風景の中に溶けこんでゆくような気持におそわれることが多かったが、これが私の自然を受身でみるという性格を形づくったように思われる。

仙台の高等学校にゆくようになって生活の環境は急に人間臭いものになり、それはそれで珍らしく面白かったが、ひとたび作られた性癖は変るものではなく、思いは常に自然にあった。大学の進路を選ぶ際には、自然にふれられるということから理学部以外には無いと思っていたが、さて何をやろうかという段階になって、はっきりした考えはなかった。化学を選んだのは、一番容易で、又やれそうだと思ったからである。

昭和17年の秋に東北大学の化学の学生になり、学んでみて成程これは面白いものだと思った。その後一年程化学の学生の生活をたのしんだが、それも束の間、戦争の様子が思わしくなり、工場に動員されることになった。当時、卒業後は海軍の技術関係の将校になるという約束で、毎月奨学金をもらう海軍委託生という制度があり、私はそれになっていたので、四日市にあった海軍燃料廠で働くことになった。ここはガソリンを作る工場で、化学関係の委託生が全国の大学から集まり、多くの知己ができた。理学部の学生はいづれも生活力が弱く、要領のいい工学部の学生の影にひっそりと固まって暮したので、互いに大変親密になった。初期の物性研におられその後ノースカロライナ大にうつられた宮川君などはその一人で、その他にも現在化学の分野で一家をなしている人が何人もいた。原油が底をつき爆撃がひどくなるにつれて、仕事は次第に不安定になり、又、無意味なことをやらされる事が多くなつたが、それに反比例して、皆で勉強しようという気分が何となく高まり、いっそのこと物理の勉強をやってみようということになった。テキストにSlater and FrankのIntroduction to Theoretical Physicsを用い輪講をやつたが、これが私の物理との最初の出会いであった。皆の心に満たされぬものがあったせいか、工場の仕事は二の次で、爆撃にさらされながら輪講だけは熱心にやつた。

戦争が終ると同時に大学を卒業したが、大学で受けた授業は実質一年ばかりで、化学はほん

の手ほどきを受けたにすぎなかった。卒業後しばらくして幸にも助手に採用していたが、敗戦後の数年は研究と名のつくようなことは殆んどできず、専ら買出しと本よみ、そしてその合間にねっては芋をかついで山登りに専念した。私の先生は石川総雄先生といい、化学熱力学の大家で可逆電池の権威であったので、しばらくして助教授の樋口泉先生の指導の下に始めた仕事は、化合物の比熱を測定し、それから熱力学関数を求め化学平衡を論ずるものであった。今とちがい当時は自動化が貧弱で、広い温度範囲の測定には、つききりで行う徹夜の測定が普通であった。この時測定した試料の一つに塩化銀があったが、これがその後の私の方向を変える原因になるとはその時は考へも及ばなかった。

私は戦争の末期に、わら半紙に印刷された 落合麒一郎、高橋秀俊、高木豊、三先生訳の Mott and Gurney の「イオン結晶論」(Electronic Processes in Ionic Crystals) という本をなげなく買い、ろくに読みもせずに本棚にしまっておいた。昭和20年代も半ばになる頃は世の中も次第におちつき、私の仕事も順調に進む様になったが、化学はいさか人工的な臭が強すぎ、複雑で、もう少し簡明直截に自然に接する学問がしてみたいという気持が次第に強くなり、ひとつ物理の本でも読んでみようかという気になった。手にしたのが「イオン結晶論」で、わからぬなりにも読んでみて、その面白さ、その迫力に強い感銘を受けた。この世にこんな面白い学問の世界があるのかと思った。

この本から受けた恩恵にはもう一つあった。前にも書いたように、私は塩化銀の比熱を測ったが、それが融点附近で異常な上昇を示すことに気づいていた。これが何によるものかは、はじめは判らなかったが、「イオン結晶論」を読んでゆくうちに、格子欠陥の生成に関して「しかし我々は融解点の近くにおけるハロゲン化銀の比熱について、何等測定あることを知らない」という記述にぶつかり、これだと思った。この仕事は当時イリノイ大学におられた Seitz 先生のすすめで Physical Review に投稿し、1952年に掲載され、このおかげで物理に親しみを持つようになった。

その後間もなく、私は比熱の仕事で学位をいたゞき、又、石川教授の停年御退官により研究室が解散することになったので、不安であったが、これを機会に物理学をやってみようかという気になった。それには学生からやりなおすことも考えられたが、自活しながら物理学を学ぶことができればこれに越したことはないと思い、米国にゆきたいと思った。幸い Seitz 先生のお世話で、ピッツバーグにあるカーネギー工大（現在カーネギー・メロン大）物理の Smoluchowski 教授のところで研究員として働く機会が与えられた。渡米は昭和29年で、旅費はフルブライト基金からいたゞき、氷川丸でシアトルに向ったが、これで化学とも縁が切れ、これからはたよるものはなく、何もかも一人でやって行かなければならぬと自分にいいきかせた。船では霜田先生、内山先生、藤井先生など、当時物理の若手の方々と一緒に

になった。物理の知識も実績もなかった私は、そのような方々を知るにつけ、ひどく無鉄砲なことをやってしまったのではないかと、心細くなった。量子力学さえまともに勉強していなかったからで、今思い出しても冷汗がながれるおもいである。

Smoluchowski 先生のもとでは、当時盛んであった固体の放射線損傷の実験を行った。既に少し古くなりかけていたが、当時の大型加速器の一つであった 300 MeV プロトンシンクロトロンからのプロトンをアルカリハライドにあて、その効果を見るものであった。何から何迄目新らしく、周囲の人々も気持よく、又、室内を呼びよせることもできたので、毎日が愉快であった。Smoluchowski 先生は自由放任主義で、私は又何でも経験しようという気持があったから、電気伝導、比熱、光スペクトル、密度変化、NMR の装置を作り、これらを使って測定した。比熱を除いてはいづれも経験がなかったので、必要に応じてその都度勉強という、綱渡りの生活であった。それでも 3 年間をここで過したお蔭で、物理の知識が少しづつ殖えていった。当時アメリカは若く意気軒昂で、万事がおおらかであった。シンクロトロンの運転を受持つオペレーターは夜には帰るので、徹夜の実験になると素人の私が自分で運転する羽目になり、始めはどうしていいかわからず、青くなったりもあった。又、加速器が故障したおりには、真空中をやぶり中にもぐり込む無鉄砲な人もいて、僅かの時間に多量の放射線を浴びるのをさして気にせず、仕事第一という雰囲気であった。

私の机は中 2 階にあり、その下が Smoluchowski 先生と Kohn 先生の部屋であった。私の部屋へのぼる階段が丁度 Kohn 先生の部屋の前にあったので、Kohn 先生とはよく雑談をした。当時 Kohn 先生はまだ極めて若く、Luttinger と一緒に仕事をしていた時代で、私は迂闊にもその仕事をよく知らなかったが、大変な秀才であると思った。先生は文化一般に対しても極めて造詣が深く、話が能や歌舞伎に及んで私はよく立往生をした。

私の前にカーネギー工大に居られたのは犬井先生で、そのために日本人の評判が高かった。しかし、『犬井は毎日午前 3 時迄勉強した』といわれるのには弱った。ピッツバーグに来てから 2 年程して山下先生がピッツバーグ大学に来られ、はじめてお目にかかったが、その後の一年間を親しくしていたゞき、後にアルゴンヌに移られた荒井さんを交えてよくドライブや食事を御一緒した。当時イリノイ大学には上田先生御夫妻と山形さんがおられ、ピッツバーグに行った最初の年の暮におたずねした。雪のふる中を、不安な気持ではじめての夜行バスの旅をしたが、あたたかいおもてなしをいたゞき、張りつめた緊張がとけていったのを覚えている。

幸いカーネギー工大での仕事を何とかまとめることができたので、Seitz 先生と Maurer 先生のお骨折りで、その後イリノイ大学の物理学教室にうつった。イリノイ大学は当時米国の固体物理学の中心の一つで、短期間ではあったが大変刺戟にみちた生活を送ることができた。仕事は同年の Brown さんと一緒にハロゲン化銀中の電子ホール効果を測定することであった

が、彼は先生で私は弟子であった。米国の生活にやっと慣れたので、はじめの頃程緊張することはなかったが、装置の設計から作成迄をすべてやらなければならなかつたので、生れたばかりの子供をかかえて戦争のような10ヶ月であった。ヘリウムを使った経験が無かつたので、魔法瓶の設計はマグネットを共用することになった Wheatley さんに懇切丁寧に教えてもらった。装置が動き出し待望の結果が得られたのは帰国もせまつた頃であった。少々複雑な装置であったが一回でうまく働き出した時は天にも昇る心持で、米国に来た甲斐があったと思った。データがでた時 Bardeen 先生に祝いの言葉をいたゞいたのは、忘れ難い想い出である。

ピツツバーグとちがい、イリノイには可成りの数の日本人が滞在していた。私が移って行った時に、丁度、鈴木平先生、神前さん、藤田さんが帰国直前で、お目にかかることができた。又、堂山さんが物理教室におられ大変お世話になった。このようにして日本の物理学者とも少しづつ知りあいになることができ、日本に帰っても物理の世界で何とかやってゆけるかも知れない、と思う様になった。そのような時に、東北大学に移っておられた上田先生からお招きを受け、日本に帰る決心をした。

帰国にはサンフランシスコから貨物船に乗ったが、船が金門橋をくぐる時、もう再びこの国に住む機会はあるまいと思い、胸が熱くなった。この四年間、米国に住みつけ日本に帰ろうかと、絶えず揺れ動いた気持を思い出した。帰国後東北大学の物理教室に籍をおき、ようやく日本の物理のコミュニティーに加えてもらうことができた。

東北大学の物理教室では上田先生から真空紫外の手ほどきを受け、富来さんと一緒にアルカリハライド吸収端の光吸収の測定を行った。吸収端は不純物に敏感なので化学の知識が役に立ったが、その際、当時化学教室におられた田村さんにいろいろ教えていたゞき有難かった。その後2年と僅かで物性研に移ったが、それ以後の事は「物性研だより」に何回か書いたので、簡単に記すことにとづめたい。

物性研ではイリノイ大学の仕事の延長として、光キャリアーの電流磁気効果の測定をはじめたが、藤田君、川井君、牧田君、志賀さん、高野君らの努力で、硫化カドミウムやハロゲン化タリウム中のポーラロンの運動について新しい事実が次々にわかつた。これには試料の純度が決定的な役割りを果したが、硫化カドミウムは当時松下東京研究所におられた大貫さんからいたゞき、又、ハロゲン化タリウムの精製は当時金田さんといった栗田夫人の努力によるところが多かった。その後、励起電子状態とそれと格子との相互作用の全貌を知るには輸送現象だけでは不充分であると思い、それと相補的に光学スペクトルの測定に主力をそそぐことにした。丁度その時栗田君が來たので、ハロゲン化タリウムの磁気光スペクトルを測定したところ、幸いにも見事な振動スペクトルが現れたのには全く驚ろいた。その後この仕事は中原君、松下君、藤井さんらによって発展され、水素様状態の磁場効果や励起子・格子相互作用について、更に新し

い現象がみつかった。光スペクトルの研究は、又、ハロゲン化タリウム混晶についても行われ、中原君と高島君の吸収、発光の精密な測定によって、混晶によってはじめて誘起される自己束縛状態の存在がみつかった。この際成分原子のクラスター生成やパーコレーションの重要性がわかったが、これは最近の竹中君のラマン散乱の実験で裏づけられた。混晶の実験結果を考えているうちに、電子格子相互作用における結晶の次元性の重要性に気づき、このために強い電子格子相互作用が期待できる一次元性結晶の光物性をやりたいと思った。これには適当なモデル物質を探すことが先決問題で、一、二の失敗の後、谷野君とウォルフラム赤塩という恰好な物質をさぐりあてることができた。測定してみると期待していた通りで、一次元電子格子系の面白さの片鱗を味うことができた。強い電子格子相互作用は水素結合にも期待されるので、その最も典型的な物質として氷を選び、関君が光スペクトルを測定したが、氷のみならず強誘電体や生体に重要な関係のある水素結合系の電子状態や格子との相互作用が、物理の側から殆んど研究されていないのを知ったのは驚ろきであった。このように私の興味は次第に強い電子格子相互作用に傾いて行ったが、その果てにあるものは化学反応であろうから、結局私は30年前に離れた元の振出しに戻りつつあるのかも知れない。

物性研には20年以上お世話になったが、これは、今迄にのべた幾つかのことと共に、私にとっての幸運の一つであった。物性研は全く自由なところで、人間関係も複雑でなく、自ら求めて左右を気にする所以なければ、のびやかな日々を過ごすことができる場所である。ことに私には神前さんという兄貴分がいて、研究上も生活上も相談相手としていつも力強い支えになっていたゞき、誠に幸せであった。又、物性研には理論家が多いので、実験屋が勉強するのには恵まれた所であった。我々は特に二人の理論家に大変お世話になった。その一人は阿部龍蔵さんで、阿部さんが物性研におられた頃、我々のグループは数年間にわたり毎週1回物性理論一般について懇切な指導を受けることができた。これにより我々はどのくらい啓発されたか、計りしぬものがあった。又、豊沢さんとその研究室の方々には、励起子や電子格子相互作用について、基礎的な勉強から実験結果の解析にいたる迄、常に相談相手になっていたゞき、我々の研究はこれに支えられて進んできたといっても過言ではない。更に、これ以外の方々にも大変お世話になったが、ここにお礼を申し上げたい。

前にもかいたように、私は自然を受身でみる性格で、ありのままの自然の中に身をしづめたいという願いが強い。山登りの話で恐縮であるが、山登りで最も自然にふれることのできるのは、先人の足跡のない場所を一人で歩くことである。自然科学の研究についても同じことがいえるのではなかろうか。今をときめく分野に参加するのを否定するわけではないが、ややもすれば競争や組織作りが第一義になり、自然の卒直な声に耳をかたむけることが第二義になってしまっていることがあるのではなかろうか。世は流行の衣裳に身をかため、賑やかに群がり進

む方向に流れつつあるが、風に顔をむけ曠野を一人行くのも、又、自然科学の研究者の一つの姿ではなかろうかと思うのである。

# 物性研究所短期研究会報告

## 中性子星の物性的諸問題

### プログラム

期 日 昭和58年10月27日(木)～29日(土)  
場 所 東京大学物性研究所 旧棟1階議義室

#### 10月27日(木)

午後の部 Introduction

小田 稔(宇宙研), 蓬茨 靈運(立教大理)	
中嶋 貞雄(東大物性研)	
中性子星の形成, 連星系の中の中性子星の進化	杉本 大一郎(東大教養)
高密度核物質と中性子星の構造	玉垣 良三(京大 理)
熱い中性子星の原子核(草稿なし)	小笠原 隆亮(京大 理)
中性子星の形成問題とパルサーの固有運動	中村 卓史(京大 理)
X線パルサー(回転する中性子星)の観測	長瀬 文昭(名大 理)
X線パルサーの周期変動とその解釈	早川 幸男(名大 理)
超高密度物質の相転移と超新星爆発	高原 マリ子(東大教養)
	佐藤 勝彦(東大 理)

#### 10月28日(金)

午前の部 中性子星の超流動とグリッチ

高塚 龍之(岩手大人社)

コメント

三武 伸一(東大 理)

中性子星の冷却

鶴田 幸子(モンタナ大)

$\pi$ 中間子凝縮と中性子星の冷却

玉垣 良三(京大 理)

中性子星外殻のプラズマ状態と輸送係数

一丸 節夫(東大 理)

WとZの実験的検証とニュートリノの質量

山口 嘉夫(東大核研)

午後の部 X線バーストとBBS(Bright Bulge Sources)

小山 勝二(宇宙研)

X線バーストのモデルと中性子星の大気

花輪 知幸(東大 理)

中性子星表面の重力

田中 靖郎(宇宙研)

ガンマ線バースト

西村 純(宇宙研)

中性子星の最大重力質量と最大赤方変位

中村 卓史(京大 理)

強磁場研究の現状

伊達 宗行(阪大 理)

超強磁場の発生とその下での物性 後藤 恒昭, 三浦 登(東大物性研)

10月29日(土)

午前の部	中性子星の表面磁場	村上 敏夫(宇宙研)
	中性子星の磁気圏	井上 一(宇宙研)
	かに星雲の中性子星	牧島 一夫(宇宙研)
午後の部	パルサー発生率問題における電波超新星と短周期パルサーの役割	大師堂 経明(早大教)
	パルサー電磁波のエネルギー源	大家 寛(東北大理)
	磁気リコネクションのダイナミックス	佐藤 哲也(広島大核理)
	コメント。(まとめ)	

### イントロダクション

宇宙研 小田 稔

中性子星はもともと 1932 年チャドウィックが中性子を発見して間もなく、バーデ、ツヴィッキーが存在を示唆した天体である。以来オッペンハイマー他によって 1930 年代に理論物理学の絶好の演習問題として扱われ、戦争による中断の時期を経て 1950 年代から 1960 年代には再び、サルピーター、浜田、カーメロン、鶴田等の人々が取組んだ対象である。

理論家の頭の中で育てられたこの幻の星が現実の存在として観測にかかってきたのはまず 1967 年パルサーの発見によってである。これは 2 ~ 3 秒よりも短い周期で極めて規則正しく脈動する電波源で、発見後まもなく高速で回転する中性子星から電波がサーチライトのように放射されているものと解しゃくされた。

一方、1962 - 3 年には予想を幾桁も上まわる明るい X 線源が発見されたことから、X 線天文学が新しい分野として誕生し、20 年の間に天文学の大きな柱、流れにまで成長した。前兆すら感じられなかった分野が、短い期間にここまで進展を見せるることは、物理学の歴史の中でも珍しい出来ごとだろう。

明るく輝く X 線星は今日では恒星と中性子星或いはブラックホールとで形成している連星と考えられている。高密度星に落ちこむプラズマの流れ、或いは吹きつけてくるプラズマの風が極端に強い重力場で解放する重力エネルギーによって超高温にまで温められ、X 線を放射すると考えるのである。

中性子星は今日の原子核物理学からすると、その質量は太陽質量の 1.5 倍程度、半径は 10km 程、従ってその密度は  $10^{15}$  グラム 1 cc ほどと想像される。そして少くとも比較的若い中性子星は  $10^{12}$  ガウスをこえる強い表面磁場をもつと思われる。実際、後に紹介されるように、観測に

よって得られるX線星の質量、半径はおかしい位ぴったりと理論的予想に一致しているし、磁場についてもそれらしい観測事実が得られている。このようなことからX線星の観測、パルサーの研究は、中性子星を通して極端に大きな重力、密度、強い磁場等、極限状態の物理学に直接結びついてくるのだろう。

X線天文学の観測、研究にはわが国の研究者がその草創の時期からかかわってきた。特に最近になって、1979年以来、今年までは科学衛星“はくちょう”が唯一のX線天文衛星として働いてきたし、今年春からはこれに衛星“てんま”が加わってX線星を様々な側面から観察している。直接観測にたずさわっている研究者達は、中性子星のいろいろな物理的性質をとらえて、大きな重力場での物質のふるまい、中性子の超流体、超強磁場での輻射の問題等をしばしば話題にしている。しかし、今までのところは表面的な、いわばシロウトの議論になっているのかもしれない。

たまたま、衛星“てんま”的打上げ作業を視察された物性研中嶋所長との間に、観測者の側からすれば本格的な物性論の介入(?)がほしいということ、物性研究者にはこれまでとは異なる角度からの問題が提供出来るかもしれないという話がもち上ったのが研究会の発端である。

こゝには宇宙物理学の実験家、理論家、そして物性の研究者が集ることになった。高圧、高密度、超流動、超強磁場と言葉は同じでも余りに杼が違いすぎて話がすれ違うことも多いかもしれない。しかし、ふだんはあまり縁がないかと思われていた分野の研究者が集って、互いに知り合い、問題を交換し、課題を拾い合う、少くともきっかけになればと思うのである。

### 27日のセッションについて

座長 伊達宗行

物性研における研究会としては異色の試みである本研究会の開始に当って企画グループである小田、中嶋、および蓬茨の各氏による Indroduction は、物性物理学と天体物理学を同じ言葉で語り合おうという意欲にあふれたものだった。とくに蓬茨氏の解説は物性研究者にもわかりやすい序言となったが、物性側からもこれに対応する解説があればなおよかったですように思われる。

つづいての中性子星の形成問題、その構造について杉本、玉垣両氏の話は相補的でわかりやすかった。物性研究者からみると、よくそこまでわかるもの、との驚きと、そして疑問も出てくる。しかしこの感想が出る事自体が学際的分野に対する理解を進めるための方法論的成功を意味しよう。

興味があったのは、物性における量子凝縮と天体におけるそれとの比較論で、物性研の福山氏の質問に端を発する。物性では、超伝導における電子間相関はフォノンにあり、その実動エ

エネルギー範囲はデバイ振動数  $\omega_D$  でカットオフされるのが常識となっている。しかし中性子星で実現していると見られる中性子やパイオン凝縮ではこれがない。そのために  $E_F$  に対応するものが使われている、という事が物性側に理解されるまでにはしばらくかかった。この辺が面白い所で、物性側としては何か話がフレーリッヒ時代にもどったような気になると同時に、いざれ天体でも  $\omega_D$  に当る量の導入が必要となるような発見があるかも、という予感もした。

つづいて小笠原、中村、長瀬、早川の諸氏による中性子星における原子核の役割りがパルサーに対する重要な意味をもつ事がいろいろの角度からのべられたのが印象的で、物性における量子渦系とピン止めのモデルがほとんどそのまま平行して論じられているのが驚きでもあった。

## X線源としての中性子星

立教大理 蓬 茨 靈 運

はじめに、理論上の天体であった中性子星が宇宙に現存する天体として認められるに至る歴史を簡単に紹介した。

中性子星は、1967年、1秒程度の周期で電波のパルスを放射する天体“電波パルサー”として発見された。正確なパルス周期は鋭いビーム状の電波を放射する天体の回転と考えられた。周期1秒の回転でも飛散しない天体、それは極端に強い重力をもつ中性子星だけが許される苛酷な要請であった。

1962年、Rossi とGiacconi はX線カウンターを搭載したロケットを大気圏外に打上げ、X線を放射する天体の存在を発見した。以来、X線を放射する天体にはいろいろの階層のもののが存在することがわかった。中性子星もその一つである。

X線を放射する中性子星は、例外はあるものの、ふつうの恒星と近接連星系を構成している。連星系とは二星がお互の重力で拘束され、共通重心のまわりを回転している系である。二つの星の間隔が恒星の半径程度の、したがって公転周期の短いもの（数日程度）を近接連星という。

中性子星を含む近接連星系では、恒星の大気が中性子星に流入する現象がおきる。中性子星のごく近傍で流入ガスの重力エネルギーが熱エネルギーに変換され、X線として放射される。

中性子星のなかには  $10^8$  T の磁場をもつものがある。このような中性子星では流入ガスは磁力線に沿って磁極に流れ込む（双極子磁場を仮定）。したがって、南北両極がX線放射域となる。磁極と回転軸が不一致であると、自転周期でX線強度がモジられる。もちろん、このようなX線星は観測されていて“X線パルサー”と呼ばれている。X線パルサーは自転周期で時を刻む時計をもつと思ってよい。軌道運動のドップラ偏移による時計の進み遅れが観測できると、公転速度、公転周期、二つの星の間隔等の軌道要素が求まる。相手の恒星が光学望遠鏡で同定されるような場合には、中性子星の質量を推定できる。このようにして求まった中性子星の質

量は  $1 M_{\odot} \sim 2 M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$  は太陽質量) の範囲にあり、平均は  $1.4 M_{\odot}$  の程度である。

一方、われわれの銀河中心付近に分布する一群のX線星（バルジ・ソースと呼ばれる）はパルス成分がない。磁場が弱い ( $< 10^4$  T) 中性子星と考えられている。このようなX線星では爆発的にX線強度が増大する現象が観測され“X線バースト”と呼ばれる。X線バーストは中性子星の表面に降り積った物質（主に水素）の核爆発であると考えられている。この現象の解析から中性子星の半径が～ $10 km$ の程度であることがわかった。

同一の中性子星について質量および半径が共に求まったという例はないが、上記の二つの観測事実をつなぎ合わせると、理論と矛盾しない値が得られる。とすれば、これから話されるような極限状態の物理が中性子で実現されていると考えておそらく間違いないであろう。

## 中性子星の形成、連星系の中の 中性子星の進化

東大教養 杉本 大一郎

中性子星は自分自身の重力を縮退中性子の圧力で支えて、静力学的平衡状態を保っている。その平均密度は原子核の密度を越える。一般相対性理論の効果を表わすパラメーターの値は、 $R_g/R = 2GM/Rc^2 \sim 0.4$  ( $M$ : 質量,  $R$ : 半径) と大きい。静水力学的平衡を保つことのできる質量には上限値があり、その値は太陽質量 ( $M_{\odot}$ ) の2倍程度と考えられている。連星系を構成している2個のパルサー、PSR 1913+16 の解析から求められた質量は ( $1.43$  および  $1.40 M_{\odot}$ )  $\pm 0.07 M_{\odot}$  である。

中性子星は質量の大きい星が超新星爆発をした後に残される。質量を限界質量以下にするためには、星は外層を吹飛ばさなければならない。最近の結果によると、 $8 - 10 M_{\odot}$  の星は Ne-O-Mg 中心核を形成するまで進化し、 $^{24}Mg$  および  $^{20}Ne$  の電子捕獲によって星の中心核がつぶれ、核力による反発と  $^{16}O$  の核燃焼によって外層を吹飛ばす。太陽質量の10倍より重い星は  $^{56}Fe$  の中心核の段階まで進化し、その後高温中心核で  $^{56}Fe$  が光分解して中心核がつぶれ、核力による反発で外層を吹飛ばす。中心部で発生したニュートリノが外層に堆積して外層を吹飛ばすことも計算されている。質量が  $12 M_{\odot}$  くらいより大きいと、鉄の中心核はどこまでも収縮してブラックホールになる。

親の量が近接連星系を成しているときにも、基本は上と同じである。しかし超新星爆発時に系の質量の  $\frac{1}{2}$  以上が系外に放出されると、2つの星の間の万有引力が急に弱くなり、連星系はこわれてしまう。近接連星系の中にある中性子星には、相手の星の量のガスが流れ込んで来る。しかし中性子星がガスを受取る速さには、 $4 \times 10^{-9} M_{\odot} yr^{-1}$  という限界がある。流入するガスの解放する重力エネルギーが光として放射され、その運動量がその後の流入を妨げるからで

ある。

## 高密度核物質と中性子星の構造

京大理 玉垣 良三

中性子星の内部には原子核の密度 ( $\rho_0 \simeq 2.8 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ ) より高密度の物質が存在する。典型的な中性子星質量として  $1.4 M_\odot$  を選ぶと、密度分布は星の中心からの距離  $r$  に応じて、 $\rho(r=0) \simeq 5\rho_0$  より漸減して  $\rho(r \simeq 9 \text{ km}) \simeq \rho_0$  に達し、その先急減して半径  $R \simeq 12 \text{ km}$  で表面に至る。この様な密度分布とバリオン密度  $\rho$  の上昇に伴なって発現・消滅する相を組合せると、大体次の様な層状構造が期待される。

- (i)  $\rho_1 \simeq 10^{-3} \rho_0 < \rho < \rho_{SF-I}$  (上限)  $\simeq \rho_0 / 3$  ; 中性子過剰核のクーロン力による格子の間に低密度では  $^1S_0$  対相互作用による中性子超流体 (SF-I) が存在する領域 星の外殻の内側 (inner crust)
- (ii)  $\rho_{SF-I}$  (上限)  $< \rho < \rho_2 \simeq (\frac{2}{3}) \rho_0$  ; 陽子の局在がなくなる意味で物質が一様になる  $\rho_2$  の少し手前でこぼれた中性子は常流体となる。
- (iii)  $\rho_2 \lesssim \rho \lesssim \rho_{SF-II}$  (上限)  $\simeq 3\rho_0$  ; 一様物質になると中性子は主に重い中間子の効果にもとづくスピン軌道力によって  $^3P_2$  対相互作用による超流体となり、数%混在する陽子は低密度のため  $^1S_0$  対相互作用による超流体となる (SF-IIと記す)。その上限は、共に物質中の核子有効質量の減少によって、約  $\rho_0$  である。
- (iv)  $\rho \gtrsim \rho^\pi$  (下限)  $\simeq 2\rho_0$  ; SF-IIが消滅するより少し前から  $\pi$  中間子凝縮が発現しだすので、星の中部 ( $r \lesssim 8 \text{ km}$ ) では、 $\pi$  凝縮相になっていると期待される。 $\rho \cong (2 \sim 3)\rho_0$  では、SF-IIと  $\pi$  凝縮が共存する。

上の場合には、中心密度が約  $5\rho_0$  で、クォーク物質への転移は期待できない。しかし、核力の選択乃至  $\pi$  凝縮がよく成長する場合など、状態方程式が“軟い”ときには、中心密度は  $20\rho_0$  にもなりうるので、このような中性子星 (半径  $\sim 7 \text{ km}$ ) の中心部 ( $r \lesssim R/2$ ) では、クォーク物質に転移していると考えられる。他方“硬い”状態方程式では、中心密度は  $1.5\rho_0$  程度で、 $\pi$  凝縮も起っていないだろう。研究会では、この様な諸相について若干言及した。

(註) 中性子星内部の高密度物質の問題については、G. Baym が名大で 1979 年に行った連続講義のノート (物性研究 1979 ~ 1980) が、物性物理の概念を多用して述べられており、物性的諸問題の解説として有用であろう。

## 中性子星の形成問題とパルサーの固有運動

京大理 中村卓史

最近 Lyne, Anderson and Salter (M. N. R. astr. Soc. 201(1982), 503), は干渉計を用いて, 26ヶの電波パルサー（中性子星）の固有運動を測定した。それによると, パルサーは普通の星 ( $\sim 10 \text{ km/s}$ ) に較べて大きな速度 ( $\approx 200 \text{ km/s}$  程度) で運動していることがわかった。又, パルサーの速度は, 初期に持っていた磁気モーメントの回転軸に垂直な成分に, ほぼ比例する。この速度の起源は, 1) 超新星爆発が赤道対称でない。2) 二重星からの runaway。3) off - center 磁気モーメント等があるが, 1) では非対称度が小さすぎる ( $\sim 0.3\%$ ), 2), 3) では, 磁気モーメントと無関係になってしまう。ここでは, パルサーの形成問題ともからめて, 重力波放出による反作用説を提案したい。

回転星の一般相対論的重力崩壊の数値計算の結果によると (T. Nakamura, Talk at the XI-th Texas Symposium (1982)), 結果は主に  $q = (\text{全角運動量}) / (M \cdot GM / c^2 \cdot c)$  (ここで,  $c$ ,  $G$  と  $M$  は, 光速度, 万有引力定数と系の全重力質量である。) という無次元なパラメーターによって決ることがわかっている。すなわち,  $q \leq 1$  のものは, 回転するブラックホールになるが,  $q \geq 1$  のものは, 回転が大きいために平べったくなつて, 分裂する可能性がある。中性子星やブラックホールになると考えられている重い星 ( $M \geq 8 M_\odot$ ) は, 観測的に速く回転していることが知られており,  $q > 1$  と考えられる。したがつて, 進化した星の中心核は,  $\rho \sim 10^9 \text{ g/cm}^3$  から重力崩壊をはじめるが, 半径が  $30 \text{ km}$  程度になった時に遠心力によって平べったくなる。そのようなディスクは, 分裂に対して不安定なので, 連星系又は多重星系になるが, この分裂の度合が, 磁場によって決る。このような系からは, 重力波が放出される。重力波によってエネルギーと角運動量を失った系は, 再び合体して中性子星又はブラックホールになるが, その時の反作用で, パルサーは固有運動を持つ。

## X線パルサー（回転する中性子星）の観測

名大理 長瀬文昭

X線パルサーは中性子星と重い早期型巨星からなる近接連星系であり, その観測から一般にX線星を理解するための基本的な描像が得られる。X線パルサーにおいては主星から中性子星へ降着するガスが中性子星の重力場で加速され, また中性子星磁場との相互作用を通して, X線輻射において主要な役割を果す。これは電波パルサーが孤立して存在しており, 得られる観測量はパルス周期に限られるが, その代り外部からの擾乱を受けない純粋な中性子星の姿を知ることが出来るのと多少事情を異にする。

観測されるX線パルサーのパルス周期（すなわち中性子星の自転速度）の変動の様子は一般

に複雑である。従来はX線パルサーの場合はその降着ガス流の持つ角運動量を受けとて中性子星の自転速度は次第に速くなるものと思われていた。しかし最近白鳥衛星が観測した帆座X-1, ケンタウルス座X-3などいくつかのX線パルサーのパルス周期は、長期的な増加傾向や短期的なランダム変動など従来のX線パルサーのモデルでは説明できないふるまいを示すことが明らかになった。この原因が中性子星の内部構造によるものか、あるいは中性子星周辺の降着ガス流の非一様性に起因するものか、今後の研究が待たれる。

X線パルサーの観測からはパルス周期の変化の他にそのドップラー変化の測定から中性子星の質量を決定できる。これまでに求められた中性子星の質量は全て  $1.4 M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$  は太陽質量) に一致する。またいくつかのX線パルサーではそのエネルギー・スペクトルにサイクロトロン・ラインが測定されることから中性子星の磁場が推定される。その結果は  $(1 \sim 5) \times 10^{12}$  ガウスである。これらの観測結果は現在提唱されている中性子星の理論的モデルに対して直接的な根拠を与えるものである。

### X線パルサーの周期変動とその解釈

名大理 早川 幸男

電波パルサーの周期が変化するグリッチは、中性子星内部の超流体と外殻の相互作用を媒介する、原子核による渦系のピン止め・ピン外しによって説明された。この機構がX線パルサーにどう効くかを論じ、長瀬によって報告された周期変動は、上記の内因よりも、主に降積流との相互作用による外因が効くことを示す。

X線パルサーは一般に角速度が小さく、ピン外しに要する Magnus 力が弱い。トンネル効果によってピン外しをするには、内部温度が高く、緩和時間が長くなる。X線パルサー Vela X-1 と Vela の電波パルサーを比べると、前者の緩和時間が約4桁も長くなる。さらに、電波パルサーでは角運動量が内から外へ輸送されるのに対して、X線パルサーでは主に外から内へ輸送される。それ故、電波パルサーのグリッチで成功した理論は、X線パルサーには当てはまらない。

X線パルサーにおいては、降積流が円板をつくる場合、降積流の角運動量受け渡しが起こる磁気圏境界の半径と、共通回転半径との大小関係によって自転の加速・減速が決まる。降積物質が星風で運ばれる場合、中性子星の重力圏に食われる時の角運動量の受け渡しで決まる。この場合一般に自転は加速されるが、星風の密度・速度が一様でなければ減速も可能になる。星風がX線に照射されて電離が進み加熱されると、圧力が増して流速が変化する。この解釈により、星風の密度分布と自転の周期変動の観測された相関を定性的に説明することができる。

長期的な周期変動から、関与する慣性モーメントは星全体のもので、殻と超流体が共通回転

していることを示す。数日の短期変動では、慣性モーメントは約 1/10で、 $\pi^-$  やクォーク等の荷電成分の寄与が問題になる。

### 超高密度物質の相転移と超新星爆発

東大教養 高原まり子、東大理 佐藤 勝彦

10M<sub>⊙</sub> より重い星が重力崩壊して高温の中性子星を形成する時、中心密度  $\rho_e$  は核密度  $\rho_n$  を越える。そこでは核力が有効となるため、状態方程式 (EOS) が stiff になる。そのため崩壊が止まり、中心核がバウンスして強い衝撃波が生じる。この衝撃波によって星の表層が吹飛ばされ、中性子星が形成されると考えられているが、現在の理論ではそれを証明するのは難しい。

一方  $\rho_e$  が  $\rho_n$  を越えると  $\pi$  凝縮やクォーク物質への相転移が生じる。これらの相転移が生じると EOS が soft になるので崩壊が進み、多量のエネルギーを放出することができる。実際、Migdal は  $\pi$  凝縮が生じると中性子星が崩壊し、解放されたエネルギーによって爆発がおこると主張している。そこで鉄の中心核の重力崩壊において相転移を考慮した場合、超新星爆発がおこりやすくなるかどうか調べたので報告する。

相転移が弱いとその影響が小さいので、ここでは相転移の強い場合のみ考えた。即ち、 $\rho_n$  より高密度で Bethe - Johnson の EOS を採用し、それに一次相転移が生じるとした。相転移の理論に不定性があるため、臨界密度  $\rho_{cr}$  をパラメーターとし、かつ normal state にもどる密度を  $2 \times 10^{15} \text{ g cm}^{-3}$  と仮定した。更に、これよりも高密度では、音速が光速に等しいとした。

計算は球対称・断熱の仮定のもとで行ない、一般相対論的效果も考慮した。

その結果、1)  $\rho_{cr} > 6.2 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$  では  $\rho_e < \rho_{cr}$  となるので相転移がおこらない。2)  $\rho_{cr} \lesssim 6.2 \times 10^{12} \text{ g cm}^{-3}$  では  $\rho_e > \rho_{cr}$  となるためダイナミックスが大きく変し、超高密度まで崩壊するため一般相対論的效果が強くなる。そのため放出される質量、エネルギーが減少し、それぞれ  $\sim 0.02 M_\odot$ ,  $\sim 10^{50} \text{ erg}$  となる。従って、相転移が生じても、それが超新星爆発にとって有効でないことがわかった。

### 座長のまとめと感想

東大教養 杉本 大一郎

パルサーの周期が突然短くなるグリッチの現象は、中性子星外殻の回転が急に速くなるということで説明されている。その原因に関して、渦系の pinning - unpinning モデルが議論された（高塚および三武を参照）。unpinning は Magnus 効果で起こると言われる。観測

からは、急激に有限振幅で周期の変動が起こっている。しかし unpinning がなだれ的に起こるのはなぜかの説明はなかった。これは線形不安定性を越えた問題である。

中性子星の冷却（鶴田）は以前と比べてより詳しく計算されるようになった。状態方程式や熱伝導率などの physics が変わると、それに応じてモデルを計算するのはルーチン化している様相である。荷電パイ中間子凝縮は chiral 対称性を考慮して強・弱相互作用共に consistent に計算され、その効果が論じられた（玉垣、巽）。中性子星の質量—中心密度関係およびニュートリノ発生による中性子星の冷却共に、その効果は以前に考えられたよりも小さいことになった。中性パイ中間子が電磁相互作用で  $2\pi$  に崩壊することが少しでもあれば、荷電パイ中間子凝縮などは問題にもならないのではないかという質問があったが、それに対する答は用意されていなかった。

中性子星は、普通の星と違って、力学（重力釣合）的構造と熱構造（温度分布）とが separable であるから、常識的な発想法が適用できる。すなわち、中心核でニュートリノ発生率が大きいと中心核は冷え、その結果ニュートリノ発生率が下がり安定である。熱流による冷却では、熱伝導率の悪い外殻（crust）の熱伝導率が冷却率を決めており、中心核の熱伝導率はたいして影響しない。

Outer crust における結晶等の状態と、そこにおける原子のレベル構造（一丸）が論じられた。後者は、X線バースターに鉄の吸収線が観測されたという問題（28日午後、田中）とも関連する。しかし観測されたのはそれほど密度の高い ( $10^4 \text{ g cm}^{-3}$ ) ところなのであろうか。

全体としては、いくつかの定量的進歩はあったが、必ずしも新しい観点が持ち込まれたとは言えない。むしろ今までの専門家以外の観点から問題を掘起すことが大切なのはなかろうか。

## 中性子星の超流動とグリッチ

岩手大・人社 高塚 龍之

パルサー二回転中性子星が突然 speed up する現象はグリッチと呼ばれ、数日から一年かかって緩和されるという特徴をもっている。この現象は丁度、地震から地球の内部情報が得られるのと同様に、中性子星内部の情報をもたらすものとして注目を集めている。研究会での報告を以下 3 点について触れる。

- (i) 星震モデル——中性子星の外殻（Crust quake）や中心部の Solid core (Corequake) での星震により星の慣性能率の減少 → 角運動量保存によって回転の speed up → 内部に超流体（新しい型の  $^3P_2$  超流動）があるためマクロな緩和時間がかかる、としてグリッチを説明——は従来提唱されてきた有力なモデルであるが、その長所と難点についてのコメント。

- (ii) 一方、観測情報の蓄積に照応して、最近 "Pin - Unpin" モデルとでも名付けられる新しいモデルが提案されている。これは中性子星外層部（原子核結晶とこれを浸している中性子超流体から成る）で超流体の渦糸が結晶にピン止めされたりはずされたりする過程にグリッチの機構を求めようとするものである。このモデルの基盤を吟味するため、現実的扱い（核子有効質量の密度及び核内、核外依存性に留意、現実的核力の採用）によって pinning の起る領域、その強さを導出した。これに基づき "Pin - Unpin" モデルへのいくつかのコメントを行った。特に unpinning が起りそうにない事を指摘し、これを救うには超流体が原子核結晶系に較べてもともと 3割程度速く回転しているとすればよいと提案した。
- (iii) Solid core が理論的に否定されたこと、Corequake に伴う heating の問題、の 2 点によって暫らく返りみられなかった Corequake モデルは、 $\pi$  中間子凝縮の特徴（中性  $\pi$  による 1 次元的固体、共存する荷電  $\pi$  による Cooling の加速）に着目すればその難点が解消される可能性のある事を強調した。

## VORTEX CREEP AND THE INTERNAL TEMPERATURE OF NEUTRON STARS

東大理 三 武 伸 一

パルサーのグリッチの機構の説明には、殻の地震によるとする立場と、原子核にピン止めされていた超流体の渦糸が突然はずれることによるとする立場があるが、このコメントでは、後者の立場により最近 Alpar, Anderson, Pines, Shaham が行なった研究について紹介した。これは、グリッチの後のパルサーの回転速度の変化を説明するモデルをたて、観測結果からモデルの中のパラメーターを決定することにより、中性子星の内部構造、とりわけ内部温度の情報を得ようという野心的な試みである。また、物理的に新しい点として、中性子星の核の超流体は正常物質（電子や殻の原子核など）との結合時間が秒以下の単位であるという最近の結果を用いて、核の超流体+正常物質と内殻の超流体の間での角運動量のやりとりを問題にしている。

結果として Vela パルサーの場合に、ピン止め領域の慣性モーメントは中性子星の全慣性モーメントに対し 1 % 程度（適当にかたい状態方程式と矛盾しない）、内部温度は  $(1.5 \pm 1) \times 10^7$  K（標準的な中性子星の冷却の計算と矛盾しない）を得ているが、渦糸のピン止めの機構の理解に不十分さがあるため、まだ不定性が残るようである。

## 中性子星の冷却

モンタナ州立大 鶴田幸子

質量の重い恒星は進化の最後の超新星爆発時、中心部分がつぶれて中性子星となる場合がある。そのような星ではエネルギー源がなく、ただ冷却していく。爆発してから現在までの年令のわかっている超新星残骸中に中性子星が観測できるかどうかは、冷却のはやさによる。中性子星が表面から黒体輻射を放出しているとし、その全放射エネルギーが太陽のそれと同程度だとすると、黒体輻射の温度は  $10^6 \sim 10^7$  K の高温となる。これはX線領域にあたる。 $\sim 100$  年から 1 万年の年令の比較的若い超新星残骸に中性子星があるとした場合、観測可能かどうかは、この程度の期間中、 $10^6 \sim 10^7$  K の高温を保つことができるか否かにかかっている。それを調べるために、数値計算によって、中性子量の表面温度の時間依存性を調べ、観測値との比較を行なった。

## $\pi$ 中間子凝縮と中性子星の冷却

京大理 玉垣良三

この研究は、異敏隆氏（山梨大教育）との共同によるもので、主要な部分は彼の研究に基づいている。詳しくは、文献 1) ~ 3) を参照されたい。

中性子星が形成されて比較的初期の高温状態では、中性微子 ( $\nu$  と  $\bar{\nu}$ ) の放出過程による冷却が主要である。 $\beta$  崩壊過程は、パウリ原理のため核子、電子のフェルミ表面のごく外側に有限温度のため存在するフェルミ粒子の遷移となる。正常相では、パウリ原理のためにエネルギーと運動量保存が同時に成立せず、それを調節する by - stander neutron が伴えば  $\nu(\bar{\nu})$  放出は可能だが、そのぶん確率は小さくなる。しかし、荷電  $\pi$  中間子 ( $\pi^\pm$ ) 凝縮が起っていると、凝縮  $\pi^\pm$  (エネルギー  $\mu$ 、運動量  $k_e$ ) がエネルギーと運動量の matching を可能にし、凝縮  $\pi^\pm$  という外場の影響の下で、通常の  $\beta$  崩壊 (及びその逆過程) が可能となる。現実に  $\pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}$  が起るのではなく、 $\pi^\pm$  凝縮の結果中性子  $n$  に陽子  $p$  が混在した準中性子  $u$  となり、フェルミ球上の運動量  $p$  の  $u$  が、他のフェルミ球上の運動量  $p^1$  の  $u$  に移るとき、その成分中で  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$  とその逆過程が起り、 $\nu$ 、 $\bar{\nu}$  放出で冷却する。

異の行った計算は、 $\pi^\pm$  凝縮の発現を抑える役割をする短距離効果に有限核のスピン・アイソスピン巨大共鳴の研究からえられた知識を採用し、 $\pi^\pm$  凝縮を促す役割をするアイソバー  $\Delta$  (1232 MeV) の効果をとり入れて行われた。 $\pi^\pm$  凝縮 (強い相互作用の側面)<sup>1)</sup> と  $\beta$  崩壊 (弱い相互作用の側面)<sup>2)</sup> を統一的に記述し、 $\nu$  放出確率は、 $\Delta$  の効果による増加より短距離効果による抑制が強く効いて、以前の単純な計算より一桁程度小さくなることが示された。状態方程式に  $\pi^\pm$  凝縮によるソフト化をとり入れて求めた星の構造と  $\nu$  放出確率の密度依存性を組

合せると、 $\pi^0$  凝縮下の $\nu$ 放出によるルミノシティは、以前の単純な計算に比して更に2桁小さくなる。

- 1) T. Tatsumi , Prog. Theor. Phys. 68 (1982), 1231.
- 2) T. Tatsumi , Prog. Theor. Phys. 69 (1983), 1137.
- 3) T. Tatsumi , and R. Tamagaki , Proceedings of the Workshop on Perspectives in Nuclear Physics at Intermediate Energies, Oct. 10–14, 1983, Trieste – Italy (World Science Publisherより出版予定).

### 中性子星外殻のプラズマ状態と輸送係数

東大理 一丸 節夫

中性子星外殻で質量密度  $\rho_m$  [g/cm<sup>3</sup>] が  $8 \times 10^6 \gtrsim \rho_m \gtrsim 1.4 \times 10^4$  領域にある鉄イオンプラズマの状態を解析し、結晶核生成確率、Wigner 結晶化に伴う過冷却状態の寿命、非晶質状態の可能性について論じた。過冷却状態での熱伝導率や電気抵抗率の計算値を結晶化状態での値と対比し、外殻のプラズマ状態が中性子星冷却過程の解析に重要な影響をもつことを示した。 $\rho_m \lesssim 1.4 \times 10^4$  で鉄イオンに束縛状態にある電子のエネルギー準位が、高密度プラズマ効果により大きくシフトすることを数値計算例により示した。

### WとZの実験的検証とニュートリノの質量

東大原子核研究所 山口 嘉夫

弱作用やニュートリノの質量は、星の進化や Big Bang の初期の状況に深くかかわる。そこでまずこれらについての最新のトピックスを2つ紹介しよう。

まず CERN ではその 400 GeV の陽子シンクロトロンを手直しして 270 GeV の陽子と 270 GeV の反陽子との衝突器としても使用できるようにした。この陽子・反陽子衝突を研究する二つの実験チーム、UA 1 と UA 2, がビームに垂直方向に大きな運動量 ( $\gtrsim 30 \text{ GeV}/c$ ) をもつ電子・陽電子や  $\mu^\pm$  粒子を検出して、弱作用を媒介する荷電中間子  $W^\pm$  と中性中間子  $Z^0$  の存在を確認した。それらの質量や巾は次の通りである。

実験チーム	UA 1	UA 2
Wの質量 (GeV/c <sup>2</sup> )	80.9 ( $\pm 1.5$ , $\pm 2.4$ )	81.0 ( $\pm 2.5$ , $\pm 1.3$ )
Zの質量 (GeV/c <sup>2</sup> )	95.6 ( $\pm 1.6$ , $\pm 2.8$ )	91.2 ( $\pm 1.3$ , $\pm 1.7$ )
Zの巾 (GeV)	1.8 (+ 5.5, - 1.1)	4 (+ 3.5, - 1.8)

これは Weinberg – Salam の電弱統一理論の予言とぴったりで、この理論への強力な支持を与える。

次に、モスクワのグループが、 ${}^3\text{H}$  の  $\beta^-$  崩壊の電子スペクトルを、全く新しい装置を用いて注意深く測定し直し、ニュートリノの質量が  $20 \sim 30 \text{ eV}$  であることを再び確めた。この重大な結果のすみやかな追試が要望される。

電弱理論や強い力の理論の現代版、更に電弱、強作用の統一をはかる大統一理論はいづれもゲージ理論である。ゲージ理論は、場自身が源となり場の振舞をきめるという型の場の理論で、相互作用が unique にきまってしまうのが特色である。更に最近では、Kaluza - Klein 流に、4 次元時空にコンパクトな n 次元の空間をつけ加え、この広い空間の計量テンソルとしてゲージ場を考える方式や、Bosons と Fermions の変換をも含む超対称性の理論など、重力をも含めたあらゆる相互作用を統一する試みが輩出している。他方 quarks や lepton の下部構造も盛んに論じられている。

### 座 長 の 感 想

阪大理 宮本重徳

10月28日午後のセッションは、中性子星の質量、半径、重力場に関する観測と理論的予測及び、地球上における強磁場の実現及びそれを用いた物性的研究に関するものであった。

田中靖郎氏の「中性子星表面の重力により鉄の吸収線が、予想より大きな赤外偏移をしているらしい事が、X線バーストのスペクトルの観測より分った」との話は、大変興味を引いたが、強い磁場内で、原子のエネルギーレベルが変わっている可能性のある話（伊達）等あり、強磁場物性についての理解の必要性を痛感した。

中性子星の磁場が、 $10^{12}$  ガウスにも及ぶという話は、本研究会の始めより話題となっていたが、研究会の終了迄、その磁場が中性子星の内部でどのようにになっており、中性子星内部で、この磁場のもととなる電流（？）がどのように流れているか等についての話を、誰からも聞く事が出来なかったのは、大変残念な事であった。

又、中嶋貞雄氏の「 $B/kT$  の値にすると、中性子星表面は、余り大きなものではない。実験室で実現している値である。」との発言は、X線天文学をやっている者の耳には大変力強くひびいた。

### X線バーストと“バルジ”ソース

宇宙研 小山勝二

X線バーストとは 1 ~ 2 秒以内に強度が増大し約 10 秒程で減少してゆくフレアー現象であり、“バルジ・ソース”とよばれる一群の X 線源にみられる。そのスペクトルは黒体輻射でよく記述され、時間と共に温度が下がってゆく。

黒体輻射の温度および強度からそれを出している物体の大きさが求められ、ほぼ半径10kmになる。X線バーストは数時間から1日くらいの間隔でくり返しある。定常的X線強度とバースト強度の時間平均の比は約100倍になっており、定常成分を中性子星での重力エネルギーの解放と考えると、バーストでは1 MeV/nucleon程度のエネルギー解放になる。これはほぼ核エネルギーの解放に等しい。

以上のことからX線バーストは中性子星表面での核爆発という有力な仮説が成り立つ。

ここではこれを作業仮説としてX線バーストから中性子星の何がわかるかを考えてみよう。

①バーストのスペクトルから黒体輻射の温度がわかれば中性子星の半径Rがバースト源までの距離の関数として求まる。ただし正確には黒体輻射のずれによる半径の不確定さがあり、これをいかに正確にするかが理論的に重要である。②バーストのピーク光度がエディントンの限界光度を越えないとすると質量を仮定すれば距離が求まる。③「てんま」の観測からスペクトル中に吸収の構造がみられる。これはHe-likeの鉄輝線(6.7 KeV)が中性子星の重力により赤方変移したと考えられる。これから質量と半径の比が求まる。

①, ②, ③から中性子星の質量と半径が求まるはずである。この二つの量は中性子星の構造を決める上で大変重要な量である。

### X線バーストのモデルと中性子星の大気

東大理 花輪知幸

X線星の多くは中性子星を含む連星でいくつかの種類の時間変動を示す。X線バーストはその一つで、X線星が数時間から1日に1回、約10秒間 $10^{38}$  erg/sの明るさで閃光的に輝く現象である。X線バーストを起こすX線星の静穏時の光度は $10^{37}$  erg/sで、これは連星系の中の相手の星から中性子星へ流れこんできたガスが解放する重力エネルギーをエネルギー源としている。これに対してX線バーストは、中性子星に降ってきた水素を主とするガスが中性子星物質に変化する際に解放する核エネルギーをエネルギー源とすると考えられている。この核エネルギーの解放はガスの流入が一定速度であっても、中性子星表面の核反応が熱的に不安定であるために間欠的になる。こういう考え方を熱核フラッシュモデルと呼ばれ、X線バーストのモデルとして多くの成功を収めている。

現在熱核フラッシュモデルは、ガスの流入がある中性子星表面での核反応を数値計算によって模擬実験することによって精密になってきている。数値計算には力学平衡、光子の拡散や電子伝導による熱の輸送、熱核反応によるエネルギーの解放、一般相対論の効果が考慮されている。こういったモデル計算と観測の対応によって中性子星の諸性質を知ることができると考えられる。例えば、熱核フラッシュモデルによるとX線バーストの最高光度は中性子星の質量に

比例する定数、エディントン限界光度になる。

X線バーストの際のX線の放射領域である中性子星大気の研究も進んでいる。中性子星大気では光子電子間の弾性散乱が重要な働きをして、従来の理論より約1.5倍高エネルギーのX線が放射されることが指摘されている。詳しいことは将来の課題である。

### 中性子星表面の重力

宇宙科学研究所 田 中 靖 郎

X線天文学の発展とともに、中性子星の実体は次第に明らかにされつつある。多くのX線星は連星系の一員として中性子星を持っており、X線星の示すさまざまな現象を介して中性子星の“計測”が可能である。X線天文衛星「てんま」は感度とスペクトル分解能の良いX線観測装置を載んでおり、X線星の観測精度もこれまでより一段と増した。「てんま」による新しい結果の一例として、中性子星表面の重力効果を決める量  $M/r$  ( $M$ は中性子星の質量,  $r$  は半径) を精度良く計る手がかりが得られた。X線バーストは中性子星表面における爆発現象と考えられており、黒体輻射のスペクトルを示すことが知られていたが、バースト源の一つ X 1636-53 からの大きなバースト 4 例について、そのスペクトルに吸収線らしい構造(凹み)が見つかった。それは 4 例とも約 4 KeV のところにある。その解釈については今後議論をつめねばならないが、吸収線として最も考え易いのは、鉄の吸収であろう。宇宙に存在する重元素の中では鉄が最も多く、実際 X 1636-53 の定常 X 線にも鉄の輝線が見られている。もし、バーストで見られる吸収線が、中性子星に降り注ぐガスに含まれる鉄によるものと考えると、6.7 KeV ( $Fe^{+24}$ ) の吸収線が 4 KeV に赤方変位した事を意味する。これが中性子星表面の一般相対論的重力効果とすれば  $(M/M_\odot)(10km/r) \approx 2.1$  となり、この量は X 線星までの距離によらないことに注目したい。もし鉄の吸収線の重力赤方変位という解釈が正しければ、得られた  $M/r$  比は現在の中性子星モデルの質量上限に近く、中性子星の理論にとって重要な意味を持つ。

### ガンマ線バースト

宇宙科学研究所 西 村 純

ガンマ線バーストは宇宙の彼方から爆発的にガンマ線が入射する現象で、1973年アメリカの原爆探知衛星ベラによって発見された。その生因はいまだにあきらかにされていない。入射するガンマ線の平均エネルギーは 100 KeV ~ 300 KeV 程度で、X線バーストの場合とくらべて 2 衡程度高い。

1970年代の後期に入ると、ガンマ線バーストの観測を目的とする検知器を搭載した衛星が

いくつか打上げられた。

これらの衛星観測からわかったことは、

1. バースト源は銀河内にあるらしい。
2. 数10KeVの付近にサイクロotron吸収と思われる吸収バンドがある。
3. 450 KeV付近にラインが観測されることがあるが、これは  $e^+ e^-$  消滅光子 (511KeV) が赤方偏移したものと考えられる。
4. 金星付近と地球付近の衛星の同時観測から三角法で、1分角程度の精度でバーストの到来方向がわかるが、その方向に特異な星は見出されていない。

以上(2), (3)の観測事実は確立されているわけではないが、他の観測事実と加えあわせて考えると、バースト源は強い磁場をもつ中性子星である可能性が高い。

バーストについての最近の新しいトピックスとして次の2つをあげることができる。一つは1978年11月19日のバーストについて約50年前の写真乾板から、その到来方向に一瞬星が輝いていたことがわかった。もう一つは人工衛星はくちょうで、1981年10月16日のバーストについて、これまでにないよい精度でX線領域におけるスペクトラムの時間的推移が観測されたことである。

これらの新事実から、バースト源について新しい知見が加えられるものと期待している。

### 中性子星の最大重力質量と最大赤方変位

京大理 中村卓史

X線バースターの中には、エディントン光度を越えるように見えるものがいくつもある。エディントン光度は、星の質量に比例するので、中性子星の質量の上限値 ( $M_{\max}$ ) がいくらかということが問題になってくる。又、最近X線衛星「てんま」が発見したX線バースターでの鉄の吸収線は、重力による赤方変位だとすると、0.6という大きな値になる。一体、どのくらいまで大きな赤方変位が許されるのであろうか？

赤方変位のかわりに、 $g = \nu_{\text{obs}} / \nu_{\text{emis}}$  を使うことが多い。さて、 $g$  は無次元な量なので、 $P$  (圧力)  $< \rho c^2$  (エネルギー密度) といったような不等式だから、下限値を出すことができる。一方、 $M_{\max}$  は次元を持った量であるが、一般相対性理論に含まれる2つの定数  $c$  (光速度) と  $G$  (重力定数) だけからは、質量の次元は作れないでの、 $M_{\max}$  を求めるには、状態方程式で、スケールを決めてやることが必要になる。

さて、 $P < \rho c^2$  でかつ、密度は外に向って必ず減少するという条件を入れると、0.46 が球体称な中性子星の  $g$  の下限値になる。 $M_{\max}$ については、 $\rho \leq \rho_0$  では  $P$  が  $\rho$  の関数としてわかっているとする。 $\rho > \rho_0$  で音速が光速を越えないという制限付きで、 $P(\rho)$  に対する

変分をとて、 $M_{\max}$  を出すことが出来る。さて、 $\rho_0$  で、 $P(\rho_0) \ll \rho_0 c^2$  だとすると、 $M_{\max}$  は、あまり  $\rho \leq \rho_0$  での状態方程式にはよらず、

$$M_{\max} = 6.8 (1 \times 10^{14} g/cm^3 / \rho_0)^{1/2} M_\odot \text{ (太陽質量)}$$

となる。又、この場合に  $g$  は minimum をとる。

結論としては、 $\rho = 5 \times 10^{14} g/cm^3$  で  $P \ll \rho c^2$  とすると、(いろいろな状態方程式があるが、全てがこの条件を満す)  $M_{\max} = 3.0 M_\odot$  で  $g_{\min} = 0.57$  となる。

「てんま」が発見した鉄の吸収線の  $g$  は 0.6 なので、吸収線を作る物質が運動しているか又は、中性子星自身が回転している等、重力以外の赤方変位を入れた方が、観測の解釈に幅が出てくると思われる。

### 強磁場研究の現状

阪大理 伊達宗行

中性子星に巨大な磁場が見出されて以来、磁場の現実的な存在限界は大きく広がった。これを考慮して現在の磁場認識限界、弱磁場で  $10^{-10}$ 、強磁場で  $10^{15}$  ガウスまでをまとめて眺め、その中に見られるいくつかの物理現象について述べる。そしてとくに注目される強磁場についてその生成についての問題点、とくに発熱と電磁力についての処理法を歴史的にのべ、現状の概略を、定常磁場（ハイブリッド：30 T）、パルス磁場（非破壊：100 T）、および磁場濃縮によるパルス磁場（爆縮、クネール法：300～500 T）にまとめてレビューする。

このような人工磁場がどのような物理的情報をもたらしつつあるかについて、物性プロパーについて問題を除き列記する。

#### (1) リドベリー・ランダウ問題

原子レーザーで高準位に励起すると主量子数  $n$  が 50 以上のものをかんたんに作れる。ここではリドベリー準位間とランダウ準位が同程度となる。この系でのゼーマン効果が測定されているが、その結果によると、あたかもランダウ準位が、 $\frac{3}{2}\hbar\omega_c$  で構成されているように見える。ここで  $\omega_c$  は普通のサイクロotron 振動数である。この  $\frac{3}{2}$ -効果は非常に注目されたが、原子によって内部構造をもったランダウ電子モデルで大体理解される。

#### (2) 新らしい量子凝縮相 $H \uparrow$

物性的にも、また将来は天体でも存在し得る強磁場中の水素原子偏極スピン集団の物性は、それが気体で量子凝縮を起し得る点で広い興味を集めつつある。これの概略についてのべる。

#### (3) 強磁場におけるブロックホ電子

結晶内電子、いわゆるブロックホ電子に  $10^9$  ガウス程度の磁場がかけられると、サイクロト

ロン半径が格子定数と同程度になる。そうすると磁場による電子状態の変化は、ある種のくり返しパターンを持ち、結果として無限大の磁場は有限の磁場に換算される。これは磁場による第1ブリルアン帯、のような効果を生ずる。

これらの各論の後で、将来強磁場の生成にどのような可能性が期待されるかについてのレビューを行う。

### 超強磁場の発生とその下での物性

東大物性研 後藤恒昭、三浦 登

70Tまでの磁場は、非破壊的に発生することができるが、これ以上の超強磁場の発生には、種々の破壊的方法が用いられている。物性研究所では、クネール法と1巻きコイル直接放電法が採用され、物性測定用のメガガウス領域の超強磁場の開発研究が行われている。

クネール法では、初期磁場を注入した金属円筒を、その外側の1次コイルに大電流を流すことにより電磁力で収縮させ、磁束を濃縮して超強磁場を発生する。今まで1次コイル用電源として1MJのコンデンサーを用いて予備的実験が行われてきたが、5MJのコンデンサーを用い、5~10MGの磁場発生を目指し、現在基礎研究が行われている。

1巻きコイル放電法では、立上り3μs以下、MAオーダーの大電流を直接1巻きコイルに流すことによって超強磁場を発生する。今年11月に100KJの超高速コンデンサーが設置され、テストの結果内径10mmの1巻きコイルに1.6MGの磁場の発生できることが確認された。

超強磁場下の物性として、中性子星の物性とも関係のある半金属の磁場誘起相転移が紹介された。Biでは超強磁場下の遠赤外レーザー光の透過強度の測定からH/Binaryの場合、0.88MGで半金属一半導体転移に対応すると思われる透過強度の異常な増加が観測された。この相転移に励起子相が関係しているかどうか不明であるが、転移点における励起子の束縛エネルギーが4.6MeV(53K)と推定されることから、相当高い温度で励起子相が存在する可能性があり、今後明らかにすべき重要な問題と思われる。

### 中性子星の表面磁場

宇宙科学研究所 村上敏夫

中性子星表面磁場の大きさの観測的な現状を紹介します。中性子星は電波パルサーの発見によって現実的な天文学上の対象として参入してきました。電波パルサーのパルス周期は大変に高い安定度を持ってはいますが、数年のタイムスケールでは徐々にスピン周期が延びてゆきます。この変化率を磁気双極子輻射によるエネルギー損失と考えると現在観測される変化率からほぼ $10^{10} \sim 12$  gauss程度の表面磁場があつて良いことになります。他方人工衛星を使ったX線

天文学の進歩で磁場に伴うサイクロトロン輻射が観測されるようになってきました。 $10^{12}$  gauss 中での電子サイクロトロン周波数が 11.6 KeV に相当し、それに見合うエネルギーの X 線が観測されたからです。尚、上限値は電子、陽電子による 2  $\gamma$  対消滅線 ( $0.5 \text{ MeV}$ ) が観測されるものの、強磁場中で支配的となる 1  $\gamma$  対消滅線 ( $1 \text{ MeV}$ ) が観測されないことから  $10^{13}$  gauss 程度と考えられます。所が最近 1.5 ミリ秒電波パルサーの発見と、ある一群の X 線源の発見により、この考えは大きく書き替えられそうです。1.5 ミリ秒パルサーの変化率から求まる磁場は  $10^8$  gauss と弱く、ある一群の X 線源（バルジ X 線群と呼んでいる）の観測から推定される磁場も  $10^8$  gauss を越すことが出来無いようです。この事実は磁場の非常に弱いあるいは無い中性子星があっても良いことを意味します。現在  $10^{12}$  gauss に達する磁場の起源としては中性子星形成時の星の表面磁場（約 100 gauss）を、地上の強磁場発生と同様に、爆縮で取り込んだと考えています。上のような特殊な中性子星のためには何らかの方法で始めから磁場を取り込まないか形成後磁場を徐々に失う必要があります。中星子星でどのように磁場が維持され、又消滅するかは中性子星内部（縮退／超伝導／超流動）の物性とからんでたいへん興味ある問題です。

### 中性子星の磁気圏

宇宙研 井 上 一

中性子星表面に  $10^{12}$  ガウスにもおよぶ磁場が存在するらしいことは村上によって解説されている。この強磁場の存在によっておこると考えられている現象の一つは、電波パルサーと呼ばれる天体现象で、これについては牧島が述べるであろう。もう一つは、X 線パルサーと呼ばれるもので、ここではこの現象について述べる。

X 線パルサーは秒から数百秒の周期で X 線強度の強弱をくり返しているもので必ず連星系をなしている。その一方のふつうの星から中性子星の重力圏内に物質が流れ込み、中性子星表面で解放される重力エネルギーが、X 線となって輻射される。しかし、中性子星の強い磁場のために落下物質は直接中性子星表面まで落ち込むことができずに、磁気圧と動圧がつり合うところに磁気境界層が形成される。この境界層でいったん止められた物質は磁気圏内に捕捉され、磁力線に沿って南北両磁極に落ち込む。落ち込んだ物質の重力エネルギーはこの両極領域で X 線となって輻射され、磁軸が回転軸に対して傾いているため、局所的な輻射領域が回転によって見えかくれして X 線パルスとなるのであろう。以上が、非常に簡単化した X 線パルサーの描像である。

落ち込む物質は、連星系回転によるコリオリ力で、中性子星に対して渦を巻きながら落ち込む。この角運動量をとりこんで一般に X 線パルサーのパルス周期はだいに早くなっている。

このパルス周期の変化率は、落下物質が捕捉される磁気圏の大きさと関連している。磁気圏の大きさは、落下物質の動圧と磁気圧のつり合いで決められるわけであるが、その大きさは中性子星からおよそ1000 kmあたりと評価され、観測される周期変化率ももっともらしい数値を示す。

## かに星雲の中性子星

宇宙研 牧 島 一 夫

宇宙では大規模な粒子加速が生じる。その機構としては、重力によるものと電磁力によるものがありうるが、後者の代表例として詳しく研究されてきたのが「かに星雲」(Crab Nebula)である。これは西暦1054年に爆発した超新星の残骸で、大きさ数光年の天体である。

かに星雲は、電波からガンマ線に至る広帯域の強い非熱的輻射を出す。これは、約 $5 \times 10^{-4}$  Gの磁場中で相対論的電子が運動することによるシンクロトロン輻射と考えられる。光やX線を出す電子のシンクロトロン寿命は、星雲の年令よりずっと短いので、これらの電子は超新星爆発で加速されたものではない。

かに星雲の中心には、超新星爆発により作られたパルサーがあり、周期33 msで高速回転している。このパルサーが粒子加速の担い手であることは疑う余地がない。とくに、パルサーの自転エネルギーは約 $6 \times 10^{38}$  erg/sの割合で減少しているが、これは星雲の諸活動に必要なエネルギーとぴったり一致する。

具体的な加速機構としては、2つの考え方がある。ひとつは、パルサー自転軸に直交した磁気モーメント成分が磁気双極子輻射を出し、この輻射場が相対論的 $\vec{E} \times \vec{B}$  加速を行うとするもの。他方は、パルサー自転軸に平行な磁気モーメント成分が、単極誘導機構で粒子を静電加速するものである。実際には、この両方の機構が共存しているとみられる。

パルサーの自転エネルギーを星雲へ輸送する機構としては、(i)電磁波によるとするモデル、(ii)相対論的粒子の拡散によるとするモデル、(iii)相対論的粒子のバルクは流れによるとするモデル、がある。近年行われた日米共同の硬X線像観測の結果は(iii)を支持している。今後、相対論的プラズマとその中の衝撃波という立場から、エネルギーの輸送を考えることが重要であると思われる。

## パルサー発生率問題における電波超新星と 短周期パルサーの役割

早大教育 大師堂 経 明

我々の銀河系におけるパルサーの発生率は5~10年に1個と推定されている。その根拠は次

のようなものである。①電波パルサーは弱いことと、非熱的銀河背景輻射が数百MHzで強いこと、の2つから2K<sub>pe</sub>（5000光年）より遠方のパルサーは観測しにくくなる。しかし、観測されたデータから、ともかく銀河系内の密度分布関数を作り、銀河系内の総数を推定する。その数は $2 \times 10^6$ 個である。ここで、ビームの影響で全体の $\frac{1}{5}$ が見えているという仮定を用いている。周期に占めるパルス幅の割合で拡がった軸対称なペンシルビームを考えているわけであるが、polar cap モデルや相対論的ビームモデルとの折合はつけられる。次にP及びP<sup>•</sup>から平均寿命を推定する。一方、平均的な銀河面からの離れ具合（scale height）と平均速度から独立な平均寿命が得られる。これらはオーダーとして $10^7$ 年を与える。これから始めの発生率が得られる。先の値は Manchester が彼等のサーベイの結果にもとづいて得たもので、各種の推定のうち最高の発生率を示す。最低値としては150年に1回というものもある。これだけ幅のある量を系外銀河に発生する超新星のモニターの結果や、銀河系内の超新星残骸の進化モデルと比較する。傾向として、パルサーの発生率の方が超新星の発生率より大きくなる。しかし、最近ミリ秒パルサーが連星系に残っていたり、光の観測の無い電波超新星が発見されたりしているので、このギャップはうまる傾向にある。ミリ秒パルサーはX線連星の時期を経て若がえったパルサーに見え、電波超新星は超新星発生率を上げるからである。

### パルサー電磁波のエネルギー源

東北大理 大家 寛

磁化プラズマの物性は変化に富み、その応用範囲は広い。特にプラズマを磁場でとじ込める核融合ではさけて通れない物質状態として多くの問題を提出している。ところで、遠くはなれた位置にありながらおびただしいエネルギーの電磁波を放射するパルサーはこの磁化プラズマでぎっしりと覆われている。特に超強力磁場のプラズマとして多くの謎を秘めていて、今後の重要な研究対象でもある。

磁化プラズマはこうして実験室から宇宙まで普遍的な存在であるが、そこから放射される電磁波の様相も周囲の磁場やプラズマの密度に応じて非常に巾広い周波数をカバーし、放射される電磁波の波長も1Åから1kmをこす辺までバラエティーに富んでいる。しかしその本質はいずれの場合も共通性をもち普遍のものがある。つまり、地球のオーロラキロメートル電波、木星のデカメートル電波、そして一般の電波パルサーやさらには「かにパルサー」からの電磁波放射のように光やX線、ひいては $\gamma$ 線で刻むパルスも同様のプラズマ中の電磁波放射メカニズムにもとづいていると考える。

以上のような立場でみると、一例として10kmの半径（R<sub>p</sub>）をもつパルサーの周囲で200R<sub>p</sub>付近から遠心力によって流出するプラズマは $\vec{V} \times \vec{B}$ 電場を生み、これは $1.5 \times 10^7$  Volt/m

にも達するが、これが1000 kmにわたる領域に作用するとすると粒子を $3 \times 10^{13}$  eV にも加速することができる。その 0.1~1%を電磁波に使えるとしても $3 \times 10^{-2} \sim 3 \times 10^{-1}$  erg/particle の放射を生み、パルサーのエネルギー源として充分であるばかりでなく、謎の存在バースターのエネルギー源ともなっていることが推測される。

### 磁気リコネクションのダイナミックス

広島大学・核融合理論研究センター 佐 藤 哲 也

中性子星に関するほとんど全ての情報は電磁波を通して得られる。その電磁波がどのようにして発せられているかは、我々が想像する以外に方法がない。観測によると、X線やγ線がバースト状に放出されることがある。中性子星には磁場があり、その周りにはプラズマも存在しているようである。即ち、中性子星には磁気圏が存在しているらしい。一方、地球磁気圏では、サブストームと呼ばれる磁気圏エネルギー（主として磁気エネルギー）が急激にプラズマエネルギーに変換され、それに伴って粒子加速・電波放射現象（オーロラや地球電波の放射など）が起きている。この主役を担うのが磁気リコネクションと呼ばれる磁力線のつなぎ替え機構であることは、観測、理論（主に計算機シミュレーション）の両面からほぼ間違いないものとされている。太陽フレアも、磁気リコネクションが何等かの役割りを演じているものと考える人も多い。更に、磁場閉じ込め核融合プラズマにおいても、トカマク・プラズマの崩壊現象、逆磁場ピンチにおける磁場の自然的反転現象、スフェロマツと呼ばれる新しい磁場閉じ込め配位の形成や崩壊などいろいろなところで磁気リコネクションが主役を演じている。

この研究会では、これら様々な場所で生起する磁気リコネクションについて、その多様な物理的性質と、その性質が強調される物理的条件の関係について、いくつかの計算機シミュレーションの例を通して紹介した。

## 物性研短期研究会報告

### 直鎖状ポリエン構造の光励起状態

東 大 工	国府田 隆夫
早大理工	鈴木 英雄
阪 大 理	櫛田 孝司
筑波大物質工	白川 英樹
分子研	那須奎一郎

直鎖状ポリエン  $[-\text{CH}=\text{CH}-]^n$  にはブタジエン ( $n=2$ ), ヘキサトリエン ( $n=3$ ) のような低分子からポリアセチレン ( $n=\infty$ ) のような高分子まで各種の誘導体を含めて多種多様な物質がある。その中には  $\beta$  カロチンなど生体物質と関係の深い物質も含まれ、それぞれの  $\pi - \pi^*$  電子励起状態の性質と挙動が物性物理、有機化学、生物物理の各分野において活潑に研究してきた。各分野の研究はそれぞれ異なった動機と方法に基づき、その研究内容にも一見かなり大きな違いがあるが、その根底にはポリエン構造の電子状態の特徴を反映した何らかの共通点が存在するに違いないと考えられる。このような問題意識によって各分野の成果を検討してみたら、現象の全体像をとらえる手掛けりとなるような接点が浮かび上がるかも知れないというのが、この研究会を企画した動機であった。

物性研短期研究会としてはやゝ型破りのこのような企画が幸いに採択されて、12月6, 7日の2日間の研究会が実現した。第1日目は主として有機化学と光生物物理、2日目にはポリアセチレンの研究を中心とする物性物理関連の話題が提供されたが、この種の研究会で起り易い相分離化がほとんど見られず、異なる分野間の質議、コメントが活潑であったのは、企画者にとって最も喜ばしいことだった。たゞし分野間の接点は容易に得られるものではなく、林を見て木を知らない物性物理研究者と木を見て林を求めない化学、生物物理研究者（「まとめ」での小林浩一氏の言葉）の間の距離感を改めて実感した二日間だったと言った方がよいが、従来共通の討論の場をほとんど持たなかった各分野間の研究者が胸襟を開いて語り合う機会を持ち得たことは、今後の研究の進展にとって少からぬ刺激となったと思われる。ここで播かれた種が芽を出し育つことを期待したい。研究会での講演内容の概略は以下の如くであった。

## プログラム

期　日 昭和58年12月6日（火）～7日（水）  
場　所 東京大学物性研究所 旧棟1階講義室  
　　　　　　世話人 国府田隆夫, 鈴木 英雄  
　　　　　　櫛田 孝司, 白川 英樹

### 12月6日（火）

9：40～10：00	はじめに	国府田隆夫（東大 工）
10：00～10：45	ポリエンの光励起状態	十倉好紀（東大 工）
11：00～11：20	短いポリエンの電子励起状態のダイナミックス	大峰 嶽（分子研）
11：30～11：50	短いポリエンの最低励起一重項および三重項状態	安積 徹（東北大理）
12：00～12：20	βカロチンの電気的・光学的性質	渡辺泰堂（関学大理）
12：30～14：00	——昼 食 ———	
14：00～14：45	ポリエンの励起状態とその光生物学的機能	鈴木英雄（早大理工）
15：00～15：20	カロチノイド・レチナールのシストラנס異性体の共鳴ラマン	
	スペクトル	小山 泰（関学大理）
15：30～15：45	——休 憩 ———	
15：45～16：05	バクテリオロドプシンの光化学反応過程	徳永史生（東北大理）
16：15～16：35	視物質ロドプシンの光化学反応過程	津田基之（北医大物理）
16：45～17：05	ピコ秒領域におけるロドプシンの光反応過程	吉澤 透（京大 理）
17：15～17：35	ロドプシンの光励起状態のダイナミックス	垣谷俊昭（名大 理）
17：45～18：05	生きたクロレラにおけるカロチノイドの共鳴ラマン散乱	
		木下修一, 櫛田孝司（阪大 理）

### ————懇親パーティ（18：30～20：00）————

### 12月7日（水）

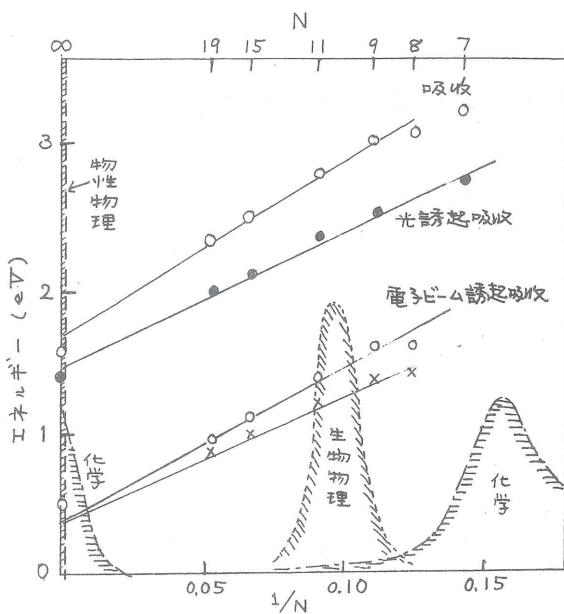
9：00～9：45	ポリアセチレン研究の現況と将来	白川英樹（筑波大物質工）
10：00～10：20	(CH) <sub>x</sub> の共鳴ラマン効果－共役鎖長プローブ	原田一誠（東北大薬）
10：25～10：45	トランス・ポリアセチレンの光伝導	福田敦夫（東工大工）
10：50～11：10	ポリアセチレン及び類似高分子のルミネッセンス	
		吉野勝美, 林 重徳, 犬石嘉雄（阪大 工）
		渡辺泰堂（関学大理）
11：15～11：35	ポリアセチレンの荷電ソリトン	田仲二朗（名大 理）

11:40~12:00	ポリジアセチレン・ポリアセチレンの過渡光スペクトル	小林孝嘉（東大 理）
12:05~12:25	ポリアセチレンの光励起状態：変調分光法によるアプローチ	三谷洋興，和田芳樹（分子研）
12:30~14:00	——昼 食 ———	
14:00~14:45	一次元パイエルスーアバード・モデルによる種々の励起状態	那須奎一郎（分子研）
15:00~15:20	電子相関と電子格子相互作用の競合一4サイトー4電子モデル	滝本淳一，豊沢 豊（東大物性研）
15:30~15:45	——休憩——	
15:45~16:05	ポリアセチレン励起状態のソリトン描像	小野寺嘉孝（都立大理）
16:15~16:35	ポリエン結合交替構造とソリトンおよびポーラロン	山口 兆，笛野高之（阪大基礎工）
16:45~17:05	共鳴ラマン・赤外スペクトルからみたポリエン分子の基底および 励起状態での構造	田隅三生（東大 理）
17:15~17:30	まとめと将来の展望	小林浩一（東大物性研）

#### I n t r o d u c t o r y T a l k

東大工 国府田 隆夫

直鎖状ポリエン分子  $[-\text{CH}=\text{CH}-]^N$  の光学スペクトルには共役鎖長の異なる多くの物質に共通した注目すべき類似性が見られる（図）。このことは明らかに、光励起に関係している共役鎖上の  $\pi$  電子状態の性質と、結合交替構造に特有な励起緩和機構の類似性を反映したものと考えられる。この問題に関して物性物理、有機化学、光生物学の各分野で今まで盛んな研究がなされてきたが、その研究対象が分野によって異なり、その描像にもかなり大きな違いが見られる。その間にどのような関係が求められるのか、現状では予想しがたいが、各分野の研究成果の間の対応関係を検討し、異なった観点を補足し合うことによって現象の全体像を把握することが、各分野での今後の研究の進展にとって、重要になりつつあると考える。そのような相互作用を引力的なものとするためには工夫と経験が必要であろうが、この研究会がそのきっかけとなることを期待したい。



### ポリエンの光励起状態

東大工 十倉好紀

ポリエンの光励起状態の特徴を、①最低  ${}^1\text{B}_u^+$  遷移、②  ${}^1\text{A}_g^+$  (シス・ピーク) 遷移、③二電子励起配置を含む最低  ${}^1\text{A}_g^-$  遷移、④ SOR 光領域に位置する各種の  $\pi - \pi^*$ ,  $\sigma - \pi^*$ ,  $\sigma - \sigma^*$  遷移、⑤電子線励起あるいはドーピングによって現れるポリエン・イオンの遷移、⑥光誘導吸収遷移の各々の場合について、総括的に議論した。特に、ポリエン分子の延長線上に位置するポリアセチレンあるいはそれと類似の  $\pi$  電子構造をもつポリジアセチレンの場合との比較検討を行った。これらの共役系ポリマーと有限長ポリエン分子の光励起状態には関連する特徴が多いが、それぞれの研究分野では異なる解釈が主流となっている場合も少くない。例えば、①の最低許容遷移について、ポリエン分子では電子間の相關（クーロン相互作用）による配置間相互作用（CI）が重要であると考えられているが、ポリアセチレンではバンド間遷移に基づく解釈が主で CI すなわち励起子効果がどの程度重要なかについては実験的に明らかでない。また例えば⑥の光誘導吸収遷移については、ポリアセチレンでは荷電ソリトン対（またはポーラロン準位間）の光吸収とされているが、カロチノイド系の研究では  $T_1 - T_n$  吸収との解釈が主となっている、等々である。これらの相異がポリエン鎖の長さによる本質的なものかどうかについて、今後吟味すべき課題が多い。講演ではこれらの問題の他に、ポリエン分子の凝集体・結晶中での光遷移に関して、励起子としてのバンド形成効果やポラリトン効果の重要性を指

摘した。

## 短いポリエンの電子励起状態のダイナミックス

分子科学研究所 大 峰 巍

ポリエンは光を吸収して励起状態になり、励起状態のエネルギー・ポテンシャル面上である C-C 結合軸周りに捩れ、その捩れ角  $\varphi$  が約 90° になった時に基底状態のポテンシャル面に無輻射遷移で移り、この面上で運動を続け、最後に Trans 又は Cis 型になる。この Cis-trans の光異性化には幾つかの励起状態が関係している。①まず、平面構造のポリエン ( $\varphi = 0^\circ$ ) での光の吸収、発光スペクトルを理解する為に、 $2^1A_g^-$ ,  $1^1B_u^+$  (及び、Rydberg state) の上下関係を、電子相関法及び基底関数展開法により各状態の性質を解析し、また分子構造の変化によりこれらの状態の上下関係の変化を調べる。4 及び  $6 - \pi$  系でフランク・コンドン的な光吸収では  $1^1B_u^+$  の方が  $2^1A_g^-$  よりも下にあるが、構造変化を入れると、この順序が逆転する。8  $\pi$  以上の長いポリエンでは  $2^1A_g^-$  が  $1^1B_u^+$  の下に入る。又特に長いポリエンでは複数の  $1^1A_g^-$  ( $1^1B_u^-$ ) が、この Optical gap の中に入ってくることを示した。②次にトライエクトリーや反応座標の解析を行い、C-C の回転と他のモードとの Coupling について調べた。これらの mode-mode coupling は非常に複雑であるが、各状態の電子論的性質により特徴的な coupling に成っていることを示し、ダイナミカルな二重回転などを例として示した。又、C-C の回転によりポテンシャル面上に、短いポリエンではエネルギーの山がなく、よって fluorescence が出ないこと、又長いポリエンでは  $1^1B_u^+$ ,  $2^1A_g^-$  の avoid crossing 又は溶媒の粘性により山が出来ることを示した。③ $\varphi = 90^\circ$  近くでの無輻射遷移に関するフランク・コンドン係数と Nonadiabatic coupling 項  $\{(\varphi_{ex} | \frac{\partial}{\partial X_i} | \varphi_{gr})$ ,  $X_i$  は核座標  $\}$  を計算し、 $1^1A_g^+$ ,  $1^1B_u^+$  (両方とも ionic states) の mixing による Sudden Polarization により、この項が大きくなり、励起状態から基底状態への遷移が強められることを示した。④光異性化での溶媒の影響を調べるために、(a) 水及び Ar 溶液内でのエネルギー散逸を 3 次元の反応動力学法を開いて調べた。(b) また Sudden Polarization によって起る溶媒和構造変化が如何に Dynamical Potential Crossing にきくかについての可能性を示した。又、 $2^1A_g^-$  ポテンシャル面上の二重回転の可能性について言及した。

## 比較的短いポリエンの励起一重項および三重項状態

東北大理 安 積 徹

長いポリエンの励起状態を考える時、比較的短いポリエンについての理解が役立つと思われる。しかし、基本的なポリエンの励起状態の研究は、ポリアセチレンに関して膨大な研究がなされ

ているのと対称的に、まだまだ十分にはなされていないのが現状である。

一重項励起状態については、HOMO から LUMO への電子遷移によって作られる  $^1L_a$  状態 ( $C_{2h}$  点群では  $^1B_u$  に相当) と、HOMO から LUMO の 1 つ上の軌道への遷移と、HOMO の 1 つ下の軌道から LUMO への遷移とから作られる各状態間の一次結合によって得られる  $^1L_b$  状態 ( $C_{2h}$  点群では  $^1A_g$  に相当) の 2 つの状態のうち、どちらが低エネルギーかということが問題になっていた。実験的には二重結合の数が 4 個以上のポリエンでは  $^1L_b$  が低エネルギーにあることがわかった。それより短いポリエンについては、実験ではよくわからないが理論計算からは  $^1L_a$  が低エネルギーとなっているようである。

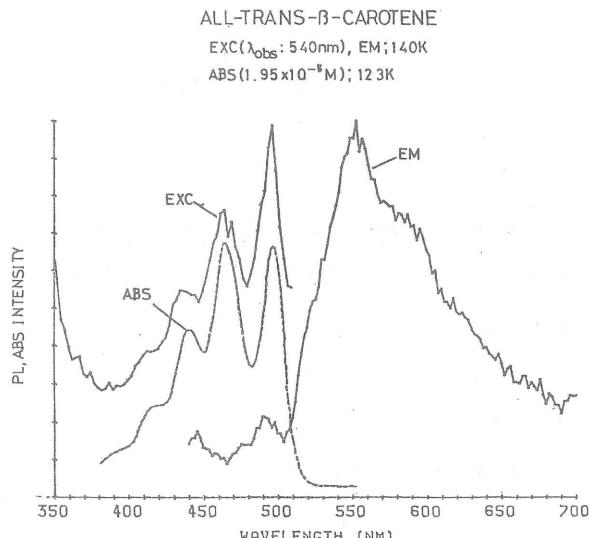
三重項励起状態についての研究は極端に少い。カロチノイド系物質については TT 吸収が測定されているが、短いポリエンについては、二三のジフェニルポリエンについての TT 吸収の測定例があるのみである。これらの物質について、三重項状態の減衰速度定数を三重項状態のエネルギーに対してプロットすると、エネルギー・ギャップの法則から期待されるような直線が得られるが、ポリアセンについての同様な直線と比べると、ポリエンの方が一桁寿命が短いことがわかる。このことは、ポリエンの三重項状態の幾何学的構造が大きくゆがんでいることを示唆している。

### $\beta$ -カロチンの光学的性質

関学大理 渡辺泰堂

クロマトファーにおける  $\beta$ -Car とバクテリオクロロフィル (Bchl) 間の効率のよいエネルギー伝達に、光受容体としての  $\beta$ -Car がどのような励起状態で関与しているかを明らかにする目的で、 $\beta$ -Car の発光とその励起スペクトルを測定した。

一重項  $^1B_u$  励起に原因する発光は、これまでの報告とは異なり、1 図に示す如く、550 nm を中心に 495 nm, 522 nm, 595 nm の側帯を伴い、約  $3,000 \text{ cm}^{-1}$  の拡がりを示す。短波長側の 3 つの発光は Car 濃度の減少と共に強度比を逆転させ、それらの励起スペク



1 図

トルは吸収の構造をよく反映している。

595 nm の発光は、その励起スペクトルから、420, 510 nm 準位に起因するものであることがわかった。2図は同じトランス  $\beta$ -Car の発光スペクトルの励起波長依存性である。励起波長を  $^1B_u$  の短波長へシフトさせるにつれ、595 nm 準位の構造がはっきりしてくる。この励起準位の構造については現段階

では明らかではないが、Thrash らがトランス  $\beta$ -Car の  $\nu_1$  バンードのラマン励起スペクトルから求めた  $^1A_g$  励起状態に相当するものと思われ、エネルギー的にも ( $17,230 \text{ cm}^{-1}$ , 580 nm) ほぼ一致する。595 nm 励起によって 710 nm の発光が観測されるが、この発光が 595 nm 励起によってのみ現れることから、595 nm 準位は光変換効率の高い準位であると推定される。クロマトファーに

おいて、 $\beta$ -Car から Bchl への光エネルギー移動は、この励起状態を介して行われるものと思われる。420, 510 nm 準位については、三重項状態を唱える研究者もいるが、さらに詳細な実験が必要であろう。

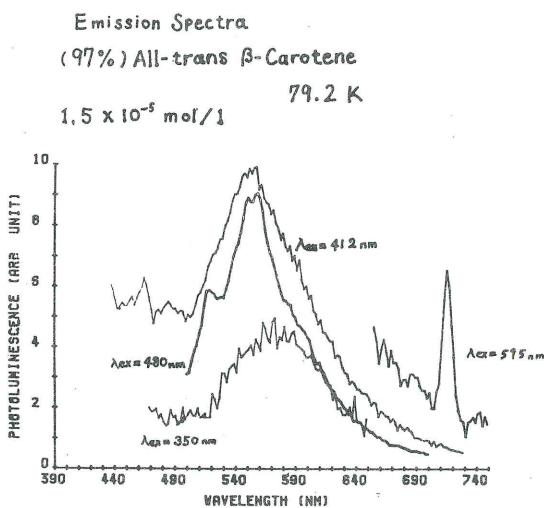


図 2

### ポリエンの励起状態とその光生物学的機能

早大理工 鈴木 英雄

生体と光との相互作用は、光エネルギー受容反応（光合成など）と、光信号受容反応（光感覚・光周性・光形態形成・光屈性など）とに大別されるが、カロチノイドや胆汁色素はこれら光生理反応の光受容体の発色団として、極めて重要な役目を果している。特に、後者の光生理反応については、明暗交代が生理時計の時刻合せを行っていることが明らかにされて来ており、その光受容蛋白質（現在既知のものは視物質とフィトクロム）の動的構造変化が、盛んに研究されている。視物質とフィトクロムの発色団は、それぞれレチナールとビリトリエンであり、共に可視部に強い吸収を示す。従って、これらの分子は  $10^{-9}$  秒程度の輻射寿命を宿命的に有している。従って、もしこの寿命の間に有効な分子変形を起して光刺激を情報化しなければ、折角吸収した光エネルギーを無駄に放出してしまうことになる。換言すれば、これらの分子は

強い電子・振動相互作用に支配されており、従って極めて変形しやすい分子である。これは基底状態の両者について言えることであるが、特に励起状態においては、シストラ NS異性化という極めて著しい分子変形が起る。また、この変化と共に、強い電気信号が発生するものと思われる。それらのダイナミックスを解明することは、物性論の分野においても非常に高い学術的意義を有するものと思われる。多くの物理学者の参加を期待する所以である。

### 物性研短期研究会「直鎖状ポリエン構造の 光励起状態」参加報告

関学大理 小山泰

ポリエン分子に興味をもつ物理・化学・生物の分野の研究者が一同に会して、研究発表と討論を行うという計画を国府田先生から御連絡頂いたのは6月であったと思う。数年前から光合成細菌の光反応中心に結合したカロテノイドの構造をラマン散乱を使って研究してきた私は、かねてからポリエンの光学的性質や異性化等の物理化学的性質に関する基礎的勉強の必要性を感じていた。当理学部の渡辺泰堂教授から物理学での発表の様子等を通じて名前だけを聞いて知っていた方々と会うことができると知って私は非常に喜んだ。今回の研究会で話をされた方々の多くは、私が初めてお会いした方々であった。

研究会に参加して案の定、自分の不勉強を思い知らされたが、物質にじかに触れている自分達の研究の意味を確信することもできた。「真のポリエンの実体は何か」を明らかにすることを共通の目標として、互いに研究方法を批判するに止まらず、盲人が象に触れて得たような我々の断片的知識を総合することができれば有益であろう。総合研究の研究班を組むなり、定期的にサマースクールのような合宿研究会を開いて研究者相互の人間的交流を図ることができないだろうか。普段、討論の相手に充分恵れない地方大学の一研究者として、この様な機会が又、与えられることを切に望む次第である。

### バクテリオロドプシンの光化学反応過程

東北大・理・物理 德永史生

バクテリオロドプシン (bR) は高度高塩菌の產生する紫膜中の色素蛋白質で、ロドプシンと同様レチナールを補欠分子族として含む。bR が光を吸収すると、K, L, M, (O) 中間体を経て元に戻る。この過程でプロトンを膜の一方から他方へ運ぶ。

bR は  $\pi$  電子の遷移による幅広い吸収帯を 570 nm 付近に持つ。このスペクトルの形は、遊離の全トランスレチナールと同様、低波数側は Gaussian で、高波数側は Lognormal 曲線である。bR 中で吸収極大が長波長移動する原因として、負電荷の存在が示唆されている。この

可能性を検討するためにフッ素を含むチレナールアノログを用いて bR アナログを作り、フッ素の 1S 電子の結合エネルギーを光電子分光法で測定したところ、負電荷は  $\beta$ -イオノン環付近ではなく、13位メチル基付近にあることが示唆された。

bR の最初の中間体 K の生成は、室温で 10 ピコ秒位で、液体ヘリウム温度では数 10 ピコ秒で、K の前に S 状態があると言われている。K から bR への逆反応ではそのような状態は見出されず、すぐ bR に戻る。bR の蛍光の量子収率と、寿命は異った温度依存性を示す。量子収率は室温で  $10^{-5}$ 、液体窒素温度で  $10^{-3}$  であるが、寿命は 10 数ピコ秒から数 10 ピコ秒に遅くなるだけである。この量子収率と寿命との温度変化に対する挙動の不一致は、K や bR の他に比較的蛍光の強い中間体を考えると説明される。この中間体や S 状態についてはまだ実験事実が少なく今後の問題である。

### 視物質ロドプシンの光化学反応過程

札幌医大物理 津田基之

視物質ロドプシンの発色団は 11-シス型レチナールであるが、その光感受性にかかわる物理量（光異性化の量子収率、光異性化速度、蛍光の量子収率等）は遊離のレチナールと比べて著しく異なる。このことはロドプシンの光化学初期過程を明らかにする上でレチナールとそのままわりのタン白質の微環境、それらの相互作用を正しく理解しなければならない。我々は生理温度ではピコ秒領域に生成するロドプシンの光化学反応中間体を液体ヘリウム温度で安定化し、その生成過程を可視吸収スペクトルで、それらの中間体のレチナールの構造を共鳴ラマン散乱により研究した。吉沢等はロドプシン ( $\lambda_{\max} 500 \text{ nm}$ ) を液体窒素温度に冷やし光照射すると長波長側に吸収極大 ( $\lambda_{\max} 540 \text{ nm}$ ) を有する中間体が生成することを見出しバソロドプシンと名づけた。彼等はさらに液体ヘリウム温度で短波長側に吸収極大を有する中間体ヒプソロドプシン ( $\lambda_{\max} 440 \text{ nm}$ ) を見出し、これを昇温することによりバソロドプシンに転換することから、バソロドプシンの先駆体の可能性を提唱した。我々はタコロドプシンを用いて検討した結果、液体ヘリウム温度でもバソロドプシンがヒプソロドプシンより高い量子収率で生じることから、ヒプソロドプシンはロドプシンの主経路には含まれないことを主張している。さらに共鳴ラマンの結果からヒプソロドプシンのシップ塩基結合は、今までの定説と異なりプロトン化していることを示した。

### ピコ秒領域におけるロドプシンの光反応過程

京大理 吉澤 透

光を吸収したロドプシンが、最初にどのような構造変化をするかという問題は、視覚光生物

学の中心課題である。この問題を解決するには、第一光産物を同定することが必要であると考え、ウシのロドプシンを77Kで照射した。その結果、吸収曲線が赤色移動することを見出し、現在バソロドプシンと呼んでいる中間体の存在することを報告した。後ロドプシンからバソロドプシンへの変化は、発色団11シスレチナールの歪んだ形の全トランス型への光異性化反応で、これが視覚における光反応であることを報告した。1972年、4Kでロドプシンを照射したとき、青色光で照射するとバソロドプシンを生じるが、赤色光で照射すると青色移動が観測され、この光産物をヒソロドプシンと名付けた。この時以来、この分野の中心課題は、1) ヒソロドプシンとバソロドプシンのいずれが先に生じる光産物であるか、2) これらのものより先に中間体が存在するか、3) 光励起後最初にどのような構造変化が起こるか、にしばられた。これらのこととを解決するために、低温スペクトルに加えて、ピコ秒レーザーによる時間分解やスペクトル測定、更に天然のロドプシンやその類似体、人工のロドプシン類似体などを用いて実験を行った。その結果バソロドプシンの前駆体として、より長波長側に吸収極大のある中間体の存在することを認め、これをフォトロドプシンと名付けた。ヒソロドプシンはフォトロドプシンの光反応の結果生じる産物であることを確めた。

### ロドプシンの光励起状態のダイナミックス

名大理 垣 谷 俊 昭

ロドプシンは非常に高速で、しかも高い量子収率で光異性化反応を行う。水溶液中のレチナールにはこのような性質がないので、レチナールが蛋白と結合することによって生じる性質である。非常に高速で光異性化がおこるので、これまで励起状態で熱平衡に到る緩和がおこる前に無輻射的に基底状態におちてくる描像があり、Warshel や Birge の semi-classical trajectory による理論的研究がなされた。その結果によると適当な条件のもとで、0.2~2 p秒で光異性化がおこる。一方、光異性化の正反応と逆反応の量子収率の和がほぼ1となること等により、励起状態には熱的平衡の達した共有状態の存在が予言されている。そこで、励起状態で熱平衡に達したときの無輻射遷移の理論を適用して基底状態への遷移速度を計算すると energy gap が小さいとき ( $\sim 0.5$  eV),  $10^{12}$  s<sup>-1</sup> の高速度を得ることが出来た。

光励起後の molecular dynamics を追跡する手段として、光吸収スペクトルのフーリエ変換の方法を試みた。ベンゼンに対する結果を図1に示す。約900 cm<sup>-1</sup>の振動のbeat が現れ、全体が exponential 的に減衰し、振動緩和に関する情報を与える。これらの結果を検討し、今後ロドプシン等に応用する予定である。

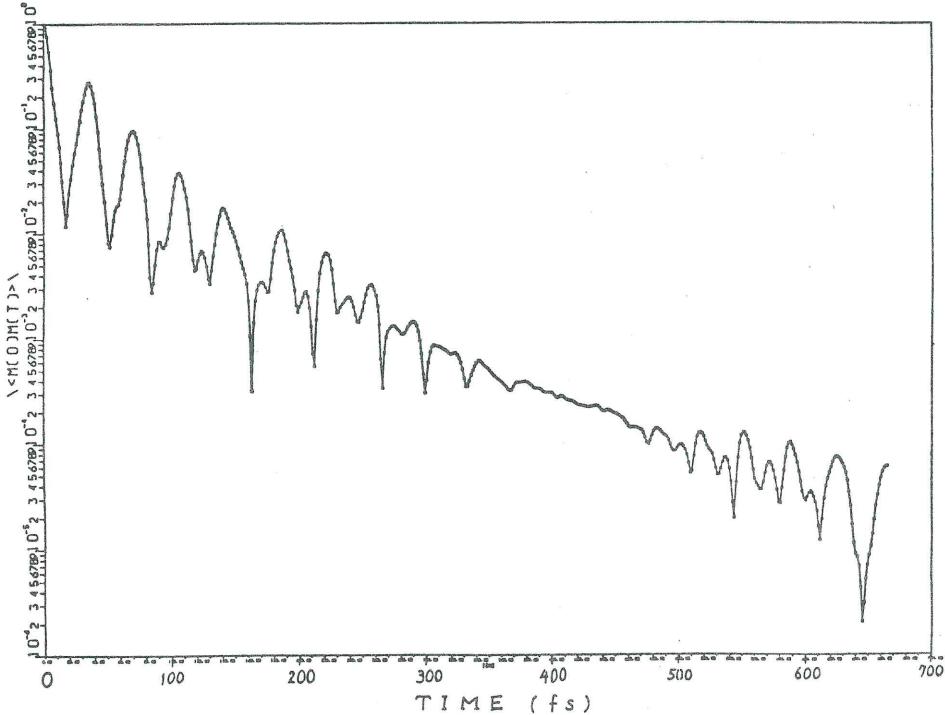


図1 遷移モーメントのtime - correlation function (縦軸)の時間的変化 (横軸)

### 生きたクロレラにおけるカロチノイドの共鳴ラマン散乱

阪大理 木下修一, 櫛田孝司

生体に見られる秩序は、結晶や磁性体に見られるような秩序と異なり、それが熱的に大きくずれた非平衡状態で実現されているという点に特徴がある。こうした非平衡な生体内で分子の各状態の確率分布がどの様になっているかという問題は大変興味深い。Drissler らは光合成を営む单細胞藻類クロレラを対象に、青~緑の  $\text{Ar}^+$  レーザーを用いて生理的温度で生体内ポリエンであるカロチノイド色素の共鳴ラマンスペクトルを測定した。彼らはストークス光と反ストークス光の強度比から、カロチノイド色素の基底電子状態の励起振動準位について、その分布を求め、4つの準位のいずれもが熱平衡から期待される値の1.3~2.6倍もの分布

をもつと報告している。

我々はこれを確かめるためにラマン散乱強度から分子の振動準位の分布を求める方法について検討し、ストークス・反ストークス光強度比に  $\nu^4$  項、共鳴効果、装置の感度補正を加えることにより分布が求められるという結果を得た。さらに  $\beta$ -カロチンを試料としてこのことを実験的に確かめた。次に、クロレラの懸濁液を試料として同様の解析を行なったところ、分布は誤差の範囲内で熱平衡から期待される値と一致し、生体中においてもカロチノイド色素は熱浴と熱平衡な状態にあるとの結論を得た。<sup>1)</sup> Drissler らの結果は解析の際  $\nu^4$  項を省いた点に原因があると推察される。

- 1) S. Kinoshita, K. Hirata and T. Kushida, J. Phys. Soc. Japan 49  
314 (1980).

### ポリアセチレン研究の現況と将来

筑波大物質工 白川英樹

無限に長い直鎖状ポリエンに相当する化合物としてのポリアセチレンに関する研究はフィルム状の試料が調製されるようになってから著しく進展し、化学と物理の両面から光が当てられるようになった。しかし、ポリアセチレンが不溶不融の高分子化合物であるためによる characterization のあいまいさが、研究結果の議論を複雑にしている。そこで、合成の立場から研究の現況と将来について問題点を整理してみた。

1. 分子構造： トランス型（トランストランソイド）とシス型（シス特朗ソイド）の二つの異性体の存在が確立しており、前者が熱力学的に安定である。重合はシス型で進行するためシスからトランスへの不可逆異性化が熱、光、ドーピングによって進行する。固相中の異性化機構の解明は今後に残された大きな問題である。
2. 分子量およびその分布： 水素化や塩素化による方法では $-(CH=CH)_n-$  とすると、 $n = 200 \sim 300$ 、同位元素標識法で  $770 \sim 1,400$ 、共重合による重量増加から  $1,150 \sim 2,300$  と見積られている。分子間での架橋点がくりかえし構造単位当たりシス型での 0.5 %、トランス型で 1 ~ 1.5 % 程度存在すると分析されているから、架橋点が分る鎖中で均一に分散しているとすれば有効共鎖鎖長はトランス型で  $70 \sim 100$ 、シス型で 200 と見積ることができる。
3. 可溶化： 分子間力が大きいためそのままでは溶媒に溶けないが、可溶性の高分子化合物とブロック共重合することにより可溶化する研究が進み、溶液物性の研究への道が開かれた。また、単結晶化の試みも発表され始めている。
4. 不純物の定量： 放射化分析による不純物の定量方法が確立された。通常の方法で合成したフィルム中の不純物は CH 単位当たり、 Ti ;  $6 \times 10^{-4}$ 、 Al ;  $1.3 \times 10^{-3}$  であった。重合方

法および精製処理方法の改良によりいずれも $10^{-5}$  のレベルに減少できる見通しである。

### (CH)<sub>x</sub> の共鳴ラマン効果 — 共役鎖長プローブ

東北大薬 原田一誠

種々のトランス共役オリゴマー分子（共役二重結合数  $N_{c=c}$ ）について、その電子吸収極大波長 ( $\lambda_{max}$ ) や  $C=C$  伸縮振動数 ( $\nu_1$ )，CH 面内変角振動数 ( $\nu_3$ ) と  $N_{c=c}$  との間には、はっきりとした対応関係があり、そのラマン散乱は  $\lambda_{max}$  附近の励起光により強く観測される（共鳴ラマン効果）。トランス-(CH)<sub>x</sub> のラマンスペクトルにおいて、 $\nu_1$  と  $\nu_3$  のピーク波数とバンドの形は著しい励起波長依存性を示すが、その解析の結果、トランス-(CH)<sub>x</sub> は長い共役鎖のみから成るのではなくて、様々な長さ ( $N_{c=c}$  にして 4 から 100 以上まで) の共役鎖が混在していることがわかった。共役の途切れの原因としては、単結合まわりのねじれ、シスの残存、折れ畳み、CH<sub>2</sub> 基の介在、架橋などが考えられ、ドーピングによる電導度増加と関連して興味が持たれる。

$\nu_1$  と  $\nu_3$  を共役鎖長分布のプローブとして利用できる。例えば、457.9 nm 励起で  $\nu_3$  は 1121 cm<sup>-1</sup> (短鎖による) と 1066 cm<sup>-1</sup> (長鎖による) の 2 つのピークから成る。その相対強度をモニターとして長共役鎖を多く含むフィルムの調製条件をきめることができる。長共役鎖を多く含むものほど  $\sigma_{max}$  (ドーピング限界での電導度) が高い。

赤外部にも共役鎖分布を反映する吸収帯を見出したこと、ポリアセチレンをドープすると現われる 3 本の赤外吸収が、1 本の共役分子鎖のドープされた部分に特徴的な分子振動吸収であり、電導度と直接には結びつかないことなども報告した。

### トランス・ポリアセチレンの光電導

東工大有機材料 福田敦夫

故意にはドープしていないトランス型ポリアセチレンの光吸収スペクトルは、薄膜を用いて測定すると 1.35 eV 附近で急激に立ち上り、高エネルギー側に尾を引いている。この吸収は  $\pi \rightarrow \pi^*$  の電子遷移によると言われている。ところが、100 μm 程度の厚膜を用いて測定すると、0.5 eV でもかなりの吸収が観測され、鋭いピークが少なくとも 2 本見出される。これらの吸収が現われる原因を明らかにする目的で、光電導の測定を始めた。その結果、

- ① 鋭いピークは格子振動の倍音あるいは結合音であり、これを励起したときの電流は温度上昇にもとづくみかけの光電流である。
- ② 0.6 ~ 1.2 eV の吸収は真の光電導に寄与している。
- ③  $\pi \rightarrow \pi^*$  電子遷移によると思われる吸収帯の立ち上り部分は、高エネルギー側の部分と異なり

なり、光電導では 1.4 eV に明瞭なピークが観測される。

さらに、キャリヤーの移動過程については

- ④ 試料を純化するにつれ、光電流は小さくなる。
- ⑤ ①の活性化エネルギーは、暗電導のと同じ 0.33 eV である。
- ⑥ ②、③は 1.4 eV のピークも含めて同じ活性化エネルギーを持ち、高温部では 0.26 eV、低温部では 0.12 eV である。
- ⑦ 光電流はクライオスタットの排気時間が長くなるにつれて減少し、特に③の高エネルギー側では影響が著しい。

などが明らかになった。

### ポリアセチレン及び類似高分子のルミネッセンス

阪大工、関学理<sup>\*</sup> 吉野勝美、林 重徳  
犬石嘉雄、渡辺泰堂<sup>\*</sup>

ポリアセチレンのルミネッセンスは他の高分子に比べて極めて弱く、特にトランス型では微弱である。ペンシルバニア大的グループはシス型でバンド端に発光を観測し、トランス型では測定できなかった事から、光電導がトランス型でのみ観測できる事と考え合せて、ソリトンモデルで説明できると報告した。一方我々はシス型では更に 900 nm 近傍の近赤外域に大きなストークスシフトの発光がある事、温度低下と共に強度は弱くなり、長波長へシフトする事、又シス型のみならずトランス型でも微弱ながら大きなストークスシフトの発光が見られる事を見出した。この事はポリアセチレンのルミネッセンスが単純にソリトンモデルでは論じ難い事を示している。Fitzen 等は我々と同様、近赤外域でのルミネッセンスを測定し、その起源を  $^2A_g$  状態からのものであるとした。しかし局所的な異性化領域、欠陥からの発光或いは自己束縛励起子からの発光の可能性もある。シス型ポリアセチレンにヨウ素をドープすると導電率の上昇に伴い、発光強度は低下し、短波長型へシフトする事がわかった。この結果はキャリヤー密度が大きくなり、シールディング効果のため束縛エネルギーが低下したと考える。即ち自己束縛励起子発光と考えるのが妥当であることを示唆する。

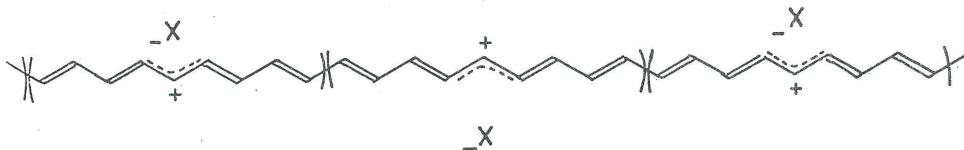
ポリアセチレンの置換体であるポリクロロフェニルアセチレン、ポリフェニルアセチレン等は矢張り大きなストークスシフトの発光を示すが、ポリアセチレンと比べて強度は強く温度依存性も異なる。

## ポリアセチレンの荷電ソリトン

名大理 田仲二朗

ポリアセチレンに、化学的或いは電気化学的ドーピングを行うと、電導度の著しい増加と共に、可視部から赤外部にかけてのスペクトルが、著しく変化する。その内容を要約すると、次のようになる。(1)シス2はトランスポリアセチレンの、可視部に見られる $\pi\pi^*$ 遷移(半導体の言葉でのバンド間遷移)が消失し、代りに近赤外部の $5000\text{ cm}^{-1}$ 附近に、同じ位の強度の新しい吸収帯が出現する。(2)ドーピングと共に、赤外部に新しいバンドが出現し、(3)さらにドーピングが進むと、金属的反射が遠赤外部に見られるようになる。

これらの結果を説明するためには、単にポリアセチレン鎖から、電子受容体の方へ電子移動が起ったと考えるだけでは不十分で、共役系の骨格の構造に、下の図に示すような、構造上の変化を生じ、いわゆる荷電ソリトンが生じたと考えるのが、もっとも合理的である。



図

ここでスペクトル変化の化学量論的考察から、荷電ソリトンがひきおこす、 $\pi\pi^*$ 遷移への影響は、1個の電荷当たり、炭素数が精々9~11程度であろうと推定される。この荷電ソリトンの位相の揃った運動(sliding mode)は、遠赤外部に金属的反射を室温で与えるが、低温ではアニオンのクーロン力によりピン止めされ、代りに、荷電ソリトンのピン止めモード(amplitude mode)が、 $570\text{ cm}^{-1}$ 附近に、極めて強く見出されるようになる。これら的事実は、ポリアセチレン中の電荷の運動が、いわゆる荷電ソリトンの運動として、ポリアセチレン鎖の格子変形を伴っておこることを示すものであり、固体物質中の電荷の運動の新しいタイプといってても、過言ではない。

本研究は、名大教養 田中政志、名大理 藤本斉、神谷幸司氏と共になされたものである。

## ポリジアセチレン ポリアセチレンの 過渡光スペクトル

東大理 小林孝嘉

ポリジアセチレン体の光学的・電気的性質は興味を持たれるが非線型光学の研究対象としても大きいに興味ある物質である。その中で Poly-PTS (polydiacetylene his Cp-to-luene surfonate)の $\chi^{(3)}$ は $3.0 \times 10^{-11}\text{ esu}$ と大きい非線型性を持っている。我々は非線

型効果との関連に於て励起状態におけるポリジアセチレンの動的挙動を研究している。又、これと並んでより多くの研究がなされているポリアセチレンについて研究も行った。femto 秒から pico 秒, nano 秒, micro 秒, mili 秒に於ける時間分解透過スペクトルや反射スペクトルを測定した。特に研究したいのはポリアセチレンについては、100 femto 秒 - 1 nano 秒の時間領域の測定と  $10 \mu$  秒以後の測定しか今までに報告されていないので、その間 時間をつないで、いわゆるソリトン模型の実体を調べたい点である。又ポリジアセチレンについては結晶に於ける反射スペクトル変化の原因が、三重項（励起子）によるのかあるいは他の状態によるのかという点を、可溶化ポリジアセチレンの吸収スペクトルとの対比により明らかにしたいと考えている。ポリジアセチレン試料は東大工・国府田先生の研究室の十倉氏、ポリアセチレン試料は名大理、田仲先生の研究室で作られたものである。

### ポリアセチレンの光励起状態：変調分光法 によるアプローチ

分子研 三谷洋興、和田芳樹

ポリアセチレンの最近の研究において電子相関のもつ重要性が再認識されつつある。ここでは、光学スペクトルを詳細に調べて、励起状態における電子相関のはたす役割を明らかにすることを試みる。まず、広いエネルギー領域でのバンド構造に関する知見を得るために、SOR 光を利用した反射スペクトルの測定を行った。その結果、ポリアセチレンのエネルギー構造は一電子近似のバンド計算によって、よく再現されることが認められた。しかしながら、この計算から予想される吸収強度は測定されたスペクトルと著しく異なる。特に、基礎吸収端近傍に見られる強い吸収帯は一電子近似の範囲内では説明し得ないことが判明した。そのスペクトルの特徴はこの吸収帯が励起子遷移によることを示唆している。その微細構造を調べるとポリマー特有のフォノンサイドバンドが観測され、この励起子モデルを強く支持している。さらに、延伸したトランス型ポリアセチレンについて偏光を利用した電場変調分光法によるスペクトル解析を行うと、この吸収帯より僅かに低エネルギー側に弱い遷移が存在することが確認された。これまでに報告されている光電導や光誘起起電力の測定、さらにレーザー励起後の過渡光吸収スペクトルとの対応関係から、この弱い遷移は電荷移動を伴う励起子遷移に起因するものであり、その緩和過程において生じる準安定状態への直接励起である可能性が高い。

## 一次元パイエルス・ハバードモデルによる 種々の励起状態

分子研 那須 奎一郎

最外殻に一個の不対電子を持つ原子（又は分子）からなる一次元鎖状物質（電荷移動型錯体、ハロゲン架橋混合原子価錯体、ウォルフラムズ赤、ポリエン等々）の物性を統一的に解明する為に、次のような二種の一次元パイエルス・ハバードモデルを用いて、基底状態（相図）と励起状態とを考察しよう。

サイト対角型（ウォルフラムズ赤型）

$$H = -2T \sum_{l,\sigma} (a_{l\sigma}^+ a_{l+1\sigma} + h.c.) + U \sum_l n_{l\alpha} n_{l\beta} + V \sum_{l,\sigma,\sigma'} n_{l\sigma} n_{l+1\sigma'} \\ + \sqrt{S} \sum_{l,\sigma} Q_l n_{l\sigma} + \sum_l Q_l^2 , \quad n_{l\sigma} = a_{l\sigma}^+ a_{l\sigma}$$

$a_{l\sigma}^+$  はサイト  $l$  にスピノル  $\sigma$  ( $=\alpha, \beta$ ) を持つ電子を成す演算子、  $T$  は電子の共鳴移動積分、  $U$  ( $V$ ) は原子内（間）クーロン斥力、  $S$  は電子・格子結合、  $Q_l$  は局在フォノンの座標。

サイト非対角型（ポリアセチレン型）

$$H = -2T \sum_{l,\sigma} (a_{l\sigma}^+ a_{l+1\sigma} + h.c.) + U \sum_l n_{l\alpha} n_{l\beta} + V \sum_{l,\sigma,\sigma'} n_{l\sigma} n_{l+1\sigma'} \\ + \sqrt{S_0} / 2 \sum_{l,\sigma} (P_{l+1} - P_l) (a_{l\sigma}^+ a_{l+1\sigma} + h.c.) + \sum_l (P_{l+1} - P_l)^2 / 2 .$$

$P_l$  は原子の鎖軸方向変位。  $S_0$  は共鳴積分の変化率を表す。

平均場で相図を求める時、対角型では  $U=S$  を境にして、  $S$  D W と C D W に分かれ、中間相は存在しない。一方非対角型では S D W はパイエルス変形と共存する中間相も生れる。この相異はスピノル反動励起にも当然反映する。この励起は、対角型の場合、  $U < S$  では三重項励起子となり、  $U > S$  で magnon に突然変化するが、非対角型の場合は、  $S_0/U$  の減少とともに励起子から magnon へ連続的に変化する。従って、この励起子のエネルギーを決定する事により、ポリアセチレンに於ける電子相関と電子格子結合の競合の性質を解明できると思われる。

## 電子相関と電子格子相互作用の競合

— 4 — サイト — 4 — 電子 モデル —

物性研 滝本淳一・豊沢 豊

電子相関と電子格子相互作用が共存する時の基底状態を、4-サイト-4-電子モデルにより調べた。バンド巾を  $2B$ 、サイト内（最近接サイト間）クーロン反発を  $U$  ( $V$ )、サイト対角型（非対角型）電子格子相互作用の強さを  $S_1$  ( $S_2$ ) とする。(1)  $B$ ,  $U$ ,  $S_1$  が存在する場

合。相図を図1に示す。AFは格子ひずみのない反強磁性的相、CDWは電荷密度波相で、その間の転移は1次。また、相図の系のサイズ依存性について、Hückelの( $4n + 2$ ) - 則と関連させ議論した。(2) B, U, S<sub>2</sub> が存在する場合。相図を図2に示す。BOWはBond Order Wave相（結合交替の生じた相）で、AF - BOW間は2次転移。SとUは鋭く対立するが S<sub>2</sub> とUの競合は弱い。Uの効果の目安として例え

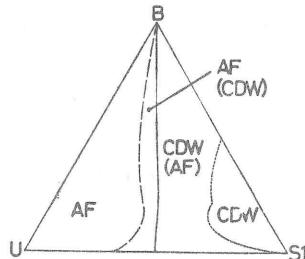


図1

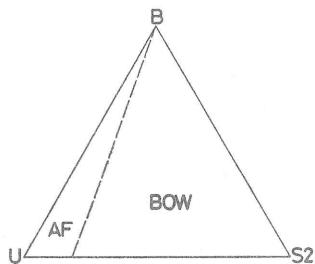


図2

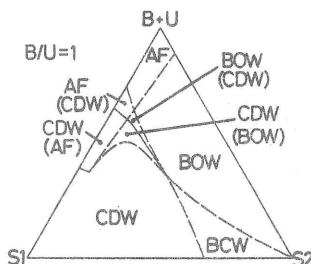


図3

ば局在モーメントを見ると、CDW相では非常に小さいがBOW相ではAF相と同程度残っている。(3)Vの効果。 $2V < U$ ならVはUを弱めるだけで定性的な影響はない。(4)B, U, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> が存在する場合。 $B/U = 1$ に固定した時の相図を図3に示す。新たにBOWとCDWの共存相（BCW）が現れる。圧力によってS<sub>2</sub> を大きくできるなら、例えばCDWからBCWへの転移を観測できる可能性がある。

#### ポリアセチレン励起状態のソリトン描像

都立大理・物理 小野寺 嘉 孝

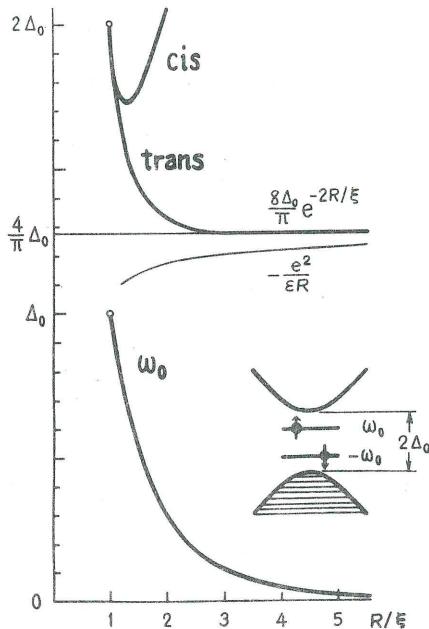
ポリアセチレンのトランス異性体 trans-(CH)<sub>x</sub> は、(1)中性磁気欠陥（中性ソリトン）の存在と、(2)ドーピングによる金属化という点で注目を集めている。最近では、これに加えて、(3)光励起とその緩和も活発に研究されはじめた。trans-(CH)<sub>x</sub> の示すこれらの独特な物性

を全体的に説明しうるモデルとして、ソリトン・モデルが有力である。

trans -  $(CH)_x$  の鎖は、その単純な繰返し構造のため、2種類の全く同等な配置をとることができる。この2つの配置の境界領域をソリトンと呼んでいる。このようなソリトンを記述しうる簡単なモデルが、Su-Schrieffer-Heegerにより提案されたSSHモデル（1979年）であり、そこでは、 $\pi$ 電子をヒュッケル近似で取扱い、トランスマッタ積分が原子変位に比例して変化する効果を取り入れている。trans -  $(CH)_x$  の物性研究は、現在のところ、このSSHモデルによって多くの物性がどの程度統一的に理解できるかがひとつの焦点となっている。

ここでは、光励起後の緩和過程を、SSHモデル（実際にはその連続体ハミルトニアン）によって調べた結果を述べる。図に示したのは、励起状態の断熱ポテンシャルである。横軸は2個のソリトン間の距離を表わし、その1目盛は、炭素原子約7個分の長さである。電子正孔対を光によって生成した直後のエネルギーは、バンドギャップ・エネルギーであり〔この点で、 $R = 0$ ではなく $R = 1$ となって

いるのは、理論の内部事情による。〕trans -  $(CH)_x$  では、ここからエネルギーは下がる一方で、 $R \rightarrow$ 無限大の極限では2個のソリトンに分解する。一方、cis -  $(CH)_x$  では、trans -  $(CH)_x$  のような2重縮合はないので、断熱ポテンシャルは下り放しとはならず、極小点をもつ。どちらの場合にも、緩和に伴って起る原子変位のため、禁制帯の中に図のように離散準位が生ずる。この2つの離散準位間の電子遷移により発光・光誘導吸収が可能であり、それらが実際に観測されている。ただし、実



図

験で見えている発光は、ほとんどがいわゆるホット・ルミネッセンスであり、準安定状態に達した後に見られるはずの強い発光は、cis異性体でも見えていない。

## ポリエン結合交替構造とソリトン およびポーラロン

阪大基礎工 山口 兆, 笛野高之

不安定中間体の電子構造および化学的挙動についての *ab initio* MO 理論研究に関連して、ポリエンラジカルの結合特性を理論計算によって模索することを試みた。現在までに得られた結果を要約すると、以下のとくである。

- (1) 線形ポリエンラジカル  $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2$  および  $\text{CH}_2(\text{CH}_2)_3\text{CH}_2$  を例にとり、Hartree-Fock (HF) 解の不安定性および電子相関効果と結合交替との関係について検討し、非制限 HF (UHF) 法が、制限 HF (RHF) 法とは異なり、多配置 (MC) SCF 計算による結果をよく再現することを確かめた。
- (2) 線型ポリエンラジカル  $\text{CH}_2(\text{CH}_2)_{2n-1}\text{CH}_2$  ( $n = 1, 2, 3, 4$ ) および環状ポリエンラジカル  $(\text{CH})_{2n+1}$  ( $n = 1, 2, 3$ ) の最安定核配置を UHF エネルギー勾配法により決定し、その結合交替様式を検討したところ、ラジカル中心近辺の結合交替はソリトン模型に見られる格子変形様式  $\Delta U(m) = \pm U_0 (-0)^m \tanh(m/n)$ , [ $0 < m < n$ ] よりもゆるやか (flat) であることが認められた。
- (3) 線形ポリエンラジカル ( $n = 8, 9$ ) の結合交替様式として  $\Delta U_y(m) = \pm U_0 (-1)^m \tanh^y(m/n)$  ( $y \geq 1$ ) を想定し、UHF SCF 計算を実行したところ、 $y = 9$  の近辺（かなり flat な構造）にエネルギー極小が存在することを認めた。 $y = 1$  および 9 に対するエネルギー差は 3 kcal/mol ていどである。
- (4) ポーラロンにおいても、結果は上記と類似している。

## 共鳴ラマン・赤外スペクトルからみたポリエン 分子の基底および励起状態での構造

東大理 田 隅 三 生

A. 共鳴ラマン励起プロフィールの解析から、 $\beta$ -カロチン（全トランス体および中央の二重結合がシスになった15-シス体）や $\beta$ -カロチンのポリエン鎖部分にある4個のメチル基がなくなった化合物の励起状態（480 nm 付近の最低許容遷移、340 nm 付近のシスピーク、275 nm 付近の第2許容遷移に対応する）での分子構造に関する情報が得られる。<sup>1-4</sup>

B. 共鳴ラマンスペクトルは基底状態での分子のねじれに関する情報を与える。<sup>3</sup>

C. ブタジエンや 1, 3, 5-ヘキサトリエンについて、C-C 単結合のまわりの構造がシス形（またはゴーシュ形）になった分子を希ガスマトリックス分離法と高温ノズル法、紫外光照射を併用することによって発生させ、それらの赤外スペクトルを測定することができる。<sup>5, 6</sup>

文献

- (1) F. Inagaki , M. Tasumi , and T. Miyagawa, J. Mol . Spectrosc. 50, 286 (1974).
- (2) S. Saito, M. Tasumi , and C.H. Eugster, J. Raman Spectrosc. 14. 299 (1983) .
- (3) S.Saito and M. Tasumi, J. Raman Spectrosc. 14, 310 (1983).
- (4) H.Okamoto , S. Saito, H.Hamaguchi , and M. Tasumi , J. Raman Spectrosc., to be published.
- (5) Y. Furukawa, H. Takeuchi , I. Harada, and M. Tasumi , Bull. Chem. Soc. Jpn. 56, 392 (1983).
- (6) Y. Furukawa, H. Takeuchi , I. Harada, and M. Tasumi , J. Mol. Struct. 100, 341 (1983).

## 物性研短期研究会報告

### 「人工格子合金の物性」

世話人 新庄輝也、遠藤康夫、安岡弘志

昭和59年1月17、18日の両日にわたって標記の研究会が開かれた。近年、薄膜作成技術の進歩により、原子レベルで構造を制御した各種多層膜が生成され、熱平衡状態では存在しない新物質を得ることが可能になった。これら「人工格子」の磁性や超伝導性を中心とする物性に強い関心が集まっている。この会議では対象を金属多層膜とし、次のような研究発表が行なわれた。又、折よく来日中の Mc Whan 博士の特別講演によって、ベル研における研究成果が紹介された。

2日間にわたって大変盛会で、活潑な討論が行なわれ、種々の観点から人工格子が興味深い研究対象であることが明らかにされた。同時に、研究はまだ着手されたばかりで、非常に広い未開拓領域を含んだ研究分野であることが印象づけられた。

### プログラム

#### 1月17日（火）

PM. 13:00~15:00 (座長 安岡弘志)

- |                               |         |              |
|-------------------------------|---------|--------------|
| 1. Introduction<br>蒸着法による人工格子 | { (30分) | 新庄輝也 (京大化研)  |
| 2. スパッター法による人工格子              | (30分)   | 藤森啓安 (東北大金研) |
| 3. MB E による金属超格子作成            | (15分)   | 寺内 崇 (関学)    |
| 4. コメント                       | (15分)   | 高橋 実 (東北大工)  |
- 休憩 (15分) ————

PM. 15:15~17:30 (座長 高橋 実)

- |   |                    |
|---|--------------------|
| 1. Fe/V, Fe/Mg 人工格子の構造 (20分)                              | 藤井保彦 (阪大基礎工)       |
| 2. Fe/V, Fe/Mg 人工格子の磁性とメスバウアー効果 (20分)                     | 川口建二 (京大化研)        |
| 3. 中性子回折による人工格子の磁性 (20分)                                  | 遠藤康夫 (東北大理)        |
| 4. 特別講演 Structure and Coherence of Multilayer Films (40分) | D.B. Mc Whan (ベル研) |

#### 1月18日（水）

AM. 9:30~11:45 (座長 遠藤康夫)

- |                         |            |
|-------------------------|------------|
| 1. FMR による人工格子の磁性 (20分) | 網代芳民 (京大理) |
|-------------------------|------------|

- |                        |             |
|------------------------|-------------|
| 2. NMRによる人工格子の磁性 (20分) | 高梨弘毅 (物性研)  |
| 3. 人工格子の電子状態 (20分)     | 浜田典昭 (物性研)  |
| 4. 表面界面の電子状態 (20分)     | 大西楳平 (日本電気) |
| 5. 人工格子の弹性的性質 (20分)    | 山本良一 (東大工)  |

————昼食————

PM.13:15~15:15 (座長 小川信二)

- |                                  |                 |
|----------------------------------|-----------------|
| 1. Micro Fabrication と輸送現象 (20分) | 福山秀敏 (物性研)      |
| 2. 人工格子による新しい磁性超伝導体 (20分)        | 立木 昌 (東北大金研)    |
| 3. Au-Ge 系の超伝導 (20分)             | 秋浜良三 (新技術開発事業団) |
| 4. 人工格子と超伝導 (実験) (20分)           | 青木亮三 (九大理)      |

————休憩 (15分)————

PM.15:15~16:30 (座長 新庄輝也)

- |               |            |
|---------------|------------|
| 1. コメント (20分) | 寺倉清之 (物性研) |
| 2. 総合討論 (40分) |            |

### 蒸着法による人工格子

京大化研 新庄輝也

蒸着法やスパッターによって2種類以上の物質を交互に規則正しく積層すると、人工的周期を与えた多層膜が生成される。この周期が数原子層程度にまで短くなったものを人工格子と呼んでいる。まず、金属元素どうしの組合せの人工格子合金についてのIntroduction を述べた。筆者らのグループで生成しているFeとMgの多層膜は、本来、液相でも分離し、熱平衡状態では合金が作れない元素どうしの組合せからなるものである。この例が示すように、人工格子の成分となる金属の組合せは状態図とは無関係であり、新物質を作り出す可能性が非常に広く存在する。

筆者らは超高真空蒸着法によって試料を生成しているが、その特徴は次のようである。真空間度は試料生成時で $10^{-9}$  Torr 台を維持し、電子銃加熱によって蒸着を行い、生成速度は約 0.1 Å/sec, 基板温度は約 -50°C の低温に保っている。膜厚制御は IC 6000 膜厚計と連動する 2 シャッター方式であり、各層について膜厚を測定してシャッターの開閉を行う。したがって膜厚は極めて厳密に制御されており、Fe-Mg 系では周期 8 Å, Fe-V 系では 12 Å といった、非常に短い人工周期が実現されている。一方試料生成にかなり時間が費される点が短所であり、積層数は約 200 回が最高である。現在用いている基板はガラスやマイラー膜であるが、X線的には周期性が良好で結晶配向性を持つ試料が得られている。

## スパッタ法による人工格子

東北大金研 藤森啓安

人工格子膜、ないし、人工周期多層膜によって新しい磁性物質や超電導物質を作ろうという目的で、我々はスパッタ法によって種々の多層膜を作り、それらの基礎物性を実験的に研究している。

すでにこのような研究は国内外で多く行われているが、多くの場合、高真空蒸着法を採用している。それは、2, 3原子の厚さまでに周期性を制御しようとすると、界面拡散をほとんど起こさないように膜を作る必要があるからである。スパッタ法は、これに比較して激しい界面拡散をともなうと考えられている。しかし、スパッタ原子の自由行程をガス圧や極間距離によって制御し、拡散を少なくすることができる。また、スパッタ法には合金膜、化合物膜、アモルファス膜が作りやすいという利点がある。したがって、物性的に特徴のある強磁性体、反強磁性体、フェリ磁性体、半導体、超電導体、誘電体を基調とした多層膜、または、それらを組合せた膜を作るのにはスパッタ法の活用も重要である。

我々の主な結果は次の諸点である。1) スパッタ法によって作られる周期膜はどのような構造のものであるかを、 $a\cdot FeC/a\cdot Si$ を例として、X線、FMR、オージェ分光、He後方散乱を駆使して調べた。その結果、界面拡散はあるものの、およそ $\lambda \approx 15\text{ \AA}$ までの周期膜を作ることが出来ることが分った。2)  $a\cdot CoNb/fcc Fe Mn$ で常温で安定な非対称磁化ループを得ることができた。これは、界面の交換相互作用の反映の結果と考えられる。3) Mo/Siでは7Kの超電導が観測され、2次元性を反映したと思われるような $J_c$ 、 $H_c$ の異方性が現れている。

## MBEによる人工格子

関西学院大理工内暉

MBE (Molecular Beam Epitaxy) 法による人工格子の作製技術は、天然の結晶では得られないような新しい物性を探すための一つの手段である。我々は半導体結晶GaAs系の人工格子をMBE法で作製し、その構造と二次元電子物性を調べてきたが、近年、金属、合金の人工格子作製を計画した。とりあげた系はAlAu系であるAlとAuはどちらも面心立方格子でその格子定数もそれぞれ $4.049\text{ \AA}$ 、 $4.078\text{ \AA}$ と似ている。また、これらの格子定数はGaAsの格子定数 ( $a = 5.654\text{ \AA}$ ) の $1/\sqrt{2}$ に近く(格子を $45^\circ$ 面内で、回転すると格子のマッチングがとれる)、GaAs基板上にAlやAuは成長しやすいだろうと考えたからである。事実、GaAs基板上にはきれいなAl、またはAlの人工結晶が作れる。しかしながら、AlとAuを交互に重ねた金属多層膜は半導体多層膜ほどの完全結晶にならない。AlとAuの表面

張力の差などが問題であると考えられるが、今後の研究がまたれる。

### Fe/V, Fe/Mg 人工格子の構造

阪大基礎工 藤井保彦

磁性的興味から真空蒸着法により製作された表記 2 種類の人工格子薄膜 (ASF) につき、面内および面間結晶構造を調べる目的で X 線回折実験を行った。これら 2 つの ASF は前者が固溶体を作るのに対して後者はほとんど溶け合わない組合せであることが知られており、好対照をなしている。

Fe/V : すでに遠藤等<sup>1)</sup>の膜面に垂直方向 ( $Q_{\perp}$ ) の系統的な X 線回折実験により数種類の膜厚につき Fe (110)<sub>bcc</sub> / V (110)<sub>bcc</sub> の stacking と coherent interface (CIF) の存在が観測されている。今回  $\{ \text{Fe} (8 \text{ \AA}) | \text{V} (24 \text{ \AA}) \}_{90}$  の ASF につき面内 ( $Q_{//}$ ) における (110) 回折線が  $Q_{\perp}$  と同様 Fe, V の平均位置にたゞ一本だけ存在することを観測し、この ASF が  $4d/d \approx 6.7\%$  の大きな d-spacing misfit を持つにもかかわらず完全な CIF (epitaxial growth) を形成することを見出した。

Fe/Mg : この系は bcc / hcp の組合せであるが Mo/Ni<sup>2)</sup>, Nb/AI<sup>3)</sup> で観測されている (110)<sub>bcc</sub> / (111)<sub>fcc</sub> の stacking および (111)<sub>fcc</sub> と (00·1)<sub>hcp</sub> の結晶学的類似性から Fe (110)/Mg (00·2) が予測される。しかし、この場合  $4d/d \approx 22\%$  の大きな misfit となり、ここも CIF を作ると思われない。実験は  $\{ \text{Fe} (15) | \text{Mg} (30) \}_{60}$ ,  $\{ \text{Fe} (12) | \text{Mg} (24) \}_{100}$ ,  $\{ \text{Fe} (4) | \text{Mg} (16) \}_{200}$  の 3 種類について行ない、第 1 番目の ASF については  $Q_{\perp}$ ,  $Q_{//}$  両方向の回折パターンから (110)<sub>bcc</sub> / (00·2)<sub>hcp</sub> の stacking を確認した。しかし大きな d-spacing misfit を反映して  $Q_{\perp}$  方向には bulk の Fe (110), Mg (00·2) の附近にそれぞれ回折線が現われ、特に前者には二次のサテライトも観測された。非常に拡がって線幅を step model<sup>4)</sup> で解析した結果、X 線的にみた coherent length はせいぜい 2 ~ 3 bilayers と求まった。この結果からこの ASF は Fe (110) = Mg (00·2) 面が余り相関を持たずに積み重なっていると思われる。他の 2 種類の ASF については  $Q_{\perp}$  方向に Mg (00·2) 反射のみ現われ、Fe からのシグナルが観測されないため stacking texture は未知である。しかし 3 者共小角散乱は高次まで観測され、ASF が設計通りできていることは確認済である。

なお本研究は新庄・川口 (京大・化研), また一部遠藤 (東北大・理), この共同研究であり、阪大では大西, 石原, 山田が参加している。

(1) Y. Endoh et al : Subwitt to Appl. Phys. Lett.

(2) M. R. Khan et al : Phys. Rev. B 27, 7186 (1983)

- (3) D. B. Mc Whan et al : J. Appl. Phys. 54, 3886 (1983).
- (4) A. Segmüller and A. E. Blakeslee : J. Appl. Cryst. 6 19 (1973).

### Fe-V, Fe-Mg 人工格子の 磁性とメスバウアー効果

京大化研 川 口 建 二

超高真空蒸着法によって作成した Fe - V 及び Fe - Mg 系人工格子の磁性をメスバウアーパルス分光法と SQUID 磁力計による測定によって検討した。Fe - V 人工格子は bcc 構造を示し、(100) 配向を持つ。一方 Fe - Mg では Fe (110) と Mg (001) が積層している。いずれも約 10 Å 程度まで短い人工周期が生成できることがわかった。V にサンドイッチされた Fe 層は 8 Å 迄は強磁性で、界面第一層で磁化が約 30% 減少しているモデルで説明できるが、6 Å 以下の厚さになると、局在モーメントを持たない成分が現れ、2 Å ではほとんど非磁性となる。

Fe - Mg では Fe の厚さが 4 Å でも 4.2 K では完全に強磁性であり、バルクの鉄と近い内部磁場が見られる。8 Å 以下の厚さでは、磁化の熱的なゆらぎのため、室温では超常磁性に似た振舞を示す。自発磁化が失なわれる温度は測定手段の観測時間に関係し、メスバウアー効果と SQUID ではかなり異なってくる。中性子測定についても言及し、完全な周期構造を持つ部分を観測する中性子回折と、試料全体を観測する SQUID の磁化の外部磁場依存性が一致することを報告した。

### 中性子回折による人工格子の磁性研究

東北大理 遠 藤 康 夫

人工格子の磁性、特に界面磁性の影響をしらべるのに偏極中性子回折が非常に有効であることに思いついたのは、1976 年に発表された平川、佐藤両氏の強磁性微粒子の表面磁性についての論文に依る。偏極中性子を用いて flipping 比を測定すると、オングストロームつまり原子層単位の磁化の変化が測れるからである。微粒子ではその粒子サイズを揃えることが極めて困難であるので結果をあいまいにしているが、もし人工格子多層膜をつくればこの困難はとりのぞかれる。最も重要な点は (強) 磁性 - (非) 磁性層の構造不整にそれ程結果が敏感でなく、むしろ (強) 磁性層の原子層毎に磁化の値が分布していることに敏感な点である。理想的な規則人工格子 (ステップ界面) 膜に依ってその原理を話し、かつ研究の現状を述べる。又メスバウアー効果や NMR に依る内部磁場の結果とも比較を試みる。

## Structure and Coherence of Multilayer Films

AT T BELL LABORATORIES D. B. MCWHAN

X-ray diffraction studies of multilayer films are reviewed. The minimum interface thickness in  $(\text{GaAs})_n(\text{AlAs})_m$  multilayers is approximately two monolayers so that the chemical modulation in a nominal alternating monolayer film is  $\sim 35\%$ . The crystallographic direction of the chemical modulation in metallic multilayers can be controlled by the appropriate choice of the plane of the substrate surface and the temperature. A geometric model for multilayers of alternating fcc and bcc metals is presented. The interface between (111) fcc and (110) bcc usually has one direction with a good lattice match leading to a parallel array of misfit dislocations. In principle a single crystal can be grown because the sixfold degeneracy of the (111) fcc regions is removed by anisotropic coherency strains. A correlation between the observed anomalies in the elastic properties and the coherency strain as a function of modulation wavelength is presented.

## 強磁性共鳴(FMR)による人工格子の磁性

京大理 網代芳民

京大化研高田研究室では新庄教授を中心に人工格子の研究が行われている。ここでは、新庄グループと共同で実験が進行中の強磁性多層薄膜でのFMRについて報告する。試料の2種類の原子を数 $\text{\AA}$ から数十 $\text{\AA}$ 毎に繰返し100層内外蒸着したもので、人工的周期性の確証など試料についての詳細は関連する講演で述べられている。これまでFe-Pd, Fe-Sb, Fe-V, Fe-Mg系についてFMRの観測を行った。なお、試料作製は化研の細糸、川口両氏による。詳細な実験結果は講演で示したが、我々の試料ではFeの厚み及び相手原子の組合せに顕著に依存するwell definedな单一信号が得られた。その共鳴磁場や線幅から磁化の厚み依存性や磁化分布を議論することができる。

個々の試料系について個性的な実験事実を述べることは紙数の関係でできないが、種々の実験事実を総合的に考察すると試料の磁気的な一様性は良好で、試料中の各磁気層は圧倒的に同一のものが繰り返し層を成していることを示している。即ち、磁気的な周期性が一様である。一つの磁気層について言えば、相手原子の組合せに応じて界面の影響で一定の磁化分布が生じ

ているが、その分布が一つの試料中の全ての磁気膜について同じであることを示している。今後、極低温での実験も合わせて、より系統的な実験を行うことによって F M R の実験から重要な情報が得られることが期待できる。

## NMRによる人工格子の磁性

物性研 高梨 弘毅

NMR は、その観測量が局所的な電子状態を強く反映するので、人工格子の磁性の研究に対して、有力な手段となり得る。本講演で取り上げる試料は、Fe - V 多層膜及び Co - Sb 多層膜の 2 種であって、ともに京大化研で作製されたものである。Fe - V 多層膜では<sup>51</sup>V 核の NMR を行って、非磁気的な V が強磁性である Fe と接することで界面においていかなる影響を受けるかに注目し、一方 Co - Sb 多層膜では<sup>59</sup>Co 核の NMR によって、強磁性の Co が非磁気的な Sb と接することでいかなる影響を受けるかに注目した。以下、2 つに分けて、実験結果とその解釈の概要を記す。

### ① Fe - V 多層膜 (Fe (15 Å) - V (30 Å)) での<sup>51</sup>VNMR

スペクトルとして、強磁性に秩序化したサイトに対応する零磁場スペクトルで、93 MHz 付近と 44 MHz 付近に 2 つの山が見られ、一方非磁気的なサイトに対応するナイトシフトゼロの近傍 (bulk の V の共鳴位置近傍) にも 1 つの山が得られた。浜田氏らのバンド計算に基づいて界面付近での内部磁場分布を評価すると、これらの実験結果は、凹凸の全くない理想的な界面を想定した下では解釈されず、界面は合金層になっており 3 層程度にわたって凹凸が存在するというモデルとよく一致することが示された。

### ② Co - Sb 多層膜での<sup>59</sup>Co NMR

ここでは、Co (30 Å), Co (15 Å), Co (8 Å), Co (4 Å) の各々と Sb (20 Å) を多層構造にした 4 種の試料において、実験を行った。その結果、全ての試料で、非磁気的なサイトに対応すると考えられる信号が観測され、一方強磁性サイトに対応する信号は、Co (30 Å) や Co (15 Å) では観測されるが、Co (8 Å) や Co (4 Å) で観測されなかった。これらのことから、CoSb 多層膜では、Co 層の内部では bulk と同じく強磁性になっているが、Sb と接する界面では磁気を失っていることがわかる。更に、スペクトルの形の解析から、その界面では、CoSb<sub>2</sub> ないしは CoSb<sub>3</sub> のような化合物ができている可能性が示唆される。

## 人工格子の電子状態

物性研 浜田典昭

Fe V 人工格子について次の報告を行った。

平らな界面についてバンド計算を行ない、原子磁気モーメントを算出した。Fe 及びV原子は界面第一層でそれぞれバルクとかなり異なる磁気モーメントを持つが、第二層目からはバルクとあまり変わらない。

バンド計算の結果及び前に行ったランダム合金の計算結果より、Fe 及びVの原子磁気モーメントについて簡単なモデルが成立することを示した。

このモデルに基づいて、内部磁場分布の解析を行ない、界面は平らなものではなく、1 原子層程度の原子配列の乱れがあることがわかった。解析した数個のサンプルについて、同程度の界面の乱れを得た。この原子配列は蒸着過程から来る自然な乱れであると結論した。

## 表面・界面の電子状態

NEC 基礎研 大西楷平

Fe (001) 自由表面と Ag monolayer を overcoat した Ag / Fe (001) の界面の電子状態と磁性を、thin film FLAPW 法による理論計算に基いて議論する。(1) Fe (001) 表面では 30%, Ag / Fe (001) 界面では 10% 程度の磁気モーメントの増加が予測されること、(2) Ag overcoating の影響は界面のみに限定されていることが計算の結果得られている。 contact hyperfine field は、(1) Fe (001) 表面では内部にくらべて減少していく、それは表面における conduction electron の寄与が atom-like の正の寄与をしているためであること、(2) 界面をつくることによりその効果が負の寄与をし、bulk like のふるまいをすること、(3) thin film の中心にある bulk like Fe 原子の hyperfine field は、-359 (K Gauss) (-366 (Fe (001))) の非常によい値が得られていること、(4) core electron の hyperfine field と磁気モーメントは非常によくスケーリングされていること、等が主要な計算結果である。hyperfine field は自由表面と界面では、S 電子のふるまいが atom like と electron gass like のちがいに相当する効果が現われていて、Mössbauer 効果から得られた field の大きさを用いて直接自由表面の磁性の評価をすることは適切ではないことが結論される。

## 人工格子の弾性的性質

東大工 山本良一, 篠嶋 妥  
今福宗行, 堂山昌男

ある種の合金多層膜 ( $\text{Ag}/\text{Pb}$ ,  $\text{Cu}/\text{Au}$ ,  $\text{Cu}/\text{Ni}$ ,  $\text{Au}/\text{Ni}$ ,  $\text{Cu}/\text{Pb}$  など) では, 積層方向の弾性率は各成分金属の, また, 固溶体の弾性率よりも高い場合のあることが報告されている。この増加の程度は成分金属の組合せおよび多層周期  $\lambda$  に依存している。この効果をブリルアンズーン・フェルミ面相互作用によって定性的に説明しようとする試みもあるが, 本研究では適当な原子間二体力を仮定し, 計算機シミュレーションにより合金多層膜の具体的な界面原子配列を求め, この近似の範囲内で積層方向の弾性定数を直接に計算した。例として,  $\text{Au}/\text{Ni}$  系を取り上げた。 $\text{Au}-\text{Au}$ ,  $\text{Au}-\text{Ni}$ ,  $\text{Ni}-\text{Ni}$  原子間ポテンシャルとして, Morse ポテンシャルを用いた。fcc 格子の (111) 面の積層した  $\text{Au}(3)/\text{Ni}(3)$ ,  $\text{Au}(5)/\text{Ni}(5)$  の多層構造模型を計算機内に分子動力学法によってシミュレートした。[111] 方向の弾性率  $Y$  は均一変形  $\vec{r} \rightarrow \vec{r}' (1 + \delta)$  によるエネルギーの増分  $W$  より  $Y = 2W/\delta^2$  によって求められる。このようにして求めた Ni と Au の  $Y$  の値は 0.395, 0.164 TPa で実験値 0.391, 0.190 とはほぼ合っている。 $\text{Au}(3)/\text{Ni}(3)$ ,  $\text{Au}(5)/\text{Ni}(5)$  については 1.78, 1.36 TPa とかなり高く, 実験値 ( $\lambda = 15\text{\AA}$  で  $Y = 0.46 \text{TPa}$ ) の 4 倍にもなっている。これは  $\text{Au}-\text{Ni}$  間の原子間力の取り方が適当でないせいと思われる。しかし,  $\lambda$  が大きくなれば  $Y$  の値が減少することは正しく再現されている。多層膜の積層方向の弾性率増大の主たる原因是, 異種金属界面の歪み (Au の格子定数は Ni よりも 16% 大きい) が周期的に存在することであると考えられる。界面原子配列, 格子振動, 電子状態などを具体的な構造模型に基いて議論するのが次の課題である。

## Microfabrication と輸送現象

物性研 福山秀敏

最近の MBE の技術は, 均一で厚さのそろった金属膜の作成を可能にしている。このようにして作られた膜は当然輸送現象に於て, 2 次元的な性格を顕著に示す。この種の膜を更に lithography 等により加工し, 1 次元的な導体を作成する努力が精力的になされている。こうして作成された金属の微細構造が示す性質は興味深い。特に, 超伝導, 磁性を示す系では, それが bulk とは本質的に異っている可能性がある。更に次元を限られた系ではアンダーソン局在が大切な役割を果すので, この局在効果と種々の相転移の絡み合いが大切な問題となる。實際, 最近, 超伝導薄膜の転移温度が膜厚に逆比例することが実験的に見事に示され, それが弱局在領域の微視理論で説明されている。

## 人工格子による新しい磁性超伝導体

東北大学金属材料研究所 立木 昌

2種類の物質を交互に積み上げて人工格子を作った場合、表題の人工格子としては次のようなものが考えられる。(1)  $\text{HoMo}_6\text{S}_8$ ,  $\text{ErRh}_4\text{B}_4$  のような強磁性超伝導体と  $\text{PbMo}_6\text{S}_8$ ,  $\text{LuRh}_4\text{B}_4$  のような非磁性超伝導体との組合せ、(2) 強磁性超伝導体と絶縁体との組合せ、(3)  $\text{Ni}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{EuS}$  のような常伝導磁性体と  $\text{Nb}$ ,  $\text{V}$  のような非磁性超伝導体との組合せ、等である。

$\text{HoMo}_6\text{S}_8$ ,  $\text{ErRh}_4\text{B}_4$  では  $\text{Ho}$ ,  $\text{Er}$  の希土類イオンが磁性を荷い、 $\text{Mo}$ ,  $\text{Rh}$  の d 電子が超伝導を荷っている。バルクの試料では希土類イオンの磁化が出ると、磁化は超伝導電流を誘起し電流は磁場を作る。この磁場は磁化と反対方向であるため、両者の相互作用は系のエネルギーを上げ強磁性と超伝導の共存は起りにくい。しかし、強磁性超伝導と絶縁体の人工格子で強磁性超伝導体の膜厚が London の侵入度  $\lambda_L$  より薄いときは、上述の遮蔽磁場は弱められるので強磁性と超伝導の共存が起り得る。膜厚を厚くしていくと sinusoidal 的に変化する磁化と超伝導の共存が現れる。強磁性超伝導体と非磁性超伝導体の人工格子に磁場を加え、渦糸は強磁性超伝導体中に位置する方が安定なので、この膜は渦糸の強力な pinning center として働く。この人工格子を使うとかなり大きな臨界電流を得ることが可能である。強磁性超伝導体と絶縁体で作った接合のジョゼフソン効果も、ジョセフソン電流と磁化との相互作用によって特異なものになることが期待される。

## Au - Ge 超格子膜の超伝導

新技術開発事業団 秋浜良三

最近の真空技術、蒸着技術の進歩は原子のオーダーで蒸着をコントロールすることが出来、数オングストロームの周期で異種金属を交互に規則正しく配列することが可能となった。このような装置を用い Au と Ge を低温基板上に  $\text{Au} (10\text{\AA}) / \text{Ge} (13\text{\AA}) / \text{Au} (10\text{\AA}) \dots$  と交互に規則正しく配列し、人工的な積層超格子構造を作ってやると約 2 K で超伝導を示し、奇妙なことに、一旦超伝導になった後、更に温度を下げるとき超伝導状態がこわれ、常伝導状態に戻り、更に温度を下げるとき再び超伝導状態に復帰する（臨界温度  $T_c$  を 3つ持つ）という新しい超伝導現象が見出された。これ等の典型的な例を図 1 に示した。

構造の特殊性から通常の三次元超伝導体と異質な準二次元超伝導がこの系で実現している可能性があり、臨界磁場  $H_c$  の異方性を検討した。図 2 に示したように、磁場を膜に平行にかけた場合の臨界磁場  $H_{c\parallel}$  と垂直にかけた場合の臨界磁場  $H_{c\perp}$  に大きな違いが観測された。この結果から KLB 理論に基づいて超伝導コヒーレント長  $\xi_\perp (0)$  と  $\xi_\parallel (0)$  を類推すると  $\xi_\perp (0) \approx 40\text{\AA}$ ,  $\xi_\parallel (0) \approx 200\text{\AA}$  という結果が得られた。 $\xi_\perp (0) \approx 40\text{\AA}$  という値は

layer 間の長さより長いため、準二次元超伝導体というよりも異方的三次元超伝導体と思われる。

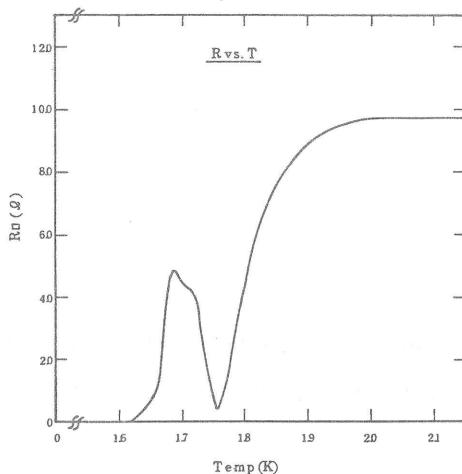


図 1

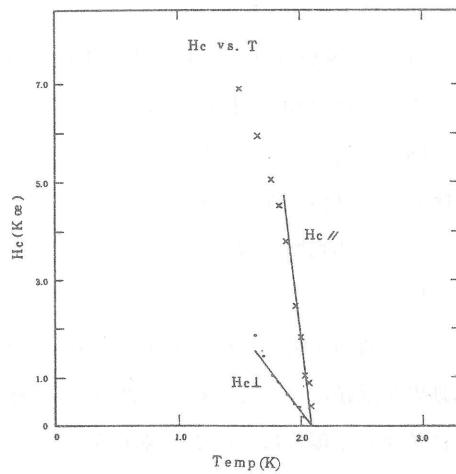


図 2

この系の超伝導の発生機構及び reentrant な現象を理論的に説明することは現時点では出来ないが、構造の不安定と超伝導の共存、競合といった観点から興味がもてる。

### 人工格子と超伝導

九大理 青木 亮三

人工格子を利用して超伝導特性の新しい可能性を探ることは、すでにいくつかの試みがなされているが、磁性ほどには確かな歩みは未だ得られていない。

もっともそれ自体明確な超伝導を示す層を他の金属や磁性体の薄膜と接合させて超伝導近接効果を追求することは、元来、超伝導電子の波動関数の拡がり距離 ( $\xi$ ) および超伝導磁束の渦径 ( $\sim \lambda$ ) がいづれも  $10^2 \sim 10^3 \text{ Å}$  程度に大きいので、試料としては人工格子というよりはむしろセミマクロなサンドイッチ層が対象となる。そのためすでに多くの研究がなされているが本研究会では特に触れないこととする。

ここでは Ginburg model などで知られているように、伝導電子系 (A) と分極性誘電層 (B) を密接させた多層薄膜構造により、在来のフォノン媒介に依らずに電子分極性励起子による新しい超伝導電子間相互作用の可能性を追求することについて検討する。

この系では分極励起子の伝導電子層内での減衰から (A) を  $10\text{ Å}$  以下の一様な極薄膜にして、しかも清浄界面により (B) と密着させることが要求される。

過去のいくつかの実験例はいづれも新しい相互作用の evidence を得ていないが、この実験上の問題点を再検討して、最近の人工格子作製技術を用いることにより、理論的 model の要求にさらに近い条件でこれらの実験を再試行することに意味があると考えられる。

## 物性研究所談話会

日 時 1984年1月12日（木）午後4時～

場 所 物性研Q棟1階講義室

講 師 石井武比古

(所属) (物性研)

題 目 共鳴型光電子分光

要 旨：

最近、内殻電子励起に伴って生ずる諸々の多体効果のうちで、内殻励起と外殻光電子放出の共鳴効果が話題になっている。物性研SOR施設で行われた実験を中心にして、共鳴効果と、それに関連した現象について解説する。

日 時 1984年1月13日（金）午後13時30分～14時30分

場 所 物性研Q棟1階講義室

講 師 H. G. Drickamer

(所属) (University of Illinois, Urbana, Illinois U.S.A.)

題 目 Electronic Phenomena at High Pressure

要 旨：

Pressure is a powerful tool for investigating electronic phenomena. The basic effect of pressure is to decrease interatomic or intermolecular distance and to increase overlap among the outer electronic orbitals. Since different types of orbitals have different spacial characteristics their energies are perturbed in different degrees. This "pressure tuning" can be used to characterize electronic states or excitations to test theories of electronic phenomena and to induce electronic transitions to new ground states with different physical and chemical properties. A few examples will be given to illustrate these categories and to demonstrate the essential unity of physics and chemistry at the level of electronic phenomena.

日 時 1984年2月13日（月）午後4時～

場 所 物性研Q棟1階講義室

講 師 Dr. R. L. Aggarwal

(所属) (MIT F. Bitter National Magnet Laboratory)

題 目 Magneto-optics in Semimagnetic Semiconductors

要 旨：

同氏らのグループが最近行っている、半磁性半導体  $Cd_{1-x}M_xSe$  の吸収端近傍での強磁場下磁気光反射スペクトル、特に励起子と交換相互作用の問題の研究についてお話しいただく予定です。

講 師 1984年2月16日(木)午後4時～

場 所 物性研Q棟1階講義室

講 師 B. Horovitz

(所属) (Ben-Gurion Univ.)

題 目 Phonons, solitons and breathers in polyacetylene

要 旨：

Horovitz 氏は永いことバイエルス系での非線型励起についての理論的研究をしておられます。今度、電総研近藤淳氏の招きで来日されたのを機会にポリアセチレン系についてお話頂く予定です。

### 昭和58年度 後期短期研究会予定

研究会名	開催期日	参加予定員	提案者
ロックイン転移 と物性異常	3月12日～ 3月13日 (2日間)	60名	○中 村 輝太郎(東大・物性研) 石 橋 善 弘(名大・工) 福 山 秀 敏(東大・物性研)

○印は提案代表者

## 人 事 異 動

発令年月日	氏 名	異 動 事 項	現(旧)官職
58. 11. 7	酒 井 明	研究休職 (58.11.7～59.9.30)	極限物性部門 表面物性助手
59. 1. 1	田 中 虔 一	極限物性部門表面物性助教授に配置換	北大工学部 助 教 授
59. 1. 1	前 田 康 二	工学部講師に昇任	凝縮系物性部 門 助 手
59. 1. 1	寺 井 佳奈子	理論部門事務官に採用	
59. 2. 1	齋 藤 軍 治	凝縮系物性部門助教授に昇任	分子科学研究 所 助 手

## Technical Report of ISSP 新刊リスト

Ser. A.

- No. 1391 Nuclear Magnetic Relaxation in Nearly Ferromagnetic  $\text{YCo}_2$  by Kazuyoshi Yoshimura, Tadashi Shimizu, Masashi Takigawa, Hiroshi Yasuoka and Yoji Nakamura.
- No. 1392 Electron Spin Resonance in Second-Stage  $\text{NiCl}_2$  - Graphite Intercalation Compound. by Masatsugu Suzuki, Kei-ichi Koga and Yoshinobu Jinzaki.
- No. 1393 Magnetization Process of  $\text{Hf}_{0.8}\text{Ta}_{0.2}\text{Fe}_2$  in Strong Pulsed Magnetic Fields. by Hironori Nishihara, Giyuu Kido, Yoshikazu Nishihara, Masayuki Itoh and Hiroshi Yasuoka.
- No. 1394 Surface Dislocation of  $\text{MgO}$  (100) Studied by Secondary Electron Emission Spectroscopy and Cathodoluminescence Spectroscopy. by Hidetoshi Namba and Yoshitada Murata.

- No. 1395 Multielectron Satellites and Spin Polarization in Photoemission from Ni Compounds. by Atsushi Fujimori, Fujio Minami and Satoru Sugano.
- No. 1396 Core-Exciton Induced Resonant Photoemission in the Covalent Semiconductor Black Phosphorus. by Masaki Taniguchi, Shigemasa Suga, Masami Seki, Hirokazu Sakamoto, Hiroshi Kanzaki, Yuichi Akahama, Shoichi Endo, Shin-ichi Terada and Shin-ichiro Narita.
- No. 1397 NMR Study of Microscopic Magnetic Properties of  $V_6O_{13}\cdot$  by Masayuki Itoh, Hiroshi Yasuoka, Yutaka Ueda and Kōji Kosuge.
- No. 1398 Picosecond Energy Relaxation Processes on Excitons in CdSe. by Yasuaki Masumoto and Shigeo Shionoya.
- No. 1399 A Model of Valence Fluctuating Systems of Metallic Rare-Earth Compounds. by Fusayoshi J. Ohkawa.
- No. 1400 Impurity-Induced Soliton Formation in Quasi-One Dimensional Superconducting State. by Hidetoshi Fukuyama, Yoshikazu Suzumura and Tetsuro Saso.
- No. 1401 Orientational Rotation of Chemisorbed K Monolayers on Cu (001). Tetsuya Aruga, Hiroshi Tochihara and Yoshitada Murata.

Ser. B.

- No. 19 Design Study Note of Super SOR (a 1 GeV Electron Storage Ring for Intense Synchrotron Radiation). by Yoshihiko Miyahara, Goro Isoyama, Seiji Asaoka, Akira Mikuni, Hiroshi Nishimura, Masami Seki, Shigemasa Suga, Masaki Taniguchi and Hirochi Kanzaki.

## 編 集 後 記

今回も御多忙中無理をお願いして、今春退官される小林先生から、春のようにさわやかで生々とした御寄稿を頂きました。

3つの研究会報告の中の2つは、いずれも、新しく注目され始めた物質に、残りの1つは宇宙物理学に関係し、物性研究の新しい流れを感じさせてくれます。

次回の原稿締切りは4月10日です。

〒106 東京都港区六本木7丁目22番1号

東京大学物性研究所

菅野 晓

秋本俊一

