

# 報告

## 第5回 市民講座「宇宙と物質の神秘に迫る ～物理学最前線～」の報告

村田仁樹（京都大学基礎物理学研究所）

### 1. 特集テーマ「物理学のこれから」

2007年9月30日（日）、京都大学21世紀COE「物理学の多様性と普遍性の探求拠点」主催の市民講座「宇宙と物質の神秘に迫る～物理学最前線～」が京都大学百周年時計台記念館にて開かれました。5回目となる今回は、本21世紀COE最終年度ということもあり、特集テーマを「物理学のこれから」と題して、田中耕一郎教授（物性物理）、長田哲也教授（宇宙物理）、國廣悌二教授（原子核理論）という物理学・宇宙物理学の未来を担う気鋭の研究者3名に、各分野のこれまでの発展や将来の展望について熱く語っていただきました。

講演会場である時計台記念館大ホールには200名を超えるたくさんの方々が集まりました（図1）。各講演終了後に設けられた質疑応答の時間には、予定時間の15分という枠に収まりきれないほどたくさんの質問が寄せられました。質問を寄せていたのは中高生から年配の方まで幅広い年齢層の方々に、最先端の物理学に対する一般の方々の関心の高さが見てとれます。時間内にできなかった質問についても、用意された紙に書いて投稿できるように配慮がなされ、そうして投稿された質問のうちいくつかは、3講演の終了後から閉会までの時間に各講演者が回答していました。また、閉会後の茶話会でも、さらに詳細な質問をしようという人々が講演者を囲んで賑わっていました。本稿では、今回の市民講演について報告します。



図1 質疑応答の様子。老若男女を問わずたくさんの方々が来場されました。



図2 田中耕一郎教授の講演

### 2. 「光で物質をあやつる」(田中耕一郎教授)

各講演のはじめに司会の柴田一成教授から講演者についての簡単な紹介が行われました。それによると、最初の講演者である田中教授（図2）は1990年に京都大学で博士号を取得された大変若い研究者ということで、今回のテーマ「物理学のこれから」を語るに最もふさわしい方の一人と言えるでしょう。

私たちの日常生活では光を「見る」という動作は欠かせないものとなっています。物理

学においても、光を‘見る’という行為によって遠くにある星の位置や温度、組成といった情報を私たちは知ることが出来ます。

これに対して、光を‘あやつる’ことで物質の特性を変えてしまおう、という新しい試みに田中教授は挑んでいらっしゃいます。講演では、光とは何か、光からどのようにして物質のもつ情報を取り出すか、といったことについて非常に丁寧に説明された後、本題である光で物質をあやつる話について、実験の画像などを交えながら分かりやすく解説してくださいました。

### 光とは何か

「光は粒子である」、ニュートンは著書『光学』の中でこう主張しています。実際、反射や屈折といった現象は最小時間の原理（フェルマーの原理）から説明できます。最小時間の原理とは、「光はかかる時間が最小となるような経路を選択する」というものです。屈折も、媒質によって光の速度が異なる、とすることでこの原理から矛盾なく説明できます。こういった背景から、18世紀までは光は波ではなく粒子であると考えられていました。

しかし、19世紀に入ると状況は一変します(図3)。ヤングによる干渉実験や回折など、粒子説では説明が困難な現象が次々と見つかります。そして、光の波動説に決定打を与えたのがマクスウェルによる電磁波の発見です。彼はマクスウェル方程式から電磁波の存在を予言し、後にこの電磁波こそが光であると考えられるようになりました。

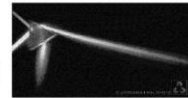
このようにして今度は光の波動説が信じられるようになりましたが、20世紀にはアインシュタインによって再び光の粒子説が脚光を浴びることになります。彼は光電効果を理由に光の粒子性を指摘します。その後、量子力学が構築されると、光は粒子性と波動性とを併せ持つ‘光量子’として認識されるように

なります。そして現代では、量子電磁力学において光は「荷電粒子間の電磁相互作用を担う基本粒子」とみなされています。

## 光の性質

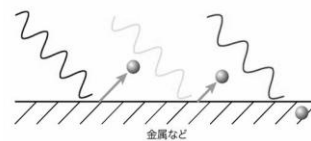
19世紀にはいると波動説が優位になった

- 干渉
  - Thomas Young (1773-1829)
  - ダブルスリットの実験、波長
- 回折
  - Fraunhofer (遠いところでの回折)
  - Augustin Fresnel (1788-1827) (偏光依存性)
- 電磁波
  - Maxwell (1831-1879)



## 光量子仮説

光にはある決まったエネルギーの単位の粒のような性質がある



光電効果

金属に波長の短い光を当てると電子が飛び出してくる現象

この現象は光が波であるすると説明できない。アインシュタインは光には粒子のような性質もあるという「光量子仮説」を提案し、何百年にも渡る「光は波か粒子か」という論争に決着をつけた。

アインシュタインはこの光量子仮説に関する業績によって1921年にノーベル賞を受賞

図3 光に対する理解の変遷

### 光で物質を見る

物質にはそれぞれ固有の振動モードが存在して、光が照射されるとある波長の光は物質に吸収され、またある波長の光は反射される、という具合にして我々は物質固有の色を見ることが出来ます。光の性質が分かると、それを技術的に応用しようという試みも盛んに行われるようになります。鉄スピンドルクロスオーバー錯体という物質では、温度の変化により原子配列が変化することで固有振動数が変わり、色が変わります。また、蛍光塗料などで使われる蛍光体という物質では、光を照射して励起させた分子が中間的な励起状態を経て

もとの状態に戻ります。このときに放出する光を我々は見ているのですが、途中で中間状態を経ることにより長時間光を放ち続けることが出来ます(図4)。

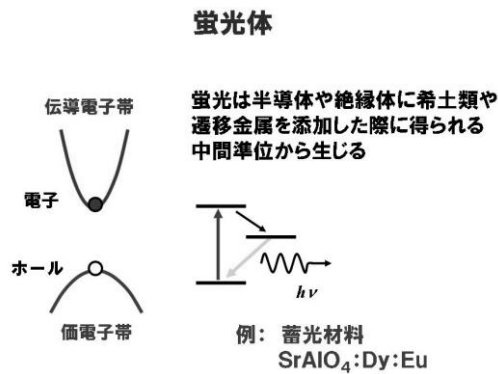


図4 蛍光体の概念図

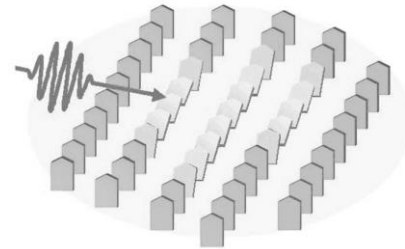
### 光で物質をあやつる

光は相互作用を担う基本粒子だと述べましたが、その相互作用をうまく利用することで物質を制御しようというのが、田中教授の研究テーマです。光誘起相転移という現象では、物質中のある一つの原子に光を照射することでマクロな物性が変化します。この現象は、もともと物質の持っている非線形性を利用することで一原子の変化から将棋倒しのよう他の原子の変化を誘起することで起こると言われています。必要なエネルギーは原子一つを変化させる分だけなので、エネルギー効率が非常に高いことがこの現象の特徴です(図5)。

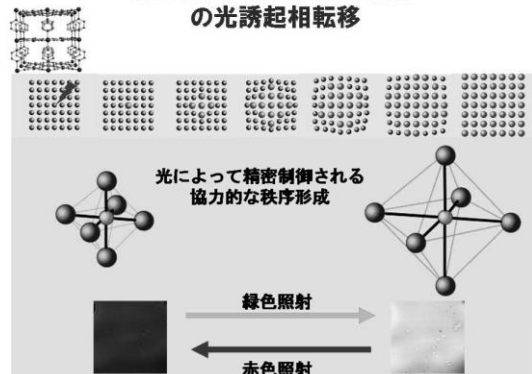
先述の鉄スピントロニクスオーバー錯体でも光誘起相転移によって色を変化させることが出来ます。さらに面白いことに、色の変化に伴って体積が13%も変化します。この変化によって近くにある結晶を飛ばすことができます。これをうまく応用すれば、エネルギー効率の非常に高いモーターをつくることも夢ではありません。

### 光誘起相転移

協力的相互作用を利用して将棋倒しのように変化を誘起する  
(もともと物質のもっている非線形性を利用する)



### 鉄スピントロニクスオーバー錯体の光誘起相転移



### 鉄スピントロニクスオーバー錯体の光誘起相転移

1 shot パルス光による相転移誘起  
13%にもおよぶ体積変化は結晶を飛ばす

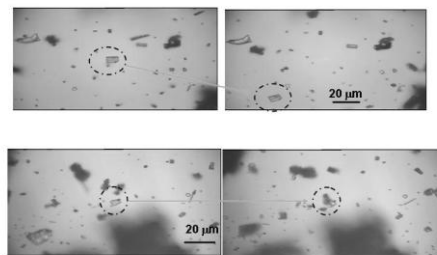


図5 光で物質をあやつる光誘起相転移の様子

これまでは‘見る’ことが中心だった光を用いて物質を制御する、という田中教授の研究には、単に基礎研究という意味だけでなく技術的応用という面からも大変興味深く、これからもますます目が離せません。



図6 長田哲也教授の講演

### 3. 「赤外線で見通す銀河系 一木も森も見たい」(長田哲也教授)

星形成や銀河形成という個々のトピックスについて掘り下げていくだけでなく、宇宙物理学の全貌を知りたい。本講演の副題「木も森も見たい」は長田教授(図6)のそんな思いから来ています。講演では、現在の宇宙観が確立するまでの歴史的な話や観測技術の発展、そしてこれから期待される観測計画などについて説明されました。図や写真などを巧みに用いて専門用語の使用を出来るだけ避け、大学の物理を知らない方でも実際の宇宙の様子を頭の中でイメージしながら理解できるように配慮されていました。そうでありながらかつ最先端の物理学を取りこぼすことなく正確に伝えられるようにと、話の内容や構成などにおいて随所に工夫が伺えました。

#### 宇宙観の確立

宇宙物理学では、宇宙の状態、例えば天体の位置や速度、組成などが観測対象となります。夜空を見上げると、あらゆる星は東から上り西へ沈んでいきます。これは、相対的に地球が天体に対して回転していることを意味しています。では地球と天体のどちらが回転しているのか、その手がかりを与えてくれるのが惑星です。何年もかけて継続的に観測を行うと、惑星は天球面上をあるときは西から

東へ(順行)、またあるときは東から西へ(逆行)と動いていくことが分かります。この事実を天動説の立場から説明するのは非常に難しく、一方、地動説では、地球も惑星も同じようにして太陽の周りを公転しているとするので簡潔に説明できます。

こうして地動説が定着すると、では星はいったい地球からどれほど離れたところにあるのか、という疑問が自然と湧き起こります。地球と星との距離を求めるときに我々が直接観測するのは、年周視差という量です。年周視差とは、地球の公転から生じる視差のことで、これを測定することで星との距離を求めることができます。ところが、最も近い星である $\alpha$ ケンタウリでさえ、年周視差はわずか0.74秒角という小さな値になるため、観測は容易ではありませんでした。実際、ティコ・ブラーエは年周視差が観測できないことを理由に地動説を否定していました。それから約200年もの時を経て、1838年にベッセルの手により初めて年周視差が観測されました。しかし、さらに遠い星の位置を知るためには、より精密な測定が必要になりますが、大気などの障害物がある地球上では、精密な観測は困難です。そのため、1989年にヒッパルコス衛星が打ち上げられ、宇宙空間からの精密な測定が可能になりました。

#### 銀河系の観測

天の川銀河の星を数えてみると、我々のいる銀河が薄いディスク状になっていることが分かります。そのディスクの中心部に棒状の構造を持ち、その棒の端から渦を巻くようにして無数の星が並んでいます。

銀河系の中心を詳しく継続的に観測すると、銀河系の中心付近にある星の動きが読み取れます。中心部をよく見てみると、不思議な現象が確認できます。赤外線で見ると中心は真っ暗で何も見えませんが、その何も見えない

ところに星が近づくと、星は急速に加速され、その周りをぐるりと回転して、また遠ざかっていきます(図7)。この現象は、銀河の中心に巨大な引力を持った天体、おそらく巨大なブラックホールが存在する為に起こると考えられています。星の動きからブラックホールの質量を見積もってみると、なんと太陽の3百万倍にもなります。

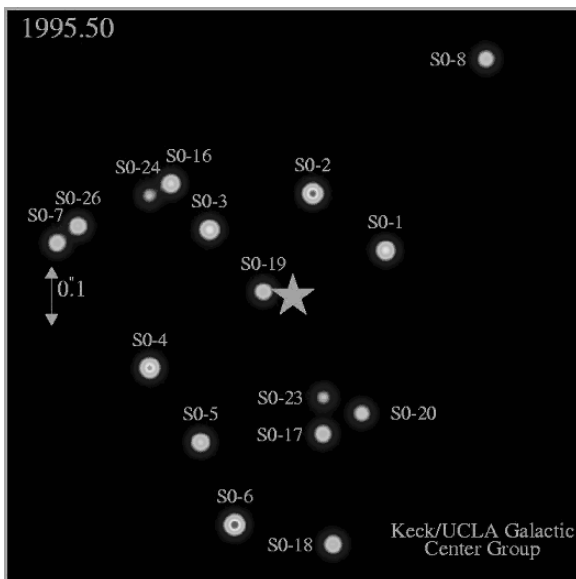


図7 銀河系の中心の赤外線像

### すばる望遠鏡と次世代望遠鏡

銀河系の中心を詳しく観測しようとしても、大気の揺らぎによる障害で地球上からの観測は容易ではありません。しかし、これを可能にするのが、補償光学という技術です。すばる望遠鏡では、高度90kmのナトリウム層に向けてナトリウムD2線と同じ波長を持ったレーザーを照射することで、レーザーガイド星と呼ばれる人工的なガイド星を作り出します。このレーザーガイド星を用いて大気の揺らぎを計測し、それを補償することで、高精度の観測が可能になりました。

さらに、2011年には岡山に口径3.8mというアジア最大級の望遠鏡が建設される計画が進んでおり、長田教授はその中心メンバーとして活躍されています。この望遠鏡では複数

枚の鏡をナノメートル精度で位置合わせし、一枚の鏡のように機能させる分割鏡方式を日本の望遠鏡としては初めて採用しています。従来の望遠鏡では星の位置やスペクトルなどを長時間かけて観測していましたが、この望遠鏡では突発天体など短時間で変動する現象に対するすばやい観測や偏光の観測が可能になり、新現象の発見が期待されています。



図8 國廣悌二教授の講演

### 4. 「素粒子」の溶ける話 —超高温・高密度の世界の探求— (國廣悌二教授)

愛媛県松山市出身の國廣教授(図8)は1981年に京都大学の博士課程を修了し、現在は基礎物理学研究所の教授をされています。研究上は略字の「国広」を使う方が多いそうです。講演では、ハドロンあるいはクォークからなる物質の超高温・高密度での振る舞いについて説明してくださいました。ハドロン物理学は専門用語が非常に多く、一般の方々にはなかなかとつきにくい分野ではありますが、國廣教授は噛み砕いて、そして熱心に語ってくださいました。

### 現代の物質観と強い相互作用

電荷を帯びた陽子や中性子がなぜ原子核という小さな領域に閉じこめられているのか。重力と電磁気力しか知られていなかった時代に、核力という新しい力を導入することでこ

の問題を解決しようと試みたのが、湯川秀樹です。彼はさらにその力は未知の粒子「中間子」によって伝わるものだと予言しました。新しい力と新しい粒子を導入するという湯川の考え方はその後の素粒子物理学の発展の中で大きな役割を果たします。

その後、陽子・中性子の仲間であるハドロンが次々と発見されていきます。すると素粒子物理学者は周期表との類推から、ハドロンは素粒子ではなく、より基本的な粒子からなる複合粒子だと考えるようになります。そうしてたくさんのモデルが提唱されましたが、その中で最も優れていたのがゲルマンのクォークモデルでした。このモデルではハドロンは6種類のクォークからなる複合粒子として記述されます。

しかし、ここへ来てもまた、クォークをハドロンの中に閉じ込める力（「強い力」）は何か、という問題が浮上します。その問題を（定性的な意味で）解決したのが、「量子色力学（QCD）」です（図9）。QCDには、粒子間の距離が小さく（大きく）なるほど相互作用が弱く（強く）なる、という性質（漸近的自由性）があり、この性質が閉じ込めの本質だと考えられています。さらにQCDはクォーク間の強い力を担う粒子としてグルーオンの存在を予言しますが、このグルーオンもまた、漸近的自由性のためにクォークとともにハドロンの中に閉じ込められていると考えられています。

### QCDの相転移

通常、「相転移」というと温度・密度などの変化により「物質」の性質が著しく変わることを言います。一方、QCDで起こる「カイラル相転移」（図10）では「真空」の変化によって起こると考えられています。現在の宇宙のような低温状態では上述のようにクォークは強い力でハドロンの中に閉じ込められてい

ますが、初期宇宙のような高温・高密度の世界ではクォーク・グルーオンを結びつける力は弱くなり、クォークとグルーオンが自由に飛び交うスープのような状態、「クォーク・グルーオンプラズマ（QGP）」になると考えられます。



図9 QCDの特徴と閉じ込め

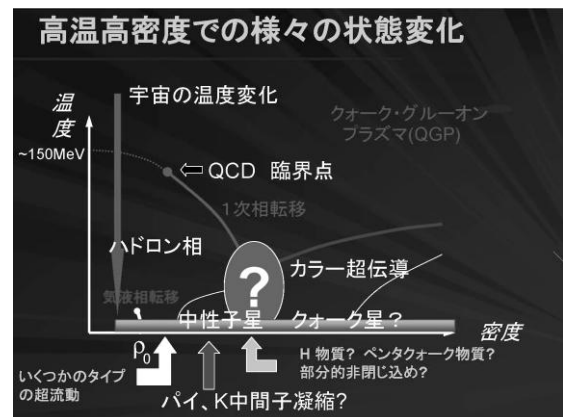


図10 QCDの相図

### QCDと天体現象

低温・低密度の現在の宇宙においても局所的には高温・高密度になっているところがあります。その代表例が中性子星です。太陽の10倍以上の質量をもつ巨大な恒星の内部では次々に核反応が起こり、鉄の中心核が形成されます。すると自己重力により中心核は収縮していき、徐々に温度を上げていくと、鉄が光子を吸収してヘリウムに分解する吸熱反

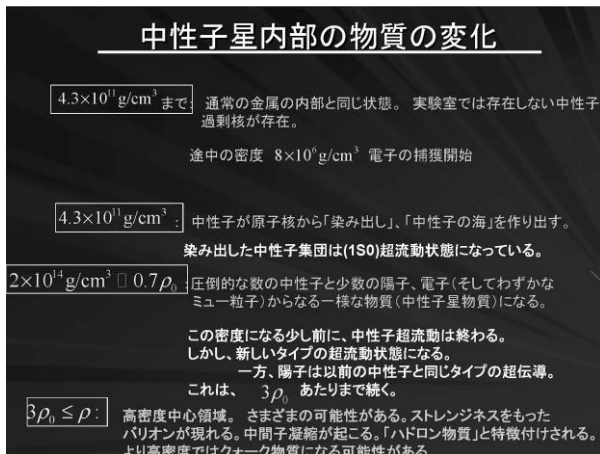


図 11 中性子星内部の物質の状態

応が起こるため、圧力が急激に弱まります。その結果、星は重力崩壊で潰れて超新星爆発を起こします。

この爆発の後には、太陽の約 1.4 倍の質量を持ちながら半径がわずか 10km という高密度な芯が残ります。高密度の芯の中では、粒子のフェルミエネルギーが大きくなります。するとエネルギーの高い電子に対しては  $\beta$  崩壊の逆反応  $p+e^- \rightarrow n+\nu_e$  (陽子が電子を捕獲して中性子に変わり、電子ニュートリノを放つ) が著しく促進され、中性子が大量に生成されます。こうして出来るのが中性子星です。この中性子星の中心部分は超高密度領域となっており、QGP 相が実現されているのでは、と期待されています (図 11)。また現在ではさらに密度の高いクォーク星の存在も予想されていて、すでにその候補と言われる星も見つかっています。ちなみに、恒星の質量が太陽質量の約 30 倍を超えると重力崩壊が止まらず、ブラックホールが出来ると考えられています。

### 地球上での QGP の再現

初期宇宙の高温・高密度状態を知るためにも、QGP の性質を実験的に調べることは極めて重要な研究だと言えます。上述のように

中性子星の中心部分では QGP が出来ていると期待されていますが、中性子星そのものを地球上で作ることは不可能です。しかし、その代わりとして高エネルギーの重イオンを衝突させることで瞬間的に高温・高密度の状態を作り出し、QGP を再現しようという試みが、アメリカの RHIC と呼ばれる加速器などで近年盛んに行われています。さらに来年度にはヨーロッパの LHC という加速器が稼働予定で、QGP に対する新たなデータが得られると期待されています。

### 5. おわりに

この市民講座は、普段はなじみのない最先端の物理学を一般の方に広く知っていただく良い機会だったと思います。21 世紀 COE としては今回が最後となりましたが、市民講座自体は今後も続けていくということです。次は誰がどんな話をして下さるか、とても楽しみです。なお、1 回目から今回までの講演プログラムや、配布資料、講演 ppt ファイル等は、<http://physics.coe21.kyoto-u.ac.jp/public.html> にあります。

村田 仁樹