

# 解説

## 光散乱に伴うスペクトル変化現象

白井 智宏\*・朝倉 利光\*\*

\* 機械技術研究所物理情報部 〒305 つくば市並木 1-2

\*\* 北海道大学電子科学研究所 〒060 札幌市北区北12条西6丁目

(1994年10月31日受理)

### Spectral Changes of Light Induced by Scattering

Tomohiro SHIRAI\* and Toshimitsu ASAKURA\*\*

\* Mechanical Engineering Laboratory, 1-2, Namiki, Tsukuba 305

\*\* Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University, Sapporo 060

#### 1. はじめに

ランダム媒質からの光散乱を記述する理論は、今世紀初頭における Einstein らの先駆的研究にはじまり、その後の多くの研究者を経てより洗練された形式へと展開されている<sup>1,2)</sup>。この分野に対する関心は現在でも高く、最近これらの研究を包括する拡張理論の一つが構築されている<sup>3)</sup>。その結果、これまでには認識されていない新たな原理に基づき、散乱光スペクトルの変化する現象が明らかとなった<sup>4)</sup>。この現象は、媒質の時空間ゆらぎの相関特性に依存するもので、入射光源・散乱媒質・散乱光検出器が相対的に静止している場合においても、ドップラー偏移によく似たタイプのスペクトル偏移現象が生じる<sup>5)</sup>。そのため、この理論は光計測の分野<sup>6)</sup>においてはもちろん、キューサーの赤方偏移の起源を探る天体物理学の分野<sup>7)</sup>においても重要な意義をもっている。

本解説では、最近構築された光散乱の拡張理論を概観した後、この新しい原理に基づく散乱光のスペクトル変化現象の物理的メカニズムを明らかにする。さらに、この現象は、Wolf 効果<sup>8)</sup>として知られる部分的コヒーレント光源からの出射光に生じるスペクトル変化現象と密接に対応していることを示し、関連する一連の研究動向を概説する。

Wolf 効果は、その発見から約8年が経過しており、ここで紹介する類似現象を含めて、比較的広く知られるようになってきた。しかし、その重要性や捉え方に関する疑問もあり<sup>9,10)</sup>、Wolf 効果の物理的意義が完全に理

解されているとは言い難い。そこで、以下ではこの効果の重要性を明らかにするとともに、諸分野に及ぼすそのインパクトについても考察してみたい。

#### 2. 時空間のゆらぎをもつ媒質からの光散乱

これまでに存在する多くの光散乱理論は、単色光の散乱現象に限定されており、かつ散乱媒質の密度ゆらぎが熱力学的に平衡状態の下で展開されてきた。しかし、これらの制限下で展開された理論は、状況によっては実際の散乱現象を正しく表現できず、実験との間に重大な不一致が生じることになる。この問題を克服するために、最近 Wolf と Foley<sup>3)</sup> は、より広い適用範囲をもつ光散乱現象の理論を構築した。

この理論は、基本的には Maxwell の方程式に準拠して、電磁波の散乱現象を第1次の Born 近似で記述するものである。ただし、入射場については、任意のコヒーレンス状態、任意の偏光状態、そして任意のスペクトル分布が考慮され、散乱媒質については、その応答が線形であり、かつ時空間のゆらぎをもつことが仮定されている。

この理論の中で重要な役割を果たす物理量は、散乱媒質の一般化誘電分極率<sup>11)</sup>  $\hat{\eta}(\mathbf{r}, t; \omega)$  と、その2次の相関関数

$$G(\mathbf{R}, T; \omega) = \langle \hat{\eta}^*(\mathbf{r}, t; \omega) \hat{\eta}(\mathbf{r} + \mathbf{R}, t + T; \omega) \rangle \quad (1)$$

である。ここで、 $\langle \dots \rangle$  は統計平均を、\* は複素共役を意味する。一般化誘電分極率とは、時間的ゆらぎをもつ媒

質の応答を記述するものであり、熱運動等に由来する媒質の時間的変動  $t$ 、入射場の周波数  $\omega$ 、および位置ベクトル  $\mathbf{r}$  の関数となる。ここでは時空間のゆらぎをもつ媒質を考慮しているため、この関数は位置  $\mathbf{r}$  と時間  $t$  に関するランダム関数となる。

散乱場のスペクトル (厳密には、スペクトル密度) に対する数学的表現式を求めるために、図 1 に示す光学的配置を考える。入射場として、直線偏光した多色平面波を仮定し、散乱媒質から十分に離れた遠方界に形成される散乱場を解析する。その際に適用する第 1 次の Born 近似とは、散乱媒質が非常に希薄であり、したがって散乱場の強度が入射場の強度に比較して無視し得るほど小さくなる場合に対する近似解法である。その結果、散乱場のスペクトルとして

$$S^{(s)}(\mathbf{r}\mathbf{u}, \omega) = \frac{(2\pi)^3 V \omega^4 \sin^2 \phi}{c^4 r^2} \times \int_{-\infty}^{\infty} S\left(\frac{\omega}{c}\mathbf{u} - \frac{\omega'}{c}\mathbf{u}_0, \omega - \omega'; \omega'\right) S^{(i)}(\omega') d\omega' \quad (2)$$

を得る。ここで、 $V$  は散乱体の体積、 $c$  は真空中での光の速度、 $\phi$  は入射場の偏光方向と観測方向がなす角、 $\mathbf{u}_0$  および  $\mathbf{u}$  はそれぞれ入射場の入射方向および散乱場の観測方向を表す単位ベクトル、そして  $S^{(i)}(\omega)$  は入射場のスペクトルである。また、散乱体積  $V$  の大きさは、散乱媒質の相関間隔に比較して十分に大きいと仮定する。式 (2) の右辺に含まれる関数  $S(\mathbf{K}, \Omega; \omega')$  は一般化構造関数であり、時空間相関関数  $G(\mathbf{R}, T; \omega)$  の 4 次元フーリエ変換

$$S(\mathbf{K}, \Omega; \omega') = \frac{1}{(2\pi)^4} \iiint_V d^3 R \int_{-\infty}^{\infty} G(\mathbf{R}, T; \omega') \times \exp[-j(\mathbf{K} \cdot \mathbf{R} - \Omega T)] dT \quad (3)$$

により定義されている。式 (2)、(3) より、散乱場のスペクトル  $S^{(s)}(\mathbf{r}\mathbf{u}, \omega)$  は、一般に入射場のスペクトル  $S^{(i)}(\omega)$  とは異なる分布となることが明らかである。

式 (2) が、既存の理論を包括することを示す一例として、直線偏光した単色平面波 (周波数  $\omega_0$ ) を入射する場

合を考える。このとき、入射場のスペクトル  $S^{(i)}(\omega)$  は、 $I_0$  を定数、 $\delta(\cdot)$  をデルタ関数として  $I_0 \delta(\omega - \omega_0)$  と書ける。この  $S^{(i)}(\omega)$  を式 (2) に代入し整理すると、式 (2) は

$$S^{(s)}(\mathbf{r}\mathbf{u}, \omega) = \frac{(2\pi)^3 I_0 V \omega^4 \sin^2 \phi}{c^4 r^2} \times S\left(\frac{\omega}{c}\mathbf{u} - \frac{\omega_0}{c}\mathbf{u}_0, \omega - \omega_0; \omega_0\right) \quad (4)$$

となる。これは、従来の動的光散乱理論において、散乱光の強度を記述するよく知られた式である<sup>12)</sup>。

入射場の偏光状態とコヒーレンス状態を併せて考慮する場合の散乱場スペクトルの一般式は、相互スペクトル密度テンソルを導入することにより導くことができる<sup>13)</sup>。

### 3. 光散乱に伴うスペクトル偏移効果

#### 3.1 数値例

前節の理論から、時空間のゆらぎをもつ媒質によって散乱された光波のスペクトルは、一般に入射光のスペクトルとは異なることが明らかとなった。実際、この種の媒質に多色平面波を入射すると、それからの散乱光のスペクトルには、ドップラー偏移によく似たタイプの周波数偏移が生じる<sup>4,5,7)</sup>。また、多色光の代りに単色光を入射する場合においても、同様の現象が観測される<sup>14)</sup>。

散乱媒質のモデルとして、時空間相関関数が

$$G(\mathbf{R}, T; \omega) = G_0 \exp\left(-\frac{|\mathbf{R}|^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{T^2}{2\tau^2}\right) \quad (5)$$

で与えられる体積散乱体を考える。ただし、 $G_0$ 、 $\sigma$  および  $\tau$  は正の定数であり、 $\sigma$  と  $\tau$  はそれぞれ媒質の空間的相関間隔および相関時間を意味する。ここでは、このモデル媒質に、直線偏光した単色平面波を入射する場合の光散乱現象を考える。このときに観測される散乱光のスペクトルは、式 (5) を式 (3) に代入し、その結果を式 (4) に代入することにより求めることができる。その結果、

$$S^{(s)}(\theta, \omega) = A \omega^4 \exp\left(-\frac{\alpha^2 - \beta^2}{2\alpha} \omega_0^2\right) \times \exp\left[-\frac{\{\omega - (|\beta|/\alpha)\omega_0\}^2}{2(1/V/\alpha)^2}\right] \quad (6)$$

を得る。ただし、

$$\begin{cases} A = \frac{(2\pi) I_0 V G_0 \sigma^3 \tau \sin^2 \phi}{c^4 r^2}, \\ \alpha = \left(\frac{\sigma}{c}\right)^2 + \tau^2, \\ \beta = \left(\frac{\sigma}{c}\right)^2 \cos \theta + \tau^2 \end{cases} \quad (7)$$

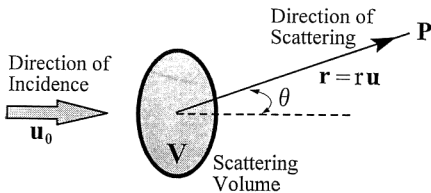


図 1 光散乱現象の模式図

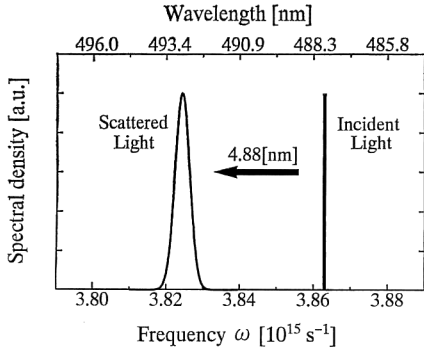


図2 散乱光スペクトルの一例

である。式(6)の右辺末尾の指数関数は、中心周波数が  $\omega' = (|\beta|/\alpha)\omega_0$  で、実効幅が  $\Gamma = 1/\sqrt{\alpha}$  のガウス型スペクトルを表している。しかし、このガウス型スペクトル分布は、式(6)右辺の第2項目の  $\omega^4$  の作用により、相対的に高周波側が強調される傾向の歪を受ける。そのため、最終的に得られる散乱光のスペクトルは、厳密なガウス型ではなく、そのピーク周波数も前述の  $\omega'$  の値に比べ若干大きくなることが予想される。

具体的数値例を示すために、散乱媒質の空間的相関間隔が  $\sigma = 15.0 \mu\text{m}$ 、相関時間が  $\tau = 5.0 \times 10^{-13} \text{s}$ 、散乱角が  $\theta = 90 \text{deg}$ 、入射光の周波数が  $\omega_0 = 3.8626 \times 10^{15} \text{s}^{-1}$  (波長  $\lambda_0 = 488 \text{nm}$  に対応) の場合を考える。これらの値を式(6)に代入し、得られる散乱光スペクトルを図2に示す。図より、散乱光のスペクトルは、入射光に比較して、ピーク周波数が低周波側に偏移し、その幅に広がりをもつ分布となることがわかる。

ここで、もし入射光が単一の線スペクトルではなく、複数の線スペクトルで構成された多色光である場合には、散乱に伴い、すべてのスペクトル線がほぼ等しい周波数の偏移を受ける<sup>14)</sup>。その結果、観測者側からみる

と、検出したスペクトル偏移が媒質と検出器間の相対的運動に起因するドップラー効果に由来するものなのか、上述の光散乱に由来するものなのか、それを区別することが非常に困難となる。

### 3.2 現象の物理的メカニズム

図3はこの現象を模式的に示したものであり、単色の入射光が媒質により散乱され、ピーク周波数の偏移した散乱光となる様子を示している。ここで導入する媒質は時空間のゆらぎをもち、入射光はこの媒質との相互作用の過程で時間的ゆらぎと空間的ゆらぎの作用を同時に受ける。しかし、ここでは現象を直感的に理解するために、それら2種の作用を分離し、それぞれを独立の作用として捉えることにする。

最初に、時間的ゆらぎの作用を考えよう。単色光が時間的にゆらぎをもつ媒質に入射されると、散乱光のスペクトルは幅に広がりをもった分布となる。これは媒質を構成する微小要素の相対運動に起因するもので、ドップラー広がりとして解釈される現象である。ただし、巨視的に見ると、媒質は光源および検出器に対して相対的に静止しているため、この段階では広がったスペクトルのピーク周波数と入射光の周波数は完全に一致する。

次に、この広がったスペクトル(多色光)と、媒質の空間的ゆらぎとの相互作用を考えよう。式(6)の導出過程から明らかなように、散乱光の空間的広がりは相関関数の空間依存項の空間的フーリエ変換によって決定される。そのため、その関数に周波数依存性がない場合には、散乱光の空間的広がりは入射光の周波数(波長)と媒質の空間的相関間隔に依存した分布となる。具体的には、回折現象と同様に、媒質の空間的相関間隔が固定されている場合には、低周波数の光(赤色光)は高周波数の光(青色光)に比較して空間的により広がった散乱光分布となる。また、それぞれの空間的広がり幅は、媒質の空間的相関間隔に依存して変化する。その結果、媒質の相関間隔が固定されている場合には観測する位置に依存して、観測位置が固定されている場合には媒質の相関間隔に依存して、散乱光のスペクトル構造が変化することになる。

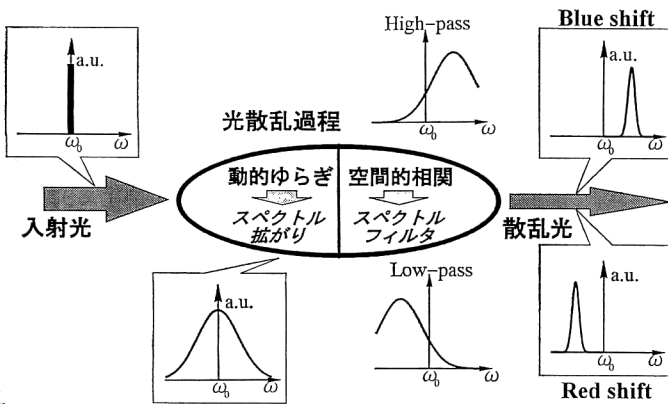


図3 スペクトル偏移現象の物理的メカニズム

散乱光のスペクトル構造の変化に関する以上の解釈は、前節の解析モデルに基礎をおく限りにおいては正しいものである。しかし、この現象と Wolf 効果との対応を考える場合には、回折に伴う一種

の現象を模式的に示したものであり、単色の入射光が媒質により散乱され、ピーク周波数の偏移した散乱光となる様子を示している。ここで導入する媒質は時空間のゆらぎをもち、入射光はこの媒質との相互作用の過程で時間的ゆらぎと空間的ゆらぎの作用を同時に受ける。しかし、ここでは現象を直感的に理解するために、それら2種の作用を分離し、それぞれを独立の作用として捉えることにする。

の色ずれ効果としての解釈に加え、それを引き起こす根本の原因となる“媒質の相関の効果”に基づく合理的な解釈が要求される。その議論の詳細は次節で行う。

以上の現象は、空間的ランダム媒質による光散乱過程を一種のスペクトルフィルターと見なすことができることを意味する。すなわち、動的作用によって広がったスペクトルが、このフィルター作用により変形され、ピーク周波数に偏移が生じるのである。ただし、このフィルターの特性は、媒質の空間的ゆらぎの性質および散乱光を検出する観測位置に依存して変化するものとなる。

以上の議論の結果、周波数偏移を引き起こす重要な要因は、媒質の空間的ゆらぎに起因するスペクトルフィルターの作用であることがわかる。そのため、媒質に動的ゆらぎがない場合でも、多色光を入射すると散乱に伴うピーク周波数の偏移現象が観測される<sup>15-18)</sup>。

#### 4. Wolf 効果との対応

一般にランダム媒質からの光散乱特性は、部分的コヒーレント光源の放射特性と密接に関連している<sup>19-22)</sup>。事実、空間的ランダム媒質に多色光を入射した場合の散乱光のスペクトル変化現象は、Wolf 効果として知られる部分的コヒーレント光源からの出射光のスペクトル変化現象に対応するものである。部分的コヒーレント光のスペクトル構造に関する研究は、Mandel<sup>23,24)</sup> による cross-spectral purity の概念とともに発展してきたが、伝搬に伴うその変化が光源のコヒーレンス状態に起因することを明確に示し、その重要性を指摘したのは Wolf<sup>25,26)</sup> である (Wolf 効果<sup>8)</sup>)。

Wolf 効果を説明する最も単純な例として、ゆらぎをもつ2点光源からの放射を考えよう<sup>27)</sup> (図4参照)。位置  $P_1, P_2$  に置かれた点光源の波動を、それぞれ  $Q(P_1, \omega)$ 、 $Q(P_2, \omega)$  とすると、位置  $P$  の波動  $U(P, \omega)$  は

$$U(P, \omega) = Q(P_1, \omega) \frac{\exp(jkR_1)}{R_1} + Q(P_2, \omega) \frac{\exp(jkR_2)}{R_2} \quad (8)$$

と書ける。そのスペクトルは、定義式  $S_U(P, \omega) = \langle U^*(P, \omega)U(P, \omega) \rangle$  を用いることにより、

$$S_U(P, \omega) = S_Q(\omega) \left[ \frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} \right] + \left[ W_Q(P_1, P_2, \omega) \frac{\exp\{j k(R_1 - R_2)\}}{R_1 R_2} + c. c. \right] \quad (9)$$

となる。ここで、

$$S_Q(\omega) = \langle Q^*(P_1, \omega)Q(P_1, \omega) \rangle = \langle Q^*(P_2, \omega)Q(P_2, \omega) \rangle \quad (10)$$

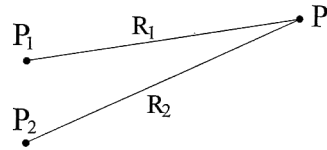


図4 2点光源  $P_1, P_2$  と観測位置  $P$

は二つの点光源のスペクトルであり、双方が等しい分布をもつと仮定している。また、

$$W_Q(P_1, P_2, \omega) = \langle Q^*(P_1, \omega)Q(P_2, \omega) \rangle \quad (11)$$

は、2点の光源間の相関を定量化する相互スペクトル密度関数である。ただし、上式中の  $\langle \dots \rangle$  は統計平均を、c. c. は複素共役を表している。式(9)は古くから知られる2光束干渉を表現する式であるが、ここではその解釈が異なっている。通常、干渉効果は光強度の空間的変動を引き起こす要因であるが、ここではある固定された位置におけるスペクトル構造の変化を起こす要因として解釈する。

理論解析の一例として、等しいガウス型のスペクトルをもつ2点光源が、ある種の相関をもって光を放射する場合の放射場のスペクトルを図5に示す。この図は、放射場のスペクトルが光源の相関特性に依存して、光源のスペクトル(図5(a))に対し低周波側(図5(b))および高周波側(図5(c))へ偏移する様子を示している。以上の理論は、音波領域<sup>28)</sup> および光波領域<sup>29)</sup> における検証実験により、その正当性が確認されている。この例は、光源から放射される光のスペクトルが、伝搬に伴う干渉効果により変化することを示している。また、その変化は放射される光がどのように干渉し合うかに依存するため、本質的には光源のコヒーレンス状態に依存するといえる。

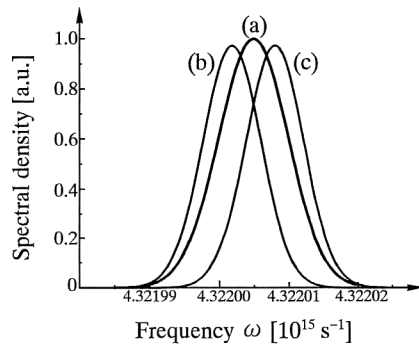


図5 相関をもった2点光源から放射された光のスペクトル

(a) 光源のスペクトル  $S_Q(\omega)$ 、(b)、(c) 放射場のスペクトル  $S_U(P, \omega)$ 。(b) と (c) では、光源の相関特性が異なる<sup>27)</sup>。

同様のスペクトル変化現象が、部分的コヒーレント平面光源<sup>30-35)</sup> および3次元光源<sup>26,36-38)</sup> からの放射光においても観測されることが理論と実験<sup>39-42)</sup> によって示されている。

完全にコヒーレントな多色の平面光源を考えると、回折角が光の周波数(波長)に依存するため、放射場には明らかな色ずれ効果が生じる。光源が部分的コヒーレント状態になると、光源のコヒーレンス状態に応じてその色ずれの程度が変化するため、放射場のある一点で観測されるスペクトル構造の変化は光源のコヒーレンス状態に依存することになる。しかし、この例から判断すると、Wolf 効果の起源は、光源のコヒーレンスよりもむしろ回折効果にあると考えることが可能となる。実際、Nugent と Gardner<sup>9)</sup> および Mielenz<sup>10)</sup> はこの点を指摘し、Wolf 効果の解釈に関する議論を展開している。しかし、この場合においても、現象を引き起こす起源は、回折による色ずれではなく、光源から放射される光の干渉効果、すなわち光源のコヒーレンス状態にあると考えるべきであろう。

等方的な3次元光源は全空間に等しい強度で放射するため、その強度分布に角度依存性は生じない<sup>43,44)</sup>。しかし、この場合でも、放射場のスペクトルが光源のコヒーレンス状態に依存して変化することが示されている<sup>26,36,37)</sup>。この現象の起源は、明らかに回折に伴う色ずれ効果ではなく、光源のコヒーレンス状態に依存する放射光の干渉の効果である。

散乱現象では、入射光の影響により、等方的散乱体により散乱された光の空間的分布は一樣とはならず、その分布に光の周波数(波長)に応じた角度依存性が生じる。そのため、前節で導入した説明のように、この現象を回折による色ずれ効果に基づき解釈することが可能となる。しかし、放射と光散乱過程の類似性により、この現象は散乱における Wolf 効果であると考えられる。そのため、この場合についてもその変化を生み出す起源は、散乱光の干渉の度合いを決定する媒質の空間的相関特性にあると解釈すべきであろう。ある種の異方性をもった媒質からの散乱光は、全空間に等方的に分布することもあり得るが、この場合のスペクトル変化現象は色ずれ効果によって説明することが不可能となる。

## 5. 諸分野に及ぼすインパクト

Wolf 効果および光散乱に伴う類似効果は、現象の理論的な予測以来、応用面と密接に関連してさまざまな分野に大きなインパクトを与えている。

Wolf<sup>26)</sup> および James ら<sup>7)</sup> は、キューサーからの放射スペクトルが赤方偏移する理由を Wolf 効果の理論に基づいて説明し、その起源に関する論争の解決を試みている。その結果、宇宙の膨張に伴うドップラー効果としての解釈では説明できない幾つかの観測事実を理論的に説明することが可能となり、天体物理学の分野に新たな視点を提供している。しかし、この理論の正当性に関する知見は未だ得られておらず、今後の研究課題である<sup>45)</sup>。

一方、Kandpal ら<sup>6,42,46)</sup> は、Wolf 効果がスペクトル計測においては誤差となり得ることを指摘し、スペクトル計測の標準スケールが各国の研究機関で異なる要因を考察している。しかし、その一方では、この効果に基づくスペクトル変化現象を、積極的に光計測に利用する試みも行われている<sup>47-50)</sup>。ある条件下では、放射場および散乱場のスペクトル変化は、光源および散乱媒質の空間的相関特性により完全に決定されるため、スペクトル計測に基づく光源および散乱媒質の情報推定が可能となる。これは、逆問題を解く新しい原理の提案であり、Wolf 効果の最も注目すべき応用例の一つである。

その他、光源のコヒーレンス制御に基づくスペクトル変調<sup>51,52)</sup> や、目の明るさの感覚が目に入る光の角度に依存する現象(スタイルズ・クロフォード効果)を眼球内部での光散乱を考慮して説明する試み<sup>53)</sup> 等、Wolf 効果の応用例は多岐にわたる。また、種々の光学系を伝搬する光波のスペクトル変化を Wolf 効果の視点から研究する手法は、現象に対する新たな洞察を与えるものとして最近特に注目を集めている<sup>54-56)</sup>。

議論を光散乱に伴うスペクトル変化現象に限定すると、非常に希薄な単一散乱媒質を対象とするこれまでの理論に加え、最近では多重散乱媒質を対象とする拡張理論の構築が積極的に行われている<sup>16-18,57,58)</sup>。その結果、比較的希薄な多重散乱媒質に対しては、現象に及ぼす多重散乱の効果が明らかとなった<sup>18,57,58)</sup>。この現象に基づく逆問題との関連から、最終的には生体組織を例とする高密度多重散乱媒質を対象とする理論への拡張が期待される。

光散乱に関する以上の研究では、理論的考察に傾倒し、それらの検証実験がほとんど行われていない。数少ない例として、交流電圧を印加した液晶板<sup>59)</sup> およびある種のイオン水溶液<sup>60)</sup> を用いた検証実験もあるが、理論的予測との定性的一致は確認されているものの、定量的にはその正当性を証明するほど十分な結果は得られていない。理論的進展と同時に、それらの実験的検証が適宜行われることが期待される。

## 6. おわりに

本稿では、時空間のゆらぎをもつ媒質からの光散乱に伴い、これまでには認識されていない新たな原理に基づき、散乱光のスペクトルが変化する現象を紹介した。特に、この現象の物理的起源は、散乱媒質の空間的ゆらぎに起因するスペクトルフィルターの効果にあり、時間的ゆらぎ作用との協同効果により、ドップラー偏移に類似する散乱光のスペクトル偏移現象を引き起こすことを明らかにした。また、以上の現象は放射と散乱の類似性により、光のコヒーレンス理論における Wolf 効果に対応するものであった。

Wolf<sup>61)</sup>によると、Wolf 効果および光散乱に伴うその類似効果に関する論文は、1994年3月現在で90余編である。今日では、その数が100編を越えていることは確実であり、この話題に対する関心の高さが伺える。しかし、この現象と多重散乱との関係等、まだ完全に解明されていない領域も残されており、応用面のさらなる探索も含めて今後の進展が期待される。

以上の動向を反映して、1995年6月7~10日にロチェスター大学で行われる Seventh Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics の最終日に、Satellite Symposium として “Spectral Effects in Collective Phenomena” が開催される。本解説に関連する研究の隆盛と問題点を考えると、この会議への期待は大きい。

## 文 献

- 1) 岩井俊昭, 岡本 卓, 朝倉利光: “光散乱現象研究の展開”, 応用物理, **63** (1994) 14-22.
- 2) A. Ishimaru: *Wave Propagation and Scattering in Random Media* (Academic Press, New York, 1978); B. J. Berne and R. Pecora: *Dynamic Light Scattering* (John Wiley & Sons, New York, 1976); B. Chu: *Laser Light Scattering*, 2nd ed. (Academic Press, New York, 1991).
- 3) E. Wolf and J.T. Foley: “Scattering of electromagnetic fields of any state of coherence from space-time fluctuations,” *Phys. Rev. A*, **40** (1989) 579-587.
- 4) J.T. Foley and E. Wolf: “Frequency shifts of spectral lines generated by scattering from space-time fluctuations,” *Phys. Rev. A*, **40** (1989) 588-598.
- 5) E. Wolf: “Correlation-induced Doppler-like frequency shifts of spectral lines,” *Phys. Rev. Lett.*, **63** (1989) 2220-2223.
- 6) H.C. Kandpal, J.S. Vaishya and K.C. Joshi: “Correlation-induced spectral shifts in optical measurements,” *Opt. Eng.*, **33** (1994) 1996-2012.
- 7) D.F.V. James, M.P. Savedoff and E. Wolf: “Shifts of spectral lines caused by scattering from fluctuating random media,” *Astrophys. J.*, **359** (1990) 67-71.
- 8) 解説論文として, E. Wolf: “Influence of source-correlations on spectra of radiated fields,” *International Trends in Optics*, ed. J.W. Goodman (Academic Press, New York, 1991) pp. 221-232; E. Wolf: “Some recent research on optical coherence,” *Huygens' Principle 1690-1990: Theory and Applications*, eds. H. Blok, H.A. Ferwerda and H.K. Kuiken (Elsevier, New York, 1992) pp. 113-127; E. Wolf: “Towards spectroscopy of partially coherent sources,” *Recent Developments in Quantum Optics*, ed. R. Inguva (Plenum, New York, 1993) pp. 369-382.
- 9) K.A. Nugent and J.L. Gardner: “Radiometric measurements and correlation-induced spectral changes,” *Metrologia*, **29** (1992) 319-324.
- 10) K.D. Mielenz: “‘Wolf shifts’ and their physical interpretation under laboratory conditions,” *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, **98** (1993) 231-240.
- 11) L. Mandel and E. Wolf: “Constitutive relations and the electromagnetic spectrum in a fluctuating medium,” *Opt. Commun.*, **8** (1973) 95-99.
- 12) R. Pecora: “Doppler shifts in light scattering from pure liquids and polymer solutions,” *J. Chem. Phys.*, **40** (1964) 1604-1614, Eq. (30).
- 13) 文献 3), 式(4.12).
- 14) D.F.V. James and E. Wolf: “Doppler-like frequency shifts generated by dynamic scattering,” *Phys. Lett. A*, **146** (1990) 167-171.
- 15) E. Wolf, J.T. Foley and F. Gori: “Frequency shifts of spectral lines produced by scattering from spatially random media,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **6** (1989) 1142-1149.
- 16) A. Lagendijk: “Terrestrial redshifts from a diffuse light source,” *Phys. Lett. A*, **147** (1990) 389-392.
- 17) A. Lagendijk: Comment on “Invariance of the spectrum of light on propagation,” *Phys. Rev. Lett.*, **65** (1990) 2082.
- 18) T. Shirai and T. Asakura: “Spectral changes of light induced by scattering from spatially random media under the Rytov approximation,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **12** (1995) in press.
- 19) J.C. Leader: “Similarities and distinctions between coherence theory relations and laser scattering phenomena,” *Opt. Eng.*, **19** (1980) 593-601.
- 20) J. Jansson, T. Jansson and E. Wolf: “Spatial coherence discrimination in scattering,” *Opt. Lett.*, **13** (1988) 1060-1062.
- 21) W.H. Carter and E. Wolf: “Scattering from quasi-homogeneous media,” *Opt. Commun.*, **67** (1988) 85-90.
- 22) W.H. Carter: “Scattering from quasi-homogeneous time fluctuating radiating media,” *Opt. Commun.*, **77** (1990) 121-125.
- 23) L. Mandel: “Concept of cross-spectral purity in coherence theory,” *J. Opt. Soc. Am.*, **51** (1961) 1342-1350.
- 24) L. Mandel and E. Wolf: “Spectral coherence and the concept of cross-spectral purity,” *J. Opt. Soc. Am.*, **66** (1976) 529-535.
- 25) E. Wolf: “Invariance of the spectrum of light on propagation,” *Phys. Rev. Lett.*, **56** (1986) 1370-1372.
- 26) E. Wolf: “Non-cosmological redshifts of spectral line,” *Nature*, **326** (1987) 363-365.
- 27) E. Wolf: “Red shifts and blue shifts of spectral lines emitted by two correlated sources,” *Phys. Rev. Lett.*, **58** (1987) 2646-2648.
- 28) M.F. Bocko, D.H. Douglass and R.S. Knox: “Observation of frequency shifts of spectral lines due to

- source correlations," *Phys. Rev. Lett.*, **58** (1987) 2649-2651.
- 29) F. Gori, G. Guattari, C. Palma and C. Padovani: "Observation of optical redshifts and blueshifts produced by source correlations," *Opt. Commun.*, **67** (1988) 1-4.
  - 30) Z. Dačić and E. Wolf: "Changes in the spectrum of a partially coherent light beam propagating in free space," *J. Opt. Soc. Am. A*, **5** (1988) 1118-1126.
  - 31) G.P. Agrawal and A. Gamliel: "Spectrum of partially coherent light: transition from near to far zone," *Opt. Commun.*, **78** (1990) 1-6.
  - 32) A. Gamliel and G.P. Agrawal: "Spectrum-enhanced spreading of partially coherent beams," *Opt. Commun.*, **78** (1990) 203-207.
  - 33) J.T. Foley: "The effect of an aperture on the spectrum of partially coherent light," *Opt. Commun.*, **75** (1990) 347-352.
  - 34) J.T. Foley: "Effect of an aperture on the spectrum of partially coherent light," *J. Opt. Soc. Am. A*, **8** (1991) 1099-1105.
  - 35) E. Wolf and J.R. Fienup: "Changes in the spectrum of light arising on propagation through a linear time-invariant system," *Opt. Commun.*, **82** (1991) 209-212.
  - 36) E. Wolf: "Redshifts and blueshifts of spectral lines caused by source correlations," *Opt. Commun.*, **62** (1987) 12-16.
  - 37) E. Wolf and A. Gamliel: "Energy conservation with partially coherent sources which induce spectral changes in emitted radiation," *J. Mod. Opt.*, **39** (1992) 927-940.
  - 38) T. Shirai and T. Asakura: "Spectral changes of light radiated by three-dimensional, anisotropic gaussian Schell-model sources," *Opt. Commun.*, **105** (1994) 22-28.
  - 39) G.M. Morris and D. Faklis: "Effects of source correlations on the spectrum of light," *Opt. Commun.*, **62** (1987) 5-11.
  - 40) D. Faklis and G.M. Morris: "Spectral shifts produced by source correlations," *Opt. Lett.*, **13** (1988) 4-6.
  - 41) G. Indebetouw: "Synthesis of polychromatic light sources with arbitrary degrees of coherence: some experiments," *J. Mod. Opt.*, **36** (1989) 251-259.
  - 42) H.C. Kandpal, J.S. Vaishya and K.C. Joshi: "Wolf shift and its application in spectroradiometry," *Opt. Commun.*, **73** (1989) 169-172.
  - 43) W.H. Carter and E. Wolf: "Correlation theory of wavefields generated by fluctuating, three-dimensional, primary, scalar sources I. General theory," *Opt. Acta*, **28** (1981) 227-244.
  - 44) W.H. Carter and E. Wolf: "Correlation theory of wavefields generated by fluctuating, three-dimensional, primary, scalar sources II. Radiation from isotropic model sources," *Opt. Acta*, **28** (1981) 245-259.
  - 45) J.V. Narlikar: "Noncosmological redshifts," *Space Sci. Rev.*, **50** (1989) 523-614.
  - 46) K. C. Joshi, H. C. Kandpal and J.S. Vaishya: "Spectral shift due to source correlation in conventional spectroradiometric measurements," *Appl. Opt.*, **30** (1991) 1471-1473.
  - 47) D.F.V. James and E. Wolf: "Some new aspects of Young's interference experiment," *Phys. Lett. A*, **157** (1991) 6-10.
  - 48) D.F.V. James and E. Wolf: "Determination of field correlations from spectral measurements with application to synthetic aperture imaging," *Radio Sci.*, **26** (1991) 1239-1243.
  - 49) E. Wolf: "Two inverse problems in spectroscopy with partially coherent sources and the scaling law," *J. Mod. Opt.*, **39** (1992) 9-20.
  - 50) D.G. Fischer and E. Wolf: "Inverse problems with quasi-homogeneous random media," *J. Opt. Soc. Am. A*, **11** (1994) 1128-1135.
  - 51) A. Gamliel and E. Wolf: "Spectral modulation by control of source correlations," *Opt. Commun.*, **65** (1988) 91-96.
  - 52) H.C. Kandpal, J.S. Vaishya and K.C. Joshi: "Generation of sharp lines under controlled source correlation," *Opt. Commun.*, **77** (1990) 1-3.
  - 53) M. Chander, H.C. Kandpal, J.S. Vaishya and K.C. Joshi: "Stiles-Crawford effect of second kind in the light of spectral shift due to source correlation," *Recent Developments in Quantum Optics*, ed. R. Inguva (Plenum, New York, 1993) pp. 387-392.
  - 54) A. Gamliel and G.P. Agrawal: "Wolf effect in homogeneous and inhomogeneous media," *J. Opt. Soc. Am. A*, **7** (1990) 2184-2192.
  - 55) G.S. Agarwal and D.F.V. James: "Spectral changes in the Mach-Zehnder interferometer," *J. Mod. Opt.*, **40** (1993) 1431-1436.
  - 56) T. Shirai and T. Asakura: "Spectral modifications of partially coherent light passing through a periodic sequence of lenses," *J. Opt. Soc. Am. A*, **11** (1994) 1141-1149.
  - 57) T. Shirai and T. Asakura: "Spectral changes of light scattered by spatially random media under the Rytov approximation," *ICO Topical Meeting Digest* (Frontiers in Information Optics, 1994) p. 354.
  - 58) T. Shirai and T. Asakura: "Spectral changes of light caused by multiple-scattering from spatially random media," *Conference Abstract* (7th Multiple Scattering Lidar/Light Experiments, 1994) pp. 80-81.
  - 59) H. C. Kandpal, J. S. Vaishya and K.C. Joshi: "Frequency shifts in spectral lines by space time fluctuations of scatterers," *Opt. Commun.*, **84** (1991) 125-126.
  - 60) H. C. Kandpal, J. S. Vaishya and K.C. Joshi: "Frequency shifts of spectral lines by scattering from space time fluctuations," *Recent Developments in Quantum Optics*, ed. R. Inguva (Plenum, New York, 1993) pp. 395-398.
  - 61) E. Wolf からの私信. List on "Publications dealing with correlation-induced changes of spectra" (1994).