



解禁時間：テレビ・ラジオ・WEB
新聞

平成 19 年 5 月 4 日（金）午前 3 時
平成 19 年 5 月 4 日（金）付朝刊

平成 19 年 5 月 2 日

北海道大学 電子科学研究所
電話：011-706-3195（事務室）

科学技術振興機構（JST）
電話(03)5214-8404(広報・ポータル部広報室)

古典理論の限界をはるかに超えた新しい光位相測定に成功 (光量子技術による精密計測の実用化に大きな前進)

北海道大学電子科学研究所（所長 笹木敬司）と JST（理事長 沖村憲樹）の研究チームは、量子もつれ合い^(注1)状態にある 4 個の光子を用いて、古典理論による従来のレーザー光測定の限界を超えた感度の光位相測定に世界で初めて成功しました。

異なる経路を通る光線の間での干渉を利用した光の位相測定は、距離や物質の密度などを精密に測定する方法として、重力波天文学から生物学まで様々な分野において基本となる技術の一つです。しかし、その測定精度は、レーザー光などを利用した場合、測定に用いる光の強度によって決まる限界（古典理論による限界^(注2)）が存在していました。一方、量子理論では、複数の光子がもつれた状態を作製することができれば、その限界を超えられることが指摘されていました。しかしこれまでの研究はもっとも初歩的な 2 個の光子を用いた実験の段階でとどまっていた。

本研究チームは、光子が 4 個互いにもつれ合った状態を高精度で作製することに成功し、かつ、特殊な工夫による非常に安定な光干渉装置を新しく作り出しました。この 2 つの開発により、3 個以上の光子では初めて、古典理論による限界を超えた感度での光位相測定に成功しました。

本成果は、量子もつれ合いの有用性を実証し、古典理論に対する量子理論の違いを明らかな形で提示できたことにより、量子理論の基本的な問題にも新たな光を当てるものです。またそこで得られた技術は、これまでの限界を超えた計測技術の開発に結びつく可能性を秘め、超高速な並列処理を実現する量子計算や、盗聴者を確実に検知しながらの秘密通信を可能にする量子暗号などの光子を用いた量子情報通信処理へも直接応用可能です。

本研究は、北海道大学電子科学研究所の竹内繁樹准教授をリーダーとし、永田智久（同大学院生）、岡本亮（JST 研究員）、ジェーレミー・オブライアン博士（英国 Bristol 大学上級講師）らの研究チームにより、JST 戦略的創造研究推進事業チーム型研究（CREST タイプ）の研究テーマ「光子を用いた量子演算処理新機能の開拓（研究代表者：井元信之 大阪大学大学院基礎工学研究科 教授）」および文部科学省プログラムにおける研究の一環として得られたものです。

今回の研究成果は、米国科学雑誌「Science」に 2007 年 5 月 4 日（米国東部時間）に掲載されます。

<研究の背景>

光学干渉計とは、異なる経路を通る光線の間での干渉を利用した測定装置です。この光学干渉計を利用した光の位相測定は、距離や物質の密度などを精密に測定する手段として様々な分野で広く用いられています。例えば、数キロメートルの大きさにおよぶ巨大な光学干渉計が重力波検出器として建設されていますし、生物体の極微領域での物質の濃度の分布は、干渉計の一種である位相差顕微鏡によって画像化されています。

しかし、現在一般に行われている、レーザー光を光源に用いた光位相測定の場合、その精度はその光に含まれる光子数（＝光強度） n に対して $1/\sqrt{n}$ という限界があります。その限界は、古典理論によって示されています。このため従来は、光子の量（＝光の強さ）を1万倍にしても測定精度はせいぜい $1/\sqrt{10000}$ 、つまり100倍程度しか向上しないという問題がありました。

それに対して量子理論では、複数の光子がもつれた状態を作り出すことができれば、その光子の数が増えれば増えるほど、その限界を超えられることが指摘されていました。その理論によると、 N 個の光子を量子理論的にもつれ合わせることができれば、 $1/N$ の精度を達成できます。つまり、もし1万個の光子を適切にもつれ合わせることができれば、測定精度は、古典理論の限界の100倍を大幅に超え、1万倍に向上させることになります。

そのもっとも初歩的な、2個の光子を用いた実験は1980年代の後半に行われました。究極の光位相の測定精度の達成に向けては、光子数を増やすことが重要です。しかし、光子の数を3個以上に増やした状態での実験はこれまで成功していませんでした。

<研究成果の概要>

今回、本研究チームは、光子が4個互いにもつれ合った状態を高精度で作りに成功、さらに、特殊な工夫による非常に安定な光干渉装置を開発することにより、3個以上の光子で初めて、古典理論による限界を超えた感度での光位相測定に成功しました。

本研究で得られた成果および内容を以下に示します。

①光子が4個互いにもつれ合った状態を高精度で作製

本研究チームは、半透鏡（ビームスプリッター）^(注3)の両側から光子を2個ずつ、

計4個の光子を同時に入射することにより、そこで引き起こされる量子干渉を利用して、4つの光子が互いにもつれ合った状態を作成しました。その際、半透鏡に入射する4個の光子は、同じ時間、同じ位置、同じ方向で入射する必要があります。研究チームは、その量子干渉の結果を直接観測することで、必要な状態がきちんと生成されていることを確認する方法を新たに開発しました。その新手法を用いて、光子4個が互いにもつれ合った状態を、高精度で作製できていることを確認しました。(図2)

②特殊な工夫による非常に安定な光干渉装置

4個の光子を発生させる方法として、今回の実験では、パラメトリック下方変換という現象を利用しました。これは、特殊な光学結晶中で、エネルギーの大きな光子が、その半分のエネルギーの2つの光子へと分裂する現象です。ただ、この方法では4個の光子はまれにしか発生しないため、一つの実験を数時間にわたって行う必要があります。その間、4個の光子の干渉状態を安定して得るためには、光子が通る2つの経路(道すじ)の長さが、数ナノメートル(原子数十個分、1ナノメートルは百万分の1ミリメートル)で一致し続ける必要がありますが、そのような安定性を得ることは非常に困難でした。

本研究チームは、図1に示すような、特殊な工夫をした光干渉装置を開発しました。この装置では、2つの光経路はまったく同じ光学部品を通るため、光学部品がわずかにずれても、経路の相対的な長さは変化しない仕組みになっています。

③3個以上の光子で初めて、古典理論による限界を超えた感度での光位相測定

図3(c)の4光子干渉縞^(注4)が、今回の研究で最重要の結果です。ただ、ここでは図3(a)の、1つの光子による干渉結果から順に説明します。

図3(a)は、図1の干渉計の一方の入力(a)から、1つだけ光子を入射した際に、出力の一方(f)での光子計数率(縦軸)を、干渉計内部に挿入した素子で位相(=経路の長さ、横軸)を変化させながらプロットしたものです。このグラフは、横軸の左端から右端までが、ちょうど光の波長(780ナノメートル)になっていることを示します。

図3(b)は、図1の干渉計の2つの入力a,bから、光子を1つずつ同時に入射し、その結果を出力e,fに設置した検出器で同時に検出した結果です。これは、以前に行われた2個のもつれ合った光子による実験を再現したものになっています。グラフは、1光子の場合(図3(a))に比べて、半分の周期の波になっており、理論の予測と一致します。また、その最小値がほぼ0になっていることから、正確に干渉が生じていることがわかります。

図3(c)が、もっとも重要な結果です。図1の干渉計の2つの入力 a, b から、光子を2個ずつ、計4個の光子を同時に入射し、その結果を出力 e, f に設置した検出器で検出した結果です。出力 e には3台の光子検出器を、f には1台の検出器を設置し、e から3個、f から1個の光子が出力された場合をプロットしています。グラフは、1光子の場合（図3(a)）に比べて、4分の1の周期の波になっており、理論の予測と一致します。また、この場合もその最小値がほぼ0になっていることから、正確に干渉が生じていることが分かります。

この干渉の正確さを、より定量的にあらわすための指標として用いられるのが、明瞭度 V で、 $V = (\text{最大値} - \text{最小値}) \div (\text{最大値} + \text{最小値}) \times 100(\%)$ で定義されます。 V は0% から100%までの値をとり、100%の時は理想的な干渉状態を、0%の時がもっとも悪い（まったく干渉していない）状態となります。今回の実験では理論上、古典理論による限界を突破するためには、光位相測定83%以上の明瞭度 V を達成すれば良いことが分かっていました。

実験結果の明瞭度 V は、 $91\% \pm 6\%$ と、誤差を考慮しても十分にこの83%を上回っており、今回の4個のもつれ合い光子による干渉を用いれば、古典理論による限界を超えた感度での光位相測定が可能であることが確認されました。

<今後の展開>

本研究によって、これまでの限界を超えた計測技術の開発への展開が考えられます。たとえば、光子数4個の量子もつれ合い光子源を用いれば、同じ光子数で比べた場合、古典的な場合（レーザー光など）に対して理想的には2倍の精度が期待できます。たとえば、単一の細胞など、サンプルそのものが光の照射に対して敏感で、照射できる光量が限られている場合には非常に強力なツールになり得ます。またもし同じ精度を達成したい場合には、半分の入射エネルギーでよいこととなります。単に必要とするエネルギーを節減出来るだけでなく、高エネルギー耐性のために必要な技術を簡約化できます。

また、その精度は従来より \sqrt{N} （光子数 N 個）倍改善するため、将来的により多くの光子のもつれ合いを実現することに期待がかかります。もしも将来、1万個の光子を適切にもつれ合わせることができれば、測定精度は、古典理論の限界よりもさらに100倍向上できることとなります。

今回の実験では、この4光子干渉計の能力を、現在手にできる中ではほぼ最良の光子源（パラメトリック下方変換）と光子検出器（アバランシェフォトダイオード）に

よって検証しました。しかし、単一の細胞観察などへ応用するためには、より効率の高い2光子源や、高い量子効率をもち光子数も区別できる検出器の実現が望まれます。

また、今回の研究で得られた、高い量子干渉技術や、4光子のもつれ合い状態の検定技術は、位相計測のみならず、超高速な並列処理を実現する量子計算や、盗聴者を確実に検知しながらの秘密通信を可能にする量子暗号などの、光子を用いた量子情報通信処理へも直接応用が可能な技術です。

<参考図>

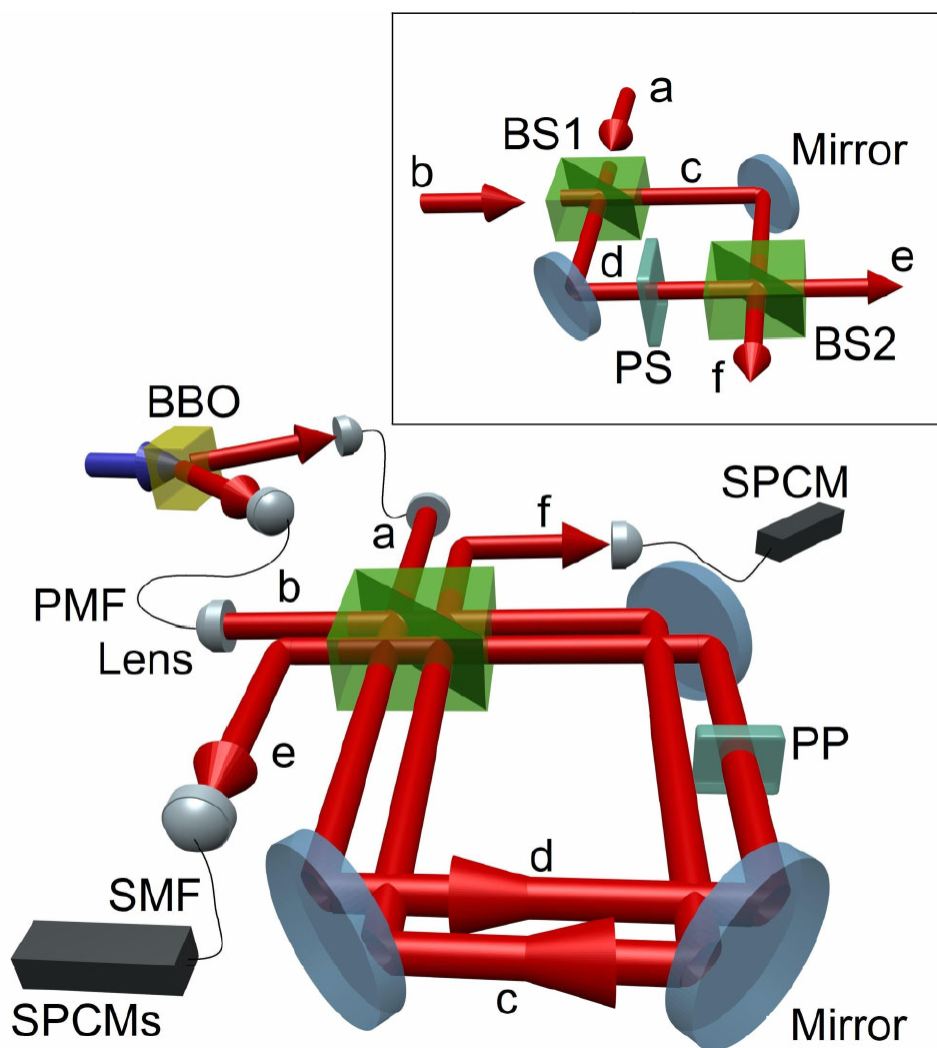


図1 実験装置

上右挿入図に示したのは、一般的な光干渉計（マッハツェンダー型干渉計^(注5)）です。この光干渉計では、a から入力された光ビームは、半透鏡 BS1 で2つの経路 c, d へと分割され、再度半透鏡 BS2 で合わせられます。その際、その2つの光は干渉し、その経路の長さの差に応じて、出力 e と出力 f の光強度は変化します。今回の実験では、図中央に示した特殊な工夫をした干渉計を用いました。その基本的な機能は挿入図と同じですが、2つの経路 c,d が同じ光学部品を通るため、光学部品の位置が熱や振動により少々揺らいでも、経路 c,d は同じだけの変化を受けるため、経路の差は変化しません。そのため、安定な干渉が可能となりました。

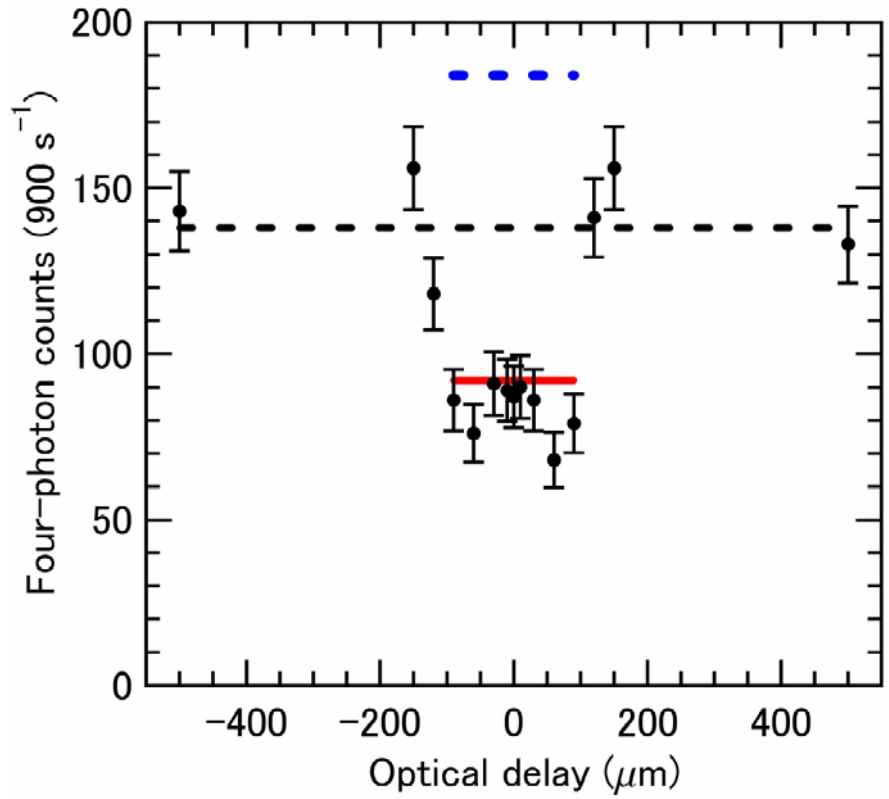


図2 2光子対同士の量子干渉結果

2個ずつの光子（計4個）を、半透鏡の2つの入力ポートから同時に入射し、その結果、光子が再度2個ずつに分かれて射出する場合を計数しました。横軸は、その入射タイミングのずれ、縦軸は計数率を表します。同時に入射した場合（横軸 Optical delay が 0）の値が、タイミングを大きくずらして入射した場合の平均値（黒点線）にくらべて計数率が約 2/3（赤実線）になっており、4個の光子が精密にもつれ合った場合の理論予測とよく一致しました。青点線は、入射される2個の光子が異なる時間位置に存在し、期待される4個の光子がもつれあった状態にない場合の理論予測です。

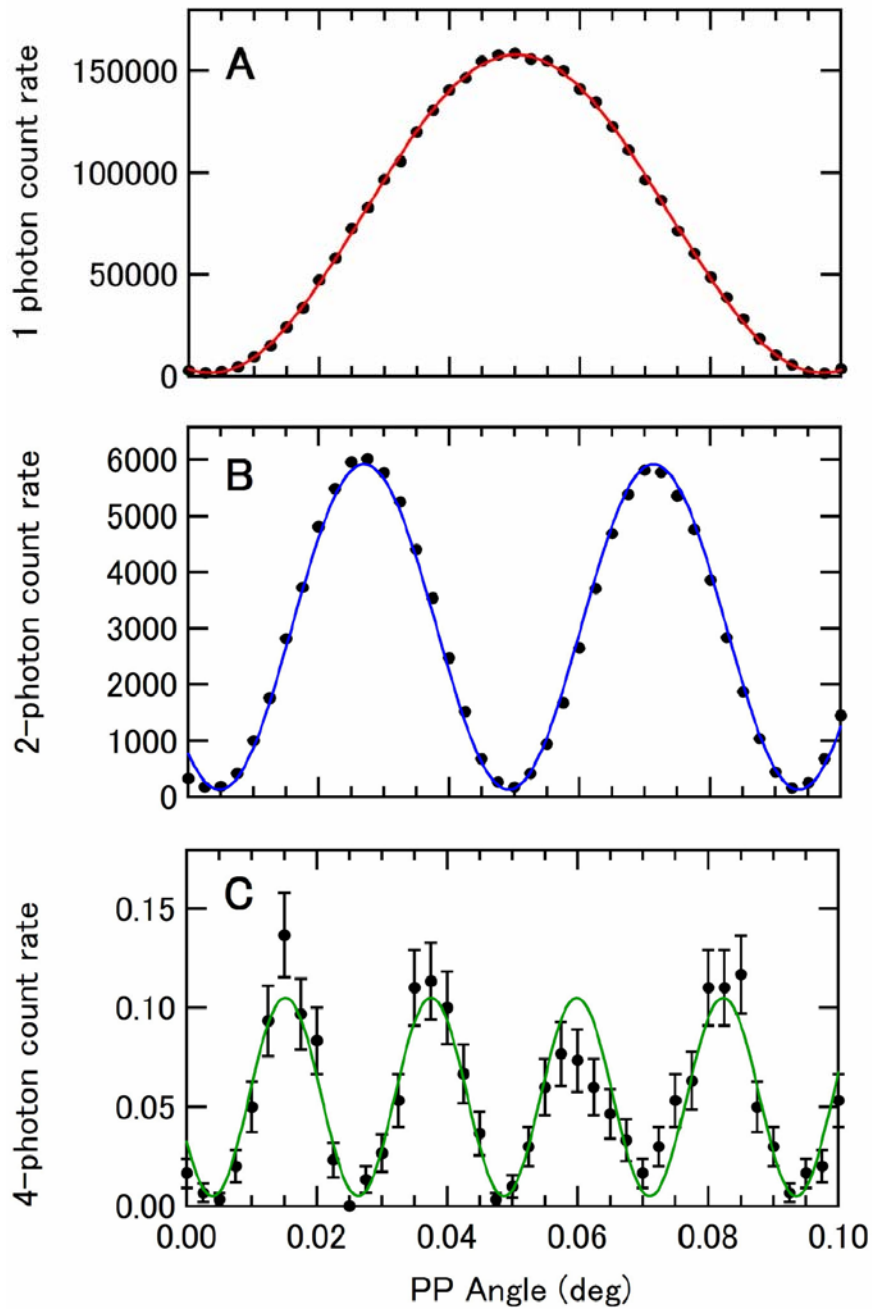


図3 実験結果

縦軸の単位はすべて毎秒。(A) 1光子入射時の干渉縞。(B)光子を1個ずつ、入力ポートA,Bから入射した際の2光子干渉縞。(C)4光子干渉縞。明瞭度は $91 \pm 6\%$ で、古典理論による限界感度を破るための明瞭度83%より十分大きな値です。

<用語解説>

(注1) 量子もつれ合い :

量子もつれあい (Quantum Entanglement) とは、2つの異なるシステム間で相関した状態が2つ以上あり、それらが(量子において複数の状態が同時に成立する)量子重ね合わせ状態にあることを言います。たとえば今回の研究で用いた4光子もつれ合い状態 ($|4, 0\rangle + |0, 4\rangle$) とは、「干渉計の一方の経路 (A) に4光子状態が存在し、他方の経路 (B) には光子がない」という状態と、「干渉計の経路 (A) には光子がなく、他方の経路 (B) に4光子状態が存在する」という、全く異なる2つの状態の量子重ね合わせ状態です。

(注2) 古典理論による限界 :

レーザー光などのいわゆる「古典光」を用いた場合、光位相の測定精度はその光に含まれる光子数 (=光強度) n に対して $1/\sqrt{n}$ が限界であり、これを「標準量子限界」と呼びます。これは、測定を n 回行うと、その統計誤差が \sqrt{n} で与えられる事に対応しています。この標準量子限界が存在するため、一般により精度を上げるには、入射光強度を増大させるか、測定時間を増やすしかありませんでした。しかし、一般にはその両者とも技術的な限界があり、それらにより決まる「標準量子限界」により得られる精度が制限されていました。

(注3) 半透鏡 (ビームスプリッター) :

入射したレーザー光などの光を2つ(場合によってはそれ以上)に分割する光学装置。半透鏡に入射した光は、一部は反射し、一部は透過して分割されます。反射光と透過光の強さがほぼ1:1の場合はハーフミラーとも呼ばれます。民生品では、光ピックアップ、反射型液晶プロジェクター、光通信機器などに使われています。

(注4) 干渉縞 :

干渉計の内部に設置された位相シフタによって、光路長を一様に変化させますと、出力部での光強度はサイン関数的に変化し、縞模様を形成します。これを干渉縞と呼びます。

(注5) マッハツェンダー型干渉計 (図1) :

通常は、レーザー光などを入力部の半透鏡 (BS1) に入射し、それが2つの経路 (c, d) に分割されます。光は波でもあるので、それらの分割波が出力部の半透鏡 (BS2) で合波される際に、干渉が生じます。その干渉結果は、出力 e と出力 f の光強度として得られ、内部に設置された位相シフタ (ps) の状態によって変化します。たとえば媒質のわずかな粗密や、重力波の通過によってもこの位相が変化し、それぞれ生物用干渉顕微鏡や、重力波干渉計に応用されています。

<論文名>

“Beating the Standard Quantum Limit with Four Entangled Photons”
(4つのもつれ合い光子により、標準量子限界をうち破る。)

<研究領域等>

この研究テーマが含まれる研究領域、研究期間は以下のとおりです。

○戦略的創造研究推進事業 チーム型研究 (CREST)

研究領域 : 「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」

(研究総括 : 山本 喜久 スタンフォード大学 教授 / 国立情報学研究所 教授)

研究課題名 : 「光子を用いた量子演算処理新機能の開拓」

研究代表者 : 井元 信之 大阪大学大学院基礎工学研究科 教授

北大グループリーダー : 竹内 繁樹 北海道大学電子科学研究所 准教授

研究期間 : 平成15年度～平成20年度

<お問い合わせ先>

竹内 繁樹 (たけうち しげき)

北海道大学 電子科学研究所

〒060-0812 札幌市北区北 12 条西 6 丁目

TEL : 011-706-2646 または 2648 (秘書室)、FAX : 011-706-4956

E-mail: takeuchi@es.hokudai.ac.jp

瀬谷 元秀 (せや もとひで)

独立行政法人科学技術振興機構 戦略的創造事業本部

研究推進部 研究第一課

〒332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8

E-mail : crest@jst.go.jp

※ 5月7日(月)より戦略的創造事業本部は下記に移転します。

〒102-0075 東京都千代田区三番町5番地 三番町ビル

TEL : 03 - 3512 - 3524 FAX : 03 - 3222 - 2064