

極限的超短パルスの絶対位相制御を実現し、それを分子の配向制御に応用することに成功した

小林 孝嘉 (物理学専攻 教授)

絶対位相とは、「レーザー電場の包絡線(黒線)のピークに対する、搬送波(赤線)のピークの相対的な位相^{*1}」として定義される。図1に、 0 、 π 、 $\pi/2$ の例を示す。その中間的な値の場合も勿論ある。これはより厳密には搬送波包絡位相(carrier-envelope phase)と呼ばれる。近年、絶対位相は、高強度レーザーによる軟X線発生やイオン化などの過程におけるその重要性が認識され、耳目を引いている。更に絶対位相は、光周波数計測等の精密計測学においても非常に重要な役割を果たすことが示された。このような流れの中で、フィードバック機構を備えたレーザー装置の絶対制御技術、またそれらを光源とした、絶対位相に依存した現象の解明が、広く興味を集める一分野として成長しつつある。

通常使われているパルスレーザーから出射される場合、パルスごとにその絶対位相は異なっている。我々の研究室では、自動的に絶対位相が安定化されるような特殊なレーザー装置を開発し、そのレーザー光を試料分子に射出することによって、分子の配向^{*2}を制御することがで

きたというのが、今回の成果である(図2)。

従来、絶対位相は、数周期程度の非常に短い光パルスについてのみ意味があり、かつ超高強度レーザーを用いないと測定できないと、専門家間で理解されていた。今回、この二つの「常識」を覆して、比較的弱いレーザーでかつ30周期のパルスを用いて測定した。それに加えて、分子の配向制御といった、分子運動、引いては化学反応を制御し、反応生成物を高効率で得ることもつながる新しい制御法を開発したことにより、絶対位相制御の有用性が更に高まったと言える。即ち、これまでは見過ごされて来たことではあるが、絶対位相は、様々な分野にまたがって研究が行われているコヒーレント^{*3}制御における新たな制御パラメータとして利用される可能性を示した。

本研究は、S. Adachi and T. Kobayashi, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 153903 (2005)に掲載されている。

(2005年4月15日プレスリリース)

- ※1 位相
時間あるいは空間的周期現象の一周期中の位置を示すパラメータ。
- ※2 分子の配向
分子を、平行または反平行にそろえること。非極性分子(永久双極子のない分子)の分子軸の向きを揃えて平行に並べると、個々の分子の特性が強調される事が起きうる。また、極性分子(永久双極子のある分子)の双極子の向きを揃えて並べると、巨視的な物質系としての反転対称性が破れるので、二次的非線形効果が出現する。
- ※3 コヒーレント
波の干渉しやすさ。時間(t)、空間(r)、波動ベクトル(k)、周波数(ω)の4種類がある。時間を例にとると、二つの時間点 t 、 t' の差がどれだけ大きくなるまで、 t における波の強さから t' における値が予測出来るかを表す。

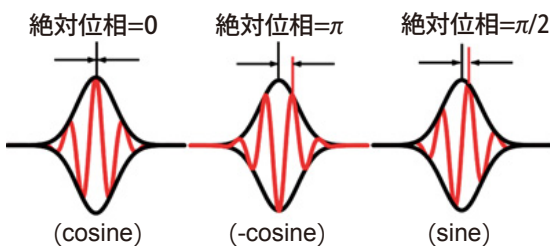


図1: パルス幅(黒線)が完全に同じで、異なる絶対位相を持つレーザーパルス

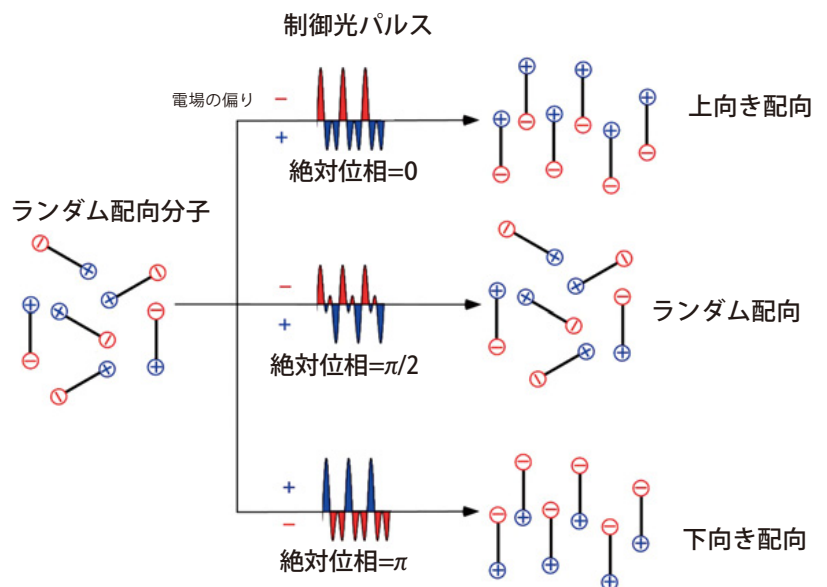


図2: 絶対位相制御による分子配向制御

超高温ハドロン物質の流体性の発見

浜垣 秀樹 (原子核科学研究センター 助教授)

米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)のRHIC重イオン衝突型加速器(図1)を用いた重イオン衝突実験研究を推進しているが、系の集団的な振る舞いの研究から、衝突により生成される超高温の系が流体に特徴的な性質を示す事がわかってきた。

近年、極端条件下でのハドロン(陽子や中性子、中間子等、強い相互作用をする複合粒子の総称)多体系が大きな注目を集めている。計算機を駆使した格子量子色力学(QCD)計算は、高温(〜170MeV)でクォークとグルーオン(強い相互作用の媒介子)が閉じ込めから解放され、クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)と呼ばれる新しい物質相に相転移することを予言した。QGPは、ビッグバンから数マイクロ秒後の原始宇宙の姿である。

高エネルギー重イオン衝突実験は、高温・高密度状態を実験室で実現し、その性質を調べる目的で80年代に始まったが、QGP実現の決定的な証拠は得られず、ましてや性質に関する知見は皆無

であった。RHICが2000年に稼動開始したことで研究は新しい時代に入った。RHICでは、100GeV/核子の金原子核同士の正面衝突が可能である。RHICでの研究のため、日米共同でPHENIXという新たな測定器を開発・建設した。多くの新しい結果が得られつつあるが、例えば、媒質中でのジェットの振る舞いの研究から高密度状態の実現が確認されている。

粒子の放出角度分布や運動量分布等の、集団的な振る舞いから、系の時空発展が調べられてきた。最近の研究で、金・金衝突からの放出粒子の方位角分布に、大きな楕円型異方性が見出された。陽子・陽子衝突にはない様相である。衝突係数が有限な場合、図2のように原子核が重なり合う衝突領域は楕円体となる。局所熱平衡が達成されると、粒子は圧力勾配が大きい楕円短軸方向に多く流れる。実験結果の一例を図3に示すが、流体* (ここでは粘性ゼロの相対論的完全流体)を仮定した計算と良い一致を示す。(QGP相に豊かな構造の存在を指摘した初田教

授(物理学専攻)らの先駆的な仕事を別にすれば)これまでQGP相は自由気体的と考えられてきた。実験結果はこの予想を完全に覆すものであり、極端条件下における物質の性質の研究を大きく前進させるものである。

今後、色々と条件を変えての測定を計画しているが、特に、より高い温度状態での振舞いは是非にも調べたい課題である。その為、近い将来、RHICの20倍余りの衝突エネルギーが可能なCERN-LHC加速器での研究を視野に入れている。超高温物質の流体的性質については、その理論的研究が活発化し、また、宇宙初期の宇宙磁場生成シナリオや元素合成理論との関係も検討され始めた。なお、結果はNuclear Physics A757号(7月下旬)に掲載予定である。

(2005年5月10日プレスリリース)

* 流体的である条件は、構成要素間の相互作用が十分に強く、平均自由行程が系の時間・空間スケールに比べて十分に短いこと。相互作用が比較的弱い場合は、自由気体的に振舞う。

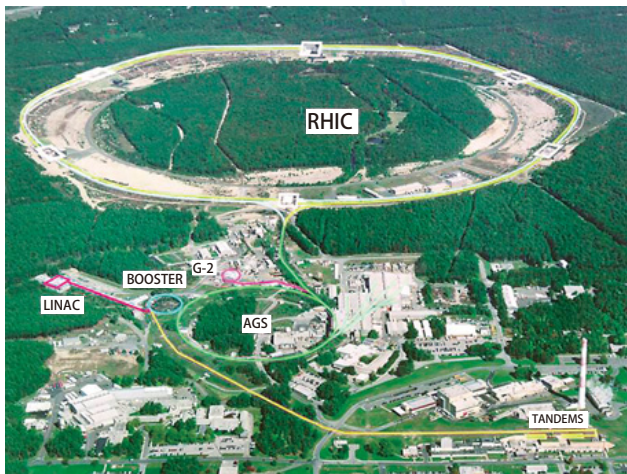


図1: 米国ブルックヘブン国立研究所のRHIC重イオン衝突型加速器。100GeV/核子の金同士の衝突を可能とする。

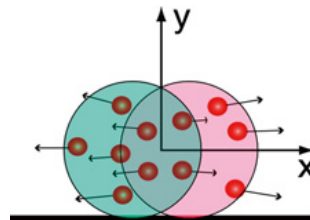


図2: 放出粒子の方位角分布に見られる楕円型異方性を説明するための概念図。有限の衝突係数を持ち、互いに反対方向から面に垂直に入射する二つの金原子核が衝突した様。二つの円が重なり合う領域が衝突領域で、局所的平衡状態が実現すると、粒子は圧力勾配の大きな±X軸方向に多く流れる。

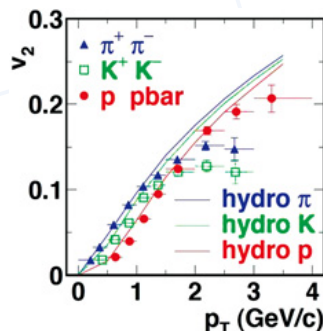


図3: 陽子(赤), K中間子(緑), π中間子(青)について、 v_2 (楕円の方位角異方性の大きさ)を運動量の関数としてプロットしたもの。実線は、理想流体を仮定した相対論的流体モデルによる計算結果。〜1GeV/c以下の v_2 の様相を良く再現している。

分子を整列させ「電子の波」の干渉効果を観測 — 極限的短時間 (10^{-15} 秒) 精度での分子構造の撮影手法に道 —

酒井 広文 (物理学専攻 助教授)

高強度超短パルスレーザー光を気体原子や分子に照射して発生する高次高調波^{※1}は、極端紫外～軟X線領域の、レーザー光と同じ性質を持つ超短パルス極短波長光源としての有用性から、長年にわたり多くの研究がなされて来た。ランダムな向きを向いている分子を使用した場合、分子に特有の現象を観測することは困難であった。今回、本研究が世界をリードするレーザー光による分子操作技術を駆使し、気体分子の向きが揃った試料を用いることにより、分子に特有の「電子の波」の量子干渉効果を観測することに世界で初めて成功した。

高次高調波の発生機構は、2つの過程からなる。高強度レーザー電場で電子がトンネルイオン化^{※2}する第1ステップと、このトンネルイオン化した電子が、高強度レーザー電場で駆動される間に得た高い運動エネルギーを、元の分子のイオンと再結合する際、「高い運動エネルギー+イオン化ポテンシャル」に相当するエネルギーの高い(波長の短い)光、すなわち高次高調波として発生する第2ステップである。今回独自に開発した手法は、高強度レーザー光を照射した際に発生するイオンを、高次高調波と同時に検出するというものである。この手法により、第1ステップと第2ステップの寄与を明確に識別することが可能となった。

試料として二酸化炭素分子を用い、分子を整列させるためのレーザー光を当ててから高次高調波発生用のレーザー光を照射するまでの時間を変えて実験したところ、観測したイオン信号の強度と高調波信号の強度との変化の仕方が逆になることを初めて発見した。すなわち、イオ

ン信号が大きい時、高調波信号が小さくなり、イオン信号が小さい時、高調波信号が大きくなった。このことは、二酸化炭素分子中の2つの酸素原子近傍の価電子軌道からトンネルイオン化した電子が、再結合過程で「電子の波」として振る舞い、強く打ち消し合う干渉効果が起こっていると考えることにより理解できる(図)。このような再結合過程における電子の波の干渉効果は、最近の理論研究によって、その観測が期待されていた「分子中で起こる量子力学的現象」の最も顕著な効果の一つである。今回の成果の鍵は、整列させた分子を試料とし、高調波とイオンを同時に観測するという独自の実験手法の採用にあった。

今回観測された強く打ち消し合う干渉効果の著しい特徴は、この効果が1分子中で、光の1周期以内で起こっていることである。この干渉効果を利用することにより、分子の瞬間的な構造(直線分子の場合は核間距離)を1フェムト秒($=10^{-15}$ 秒)以下の極限的短時間精度で調べられる可能性がある。さらに、整列させ

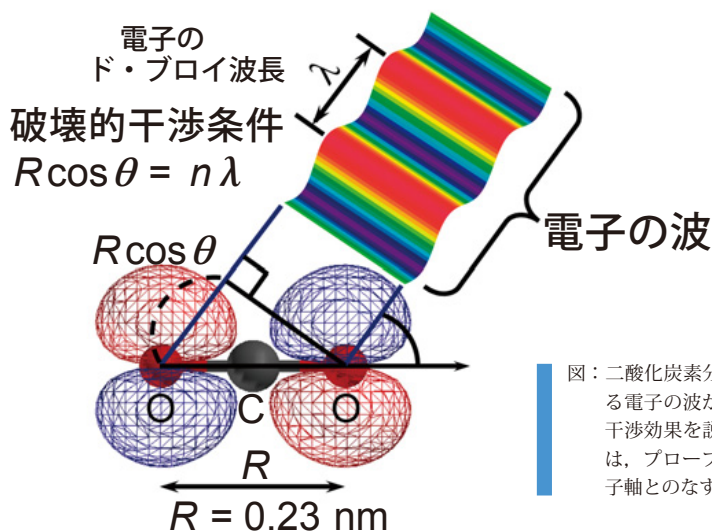
た分子を試料とし、高調波とイオンを同時に観測するという実験手法は、今後当該分野の標準的実験手法となるであろう。

本研究は、「T. Kanai, S. Minemoto, and H. Sakai, Nature (London) **435**, 470-474 (2005)」に掲載され、同じ号のNEWS & VIEWS欄「J. P. Marangos, Nature (London) **435**, 435 (2005)」で注目すべき成果として紹介された。

(2005年5月26日プレスリリース)

※1 高次高調波
強度が $10^{13} \sim 10^{14}$ W/cm² 程度以上の超短パルス高強度レーザー光(基本波と呼ぶ)を原子や分子に照射すると、波長が基本波の n 分の1 (n は反転対称性のある媒質の場合は奇数)の短波長光が発生する。 n は容易に数十に達し、 n 次の高調波と呼ばれる。

※2 トンネルイオン化
量子力学系で見られるトンネル効果の一つ。ポテンシャル障壁よりも低いエネルギー状態からある確率でイオン化する現象をトンネルイオン化と呼ぶ。



図：二酸化炭素分子中で起こっている電子の波が強く打ち消し合う干渉効果を説明する模式図。 θ は、プローブ光の偏光方向と分子軸とのなす角に対応する。

宇宙で最初に爆発した超新星から生まれた重元素の最も少ない星

野本 憲一 (天文学専攻 教授), 梅田 秀之 (天文学専攻 教務補佐員)

最近、すばる望遠鏡によって発見された“重元素の最も少ない星”は、この星がはたして宇宙で最初に誕生した星であるかどうかという問題を提起した。私たちは宇宙の第一世代の大質量星の進化と超新星爆発をシミュレートし、超新星爆発によって放出された重元素を含むガスの組成を推定したところ、この星の極めて特異な元素組成と合致することを示した。それにより、(1) この星は第一世代の超新星から生まれた第二世代の星であること、(2) この超新星は、ブラックホールを形成しつつ爆発する特殊な超新星であったことを明らかにした。

宇宙誕生直後にはビッグバンで創られた水素やヘリウムなどの軽い元素しかなかったために、宇宙初期には炭素よりも重い元素を持たない星々（第一世代星）が生まれたはずである。もしこれらの星が太陽よりも軽い星であったならば、現在でも生き残っている可能性があるために、20年以上も前からこのような星の探査が行われてきた。ごく最近、すばる望遠鏡によって、これまでで最も重元素の少ない HE1327 - 2326 という名の、太陽より質量の小さい星が発見された。水素に対する鉄の比が太陽と比べて25万分の1しかなく、それまで知られていた星 (HE0107 - 5240) の最小記録 (20万分の1) を更新したのである。

これらの星は、その鉄の含有量の極端な少なさから、発見当初より「第一世代の星そのものではないか」という可能性が指摘されていた。この場合、観測された重元素は長い寿命の間に星間ガスや連

星系を成しているなら伴星から供給されたものとなる。これに対して、私たちは、(1) 第一世代の星は、もっと重くて寿命の短い星であり、それが一生の最後に超新星爆発を起して重元素を放出すること、(2) 観測された小質量星は第一世代ではなく、第一世代の超新星が放出する重元素によって汚染されたガスから生まれた第二世代の星であると考えた。これは重元素が非常に少ないガスでは、ガスの冷却効率が低いために大質量星が生まれるという理論的予想に基づいたものである。

このように宇宙で最初に生まれた星が軽かったか重かったかという論争に決着をつけるヒントとして、私たちは、観測された重元素の非常に少ない二つの星の元素組成に着目した。これらの星では、鉄の少なさがほぼ同じであることに加えて、鉄に対する炭素の比が太陽の1万倍と異常に多いという共通の特徴を持っていた。その一方で、ナトリウムやマグネシウムについてはその比が10倍、窒素では100倍も異なるという大きな違いがあった (図1)。私たちは、まず、炭素と窒素の組成比を星間空間や伴星からのガス降着で再現することは困難であることを示した。

では、大質量星の超新星爆発によって放出された重元素を含むガスの組成は、観測された組成を説明できるのだろうか。それがイエスであることを示したのが、今回私たちが計算した大質量星の超新星のモデルである。このモデルでは、質量の大きさに比べて爆発のエネルギーがやや小さく、いったん合成された重元素の

大部分が中心部のブラックホールに落下してしまい、ごく一部の鉄族元素だけが、表面に混ぜられて放出されるのである (図2)。一方、星の外側にあった炭素などの元素は、落下することなく放出されるので、放出される爆発物質は観測のように非常に大きな炭素と鉄の比を持つことになる (図1)。また、ナトリウムやマグネシウムはブラックホールへ落下するかどうかの境界付近にあるために、それらの組成の違いは爆発エネルギーのわずかな違いによってその境界の位置が変化したことで生じたと考えられる。

超新星の後期の明るさは、主として、放出された放射性元素ニッケル (Ni56) が鉄 (Fe56) へと崩壊していく過程で発生するガンマ線のエネルギーによって賄われる。従って、放出される鉄が極端に少ないということは、これまでに知られている超新星よりも、後期がはるかに暗い新型の超新星であったことを意味している。

このように、私たちの研究は、第一世代の星は大質量星であり、その中でも、ブラックホールを形成しつつ超新星爆発を起すものが、宇宙初期の元素の増加、化学進化に重要な寄与をしていたことを初めて示したのものとなった。本研究は、元天文学専攻・日本学術振興会特別研究員で現在日本原子力研究所研究員の岩本信之氏が筆筆者の論文として、Iwamoto et al. (2005 Science 308, および Science Express オンライン速報版) に掲載されている。

(2005年6月3日プレスリリース)

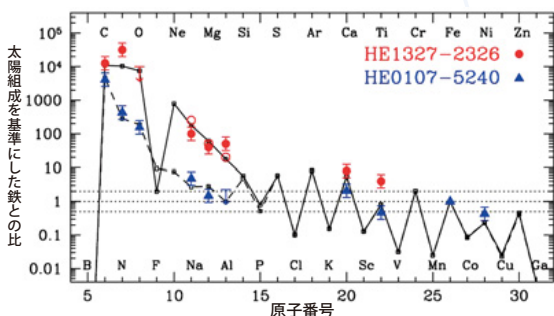


図1：鉄が極端に少ない2つの星 HE1327 - 2326 (赤点) と HE0107 - 5240 (青点) の元素組成分布と理論モデルによる再現結果 (実線が前者、破線が後者に対応する)

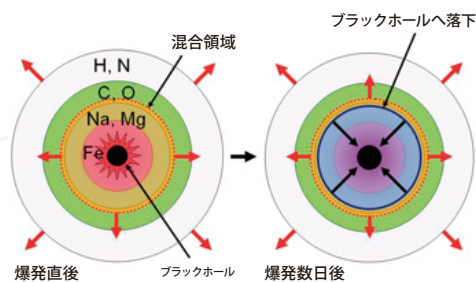


図2：ブラックホールを形成するような大質量星の超新星爆発で、いったん重元素が合成され (左)、その後、鉄の大部分がブラックホールへと落下し、ごくわずかだけが表面へと混ぜられて放出されるモデルの模式図