



研究最前線

ナノチューブ加速器によるプロトンビーム生成

Proton Beam Generation by Nanotube Accelerator

村上 匡且

MURAKAMI Masakatsu

大阪大学レーザーエネルギー学研究中心

(原稿受付：2014年3月12日)

カーボンナノチューブの内部に水素化合物を充填するなどしたナノ構造体に強力なレーザーを照射すると、正に帯電したナノチューブと内部プロトンが電氣的に反発し合う結果、プロトンが高い指向性とエネルギー均一性をもってナノチューブの両端から射出されるという新たなイオン加速機構を提唱する。

Keywords:

nanotube accelerator, high-intense short pulse laser, proton beam generation

1. はじめに

近年、超短パルス・超高強度レーザーによるイオン加速の研究が世界の多くの研究機関・研究者を巻き込んで精力的に展開されている。これは、陽子線癌セラピー、プロトンビーム診断、コンパクト中性子源、プロトン駆動核融合といった、医療、産業、エネルギーなど幅広い分野への応用が視野に入っているためである。将来の実用的な応用には、加速されるイオンビームに対して、最大エネルギー、指向性、単色性、エネルギー効率といった各種工学的条件が各々の用途ごとに課せられることになる。特に指向性、単色性は応用の如何を問わず共通要請項といえる。レーザーを使ったプロトン加速に関しては、これまで様々なターゲットや加速方式が提案されているが、一長一短のものが多くのが現状である。本稿では、つい最近提案されたカーボンナノチューブを利用した新しいプロトン加速方式に関して紹介する[1]。よく知られるようにカーボンナノチューブ(CNT)は、1991年、飯島澄男氏の発見以来[2]、そのユニークな物性・機械特性ゆえに半導体、燃料電池、光学機器といった様々な応用へと発展した。ただ、そうした応用の動作環境は、固体・常温というものが殆どであり、本稿で述べる機構が対象とするフェムト秒(10^{-15} sec)、メガ電子ボルトといった極限パラメータにおいて動作する応用は皆無といえる。

2. ナノチューブ加速器の加速機構

図1は「ナノチューブ加速器」の概念図である。長さ50-200 nm、直径20-100 nm程度のサイズのカーボンナノチューブの中に、水、パラフィン、プラスチック等の水素化合物を挿入する。 $10^{18}-10^{20}$ W/cm²オーダーの強度をもつ超高強度レーザーの照射により、ナノチューブだけでな

く内部の水素化合物もプラズマ化しほぼ完全電離するため、水素化合物(固体・液体)の化学結合としての在り方は重要ではない。ただし、最終的なプロトンビームのフラックスを増強させる意味から水素リッチな化合物が好ましい。レーザー照射によって系に内在する電子は原子からはぎ取られ、10フェムト秒前後、即ち、高々2~3レーザーサイクルの時間スケールで電離した電子の大半が遠方に吹き飛ばされる。取り残されたイオン群は強力な自己クーロン力により互いに反発し合い四方八方に加速され

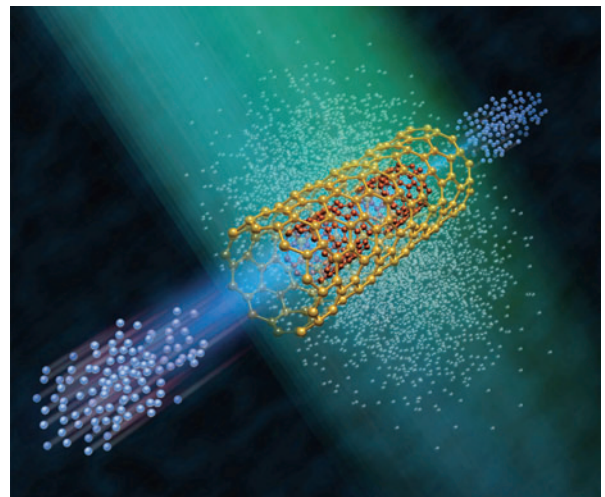


図1 「ナノチューブ加速器」概念図。カーボンナノチューブ内に水素化合物を装填した状態で超高強度レーザーを円筒側面に照射すると、大半の電子は吹き飛ばされ、残されたイオン同士のクーロン反発力によって内部のプロトンが弾丸の如く円筒軸方向へ射出される。ナノチューブと内装水素は大砲の砲身と砲弾の関係に対応する。ナノチューブを金原子等でコーティングすることでビーム品質の向上につながる。

る。ターゲットに球状クラスターを使えば、イオンも等方的に球状に飛散することになり、これがいわゆるクーロン爆発と呼ばれるものである[3]。しかし、図1に示されるような中空円筒状の構造下では、興味深いことに内部のイオン（特にプロトンのような軽イオン）は円筒軸に沿って指向性をもつて射出されるだけでなく、ほぼ同程度のエネルギーをもった単色性の高いビームを生成することが詳細な3次元粒子シミュレーションからわかった（後述）。円筒状のナノチューブと内挿水素化合物は、大砲の砲身と砲弾の関係に類似している。以下、これを「ナノ砲」ないし「ナノチューブ加速器」と呼ぶ。ところで、図1ではナノチューブと内挿水素の双方を単原子層として描いているが、実際には多層でも同じ動作原理で機能し、むしろ多層の方が高いクーロン反発力、したがってより高いプロトンエネルギーを期待することができる。内挿すべき水素化合物はシリンダ状である必要はなく、形状は何でも構わない。また、「ナノ砲」としての性能向上の目的から、カーボンナノチューブに金などの重原子をコートすることが得策と思われ、後述の3次元粒子シミュレーションにおいても有効であることが確認されている。

何故ナノチューブ加速器が指向性と準単色性をもつプロトンビームを生成し得るのかを、ナノチューブ内外のクーロンポテンシャルの鳥瞰図として模式的に示したのが図2である。図中、ナノチューブ本体は図の青線領域であると仮定しており、 z 軸とナノチューブの軸が平行である。縦軸の物理量は、ナノチューブ表面が一様に電離したと仮定した場合に生成されるクーロンポテンシャル場を計算したものである。ナノチューブ内のクーロンポテンシャルは図のように、 z 軸方向には凸構造を、半径方向には凹構造を持ち、全体としては鞍馬（サドル）構造を呈している。3つの赤点は任意の場所に置かれたテストイオンであり、こうして生成されたクーロン場を通して加速される様子が黄色の軌跡で表されている。ポテンシャルが独特の鞍馬構造という空間配位をもつが故に、テストイオンは中心軸方向に寄せられると共に、軸方向には加速され、ナノチューブ開口端より指向性をもって射出されるのである。イオンの加速は、基本的にはクーロンポテンシャルエネルギーから運動エネルギーに直接変換され、このエネルギー保存によって最終速度が決まる。

準単色性についてもやはり図2から理解できる。クーロン場による加速度は開口端付近が最大となるが、一方でナノチューブ内でのポテンシャル勾配は比較的緩やかである。換言すれば、水素化合物を開口端からある程度中心寄りに配置すれば、ポテンシャルエネルギーの差を低く抑えることができ、結果として運動エネルギーのばらつきも抑えられ、エネルギースペクトルが準単色に繋がると考えられる。

3. 粒子シミュレーション

ナノチューブ加速器からプロトンビームが生成される様子を詳細な3次元粒子シミュレーションを使って定量的に観測してみる。一般に多くのプラズマシミュレーションで

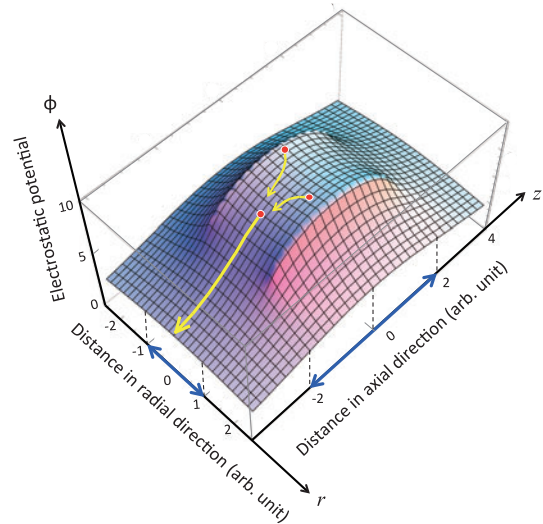


図2 ナノチューブの加速原理。ナノチューブ（円筒軸と z 軸は平行で、ナノチューブ本体は図の青線領域にあると仮定）。縦軸はナノチューブが一様に電離した場合のクーロンポテンシャルを表す。3つの赤点はテストイオンであり、ナノチューブ内を加速される様子を黄色の軌跡で表されている。ナノチューブ内では図のように、 z 軸方向には凸構造を、半径方向には凹構造をもつ鞍馬構造をもっている。この独特のポテンシャル配位が結果としてプロトンビームに指向性と準単色性をもたせる。

はPIC（Particle in Cell）コードと呼ばれる汎用性の高い粒子シミュレーション手法が使われている。ただPICでは、空間ユニットである1メッシュのスケールは、通常デバイ長程度として設定される。このことは、PICコードにはデバイ長より狭い空間の解像度がないことを意味している。一方、今我々が考えている系の環境（固体密度、MeV）においては、デバイ長が数十から数百nmのオーダーとなりナノチューブ加速器のサイズと同等、あるいはそれ以上になってしまうため、ナノチューブ加速器を取り巻く環境スケールではデバイ遮蔽が効かず、したがってPICコードは使えないことになる。そこで全ての2体間のクーロン相互作用を計算するMD（Molecular Dynamics）シミュレーションが必要となる。これは、スケールははるかに異なるが、遮蔽効果がない天体の多体問題を扱う手法と等価である。

図3はMDシミュレーションの結果である。長さ30nm、直径15nmのカーボンナノチューブに金をコートし、内部には直径8nm、長さ6nmの単層プロトン・シリンダを2個配置したものをターゲット構造として想定したものである。MD計算に使用した粒子は、電子、プロトン、炭素イオン、金イオンで、これら4種粒子の総数は約40万個である。レーザーは、波長0.8 μ mのTi-sapphireレーザーを使い、照射強度は 10^{18} W/cm²、パルス波形としてはシンプルな正弦関数を仮定した。この環境下で水素および炭素は完全電離、金原子の電離度は20とした[4]。時間 T はレーザー周期（2.8fs）で規格化した値を示す。レーザーは左右に振れる線形偏光として図3下段の下方から円筒軸に垂直に入射している。

大半の電子（白）は図3にみられるように、最初の数フェムト秒のうちに吹き飛び（残留電子量は20%程度）、

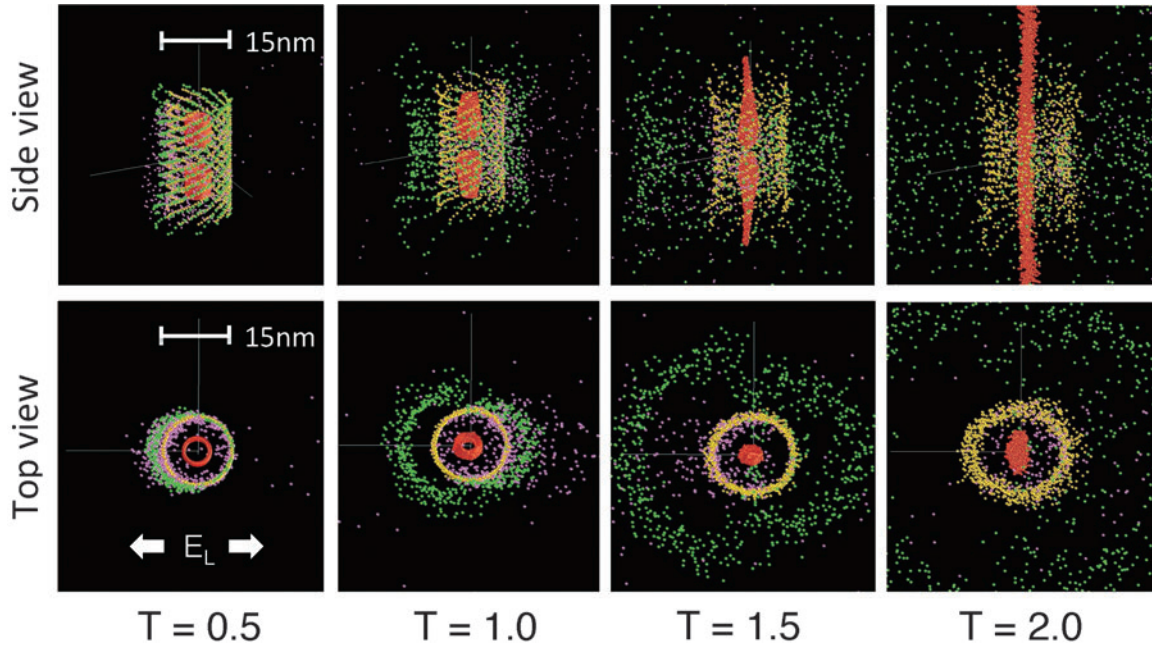


図3 ナノチューブ加速器の3次元粒子シミュレーション。白は電子，赤はプロトン，緑は炭素イオン，黄は金イオンを表す。レーザー照射強度は 10^{18} W/cm²，プロトンのエネルギーは 1.5 MeV であった。線形偏光を採用。時間 T はレーザーサイクル (2.7 fs) で規格化された値を示す。

それと同時にクーロン反発力により各イオンも膨張を始める。電場中にあるイオンの加速は、電荷を q 、質量を m とすると単純に q/m に比例するので、まず軽い炭素イオン（緑）が円筒外方に膨張を始める。一方のナノチューブ内部では先に述べた加速機構により、プロトン（赤）が円筒中心軸方向に寄せられると共に軸に沿って外方に加速される。原子番号79の金は相対的に電離度も低く、大半のプロトンがナノチューブ外に射出されるまで「もちこたえて」くれる。これが、金のような重原子をコートすることによる加速パフォーマンス向上の理由である。また、本シミュレーションでは軸方向の長さ L と直径 D とのアスペクト比は $L/D = 2$ を仮定したが、エネルギー効率的にはこの程度の数値が最適と考えられる。たとえナノチューブを長くしても、開口端から深くチューブ内に位置するプロトンは加速に有効に寄与しないためである。

実際の応用をめざす観点から、プロトンのエネルギースペクトルを評価することが重要となる。図4は、図3に示したシミュレーションにおけるプロトンのエネルギースペクトルの $T = 5$ (14 fs) までの時間発展を示したものである。時間と共にスペクトルの形状はシャープになり、 $T = 5$ の時点で、ほぼ最終の形状に近いものとなっている。このときの最大プロトンエネルギーは $E_{\max} \sim 1.5$ MeV、エネルギー広がり $\Delta E \sim 0.5$ MeV、したがって相対的エネルギー揺らぎは $\Delta E/E_{\max} \sim 3\%$ と高い単色性を有していることがわかる。このとき、 $\eta_{\text{con}} = (\text{プロトンの総運動エネルギー}) / (\text{吸収レーザーエネルギー})$ として定義されるエネルギー変換効率は 1% 未満であったが、その後の計算における水素の装填増加等により理論設計としては 5% 程度にまで増大している。この数値自体は、レーザーによるイオン加速方式で最も広く研究されている TNSA (Target Normal Sheath Acceleration) 方式[5, 6] とほぼ同程度なのであ

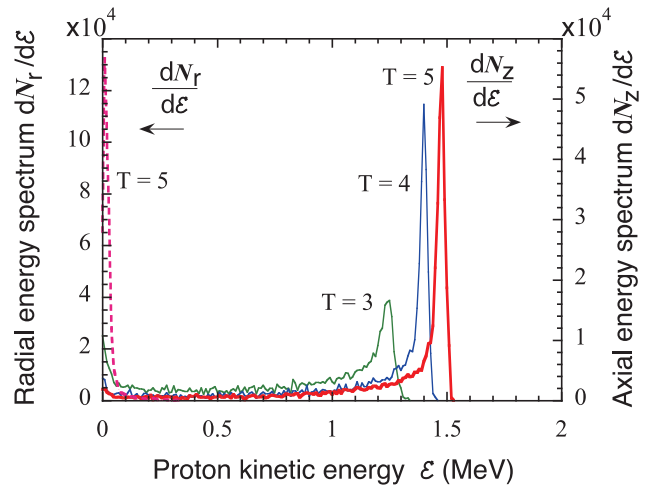


図4 プロトンのエネルギースペクトル。z軸方向のプロトンの運動エネルギーの時間発展を追ったもので、パラメータは図3のシミュレーションと同一。図中左端の破線は $T = 5$ における r 方向のエネルギースペクトルを表す。最終形状に達した $T = 5$ の時間帯で、高い単色性と指向性をもつプロトンビームが得られていることがわかる。

るが、TNSA の場合は低エネルギーから高エネルギー帯にかけてプロトンエネルギーが単調減衰するのが典型であり、最大エネルギー近傍における有効エネルギー束は限定されることに留意したい。ところで、一見すると図3の $T = 2$ において、生成されたプロトンビームには指向性はあっても、単色性があるようにはみえない。この点、図4にみるように、時間経過と共に膨張する金イオンとプロトンとの絶妙な空間配位と加速履歴による「後続の追い上げ効果」があり、最終的には $T = 5$ にみる単色スペクトルが得られるのである。また図4には、低エネルギー領域に破線で示された z 軸とは垂直な r 方向のエネルギースペクトル

も付されている。これから、ほぼ最終スペクトルに到達した時点 ($T=5$) で、 z 軸方向と r 方向の運動エネルギー比が85倍程度であることが評価され、高い指向性が得られていることがわかる。この時点までに系に内在するポテンシャルエネルギーはほぼ全て運動エネルギーに変換されており、以後のイオン膨張プロセスにおいても、指向性レベルは維持されることは確認されている。

4. おわりに

本稿では、特殊加工を施したナノチューブに超短パルス・超高強度レーザーを照射し、指向性と単色性を備えたプロトンビームを生成する新たなプロトン加速機構を紹介した。現在、本アイデアに対する実証実験計画が進行しており、その成否は(1)ターゲット(2)高精度レーザー(3)理論・シミュレーションによる最適化、という三位一体の有り様にかかっている。図1に示したスタンドアローンのナノチューブ概念図だけをみれば、「応用を標榜しているの

に一個だけで一体どうする」とか「ターゲットを基板に載せてナノ砲として本当に機能するのか」といった物理・工学的御質問は既に多く寄せられているが、本質的な障壁はないと考えている。ナノチューブ加速器という今回のアイデアが、これまでにない「ナノ材料工学と高エネルギー密度物理の融合」という新たなパラダイムを開く上での一つの試行となるのではないかと期待する次第である。

参考文献

- [1] K. Nishihara *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **464**, 98 (2001).
- [2] S. Iijima, Nature **354**, 56 (1991).
- [3] M. Murakami and K. Mima, Phys. Plasmas **16**, 103108 (2009).
- [4] P. Mulser and D. Bauer, *High Power Laser-Matter Interaction* (Springer, Berlin, Heidelberg, 2010), Chap. 7.
- [5] S.C. Wilks *et al.*, Phys. Plasmas **8**, 542 (2001).
- [6] 西内満美子：プラズマ・核融合学会誌 **88**, 5 (2012).