

# コンパクトな超強度レーザーとナノ構造が 超高圧に道を開く

ジョージ・J・ロッカ。共同執筆者、ヴァチエスラフ・シリャブツェフ、リード・ホリンガー、クレイトン・バグステン、アレキサンダー・プーコフ、ヴラル・カイマク、リカルド・トマジーニ、リチャード・ロンドン、ジェボム・パク、マリア・ガブリエラ・カベルート

相対論的強度の超短レーザーパルスと協調したナノワイヤアレイの放射は、ギガバル圧力で特徴づけられた超高エネルギー密度領域で物質を生み出し、高エネルギー物理学における新たな実験を可能にする。

物質を加熱して、ギガバルを超える圧力で特徴づけられる超高エネルギー密度(UHED)状態にすることは、例えば星の中心、国立点火施設(NIF)のようなレーザー駆動の慣性核融合(ICF)カプセルの球状圧縮に見られ、これは非常に難しい作業である。UHEDプラズマ状態は、核融合研究の関心事である。X線、ガンマ線、高エネルギー粒子、中性子も含まれるが、これらの強い閃光の生成、また極限環境研究所や天体

物理学環境に見られる条件での原子プロセスの研究にとっても強い関心事である。

残念ながら、研究室でのUHEDプラズマの実現は主に、ICF実験におけるこれら爆縮されたカプセルの主要ホットスポットに限られている<sup>(1)(2)</sup>、また今日のほとんどの強力なレーザーでさえ、固体フラットターゲットに照射する際には、UHED状態達成には及ばない。このような従来のプラズマ加熱ス

キームでは、最先端の強力レーザーパルスは、急速なプラズマ噴出を起し、レーザーパルスの残りが固体密度ターゲットを直接加熱できなくなる。今日のほとんどの強力な短パルスレーザーを利用する高温電子による加熱は、UHED状態への境界を超えるだけである<sup>(3)</sup>。

われわれは、コンパクトな超短パルス(USP)レーザーを用いてUHED状態に至るための、違うアプローチを追及している。相対論的強度に集束した、ジュールレベル程度のエネルギーの超高コントラストフェムト秒レーザーパルスで、高アスペクト比、垂直配向ナノワイヤアレイを照射する(図1)<sup>(4)(5)</sup>。

この戦略によって得られるのは、類例のない組合せである。つまり、ほぼ完璧なレーザー吸収と、半固体の平均密度ターゲットへの劇的に増強された光浸透との組合せである。ここでは光がトラップされ、ほぼ完全に吸収される。このため、材料は容量的に加熱されてUHED領域に十分に達し、繰返し放射可能なジュールクラスの卓上フェムト秒レーザーを使ってUHEDプラズマ領域への明確な経路が得られる。

## 相対論的強度でナノ構造照射

グレーティング、「スモークターゲット」(ガス雰囲気蒸着・堆積された金属)、ナノスフィア、ナノワイヤを含む構造化ターゲットをうまく使ってレーザー照射吸収を増やした。これは強められたX線放出の観察からも明らか

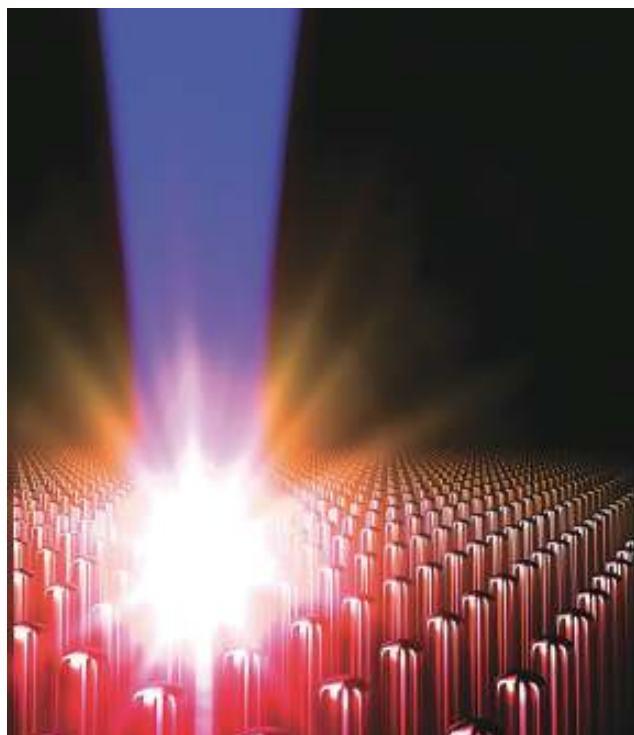


図1 相対論的強度のフェムト秒レーザーパルスと整列ナノワイヤアレイとの相互作用が、UHEDプラズマを生成する。(提供:コロラド州立大、リード・ホリンガー、アダム・ベアドール)

である(参考文献、18-24 in C. Bargsten et al. Sci. Adv., 3, 1, e1601558 [2017])。しかしながら、空隙なギャップで隔てられた高アスペクト比の整列されたナノワイヤアレイは、容量加熱を可能にする点で類例がない。これは、相対論的強度のフェムト秒レーザーパルスを半固体密度材料に深く浸透させることによって加熱する。

照射プロセスでは、強力なレーザー場によって電子がナノワイヤ表面からはがされ、レーザー場は電子を加速してワイヤ間のギャップに押し込み、これによって高エネルギーが得られる。電子とナノワイヤとの衝突が材料を加熱して極端な高温にし、ナノワイヤを爆発させ、プラズマ間のギャップを急速に埋める。ギャップが埋まると、連続的な臨界電子密度層が形成され、レーザーエネルギーがさらに材料に結合することはできなくなる。

相対論的強度のフェムト秒レーザーパルスを利用することで、非常に効率的にエネルギーがナノワイヤアレイ深くに結合し、半固体密度材料の大容量を深さ数 $\mu\text{m}$ でマルチキロ電子ボルト温度まで加熱する。この容積プラズマ加熱アプローチにより、ギガバール圧力のUHED領域が、 $5 \times 10^{18} \text{W/cm}^3$ の比較的控えめな強度で利用可能になる。

コロラド州立大での実験では、垂直配向のニッケル(Ni)と金(Au)のナノワイヤアレイを約50fs幅の超高コントラストパルスで照射した。パルスは、周波数過倍( $\lambda=400\text{nm}$ )、高出力Ti:Sapphireレーザーからのものである。超高コントラストは重要である。比較的強度のプリパルスが、高強度超短パルスの到来に先立ち、臨界密度表面を形成することによってアレイを破壊することができるからである。

$5 \times 10^{18} \text{W/cm}^2$ のレーザーパルスを55

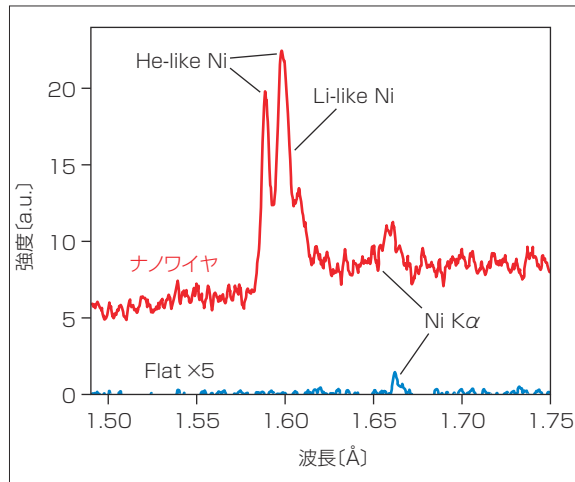


図2 強度 $5 \times 10^{18} \text{W/cm}^2$ で照射されたニッケル(Ni)ナノワイヤのシングルショットX線スペクトルを、フラット研磨Niターゲット(10倍拡大したスケール)のスペクトルと比較している。(出典:M. Purvis et al<sup>(4)</sup>)

から80nm径、固体密度約12%の平均密度ナノワイヤに集束させることによって得られるX線スペクトルは、強く電離したプラズマの生成を示している。垂直配向、55nmNiナノワイヤからのスペクトルは、強い発光の高イオン化プラズマを示している。強い発光は、 $2p-1s$ ( $\lambda=1.588\text{Å}$ )および、リチウム(Li)に似たラインとともに、ヘリウム(He)に似たNi( $\text{Ni}^{26}$ )の相互結合ラインからのものである(図2)。

このスペクトルは、同じ条件で照射された、研磨されたフラットターゲットに対応するスペクトルとは著しく違っている。それは、 $1.658\text{Å}$ でNi K $\alpha$ 線からの線放射を示しているだけである。K $\alpha$ 放射は、たいていの場合、高エネルギー電子で生成されるが、Heに似たイオン遷移は、強い裸イオンを生成して励起するには高温プラズマを必要とする。

ナノワイヤターゲットからのHeに似た線放射が、この放射強度でK $\alpha$ 線の強度を上回することは注目に値する。銅(Cu)箔での以前の研究では、K $\alpha$ 線からの放射は、 $>2 \times 10^{20} \text{W/cm}^2$ でようやく上回ったからである<sup>(6)</sup>。整列したNiナノワイヤターゲットは、この7-8keVスペクトル領域では、X線フラッ

クスで50倍以上の増加となった。以前の実験と一致して、1keVフォトンエネルギー領域でも同様の増強が観察された<sup>(7)</sup>。

同様に、80nm径Auワイヤアレイを照射することで、著しく強く電離した半固体密度のAuプラズマが生み出された。Auナノワイヤスペクトルは、コバルト(Co)に似たAu( $\text{Au}^{52}$ )からガリウム(Ga)に似たAu( $\text{Au}^{48}$ )までの範囲のイオンからの、未解明の4-3ラインの強力なAu M殻放射を示している。同じパルスで照射されたフラット固体ターゲットに関しては、Auターゲットからのスペクトルと、フィルタ処理したフォトダイオードアレイ信号の両方とも、X線領域で飛躍的な増加を示している。

### 最高エネルギー密度生成

高温電子ガスのエネルギー密度と圧力は、エネルギーおよび運動-速度生成物の積分によって与えられ、分布関数により重みづけされている。われわれは、セル内の粒子(PIC)シミュレーションを用いて、エネルギー密度を直接粒子データから計算した。また、平衡相対ガスの式を用いて圧力を推定した(図3)。レーザーの強力な電界によっ

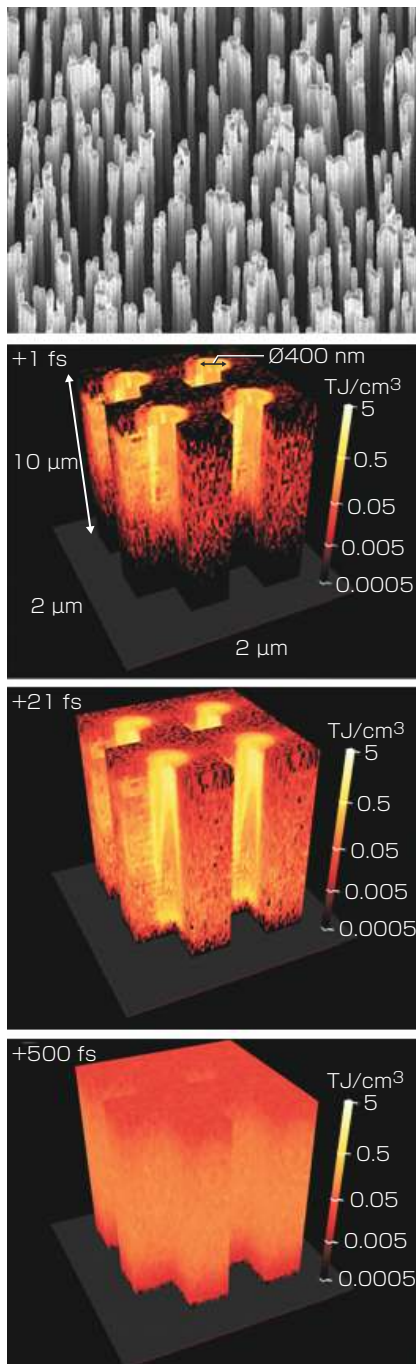


図3 エネルギー密度分布PICシミュレーションは、400nm波長、30fs幅、 $1 \times 10^{22} \text{W/cm}^2$ 強度で照射された垂直配向の金ナノワイヤを示している。各フレームは、ピークパルスに関して異なる時間に対応している。(提供:M. G. Capeluto [上]、出典:C. Bargsten et al.<sup>(5)</sup>[下])

てワイヤから剥奪した電子は、基板方向に加速される。

荷電平衡は、ナノワイヤを通した大

きなレーザー誘起反流の生成を必要とする。結果的に起きる強力な準静的、自然発生的方位磁場により、ナノワイヤは高温の超高密度プラズマになる<sup>(8)</sup>。 $4 \times 10^{19} \text{W/cm}^2$ 強度で照射された55nm径Niナノワイヤの例では、計算によりプラズマ密度が $10^{24} \text{cm}^{-3}$ を超えていることがわかり、エネルギー密度は約 $20 \text{GJcm}^{-3}$ である。圧力 $>100 \text{Gbar}$ はワイヤ一端近傍で素早く達成される。

レーザーパルスは、ワイヤ長を伝搬し続け、アレイ深くに至る、これはワイヤ間のギャップが高密度プラズマを免れている限りにおいてである。ワイヤが延びるに従い、ワイヤ間のギャップは超臨界密度プラズマで満たされる。衝突がプラズマを均質化し、均質なプラズマ層が数ミクロン厚で形成され、そこでは原子がHeに似た段階まで電離される、これは計測で観察された。

ワイヤの拡張は、ワイヤの長さに沿って次第にワイヤ間のギャップに近づき続け、最終的にエネルギー密度 $1 \text{GJ/cm}^3$ 、圧力 $7 \text{Gbar}$ で、ターゲット横断面全体が、材料で満たされる。

われわれはナノワイヤアレイで熱浸透度を計測した、異なる原子成分(Coなど)のトレーサナノワイヤセグメントが電離されてHeに似た段階になる深さを計測している。上述の照射条件では、われわれは、シミュレーションに合致する浸透の深さ $4 \sim 5 \mu\text{m}$ を計測し、容積加熱を確認した。

加えて、プラズマ条件を予測するためにPICシミュレーションも行った。これは、レーザー照射強度がさらに $1 \times 10^{22} \text{W/cm}^2$ に増加することによって達成される。結果が示しているのは、30fsパルスで照射された400nm径Auナノワイヤアレイの前例のないエネルギー密度と圧力である(図4)。ナノスケールピンチ(ナノピンチ)圧縮フェー

ズ中に、ナノワイヤのプラズマ密度は、 $2 \times 10^{25} \text{cm}^{-3}$ に達する。これは、臨界密度を3000倍上回っている。

他のレーザーターゲット配置であれば、ナノピンチプロセス中にもっと高密度、 $6 \times 10^{25} \text{cm}^{-3}$ に達することができる。そのような究極的ピーク密度なら、NIF( $1 \times 10^{26} \text{cm}^{-3}$ 程度)<sup>(9)</sup>でメガジュールのレーザーエネルギーを使う核融合ホットスポットで達成されるレベルに近づくが、潜在的にはさらに高温に到達するだろう。

ナノワイヤ内のエネルギー密度は、ピーク値 $2 \text{TJcm}^{-3}$ に達すると予測されている。すなわち、レーザーパルスエンド付近でテラバールオーダー相当になる。加熱されたナノワイヤの拡張は、計算上、エネルギー密度が $80 \text{GJcm}^{-3}$ のプラズマ層になる。これは太陽の内部よりも大きな圧力 $350 \text{Gbar}$ に相当する。

そのようなナノワイヤアレイプラズマ条件は、NIFカプセルが高圧縮されたときに得られる条件に匹敵し、新たな実験室プラズマ領域が効果的に実現する。こうした究極のエネルギー密度は、X線やニュートロンの超短パルスの効率的生成にとっては重要な利点になる。

X線の場合、大きなプラズマ密度は、放射寿命を低減させる。これは、放射冷却が流体力学冷却速度比となり、X線変換効率が大きくなることにつながる。重水素または重水素-トリチウム核融合反応による中性子発生の場合、エネルギーイオンの高圧は大きなメリットがある。反応速度が密度の平方に比例するからである。

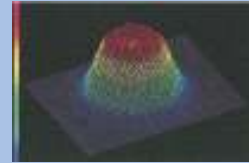
このような整列したナノ構造プラズマは、超音速ガスジェットにおけるクラスタの効率的容積加熱との類似点がある<sup>(10)</sup>。ただしそれに加えて平均密度は数ケタ大きいという利点があり、潜在的にコンパクトなレーザ



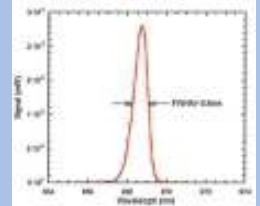
# これが 高出力 VCSEL です

この高出力半導体レーザーはエッジエミッター方式に比べ数々の特徴があります！

## ◆ビームの質がよい



Far-field beam profile



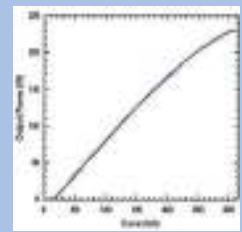
Emission spectrum

5mm×5mm VCSEL array at 100W output power

## ◆高スケールビリティ



100W CW single mode VCSEL array mounted on a micro cooler



### その他の特徴

- ◆ 温度依存性が低い
- ◆ 製品間のばらつきが小さい
- ◆ バックトークが少ない
- ◆ 波長の安定度が高い
- ◆ FIT<10

**AUTEX** オーテックス株式会社  
 URL <http://www.autex-inc.co.jp>  
 E-mail Sales11@autex-inc.co.jp

東京本社 〒162-0067  
 東京都新宿区富久町16-5 新宿高砂ビル  
 TEL. 03 (3226) 6321 FAX. 03 (3226) 6290

大阪支社 〒530-0004 大阪市北区堂島浜2-1-29  
 TEL. 06 (6344) 6328 FAX. 06 (6344) 6342

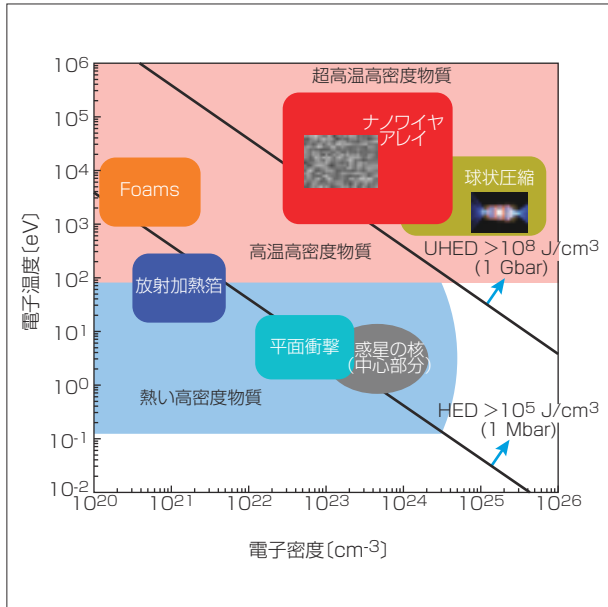


図4 温度-電子密度マップは、他の高エネルギー密度プラズマとの関連で、整列ナノワイヤアレイの照射によって利用できるプラズマパラメータスペースを示している。ラインは、高エネルギー密度(HED)および超高エネルギー密度(UHED)、 $>1 \times 10^8 \text{ J/cm}^3$ として一般に受け入れられている領域の限界を示している。(出典:C. Bargsten et al<sup>(5)</sup>)

による記録的な核融合中性子を生み出す超高速中性子パルスに行きつく。

要約すれば、整列したナノワイヤアレイを高コントラスト超短パルスによって照射することで、実験室において前例のない圧力への道が開ける。これは高エネルギー密度物理学研究のためのコンパクトなレーザ、高密度プラズ

マ内の重原子の高電離状態、さらには超高压、高温、高密度の照射輸送効果によるものである。こうしたプラズマは結果的に、光学的レーザ光の超高速X線フラッシュへの記録的な変換効率、さらに半固体密度プラズマにおける核融合によって超高速中性子パルスの効率的生成になる。

### 謝辞

この研究は、米国エネルギー省核融合エネルギープログラム、科学局および空軍科学研究所の支援を受けた。また、遡っては、防衛威嚇緩和機関とNESTecの支援も受けている。LLNL研究者、リカルド・トマジニ、リチャード・ロンドン、ジェボム・パクの研究は、米国エネルギー省後援により行われた。

### 参考文献

- (1) R. Nora et al., Phys. Rev. Lett., 114, 045001 (2015).
- (2) T. Dittrich et al., Phys. Rev. Lett., 112, 055002 (2014).
- (3) D. Hoarty et al., Phys. Rev. Lett., 110, 265003 (2013).
- (4) M. Purvis et al., Nat. Photon., 7, 10, 796-800 (2013).
- (5) C. Bargsten et al., Sci. Adv., 3, 1, e1601558 (2017).
- (6) W. Theobald et al., Phys. Plasmas, 13, 043102 (2006).
- (7) G. Kulcsár et al., Phys. Rev. Lett., 84, 5149 (2000).
- (8) V. Kaymak et al., Phys. Rev. Lett., 117, 035004 (2016)
- (9) D. Clark et al., Phys. Plasmas, 23, 072707 (2016).
- (10) T. Ditmire et al., Nature, 398, 489 (1999).

### 著者紹介

ジョージ・ロッカはコロラド州立大特別栄誉教授、ヴァンセスラフ・シリアプツェフは同大リサーチサイエンティスト、リード・ホリンガーおよびクレイトン・バークステンは同大院士(e-mail:jorge.rocca@colostate.edu URL:www.colostate.edu)、アレクサンダー・ブーコフは独ハイニンリッヒ・ハイネ大デュッセルドルフの教授、ヴラル・カイマクは同大の研究者(URL:www.uni-duesseldorf.de)、リカルド・トマジニ、リチャード・ロンドン、ジェボム・パクはLLNLの研究者(URL:www.llnl.gov)、マリア・ガブリエラ・カバルトはアルゼンチンのブエノスアイレス大の講師/研究者。(URL:www.uba.ar)