

# パワーレーザーと量子ビームの融合で生まれる世界

～ 光・量子ビーム融合プラットフォームの必要性 ～

パワーレーザーの現状と課題

パワーレーザーに関連した装置・技術の有効利用について

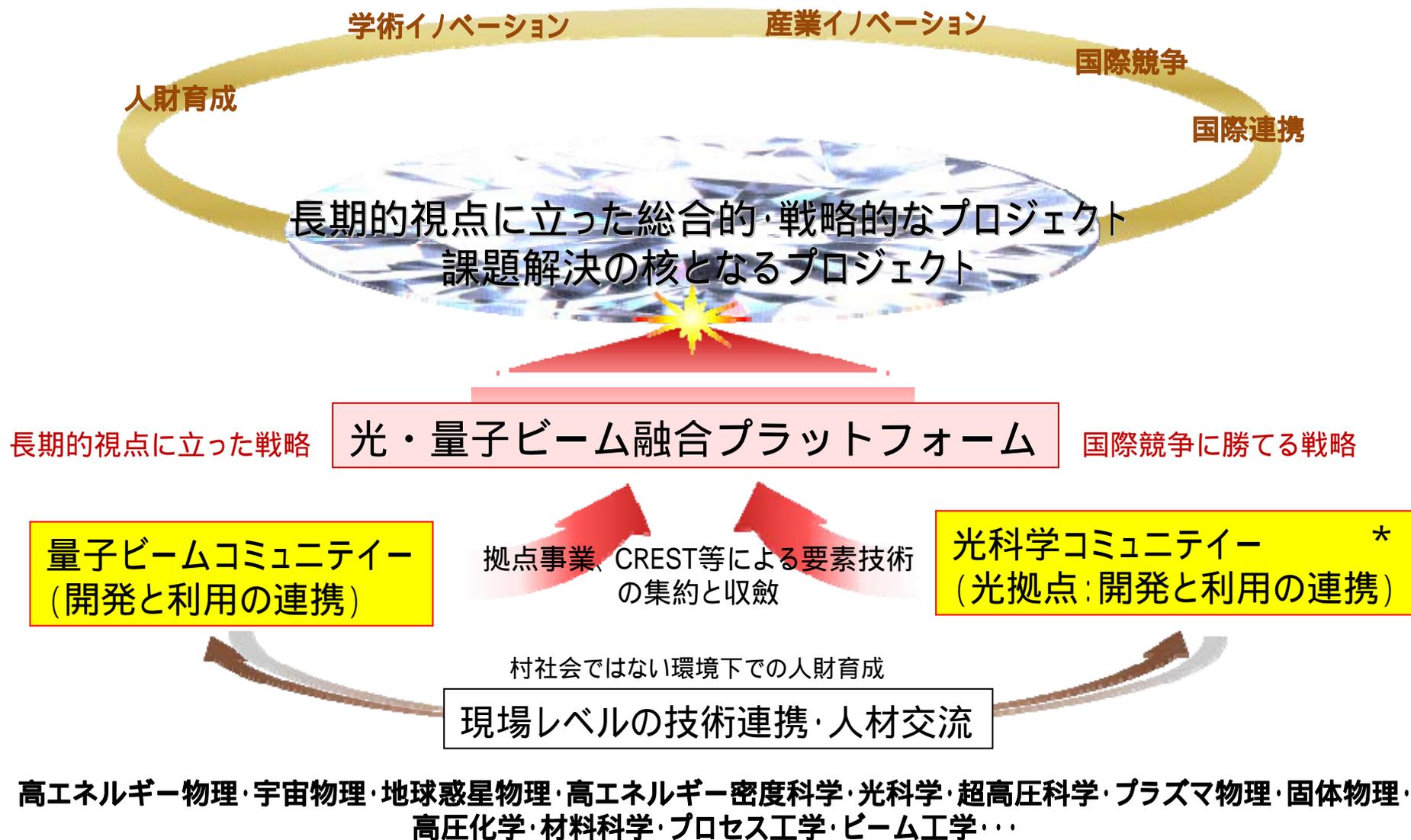
パワーレーザーと量子ビームの融合で見える新たな地平線

まとめ

兒玉 了祐

大阪大学光科学センター

# 光・量子ビーム融合による村型から都市型への飛躍



\* ネットワーク型光拠点事業ではじめて生まれた 利点 (e.g. 基盤的要素技術開発やソフトの連携) と課題・問題 (集約・収斂)

# パワーレーザー (10年前)

## 高ピークパワー ( $\tau < \text{psec}$ )



TW

PW

繰返しレーザー

先端技術の進展を牽引する**技術集約型研究開発**であるパワーレーザー開発は、先進国の基盤技術開発課題として重要視されている

## 高出力レーザー ( $\tau > \text{nsec}$ )



J

10J

100J

kJ

繰返しレーザー

約10年前

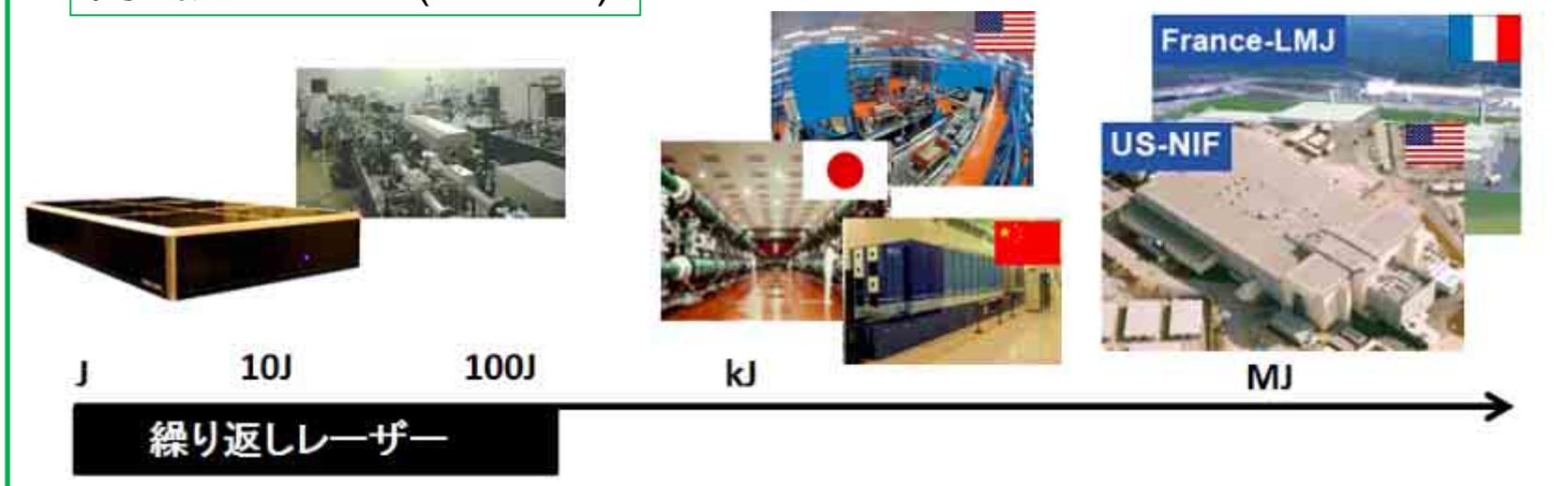
# パワーレーザー技術の進展

パワーやエネルギーの進展とともに繰り返しやシステムの小型化も進展

高ピークパワー ( $\tau < \text{psec}$ )



高出力レーザー ( $\tau > \text{nsec}$ )



# 世界のパワーレーザー開発:

先進国における先端技術進展を牽引する技術集約型研究開発

## [欧州連合]

- 欧州超高強度レーザープロジェクト: 超高強度レーザー建設、レーザー励起新光源 (中性子源、陽子線源、電子源、X線源、アト秒光源など) と **極限物性研究計画 (1000M€ ~ 2011)**

チェコ、ハンガリー、ルーマニア (290M€ ~ 2011)、仏国 (独自に数10M€ ~ 2011)

- 欧州XFELプロジェクト

レーザーコミュニティとXFELの連携による **XFEL + PWレーザー建設計画**

## [独国]

- ドレスデンHZDR: **量子ビームとパワーレーザーの融合による新設備**  
上記欧州プロジェクトと連携 (数10M€ ~ 2012稼働)

## [仏国]

- LMJプロジェクト(CEA): レーザー核融合と極限物理 (1000-2000M€ ~ 2012稼働)

- **仏国パワーレーザーネットワーク:**

極限物性研究のためのパワーレーザー整備

(日本の光拠点事業に刺激され5研究機関連携事業: 80M€/5years ~ 2010)

- IZESTプロジェクト:

プラズマフォトリックデバイス + 既存大型パワーレーザーでゼタワット (1<sup>st</sup>)

>100GeVの電子加速 (2<sup>nd</sup>): **国際チームの形成 (KEKと協定)**

## [米国]

- SLAC-MECプロジェクト:

**パワーレーザー + XFELによる極限物性専用施設 (30M\$ ~ 2011, 2012稼働)**

- レーザー加速プロジェクト (LBNL-BELLA: 30M\$ ~ 2012稼働)

- NIF-MJレーザープロジェクト: 超大型レーザーによる核融合、極限物性、宇宙物理実験、  
(3.1B\$ ~ 2010稼働)

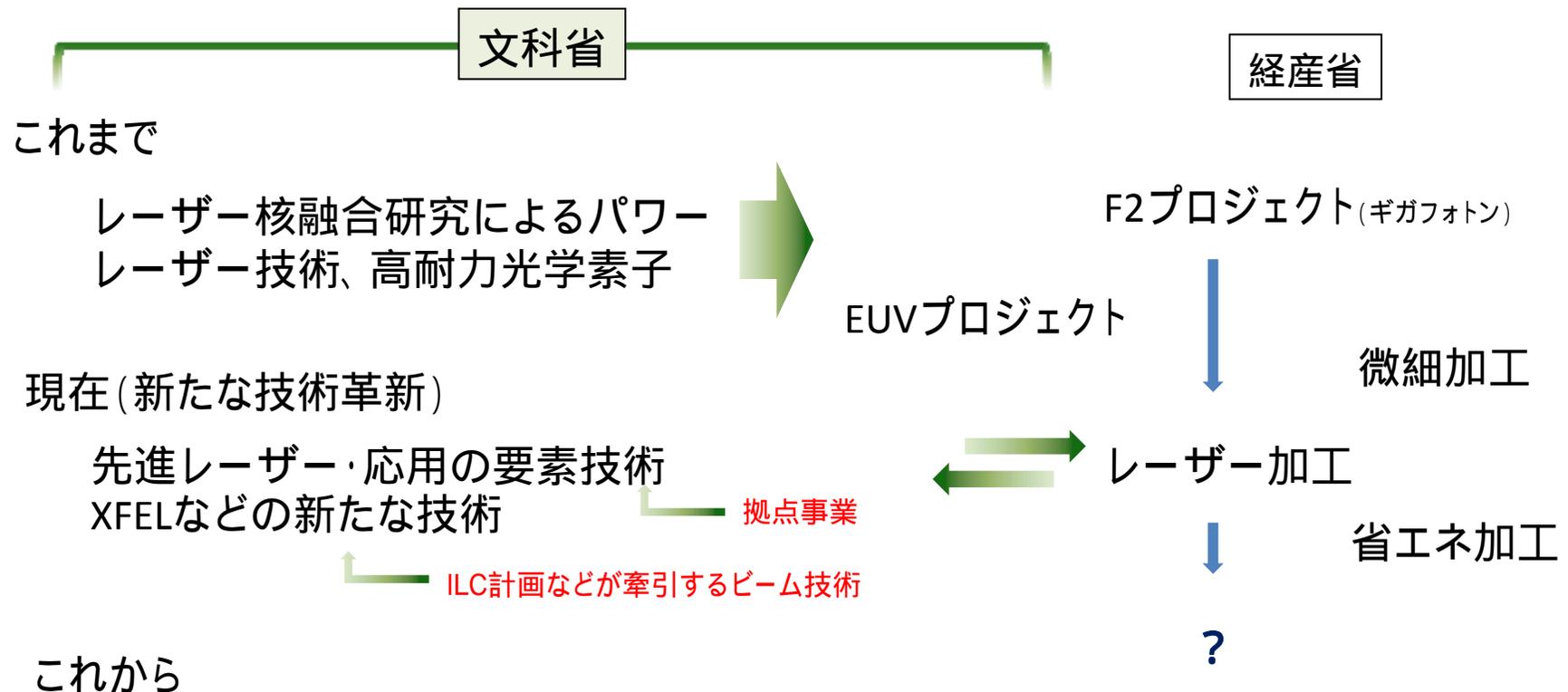
## パワーレーザーに関する技術開発：戦略性と継続性

- 日本では、レーザー核融合研究旺盛な時代以降、EUVプロジェクト以外にパワーレーザーを開発し学術利用するプロジェクトに恵まれていなかった。
- 欧米では、パワーレーザーの開発を含めた大型プロジェクトが継続的にあった。(欧米)  
戦略的に技術の継承を目的に大型プロジェクト終了後も10年程度企業をサポートする体制(仏国)
- パワーレーザーに関する戦略性と継続性に関する成功例と失敗例  
失敗例：HOYAの技術の海外流失と喪失(日本)  
成功例：欧州ELIプロジェクトによる技術とマネーの循環(仏国)

失敗を繰り返さないためにも、国際競争に勝てる戦略と技術の継承を検討・実施するプラットフォーム(プログラム)が早急に必要(今なら間に合う)

経済性と効率：現有の技術と装置の連携による新たな芽  
先見性と効果：海外がまだ重点化していないテーマの選定  
意識改革：村型から都市型への意識改革

# 文科省の学術研究が牽引するパワーレーザー基盤技術と産業応用



e.g. 今なら我が国がアドバンテージを取れる分野と技術

- ・パワーレーザーによる高エネルギー密度科学  
(真空の物理、高エネルギー密度新物質創生)
- ・セラミックパワーレーザー
- ・PCSEL励起先進固体レーザー

# 施設・装置・技術等の有効利用には要素技術を昇華させる有機的連携プログラムまたはプラットフォームが必要



現状：  
 戦略的に有効な材料(要素技術や先端施設)は開発されているが、有機的連携を実現する具体例と支えるプログラムは？



具体案：パワーレーザーを軸とした有機的連携案

**(阪大のCRESTs)**

世界最高のX光学素子 1)

世界レベルのパワーレーザー技術

世界初のプラズマフォトンクス 2)

最も安定なレーザー電子ビーム 3)

1) Nature Phys. 6, 122 (2010)  
 2) Nature 432, 1005 (2004); Nature Physics 2, 456 (2006)  
 3) Nature Phys. 6, 1010 (2010)

**PhoPs**

KEK、XFEL理研、  
光量子ビームプラットフォーム

拠点・CRESTs要素技術

日英米仏連携戦略拠点(阪大)  
(欧米37機関)

アジア連携拠点(阪大)  
(中印韓17機関)

**国際競争力ある  
高エネルギー密度科学の展開**

**しっかりした受け皿：基盤装置**

# なぜパワーレーザー？：これまでの極限状態を越える世界

## レーザー加速：

- 見えなかったランダム超高速現象(フェムト秒・ナノメートルの世界)
- 一研究室に一台のXFEL(フェムト秒・ナノメートルの世界)
- エネルギーフロンティア(10TeVを越えた世界)

## 超高压：

- 太陽系外巨大地球型惑星コアの世界
- スーパーダイヤモンド：従来のダイヤモンドより3 - 5倍の寿命・加工速度の世界
- 究極の超高密度水素貯蔵が可能な世界(現有ガソリン車の10倍の走行距離)

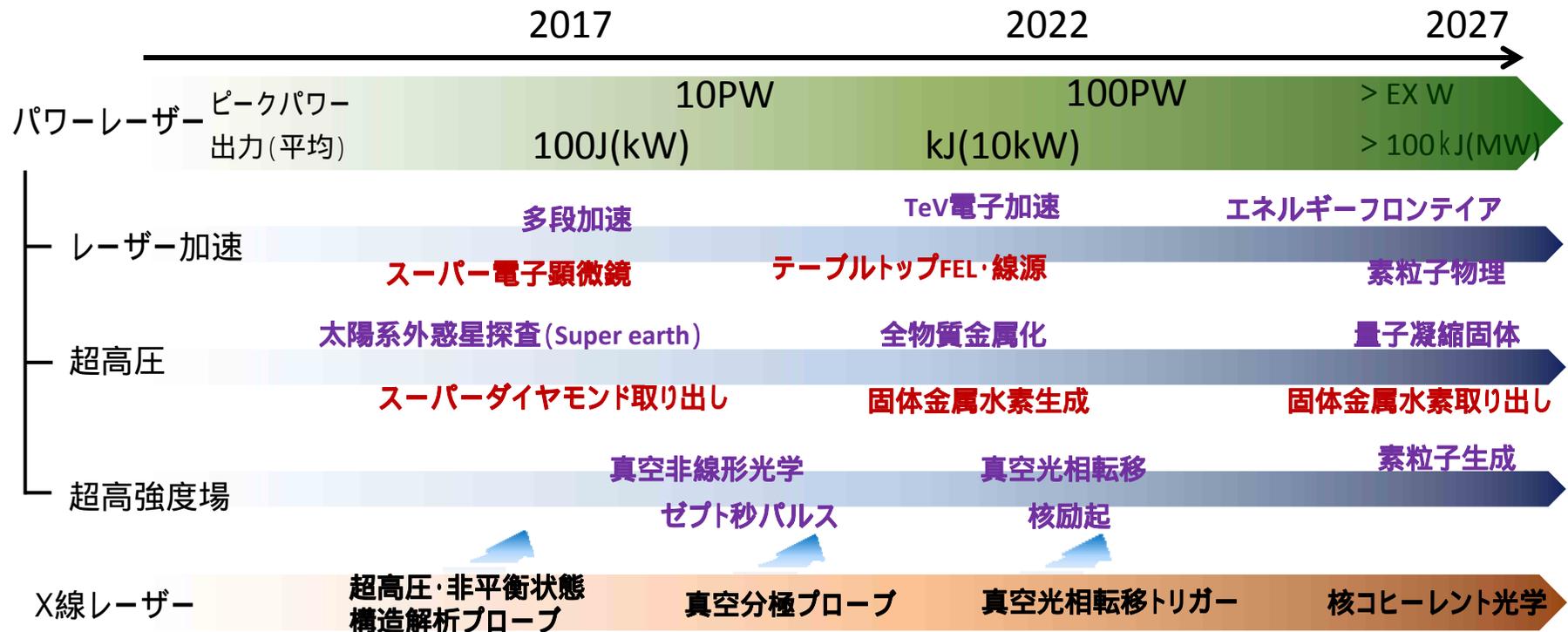
## 超高強度場：

- 真空が偏極する世界
- 真空が雪崩的あるいはドミノ倒しのように変化する世界
- 真空から素粒子が生成される世界

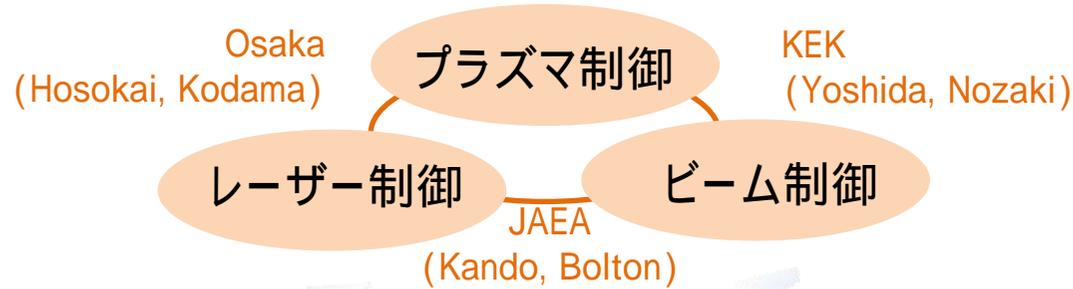
新しい世界を見るには  
学際連携が必要不可欠

ビーム工学、レーザー工学、プラズマ制御工学、物性診断技術、シミュレーション技術の連携により初めて実現できる。

これらは高エネルギー物理・宇宙物理・惑星物理・光科学・超高压物理・プラズマ物理・固体物理・高压化学・材料科学・プロセス工学など幅広いコミュニティの協力で開拓される新しい世界。



# レーザー・プラズマ・ビーム技術の融合による新技術の胎動

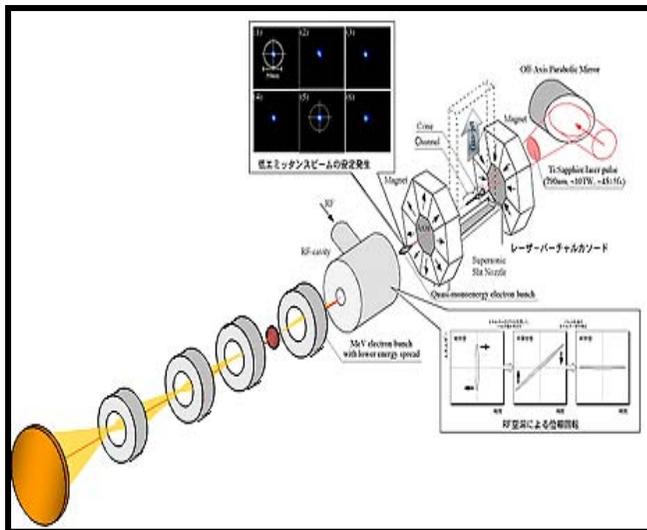


安定な電子ビーム

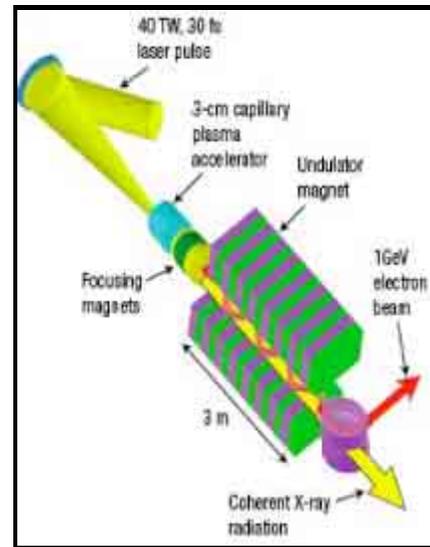
位相制御電子ビーム

加減速制御可能な安定な電子ビームの実現

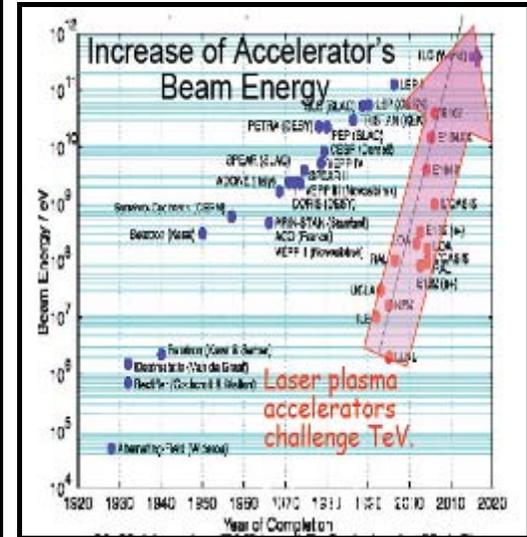
FY2012



スーパー電子顕微鏡  
 (特願2011-247257:阪大)



テーブルトップXFEL

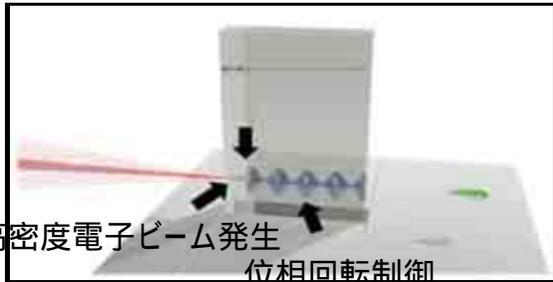


TeV電子



# 独自のレーザー・プラズマ・ビーム制御技術による世界競争力ある新しい電子顕微鏡

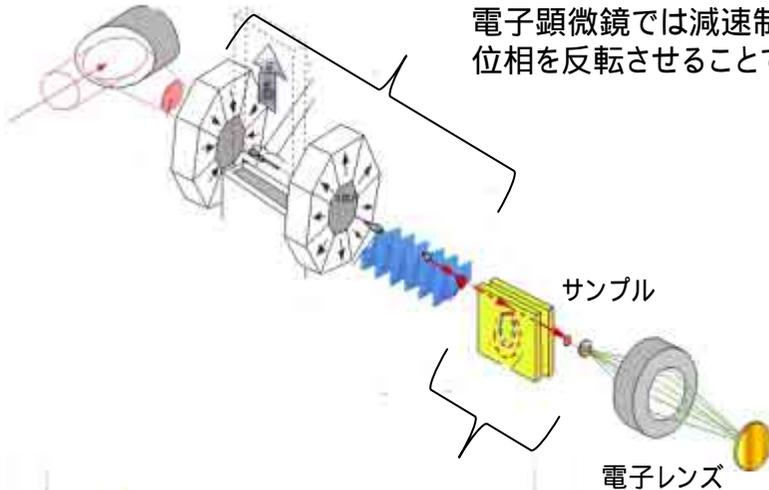
パワーレーザーとプラズマフォトニックデバイスによる電子ビーム発生制御(独自)



極短バンチ高密度電子ビーム発生

位相回転制御

電子顕微鏡では減速制御  
位相を反転させることで加速制御



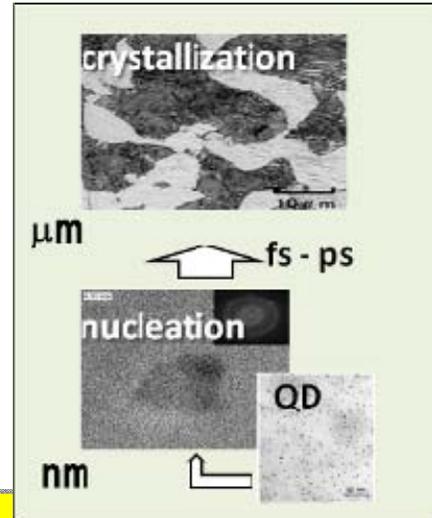
チャープパルス電子バンチ輸送法



特願2011-247257:阪大

物質材料科学における基本問題を解明

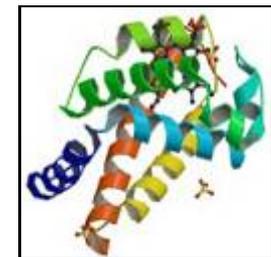
原子スケールのランダム過渡現象から始まるといわれている物質構造相転移の謎を解き明かす



シミュレーション予測

- ・時間分解能: <math><10 - 100\text{fs}</math>
- ・空間分解能: 1.6nm
- ・シングルショットイメージング
  - 電子バンチ幅: <math><10 - 100\text{fs}</math>
  - エネルギー: <math><10\text{MeV}</math>
  - ビーム発散角: <math>10^{-4}\text{ rad}</math>
  - 電子数: <math>>10^{-9} - 10</math>/pulse
  - 単色性: <math>\Delta E/E = 10^{-4}</math>

バイオへの応用



その他のレーザー駆動電子顕微鏡

RFフォトカソード(LLNL): 10ns/15nm

シングルショット

電界放出型(CALTECH): 300fs/<math><0.1\text{nm}</math>

マルチショット

1999ノーベル化学賞

# なぜパワーレーザー？：これまでの極限状態を越える世界

## レーザー加速：

- 見えなかったランダム超高速現象(フェムト秒・ナノメートルの世界)
- 一研究室に一台のXFEL(フェムト秒・ナノメートルの世界)
- エネルギーフロンティア(10TeVを越えた世界)

## 超高圧：

- 太陽系外巨大地球型惑星コアの世界
- スーパーダイヤモンド：従来のダイヤモンドより3 - 5倍の寿命・加工速度の世界
- 究極の超高密度水素貯蔵が可能な世界(現有ガソリン車の10倍の走行距離)

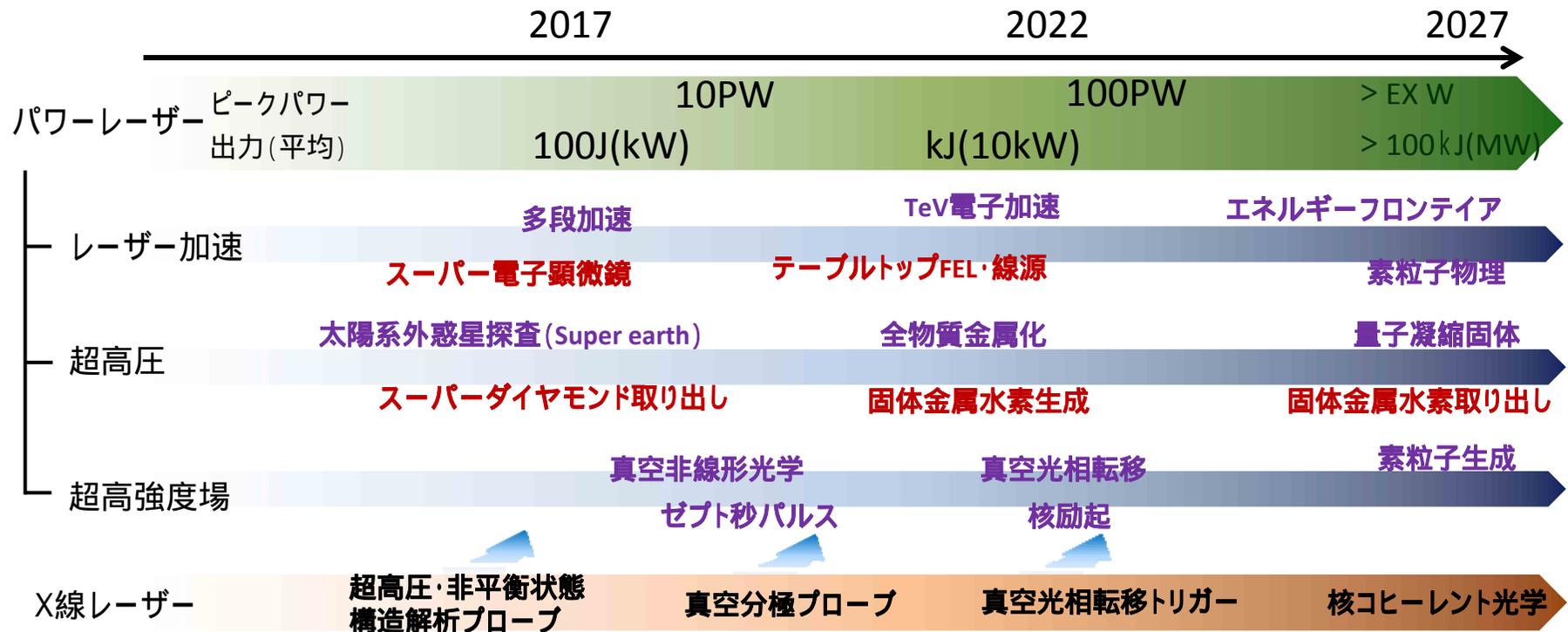
## 超高強度場：

- 真空が偏極する世界
- 真空が雪崩的あるいはドミノ倒しのように変化する世界
- 真空から素粒子が生成される世界

新しい世界を見るには  
学際連携が必要不可欠

ビーム工学、レーザー工学、プラズマ制御工学、物性診断技術、シミュレーション技術の連携により初めて実現できる。

これらは高エネルギー物理・宇宙物理・惑星物理・光科学・超高圧物理・プラズマ物理・固体物理・高圧化学・材料科学・プロセス工学など幅広いコミュニティの協力で開拓される新しい世界。



# パワーレーザーではじめ実現できる超高压の世界

静圧縮(DAC)の物理的限界(400 - 500万気圧)を超えた超高压の世界を制御

通常の化学結合では考えられない物質	> 100万気圧
新物質: ポストダイヤモンド構造、固体金属水素	> 1000万気圧
系外地球型惑星探査	> 1000万気圧
全ての物質が金属になる状態	> 3000万気圧
未知の固体: 量子凝縮固体	> 1億気圧

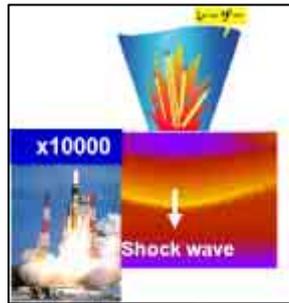
動的圧縮による材料プロセス

動的圧縮による表面硬化・寿命改善  
非平衡圧縮による異常格子欠陥、超硬度化や高压相凍結  
極限環境下で利用できる新材料創成



これらの新物質構造を解析する新たなレーザー・量子ビーム技術:  
短パルス高輝度X線源(XFEL)によるX線散乱・回折診断  
短バンチ電子線源(レーザー加速電子ビーム)による電子顕微鏡

# パワーレーザーで実現できる100-1000万気圧の世界には、 全く新しい固体物質材料が多く眠っている。

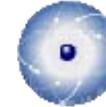


従来とは全く異なる化学反応.

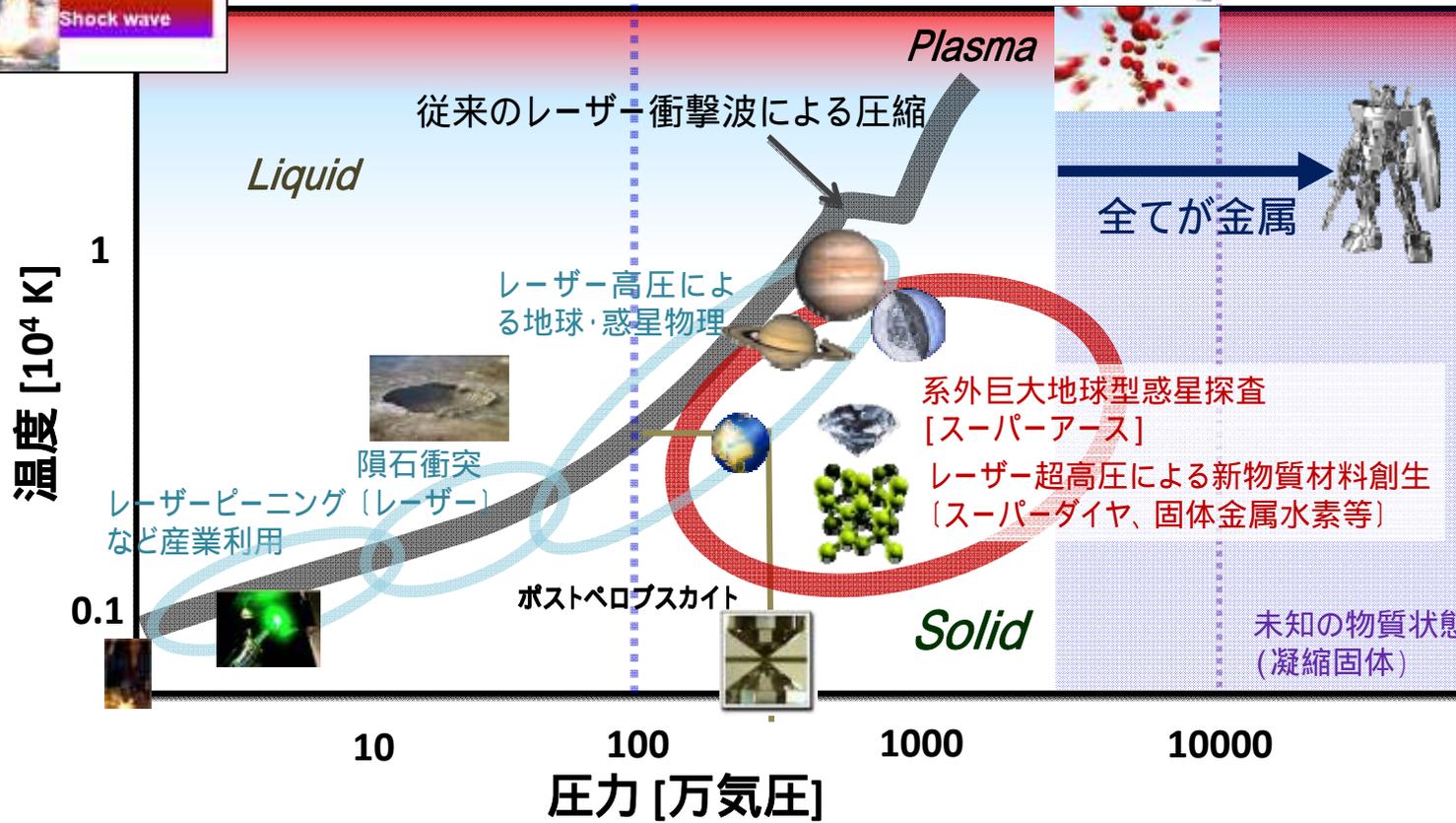
量子的な効果がマクロに見える？



エネルギー密度  
= 化学結合エネルギー



エネルギー密度  
= 核電子のエネルギー密度



全てが金属



系外巨大地球型惑星探査  
[スーパーアース]  
レーザー超高压による新物質材料創生  
[スーパーダイヤモンド、固体金属水素等]

未知の物質状態  
(凝縮固体)



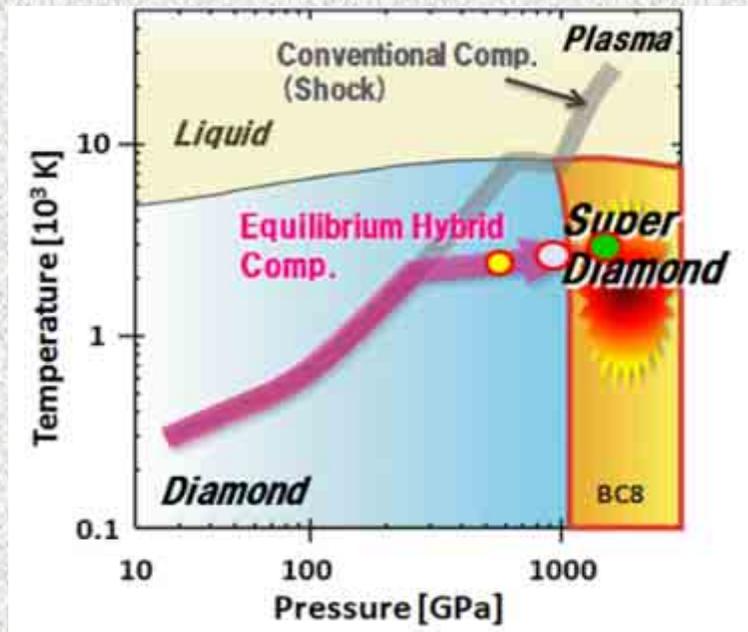
# 世界で初めてのスーパーダイヤモンド状態を実現、超高压状態でしか存在できなかった金属シリコンを常圧に取り出すことに初めて成功(我が国独自の成果)

独自の手法による高エネルギー密度新固体物質の生成との凍結:

- ダイヤモンドより硬いと予測されているスーパーダイヤモンドの創生
- 固体金属水素の実現: 20世に紀取り残された人類の課題に終止符
- 超高压(数100万 1000万気圧)で実現できる新物質: 新しい物質観の提示

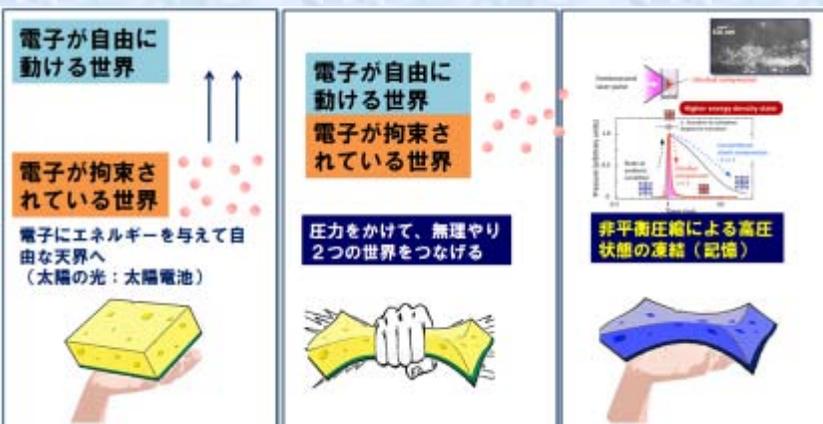
## 新物質を創る技術

独自の圧縮手法で世界で初めてスーパーダイヤモンドを瞬間的に生成



## 手の上に取り出す技術(凍結技術)

超高速加圧・減圧により世界で初めて高压でしか存在しなかった金属シリコンを大気圧に取り出すことに成功



## 研究開発

### 固体金属水素の実現

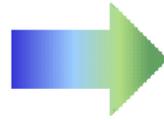
- 高压水素ポンベの密度に比べ約20倍以上の高密度
- 常温常圧での高密度水素貯蔵ができる(超高压凍結)
- 室温超電導

### ダイヤモンドより硬い スーパーダイヤモンド創生

- 加工時間の大幅な短縮(1/3-1/5)や長寿命化(3~5倍程度)
- 特定資源市場の制約から解放

### 新物質・材料創生

- 新しい化合物の生成や超高密度ハイドレート、高密度メタンなど新たなエネルギー貯蔵材に繋がる



## グリーンイノベーションを 目指した新技術の創出

### 超高密度水素貯蔵開発

### 室温超電導の理解

### 省エネルギー加工のために より高い硬度の材料開発

### タングステン等(レアメタル) に代わる超硬工具原料開発

世界のどこにもない技術



世界で最も早く技術を押さえた国が将来の市場を左右

# 光と量子ビームの融合で実現する高エネルギー密度新物質構造解析

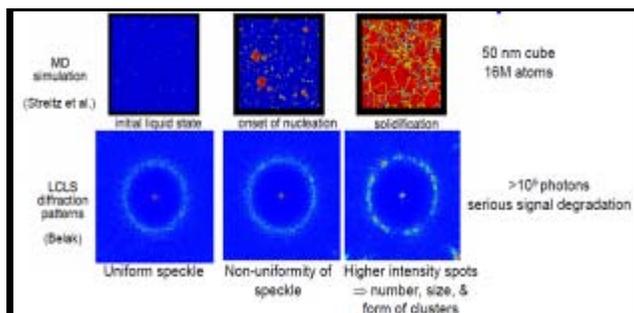
ランダムな構造変化をシングルショットで診断する必要がある



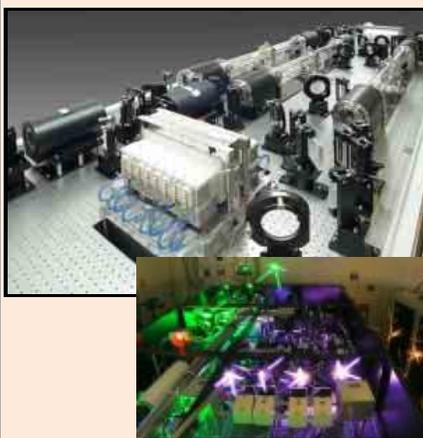
X線自由電子レーザー



SACLAXFEL



パワーレーザー



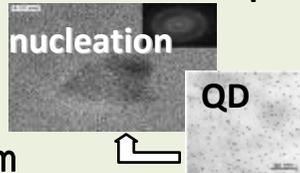
crystallization



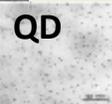
μm

fs - ps

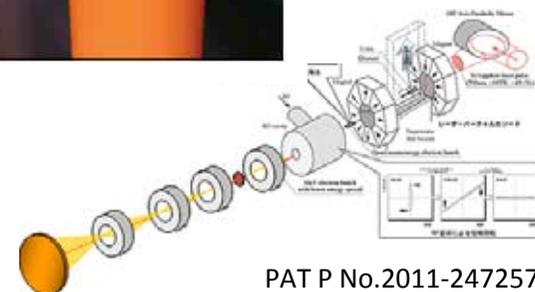
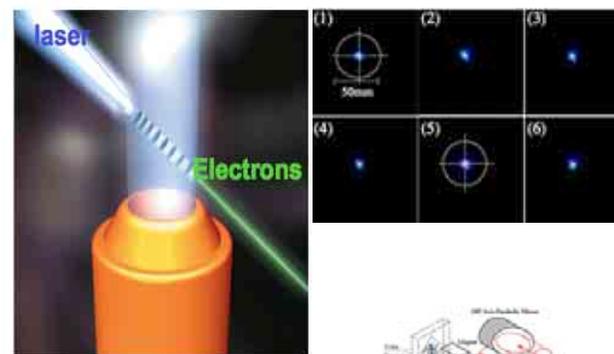
nucleation



nm



レーザー加速電子による電子顕微鏡



PAT P No.2011-247257

空間分解能: a few 10 nm  
時間分解能: a few 10fs  
シングルショット観測を実現する大電流

# なぜパワーレーザー？：これまでの極限状態を越える世界

## レーザー加速：

見えなかったランダム超高速現象(フェムト秒・ナノメートルの世界)  
 ー研究室に一台のXFEL(フェムト秒・ナノメートルの世界)  
 エネルギーフロンティア(10TeVを越えた世界)

## 超高压：

太陽系外巨大地球型惑星コアの世界  
 スーパーダイヤモンド：従来のダイヤモンドより3 - 5倍の寿命・加工速度の世界  
 究極の超高密度水素貯蔵が可能な世界(現有ガソリン車の10倍の走行距離)

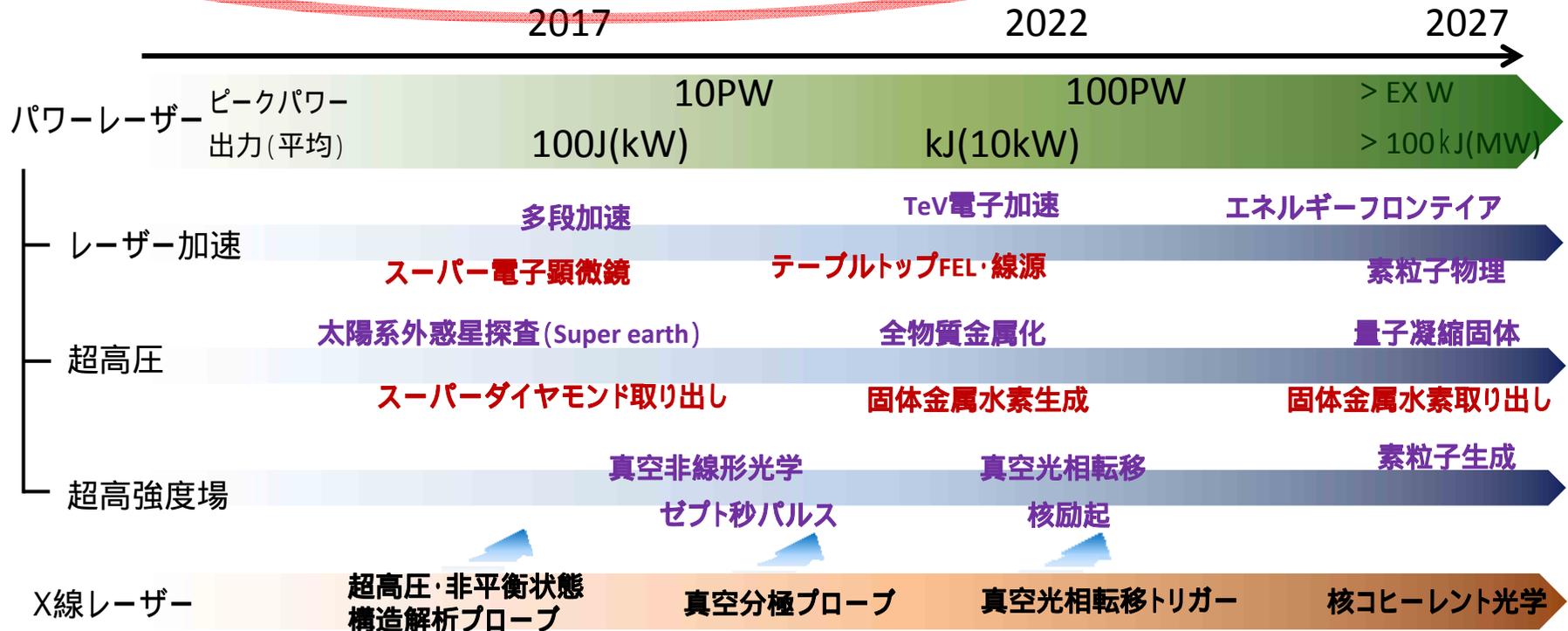
## 超高強度場：

真空が偏極する世界  
 真空が雪崩的あるいはドミノ倒しのように変化する世界  
 真空から素粒子が生成される世界

新しい世界を見るには  
 学際連携が必要不可欠

ビーム工学、レーザー工学、プラズマ制御工学、物性診断技術、シミュレーション技術の連携により初めて実現できる。

これらは高エネルギー物理・宇宙物理・惑星物理・光科学・超高压物理・プラズマ物理・固体物理・高压化学・材料科学・プロセス工学など幅広いコミュニティ-の協力で開拓される新しい世界。

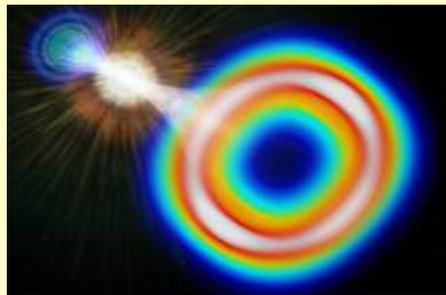


# 宇宙の起源や質量起源に関する真空を体系的に理解できる 日本のパワーレーザーと量子ビーム技術

## 真空の世界

### 真空と光の相互作用

真空中で光が散乱、色が変わる  
真空を壊さないで真空を調べる

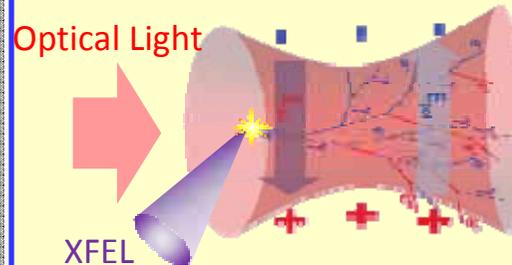


### 真空光相転移・破壊

真空の雪崩崩壊  
高強度場における真空偏極  
+ X線トリガー

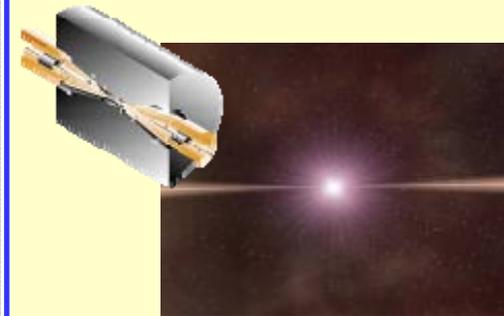
Optical Light

XFEL



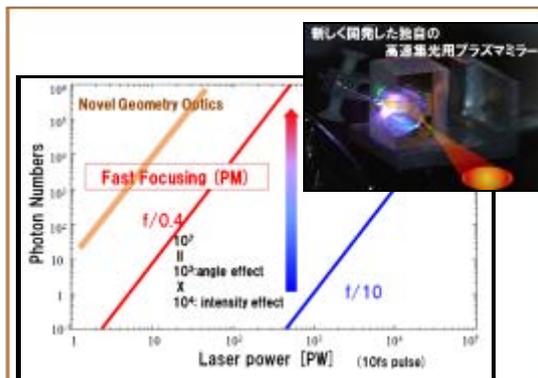
### 真空に潜む素粒子

強いガンマ線の衝突で質量の  
元と関係する素粒子を生成



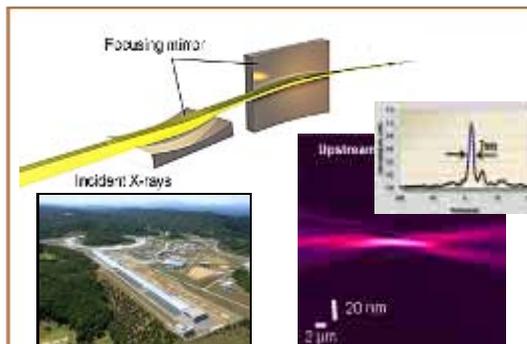
真空の世界への扉を開く世界一の技術はある。あとはパワーレーザー

## 真空への扉 を開く世界 一の技術



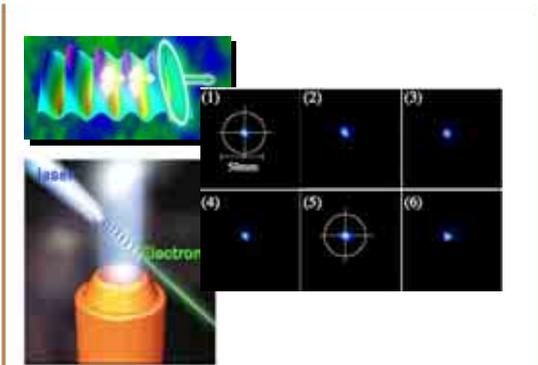
真空非線形光学を現実化させる  
プラズマ集光ミラー(世界初)

Opt. Letts. 35,2314(2010)  
Phys. Rev. Lett. 107, 073602(2011)



X線を極限まで絞るX光学素子  
(世界一の集光)

Nature Phys. 6, 122 (2010)

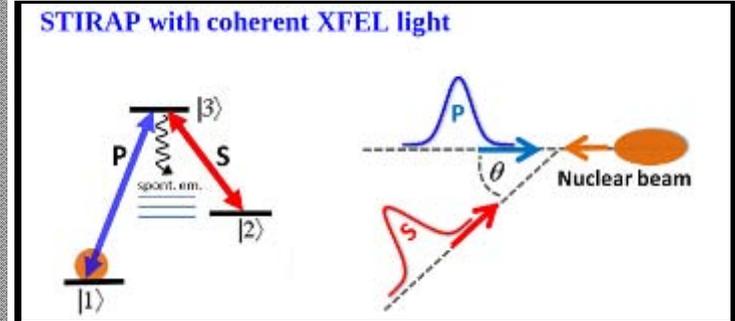
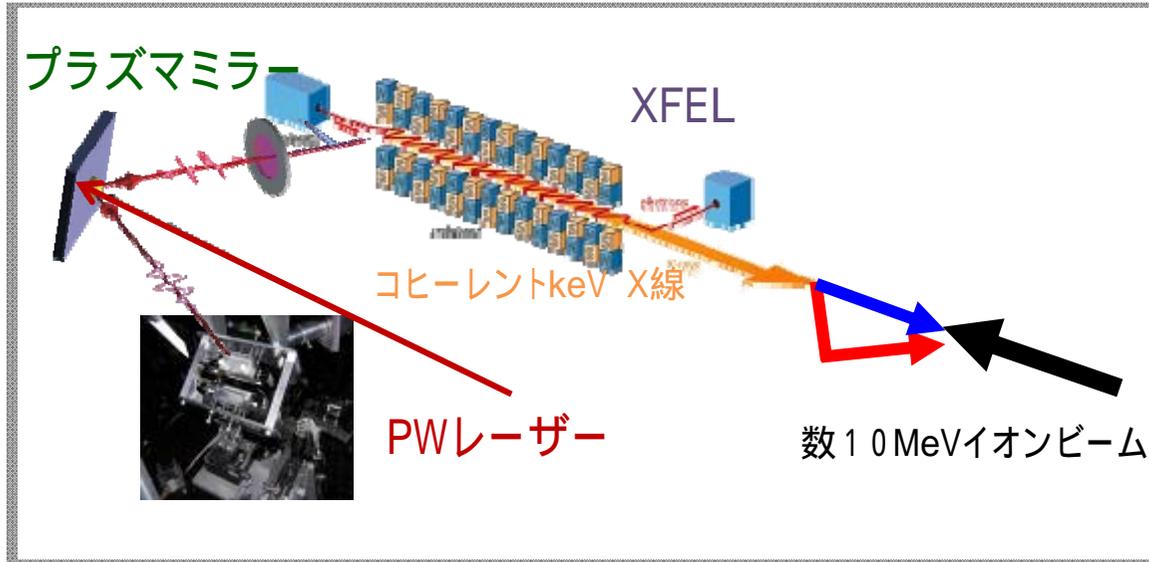


最も安定なレーザー加速電子ビーム  
(世界一安定)

Appl. Phys. Lett. 96, (2010) 121501.  
Nature Phys. 6, 1010(2010)

# パワーレーザー・プラズマミラー・XFEL・イオンビームの融合で可能となる核コヒーレント光学の開拓

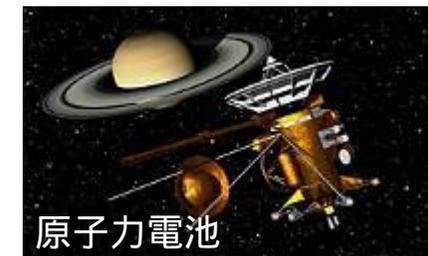
核コヒーレント光学



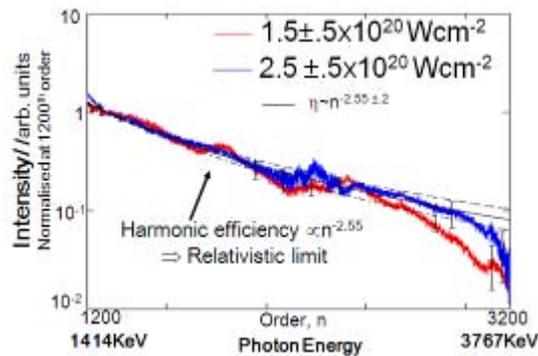
加速したイオン核を時間コヒーレンスあるX線でコヒーレント制御

核コヒーレント光学の開拓

人工的な同位体を高効率に生成できる技術。  
エネルギーストレージ率がけた違いに大きな新しい原子力電池材料を生み出す可能性。

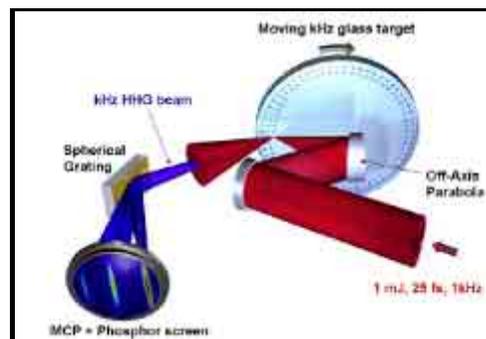


PWレーザーとプラズマミラーによるコヒーレントkeV X線 (zeptosecond)



Nature Phys. 2, 456-459 (2006).

kHzで動作できるプラズマミラーによる高次高調波発生



2011 仏国

# パワーレーザーと量子ビームの融合で生まれる世界

- ・パワーレーザーの戦略と戦術: 先進国として必要性不可欠な技術集約型研究開発課題
- ・多数のCRESTなどで構築された世界競争力ある技術の集約と収斂  
(やりっぱなし、もしくは研究室レベルに眠ってしまう恐れ)
- ・パワーレーザーと量子ビームの融合が進んでいる。 (村から都市型へ)

