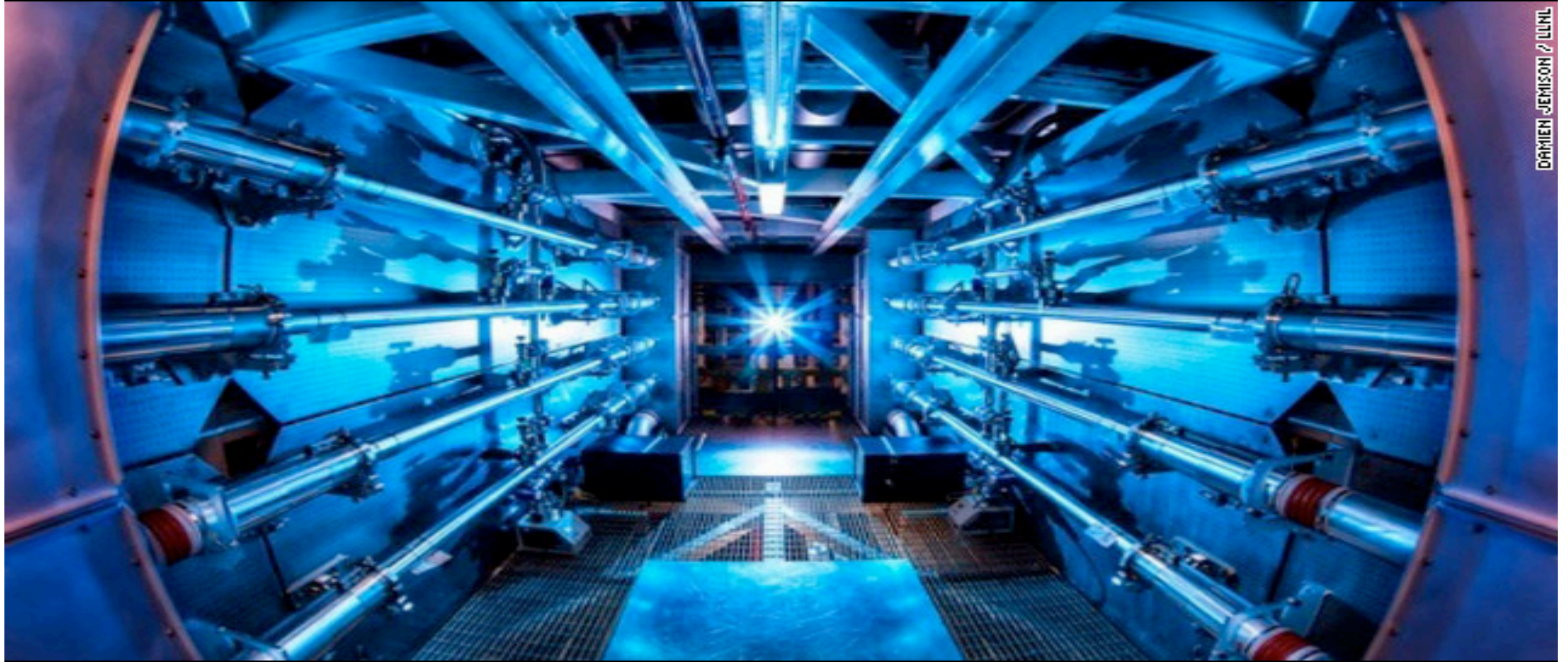


高エネルギーへの挑戦－高強度レーザー 核融合、宇宙物理、素粒子物理への応用



工学部システム創成学科B／光量子科学研究センター
石川顕一

講義資料ダウンロード

<http://ishiken.free.fr/english/lecture.html>

メール

ishiken@n.t.u-tokyo.ac.jp

太陽は莫大なエネルギーを生み出している



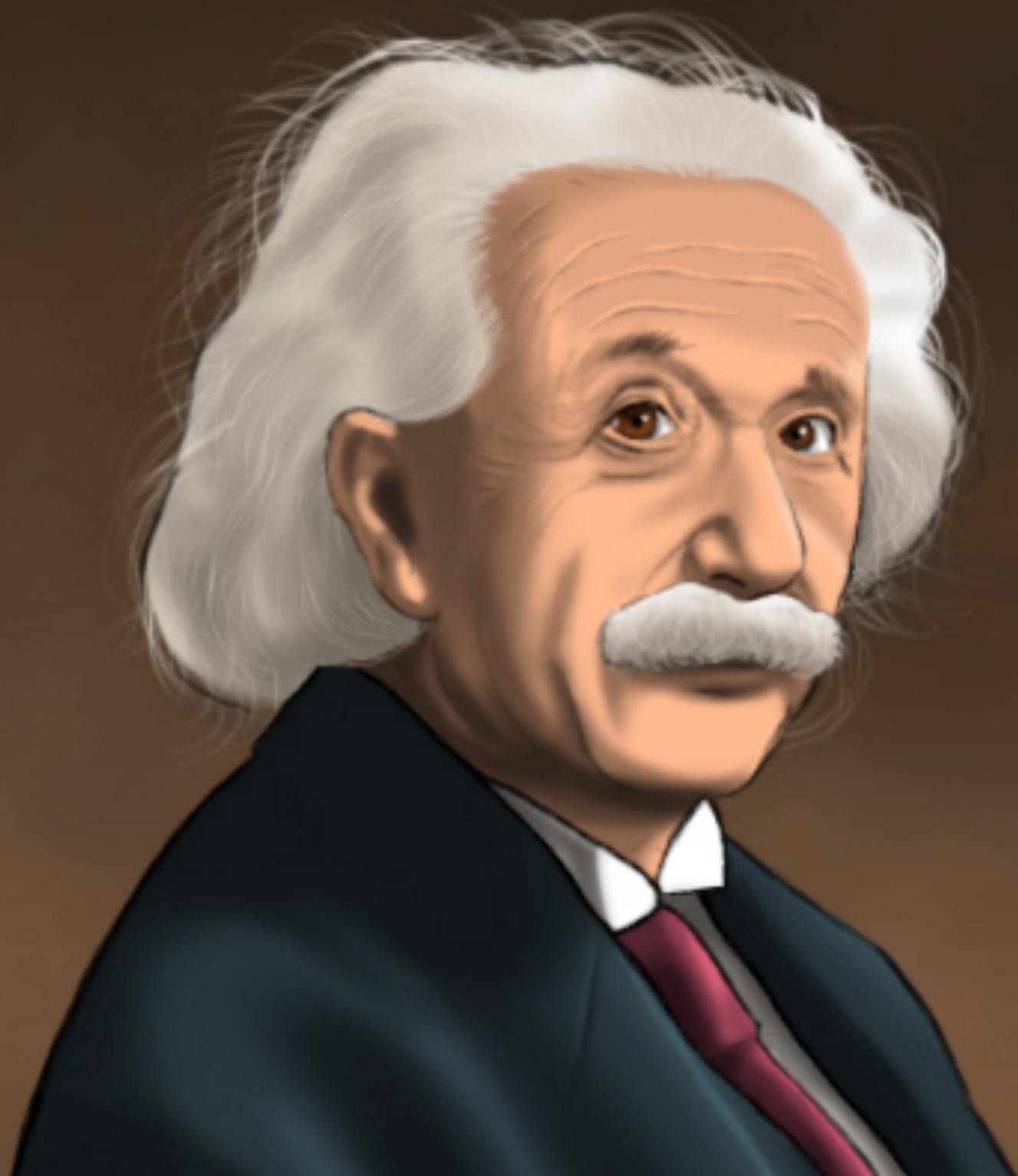
太陽が1秒間に放射するエネルギー

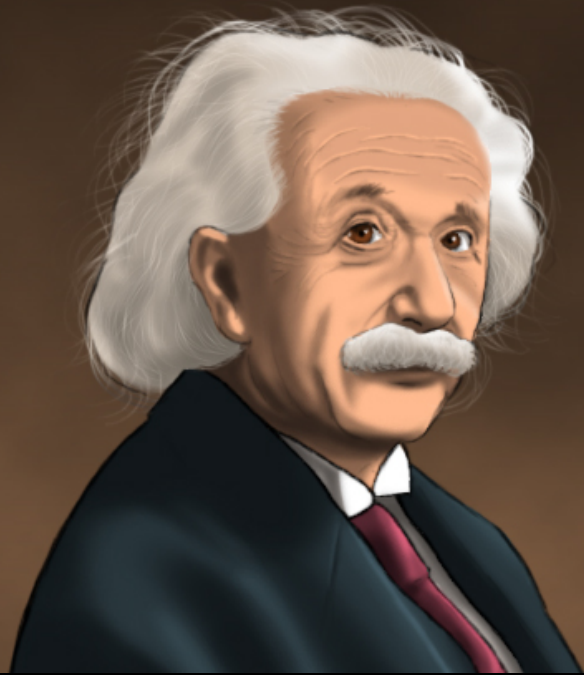
3.8×10^{26} ジュール

> 人類がこれまでに生み出した全エネルギー

太陽はこれまでに50億年輝き、さらに50億年輝く
かりに太陽が石炭でエネルギーを発生していると
すると数千年で燃え尽きる。

この莫大なエネルギーはどう
やって作られるのか？





アインシュタインの業績

光量子仮説

誘導放出

ボーズ・アインシュタイン凝縮

重力による時間の遅れ ← 一般相対性理論

量子暗号・量子情報につながるパラドックス

ブラウン運動の理論 → 金融工学・数理ファイナンス

特殊相対性理論（今回）

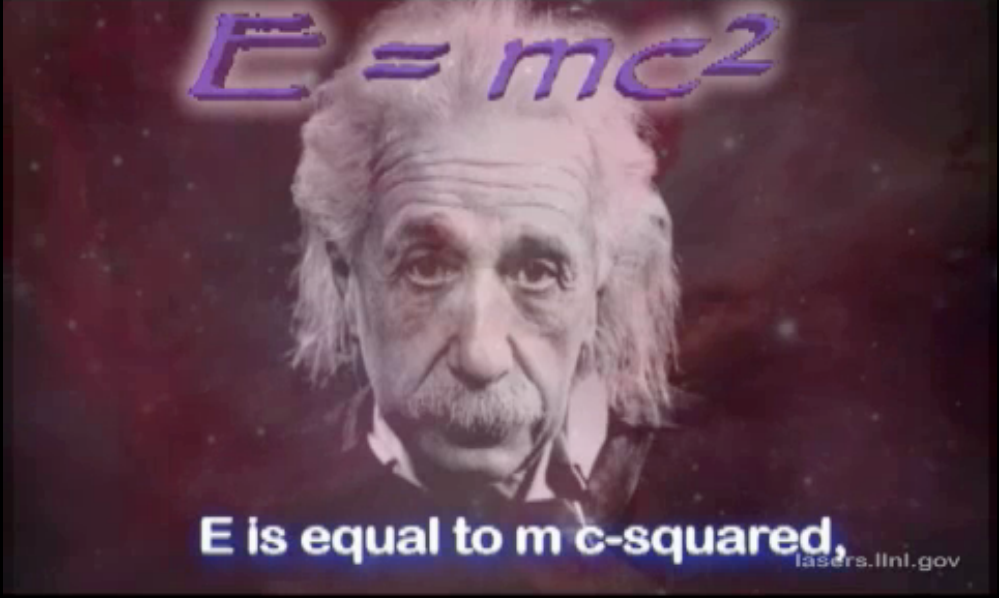
世界一有名な方程式

エネルギー

質量

$$E = mc^2$$

光速度 3×10^8 m/s

A portrait of Albert Einstein, showing his characteristic wild white hair and mustache. The equation $E = mc^2$ is superimposed on the top of his head in a stylized, glowing blue font. The background of the portrait is a dark, reddish-brown space with some light speckles.
$$E = mc^2$$

E is equal to m c-squared,

lasers.llnl.gov

世界一有名な方程式

エネルギー

質量

$$E = mc^2$$

光速度 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

質量とエネルギーは、同じものが
違う形で現れたもの

単位のチェック

エネルギー

質量

$$E = mc^2$$

光速 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

$$\text{J} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2 \cdot \text{m} = \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = \text{kg} \cdot (\text{m/s})^2$$

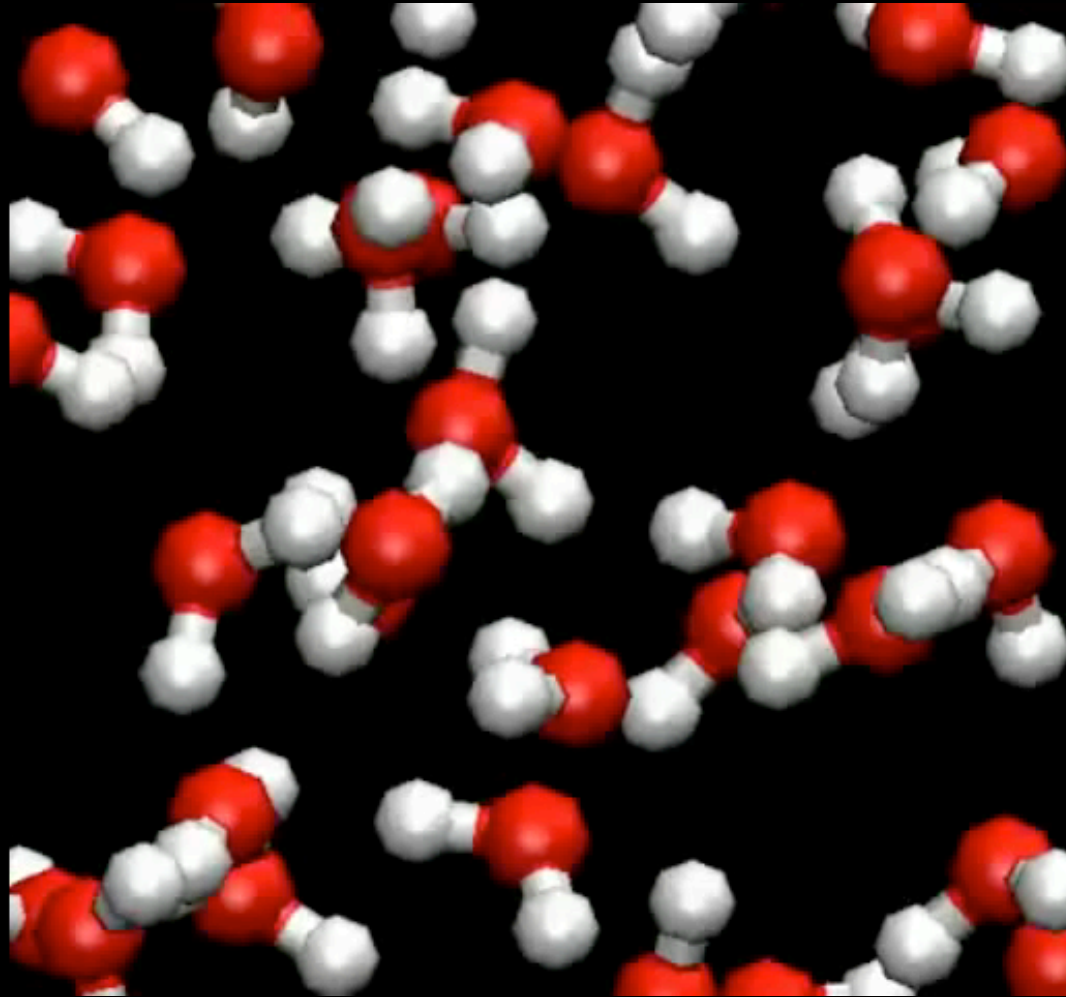
500グラムの物質を完全にエネルギーに変換したら何カロリー？

約 1 京カロリー

東京都の消費電力量の四ヶ月分以上

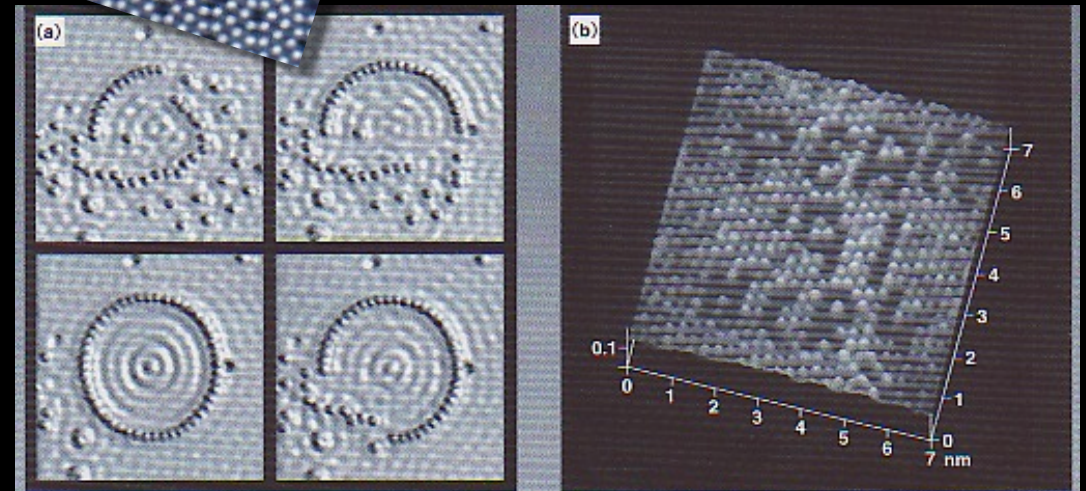
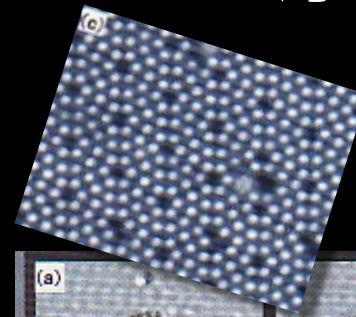
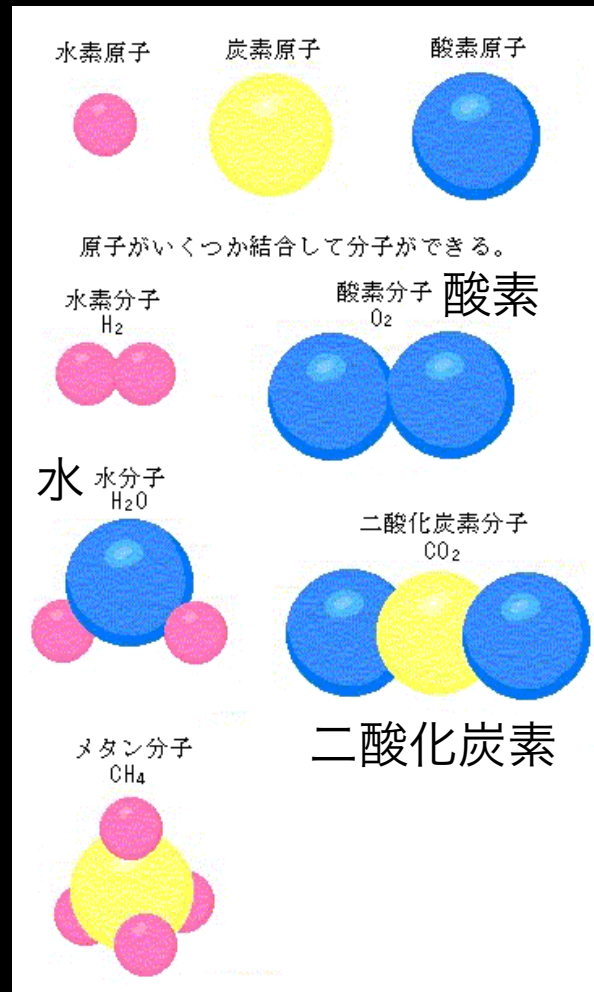
小さな質量が非常に大きなエネルギーに変換できる。でもどうやって？

物質は分子からできている



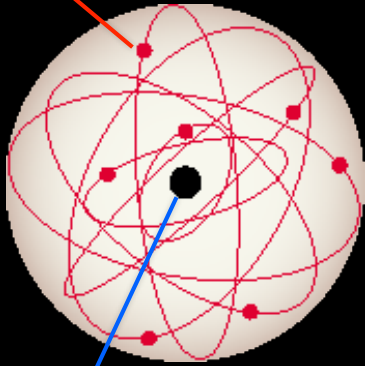
分子は原子からできている

原子は本当にある
原子は見える

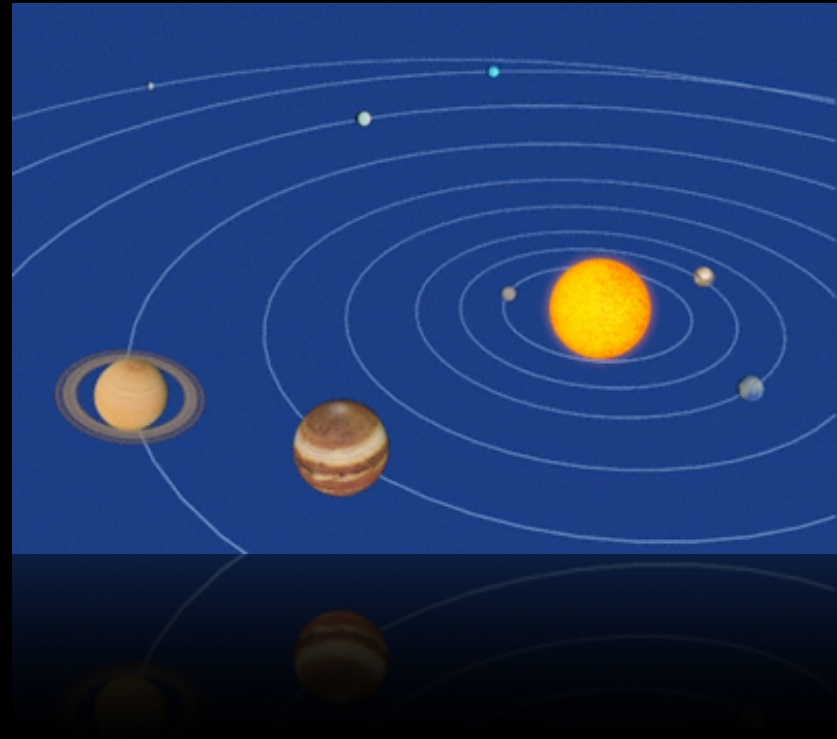


原子の中では、電子が原子核 のまわりを回っている

電子（マイナスの電荷）

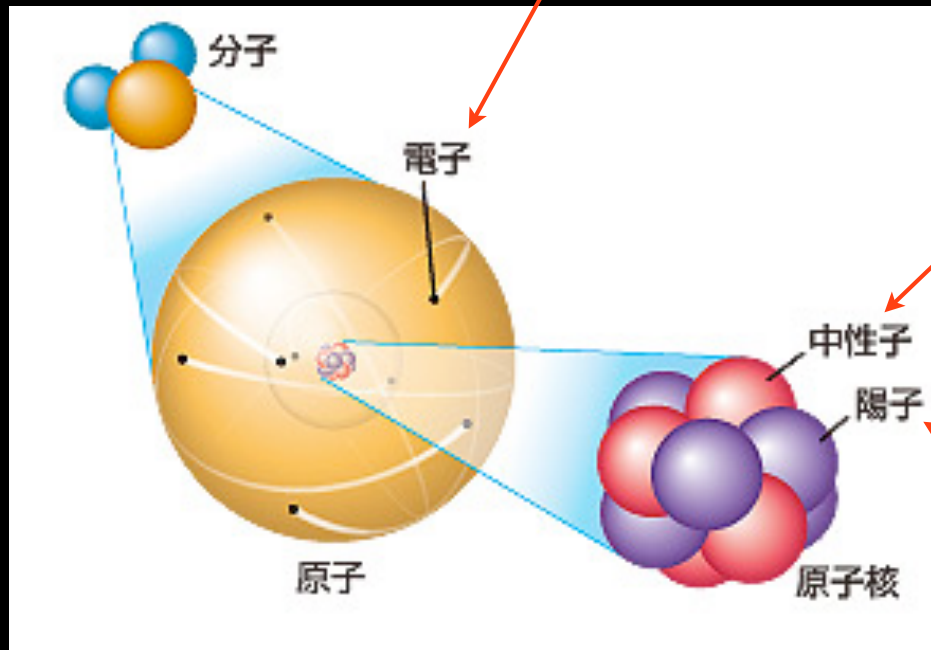


原子核（プラスの電荷）



原子核は陽子と中性子からできている

マイナスに帯電 -1.6×10^{-19} クーロン 質量 9.109×10^{-31} kg



電氣的に中性

質量 1.675×10^{-27} kg

1840倍

水素の原子核

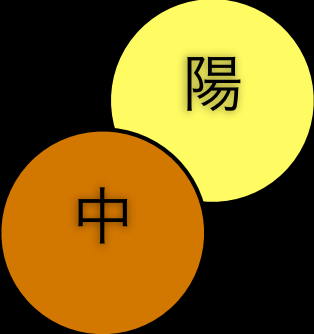
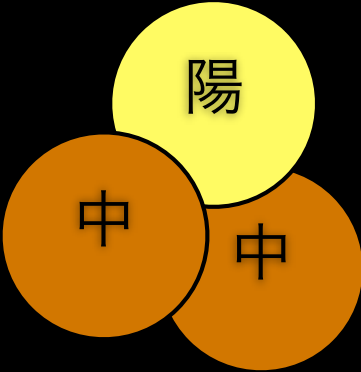
プラスに帯電

1.6×10^{-19} クーロン

質量 1.673×10^{-27} kg

水素原子には3つの同位体がある

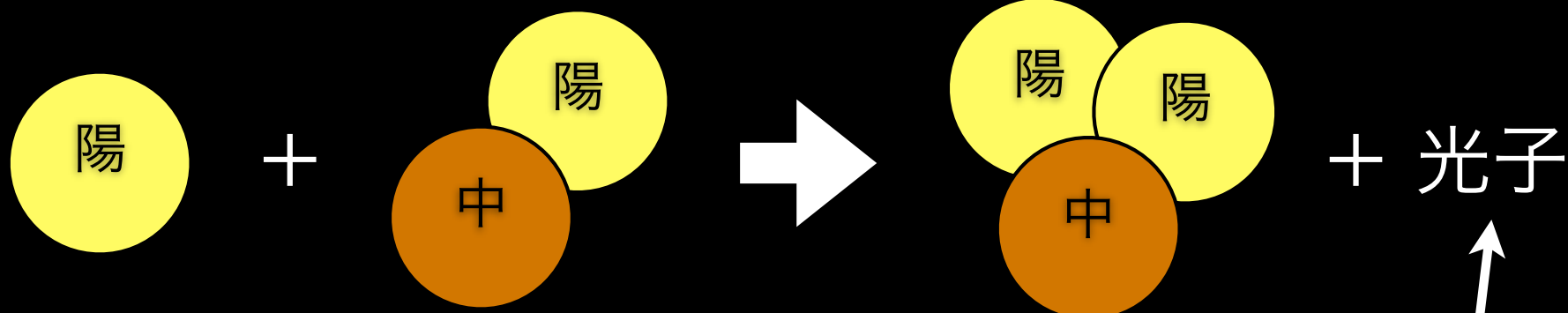
陽子の数（原子番号）は同じだが、中性子の数が違う

	普通の水素（軽水素） ${}^1\text{H}$ p	天然存在比 99.9885%
	重水素 D	0.0115%
	三重水素 T	放射性

軽水素

重水素

ヘリウム3



$1.67262 \times 10^{-27} \text{ kg}$

$3.34358 \times 10^{-27} \text{ kg}$

計 $5.01620 \times 10^{-27} \text{ kg}$

$5.00641 \times 10^{-27} \text{ kg}$

$0.00979 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 軽くなってる！

→ $8.80 \times 10^{-13} \text{ ジュールのエネルギーに変換}$
 $E = mc^2$

核融合反応

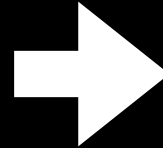
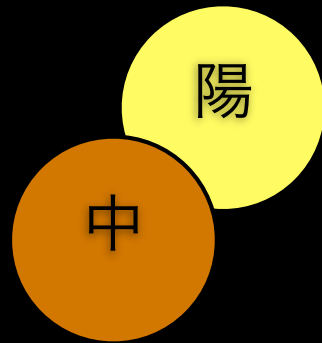
軽い元素が合体してエネルギーを放出

軽水素

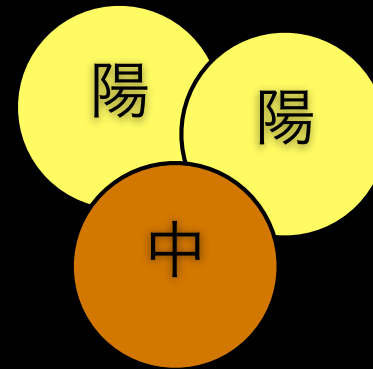


+

重水素

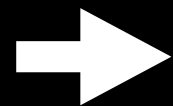


ヘリウム3



+ 光子

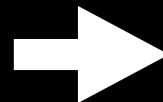
$0.00979 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 軽くなってる！



8.80×10^{-13} ジュールのエネルギーに変換

1モル(6.02×10^{23} 原子)なら

5.90ミリグラム軽く



5.30×10^{11} ジュール

$= 5.30 \times 10^8$ キロジュール

普通の燃焼（化学反応）と比べてみよう

炭素 $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 407 \text{ キロジュール/モル}$

水素 $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 286 \text{ キロジュール/モル}$

核融合反応

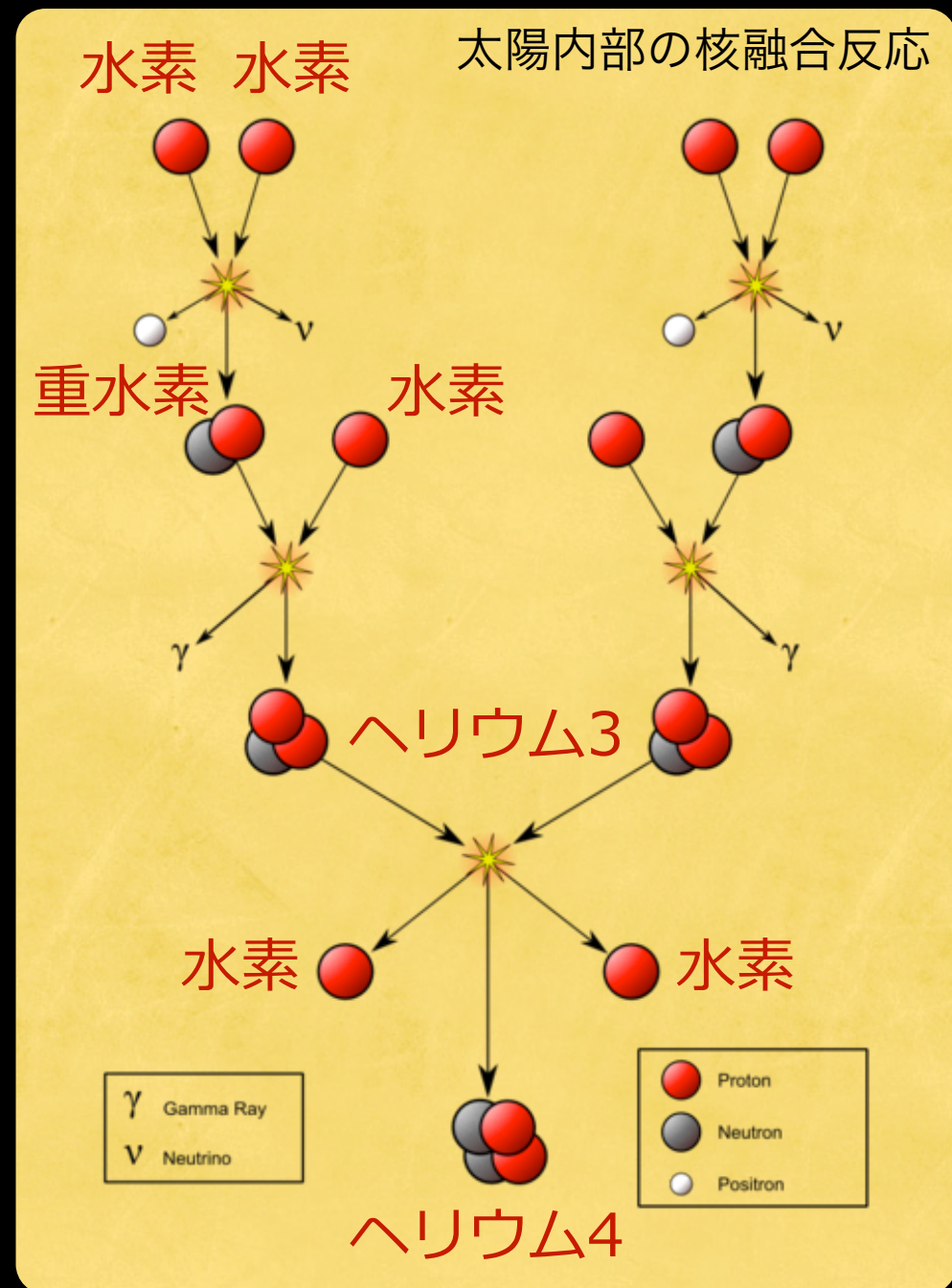
$p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma + 530000000 \text{ キロジュール/モル}$

核融合反応はけた違いに効率がいい

※ 化学反応でも反応エネルギーの分だけ、ごくわずかだが質量変化がある

※ 原子爆弾・原子力発電所は核分裂反応、水素爆弾は核融合反応、福島第一原発で起こった水素爆発は化学反応

核融合反応が
恒星(太陽を含む)の
莫大なエネルギー源



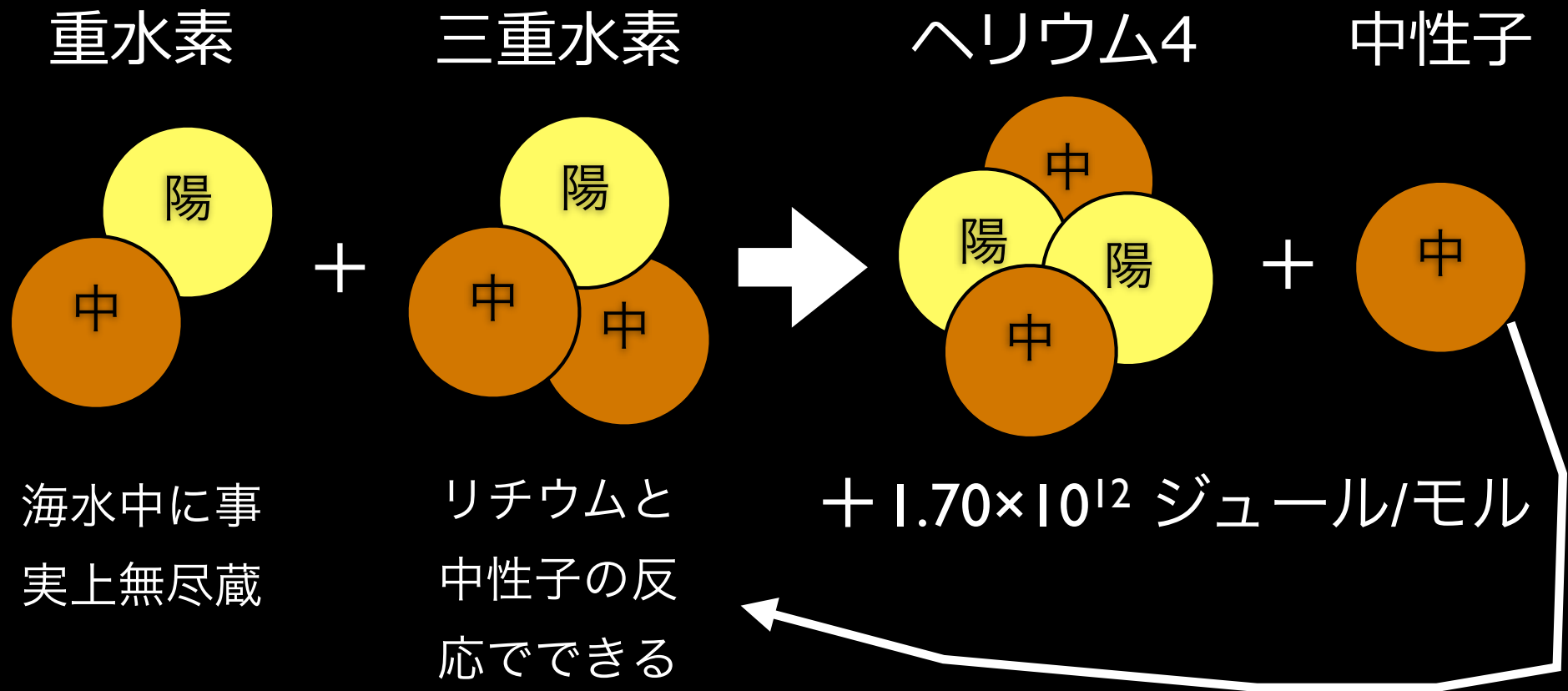
核融合反応が
恒星(太陽を含む)の
莫大なエネルギー源

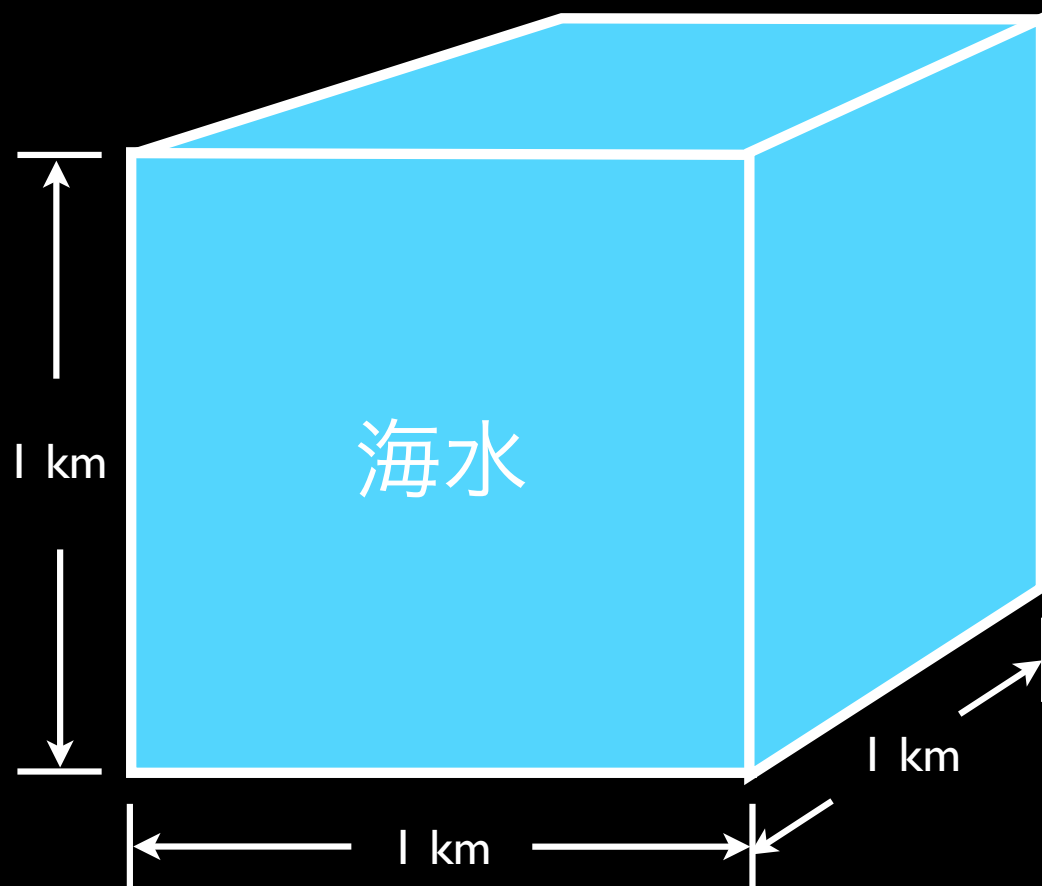
ハンス・ベーク
1967年
ノーベル物理学賞



地上に太陽を

核融合エネルギー





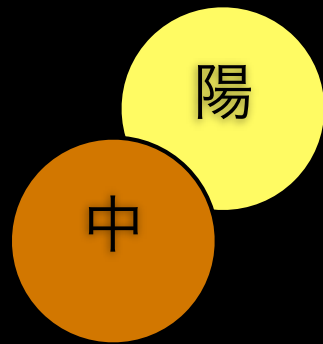
世界の石油
= 埋蔵量の全
エネルギー

核融合エネルギー

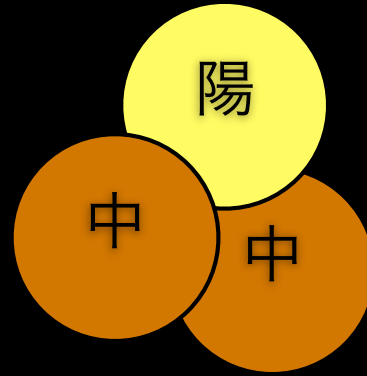
- 燃料が海水中に事実上無尽蔵にある
- CO₂発生量が少ない（原子力・水力なみ）
- 高レベル放射性廃棄物がでない

核融合が難しいのは…

重水素

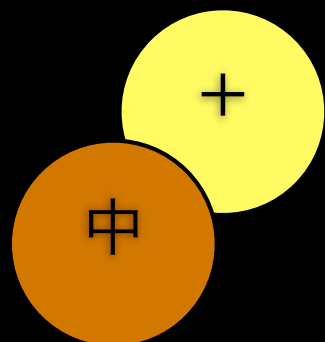


三重水素

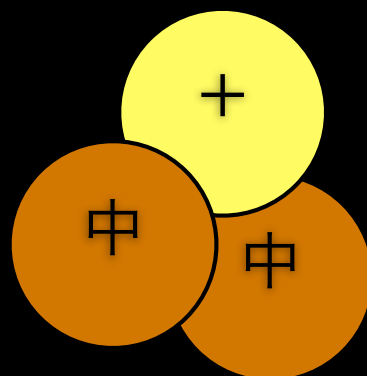


核融合が難しいのは…

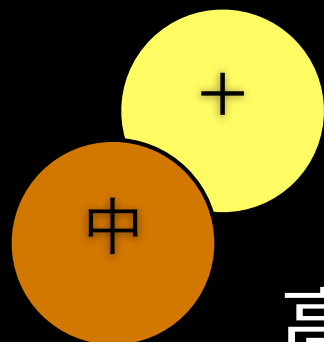
重水素



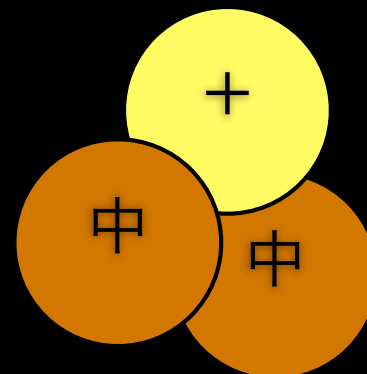
三重水素



プラスの電荷同士で
反発してなかなか近
づかない



高速（高温度）にする必要



太陽の中心温度は1500万度

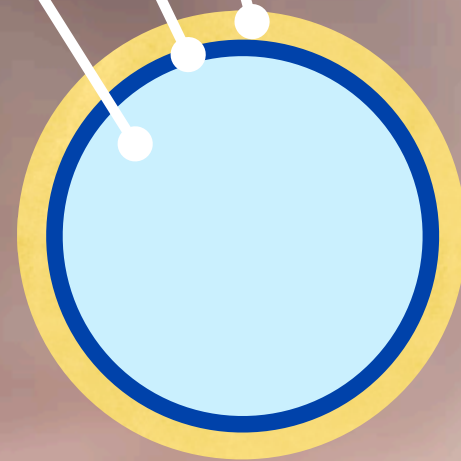
高出力高エネルギーのレーザーを使って
物質を高温高密度にし、核融合を起こす

レーザー核融合

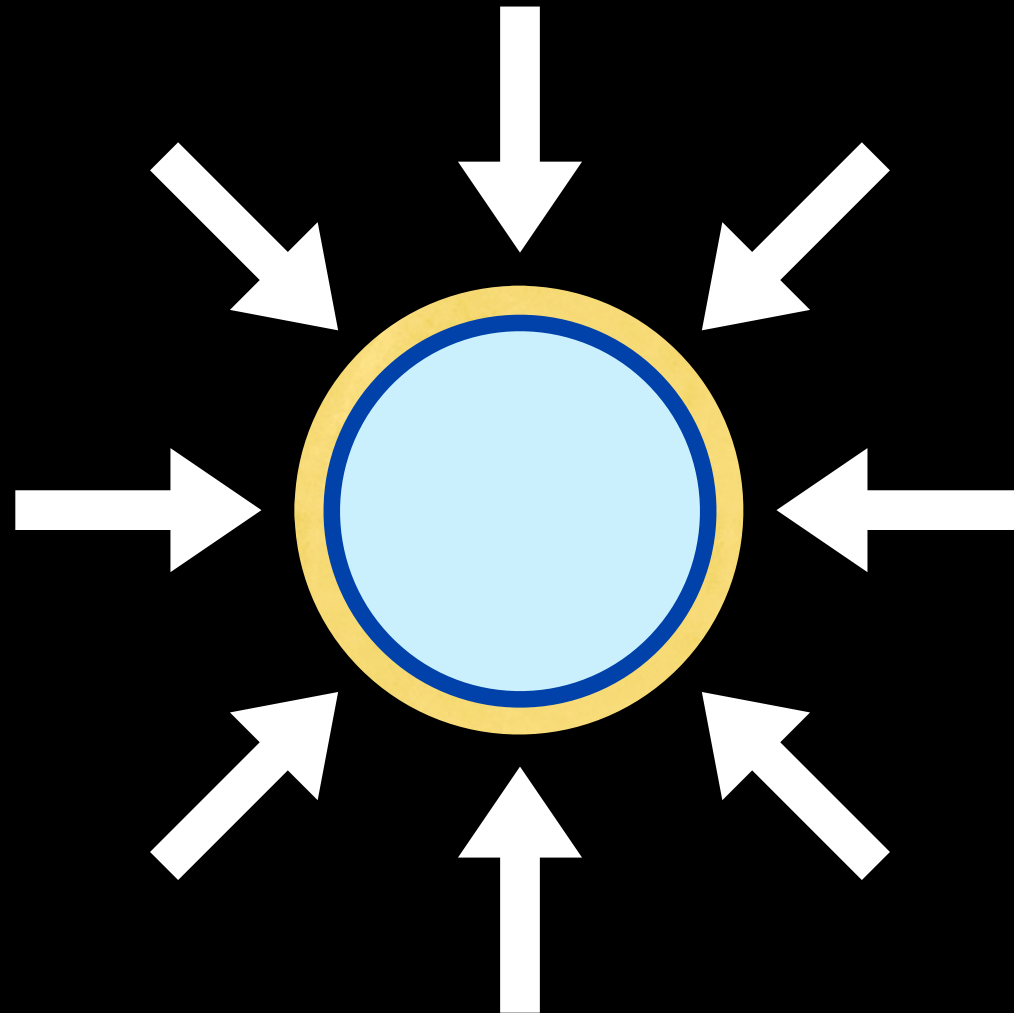
アブレーター
(CH + 2% Si)

固体の重水素・三重水素
気体の重水素・三重水素

燃料ペレット 直径約2ミリ

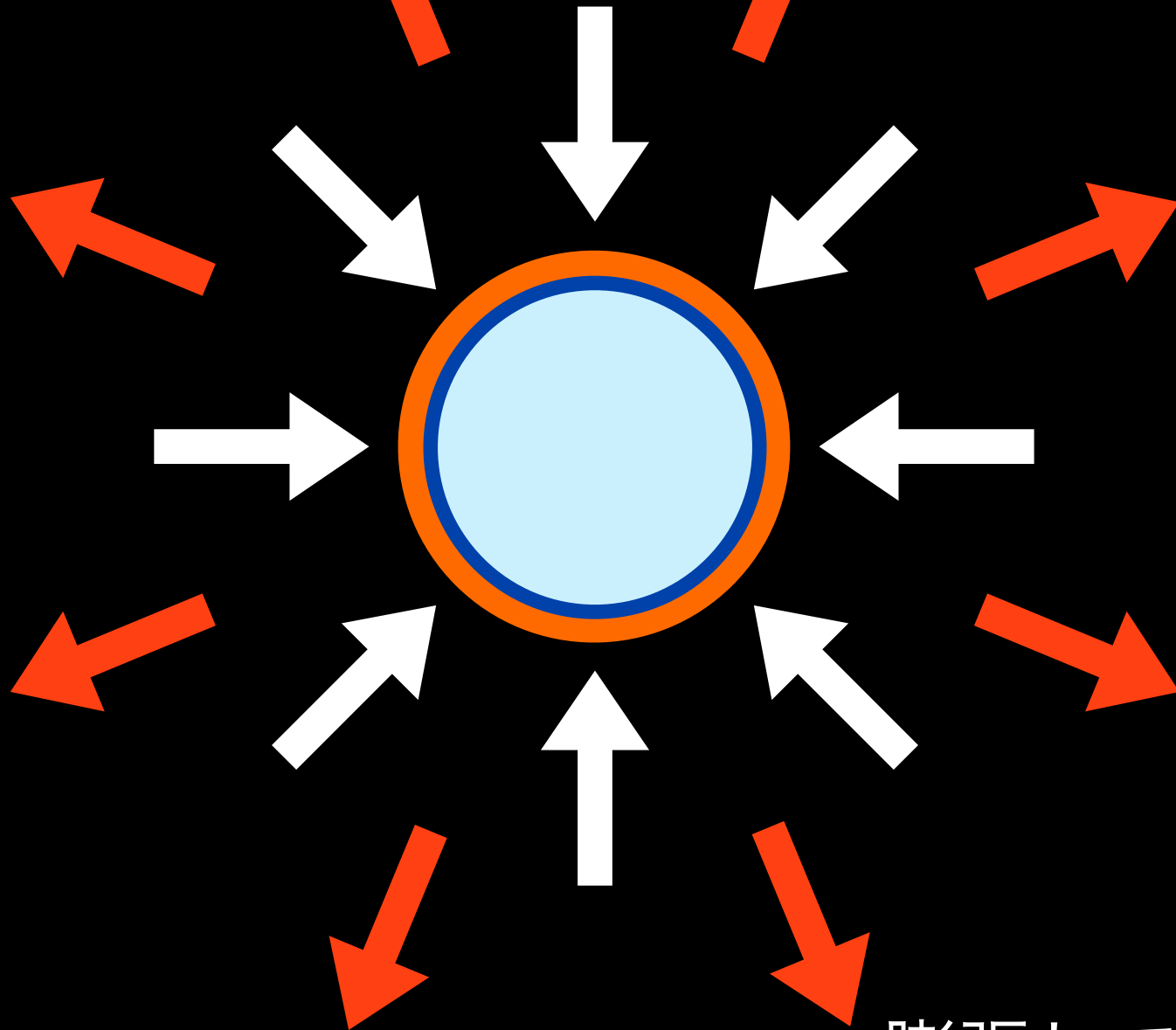


四方八方からレーザーを照射



メガ(100万)ジュールのエネルギーを投入

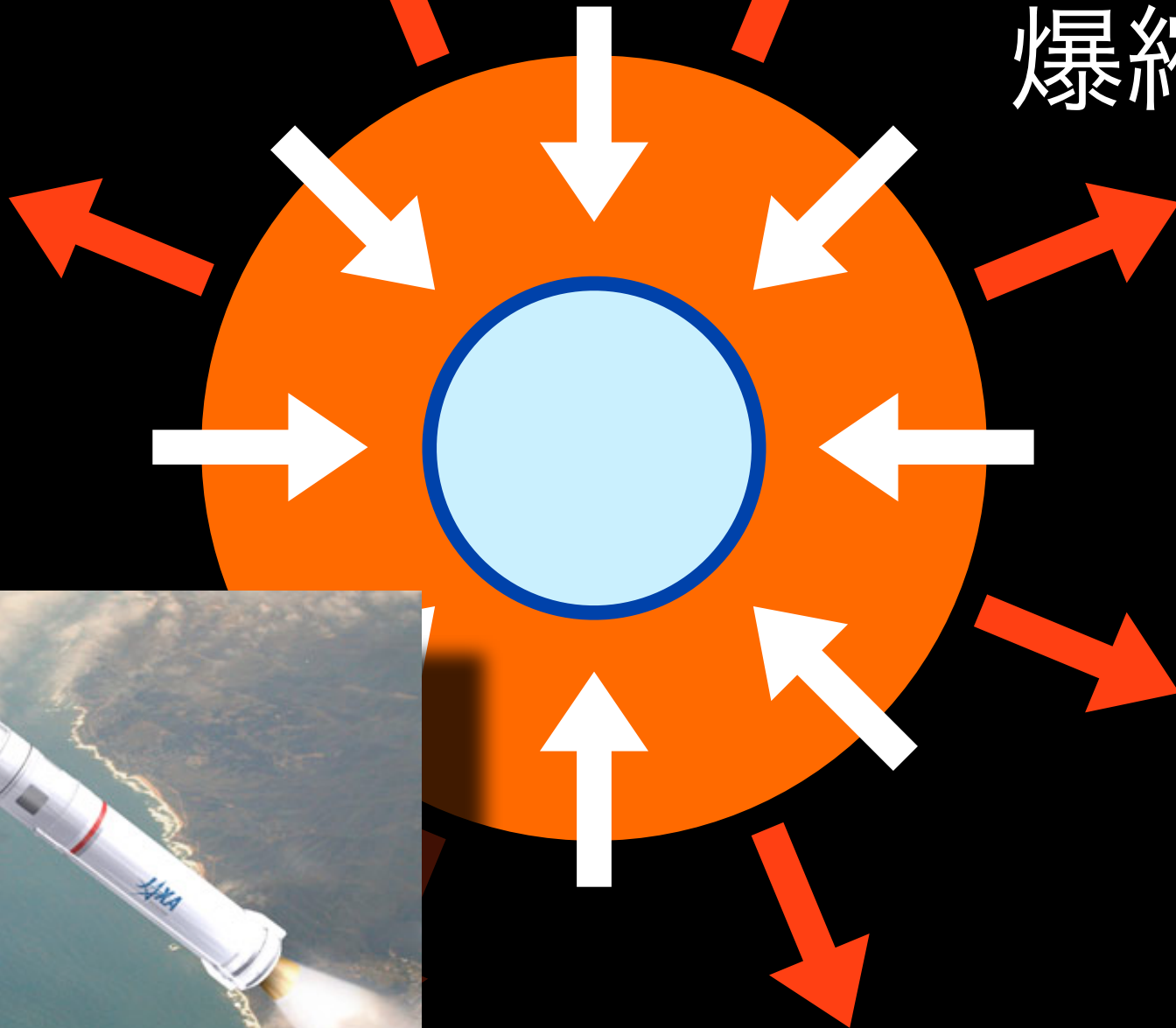
アブレーター層の温度が急速に上昇しプラズマ化



膨張してふきとぶ

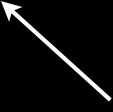
ロケットと同じ原理で核燃料が圧縮される

爆縮



核燃料を 1 億度、密度 1000 g/cm^3 の状態に

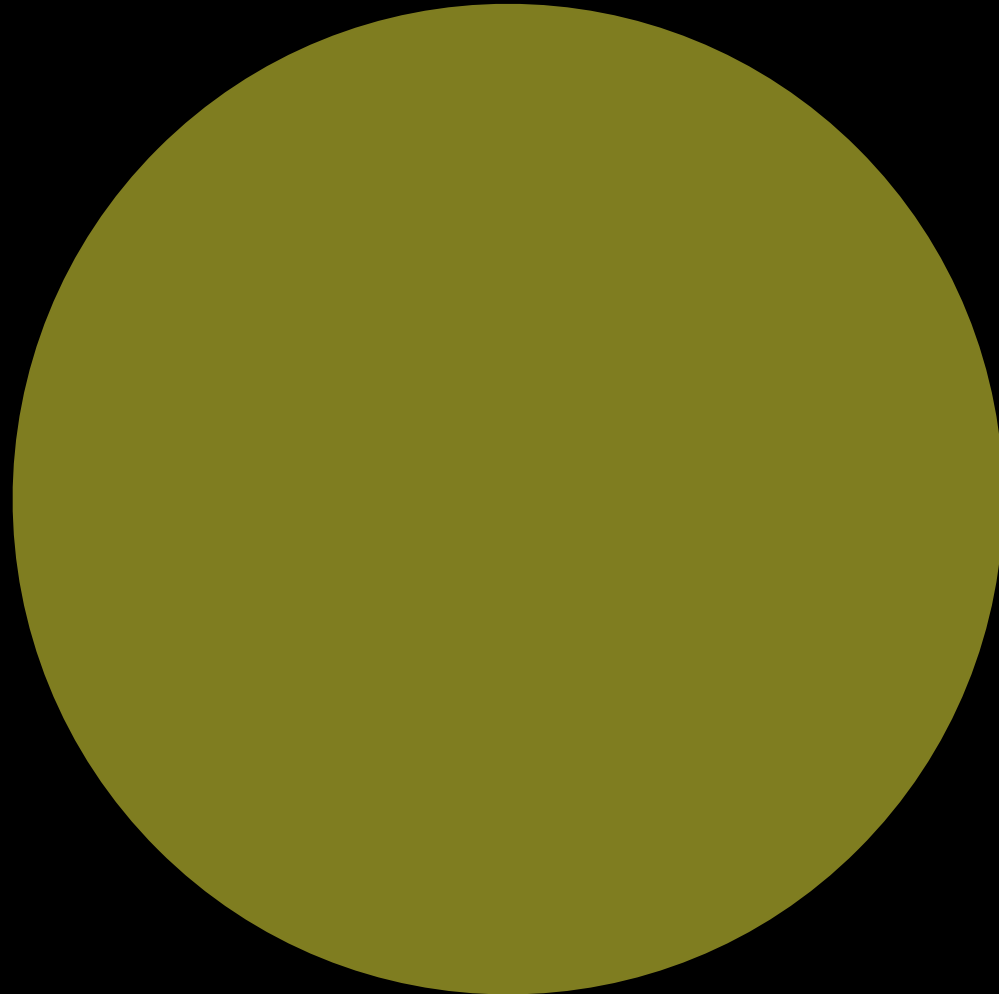
水の1000倍、金の50倍



17ナノ秒(0.000000017秒)後

恒星の中心部と同様の高温高密度の状態

核融合反応が起こり、エネルギー生成



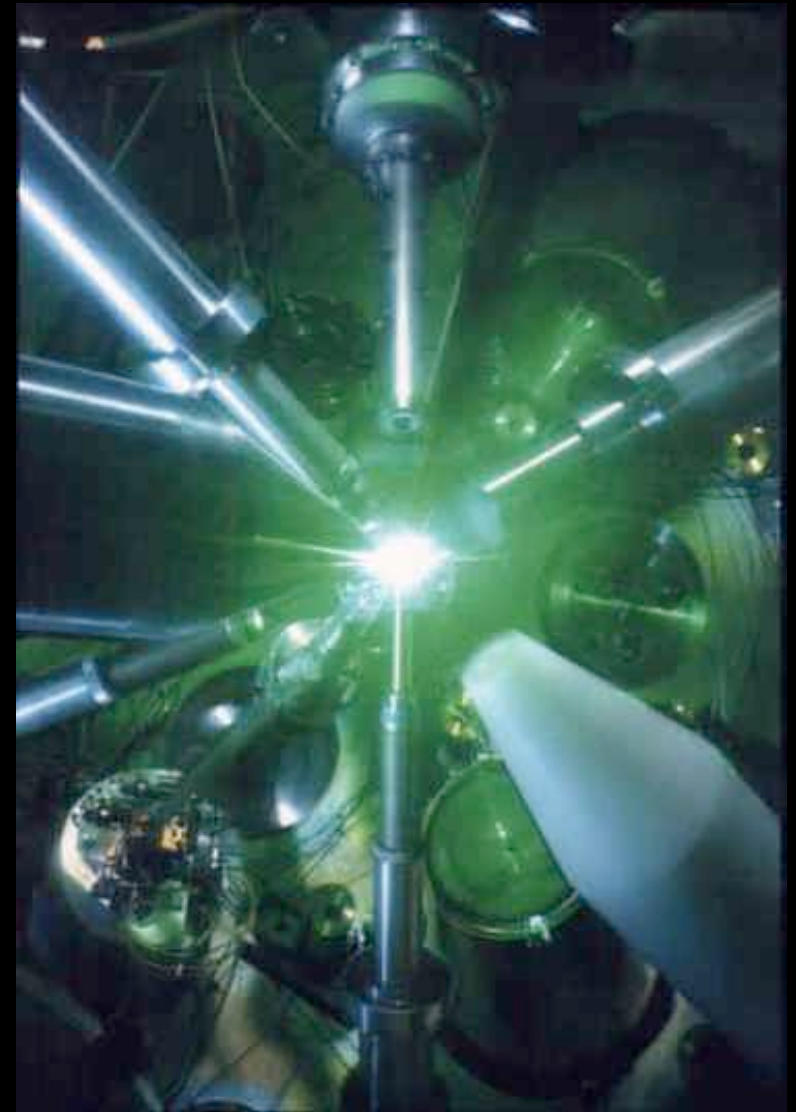
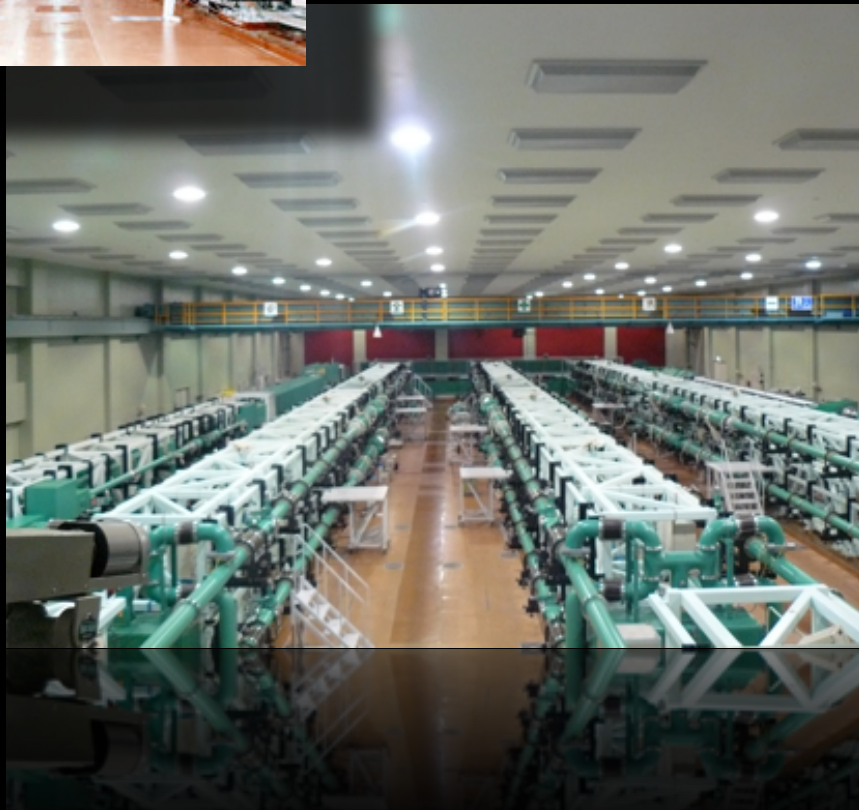
レーザー核融合の実現を目指して、1970年代から
ハイパワーレーザーの建設が始まる

- ローレンス・リバモア研究所 (米)
- ロチェスター大学 (米)
- 大阪大学
- ラザフォード・アップルトン研究所 (英)
- National Ignition Facility (NIF) (米)
- Laser Mega-Joule (仏)

など

大阪大学 GEKKO(激光) XII

1983年完成 12ビーム



National Ignition Facility 米国国立点火施設

@ローレンス・リバモア研究所



アメフト場3つ分の大きさ
35億ドル(2800億円)

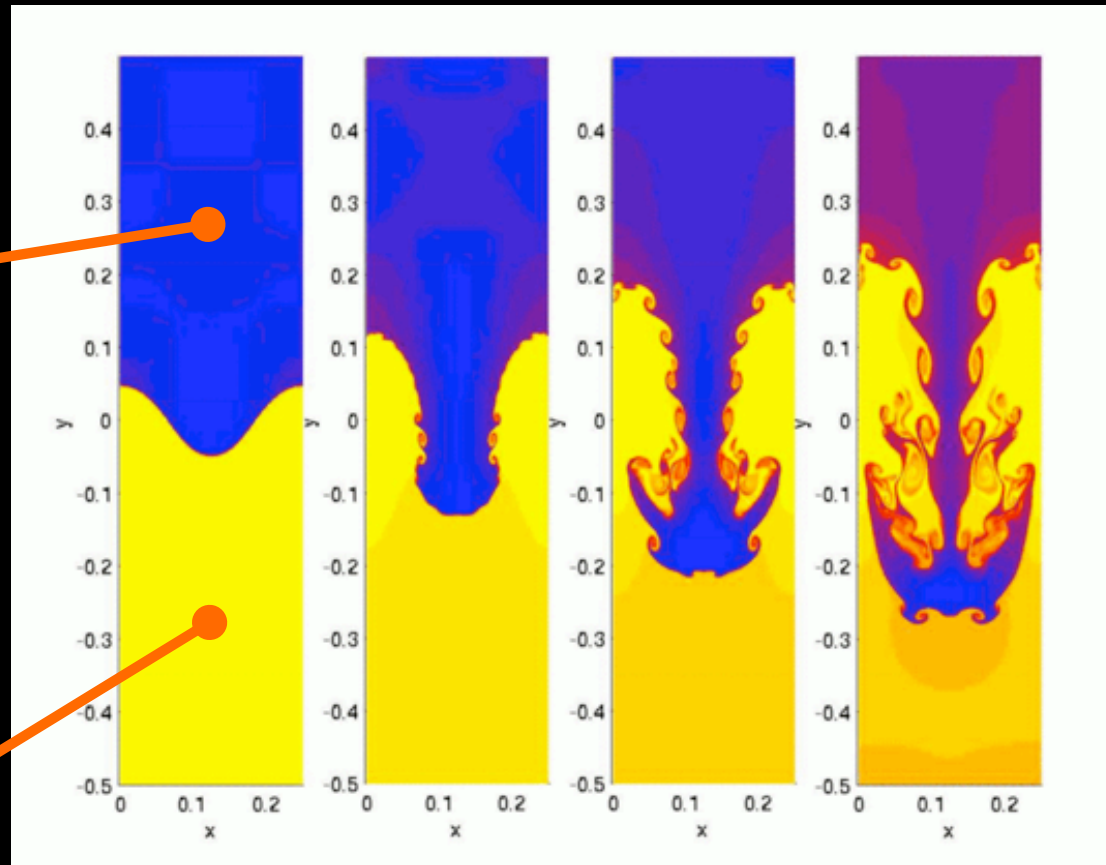
192本のレーザー
ビームを照射



すべての方向から正確に均一に圧縮しないといけない←これが難しい

重い液体
(水など)

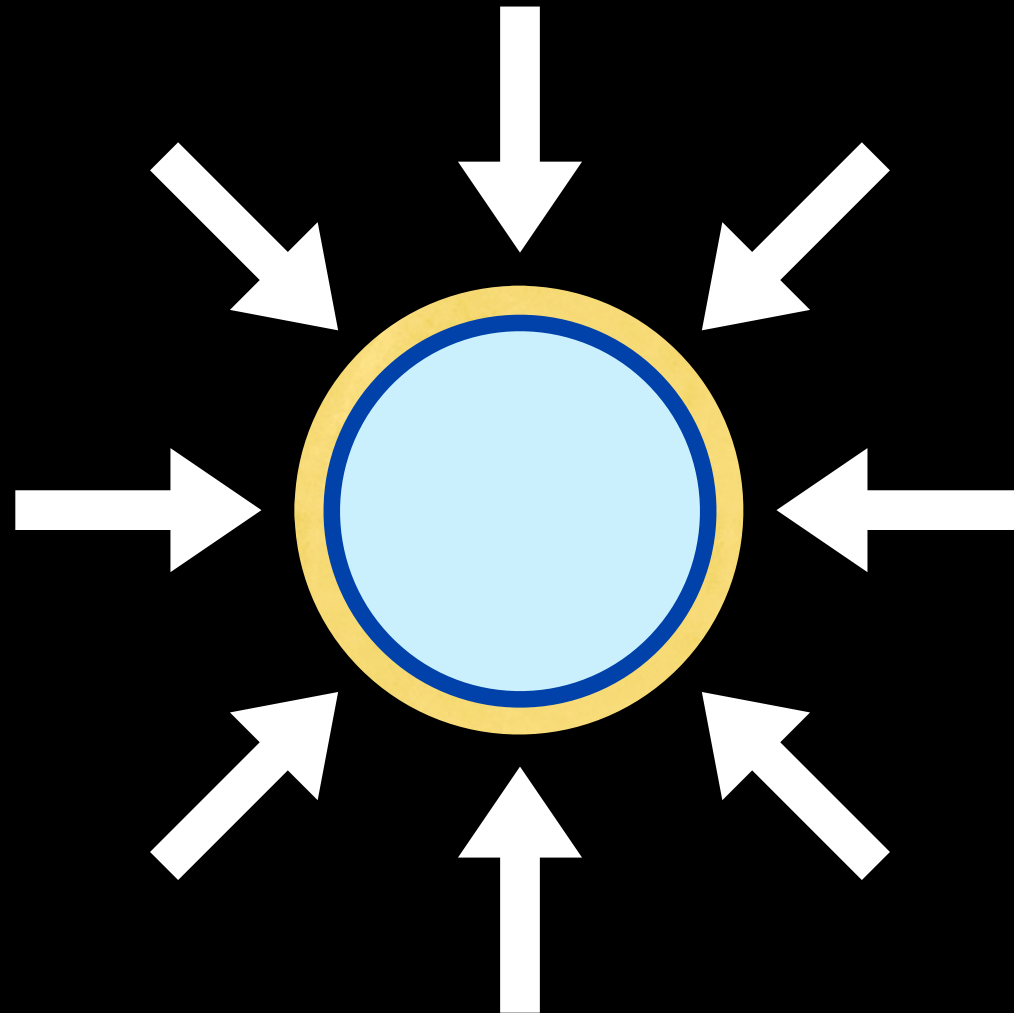
軽い液体
(油など)



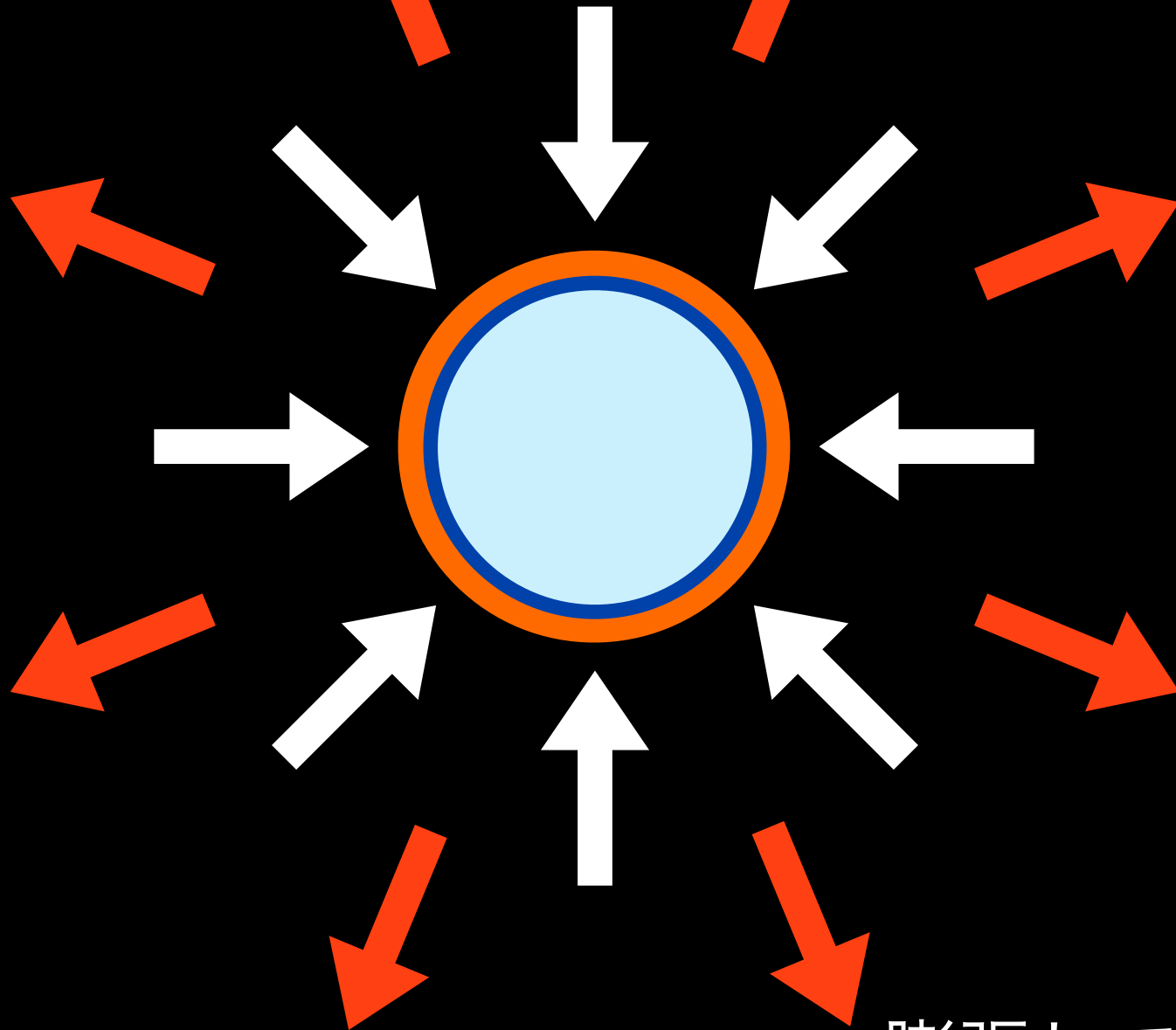
これ乗り越えるために

- 高速点火
- 間接駆動

四方八方からレーザーを照射

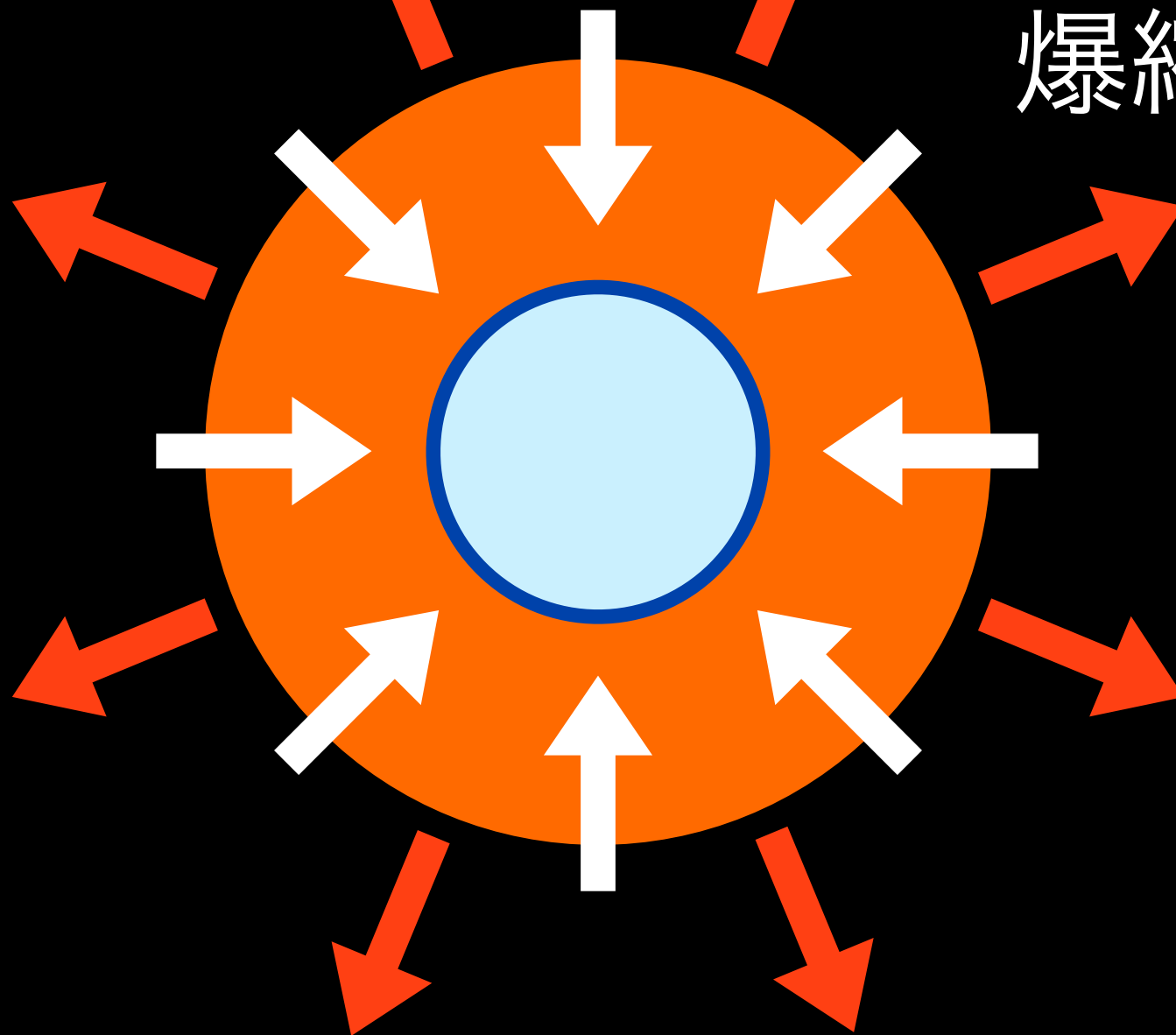


アブレーター層の温度が急速に上昇しプラズマ化

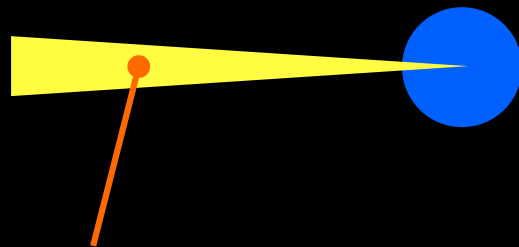


膨張してふきとぶ

ロケットと同じ原理で核燃料が圧縮される

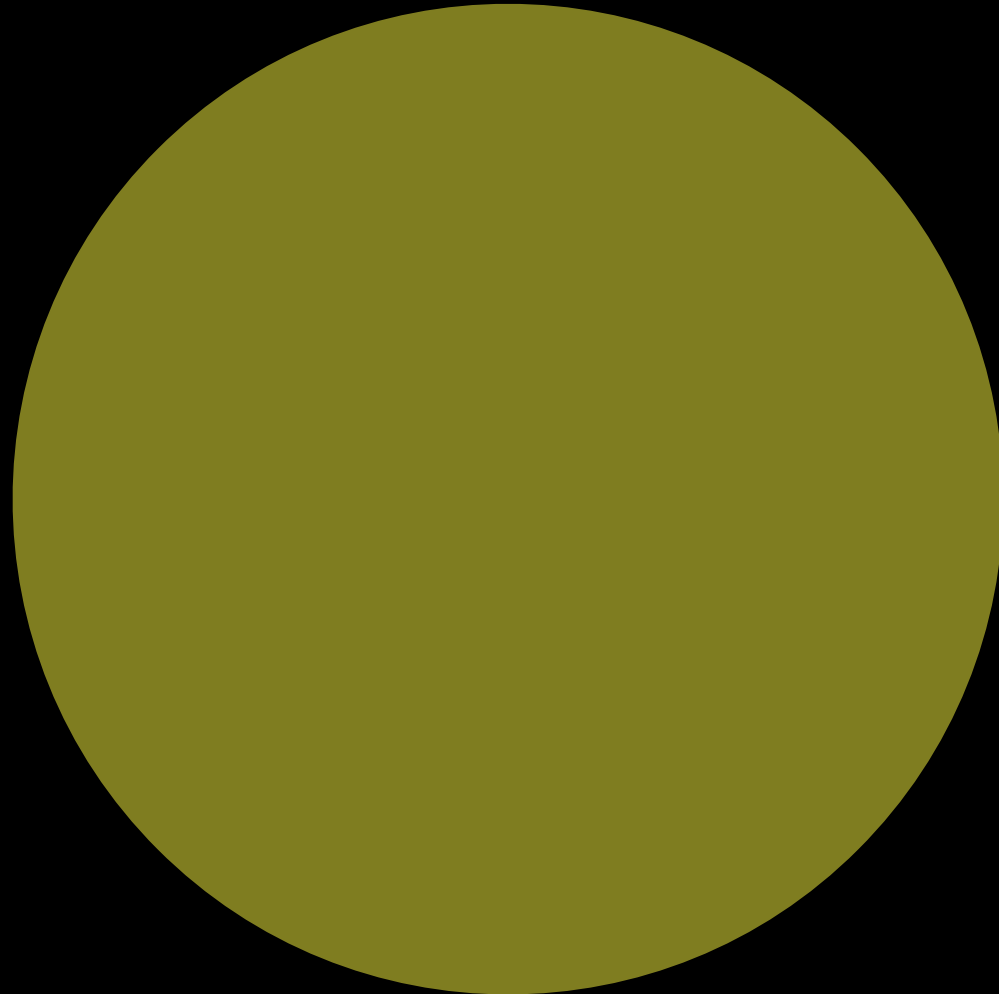


爆縮

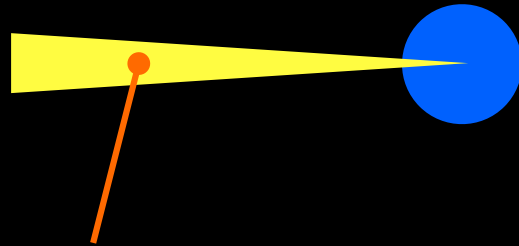


高強度のフェムト秒またはピコ秒
レーザーで点火を助ける

核融合反応が起こり、エネルギー生成



高速点火方式



高強度のフェムト秒またはピコ秒
レーザーで点火を助ける

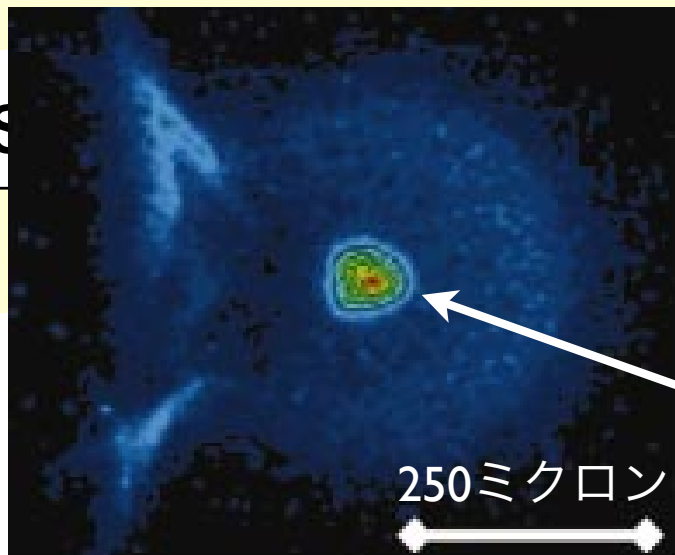
2001年に、大阪大学レーザーエネルギー学研
センターで、高速点火で核融合反応を起こすこ
とに成功



爆縮用レーザー

$$\frac{dm}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

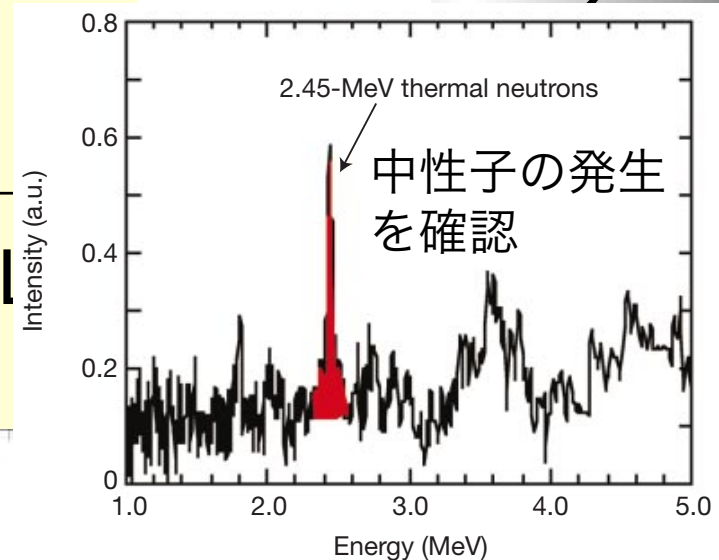
9本
1ナノ秒



er intensity.

コアの部分は
密度50~70 g/cm³

250ミクロン



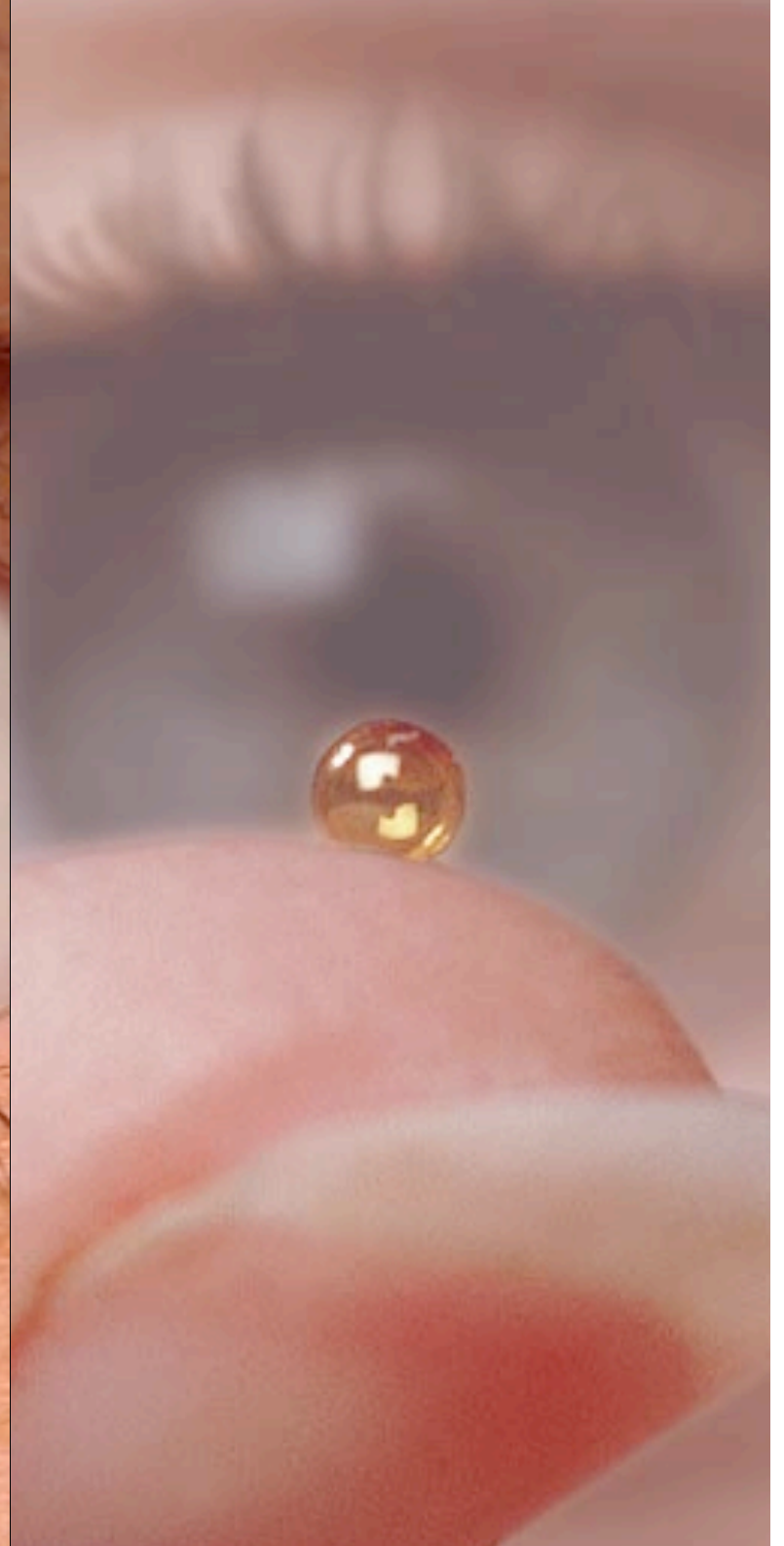
on En

sity (

これ乗り越えるために

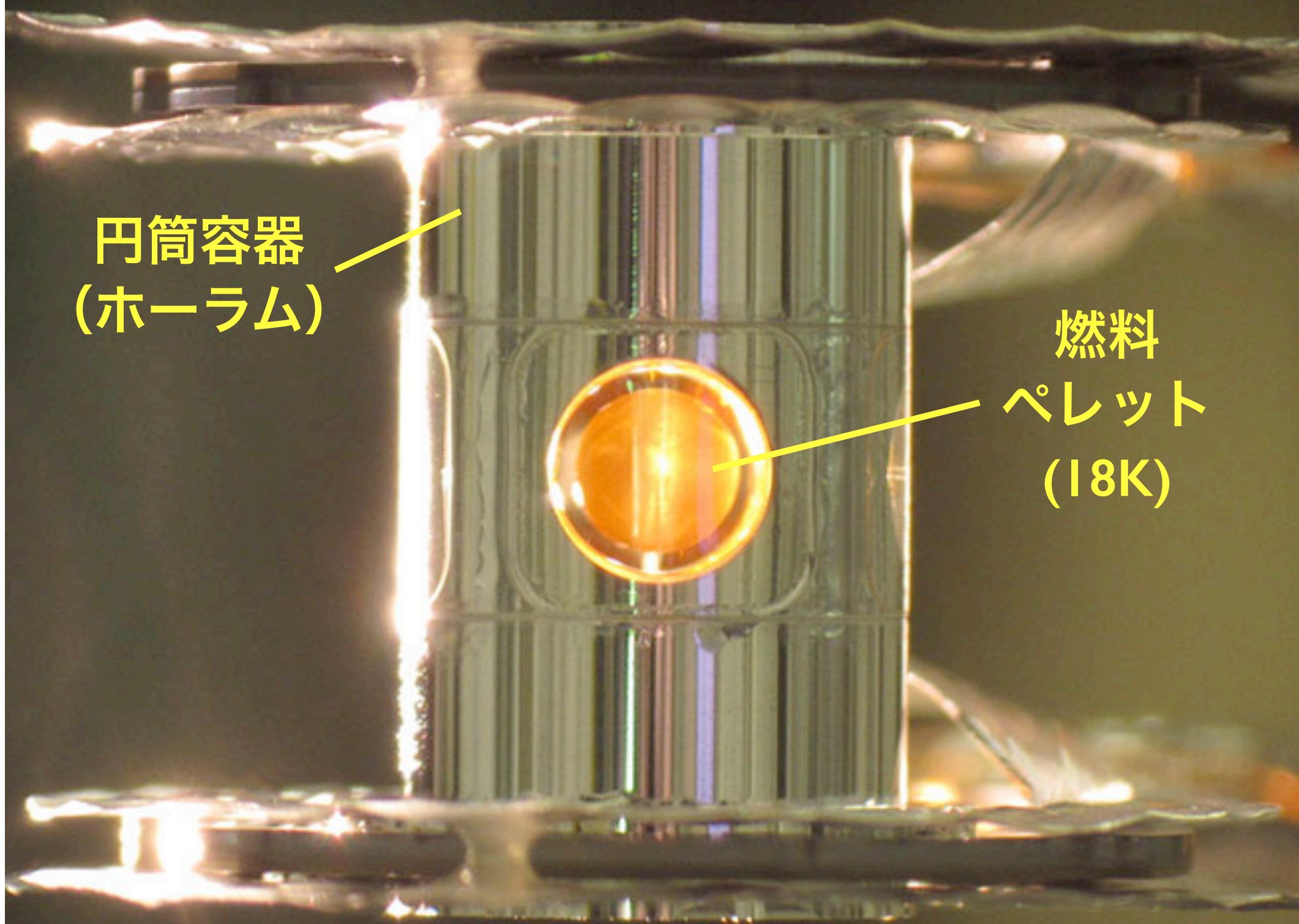
- 高速点火
- 間接駆動

金製のこの円筒容器の中に
燃料ペレットを入れる

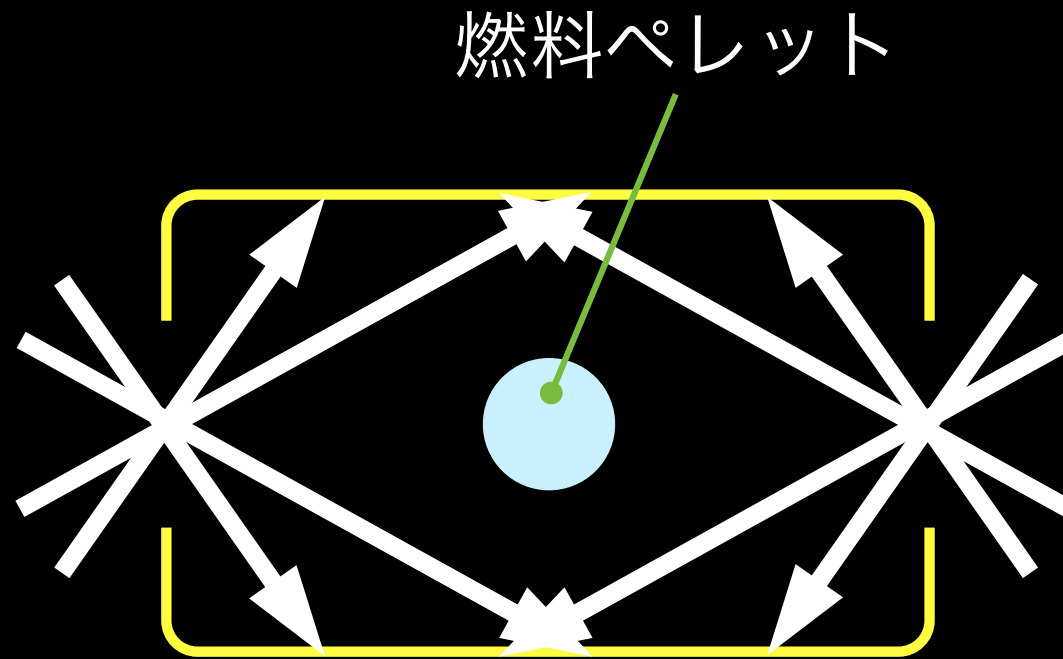


円筒容器
(ホーラム)

燃料
ペレット
(18K)

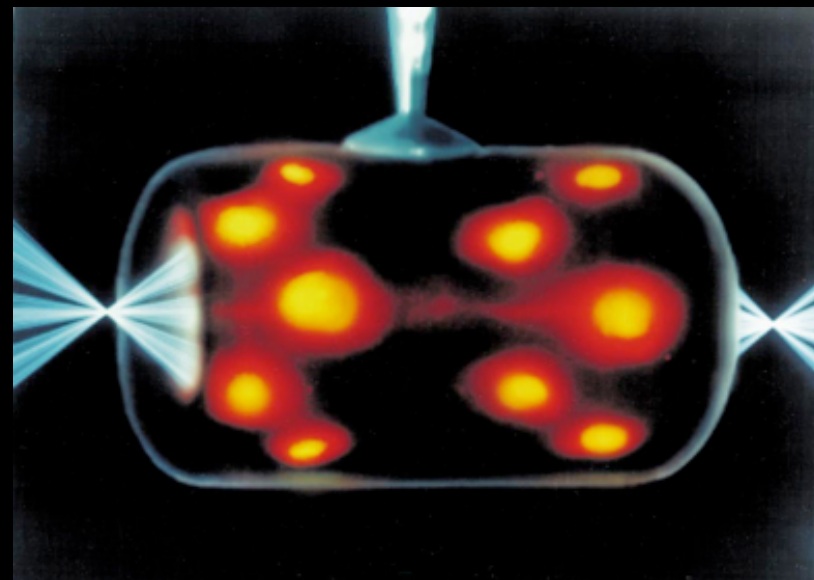
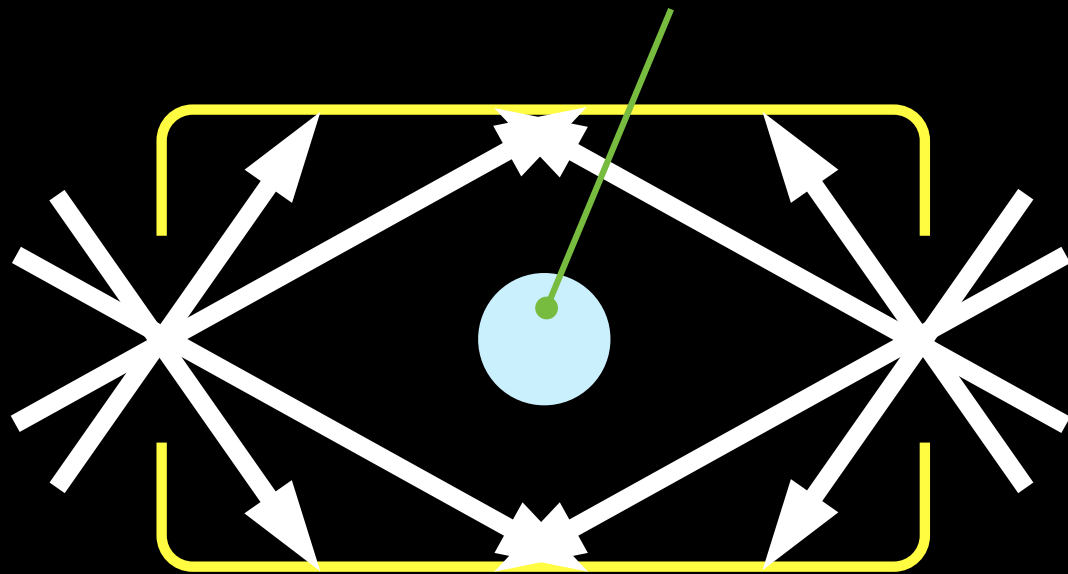


レーザービームを円筒容器内部に照射



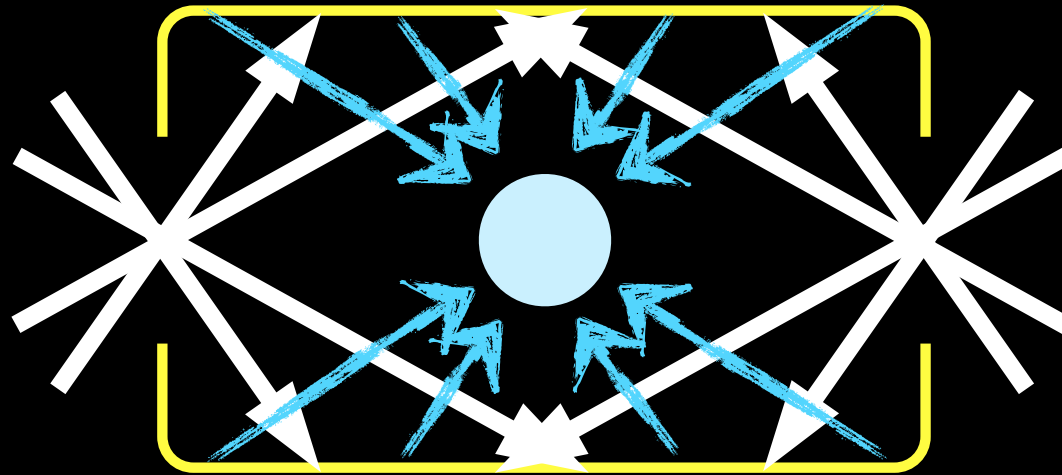
レーザービームを円筒容器内部に照射

燃料ペレット

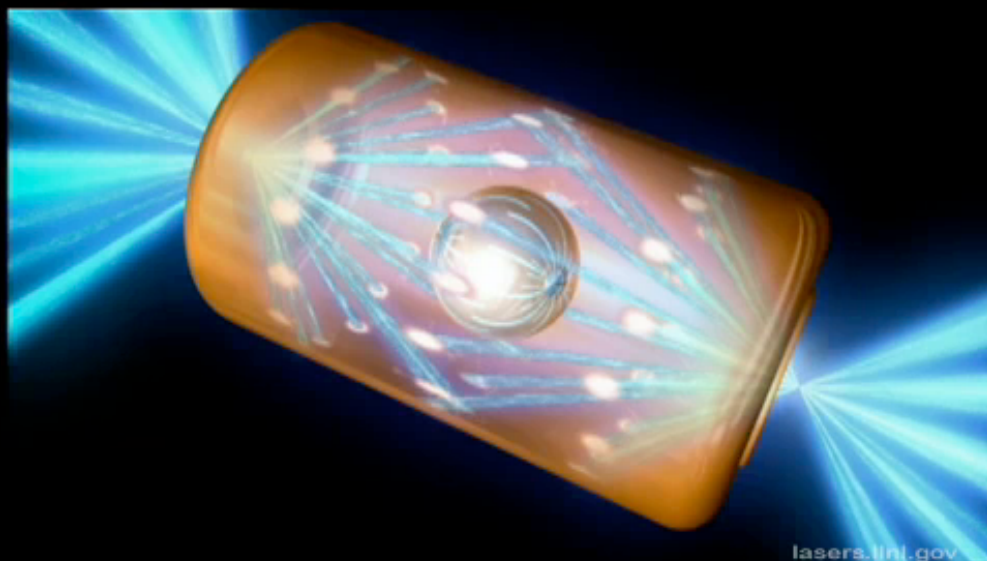


X線イメージ

レーザーは内壁でほぼ100%の効率で
X線に変換される

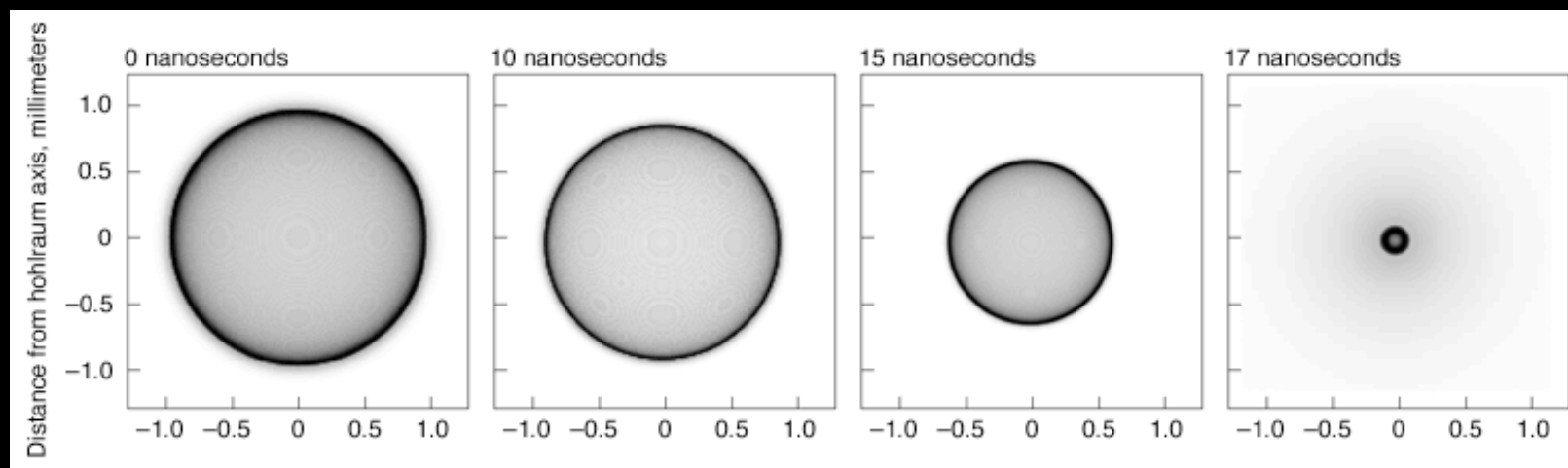


1000兆ワット/cm²の高強度のX線が
均一に燃料を爆縮



間接駆動

爆縮まで17ナノ秒



ナノ=10億分の1

National Ignition Facility 米国国立点火施設

@ローレンス・リバモア研究所



アメフト場3つ分の大きさ
35億ドル(2800億円)

192本のレーザー
ビームを照射



2012年7月5日 NIF

- 192本の紫外線レーザービーム照射
- 500兆ワットのレーザーパワー
- 185万ジュールのレーザー光エネルギー
- ビーム毎のエネルギー差は1%以内

のレーザーの目標達成

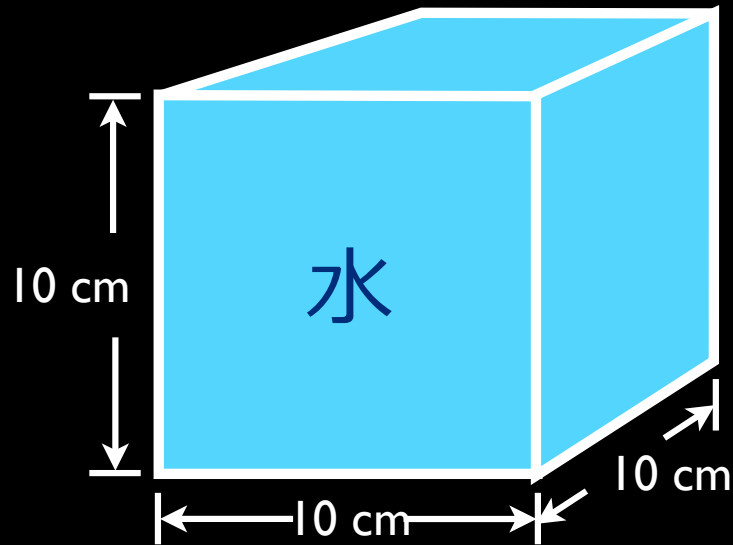
500兆ワット(0.5ペタワット)のレーザーパワー

ペタ = 10^{15} = 1000兆

- 全米の消費電力の1000倍！
- 全世界の発電容量の150倍！
- 原子力発電所50万基分！

こんなに使ったら全世界が停電するはずでは？

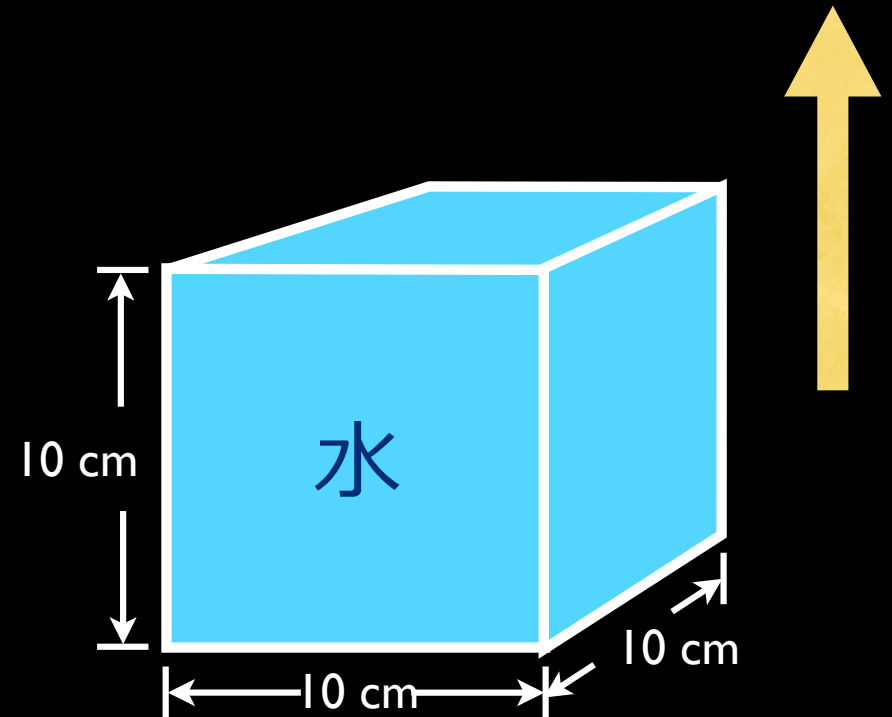
エネルギー・パワー・強度



温度を1度上げるのに必要
なエネルギー

= 1 kcal

= 4200 ジュール



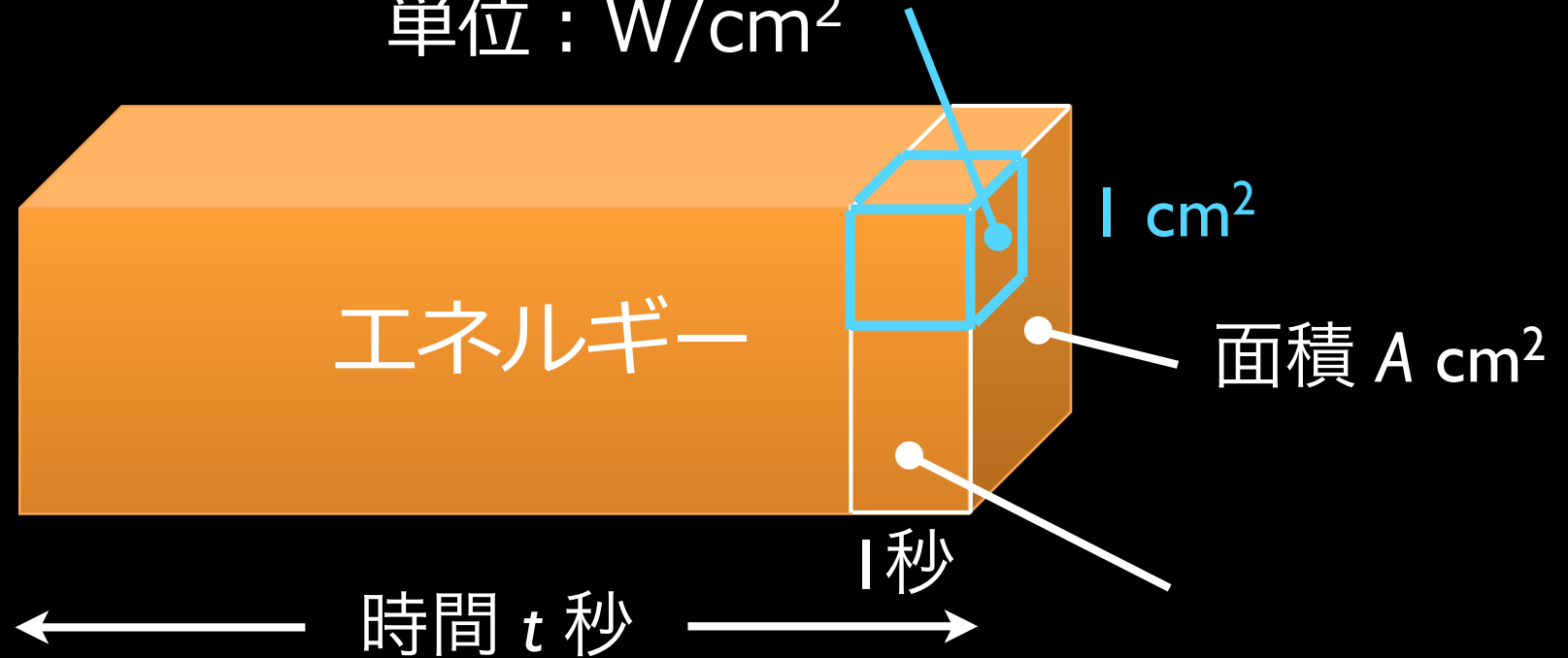
1 m持ち上げるのに必要
なエネルギー

= 2.3 cal

= 9.8 ジュール

単位面積あたりに与えられるパワー = 強度（明るさ）

単位：W/cm²



1秒あたりのエネルギー
= パワー（出力、仕事率）

単位：ワット (W)

同じエネルギーでも、かける時間によってパワーが違う

同じパワーでも、面積によって強度が違う

消費電力・レーザーのパワー

= 単位時間（秒）あたりのエネルギー

ワット = ジュール/秒 ワット × 秒 = ジュール

185万ジュール ÷ 500兆ワット = 3.7ナノ秒

ナノ = 10億分の1

60秒で400メガジュールの電気エネルギーを蓄える

➡ 6700キロワット 17,000世帯分の電力

スーパーコンピューター「京」の
使用電力は12700キロワット



史上最大のレーザー光のエネルギー
185万ジュール = 442 kcal



非常に短い時間（NIFの場合ナノ秒）に
集中させることで、莫大なパワー

2012年7月5日 NIF

- 192本の紫外線レーザービーム照射
- 500兆ワット(0.5ペタワット)のレーザー
パワー $\text{ペタ} = 10^{15} = 1000\text{兆}$
- 185万ジュールのレーザー光エネルギー
- ビーム毎のエネルギー差は1%以内
のレーザーの目標達成

いよいよ次の目標は

核融合で生まれた
エネルギー

>

燃料に与えられた
エネルギー

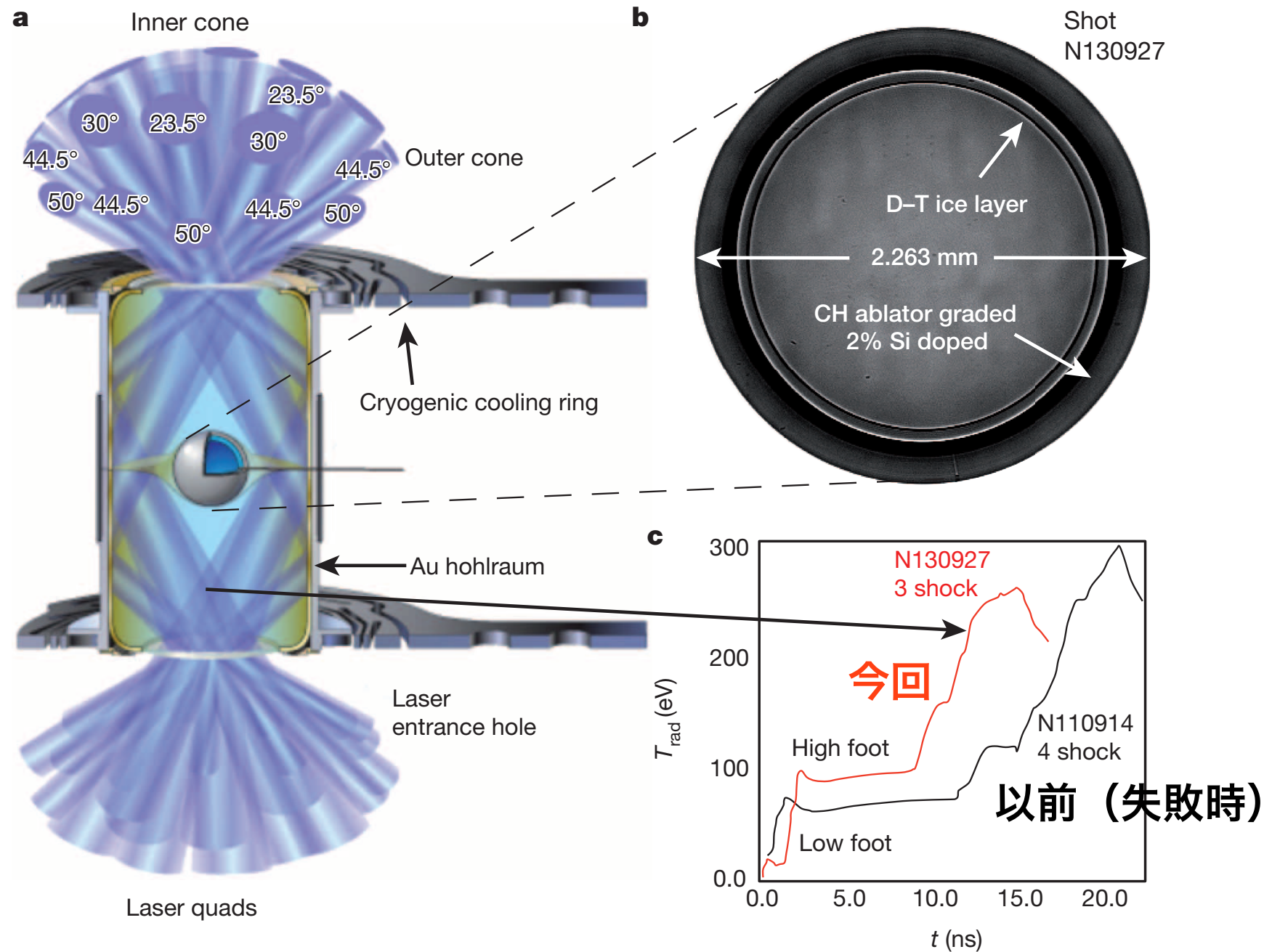
の実現

2012/9/30まで実験が行われたが **失敗！**

今のところ原因はよく分かっていない

コンピューターシミュレーションに問題？

2013年9月にレーザーパルスの時間波形を変えて再挑戦

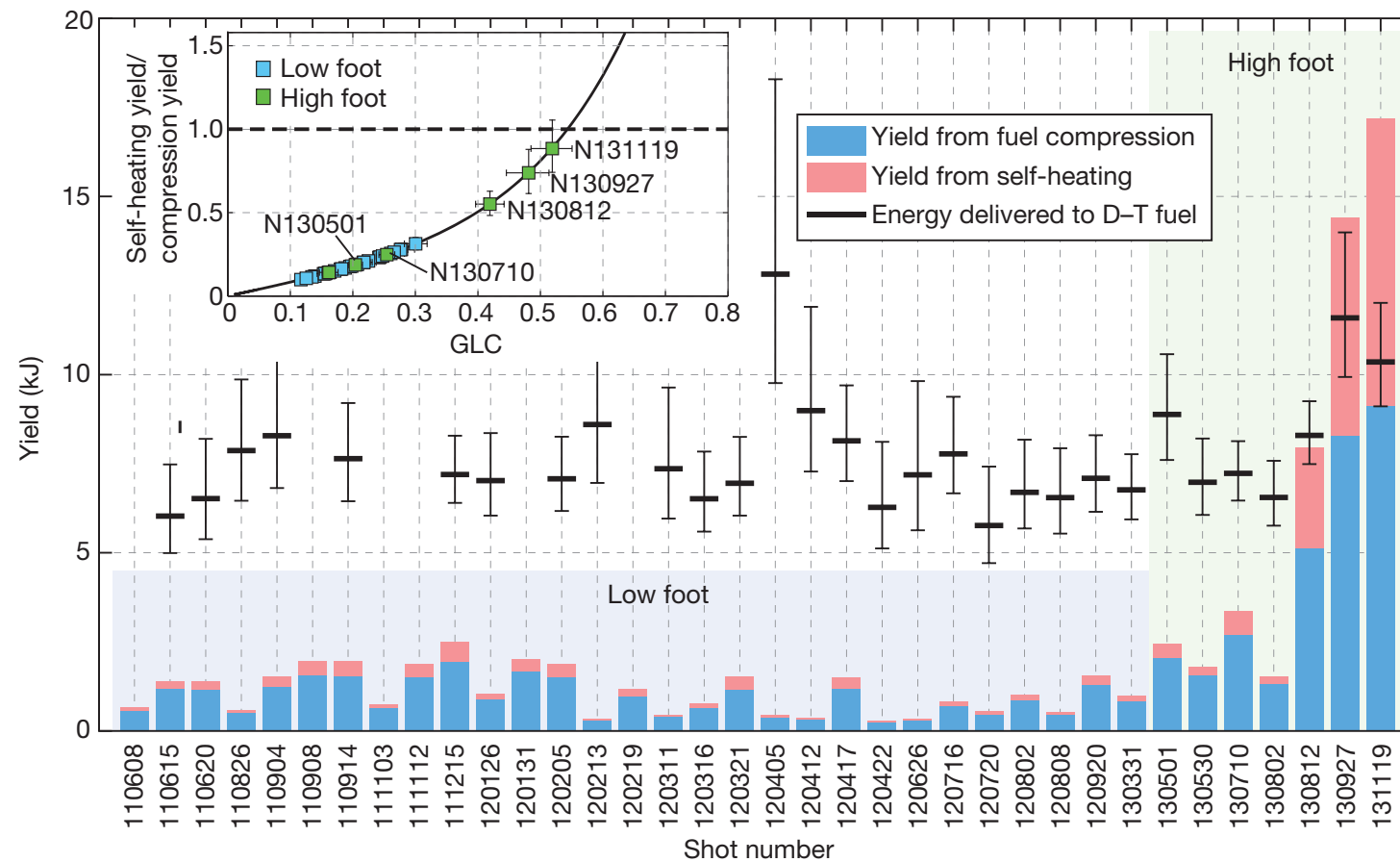


核融合で生まれた
エネルギー

>

燃料に与えられた
エネルギー

に成功！

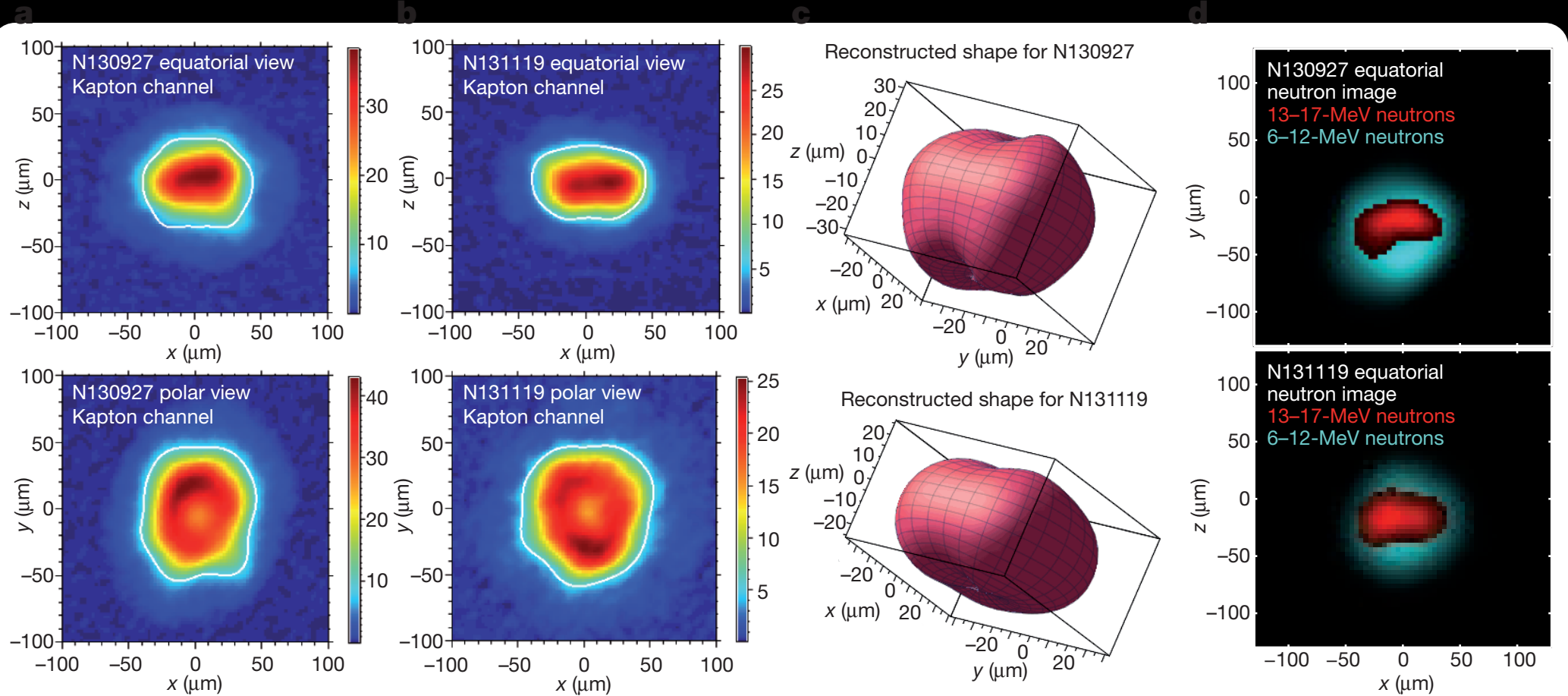


爆縮時のホットスポット

X線

再現図

中性子



レーザー核融合をめざして開発
された高出力高エネルギーのレ
ーザーは核融合**以外**の研究にも
使われはじめている

1 億度、密度 1000 g/cm^3 の状態に

水の1000倍、金の50倍



1000億気圧

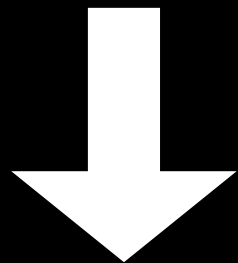
恒星の中心部と同様の高温高密度の状態

1 億度、密度 1000 g/cm^3 の状態に

水の1000倍、金の50倍

恒星の中心部と同様の高温高密度の状態

1000億気圧



星の内部を研究する実験室

実験室宇宙物理学

実験室宇宙物理学

- 恒星の構造や中心部の状態

- 惑星の構造や中心部の状態

地球の内部は地震波で調査。この方法は他の惑星には使えない。
1849個の太陽系外惑星が見つかった(2014/11/2現在)

- 宇宙化学

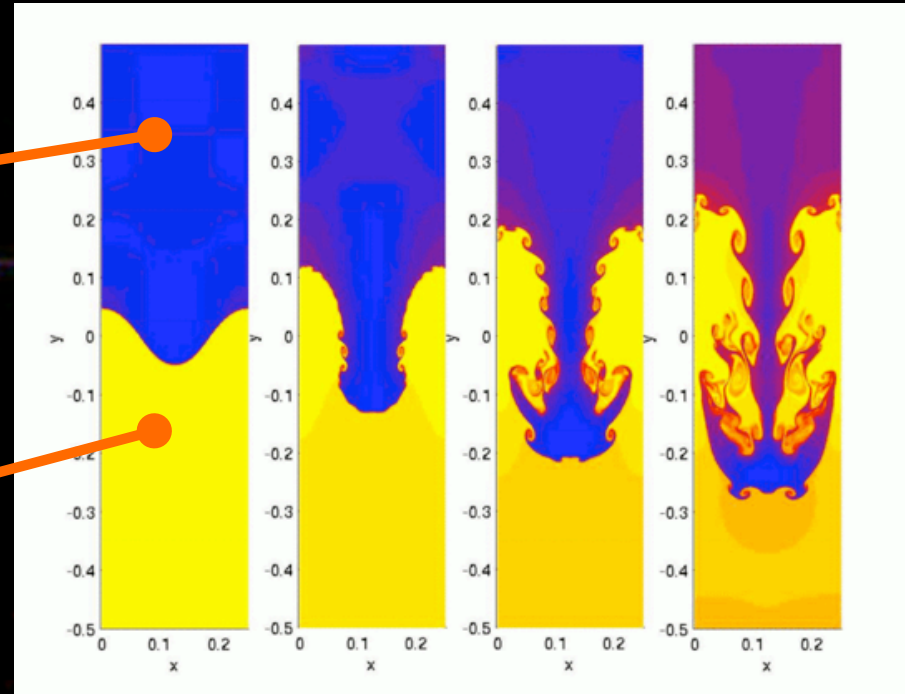
星間物質や生命の起源

- 超新星爆発

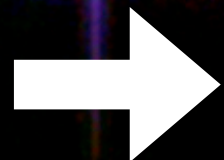
すべての方向から正確に均一に圧縮しないといけない←これが難しい

重い液体
(水など)

軽い液体
(油など)



超新星爆発でも同様の不安定性が生じる



核融合用レーザーで研究できると期待

恒星や惑星の内部の状態を知るには、高温高压 高密度の極限状態の物質の

- 状態方程式（温度と圧力と密度の関係）

核融合燃料がどのように爆縮されるかにも関係
理想気体なら $\text{圧力} = \text{定数} \times \text{密度} \times \text{温度}$ だが...

- オパシティ（不透明度）

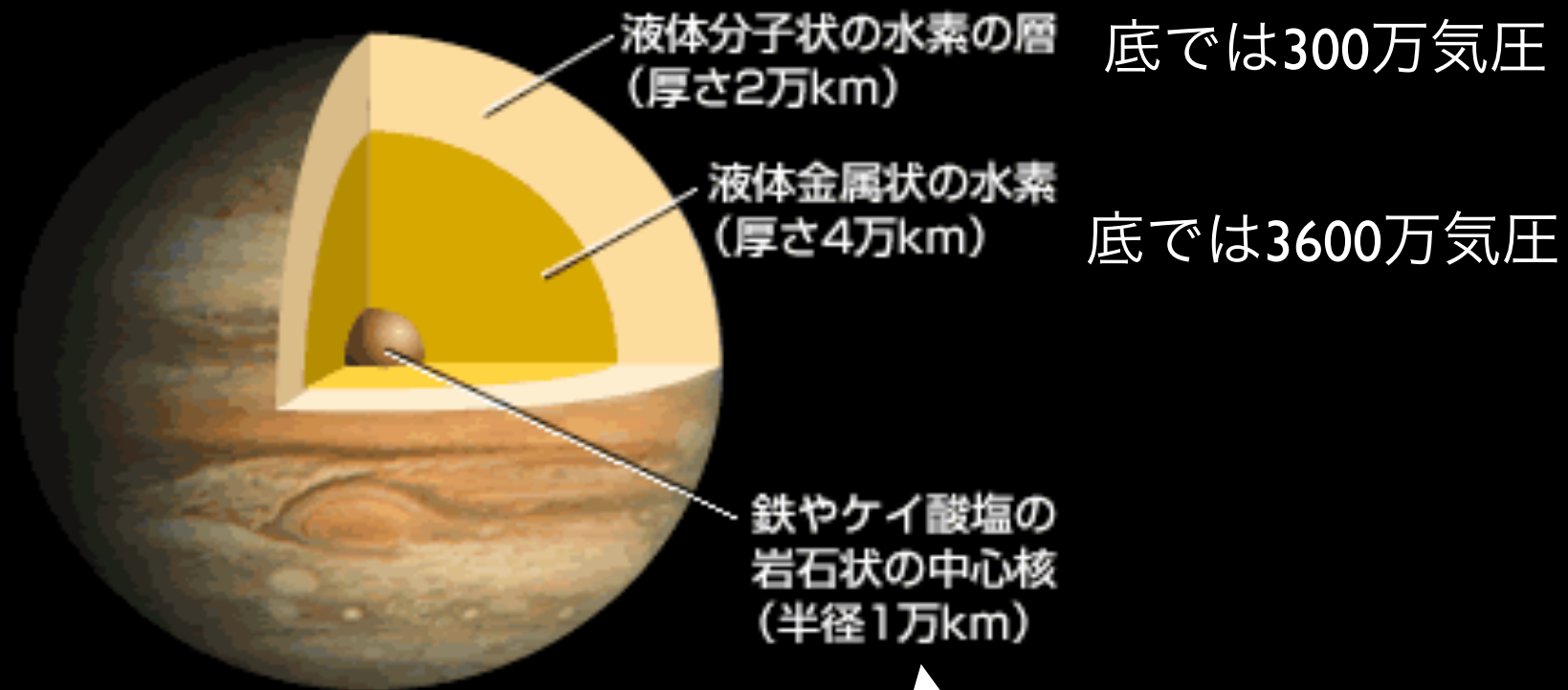
核融合反応の量に対して、星の温度と明るさが
どれぐらいになるかを知る鍵

- 核融合反応の進む速さ

木星や土星に地面はあるか？

天王星の中心部はダイヤモンドか？

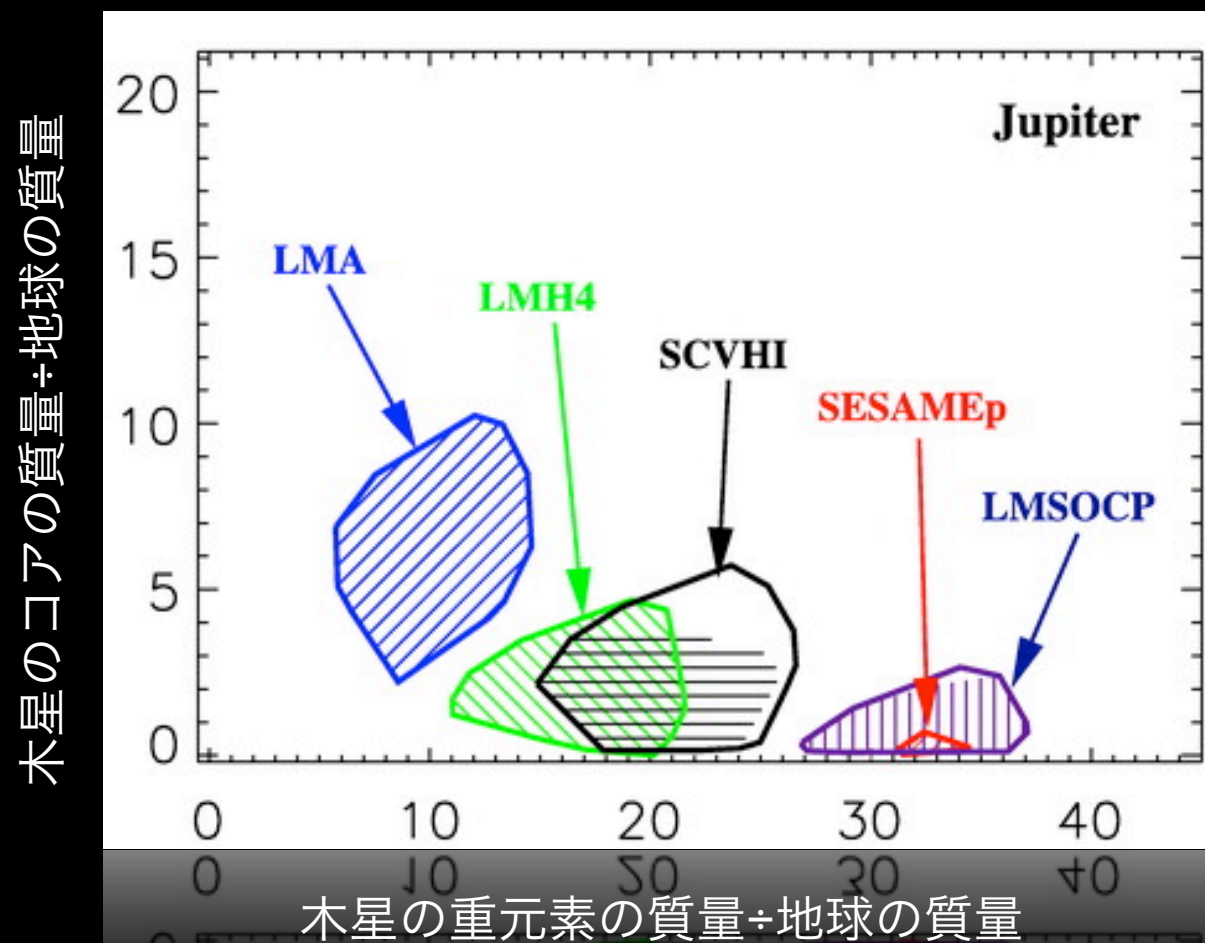
想像されている木星の内部…はっきり分かっていない



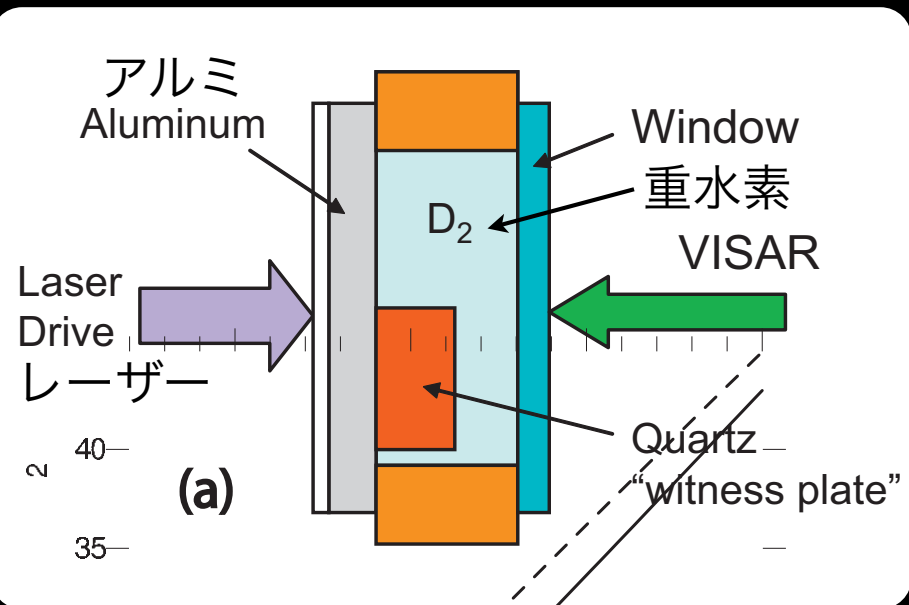
これ（地面）があるかは状態方程式しだい
木星の寿命も状態方程式しだい

これまでは理論計算するしかなかった

➡ 状態方程式によって答が大きく異なる



レーザーによる実験がはじまっている

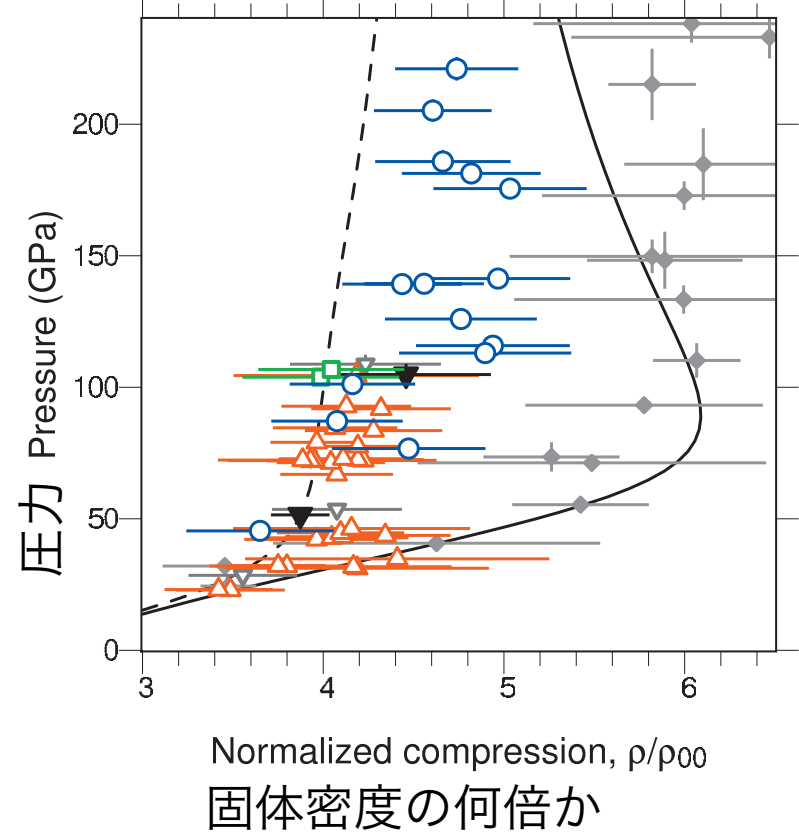


ロチェスター大学オメガレーザー
での実験

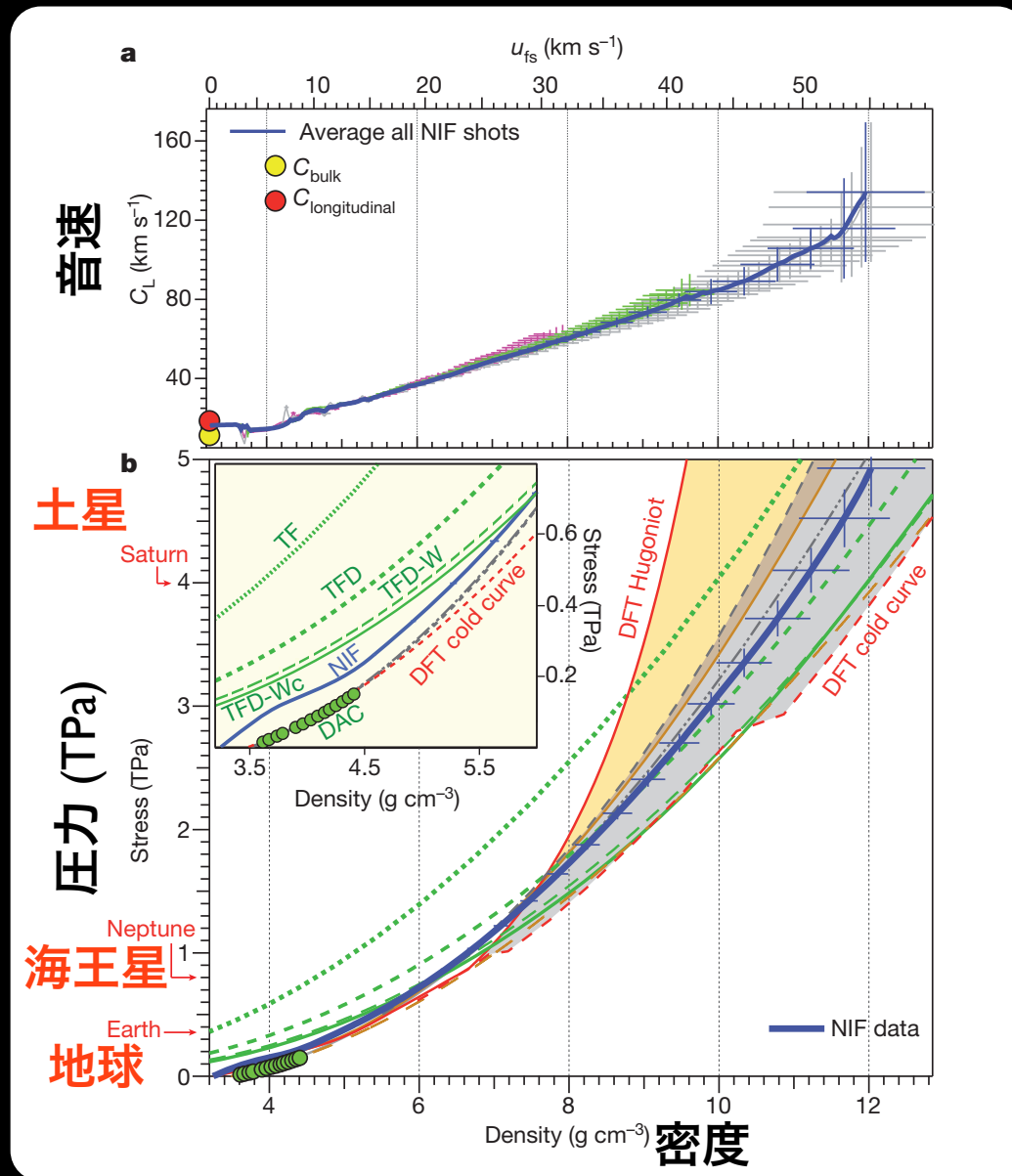
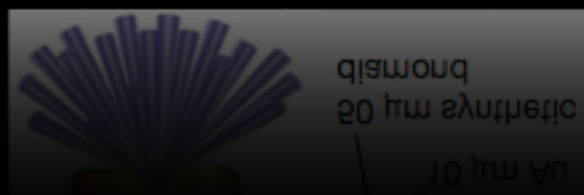
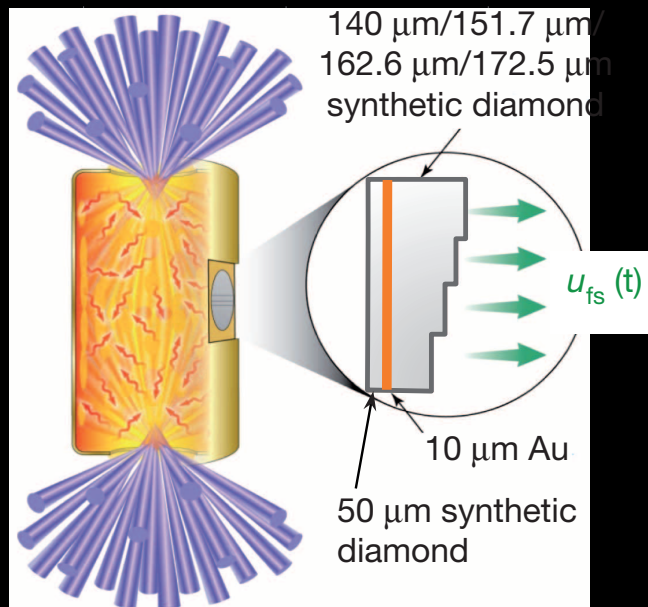
3 キロジュール
(NIFの600分の1)

3.7ナノ秒

GPa = 10000気圧 地球中心部は350GPa



NIFではダイヤモンドを5テラパスカルに圧縮 (5千万気圧)



レーザーを使って極限状態
の物質を研究する時代が始
まっている

レーザーのパワーの記録の例

ペタ = 10^{15} = 1000兆

NIF 1.25ペタワット(1996年)

ナノ(10^{-9})秒

阪大 1ペタワット(2002年)

韓国 1.5ペタワット(2012年)

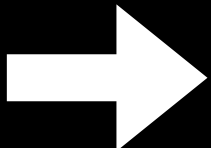
30フェムト(10^{-15})秒

核爆弾を除けば、

人工的に作れる最大のパワー

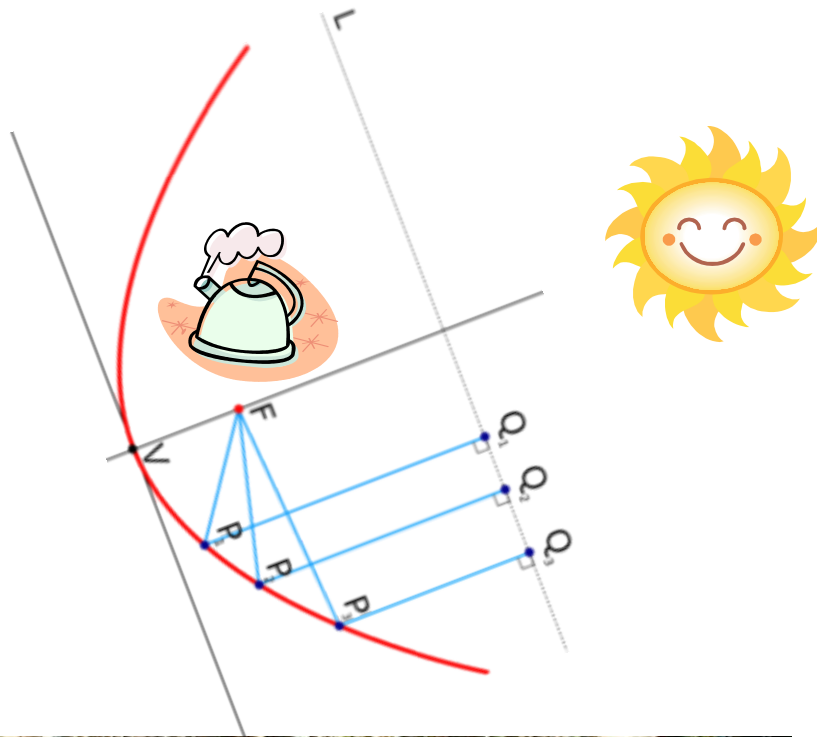
1ペタワットのレーザー光を集光すると…

波長（おおざっぱに言って1ミクロン） ぐらいのサイズ
まで集光できる $10^{15} \text{ W} \div (10^{-4} \text{ cm})^2 = 10^{23} \text{ W/cm}^2$

実際の記録(2008年)  $2 \times 10^{22} \text{ W/cm}^2$

地球表面での太陽光 0.075 W/cm^2

太陽の全エネルギーを約 1 平方メートルの
面積に集中させたのと同程度



Solar cooker



Canberra Deep Dish Communications Complex



ヨーロッパの新しい大規模レーザープロジェクト

Extreme Light Infrastructure (ELI)

- レーザーを使った素粒子加速器(10 GeV)
- アト秒レーザー
- 核物理研究
- 超高強度レーザー



最終目標は 200ペタワット, $10^{25} \sim 10^{26} \text{ W/cm}^2$

太陽の全エネルギーを約 1 平方センチの面積に集中させたのと同程度

超新星爆発のエネルギー 10^{38} W

> 銀河系のすべての星の合計

超新星の半径 $10 \text{ km} = 10^6 \text{ cm}$

➡ $10^{38} \text{ W} \div (10^6 \text{ cm})^2 = 10^{26} \text{ W/cm}^2$

宇宙を探してもまれにしか存在しないエネルギー強度！

素粒子物理の基礎研究が
期待されている

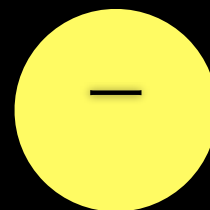
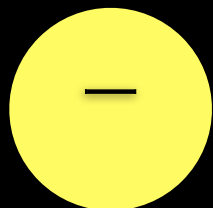


素粒子物理・宇宙物理の最も根源的な疑問の1つ

真空は真に^{から}空か

次から次へと（仮想の）電子と陽電子のペアが 誕生しては一瞬で消えている

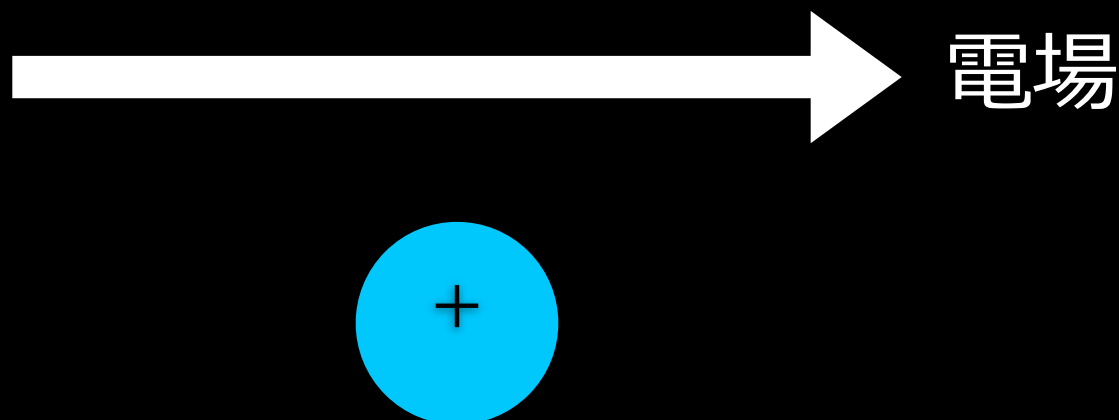
陽電子…電子の反粒子（ガンの診断(PET)にも使われている）



生まれてもすぐ一瞬(0.001 アト秒= 10^{-21} 秒ぐ らい)で消えるので見ることができない

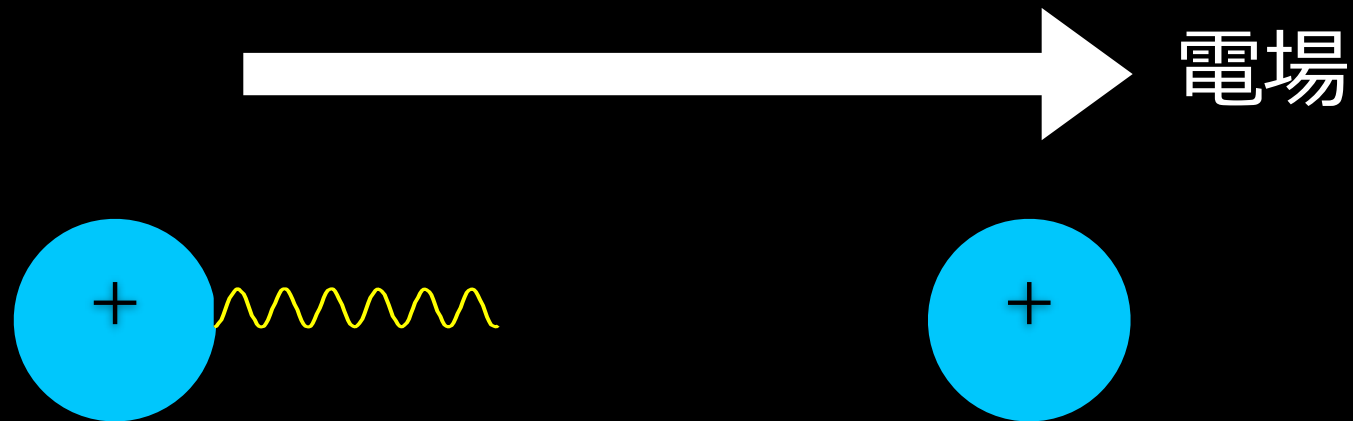
※物理現象の最小時間単位は 5×10^{-44} 秒（プランク時間）という説が有力

$2 \times 10^{26} \text{ W/cm}^2$ 程度のレーザーの電場があると...



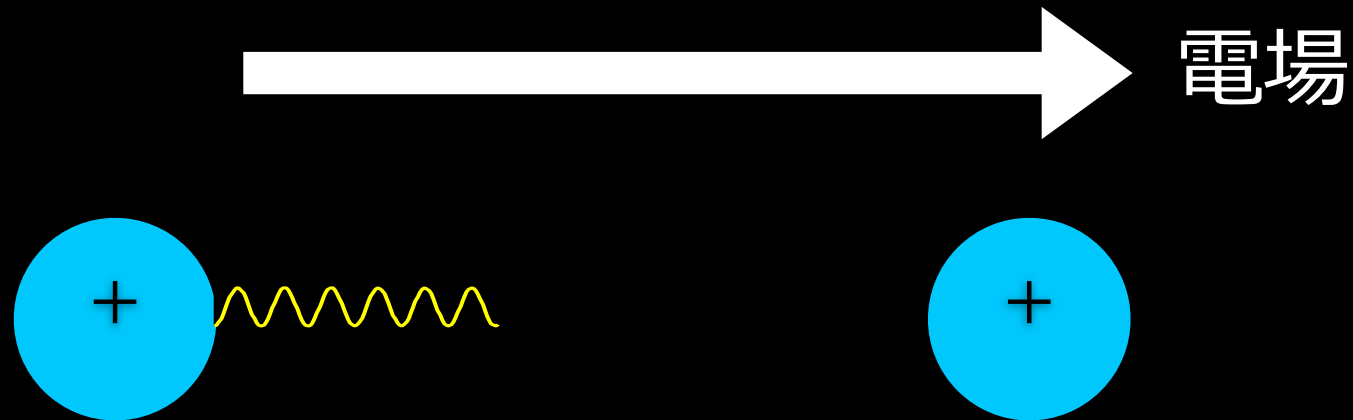
電子と陽電子は引き離されて、本物の電子と陽電子になる

超超超高強度のレーザー光の中で電子や陽電子は高エネルギーの
ガンマ線を放出



ガンマ線がまた電子と陽電子のペアを作り出す

超超超高強度のレーザー光の中で電子や陽電子は高エネルギーのガンマ線を放出



ガンマ線がまた電子と陽電子のペアを作り出す

これが繰り返し起こって電子と陽電子が
次々と飛び出し、**真空が破壊**される！

と予想されている

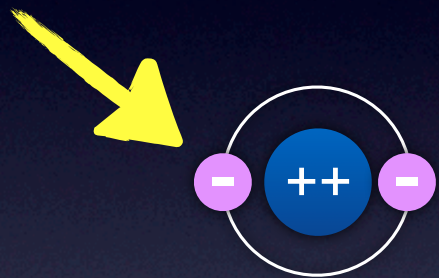
ガラスの中では

加速された電子が
他の原子に衝突

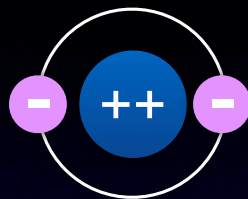
原子をイオン化

イオン化が次々に起こり、高エネルギーの電子がたくさんできる

レーザー



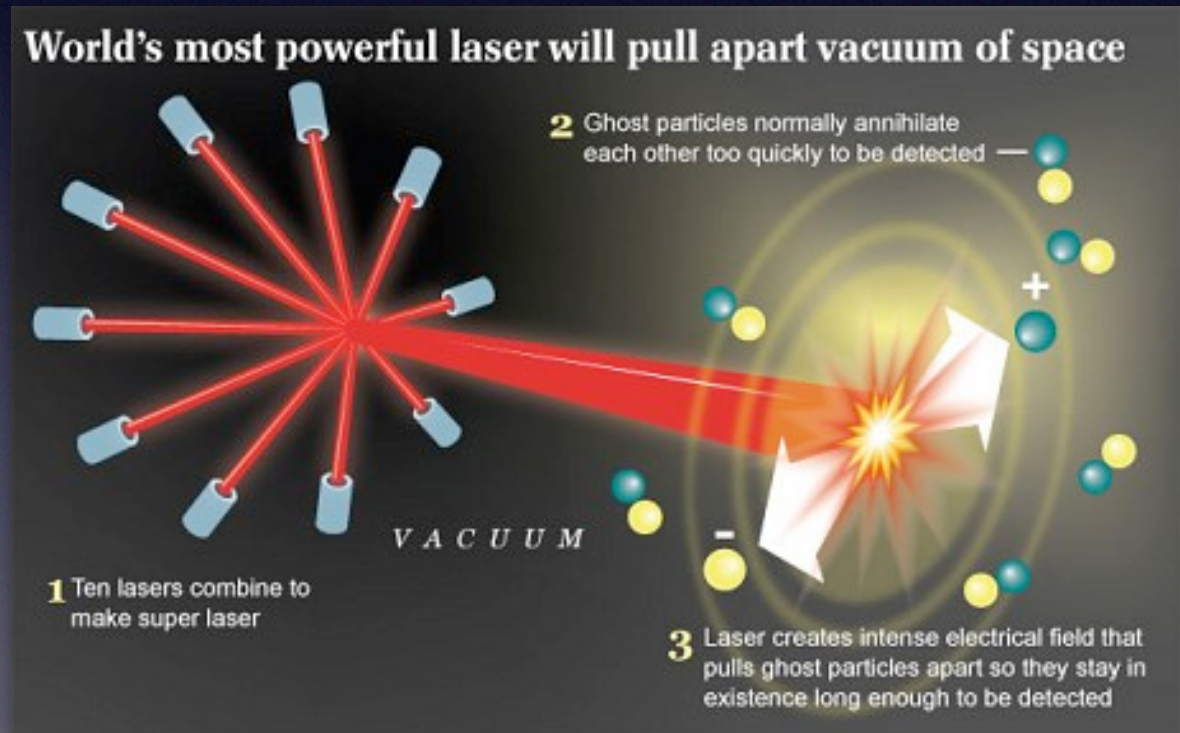
複数の光子を
一気に吸って
イオン化



$2 \times 10^{26} \text{ W/cm}^2$ 程度のレーザーをつかえば、真空がまるで物質のように破壊されると、予想されている（光の強度の物理的限界）



この予想を実験で確かめられるかも



レーザーを使って極限状態
の物質と真空を研究する時
代が始まるうとしている