

■本資料のご利用にあたって(詳細は「利用条件」をご覧ください)

本資料には、著作権の制限に応じて次のようなマークを付しています。
本資料をご利用する際には、その定めるところに従ってください。

***** : 著作権が第三者に帰属する著作物であり、利用にあたっては、この第三者より直接承諾を得る必要があります。

CC : 著作権が第三者に帰属する第三者の著作物であるが、クリエイティブ・コモンズのライセンスのもとで利用できます。

 : パブリックドメインであり、著作権の制限なく利用できます。

なし : 上記のマークが付されていない場合は、著作権が東京大学及び東京大学の教員等に帰属します。
無償で、非営利的かつ教育的な目的に限って、次の形で利用することを許諾します。

- I 複製及び複製物の頒布、譲渡、貸与
- II 上映
- III インターネット配信等の公衆送信
- IV 翻訳、編集、その他の変更
- V 本資料をもとに作成された二次的著作物についての I からIV

ご利用にあたっては、次のどちらかのクレジットを明記してください。

東京大学 Todai OCW 学術俯瞰講義
Copyright 2012, 石川顕一

The University of Tokyo / Todai OCW The Global Focus on Knowledge Lecture Series
Copyright 2012, Kenichi Ishikawa

より速く、より強く

高エネルギーへの挑戦－高強度レーザー



DAMIAN JEMISON / LLNL

光量子科学研究センター
石川顕一

* Lawrence Livermore National Laboratory
<https://www.llnl.gov/news/newsreleases/2012/Jul/NR-12-07-01.html>

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

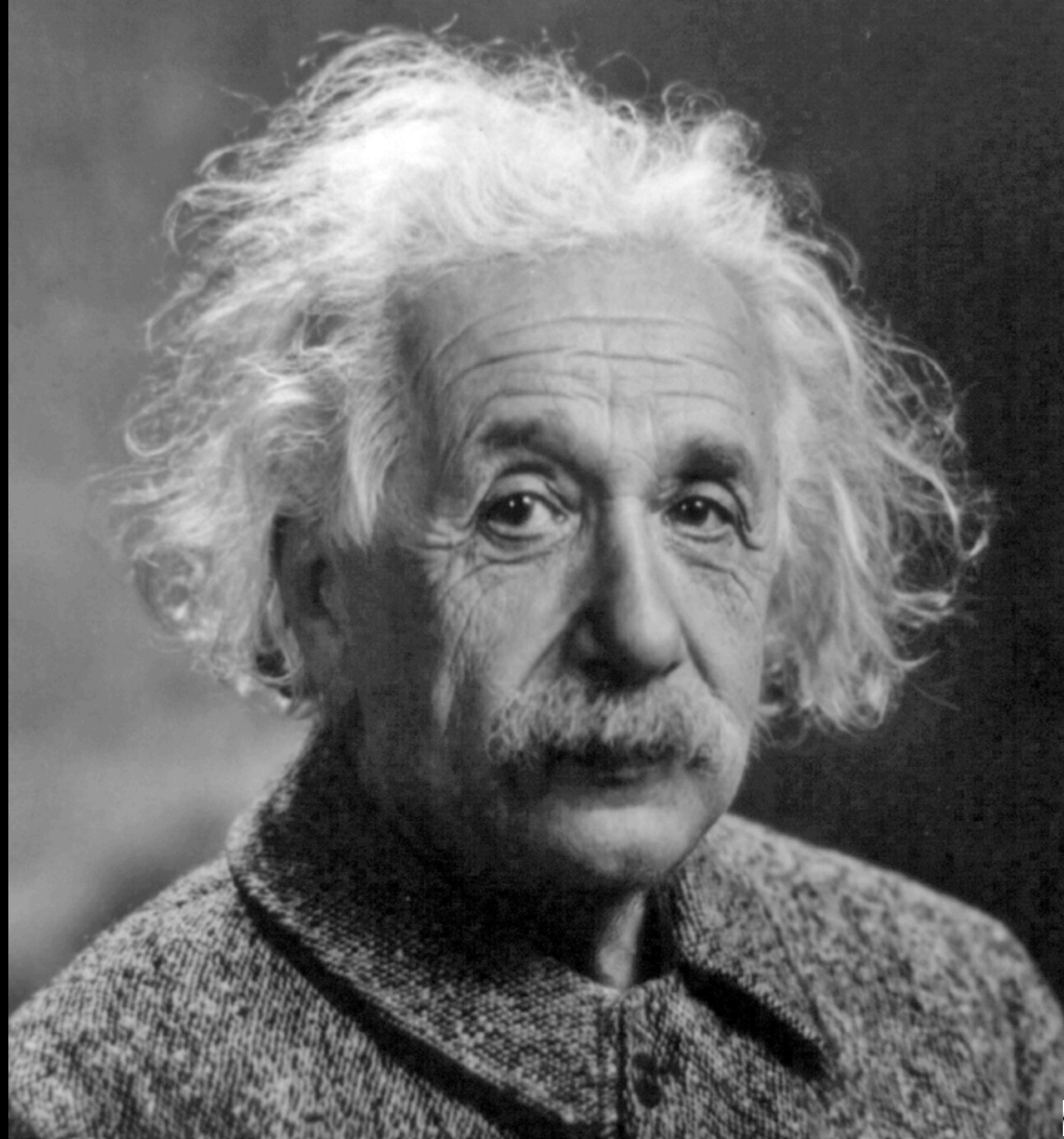
3.8×10^{26} ジュール

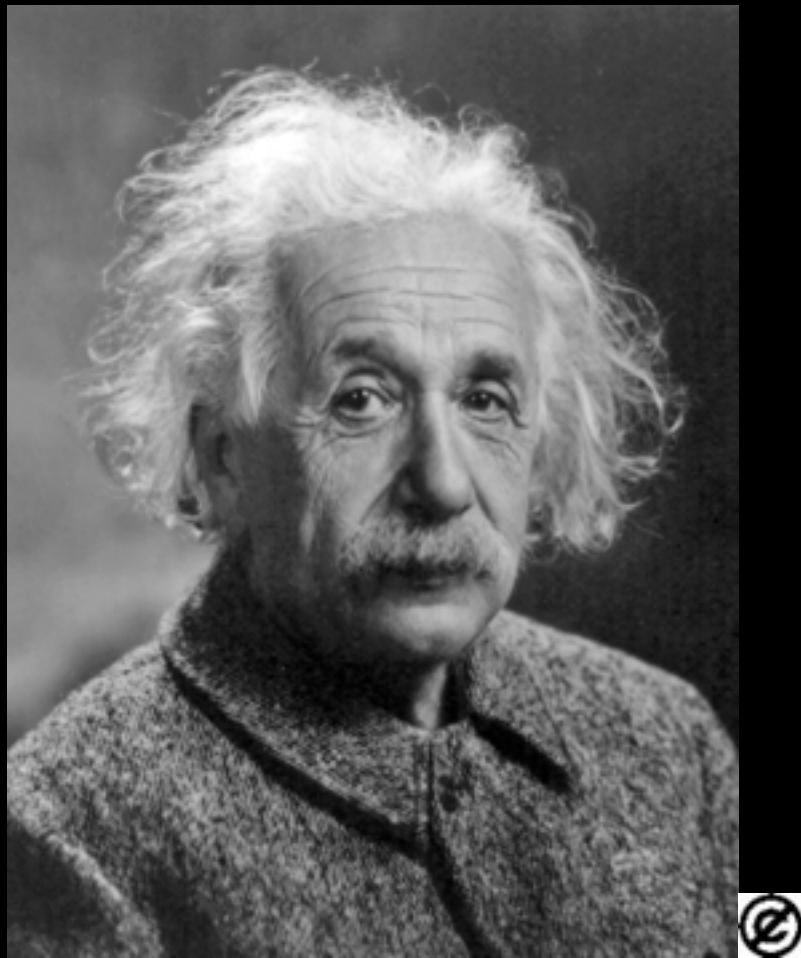
> 人類がこれまでに生み出した全エネルギー

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（第1回）

誘導放出（第1回）

ボーズ・アインシュタイン
凝縮（第3回）

重力による時間の遅れ ← 一般相対性理論（第6回）

量子暗号・量子情報につながるパラドックス
（第10または11回？）

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）

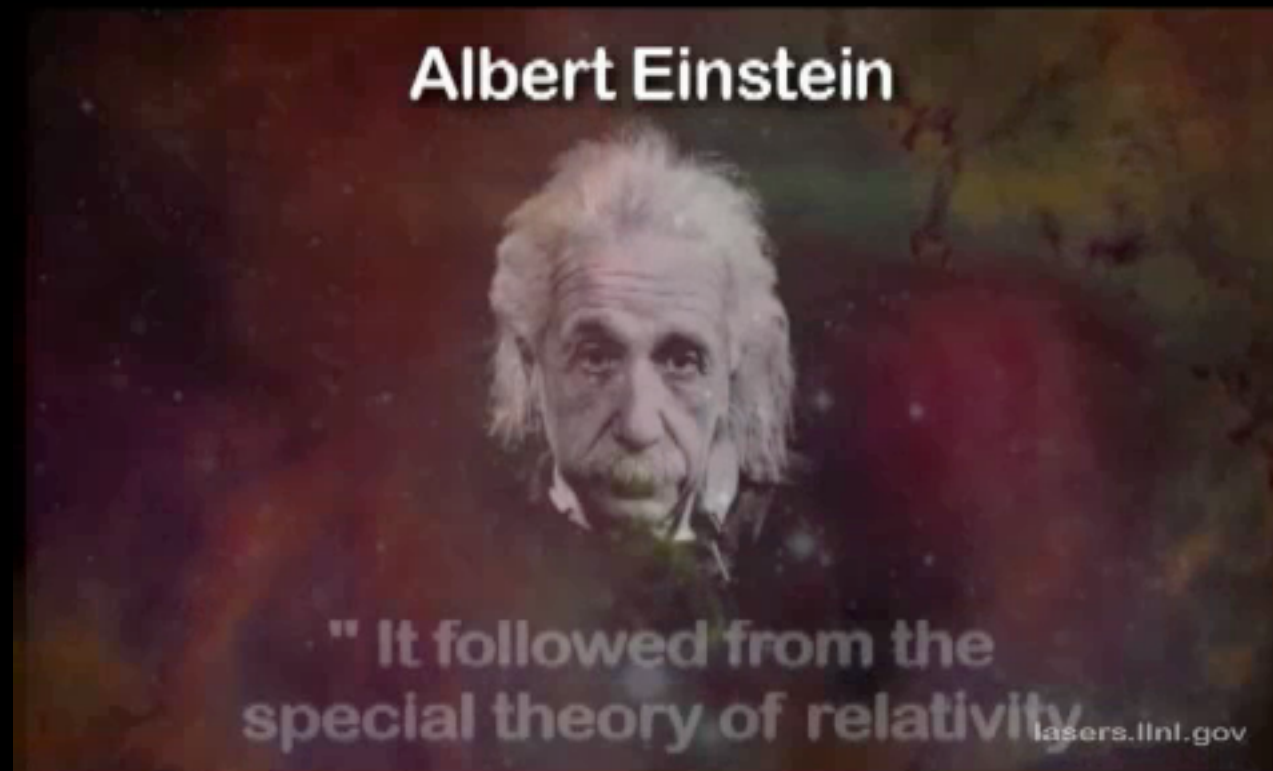
世界一有名な方程式

エネルギー

質量

$$E = mc^2$$

光速 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$



- * Lawrence Livermore National Laboratory
https://lasers.llnl.gov/multimedia/video_gallery/
"From the Sun to a Sun"

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

$$E = mc^2$$

光速度 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

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

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

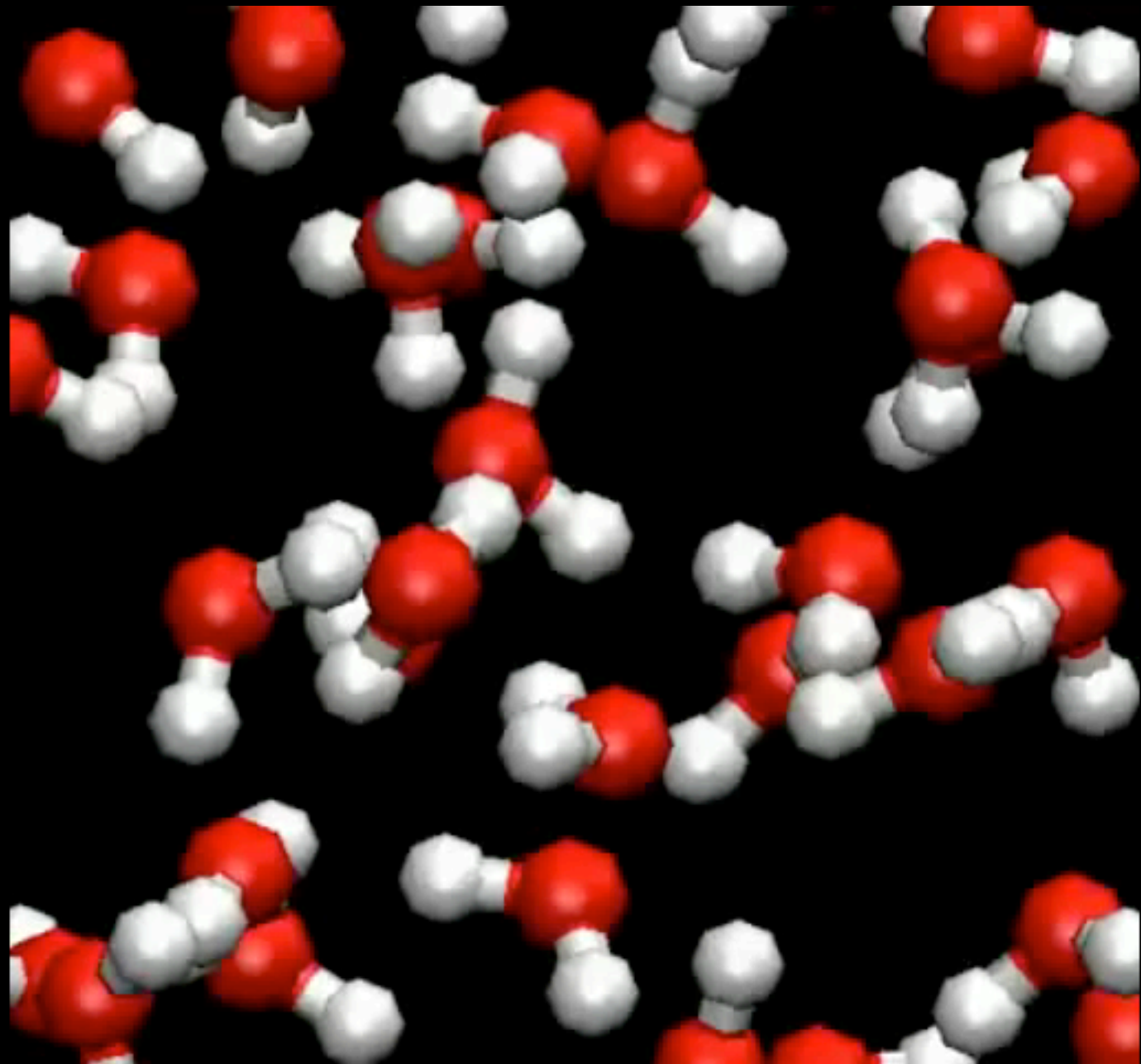
東京都の消費電力量の四ヶ月分以上

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

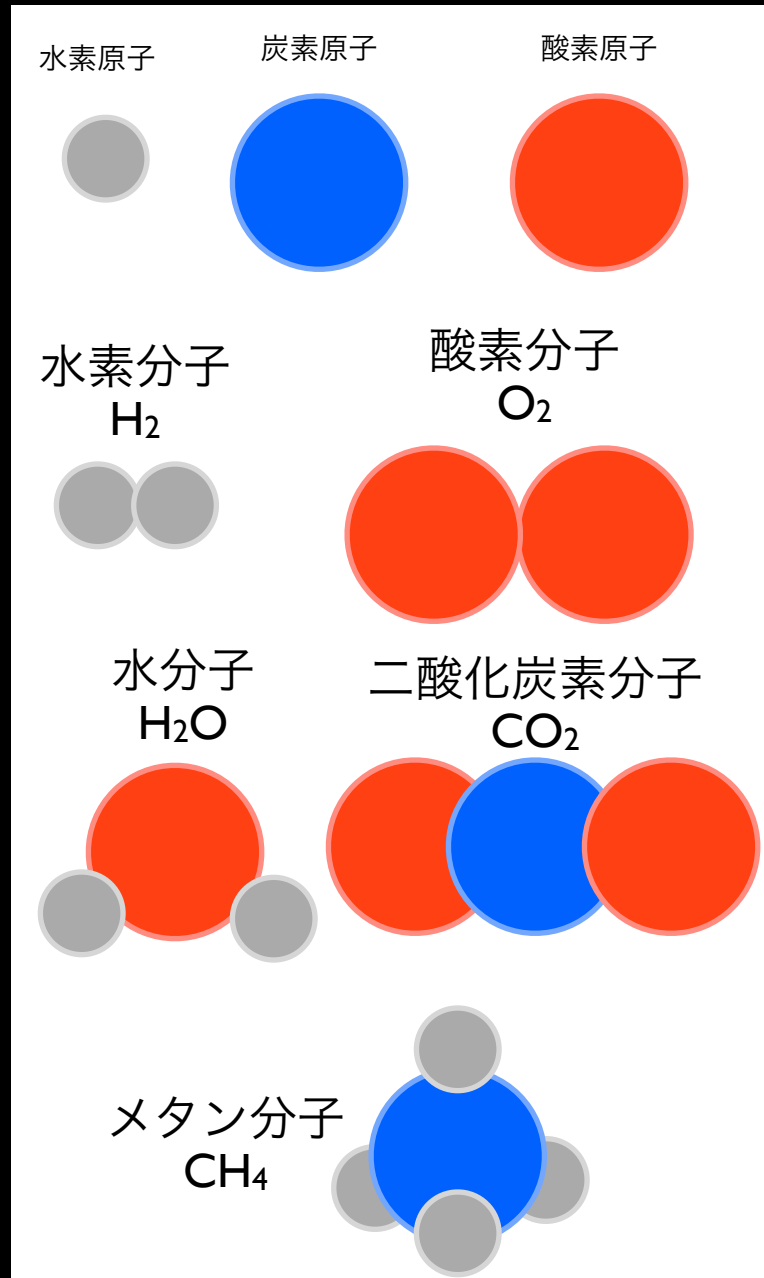


[http://commons.wikimedia.org/wiki/
File:Blue_Linckia_Starfish.JPG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blue_Linckia_Starfish.JPG)
Copyright (c) 2004 Richard Ling
CC BY-SA 3.0

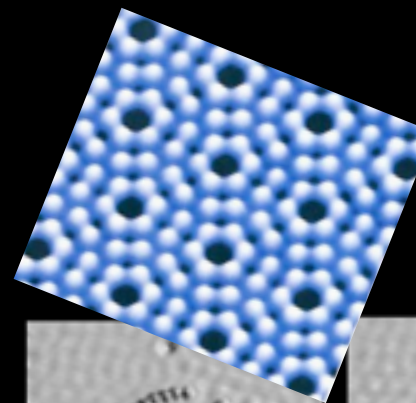


*

分子は原子からできている

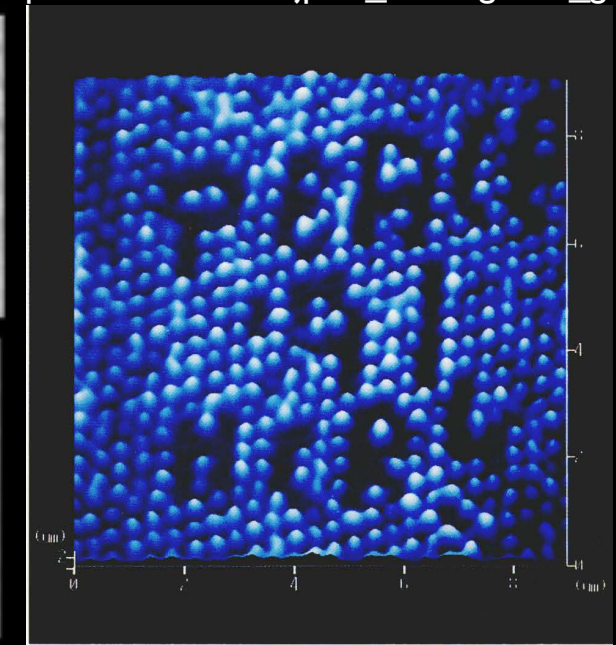
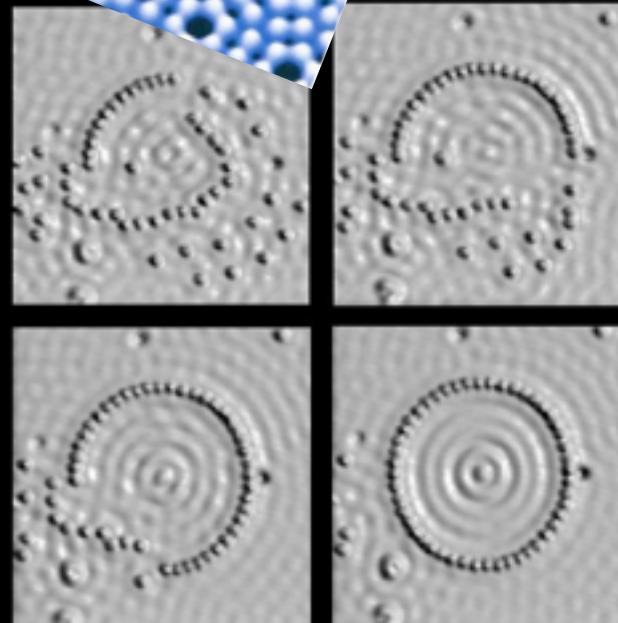


原子は本当にある
原子は見える



* 東北大学一杉太郎研究室、STMギャラリー

http://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/~t_hitosugi/stm_gallery.html



*

「走査トンネル顕微鏡を用いた原子操作技術」
『日立評論』1992年1月号、p.113 図3

* image©Crommie, Lutz & Eigler IBM

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）

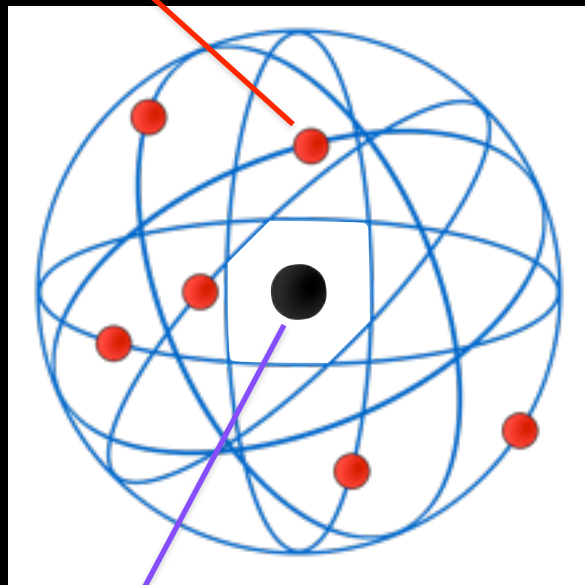
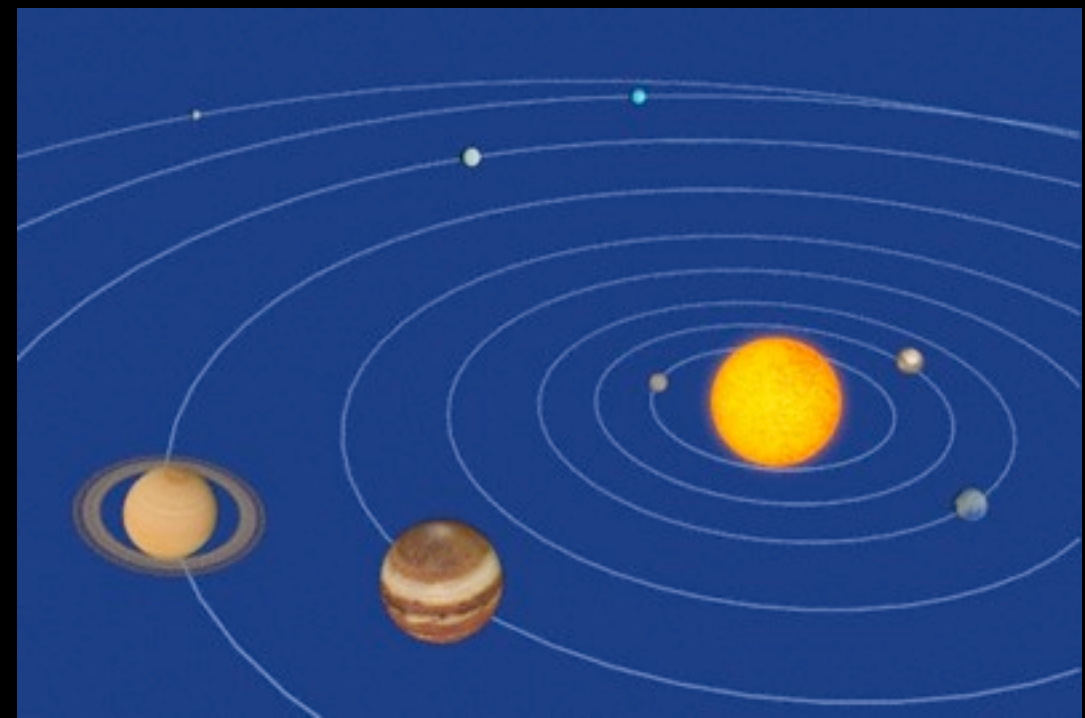


Image by Colin M.L. Burnett.
Wikipediaより転載
[http://commons.wikimedia.org/
wiki/File:Rutherford_atom.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rutherford_atom.svg)
CC BY-SA 3.0

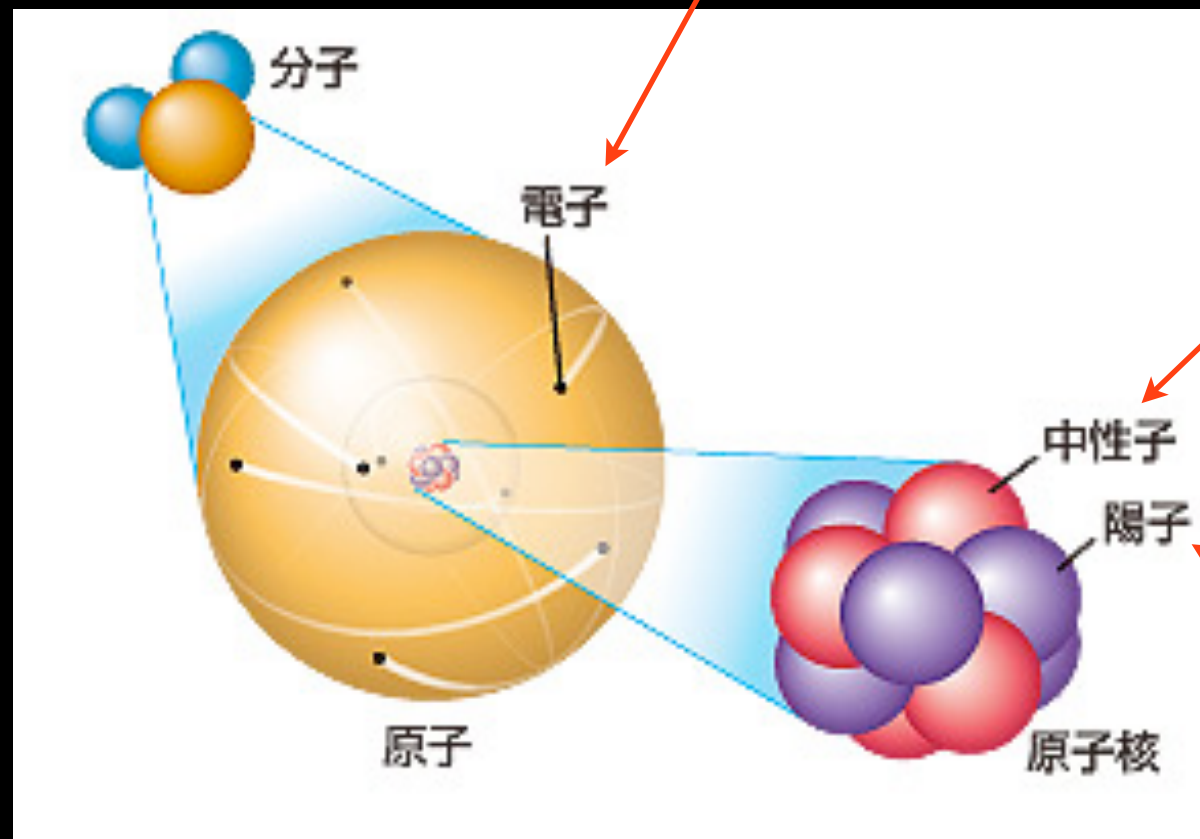
原子核（プラスの電荷）



* 出典：IPA「教育用画像素材集サイト」
<http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>

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

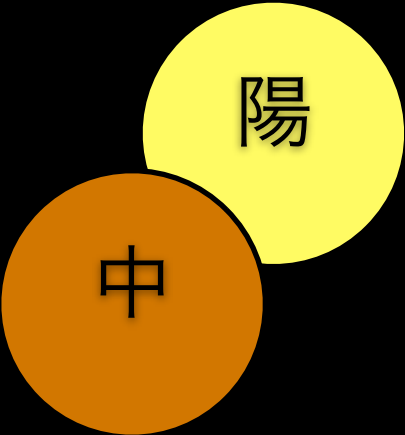
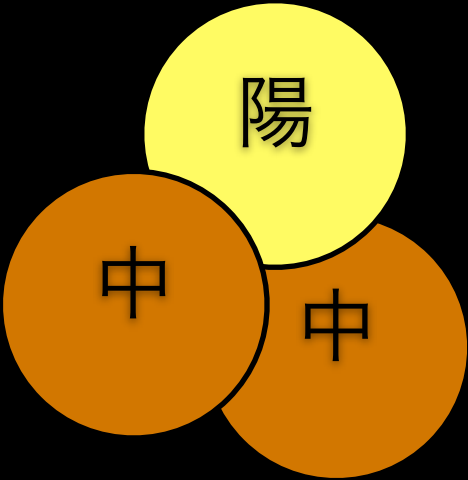
質量 1.673×10^{-27} kg

* 提供：理化学研究所

『理研ニュース』2009年10月号、p.12 図1「原子核」

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

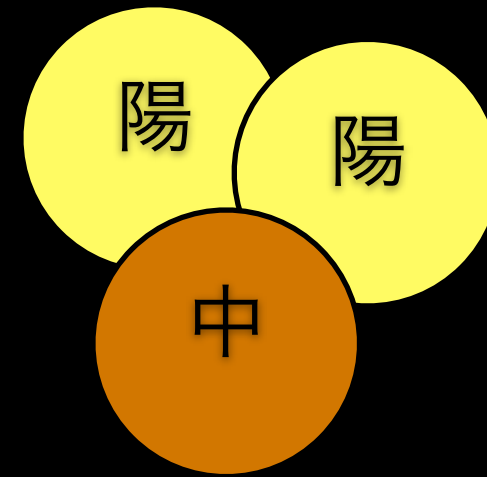
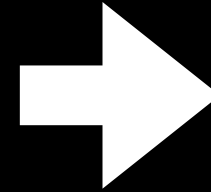
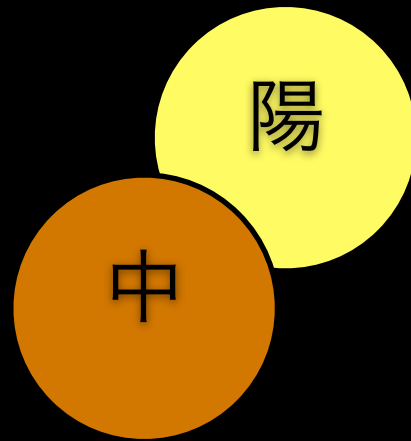
軽水素

重水素

ヘリウム3



+



+ 光子

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

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

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

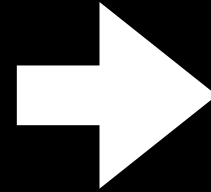
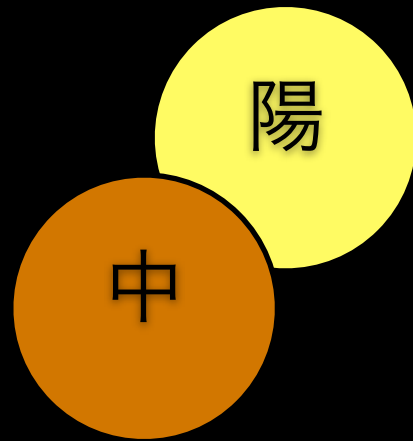
軽い元素が合体してエネルギーを放出

軽水素

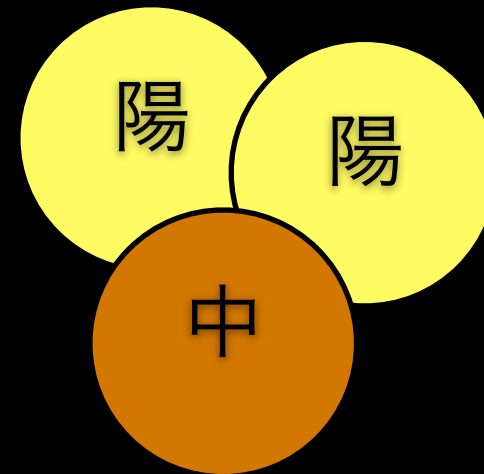


+

重水素

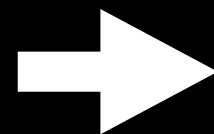


ヘリウム3



+ 光子

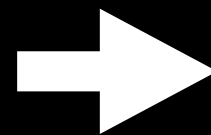
$0.00979 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 軽くなってる！



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
= 5.30×10^8 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

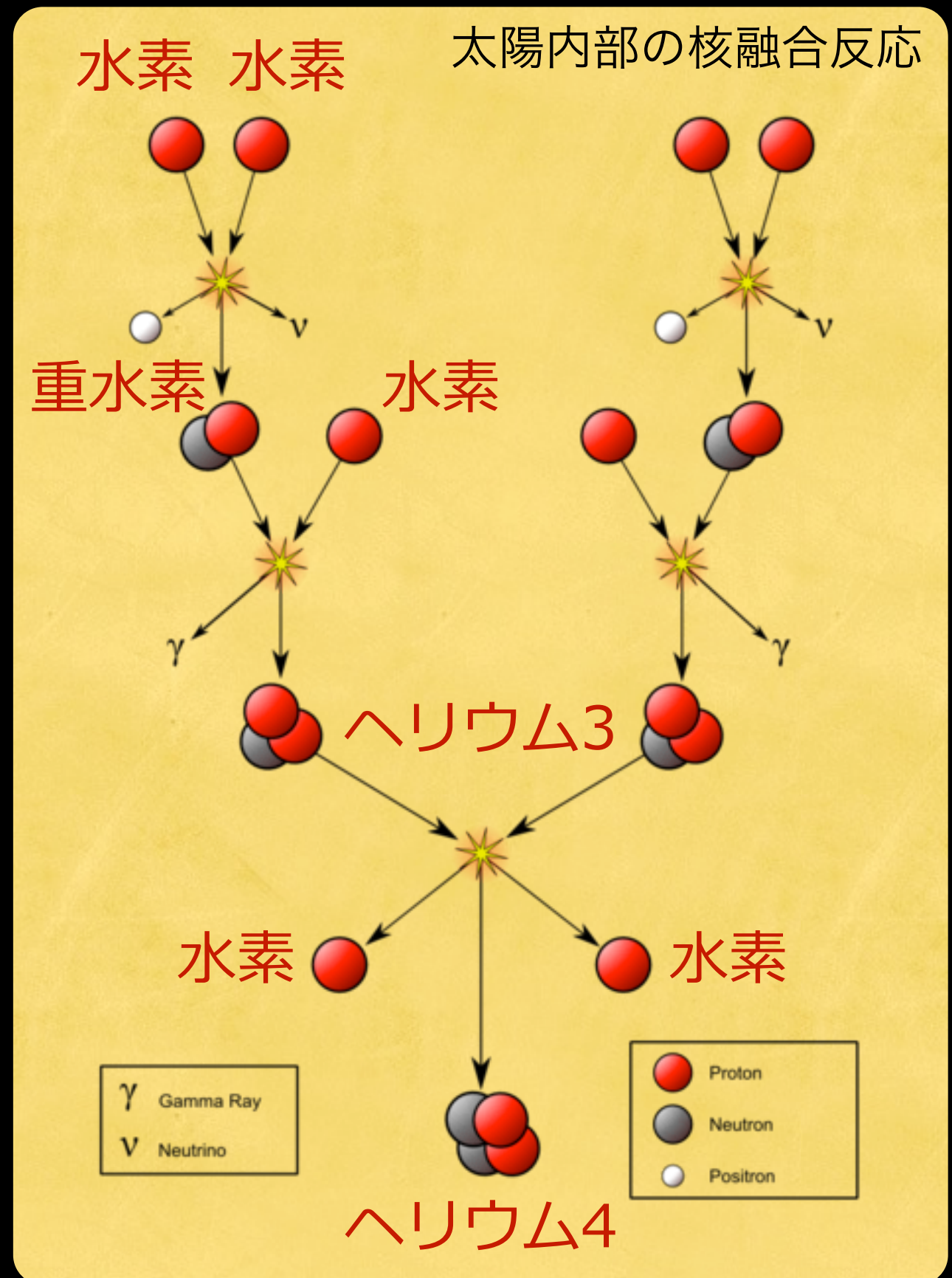
$\text{p} + \text{d} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma + 5300000000 \text{ キロジュール/モル}$

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

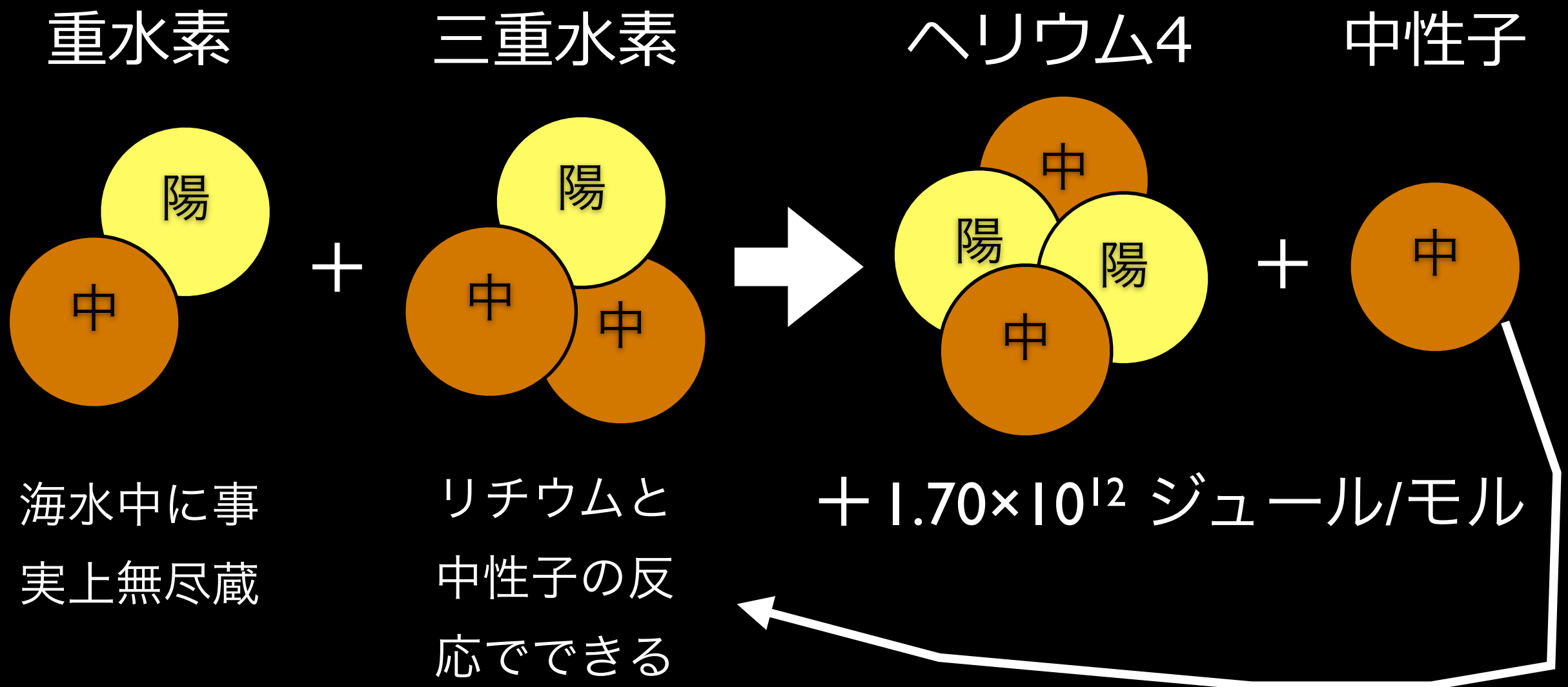
ハンス・ベーク
1967年
ノーベル物理学賞

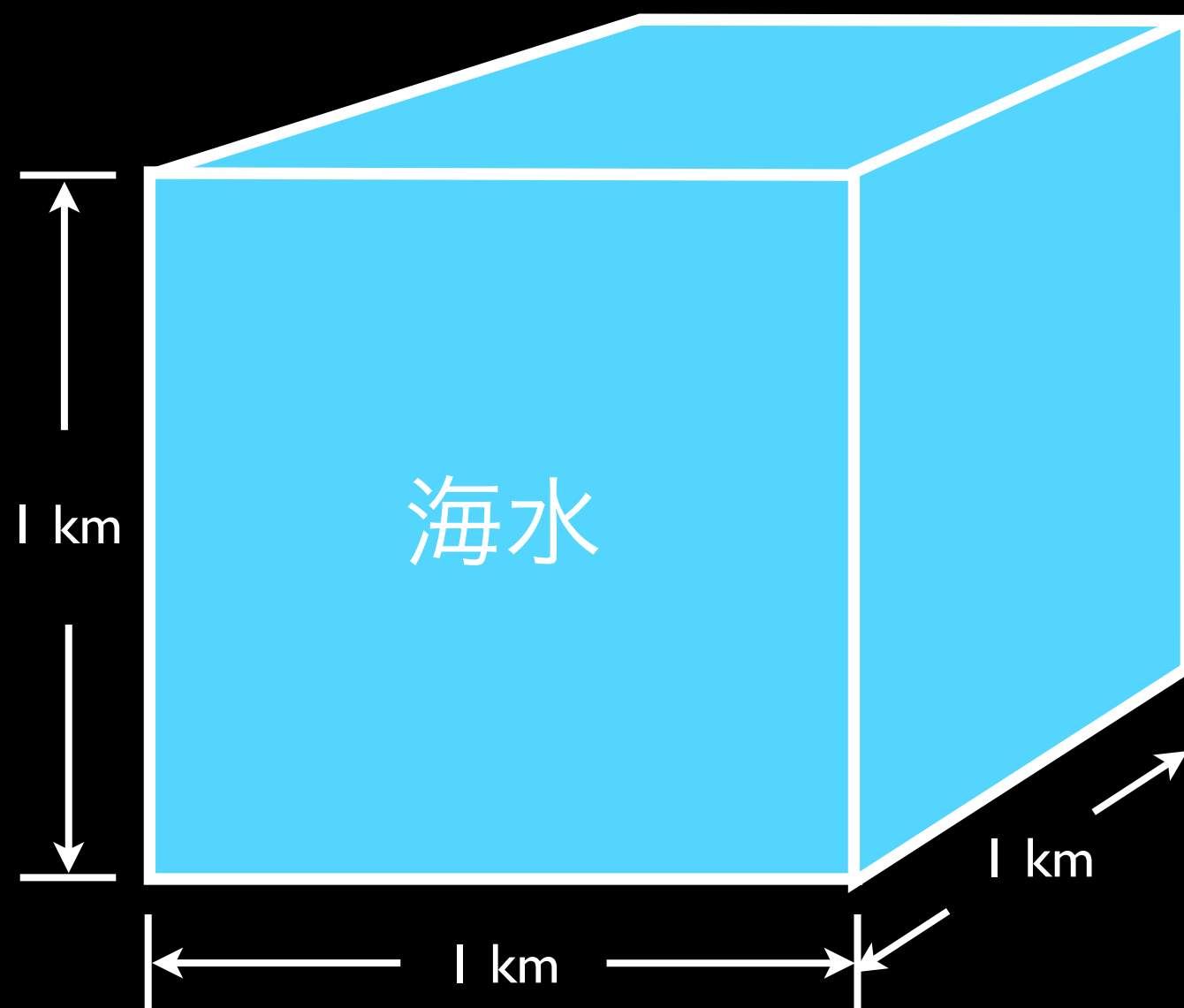
Photo by Los Alamos National Laboratory
<http://www.flickr.com/photos/losalamosnatlab/7597450934>
CC BY-NC-ND 2.0



地上に太陽を

核融合エネルギー





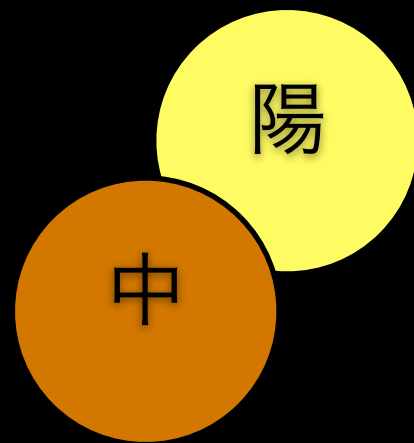
世界の石油
= 埋蔵量の全
エネルギー

核融合エネルギー

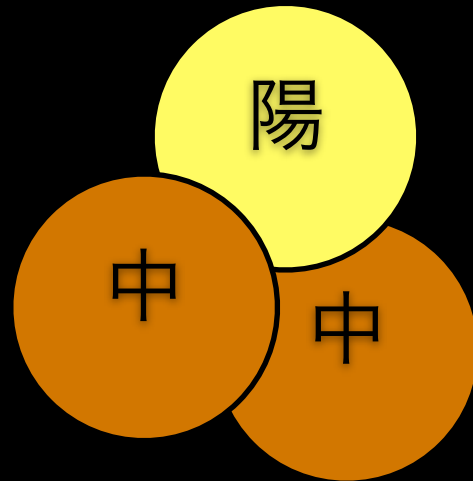
- 燃料が海水中に事実上無尽蔵にある
- CO₂発生量が少ない（原子力・水力なみ）
- 高レベル放射性廃棄物がでない

核融合が難しいのは…

重水素

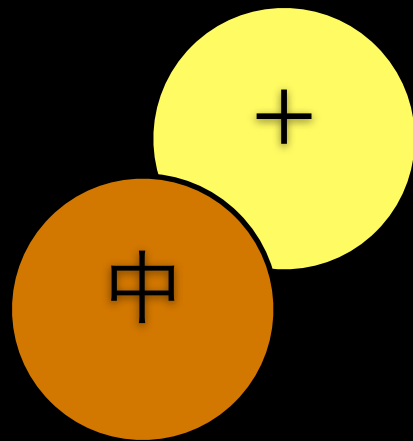


三重水素

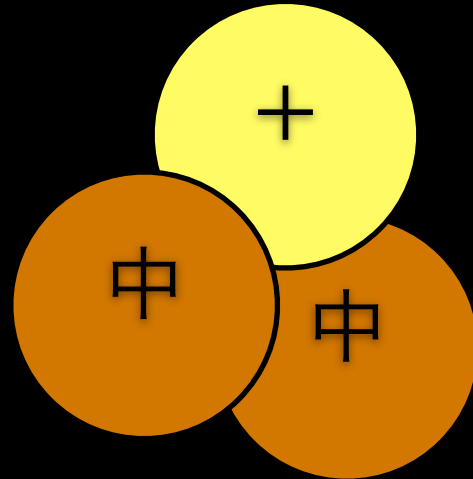


核融合が難しいのは…

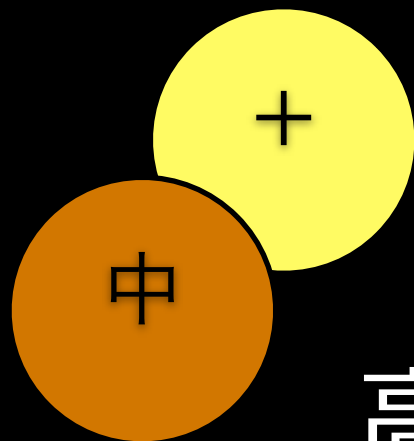
重水素



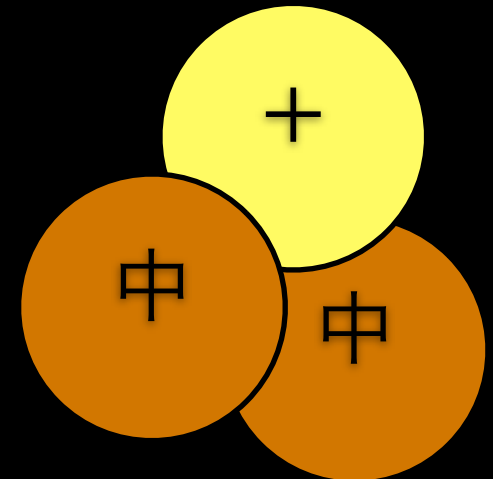
三重水素



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

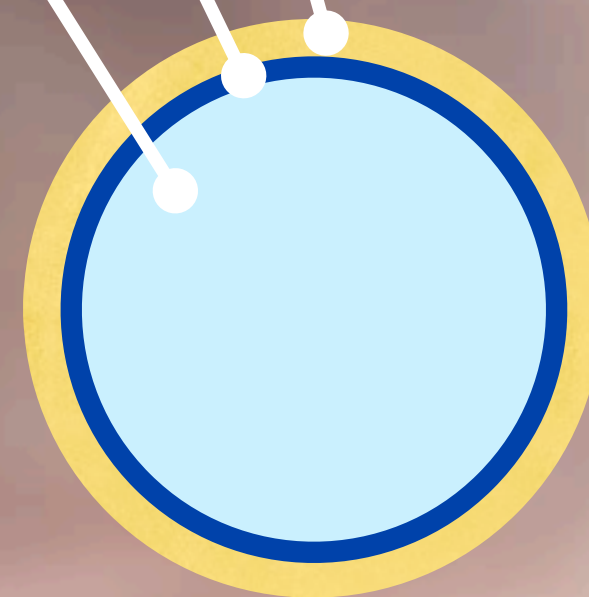
高出力高エネルギーのレーザーを使って
物質を高温高密度にし、核融合を起こす

レーザー核融合

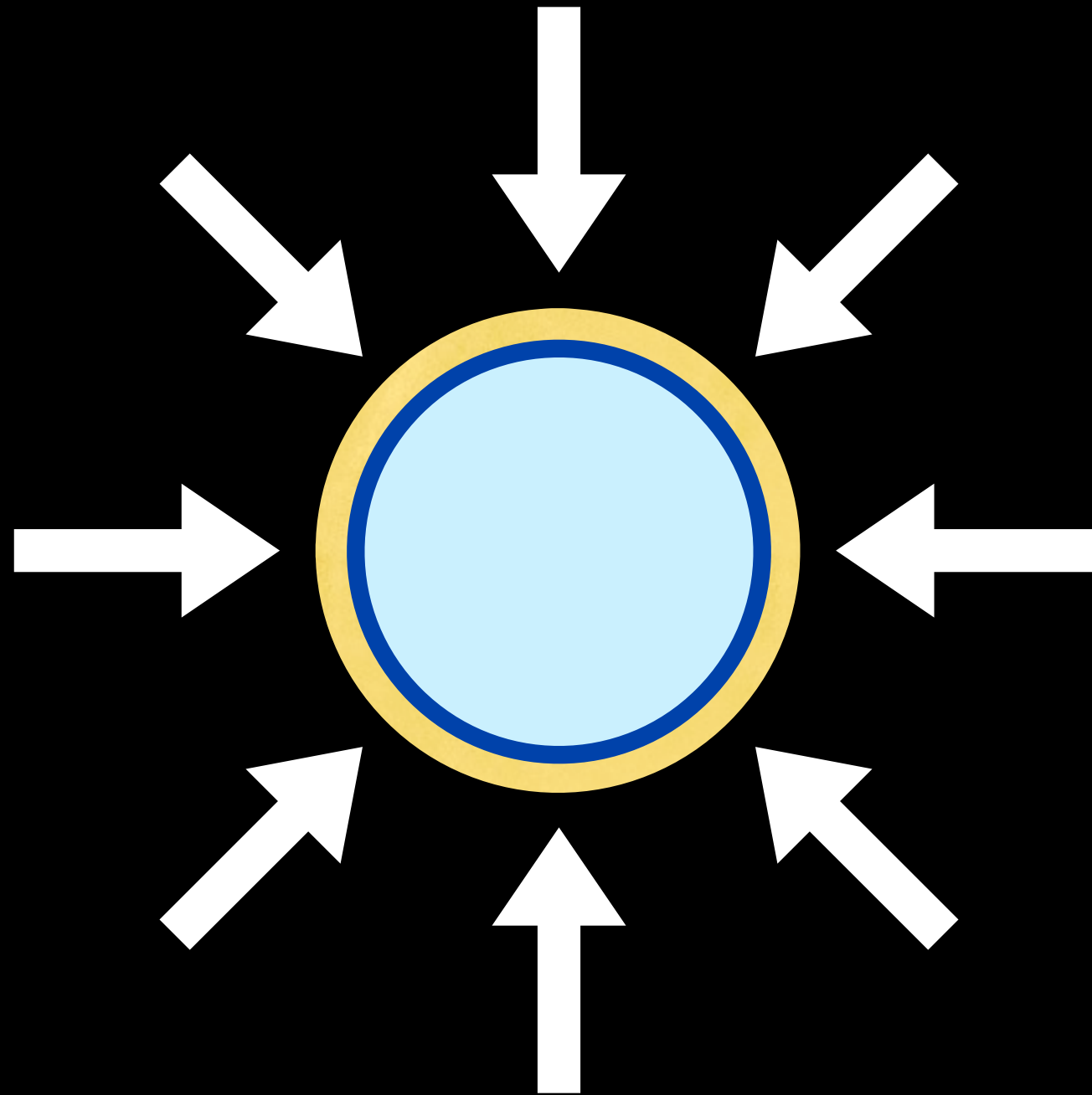
アブレーター
(ポリイミド、銅入りベリリウムなど)

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

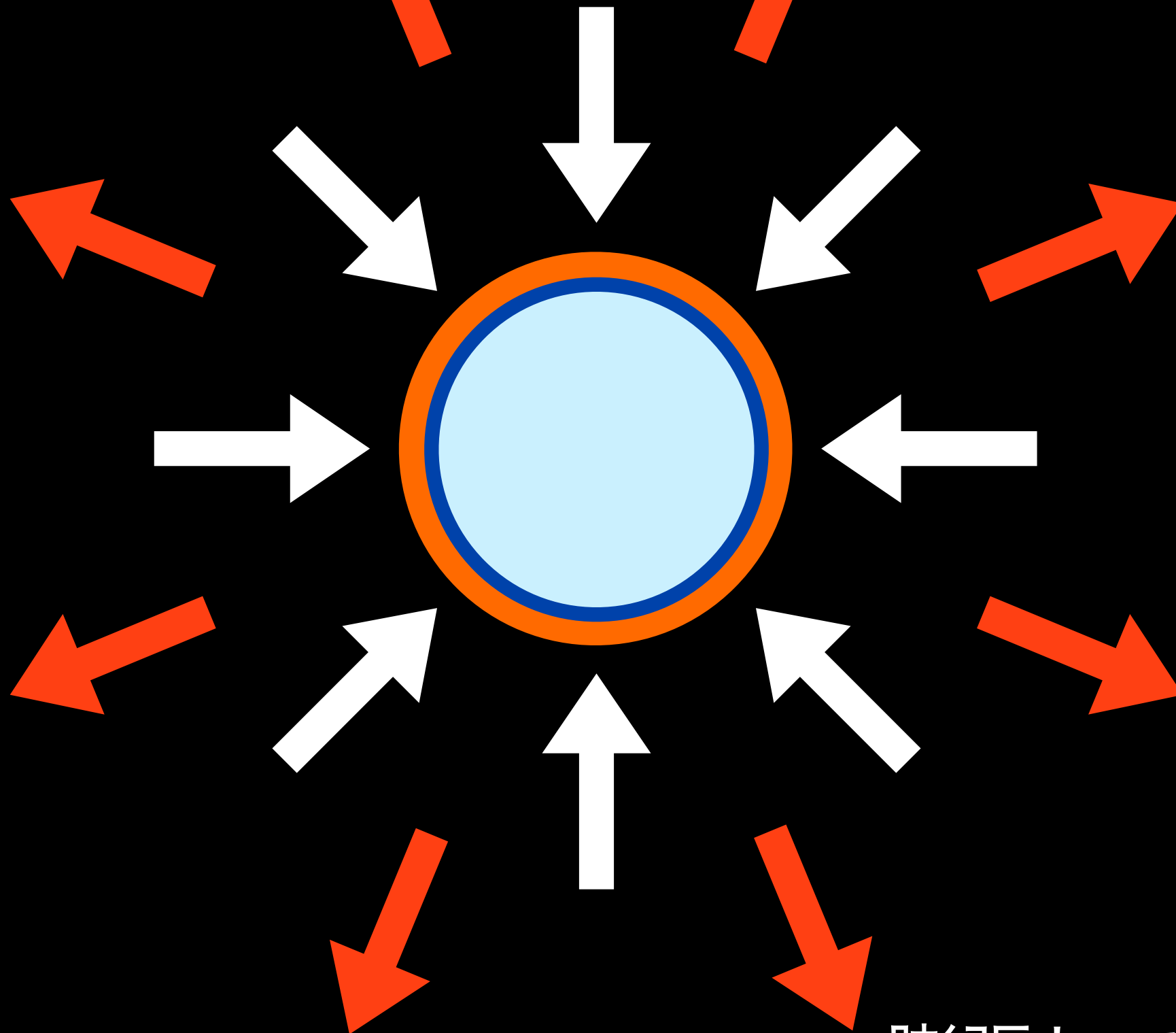


四方八方からレーザーを照射



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



* JAXA

核燃料を 1 億度、密度 1000 g/cm^3 の状態に

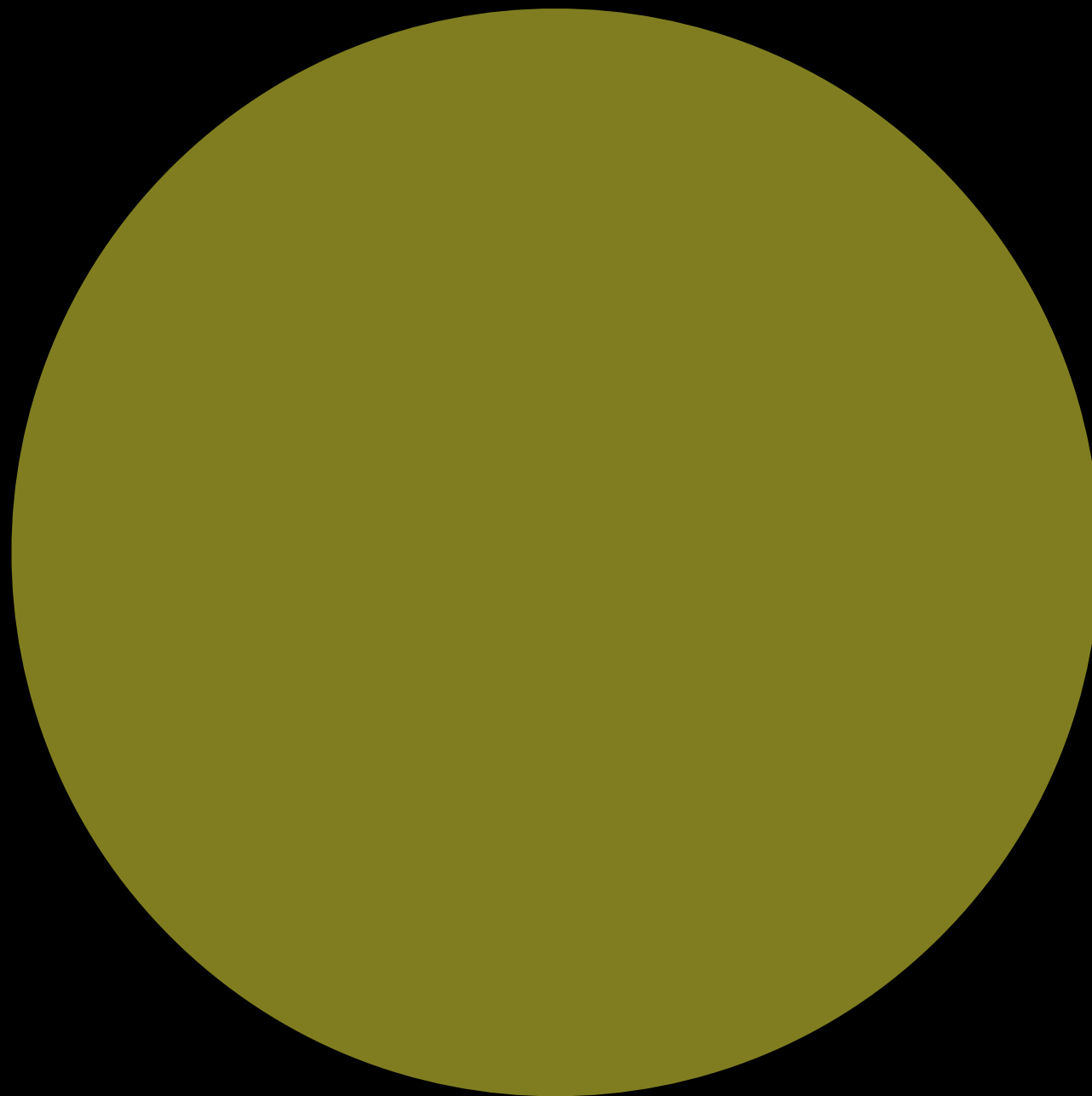
← 水の1000倍、金の50倍



17ナノ秒(0.0000000017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



*

Copyright ; 2006 GOD Group,
ILE@Osaka University. All rights reserved.

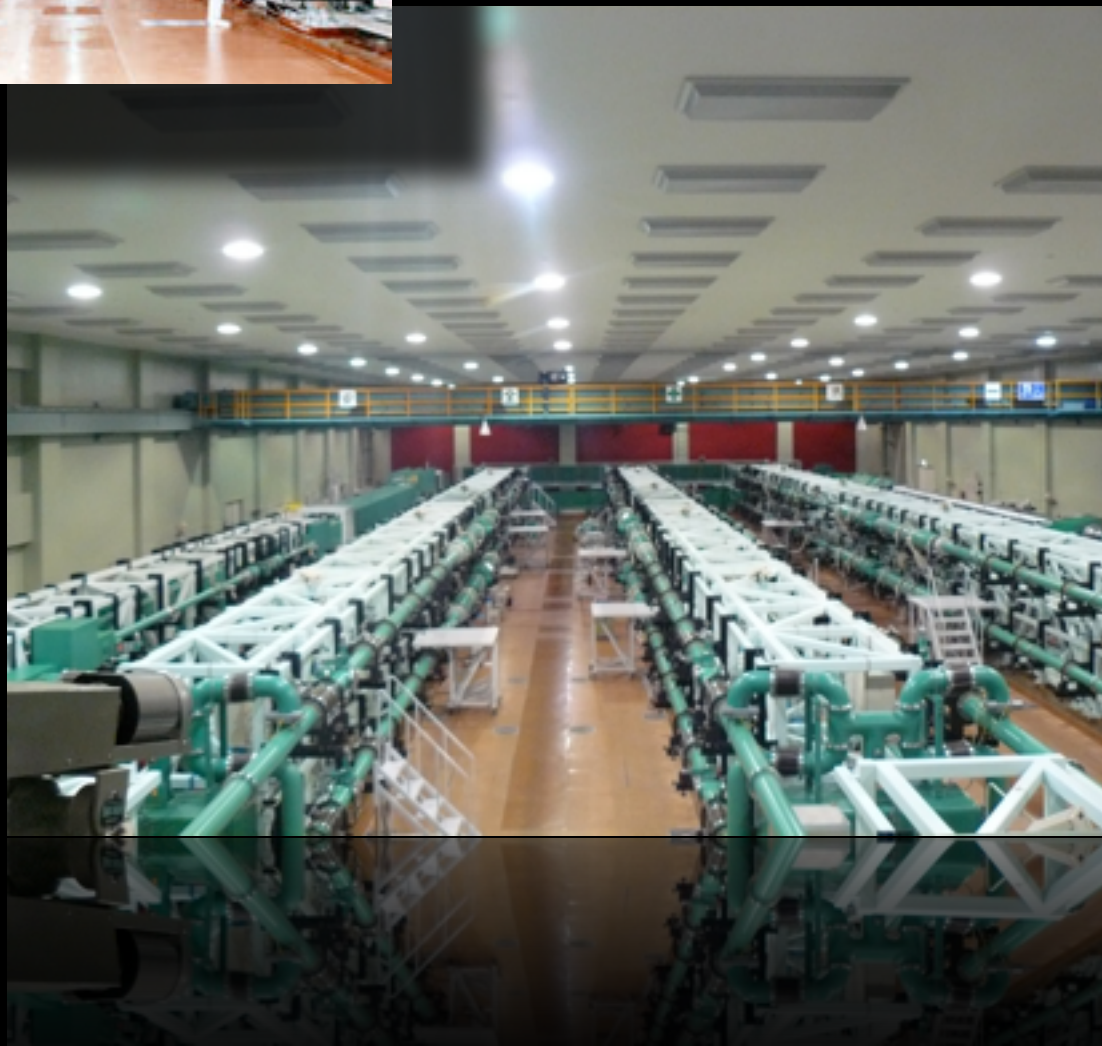


Photo by Sho Kasuga
<http://www.flickr.com/photos/skasuga/3098379967/in/set-72157611027971742>
CC BY-NC-SA 2.0

著作権の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました。

ターゲットショット時のターゲットチェン
バー内の写真

<http://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/GOD/html/gallery.html>
<http://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/GOD/image/gallery/LaserShot-1s.jpg>

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

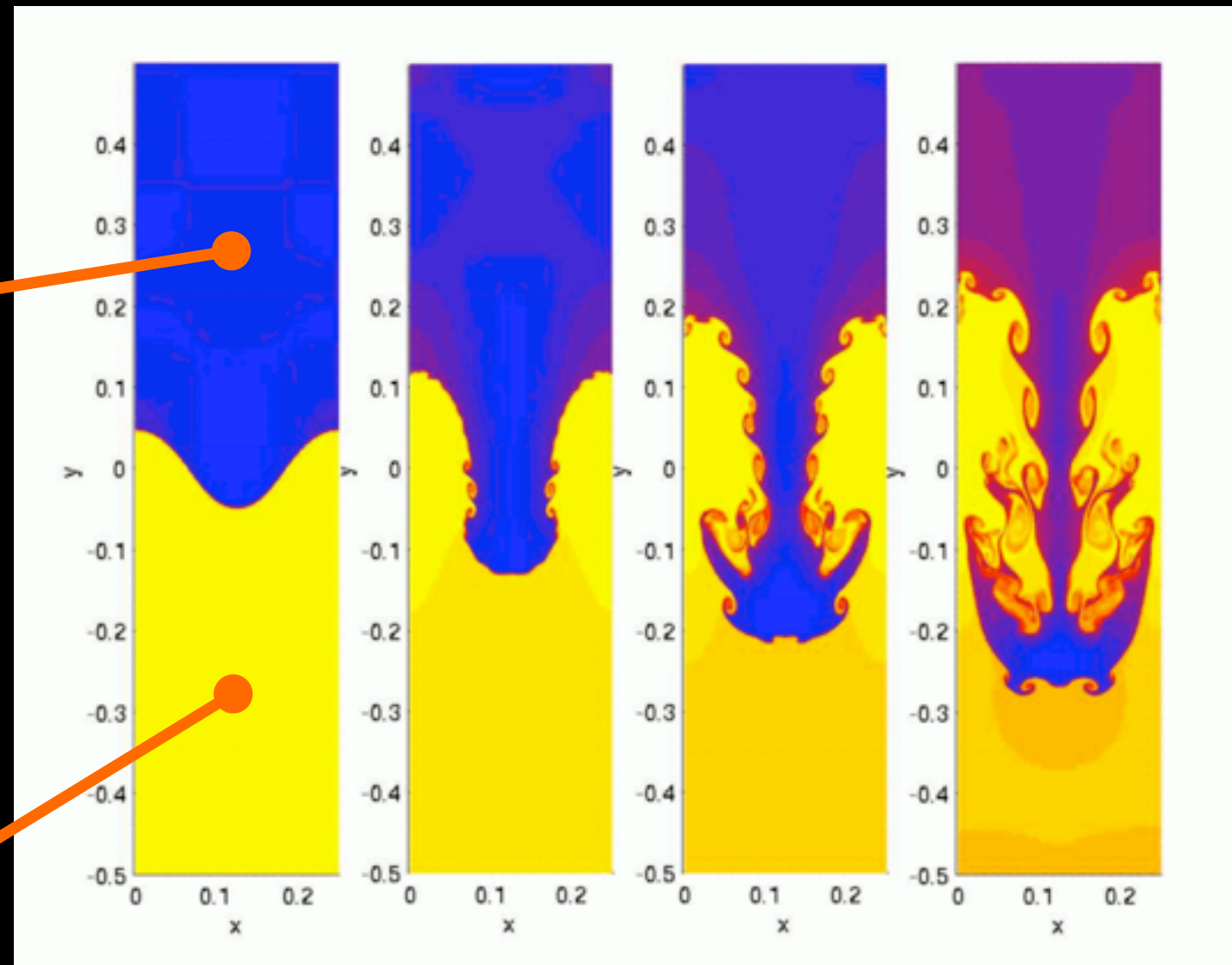
* Lawrence Livermore National Laboratory
https://lasers.llnl.gov/multimedia/photo_gallery/overview/?id=2&category=overview

* Lawrence Livermore National Laboratory
https://lasers.llnl.gov/multimedia/photo_gallery/overview/?id=4&category=overview

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)



*

Shengtai Li and Hui Li (2006) Parallel AMR Code
for Compressible MHD or HD Equations
[http://math.lanl.gov/Research/Highlights/
amrmhd.shtml](http://math.lanl.gov/Research/Highlights/amrmhd.shtml)

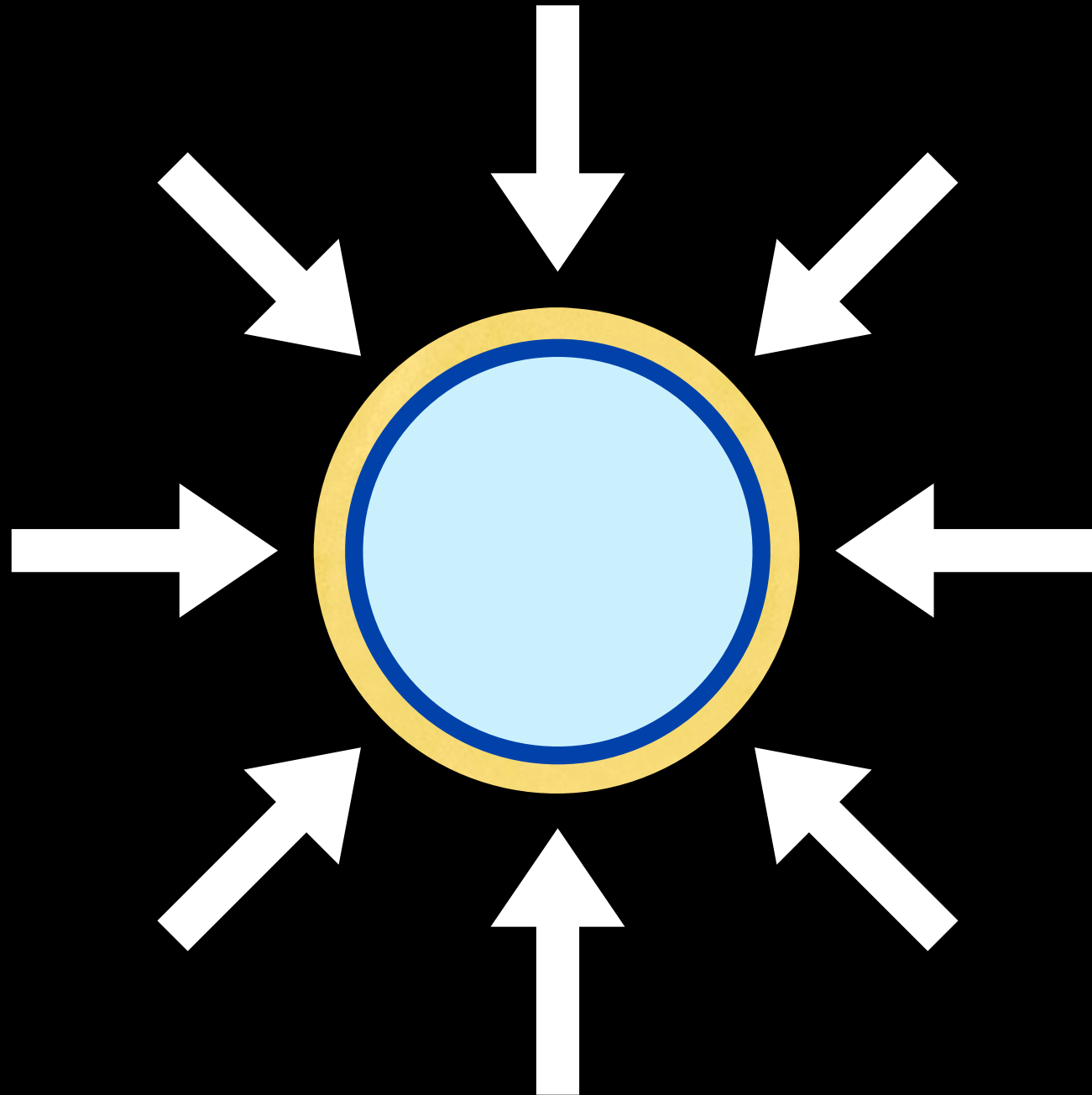
© Copyright 2006 Los Alamos National Security,
LLC, All rights reserved

Unless otherwise indicated, this
information has been authored by an
employee or employees of the Los
Alamos National Security, LLC (LANS),
operator of the Los Alamos National
Laboratory under Contract No. DE-
AC52-06NA25396 with the U.S.
Department of Energy. The U.S.
Government has rights to use,
reproduce, and distribute this
information. The public may copy and use
this information without charge, provided
that this Notice and any statement of
authorship are reproduced on all copies.
Neither the Government nor LANS
makes any warranty, express or implied,
or assumes any liability or responsibility
for the use of this information.

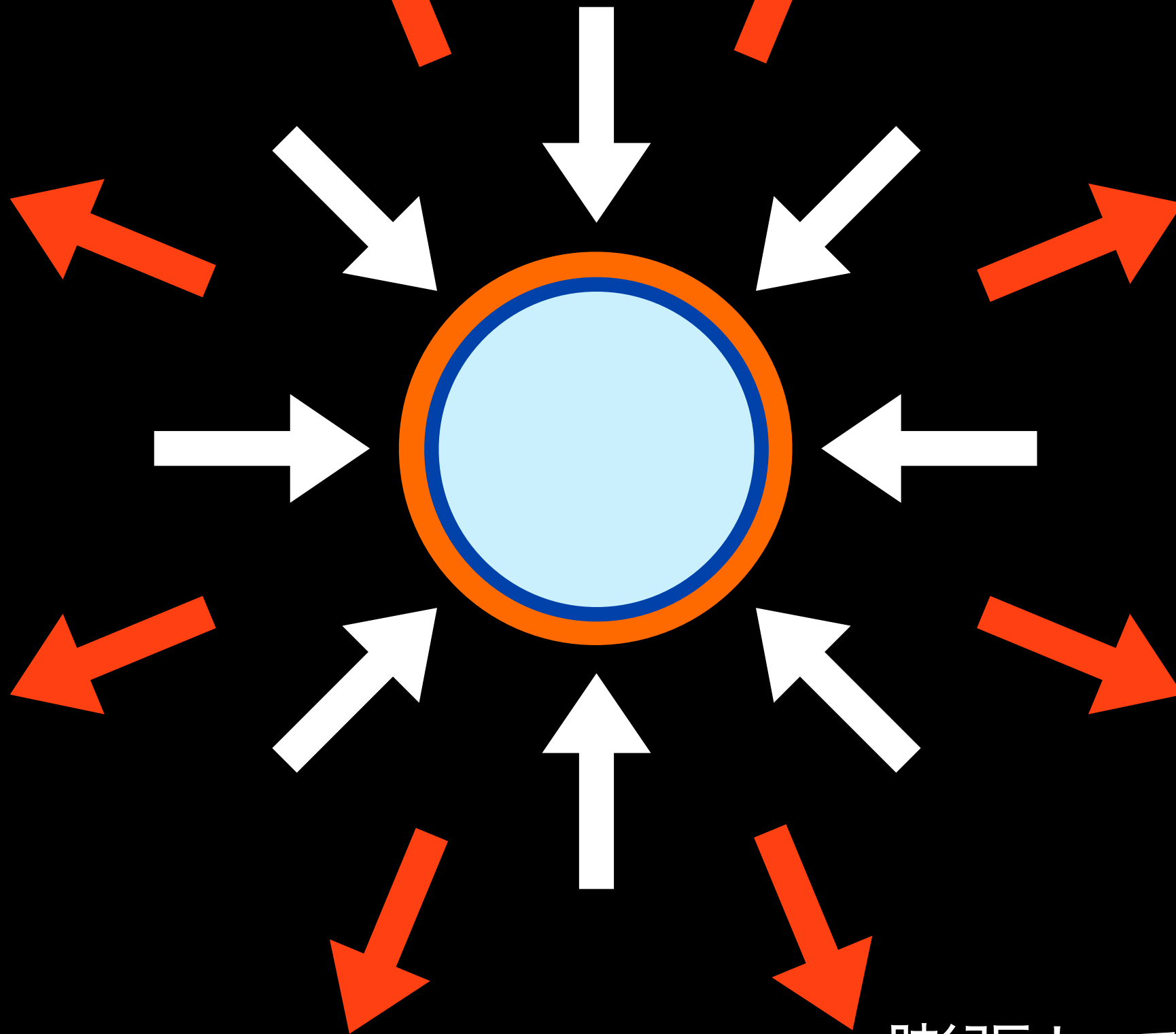
これを乗り越えるために

- 高速点火
- 間接駆動

四方八方からレーザーを照射



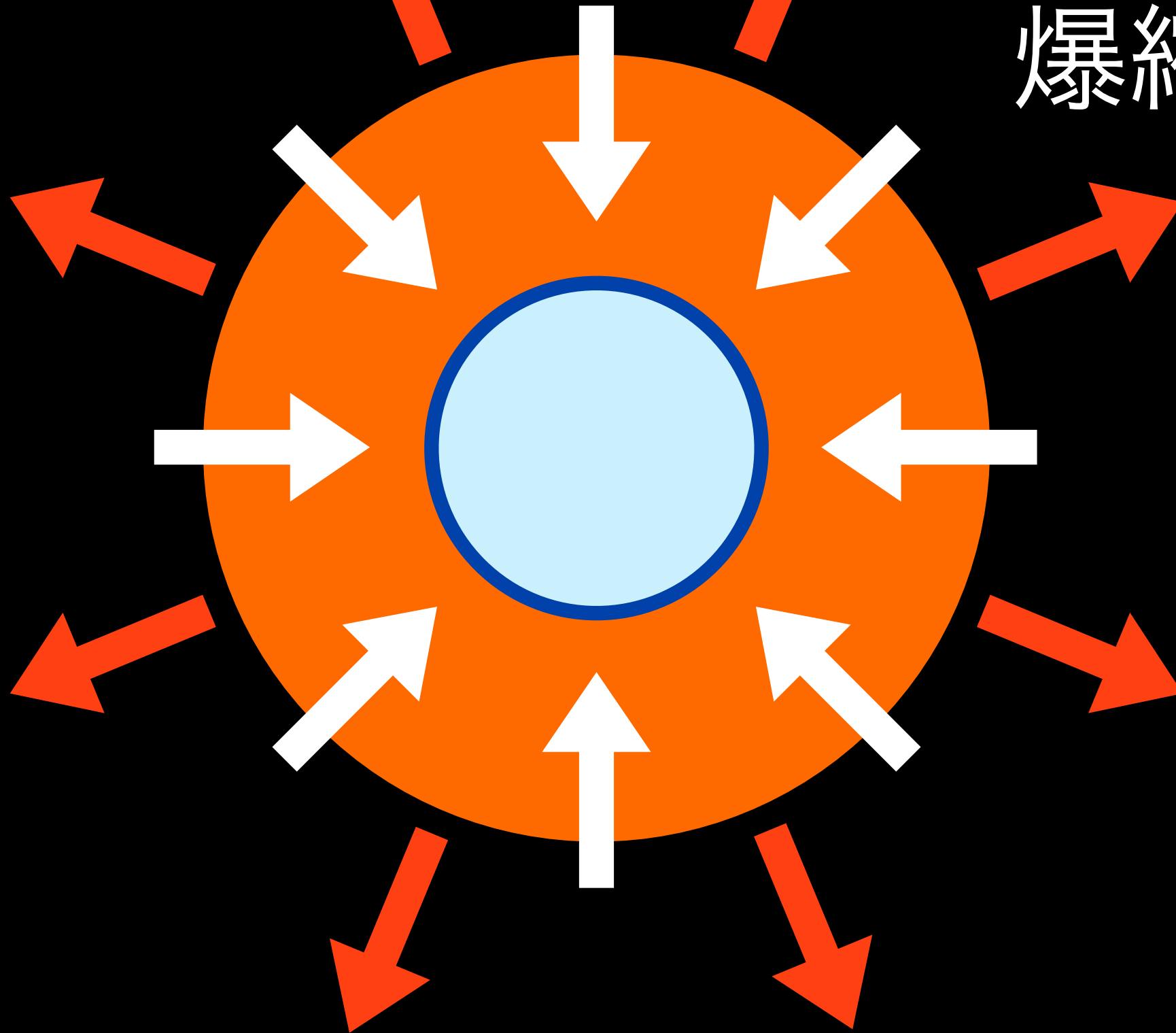
アブレーター層の温度が急速に上昇しプラズマ化

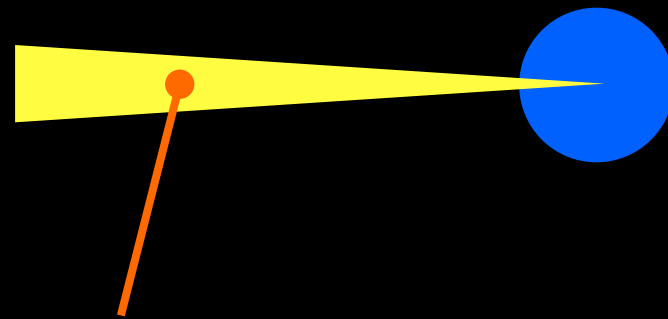


膨張してふきとぶ

ロケットと同じ原理で核燃料が圧縮される

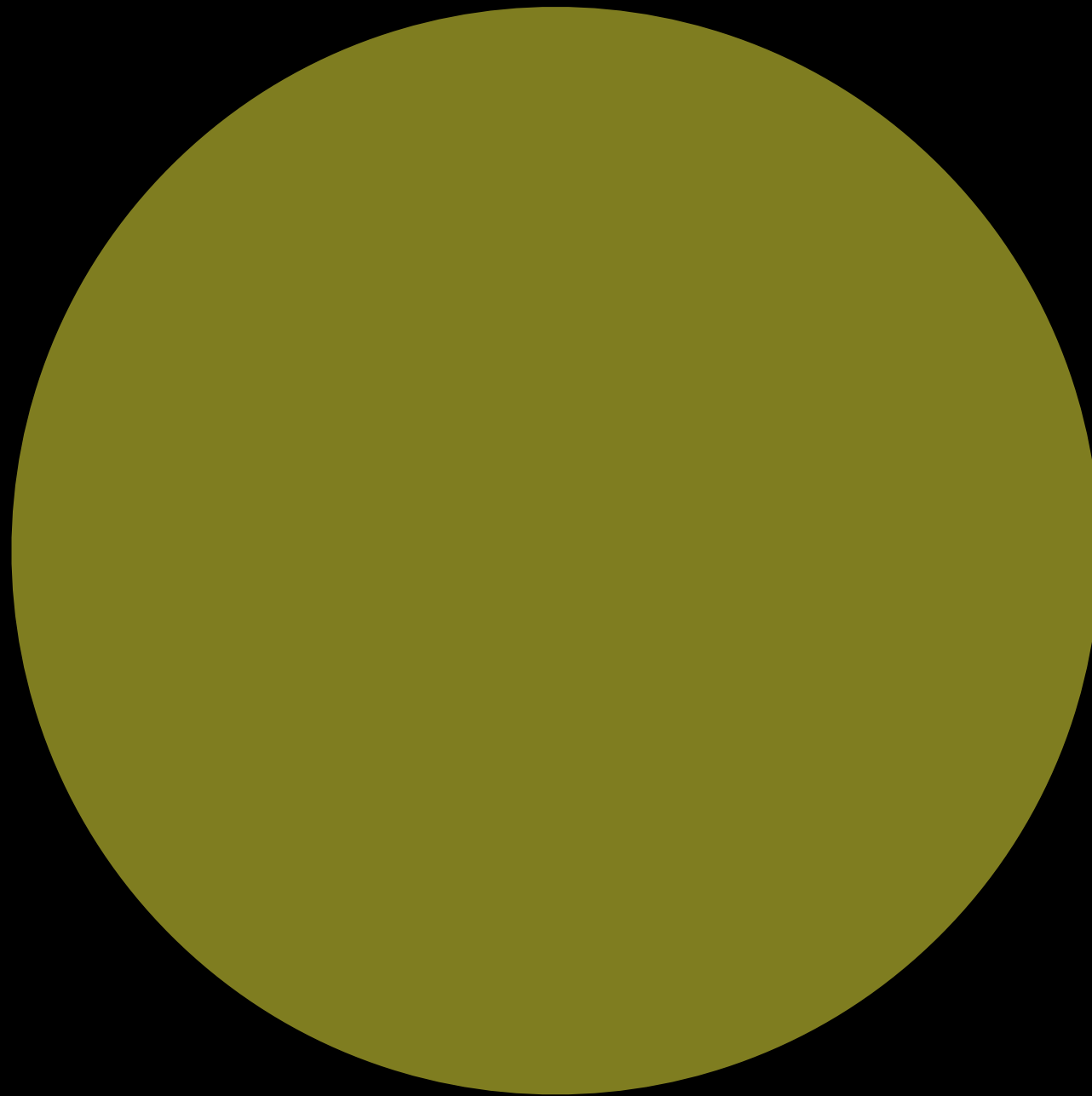
爆縮



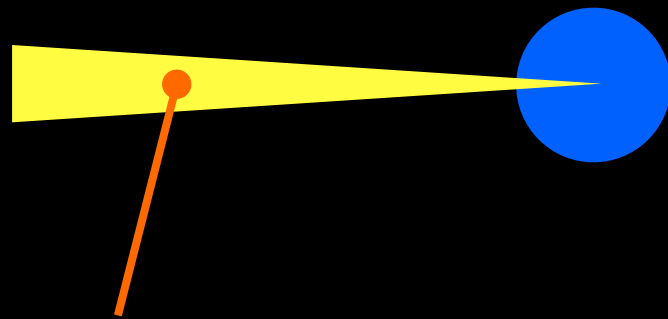


高強度のフェムト秒またはピコ秒
レーザーで点火を助ける

核融合反応が起こり、エネルギー生成



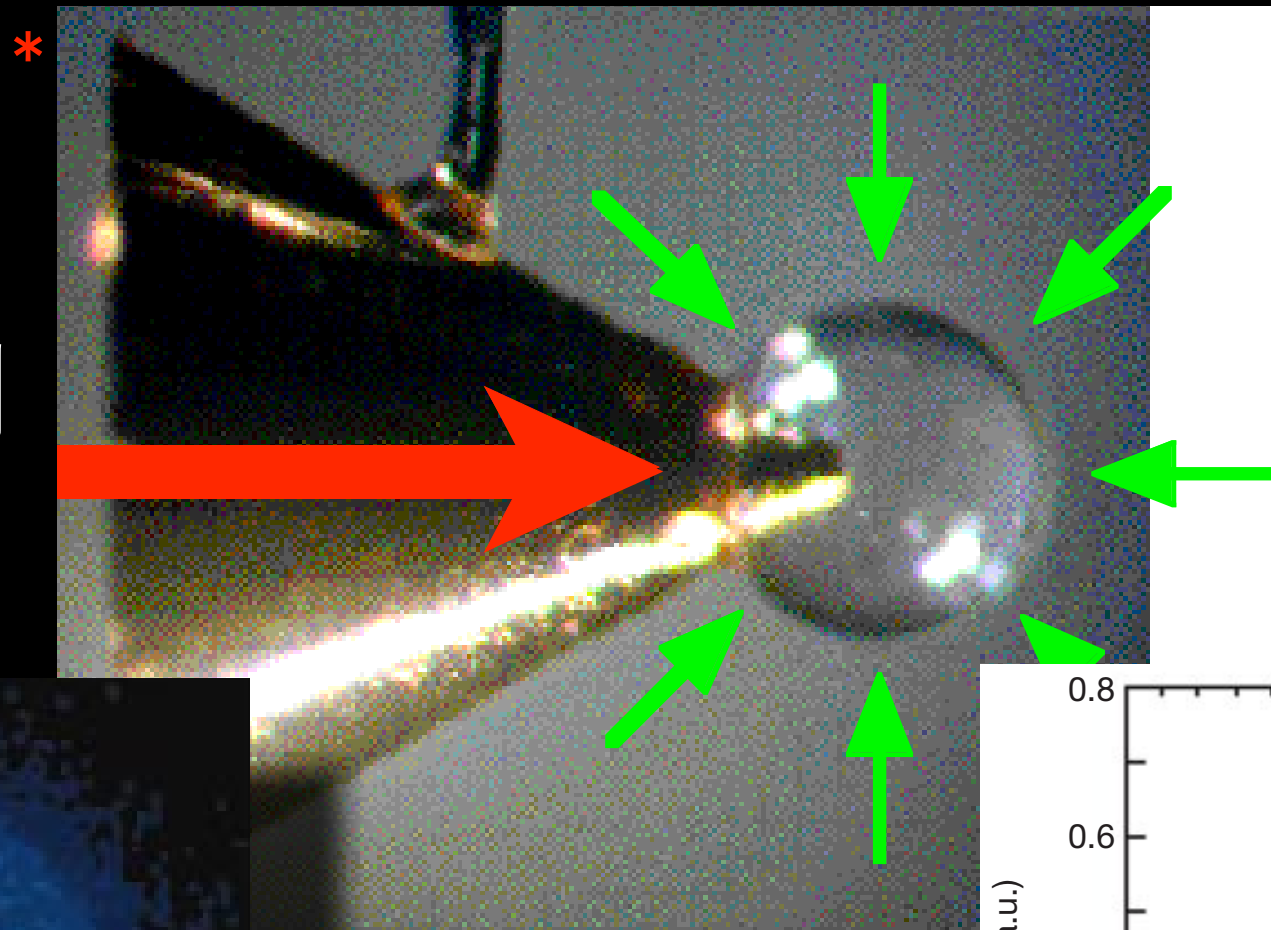
高速点火方式



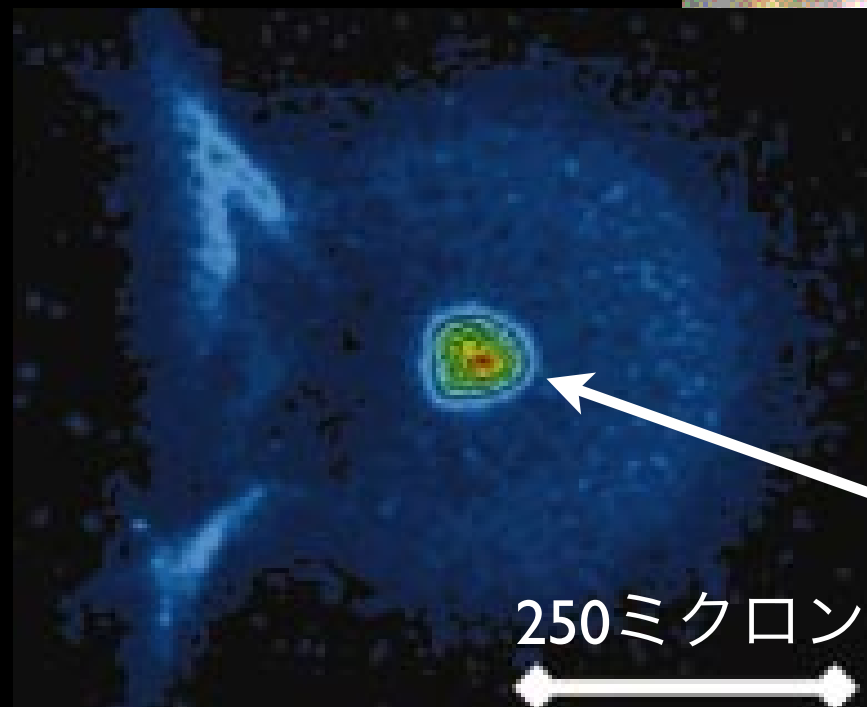
高強度のフェムト秒またはピコ秒
レーザーで点火を助ける

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

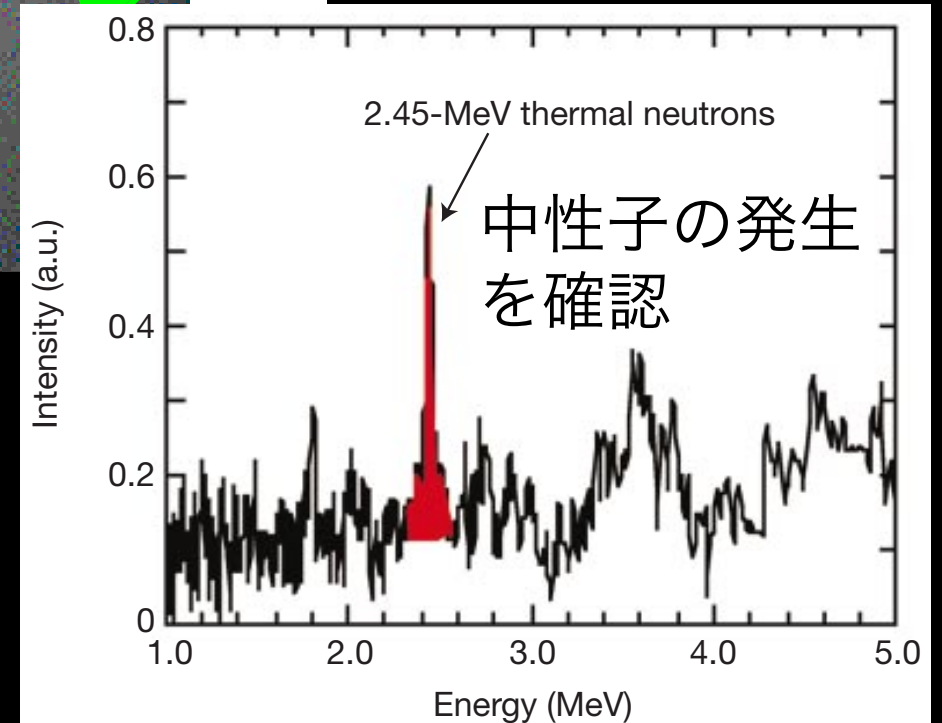
高速点火用
レーザー



爆縮用
レーザー
9本
1ナノ秒



コアの部分は
密度 $50\sim 70\text{ g/cm}^3$
温度数百万度



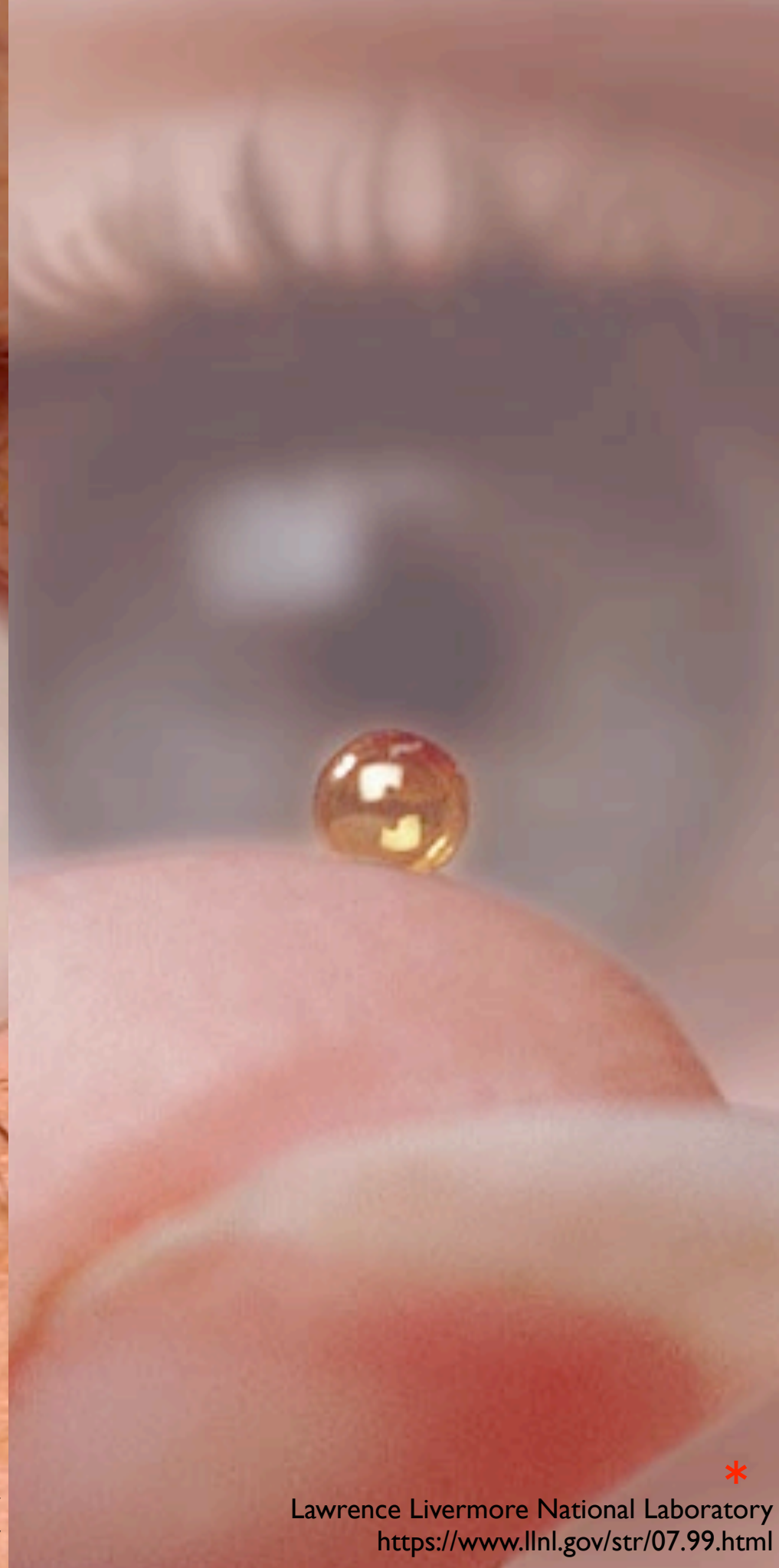
これを乗り越えるために

- 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

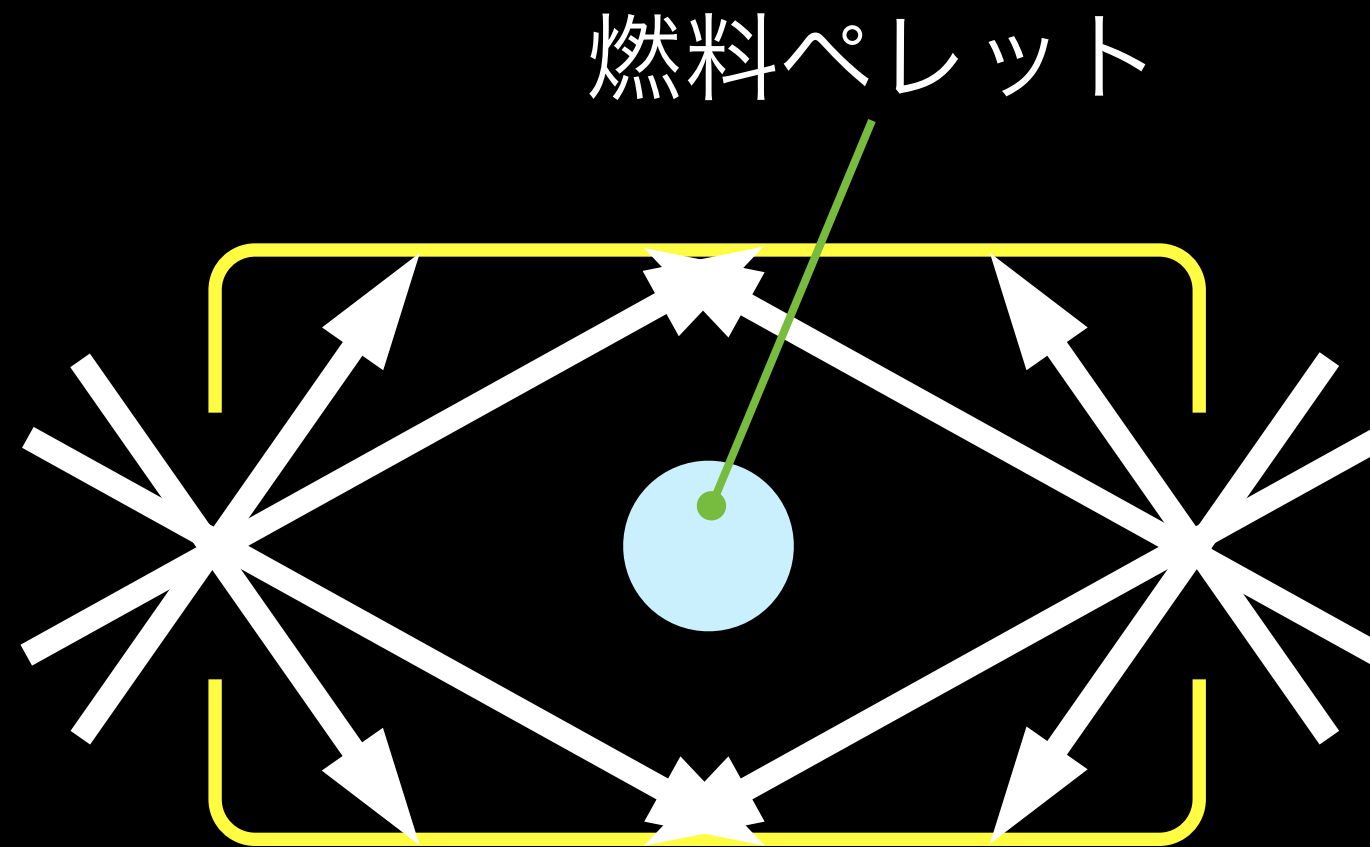


*



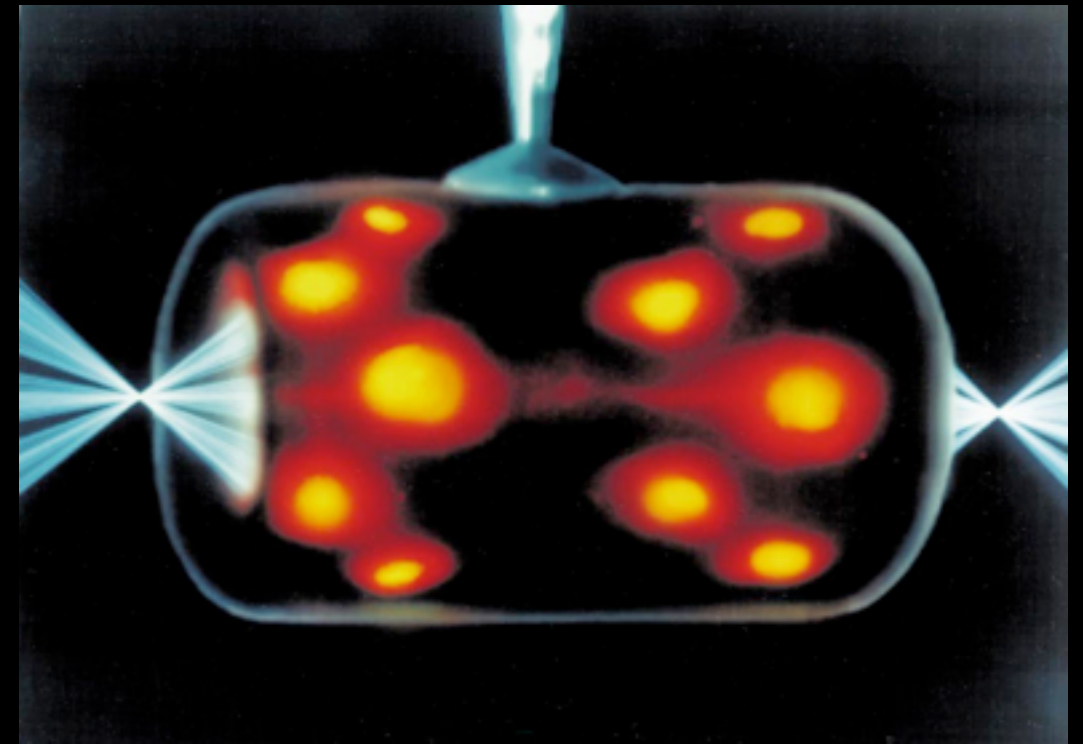
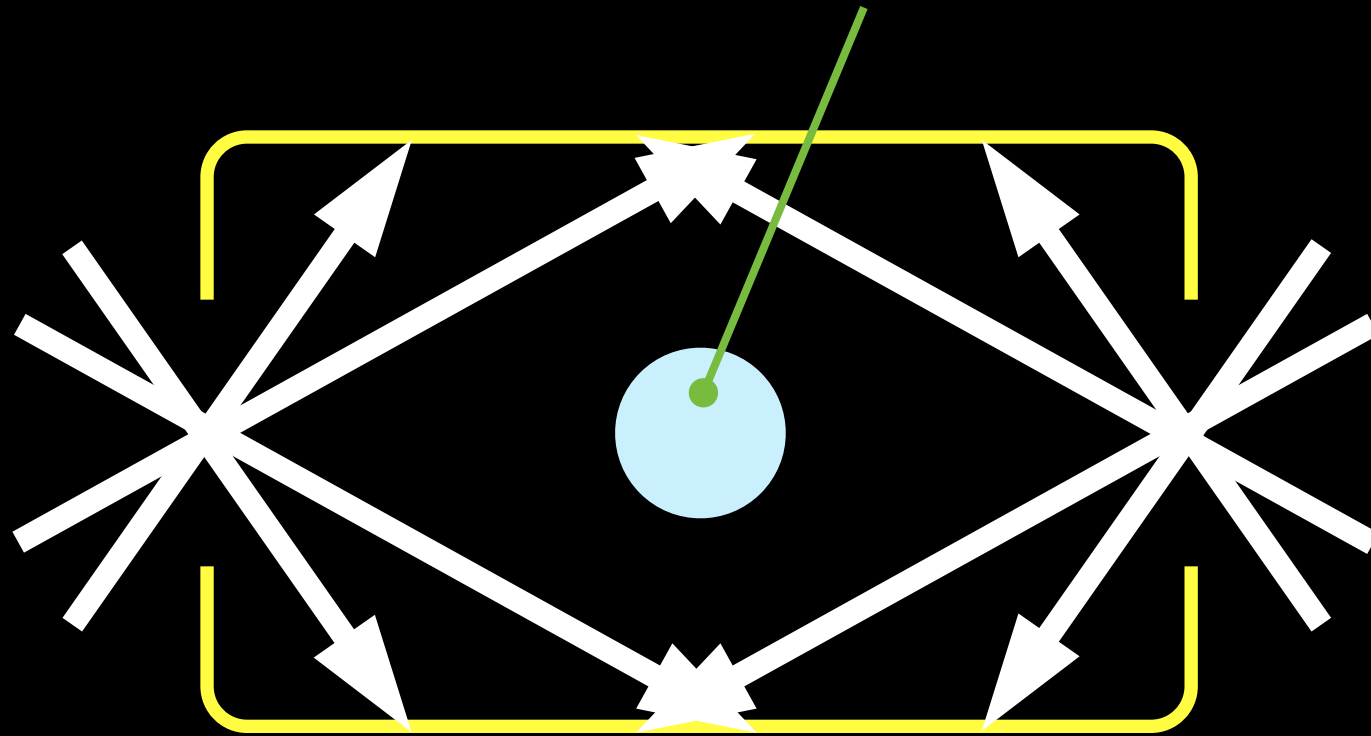
*

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

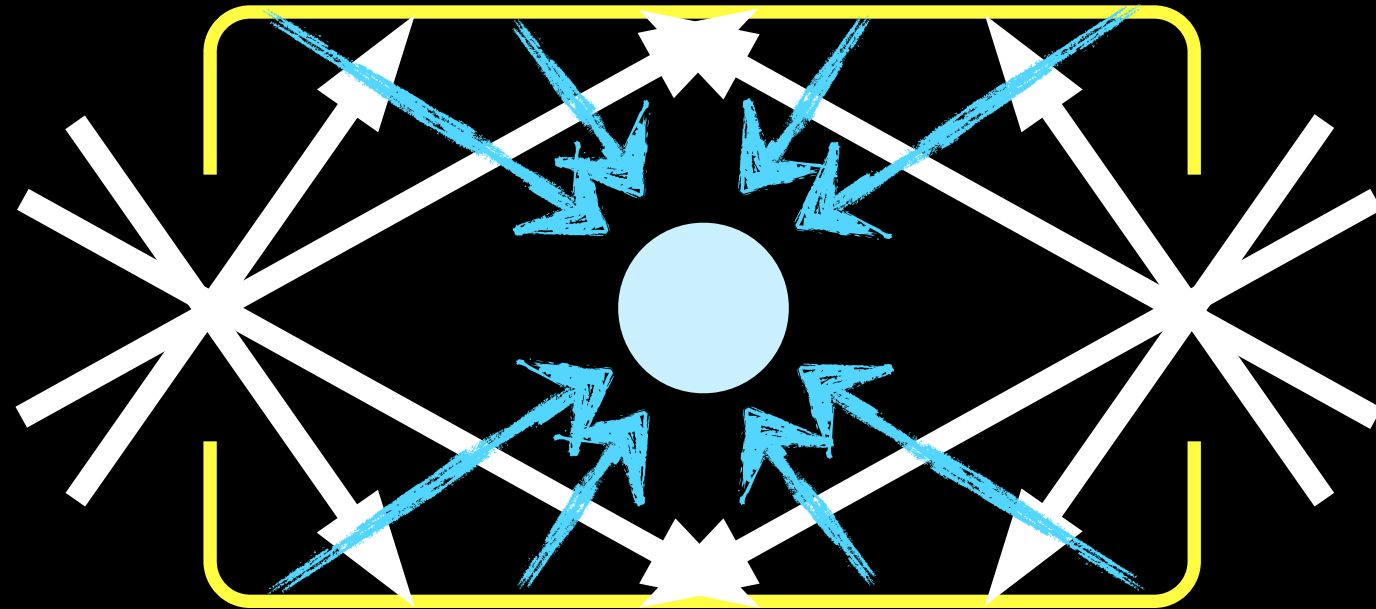
燃料ペレット



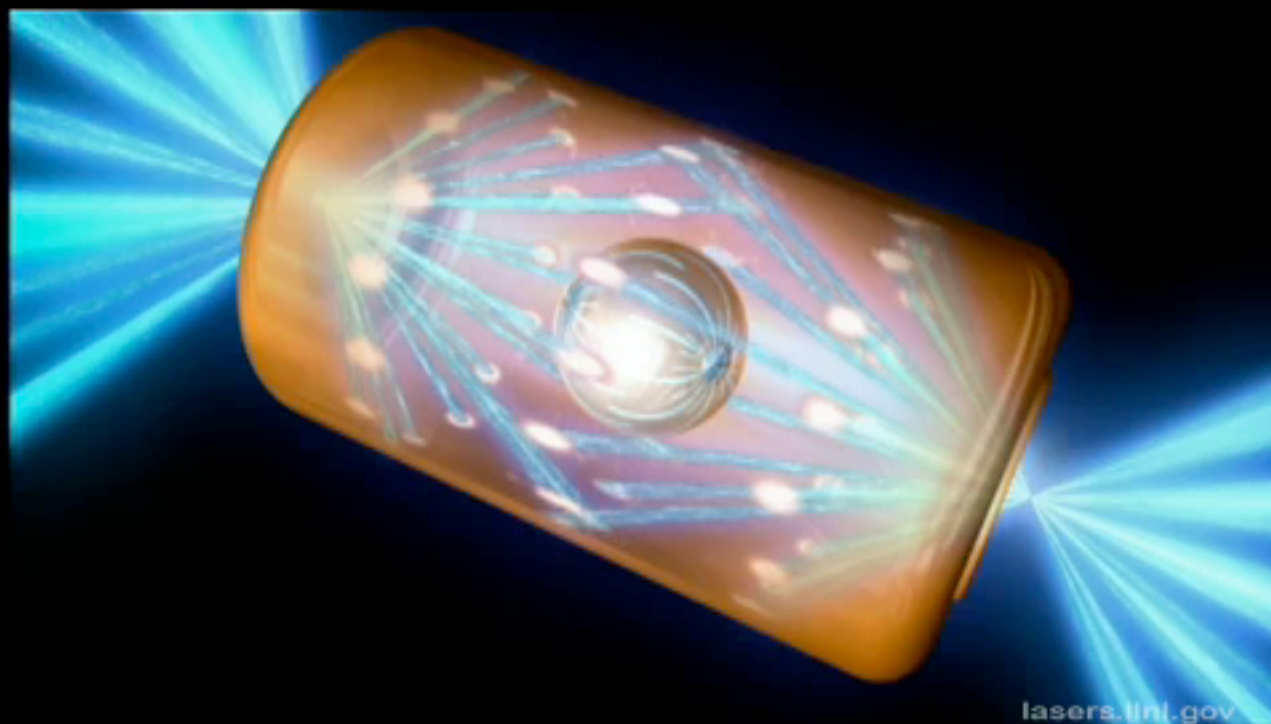
X線イメージ

* E.M. Campbell (1998) Laser Programs: the first 25 years, 1972-1997,
US Technical Report: UCRL-TB-128043, p.6
http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?osti_id=16710

レーザーは内壁でほぼ100%の効率で
X線に変換される



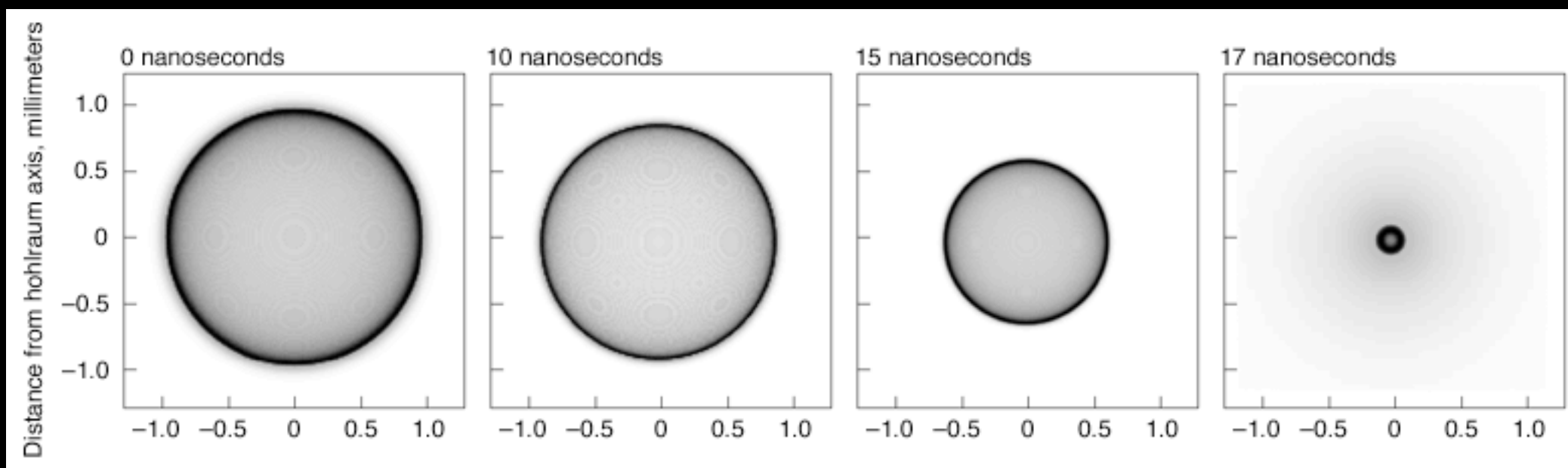
1000兆ワット/cm²の高強度のX線が
均一に燃料を爆縮



* Lawrence Livermore National Laboratory
https://lasers.llnl.gov/multimedia/video_gallery/
 “The Power of Light (short version)”

間接駆動

爆縮まで17ナノ秒



* Lawrence Livermore National Laboratory
<https://www.llnl.gov/str/07.99.html>

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

* Lawrence Livermore National Laboratory
https://lasers.llnl.gov/multimedia/photo_gallery/overview/?id=2&category=overview

* Lawrence Livermore National Laboratory
https://lasers.llnl.gov/multimedia/photo_gallery/overview/?id=4&category=overview

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

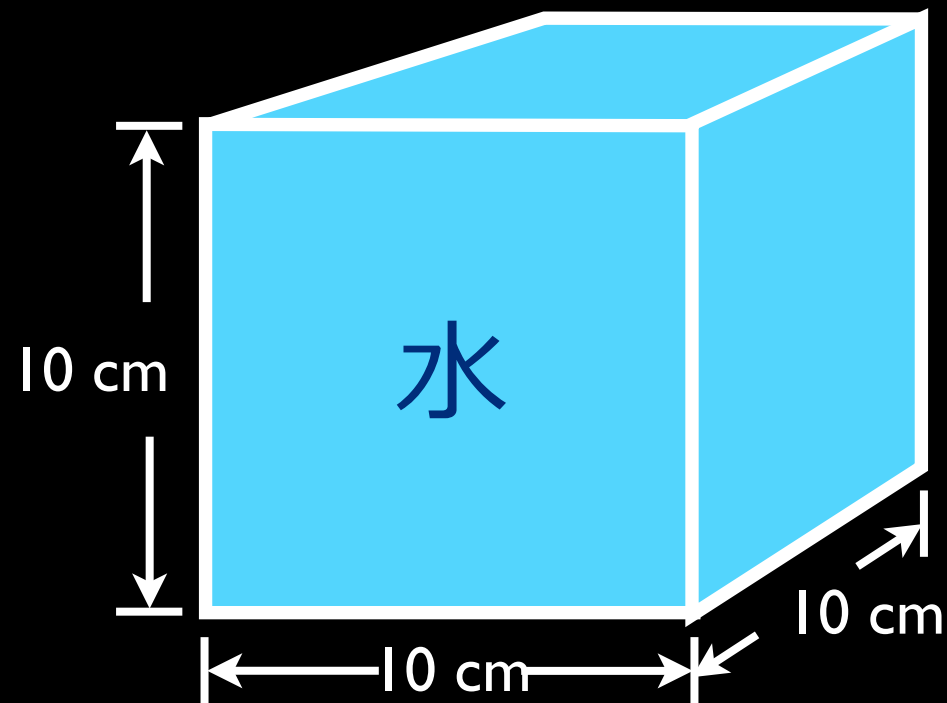
500兆ワット(0.5ペタワット)のレーザーパワー

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？

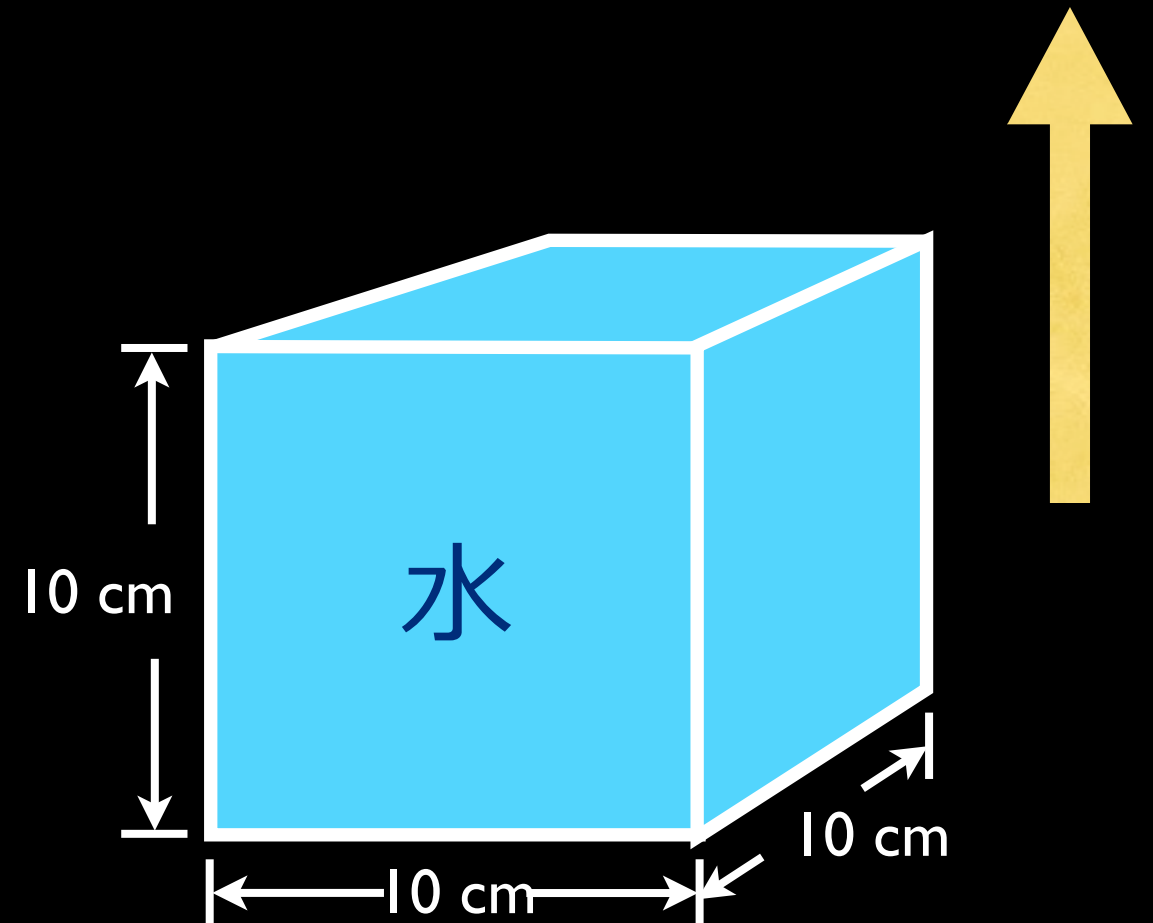
エネルギー・パワー・強度



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



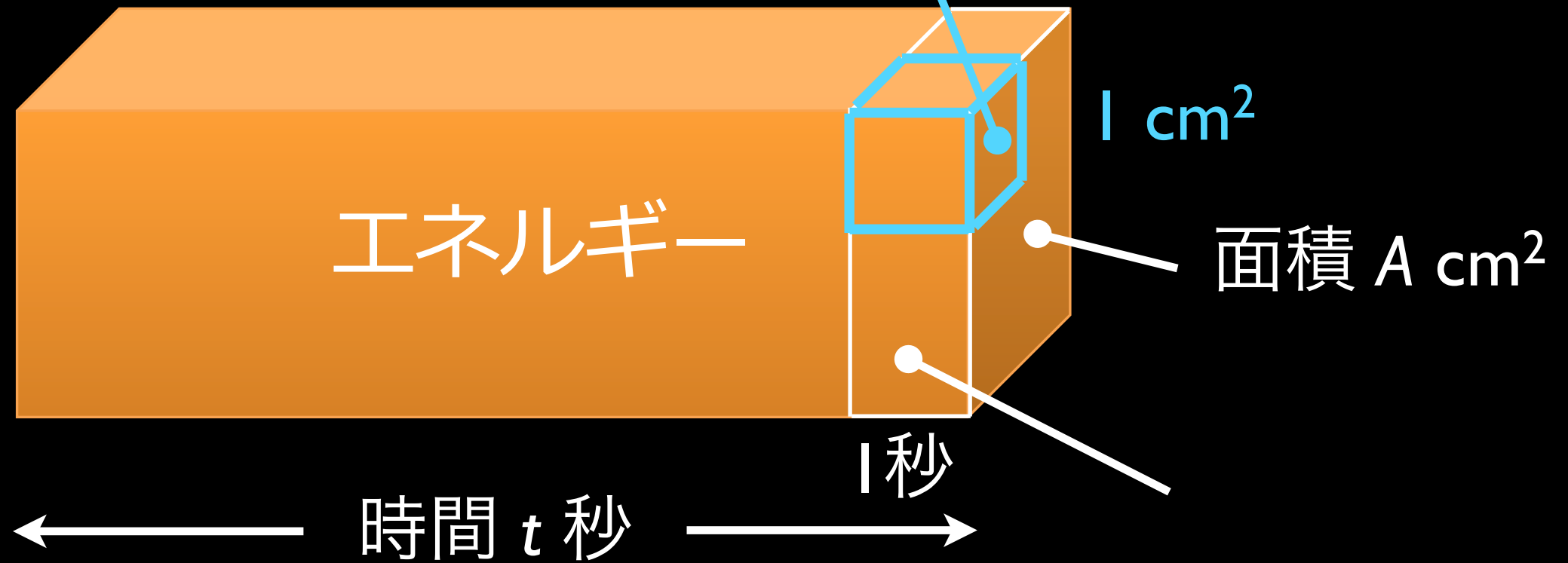
1 m持ち上げるのに必要
なエネルギー

= 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



Image copyright CoolCLIPS.com

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 ペタ = 10^{15} = 1000兆

- 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

> 投入したエネルギー

の実現

今年の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

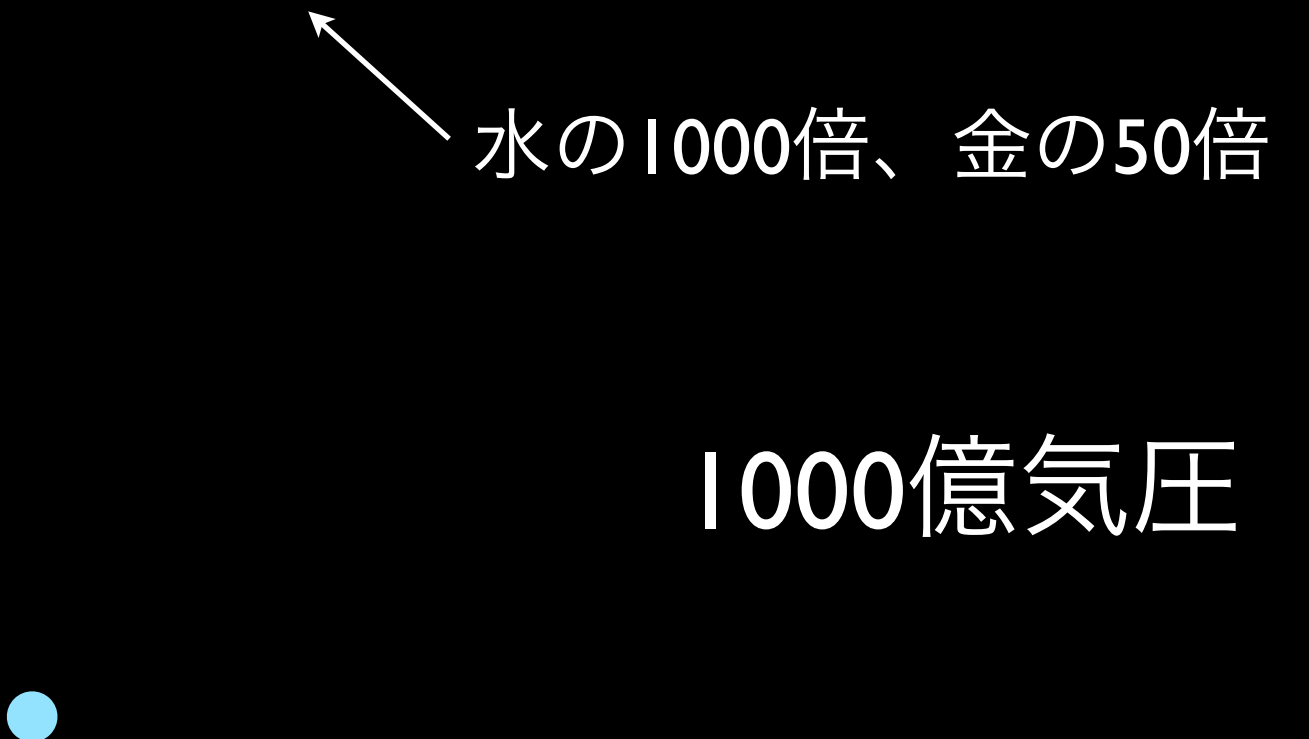
コンピューターシミュレーションに問題？

来年度も実験は続く

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

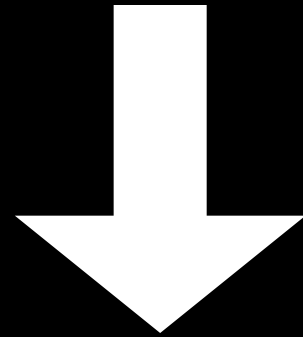
恒星の中心部と同様の高温高密度の状態

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。
841個の太陽系外惑星が見つかった(2012/10/12現在)

- 宇宙化学

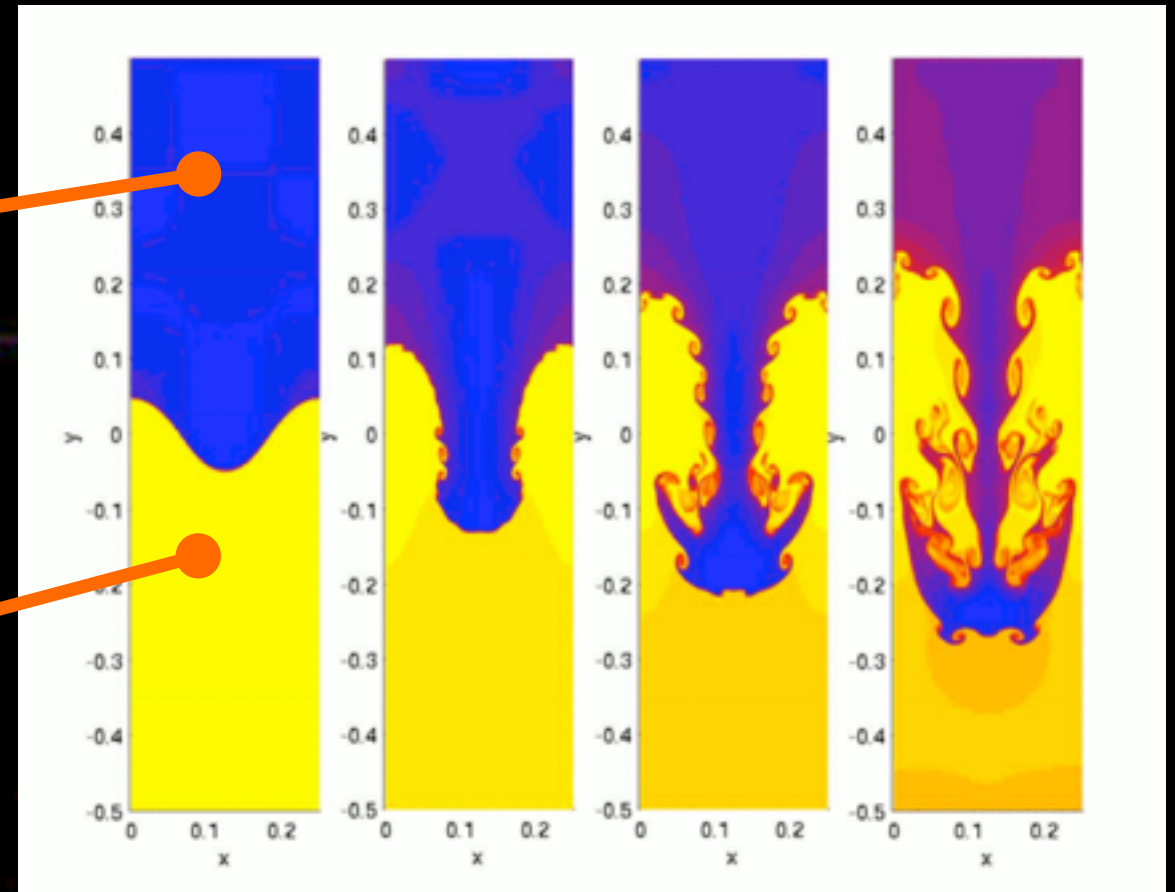
星間物質や生命の起源

- 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)



* Shengtai Li and Hui Li (2006) Parallel AMR Code for Compressible MHD or HD Equations
<http://math.lanl.gov/Research/Highlights/amrmhd.shtml>

© Copyright 2006 Los Alamos National Security, LLC, All rights reserved

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

* Photo by NASA / ESA / P.Challis and R. Kirshner
(Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)

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）

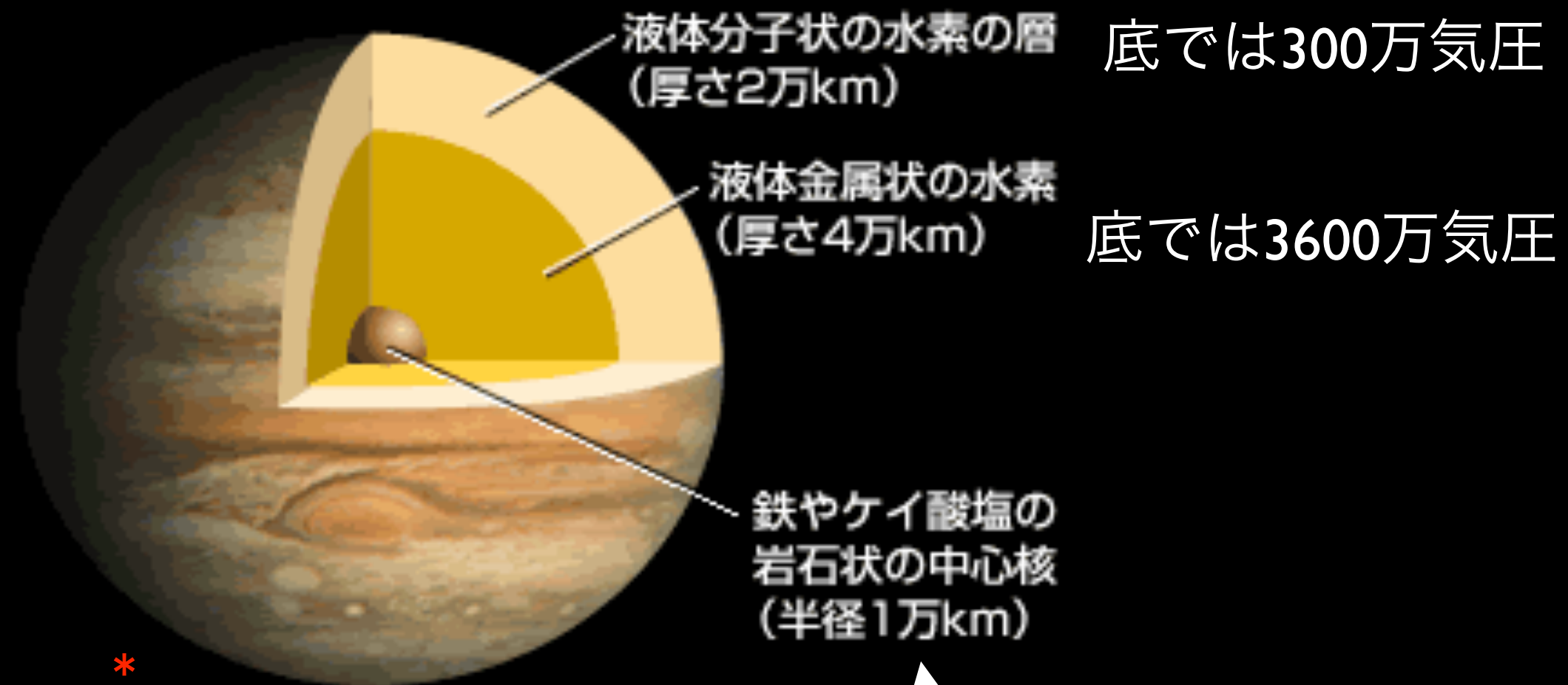
核融合反応の量に対して、星の温度と明るさが
どれぐらいになるかを知る鍵

- 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



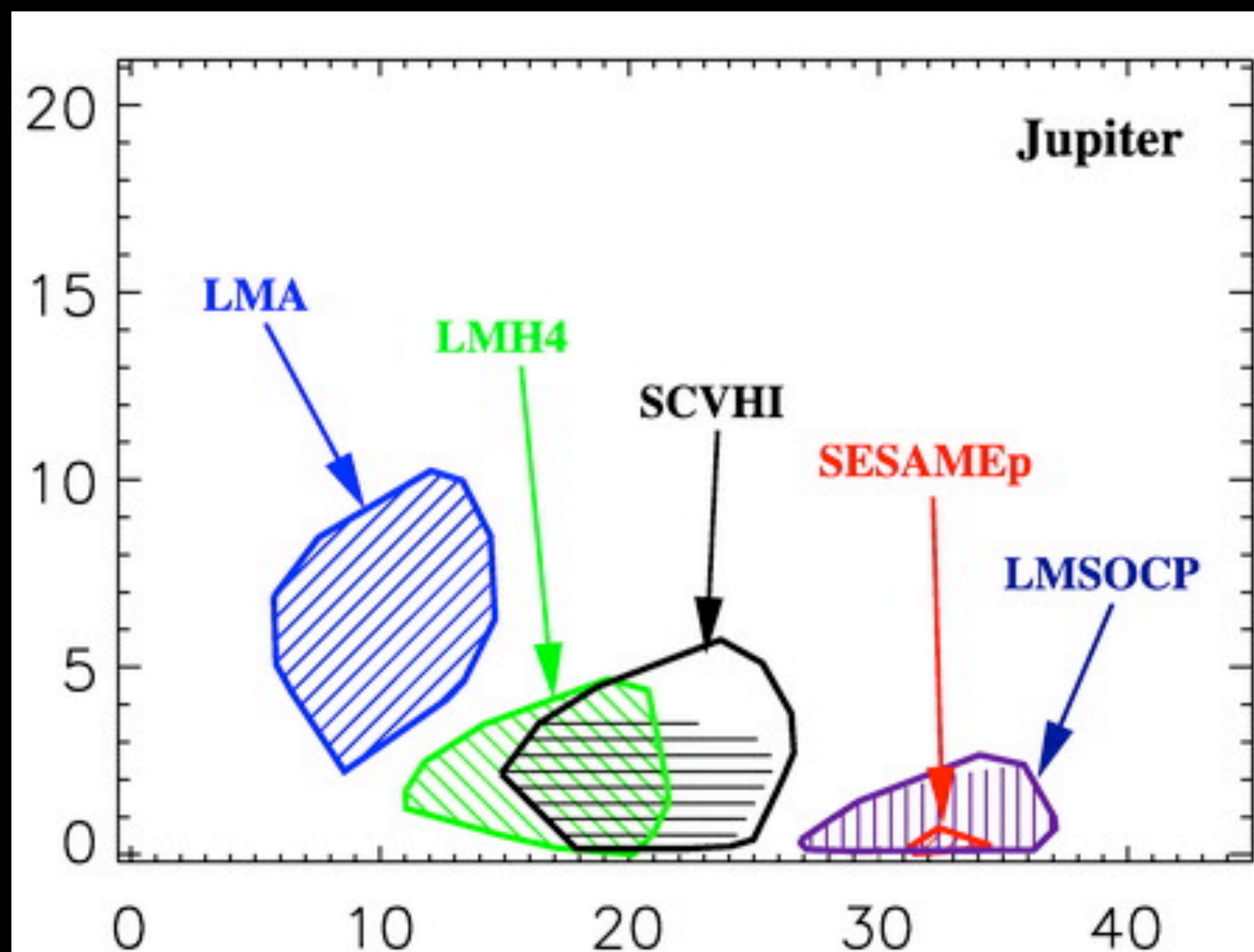
Copyright (c) 1998-2008 National Museum
of Nature and Science. All rights reserved

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

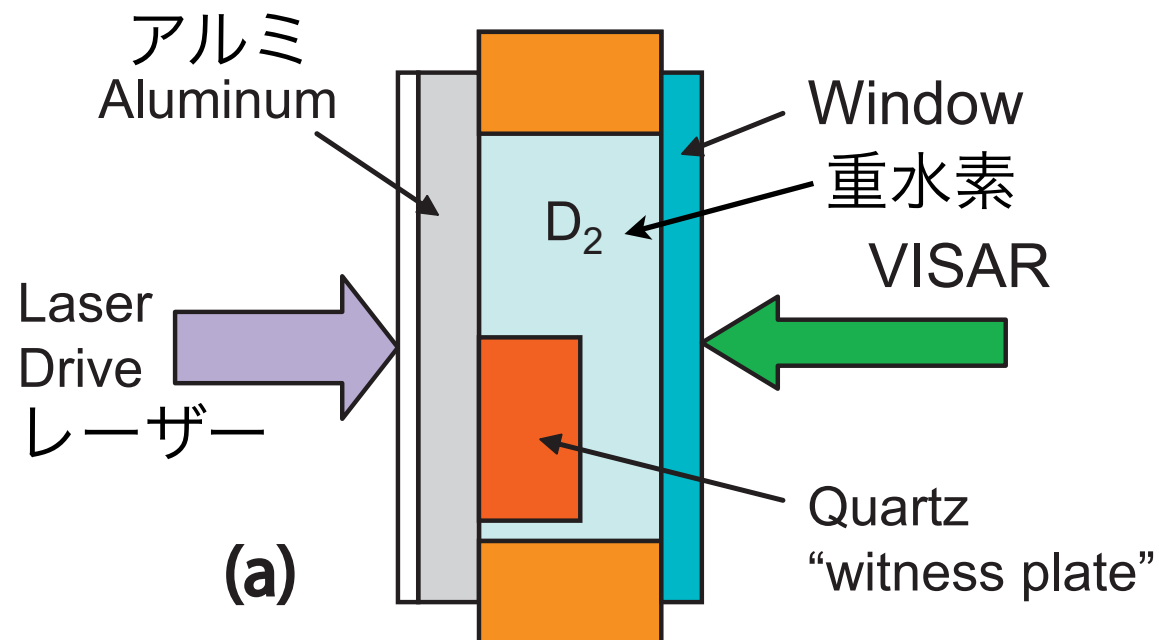
木星のコアの質量÷地球の質量



木星の重元素の質量÷地球の質量

レーザーによる実験がはじまっている

* D. Saumon and T. Guillot (2004)
Shock Compression of
Deuterium and the Interiors of
Jupiter and Saturn, *The
Astrophysical Journal*, vol.
609:1170-1180, p.1176 Fig.8.
Reproduced by permission of
the AAS.

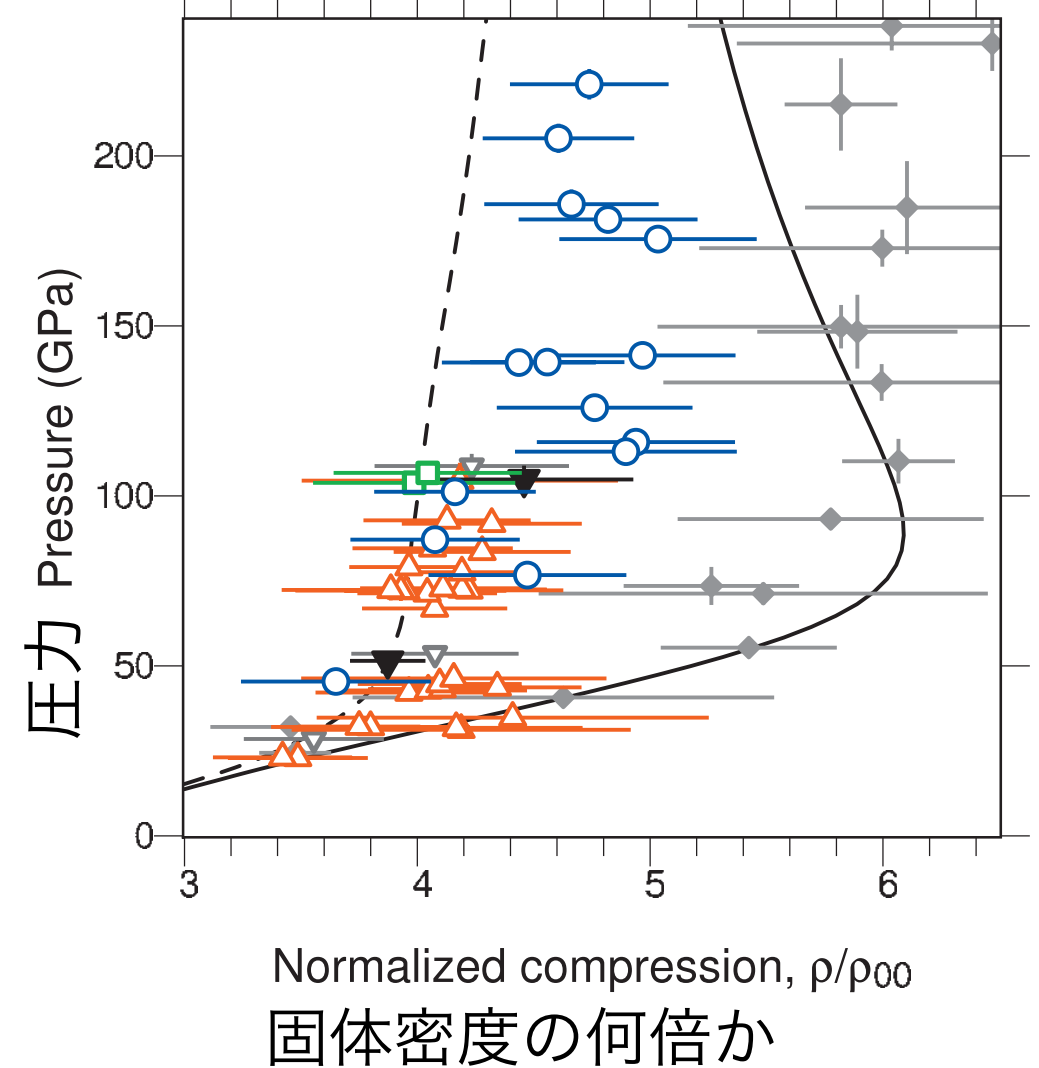


ロチェスター大学オメガレーザー
での実験

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



Reprinted figures with permission from D. G. Hicks, T. R. Boehly, P. M. Celliers, J. H. Eggert, S. J. Moon, D. D. Meyerhofer, and G. W. Collins (2009)
Laser-driven single shock compression of fluid deuterium from 45 to 220 GPa, *Physical Review B*, vol.79:014112, p.4 Fig.2(a) and p.9 Fig.8.
Copyright 2009 by the American Physical Society.

Readers may view, browse, and/or download material for temporary copying purposes only, provided these uses are noncommercial personal purposes. Except as provided by law, this material may not be further reproduced, distributed, transmitted, modified, adapted, performed, displayed, published, or sold in whole or part, without prior written permission from the American Physical Society.

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)

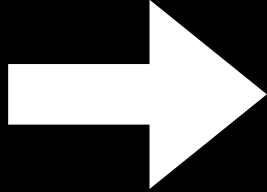
30フェムト(10^{-15})秒

核爆弾を除けば、

人工的に作れる最大のパワー

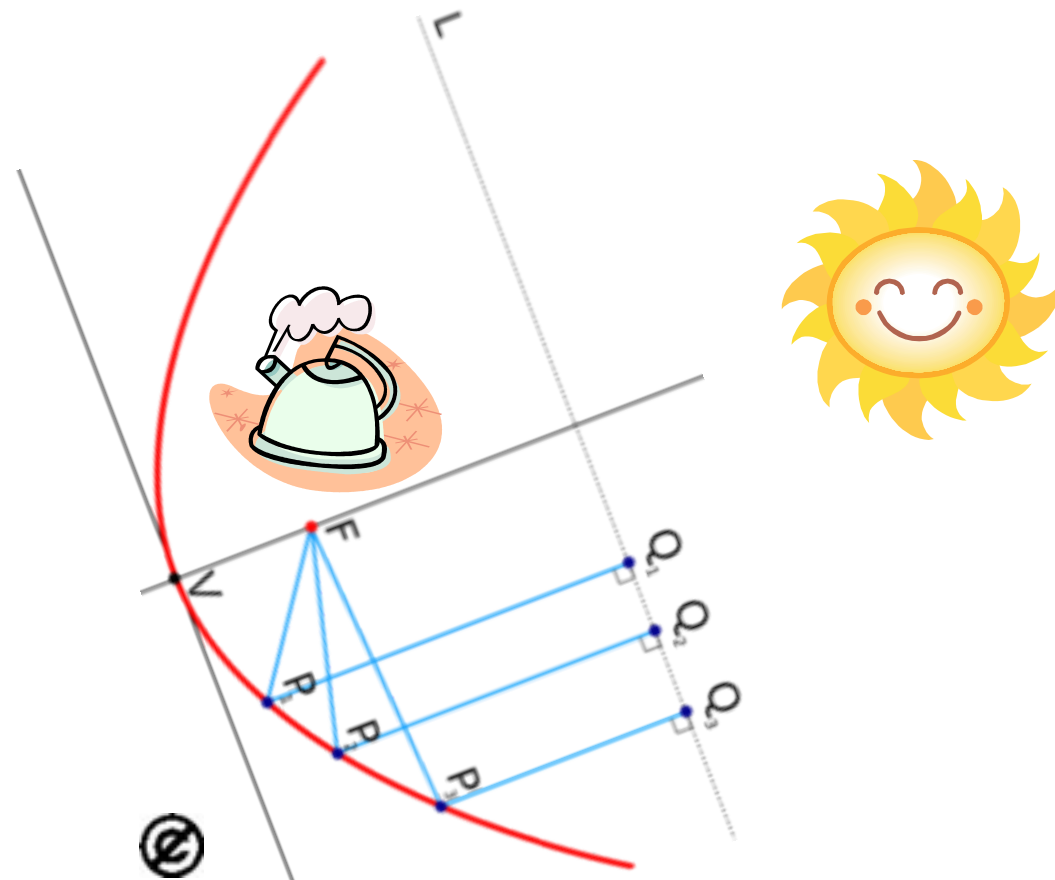
1ペタワットのレーザー光を集光すると…

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



* OptoSigma Corporation

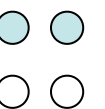


Solar cooker



Canberra Deep Dish Communications Complex

*
Photo by
NASA
[http://
dayton.hq.nasa.
.gov/
ABSTRACTS/
GPN-2000-00
0502.html](http://dayton.hq.nasa.gov/ABSTRACTS/GPN-2000-000502.html)



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

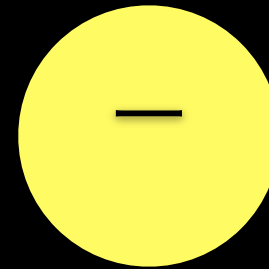
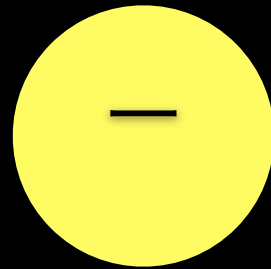


素粒子物理・宇宙物理の最も根源的な疑問の1つ

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

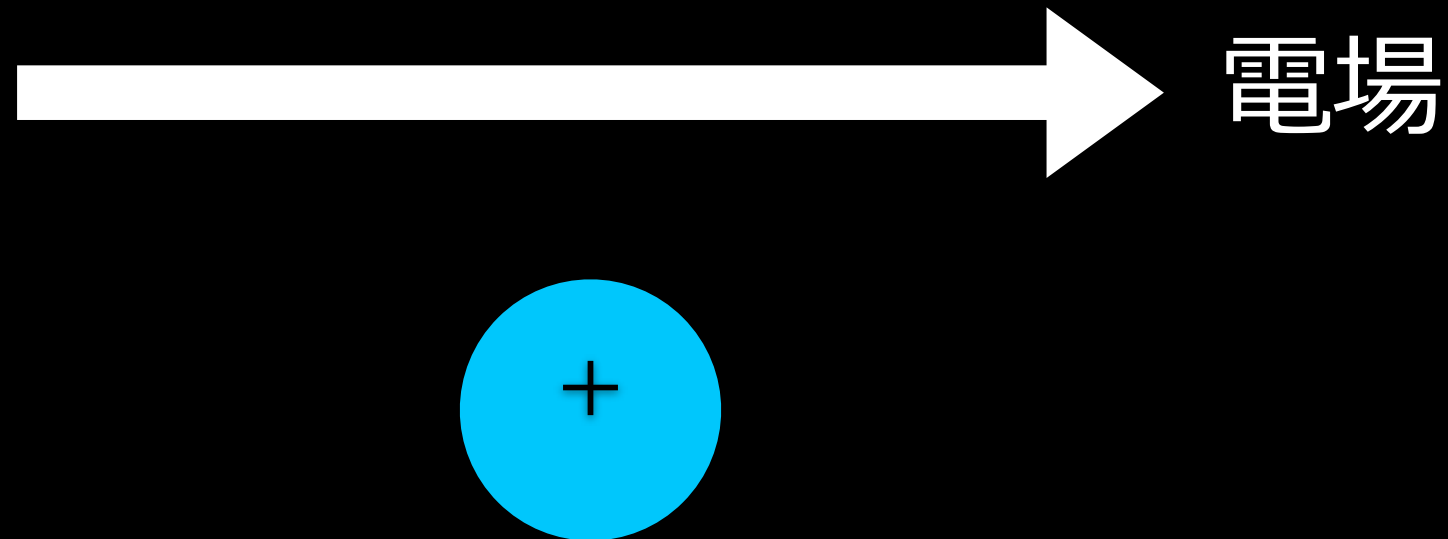
陽電子…電子の反粒子（ガンの診断(PET)にも使われている）



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

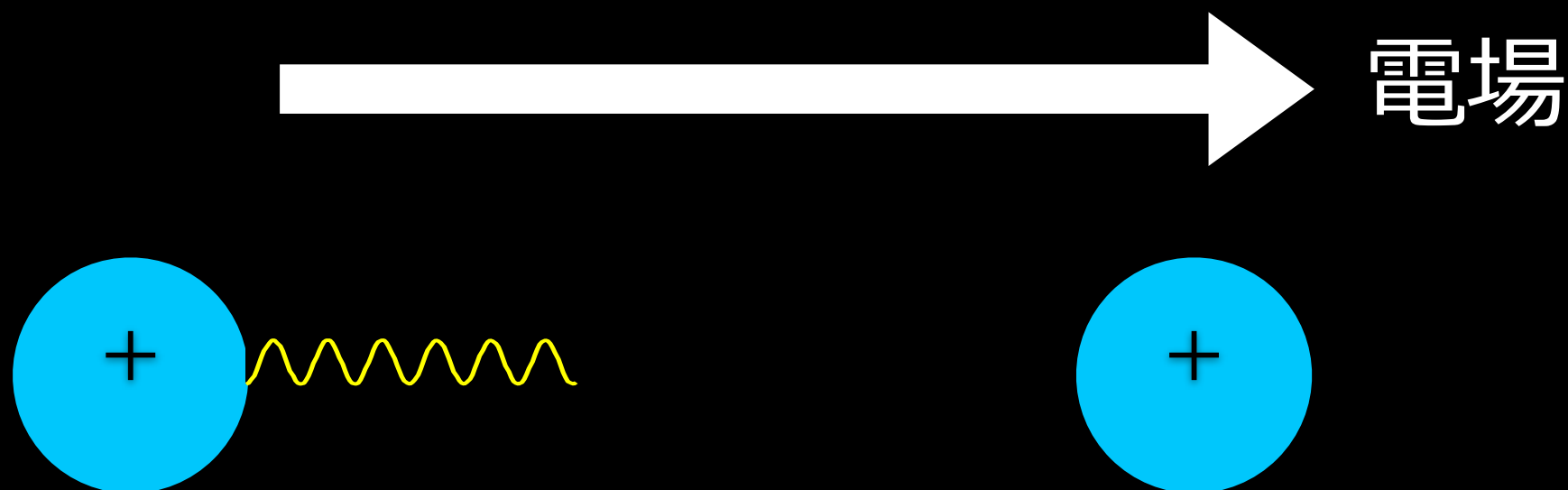
※物理現象の最小時間単位は 5×10^{-44} 秒（プランク時間）という説が有力

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



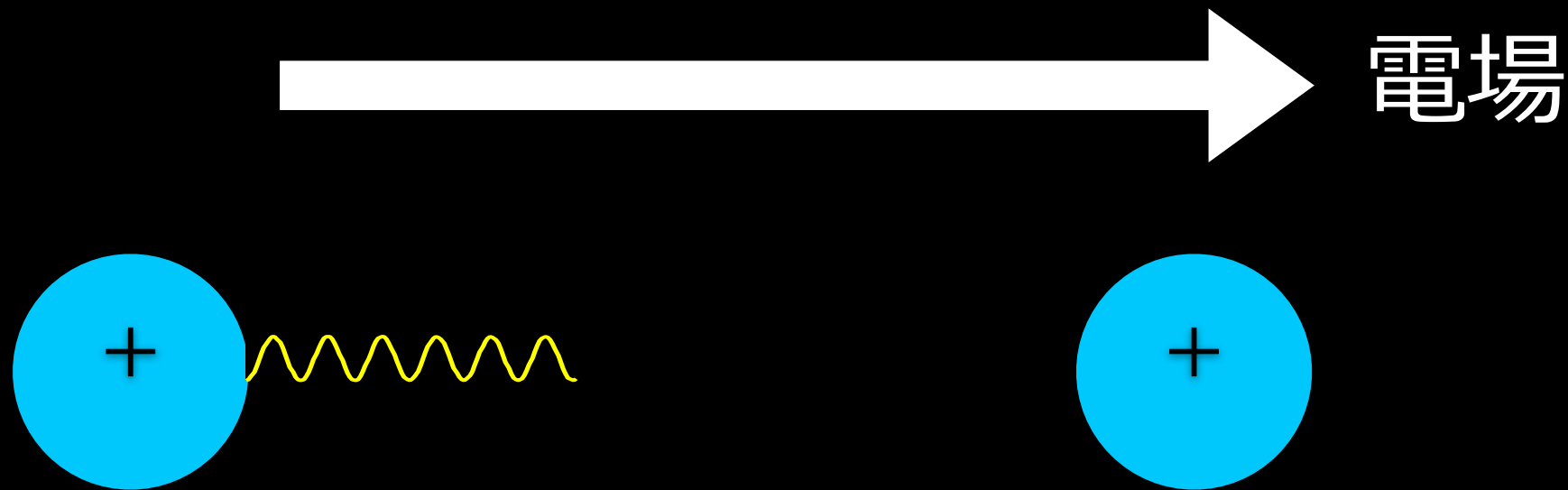
電子と陽電子は引き離されて、本物の電子と陽電子になる

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！

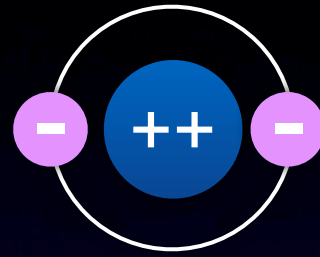
と予想されている

ガラスの中では

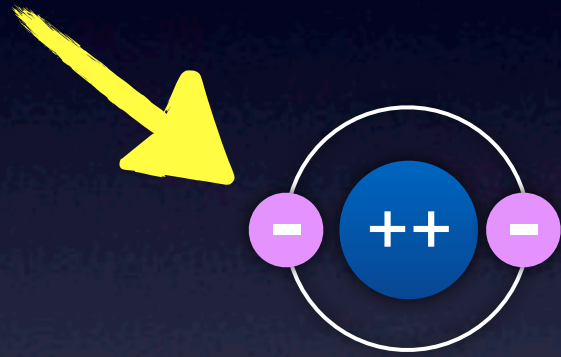
加速された電子が
他の原子に衝突

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



2×10^{26} W/cm²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

著作権の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました。

The Telegraph の記事より

Richard Gray "World's most powerful laser to tear apart the vacuum of space," 30 Oct 2011.

<http://www.telegraph.co.uk/science/science-news/8857154/Worlds-most-powerful-laser-to-tear-apart-the-vacuum-of-space.html> | 枚目

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