

■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
一瞬への挑戦ー超短パルスレーザー

光量子科学研究センター
石川顕一

Yahoo, Google, ...



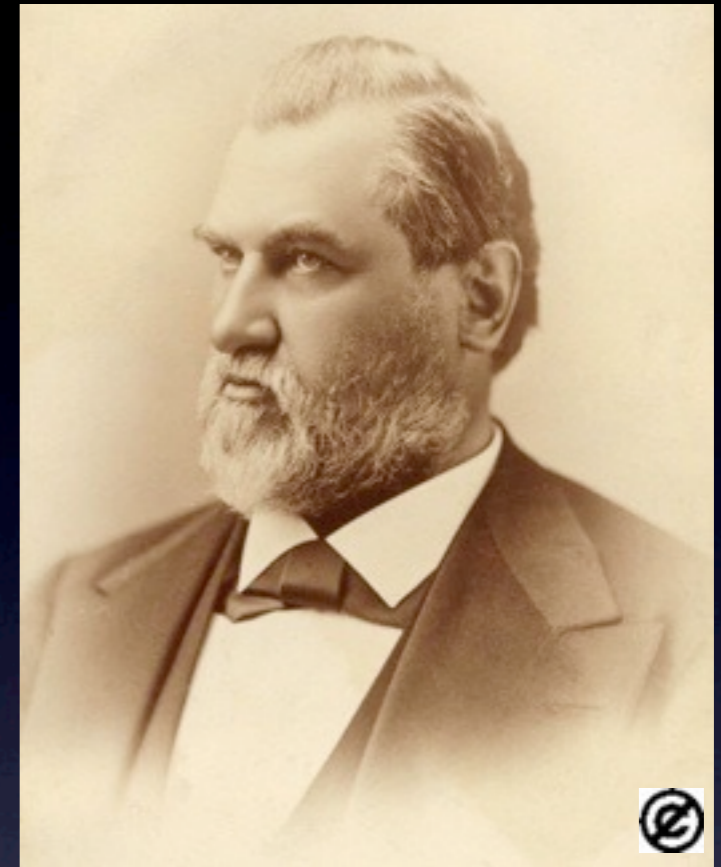
スタンフォード大学

Photo by Jawed Karim from Wikimedia Commons
[http://commons.wikimedia.org/wiki/
File:Stanford_University_campus_from_above.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stanford_University_campus_from_above.jpg)
CC-BY-SA 3.0

リーランド・スタンフォード

スタンフォード大学の創始者
カリフォルニア知事

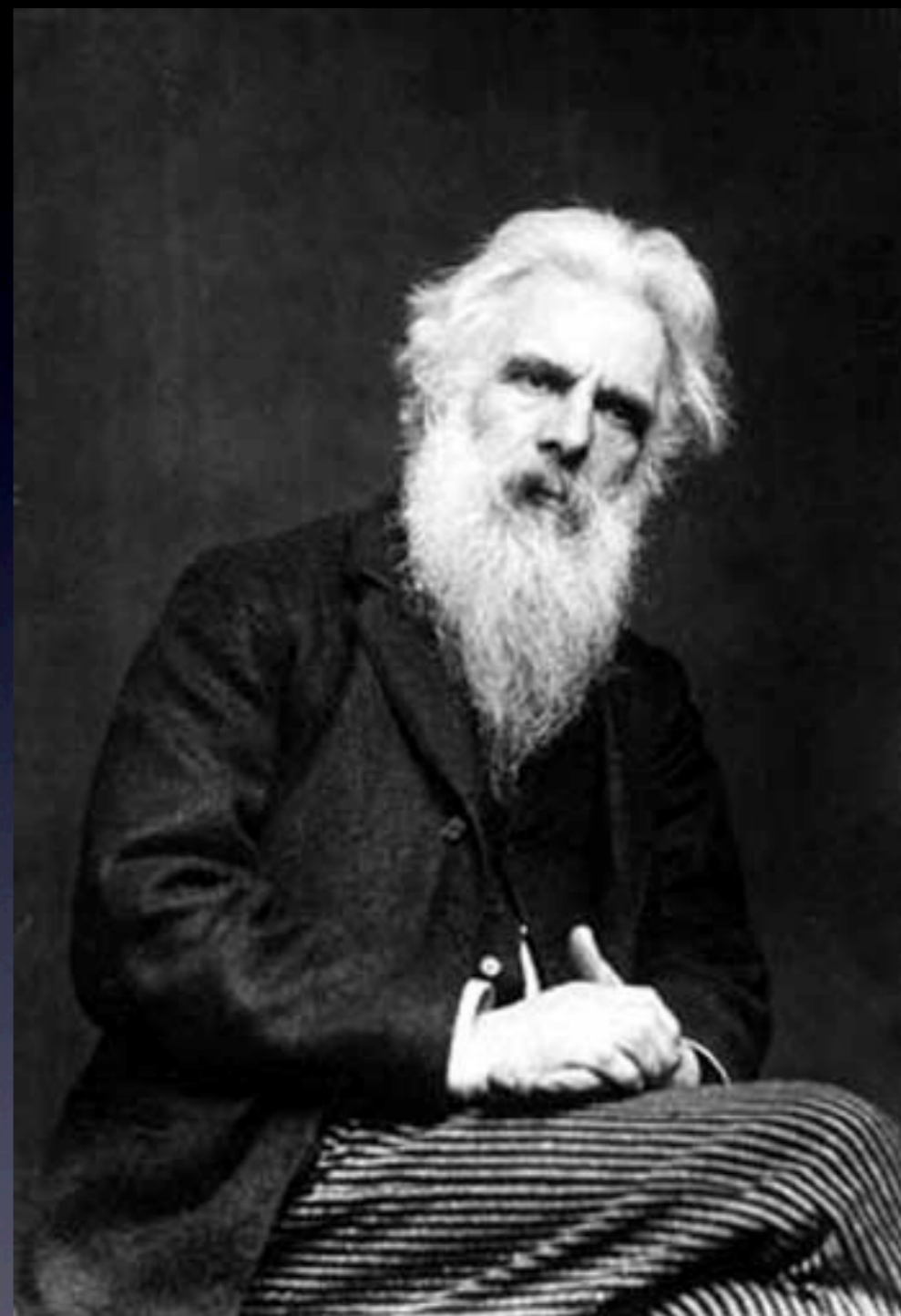
1872年



疾走中の馬の4本全ての脚が宙に浮いて
いる瞬間があるか

友人と賭け

エドワード・マイブリッジ
に2000ドルで撮影を依頼





馬の速度は時速約60km (秒速17m)
当時は晴天でも秒単位の露光が必要
高速で疾走する馬の**一瞬**をとらえる

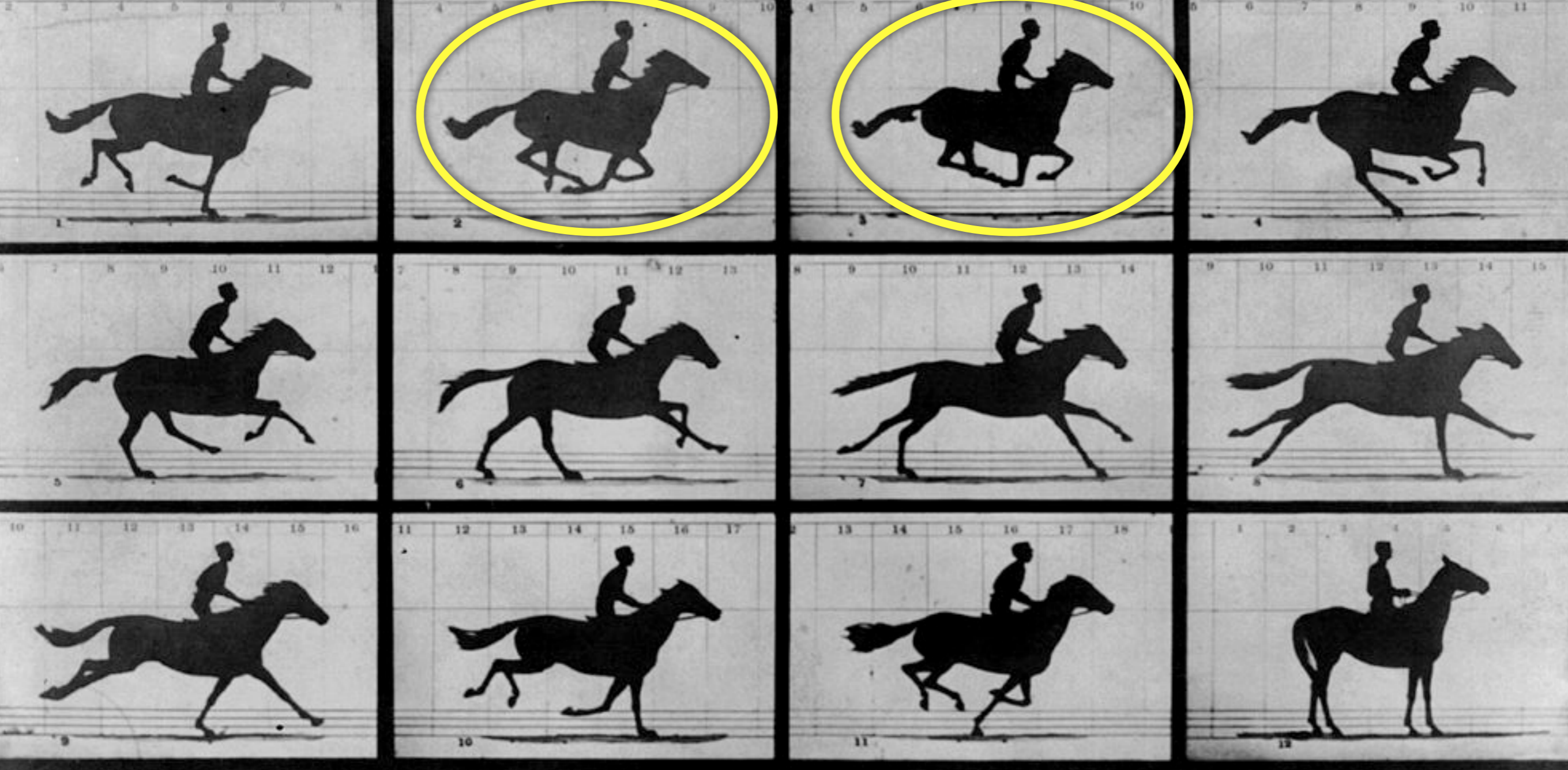


- ▶ 高速のシャッタースピード
- ▶ 大口径のレンズ
- ▶ 高感度の感光材料



5年以上の歳月と5,000ドルを費やし…

- ▶ 高速のシャッタースピード
 - ➡ 露出時間1,000～6,000分の1秒
- ▶ 大口径のレンズ
 - ➡ レンズ口径32ミリ
- ▶ 高感度の感光材料
 - ➡ 写真感度向上のための化学研究



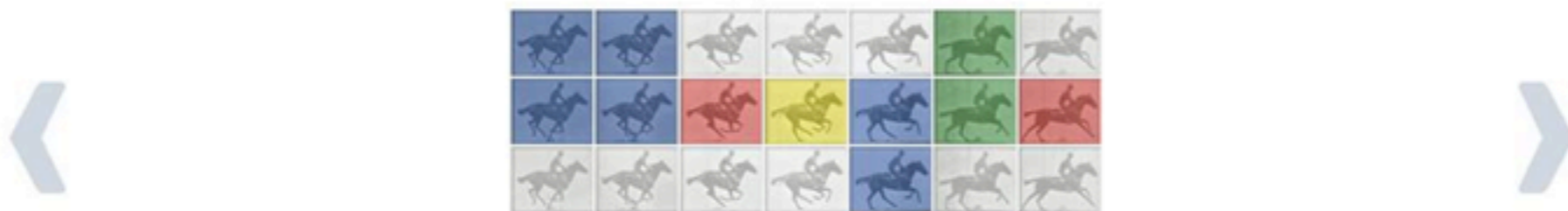
4本全ての脚が宙に浮いて
いる瞬間がある！





Eadweard J. Muybridge's 182nd Birthday

+1 1,254



[Home](#)

Apr 9, 2012

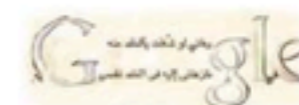
[About Doodles](#)

Location: [Global](#)

[Doodle Store](#)

Tags: [Horse](#), [Jockey](#), [Art](#), [Photography](#), [Animation](#), [Horseback Riding](#), [Locomotion](#), [Black And White](#), [Interactive](#)

More Doodles



2012年4月9日のグーグルのロゴ



馬と人間のつきあいは5,500年にもおよぶ
疾走する馬の脚の運び方が解明されたのは1878年!



疾走する馬の脚の運び方を解明したのは



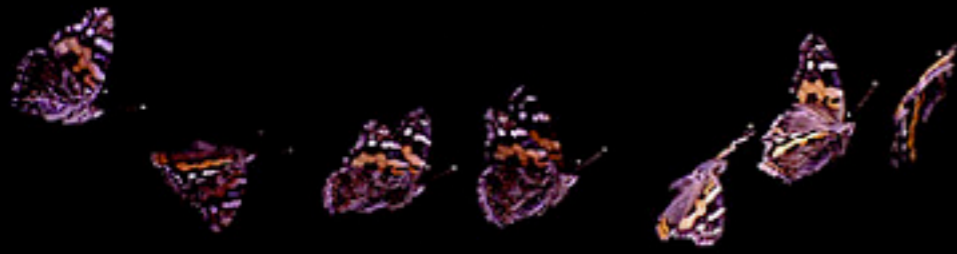
疾走する馬の**一瞬**をとらえる高速度カメラ

一瞬への挑戦

一瞬をとらえるためのマイブリッジ
がとったアプローチ

高速度シャッター

もう一つの方法…



ストロボ（フラッシュ）撮影

* Copyright (c) Kuribayashi Satoshi

暗闇の中で**ごく短時間だけ発光する光源**を使って、
高速で動くものの**一瞬をとらえられる**



超短パルス レーザー



* ご提供：キヤノンマーケティングジャパン株式会社

フェムト秒レーザー

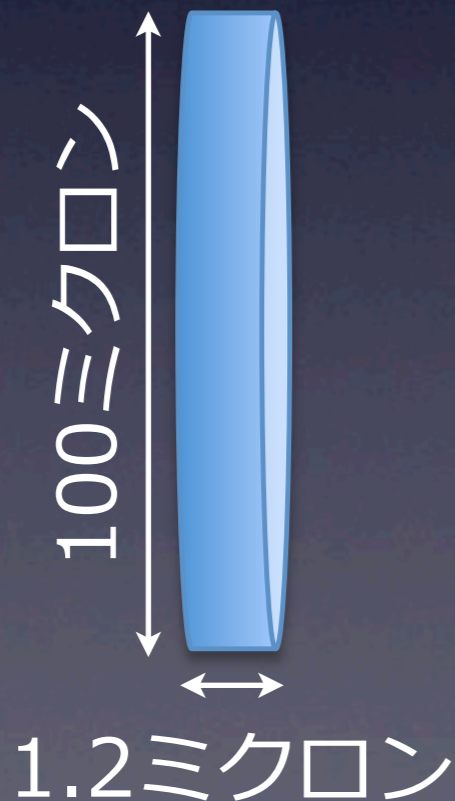
最短で約4フェムト秒だけ光るパルスが得られる

フェムト秒 = 10^{-15} 秒 = 1000兆分の1秒

1秒 : 1フェムト秒 = 3千万年 : 1秒

4フェムト秒 → 光が1.2ミクロンしか進めない

1ミクロン = 1000分の1ミリ



もはやレーザー**ビーム**で
はなくレーザーの**円盤**が
飛んでいくイメージ

どうやってレーザーを非常に短い時間だけ光らせるか？

チタンサファイアレーザー

Photo by Hankwang, from Wikimedia Commons
[http://commons.wikimedia.org/wiki/
File:Titanium_sapphire_oscillator.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Titanium_sapphire_oscillator.jpg)
CC BY-SA 3.0

元素図鑑

セオドア
グレイ
THEODORE
GRAY



H 1																	He 2															
Li 3	Be 4																	B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10									
Na 11	Mg 12																	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18									
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36															
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54															
Cs 55	Ba 56																	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88																	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Uut 113	Fl 114	Uup 115	Lv 116	Uus 117	Uuo 118
		La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71																
		Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103																

(c) 2013 Theodore Gray
<http://periodictable.com>

チタンのイオンをサファイア結晶中に入れる Ti^{3+}



サファイア？



Smithsonian National Museum of Natural History (Photo by Chip Clark)
<http://www.mnh.si.edu/earth/text/>

これに入れるのではない

サファイア = 酸化アルミニウム(Al_2O_3)の結晶

不純物によって色と名前が違う

	サファイア (宝石)	ルビー
不純物	鉄とチタン	クロム
見た目	 *	 *

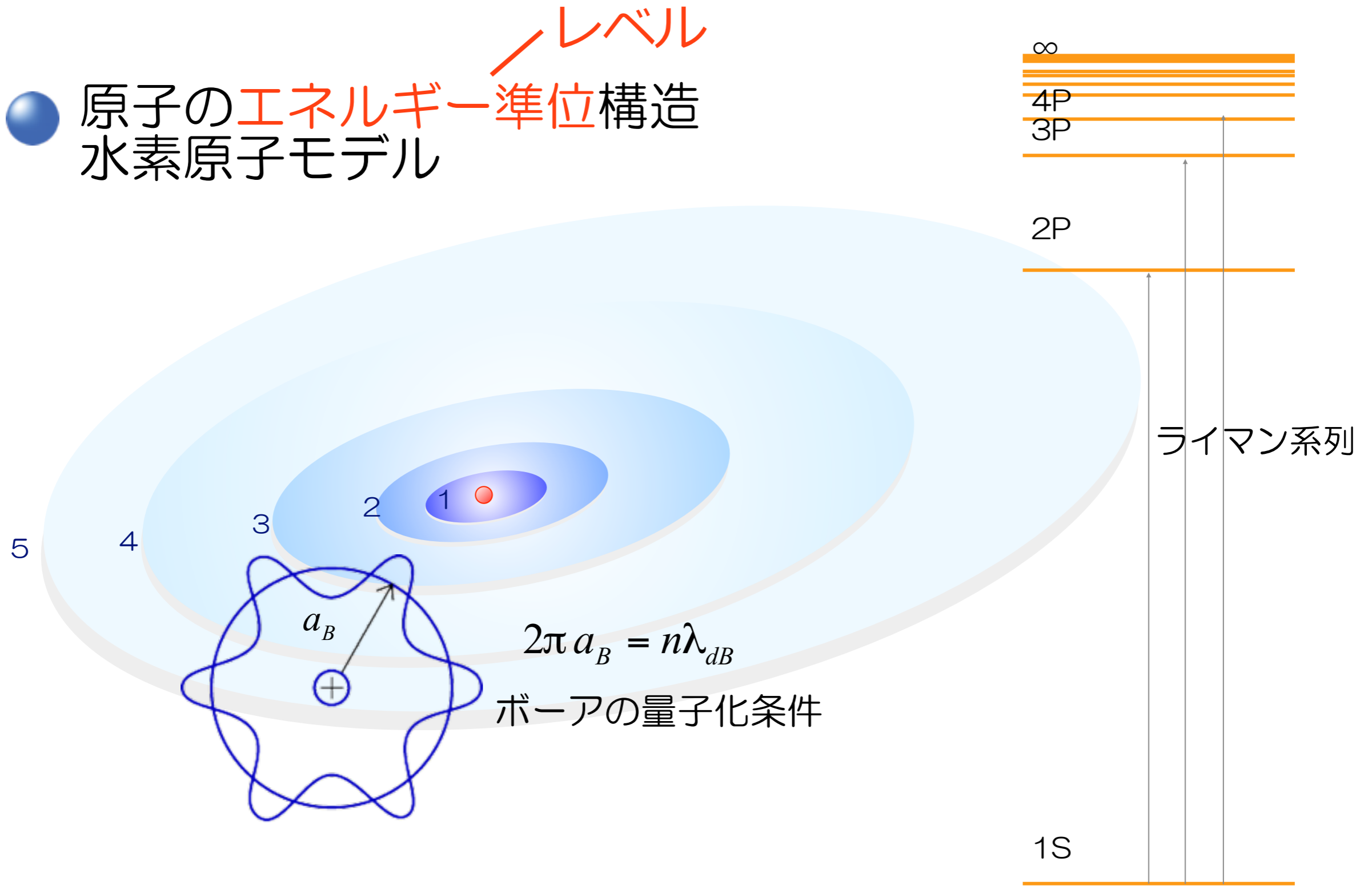
Smithsonian National Museum of
National History (Photo by Chip
Clark)
<http://www.mnh.si.edu/earth/text/>

サファイア中のアルミニウムの一部をチタン
イオンに置き換える

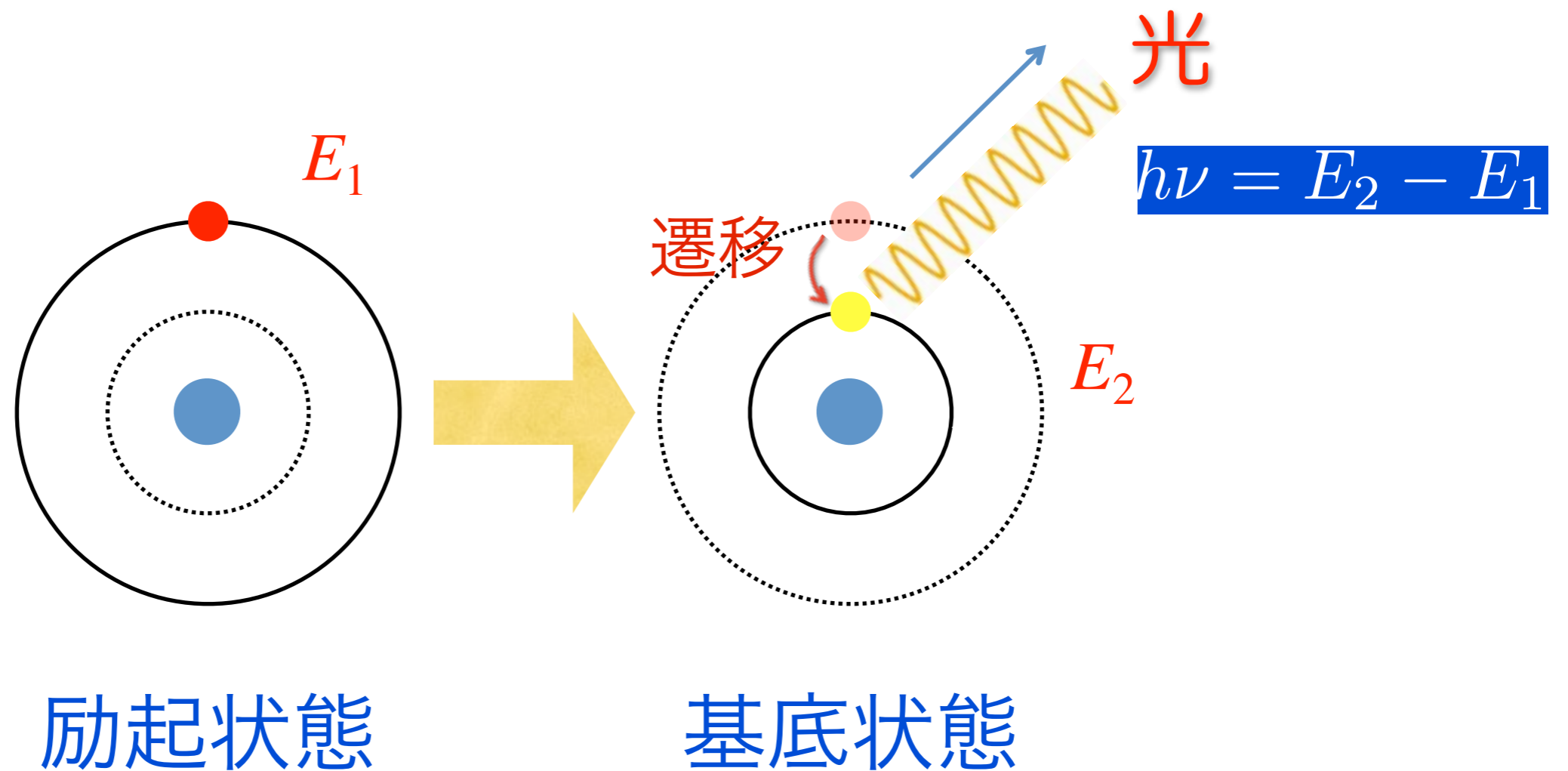
初回の復習

光と原子

- 原子のエネルギー準位構造
水素原子モデル



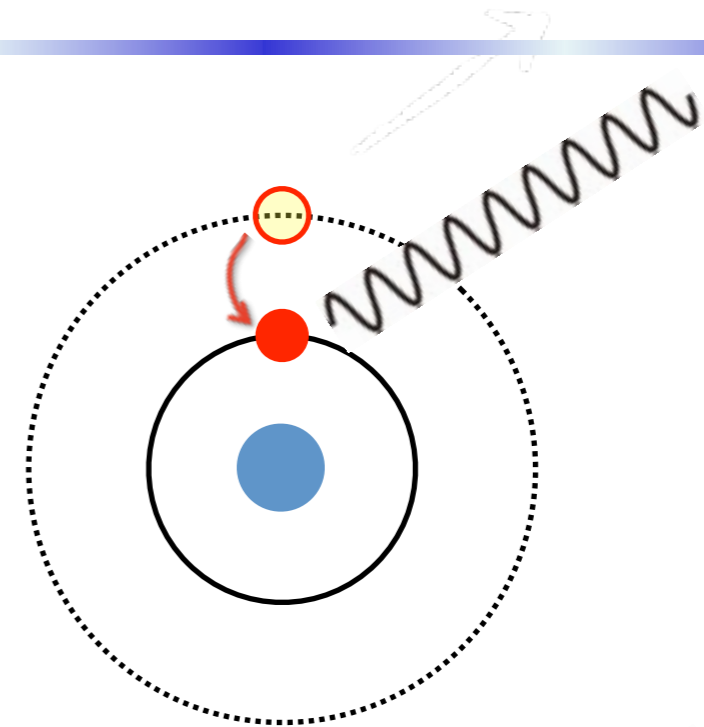
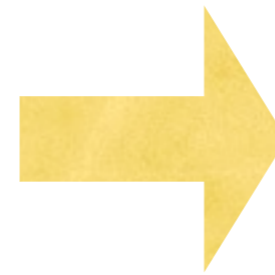
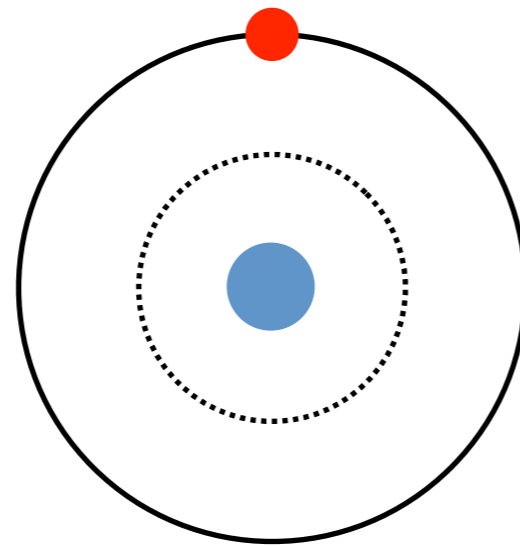
電子が原子の中で軌道を遷移すると光が発生する



光の放出は2種類ある

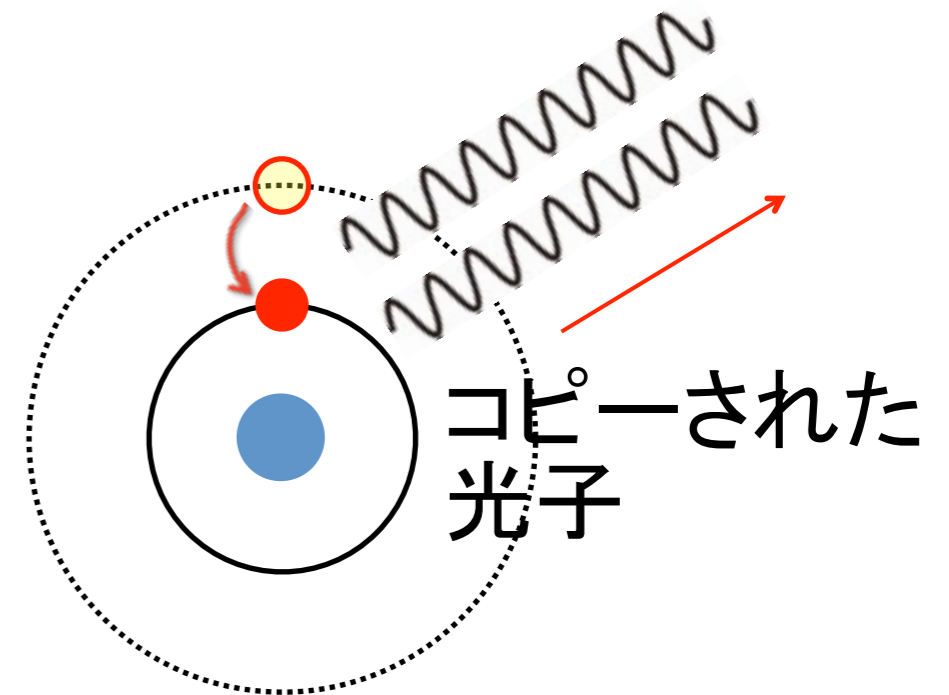
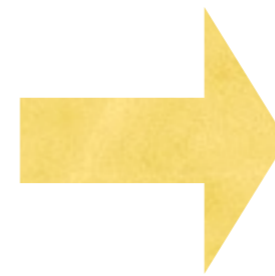
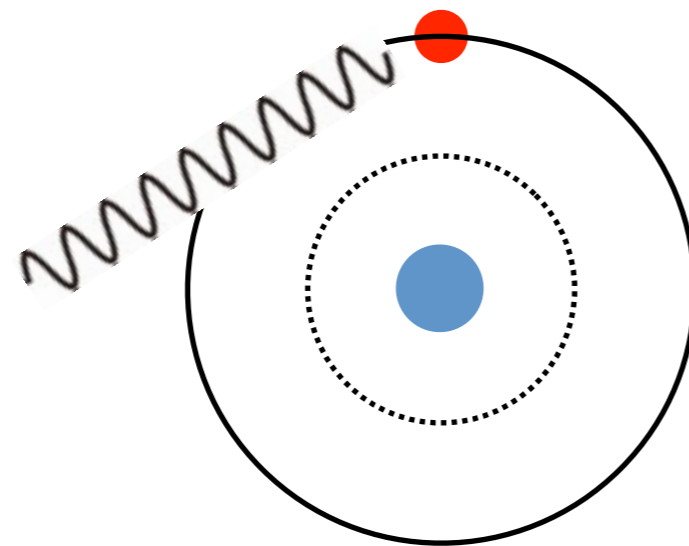
自然放出

勝手に光を出す



誘導放出

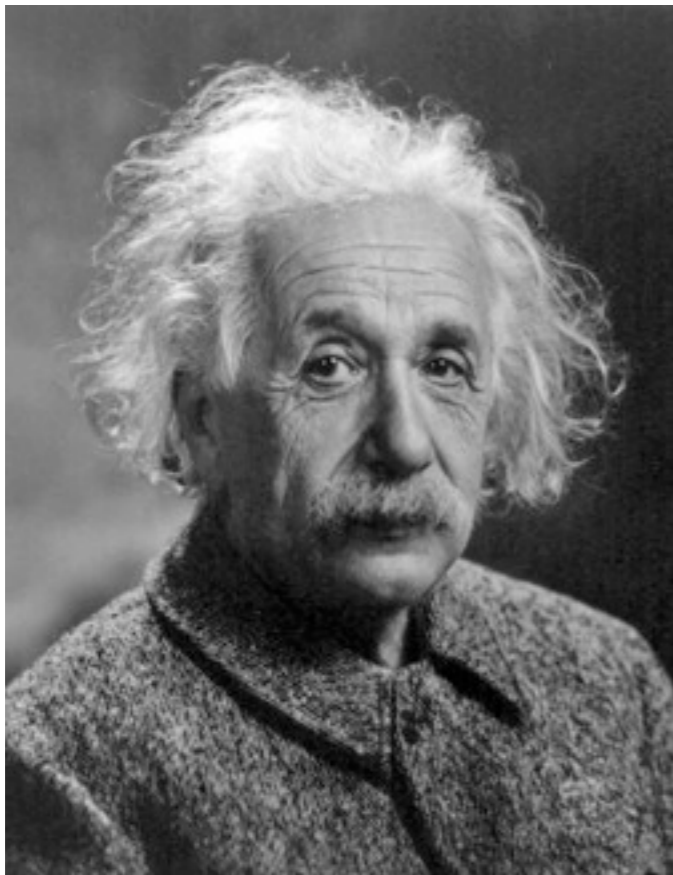
入ってくる光につられて光を出す



レーザー LASER

Light **A**mplification by **S**timulated
Emission of **R**adiation

誘導放出による光の増幅



誘導放出を理論的に予言したのは

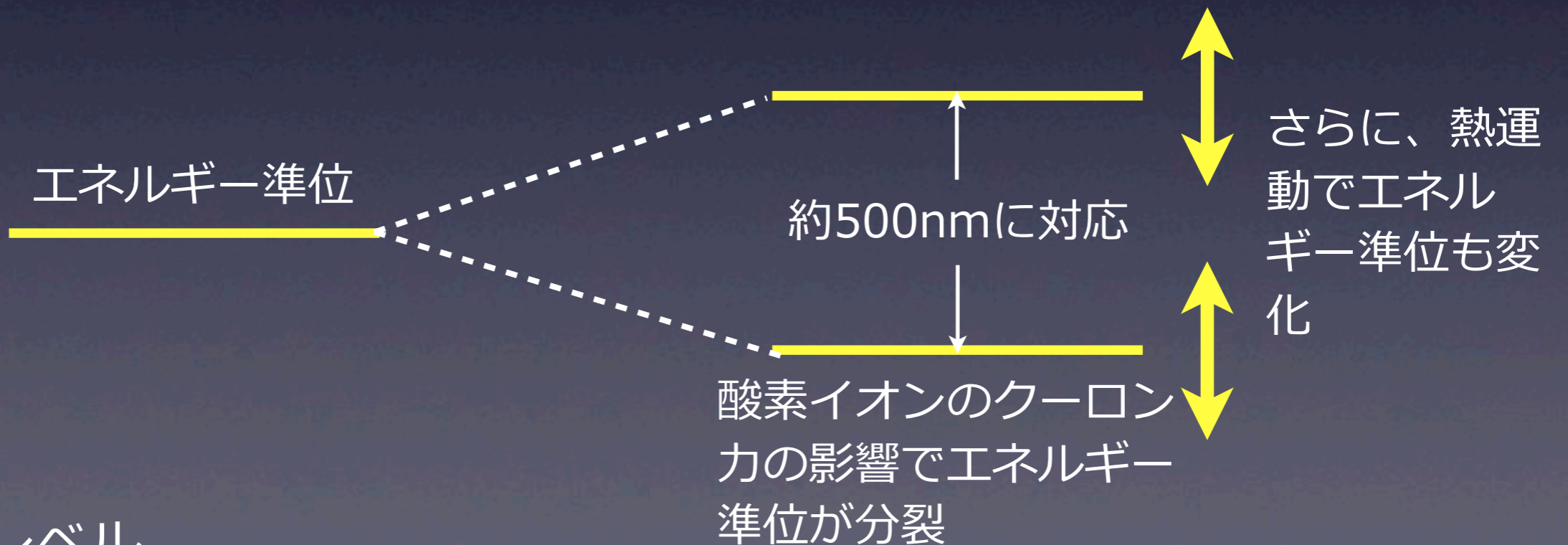
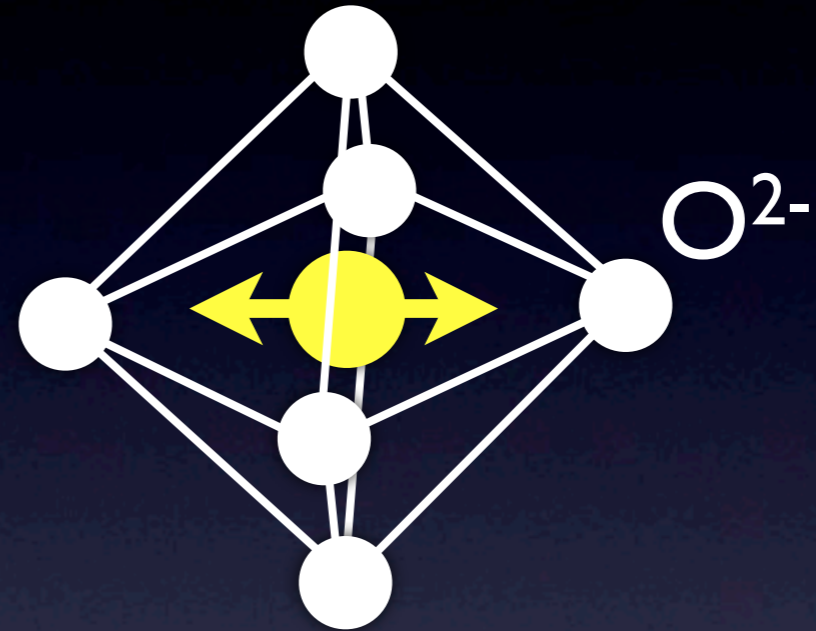
アインシュタイン

1916年

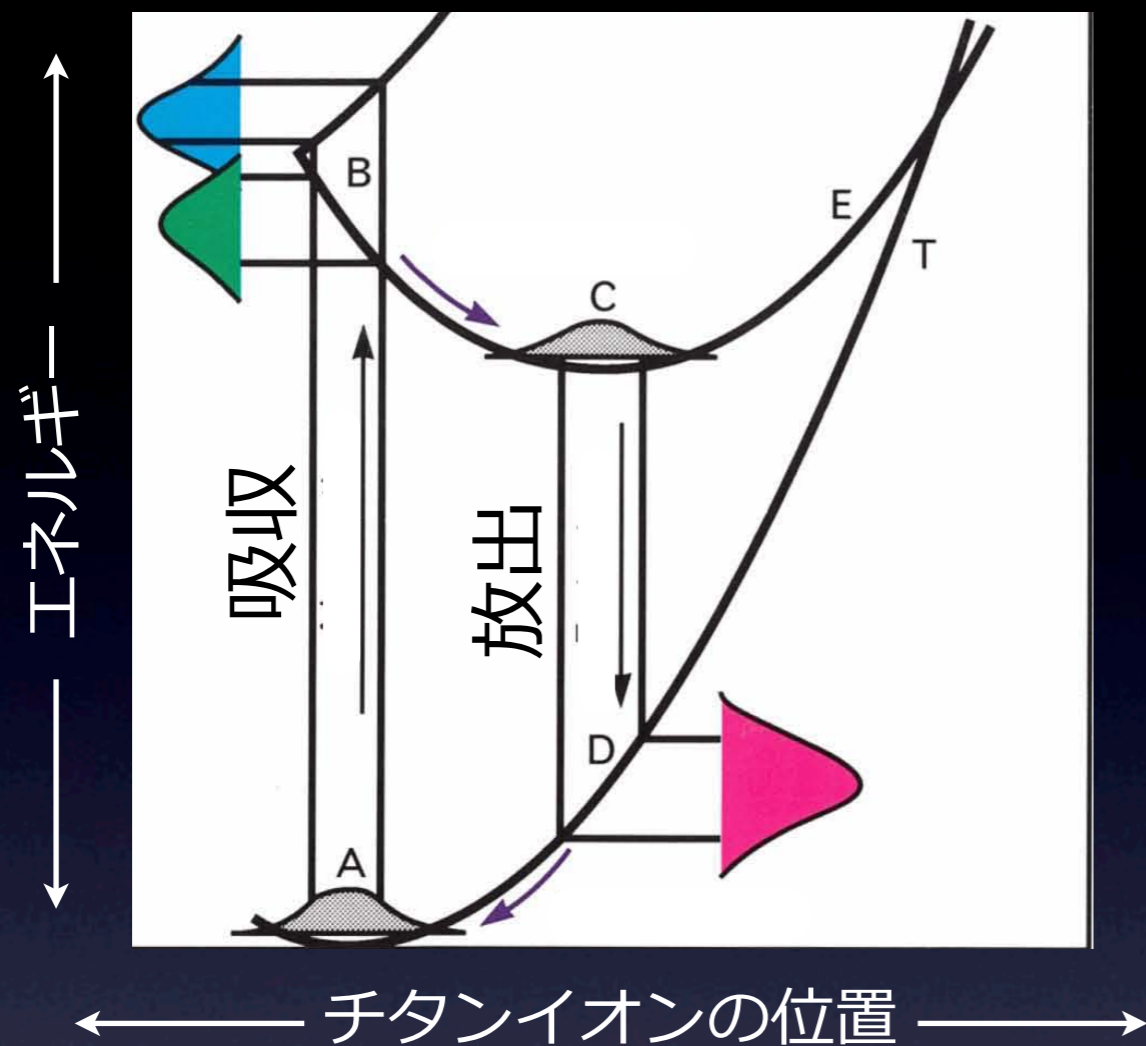
回りに何もな
い自由なチタ
ンイオン



サファイア中の
チタンイオン



※準位 = レベル



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。

Fig. 1 in
David W. Piston, John C. Long and Michael W.
Davidson, *Ti:Sapphire Mode-Locked Lasers*, Olympus
Microscopy Resource Center, Olympus America Inc.

<http://www.olympusmicro.com/primer/java/lasers/tsunami/index.html>

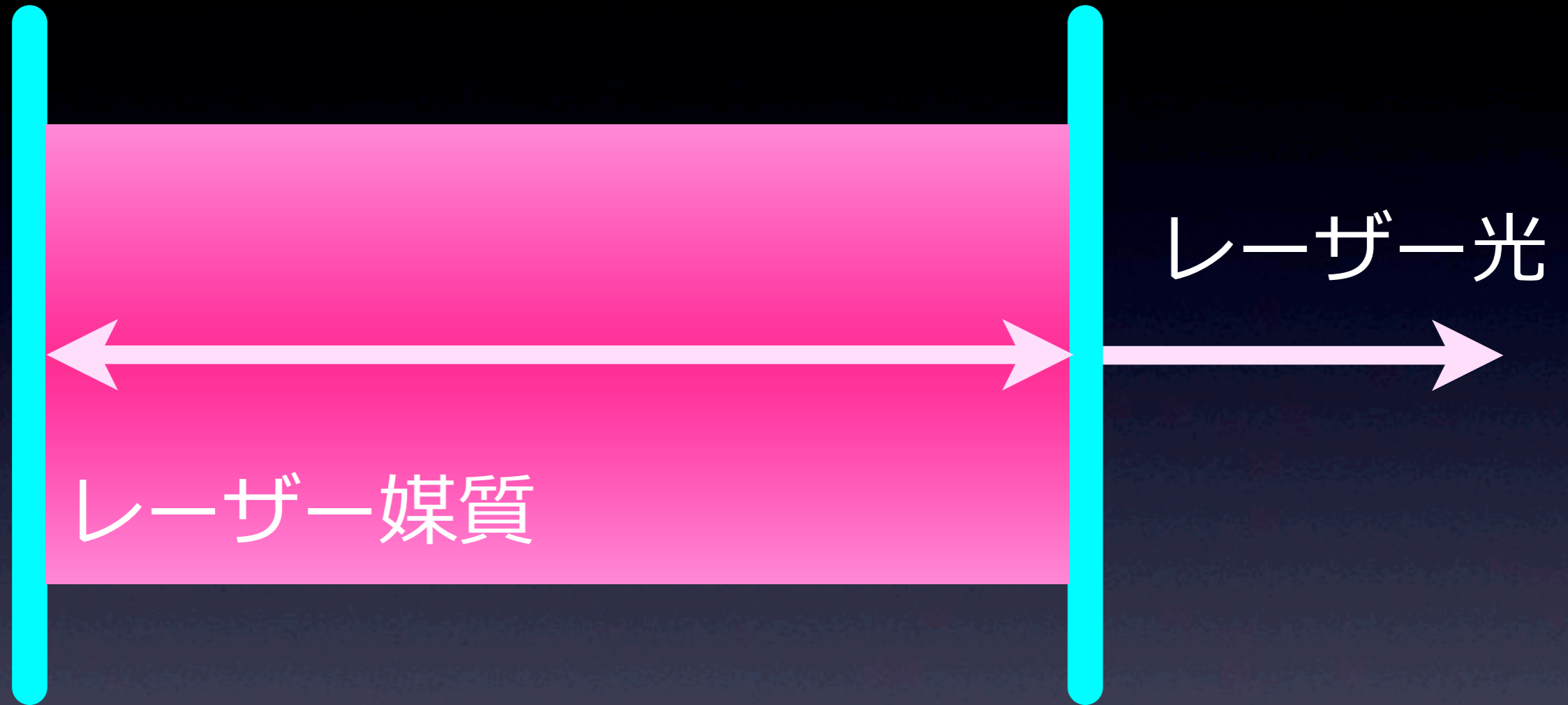
* Reprinted with permission of MIT Lincoln Laboratory, Lexington, Massachusetts

サファイア結晶中のチタンイオンは赤～赤外の
広い範囲の光を放出

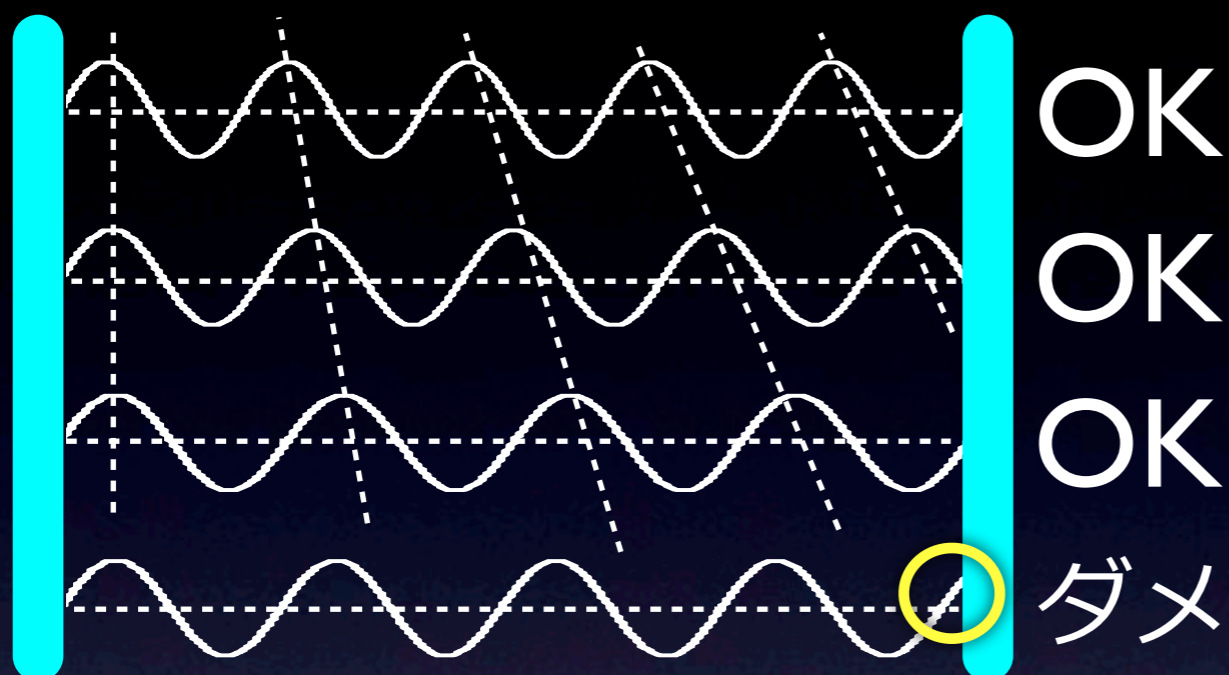
ところが、どんな波長でもレーザーとして使えるわけではない。

鏡

少しだけ光を通す鏡



効率よく光を増幅するため、レーザー媒質を
一対の鏡ではさみ、光を何往復もさせる



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。

Fig. 1 in
David W. Piston, John C. Long and Michael W.
Davidson, *Ti:Sapphire Mode-Locked Lasers*, Olympus
Microscopy Resource Center, Olympus America Inc.

<http://www.olympusmicro.com/primer/java/lasers/tsunami/index.html>

鏡の間にちょうど
おさまる波長の光
だけが発生できる

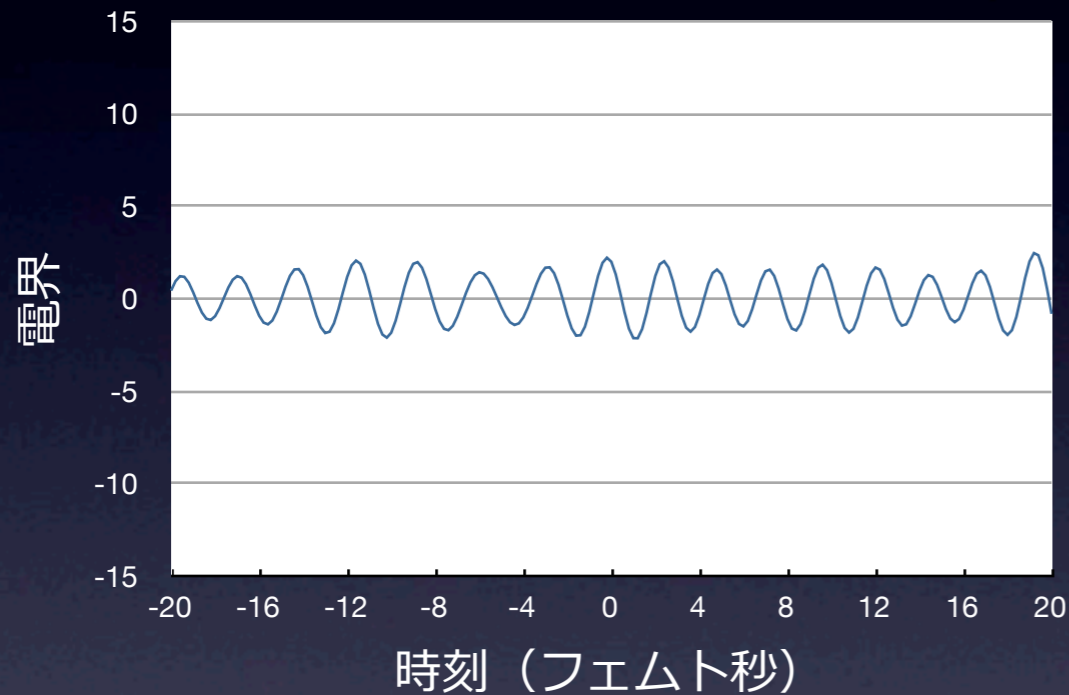


レーザーからは、
とびとびの波長が
まざった光が出て
くる。

とびとびの波長がまざるとどんな波になる？

色々な波長の位相が
ばらばらだと

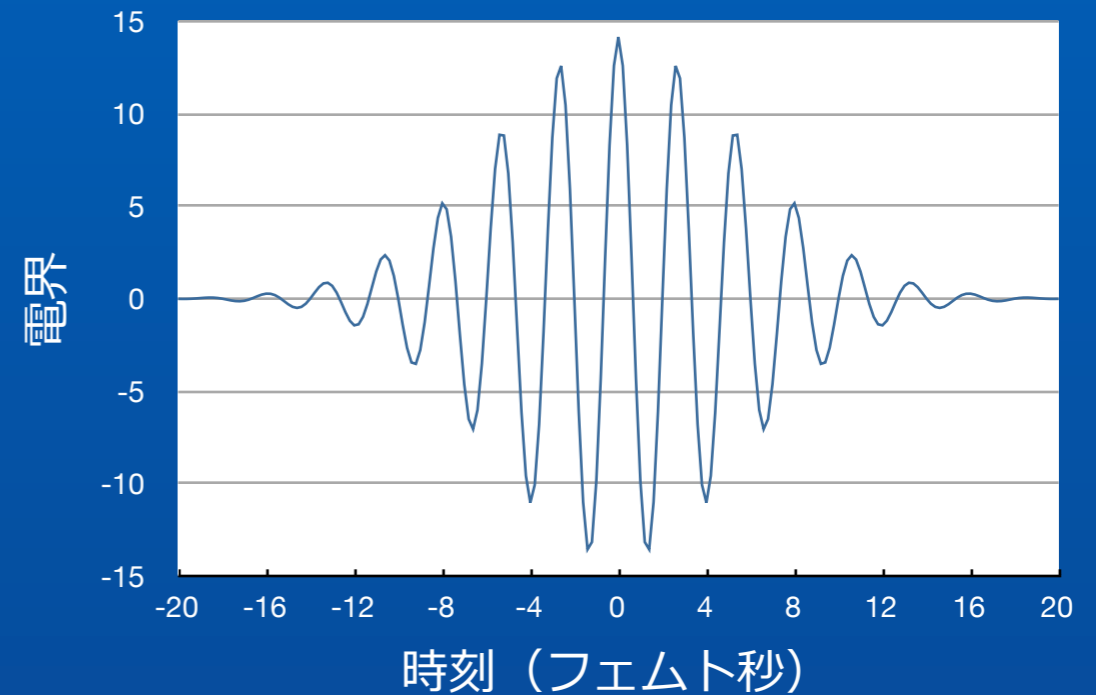
レーザーパルスの形



だらだらと長い
強度が低い

色々な波長の位相が
そろっていると

レーザーパルスの形

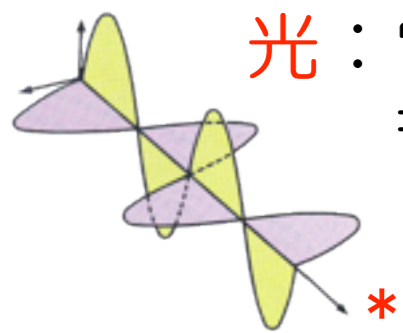


短い時間だけパルス状に光る
強度が強い

どうやってこちらだけを取り出すか？



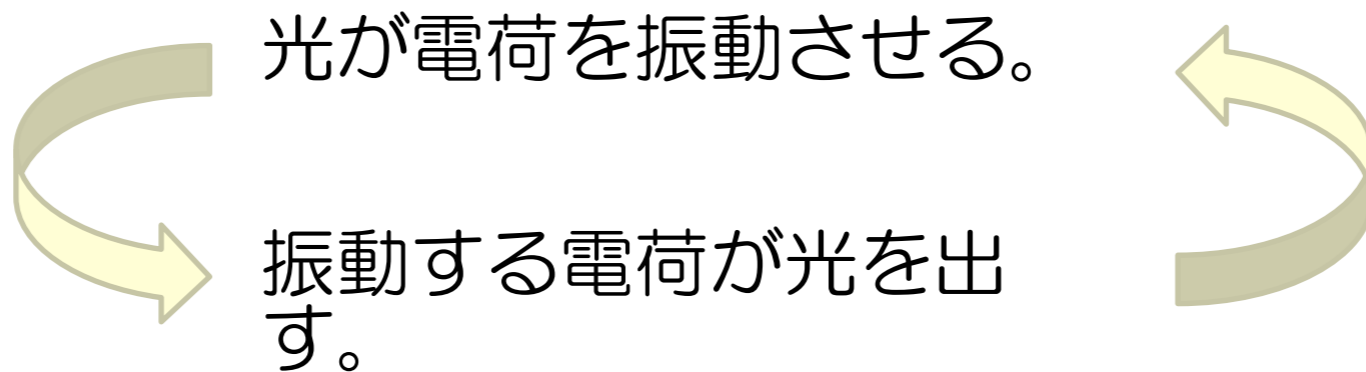
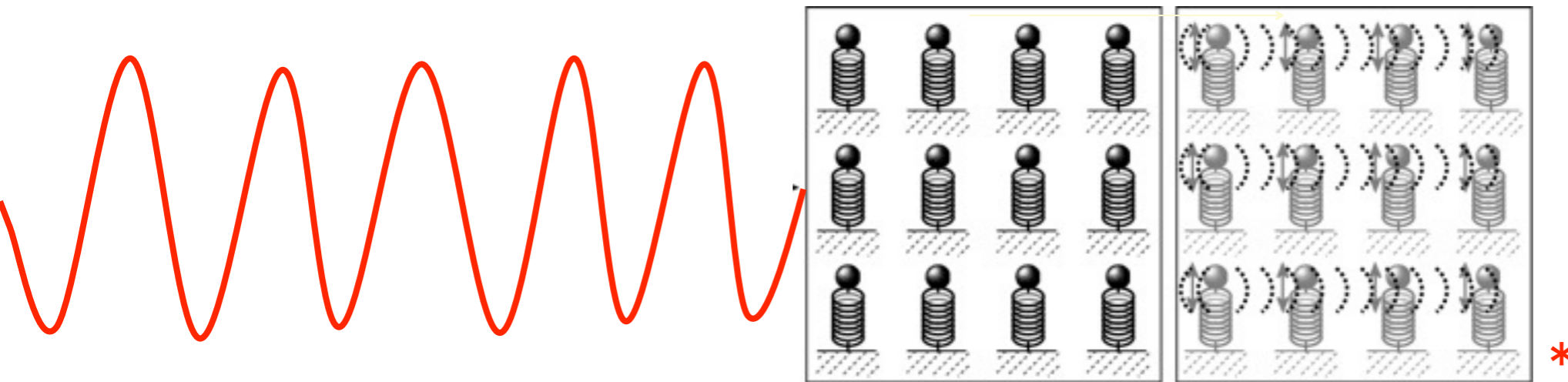
物質中を進む光



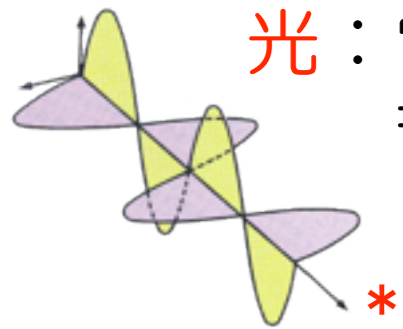
光：電磁場
=電荷を動かす力



物質：電荷をもった粒子
の集まり



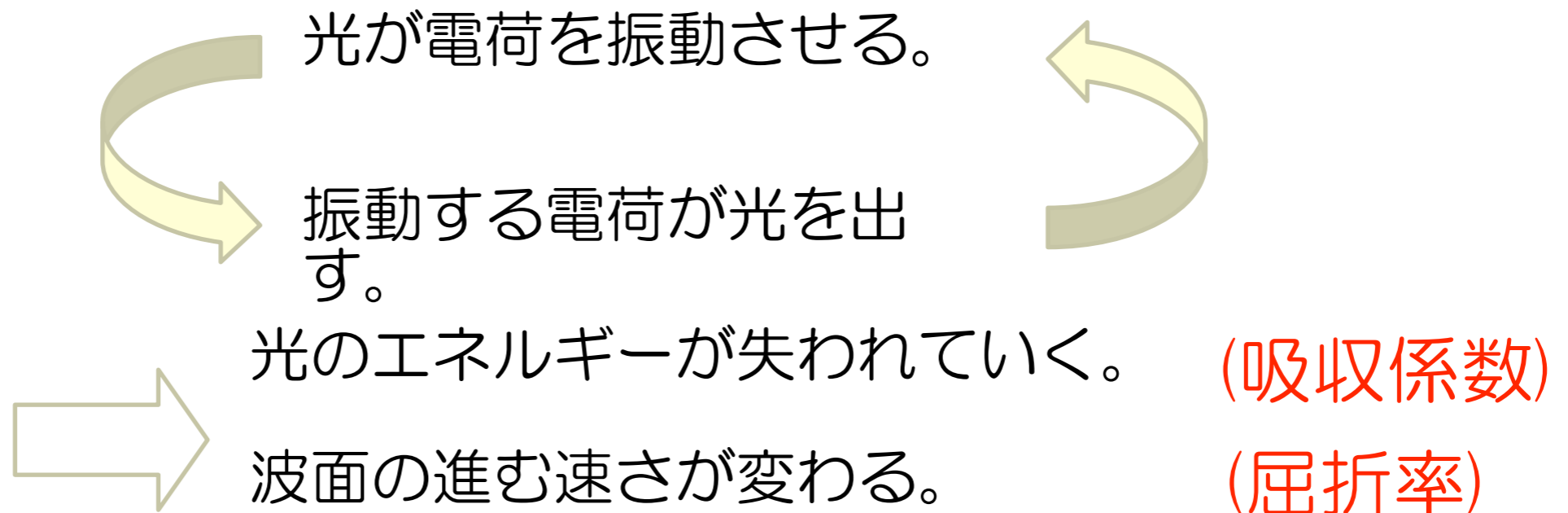
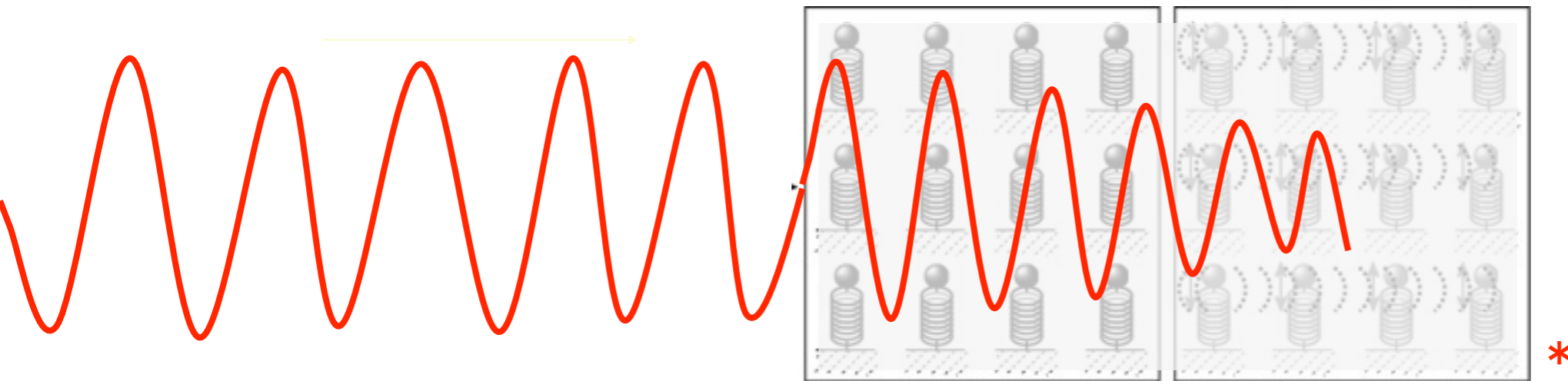
物質中を進む光



光：電磁場
=電荷を動かす力

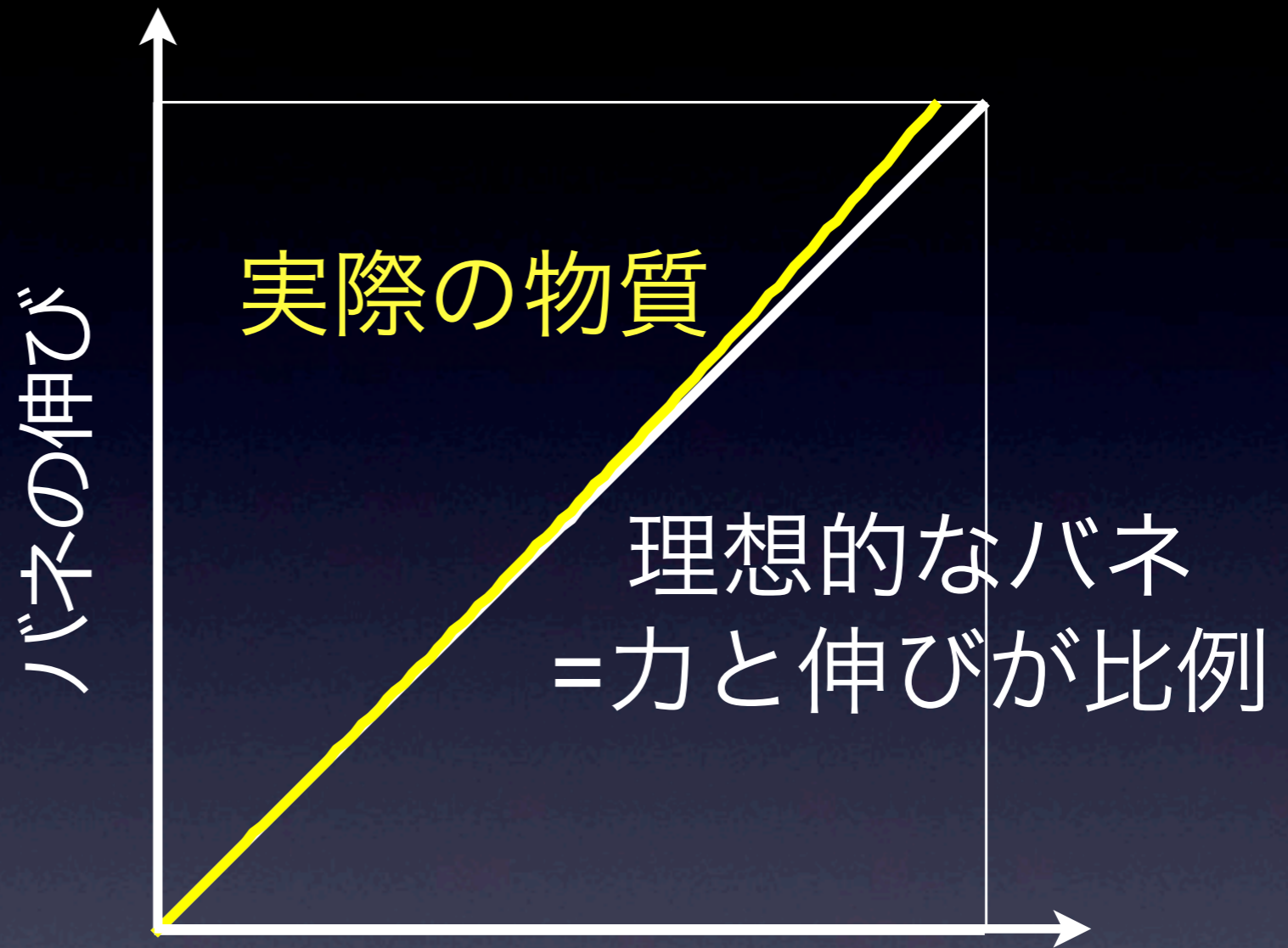
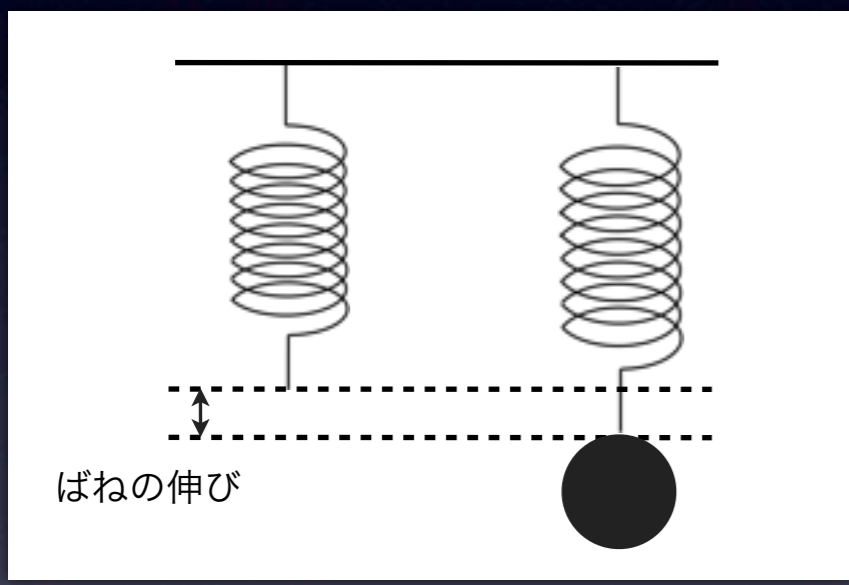
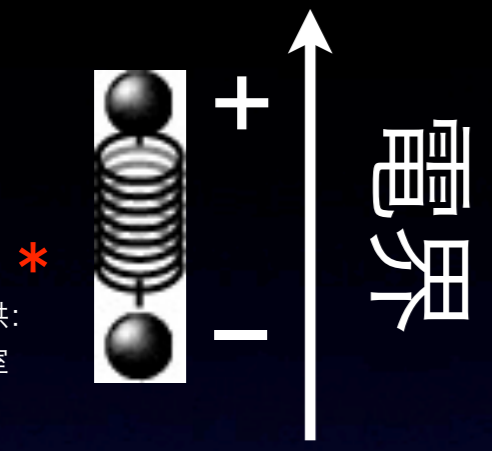


物質：電荷をもった粒子
の集まり



電界の強さとバネの伸びの関係

イラスト提供:
五神真研究室

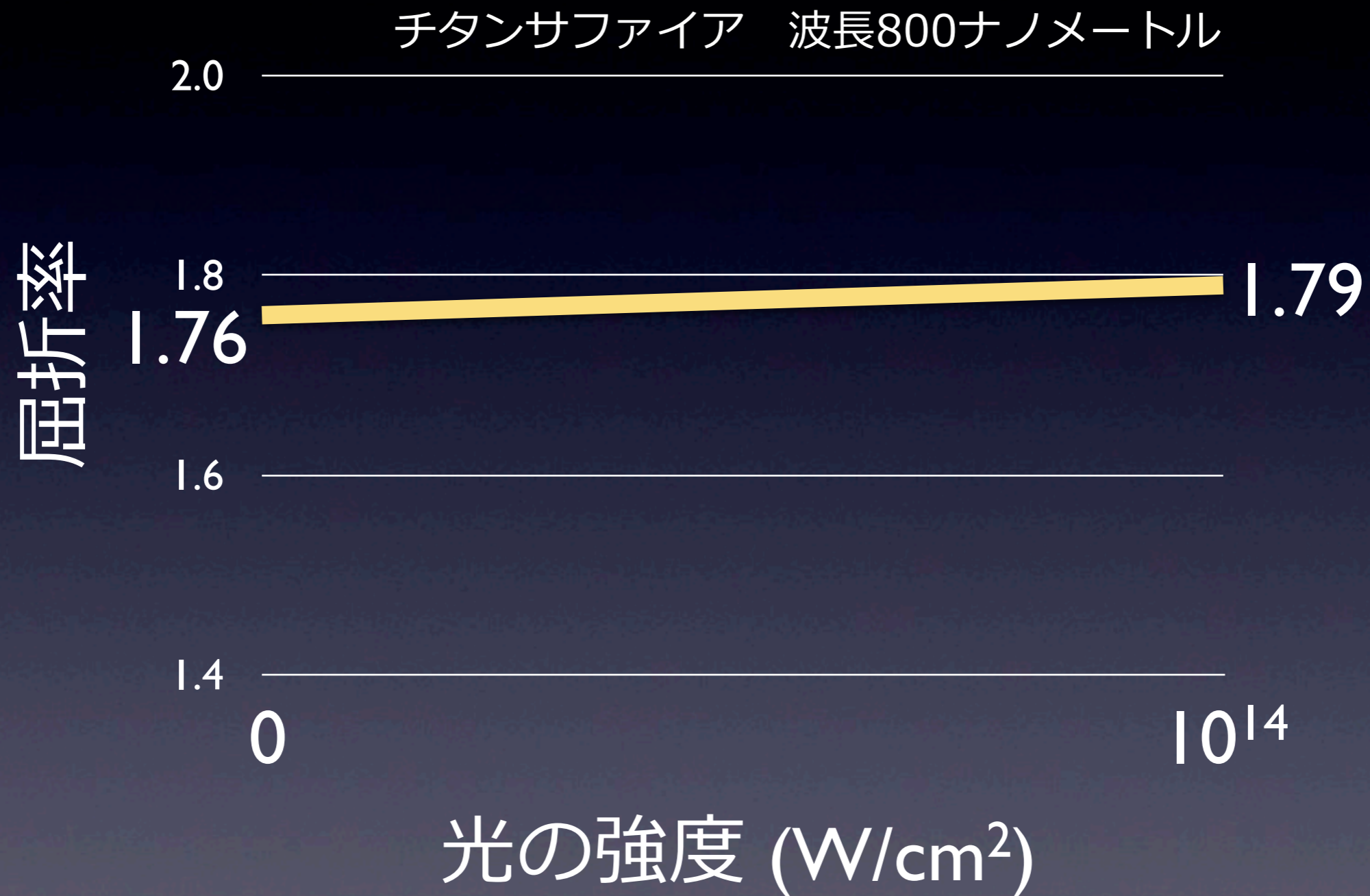


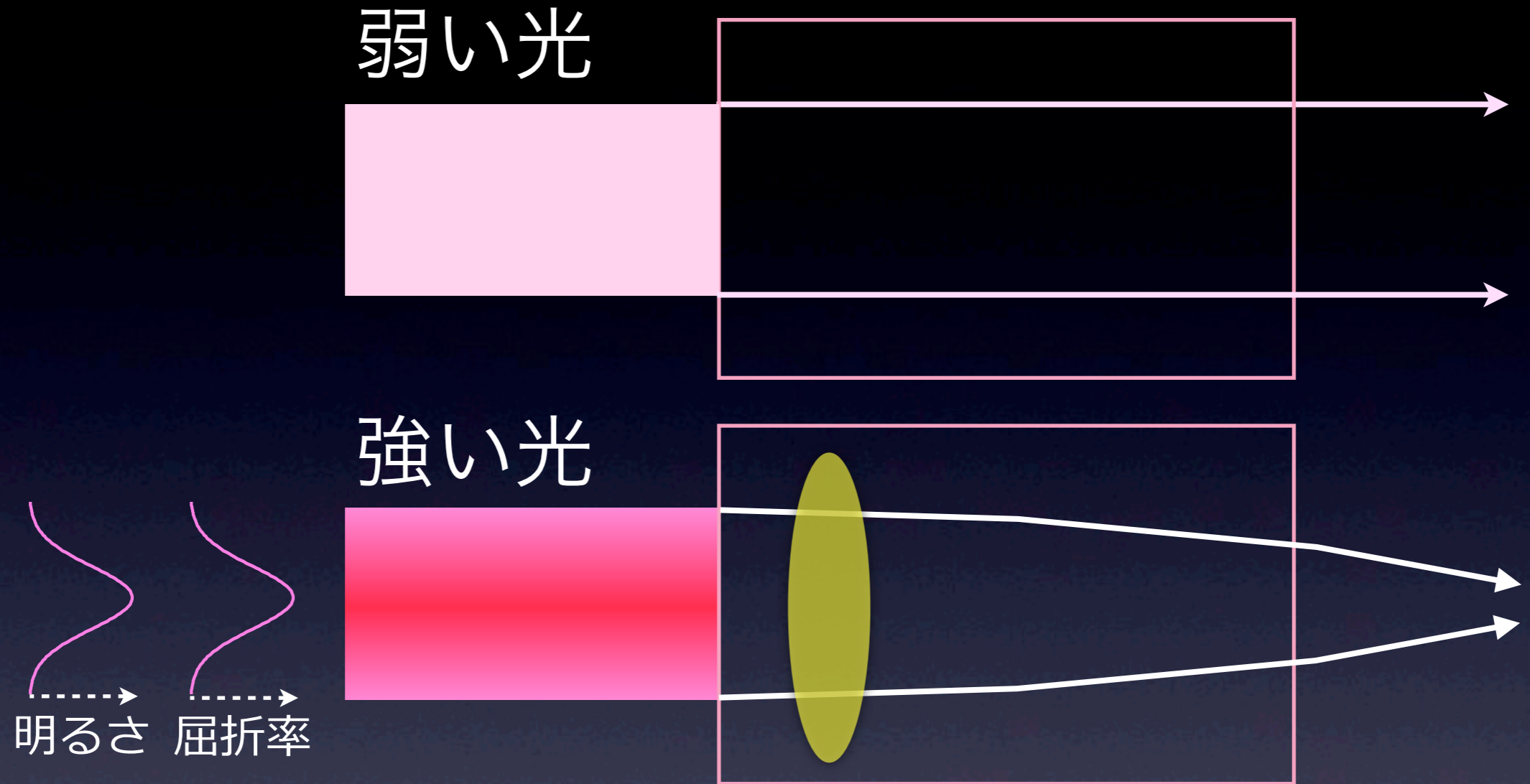
実際の物質では

力が弱いとき → 力が2倍になれば伸びも2倍

力が強いとき → 力が2倍になると伸びは2倍以上

光が強い（明るい）ほど、屈折率が大きくなる





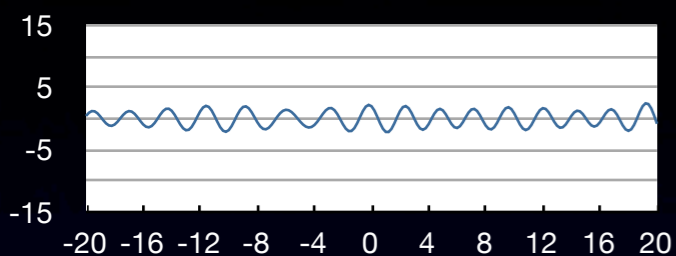
強いレーザー光は物質の中に凸レンズを作り、収束する（自己収束）

絞り

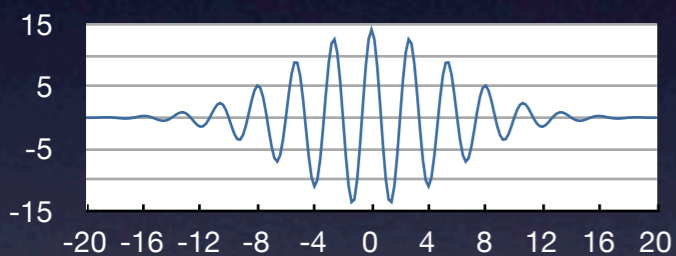
ブロックされる

通り抜ける！

弱い光



強い光



こっちだけがほしい

絞りをおくことで、短いパルスになっているレーザー光だけが得られる。

フェムト秒レーザー

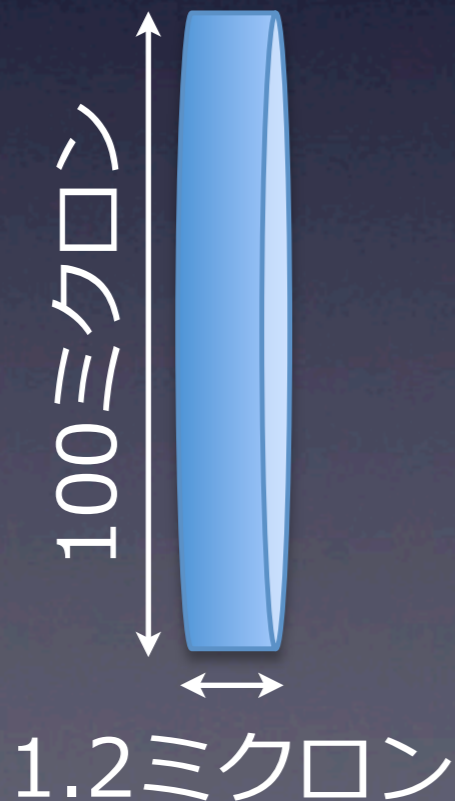
最短で約4フェムト秒だけ光るパルスが得られる

フェムト秒 = 10^{-15} 秒 = 1000兆分の1秒

1秒 : 1フェムト秒 = 3千万年 : 1秒

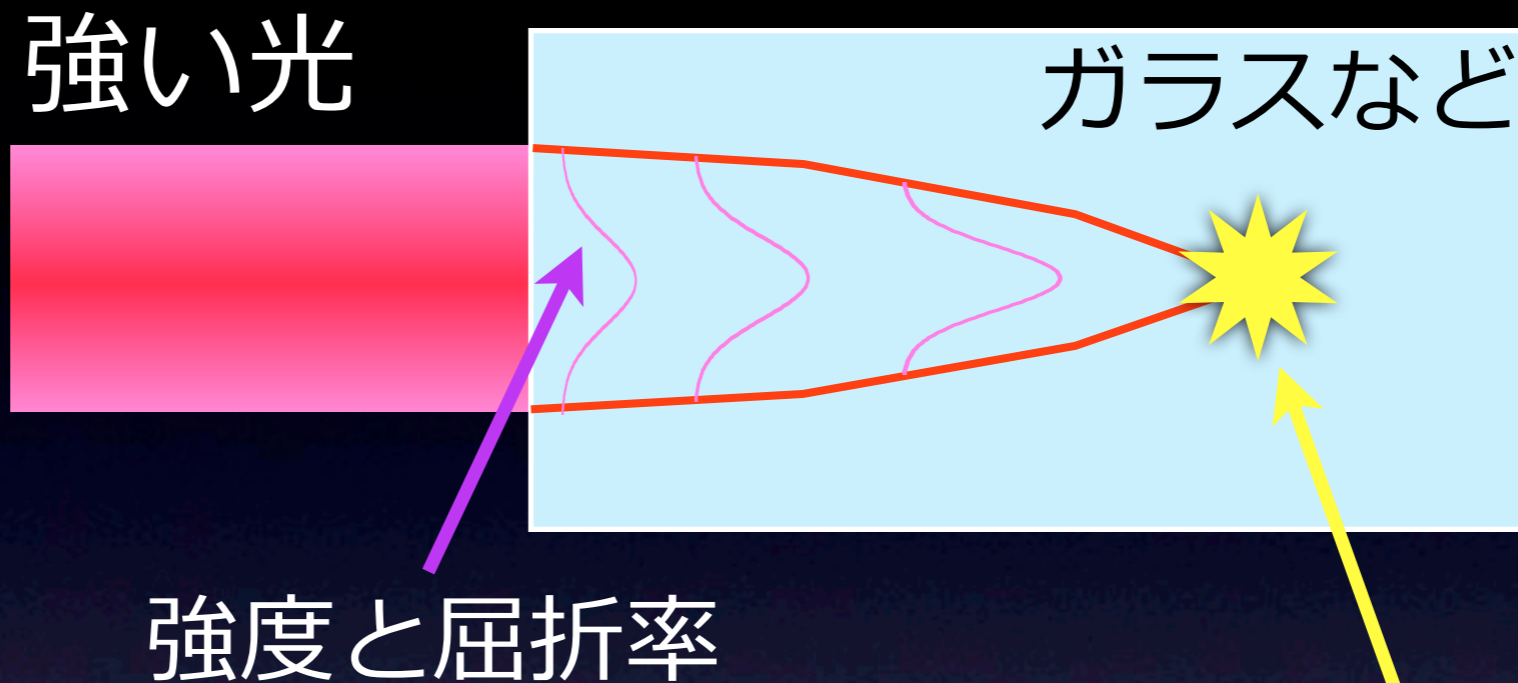
4フェムト秒 → 光が1.2ミクロンしか進めない

1ミクロン = 1000分の1ミリ



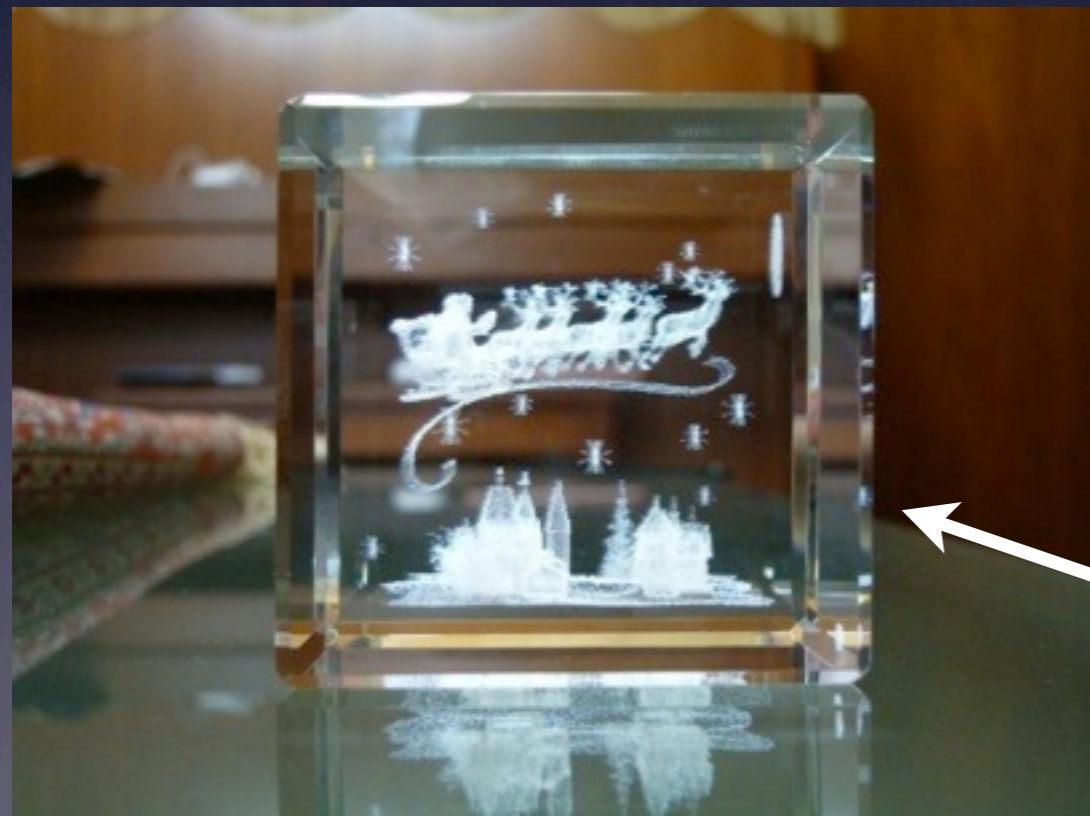
もはやレーザー**ビーム**で
はなくレーザーの**円盤**が
飛んでいくイメージ

ちょっと寄り道...



エネルギーが一点に集中

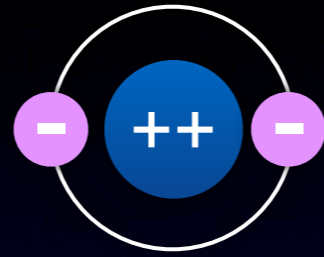
ガラスなどの内部
だけを加工できる



こういうのには
ナノ秒レーザーが使われる
(10^{-9} 秒 = 10億分の1秒)

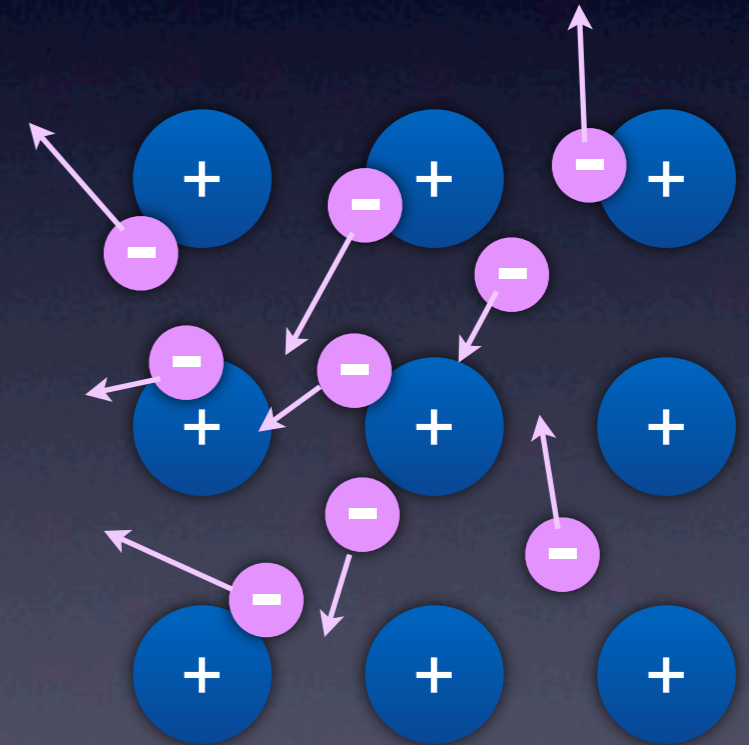
原子をイオン化

加速された電子が
他の原子に衝突



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

ナノ(10^{-9})秒たつと...



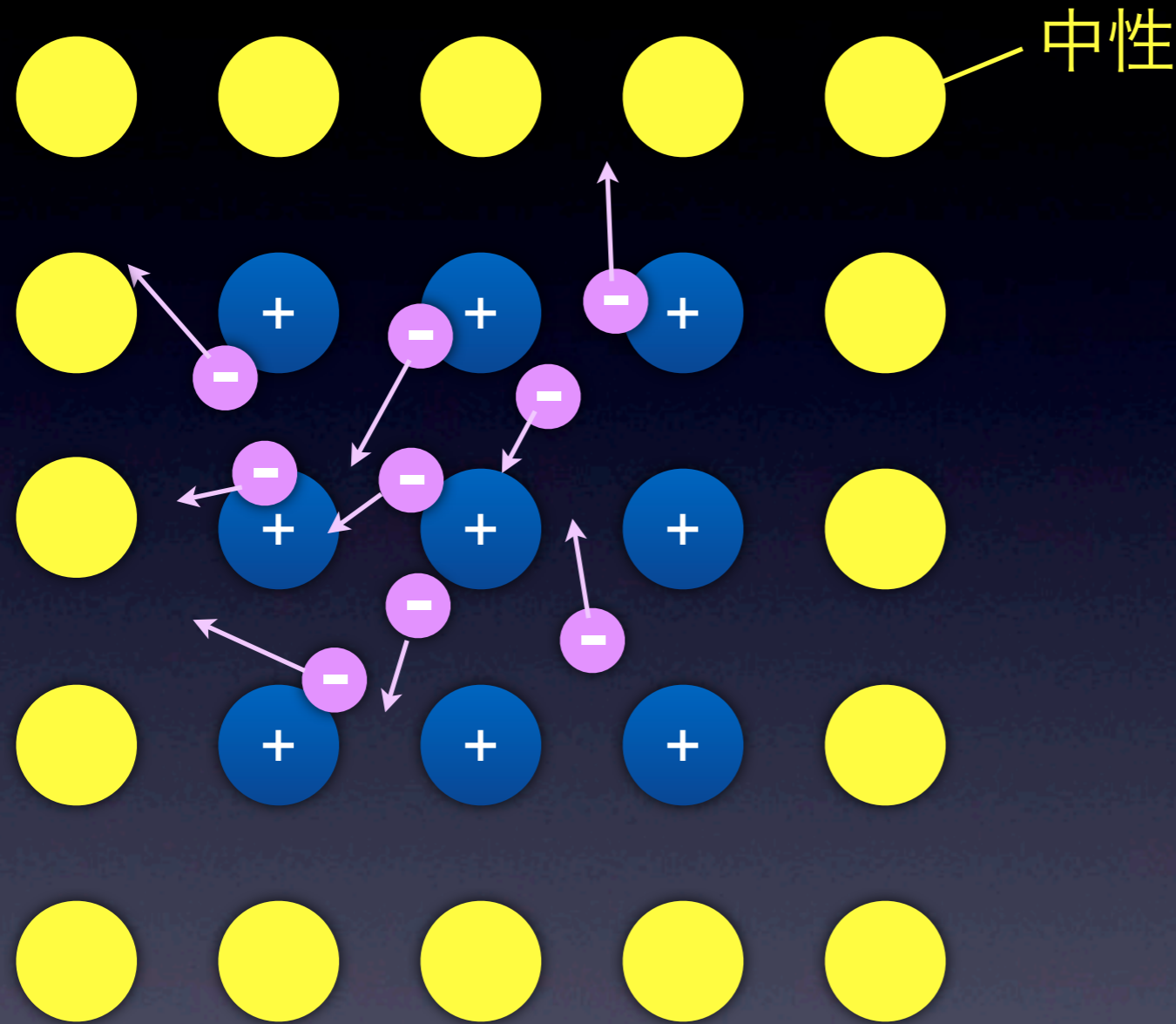
レーザー



複数の光子を
一気に吸って
イオン化

イオンが電子からエネルギーを受け取って不規則に動き出す→温度上昇→融解・ダメージ

100万倍短いフェムト(10^{-15})秒パルスを使うと



高エネルギーの
電子が飛びさる



プラスの電荷同士の
反発力で、イオンも
飛びさる

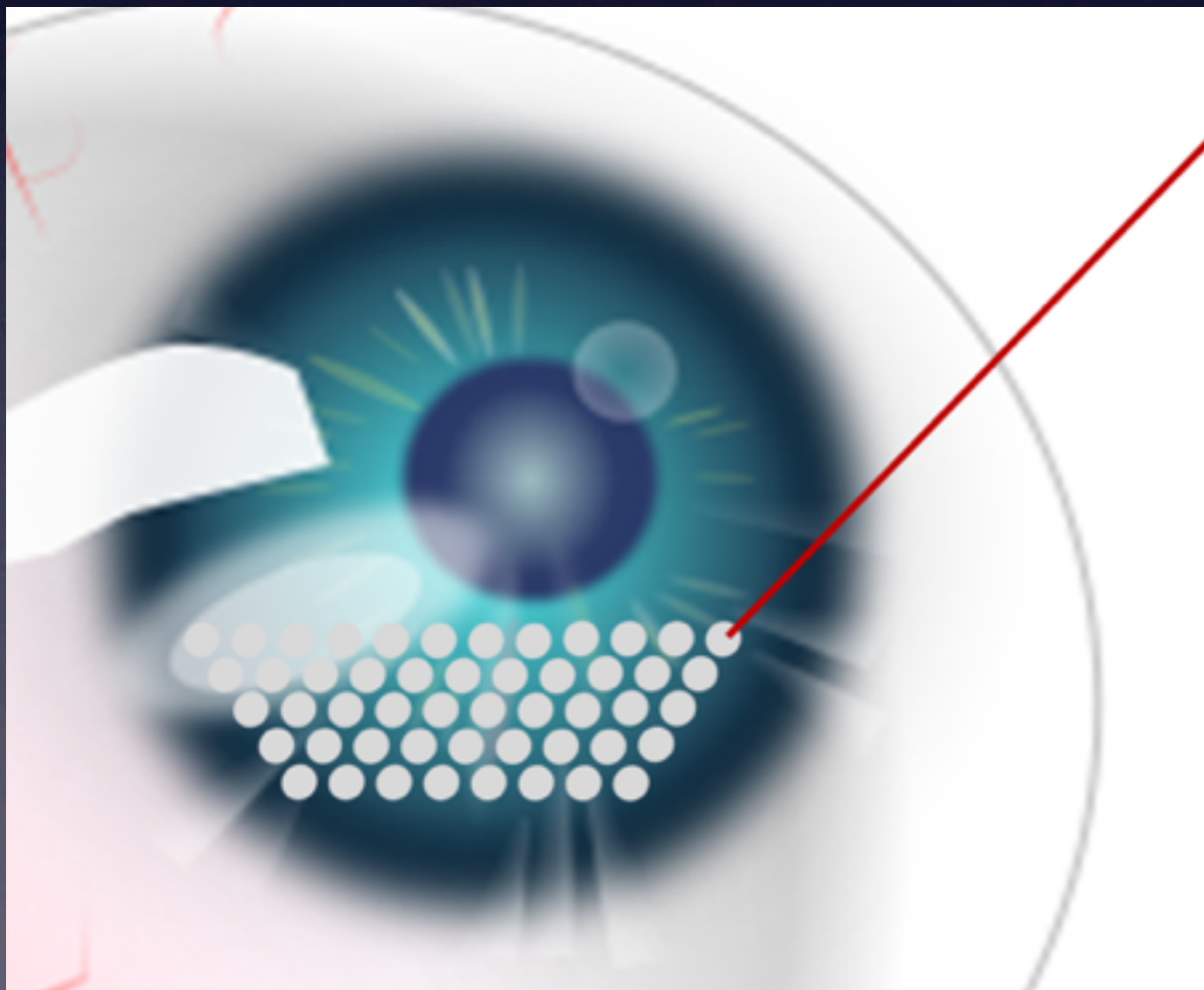


微細な空洞ができる

温度上昇が少ないので変性や融解がなく、
きれいに加工できる

フェムト秒レーザーを使えば温度上昇が少ない
ので、**傷つけることなく**きれいに加工できる

ナノメートルのスケールの微細加工に応用され
ている



(他の例)

レーシック (近視の
レーザー手術) での
フラップ作成にも使
われている。

こんなにも高速度の
シャッター・ストロ
ボで科学者が見たい
ものは？

色と光

光の3原色 (RGB)

赤

緑



青

提供：五神真研究室



提供：井上慎先生

色の3原色

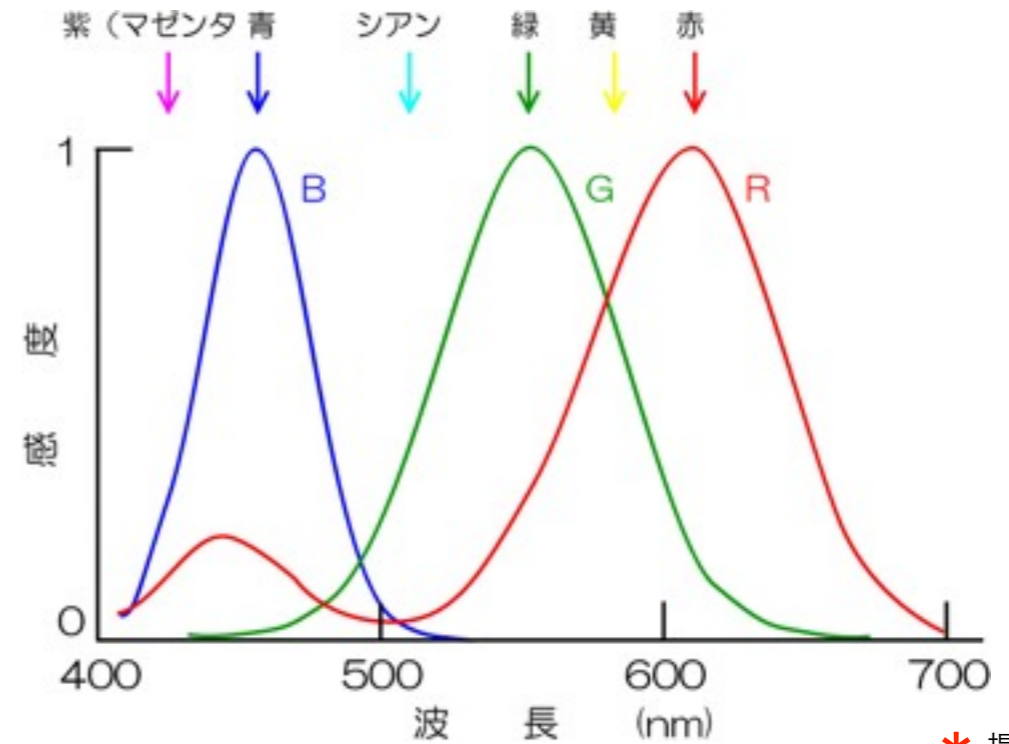
シアン

マゼンタ



黄

提供：五神真研究室

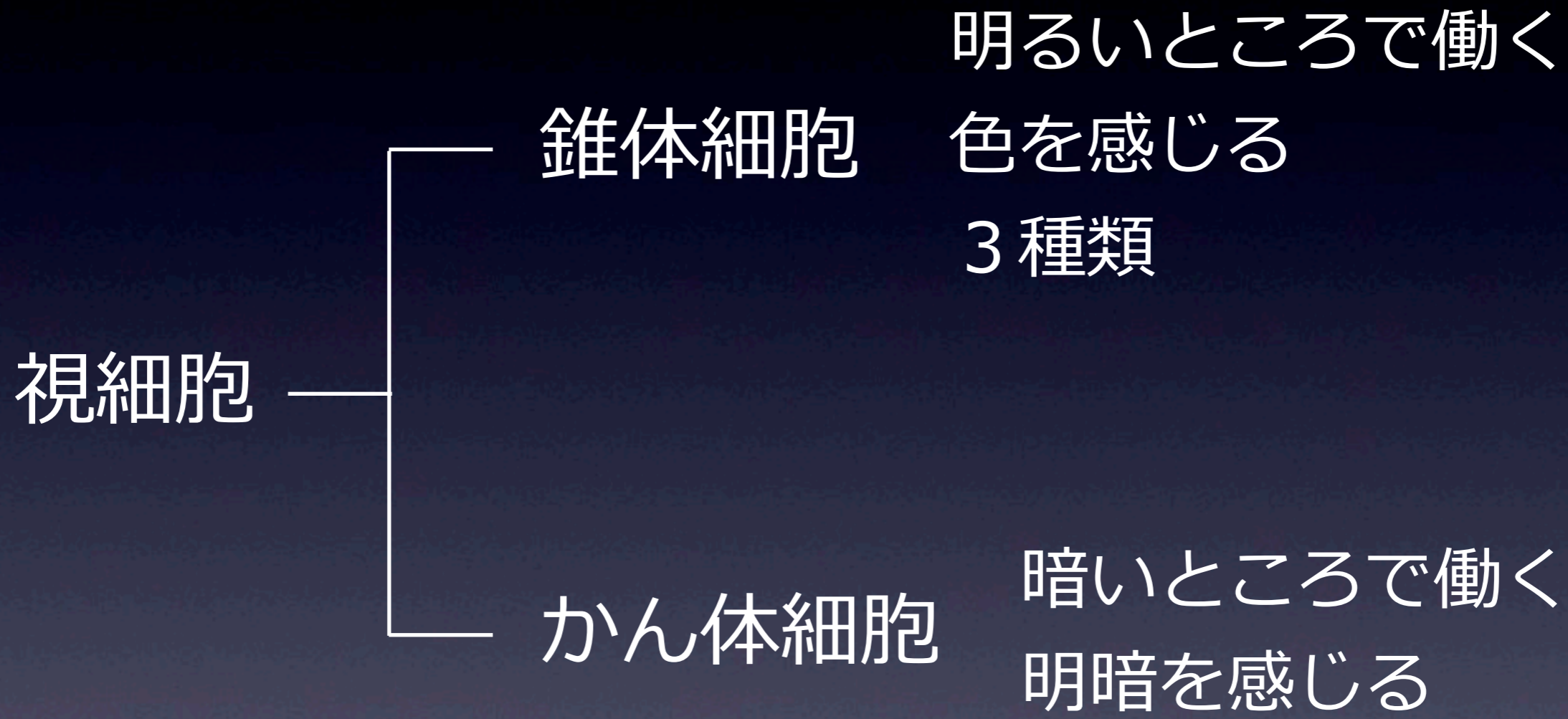


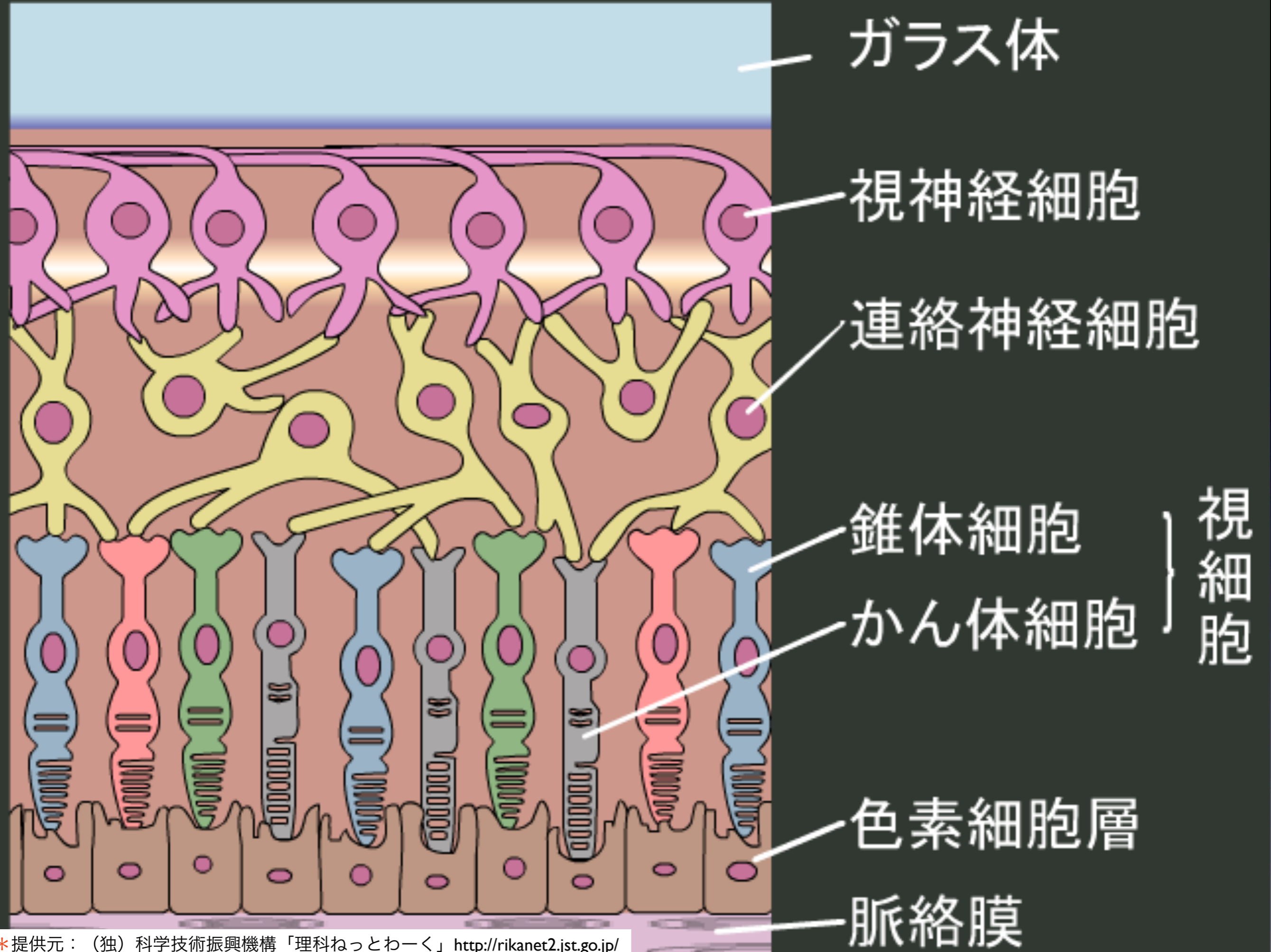
* 提供：五神真研究室

なぜ3つ？

光の性質ではなく、

目の性質





ガラス体

視神経細胞

連絡神経細胞

錐体細胞

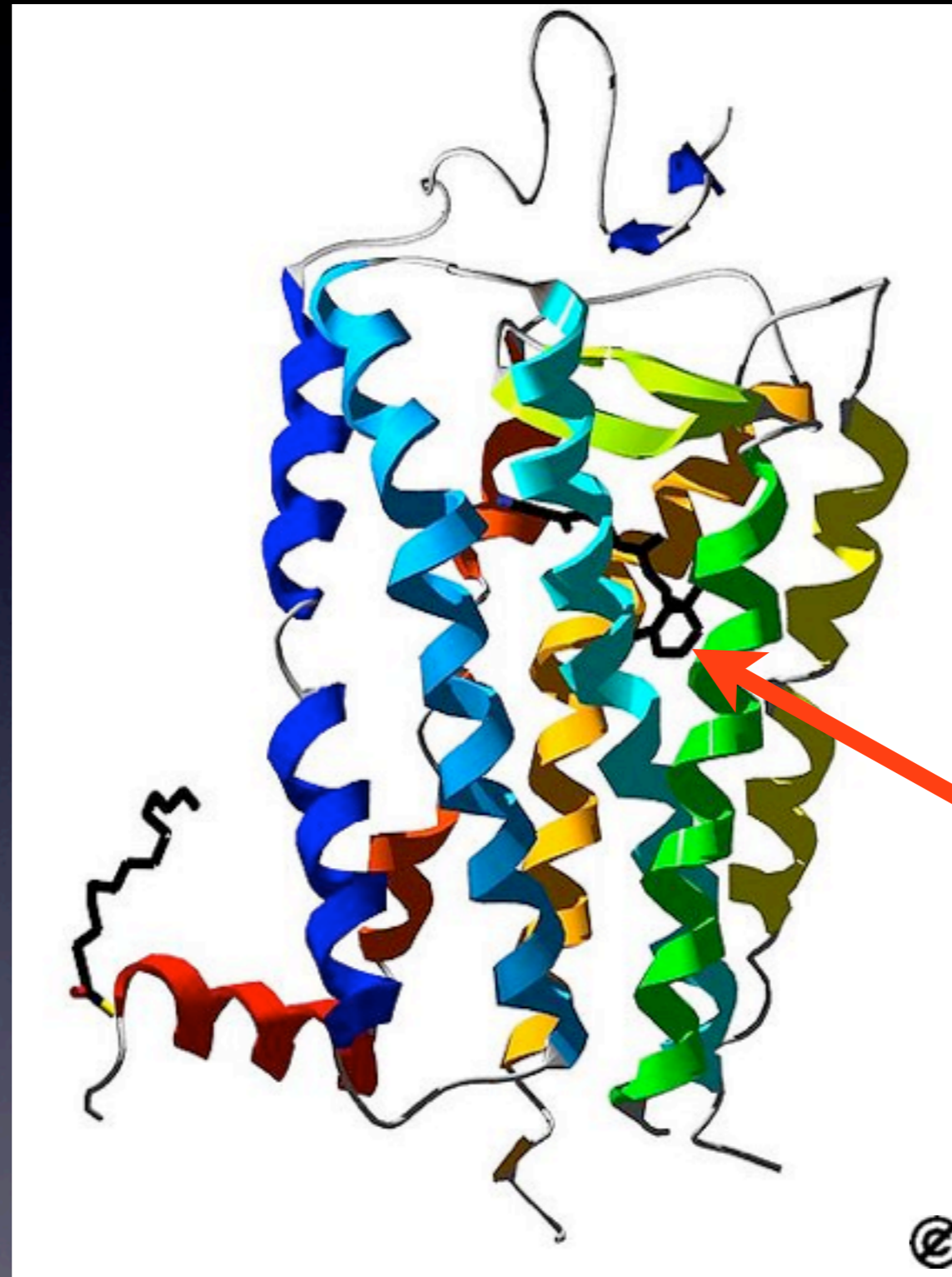
桿体細胞

視細胞

色素細胞層

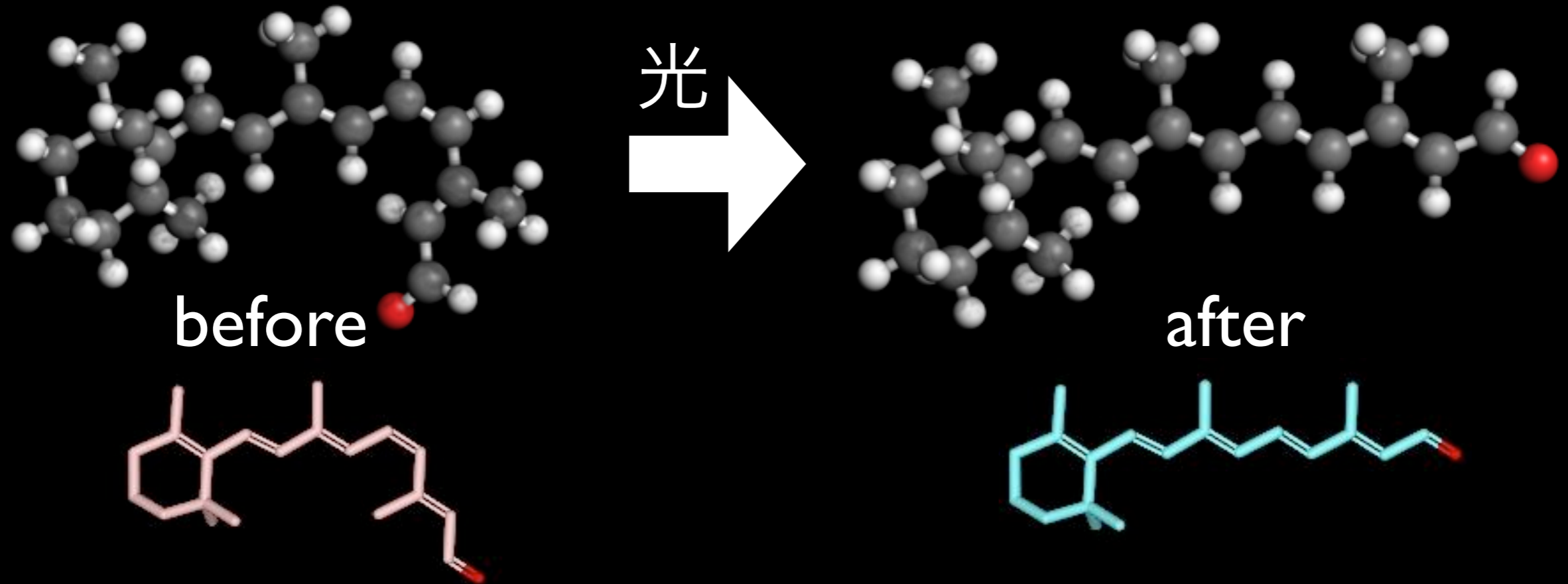
脈絡膜

がん体細胞の光受容タンパク…ロドプシン

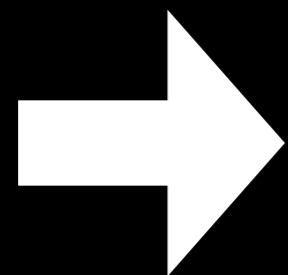


レチナール

レチナールが光を吸収すると変形することで、
かん体細胞は光を感知する



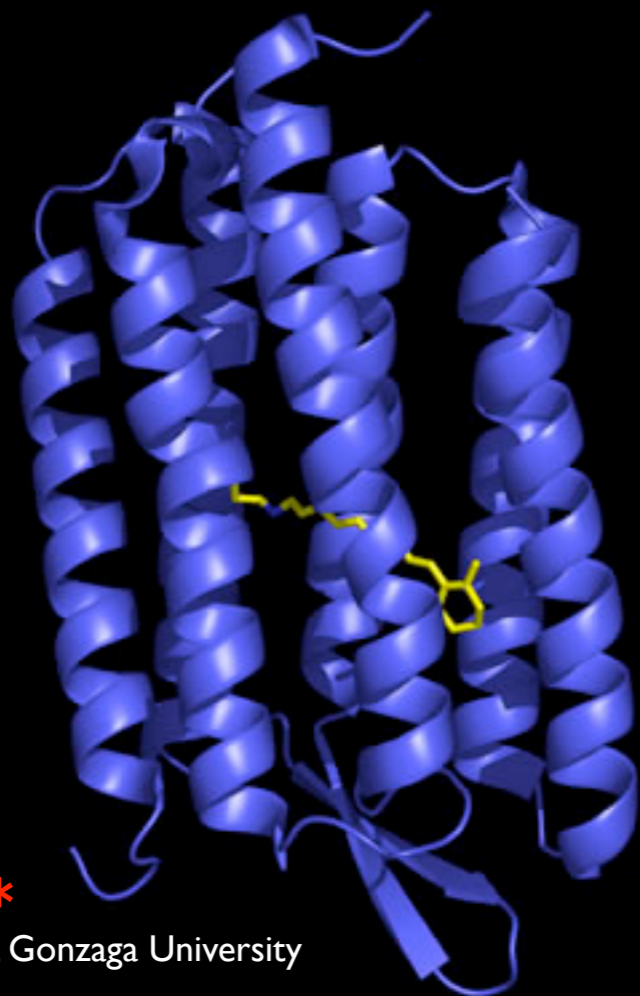
途中の状態はどうなってる？



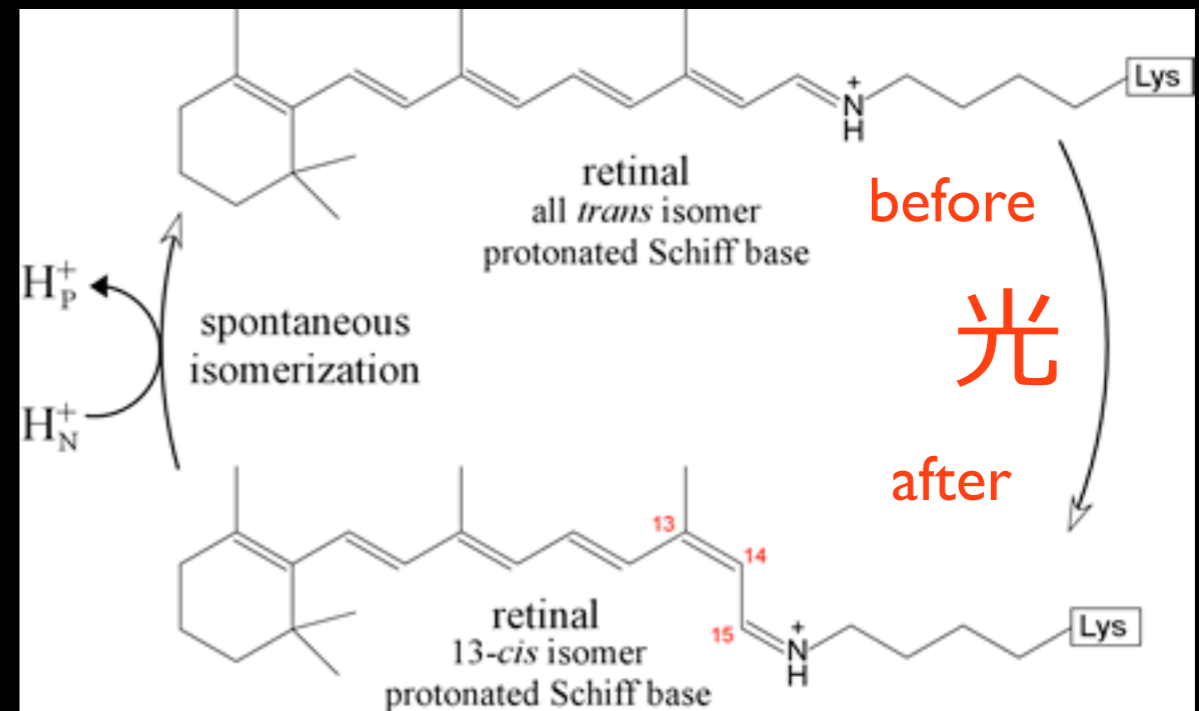
フェムト秒レーザーで調べたいが、ヒトの
視細胞を使うのはちょっと大変

似たようなものに バクテリオロドプシン

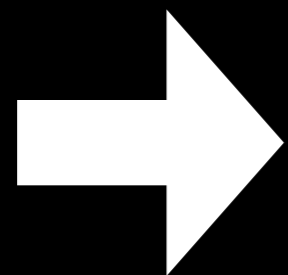
光エネルギーを利用して水素イオンを細胞膜の内から外へ輸送する
光合成色素（高度好塩菌が持っている）



レチナール



途中の状態はどうなってる？

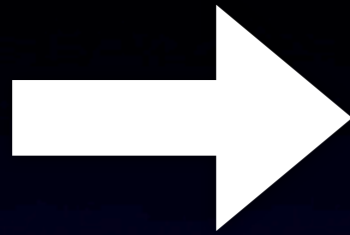


フェムト秒レーザーで調べる

小林孝嘉元東大教授の研究を紹介

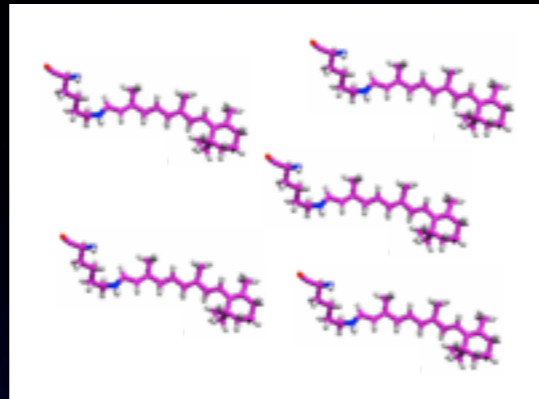
レチナール

フェムト秒レーザー



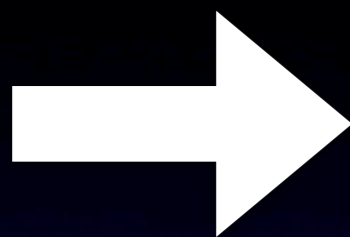
4.7 fs

fs = フェムト秒



*
©1994-2013 by the
University of Illinois
Board of Trustees
and others

フェムト秒レーザー



4.7 fs

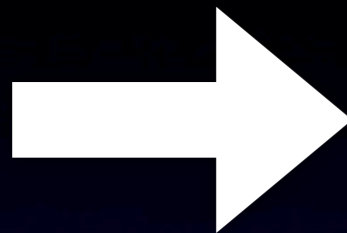
fs = フェムト秒

光子を吸収した
レチナール
たち

よ〜いドン！
スタートをそろえる

変形中

フェムト秒レーザー



4.7 fs

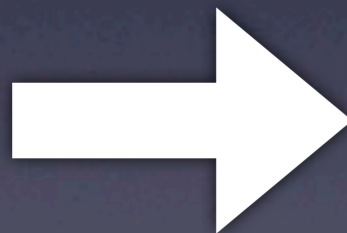
fs = フェムト秒

Δt フェムト秒後

光子を吸収した
レチナール
たち



フェムト秒レーザー



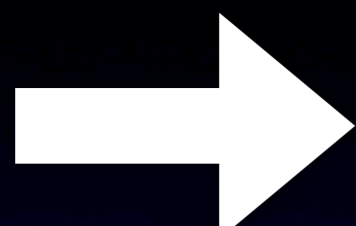
検査用
4.7 fs

変形途中のレ
チナールたち



吸収率
を測定

フェムト秒レーザー



4.7 fs

fs = フェムト秒

Δt フェムト秒後

光子を吸収したレチナールたち



フェムト秒レーザー

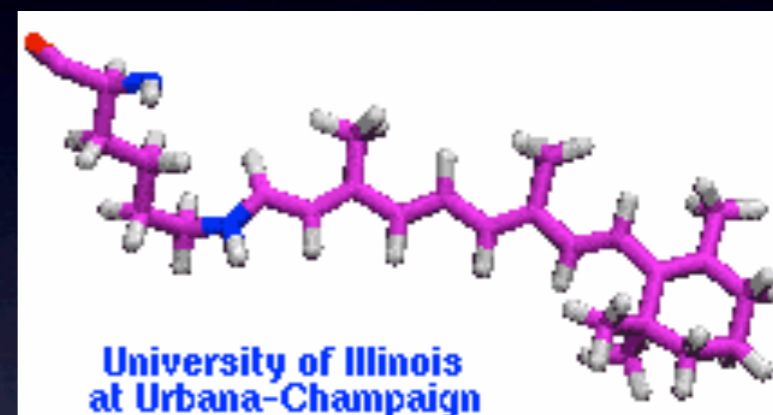


検査用
4.7 fs

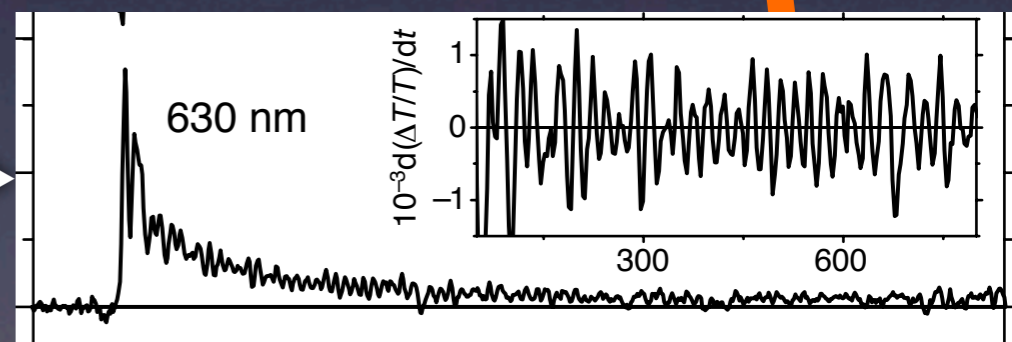
変形途中のレチナールたち



吸収率を測定

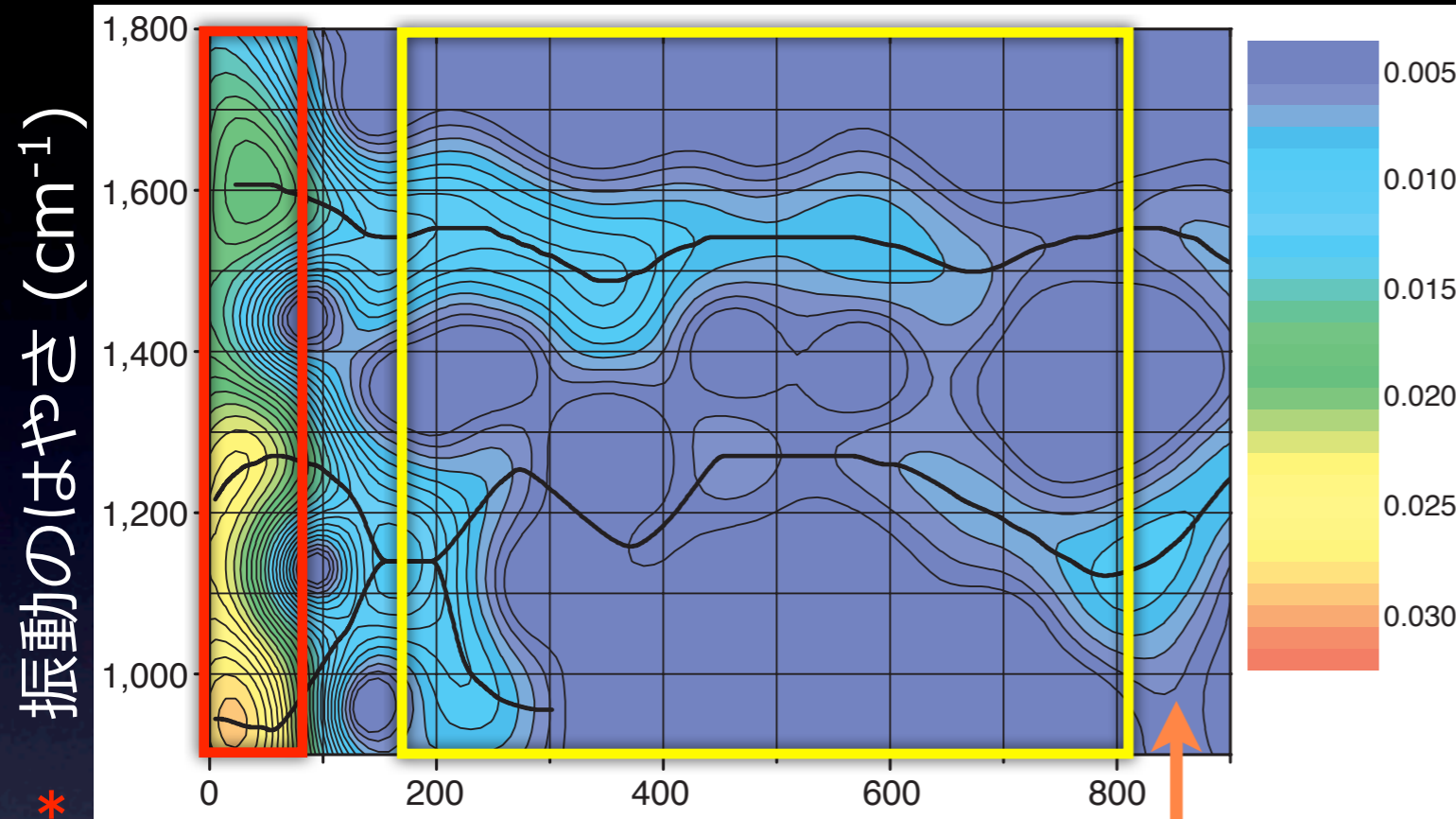


原子同士の結合の振動



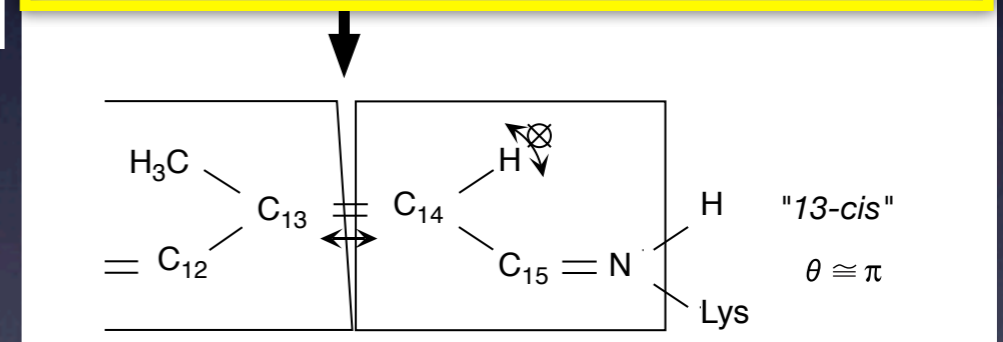
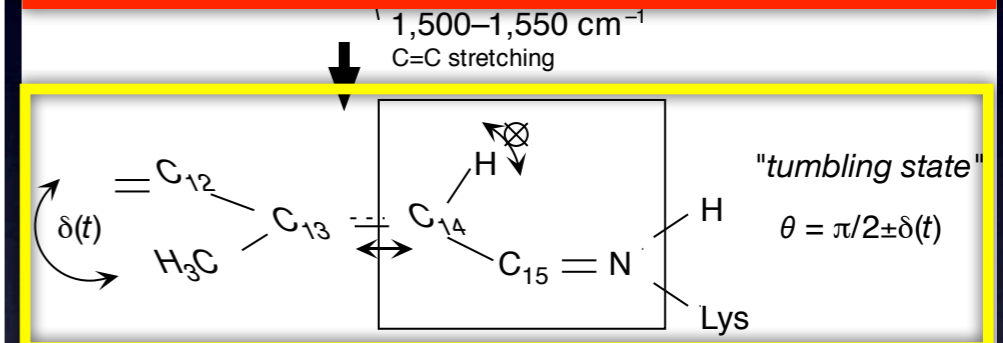
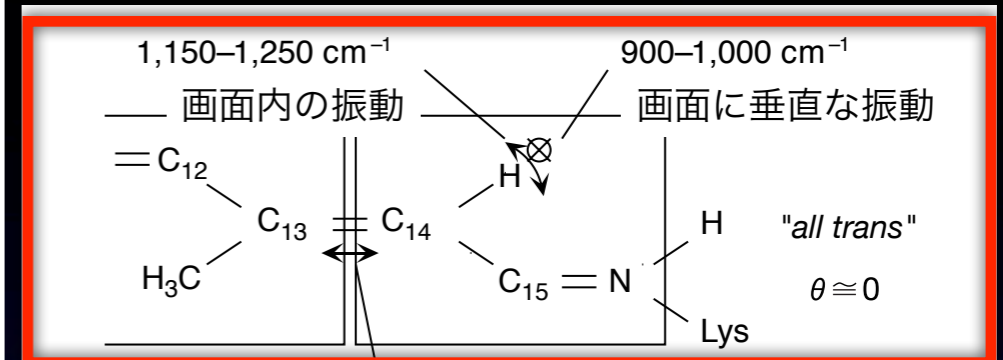
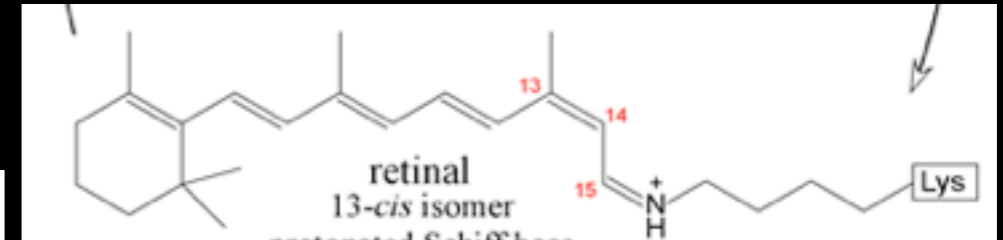
* Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: NATURE 414(6863): 531-534, p.531 Fig.2, copyright 2001.

右半分と左半分の角度が振動



時間差 (フェムト秒)

90度あたりにいったん落ち着く



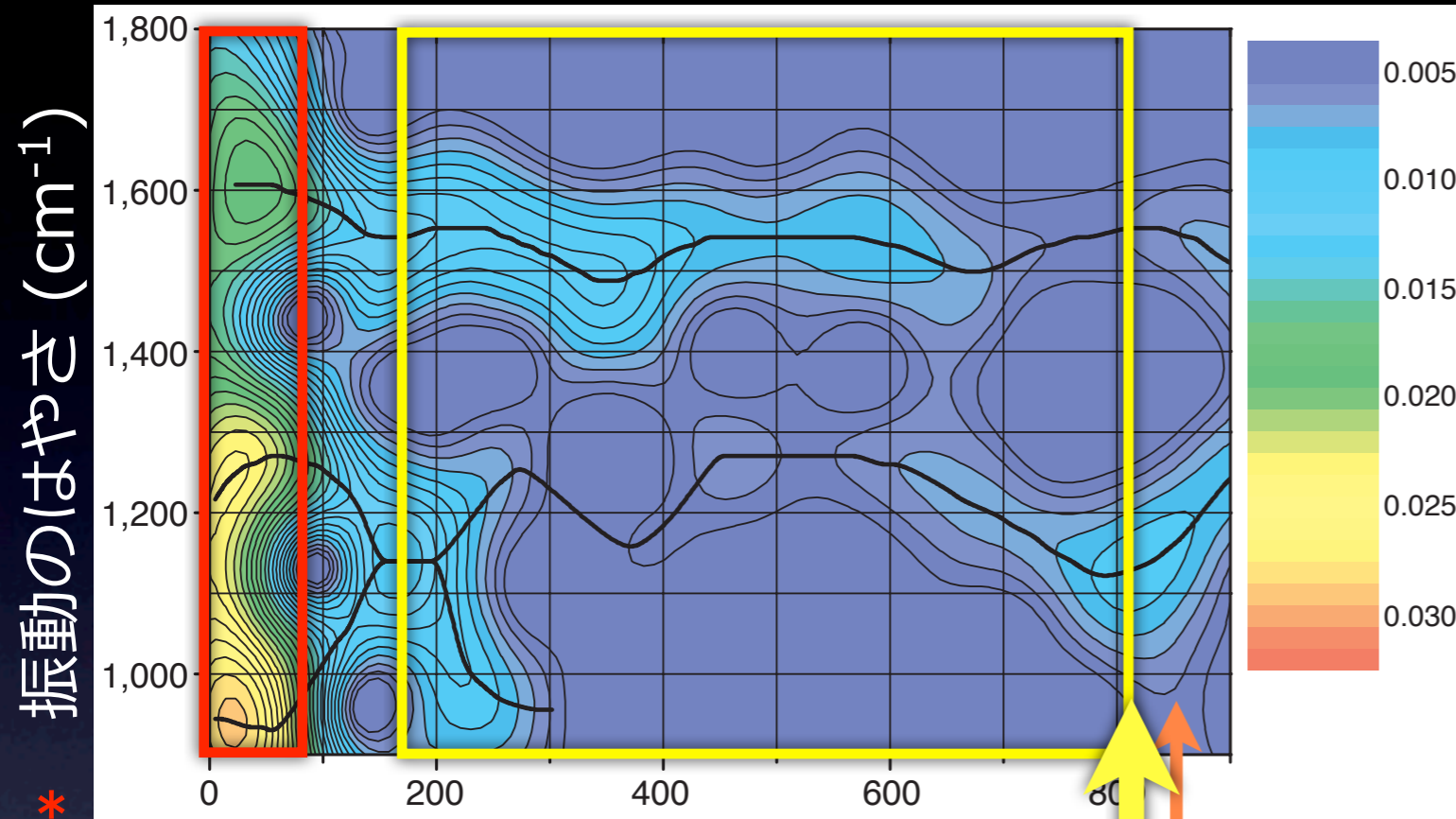
* Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: NATURE 414(6863): 531-534, p.533 Fig.5, copyright 2001.

「レチナールの変形のムービー」

変形の途中経過(900フェムト秒間)を追跡

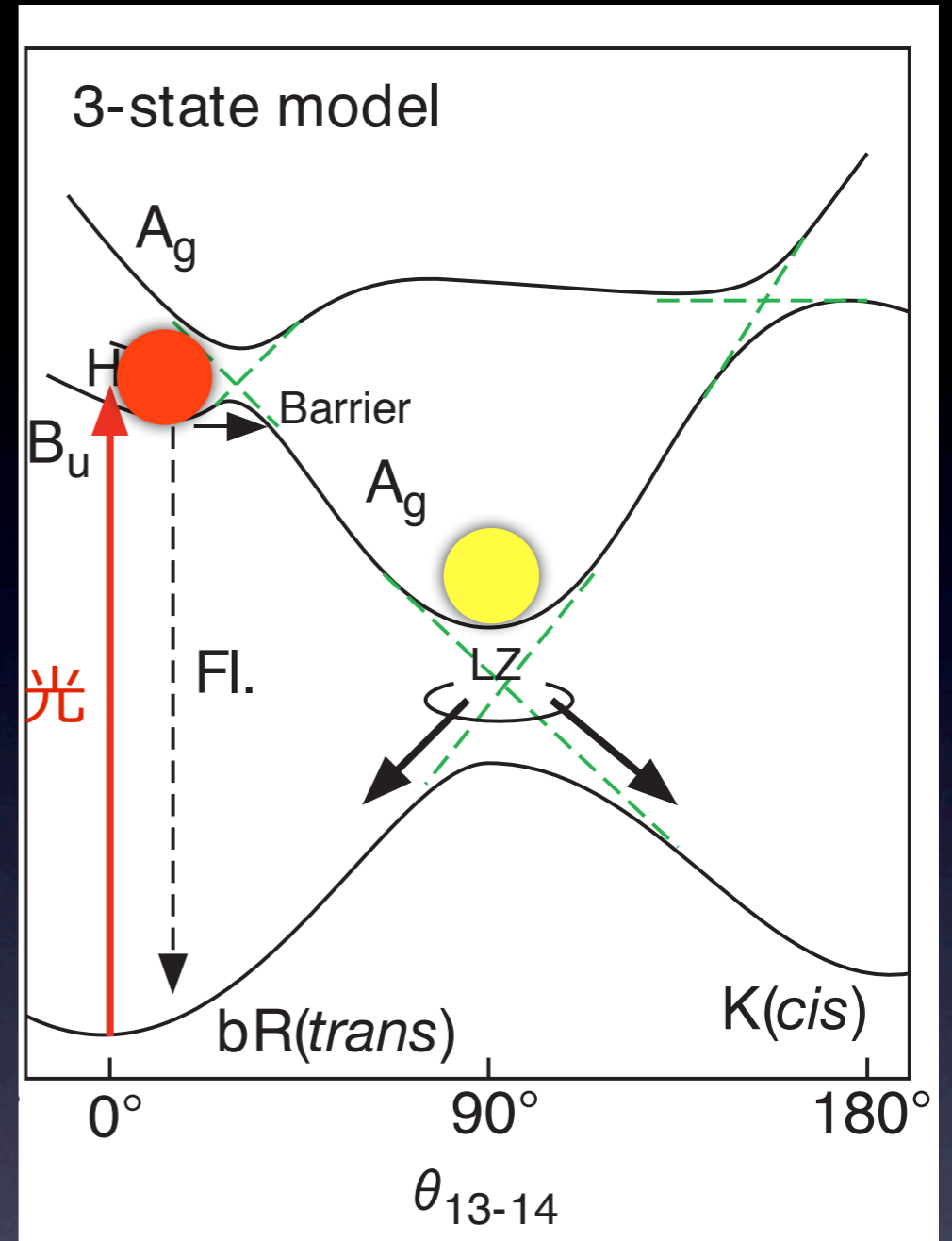
* Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: NATURE 414(6863): 531-534, p.532 Fig.3, copyright 2001.

右半分と左半分の角度が振動



時間差 (フェムト秒)

90度あたりにいったん落ち着く



* Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: NATURE 414(6863): 531-534, p.531 Fig.1, copyright 2001.

「レチナールの変形のムービー」

変形の途中経過(900フェムト秒間)を追跡

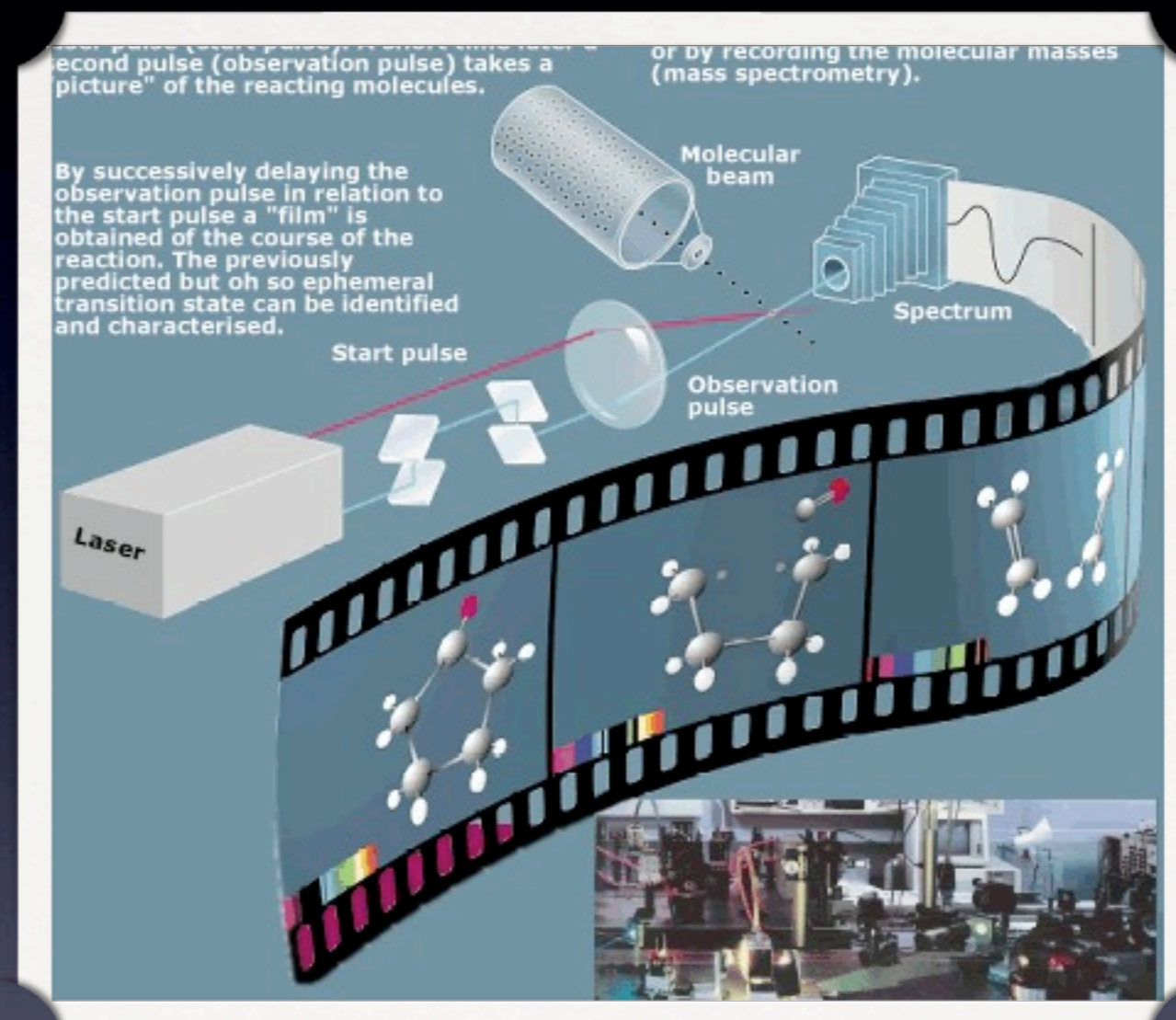
フェムト秒レーザーを使
えば、分子の変形（化学
反応）のムービーを作れ
る

フェムト秒化学

フェムト秒化学を切り拓いたのは



Wikipediaより転載 <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zewel.jpg>
CC BY-SA 3.0



* Copyright © The Royal Swedish Academy of Sciences
<http://www.nobelprize.org/>

アハメッド・ズウェイル

ノーベル化学賞(1999年)

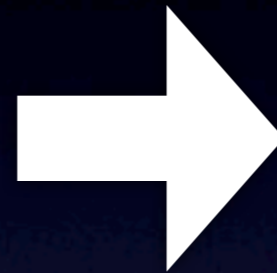
2001年に1フェムト秒より短いパルスの
レーザーが誕生！

アト秒レーザー

アト秒 = 10^{-18} 秒 = 0.0000000000000000001秒
= 100京分の1秒

1秒 : 1アト秒 = 300億年 : 1秒

2001年



2012年

530アト秒

67アト秒

香取先生の時計でさえ、1秒間にこれぐらいはくるう

光は波である 「波」とは？

日常用語…水面の高低運動



Photo by Johntex, 2006
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gentle_waves_come_in_at_a_sandy_beach.JPG
CC SA-BY 3.0

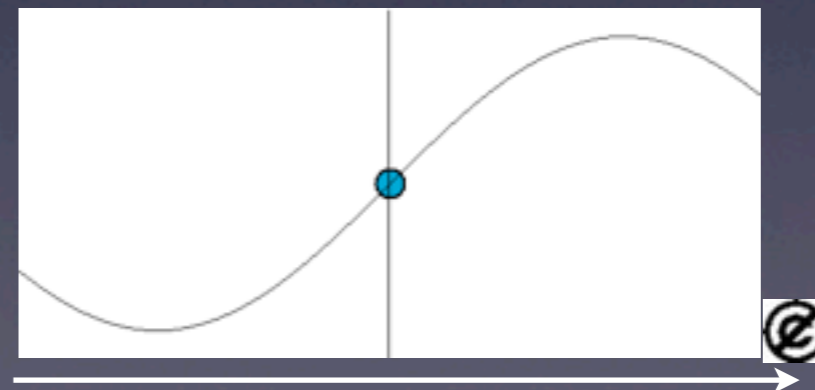


Work by Corpse Reviver
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind_wave_2.ogv
CC SA-BY 3.0

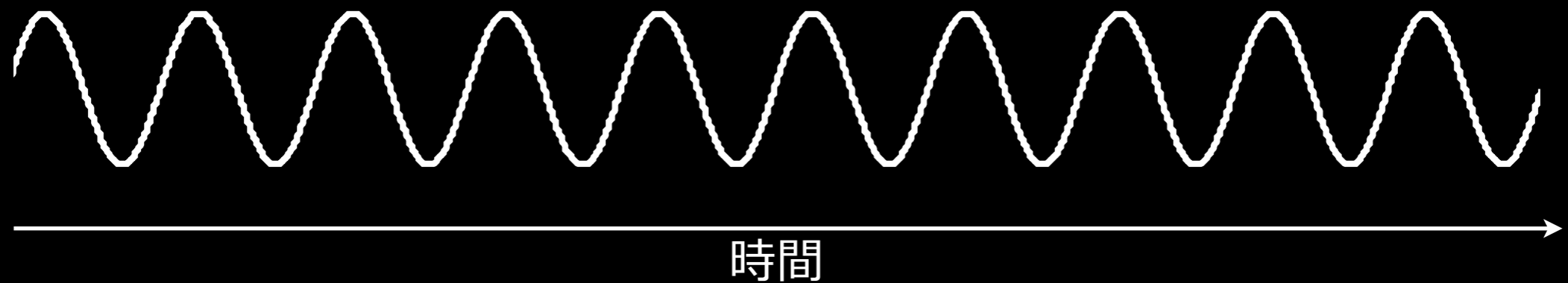
物理学の用語…波動…波のような動き全般



Photo by Roger McLassus
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:2006-01-14_Surface_waves.jpg
CC SA-BY 3.0



位置



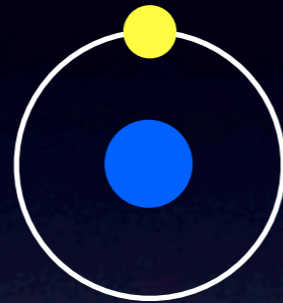
波（波動）のある一定の場所をみれば、
時間的に振動している（波打っている）

光が波だというのなら、光の中では、電界
(電場) が時間的に振動しているのか？



アト秒レーザーの登場に
よって測定可能に

①アト秒レーザーパルスで光電効果を起こす

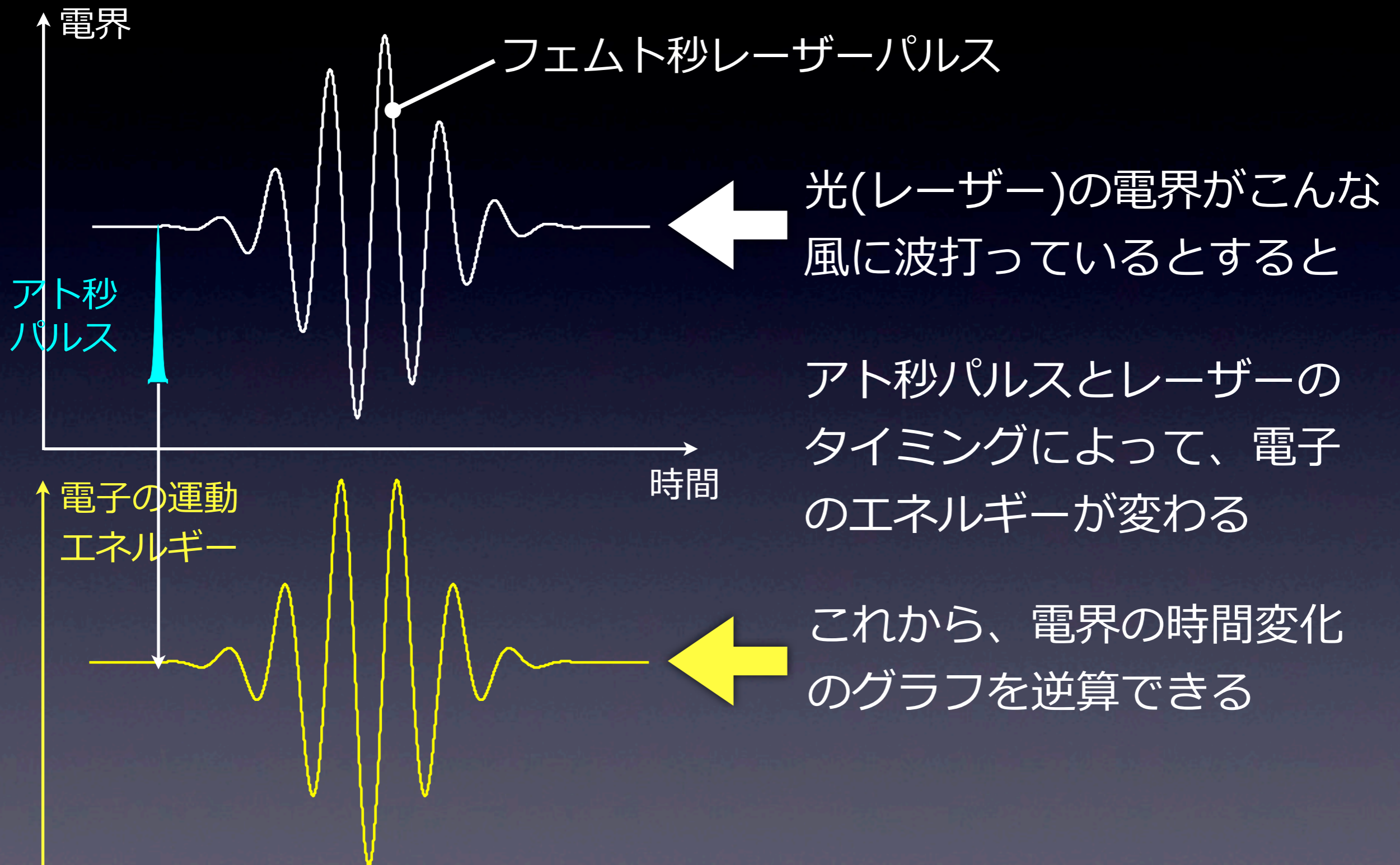


光子のエネルギーを吸収して、電子が
原子の外にとび出す

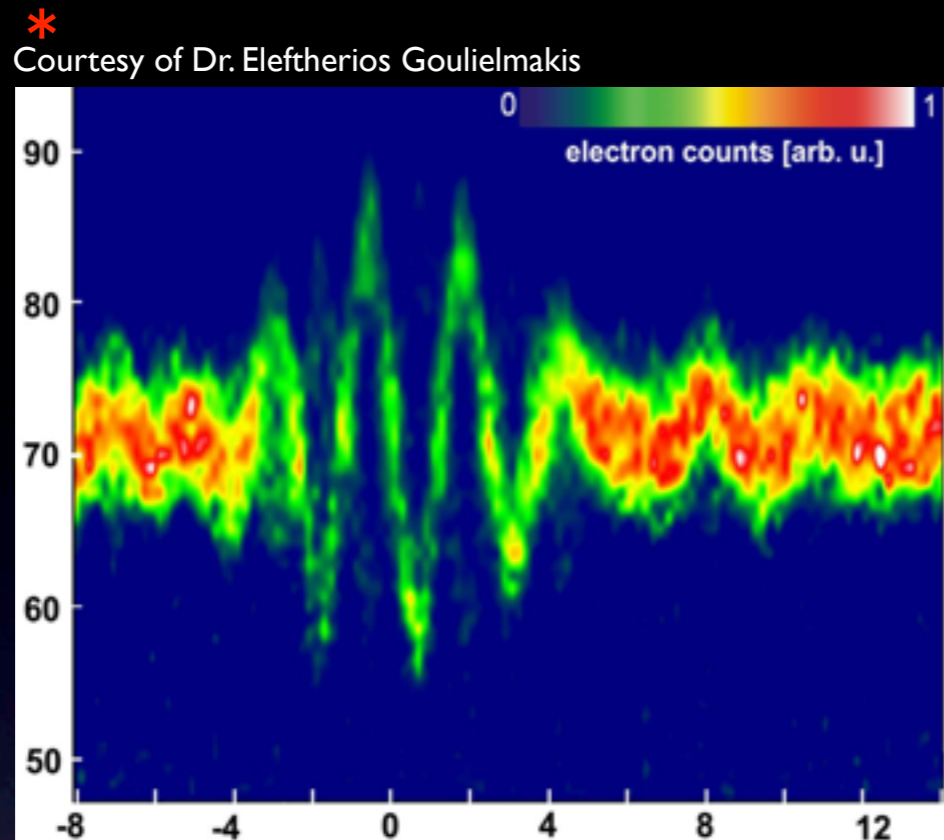
電子のエネルギー

= 光子のエネルギー - イオン化エネルギー(結合のエネルギー)

①第2のレーザーで電子のエネルギーを変える



電子のエネルギー (電子ボルト)



時間 (フェムト秒)

光の中では、電界が
本当に波打っている
直接観測されたのは
2004年!

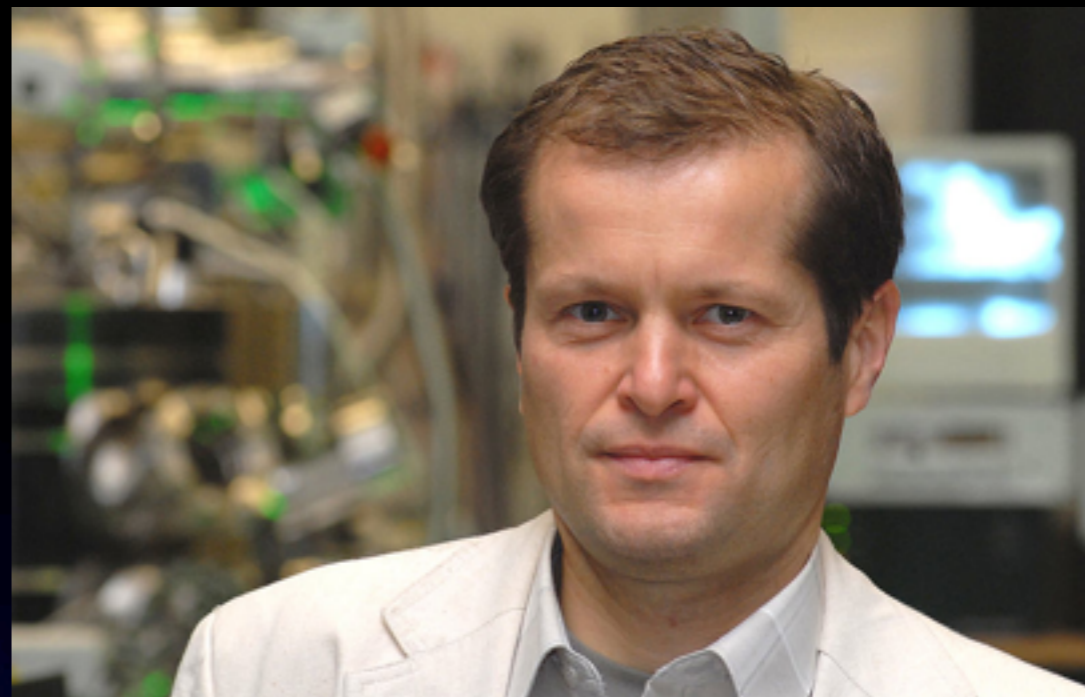
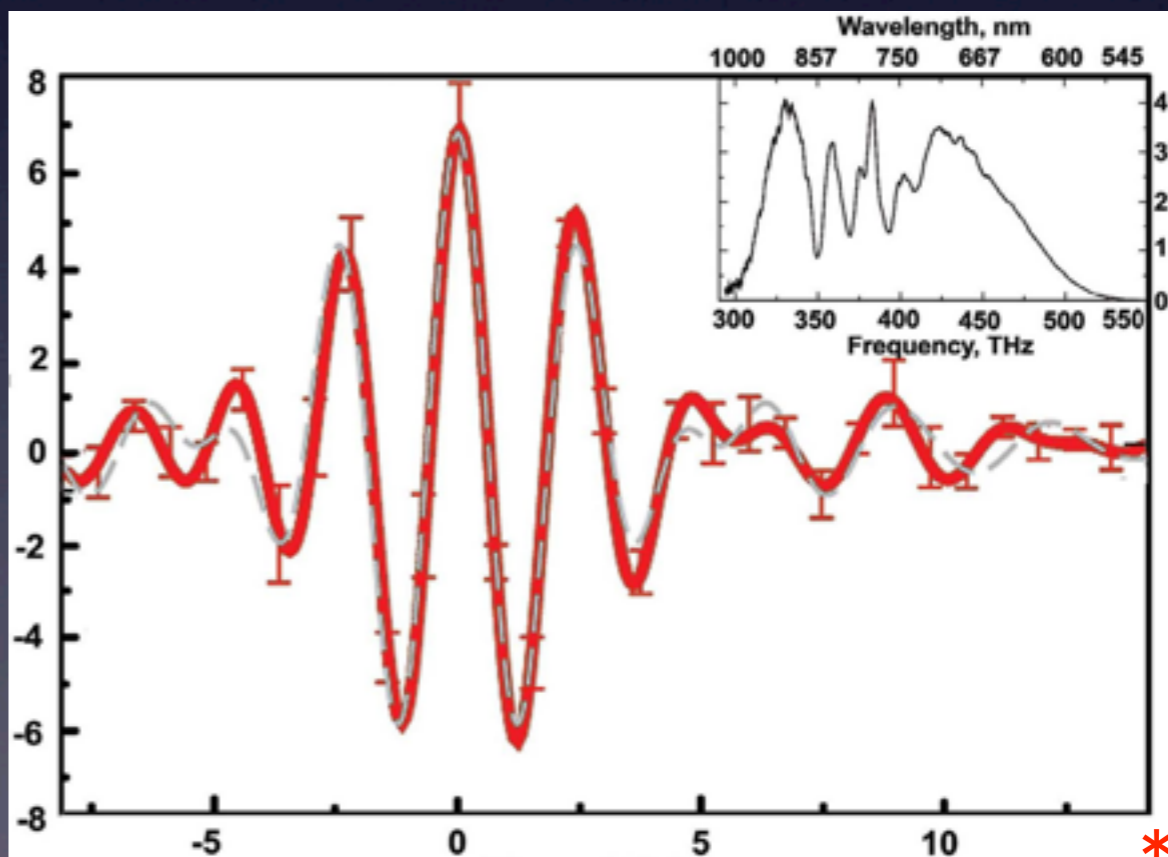


Photo by Thorsten Naeser
[http://commons.wikimedia.org/wiki/
 File:Ferenc_Krausz.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ferenc_Krausz.jpg)
 CC BY 2.0

クラウス

電界 (10^7 V/cm)



Courtesy of Dr. Eleftherios Goulielmakis

時間 (フェムト秒)

一瞬のできごととの
スローモーション
を撮るために

挑戦は続く...

