

# エネルギーを基礎とした先端科学の展望

岸本泰明 京都大学大学院エネルギー科学研究科  
前川孝(教授)、中村祐司(教授)、李継全(准教授)

## 授業のテーマと目的

21世紀の世界は、エネルギー資源の枯渇、需要の増大によるエネルギー供給不足が大きな問題となっている。この講義では、エネルギーにおける「量」と「質」の視点を中心に据え、エネルギーの存在形態やエネルギーを測る単位、エネルギーを支配する法則などエネルギー科学の基本的な事項を講義するとともに、地球温暖化とエネルギー科学の関係や21世紀を支える様々な先端科学の進展をエネルギーの「量」と「質」の観点から評価・検討する。

また激しい国際競争にさらされる日本における科学技術のあり方や行方、問題点について、外国における科学技術行政や政策などの比較、科学教育のあり方など、社会的・文化的、教育的視点も含めて考察する。

京都大学大学院 エネルギー科学研究科

プラズマ・核融合基礎学分野

岸本・李研究室

(岸本泰明)

核融合・光量子・宇宙の理解をめざした  
理論プラズマ物理学の探求



【講義情報】 参照

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/kishi/index.html>

質問・コンタクト

[kishimoto@energy.kyoto-u.ac.jp](mailto:kishimoto@energy.kyoto-u.ac.jp)

# 講義予定

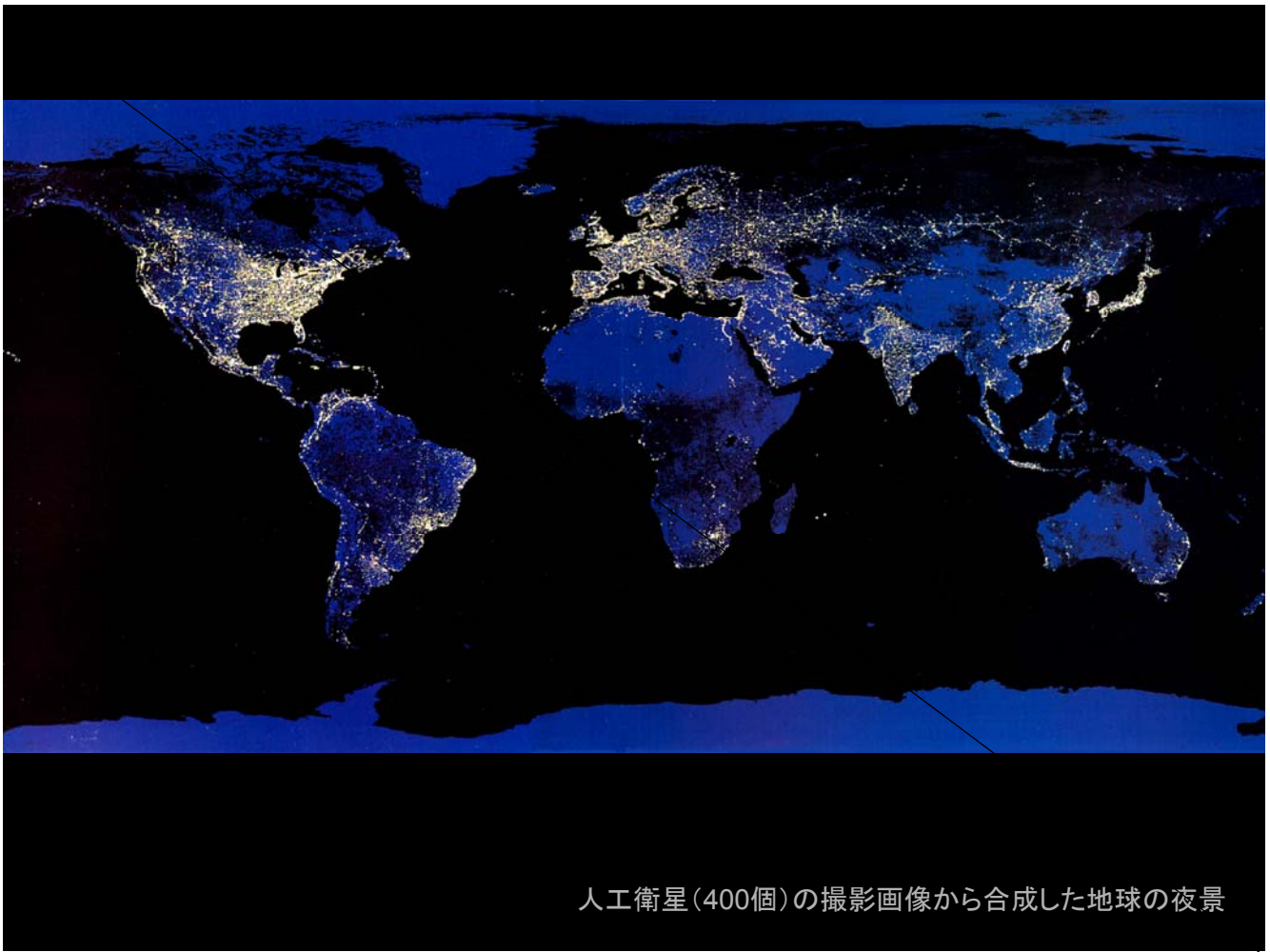
4月10日( 1) 岸本	5月29日( 8) -
4月17日( 2) 岸本	6月05日( 9) -
4月24日( 3) 岸本	6月12日(10) -
5月01日( 4) -	6月19日(11) -
5月08日( 5) -	6月26日(12) -
5月15日( 6) -	7月04日(13) -
5月22日( 7) -	7月11日(14) -
	7月18日(15) -

1. 21世紀のエネルギーの現状と動向
2. エネルギーの概念・単位・ 存在形態
3. エネルギーを支配する法則
4. 「量」を求める科学と「質」を求めるエネルギー科学
5. エネルギーから見た「重厚長大」と「短小軽薄」の科学
6. 地球温暖化問題とエネルギー科学
7. 21世紀の先端科学とエネルギー
8. 日本における科学技術・科学教育、学技術行政のあり方と行方

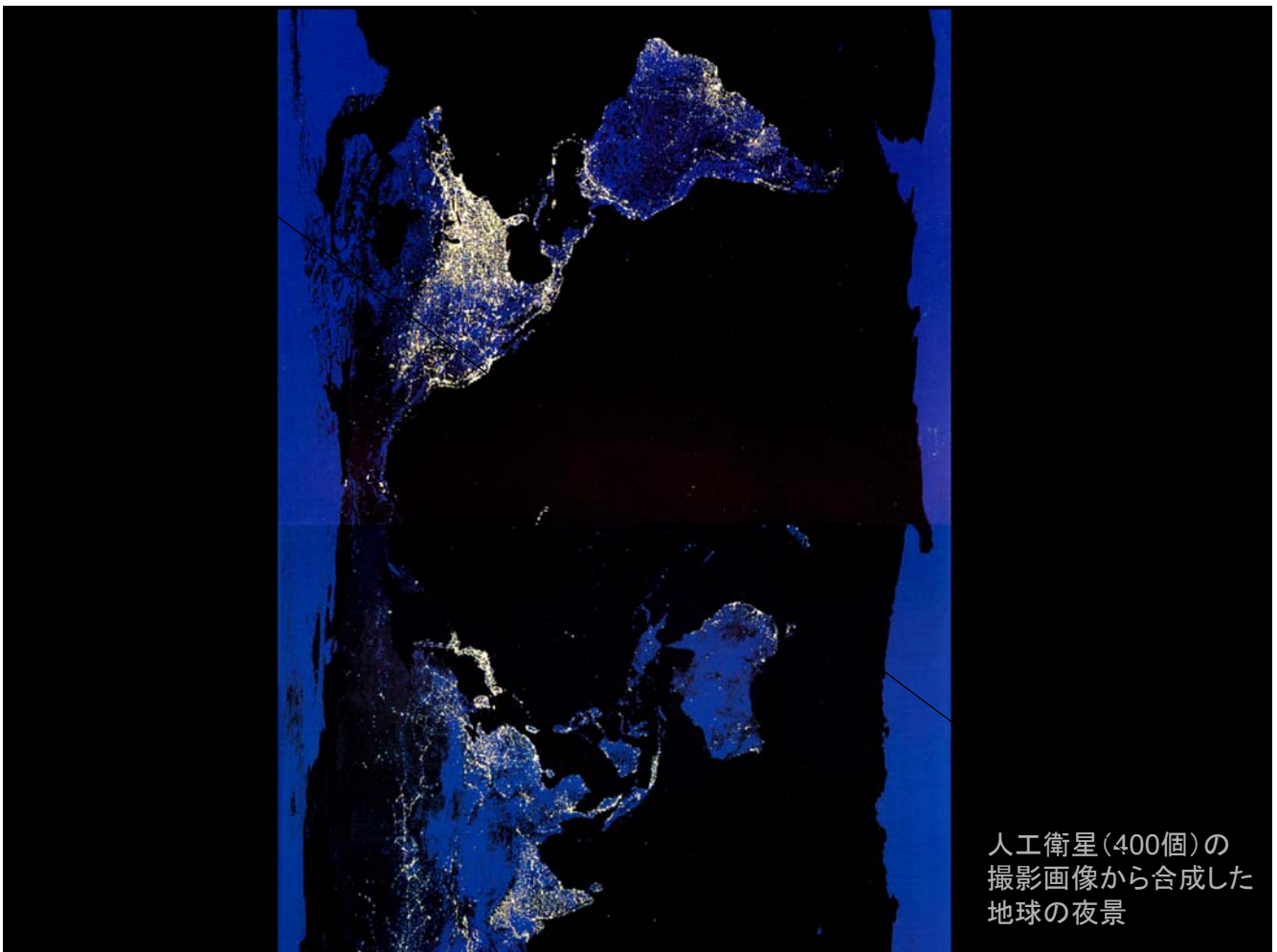
成績評価 : 出席(問題) + レポート

## 人類とエネルギー

### エネルギーの量を見積もる



人工衛星(400個)の撮影画像から合成した地球の夜景



人工衛星(400個)の  
撮影画像から合成した  
地球の夜景

# エネルギー科学：宇宙からの視点と人間からの視点

「エネルギー問題」・「地球環境問題」・「食料問題」・「資源エネルギー問題」



## 世界の人口



1位		中国	13億4千万人
2位		インド	11億9千万人
3位		アメリカ	3億1千万人
4位		インドネシア	1億3千万人
5位		ブラジル	1億9千万人
6位		パキスタン	1億7千万人
7位		バングラディッシュ	1億6千万人
8位		ナイゼリア	1億5千万人
9位		ロシア	1億4千万人
10位		日本	1億3千万人

2008年国連人口基金

68億6000万人

= $6.86 \times 10^9$ 人

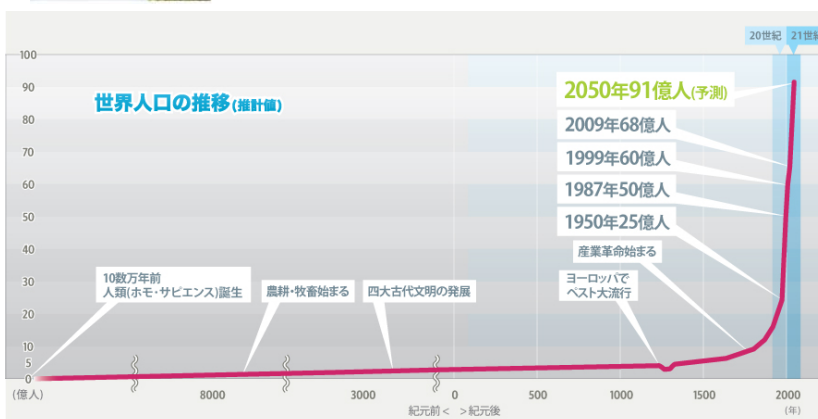
(2010/4/12 現在

1分間に 152人増加)

<http://arkot.com/jinkou/>

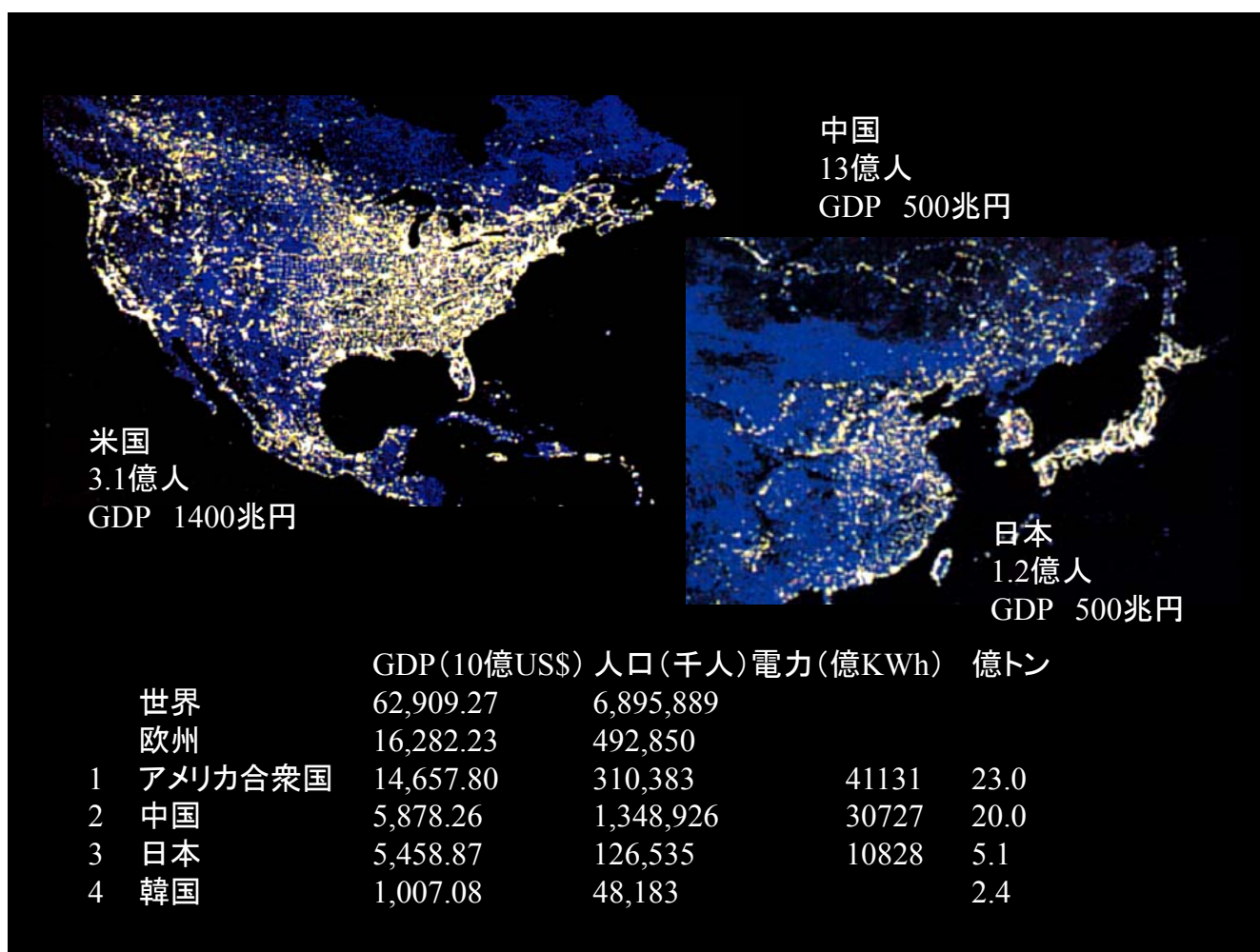
69億1000万人

= $6.91 \times 10^9$ 人 (2010)

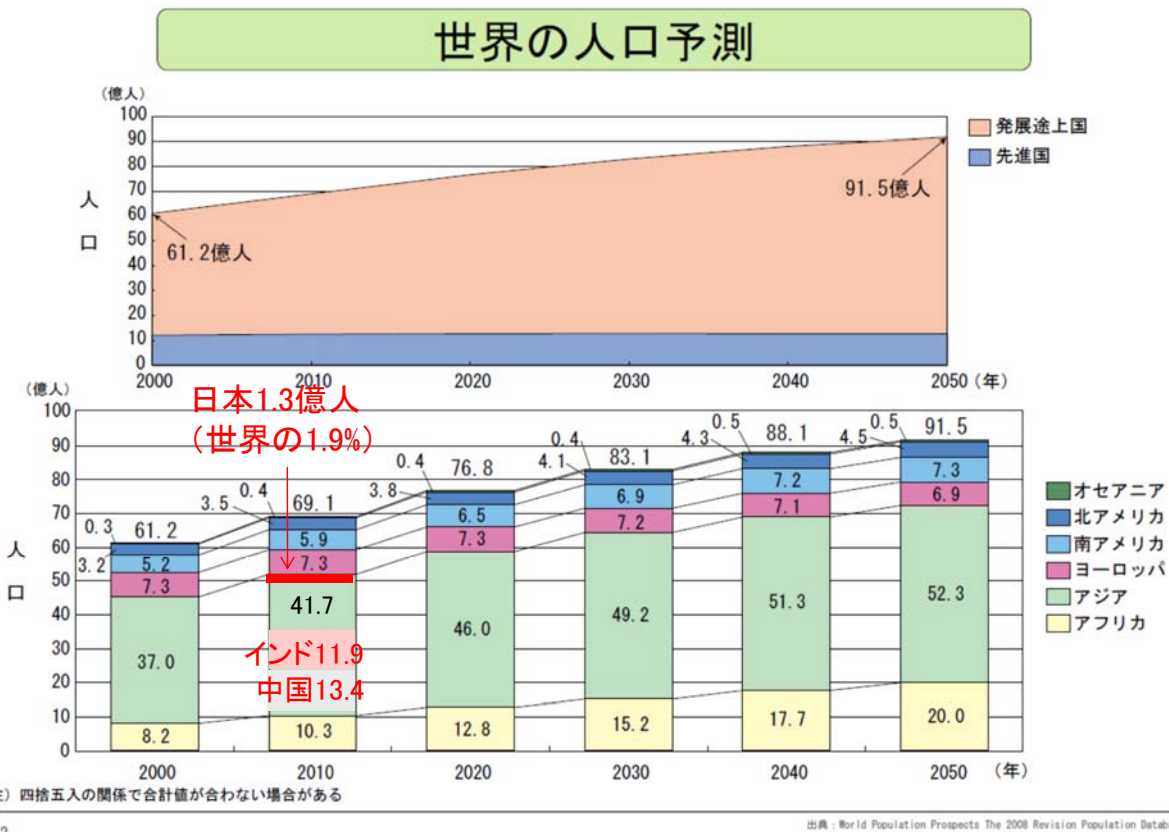


2010年 国内総生産  
国際通貨基金(IMF)リスト

	2010年		2007年	
	GDP(10億US\$)	人口(千人)	電力(億KWh)	億トン
世界	62,909.27	6,895,889		
欧州	16,282.23	492,850		
1 アメリカ合衆国	14,657.80	310,383	41131	23.0
2 中国	5,878.26	1,348,926	30727	20.0
3 日本	5,458.87	126,535	10828	5.1
4 ドイツ	3,315.64	82,302	5910	3.1
5 フランス	2,582.53	62,787	4814	2.6
6 イギリス	2,247.46	62,035	3734	2.1
7 ブラジル	2,090.31	194,946		2.3
8 イタリア	2,055.11	60,550	3392	1.8
9 カナダ	1,574.05	34,016	5604	3.3
10 インド	1,537.97	1,224,514	6097	4.3
11 ロシア	1,465.08	142,958	8977	6.8
12 スペイン	1,409.95	46,076		
13 オーストラリア	1,235.54	22,268		
14 メキシコ	1,039.12	113,423		
15 韓国	1,007.08	48,183		2.4



# 世界の人口(未来予測) 地球人口(2010): 69億1000万人=6.91 × 10<sup>9</sup>人



## 世界の人口と日本のこれから

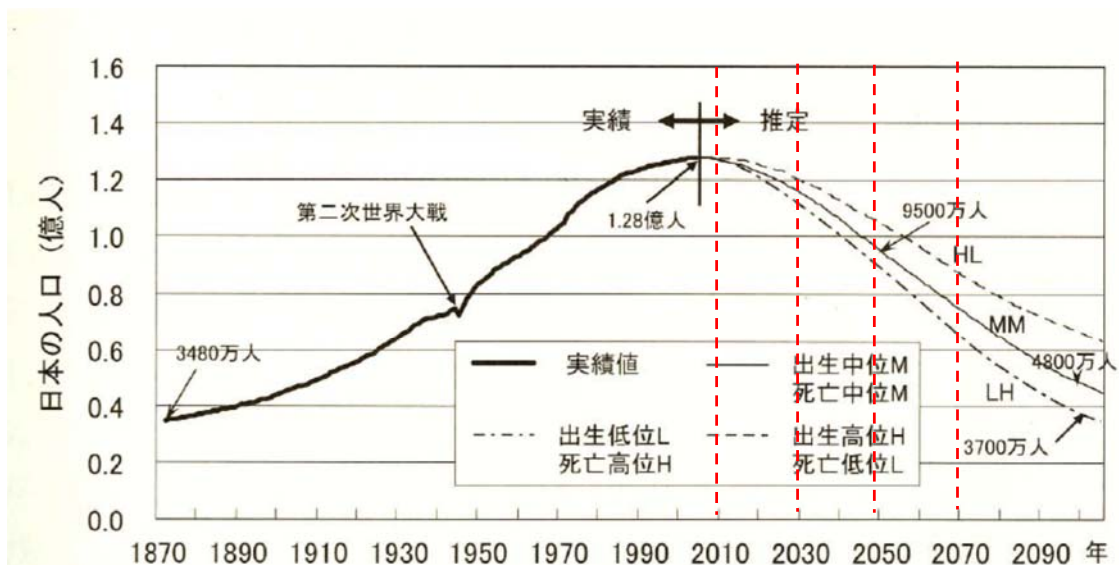
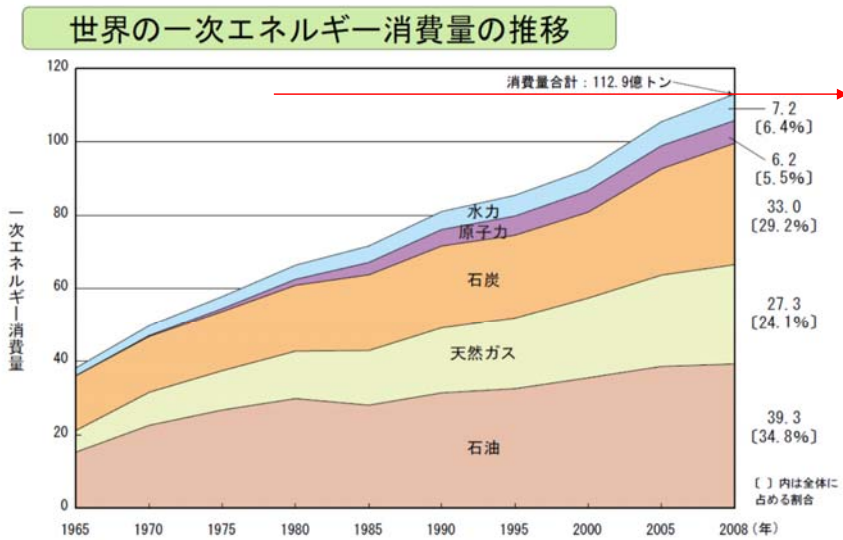


図2 日本の人口の推移と将来予測値 (人口統計資料集(2008)より作成)

# 世界の消費エネルギー



1TOE  
 = $10^7$  kcal  
 = $4.19 \times 10^{10}$  J

1リットル  
 = $10^4$  kcal  
 =10000kcal

人間の  
 消費エネルギー :  
**2000kcal/day**

四捨五入の関係で合計値が合わない場合があります **112.9億トン =  $1.129 \times 10^{10}$  トン**

石油換算トンTOE: Ton of Oil Equivalent 定義 1TOE= $10^7$  kcal = $4.19 \times 10^{10}$  J

1次エネルギー: 石油・石炭・天然ガス等の化石燃料、原子力の燃料であるウラン、水力・太陽・地熱等の自然エネルギー等自然から直接得られるエネルギー

2次エネルギー: 電気・ガソリン・都市ガス等、一次エネルギーを変換や加工して得られるエネルギーのことを二次エネルギー

## 世界の総人口

2010年

69億1000万人= $6.91 \times 10^9$  人

2050年予測

90億人= $9 \times 10^9 \sim 10^{10}$  人

年間のエネルギー消費量(1次エネルギー)

112.9億トン(石油換算) =  $1.129 \times 10^{10}$  トン $\sim 10^{10}$ トン

$1.12 \times 10^{10}$  トン  $\times 10^7$  kcal  $\sim 1.12 \times 10^{17}$  kcal

定義 1TOE= $10^7$  kcal  
 = $4.19 \times 10^{10}$  J

一人当たりの平均使用エネルギー

$1.12 \times 10^{17}$  kcal  $\div (7 \times 10^9$  人) =  $1.6 \times 10^7$  kcal

基礎代謝 : **1200kcal/day** =  $1.2 \times 10^6$  cal/day = 1.2Mcal/day

消費エネルギー : **2000kcal/day** =  $2 \times 10^6$  cal/day = 2.0Mcal/day

年間の消費エネルギー

2000kcal  $\times 365 = 7.3 \times 10^5$  kcal

$1.6 \times 10^7$  kcal  $\div (7.3 \times 10^5$  kcal) = 22

**全人口平均で、一人当たりの消費量(代謝)の 22倍程度のエネルギーを使用**

# 空間と時間のスケール

## 目で見える世界、見えない世界

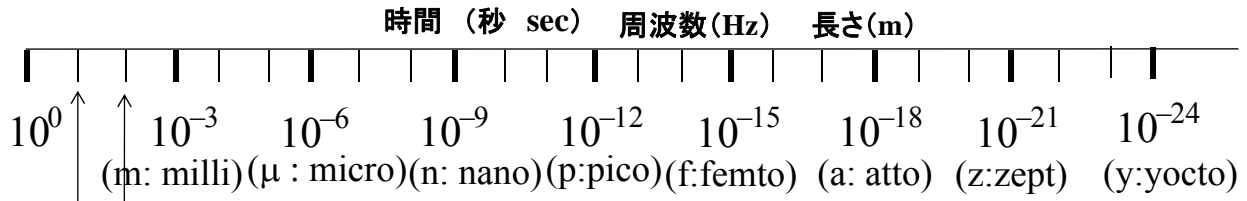
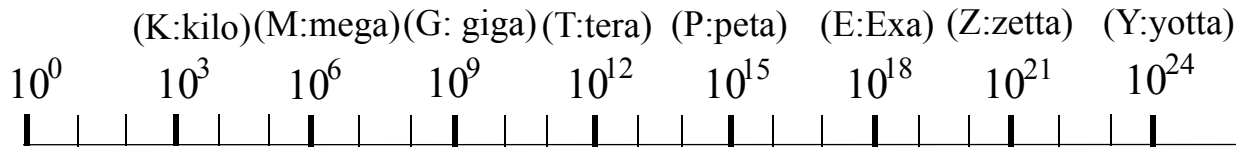
### 単位と情報量

Wikipedia「単位一覧」より

単位	SI接頭辞	大きさ	単位	SI接頭辞	大きさ
十	da(デカ)	$10^1$	割	d(デシ)	$(10^{-1})$
百	h(ヘクト)	$10^2$	分	d(デシ)	$10^{-1} (10^{-2})$
千	k(キロ)	$10^3$	厘(りん)、釐(りん)	c(センチ)	$10^{-2} (10^{-3})$
万		$10^4$	毛(もう)、毫(ごう)	m(ミリ)	$10^{-3} (10^{-4})$
	M(メガ)	$10^6$	糸、絲(し)		$10^{-4}$
億		$10^8$	忽(こつ)		$10^{-5}$
	G(ギガ)	$10^9$	微(び)	$\mu$ (マイクロ)	$10^{-6}$
兆	T(テラ)	$10^{12}$	纖(せん)		$10^{-7}$
	P(ペタ)	$10^{15}$	沙(しゃ)		$10^{-8}$
京(けい、きょう)		$10^{16}$	塵(じん)	n(ナノ)	$10^{-9}$
	E(エクサ)	$10^{18}$	埃(あい)		$10^{-10}$
垓(がい)		$10^{20}$	渺(びょう)		$10^{-11}$
	Z(ゼタ)	$10^{21}$	漠(ばく)	p(ピコ)	$10^{-12}$
秭(し)、穄(じょ)	Y(ヨタ)	$10^{24}$	模糊(もこ)		$10^{-13}$
穰(じょう)		$10^{28}$	逡巡(しゆんじゆん)		$10^{-14}$
溝(こう)		$10^{32}$	須臾(しゆゆ)	f(フェムト)	$10^{-15}$
澗(かん)		$10^{36}$	瞬息(しゆんそく)		$10^{-16}$
正(せい)		$10^{40}$	彈指(だんし)		$10^{-17}$
載(さい)		$10^{44}$	刹那(せつな)	a(アト)	$10^{-18}$
極(ごく)		$10^{48}$	六徳(りつとく)		$10^{-19}$
恒河沙(ごうがしゃ)		$10^{52}$	虚空(こくう)		$10^{-20}$
阿僧祇(あそうぎ)		$10^{56}$	清浄(せいじょう)	z(ゼプト)	$10^{-21}$
那由他(なゆた)		$10^{60}$	阿頼耶(あらや)		$10^{-22}$
不可思議(ふかしぎ)		$10^{64}$	阿摩羅(あまら)		$10^{-23}$
無量大数(むりょうたいすう)			涅槃寂靜(ねはんじゃくじょう) ( $10^{-26}$ の場合等諸説あり)	y(ヨクト)	$10^{-24}$



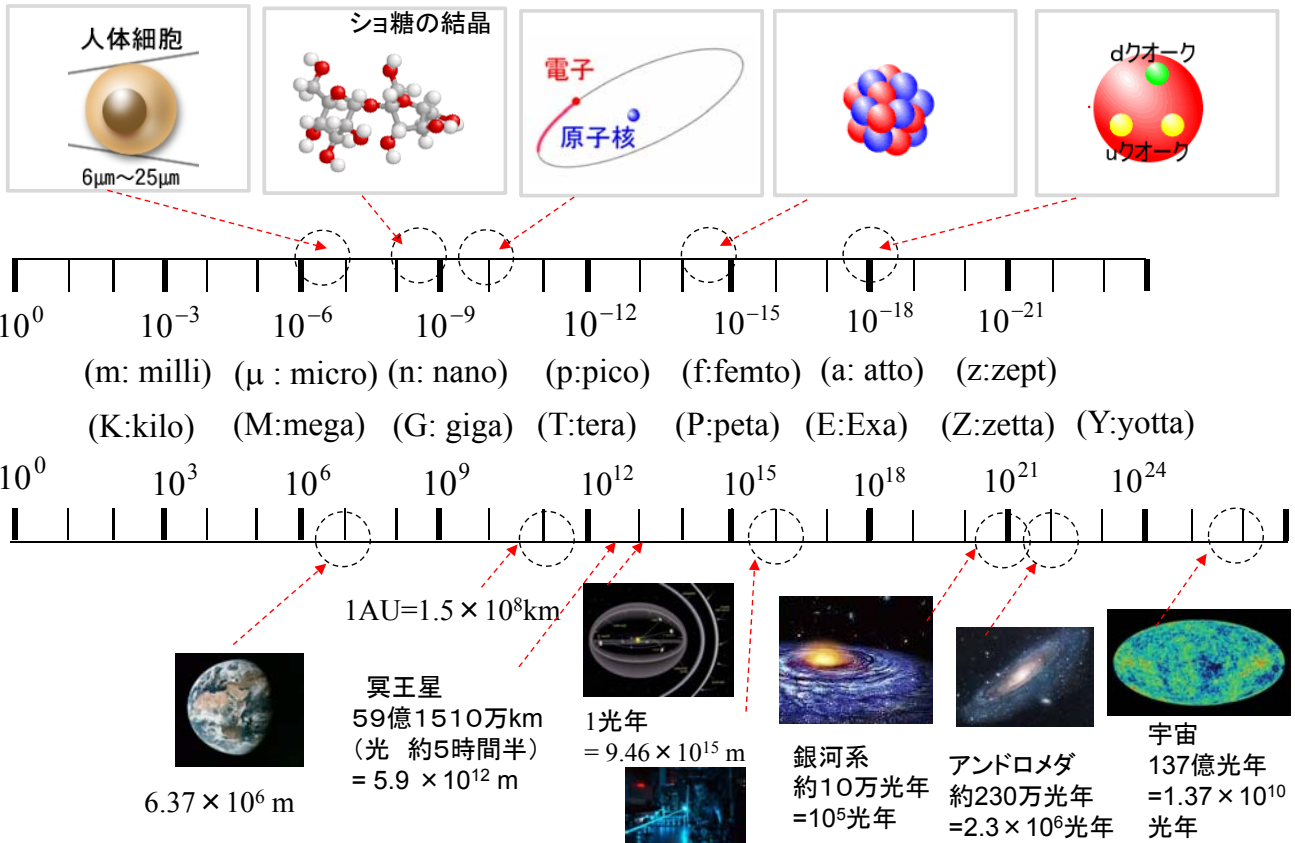
# 単位と情報量



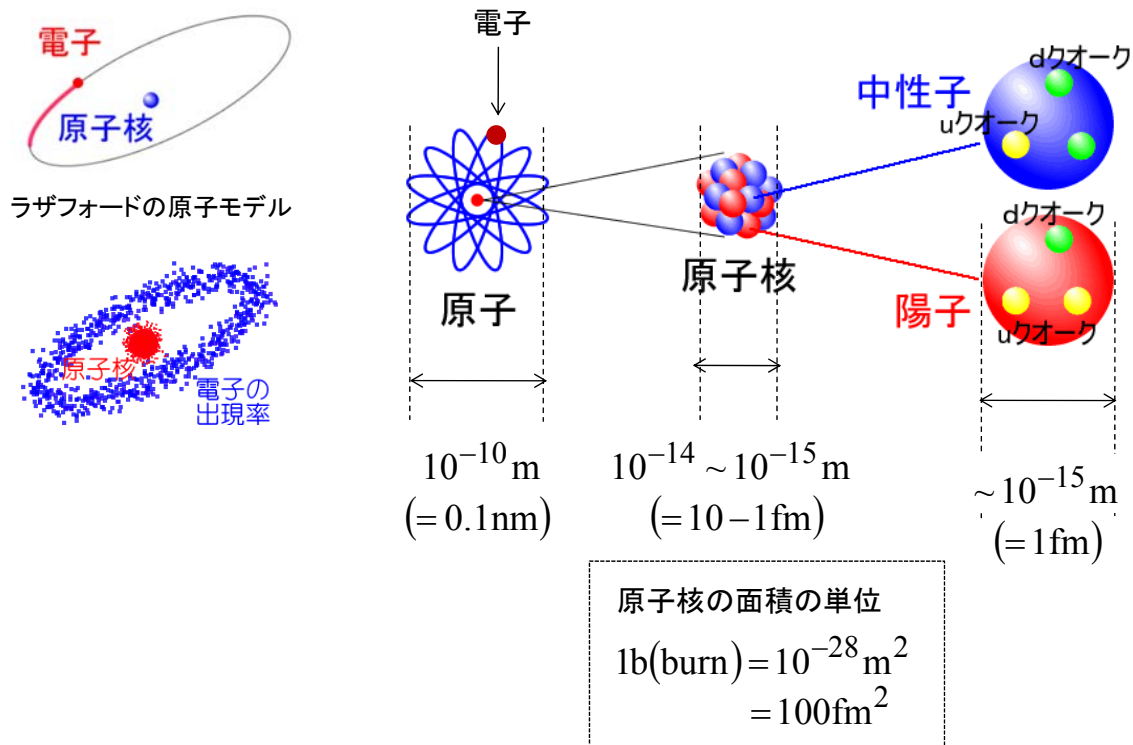
10<sup>-1</sup>    10<sup>-2</sup>  
(d: deci) (c: centi)

10<sup>-3</sup> = 0.001 (1000千分の1)  
 10<sup>-6</sup> = 0.000001 (100万分の1)  
 10<sup>-9</sup> = 0.000000001 (10億分の1)  
 10<sup>-12</sup> = 0.000000000001 (1兆分の1)  
 10<sup>-15</sup> = 0.000000000000001 (1000兆分の1)  
 10<sup>-18</sup> = 0.000000000000000001 (100京分の1)

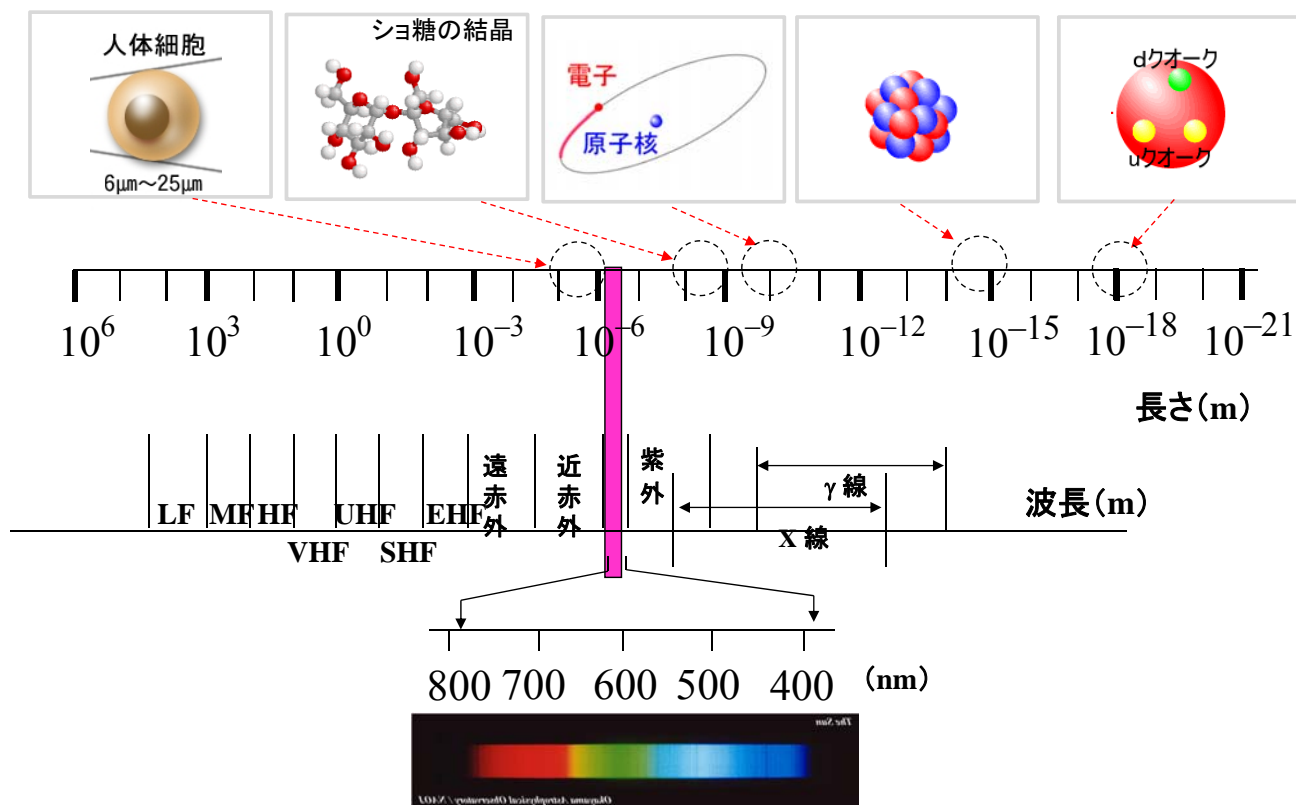
# 幅広い空間スケール

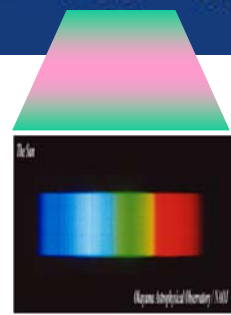
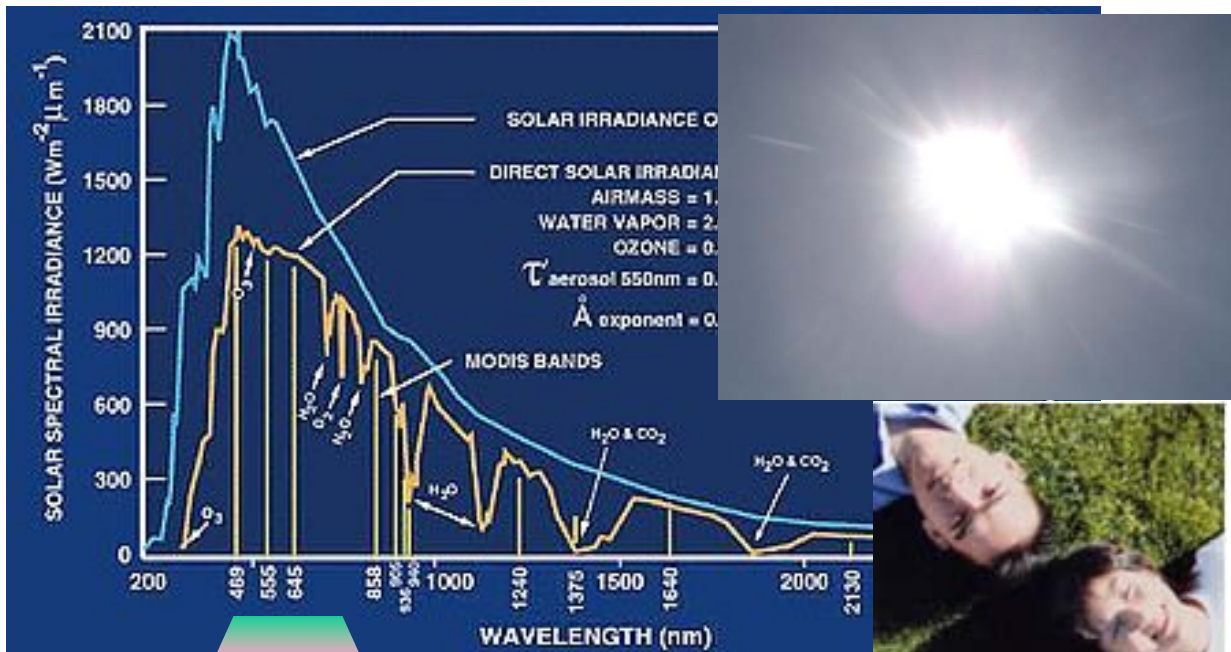


# 原子の大きさ

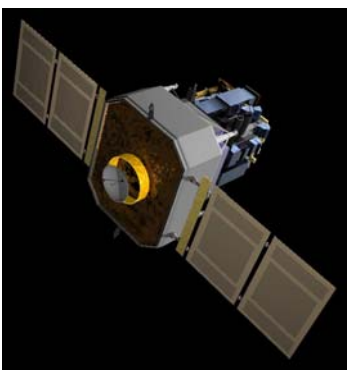


# 様々な電磁波(光)

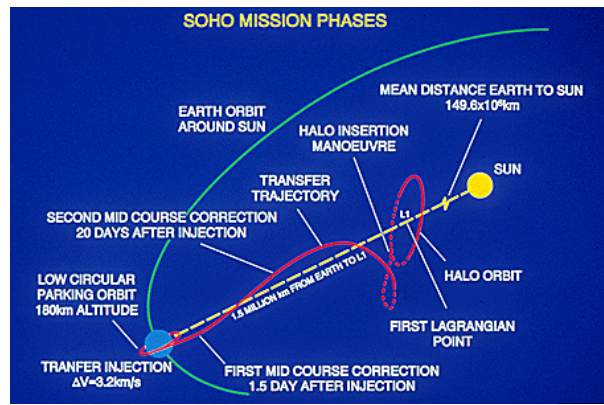




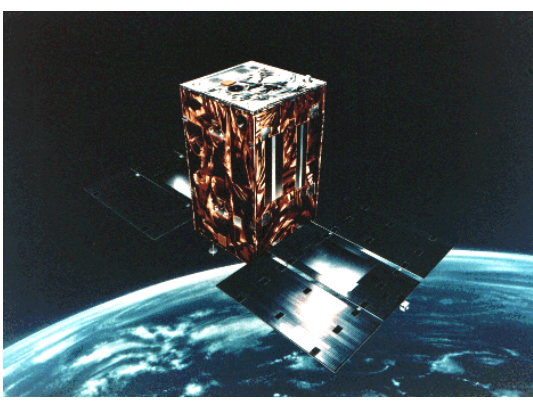
太陽放射の組成(太陽からの放出時)  
 ガンマ線- ごく微量  
 エックス線- ごく微量  
 紫外線 (~0.4 $\mu m$ ) - 約7%  
 可視光線 (0.4 $\mu m$ ~0.7 $\mu m$ ) - 約47%  
 赤外線 (0.7 $\mu m$ ~100 $\mu m$ ) - 約46%  
 電波 (100 $\mu m$ ~) - ごく微量



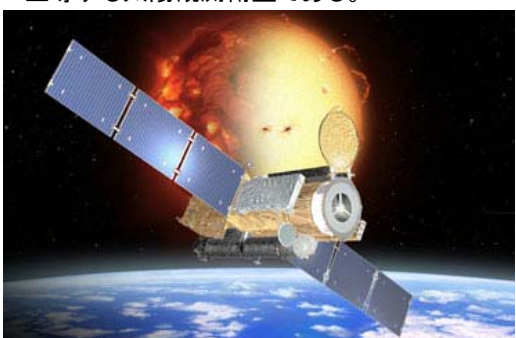
SOHO 太陽観測衛星(Solar and Heliospheric Observatory) 1995年に打ち上げ  
 NASA(米航空宇宙局)ESA(欧州宇宙機関)

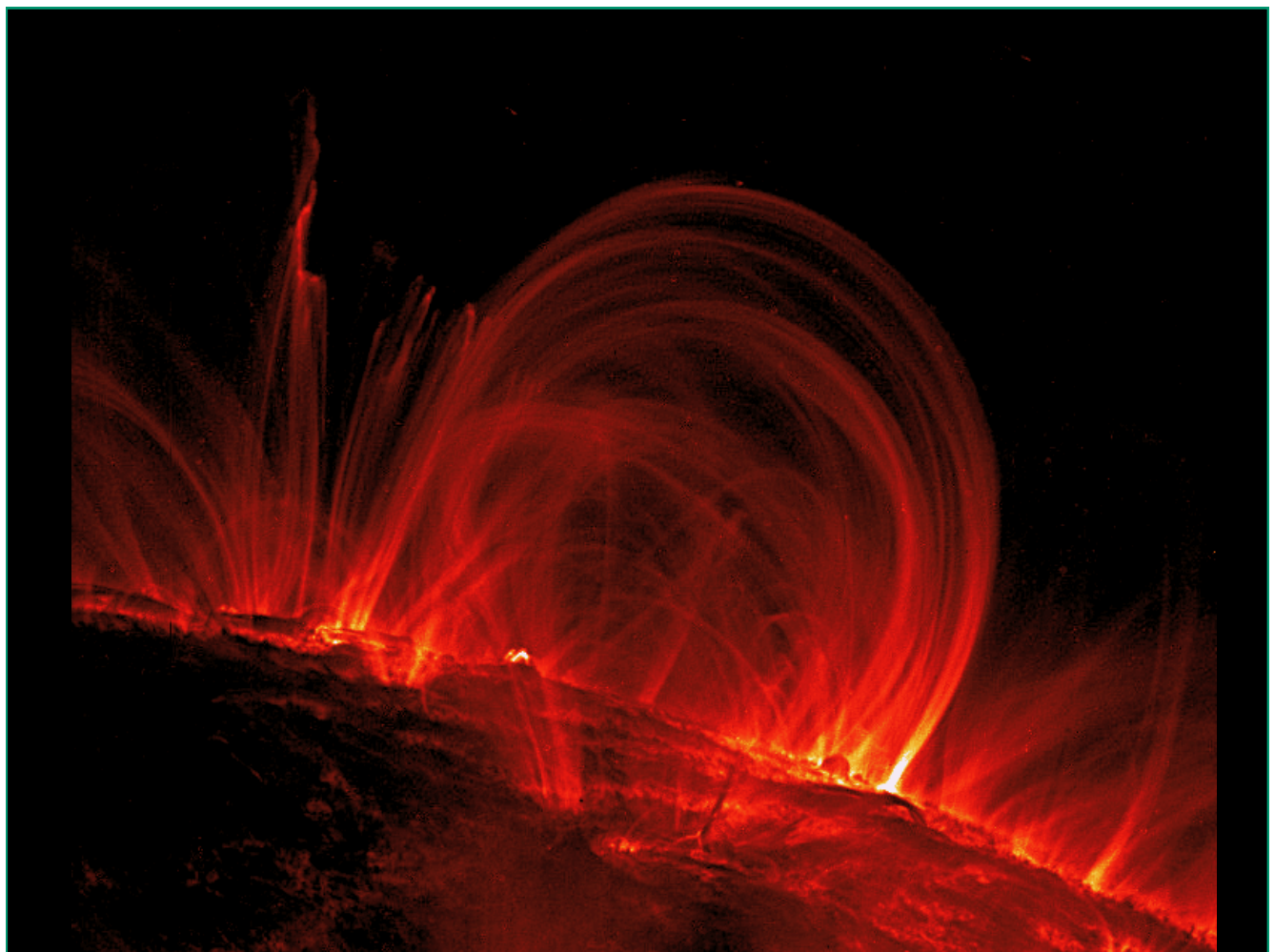
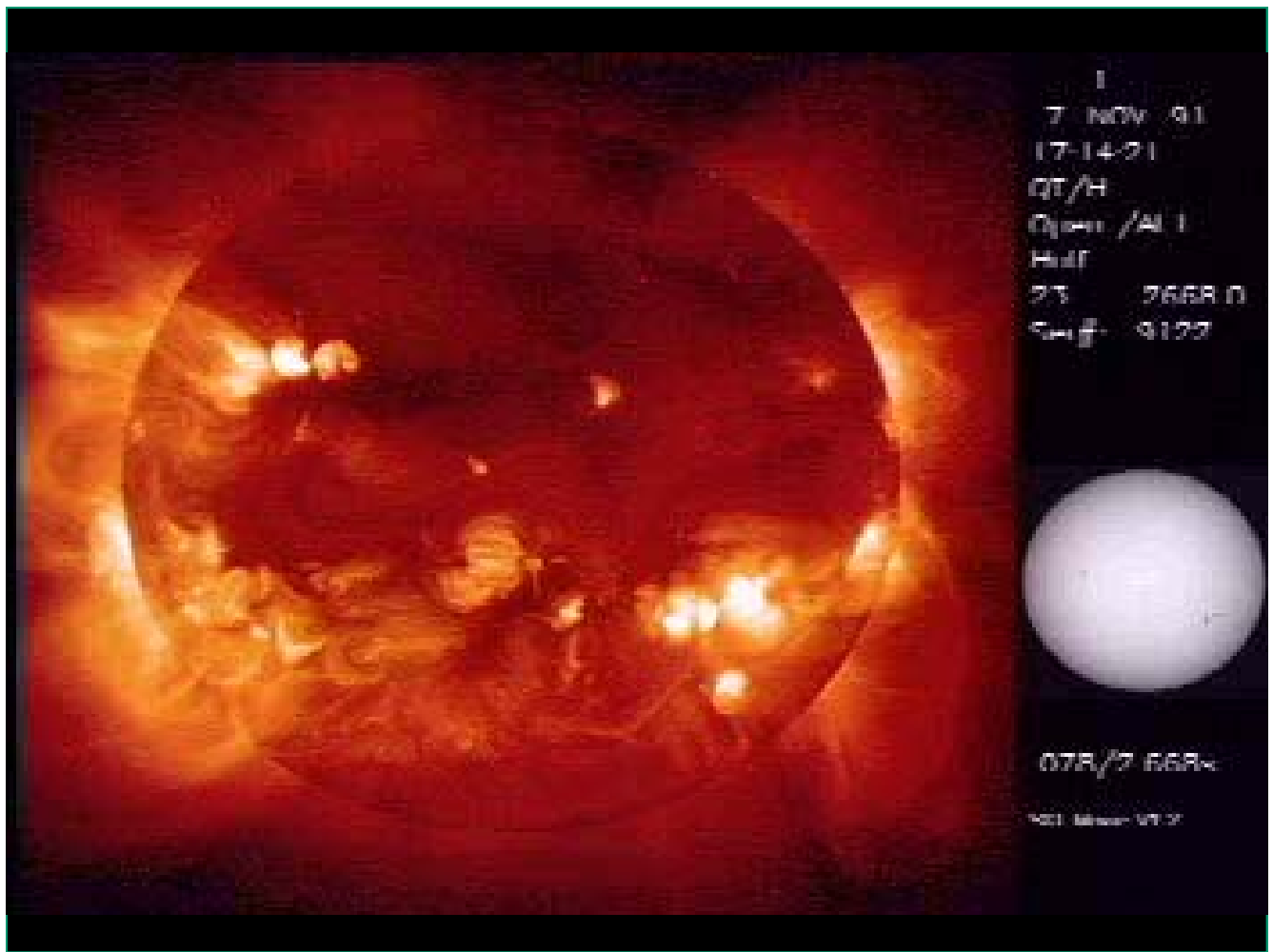


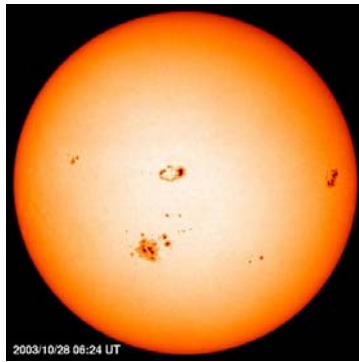
「ようこう」は、旧文部省宇宙科学研究(現JAXA)が開発した太陽観測衛星である。1991年8月に打ち上げられて以来、ほぼ10年間に渡って観測を行った。



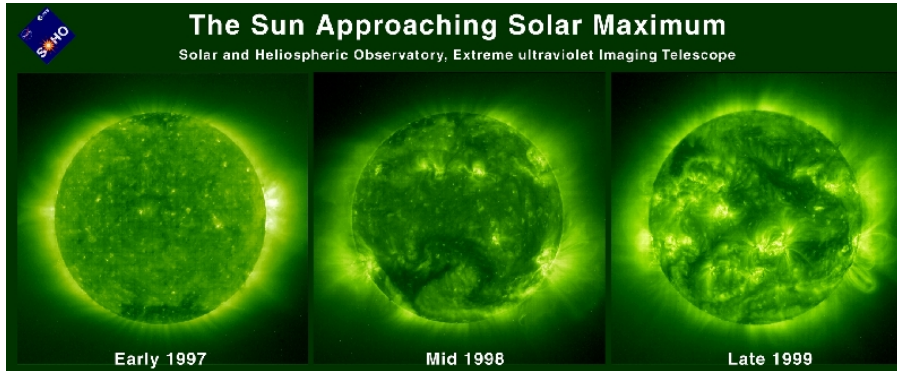
「ひので」は、JAXA[宇宙航空研究開発機構]主導する太陽観測衛星である。





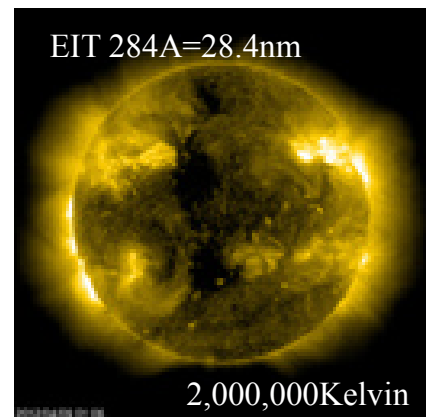
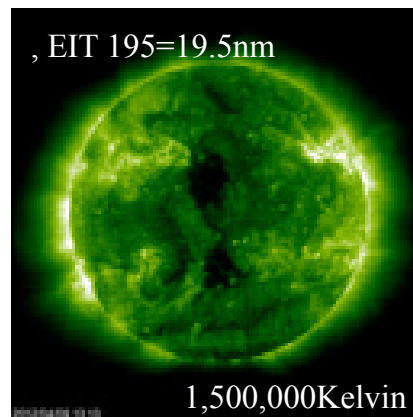
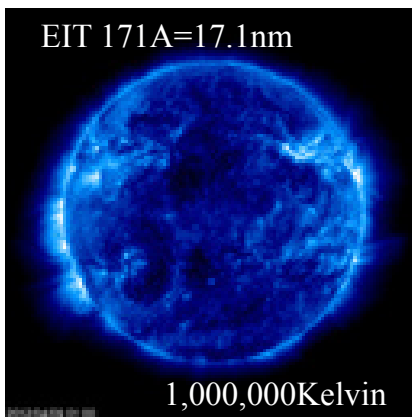


2009年1月31日  
太陽の可視光写真

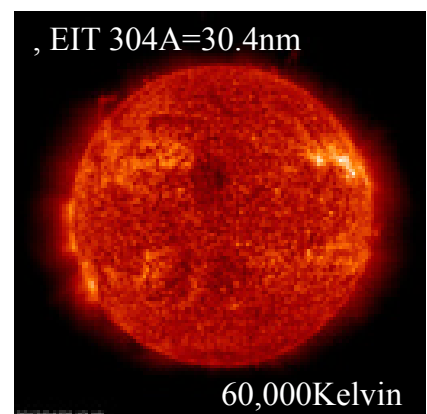


SOHO 太陽観測衛星  
(Solar and Heliospheric Observatory)  
1995年に打ち上げ  
NASA(米航空宇宙局)  
ESA(欧州宇宙機関)

Extreme  
Ultra-violet

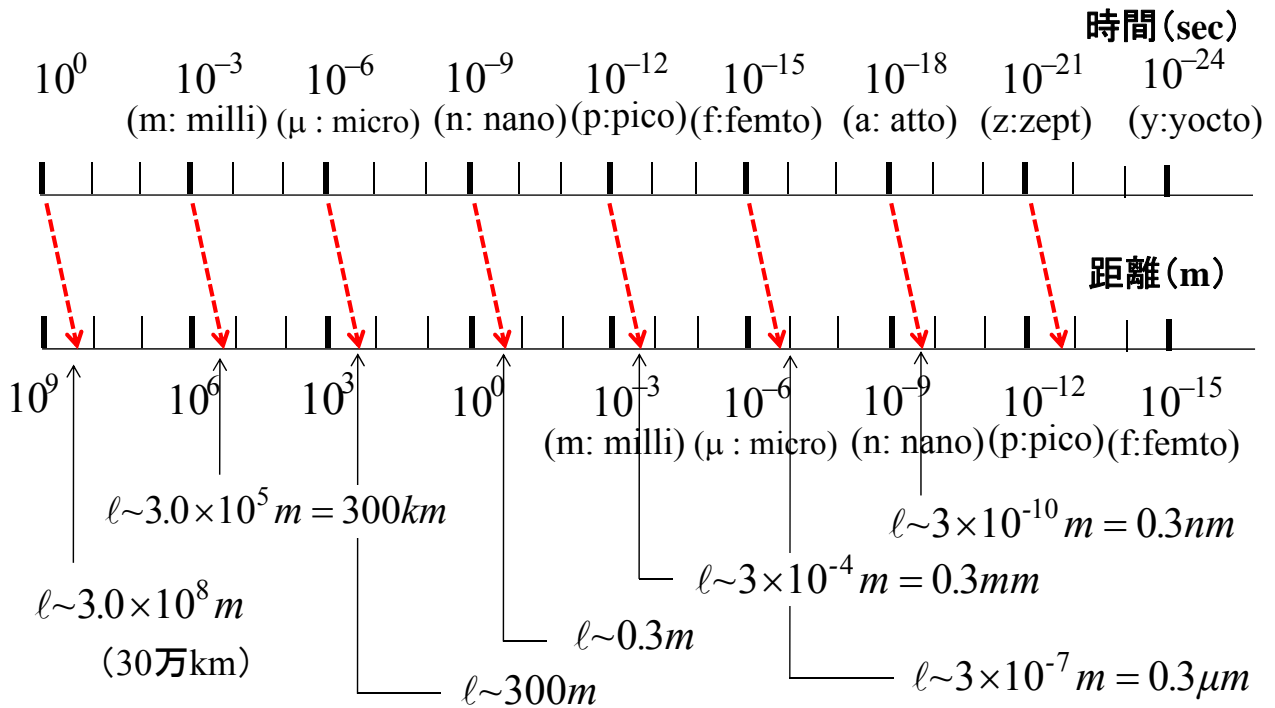


EIT (Extreme ultraviolet Imaging 超遠赤外 Telescope) images the solar atmosphere at several wavelengths, and therefore, shows solar material at different temperatures. In the images taken at **304 Angstrom** the bright material is at 60,000 to 80,000 degrees Kelvin. In those taken at **171 Angstrom**, at 1 million degrees. **195 Angstrom** images correspond to about 1.5 million Kelvin, **284 Angstrom** to 2 million degrees. The hotter the temperature, the higher you look in the solar atmosphere.

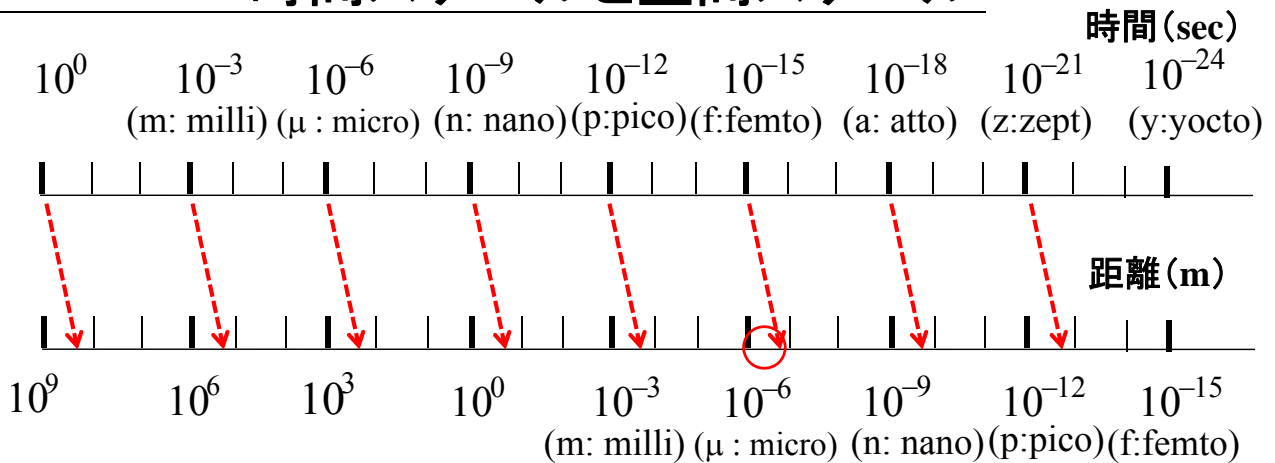


# 時間スケールと空間スケール

光速(真空中):  $c = 299792.5 \text{ km/sec} \cong 3.0 \times 10^8 \text{ m/sec}$   
 光が進む距離:  $l = c\tau$



# 時間スケールと空間スケール



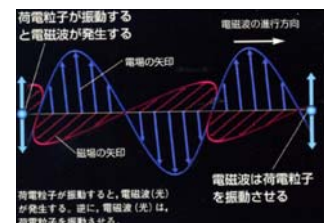
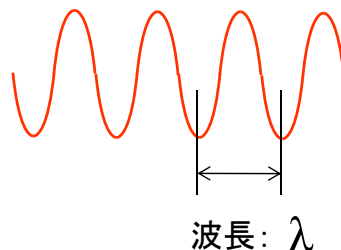
赤色レーザー

$$\lambda = 0.65 \mu\text{m} = 650 \text{ nm}$$

$$= 0.8 \times 10^{-6} \text{ m} = 0.8 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

周期: 1波長だけ光が進む時間

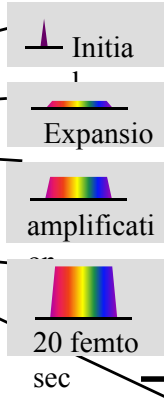
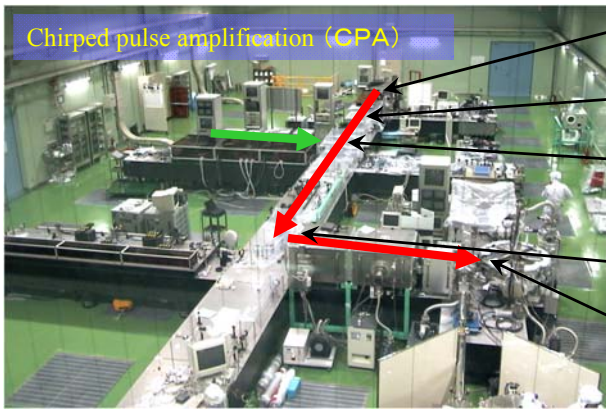
$$T = \frac{\lambda}{c} = \frac{0.65 \times 10^{-6} \text{ (m)}}{3.0 \times 10^8 \text{ (m/sec)}} \sim 2.17 \times 10^{-15} \text{ sec}$$



# 極短パルス高強度レーザー

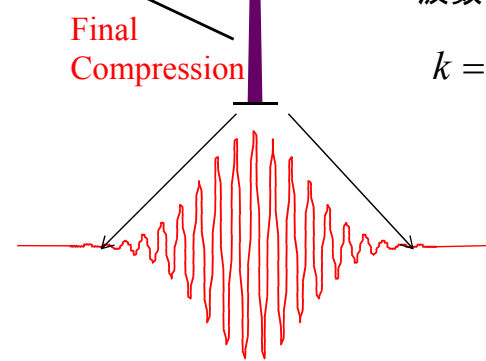
Advanced photon research (Kansai Institute and Kyoto Univ.)

日本原子力研究開発機構 関西光科学センター



$$\tau = \frac{\lambda}{c} = \frac{0.8 \times 10^{-6} (m)}{3.0 \times 10^8 (m/sec)} \sim 2.6 \times 10^{-15} \text{ sec}$$

角振動数  
 $\omega = \frac{2\pi}{\tau}$   
波数  
 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$



パルスの時間:

$$T_{\text{laser}} = 20 \text{ fsec} = 2 \times 10^{-14} \text{ sec}$$
$$N = \frac{T_{\text{laser}}}{T} = \frac{20 \times 10^{-15} (\text{fsec})}{2.6 \times 10^{-15} (\text{fsec})} \sim 7.7$$

## エネルギーの基礎

### エネルギーとは何か？

## エネルギーの単位 (1)

### MKS単位 (Meter/Kg/Sec)

$$f(\text{N}) = m(\text{kg}) \times a \left( \frac{\text{m}}{\text{sec}^2} \right) \quad : \quad \text{力} = \text{質量} \times \text{加速度}$$

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \times 1 \text{ m/sec}^2 \quad : \quad 1 \text{ kg の質量の物体を} \\ 1 \text{ m/sec}^2 \text{ で加速する力}$$

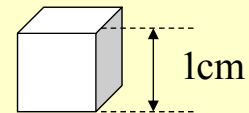
例:  $1 \text{ kg重} = 1 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/sec}^2 \text{ N}$

**1 J = 1 N × 1 m** : 1N で 1m 動かすのに要するエネルギー

$$1 \text{ cal (カロリー)} = 4.186 (\sim 4.2) \text{ J}$$

➡ **水 1g の温度を 1°C 上げる熱量**

$$1 \text{ cm}^3 = 1 \text{ cc}$$



## エネルギーの単位 (2)

### CGS (Centimeter/g/Sec) 単位

$$f(\text{dyn}) = m(\text{g}) \times a \left( \frac{\text{cm}}{\text{sec}^2} \right) \quad : \quad \text{力} = \text{質量} \times \text{加速度}$$

$$1 \text{ dyn} = 1 \text{ g} \times 1 \text{ cm/sec}^2 \quad : \quad 1 \text{ g の質量の物体を} \\ 1 \text{ cm/sec}^2 \text{ で加速する力}$$

$$(1 \text{ N} = 10^3 \text{ g} \times 10^2 \text{ cm/sec}^2 = 10^5 \text{ dyn})$$

**1 erg = 1 dyn × 1 cm (= 10<sup>-7</sup> J)**

1dyn で 1cm 動かすのに要するエネルギー

$$(1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m} = 10^5 \text{ dyn} \cdot 100 \text{ cm} = 10^7 \text{ dyn} \cdot \text{cm}, \quad 1 \text{ dyn} = 10^{-7} \text{ J})$$



# エネルギーの単位

## MKS 単位(ニュートン・ジュール)

1 N : 1kg の質量の物体を  $1\text{m}/\text{sec}^2$  で加速する力

1 J = 1N x 1m : 1N で 1m 動かすのに要するエネルギー

## CGS 単位(ダイン・エルグ)

1 dyn : 1g の質量の物体を  $1\text{cm}/\text{sec}^2$  で加速する力

(1N =  $10^5$  dyn)

1 erg = 1 dyn x 1cm :

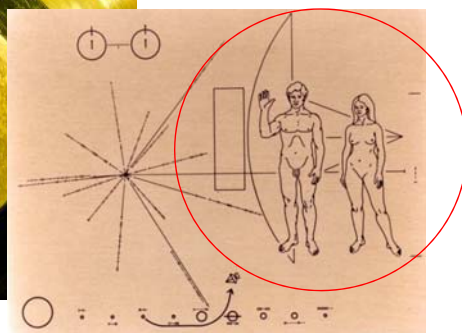
1 dyn で 1cm 動かすのに要するエネルギー  
=  $10^{-7}$  J

1 Joule (SI 単位: MKSA) =  $10^7$  erg (CGS 単位)

# 人間のエネルギー消費 (1)



男性: 1500 kcal



Voyager Golden Record

## 人間の生命活動に必要なエネルギー

人間の細胞の数

60兆個 =  $60 \times 10^{12}$  個

細胞の大きさ:  $1-10 \mu\text{m}$

( $\mu\text{m} = 10^{-6} \text{m} = 10^{-4} \text{cm}$ )

人間 = 水 ( $1\text{g} = 1\text{cm}^3$ )

$\frac{60 \times 10^3 \text{cm}^3}{(10^{-3} \text{cm})^3} = 6 \times 10^{13}$

消費エネルギー: 基礎代謝の1.5-2 倍

基礎代謝(女性) :  $1200\text{kcal}/\text{day} = 1.2 \times 10^6 \text{cal}/\text{day} = 1.2\text{Mcal}/\text{day}$

消費エネルギー :  $2000\text{kcal}/\text{day} = 2 \times 10^6 \text{cal}/\text{day} = 2.0\text{Mcal}/\text{day}$

$2 \times 10^6 \times 4.186 \text{ J}/\text{day} = 8.37 \times 10^6 \text{ J}/\text{day}$

体重:  $50\text{kg} = 5 \times 10^4 \text{g}$  ( $1^\circ\text{C}$ 上昇  $5 \times 10^4 \text{cal}$ ) (体温程度)

体重を水と仮定  $\rightarrow$  1日の温度上昇:  $2 \times 10^6 \text{cal} / 5 \times 10^4 \rightarrow 40^\circ\text{C}$

## 人間のエネルギー消費 (2)



質量  $M$  150g (0.15kg)

速度  $V$  150km/h 41 m/sec

エネルギーはいくらか？

(J 単位 および cal 単位で求めよ)

$$E = \frac{1}{2}MV^2 \cong \frac{1}{2} \times 0.15\text{kg} \times (42\text{ m/sec})^2 \sim 130\text{ J}$$

$$E \sim \frac{130\text{ J}}{4.184(\text{J/cal})} \sim 31\text{cal}$$

1 試合 100 球 投球 = 3100 cal = 3.1 kcal

注: 基礎代謝 : 1200kcal/day

注(?): 変換効率 1% → 310 kcal (1日の新陳代謝の 1/4 を消費)

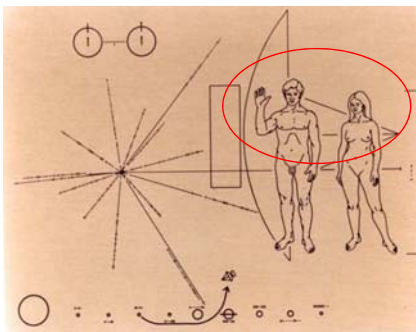
それ以外の体を動かしているエネルギー は？

質量  $M$  60kg

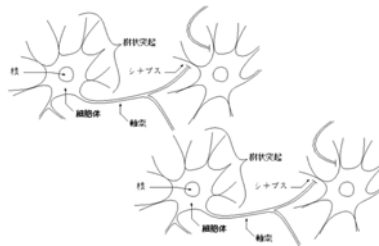
速度  $V$  75km/h ~20 m/sec

$$E = \frac{1}{2}MV^2 \cong 12000\text{ J} \sim 2.8\text{kcal}$$

## 人間のエネルギー消費 (3)



### 脳のエネルギー消費



基礎代謝 :

$$1200\text{kcal/day} = 1.2 \times 10^6\text{cal/day} = 1.2\text{Mcal/day}$$

男性: 1350~1400g 女性: 1200~1250g (体重の約2%)

1日120g(1時間5g)のブドウ糖を消費

~ 240 kcal (全体の 20% を消費)

課題: 脳とコンピュータの消費エネルギー？