

宇宙科学II (電波天文学)  
第6回

ビッグバン宇宙(続)  
&  
主系列星

前回の復習

# 黒体放射

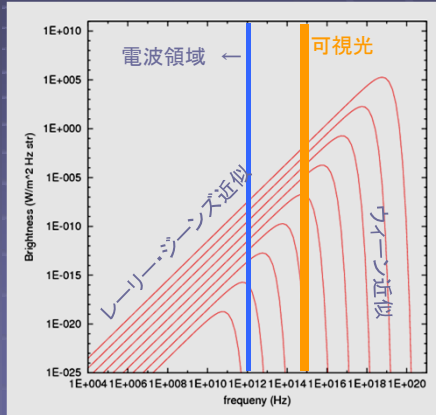
- 黒体(すべての周波数の電磁波を吸収し、再放射する仮想的物体)から出る放射

黒体放射の例：溶鋳炉からの光



八幡製鉄所

黒体放射の研究は、19世紀末に溶鋳炉の温度計測方法として発展

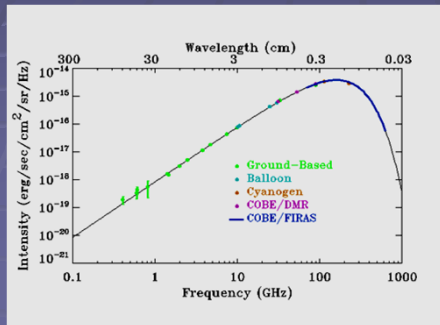
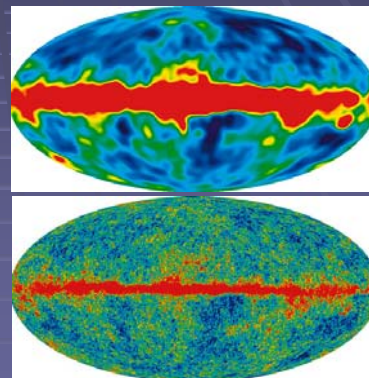


Bvのプロット (10<sup>0</sup> ~ 10<sup>8</sup> K)

# 宇宙背景放射

- 宇宙は3Kの黒体放射で満たされている＝宇宙背景放射
- ビッグバン宇宙に対する最も重要な観測的証拠のひとつ  
(宇宙が過去に高温高密度であったことの証拠)

COBE(上)とWMAP(下)が電波でみた宇宙(中央は銀河面)



宇宙背景放射のスペクトル

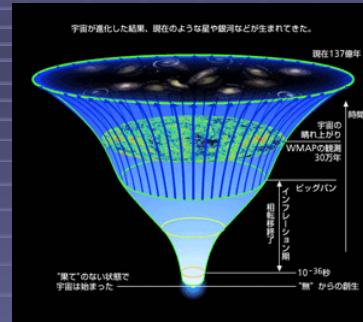
## ビッグバン宇宙論の三大証拠

- 宇宙膨張(ハッブルの法則, 1929年)  
遠い銀河ほど大きな後退速度を持つ
- 元素合成(1948年)  
宇宙における元素組成(水素~75%, ヘリウム~25%)  
は宇宙初期の高温状態から説明可能
- 宇宙背景放射(1965年)  
宇宙が昔高温、高密度であったことの痕跡

## ビッグバンと インフレーション

# インフレーション

単純なビッグバンでは  
なぜゆらぎが一樣か  
なぜ宇宙が平坦か  
が説明できない。

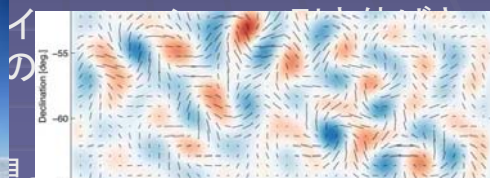


これを解決するために、宇宙初期の急激な膨張で宇宙が引き伸ばされたとするのが「インフレーション」

提唱者の一人が、東大名誉教授・現自然科学研究機構長の佐藤勝彦氏

# 最近のニュース

- 2014年3月17日、BICEP-2チームがインフレーションの痕跡を発見したと発表
- 観測したのは宇宙背景放射のB-mode偏光

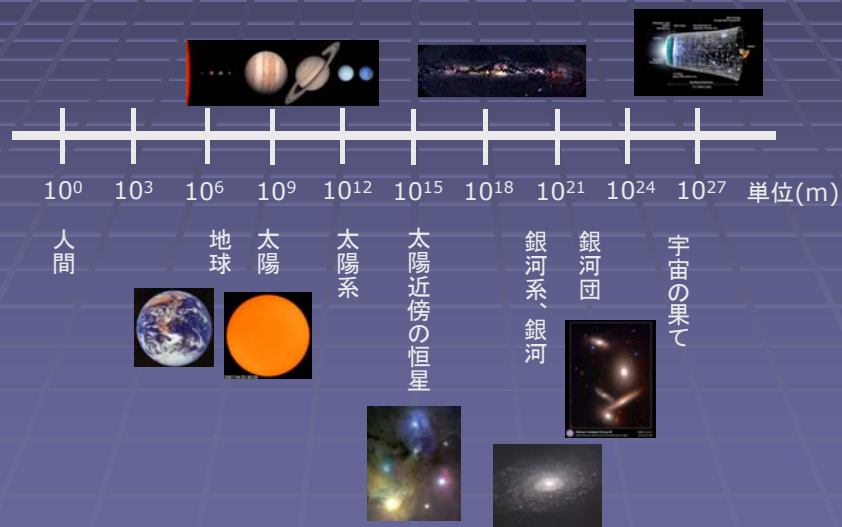


今後の検証に期待！

# 主系列星

## 宇宙の階層構造

- ログスケールで表示した宇宙の大きさ



## 主系列星

- 太陽のような普通の恒星を主系列星という
- 中心部で水素の核融合が起きて輝く
- 質量は太陽の~0.1倍から~100倍  
(それより軽い星は核融合を起こさない)
- 星の色(温度)と等級に良い相関がある  
(色一等級関係)



恒星の例  
(オリオン座)

## 星には一生がある

- 星は人間と同じように生まれて死ぬ

星間ガスが重力収縮して星が誕生



核融合反応で恒星として輝く(主系列)

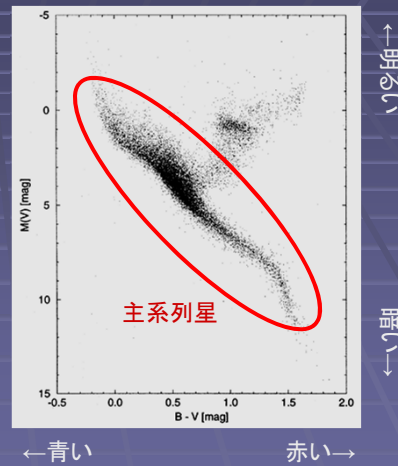


核融合の燃料が無くなると燃え尽きる

主系列星は可視光で最も明るく、電波天文学の対象として取り上げられることは少ない。しかし、星の誕生と死は電波天文学でも重要な観測対象

## 色等級図(HR図)

- 星の色と明るさ(等級)の  
関係を表す。
  - Hertzsprung-Russell図  
(HR図)とも呼ばれる。
  - この図上で、太陽のような  
星は1本の主系列にのる
- 主系列: 明るい星ほど青い  
(明るい星ほど温度が高い)

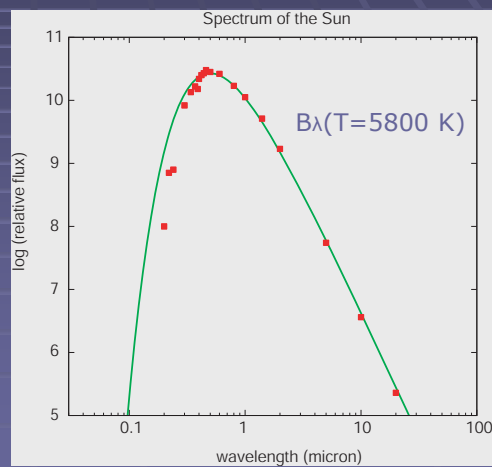


## 太陽: 恒星の代表格

- 太陽: 極めて普通の恒星
- 太陽の光球  
温度 $\sim 5800$ 度の黒体に近い
- $\lambda_{\max} = 0.5 \mu\text{m}$   
→ 可視光線



SOHOが見た太陽



太陽のスペクトル

## 地球の温度

- 太陽の光度  $L_{\text{sun}} = 4\pi R_s^2 \sigma T_s^4$
- 地球が単位時間に受け取るエネルギー  

$$P_{e\_in} = L_{\text{sun}} \times (\pi R_e^2) / (4 \pi a^2) \times (1-A)$$
 (a: 位置天文単位、A: 反射率)
- 地球が単位時間に放出するエネルギー  

$$P_{e\_out} = 4\pi R_e^2 \sigma T_e^4 \times (1-f)$$
 (f: 温室効果を表す係数)



T=5800 K



T~300 K

## 太陽と地球の温度 II

- 地球における入力と出力のつり合いから、

$$T_e = \left( \frac{1-A}{1-f} \right)^{1/4} \sqrt{\frac{R_\odot}{2a}} T_\odot,$$

$$a = 1.5 \times 10^8 \text{ km}, R_{\text{sun}} = 7 \times 10^5 \text{ km}$$

$$T_{\text{sun}} = 5800 \text{ K}$$

- A=f=0の時  $T_e = 279 \text{ K} (6^\circ \text{C})$
- A=0.3, f=0の時  $T_e = 255 \text{ K} (-18^\circ \text{C})$

黒体近似でも地球の温度をだいたい説明できる。

実際の地球はA=0.3なので、f(温室効果)がないと地球は凍る

→ 温室効果ガスは必要。が、増えすぎてもバランスがくずれる

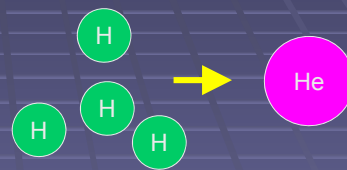


## 星のエネルギー

### 恒星のエネルギー源

- 太陽のような恒星は核融合を起こして輝く

- 主系列での核融合反応  
 $4\text{H} \rightarrow \text{He}$  等



- 核融合を起こす燃料がなくなると星は燃え尽きて死を迎える
- したがって恒星中の水素が燃え尽きる時間が寿命

## 特殊相対論

- 以下の話の準備として、特殊相対論に関する話を少しだけ(エネルギー関連)
- 質量 $m$ , 速度 $v$ の物体の運動量、エネルギーは

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

- 古典的な極限( $v \ll c$ )では

$$\vec{p} \approx m\vec{v},$$

$$E = mc^2 + \frac{1}{2}mv^2$$

となり、運動量はニュートン力学に一致。

エネルギーは第2項がニュートン力学の運動エネルギーに一致

## 特殊相対論 II

- 前頁のエネルギーの第1項は質量で決まるエネルギー。速度 $v=0$ とすれば

$$E = mc^2$$

という、質量とエネルギーが等価であるという有名な関係式が得られる。

- 一般の場合には、

$$E^2 - c^2p^2 = \left( \frac{m^2c^4 - m^2v^2c^2}{1 - v^2/c^2} \right) = m^2c^4 \text{ より、}$$

$$E^2 = (mc^2)^2 + c^2p^2 \text{ となる。}$$

特に、光子( $m=0$ )や相対論的物質( $mc^2 \ll cp$ )の場合、

$$E = cp \text{ となる}$$

## 核融合のエネルギー

- 質量とエネルギーは等価 :  $E = mc^2$
- 核融合で開放されるエネルギーは反応前後の質量差( $\Delta m$ )による ( $\Delta E = \Delta m c^2$ )

水素 $^1\text{H}$ の質量	1.0078 u
ヘリウム $^4\text{He}$ の質量	4.0026 u
ヘリウム1個と水素4個の差	$\Delta m = 0.0286 \text{ u}$
( $\Delta m / 4\text{u} \sim 0.7\%$ , 静止質量の0.7%を解放)	

u はおよそ陽子1個の質量( $m_{\text{H}} = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ )に相当  
ヘリウム1個が生成されて解放されるエネルギー

$$\Delta E = \Delta m c^2 = 4.3 \times 10^{-12} \text{ J}$$

## 太陽の寿命

- 太陽の光度  $L_{\text{sun}} = 3.8 \times 10^{26} \text{ W}$
- 太陽質量  $M_{\text{sun}} = 2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$
- すべてが水素だとして核融合で取り出せるエネルギー総量

$$E = 0.007 M_{\text{sun}} c^2 = 1.3 \times 10^{45} \text{ J}$$

- すべての水素が燃えた場合の寿命  
 $t = E / L_{\text{sun}} = 1000 \text{ 億年}$
- 実際には中心部の10%程度が燃焼可能なので、  
太陽の寿命は約100億年となる。

# 恒星のエネルギーと原子核

## 原子核の話 I

- 原子は、原子核と電子からなる
- 原子核は、陽子と中性子からなる
- 原子核質量  $A = Z(\text{陽子数}) + N(\text{中性子数})$
- 原子番号 = 陽子数 ( $Z$ ) = 原子核の電荷

原子核 電子



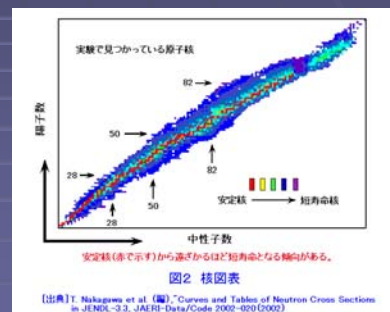
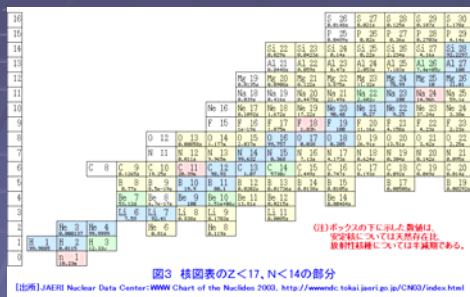
1												18		16		17		18																									
1	2											3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																
H	He											B	C	N	O	F	Ne											Br	Kr														
1.0079	4.0026											10.811	12.011	14.007	15.999	18.998	20.180											79.904	83.801														
3	4											5	6	7	8	9	10											11	12														
Li	Be											Al	Si	P	S	Cl	Ar											K	Ca														
6.941	9.0122											26.981	28.086	30.974	32.065	35.453	39.948											39.098	40.078														
11	12											13	14	15	16	17	18											19	20														
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar											K	Ca														
22.990	24.305											26.981	28.086	30.974	32.065	35.453	39.948											39.098	40.078														
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36											37	38														
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr											Rb	Sr														
39.098	40.078	44.956	47.887	50.942	51.996	54.938	55.935	58.933	58.933	63.546	65.38	69.723	72.64	74.922	78.96	79.904	83.801											85.468	87.62														
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54											55	56														
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe											Cs	Ba														
85.468	87.62	88.906	91.224	92.906	95.94	(98)	101.07	102.91	106.42	107.87	112.41	114.82	118.71	121.76	127.60	126.90	131.29											132.91	137.33														
55	56											57	58	59	60	61	62	63	64											65	66												
Cs	Ba											La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd											Tm	Yb												
132.91	137.33											138.91	140.12	140.91	144.24	(145)	150.36	151.96	157.25	158.93											188.906	190.48											
67	68											69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86											87	88		
Fr	Ra											Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr											(283)	(284)					
(283)	(284)											(287)	(288)	(289)	(290)	(291)	(292)	(293)	(294)	(295)	(296)	(297)	(298)	(299)	(300)	(301)	(302)	(303)	(304)	(305)	(306)	(307)	(308)										
* Lanthanide series																		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71											
																		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu											
																		138.91	140.12	140.91	144.24	(145)	150.36	151.96	157.25	158.93	164.93	167.26	168.93	173.04	174.96												
# Actinide series																		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104										
																		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr											
																		(287)	(288)	(289)	(290)	(291)	(292)	(293)	(294)	(295)	(296)	(297)	(298)	(299)	(300)	(301)	(302)										

## 原子核の話II

- 原子核は強い力(短距離力)で結合  
10<sup>-15</sup>mレベルでクーロン力よりも大きくなる
- 原子核には(Z,N)の値によって、安定なもの不安定なもの存在。半減期はその核種が半分になるのにかかる時間(1/eになる時間を寿命ともいう)
- 単独の中性子は不安定で、約15分で陽子に崩壊(弱い力)。質量差はわずか。  
$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

## 核図表

- (中性子数N,陽子数Z)の平面上に核種を配置した表
- およそN~Zが安定な原子核(Z>>1では N > Zで安定)

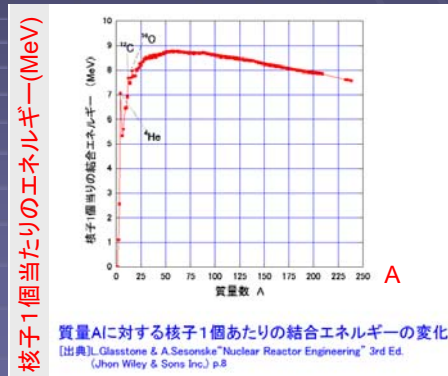


核図表の例 (横軸は中性子数N、縦軸は陽子数Z)

## 原子核の結合エネルギー

- 安定核種の中でも最も安定な原子核はFe (A=56)
- これより小さい原子核に陽子や中性子を加えエネルギーを得るのが核融合
- これより大きな原子核を壊してエネルギーを得るのが核分裂

核子1個あたりのエネルギー



1eV =  $1.3 \times 10^{-19}$  J, 電子に1Vの電圧をかけて得られるエネルギー

## 星の核融合と進化

- 質量に応じて、最大でFeまで燃焼が進む。  
 $4\text{H} \rightarrow \text{He}$   
 $3\text{He} \rightarrow 12\text{C}$   
 $12\text{C} \rightarrow 16\text{O} \rightarrow 20\text{Ne} \dots \rightarrow 56\text{Fe}$
- 軽い星では温度が十分あがらないので燃焼が途中で止まる。→ 縮退圧で支える白色矮星へ
- 重い星(太陽の10倍以上)では鉄の生成まで進む  
その後鉄より安定な核がないために核反応によるエネルギー生成で星を支えることができなくなる  
→ 超新星爆発へ

# 元素と宇宙

- すべての元素は宇宙起源

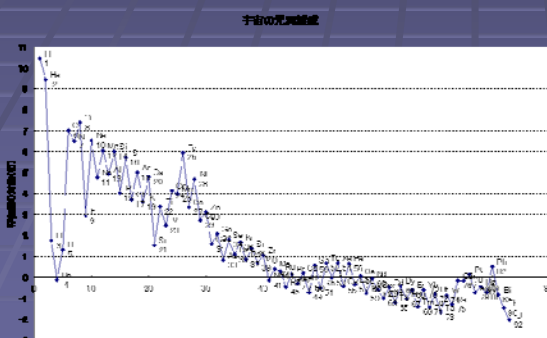
The periodic table shows the origin of elements:
 

- ビッグバン (Big Bang):** Elements 1 (H) and 2 (He).
- 超新星 (Supernova):** Elements 3 (Li) through 10 (Ne).
- 恒星 (Star):** Elements 11 (Na) through 100 (Fm).

- 天体による元素合成がなければ、生命は誕生しえない

# 人間=星の子

- ビッグバンは水素とヘリウムのみ生成
- 人間の体を構成する元素(CHONPS...)のうち水素以外は星の内部で生成された。
- 人間を含むすべての生命は“星の子”である。



宇宙と人体の元素組成

表1 人体を構成している元素組成

元素	重量(g)	体重に対する重量(%)
酸素	43,000	61
炭素	16,000	23
水素	7,000	10
窒素	1,800	2.6
カルシウム	1,000	1.4
リン	780	1.1
硫黄	140	0.20
カリウム	140	0.20
ナトリウム	100	0.14
塩素	95	0.12
マグネシウム	19	0.027

[出典] ICRP Publication 23, Report of the Task Group on Reference Man (1974), p.327

## エネルギーの話

### エネルギー論

- 化学エネルギー(石油 etc.)  
最も安価だが CO2排出、枯渇の可能性有。
- 核エネルギー  
高効率。高い技術が必要。
  - ・核融合 クリーンだが要超高温。未实用。
  - ・核分裂 実用中だが放射能汚染問題。
- 太陽エネルギー(太陽光発電 etc)  
クリーン だが高コスト。  
未来のエネルギーは何か？



## エネルギー生成効率

エネルギーを取り出せる割合(静止質量比)

- 核融合

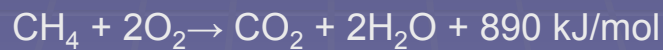
$$\epsilon_{pp} \sim 0.7\% \quad (4H \rightarrow He)$$

- 核分裂

ウラン(A=235)をA~100程度の核2個に分裂する場合、核子あたりのエネルギーから

$$\epsilon_{uran} \sim 1 \text{ MeV} / m_H \sim 0.1\% \quad (m_H = 937 \text{ MeV})$$

- 化学エネルギー



$$\epsilon_{chem} \sim 6 \times 10^{-8}\% \quad (<< \epsilon_{pp}, \epsilon_{uran})$$

核エネルギーの効率は化学エネルギーに比べ桁違いに大きい！

## ブラックホール発電所!?

- 宇宙で最もエネルギー生成効率が高いのは、実はブラックホールへの質量降着

- BHに物質を落として重力エネルギーを解放すると

$$\epsilon_{BH} \sim 10 \text{ -- } 40\% \quad (\text{核エネルギーの10倍以上})$$

- 落とす物質は何でもよい！(ゴミ、放射性物質 etc.)  
一石二鳥である。

- しかし、BHは危ない(飲み込まれる...)  
いまのところは、SFの世界の存在か

## 核融合と核分裂

- 核融合

水素 → ヘリウム → 炭素 ...

長所: クリーン

短所: 超高温が必要(1億度)

- 核分裂

重元素 → 質量数の小さい別元素

長所: 簡単(自然分裂、または中性子を当てる)

短所: 放射性物質が発生

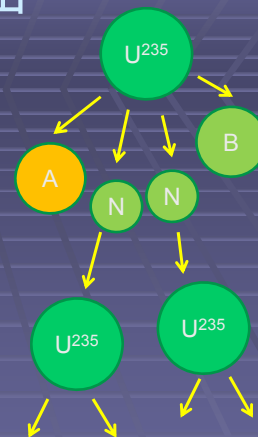
## 核分裂が簡単な理由

- $^{235}\text{U}$ の例

半減期7億年で自然に崩壊

その際数個の中性子を放出

その中性子を別の $^{235}\text{U}$ が吸収して連鎖反応(臨界)



- 必要なのは $^{235}\text{U}$ を高濃度にした「濃縮ウラン」
- 濃縮ウランが一定量あれば、簡単に臨界に  
(例: 1999年の東海村JCO事故)

## 人類のエネルギー収支

- 日本の年間消費エネルギー（電気、石油、他）  
 $E \sim 2 \times 10^{19} \text{ J}$
  - 世界の人口（70億人）が日本レベルでエネルギーを消費すると  
 $E \sim 1.2 \times 10^{21} \text{ J}$
  - 地球が太陽から受け取るエネルギー（年間）  
 $E \sim 5 \times 10^{24} \text{ J}$
- 太陽エネルギーは人類の活動を支えるのに十分

## 太陽光発電の問題点

- 建設コスト
  - 原発  $\sim 25 \text{ 万円/kW}$
  - 太陽電池  $\sim 50 \text{ 万円/kW}$ （原発の倍）
- 土地
  - 太陽光を集めるために広大な面積が必要
- 電池
  - 昼に発電して充電し、夜に回す必要

## 太陽電池の要求面積

- 地球表面での太陽フラックス

$$F = L_{\text{sun}} / (4 \pi a^2) = 1.4 \text{ kW/m}^2$$

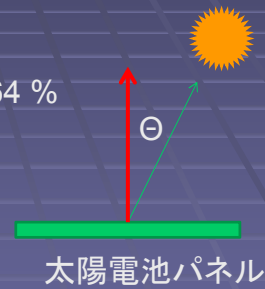
- 太陽電池の変換効率            ~20 %
- 昼の長さ                            ~50 %
- 平均入射効率                     $2 / \pi \sim 64 \%$
- 晴天率                                ~50 %

- 一般家庭1世帯あたり必要な面積

$$P = 100 \text{ V} \times 30 \text{ A} = 3 \text{ kW}$$

$$S = 3 / F / (0.2 \times 0.5 \times 0.64 \times 0.5) = 70 \text{ m}^2$$

(→ 8.3m x 8.3m, 家の屋根レベル)



## 太陽電池の面積II

- 原発1基分(100万kW)の太陽光発電に必要な土地

$$S = 100 \text{ 万} / F / (0.2 \times 0.5 \times 0.64 \times 0.5) = 23 \text{ km}^2$$

- 日本の原発全部(55台分)を置き換えるには  
1300 km<sup>2</sup>  
(山手線内面積~63km<sup>2</sup>の約20倍!!)

- 土地代もどうする?

1平米あたり1万円なら13兆円

電池(蓄電)の問題ももちろん重大...

## 原発はいる？いない？

- 電気は必要(生活レベルを落とさない限り)
- 原発は放射能の危険性有(事故が実際に起きた)
- 代替エネルギーの解は未定(化学燃料はCO<sub>2</sub>を出す。太陽エネルギーへの置き換えも簡単でない)

結論は総合的に考えて出すべき