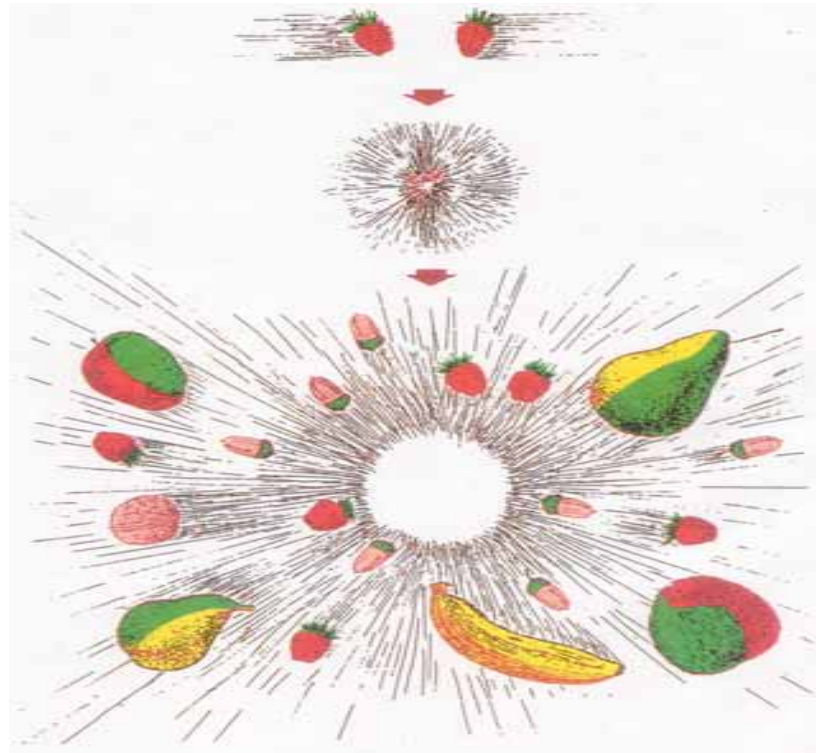


自然の2つの極限

「物はなにからできているか」から「太陽や宇宙のこと」まで
大阪大学核物理研究センター
板橋 隆久



「10兆分の1 cmの極微少の素粒子の探求や原子核の合成の話、宇宙の創生や太陽のエネルギー源、またこれからを研究するための道具、さらに研究する人々と国際協力について」

自然から学ぶ

- ものすごく大きな自然
宇宙、星、太陽、銀河、天体
- ものすごく小さな自然
原子、原子核、クォーク、ニュートリノ

地球の半径

6380 km

月までの距離

384000 km

太陽系の大きさ

60000000000 km

銀河系の直径

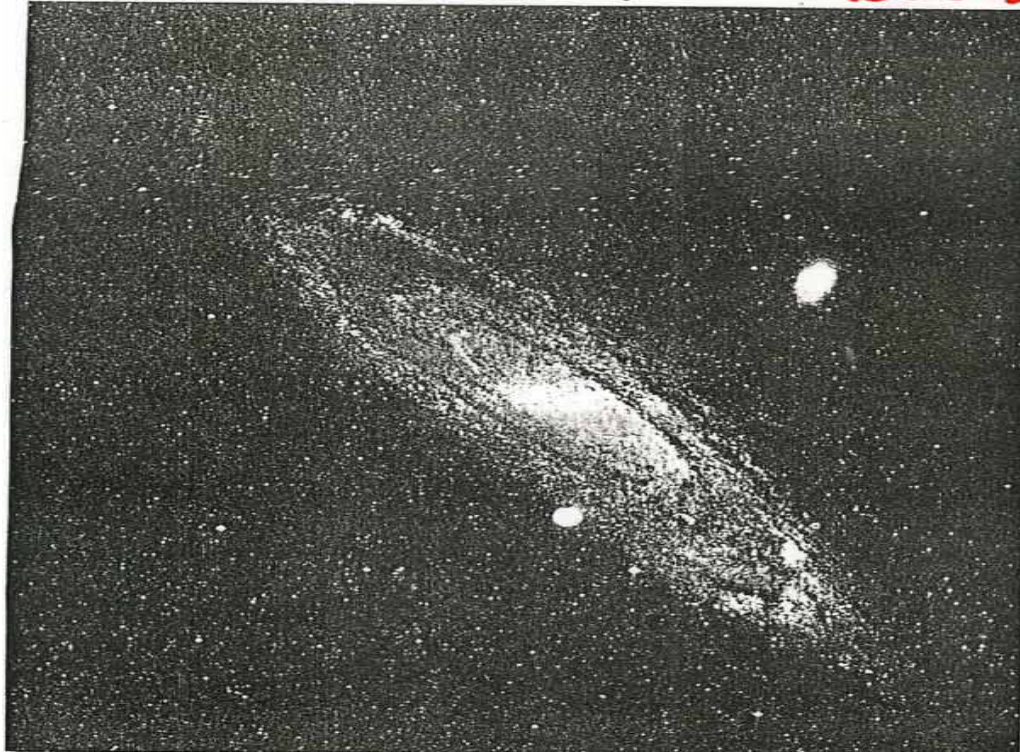
80000 光年

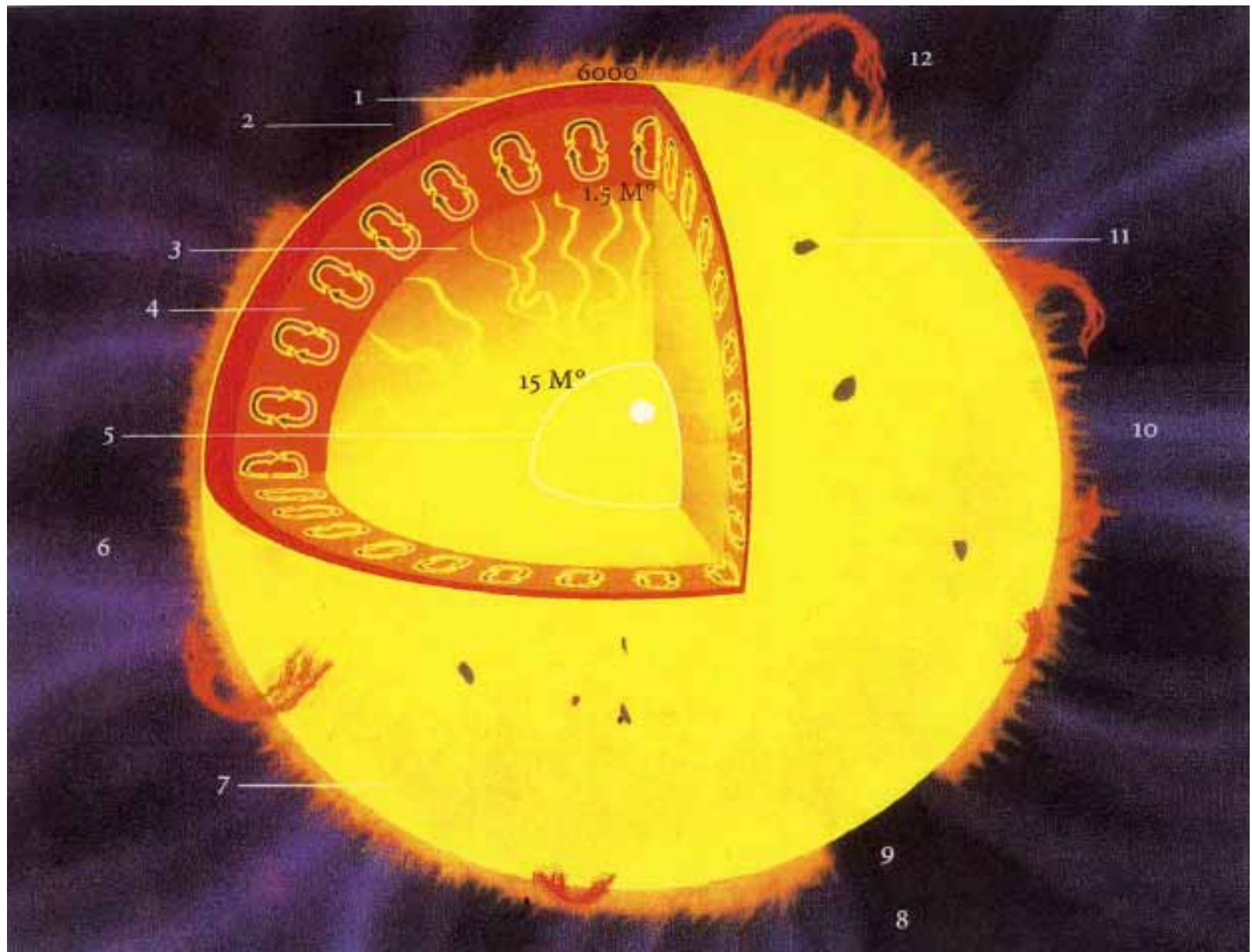
宇宙の大きさ

150 億光年

アンドロメダ大星雲

地球からの距離
~ 200 万光年





どのような形に変わっても、エネルギーの総量は一定不変である。

これをエネルギー保存の法則という。この法則は、最も基本的で重要

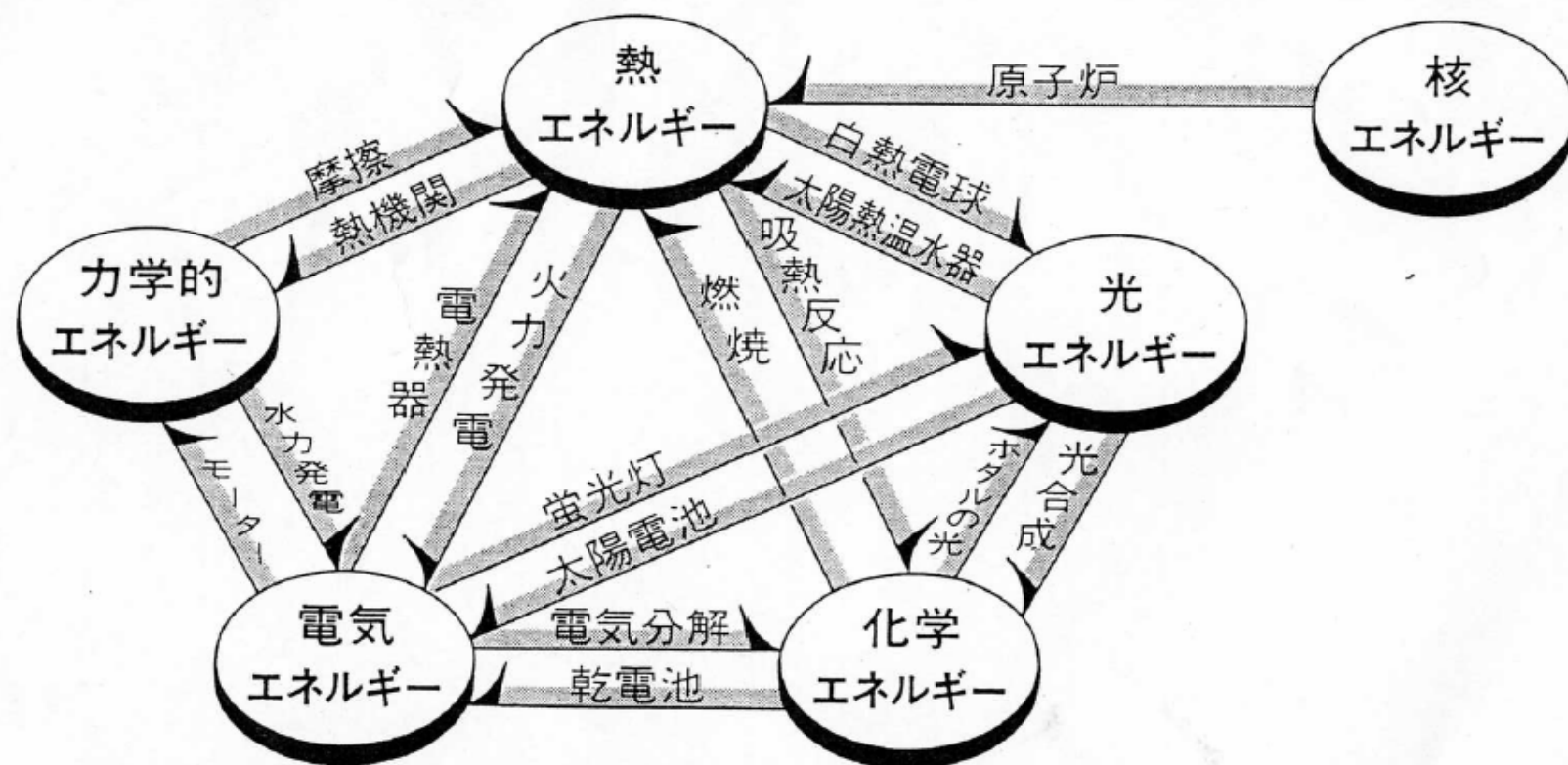
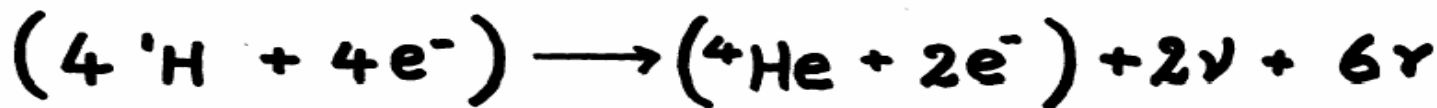
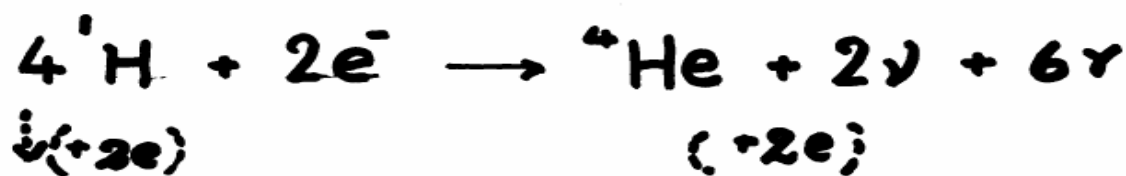


図 14 いろいろな形のエネルギーの変換

核融合.

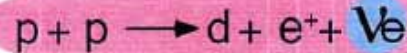
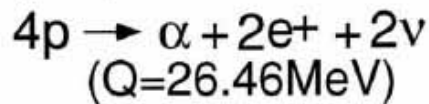
太陽やその他の恒星の放出するエネルギーの源
～水素などの核融合

p-p cycle



$$\begin{aligned}\therefore \Delta mc^2 &= \{4(1.007825\text{u}) - 4.002603\text{u}\} (931.5\text{ MeV/u}) \\ &= 26.7\text{ MeV}\end{aligned}$$

p-p chain



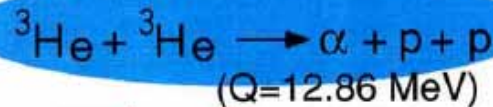
GALLEX
SAGE (^7Ga)



$$\phi(pp) \propto S_{11}^{0.14} S_{33}^{0.03} S_{34}^{-0.06}$$

$$\phi({}^7\text{Be}) \propto S_{11}^{-0.97} S_{33}^{-0.43} S_{34}^{0.86}$$

86 %



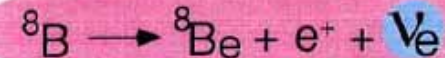
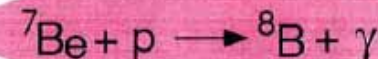
$\sigma \sim \text{pb}$ $E_{\text{cm}} = 17 \sim 27 \text{ keV}$

hypothetical narrow resonance
→ reduce neutrino flux from
 ${}^7\text{Be}$ and ${}^8\text{B}$ reactions

14 %



HOMESTAKE
(^{37}Cl)



Super Kamiokande
(water Cherenkov)

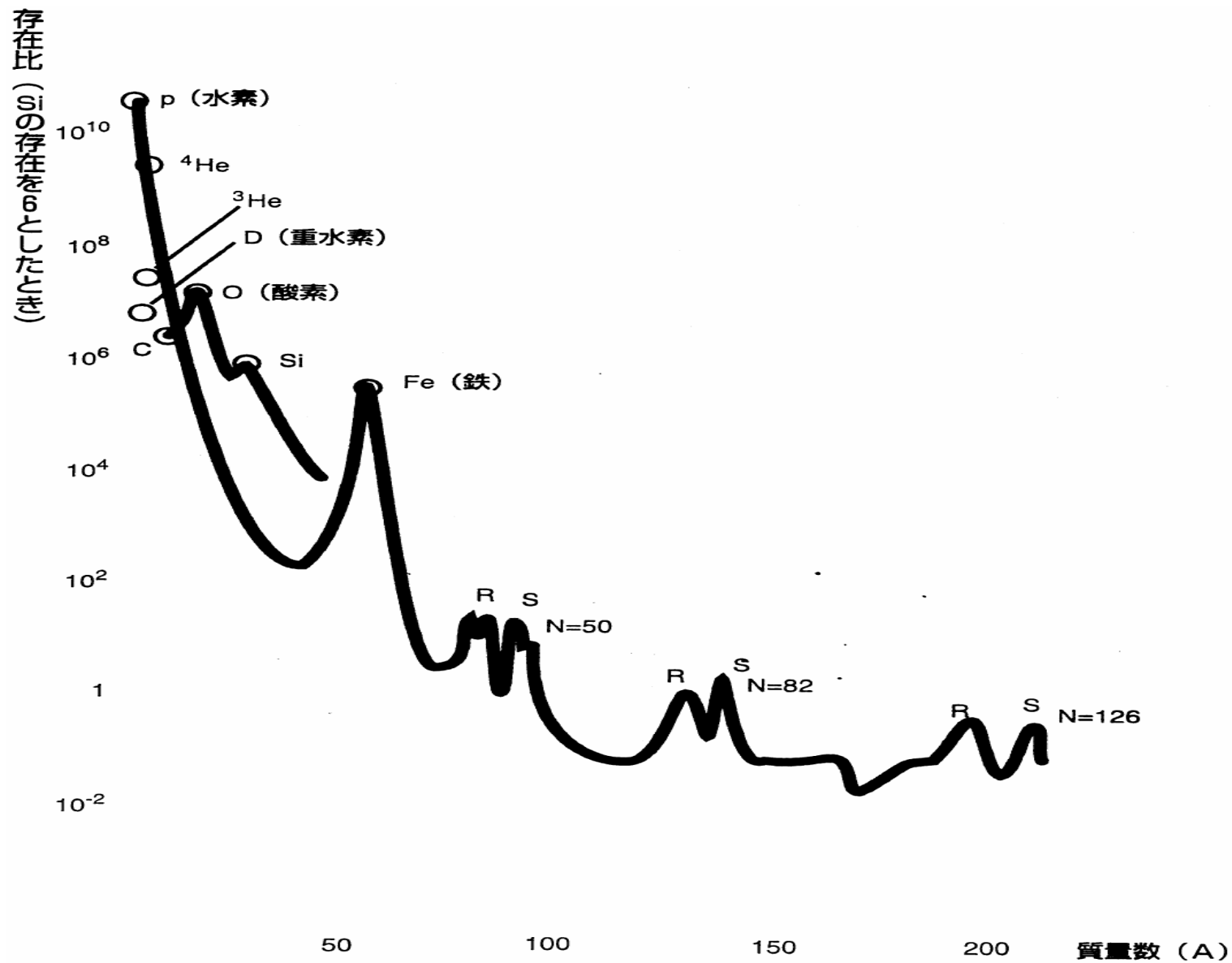
$\alpha + \alpha$

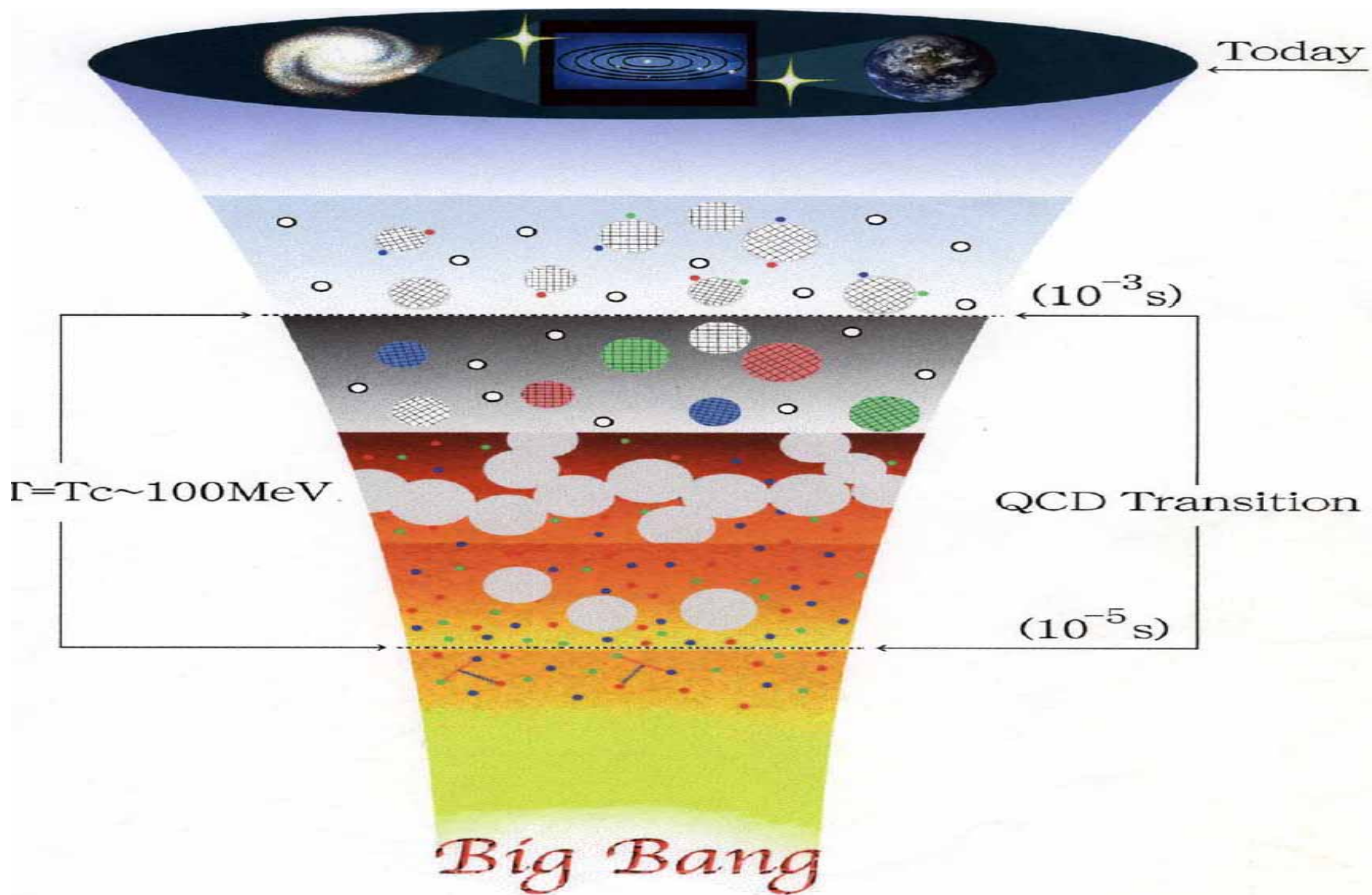
$$\phi({}^8\text{B}) \propto S_{11}^{-2.6} S_{33}^{-0.40} S_{34}^{0.81} S_{17}^{1.0} S_{e^-7}^{-1.0}$$

S-factor

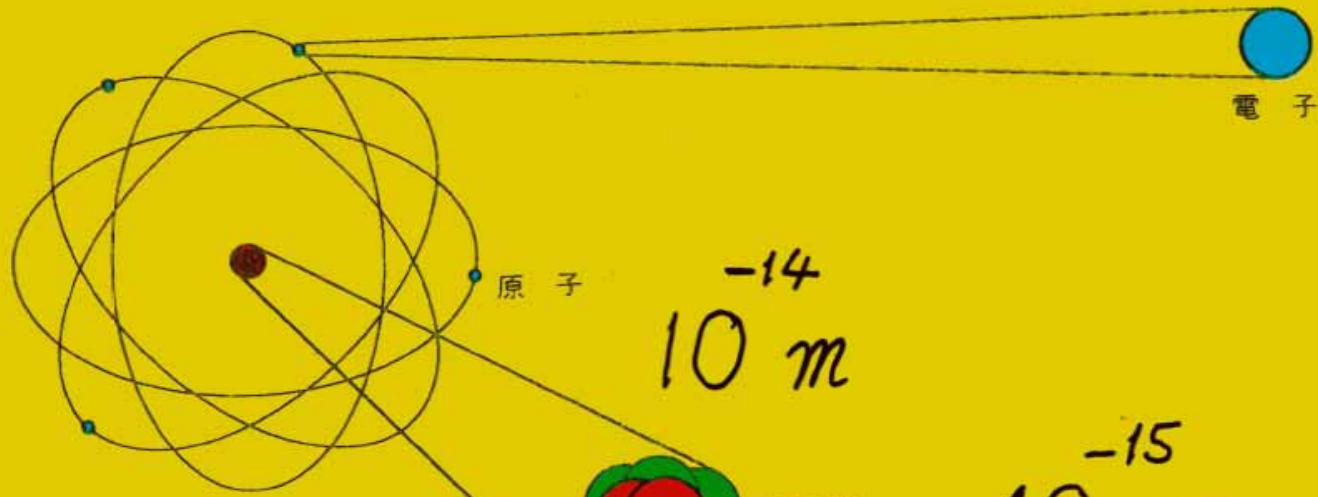
- input parameter of standard solar model
- extrapolation from high energy region

$$\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} \exp(-2\pi\eta(E))$$





$1\text{\AA}$ 10^{-10} m



原子

電子

10^{-14} m



原子核

10^{-15} m

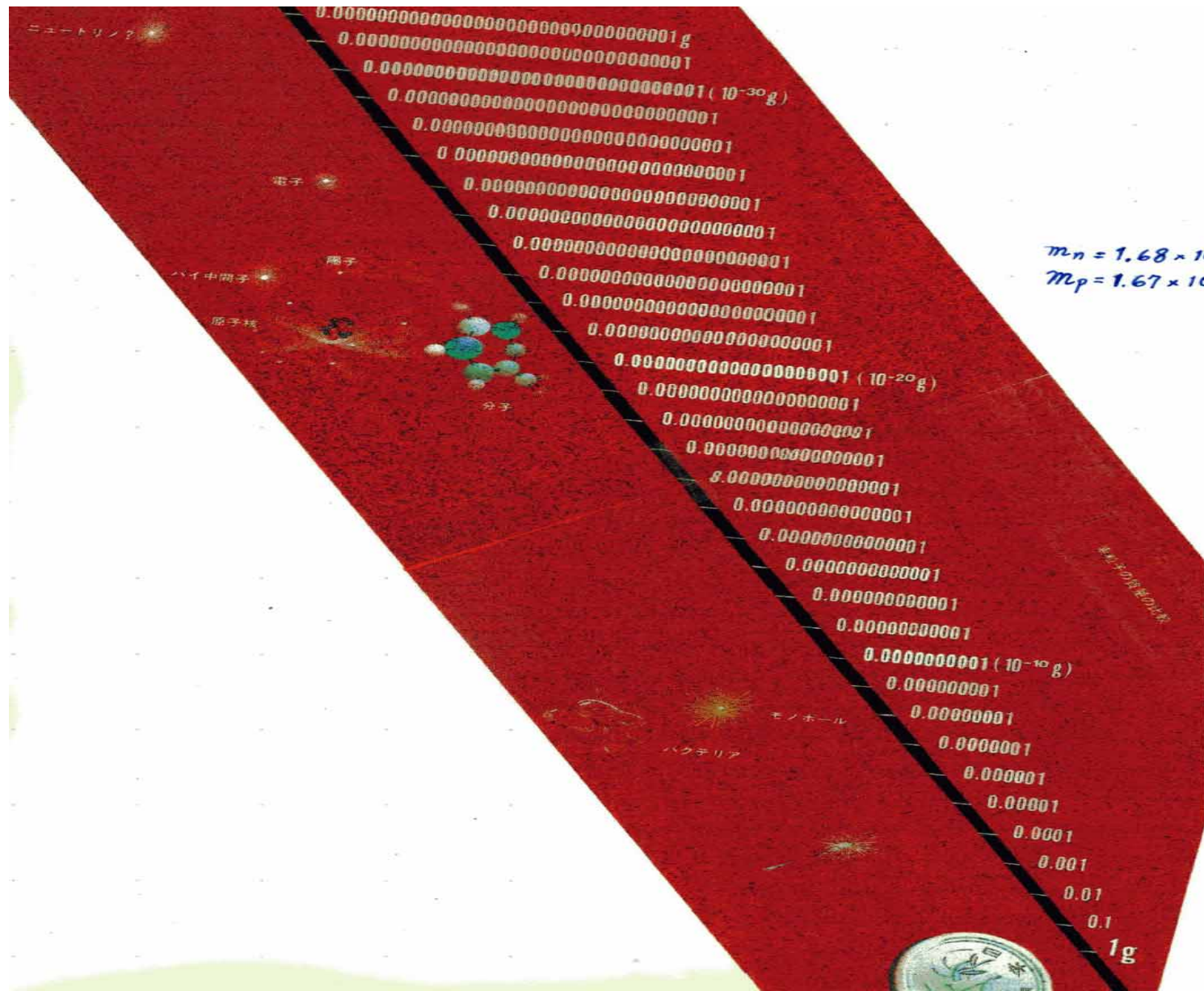


素粒子

$< 10^{-17}\text{ m}$



クォーク

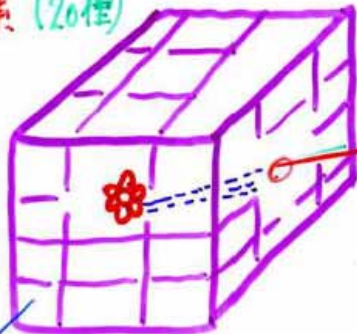


$$m_n = 1.68 \times 10^{-24}$$
$$m_p = 1.67 \times 10^{-24}$$

放射線の性質

自然放射性元素 (20種)

U
Po
Ra



鉛

豊富な実験材料を提供

透過能力！

一枚程の紙で停るもの

2.5cm位の木で止まるもの

紙も木も通り抜ける
ぶ厚いコンクリートで止まるもの

α -ray

β -ray

γ -ray

電場
磁場

アルファ線
 α

ガンマ線
 γ

β
電子

SONY



放射性核崩壊の3つの型



(電荷保存)

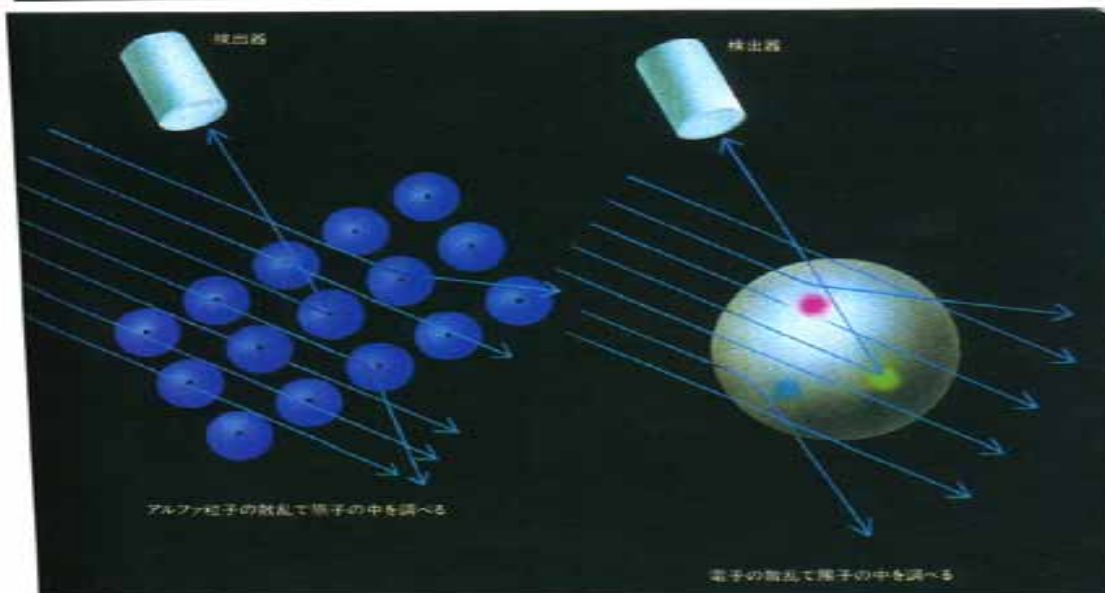
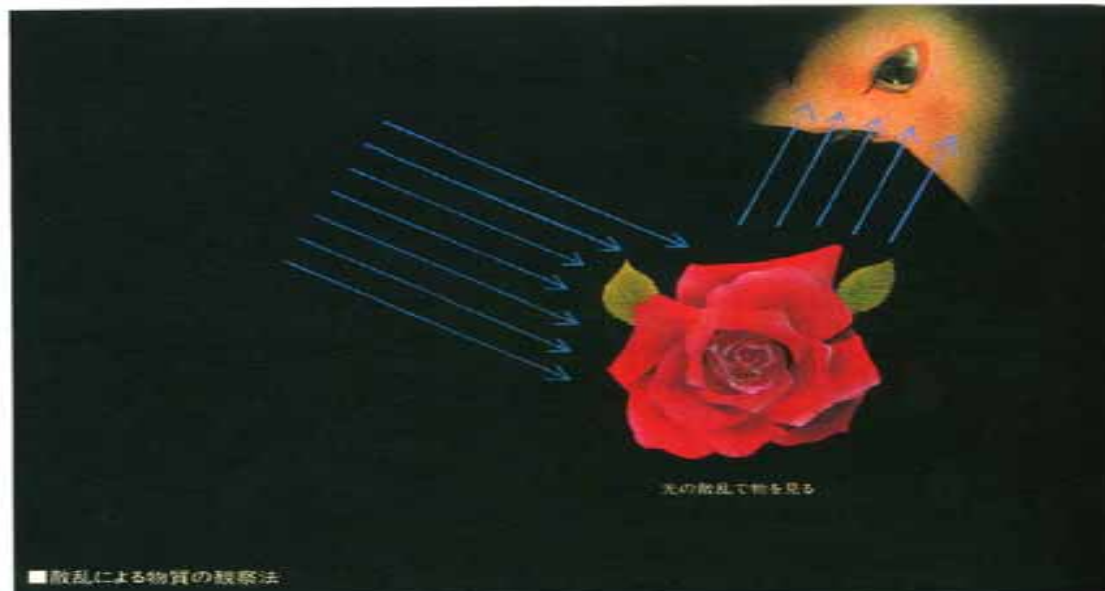
中性子の崩壊

mean life

886.7 s

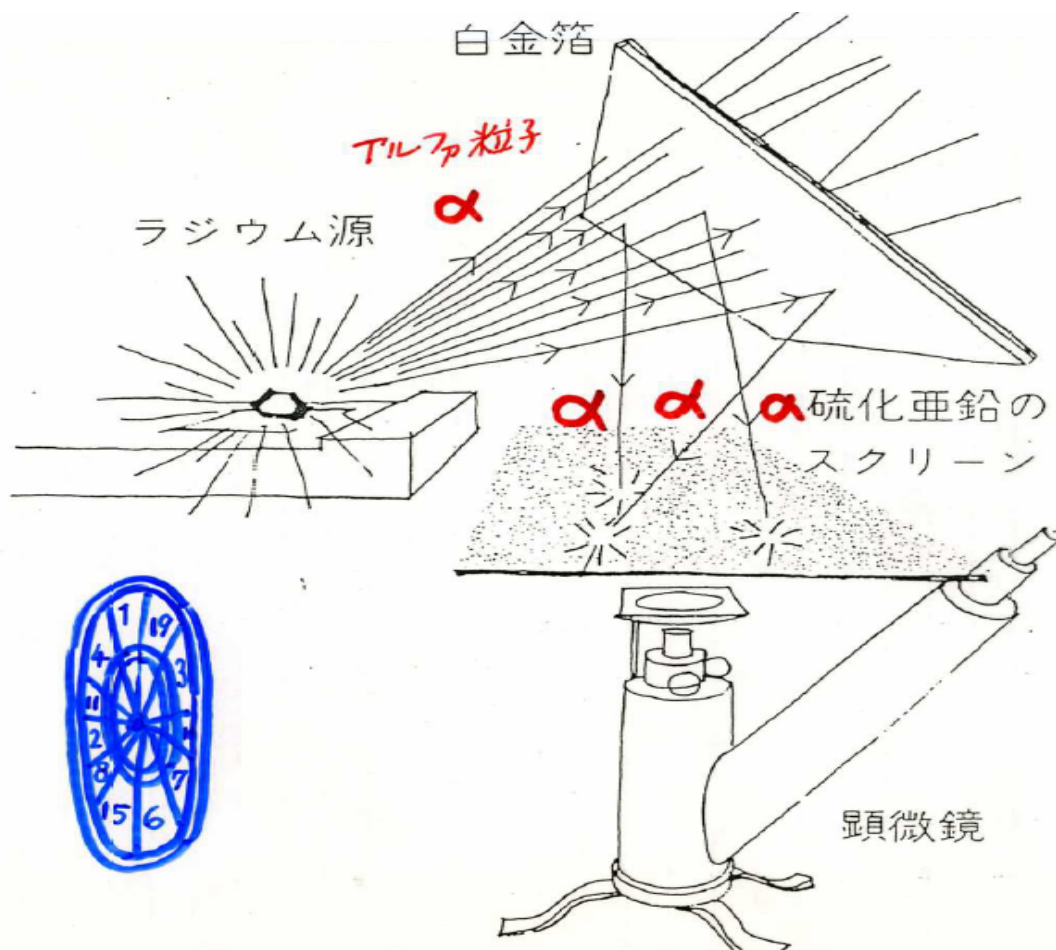
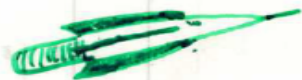


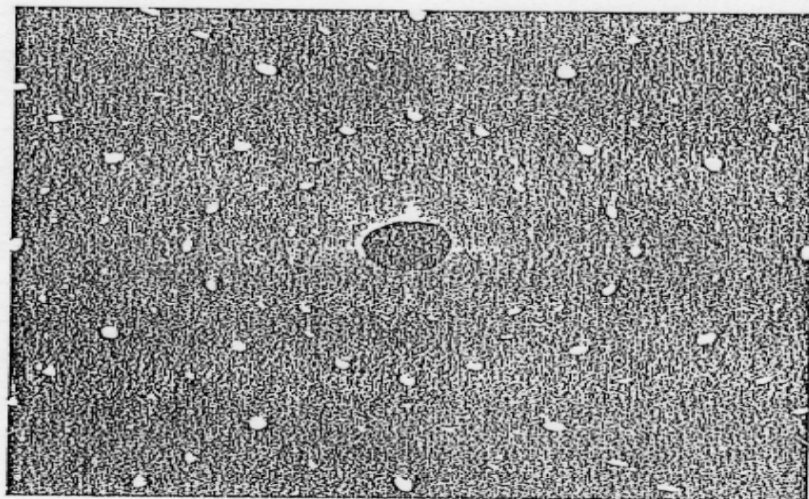
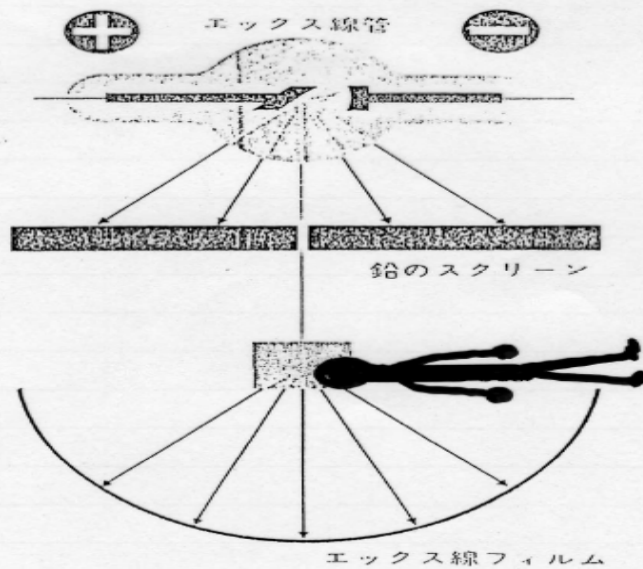
$$m_{n^0} c^2 - (m_p c^2 + m_{e^-} c^2) = 0.8 \text{ MeV}$$

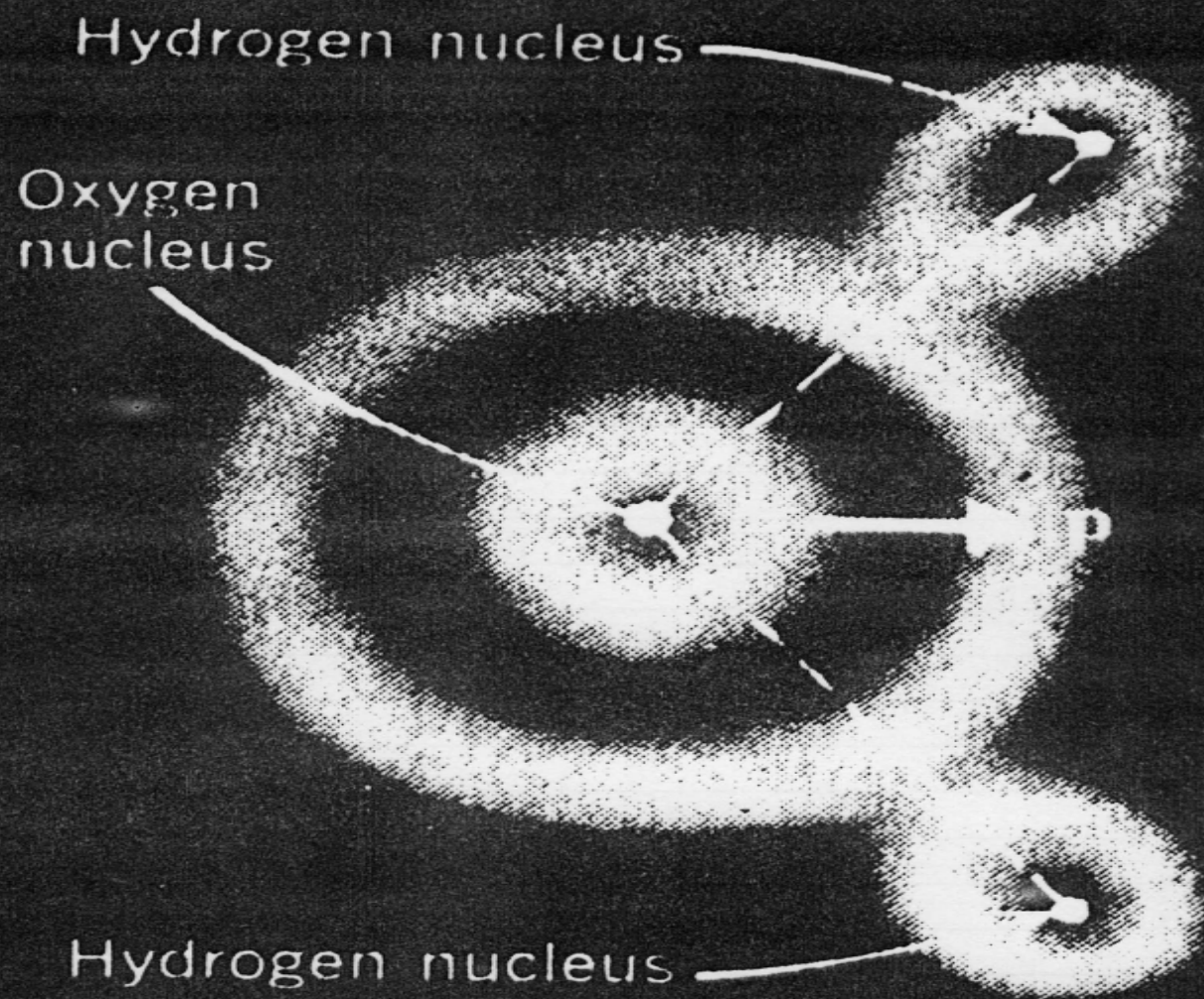


大まか

α線の実験により、
原子核(原子の中心)の
大きさが
10兆分の1cm位で
あることが判った。







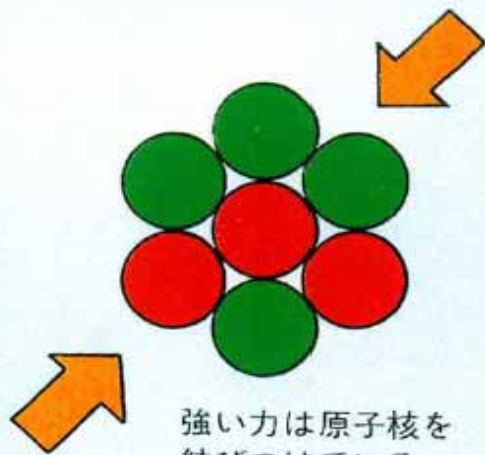


物質の基礎構成要素

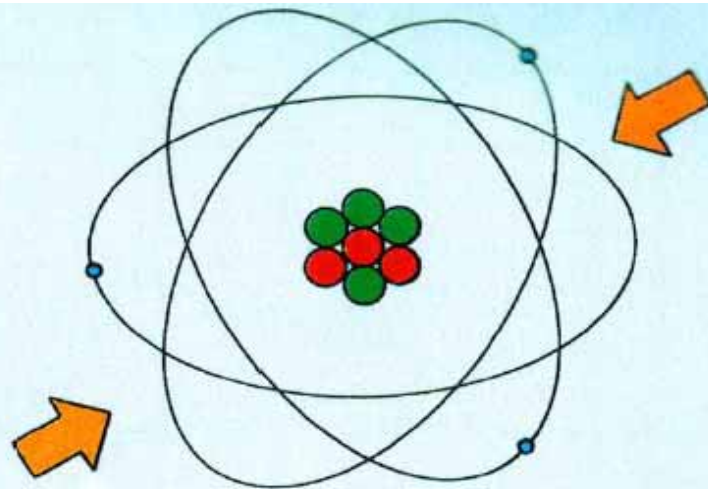
日常世界の物質中	クォーク	レプトン
	 アップ  ダウン	 電子  電子中性微子
高エネルギー環境で存在する物質中	 奇妙さ  チャーム	 ミュー中間子  ミュー中性微子
	 ボトム  トップ(?)	 タウ  タウ中性微子(?)

力の伝達体

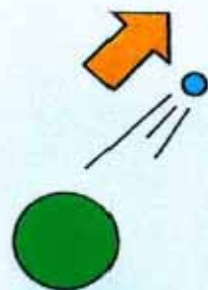
力	光子
	
電弱	Wボゾン  Zボゾン 
	グリユオン 



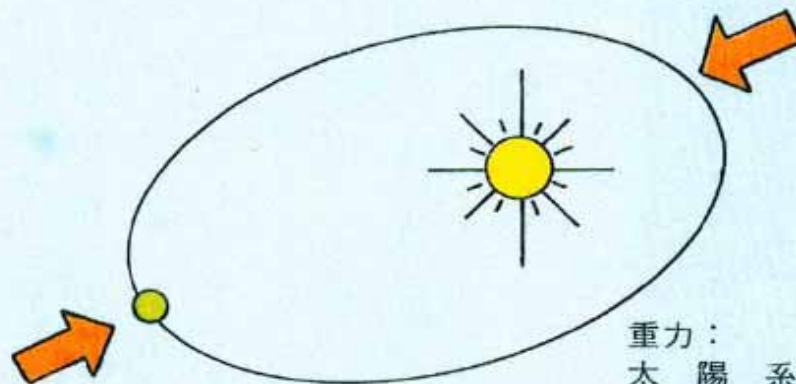
強い力は原子核を
結びつけている



電磁力は原子を
結びつけている



弱い力：
放射性崩壊



重力：
太陽系

どのような形に変わっても、エネルギーの総量は一定不変である。

これをエネルギー保存の法則という。この法則は、最も基本的で重要

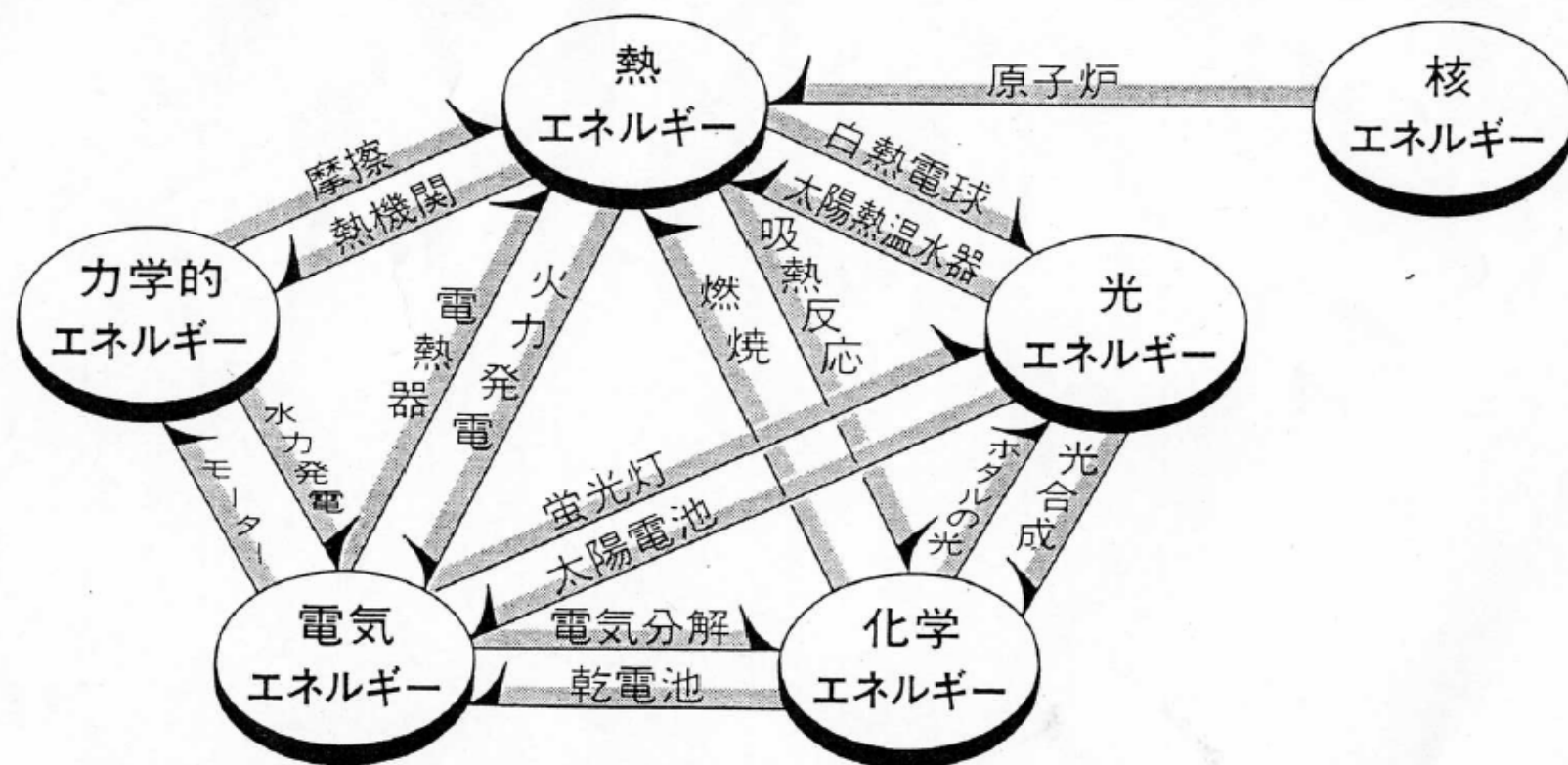


図 14 いろいろな形のエネルギーの変換

力学的エネルギー保存則

力学的エネルギー

$$= (\text{運動エネルギー}) + (\text{位置エネルギー})$$

◦ 重力 による位置エネルギー

◦ 万有引力による位置エネルギー

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \left(-G\frac{mm'}{r}\right)$$

◦ 弾性力 による位置エネルギー

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

◦ 電気力 (クーロン力) による位置エネルギー

◦ 核力 による位置エネルギー

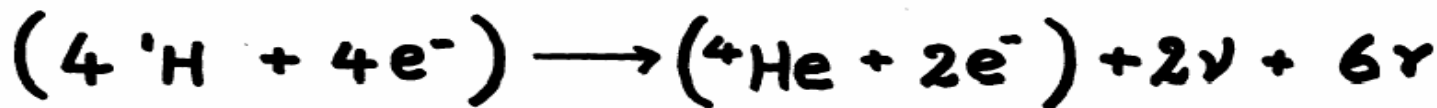
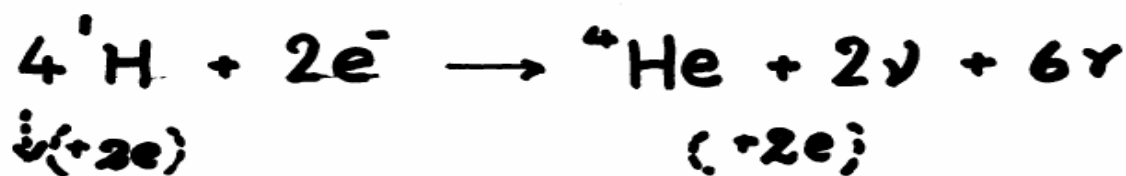
◦ 弱い力 による位置エネルギー

4つの基本的な力

核融合.

太陽やその他の恒星の放出するエネルギーの源
～水素などの核融合

p-p cycle



$$\begin{aligned}\therefore \Delta mc^2 &= \{4(1.007825\text{u}) - 4.002603\text{u}\} (931.5\text{ MeV/u}) \\ &= 26.7\text{ MeV}\end{aligned}$$

${}^4_2\text{He}$ の 結合エネルギー

◦ 陽子 $1.00728 \times 2 = 2.01456$

◦ 中性子 $1.00866 \times 2 = 2.01732$

◦ 電子 $0.00055 \times 2 = 0.0011$

合計 $= 4.03298$
(—)

◦ He $= 4.00260$

∴ $\Delta m (\mu) = 0.03038$

結合エネルギー (Δmc^2)

$$\Delta m; 0.03038 \mu = 0.0304 \times 1.66 \times 10^{-27} \\ = 5.05 \times 10^{-29} \text{ (kg)}$$

$$\begin{aligned} \Delta mc^2 &= 5.05 \times 10^{-29} \times (3 \times 10^8)^2 \\ &= 4.55 \times 10^{-12} \text{ Joule} \\ &= 28.4 \text{ MeV} \end{aligned}$$

原子物理学では、エネルギーの単位として、電子ボルト
エレクトロン・ボルト
(eV) を使う。

keV ; 10^3 eV

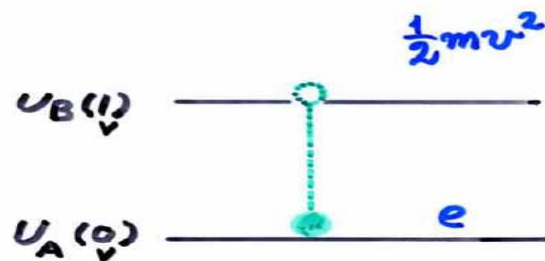
MeV ; 10^6 eV

GeV ; 10^9 eV

TeV ; 10^{12} eV

PeV ; 10^{15} eV

EeV ; 10^{18} eV



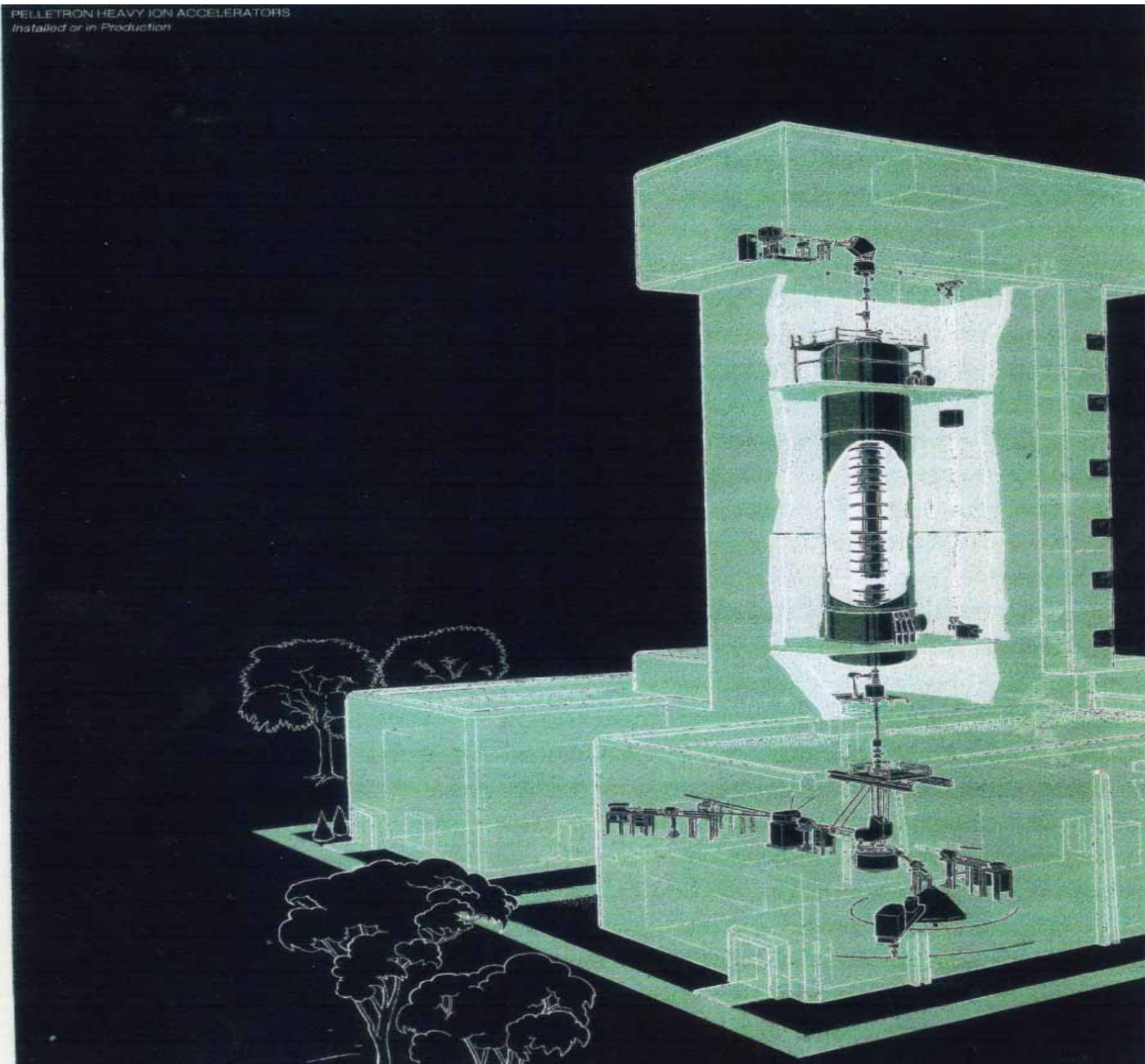
□ 1 V (ボルト) の電位差のある2地点間の電子の位置
 エネルギーの差を 1 電子ボルト という。 □

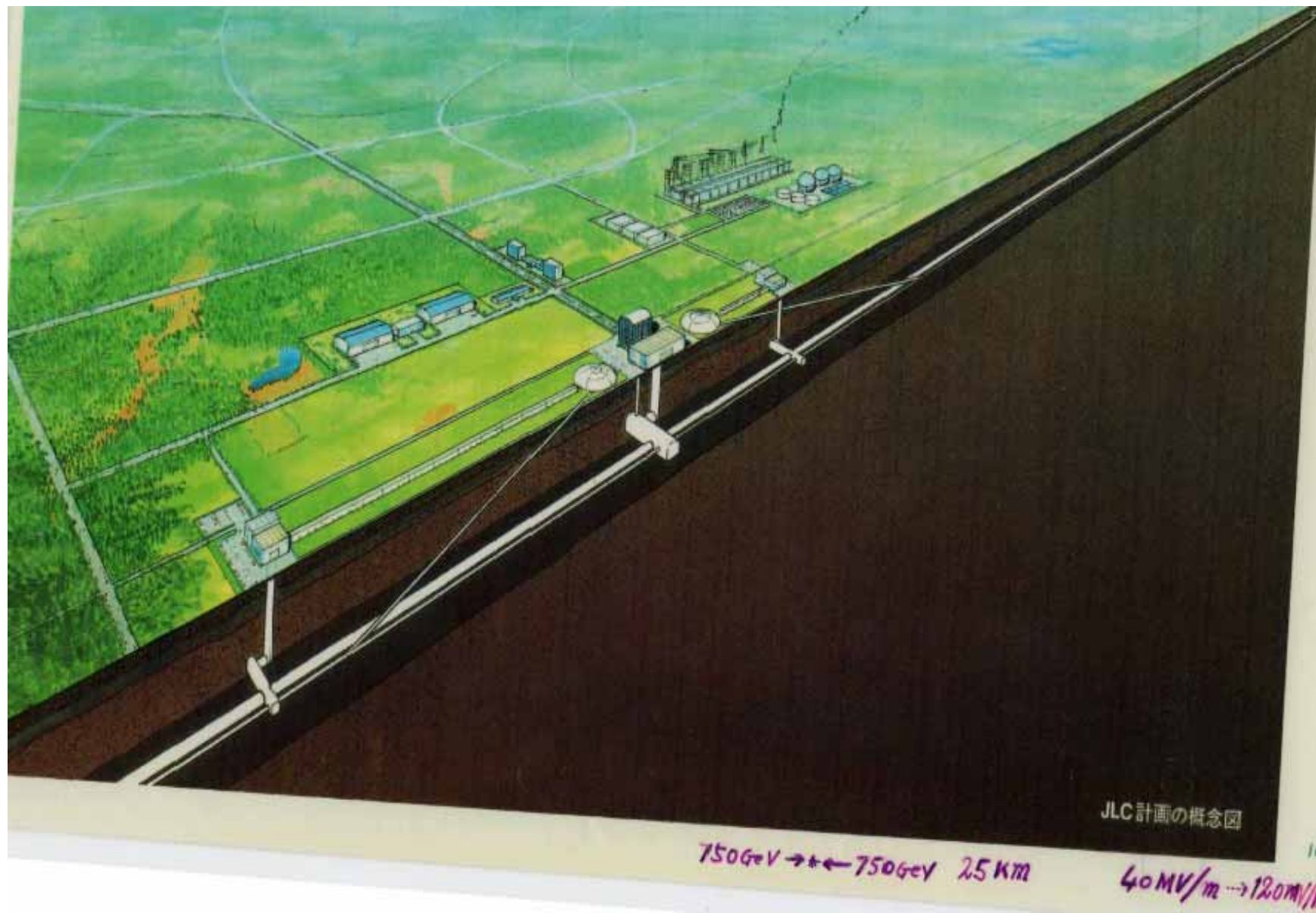
この電位差で電子が加速された場合、電子の運動エネルギー
 が増える。

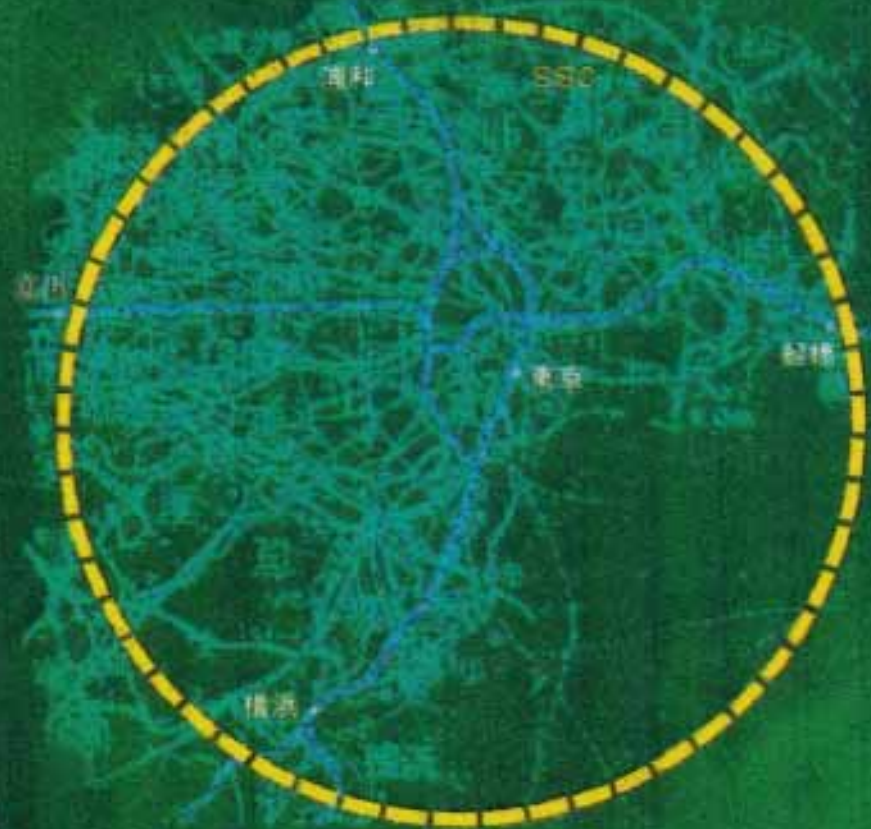
$$\frac{1}{2} (9.1 \times 10^{-31}) v^2 = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\therefore v^2 = 3.5 \times 10^{11} \quad v = 5.9 \times 10^5 \text{ m/s}$$

PELLETRON HEAVY ION ACCELERATORS
Installed or in Production







シンクロトロン

設置場所	名称	直径(に)	完成年
高エネルギー物理学研究所(KEK)日本	KEK-PS トリスタン	108 360	1976 1986
ヨーロッパ原子核研究所(CERN)	CPS SPS LEP	200 2200 6400	1960 1976 1988
フェルミ国立加速器研究所(FNAL)アメリカ	—— テバトロン	2000 2000	1972 1986
ブルックヘブン国立研究所(BNL) アメリカ	AGS	257	1960
？ アメリカ	SSC	2.5万~7万?	1990予定?
セルブコフ高エネルギー物理研究所(IHEP)ソ連	—— UNK	472 6000	1967 1990予定?

線型加速器

設置場所	全長(に)	完成年
スタンフォード線型加速器センター(SLAC)アメリカ	3000	1966
高エネルギー物理学研究所(KEK)日本	400	1982



天橋門橋(1629に)



国島大橋(1270に)





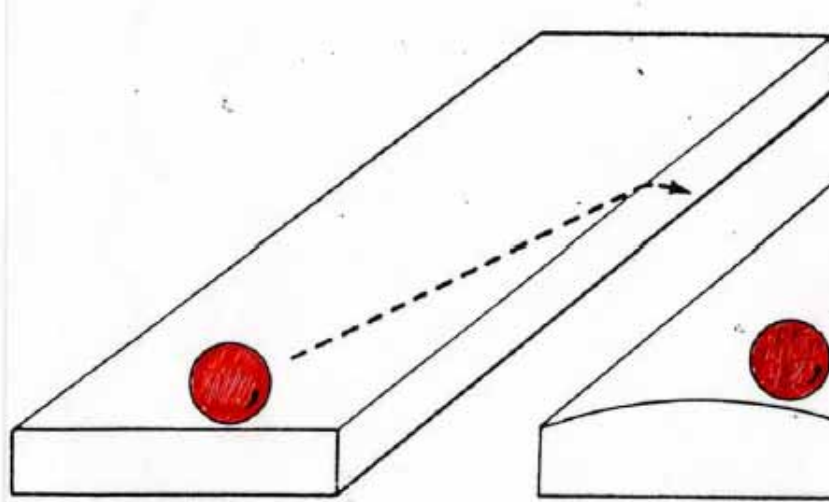
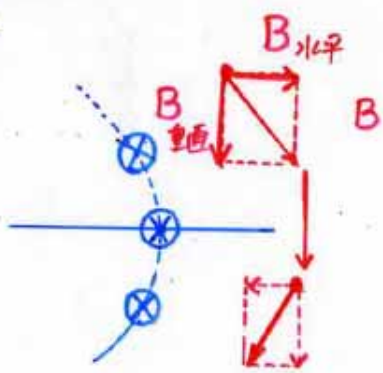
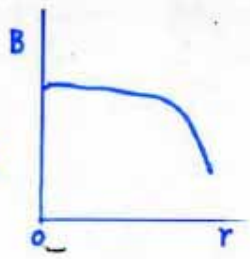
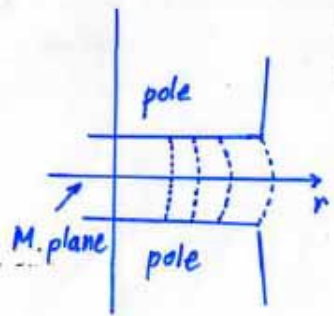
文部省高エネルギー物理学研究所

直至

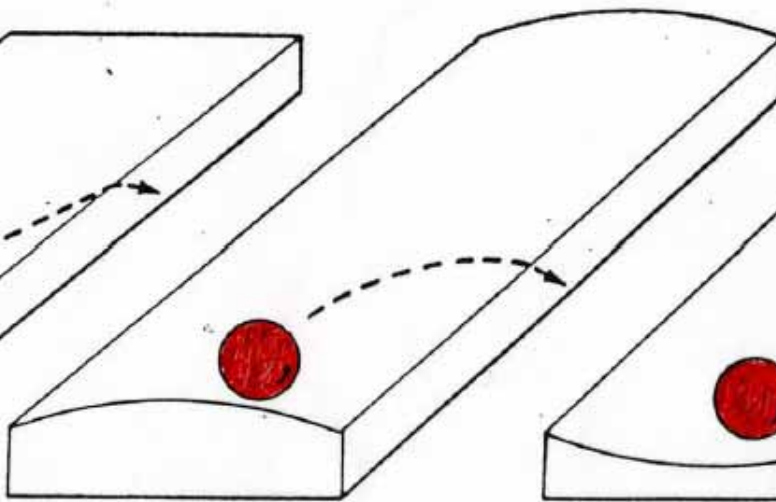
960m

e^-e^+

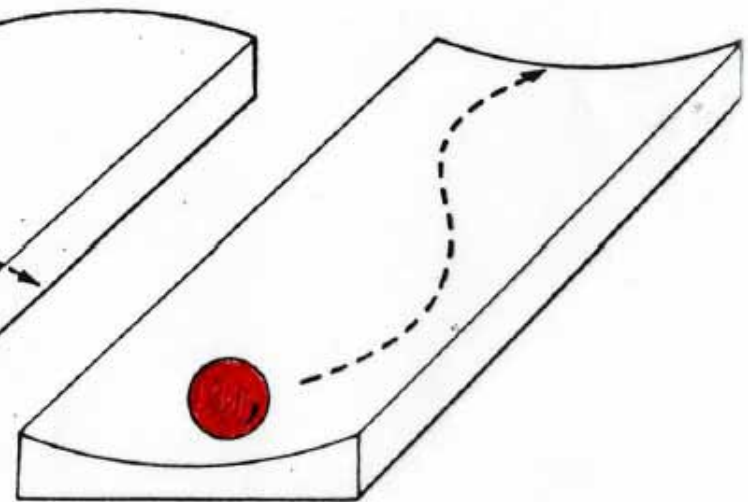
weak focus



発散

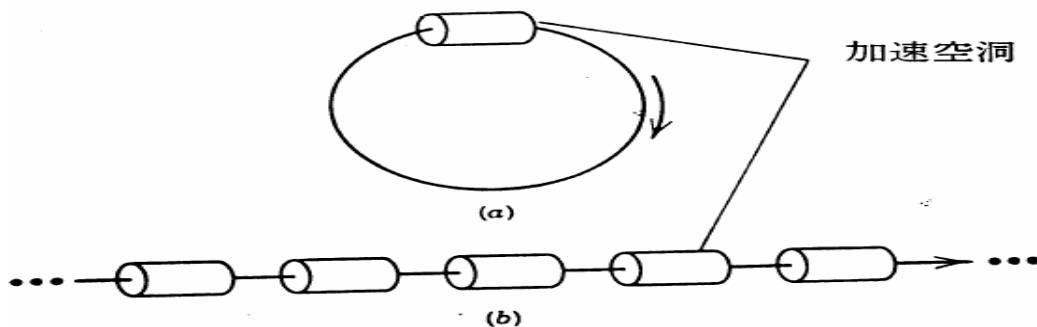
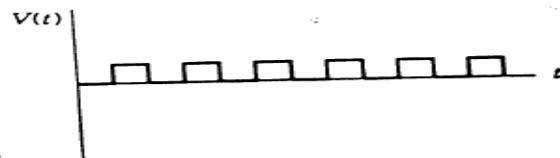
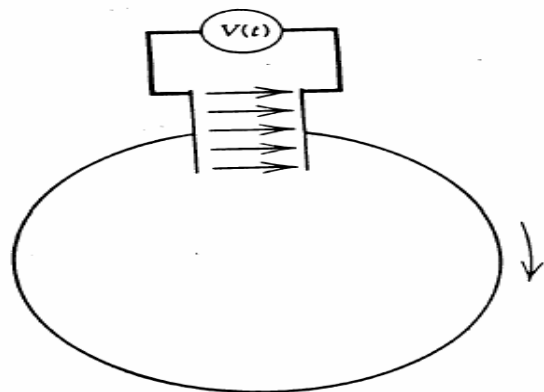
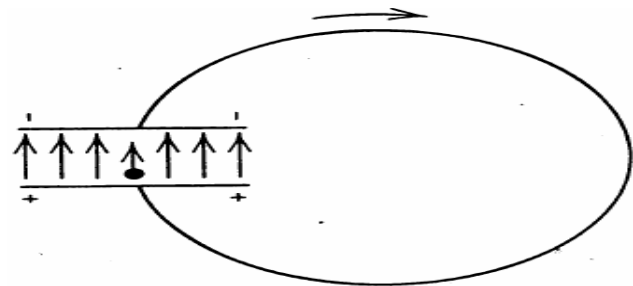


発散



収束

5km 1m

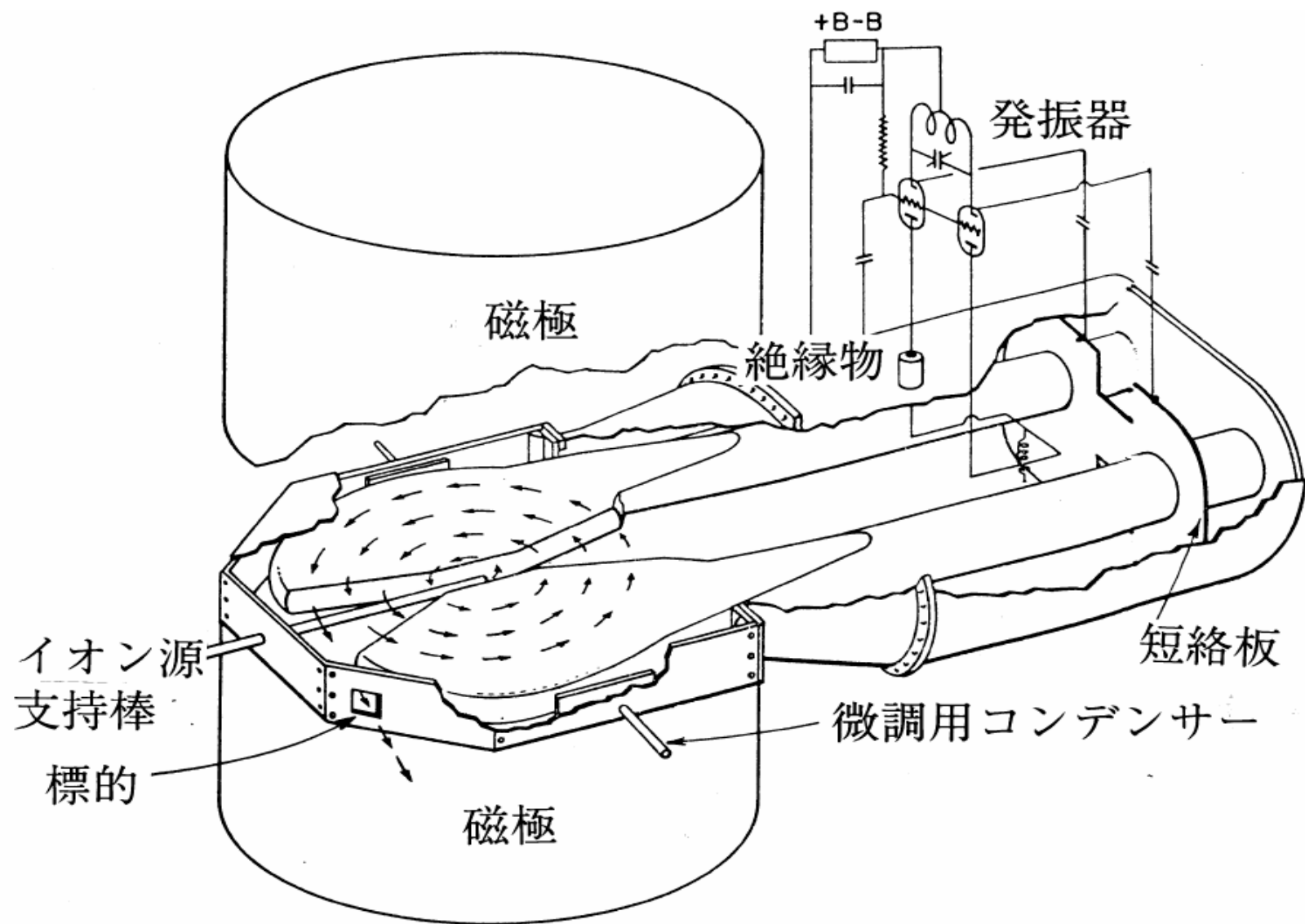


「多重加速」

「共鳴加速」

{ 高周波の周期と
粒子の運動との
間に一定の関係
の原理

都合の良いタイミング



Target chamber.

e-catcher

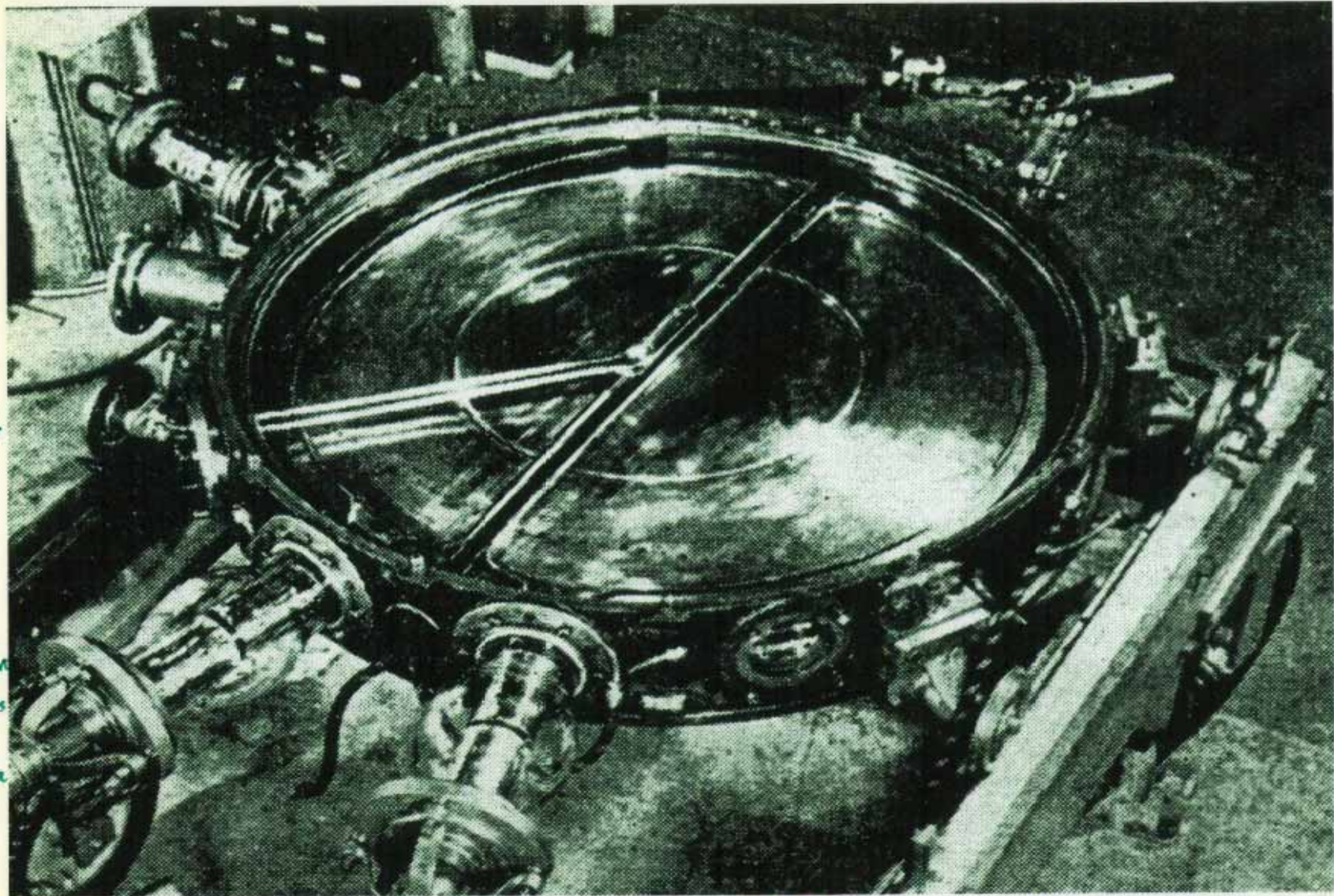
dee-support
pyglass
insulators

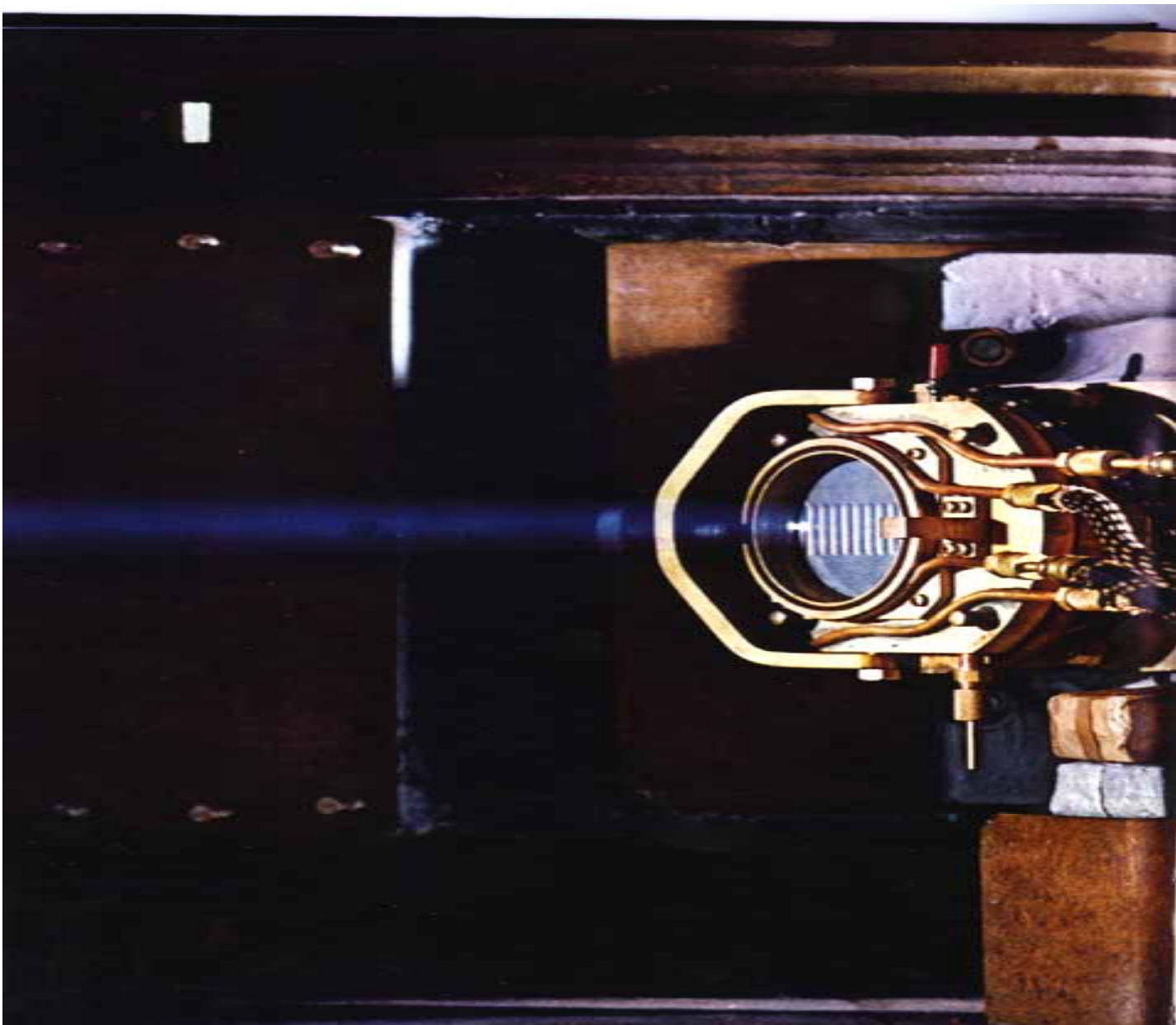
Ion-source
→

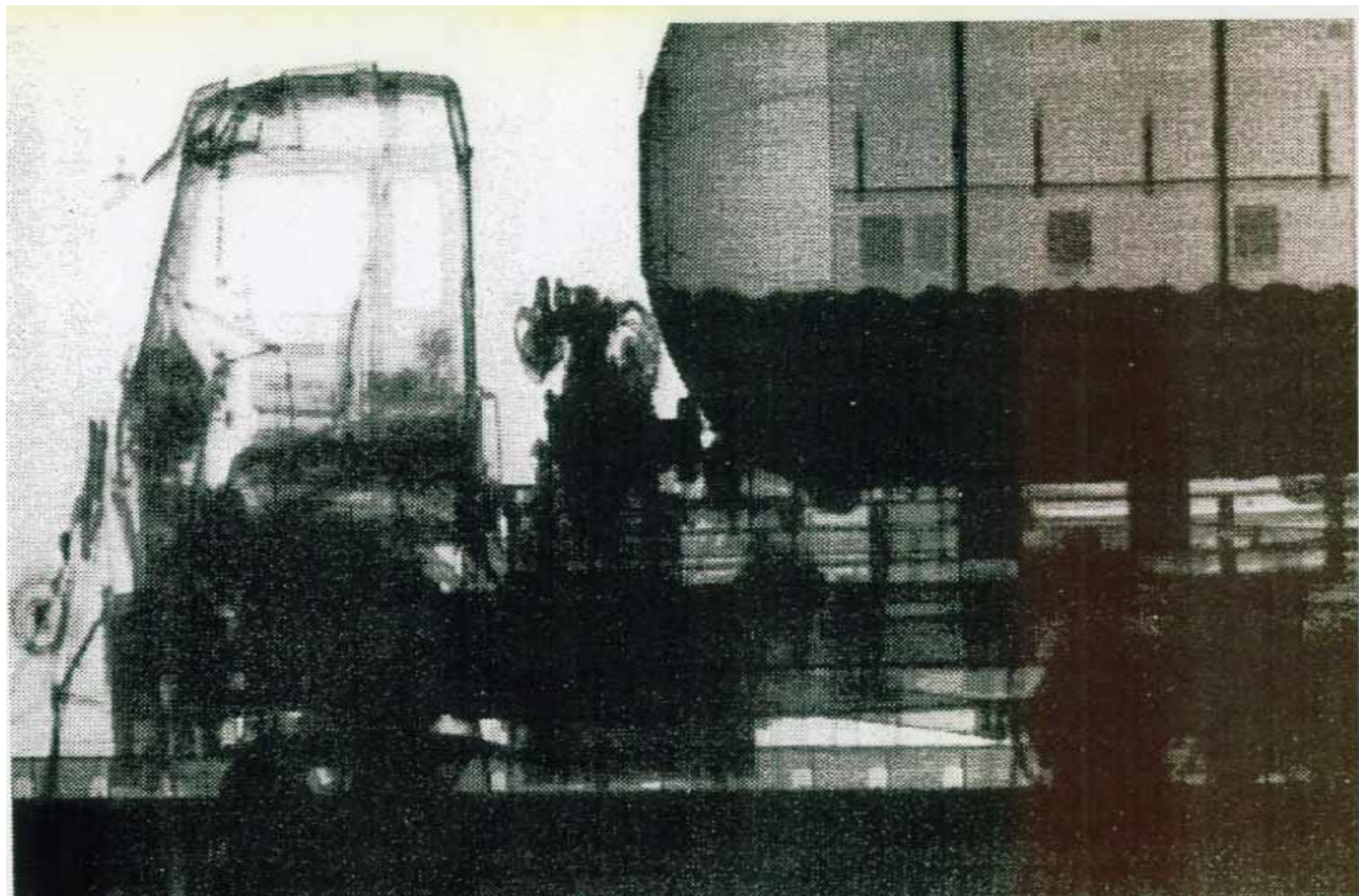
dee-support.

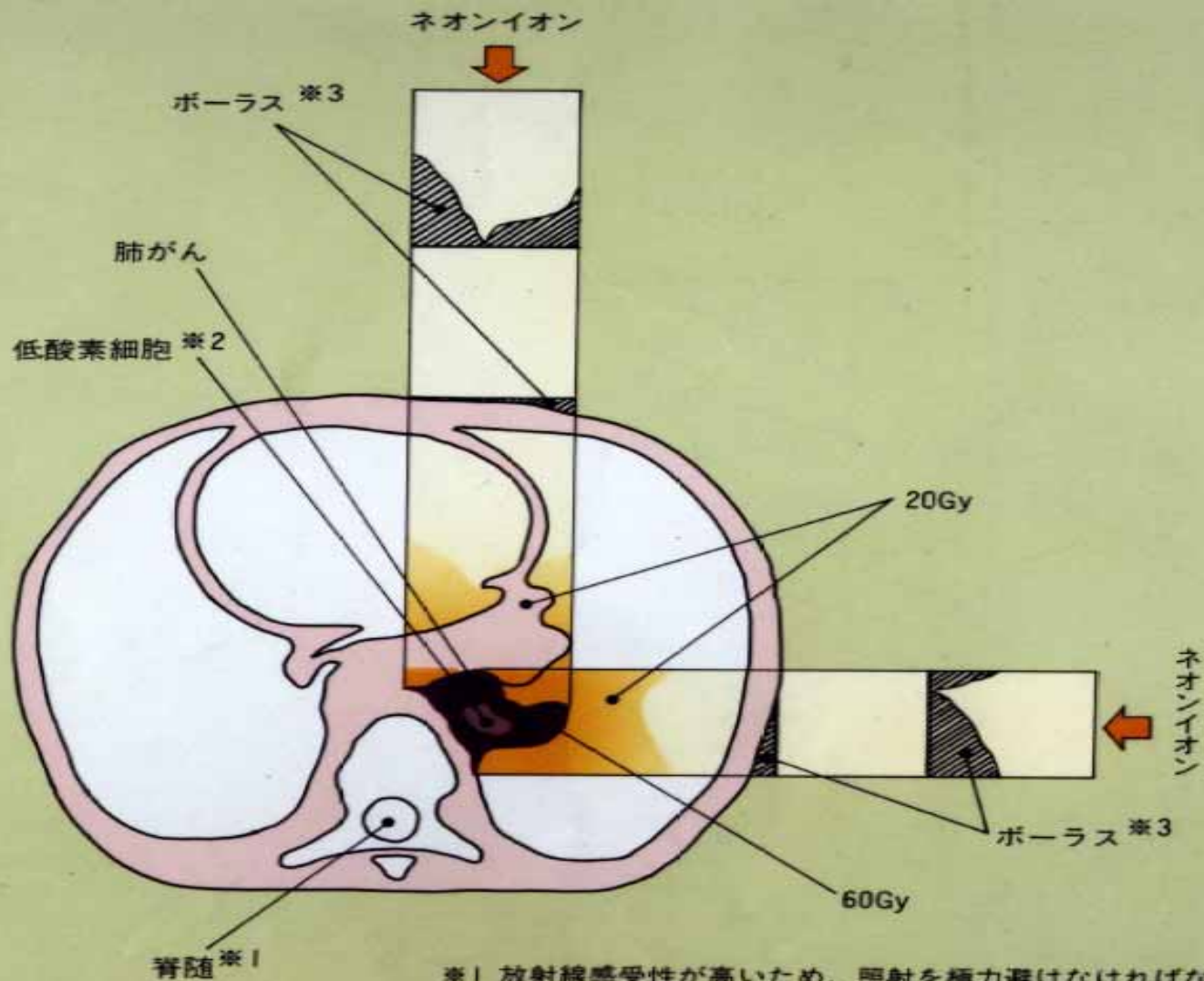
42"

Harvard Univ. 1939









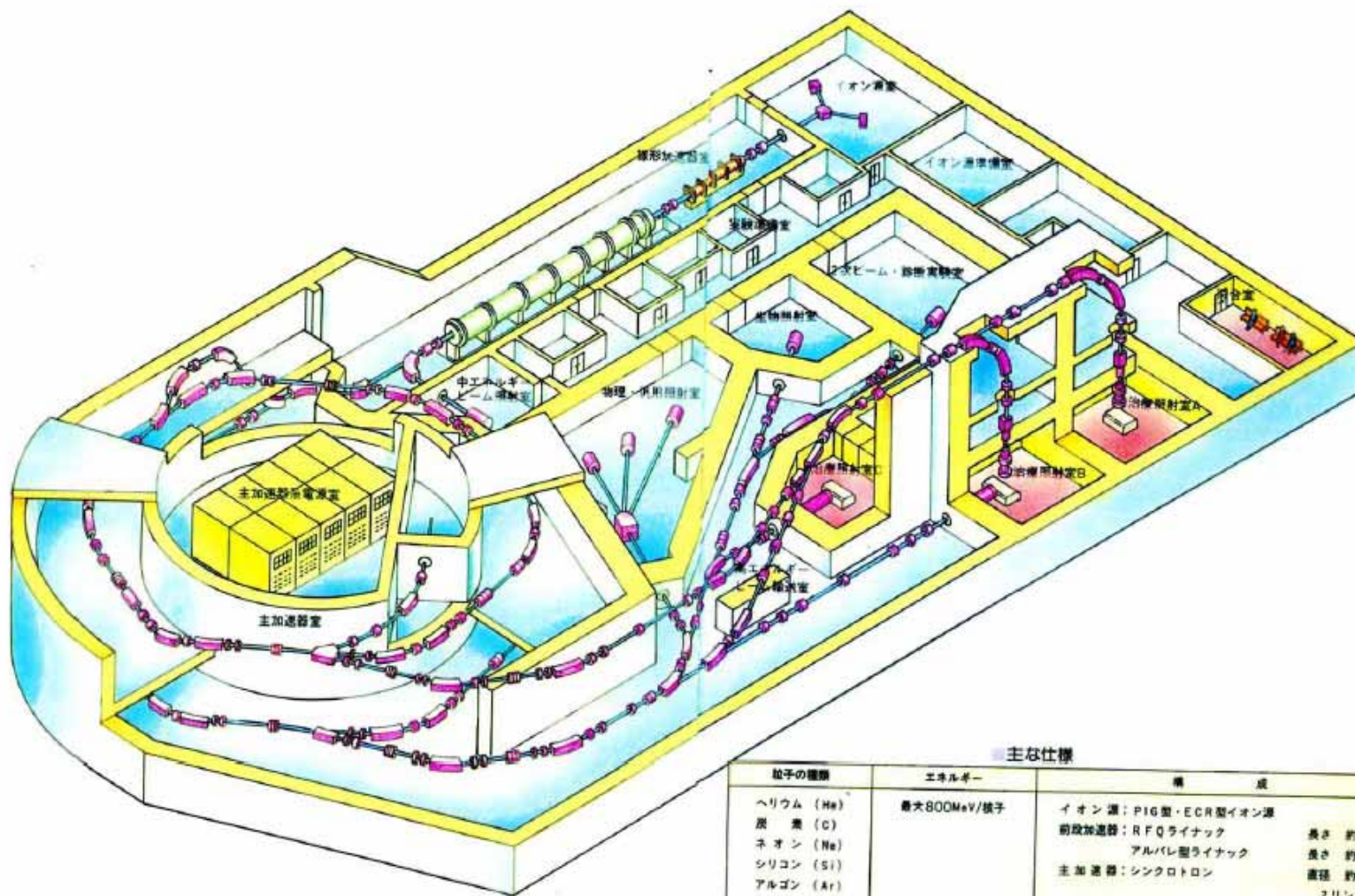
※1 放射線感受性が高いため、照射を極力避けなければならない臓器

※2 がん細胞のうち、放射線感受性が低く従来の放射線（X線、γ線）で殺傷することが困難であった細胞

※3 放射線線量分布をがんの形に合わせて調整するための補正材

21世紀に向けて、新しいがん治療時代の到来を告げる重粒子加速器。HIMAC

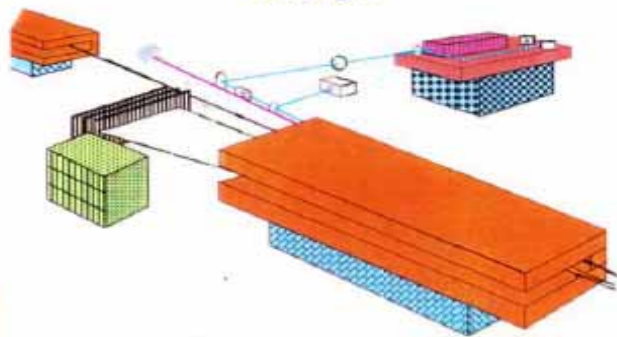
(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)



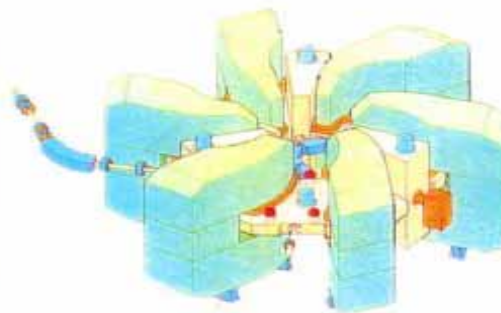
主な仕様

粒子の種類	エネルギー	構成
ヘリウム (He)	最大800MeV/核子	イオン源: PIG型・ECR型イオン源
炭素 (C)		前段加速器: RFQライナック
ネオン (Ne)		アルバレー型ライナック
シリコン (Si)		主加速器: シンクロトロン
アルゴン (Ar)		
		長さ 約7m
		長さ 約24m
		直径 約42m
		2リング

**Laser Electron Photon Facility for
Quark Nuclear Physics
SPRING-8**



**RCNP Cyclotron Laboratory for
Nucleon Hadron Nuclear Physics**



Nishiharima

Kobe

Kyoto

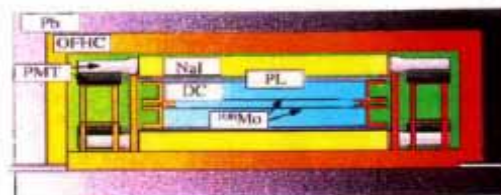
OSAKA
RCNP

Ohito

Nagoya

Tokyo

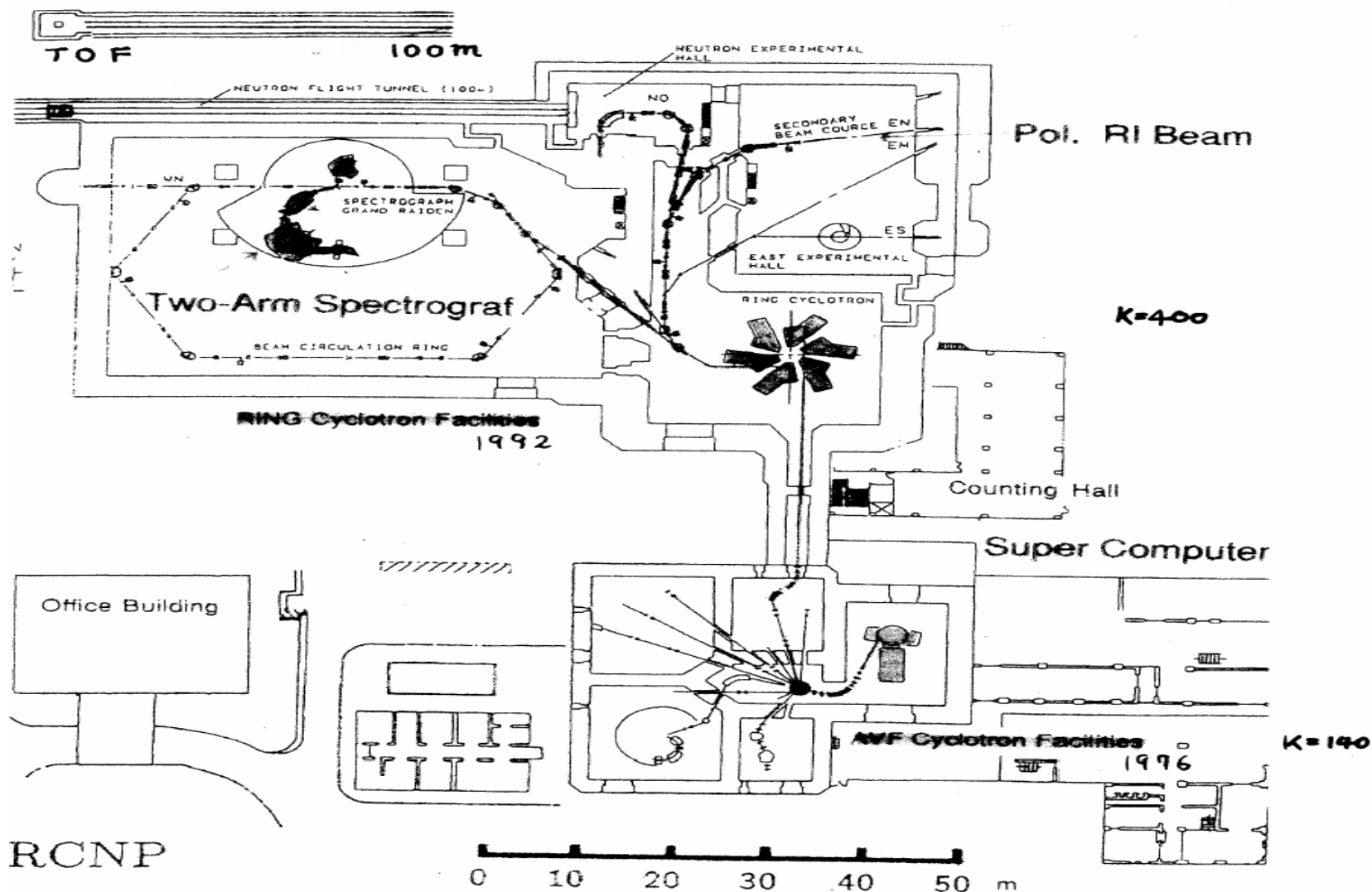
**Ohito Cosmo Observatory for
Lepton Nuclear Physics**

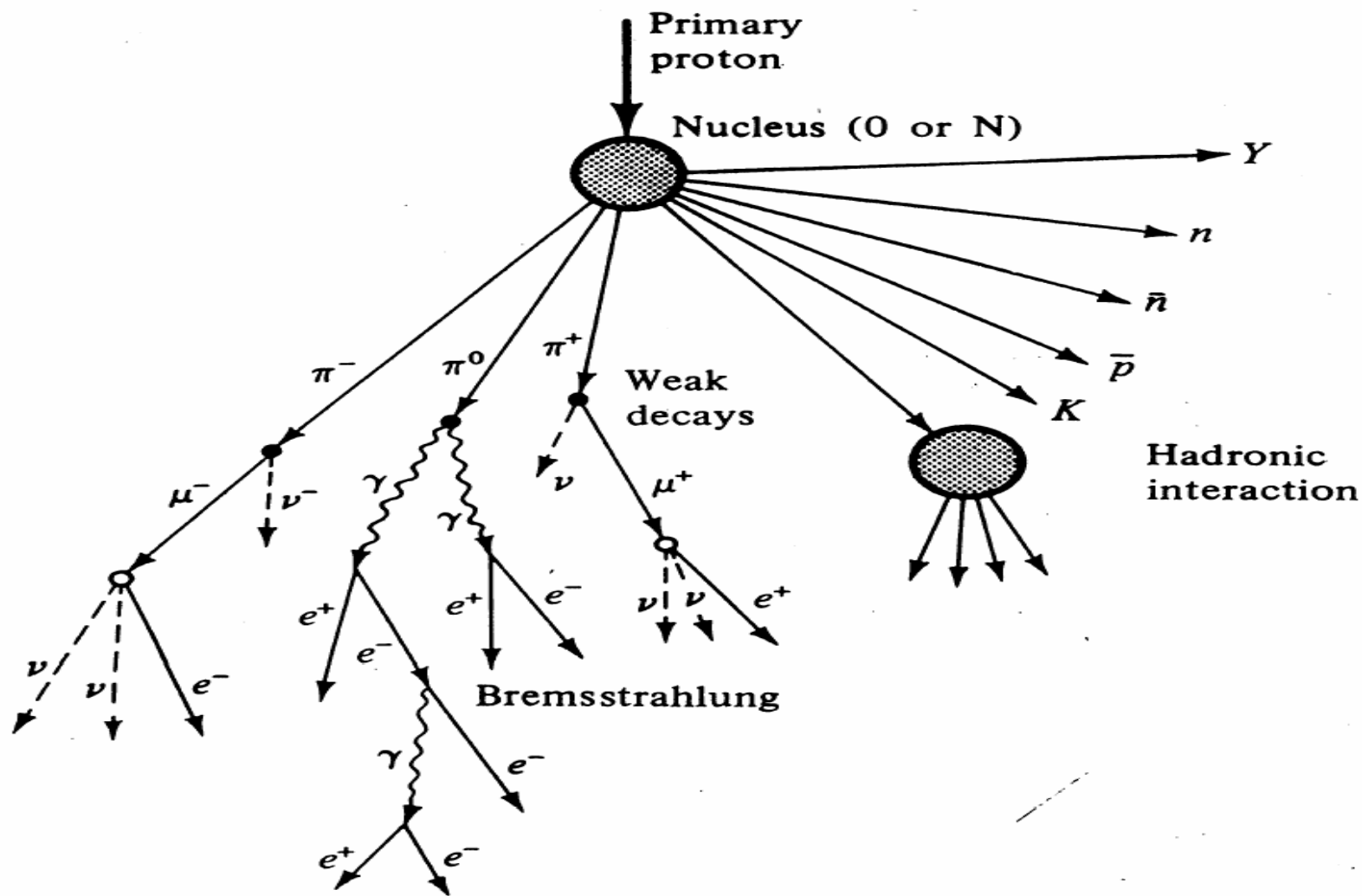


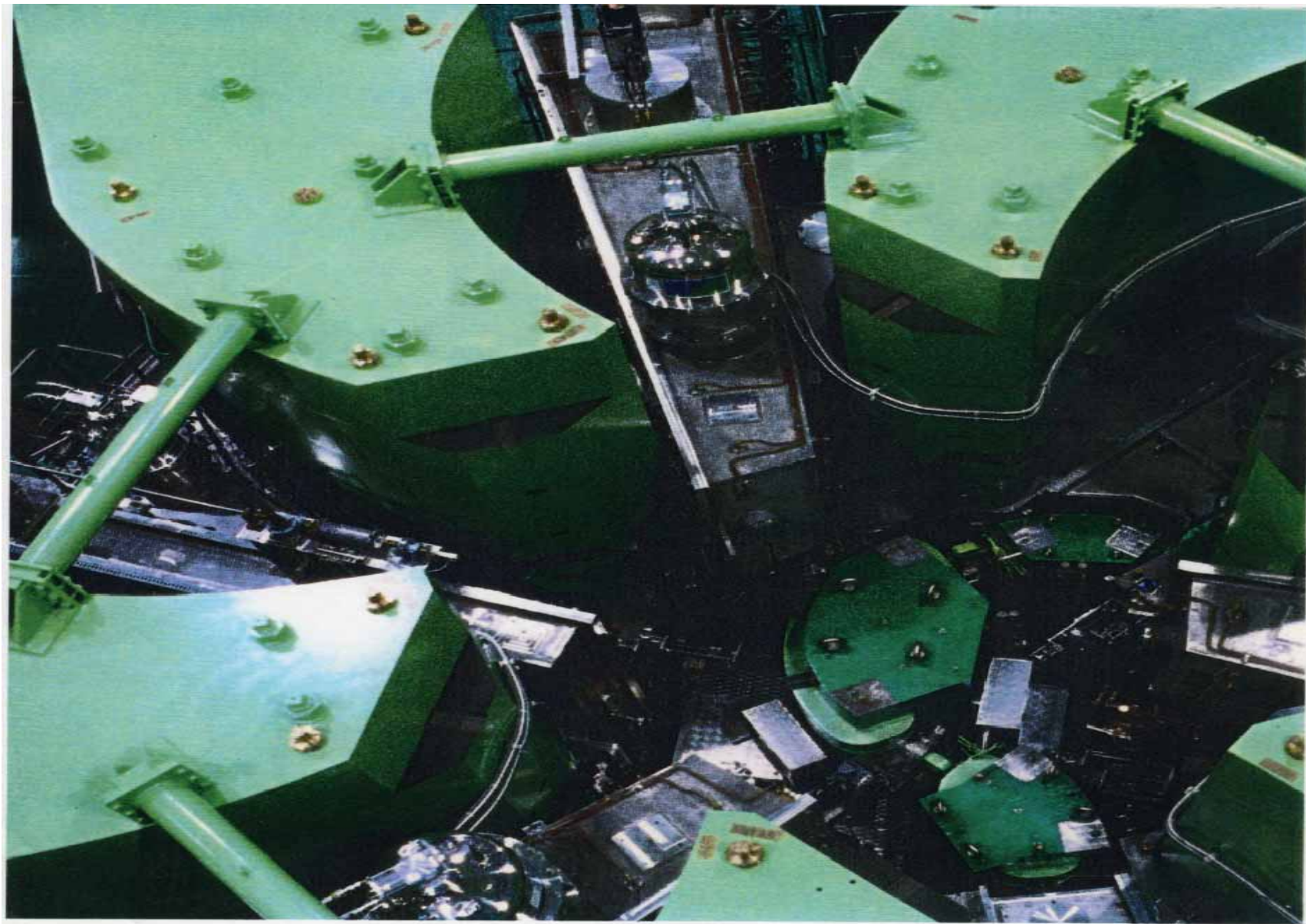
Cyclotron Lab.

$0.2 \sim 0.4 \text{ GeV } \bar{p}$, $0.5 \sim 1 \text{ GeV/c}$

RESEARCH CENTER FOR
NUCLEAR PHYSICS
OSAKA UNIVERSITY









$$E = mc^2$$

エネルギー $\equiv$ 等価質量

アインシュタイン

粒子.

光の速さ

$\sim 30\% \Rightarrow 70\%$

同期性

3.11 打法

いちろ

集 束 カ

(4枚)

レンズ"

サイクロトロン (RCNP)



シンクロトロン (KEK)

軌道

一筆書き.

Donuts

か、取線香

