

超伝導技術と素粒子物理学の発展

京都大学・物理学教室・特別講義

山本 明

(高エネルギー加速器研究機構)

2000.10.6

1

目 次

- 1. はじめに
- 2. 超伝導・低温技術の基礎
- 3. 高エネルギー粒子加速器への応用と発展
 - エネルギーフロンティアをめざした高磁場磁石への挑戦
- 4. 高エネルギー物理実験における応用と発展
 - 粒子透過性に優れた大型超伝導電磁石の開発
- 5. 宇宙観測における応用と発展
 - 超伝導スペクトロメーターを用いた宇宙反粒子探索実験：BESS.
- 6. 今後の展開
 - JHF計画における大強度ミュオンビーム
 - VLHC構想
- 7. まとめ

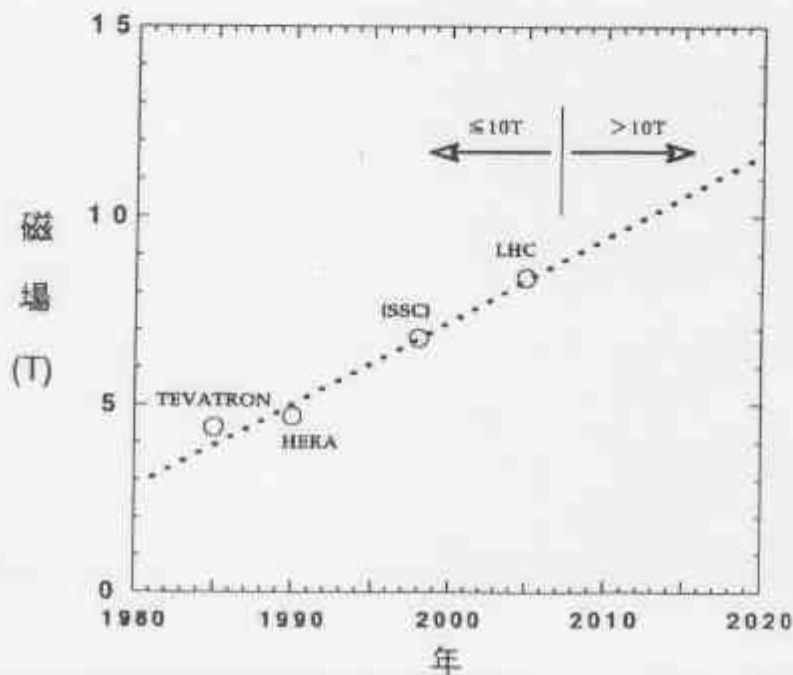
2

1. はじめに

- 高エネルギー・素粒子物理実験における超伝導技術の役割
 - エネルギーフロンティア粒子加速器と粒子検出器の実現に不可欠
 - 加速器の高エネルギー化
 - 常伝導磁石/鉄ヨークの飽和限界： 2 T
 - 高磁場化 >> 高電流密度化 >> 超伝導化が不可欠
 - 粒子検出器の大型化、薄肉化、高分解能化
 - 大規模磁場空間 >> 省エネルギー化
 - 運動量分析・高分解能 >> 磁場の透明化・高磁場化

3

粒子加速器の高エネルギー化と磁場強度の進展



4

超伝導・低温技術の発展

- 1908: ヘリウムの液化
- 1911: 超伝導の発見
- 1924: 超流動ヘリウムの発見
- 1933: マイスナー効果の発見
- 1957: BCS理論の完成
- 1961: Nb₃Snでの高磁場マグネット
- 1965: 超伝導線の完全安定化の概念
- 1968: 泡箱用超伝導マグネット
- 1970: NbTi極細多芯超伝導線の工業化
- 1979: 医療用MRI超伝導マグネットの実用化
- 1983: FNAL/Tevatronの完成
- 1986: 高温超伝導の発見
- 1987: 磁気浮上列車(MAGLEV) 411km/h
- 1990: HERA完成
- 1995: CERN/LHC建設開始
- 1998: 超伝導・核融合実験装置LHD完成
- 1999: BNL/RHIC完成

5

2. 超伝導・低温技術の基礎

- 超伝導とは
- 超伝導現象のグローバルな理解
- 超伝導のミクロな現象
- 実用的な超伝導線
- 超伝導線の安定化と保護
- (冷却・低温技術)

6

超伝導とは

超伝導の基本的な性質

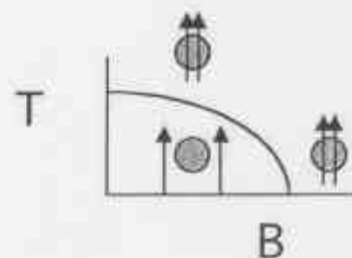
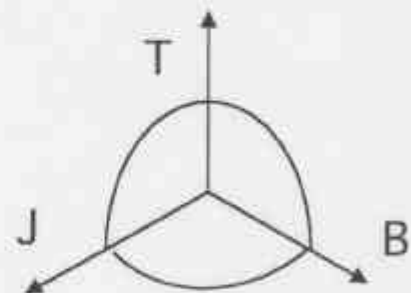
- 完全導電性 ($E = 0$)
 - 電気抵抗がゼロ
- 完全反磁性 ($B = 0$)
 - マイスナー効果
- 量子性
 - 不連続な量子束 (フラクソイド)
- ジョセフソン効果 (トンネル効果)
 - 量子トンネル効果



7

超伝導とは (続)

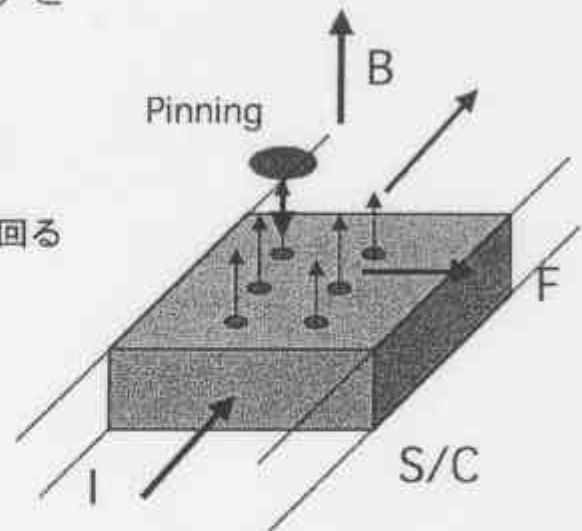
- 超伝導の発生条件
 - $T < T_c$ (臨界温度)
 - $B < B_c$ (臨界磁場)
 - $J < J_c$ (臨界電流)
- 超伝導であることがより安定
 - 超伝導状態のエネルギーレベルが低く安定。
 - 常伝導状態との間にエネルギーギャップがある。
 - 臨界条件でエネルギー準位が合致。



8

超伝導とは (続)

- 超伝導が破れる条件
 - 電流が受ける力 (ローレンツ力) とピン止め力のバランス
 - $F_L = I \times B = q \cdot v \cdot B > F_{\text{Pinning}}$
 - ローレンツ力がピン止め力を上回る
 - 磁束の移動、変化
 - 電流の移動、変化
 - $\text{Rot } E = -dB/dt$
 - ジュール発熱
 - 温度上昇
 - 超伝導の破れ



9

超伝導現象のグローバルな理解

- Maxwell 方程式からのアプローチ:
 - $\text{div } E = \sigma / \epsilon_0$ (ガウスの定理)
 - $\text{rot } E = -dB/dt$ (ファラデーの式)
 - $\text{div } B = 0$ (磁気単極子なし)
 - $\text{rot } B = \mu_0 j + (1/c^2) dE/dt$ (アンペールの式)
- 完全導電性:
 - $\text{rot } E = 0 \gg dB/dt = 0$
 - 磁場は変化できない \gg 超伝導体のなかで常に $B = 0$
- 完全反磁性:
 - $B = 0 \gg \text{rot } B = \mu_0 j = 0$
 - 外部磁場の変化 \gg 変化を打ち消すように表面電流
 - 反磁荷 $-M = -H = B / \mu_0$ が誘起 (と考えると良い)

10

超伝導現象のグローバルな理解 (続)

- 超伝導の電気力学: London 方程式

- $E = 0 \gg dB/dt = 0$

+

>>超伝導体の表面現象を説明

- $B = 0$

- London方程式

- $\text{rot } J_s = - [1/\mu_0 \lambda_L^2] \cdot B$

- $dJ_s/dt = [1/\mu_0 \lambda_L^2] \cdot E$

∞ ここで、 $\lambda_L = (m/\mu_0 n_s e^2)^{1/2}$

- 磁場 (B) は表面からわずかに侵入し、その領域に超伝導電流 J_s が流れる

11

超伝導現象のグローバルな理解 (続)

- 超伝導現象のグローバルな理解 London方程式を導いてみる

$$F = m \dot{v}_s = e \cdot E$$

$$J_s = n_s e v_s$$

- $\Gamma_s = (n_s e^2/m) E$

- $E = m/(n_s e^2) \cdot J_s$

- Maxwell方程式より

$$dB/dt = -\text{rot } \times E$$

$$\text{rot } B = \mu_0 J_s$$

- $dB/dt = -\nabla \times (m/n_s e^2) J_s$

$$= - (m/\mu_0 n_s e^2) \cdot \nabla \times (\nabla \times B)$$

$$= -\lambda^2 \nabla^2 B$$

- よって、 $B = 1/\lambda^2 \cdot \nabla^2 \cdot B$

12

超伝導のグローバルな理解 (続)

- London 理論では $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ のみならず、 $\mathbf{B} = 0$ として現象を説明する
- よって、 $\nabla^2 \mathbf{B} = 1/\lambda^2 \cdot \mathbf{B}$
- 一次元では、 $B(x) = B_a \exp(-x/\lambda)$
 - $\lambda_L = (m/\mu_0 n_s e^2)^{1/2}$ Londonの侵入深さ
 - Penetration Depth ($\sim 10^{-6}$ m)
 - Bが侵入する
- もしZ方向に均一な磁界では
- $d\mathbf{B}/dx = \mu_0 J_y = B_a/l \exp(-x/l)$ を用いて
 - $JY = J_a \exp(-x/l)$... 表面近くに電流が流れる

13

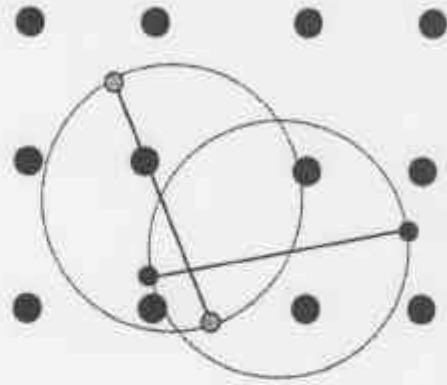
超伝導のミクロな描像 (BCS理論)

- 超伝導現象のミクロな起因を電子の振る舞いと関係づけ、量子力学的に説明。
 - (J. Bardeen, L.N. Cooper, J. R. Schrieffer)
- 電子対(Cooper-pair) が同方向・同速度で動き超伝導を引き起こす。
- 金属格子の間を電子対が移動する。対になることによってパウリの排他原理に抵触せず、同じ運動量で移動できる。 \gg ボーズ粒子として振る舞う。
- 金属中の音速より小さな速度で電子対が移動した時、金属格子によって運動量を失わず、超伝導電流となる。

14

超伝導のミクロな描像 (BCS理論: 続)

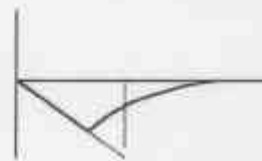
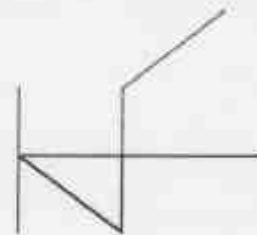
- クーパー対のふるまい
 - 比較的長い距離で対
 - ボーズ粒子としての振る舞い
 - 電子・フォノンの相互作用



15

超伝導体 (一種、二種)

- 第一種 (鉛、錫等)
 - マイスナー領域 $\gg \gg$ ノーマル領域
- 第二種 (Nb等) \dots 実用になる超伝導線材
 - マイスナー領域 \gg 混合領域 \gg ノーマル領域
 - 混合領域の存在により高い磁場までの超伝導特性



16

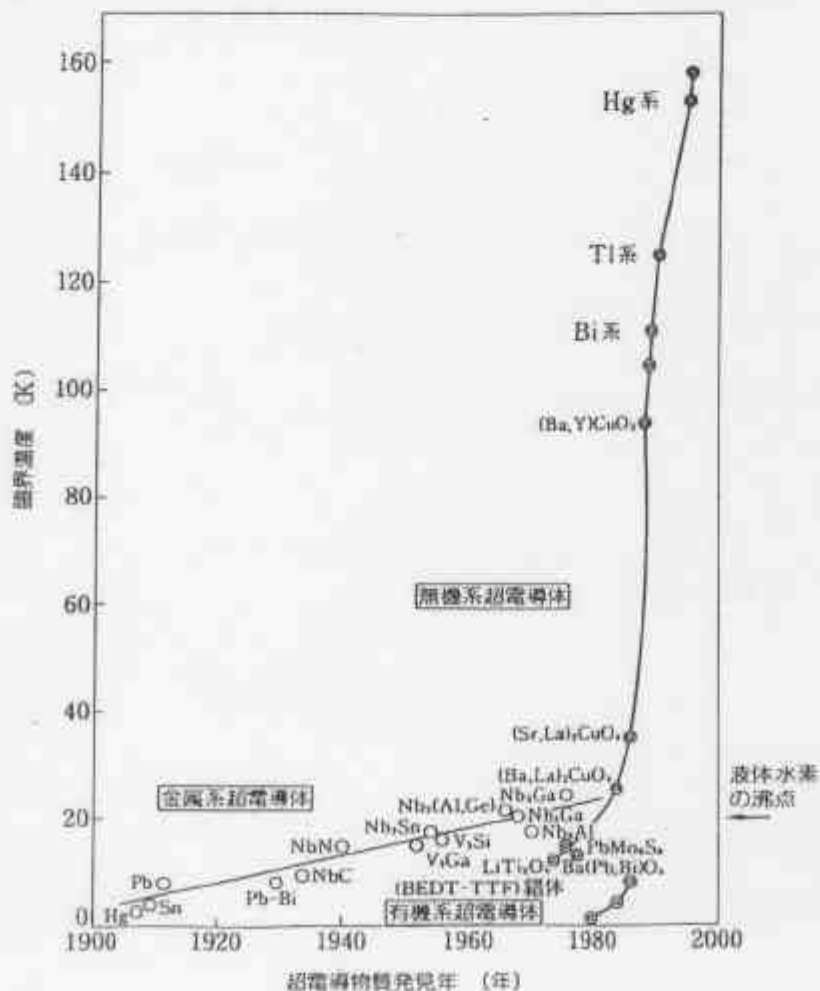
実用的な超伝導線

- 第一種超伝導体

- 超伝導状態と常伝導状態に明確な境界
 - 熱力学的臨界磁界 (B_c)
- ローレンツ力 \gg 磁束 (フラックス) ジャンプ
- 磁場の侵入距離が少ない
 - 安定さに欠ける
- Hg 等

- 第二種超伝導体

- 中間の混合状態がある (超伝導と常伝導の共存)
 - $B_{c1} < B_c < B_{c2}$
- 不純物、格子欠陥などの磁束の移動に対するピン止め力によって、より安定な超伝導状態。
- ローレンツ力 $>$ ピン止め力を で常伝導転移
- 磁場の侵入距離が大きい
- Nb, NbTi, Nb₃Sn, (HTS)
- 超伝導磁石等に、より実用的な超伝導体



各種超伝導体の特徴

Material	T _c	B _{a1} (0)	B _{a2} (0)	ξ _{GL} (0)	λ _{GL} (0)
	[K]	[T]	[T]	[nm]	[nm]
[type-1]					
Hg	4.2	0.04			
[type-2]					
Nb	9.25	0.06	0.4	39	31.5
NbTi	9.5		11.5		
Nb ₃ Sn	18	0.01	21.5	3	170
[type-2 & high T _c]					
Ba ₂ YCu ₃ O ₇	92	0.06(//)	35(//)	3.1(//)	130(//)
Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈	120				
Tl ₂ Ba ₂ CaCu ₂ O ₈	108	0.015(//)	130	1.6	220(//)

19

超伝導線の安定化と保護

- 安定化
 - 超伝導特性の安定化
 - 擾乱に対して超伝導状態を保つ
 - 超伝導線の比熱を増やす
 - 冷却を良くする
 - 冷却安定化
 - ダイナミック安定化
- 保護
 - 超伝導が破れた後の超伝導線の安全
 - ジュール発熱によるコイルの焼損を防ぐ
 - コイルの熱容量を増やす
 - 一部のエネルギーを外部に取り出す、分担する

20

冷却技術

- 冷媒の種類
 - 超臨界ヘリウム ($> 4.5 \sim 5 \text{ K}$)
 - ガス、液体の中間状態
 - 比熱 (顕熱) による熱交換
 - 冷却路に従い温度が変化
 - 4.2 K 飽和液体ヘリウム
 - 蒸発潜熱で熱交換
 - 温度が一定
 - 沸騰状態
 - 1.9 K 大気圧超流動ヘリウム
 - 単相流であり、比熱で熱交換
 - 超流動であり、優れた熱移送
 - 1.9 K 飽和液体ヘリウム
 - 減圧法により飽和蒸気圧での沸騰バランス
 - 超流動ヘリウムを簡易に発生

21

冷却・低温技術

- 浸漬冷却
 - 液体ヘリウム中に直接コイルを浸す。
 - 冷却条件は最も良い
 - 液体ヘリウム容器が必要
- 強制冷却 (Cable-in-conduit)
 - 超伝導線を管内に埋め込み、超臨界ヘリウムを流し直接冷却、
- 間接冷却
 - 冷却管内に二相流ヘリウム (沸騰状態) を流し、コイルは管からの伝導で冷やす。
 - 冷却効果は劣るがヘリウム容器を必要としない。
- 小型冷凍機からの直接・伝導冷却
 - 液体ヘリウムがマグネットクライオスタットには必要なくなる。
 - 小型マグネットには急速に応用されている。

22

3. 高エネルギー粒子加速器と超伝導マグネット技術

- 世界の高エネルギー超伝導加速器の発展
- 高エネルギー化と高磁場化
- 超伝導化の意義
- 電流の作る磁場・電磁力
- 加速器用超伝導電磁石の進展
- 高磁場達成への努力
- 磁場精度達成への努力
- 高磁場超伝導マグネットの開発（例）
 - CERN/LHC計画における超伝導マグネットの開発
 - 高エネルギー研における強収束四極マグネットの開発

23

世界の高エネルギー超伝導加速器の発展

<u>Acel.</u>		<u>Tevatron</u>	<u>HERA</u>	<u>(SSC)</u>	<u>RHIC</u>	<u>LHC</u>
Lab.	FNAL	DESY (US)	SSCL (Germ)	US (US)	CERN (US)	(Swiss)
Energy		0.9 TeV	0.82 TeV	20 TeV	0.1amu	7 TeV
Radius		1 km	1 km	15 km	0.5 km	4.5 km
Rings		1(p+p-)	1(e+p)	2(p+p)	1(nucl)	2(p+p)
B-dipole		4.4 T	4.7 T	5 T	3.5 T	8.36 T
G-quad.		76 T/m	91 T/m	205 T/m	72 T/m	220 T/m
R-coil		38 mm	37.5 mm	25 mm	40 mm	28 mm
#Dipoles		774	422	8700	288	2x1232
SC		NbTi	NbTi	NbTi	NbTi	NbTi
Temp.		4.5 K	4.5 K	4.4 K	4.5 K	1.9 K
Year		1985	1990	cancelled	(2000)	(2005)

24

高エネルギー化と高磁場化

- 磁場中での荷電粒子の運動

- ローレンツ力

- $F = q [E + (v \times B)]$

- $F_r = q \cdot v_0 \times B_y$

- 遠心力

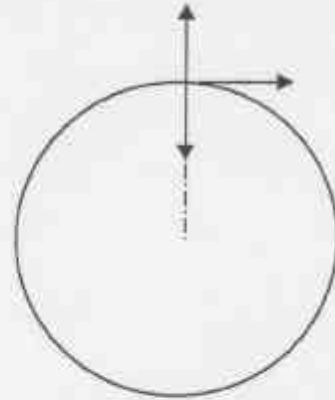
- $F = m \cdot v^2 / \rho = p \cdot v / \rho$

- $F_r = p \cdot v_0 \cdot / r$

- 磁場中での荷電粒子の軌道

- $p \cdot v_0 / \rho = q \cdot v_0 \cdot B_y$

- $\rho = q \cdot B_y \cdot p$



- エネルギーフロンティアを目指すためには

- 磁場と高く、半径を大きく

25

超伝導化の意義

- 超伝導磁石による高エネルギー化の実現

- 常伝導磁石の限界

- コイル電流密度の限界 $< 10 \text{ A/mm}^2$

- 鉄ヨークによる増強が不可欠

- 鉄の磁気飽和限界 2 Tesla

- 加速器用超伝導電磁石の発展

- コイル電流密度 $< 500 \text{ A/mm}^2$

- Tevatron 4.5 Tesla

- LHC 8.4 Tesla

- 高エネルギー研における開発の状況

- 超伝導ビームライン 4 T (1980)

- SSC R&D 6 T (1985)

- LHC R&D Dipole 10T (1994)

- LHC R&D low- β Quad. 10T (1997)

26

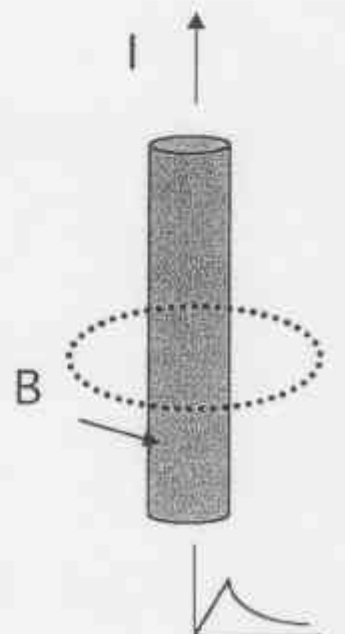
超伝導化の意義（続）

- 高磁場化への努力とその難しさ
 - より電流密度の増大が必要、しかし、
 - ローレンツ力の増大により
 - 超伝導線 臨界電流の減少
 - コイル構造 支持構造増大

27

電流のつくる磁場

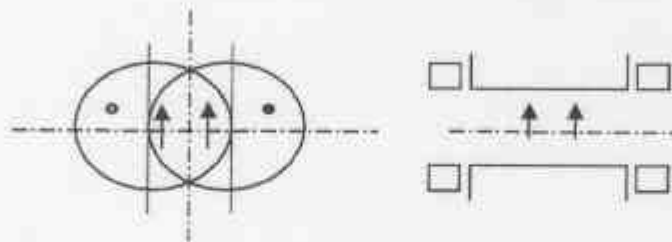
- 円筒電流による磁場
 - マクスウェルの方程式より
 - $\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{J}$
 - 円筒内部 ($r < a$) において
 - $2 \pi r B = \mu_0 \pi r^2 J$
 - $B = (1/2) \cdot \mu_0 \cdot r \cdot J$
 - $B_y = (1/2) \cdot \mu_0 \cdot x \cdot J$ (@ $y = 0$)
 - 円筒外部 ($r > a$) において
 - $2 \pi r B = \mu_0 \pi a^2 J$
 - $B = (1/2) \cdot \mu_0 \cdot a^2 \cdot J \cdot 1/r$
 - $B_y = (1/2) \cdot \mu_0 \cdot a^2 \cdot J \cdot 1/x$ (@ $y = 0$)



28

電流のつくる磁場 (続)

- 一対の円筒電流が $\pm 1/2dx$ ずれ、反対向きに流れている場合を考える
- 重なっている領域に発生する磁場 (@ $Y = 0$) は $B_y = B_{y1} + B_{y2}$
 $= (1/2) \cdot \mu_0 \cdot (x + 1/2dx) \cdot J + (1/2) \cdot \mu_0 \cdot (x - 1/2dx) \cdot (-J)$
 $= (1/2) \cdot \mu_0 \cdot dx \cdot J \quad \dots \quad \text{constant}$



29

電流のつくる磁場 (続)

- より一般的に扱おうと、
 - Maxwell's Eq. から、 $\text{div } \mathbf{B} = 0$, $\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$
- 電流が無い場所で (@ $\mathbf{J} = 0$)
 - $\text{Div } \mathbf{B} = 0$, $\text{rot } \mathbf{B} = 0$
- Vector Potential, \mathbf{A} , Scalar Potential, Φ を用いて
 - $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$, $\mathbf{B} = -\text{grad } \Phi$
- すなわち

$$B_x = dA_z / dy = -d\Phi / dx$$

$$B_y = dA_z / dx = -d\Phi / dy$$
- 複素関数論に現れる Cauchy-Riemann の式と同じ。
- 複素平面 $z = x + iy$ における解析的な Potential Function として (電流は z 軸に平行)、
 - $F(z) = A_z(x, y) + i \Phi(x, y)$

30

電流のつくる磁場 (続)

- $F(z) = A_z(x, y) + i\Phi(x, y)$ はべき展開でき
 - $F(z) = \sum c_n z^n = \sum c_n (x + iy)^n$
- $F(z)$ の導関数も解析的に表現でき
 - $dF(z)/dz = -dA/dx - id\Phi/dx = di dA/dy - dF/dx$
 $= By + iBx$
- よって、 $B = By + iBx = \sum n \cdot c \cdot z^{n-1} = n \cdot c \cdot (x + iy)^{n-1}$
 - (注意: $Bx + iBy$ は z の解析関数ではない)
- 極座標系に転換し、原点(0, 0)での電流について考えると
 - $A_z(r, \theta) = -(\mu_0/2\pi) \cdot I \cdot \ln(r/a)$
 - $B_\theta = -Az/dr = (\mu_0/2\pi r) \cdot I$
- もし、電流が任意の点($r = a, \theta = \phi$)にある場合、 $r < a$ の時、
 - $A_z(r, \theta) = (\mu_0/2\pi) \cdot I \cdot \sum (1/n) (r/a)^n \cdot \cos[n(\theta - \phi)]$
 - $B_\theta = -Az/dr = -(\mu_0/2\pi) \cdot I \cdot \sum (r/a)^{n-1} \cdot \cos[n(\theta - \phi)]$

31

電流のつくる磁場 (続)

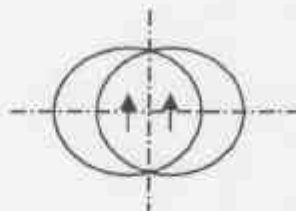
- 電流が円筒の周方向に分布している場合
 - $I(\phi) = I_0 \cos(m\phi)$
 - $A_z(r, \theta) = (\mu_0/2\pi) \cdot I_0 \cdot \sum (1/n) (r/a)^n \cdot \cos(m\phi) \cos[n(\theta - \phi)]$
- $n = m$ において
 - $A_z(r, \theta) = (\mu_0/2) \cdot I_0 \cdot (1/m) (r/a)^m \cdot \cos(m\theta)$
 - $B_\theta(r, \theta) = -(\mu_0/2a) \cdot I_0 \cdot (r/a)^{m-1} \cdot \cos(m\theta)$
 - $n = m = 1$ dipole
 - $n = m = 2$ quadrupole
 - $n = m = 3$ sextupole

32

電流の作る磁場（続）

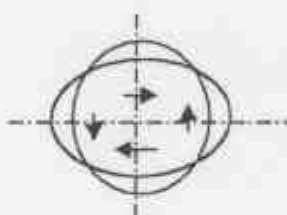
- Dipole

- $n = 1$



- Quadrupole

- $n = 2$

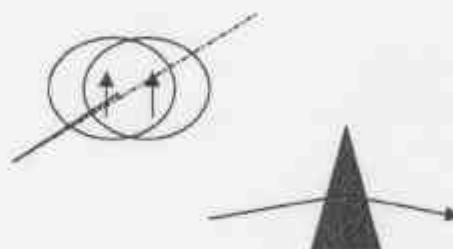


33

二極と四極マグネット

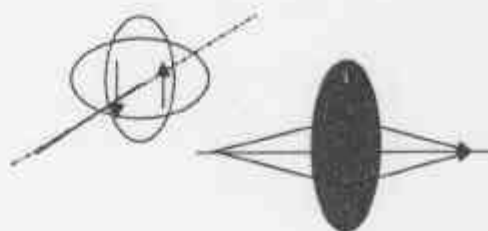
二極(双極)

- ビームを曲げる
- プリズムの役割
- LHCでは、直径9 kmの円軌道の為に > 1000 台必要



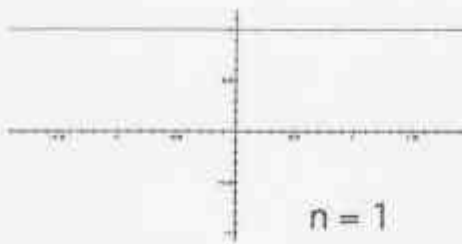
四極

- ビームを絞る
- レンズの役割
- LHCのリング部に > 500 台
- 衝突点近くに特別に強力な四極磁石を 32 台
- (日本がその内の半分を担当)

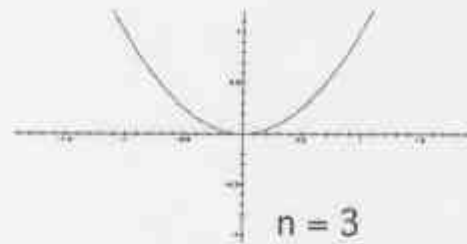


34

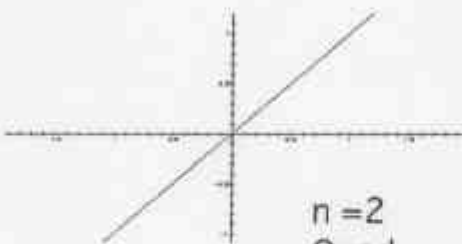
電流のつくる磁場 (続)



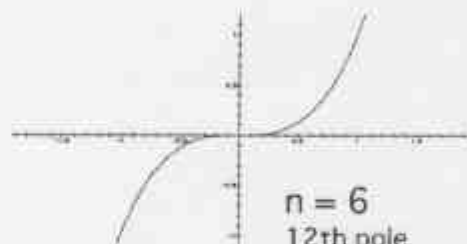
$n = 1$
Dipole



$n = 3$
Sextupole



$n = 2$
Quad.



$n = 6$
12th pole

35

電流のつくる磁場 (続)

- Multipole 成分を展開し
 - $B_\theta = B_{ref} - (r/r_0)^{n-1} [b_n \cos(n\theta) + a_n \sin(n\theta)]$
 - $B_r = B_{ref} - (r/r_0)^{n-1} [-a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta)]$
 - これは、以下と同義:
 - $B_y + iB_x = B_{ref} - (b_n + i a_n) ((x + iy)/r)^{n-1}$
- 四本の線電流によるベクトルポテンシャル
 - $A_z(r, \theta) = 2\mu_0 J / \pi - 1/n \cdot (r/a)^n \cos(n\theta) \cos(n\phi)$
- セクター型のコイルに拡張すると
 - $A_z(r, \theta) = 2\mu_0 J / \pi - 1/n \cdot \int (r/a)^n | \cos(n\theta) d\phi \cos(n\phi)$
 - $A_z(r, \theta) =$
- 十分薄い電流シートにおいて
 - $A_z(r, \theta) = 2\mu_0 J \cdot J_{ada} - 1/n^2 \cdot (r/a)^n \sin(n\phi) \cos(n\theta)$
 - $B_n = 2\mu_0 J \cdot J \cdot da \cdot 1/n \cdot (r/a)^{n-1} \cdot \sin(n\phi)$

$\phi_1 = 60$ 度において、 $n=3$ は発生しない (ダイポールの高次)

- $= 30$ 度において、 $n=6$ は発生しない (四極の高次)

36

磁場精度達成への努力

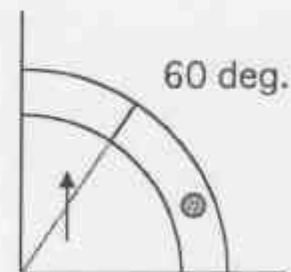
- 加速器用（特に蓄積リング用）超伝導磁石には、高い磁場均質性が求められる。
 - 高調波成分を $\ll 1 / 10000$ に抑える。
 - 特にコイルの θ 方向の位置決め精度
 - $\ll 100 \mu\text{m}$ が要求される。
 - 例)
 - $B_3 = 1/3 \cdot (r_0/a)^2 \cdot \{\sin(180 + 3d\phi_1) / \sin(60+d\phi_1)\}$
 - $= < 1 \times 10^{-4}$
 - @ $a = 40 \text{ mm}, r_0 = 25 \text{ mm},$
 - $\delta\phi_1 < 0.25 \text{ mr} \gg \text{required accuracy of } 0.01 \text{ mm}$

37

磁場精度達成への努力(続)

高調波成分の現れ方の例

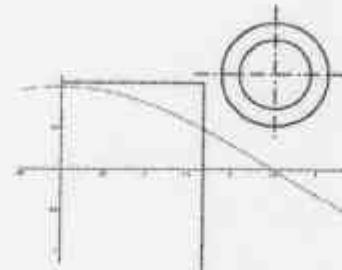
- 最も単純化されたDipole 磁場を作る電流分布
- $I = I_0 \cos \theta \gg \theta = 60 \text{ degrees}$
- $I = \cos 3\theta$ (Sextupole) をみると
 - $b_3 = \text{positive} \quad @ 0 \sim 30 \text{ deg}$
 - $= \text{negative} \quad @ 30 \sim 60 \text{ deg}$
- ∞ $\theta = 60 \text{ deg}$ でちょうどキャンセルする。
- もし、 0.1 mr ずれたとすると
- $\sim 10^{-4}$ のずれができることになる。
- これ以下にコイル精度を抑えることが必要。



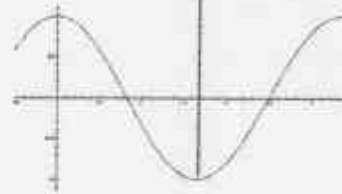
38

磁場精度達成への努力(続)

- $n = 1$
 - Dipole



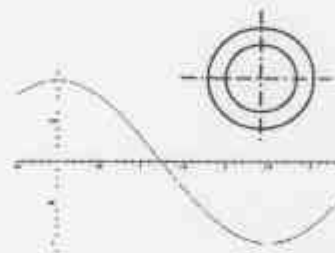
- $n = 3$
 - Sextupole



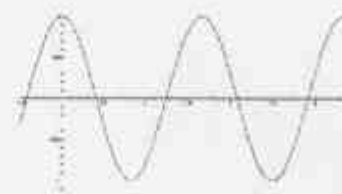
39

磁場精度達成への努力(続)

- $n = 2$
 - Quadrupole



- $n = 6$
 - 12th pole



40

高磁場化への努力

- 超伝導線電流密度の向上
 - $B = \mu_0 J \times$ >> 超伝導線の電流密度をできる限りあげる
 - $J_c(\text{NbTi}) =$

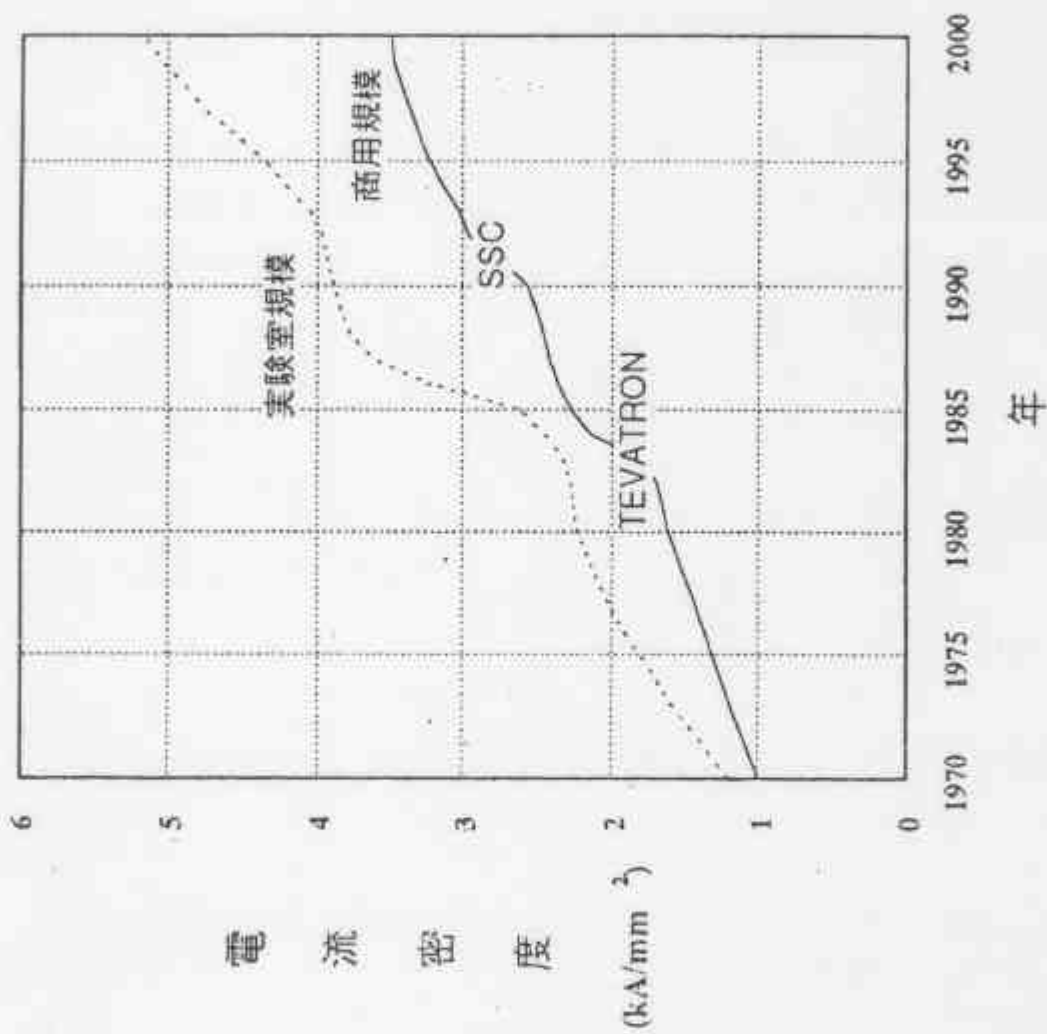
2000 A/mm ²	(~1980: Tevatron)
2500 A/mm ²	(~1990: SSCL)
3000 A/mm ²	(~2000: LHC)
- 鉄ヨークによる磁場への寄与
 - $B_{\text{iron}}/B_{\text{coil}} = (\mu/R)^{2n}$
 - 鉄ヨークをできる限りコイルに近づける (ただし、鉄の飽和により限界がある)
 - ~ 10 % with warm Iron magnet at Tevatron
 - ~ 35 % with cold iron magnet at RHIC
 - ~ 20 % with higher field magnet at LHC
- 温度を下げる
 - J_c at 7 T, 4.2 K = J_c at 10 T, 1.8 K
 - LHCでは1.9 Kまで冷やして磁場の向上を計る

41

高磁場化への努力 (続)

- 電磁力に伴う超伝導の破れ (クエンチ)
 - 超伝導コイルに働く電磁力 (定常)
 - $F = qv \times B = I \times B = H \times B$
 - $P = J \times \langle B \rangle = B^2 / 2\mu_0$
 - 例) $p = 10^2 / (2 \times 4\pi \times 10^{-7}) = 40 \text{ MPa}$ >> 電気絶縁材の破れ強度限界
 - フラックスジャンプによる発熱
 - 電磁力/単位体積: $f = B \times J$
 - 仕事/単位体積: $w = dT \times Cp = \int f \cdot dl$
 - 例) $dt = B \cdot J \cdot dl / Cp = 10 \text{ T} \times 5 \times 10^8 \text{ T/m}^2 \times 1 \times 10^{-6} \text{ m} / 1 \text{ kJ/m}^3\text{K} = 5 \text{ K}$
 - 対策
 - ピニング力をあげる
 - 超伝導フィラメントの極細化

42



Nb-Ti線の進歩

高磁場化への努力（続）

- エポキシなどのクラックによる発熱

$$\propto \rho \cdot h \cdot c \cdot dT = 2\gamma$$

- (ρ は密度、 c は比熱、 T は温度、 γ はエネルギー)

- 例)

- $C = 300 \text{ T}^2 \text{ erg/g/K}$,

- $G = 10^5 \text{ erg/cm}^2$,

- $R = 2 \text{ g/cm}^3$

- $H = 0.1 \text{ cm}$

- $dT = 11 \text{ K}$

- \gg クエンチを起こすに従軍

- ($T_c = 9.5 \text{ K}$)

43

磁場と電磁力

- ローレンツ力

- $F = q \cdot v \times B = I \times B$ (単位長さ当たり)

- $p = j \times B$ (単位面積当たり)

- $B = \mu_0 \cdot j$

- 電流（コイル）内の平均磁場を $B/2$ とすれば、

- $p = B^2 / 2\mu_0$

- ∠ 例) $B = 10 \text{ Tesla}$

- ∞ $p = 10^2 / (2 \times 4\pi \times 10^{-7})$

- ∞ $= 40 \text{ MPa (400 atm)}$

44

加速器用超伝導電磁石の発展

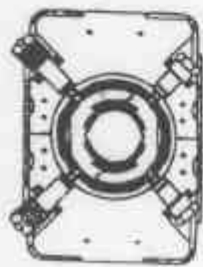
<u>Accel.</u>	<u>Tevatron</u>	<u>HERA</u>	<u>(SSC)</u>	<u>RHIC</u>	<u>LHC</u>
Lab.	FNAL	DESY	SSCL	US	CERN
Energy	0.9 TeV	0.82 TeV	20 TeV	0.1/amu	7 TeV
Radius	1 km	1 km	15 km	0.5 km	4.5 km
B-dipole	4.4 T	4.7 T	5 T	3.5 T	8.36 T
G-quad.	76 T/m	91 T/m	205 T/m	72 T/m	220 T/m
R-coil	38 mm	37.5 mm	25 mm	40 mm	28 mm
SC	NbTi	NbTi	NbTi	NbTi	NbTi
Temp.	4.5 K	4.5 K	4.4 K	4.5 K	1.9 K
Coil conf.	D. Shell	D. Shell	D. Shell	S. Shell	6-block
Collar	SUS	Al	SUS	Plastic	SUS
Yoke	warm	cold	cold	cold	cold
Year	1985	1990	cancelled	(2000)	(2005)

45

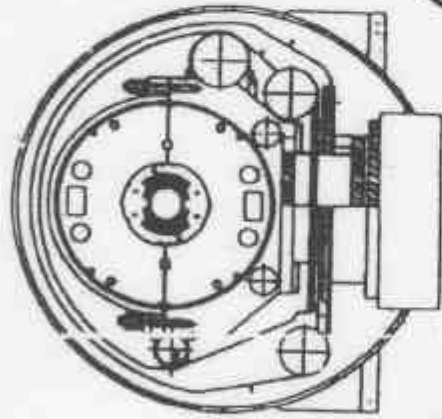
高磁場超伝導マグネットの開発

- CERN/LHC計画における超伝導マグネットの開発
- LHC
 - Large Hadron Collider
 - 7TeV+7TeV陽子衝突型加速器
 - ヨーロッパ共同の計画
 - アメリカ、ロシア、日本などが協力
 - 約(2x)2000台の超伝導マグネット
 - 2005年の完成を目指す
- CERN
 - ヨーロッパ共同粒子物理研究所
 - スイス・ジュネーブの近郊

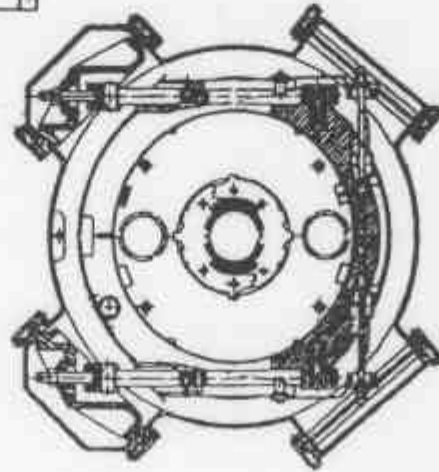
46



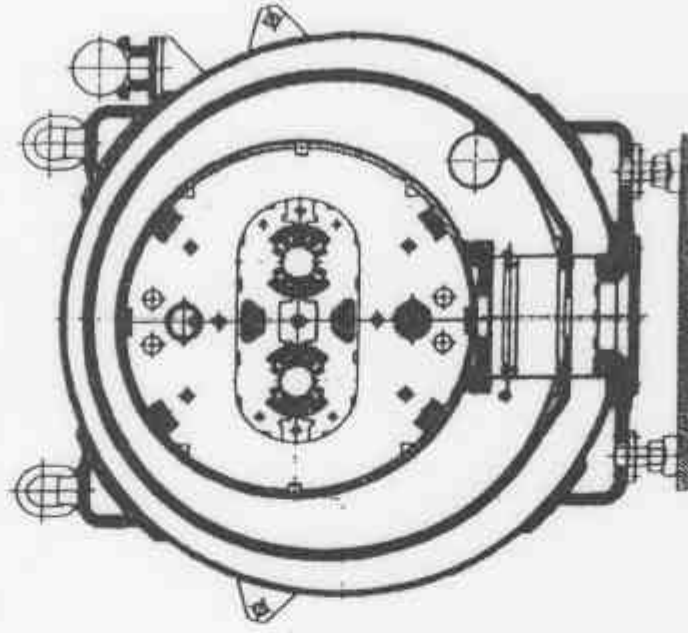
Tevatron



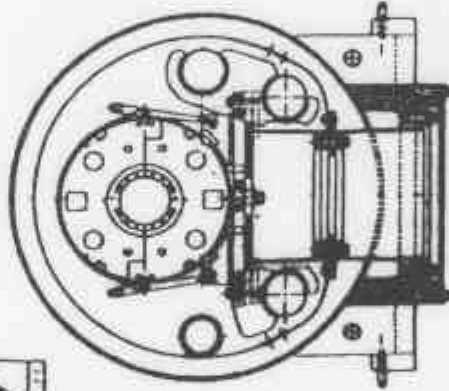
SSC



HERA



LHC



RHIC

Cross sections of dipoles in the superconducting high energy accelerators, in each case the beam pipe has been omitted to show the magnetic aperture.

LHC計画における日本の協力

- 10 Tダイポールの基礎開発
 - 基本設計で貢献
 - 10 Tを越える磁場記録の達成
 - 超伝導線材、マグネット構造材の分担（受注）
- 衝突点用強収束超伝導四極電磁石の開発
 - 大口径・Low- β Quadrupole
 - アメリカと半数づつを分担
- 冷却システム
 - 高効率低温コンプレッサーおよび冷却システムの分担

47

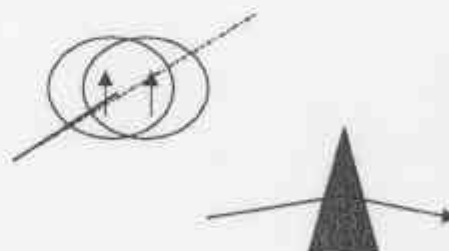
二極と四極マグネット

二極(双極)

ビームを曲げる

プリズムの役割

LHCでは、直径9 kmの円軌道の為
に>1000台必要



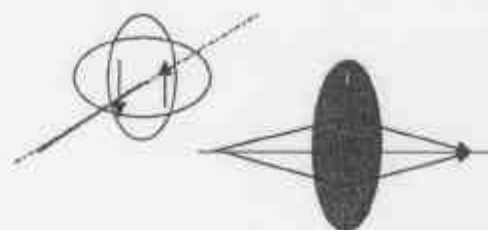
四極

ビームを絞る

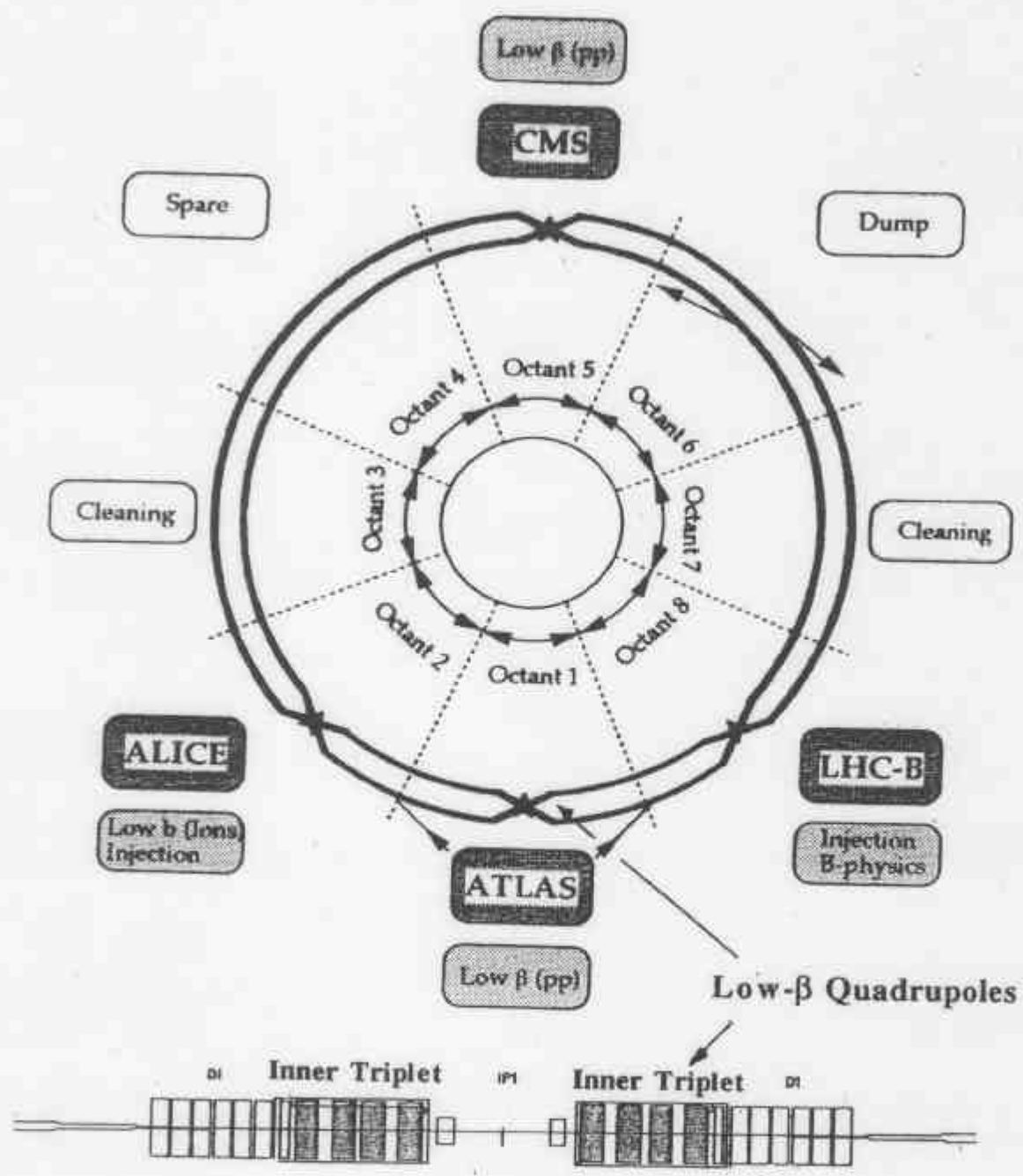
レンズの役割

LHCのリング部に>500台
衝突点近くに特別に強力な四極磁石を
32台

(日本がその内の半分を担当)



48



10 T ダイポールの基礎開発

- 基本設計
 - NbTi超伝導線材 (@1.9K, 超流動ヘリウム)
 - ツインダイポール
 - 二つの磁石を一つの鉄ヨークに組み込む
 - 低温鉄ヨーク
- 高エネルギー研での設計の特色
 - 精度再現性への追求
 - 完全ツイカラーコイル
 - 鉄ヨーク同じ収縮率を持つ
 - 室温で基本精度を決定する。
- 初期励磁で、臨界電流値に対して95%を達成
- 最高中心磁場 10.3 Tを達成

49

ビーム衝突点用・強収束四極マグネットの開発

- ビーム衝突点用強収束超伝導四極マグネット
 - ルミノシティ（ビーム衝突輝度）をあげるため
 - 大口径、
 - 高磁場勾配>> 高磁場
 - 四極磁石を必要とする。
- 四カ所の衝突点の両側にトリプレット（FDF）四極磁石を配置する。
- 衝突点からのビームロスに伴う入熱が5~10 W/m
- に達する、厳しい放射線環境にも耐えなければならない。
- LHC計画のなかでも、最も技術難度の高い磁石開発
- アメリカと日本が半数づつ（各16台）を、独自の設計に基づき、分担して開発する。

50

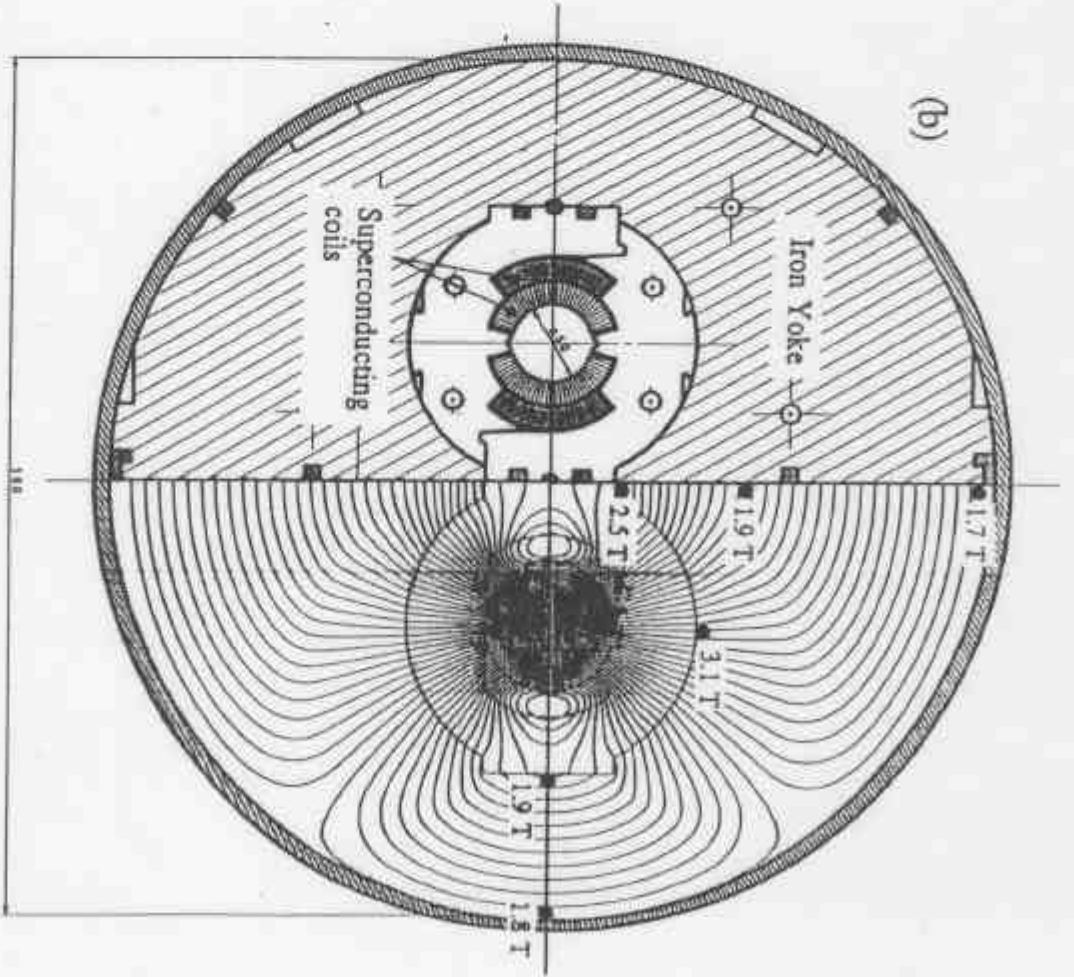
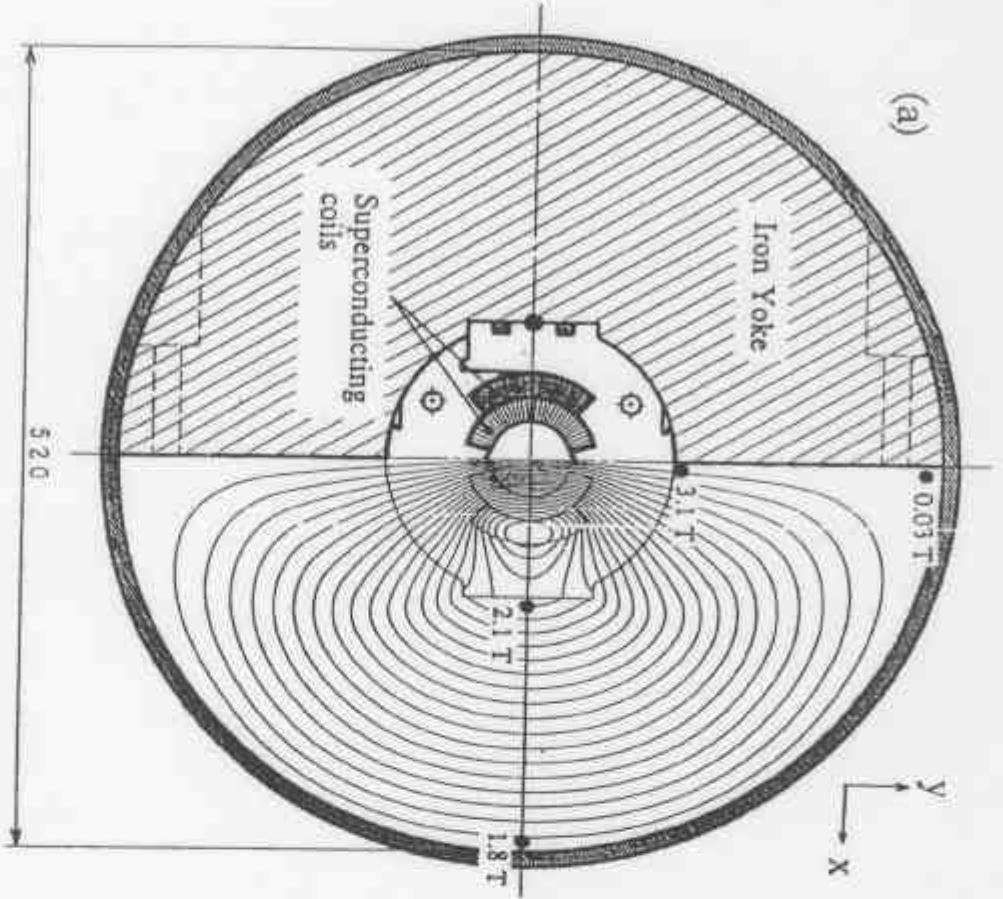
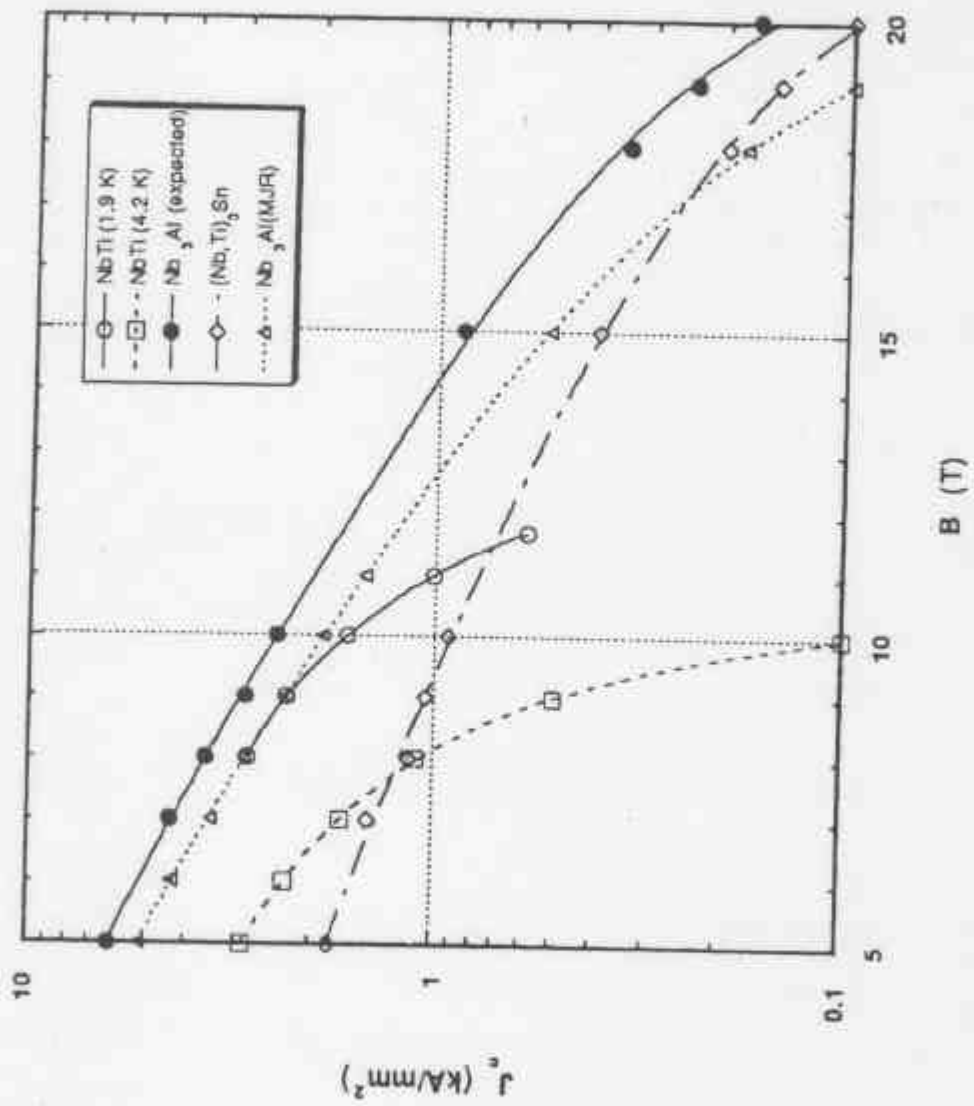
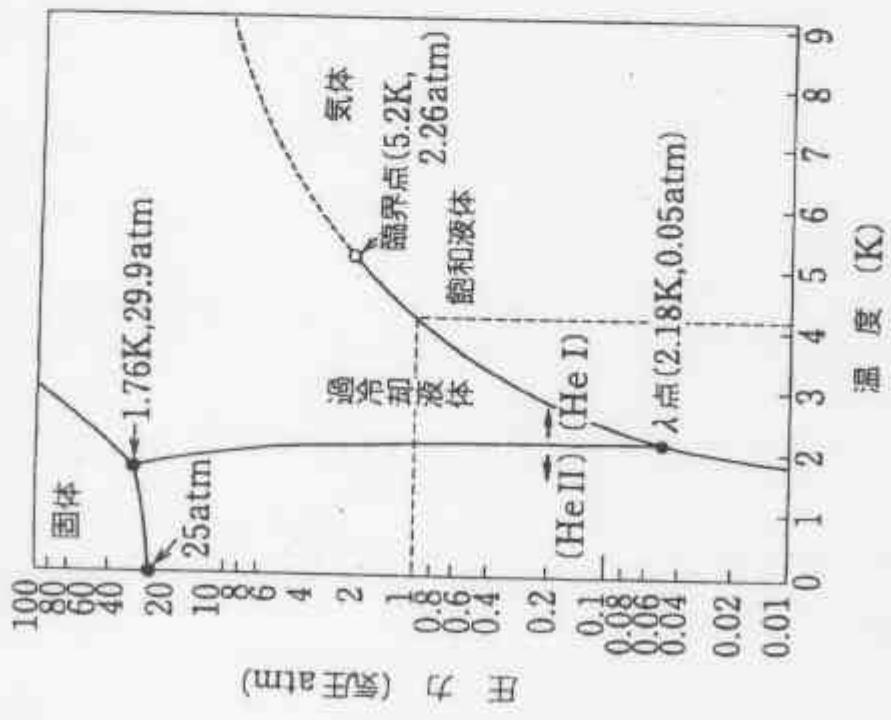


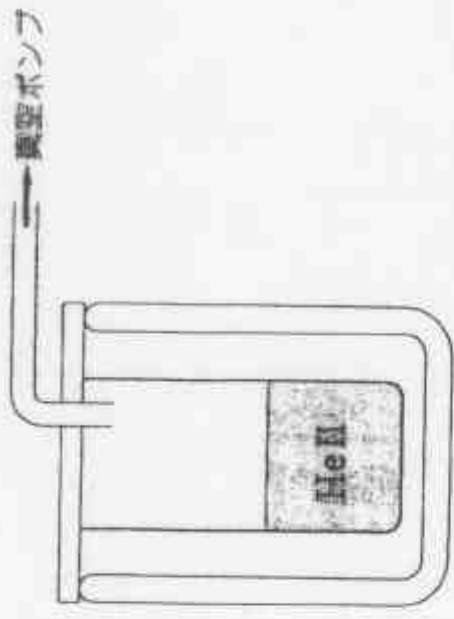
Fig. 1.



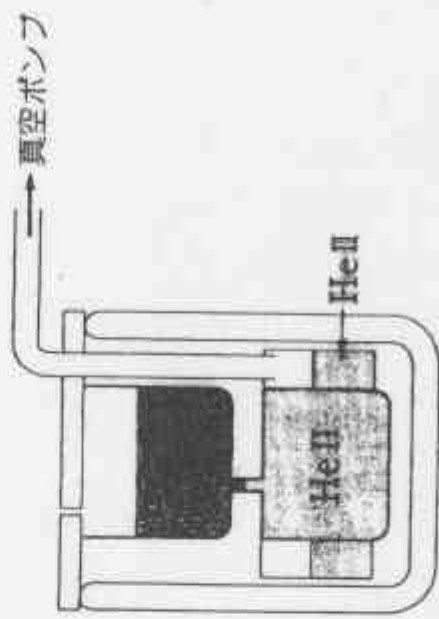
合金系 (Nb-Ti) と化合物系 (Nb₃Sn、Nb₃Al) の臨界電流特性



ヘリウム状態図と超電導磁石の冷却条件



(a) 減圧による方法



(b) 加圧超流動へリウム

超流動を作る

ビーム衝突点用・強収束四極マグネットの開発（続）

- 基本設計条件
 - NbTi超伝導材 (@1.9K, 1atm)
 - 設計磁場勾配 240 T/m
 - コイル内最高磁場 9.6 T
 - ビーム入熱 40 W/mag
- 基本構造
 - (電磁的には) 四層コイル
 - (機械的には) 二重シェル構造
 - 鉄ヨークを最大限コイルに近づける
 - 鉄ヨークによる電磁力支持
 - コイルに位置決め精度、再現のしやすい構造

51

ビーム衝突点用・強収束四極マグネットの開発（続）

- 開発の経過と計画
 - 1996年 基本設計
 - 1997～9年 1mモデルの試作
 - 1999～ プロトタイプ
 - 2001～ 実機製作
 - 2004 完成
 - 2005 CERNにて実験開始
- 開発の成果
 - 1～3号機の完成試験（4、5号機をまもなく試験）
 - 磁場勾配250 T/mを達成（1号機）
 - 運転磁場>215 T/m初期励磁で達成（2号機）
 - 要求磁場精度(<10⁻⁴)を達成（3号機）

52

ビーム衝突点用・強収束四極マグネットの開発（続）

• 超伝導マグネットの組立と構造

- コイル巻き線
 - コイル製作精度を < 30 ミクロン
- カラーリング
 - 約 $1/10$ の予備応力をあたえつつ、予備組立
 - コイルの位置決めとなるカラーを組立
- ヨーキング
 - 鉄ヨークをくみつけ、
 - 鉄ヨーク構造を利用してコイルに予備応力を与える
- シリンダーリング
 - 超流動液体ヘリウム容器となる

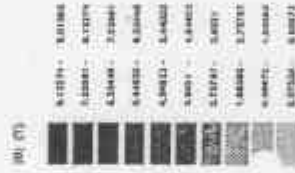
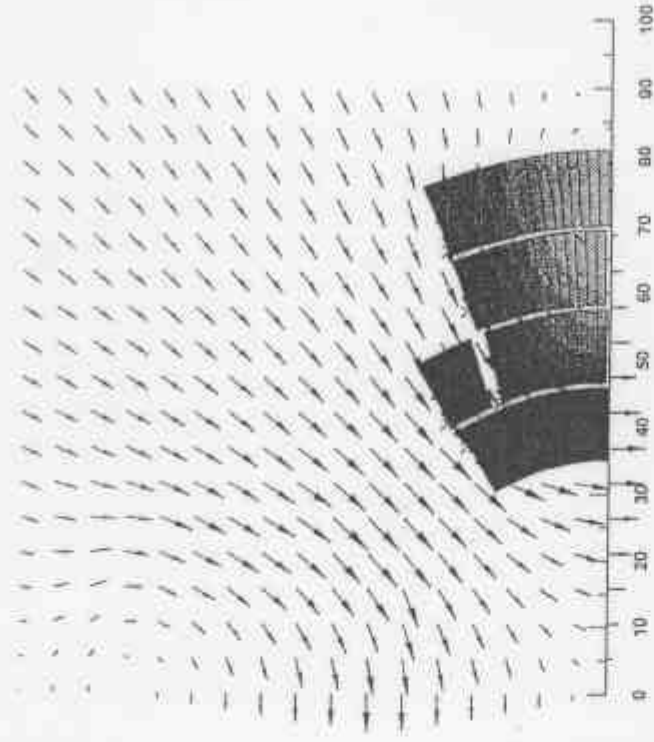
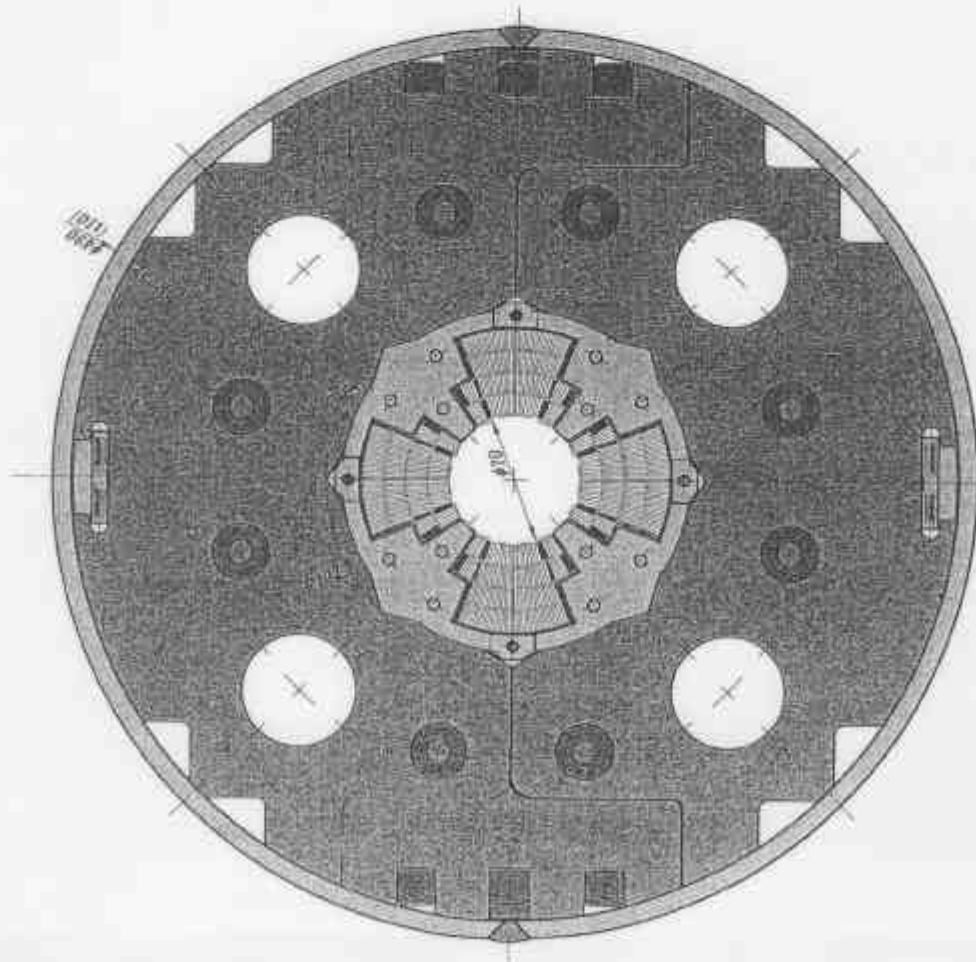
53

ビーム衝突点用・強収束四極マグネットの開発（続）

技術的な課題

- 磁場の精度：
 - 周回するビームの軌道を保ちつつビームの発散、ロスを防ぐために、有効口径（ $\sim 2/3$ ）で磁場の均質度 10^{-4}
- プリストレス：
 - 発生するコイル内での電磁力に対し、それ以上の応力であらかじめコイルを支持固定
- クエンチ：
 - 電磁応力によるコイルの動き、ピンング力を越える電磁力による超伝導体内でのフラックスジャンプ、
- トレーニング：
 - クエンチを起こしつつ、徐々に到達電流があがっていく現象。あまり多発すると数千台の磁石が性能を発揮するために時間がかかりすぎる。
- 安全性：
 - クエンチが発生した時、電磁蓄積エネルギーを安全に吸収または取り出すことが必要。

54



ROXIE*.d



LHC-MQXA

2) Basic Consideration on the Coil Design.

Maxwell Equation :

$$B = \text{rot } A \quad (B_\theta = -dA_z/dr)$$

For Quadrupole

$$A_z(r, \theta) = 2\mu_0/\pi \cdot J \cdot r^2/2 \cdot \cos 2\theta \int_{a_1}^{a_2} \frac{1}{a} da$$

$$= 2\mu_0/\pi \cdot J \cdot r^2/2 \cdot \cos 2\theta \cdot \ln(a_2/a_1)$$

$$B(\theta) = 2\mu_0/\pi \cdot J \cdot r \cdot \ln(a_2/a_1) \cdot \cos 2\theta$$

If $\theta = 30^\circ$, and $r < a_1$,

$$B(\theta) = \sqrt{3}/\pi \cdot \mu_0 \cdot J \cdot r \cdot \ln(a_2/a_1)$$

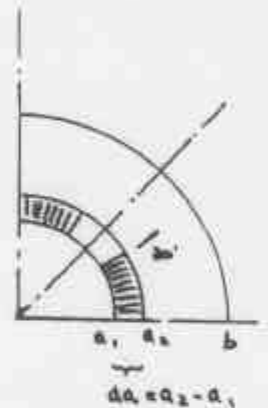
$$G = B_\theta / r = \sqrt{3}/\pi \cdot \mu_0 \cdot J \cdot \ln(a_2/a_1)$$

or $a_2/a_1 = \exp[\pi\sqrt{3} \cdot 1/\mu_0 \cdot G/J]$

As an Example:

$$a_2/a_1 = \exp[\pi\sqrt{3} \cdot 1/4\pi \times 10^{-7} \cdot 250(\text{T/m}) / 4 \times 10^8] = 2.46$$

$$a_2 = 0.086 \text{ mm} \Rightarrow da = 0.051 \text{ mm} \quad \text{at } a_1 = 0.035 \text{ mm}$$



5) Effect of the Iron Yoke.

With assuming thin coil.,

$$B_\theta = -2\pi \cdot \mu_0 \cdot I \left(\frac{r}{a}\right)^{n-1} \left(1 - \left(\frac{a}{b}\right)^{2n}\right) \cos n\theta$$

at $n = 2$ (Quadrupole) and $r = a = a_1$.

$$B_\theta = -2\pi \cdot \mu_0 \cdot I_0 \left\{ 1 + \left(\frac{a}{b}\right)^4 \right\} \cos n\theta$$

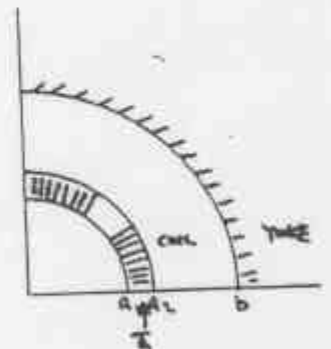
$$\left(= \eta \right)$$

With assuming $\bar{a} = a_1 + 1.5w$, $w = a$ coil width of layers

$$B_{\theta a} = \kappa \left\{ 1 + \left(\frac{\bar{a}}{b}\right)^4 \right\}$$

As an example at $w = 12 \text{ mm}$, $b = 96 \text{ mm}$,

$$\eta = 1 + (53/96)^4 = 1.093 \quad (>> 9.3\% \text{ enhanced})$$



ビーム衝突点用・強収束四極マグネットの開発（続）

- これまでに得られた成果
 - 1 mモデルで250 T/mを達成（1号機）
 - 初期励磁で磁場勾配220 T/mを達成（2号機）
 - 求められる磁場精度を達成（3号機）
 - 12極成分 7×10^{-5}
 - 20極成分 $< 1 \times 10^{-5}$

- 今後の計画
 - 1 m 4、5号機モデルの試験・・・再現性の確認
 - 6.3 mモデルプロトタイプの開発（2台）
 - 実機の製作、試験（20台）
 - 2001～2004

55

4. 素粒子実験における超伝導マグネット技術

- 高エネルギー・素粒子実験用超伝導マグネットの開発とその進展

- 磁場の選択と特徴
 - ダイポール磁場
 - トロイダル磁場
 - ソレノイド磁場

- CERN/LHC実験における超伝導マグネット
 - CMS
 - ATLAS

- ソレノイドマグネットにおける薄肉化への開発

56

素粒子実験用超伝導マグネットの開発とその進展

- なぜ超伝導マグネットが必要か？
- スペクトロメーター（分光）マグネットに求められる3つの要素
 - 運動量分析
 - 磁場 B : できる限り大きく
 - 磁場空間 : できる限り大きく
 - 粒子の通過を妨げない（軌跡を乱さない）
 - 透明性 : コイルをできる限り少ない物質で
 - エネルギーの節約
 - 大型化に伴う省電力化
 - 1 MWの消費電力を半年使うと、、、電気代 1億円

57

磁場中での荷電粒子の動き

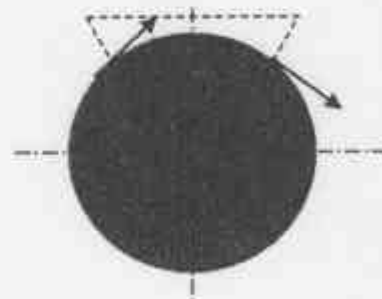
• 基本式

- ローレンツ力と遠心力のバランス

$$\begin{aligned} \bullet F = q \cdot v \cdot B = mv^2 / \rho = p \cdot v / \rho \\ - p = q \cdot \rho \cdot B \end{aligned}$$

$$\bullet P [\text{GeV}/c] = 0.3 \cdot \rho [\text{m}] \cdot B [\text{Tesla}]$$

$$\bullet 1 \text{ GeV}/c = 0.3 \times 3.33 \text{ m} \times 1 \text{ Tesla}$$



58

磁場中での荷電粒子の動き(続)

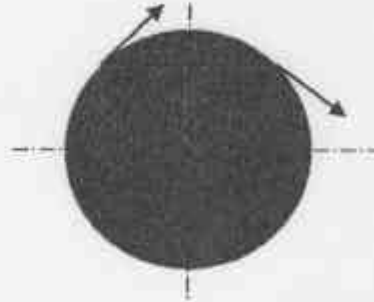
- 磁場による偏向(Deflection)

$$\angle \phi = L/\rho = q B L / p$$

- Saggiita

- $S = q \cdot B \cdot (L/2)^2 / p$

- $dp/p = ds/s = k \cdot 1/(BL^2)$



59

磁場中での荷電粒子の動き(続)

- 運動量測定 of 分解能は $1 / B L^2$ に比例する。

- 例)

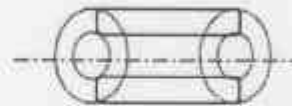
- $B = 2$ テスラ、 $L/2 = 2$ m の磁場空間で
サジッタが 10mm (0.01m) あった時、粒子の運動量の運動量は、

- $P = 0.3 \times 2 \text{ Tesla} \times 2^2 \text{ m}^2 / 10^{-2} \text{ m}$
 $= 240 \text{ GeV}/c$

60

磁場の選択と特徴

- ダイポール
 - 均一な磁場
 - 鉄ヨークが必要
 - 主として固定標的実験
 - 偏向角測定
- ソレノイド
 - 均一な磁場
 - 薄肉化
 - 主として衝突ビーム実験
 - サジッタを測定
- トロイダル
 - $1/r$ の磁場
 - それ自身で閉じた磁場
 - サジッタ+偏向角



61

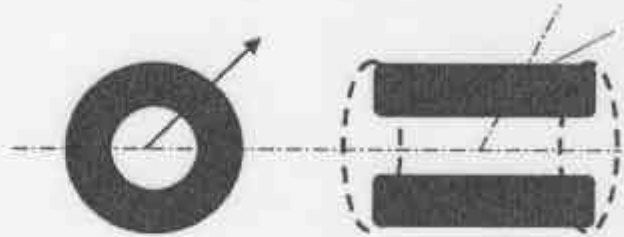
ダイポール磁場

- 特色
 - 鉄ヨークによる磁場の決定 ($< 2\text{ T}$)
 - 大立体角は困難
 - 偏向角の測定に最適
 - 固定標的実験に多く用いられる。
 - ビーム衝突実験 \gg 特殊な場合
- 例
 - SKSスペクトロメーター (KEK)
 - LHCb (常伝導コイル)
 - LHC-ALICE (常伝導コイル)

62

トロイダル磁場

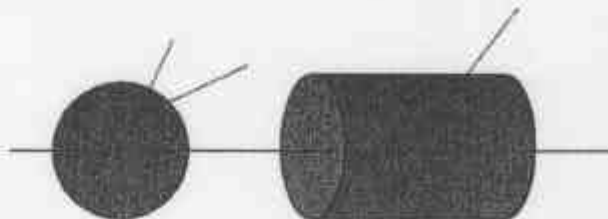
- 閉じた磁場
(鉄ヨークを必要としない)
- 測定器の部分にのみ磁場
- 磁場は $1/r$ に逆比例
- 実際的には 6 ~ 10 のコイルで近似
- 磁場は起伏が大きく、コイル内での磁場が高い
- 構造は複雑 >> バランスを保つための機械構造
- サジッタとディフレクションを計る
- $dp/p = (B_p \cdot R_1 \cdot \ln(R_1/R_0) / \sin \theta)^{-1}$



63

ソレノイド磁場

- 軸方向に均質な磁場
- 電磁圧力に対してコイル自身で安定な構造
- 磁束のリターンに鉄ヨーク
(または空芯による外部磁場)
- 主としてコイル内部磁場を用いる
- サジッタを計る
- $dp/p = (B \cdot R^2)^{-1}$
- コイルの外側では偏向角を計る
- $dp/p = (B \cdot R)^{-1}$



64

粒子検出器用超伝導マグネットの進展

- ダイポール
 - 井原, S K S (KEK-PS)
- (薄肉) ソレノイド
 - CELLO
 - CDF, TOPAZ, VENUS, AMY (Tristan)
 - ALEPH, DELPHI (LEP)
 - ZEUS, H1 (HERA)
 - BELLE (KEK-B), BABAR (SLAC-B)
 - ATLAS, CMS (LHC)
- トロイド
 - Toroid (KEK)
 - CEBAF
 - ATLAS (LHC)

65

薄肉超伝導ソレノイド

究極の目標 >> 物質のない、透明な磁場空間

- 物理実験の要求
 - 磁場を強く
 - コイルおよびクライオスタットの物質を少なく
 - 多重散乱、エネルギーロスを極力抑える
 - Magnetic Field $\text{rot } B = \mu_0 J$
 - Transparency $X \sim RB^2 / (E/M)$
 $\sim RB^2 \gamma / \sigma_h$
- 性能と安全性のバランス
 - 電流密度を高く、コイルを軽く
 - E/M (蓄積エネルギー/冷却重量) を高く
 - 超伝導線を細く、強く、...
 - クエンチが起きた時には
 - 伝播を素早く、コイル内で均等にエネルギー吸収
 - クライオスタットを薄く、軽く

66

FUNDAMENTAL RELATIONS IN THIN SOLENOID DESIGN

Magnetic Field : $\Delta \times B = \mu_0 j \Rightarrow B = \mu_0 \cdot n I$
 (infinite length or with iron pole)

Stored Energy : $E = \frac{1}{2\mu_0} \int B^2 dv = \frac{B^2}{2\mu_0} \cdot \pi R^2 \cdot L$

Mass : $M = V_{\text{coil}} \cdot \gamma = 2\pi R \cdot t \cdot L \cdot \gamma$

Magnetic pressure : $P_r = \frac{B^2}{2\mu_0}$

Hoop Stress : $\sigma_h = \left(\frac{R}{t}\right) P_r = \frac{R}{t} \cdot \frac{B^2}{2\mu_0}$

Wall Thickness : $t = \left(\frac{1}{\sigma_h}\right) \cdot R \cdot P_r = \left(\frac{1}{\sigma_h}\right) \cdot R \cdot \left(\frac{B^2}{2\mu_0}\right)$

E / M ratio : $E / M = \left(\frac{B^2}{2\mu_0}\right) \cdot \frac{R}{2t\gamma} = \frac{\sigma_h}{2\gamma}$

57

-
- B : Magnetic flux density
 - μ_0 : permeability
 - n : turns / unit length
 - I : Current
 - R : Coil radius
 - L : Coil Length
 - t : Coil thickness
 - γ : Density of material used in coil
 - H : Enthalpy
 - T : Temperature

• **Physics Requirements:**

- Magnetic Field, B : As high as possible : $\Delta \times B = \mu_0 j \Rightarrow B = \mu_0 n I$

- Transparency, X : As thin as possible : $X \propto t \propto \frac{R \cdot B^2}{E/M} \propto \sigma_h / (E/M)$

• **Safety Constraints:**

- Superconducting Stability:

Min. Quench Energy : As high as possible :

$$MQE = \Delta H \cdot A \cdot l_{MPZ} = \gamma C \cdot \Delta T \cdot A \left(\frac{1}{J_a \sigma} \right) \cdot \{ 2 L_0 T (T_c - T_0) \}^{1/2}$$

- Mechanical Safety:

$$\begin{aligned} \underline{\sigma_h} : \text{Within elastic design} : \sigma_{2\tau} = \sigma_h - \sigma_z \ll \sigma_{ys} \\ = \left(\frac{1}{t} \right) \cdot R \cdot \left(\frac{B^2}{2\mu_0} \right) \end{aligned}$$

- Quench protection

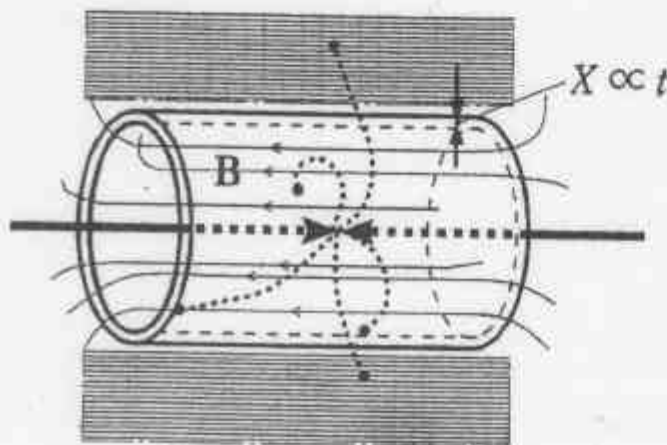
T : As low as possible : $H(T) = E/M \Rightarrow T \propto (E/M)^{1/3} - 1/4$

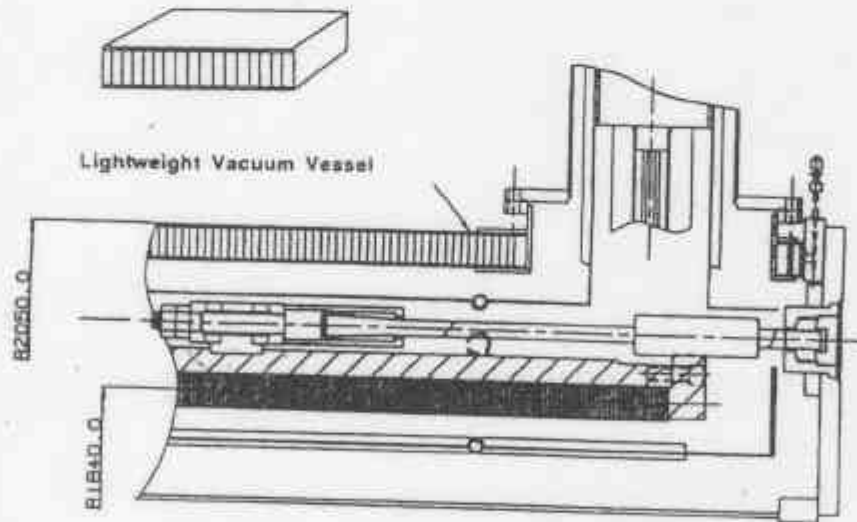
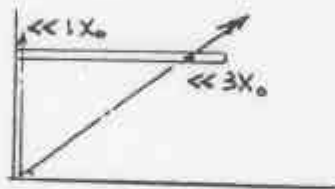
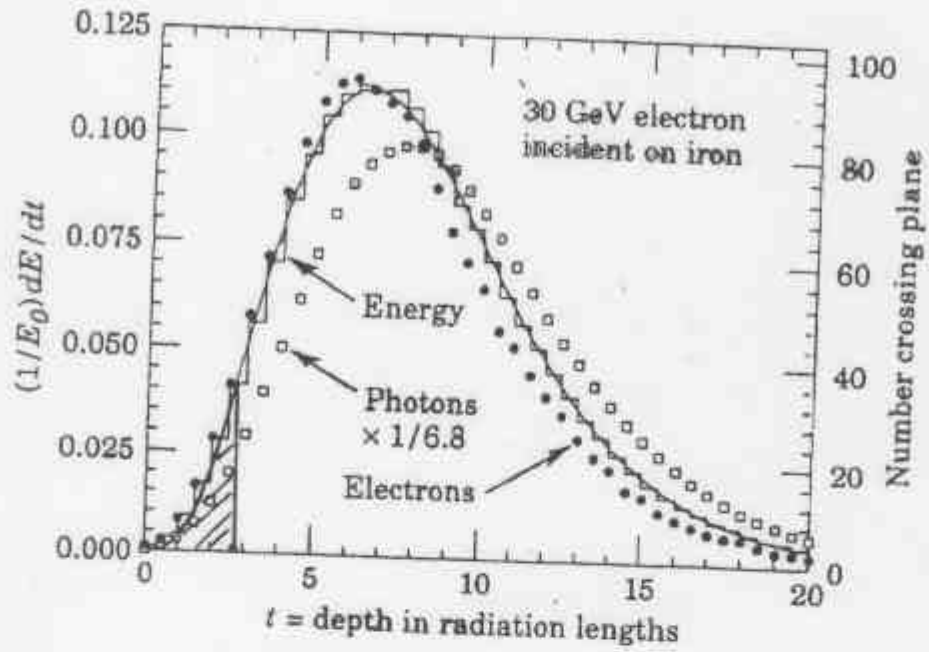
ΔT : As small as possible : $\epsilon = \int \propto dT$

• **Physics Requirements:**

• Magnetic Field, B : As high as possible : $\Delta \times B = \mu_0 j$

• Transparency, X : As thin as possible : $X \propto t \propto \frac{R \cdot B^2}{E/M} \propto R \cdot B^2 \cdot \frac{\gamma(\text{density})}{\sigma_h}$





High Strength Conductor



Quench Propagation Strips



Higher E/M Ratio

薄肉超伝導ソレノイド・新技術

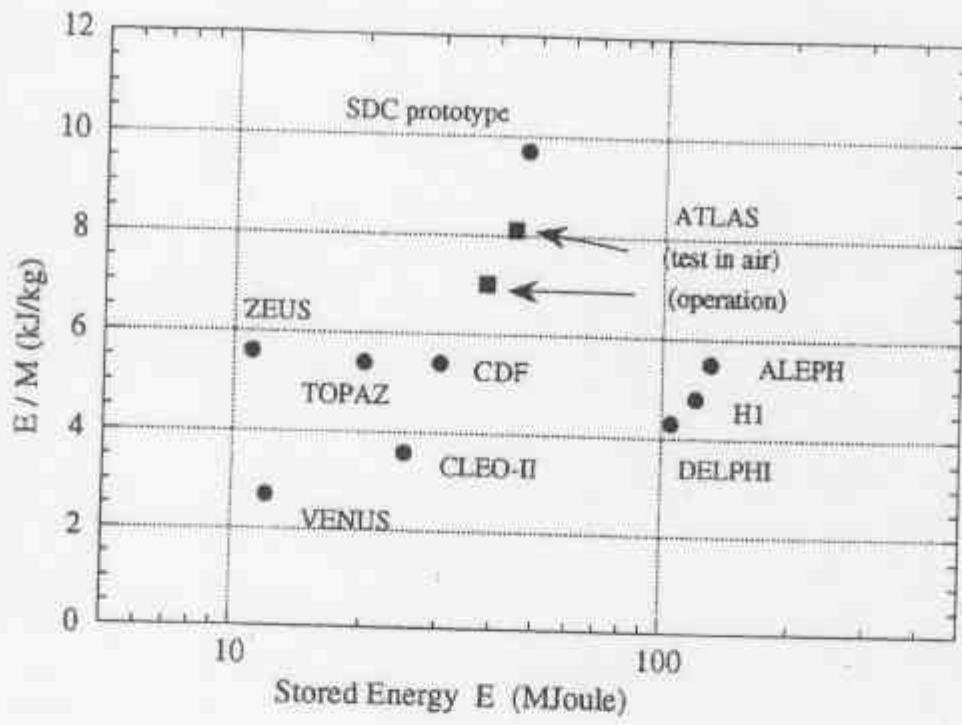
- 磁場の透明化を目指して開発された新技術
 - アルミ安定化超伝導線 (CELLO, CDF, TOPAZ,,)
 - X-Z **
 - $X_0(\text{Cu}) = 14 \text{ mm} \gg X_0(\text{Al}) = 89 \text{ mm}$
 - アルミ安定化材の高強度化 (低抵抗を保ちつつ)
 - 微量添加合金 (Ni添加、析出強化)
 - 機械加工強化
 - コイルの内巻き法 (TOPAZ, ALEPH, DELPHI ,,,)
 - 内側ボビンをなくし、
 - 電磁力支持シリンダーに直接コイルを巻き付ける
 - 純アルミ板高速クエンチ伝播法
 - コイル軸方向に超高熱伝導特性を有する純アルミ板によりクエンチを瞬時に全体に伝播し、コイル内での温度差熱歪みによるコイルの損傷を防ぐ。
 - クライオスタットの軽量化
 - Alハニカムクライオスタット、 炭素繊維強化プラスチッククライスタット

67

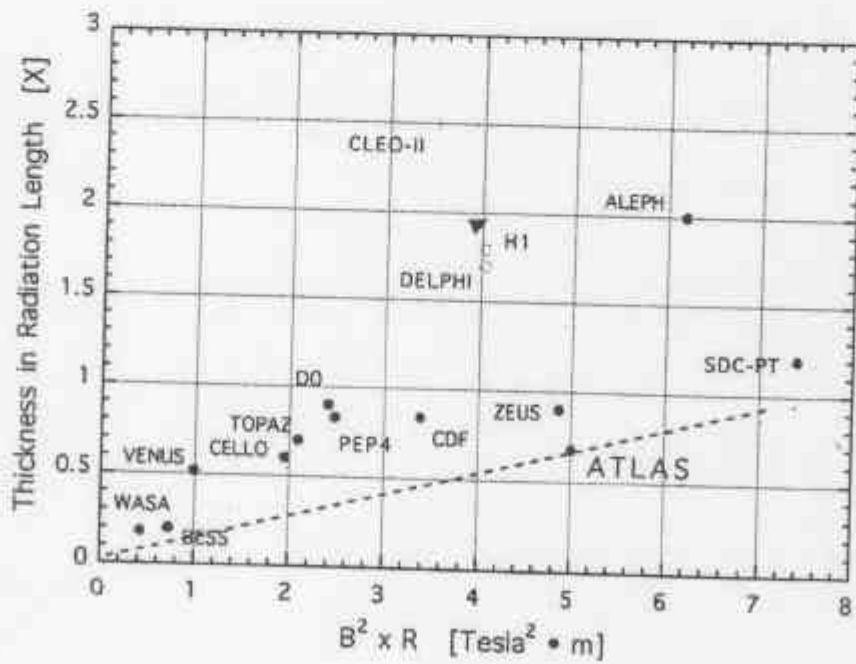
CERN/LHC・物理実験における超伝導マグネット

- LHC物理実験
 - 7+7 TeV 陽子・陽子衝突実験
- 四つの衝突実験
 - CMS
 - 単一高磁場ソレノイドによるコンパクトで精度の高い測定器
 - ATLAS
 - 薄肉ソレノイド + トロイド
 - 鉄構造が少なく、特にミュオン運動量測定精度が高い測定器
 - ALICE
 - 大型・常伝導ソレノイド + 常伝導ダイポール
 - LHC-b
 - 常伝導ダイポール

68



E/M Ratios in various detector solenoids.

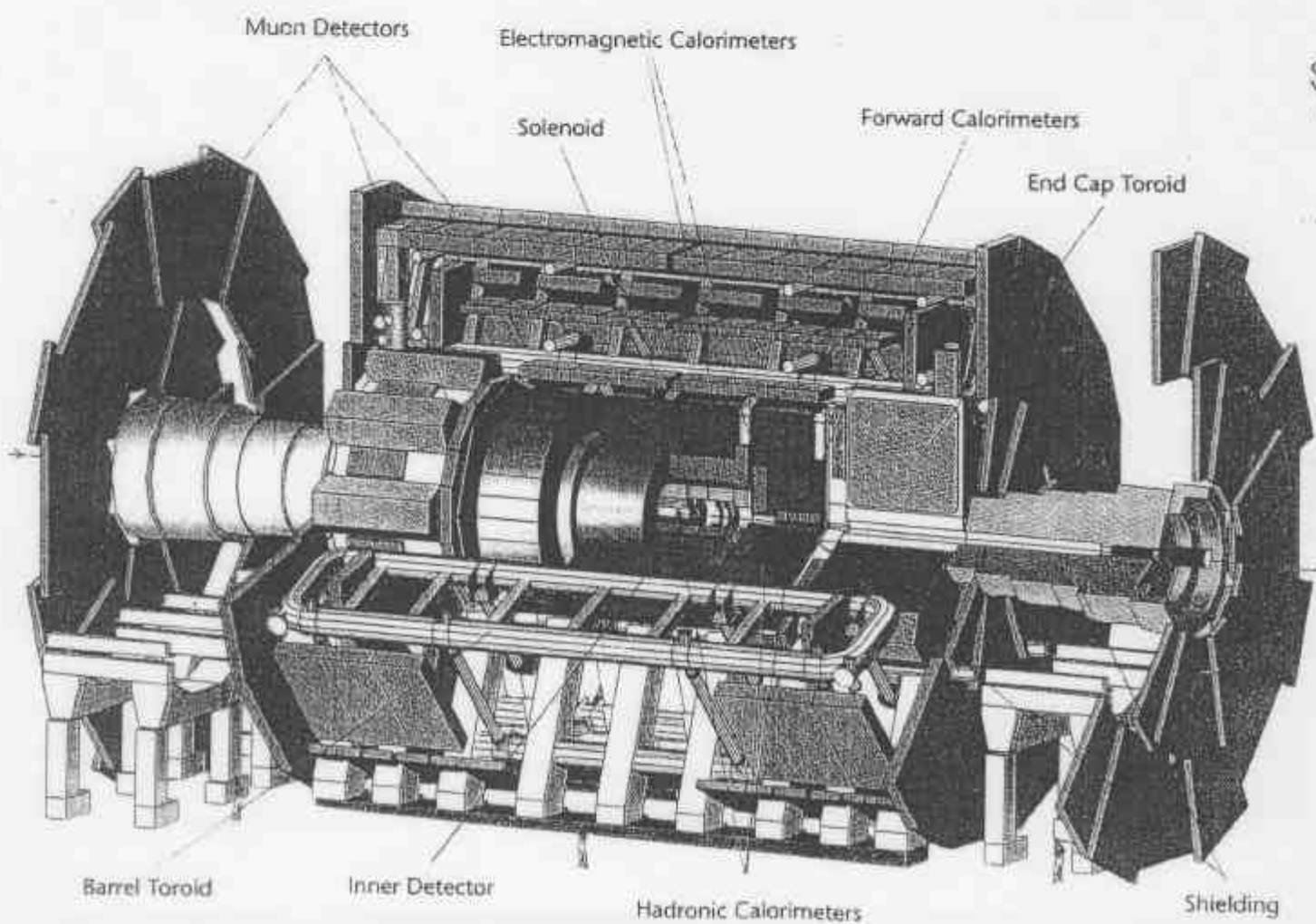
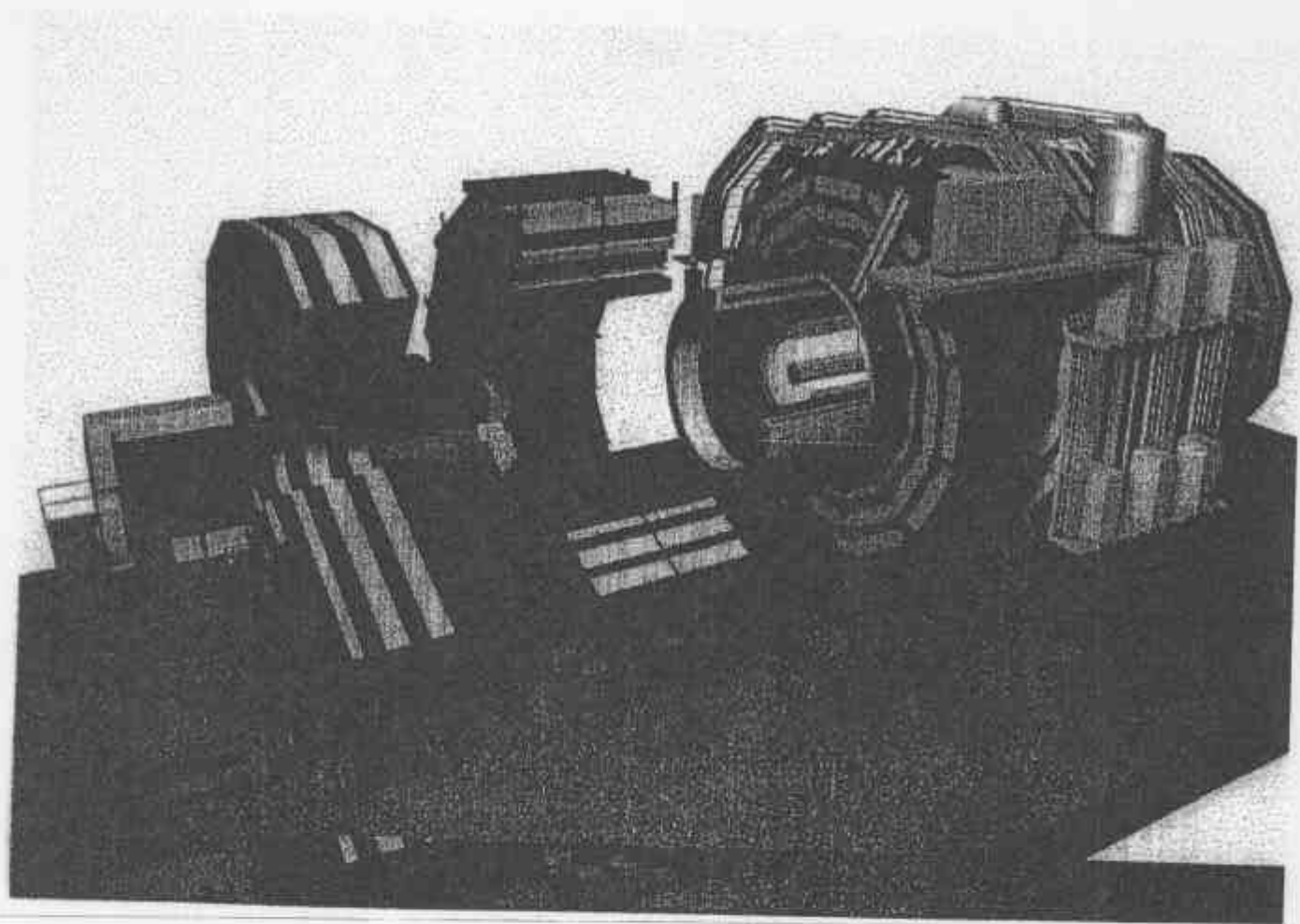


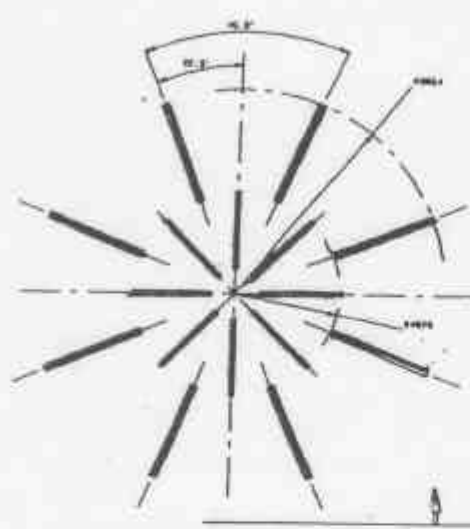
CMS

69

ATLAS

70





Angular distribution of magnetic and electric fields

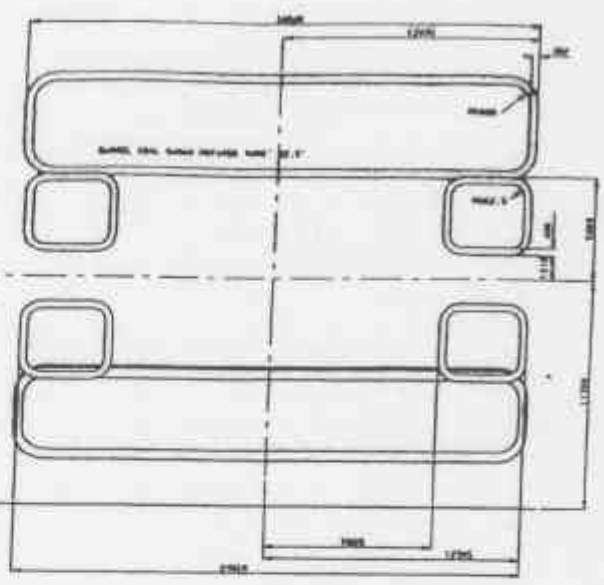
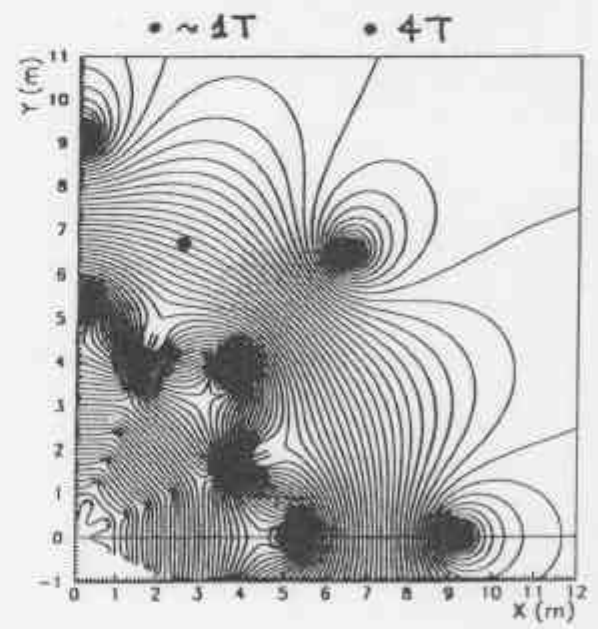
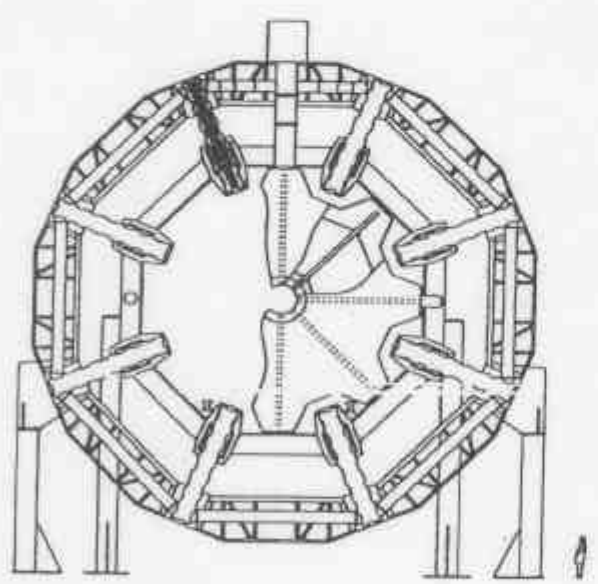


Figure 4



LHCb

71

ALICE

72

粒子検出器用超伝導マグネットの将来展望

- ソレノイド
 - さらなる透明化 (カロリメーターの分解能向上)
 - さらなる高強度 (低抵抗) アルミ安定化材の開発
 - 銅を越える強度、銅を越える電気伝導度 (熱伝導度)
 - E/M ratio を $10 \gg 20 \text{ kJ} / \text{kg}$ への努力
 - $B = 2 \text{ T}, R = 2 \text{ m}, \gg \gg x = 0.7 X_0$
 - 高磁場化 (高エネルギー化)
 - 大型粒子検出マグネットにおいて 5 T を越える?
 - ダブル・ソレノイドの可能性
 - 純極性ダブル・ソレノイド
 - 中央極薄肉ソレノイド (3 T)
 - 外側大口径、ソレノイド (2 T)
 - 空芯化 (ミュオン検出分解能の向上)
 - 逆極性ダブル・ソレノイド
 - 電流によるアクティブ・シールドの概念

73

5. 宇宙観測における超伝導・低温技術の応用

- 宇宙空間における宇宙粒子線の観測計画
 - ASTROMAG 計画と超伝導マグネット
 - 気球による宇宙粒子線の観測 (BESS) と超伝導マグネット
- 太陽 AXION 探索実験
- 重力波探索実験への低温技術の果たす役割

74

宇宙空間における宇宙粒子線の観測と 超伝導マグネット

- 宇宙空間における宇宙粒子線の観測
 - 大気フリー
 - 高い感度、大気によるバックグラウンドフリー
 - 局所磁場空間を発生
 - 電力の節約、軽量化が必須
 - 永久電流・超伝導マグネットが
 - 本質的な役割を果たす

75

宇宙空間における宇宙粒子線の観測と 超伝導マグネット (続)

- ASTROMAG計画 (1985~)
 - 宇宙ステーションにおける宇宙粒子線の観測計画
 - 超伝導マグネットをコアとした恒久的な観測基地
 - NASAを中心とした検討にイタリア、日本が協力
 - 超伝導電磁石の基本構想検討
 - ショートコイル (アメリカ提案)
 - アルミ安定化モデルコイルをKEKで開発
 - 薄肉超伝導ソレノイドを提案 (KEK)
 - モデルソレノイドの開発
 - 第一段階として気球実験による性能の検証を計画
 - BESS気球実験
 - (東大、KEK、神戸、宇宙研、NASA、U.M.)
 - (スペースシャトルの事故によりASTROMAG計画が無期延期)

76

宇宙空間における宇宙粒子線の観測と 超伝導マグネット (続)

• 宇宙空間における超伝導電磁石の特色と制約

	<u>地上</u>	<u>打ち上げ</u>	<u>宇宙 Station</u>
重力加速度	1 G	1 0 G	0 G
周囲圧力	1 atm		vacuum
周囲温度	300 K		- 250 K
地球磁場	0.3 gauss		0.3 gauss
磁石重量への制約		- 1 ton	
サイズ	4 mφ		
全磁気モーメント	ゼロ		ゼロ
漏れ磁場 (居住区)	< 1 gauss	1 gauss	1 gauss
供給可能電力			- 1 kW
励磁	No	No	Yes
運転条件			永久電流
冷媒ライフ/冷凍器			> 1年
液体ヘリウム温度			1.8 K

77

宇宙空間における宇宙粒子線の観測と超伝導マグネット (続)

• ASTROMAGテストコイル (KEK)

Coil	Short Solenoid	Simple
Size	1.6 mφ x 0.2 m	
Configuration	A pair and casp	M = 0
Coil weight	650 kg	
Usable field	External field	Free sp.
∫ B dt	1.5 T•m	
dB/year	< 1 %	
E/M	15 kJ/kg	Lightness
Superconductor	NbTi	
Stabilizer	Al	Transparent
Temp	1.8 K	
Cooling	Indirect conductive cooling	
Radiation Shield	3-stage shield	
Total weight	< 2 ton	

78

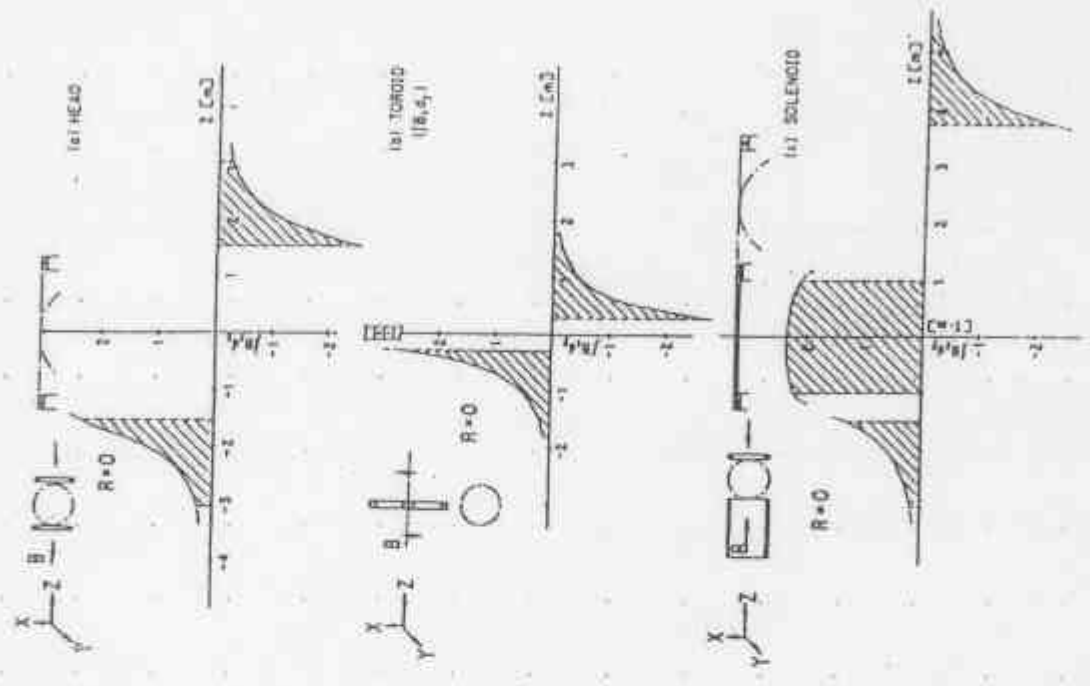
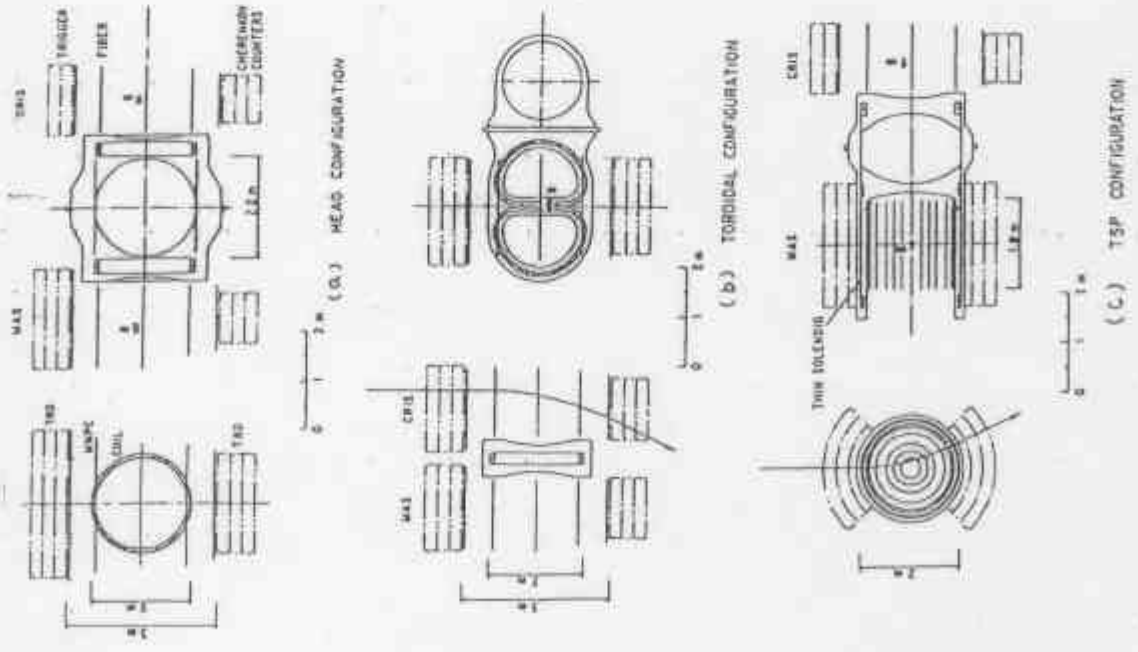


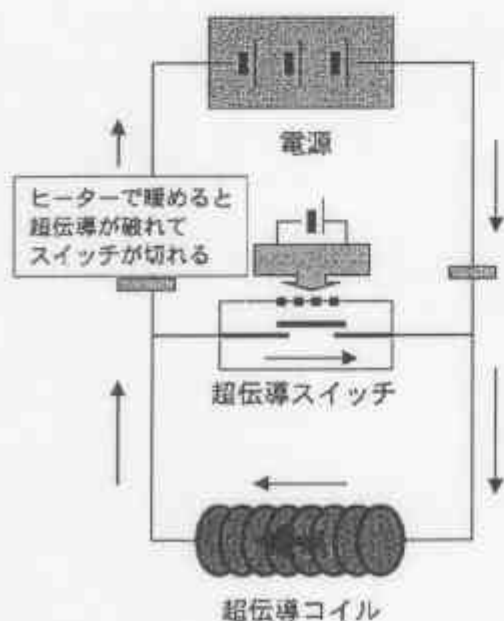
図3.1.1.1-5 ASTROMAGの磁場分布の比較

宇宙空間における宇宙粒子線の観測と超伝導マグネット（続）

- 薄肉超伝導ソレノイドの提案（KEK）
 - アルミ安定化細線 Transparent coil
 - 静的間接冷却 saving cryostat material
 - 永久電流 < 500 A
 - 液体ヘリウムライフ ~ 1 Week (150 l)
 - 透明度 < 0.2 radiation length
 - (シンチレータ 2 x 2 cm分)
 - 全体重量 500 kg
- モデルマグネットの開発
 - 気球実験での有効性の検証
 - BESS 実験への発展

79

永久電流マグネット



- 超伝導コイルを充電
- ↓
- 超伝導スイッチをON（ヒーターを切る）、
- ↓
- 超伝導のループが完成
- ↓
- 永久電流となり（電流一定）
- ↓
- 磁場が減衰しない。

80

2-2、超伝導ソレノイドコイル

・ 軽量化（粒子透過性）への努力

E/M 比 (Stored Energy / Effective cold mass) を高める

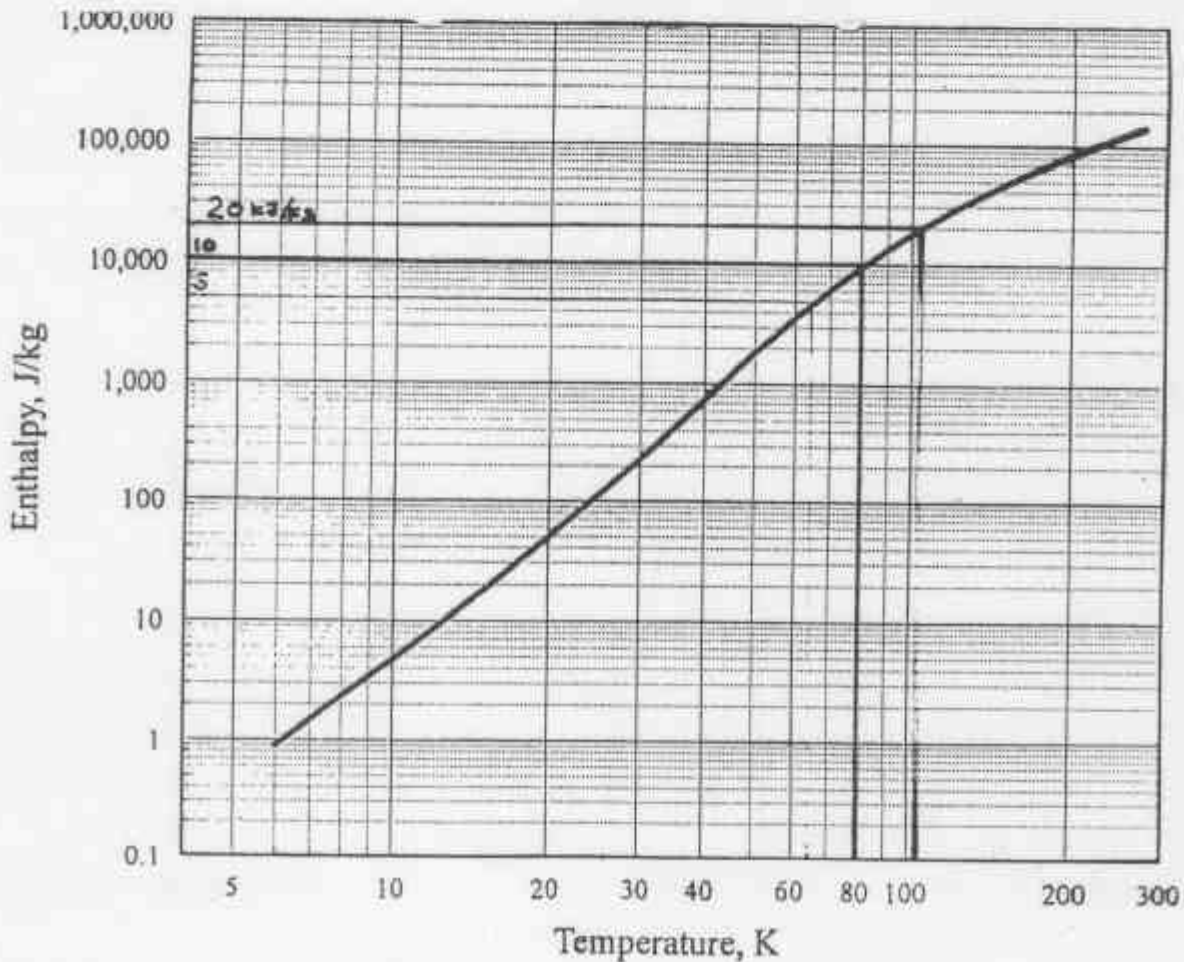
$$E/M = \int (CpT) d.T = H(T_2) - H(T_1) = \text{aprox. } H(T_2)$$

>> クエンチ後のコイル平均温度上昇を示す

For Example (Al):

E/M = 5 kJ/kg	→ T ₂ = 65 K
= 7.5 kJ/kg	= 75 K
= 10 kJ/kg	= 80 K
= 20 kJ/kg	= 100 K

8064



DEVELOPMENT OF FAST QUENCH PROPAGATION TECHNIQUE BY USING PURE AL STRIP

83 64

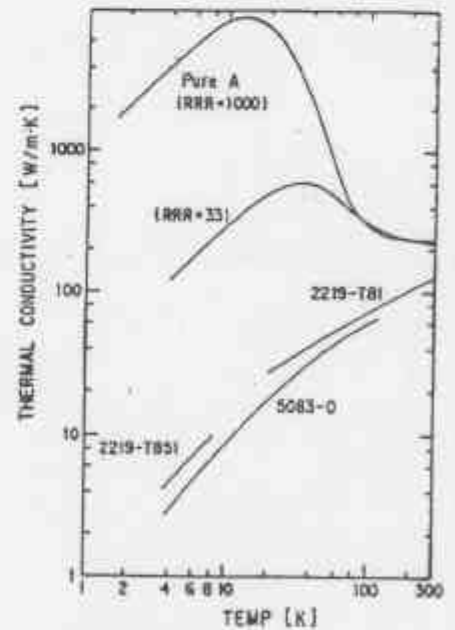
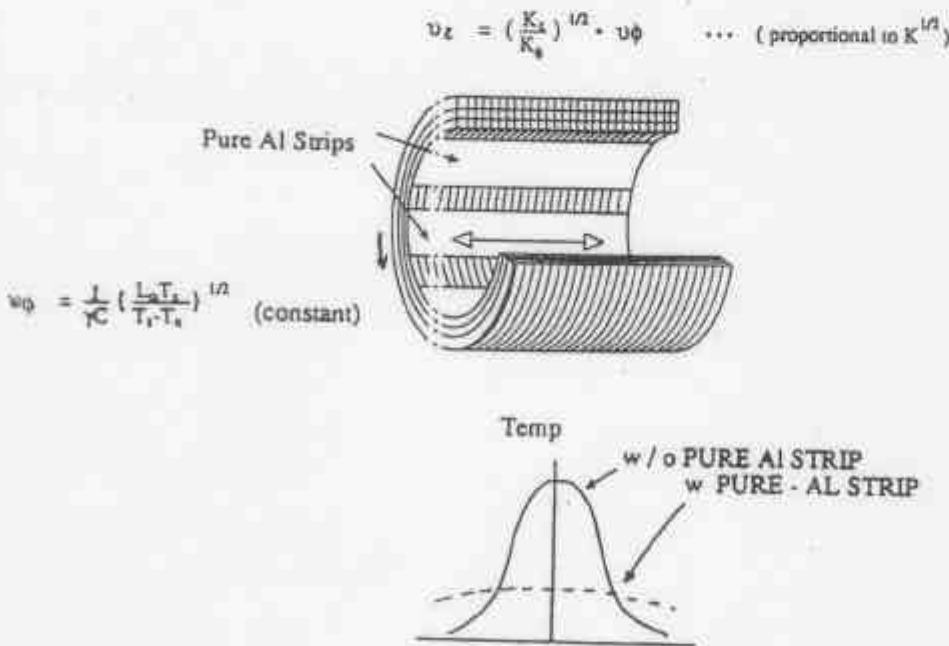
- Fast Quench Propagation >> Uniform Energy Dump,
is helpful for:
 - >> Uniform Temperature Rise with less ΔT ,
 - >> Eliminate Excessive Thermal Stress

• Quench Propagation Velocity :

$$v_{\phi} = \frac{J}{\gamma C} \left\{ \frac{L_0 T_s}{T_s - T_0} \right\}^{1/2} \dots (\text{constant})$$

$$v_z = \left(\frac{K_z}{K_{\phi}} \right)^{1/2} \cdot v_{\phi} \dots (\text{proportional to } K^{1/2})$$

• Improvement of Axial thermal Conductance should be efficient:



太陽AXION探索実験

- AXION
 - 量子色力学 (QCD: Quantum Chromodynamics)
 - 素粒子物理学におけるクォーク巻に働く強い相互作用を記述する理論
 - 素粒子物理の標準模型の重要な構成要素
 - C P (C: 荷電共役、p: 空間反転) 対称性の破れを
 - 破る項が存在することが知られている。
 - しかし、実験的には、C P の保存が観測されている。
 - (中性子の双極子モーメント: 実験の精度範囲内でゼロ)
 - C P が保存するという実験事実を理論的に自然に説明することができない。
 - 「強いC P 問題」
 - AXION模型 >> 電子よりも軽い未確認の粒子
 - 光子、核子、(レプトン) と非常に弱い結合 ($G_{\gamma\gamma}$)
 - 質量 (m)、結合定数 (g) は理論からは予言されない
 - いろいろな天体からも大量に放出されている

81

太陽AXION探索実験 (続)

- 太陽がAXIONを放出
 - 中心部からの熱的な放射
 - $E_a \sim 4 \text{ keV}$
 - $L_a \sim 10^{-3} L \times (G_{\gamma\gamma}/10^{-10} \text{ GeV}^{-1})^2$
 - [K. van Bibber et al, PR. D39 (1989) p.2089]
- 東大、KEKグループにおける探索実験
 - $G_{\gamma\gamma}$ チャネルにおける探索
 - 質量、 $\sim 1 \text{ eV}$ レベルでの探索

82

太陽AXION探索実験（続）

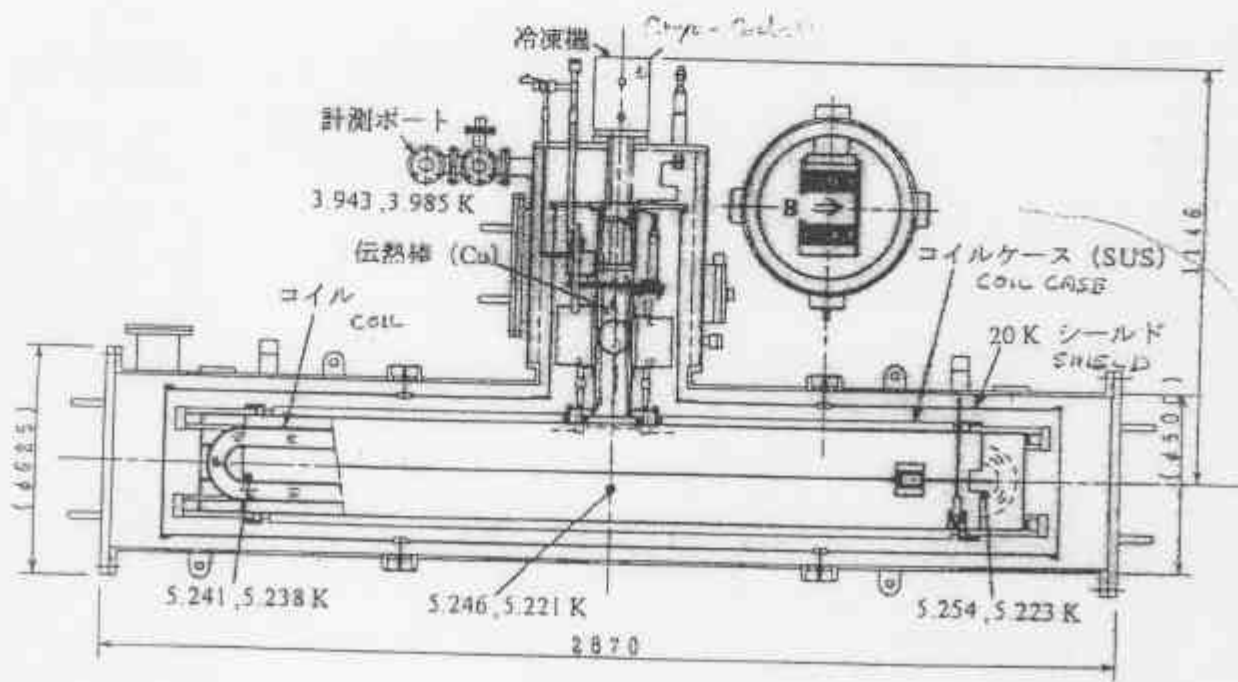
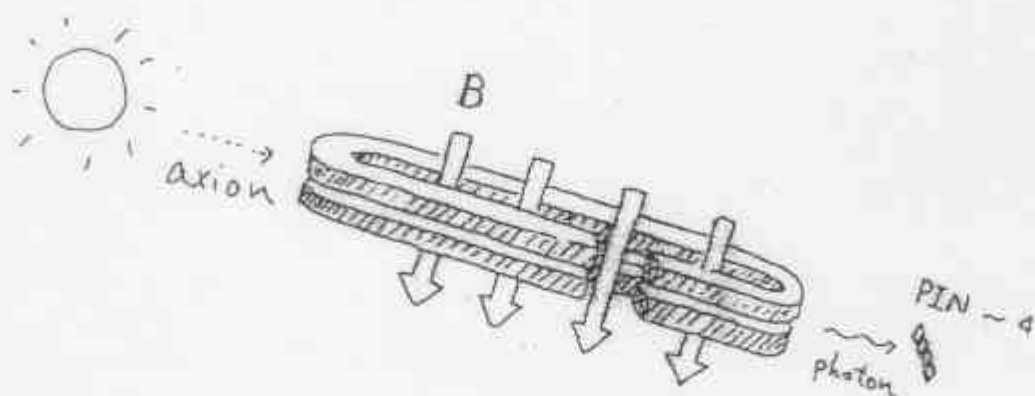
- 超伝導電磁石への要求と特色
 - ダイポール磁場>>できる限り高く
 - $B \cdot L = 8-10 \text{ T} \cdot \text{m}$
 - $G \sim 2 \text{ cm}$
 - 長期連続観測（運転）
- 新たな試み
 - レーストラックコイル（ダイポール）
 - 永久電流マグネット（長期連続運転）
 - 小型冷凍器・伝導冷却（無人・自動運転）
- 大学の一研究室で $10 \text{ T} \cdot \text{m}$ の磁石が自動運転可能となった。

83

太陽AXION探索実験（続）

- 磁石のパラメーター

84



SPRIT RACE TRACK (DIPOLE)
10-T.m
CONDUCTIVELY COOLED

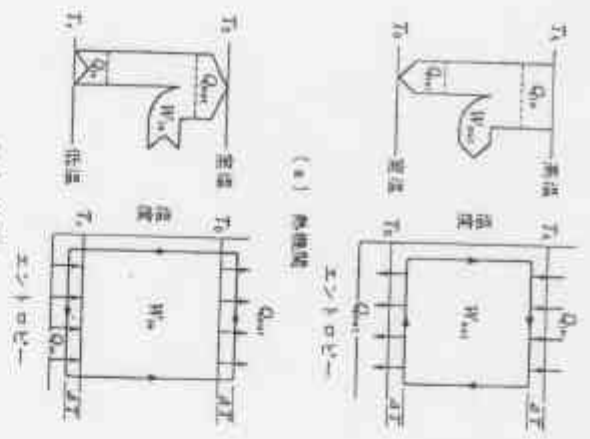


図 4.3 カルノーサイクル

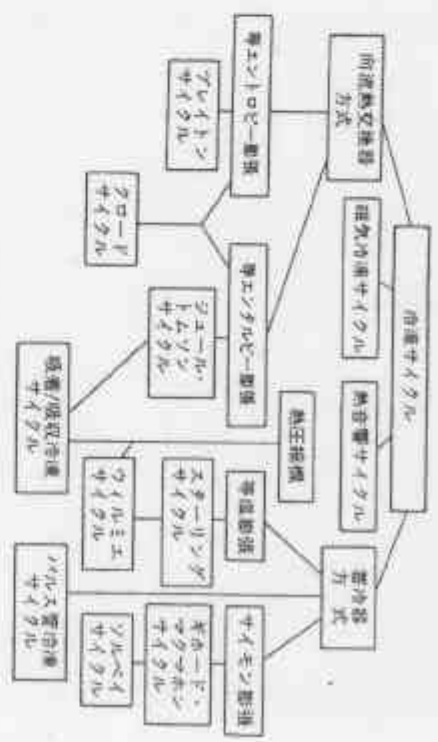


図 4.5 熱交換機の分類

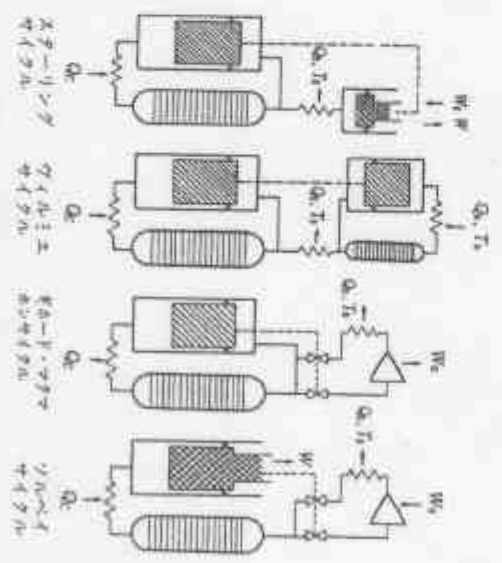


図 4.20 各種型熱交換機の比較

太陽AXION探索実験（続）

- 小型冷凍機による超伝導磁石の冷却
 - GM（ギフォード・マクマフオン）小型冷凍機
 - 直接・伝導冷却
 - 全く液体ヘリウムをクライオスタットのなかに持たない
 - 性能
 - $\sim 1\text{ W @ }4.5\text{ K}$
 - 効率は $1/70 \times$ カルノー効率（ $1/70$ ）
 - 室温で5 kW程度
- 永久電流モード、
- 高温超伝導電流リードとの組み合わせ
- 完全自動運転

85

重力波探索実験における低温技術

- 重力波
 - 質量のある物体の存在は時空の歪みを生む
 - アインシュタインの一般相対性理論
 - 質量をもった物体が移動すると時空の歪みが波となって光速で伝播
 - ハルスとテイラーにより、連星パルサーの公転周期の変化の観測から、間接的に確認
 - （1993年：ノーベル賞）
- 重力波検出の意義
 - これまでに、直接的な観測はなされていない。
 - 超新星爆発、ブラックホールの形成などの強い重力場での一般相対性理論の検証が、唯一、
 - 重力波によってのみ可能

86

重力波探索実験における低温技術（続）

- 重力波を見る
 - 重力波によって生じた時空の歪みを
 - 決まった距離を往復する光の時間差から測定
 - 光の干渉現象を利用
 - 90度違った方向での光の往復時間の差にともなう干渉を、重なりあった光の光量の変化から観測
- 歪みのレベルと実験の困難さ
 - 乙女座銀河団からの重力波
 - 1 mの距離におかれた2つの質点は
 - 1.0^{-20} mだけ動く
 - あまりに小さな変位量

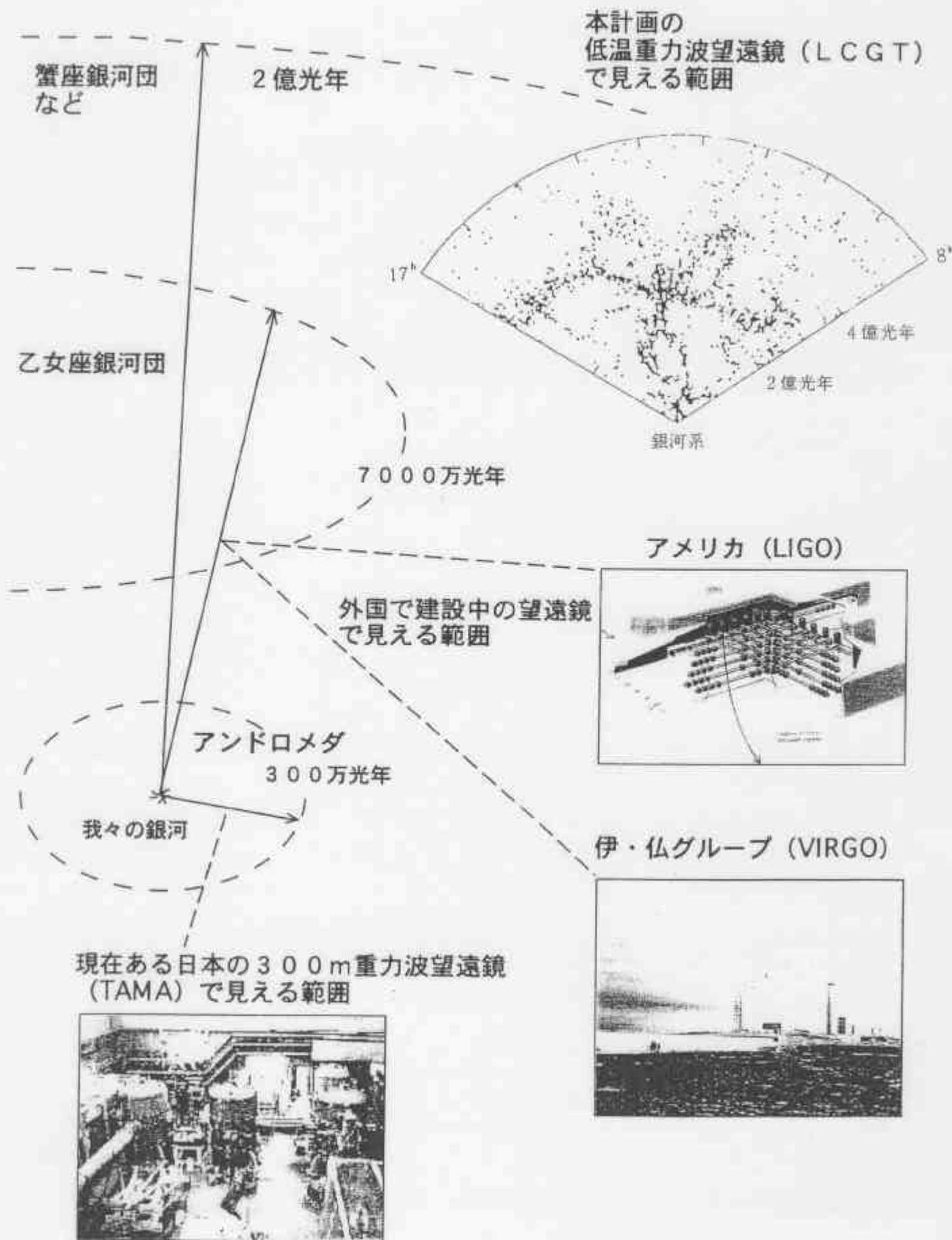
87

重力波探索実験における低温技術（続）

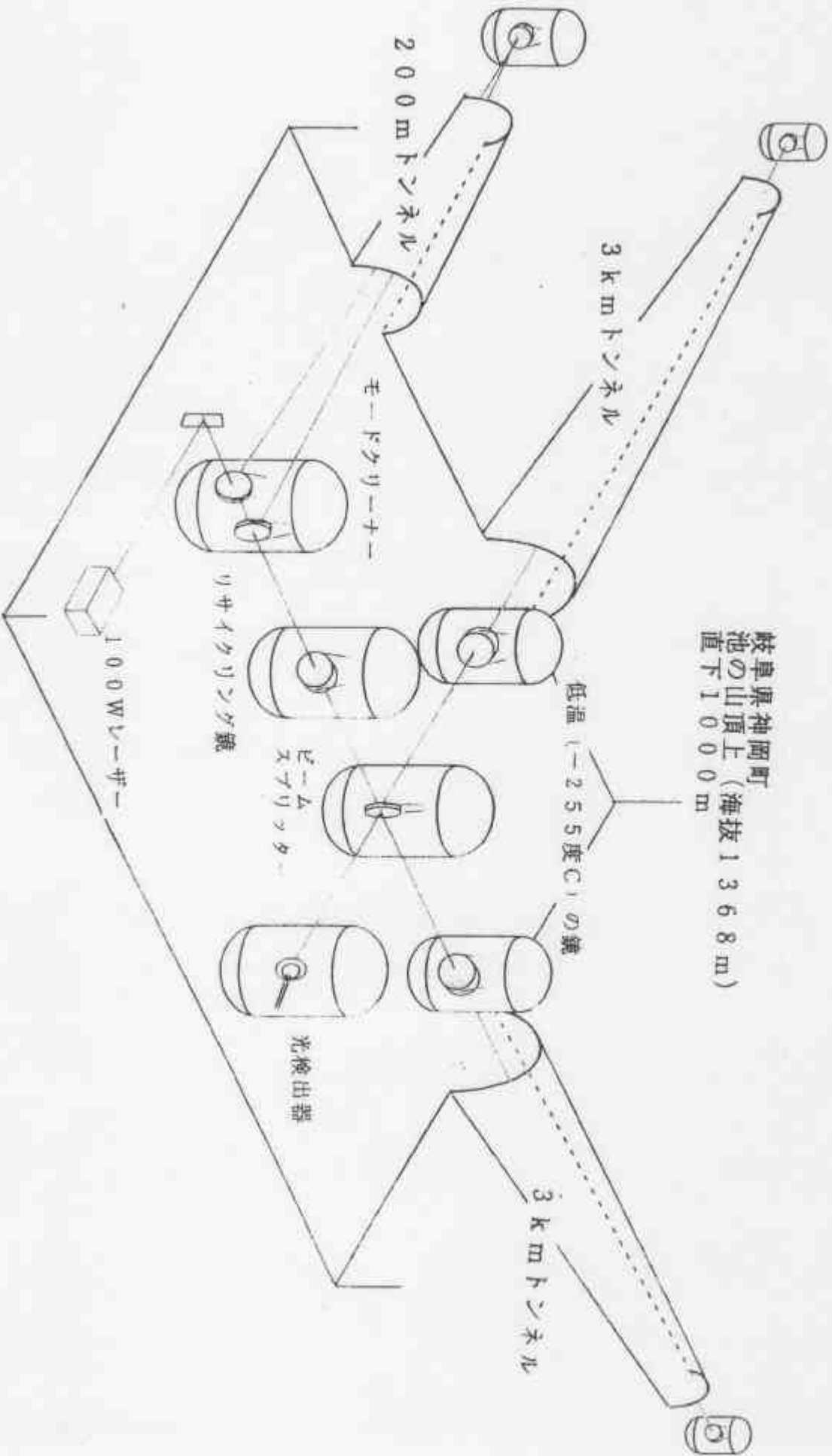
- 低温重力波望遠鏡（LCGT）計画
 - 東大宇宙研（&国立天文台）を中心とした計画
 - KEKが低温技術で協力
- 室温レベルでの努力と限界
 - 干渉計を長く >> 3 km
 - 光の折り返し >> ファブリフェロー干渉法
 - レーザーパワー >> 大きく（ ~ 100 W）
 - リサイクル
 - 光の損失の低減 >> 低損失ミラー
- 低温化による感度の向上
 - 干渉計ミラーを低温（ ~ 10 K）に冷やす
 - 熱的な振動を押さえ、重力波変位への感度向上
 - サファイア・ミラーを低温に冷やす

88

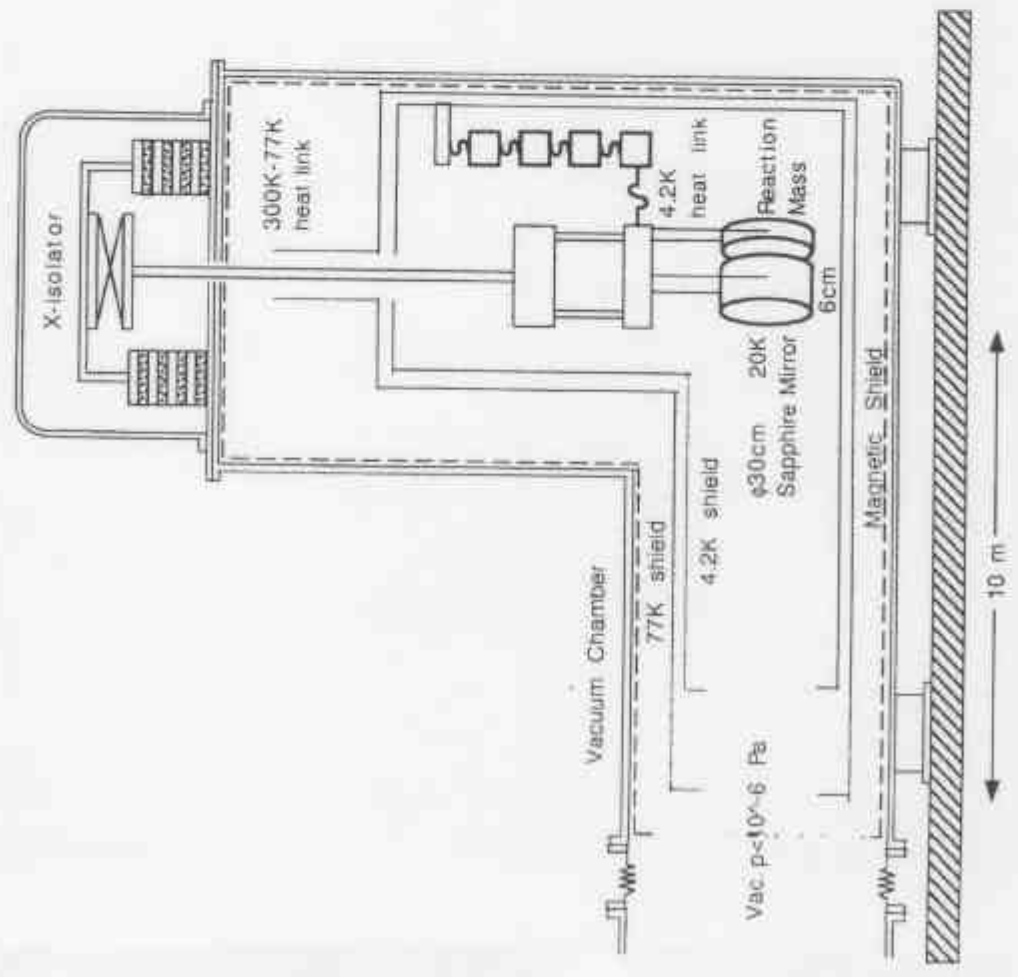
重力波望遠鏡で見える範囲



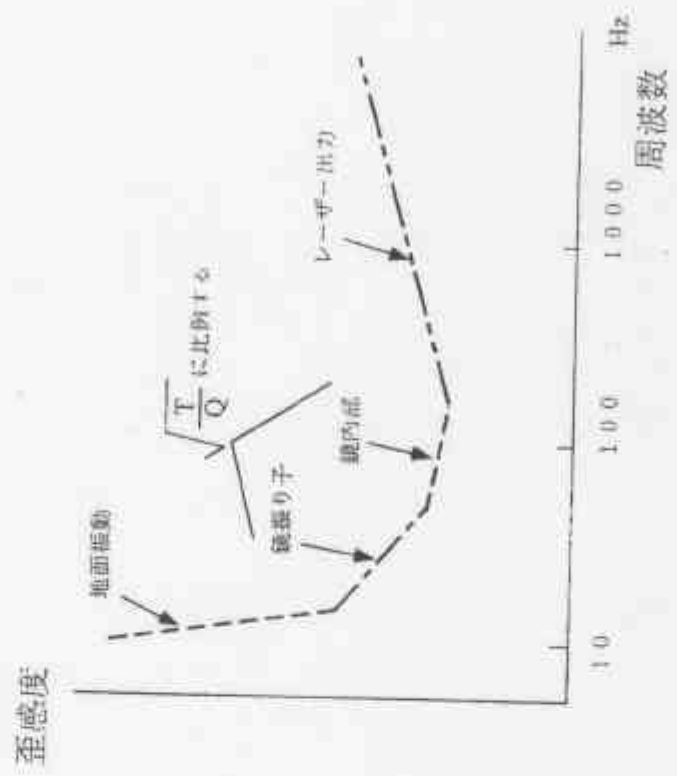
低温重力波望遠鏡 (LCCGT)



液体ヘリウム温度を目標とする極低温で動く鏡を開発する。



1000 Hz前後の感度を上げるにはQが高い材料を用いて、低温にするのがよい。



重力波探索実験における低温技術（続）

- ミラーを低温に冷やす
 - サファイア・ミラーをサファイア・ワイヤーで伝導冷却
 - 高いQ値（振動共振が大、減衰が小）
 - 低温での高い熱伝導
- 冷却
 - 液体ヘリウムリザーバーからの伝導冷却
 - 静か
 - 液体ヘリウムの長期供給
 - 機械的・小型冷凍機による直接的な伝導冷却
 - 振動が不可避（ただし、周波数がずらせる？）
 - 長期自動運転に適する
 - パルスチューブ・小型冷凍器による伝導冷却
 - 機械的な振動がない
 - 開発中 >> 将来への期待が大きい

89

6. 今後の展開

- 大強度ミュオンによる物理の将来計画
 - ◁ JHF/PRISM計画
 - ◁ $\mu e \rightarrow \gamma$ 探索実験計画における超伝導マグネット
- 高エネルギー超伝導加速器将来計画
 - VLHC計画
 - ミュオン・コライダー計画
- 宇宙空間における宇宙線観測
 - 長期気球フライト（北半球一周、南極周回）
 - 人工衛星、宇宙ステーションにおける長期観測
- 超伝導・低温技術における将来展望
 - 高温超伝導
 - パルス管冷凍機

90

大強度ミュオンによる物理の将来計画

- JHF計画・大強度ミュオン物理実験

- レプトン・フレーバー非保存の探索
 - トップクォークの質量が大きいことから
 - 実験的に観測できる可能性が高まる。

$\angle \mu^- \rightarrow e^- \gamma$

- 分岐比探索目標 10^{-14}

- パイオン生成・捕獲における超伝導技術

- ミューオンの源となるパイオンを陽子・原子核衝突により生成・捕獲
 - 高磁場超伝導ソレノイドが不可欠
- パイオン崩壊>ミュオン生成のためのビームライン
 - 超伝導ソレノイドが不可欠

91

超伝導加速器・将来計画

- VLHC計画

- LHC後のエネルギーフロンティアを目指す加速器計画
 - パイプトロン構想
 - ~ 2 Tの単電流+鉄ヨーク
 - 高磁場磁石による構想
 - 11~13テスラ超伝導電磁石
 - * Nb3Sn or NbsAl

- ∞ Vファクトリーから μ コライダーへ

- 大強度ミュオン
 - 超伝導マグネットによるパイオン捕獲、
 - ミューオンへの転換・ビームチャンネル

- ミューオン加速 >>
 - ニュートリノファクトリー
 - ミューオンコライダー

92

VLHC Ring Size



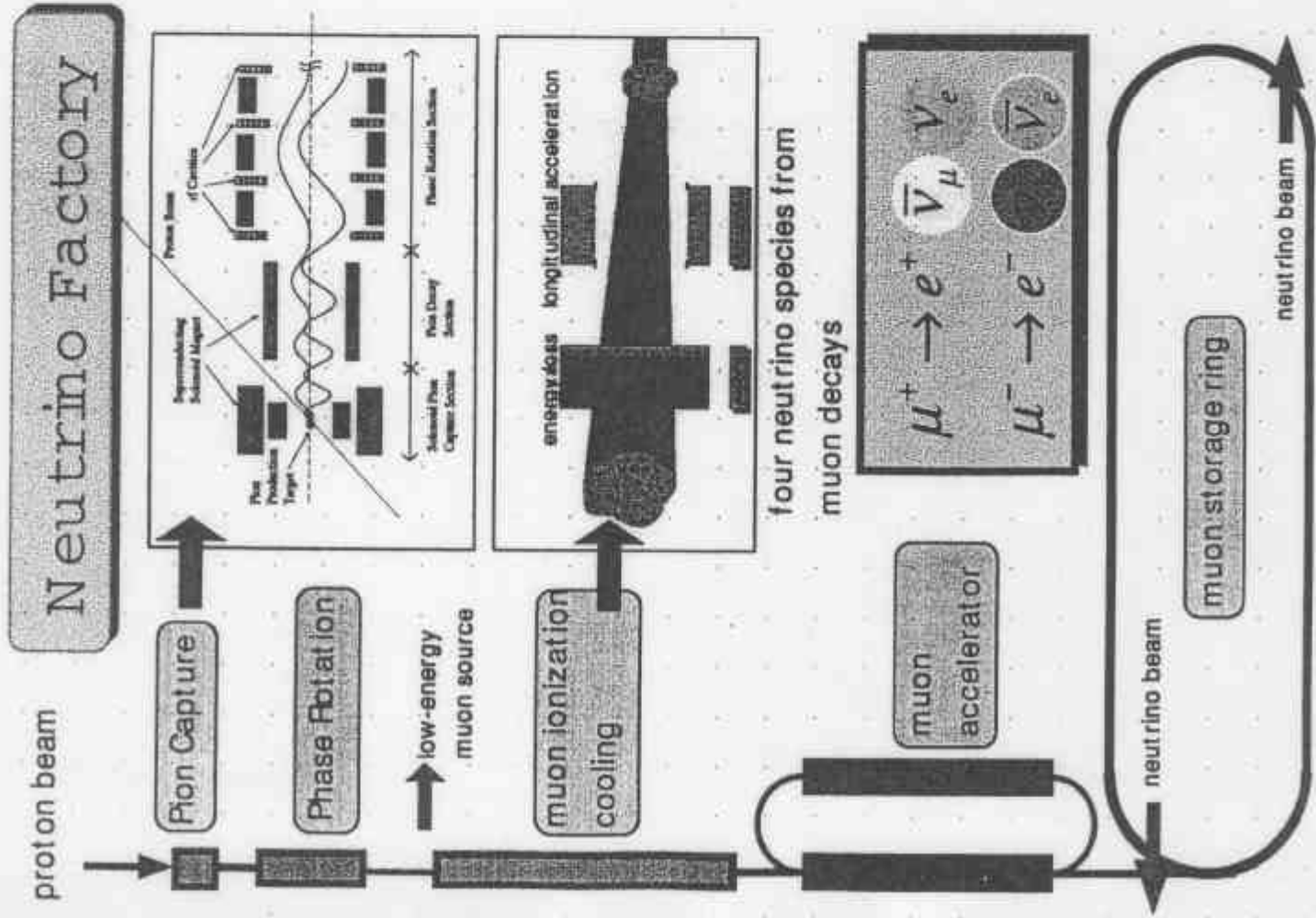
M.Wake /KEK

VLHC Parameters

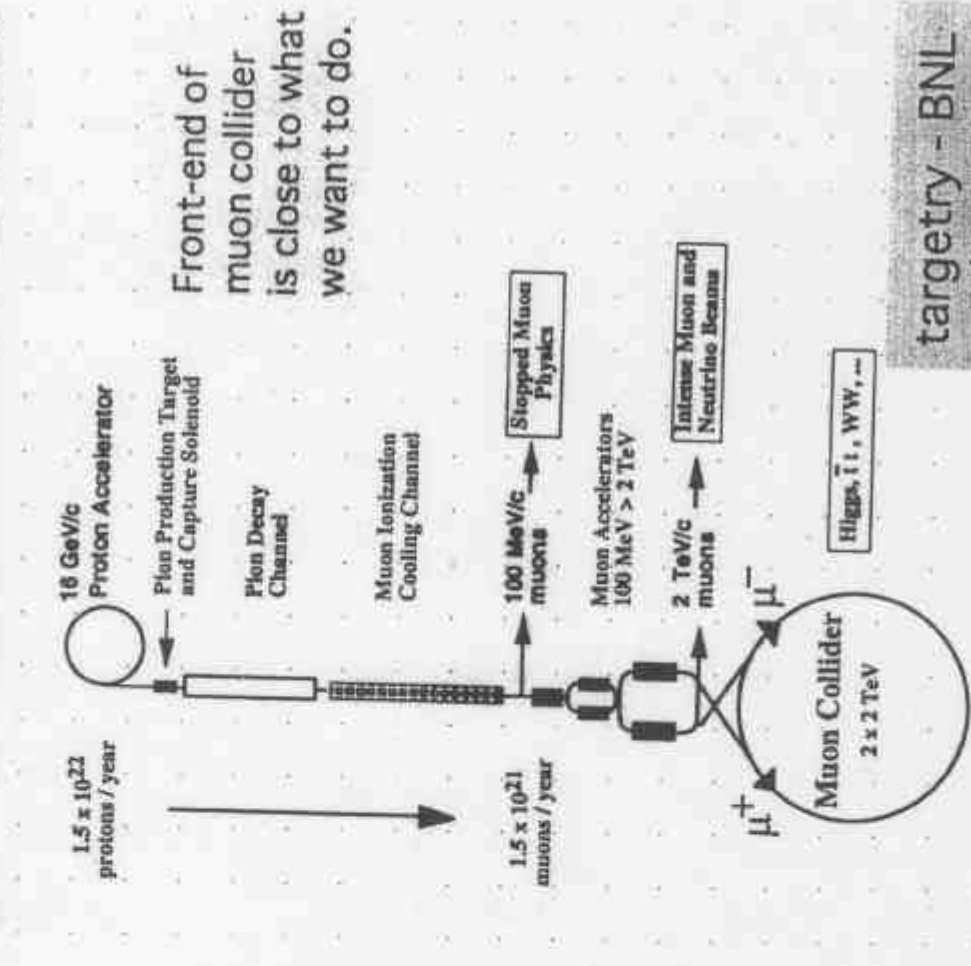
Accelerator parameters (from Snowmass, 1996)

Parameter	High field-new technology	High field-known technology	Low Field	Units
CM Energy	100	100	100	TeV
Dipole field	12.6	9.5	1.8	T
Circumference	104	138	646	km
Synchrotron radiation damping time (horizontal amplitude)	2.6	4.6	<i>undamped</i>	hr
Initial/peak luminosity	.35/1.2	.35/1.0	1/1	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
Integrated luminosity per day	500	500	700	pb^{-1}
Number of stores per day	2	2	1	
Initial rms normalized emittance	1	1	1	$\pi \text{ } \mu\text{m-rad}$
β^*	20	20	20	cm
Protons/bunch	0.5	0.5	0.94	10^{10}
Number of bunches	20794	27522	129240	
Equilibrium emittance (\times)	144.2	62	1.8	$10^{-3} \pi \text{ } \mu\text{m-rad}$
Beam stored energy	.89	1.18	9.73	GJ
Synchrotron radiation power/ring	189	143	48	kW
Total protons/ring	1.1	1.5	12.2	10^{14}
Revolution frequency	2.89	2.18	.46	kHz
Synchrotron frequency	8.9	5.8	.86	Hz
Rf Voltage	100	100	100	MV
Radio-frequency	360	360	360	MHz
Energy loss/turn	3678	2778	526	keV
Rms relative energy spread (collision)	15.6	18.0	39.0	10^{-6}
Fill time	16.3	16.3	28	min.
Acceleration time	5.8	7.6	35.9	min.

M.Wake /KEK

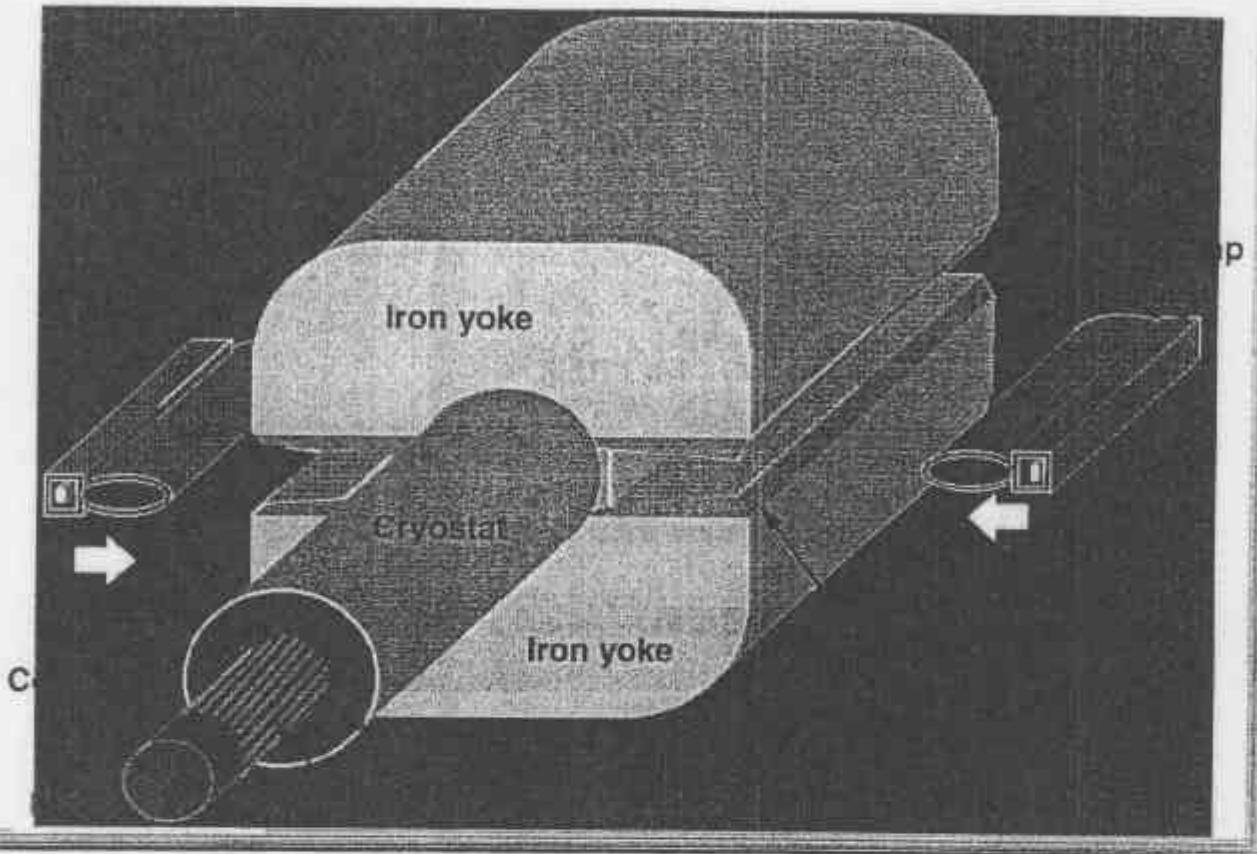


Muon collider project

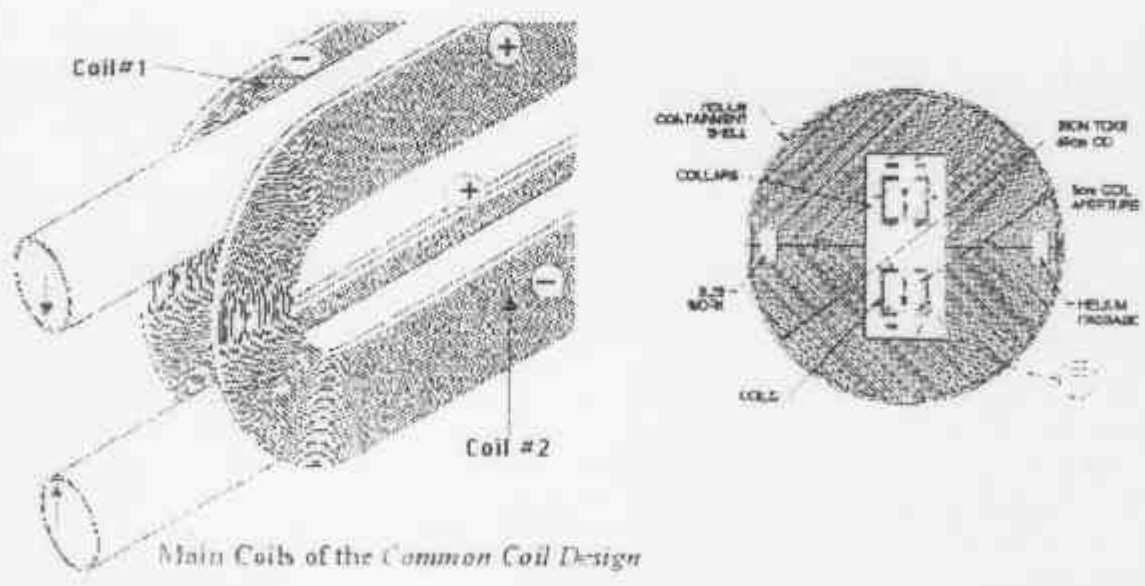


targetry - BNL
cooling - FNAL

Double C Magnet Conceptual



Common Coil Design



Main Coils of the Common Coil Design

超伝導における新技術

- 新超伝導線材
 - 金属系（低温超伝導）
 - Nb₃Snの高強度化
 - $B = < 15 \text{ T}$ @ 4.2K における実用化
 - 大強度ビームロス入熱環境で不可欠
 - Nb₃Al の実用化
 - $B \geq 15 \text{ T}$ @ 4.2 K において有望
 - Cuまたは他材質での安定化材の付加が課題
 - セラミック系（高温超伝導）
 - Bi₂212/2223
 - $T \leq 20 \text{ K}$ における実用化
 - $B \geq 15 \text{ T}$ で有望
 - 冷凍機負荷の低減に有望
 - 機械的な強度と電流密度の上昇が課題>>ケーブル化の試作成功で新段階へ

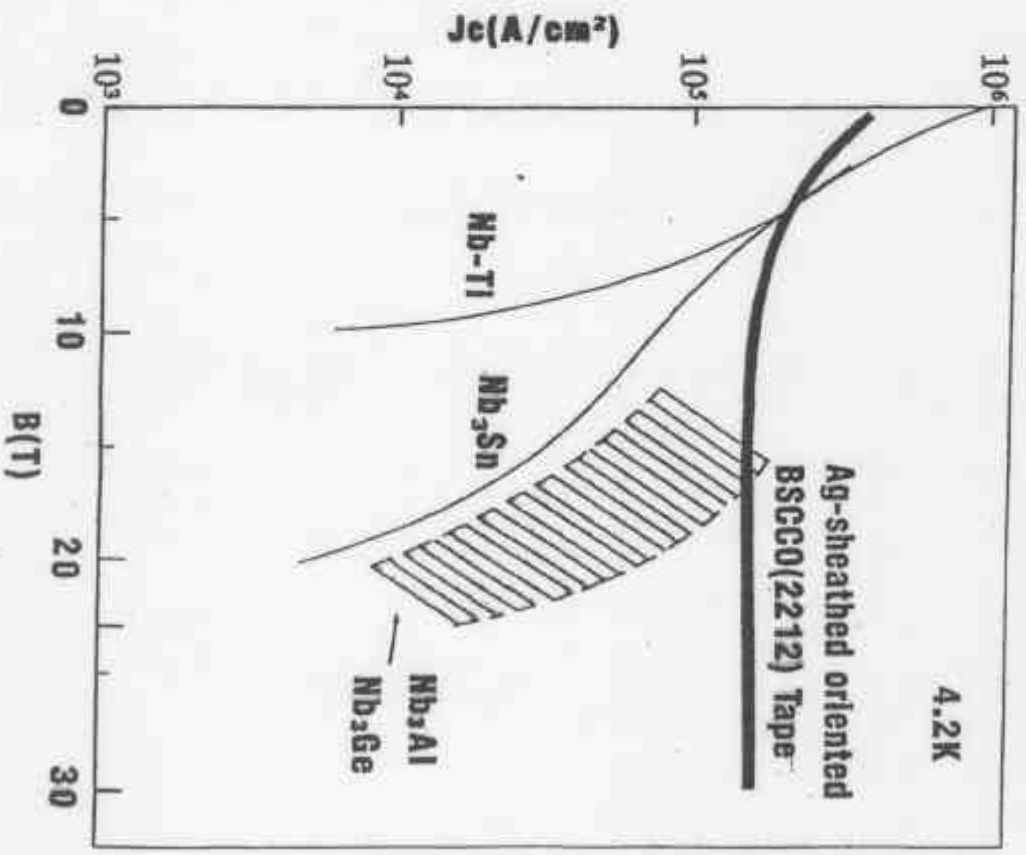
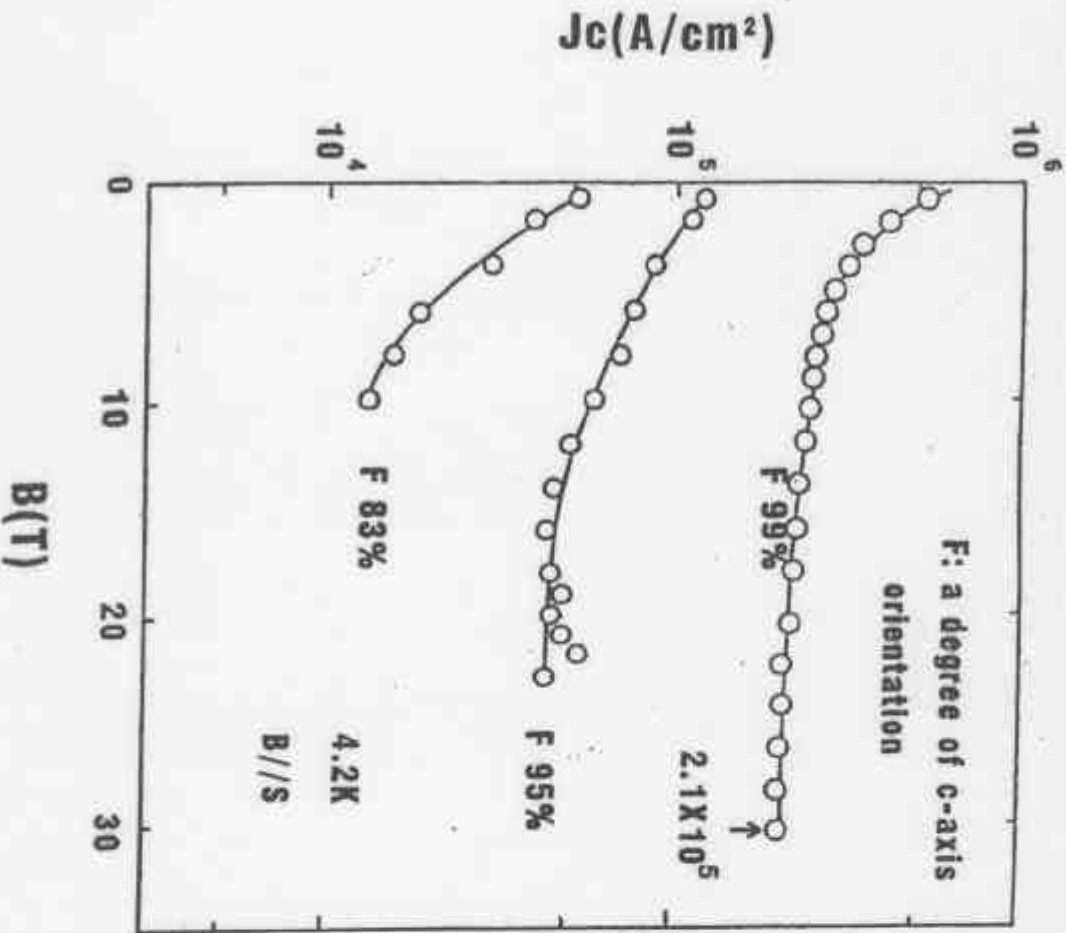
93

低温における新技術

- 小型冷凍機による直接・伝導冷却
 - 小型、中規模、物理実験用マグネットへの応用
 - 冷却への負担が著しく低減
 - 無人、自動運転
 - ただし、機械的な動きがあり、ピストン部等
 - のシールなどの寿命 (<1年) が課題
- パルス管冷凍機の実用化
 - 機械的なピストンによるガス・熱の移動をバルブ操作によるガスフローのパルスのなフロー制御により置き換える。
 - 機械的な移動部がなくなり、長期メンテナンスフリーな運転が可能となる。
 - 今年、4.2 Kへの到達に成功
 - 将来、有望な技術

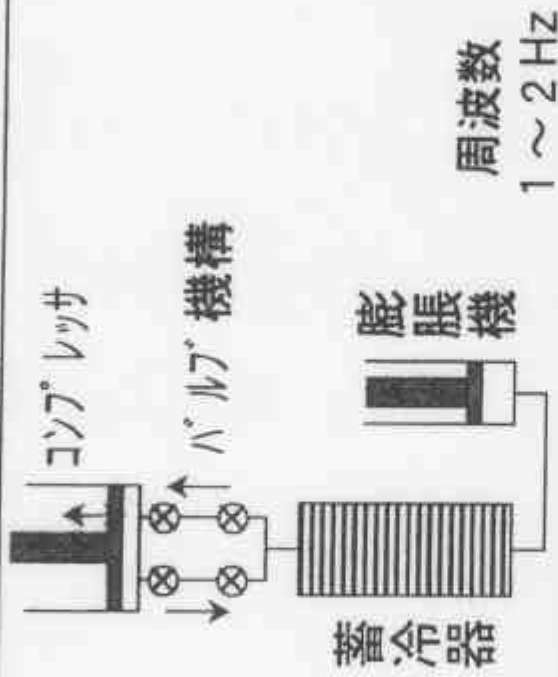
94

Magnetic Field Dependence of J_c at 4.2K for c-axis Oriented BSCCO Tape



従来使用されている極低温冷凍機

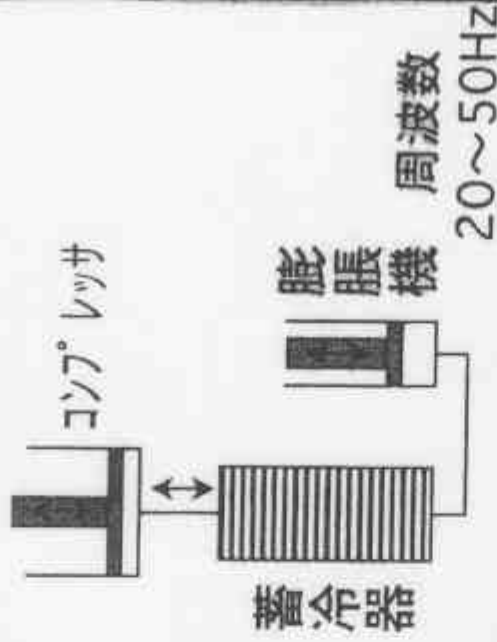
GM冷凍機



- ・ 低価格
- ・ 高信頼性(1 ~ 3年)
- ・ 多段化が容易
- ・ 2段で4K実用化済み
- ・ クライオポンプ(80K/20K)
- ・ 超電導磁石シールド冷却(80K/20K)
- ・ 直冷式超電導磁石(80K/4K)

構成

スターリング冷凍機



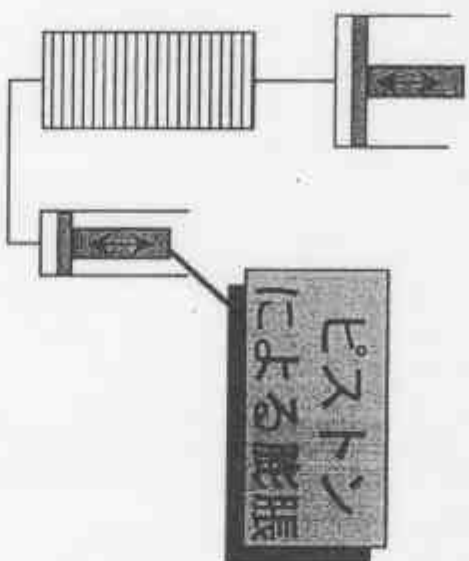
- ・ 高効率
- ・ 小型、軽量
- ・ 多段化はR&Dレベル
- ・ 20Kレベル実証済み
- ・ 赤外線センサー冷却(60 ~ 80K)

特徴

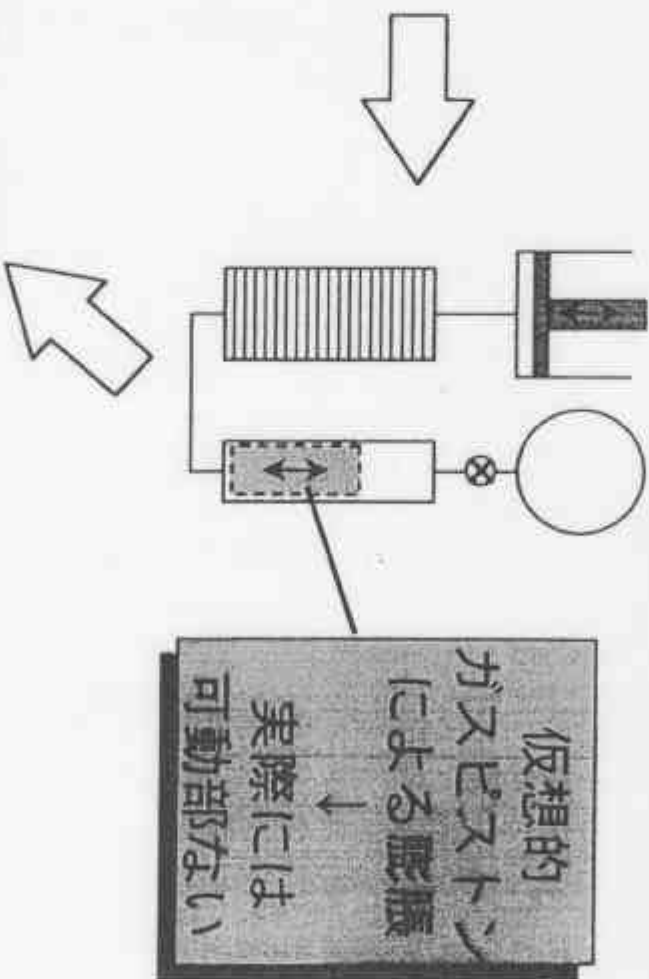
用途

高信頼性が期待されるパルスチューブ冷凍機

スターリング冷凍機



パルスチューブ冷凍機
(スターリング型)



パルス管冷凍機開発の現状

- ・ 80Kレベルは商品化済み (GM型、スターリング型)
- ・ GM型では、20Kレベル、4Kレベル到達 (R&D)

7. まとめ

- 超伝導の基本特性
 - 完全導電性 (抵抗がゼロ) $E = 0$
 - 完全反磁性 (マイスナー効果) $B = 0$
 - 磁束の量子性 ($\Phi = n\phi$)
 - トンネル効果 (ジョセフソン効果)
- グローバルな描像
 - 磁束は超伝導体のなかには、はいりこめない
 - 磁束の侵入を阻止するよう、表面に超伝導電流が流れ、指数関数的に磁束が現象する
 - ロンドン理論および侵入深さ
- ミクロな描像
 - 電子 (クーバー) 対による、金属格子振動と連動した電子の移動
 - ボーズ粒子的に振る舞い、超伝導電流となる。

95

まとめ (続)

- 実用的な超伝導
 - 第一種超伝導体
 - 超伝導状態と常伝導状態に明確な境界
 - 熱力学的臨界磁界 (B_c)
 - ローレンツカ \gg 磁束 (フラックス) ジャンプ
 - 磁場の侵入距離が少ない
 - 安定さに欠ける
 - Hg 等
 - 第二種超伝導体
 - 中間の混合状態がある (超伝導と常伝導の共存)
 - $B_{c1} < B_c < B_{c2}$
 - 不純物、格子欠陥などの磁束の移動に対するピン止め力によって、より安定な超伝導状態。
 - ローレンツカ $>$ ピン止め力を で常伝導転移
 - 磁場の侵入距離が大きい
 - Nb, NbTi, Nb₃Sn, (HTS)
 - 超伝導磁石等に、より実用的な超伝導体

96

まとめ (続)

- 超伝導マグネットの特色
 - 高磁場の発生がエネルギーフロンティアを目指す加速器、物理実験に不可欠
 - 高磁場の発生
 - 大電流密度 >> 超伝導が不可欠
 - エネルギーの節約
 - 冷凍機での効率 ($\sim 1/1000$) を含めても大きな電力の節約 ($> 10^8$ JY/1MW \cdot year)
 - 粒子の透過性
 - 電流密度を高め、物質の低減、
 - 粒子の透過性能の向上 >> 測定器性能の向上
- 技術的な課題
 - 超伝導状態の安定化
 - クエンチ (トレーニング)
 - エネルギー吸収に伴う、安全性
 - 電流が磁場を決める >> 磁場精度実現の難しさ

97

まとめ (続) 超伝導磁石の特色と比較

目的	加速器	粒子検出器
形状	ダイポール 四極	ソレノイド トロイド
強度	5~10 T	1~4 T
磁場口径	5~10 cm	1~10 m
磁場精度	$\ll 10^{-4}$	$10^{-2} \sim 10^{-3}$
超伝導体電流密度	1000 A/mm ²	2000 A/mm ²
平均電流密度	300-500 A/mm ²	50 - 200 A/mm ²
運転/臨界条件比	80-90 %	40 - 60 %
運転温度	1.9 - 4.5 K 4.5 K	
クエンチ後温度上昇	< 300 K	< 120 K
冷却	液体ヘリウム中	伝導、間接冷却
特徴	磁場精度 高磁場 (限界)	大空間 機械応力 (限界) 粒子透過性への極限要求

98

今後の展望

- 加速器用超伝導マグネット高磁場化への努力
 - 超伝導線材の開発
 - Nb₃Al, HTS
 - 次世代加速器用超伝導マグネット
 - 11~13 T (ダイポール)
 - ミューオン加速器用超伝導マグネット
 - 11~13 T (ソレノイド)
- 粒子検出器用超伝導マグネット
 - 超伝導材
 - アルミ安定化、高強度化 (200 MPa)
 - 透明化
 - E/M比の向上目標 (>>20 kJ/kg)
 - 高磁場化、大空間化
 - B・Rの最適化 (5 Tを越えられるか?)

99

今後の展望 (続)

- 新技術
 - 高温超伝導
 - 実用化への開発が急速に進んでいる
 - 小型マグネットへの応用は近い
 - 冷却
 - パルス管小型冷凍器
 - 宇宙、リモート環境での期待が大きい。

100

おわりに

- 素粒子物理実験における超伝導技術
 - 先端技術の進展が物理実験フロンティアへの鍵を握っている。
 - 理論 <> 実験 <> 先端技術
 - 超伝導技術は、欠くことのできない象徴的な先進技術。
 - 素粒子物理の進展に本質的に貢献できる魅力ある技術開発研究。

101

参考図書・文献

- 超伝導・冷却（技術）について
 - A.C.ローズ・インネス, E.H.ロディック (高本進, 安河内節, 訳) 「超伝導入門」 産業図書 (1976)
 - 電気学会編, 「超伝導工学」 電気学会大学講座, オーム社 (1976)
 - 低温工学会編, 「低温工学ハンドブック」 (1993)
 - 大塚幸一郎, 「超伝導の世界」 ブルーバックス, 講談社 (1987)
 - 長井洋介, 「低温・超伝導・高温超伝導」 パリティ編集委員会編, 丸善 (1995)
 - J. G. Weisend II "Handbook of Cryogenic Engineering" Taylor & Francis (1998).
 - S. W. C Van Sciver, "Helium Cryogenics" Plenum Press (1986).
 - 新富孝和 「低温・超伝導技術」 KEK-Proceedings 98-13 (1999).
 - 岸原光二 「超伝導の基礎」 第8回低温工学サマーセミナー講義, 低温工学会 (1996)
- 加速器・粒子検出器用超伝導マグネットについて
 - M. Wilson, "Superconducting Magnets" Oxford University Press (1983).
 - K. H. Moss, P. Schmuser, S. Wolf, "Superconducting Accelerator Magnets" World Scientific Publishing (1996)
 - F. M. Asner, "High Field Superconducting Magnets", Oxford University Press, (1999).
 - H. Riesen et al, "CERN Accelerator School; Superconductivity in Particle Accelerators", CERN 90-03, (1996).
 - 土屋清彦 「超伝導電磁石」 高エネルギー加速器セミナー(OHO-87) (1987)
 - A. Yamamoto et al, "Development towards Ultra-Thin Superconducting Solenoid Magnets for High Energy Particle Detectors" Nuclear Physics B 76, (1999) p. 565.

102

Appendix

超伝導スペクトロメーターによる 宇宙線反粒子探索気球実験

-- B E S S --

- はじめに
- 実験の目的
- 超伝導スペクトロメーターの開発
- 気球飛翔実験
- 実験結果
- 現状と今後の計画

103

はじめに

- BESS
 - Balloon Experiment by using a Superconducting Magnet Spectrometer
- 国際共同研究（グループ）
 - 日本（代表：折戸周治）
 - 東京大学
 - 高エネルギー研
 - 神戸大学
 - 宇宙科学研
 - アメリカ（代表：Jonathan Ormes）
 - NASA
 - メリーランド大

104

BESS 気球実験の目的

- 大気成層圏上空での宇宙粒子線の観測
 - 宇宙線反粒子（探索）をプローブとして、宇宙の誕生と進化の歴史を探る。特に、
 - 宇宙における物質・反物質の非対称性の検証。
 - 低エネルギー宇宙線反陽子の起源を探る。
 - 原始ブラックホールからの蒸発？
 - 宇宙暗黒物質から？
 - 宇宙線絶対粒子束の精密測定（太陽活動周期を通じた観測）
 - 宇宙線伝播モデルの検証
 - ニュートリノ振動観測実験の基盤となる
大気ミュオン >> 大気ニュートリノフラックスの精密決定。
 - エキゾチック宇宙粒子線の探索。

105

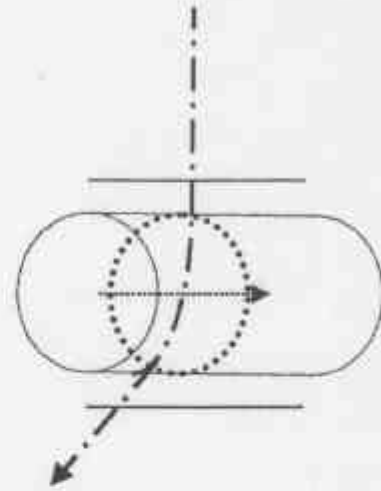
BESS 気球実験の経過

1985	Thin Solenoid Spectrometer概念の提案（山本） > ASTROMAG計画への提案
1987	モデルマグネットの開発開始 モデルマグネットを用いた気球実験の提案(折戸)
1988	BESSスペクトロメーターの開発スタート
1989	日本での測定器テストフライト（宇宙研・三陸）
1992	スペクトロメーター完成 カナダ遠征・フライトレディーに至る
1993	カナダ・第1回フライト成功 反陽子(6)
1994	第2回フライト 反陽子(2)
1995	第3回フライト (New TOF) 反陽子(43)
1996	気球飛行不成功
1997	第4回フライト (AGC) 反陽子(420)
1998	第5回フライト (New AGC) 反陽子(450)
1999	第6回フライト (Shower-C) 反陽子(~700) 乗鞍山での観測
2000	第7回フライト

106

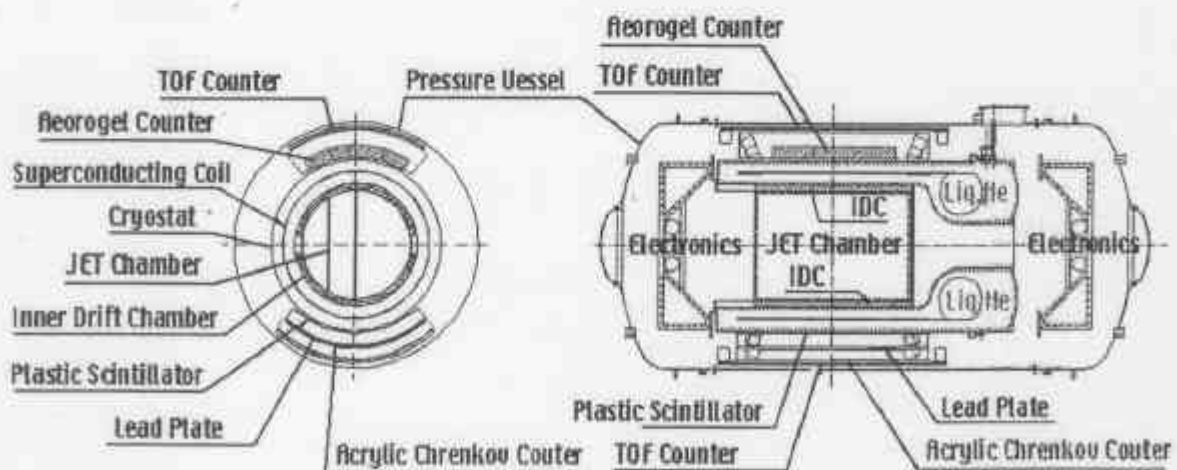
Technical Features of BESS Spectrometer

- Uniform magnetic field with “thin solenoid”, enabling particle passing through
- Large Acceptance with horizontally cylindrical layout
- Precise measurement in high statistics specially in low energy region.



COSPAR-2000

6



BESS Spectrometer Configuration

COSPAR-2000

8

これまでの観測結果のまとめ

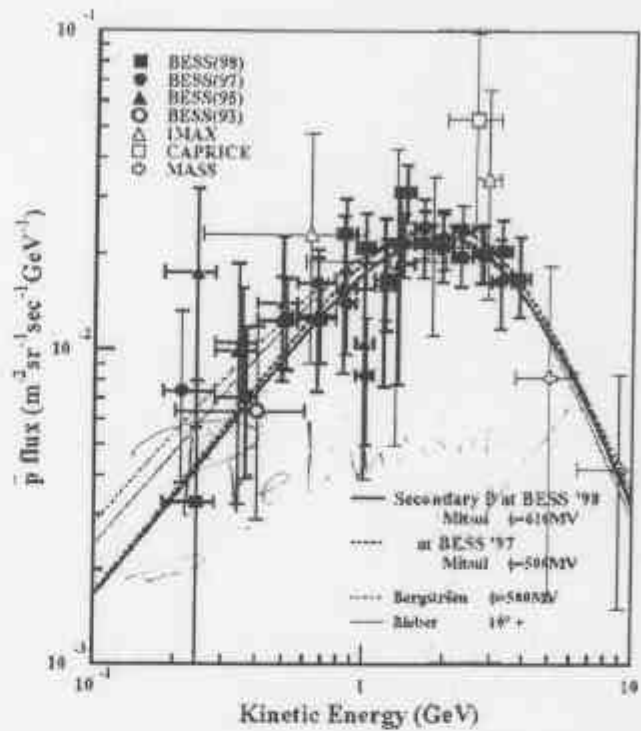
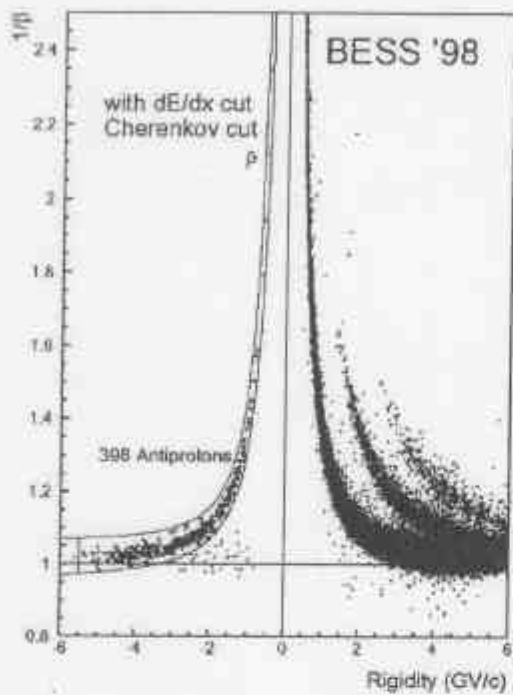
- 反陽子
 - はじめての速度測定に基づく質量決定による宇宙線反陽子の観測 (1993)
 - 10^3 以上の反陽子イベントを観測
 - 宇宙線二次粒子としてのスペクトラムのピークの精密測定から絶対流速の決定
 - Standard Leaky Box Model ほぼに整合する。しかし、
 - 低エネルギー領域では予測よりも多見える。
 - さらなる統計が必要
- 反ヘリウム
 - $\sim 3 \times 10^6$ のヘリウムの観測に対して反ヘリウムは1イベントも観測されていない。
 - 少なくとも銀河とその周辺の宇宙は粒子だけからできている、直接的な証拠。

107

これまでの観測結果のまとめ (続)

- 陽子、ヘリウム
 - 1-100 GeVにおけるエネルギースペクトラムを精密測定
 - 大気ニュートリノ、二次粒子反陽子への基盤となるデータを提供
 - これまでに観測されたスペクトラムの分布の範囲のなかでは、低い位置。従来標準的に用いられてきたHKKMに対し、50GeVでファクター2の差が観測されている。

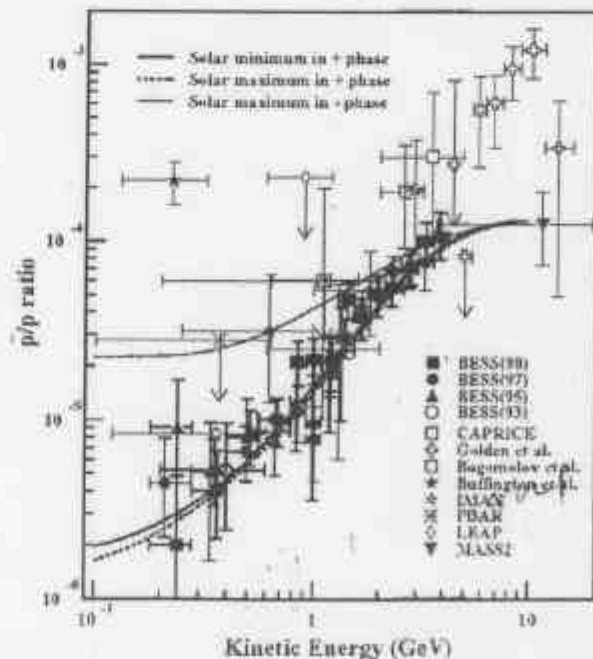
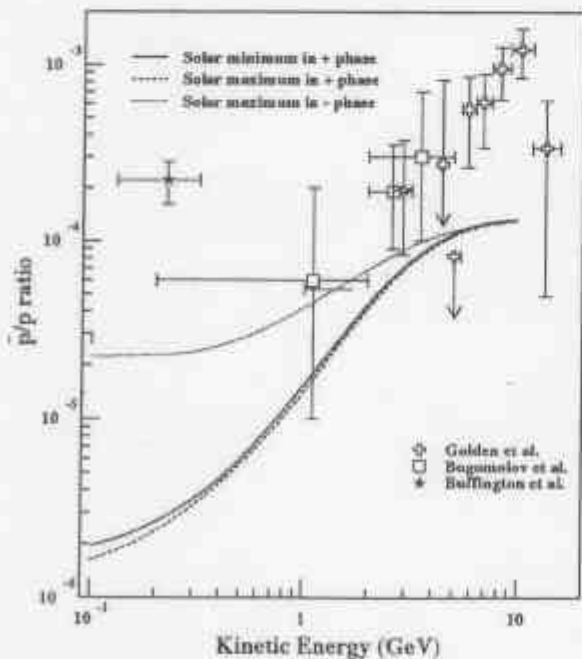
108



Antiproton/Proton Ratio

Before BESS Experiment

by BESS98

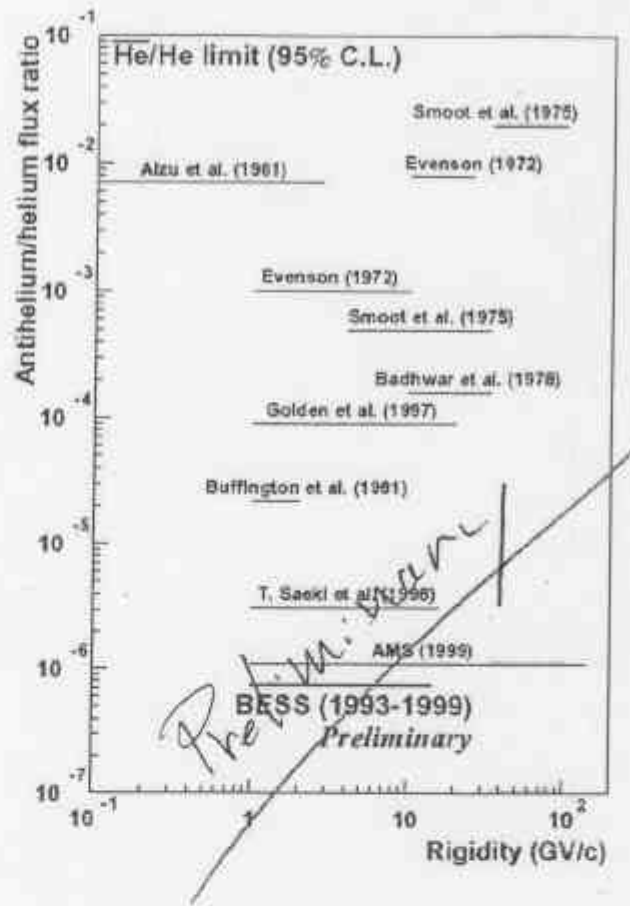


Anti-He Search

- Anti-He/He Ratio
from data in BESS93 - 99
(Model Dependent)

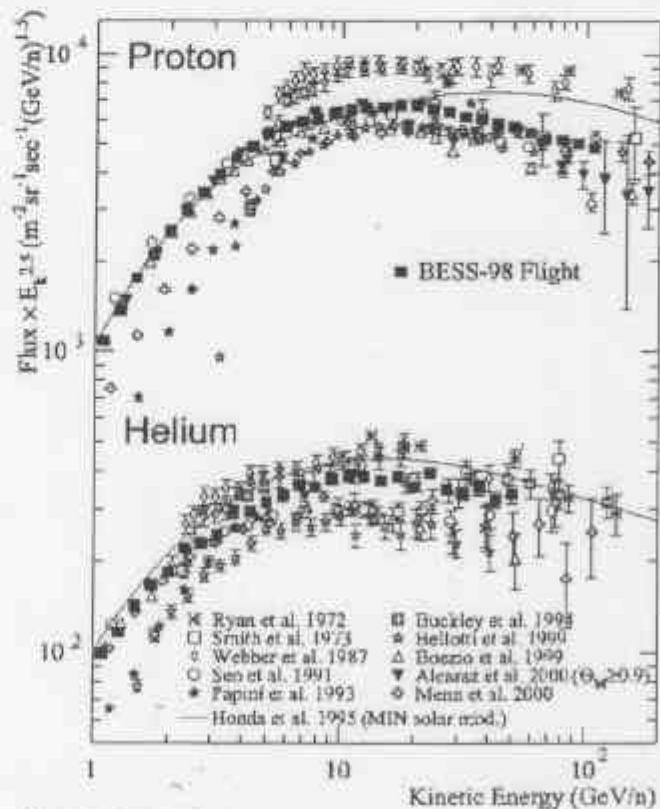
$$7.4 \times 10^{-7}$$

(Preliminary)



Precise measurement of Proton and Helium Spectra in BESS-98 Flight

- Data from half time period
- 1/3 acceptance
- Proton events ~ 800 K
(1 - 120 GeV)
- Helium events ~ 80K
(1-54 GeV/n)
- Uncertainty, p; < 5 %
He; < 10 %
- Suggested necessary reconsider for the atmospheric neutrino prediction.



今後の計画

- 陽子、ヘリウム
 - 太陽周期の影響の精密観測
 - 1 TeVまでの精密エネルギースペクトラム
 - 大気ニュートリノ流速の精密決定への基盤観測
 - スペクトロメーターの改善
 - 粒子飛跡チェンバーの分解能向上
- 反陽子、反重陽子、反ヘリウム
 - さらなる統計、太陽活動周期のカバー
 - 長時間フライトの計画
 - 北半球周回フライト (5~10日)
 - アラスカ >>グリーンランド>>カナダ
 - スウェーデン>>グリーンランド>>カナダ
 - 南極周回フライト (15~25日)
 - 長期フライトに向けたスペクトロメーターの
 - 小型化 高精度化 実用化の開発