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

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計画における大規模ミューオンビーム
   ・ VLHC構想
7. まとめ
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 -> 磁場の透過化・高磁場化

粒子加速器の高エネルギー化と
磁場強度の進展
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LH2完成
- 1999: BNL/RHIC完成

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）
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

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なり安定。
  - 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。
超伝導とは（続く）

- 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

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：
  - \( \text{div} \ E = \sigma / \varepsilon_0 \) (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（と考えても良い）
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
  \[ E = 0 \rightarrow dB/dt = 0 \]
  \[ \rightarrow B = 0 \]  
  >> 超伝導体の表面現象を説明

・ London 方程式
  \[ \begin{align*}
  \text{rot} J_\nu &= \left( \frac{1}{\mu_0 \lambda_L^2} \right) \times E \\
  dJ_\nu/dt &= \left( \frac{1}{\mu_0 \lambda_L^2} \right) \times E
  \end{align*} \]

  \[ \text{ここで、} \quad \lambda_L = \left( \frac{m}{\mu_0 n_\nu e^2} \right)^{1/2} \]

  - 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 \( J_\nu \) が流れる

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
  \[ F = mn' \nu s = e \times E \]
  \[ J_\nu = n_\nu e \nu s \]
  \[ J_\nu = (n_\nu e^2/m) E \]
  \[ E = m/(n_\nu e^2) \times J_\nu \]

・ Maxwell 方程式より
  \[ dB/dt = - \text{rot} \times E \]
  \[ \text{rot} B = \mu_0 J_\nu \]

・ \( dB/dt = -(m/n_\nu e^2) \times J_\nu \times V \times (V \times B') \]
  \[ = - (m/\mu_0 n_\nu e^2) \times V \times (V \times B') \]
  \[ = \lambda^2 V \times B' \]

  よって、 \( B' = 1/\lambda^2 \times V \times B' \)
超伝導のグローバルな理解（続）

- London理論では$B^2 = 0$のみならず、$B = 0$として現象を説明する

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

- 一次元では、$\mathcal{B}(x) = B_0 \exp(-x/\lambda)$
  \[ \lambda_0 = (m/\mu \cdot n \cdot \varepsilon^2)^{1/2} \] Londonの侵入深さ
  - Penetration Depth ($\sim 10^{-6}$ m)
  - $\mathcal{B}$が侵入する

- もし$z$方向に均一な磁界では

- $d\mathcal{B}/dx = \mu_0 J_y = B_0 \exp(-x/\lambda)$ を用いて
  - $J_y = J_0 \exp(-x/\lambda)$ 表面近くに電流が流れる

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ワリの排他原理に抵触せず、同じ運動量で移動できる。同ポ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。
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

超伝導体（一種、二種）

- 第一種（鉛、錫等）
  - マイスナー領域 ≫ ≫ ノーマル領域

- 第二種（Nb等）・・・実用になる超伝導線材
  - マイスナー領域 ≫ 混合領域
  - ≫ 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
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 (Bc)
  - ローレンツカ★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）
    - Bc1 < Bc < Bc2
  - 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
各種超伝導体の特徴

<table>
<thead>
<tr>
<th>Material</th>
<th>$T_c$</th>
<th>$B_{a1}(0)$</th>
<th>$B_{a2}(0)$</th>
<th>$\xi_{a1}(0)$</th>
<th>$\lambda_{a1}(0)$</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td></td>
<td>[K]</td>
<td>[T]</td>
<td>[T]</td>
<td>[nm]</td>
<td>[nm]</td>
</tr>
<tr>
<td>[type-1]</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Hg</td>
<td>4.2</td>
<td>0.04</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>[type-2]</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Nb</td>
<td>9.25</td>
<td>0.06</td>
<td>0.4</td>
<td>39</td>
<td>31.5</td>
</tr>
<tr>
<td>NbTi</td>
<td>9.5</td>
<td></td>
<td>11.5</td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Nb$_3$Sn</td>
<td>1.8</td>
<td>0.01</td>
<td>21.5</td>
<td>3</td>
<td>170</td>
</tr>
<tr>
<td>[type-2 &amp; high $T_c$]</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Ba$_2$YCu$_2$O$_8$</td>
<td>92</td>
<td>0.06(/)</td>
<td>35(/)</td>
<td>3.1(//)</td>
<td>130(//)</td>
</tr>
<tr>
<td>Bi$_2$Sr$_2$CaCu$_2$O$_8$</td>
<td>120</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Tl$_2$Ba$_2$CaCu$_2$O$_8$</td>
<td>108</td>
<td>0.015(77K)</td>
<td>130</td>
<td>1.6</td>
<td>220(77K)</td>
</tr>
</tbody>
</table>

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
冷却技術

・冷媒の種類
  - 超臨界ヘリウム (> 4.5 〜 5 K)
    - ガス、液体の中間状態
    - 比熱（顯熱）による熱交換
    - 冷却路に従い温度が変化
  - 2 K 飽和液体ヘリウム
    - 蒸発潜熱で熱交換
    - 溫度が一定
    - 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、優れた熱移動
  - 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

冷却・低温技術

・浸没冷却
  - 液体ヘリウム中に直接コイルを浸す。
  - 冷却効果は最も良い
  - 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却する。
  - 冷却効果は劣るがヘリウム使用が必要としない

・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。
  - 小型マグネットクライオスタットは急速に対応されている。
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

世界の高エネルギー超伝導加速器の発展

<table>
<thead>
<tr>
<th>Accelerator</th>
<th>Tevatron</th>
<th>HERA</th>
<th>(SSC)</th>
<th>RHIC</th>
<th>LHC</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Lab.</td>
<td>FNAL</td>
<td>DESY</td>
<td>(CERN)</td>
<td>CERN</td>
<td>(Swiss)</td>
</tr>
<tr>
<td>Energy</td>
<td>0.9 TeV</td>
<td>0.82 TeV</td>
<td>20 TeV</td>
<td>0.1 amu</td>
<td>7 TeV</td>
</tr>
<tr>
<td>Radius</td>
<td>1 km</td>
<td>1 km</td>
<td>1.5 km</td>
<td>0.5 km</td>
<td>4.5 km</td>
</tr>
<tr>
<td>Rings</td>
<td>(p+p-)</td>
<td>(e+p)</td>
<td>(p+p)</td>
<td>(ncl)</td>
<td>(p+p)</td>
</tr>
<tr>
<td>B-dipole</td>
<td>4.4 T</td>
<td>4.7 T</td>
<td>5 T</td>
<td>3.5 T</td>
<td>8.36 T</td>
</tr>
<tr>
<td>G-quad.</td>
<td>76 T/m</td>
<td>91 T/m</td>
<td>205 T/m</td>
<td>72 T/m</td>
<td>220 T/m</td>
</tr>
<tr>
<td>R-coil</td>
<td>38 mm</td>
<td>37.5 mm</td>
<td>25 mm</td>
<td>40 mm</td>
<td>28 mm</td>
</tr>
<tr>
<td>#Dipoles</td>
<td>774</td>
<td>422</td>
<td>8700</td>
<td>288</td>
<td>2x1232</td>
</tr>
<tr>
<td>SC</td>
<td>NbTi</td>
<td>NbTi</td>
<td>NbTi</td>
<td>NbTi</td>
<td>NbTi</td>
</tr>
<tr>
<td>Temp.</td>
<td>4.5 K</td>
<td>4.5 K</td>
<td>4.4 K</td>
<td>4.5 K</td>
<td>1.9 K</td>
</tr>
</tbody>
</table>
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
    - \( F = q \left( \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} \right) \)
    - \( F = q \mathbf{v} \times \mathbf{B} \)
  - 遠心力
    - \( F = m v^2 / \rho = p \mathbf{v} / \rho \)
    - \( F = p \mathbf{v} / \rho \)

- 磁場中での荷電粒子の軌道
  - \( p \mathbf{v} / \rho = q \mathbf{v} \times \mathbf{B} \)
  - \( p = q \mathbf{B} \rho / \mathbf{v} \)

- 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

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 \( < 10 \text{ A/mm}^2 \)
    - 鉄ヨークによる増幅が不可欠
    - 鋼の磁気飽和限界 \( 2 \text{ Tesla} \)
  - 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 \( 4.5 \text{ Tesla} \)
    - LHC \( 8.4 \text{ Tesla} \)

- 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)
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

電流のつくる磁場

- 円筒電流による磁場
  - マックスウェルの方程式より
    
  - 円筒内部 \((r < a)\)において
    - \(2 \pi r B = \mu_0 \pi r^2 J\)
    - \(B = (1/2) \cdot \mu_0 \cdot r \cdot J\)
    - \(By = (1/2) \cdot \mu_0 \cdot x \cdot J\) \((@ y = 0)\)
  - 円筒外部 \((r > a)\)において
    - \(2 \pi r B = \mu_0 \pi a^2 J\)
    - \(B = (1/2) \cdot \mu_0 \cdot a^2 \cdot J \cdot 1/r\)
    - \(By = (1/2) \cdot \mu_0 \cdot a^2 \cdot J \cdot 1/x\) \((@ y = 0)\)
電流のつくる磁場（続き）

・ 一対の円筒電流が+/-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

\[ B_y = B_{y1} + B_{y2} \]

\[ = (1/2) \mu_0 \times (x + 1/2dx) \times J + (1/2) \mu_0 \times (x - 1/2dx) \times (-J) \]

\[ = (1/2) \mu_0 \times d \times x \times J \cdots \text{constant} \]

電流のつくる磁場（続き）

・ より一般的に扱うと、
  - Maxwell's Eq. から、\( \text{div } B = 0 \)、\( \text{rot } B = \mu_0 J \)

・ 電流が無い場所で (@ J = 0)
  - \( \text{div } B = 0 \)、\( \text{rot } B = 0 \)
  - Vector Potential, A、Scalar Potential, \( \Phi \) を用いて
    - \( B = \text{rot } A \)、\( B = -\text{grad } \Phi \)

・ すなわち
  - \( B_x = \frac{dA_z}{dy} = -\frac{d\Phi}{dx} \)
  - \( B_y = \frac{dA_z}{dx} = -\frac{d\Phi}{dy} \)

・ 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）。
  - \( F(z) = A_z(x,y) + i \Phi(x,y) \)
電流のつくる磁場（続）

・ $F(\zeta) = A(x, y) + i \Phi(x, y)$ は、べき展開で表されます。
  
  $F(\zeta) = \sum c_n \zeta^n = \sum c_n (x + iy)^n$

・ $F(\zeta)$ の導関数も解析的に表すことができる。
  
  $dF(x)dx = \frac{dA}{dx} - \frac{id\Phi}{dx}$ と
  $\frac{dA}{dy} - \frac{id\Phi}{dy} = By + iBx$

・ よって、
  
  $B = By + iBx = - \frac{\mu_0}{c} \cdot \zeta^{n-1} = \frac{n}{c} \cdot (x + iy)^n$

  (注意： $B \times iB$ 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
  
  $\text{Az} (r, \theta) = (\mu_0/2\pi) \cdot I \cdot \ln \left( \frac{r}{a} \right)$

  $\text{Bz} = - \text{Az}/dr = (\mu_0/2\pi) \cdot I$

・ もし、電流が任意の点 $(r = a, \theta = \phi)$ にある場合、$r < a$ の時、
  
  $\text{Az} (r, \theta) = (\mu_0/2\pi) \cdot I \cdot \frac{1}{r} \cdot \ln \left( \frac{r}{a} \right) \cdot \cos \left[ \frac{n(n-1)}{n(n-2)} \right]$

  $\text{Bz} = - \text{Az}/dr = (\mu_0/2\pi) \cdot I \cdot \frac{1}{r} \cdot \ln \left( \frac{r}{a} \right) \cdot \cos \left[ \frac{n(n-1)}{n(n-2)} \right]$

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
  
  $I (\phi) = I_0 \cos (m\phi)$

  $\text{Az} (r, \theta) = (\mu_0/2\pi) \cdot I_0 \cdot \left( \frac{1}{n} \right) \cdot (r/a)^n \cdot \cos \left( \frac{n\phi}{n-\phi} \right)$

・ $n = m$ において

  $\text{Az} (r, \theta) = (\mu_0/2\pi) \cdot I_0 \cdot (r/a)^m \cdot \cos (m\theta)$

  $\text{Bz} (r, \theta) = - (\mu_0/2\pi) \cdot I_0 \cdot (r/a)^{m-1} \cdot \cos (m\theta)$

- $n = m = 1$ dipole
- $n = m = 2$ quadrupole
- $n = m = 3$ sextupole
電流の作る磁場（続）

- Dipole
  - $n = 1$

- Quadrupole
  - $n = 2$

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9km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）
電流のつくる磁場（続）

\[
B_\text{d} = B_\text{ref} \left( \frac{3}{10} a_0 \cos(n\theta) + b_0 \sin(n\theta) \right)
\]

\[
B_r = B_{\text{ref}} \left( \frac{3}{10} a_0 \cos(n\phi) + b_0 \sin(n\phi) \right)
\]

これは、以下と同義です：

\[
B_y + iB_x = B_{\text{ref}} \left( (bn + ian) \left( (x + iy) \right) \right)
\]

- **四本の線電流によるベクトルポテンシャル**
  - \( A_x (r,\theta) = 2 \mu_0 \mu_0 \right)

- **セクター型のコイルに拡張すると**
  - \( A_x (r,\theta) = 2 \mu_0 \mu_0 \right)

- **十分薄い電流シートにおいて**
  - \( \phi_0 = 60^\circ \) において、\( n=3 \) は発生しない（ダイポールの高次）
  - \( \phi_0 = 30^\circ \) において、\( n=6 \) は発生しない（四極の高次）
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。
  - 高調波成分をくく1/10000に抑える。
  - 特にコイルのθ方向の位置決め精度
    ・くく100μm が要求される。
  - 例)
    - B3 = 1/3 * (r/a)^2 * \left[ \sin(180 + 3\phi_p) / \sin(60+\phi_p) \right]
    - = < 1 x 10^-4

  • @a = 40 mm, r0 = 25 mm,
  • δφ < 0.25 mr >> required accuracy of 0.01 mm

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 = I0 cos θ >> θ = 60 degrees

  • I = cos 3θ（Sextupole）をみると
    - b3 = positive  @ 0 ~ 30 deg
    - = negative  @ 30 ~ 60 deg
  \(\theta = 60\) deg でちょうどキャンセルする。

  • もし、0.1mrずれたとすると
    • 〜1 0^-4 のずれがでることになる。

  • これ以下にコイル精度を抑えることが必要。
\begin{itemize}
  \item $n = 1$
    \begin{itemize}
      \item Dipole
    \end{itemize}
  \item $n = 3$
    \begin{itemize}
      \item Sextupole
    \end{itemize}
  \item $n = 2$
    \begin{itemize}
      \item Quadrupole
    \end{itemize}
  \item $n = 6$
    \begin{itemize}
      \item 12th pole
    \end{itemize}
\end{itemize}
高磁場化への努力

- 超伝導線電流密度の向上
  - \( B = \mu_0 j x \) >> 超伝導線の電流密度をできる限りあげる
  - \( J_c(NbTi) = \)
    - 2000 A/mm² (-1980: Tevatron)
    - 2500 A/mm² (-1990: SSCL)
    - 3000 A/mm² (-2000: LHC)

- 鉄ヨークによる磁場への寄与
  - \( B_{k-vac}/B_{k-coil} = (a/R)^{1/2} \)
    - 強さをできる限りコイルに近づける（ただし、鉄の熱和により限界がある）
    - \( \sim 10\% \) with warm iron magnet at Tevatron
    - \( \sim 35\% \) with cold iron magnet at RHIC
    - \( \sim 20\% \) 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

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）
    - \( F = qv \times B = I \times B = H \times B \)
    - \( P = J \times <B> = B^2 / 2 \mu_0 \)
    - 例） \( p = 10^2 / (2 \times 4 \pi \times 10^3) = 40 \) MPa >> 電気絶縁材の破壊強度限界

- 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： \( w = dT \times C_p = I f \ dl \)
  - 例） \( dl = B \times J \times dl / C_p = 10^7 \times 5 \times 10^4 \ T m^2 / s \times 1 \times 10^7 m / 1 \times J / m K = 5 \) 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
電流密度
(kA/mm²)

年

実験室規模
商用規模
TEVATRON
SSC

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
  \[ \rho \cdot h \cdot c \, dT = 2 \gamma \]
  - (\(\rho\)は密度、\(c\)は比熱、\(T\)は温度、\(\gamma\)はエネルギー)

- 例
  - \(C = 300 \, \text{T}^2 \, \text{erg/g/K}\)
  - \(G = 10^6 \, \text{erg/cm}^2\)
  - \(R = 2 \, \text{g/cm}^3\)
  - \(H = 0.1 \, \text{cm}\)

- \(dT = 11 \, \text{K}\)
  - >> クエンチを起こすのに従来
  - (\(TC = 9.5 \, \text{K}\))

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）\(B = 10 \, \text{Tesla}\)
  \[ p = 10^2 / (2 \times 4 \pi \times 10^{-7}) \]
  \[ p \approx 40 \, \text{MPa (400 atm)} \]
加速器用超伝導電磁石の発展

<table>
<thead>
<tr>
<th>Accelerator</th>
<th>Tevatron</th>
<th>HERA</th>
<th>(SSC)</th>
<th>RHIC</th>
<th>LHC</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Lab.</td>
<td>FNAL</td>
<td>DESY</td>
<td>SSCL</td>
<td>US</td>
<td>CERN</td>
</tr>
<tr>
<td>Energy</td>
<td>0.9 TeV</td>
<td>0.82 TeV</td>
<td>20 TeV</td>
<td>0.1/amu</td>
<td>7 TeV</td>
</tr>
<tr>
<td>Radius</td>
<td>1 km</td>
<td>1 km</td>
<td>15 km</td>
<td>0.5 km</td>
<td>4.5 km</td>
</tr>
<tr>
<td>B-dipole</td>
<td>4.4 T</td>
<td>4.7 T</td>
<td>5 T</td>
<td>3.5 T</td>
<td>8.36 T</td>
</tr>
<tr>
<td>G-quad.</td>
<td>76 T/m</td>
<td>91 T/m</td>
<td>205 T/m</td>
<td>72 T/m</td>
<td>220 T/m</td>
</tr>
<tr>
<td>R-coil</td>
<td>38 mm</td>
<td>37.5 mm</td>
<td>25 mm</td>
<td>40 mm</td>
<td>28 mm</td>
</tr>
<tr>
<td>SC</td>
<td>NbTi</td>
<td>NbTi</td>
<td>NbTi</td>
<td>NbTi</td>
<td>NbTi</td>
</tr>
<tr>
<td>Temp.</td>
<td>4.5 K</td>
<td>4.3 K</td>
<td>4.4 K</td>
<td>4.3 K</td>
<td>1.9 K</td>
</tr>
<tr>
<td>Coil conf.</td>
<td>D. Shell</td>
<td>D. Shell</td>
<td>D. Shell</td>
<td>S. Shell</td>
<td>6-block</td>
</tr>
<tr>
<td>Collar</td>
<td>SUS</td>
<td>Al</td>
<td>SUS</td>
<td>Plastic</td>
<td>SUS</td>
</tr>
<tr>
<td>Yoke</td>
<td>warm</td>
<td>cold</td>
<td>cold</td>
<td>cold</td>
<td>cold</td>
</tr>
</tbody>
</table>

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（2×）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
LHC計画における日本の協力

- 10Tダイポールの基礎開発
  - 基本設計で貢献
  - 10T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-b 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

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9km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）
10T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磁ヨークに組み込む
  - 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
    • 完全ツイクラーコイル
    • 鉄ヨーク同士吸収率を持つ
    • 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 10.3Tを達成

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（ビーム衝突程度）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5〜10W/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。
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) 加圧超流動ヘリウム

超流動をを作る
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, larm)
  - 設計磁場勾配 240 T/m
  - コイル内最高磁場 9.6 T
  - ピーム入熱 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

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）
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

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（〜 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、ビニング力を超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。
2) Basic Consideration on the Coil Design.

Maxwell Equation:
\[ B = \text{rot} A \quad (B_0 = -\frac{d A_z}{d r}) \]

For Quadrupole
\[ A_z (r, \theta) = 2 \mu_0 \rho / \pi . J . r^2 / 2 . \cos 2\theta . \int_{a_1}^{a_2} \frac{1}{d} \, da \]
\[ = 2 \mu_0 \rho / \pi . J . r^2 / 2 . \cos 2\theta . \ln (a_2 / a_1) \]
\[ B(\theta) = 2 \mu_0 / \pi . J . r . \ln (a_2 / a_1) . \cos 2\theta \]

If \( \theta = 30^\circ \), and \( r < a_1 \),
\[ B(\theta) = \sqrt{3}/\pi \mu_0 . J . r . \ln (a_2 / a_1) \]
\[ G = B_0 / r = \sqrt{3}/\pi \mu_0 . J . \ln (a_2 / a_1) \]
or
\[ a_2 / a_1 = \exp [\pi \sqrt{3} / 1.1 \mu_0 . G / f] \]

As an Example:
\[ a_2 / a_1 = \exp [\pi \sqrt{3} / 1.4 \pi \times 10^{-7} \times 250(T/m) / 4 \times 10^8 ] = 2.46 \]
\[ a_2 = 0.086 \text{ mm} \Rightarrow \text{da} = 0.051 \text{ mm} \quad \text{\&} \quad a_1 = 0.035 \text{ mm} \]

5) Effect of the Iron Yoke.

With assuming thin coil,
\[ B_0 = -2 \pi \mu_0 I \left( \frac{e}{a} \right)^n \cdot \left[ 1 - \left( \frac{a}{b} \right)^n \right] \cos n\theta \]
at \( n = 2 \) (Quadrupole) and \( r = a = a_1 \),
\[ B_0 = -2 \pi \mu_0 I \left( 1 + \left( \frac{a}{b} \right)^n \right) \cos n\theta \]
(\( = \eta \))

With assuming \( a = a_1 + 1.5 \mu_0 \), \( \Theta = a \) coil width of \( 4 \) layers
\[ B_{a} = \kappa \left( 1 + \left( \frac{a}{b} \right)^n \right) \]

As an example at \( w = 12 \text{ mm} \), \( b = 96 \text{ mm} \),
\[ \eta = 1 + (53/96)^4 = 1.093 \quad (\gg 9.3\% \text{ enhanced}) \]
ビーム衝突点用・強収束四極マグネットの開発（續）

・これまでに得られた成果
  - 1mモデルで250T/mを達成（1号機）
  - 初期励磁で磁場勾配220T/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 7x10^{-5}
    • 20極成分 <1x10^{-5}

・今後の計画
  - 1m 4、5号機モデルの試験・・・再現性の確認
  - 6、3m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

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
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

- 運動方程式
  - 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）
  - 遮蔽性: 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えば、電気代 1 億円

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
    - \( F = q \cdot \nu \cdot B = \frac{mv^2}{\rho} = p \cdot \nu / \rho \)
    - \( p = q \cdot \rho \cdot B \)

- \( P \ [ GeV/c ] = 0.3 \cdot \rho \ [ m ] \cdot B \ [ Tesla ] \)

- 1 GeV/c = 0.3 x 3.33 m x 1 Tesla
磁場中での荷電粒子の動き（続）

- 磁場による偏向（Deflection）
  \[ \phi = \frac{L}{\rho} = qB \frac{L}{p} \]

- Sagitta
  - \[ S = qB \frac{(L/2)^2}{p} \]
  - \[ \frac{dp}{p} = \frac{ds}{s} = k / (BL^2) \]

磁場中での荷電粒子の動き（続）

- 運動量測定の分解能は \( 1 / BL^2 \) に比例する。

- 例）
  - \( B = 2 \) テスラ、\( L/2 = 2 \) mの磁場空間で
    サジットが1.0mm (0.01m) あった時、粒子の運動量の運動量は、
    \[ P = 0.3 \times 2 \text{Tesla} \times 2^2 \text{m}^2 / 10^{-2} \text{m} \]
    \[ = 240 \text{GeV/c} \]
磁場の選択と特徴

- ダイポール
  - 均一な磁場
  - 鉄コイルが必要
  - 主として固定標的実験
  - 偏角測定

- ソレノイド
  - 均一な磁場
  - 薄肉化
  - 主として衝突ビーム実験
  - サジックを測定

- トロイダル
  - 1/r の磁場
  - それ自身で閉じた磁場
  - サジック+偏角

ダイポール磁場

- 特色
  - 鉄コイルによる磁場の決定（＜2 T）
  - 大立体角は困難
  - 偏角の測定に最適
  - 固定標的実験に多く用いられる。
  - ビーム衝突実験＞＞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）
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 \( 6 \sim 10 \) 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
  \[
  dp/p = -(B \cdot R) \cdot \ln(R/R_c) / (\sin \theta)^2
  \]

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
    \[
    dp/p = -(B \cdot R^2)^{\alpha}
    \]

- コイルの外側では偏角を計る
  \[
  dp/p = -(B \cdot R) \cdot \theta
  \]
粒子検出器用超伝導マグネットの進展

- ダイポール
  - 井戸、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)

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、エネルギーロスを増力抑える
    - Magnetic Field
      - rot B = μ₀J
    - Transparency
      - X ~ RB² / (E/M)
      - ~ RB² γ / σ₈

- 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
FUNDAMENTAL RELATIONS IN THIN SOLENOID DESIGN

Magnetic Field: \( \mathbf{\mathbf{\alpha}} \times \mathbf{B} = \mu_0 j \quad \Rightarrow \quad \mathbf{B} = \mu_0 \cdot n \mathbf{I} \)  (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: \( t = \left( \frac{1}{\sigma_h} \right) \cdot R \cdot P_r \quad = \left( \frac{1}{\sigma_h} \right) \cdot R \cdot \left( \frac{B^2}{2\mu_0} \right) \)

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

---

**B**: Magnetic flux density

**\( \mu_0 \)**: permeability

**n**: turns / unit length

**I**: Current

**R**: Coil radius

**L**: Coil Length

**t**: Coil thickness

**\( \gamma \)**: Density of material used in coil

**H**: Enthalpy

**T**: Temperature
• Physics Requirements:
  - Magnetic Field, B: As high as possible: \( \Delta x B = \mu_0 j \Rightarrow B = \mu_0 n I \)
  - 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:
    \[ MQE = \Delta H \cdot A \cdot \text{IMPZ} = \gamma C \cdot \Delta T \cdot A \left( \frac{1}{\mu_0} \right) \cdot \left\{ 2 \cdot L \cdot T \left( T_c - T_0 \right) \right\}^{1/2} \]
  - Mechanical Safety:
    \( \sigma_h \): Within elastic design: \( \sigma_{2\tau} = \sigma_h - \sigma_z \ll \sigma_{ys} \)
    \[ = \left( \frac{1}{I} \right) \cdot R \cdot \left( \frac{B^2}{2 \mu_0} \right) \]
  - Quench protection:
    T: As low as possible: \( H(T) = E/M \Rightarrow T \propto \left( \frac{E/M}{T_0} \right)^{1/3} - 1/4 \)
    \( \Delta T \): As small as possible: \( \epsilon = \int \propto dT \)
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 (CELO, CDF, TOPAZ,)
    - X-Z **
    - Xc (Cu) = 14 mm  >> Xc (Al) = 89 mm
  - アルミ安定材の高強度化（低抵抗を保ちつつ）
    - 微量添加合金 (Ni添加, 折出強化)
    - 機械加工強化
  - コイルの巻き方 (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磁伝導特性を有する純アルミ板をクエンチを繰り返す全分に伝播し、コイル内での温度差熱害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ティッククライオスタット

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
    - 單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、特にミュー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 + 常伝導ダイボール
  - LHC-b
    - 常伝導ダイボール
E/M Ratios in various detector solenoids.
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)
  - さらなる高性能 (低抵抗) アルミ安定化材の開発
  - 磁を越える強度、磁を越える電気伝導度 (熱伝導度)
  - E/M ratio を 100 >> 20 kJ / kg への努力
    
    \[ B = 2 \text{T}, R = 2 \text{m}, x = 0.7X_0 \]
  - 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
      - 純磁性ダブル・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 (ミューオン検出分解能の向上)
  - 逆磁性ダブル・ソレノイド
    - 電流によるアクティブ・シールドの概念

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
  - ASTRON MAG計画と超伝導マグネット
  - 気球による宇宙粒子線の観測 (BEES) 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
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

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）

・ A S T R O M A G 計画 （1 9 8 5 ～）
  - 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
  - N A S A 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
      - B E S S 気球実験
        - （梁氏、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）
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徴と制約

<table>
<thead>
<tr>
<th></th>
<th>地上</th>
<th>打ち上げ</th>
<th>宇宙 Station</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>重力加速度</td>
<td>1 G</td>
<td>10 G</td>
<td>0 G</td>
</tr>
<tr>
<td>周囲圧力</td>
<td>1 atm</td>
<td></td>
<td>vacuum</td>
</tr>
<tr>
<td>周囲温度</td>
<td>300 K</td>
<td></td>
<td>~ 250 K</td>
</tr>
<tr>
<td>地磁場</td>
<td>0.3 gauss</td>
<td></td>
<td>0.3 gauss</td>
</tr>
<tr>
<td>磁石重量への制約</td>
<td>~ 1 ton</td>
<td></td>
<td>零</td>
</tr>
<tr>
<td>サイズ</td>
<td>4 m³</td>
<td></td>
<td>1 gauss</td>
</tr>
<tr>
<td>全磁気モーメント</td>
<td>零</td>
<td></td>
<td>1 gauss</td>
</tr>
<tr>
<td>漏れ磁場（居住区）</td>
<td>&lt; 1 gauss</td>
<td>1 gauss</td>
<td>~ 1 kW</td>
</tr>
<tr>
<td>供給可能電力</td>
<td>No</td>
<td>No</td>
<td>Yes</td>
</tr>
<tr>
<td>驅動</td>
<td>永久電流</td>
<td></td>
<td>&gt; 1年</td>
</tr>
<tr>
<td>冷媒ライフ／冷凍器</td>
<td>1.8 K</td>
<td></td>
<td>1.8 K</td>
</tr>
<tr>
<td>液体ヘリウム温度</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
</tbody>
</table>

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)

<table>
<thead>
<tr>
<th></th>
<th>Short Solenoid</th>
<th>Simple</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Size</td>
<td>1.6 m x 0.2 m</td>
<td>M = 0</td>
</tr>
<tr>
<td>Configuration</td>
<td>A pair and casp</td>
<td>Free sp.</td>
</tr>
<tr>
<td>Coil weight</td>
<td>650 kg</td>
<td>Lightness</td>
</tr>
<tr>
<td>Usable field</td>
<td>External field</td>
<td>Transparent</td>
</tr>
<tr>
<td>δB dl</td>
<td>1.5 T·m</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>dB/year</td>
<td>&lt;1 %</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>E/M</td>
<td>1.5 kJ/kg</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Superconductor</td>
<td>NbTi</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Stabilizer</td>
<td>Al</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Temp</td>
<td>1.8 K</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Cooling</td>
<td>Indirect conductive cooling</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Radiation Shield</td>
<td>3 stage shield</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Total weight</td>
<td>&lt; 2 ton</td>
<td></td>
</tr>
</tbody>
</table>
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
- 体重量
  - (シンチレーター2 x 2 cm分)
  - 500 kg

- モデルマグネットの開発
  - 気球実験での有効性的検証
  - BESS実験への発展

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。
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

\[
E/M = \int (CpT) \, dT = H(T_2) - H(T_1) = \text{approx. } H(T_2)
\]

>> クエンチ後のコイル平均温度上昇を示す

For Example (Al):

- \( E/M = 5 \text{ kJ/kg} \rightarrow T_2 = 65 \text{ K} \)
- \( = 7.5 \text{ kJ/kg} \rightarrow T_2 = 75 \text{ K} \)
- \( = 10 \text{ kJ/kg} \rightarrow T_2 = 80 \text{ K} \)
- \( = 20 \text{ kJ/kg} \rightarrow T_2 = 100 \text{ K} \)
DEVELOPMENT OF FAST QUENCH PROPAGATION TECHNIQUE
BY USING PURE Al STRIP

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

  >> Eliminate Excessive Thermal Stress

- Quench Propagation Velocity:

\[ \nu_\phi = \frac{I}{\gamma c} \left( \frac{L_0 - T_1}{L_0 - T_0} \right)^{1/2} \quad \text{... (constant)} \]

\[ \nu_z = \left( \frac{K_z}{K_0} \right)^{1/2} \cdot \nu_\phi \quad \text{... (proportional to } K^{1/2} \text{)} \]

- Improvement of Axial thermal Conductance should be efficient:

\[ \nu_\phi = \frac{I}{\gamma c} \left( \frac{L_0 - T_1}{L_0 - T_2} \right)^{1/2} \quad \text{(constant)} \]

\[ \nu_z = \left( \frac{K_z}{K_0} \right)^{1/2} \cdot \nu_\phi \quad \text{... (proportional to } K^{1/2} \text{)} \]
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束に働く強い相互作用を記述する理論
    - 素粒子物理学の標準模型の重要な構成要素
    - CP (C: 荷電共役、P: 空間反転) 対称性の破れを
    - 破却が存在することが知られている。
  - しかし、実験的には CP 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）
  - CP 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 CP 問題」
      - AXION 模型  
  - 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) は理論からは予想されない
  - いろいろな天体からも大量に放出されている

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 ~ 4 keV
    - L_a ~ 10^{-3} L x (G_{\gamma\gamma}/10^{-10} GeV^{-1})^2

- 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、〜1eVレベルでの探索
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
    • $B \cdot L = 8\sim10$ T\cdotm
    • $G = \sim 2$ 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 $10T\cdotm$ の磁石が自動運転可能となった。

太陽AXION探索実験（続）

・ 磁石のパラメーター
SPRIT RACE TRACK (DIPOLE)
10 T. m
CONDUCTIVELY COOLED
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・マクマフォン）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
    - ≈ 1 W @ 4.5 K
    - 効率は 1/2.0 × カルノー効率（1/20）
    - 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

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
重力波探査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
    • 1mの距離におかれた2つの質点は
      - 1.0-2.0mだけ動く
  - あまりに小さな変位量

重力波探査実験における低温技術（続）

• 低温重力波望遠鏡（L C G T）計画
  - 東大宇宙研（&国立天文台）を中心とした計画
    • K E K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 ➔ ファブリフィロー干渉法
  - 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

87
88
重力波望遠鏡で見える範囲

蟹座銀河団など

2億光年

乙女座銀河団

7000万光年

アンドロメダ

300万光年

我々の銀河

現在ある日本の300m重力波望遠鏡（TAMA）で見える範囲

本計画の低温重力波望遠鏡（LCGT）で見える範囲

アメリカ（LIGO）

伊・仏グループ（VIRGO）

銀河系

4億光年

2億光年

17°

8°
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

6. 今後の展開

- 大強度ミューオンによる物理の将来計画
  - JHF/PRISM計画
  - μe→γ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
  - V LHC計画
  - ミューオン・コライダーチ計画

- 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
大強度ミューオンによる物理の将来計画

- JHF計画・大強度ミューオン物理実験
  - 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。
  - $\mu^- \rightarrow e^- \gamma$
    - 分岐比探索目標 $10^{-11}$

- バイオン生成・捕獲における超伝導技術
  - ミューオンの源となるバイオンを陽子・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
  - バイオン崩壊＞ミュー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

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
    - パイプトン構想
      - ～2 Tの単電流+数ヨーク
    - 高磁場磁石による構想
      - 11〜13テスラ超伝導電磁石
        - Nb3Sn or Nb3Al

∞ Vファクトリーからμコライダーへ

- 大強度ミューオン
  - 超伝導マグネットによるバイオン捕獲,
  - ミューオンへの転換・ビームチャネル
  - 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
VLHC Ring Size

VLHC Parameters

<table>
<thead>
<tr>
<th>Parameter</th>
<th>High field—new technology</th>
<th>High field—known technology</th>
<th>Low Field</th>
<th>Units</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>CM Energy</td>
<td>100</td>
<td>100</td>
<td>100</td>
<td>TeV</td>
</tr>
<tr>
<td>Dipole field</td>
<td>12.6</td>
<td>9.5</td>
<td>1.8</td>
<td>T</td>
</tr>
<tr>
<td>Circumference</td>
<td>104</td>
<td>138</td>
<td>64</td>
<td>km</td>
</tr>
<tr>
<td>Synchrotron radiation damping time (horizontal amplitude)</td>
<td>2.6</td>
<td>4.6</td>
<td>outdamped</td>
<td>hr</td>
</tr>
<tr>
<td>Initial/peak luminosity</td>
<td>3.5/1.2</td>
<td>3.5/1.0</td>
<td>1.1</td>
<td>10^34 cm^-2 sec^-1</td>
</tr>
<tr>
<td>Integrated luminosity per day</td>
<td>500</td>
<td>500</td>
<td>700</td>
<td>ph/s</td>
</tr>
<tr>
<td>Number of storms per day</td>
<td>2</td>
<td>2</td>
<td>1</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Initial rms normalized emittance</td>
<td>1</td>
<td>1</td>
<td>1</td>
<td>s pm·rad</td>
</tr>
<tr>
<td>β*</td>
<td>20</td>
<td>20</td>
<td>20</td>
<td>cm</td>
</tr>
<tr>
<td>Protons/beam</td>
<td>0.5</td>
<td>0.5</td>
<td>0.04</td>
<td>μA/μl</td>
</tr>
<tr>
<td>Number of bunches</td>
<td>27,522</td>
<td>27,522</td>
<td>129,540</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Equilibrium emittance (n)</td>
<td>1.4</td>
<td>62</td>
<td>1.8</td>
<td>10^-3 n pm·rad</td>
</tr>
<tr>
<td>Beam stored energy</td>
<td>0.9</td>
<td>1.18</td>
<td>9.73</td>
<td>GI</td>
</tr>
<tr>
<td>Synchrotron radiation powering</td>
<td>189</td>
<td>140</td>
<td>46</td>
<td>kW</td>
</tr>
<tr>
<td>Total powering</td>
<td>1.3</td>
<td>1.3</td>
<td>1.2</td>
<td>μW</td>
</tr>
<tr>
<td>Revolution frequency</td>
<td>2.89</td>
<td>2.18</td>
<td>26</td>
<td>kHz</td>
</tr>
<tr>
<td>Synchronous frequency</td>
<td>5.9</td>
<td>5.9</td>
<td>25</td>
<td>Hz</td>
</tr>
<tr>
<td>RF Voltage</td>
<td>100</td>
<td>180</td>
<td>100</td>
<td>MV</td>
</tr>
<tr>
<td>Radio-frequency</td>
<td>560</td>
<td>360</td>
<td>360</td>
<td>MHz</td>
</tr>
<tr>
<td>Energy loss/turn</td>
<td>3678</td>
<td>2778</td>
<td>526</td>
<td>keV</td>
</tr>
<tr>
<td>Ring relative energy spread/confusion</td>
<td>15.6</td>
<td>18.0</td>
<td>39.0</td>
<td>nA</td>
</tr>
<tr>
<td>Fill time</td>
<td>16.3</td>
<td>16.3</td>
<td>23</td>
<td>min.</td>
</tr>
<tr>
<td>Acceleration time</td>
<td>5.8</td>
<td>7.6</td>
<td>33.9</td>
<td>min.</td>
</tr>
</tbody>
</table>
 proton beam

Neutrino Factory

Proton Capture
Phase Rotation
low-energy muon source
muon ionization cooling

energy loss longitudinal acceleration

four neutrino species from muon decays

$\mu^+ \rightarrow e^+ V_\mu V_e$
$\mu^- \rightarrow e^- \overline{V}_e$

Muon Collider
2 x 2 TeV

1.5 x 10^{22} protons/year
18 GeV/c Proton Accelerator
Proton Production Target and Capture Solenoid
Muon Decay Channel
Muon Ionization Cooling Channel
1.5 x 10^{21} muons/year
100 MeV/c
Stopped Muon Physics
Muon Accelerators 100 MeV > 2 TeV
2 TeV/c muons
Intense Muon and Neutrino Beams

Front-end of muon collider is close to what we want to do.

targety - BNL cooling - FNAL
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
      - $B = < 15 \, T \oplus 4.2 \, K$ 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
      - $B \geq 15 \, T \oplus 4.2 \, K$ 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
      - $T < 20 \, K$ における実用化
      - $B \geq 15 \, T$ 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

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・熱の移動をパルス操作によるガスフローの
    パルス的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
For c-axis oriented BSCCO tape
Magnetic field dependence of Jc at 4.2K
<table>
<thead>
<tr>
<th></th>
<th>構成</th>
<th>特徴</th>
<th>用途</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>GM冷凍機</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>組み込み冷凍機</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>コンプレッサ</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>エンジン</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>試験機</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
</tbody>
</table>

<table>
<thead>
<tr>
<th></th>
<th>12.7℃</th>
<th>20 Hz</th>
<th>20K</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>低温冷凍機</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>高効率</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>小型、軽量</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>多段化</td>
<td>R&amp;D</td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>20K PRESSURE</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>赤外線センサー冷却(60℃/80K)</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
</tbody>
</table>

従来使用されている極低温冷凍機

GM冷凍機

スターリング冷凍機

構成

低価格

・低温冷凍機の(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)

直冷式超電導磁石(80K/4K)

用途
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 \( \Phi = n\Phi_0 \)
  - トンネル効果 (ジョセフソン効果)

- グローバルな像
  - 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

- ミクロな像
  - 電子（クーパー）対による、金属格子振動と連動した電子の移動
    - ポーズ粒子的に振る舞い、超伝導電流となる。

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
      - 動力学的臨界磁界 \( B_c \)
    - ローレンツカ \( \Phi \) 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)
      - \( B_c 1 < B_c < B_c 2 \)
    - 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 \( \Phi \) ピン止め力で常伝導転移
    - 磁場の侵入距離が大きい
      - \( Nb, NbTi, Nb3Sn(JLT) \)
    - 超伝導磁石等に、より実用的な超伝導体
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（〜1/1000）を含めても大きな電力の節約（〜10⁴ MJ/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

<table>
<thead>
<tr>
<th>ポイント</th>
<th>加速器</th>
<th>粒子検出器</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>形状</td>
<td>ダイボール</td>
<td>ソレノイド</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>四極</td>
<td>トロイド</td>
</tr>
<tr>
<td>強度</td>
<td>5〜10 T</td>
<td>1〜4 T</td>
</tr>
<tr>
<td>磁場口径</td>
<td>5〜10 cm</td>
<td>1〜10 m</td>
</tr>
<tr>
<td>密度精度</td>
<td>≪10⁻⁴</td>
<td>10⁻²〜10⁻³</td>
</tr>
<tr>
<td>磁場主体電流密度</td>
<td>1000 A/mm²</td>
<td>2000 A/mm²</td>
</tr>
<tr>
<td>平均電流密度</td>
<td>300〜500 A/mm²</td>
<td>10〜200 A/mm²</td>
</tr>
<tr>
<td>運転／臨界条件比</td>
<td>80〜90 %</td>
<td>40〜60 %</td>
</tr>
<tr>
<td>运転温度</td>
<td>1.9〜4.5 K</td>
<td>4.5 K</td>
</tr>
<tr>
<td>クエンチ後温度上昇</td>
<td>&lt;300 K</td>
<td>&lt;120 K</td>
</tr>
<tr>
<td>冷却</td>
<td>液体ヘリウム中</td>
<td>伝導、間接冷却</td>
</tr>
<tr>
<td>特徴</td>
<td>磁場精度</td>
<td>大空間</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>高磁場（限界）</td>
<td>機械応力（限界）</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>粒子透過性への要求</td>
<td></td>
</tr>
</tbody>
</table>
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?)

今後の展望（續）

・ 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。
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 ◀ 实験 ◀ 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。

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（島本進、安河内進、訳）
    「超伝導入門」 廣済堂（1978）
  - 電気学会編、「超伝導工学」電気学会大学講座、オーム社（1978）
  - 優温工学会編、「低温工学ハンドブック」（1993）
  - 大塚崇一郎、「超伝導の世界」ブルーバックス、建設社（1987）
  - 増田洋介、「低温・超伝導・超伝導技術」バーチャル出版委員会編、丸善（1985）
  - 新高山 司、「低温・超伝導技術」 EEE-Proceedings 96-12 (1999)
  - 仲山実ら「超伝導の基礎」第5回低温工学シンポジウム、低温工学協会 (1996)

- 加速器・粒子検出器用超伝導マグネットについて
  - 土屋靖康「超伝導電磁石：高エネルギー加速器セミナーOHO-87」(1987)
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

-- BESS --

・ 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

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
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。
      - 原初ブラックホールからの蒸発？
      - 宇宙暗黒物質から？
  - 宇宙線総対粒子束の精密測定（太陽活動周期を通した観測）
    - 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。
  - エキゾティック宇宙粒子線の探索。

BESS気球実験の経過

1985 Thin Solenoid Spectrometer概念の提案（中本）＞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 気球飛翔不成功
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
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.
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。

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、50 GeVでファクター2の差が観測されている。
Antiproton Identification in BESS-98

Antiproton flux observed in BESS93-98

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 \( \sim 800 \text{ K} \) (1 - 120 GeV)
- Helium events \( \sim 80\text{K} \) (1-54 GeV/n)
- Uncertainty, p; < 5 \%
  He; < 10 \%
- Suggested necessary reconsidere 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テヴ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
  - 長期間フライトの計画
    - 北半球周回フライト（5〜10日）
      - アラスカ >> ブリテンランド >> カナダ
      - スウェーデン >> ブリテンランド >> 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・機器軽量・操作簡易の開発