

ミュー粒子衝突型加速器の発展

米原 克也

Fermi National Accelerator Lab

セミナー@KEK

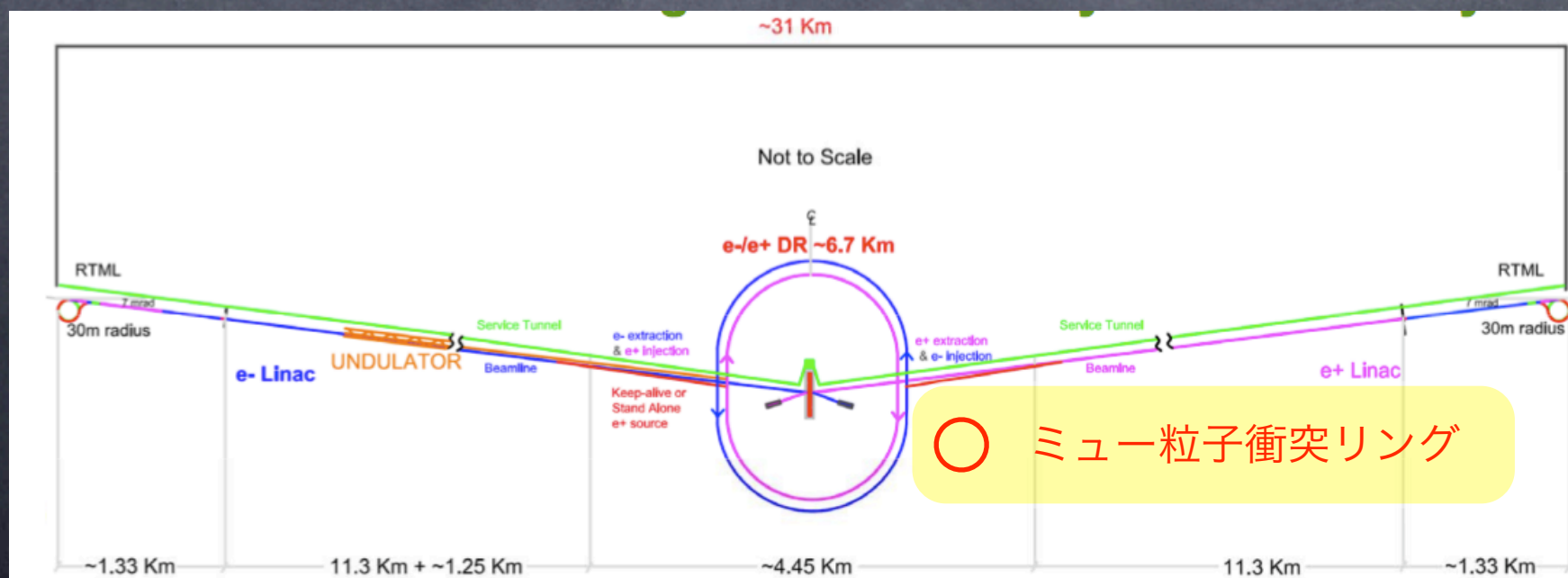
イントロダクション

新しい事象を発見するための素粒子物理学のアプローチは2通り。一つは精密測定、もう一つは高エネルギーフロンティアマシンを使った実験。ミュー粒子を使った実験はその両方をカバーする。このセミナーでは高エネルギーフロンティアマシンの最先端である、ミュー粒子衝突型加速器を紹介する。

なぜミュー粒子を加速粒子するのか？

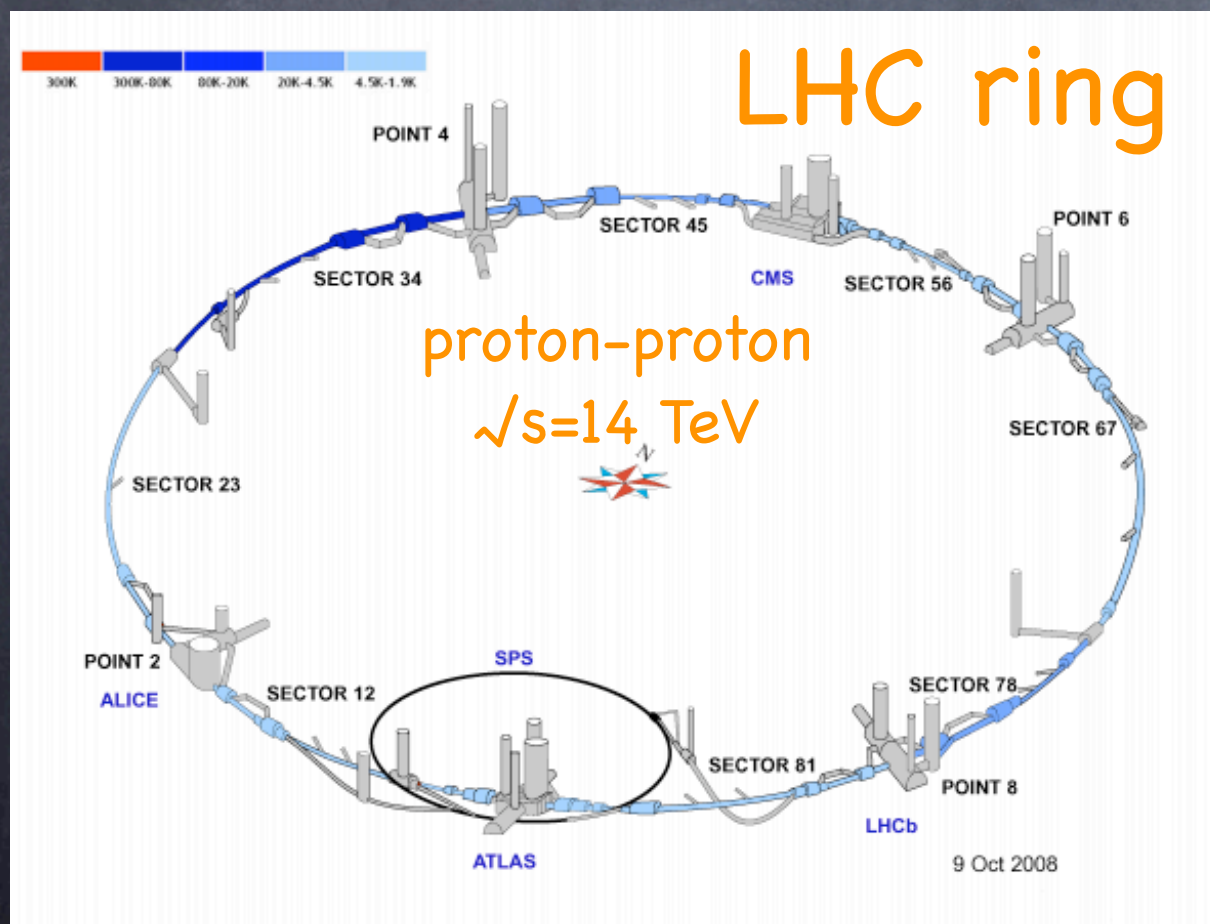
- 質量が電子質量の200倍：加速の際に生じるSynchrotron放射の確率が電子に比べて格段に低い
 - ▶ 例1：ILC（国際電子衝突型加速器）での到達エネルギーは250 GeV。一方ミュー粒子加速器では750 GeVかそれ以上が可能。
 - ▶ 例2：ILCは全長が20 km以上の線形型加速器。ミュー粒子加速器は円形で、直径2 km程度。

ILC design: B. Barish Fermilab Users Meeting'08



- ミュー粒子は基本粒子：陽子の様な内部複合粒子ではないので、到達エネルギーがそのまま反応エネルギーとして使用できる。

- ▶ LHC（陽子衝突型加速器）の場合、到達エネルギーは14 TeVであるが、実際の反応はクォーク同士の衝突によって生じるので、使用可能なエネルギーは1/9となる。一方ミュー粒子では到達エネルギーがそのまま使用可能なエネルギーになる。

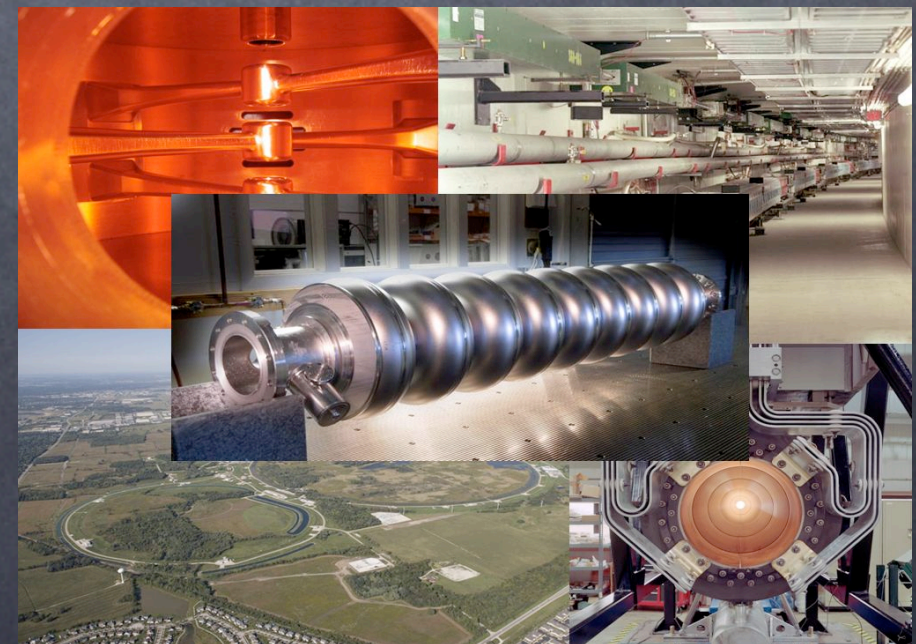


ミュー粒子を使用する際のデメリット

- 2次粒子として生成しなければならない。
- 寿命（静止系で2.2 micro sec）がある。
- 加速技術が確立されていない。

ミュー粒子加速の際に生じる困難

- 陽子を物質中に照射して、大量のパイ粒子を生成。パイ粒子が崩壊してミュー粒子が発生する。各反応ごとにビームの大きさが大きくなっていく。ところが加速器系の受容可能な大きさは決まっているため、ミュー粒子を加速する際に大量のミュー粒子を失うことになる。この問題を解決するには、膨大なパワーを供給する必要が生じる。
- ▶ 例：パイ粒子崩壊後のミュー粒子のビームの大きさはバスケットボールの大きさ。一方加速器系での受容可能な大きさはピンポン球よりも小さい。

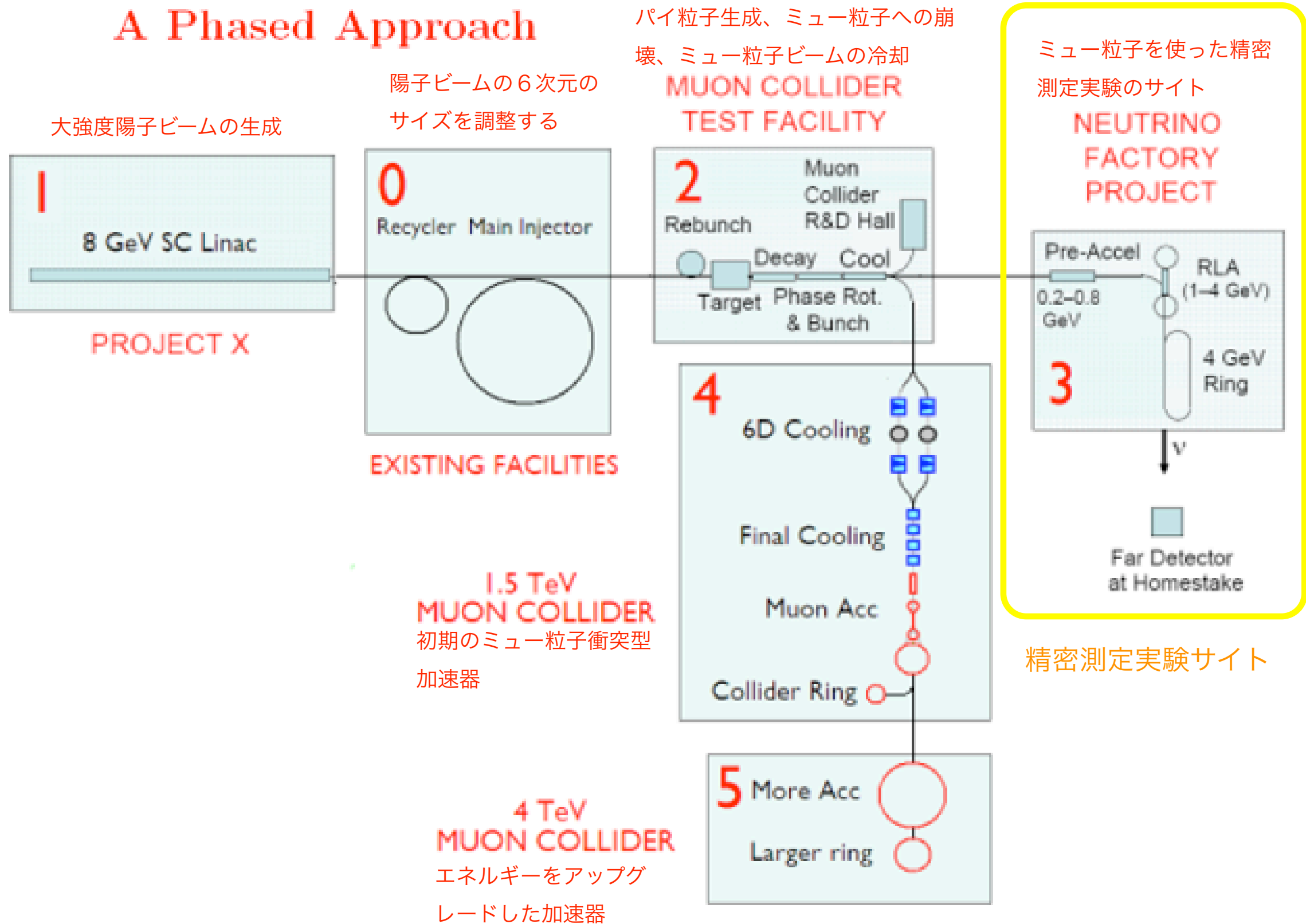


如何にしてビームサイズを小さくするか？

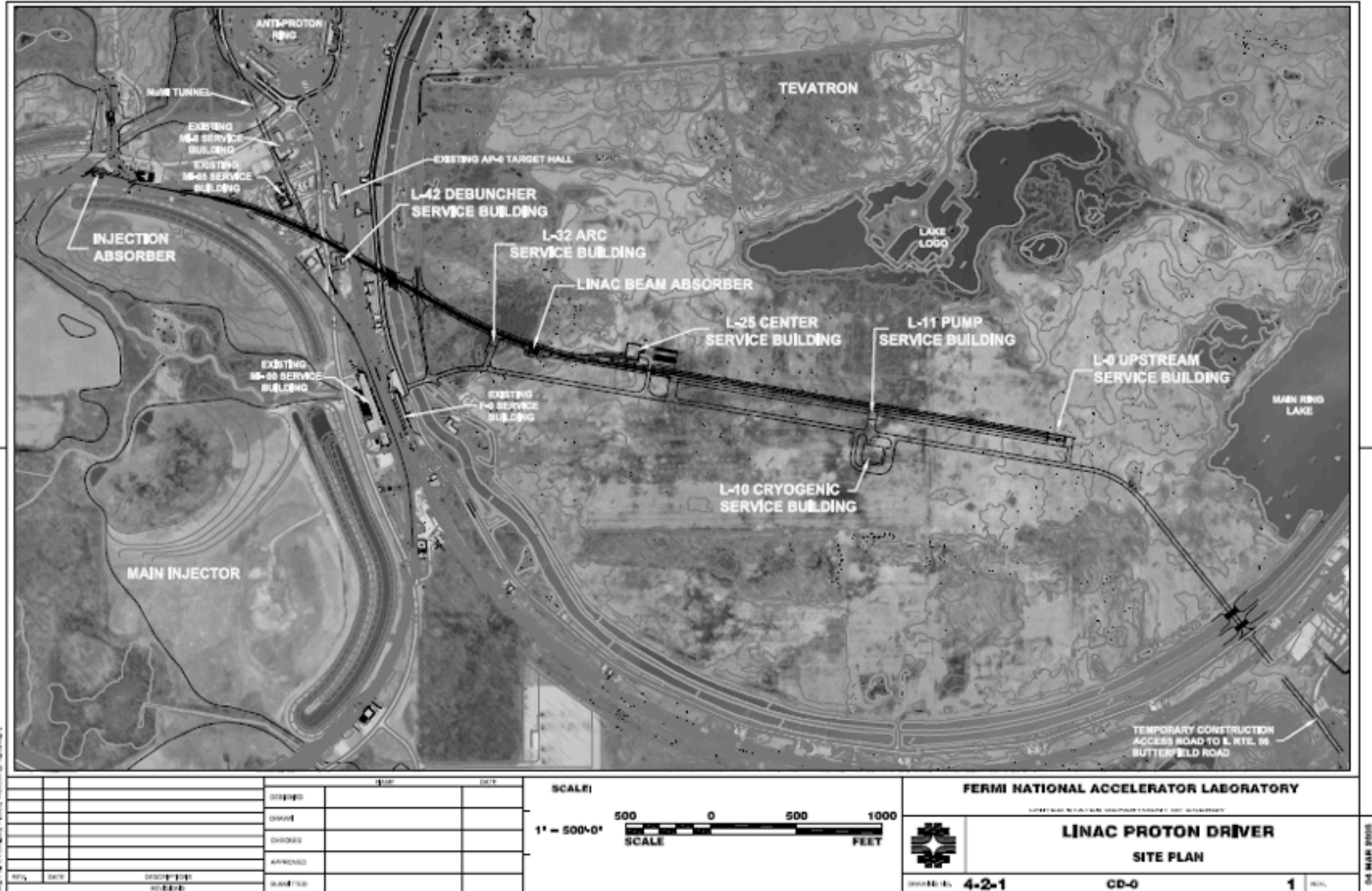
現在考案されている新しい技術を紹介
するのが今セミナーのメインテーマ

ミュー粒子型加速器の全体像

A Phased Approach



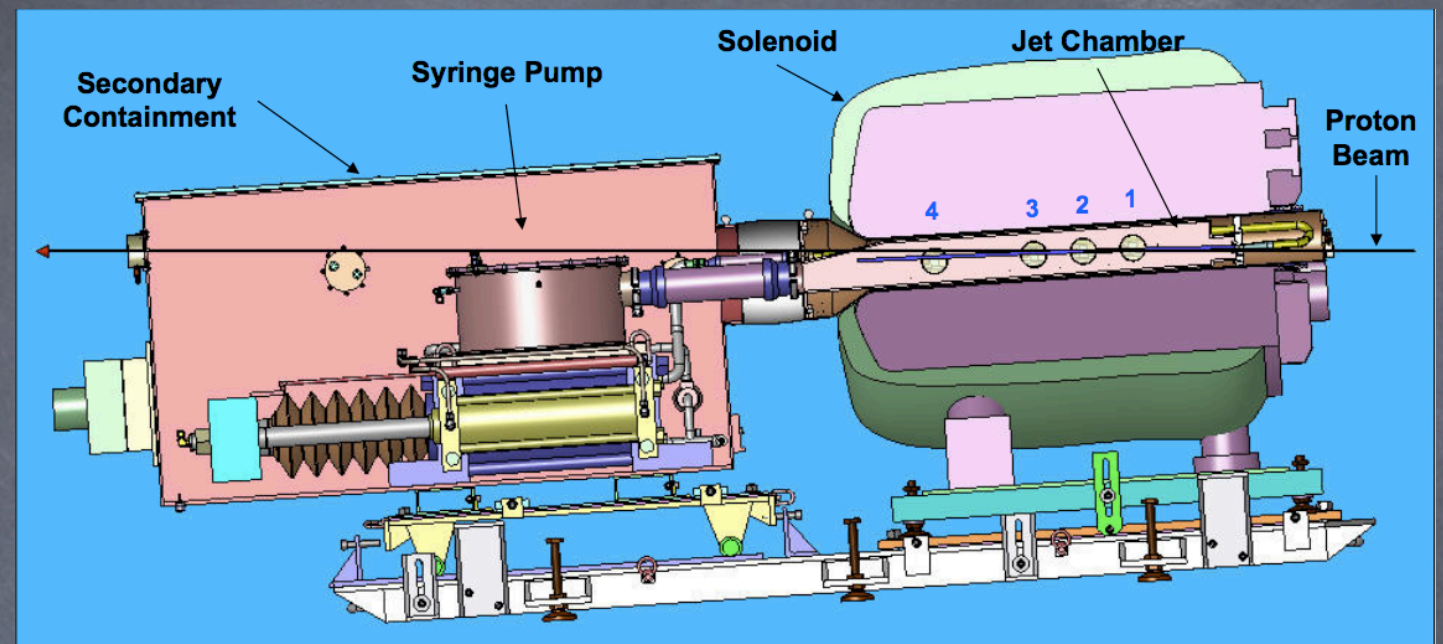
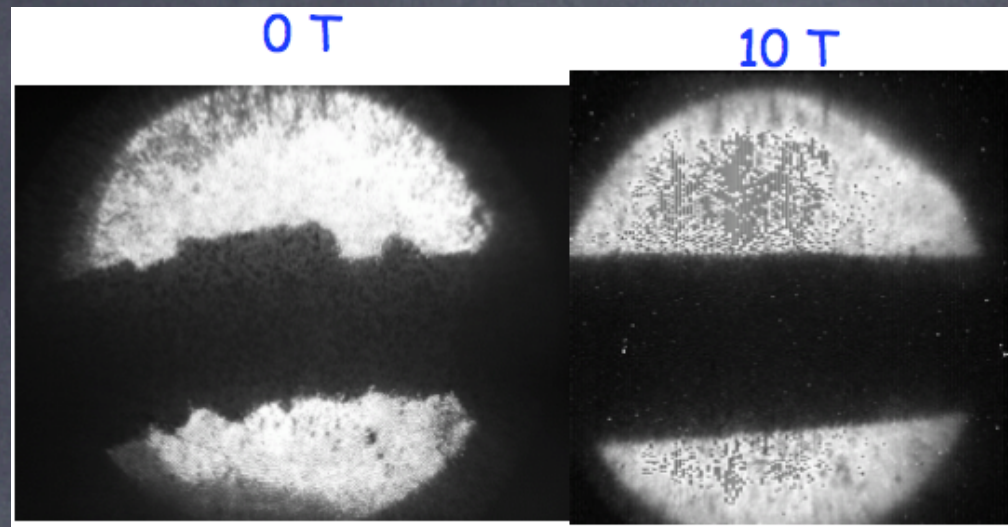
大強度陽子ビーム



Project X計画がフェルミで提案される。

MIを使うことにより、最大4MWまで到達する。

パイ粒子生成標的の研究

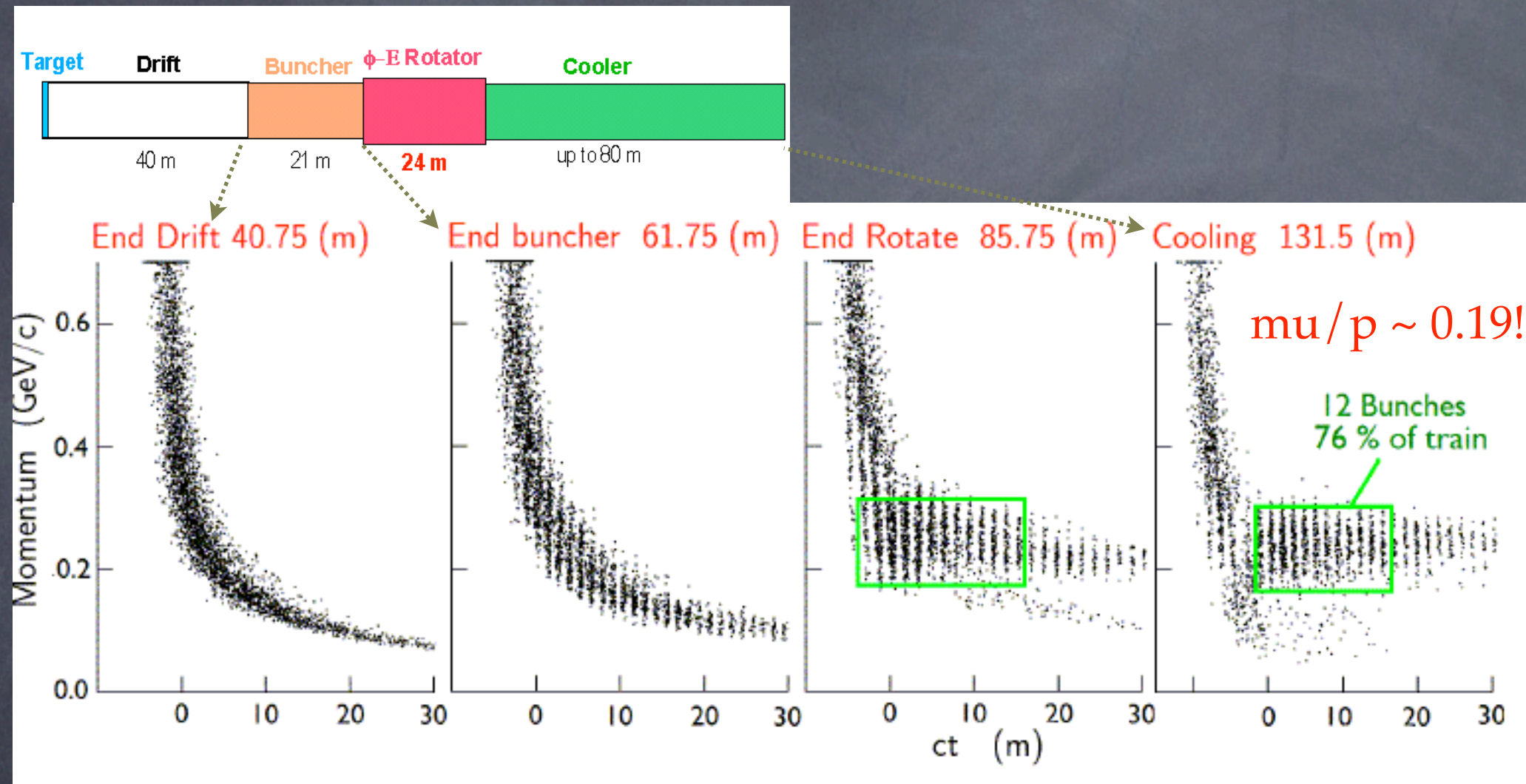


MERIT実験をCERNで行った。

パイ粒子生成標的を研究するのが目的。

最大4 MWまで陽子ビームを照射し、標的である水銀が問題なく動作することを確認した。

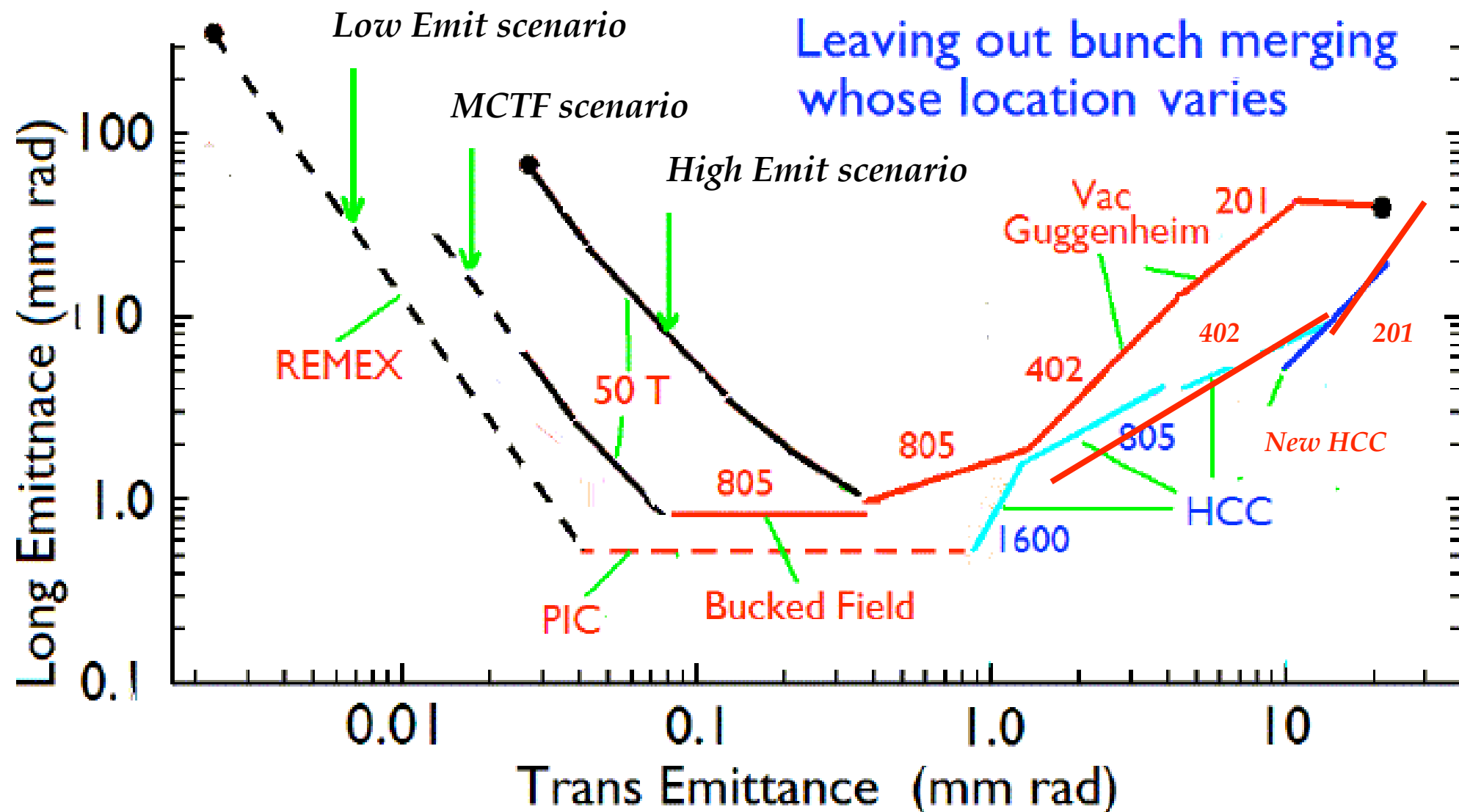
崩壊、位相回転



パイ粒子を崩壊させてミュー粒子を生成し（Drift）、ビームの長さを細切れにし（Buncher）、位相を回転（Phase Rotator）、ビームサイズを小さくするため、ビームを冷却する（Cooling）

ミュー粒子ビームの冷却

- ミュー粒子加速器の性能を決める最も重要な部分がビーム冷却。冷却の効率が良いければ、後続の加速装置のコストも軽減されるし、技術的な問題も解決しうる。

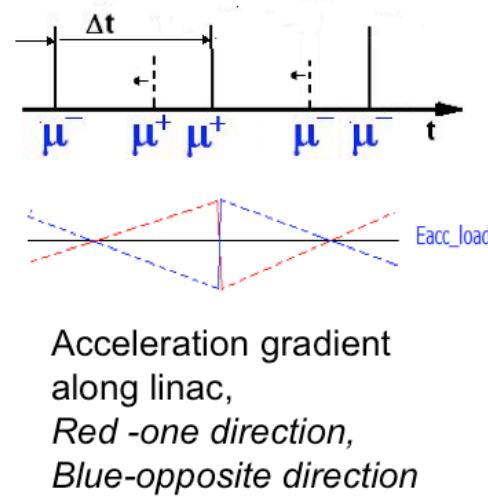
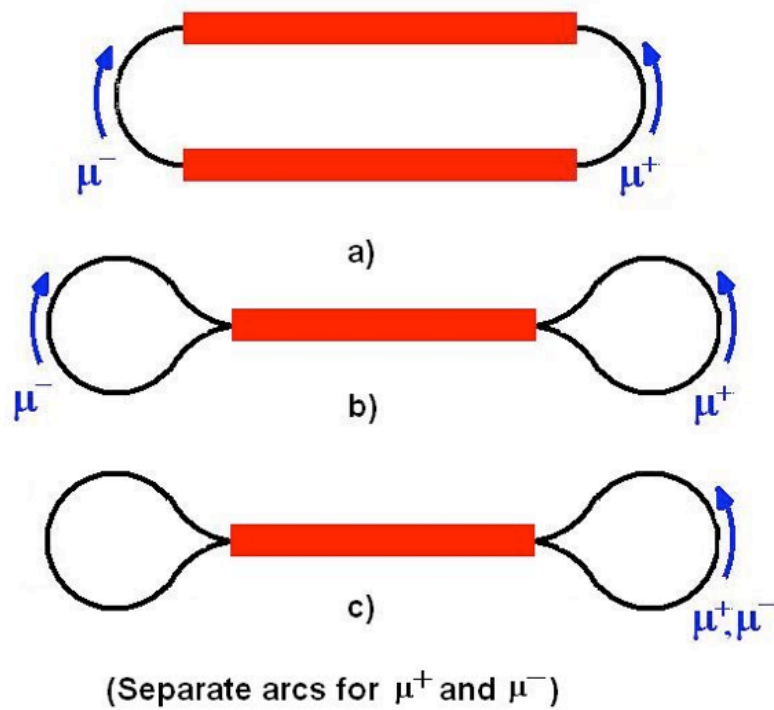


上の図はビームサイズがどのように冷却されていくかを示している。

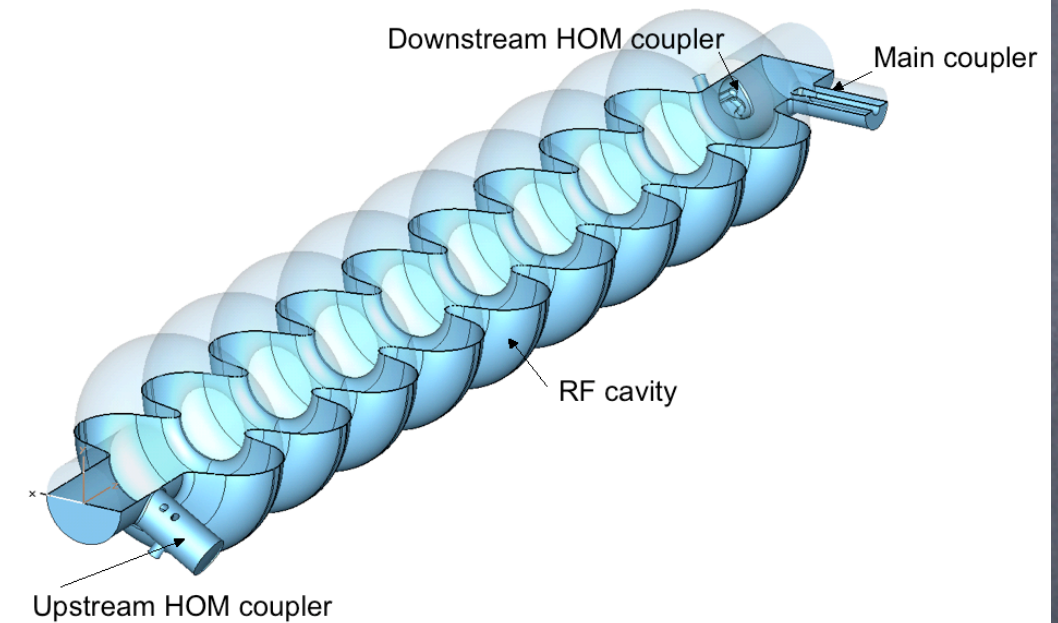
装置の紹介は後で行う。

ミュー粒子の加速

For the schemes below the time intervals are different and, thus,
b) Klystron power should change during acceleration;
c) The klystron maximal pulse power should be increased compared to the simplest case.

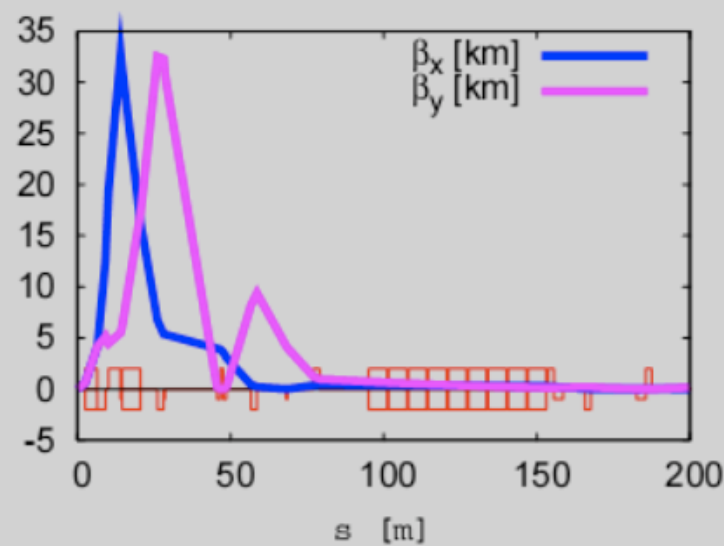


ILC RF cavity with the HOM and input couplers:

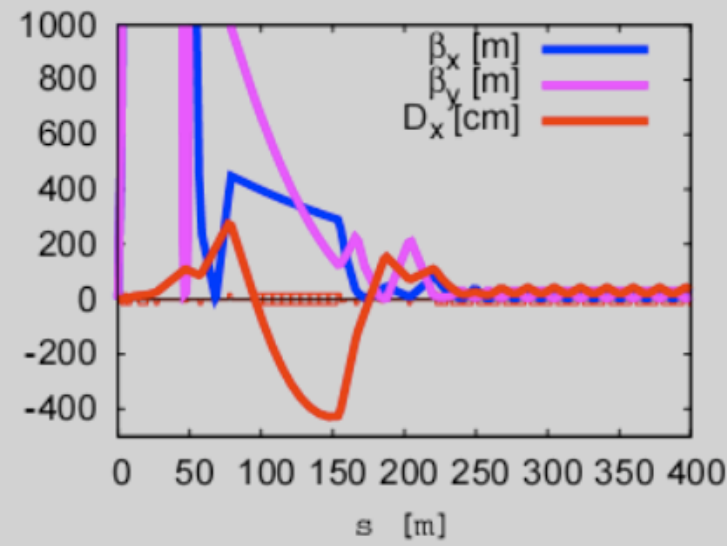


高勾配電場を生成できる超伝導RFセルを使って、効率よくミュー粒子を加速する研究が始まった。

ミュー粒子衝突リング

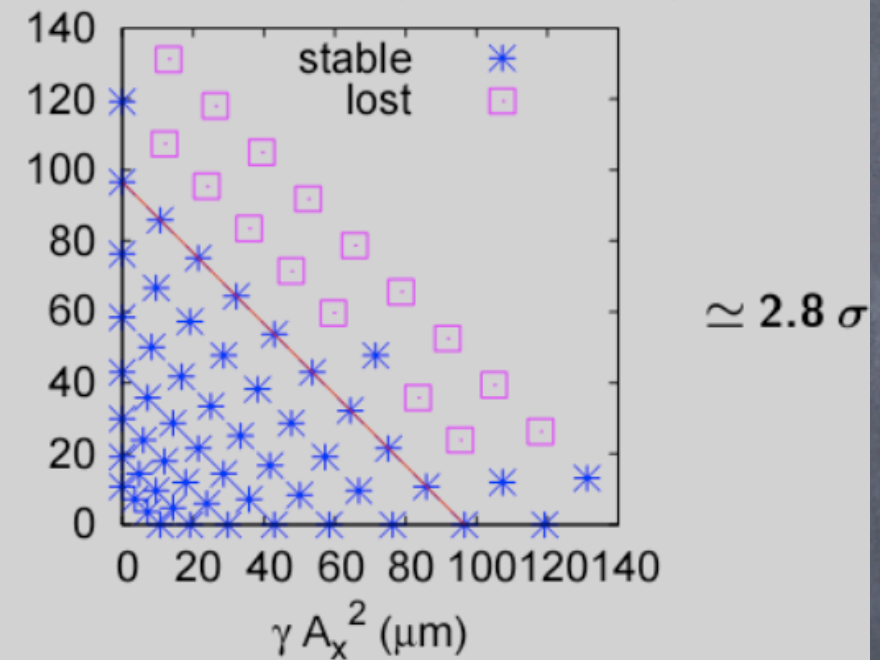


IR



Matching section

Dynamic Aperture (with octupoles)

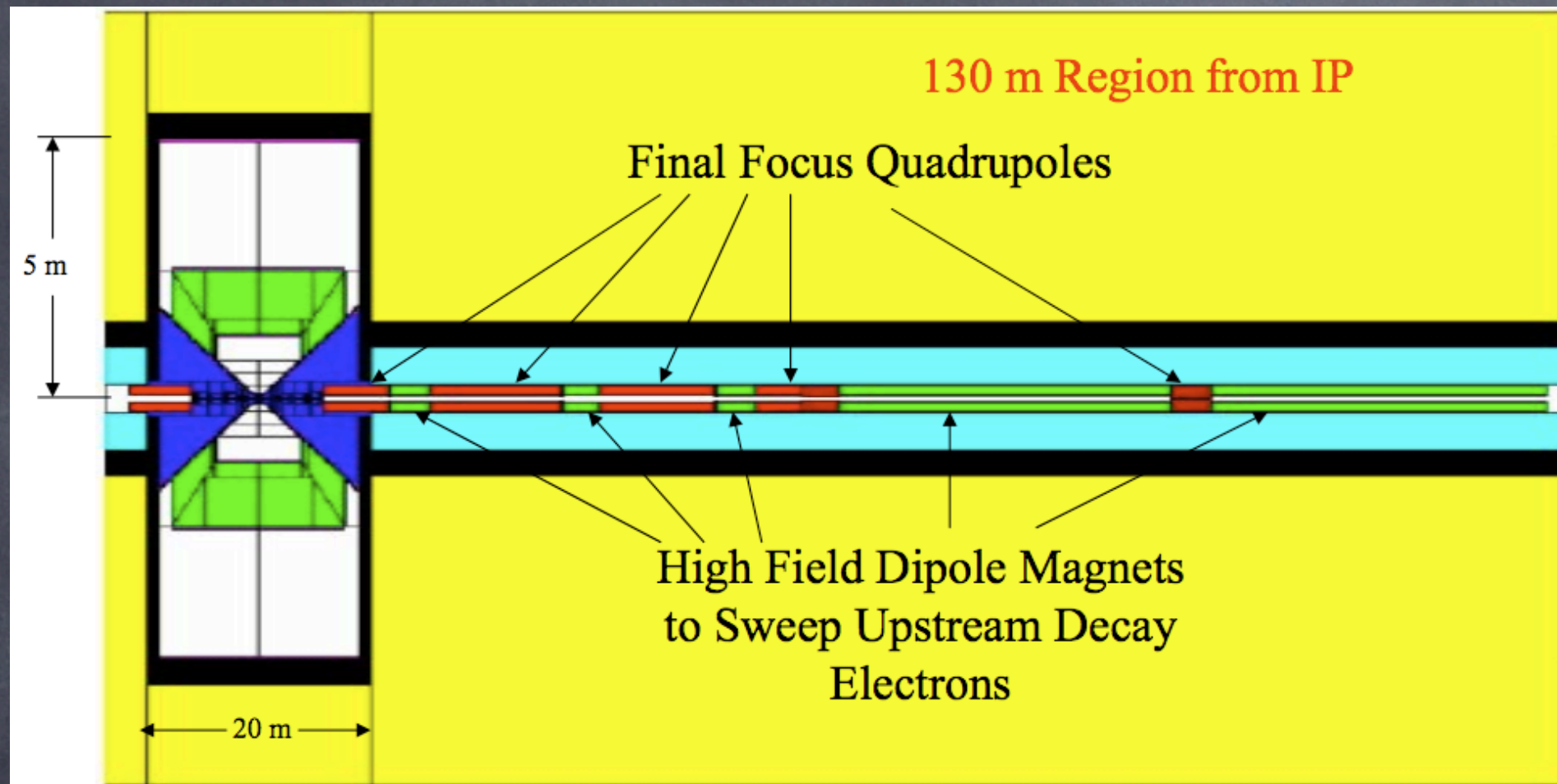


SUMMARY AND OUTLOOK

Energy (GeV)	Dipole First	Oide (96)	Dipole First with 90 deg.FODO
L (m)	3132	5670	3815
B_{dip} (T)	9.6	3.7	9.7
Tunes	42.11/41.18	31.55/31.56	35.52/34.64
β^* (mm)	10	3	10
$\hat{\beta}$ (km)	33	901	33
# of IPs	2	1	1
distance to first quad (m)	± 6 (2.5)	± 6	± 6 (2.5)
DA (# of σ)	2.8	4.5	3
momentum aperture	$\pm 0.6 \%$	$\pm 0.6 \%$	$\pm 0.7 \%$
α_p	-1.3×10^{-4}	5×10^{-5}	5×10^{-4}
length of RF sections (m)	-	2×1.5	-

ミュー粒子ビームはかなり大きな運動量の分散を持っている。いかにこの大きな分散をもったビームをリング内に保つかがリング設計の重要な点。

検出器



崩壊ミュー粒子が生成する電子は、検出器のバックグラウンドに大きな寄与をする。このため、検出器には非常に大きなタングステン製のコーンが両方の口におかれている。このため、前方に飛んだイベントを再生することは不可能になる。

電子衝突型加速器に使用される検出器

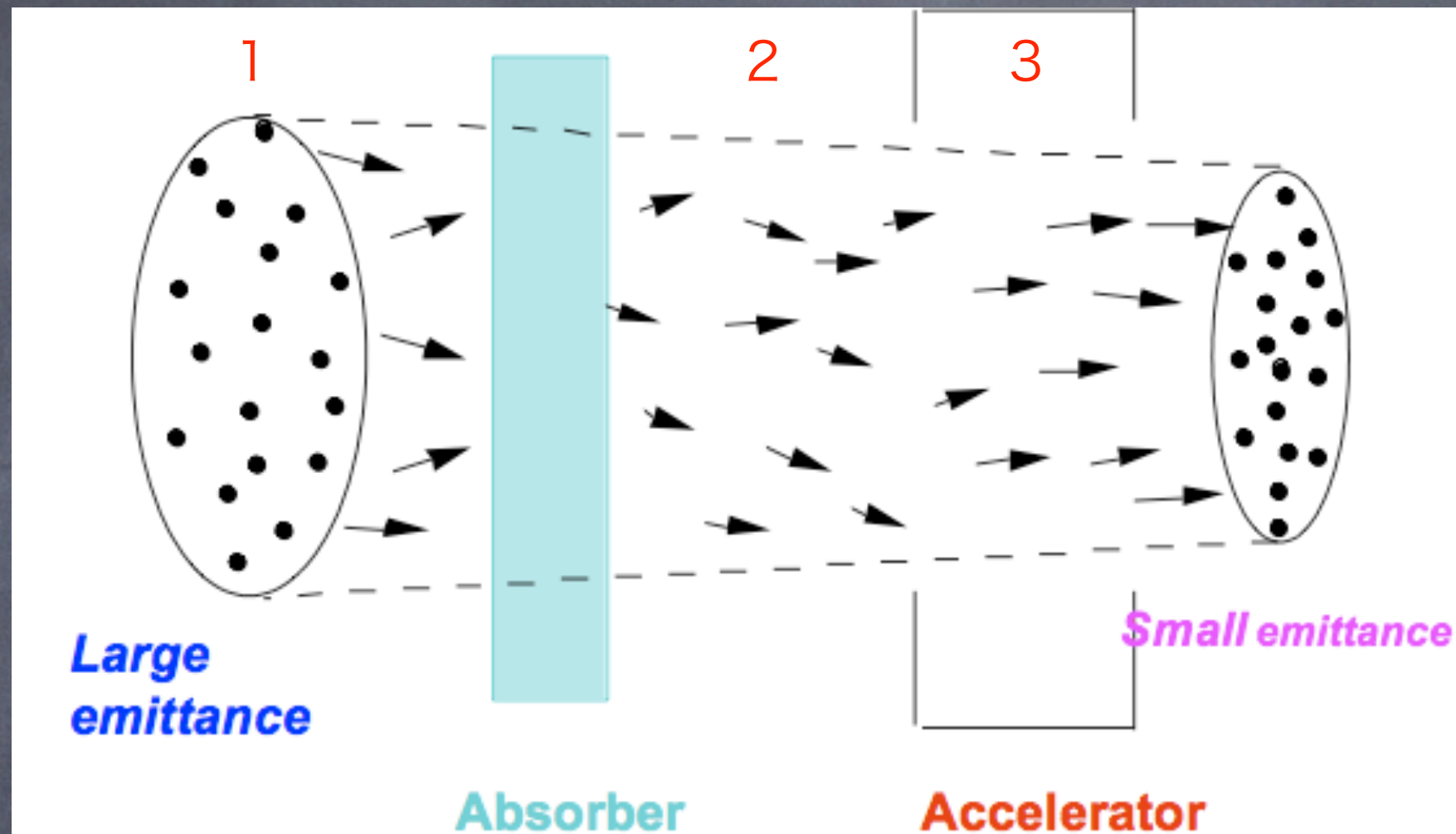
Detector Specifications

- Detector requirements given for CLIC detector
 - Some are more stringent for ILC
- Many performance parameters are factor 2 - 5 better than what has been achieved to date
- Granularity of the detectors expected to dramatically increase because of recent technology advances
- Material budgets significantly reduced
- Machine Detector Interface
 - Masking system
 - Constraints on vertex detector
 - Magnet design
 - Low angle calorimeters
 - Beam pipe design

Detector	CLIC
Vertexing	$15\mu m \oplus \frac{35\mu m GeV/c}{p \sin^{3/2} \theta}$ $15\mu m \oplus \frac{35\mu m GeV/c}{p \sin^{5/2} \theta}$
Solenoidal Field	$B = 4 \text{ T}$
Tracking	$\frac{\delta p_t}{p_t^2} = 5. \times 10^{-5}$
E.m. Calorimeter	$\frac{\delta E}{E(GeV)} = 0.10 \frac{1}{\sqrt{E}} \oplus 0.01$
Had. Calorimeter	$\frac{\delta E}{E (GeV)} = 0.40 \frac{1}{\sqrt{E}} \oplus 0.04$
μ Detector	Instrumented Fe yoke $\frac{\delta p}{p} \simeq 30\%$ at 100 GeV/c
Energy Flow	$\frac{\delta E}{E (GeV)} \simeq 0.3 \frac{1}{\sqrt{E}}$
Acceptance	$ \cos \theta < 0.98$
mask	120 mrad
beampipe	3 cm
small angle tagger	$\theta_{min} = 40 \text{ mrad}$

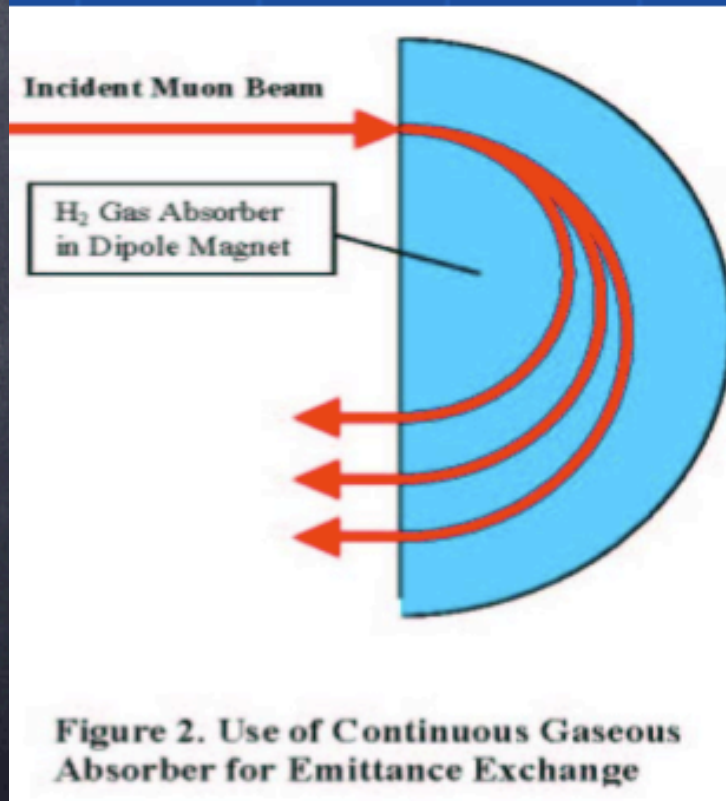
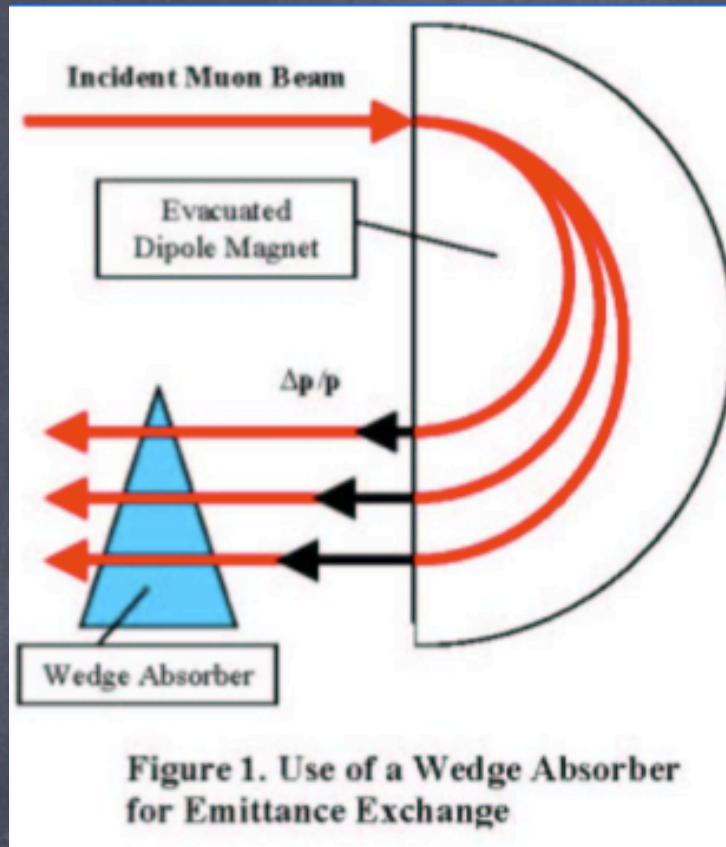
- My comments on detector technology mainly based on current efforts within the ILC community

イオンビーム冷却の原理



- 1 初期のビームサイズ（バスケットボール）
- 2 ビームを吸収材料に照射
- 3 イオン化反応によりミュー粒子の運動量が失われる
- 4 RF加速装置によって、一方向のビーム運動量が再生される
- 5 初期のビームの大きさよりも終期の方が小さくなる

エミッタンス交換過程



先の過程では横方向にしかビームサイズを縮小することしかできない。

縦方向にもビームサイズを縮小するために、エミッタンス交換過程を加える。

双極子磁石を使うことによって、ビームを運動量に沿って分布し直す。

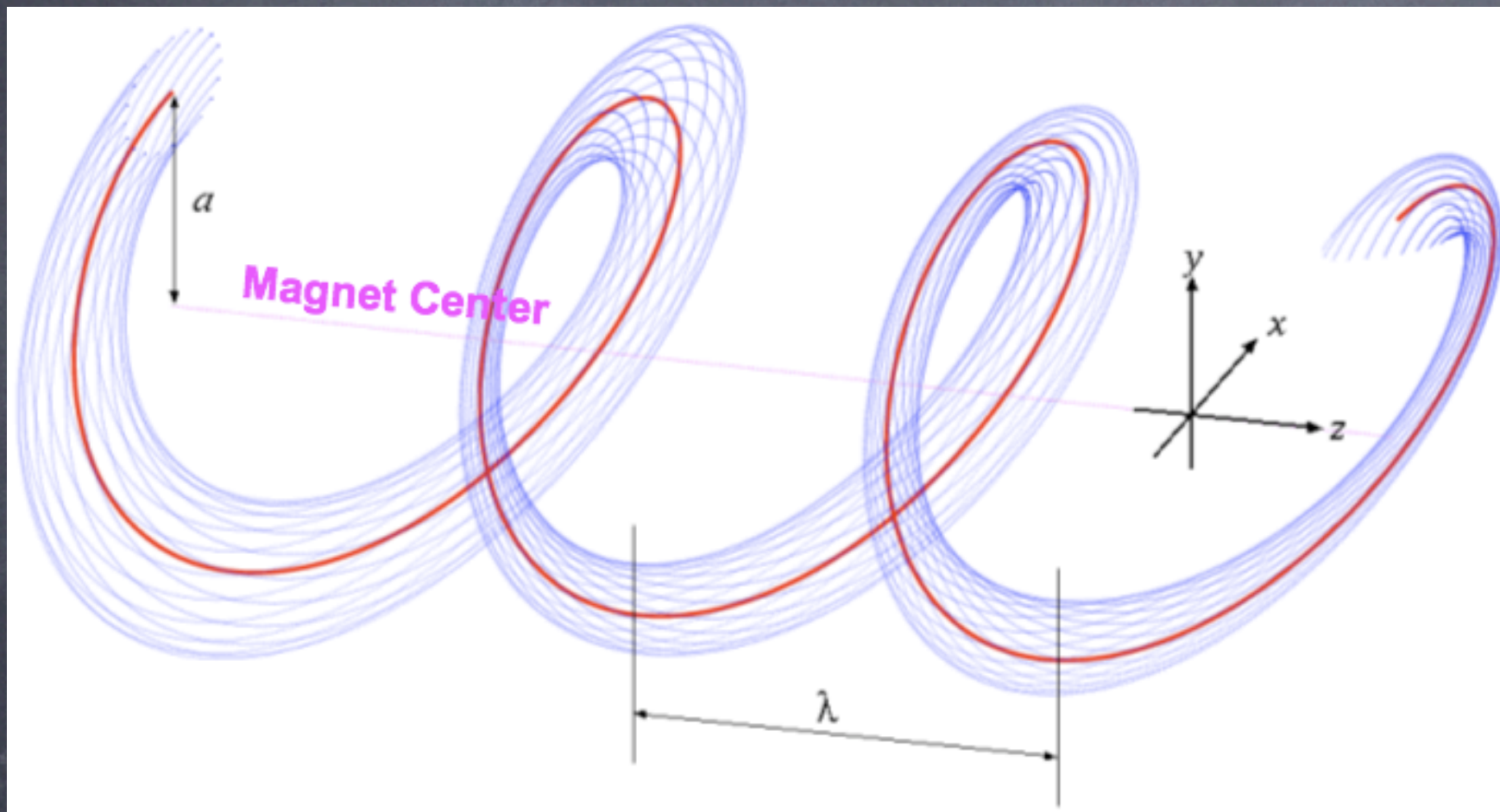
後にウェッジ型の吸収材を置くことによって、吸収材内の道程長さを調節して、縦方向のサイズをかえることができる。

上の設計をさらに発展させ、磁石内に水素ガスを混入することによって、連続的にエミッタンス交換をすることが出来る。

ヘリカル型冷却チャンネル

Slava & Rol PRSTAB 8041002(2005)

ヘリカル磁石内での粒子運動



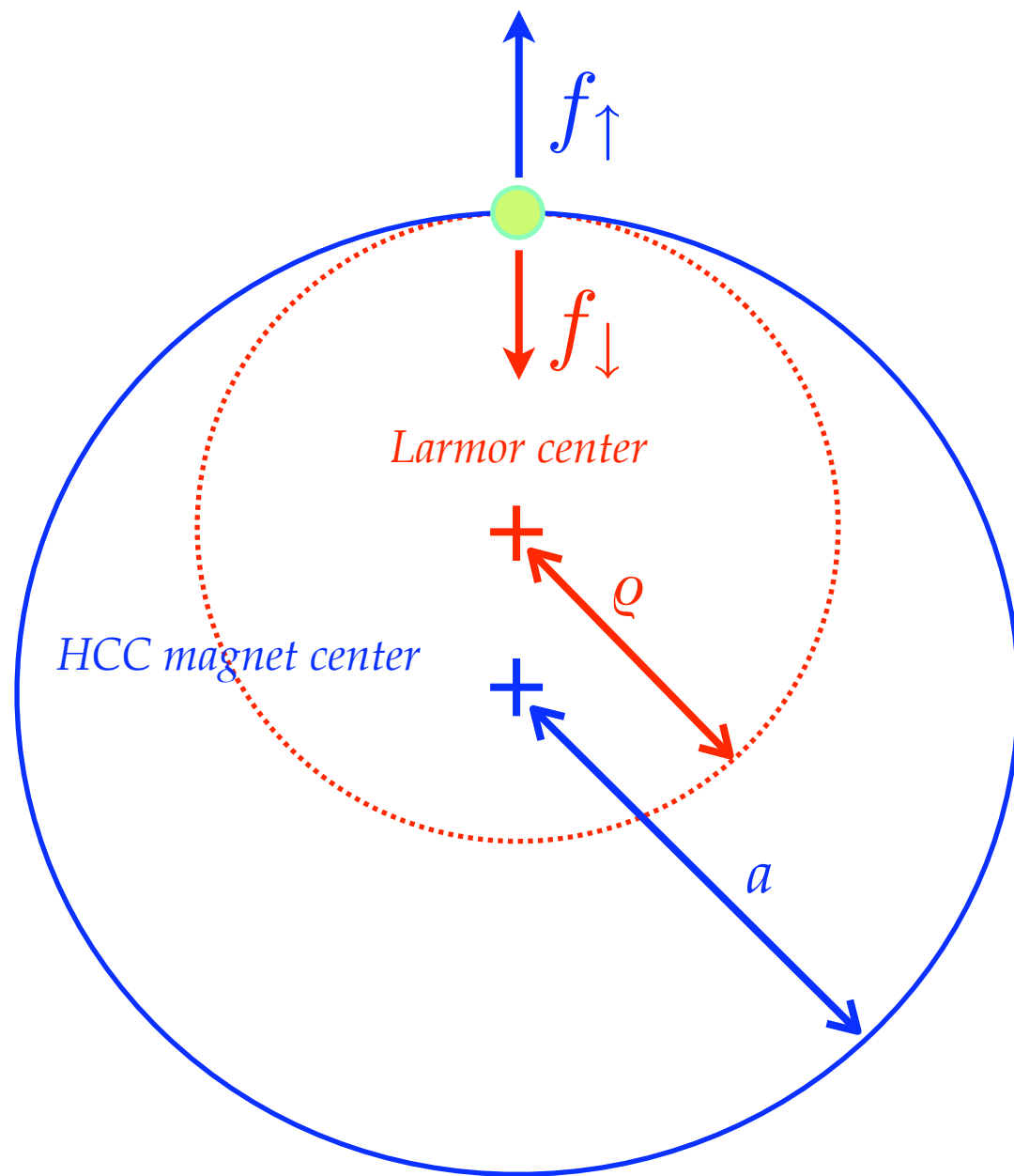
ヘリカル磁石：複合機能型磁石

ソレノイド＋ヘリカル双極子＋ヘリカル四重極子

吸収材として高圧力水素ガスを混入

更にRF加速構造が連続的に磁石の中に含まれている

ヘリカル型ミュー粒子ビーム冷却装置 の理論的解釈



Larmor motion

$$f_{\downarrow} = -\frac{e}{m_{\mu}} p_{\varphi} \cdot b_z$$

$$\rho = \frac{p_{\varphi}}{b_z}$$

Radial equation of motion with helical dipole

$$f = f_{\uparrow} + f_{\downarrow}$$

$$= \frac{e}{m_{\mu}} (p_z b_{\varphi} - p_{\varphi} b_z)$$

$$f = \gamma m r'' - \gamma m r \omega^2$$

$$p(a) = \frac{\sqrt{1 + \kappa^2}}{k} \left(b_z - \frac{1 + \kappa^2}{\kappa} b_{\varphi} \right)$$

Dispersion factor

$$\hat{D}^{-1} = \left(\frac{a}{p} \frac{dp}{da} \right) = \frac{\kappa^2 + (1 - \kappa^2)q}{1 + \kappa^2} + g$$

$$g = - \frac{(1 + \kappa^2)^{3/2}}{pk^2} \frac{\delta b_\varphi}{\delta a}$$

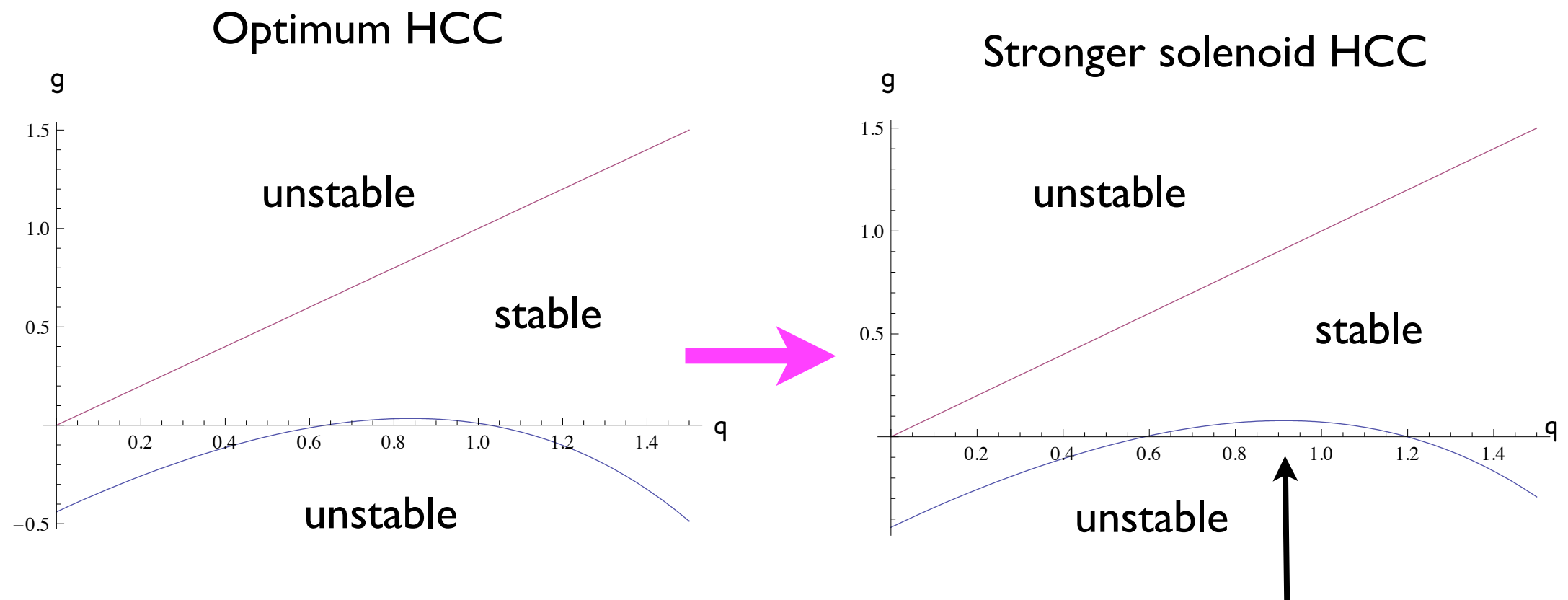
$$q = \frac{k_c}{k} - 1 = \frac{(1 + \kappa^2)^{3/2}}{kp\kappa} b_\varphi = \frac{a}{\rho} - 1$$

Important parameter to design HCC: $\hat{D}, q$

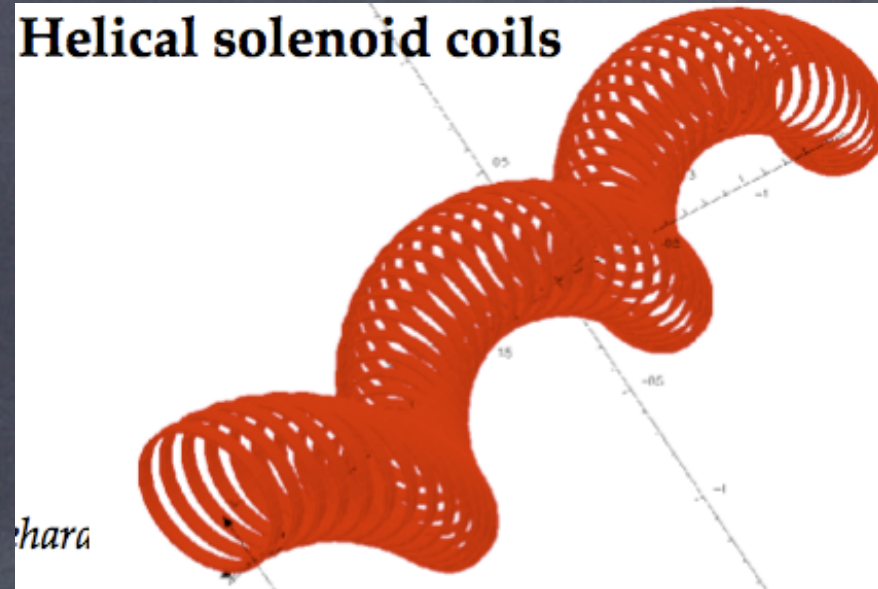
Stability condition is

$$0 < \left(\frac{2q + \kappa^2}{1 + \kappa^2} - \hat{D}^{-1} \right) \hat{D}^{-1} < \frac{1}{4} \left(1 + \frac{q^2}{1 + \kappa^2} \right)^2$$

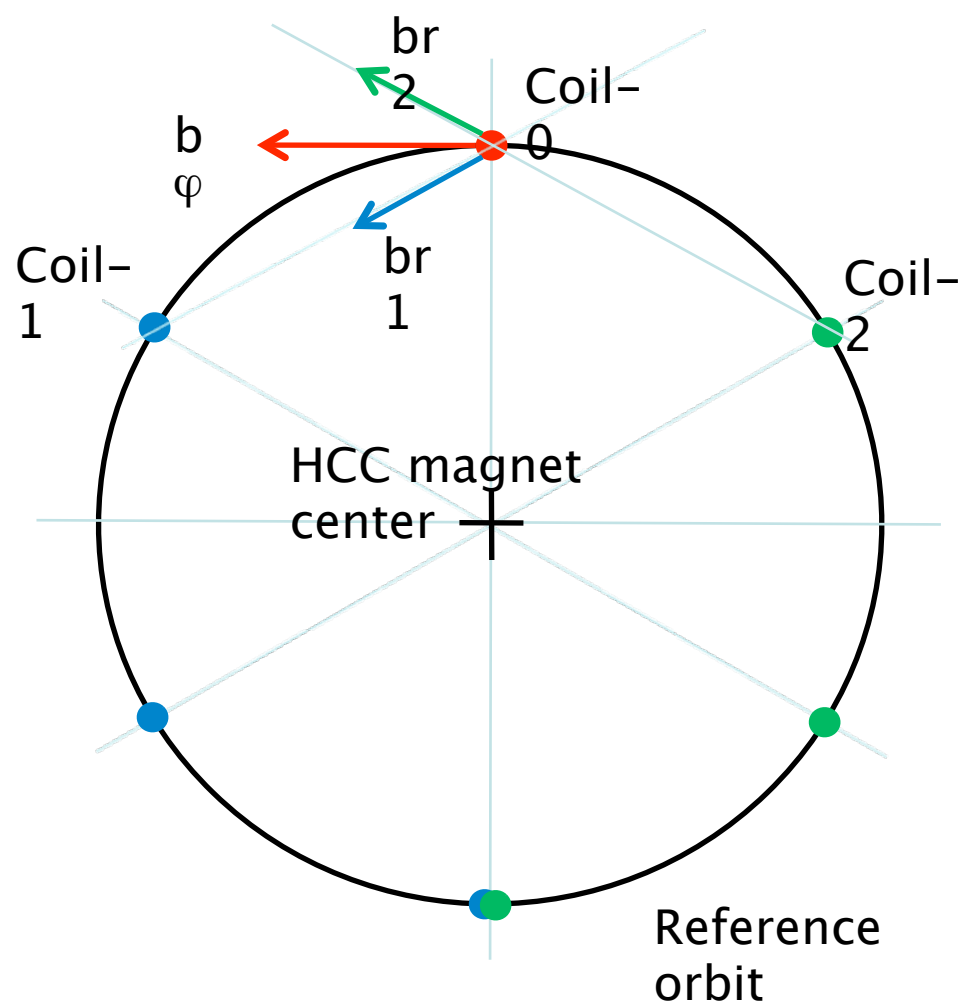
Higher $b_z \rightarrow \kappa > 1$



ヘリカル磁石の設計

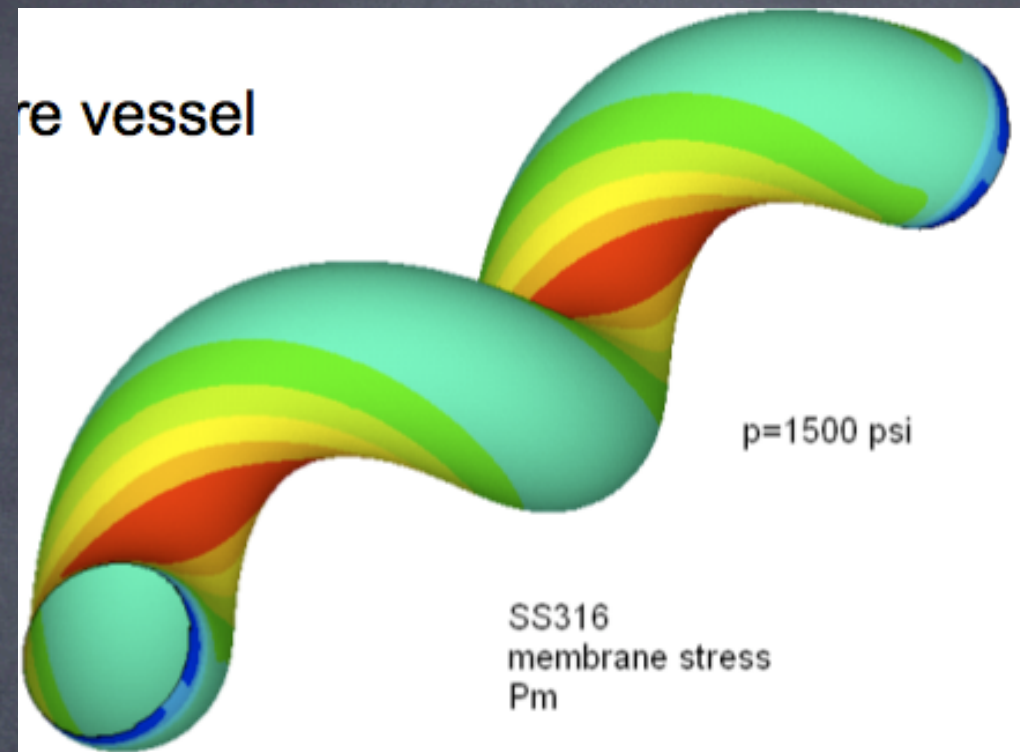


ソレノイド型のリングをヘリカル形に並べるだけで、自然にヘリカル磁石が完成する。



- Need to adjust (B_z , b , b') on red dot
- Blue dot and green dot are centers of upstream (Coil-1) and downstream (Coil-2) HS coils
- Br on red dot is zero
- B_z and b are tuned by the location of HS coil
- b' is tuned by the coil size

水素ガス封印容器



水素ガスの圧力は常温で200気圧であるが、圧力を下げるため、ガス封印容器は液体窒素温度まで下げる。これにより実際のガス圧は50気圧まで下げることができる。

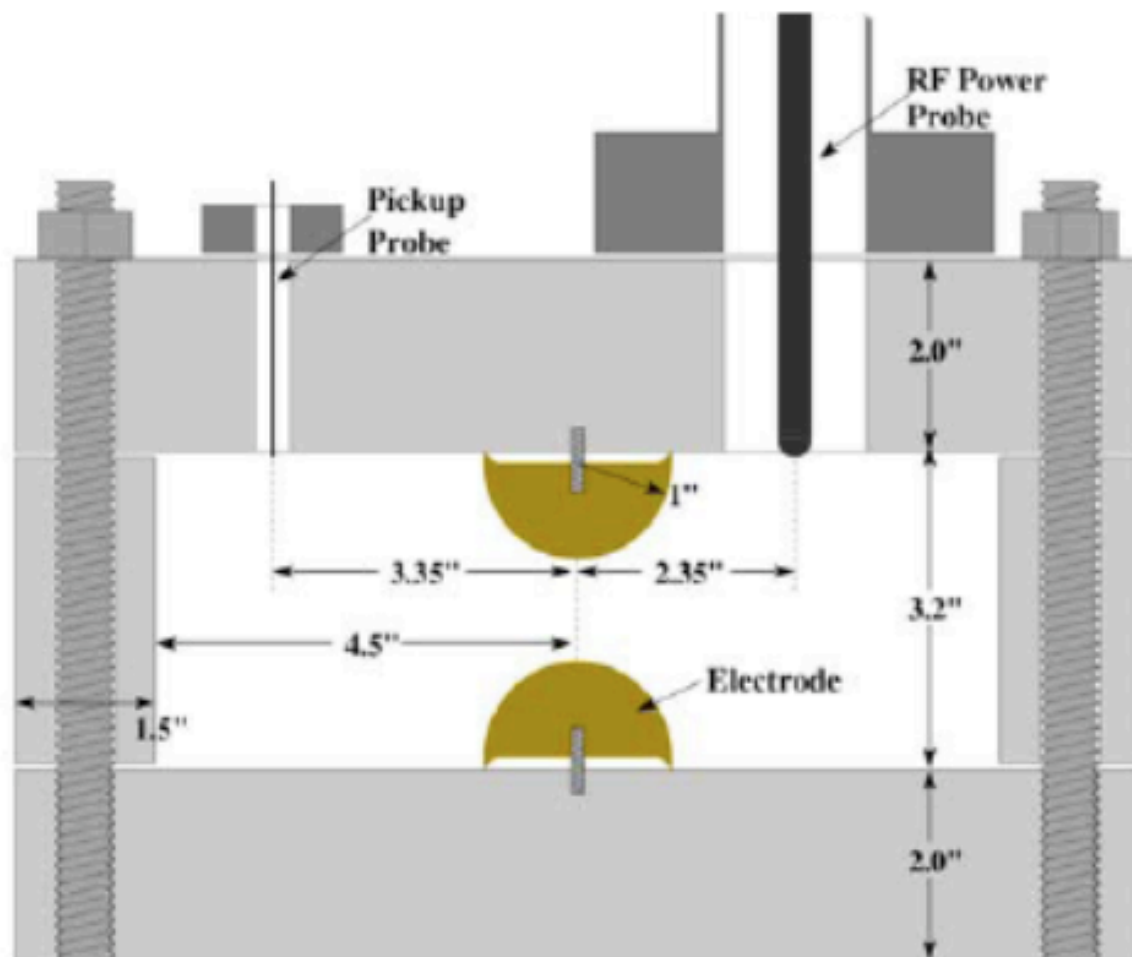
左の図は50気圧のガスを封入する容器はどれだけ壁の厚さが必要かを計算した。

Table 1 Summary of the Result for P=50 ATM (750 psi)

P=50 ATM (750 psi)			SS 316		Inconel 718	
Pipe center/ Rh (m)	Inner bore radius/ Rtube (m)	L (period) (m)	t _ shell	t _ end plate	t _ shell	t _ end plate
1st design			2.1"	2.5"	1.2"	1.4"
0.318	0.574	2				
2nd design			1"	1.45"	0.5"	1"
0.159	0.287	1				
Initial design			0.75"	1.45"	0.35"	1"
0.2546	0.255	1.6				

高圧水素ガスを封入したRFセルの研究

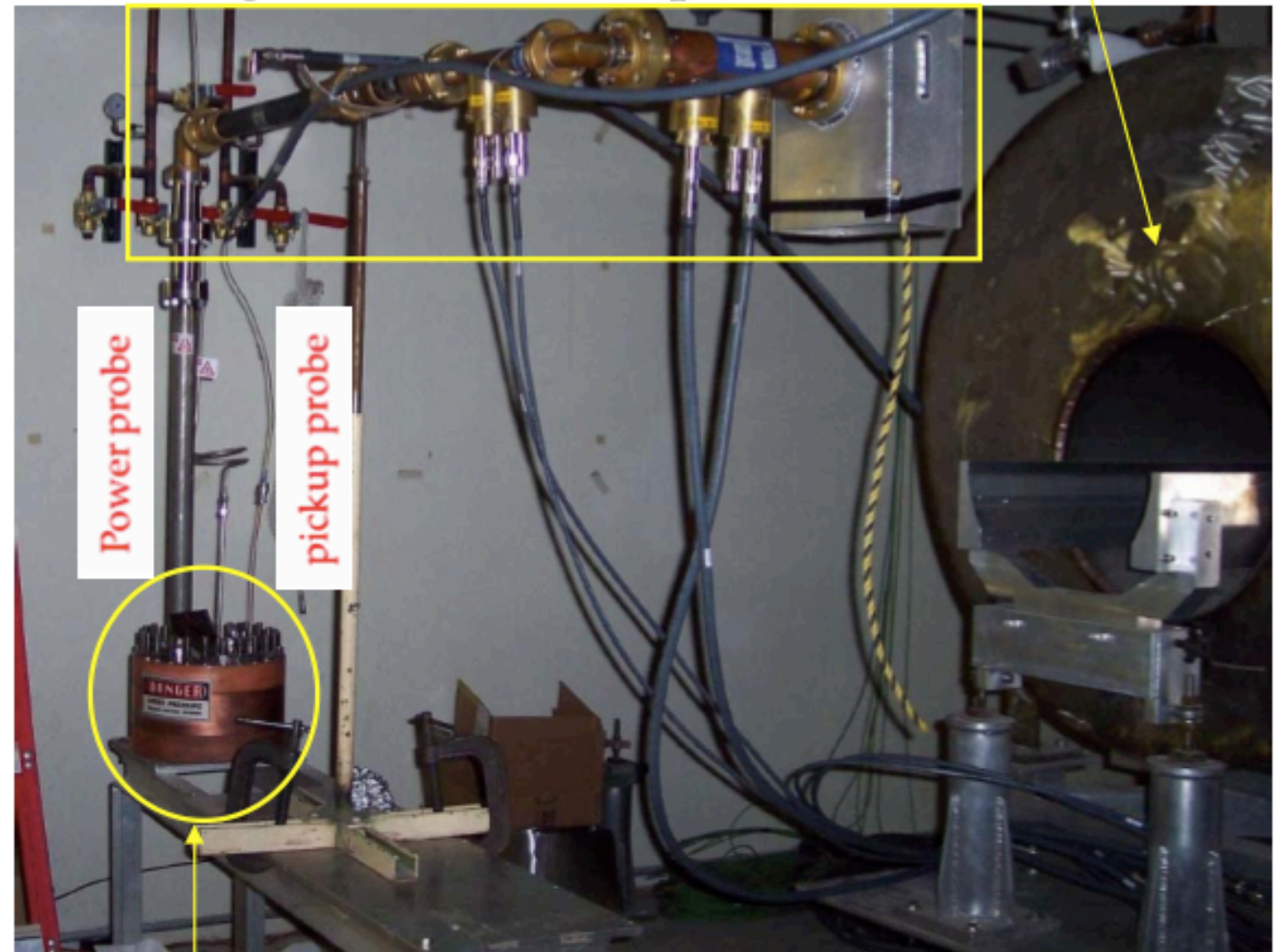
805 MHz High Pressurized RF cavity



- Electrodes can be changed (Cu, Al, Sn)
- It can be pressurized up to 1600 psi

Waveguide + coax adapter

5 T solenoid



800 MHz
Mark II
Test Cell

水素ガスは吸収材の役割を果たす

RF崩壊電圧の測定

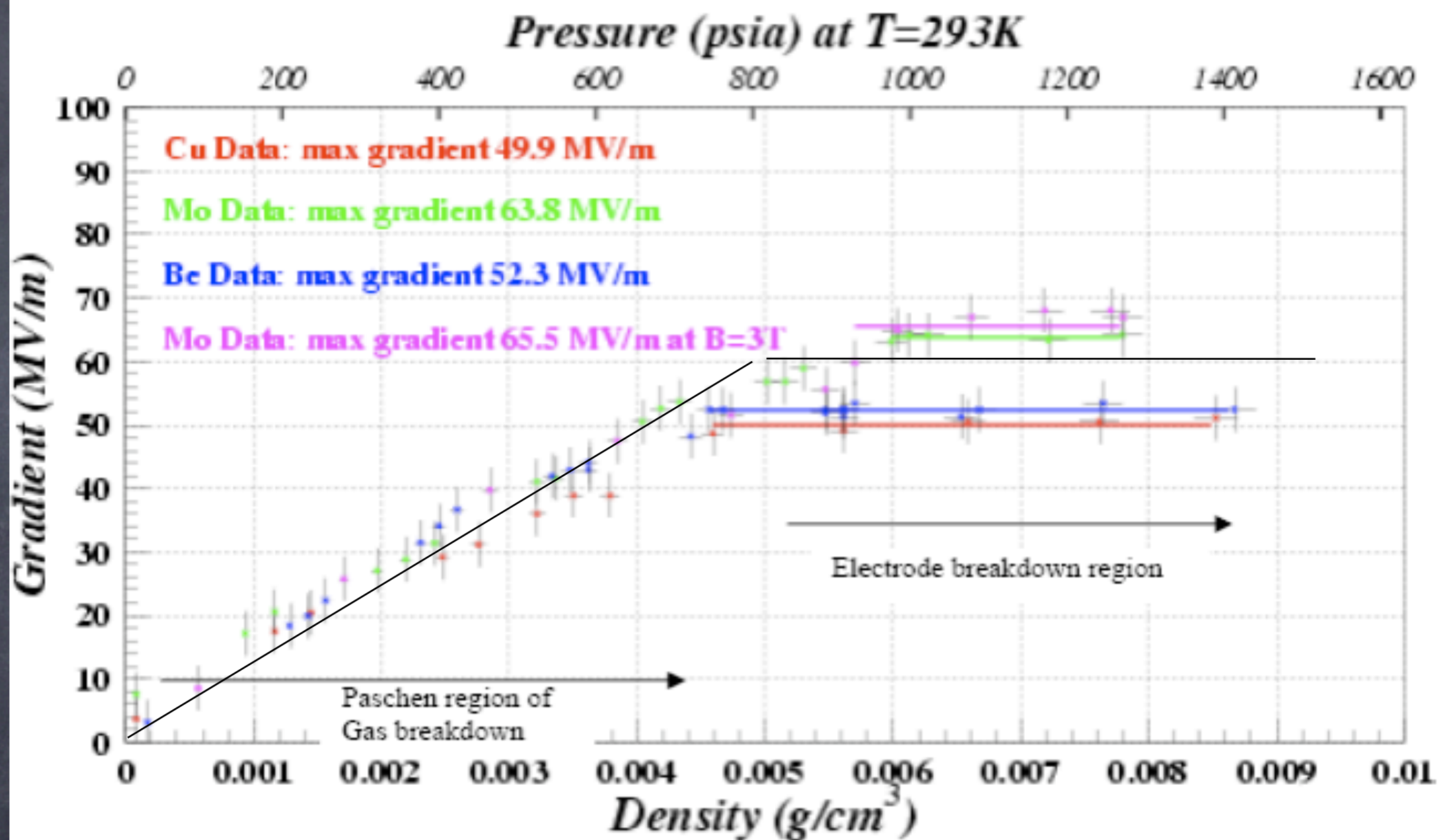


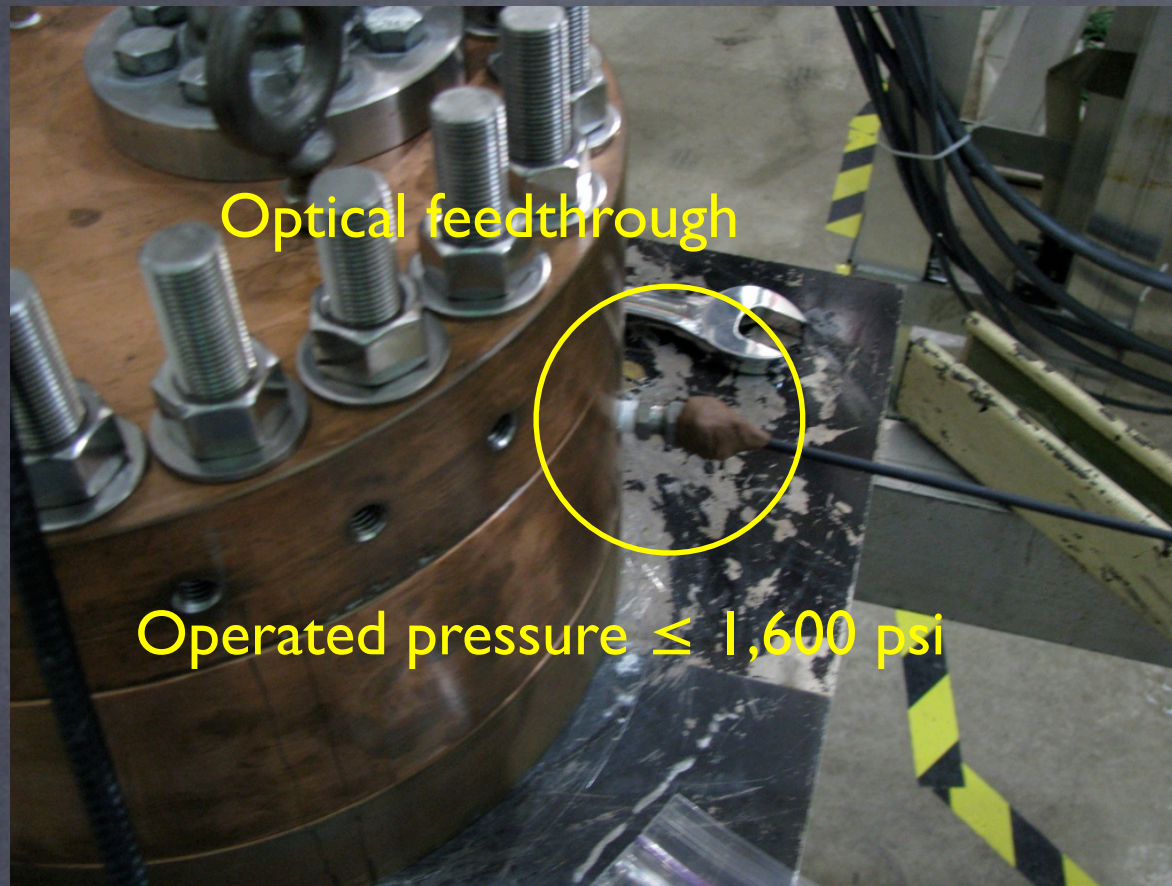
Figure 3: Measurements of the maximum stable TC gradient as a function of hydrogen gas pressure at 800 MHz with no magnetic field for three different electrode materials, copper (red), molybdenum (green), and beryllium (blue). As the pressure increases, the mean free path for ion collisions shortens so that the maximum gradient increases linearly with pressure. At sufficiently high pressure, the maximum gradient is determined by electrode breakdown and has little if any dependence on pressure. Unlike predictions for evacuated cavities, the Cu and Be electrodes behave almost identically while the Mo electrodes allow a maximum stable gradient that is 28% higher. The cavity was also operated in a 3 T solenoidal magnetic field with Mo electrodes (magenta); these data show no dependence on the external magnetic field, achieving the same maximum stable gradient as with no magnetic field.

なぜRF崩壊電圧がガス密度に依存するか？

- RF崩壊は電子が電極間を導通させることによって起こると仮定する
- 道程距離は全反応断面積に逆比例して短くなる
- 道程距離は粒子密度に逆比例して短くなる
- 上のことから、粒子密度を上げてやると、より高い加速電圧でRF構造が崩壊する
- あるガス圧以上になると、別のプロセスでRF崩壊が生じることがこの実験で分かった
- この新しいプロセスによるRF崩壊では、電極の材質に依存している
- 現在もこの実験を進行している

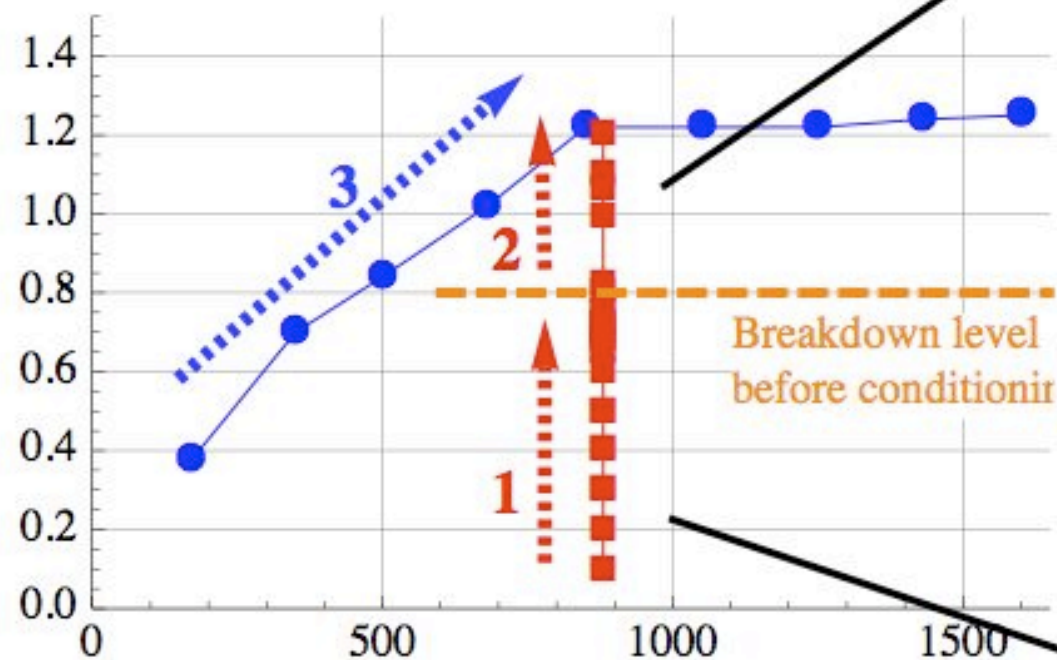
最も最近に行われた実験 (9月)

MuCool Test Area@Fermilab

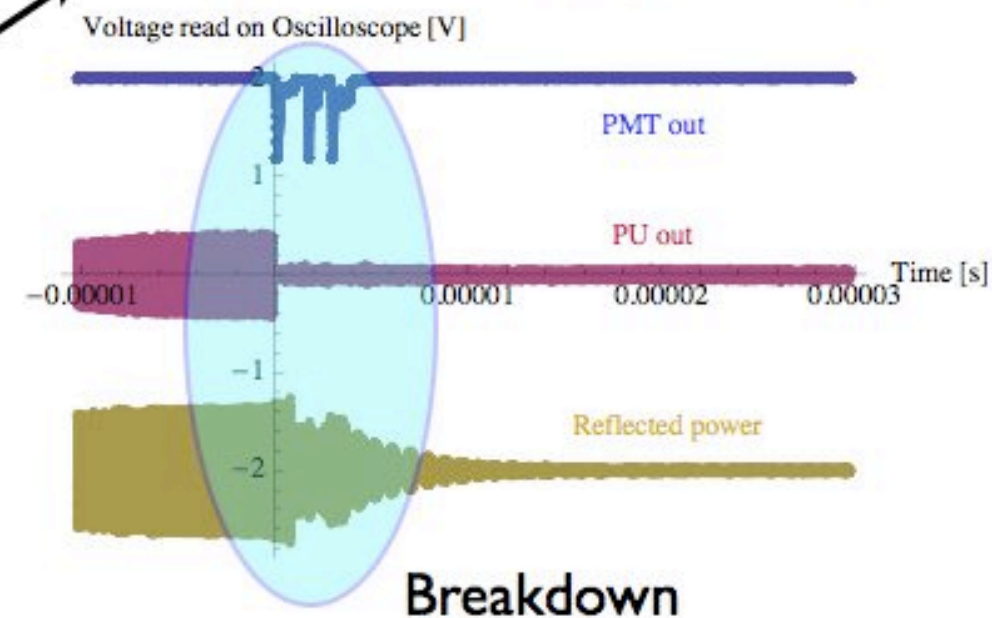


Process Fast Signal Measurement

PU signal [V]

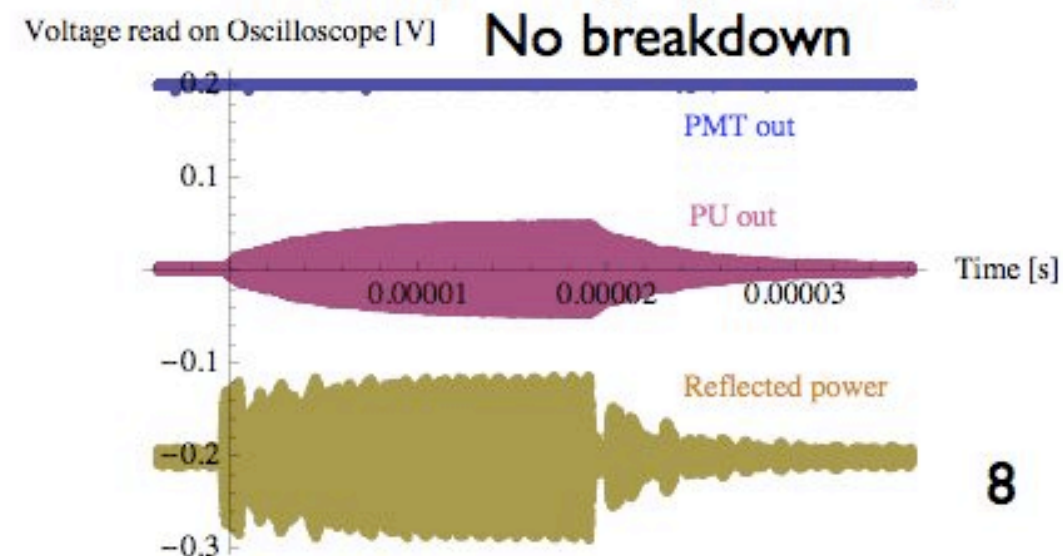


High pickup voltage (process 2)



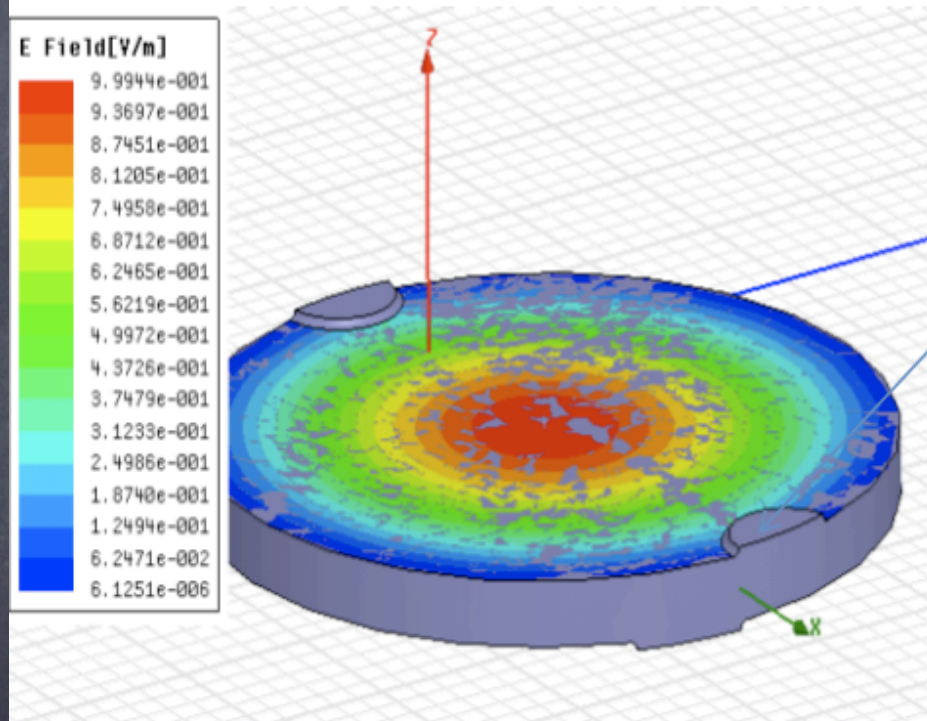
H2 Gas Pressure [psi]

Low pickup voltage (process 1)



どうやってRFをヘリカル磁石に導入するか？

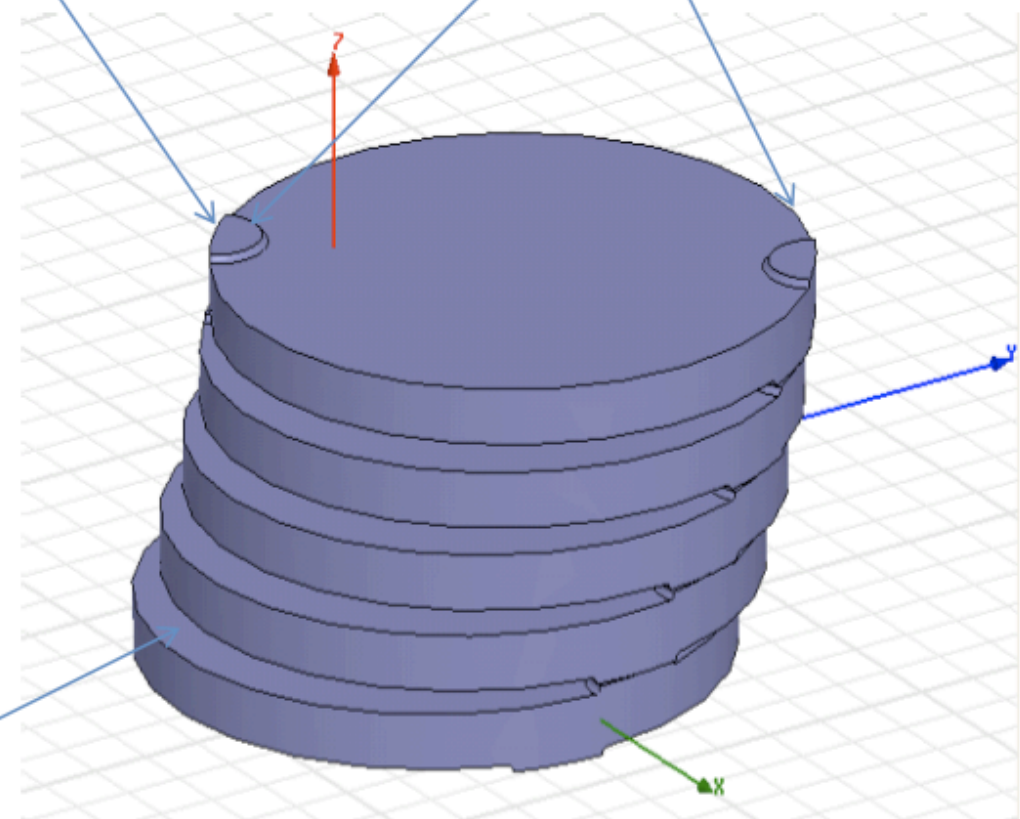
Side-coupled pillboxes to obtain a travelling-wave structure **without** el. fields exceeding the max. pillbox value in the centre



Z-axis is the helix centre,

Radius of the coupling holes = 40 mm, rounded edges, radius = 5mm.

Here E_z is low !



phase advance/cell = 36.9 deg.,
corresponding to diagonal particle
pathlength 7 cm at $\beta = 0.92$,
pillbox diam. = 500 mm,
pillbox thickness = 40 mm,
Cu. disc thickness between cavities = 10 mm
(for heat transport and room for grid or foil)

Series of HCCs

1st HCC: $\lambda=2.0$ m, $\kappa=1.0$

Primary HS:

Inner R = 650 mm, Outer R = 680 mm

Current density = -69 A/mm²

Correction HS:

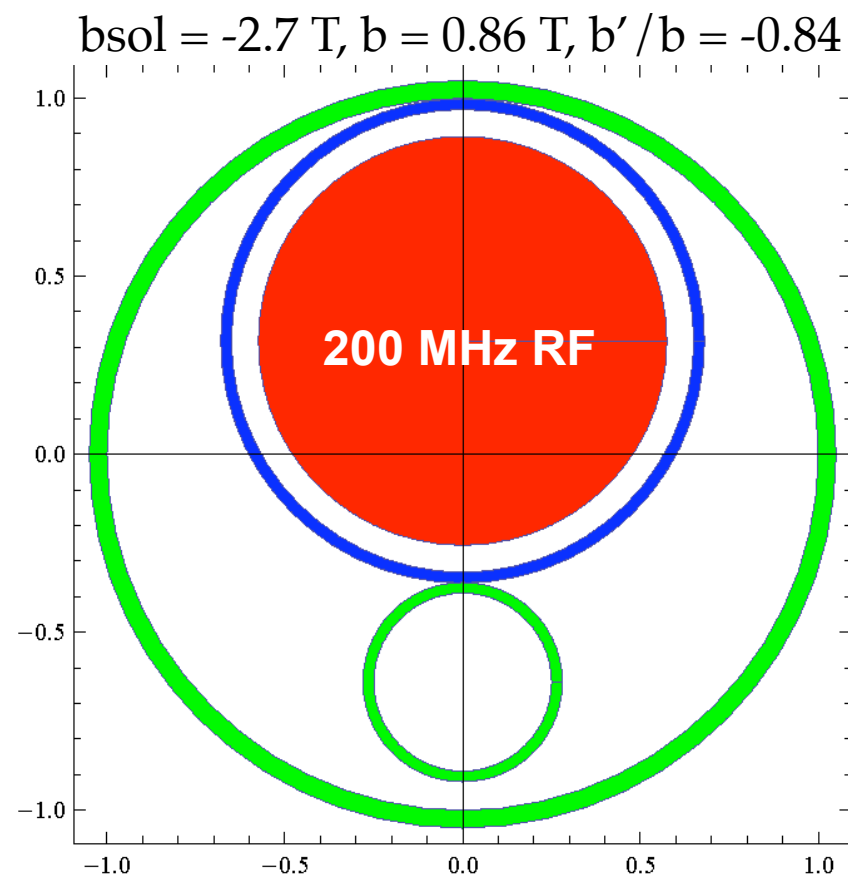
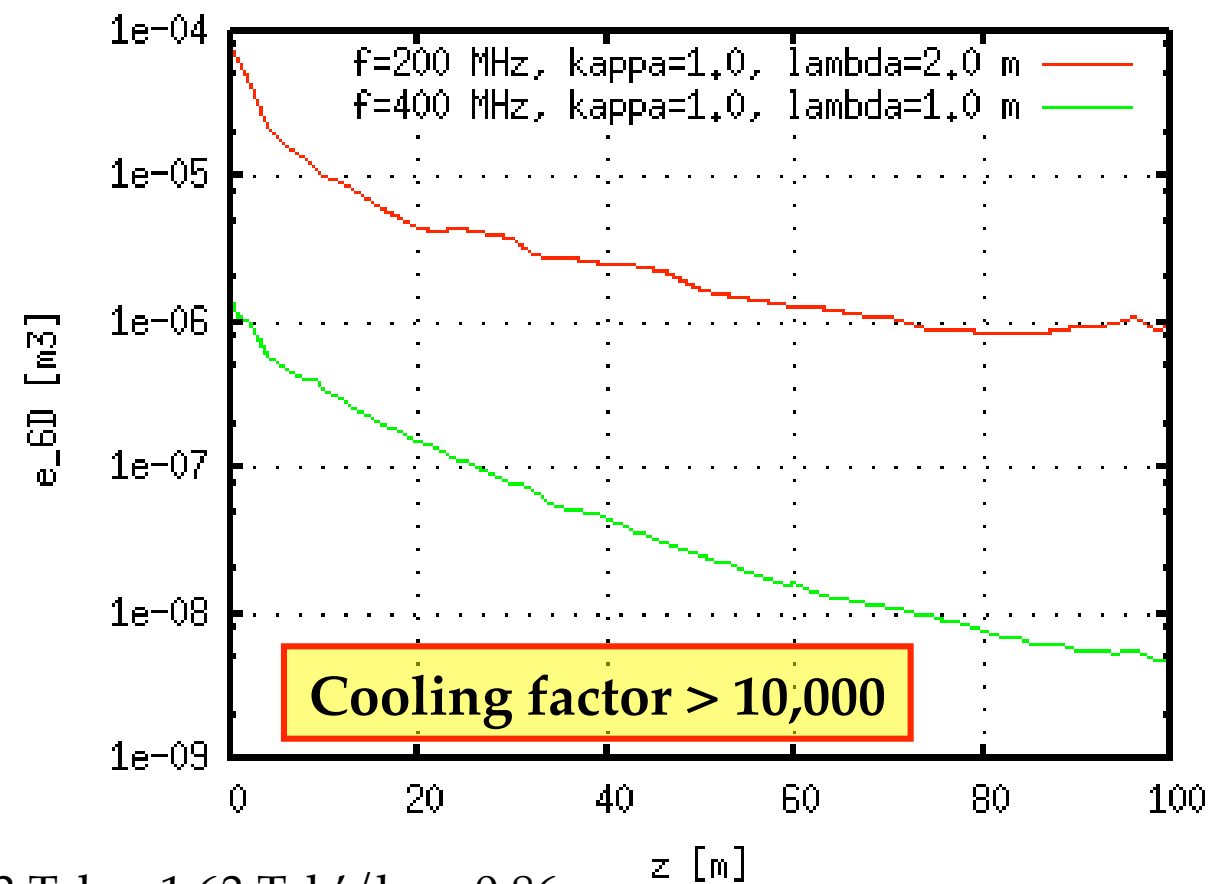
Inner R = 250 mm, Outer R = 280 mm

Current density = 414 A/mm²

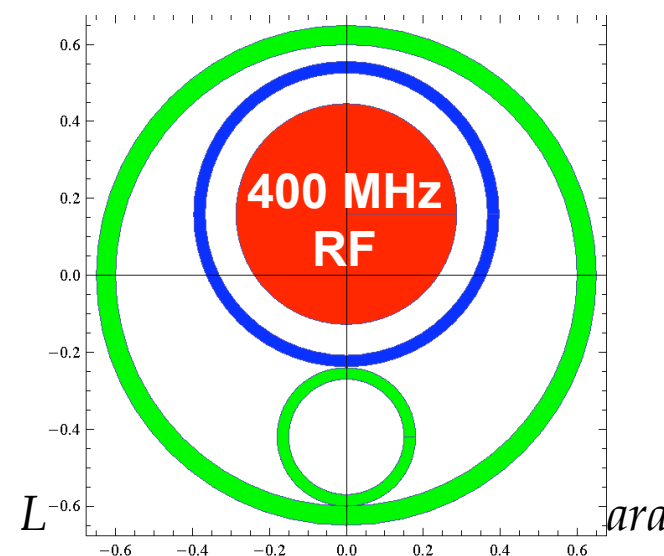
Solenoid:

Inner R = 1000 mm, Outer R = 1050 mm

Current density = -11 A/mm²



$b_{sol} = -5.3$ T, $b = 1.63$ T, $b'/b = -0.86$



2nd HCC: $\lambda=1.0$ m, $\kappa=1.0$

Primary HS:

Inner R = 367 mm, Outer R = 397 mm

Current density = -129 A/mm²

Correction HS:

Inner R = 150 mm, Outer R = 180 mm

Current density = 387 A/mm²

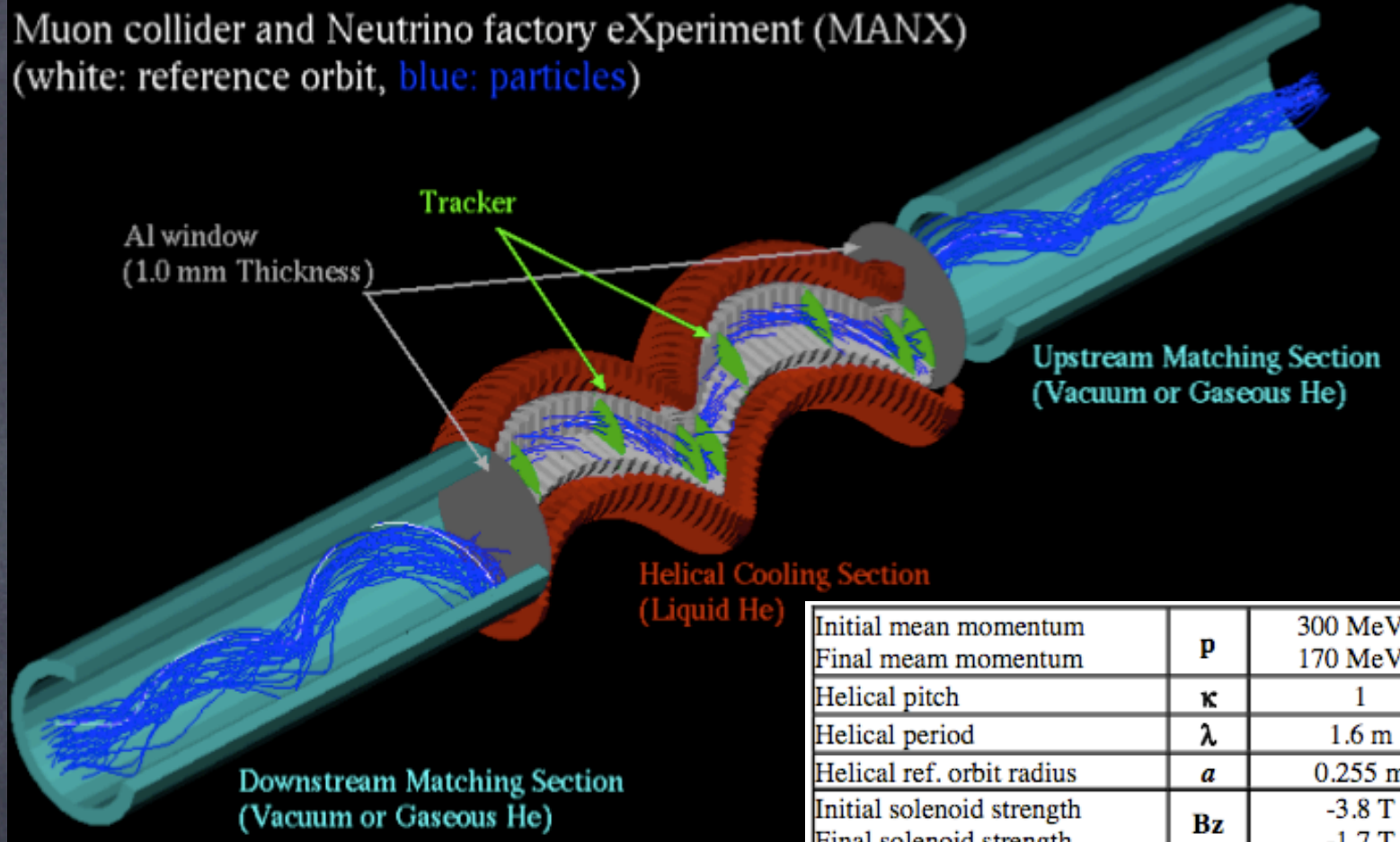
Solenoid:

Inner R = 600 mm, Outer R = 650 mm

Current density = -31 A/mm²

ヘリカル冷却チャンネルのデモ用実験

Muon collider and Neutrino factory eXperiment (MANX)
(white: reference orbit, blue: particles)



Initial mean momentum	p	300 MeV/c
Final mean momentum	p	170 MeV/c
Helical pitch	κ	1
Helical period	λ	1.6 m
Helical ref. orbit radius	a	0.255 m
Initial solenoid strength	B_z	-3.8 T
Final solenoid strength	B_z	-1.7 T
Initial helical dipole strength	b	1.2 T
Final helical dipole strength	b	0.8 T
Initial helical quad. Strength	b'	-0.9 T/m
Final helical quad. Strength	b'	-0.5 T/m

Table 1: Design parameters in cooling section

Normal cooling

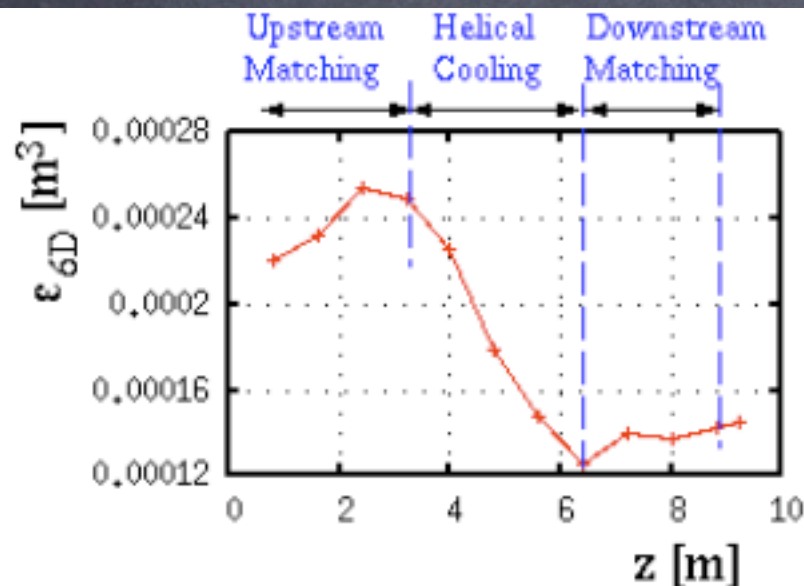


Figure 3: 6D emittance evolution in the best cooling scheme

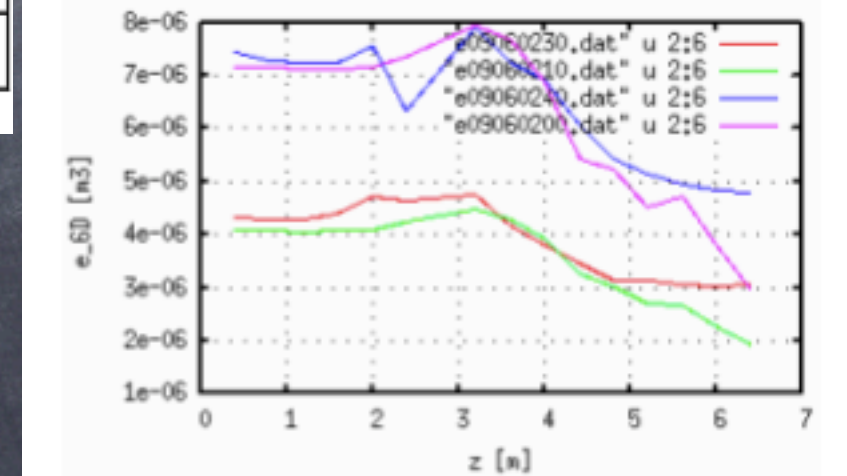
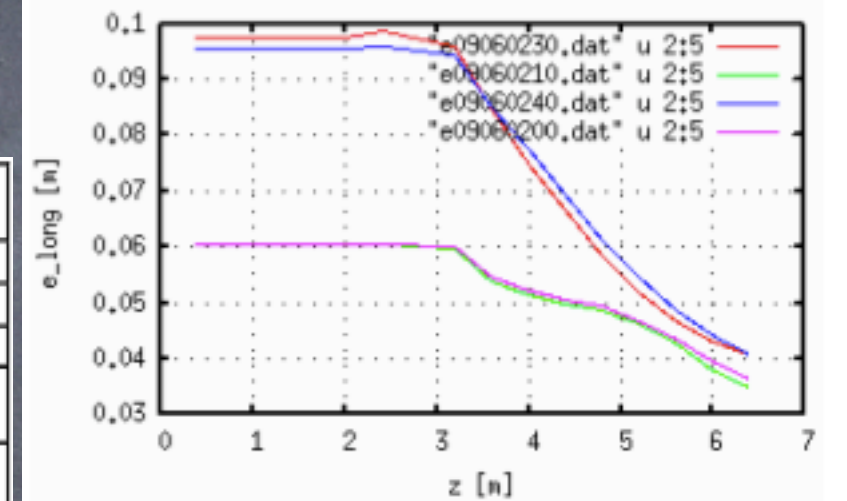
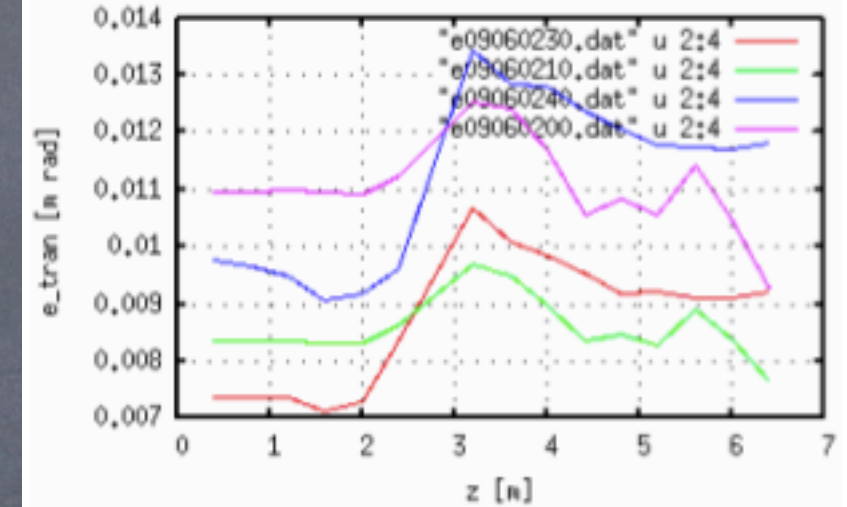


Figure 3: Transverse (top), longitudinal (middle), and 6D (bottom) emittance evolutions in the best cooling (red and blue lines) and the longitudinal only cooling (magenta and green lines) schemes.

- Design MANX field to achieve;
 - Transverse cooling factor > 1.4
 - Longitudinal cooling factor > 1.4
 - 6D cooling factor > 2.7
 - (ex. $p_{\text{init}}=300 \text{ MeV} / c \rightarrow p_{\text{final}}=150 \text{ MeV} / c$)
- Design longitudinal enhancement cooling
- Study isochronous option
- Design matching section
- Feasibility design

まとめ

- ミュー粒子衝突型加速器の開発が活発化してきている
- 主な要因は新しい冷却技術が効率よく機能する可能性が高いため
- 現在も高圧ガス充填RFセルに関して実験を行っており、結果は良い
- しかしながら、この分野の傾向として、人手が非常に足りない
- 興味のある人はぜひご連絡を！

yonehara@fnal.gov