

ミューオンコライダーって
どれくらい難しいの？

大谷 将士 (KEK)

イントロダクション

- 2次粒子で (→エミッタンス大・大強度ドライバーが必要)
2マイクロ秒の寿命を持つ (→素早く冷却・加速)
ミューオンを高輝度 (ルミノシティ) でぶつけるのが難しい。
- 一方で、新物理の明らかな兆候が見つからない中、
国内外ともにミューオンコライダーへ寄せる期待が
高まっている (ように感じる)。
- そこで、これまで行われてきた研究開発、
特にミューオンの冷却・加速を中心にレビューし、
どれくらい難しいか理解していきたい。
- 最後に自身の研究との関連と展望を述べる。

目次

- ミューオンコライダー
- これまでの研究開発のレビュー
 - US Muon Acceleration Program (MAP)
 - 冷却・加速を中心に
 - Low EMittance Muon Accelerator (LEMMA)
 - 近年、提唱された手法 [NIMA 807, 101 (2016).]
- 自身の研究 (J-PARC muon g-2/EDM)と絡めて展望

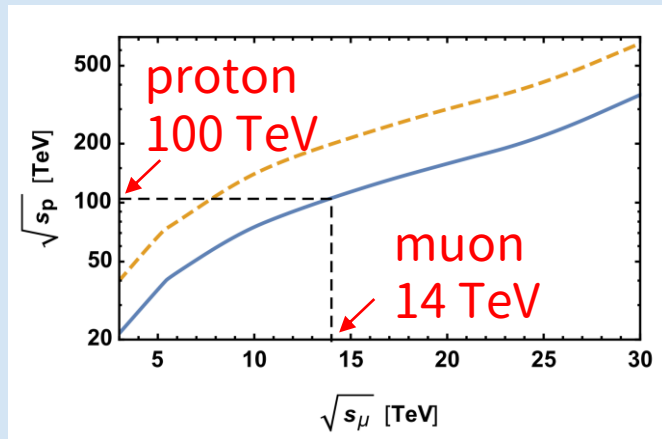
ミューオンコライダー

	proton	electron	muon
available energy in collision	☹ shared by partons	☺	☺
acceleration	☺	☹ radiation in ring → linear	☺
handling	☺	☺	☹ need cooling decay in 2 μ s

目安となる要求性能

- ~30年後にFCC-hhと相補的に新物理を探索しようと思うと、
ルミノシティ $10^{34\sim35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ @ $\sqrt{s}=14 \text{ TeV}$ が目安。

$\sqrt{s} \sim 2\text{M}$ の生成断面積の比較



LHC, FCC-hhの基本パラメータ

	LHC	HL-LHC	FCC-hh			
			Initial	Nominal		
Main parameters and geometrical aspects						
c.m. Energy (TeV)		14	100			
Circumference C (km)		26.7	97.75			
Dipole field (T)		8.33	<16			
Peak luminosity ¹ ($10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	1.0	5.0	5.0	<30.0		
Optimum	average	integrated	0.47	2.8	2.2	8

Muon collider, input to the European Strategy Update [\[link\]](#)

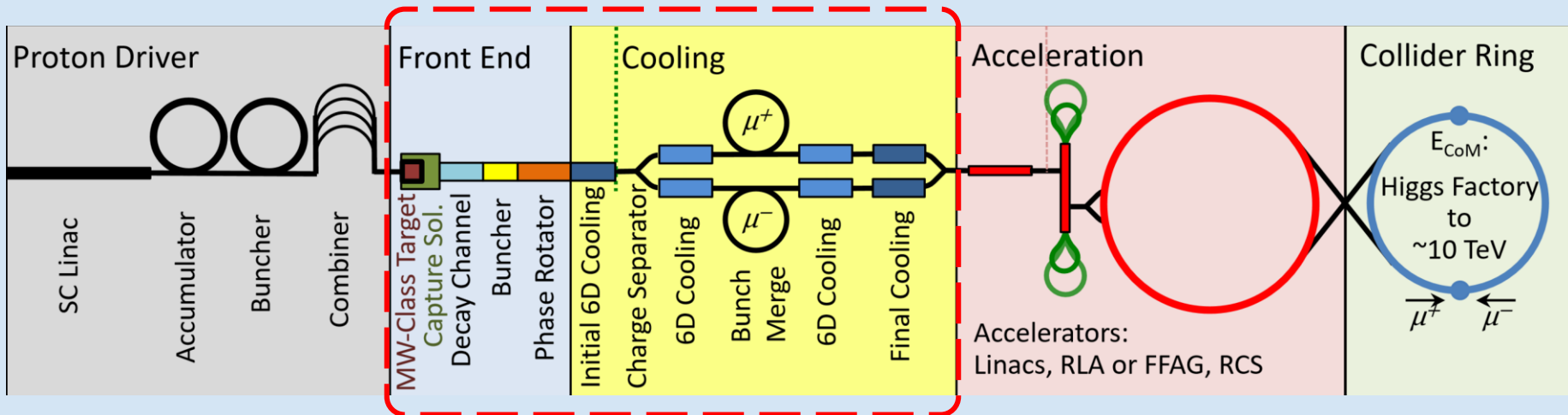
The European Physical Journal Special Topics 228 (Jul, 2019) 755–1107.

- 電弱相互作用で新粒子($\leq \sqrt{s}$)ができる反応断面積 $\sigma \cong (10 \text{ TeV}/\sqrt{s})^2 \text{ [fb]}$
- ルミノシティ $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- 5年間 (100日 $\times 5 \sim 5 \times 10^7 \text{ s}$)

➡ $N = L\sigma t = 500$ イベント

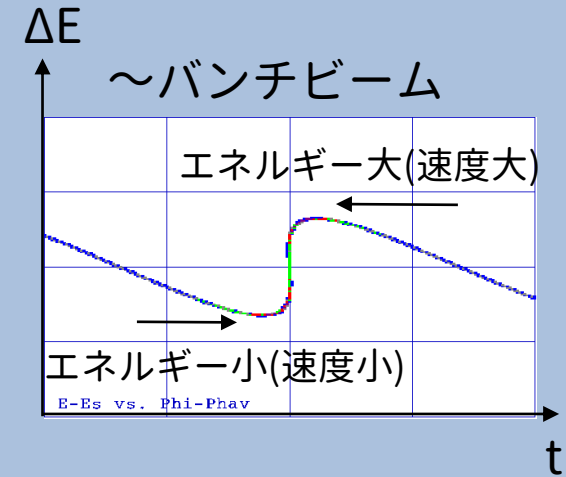
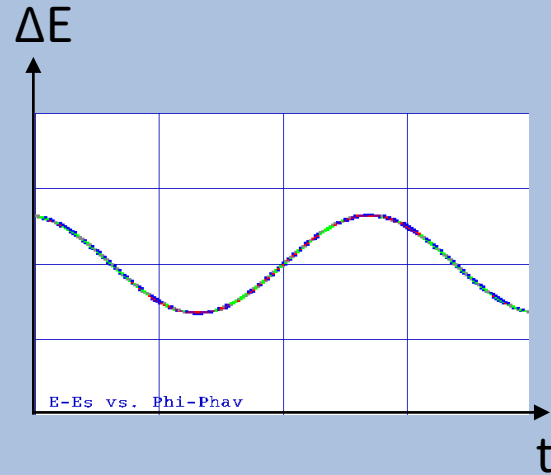
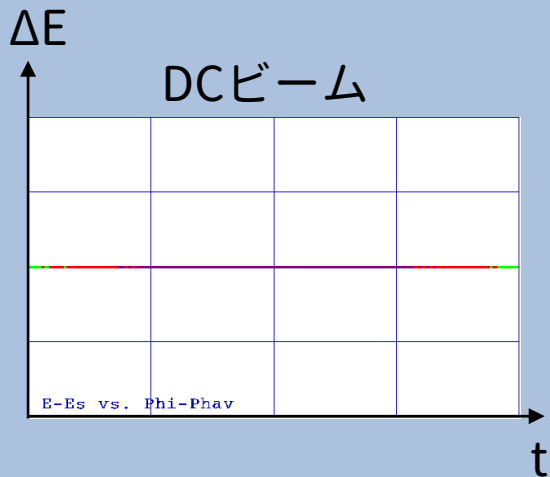
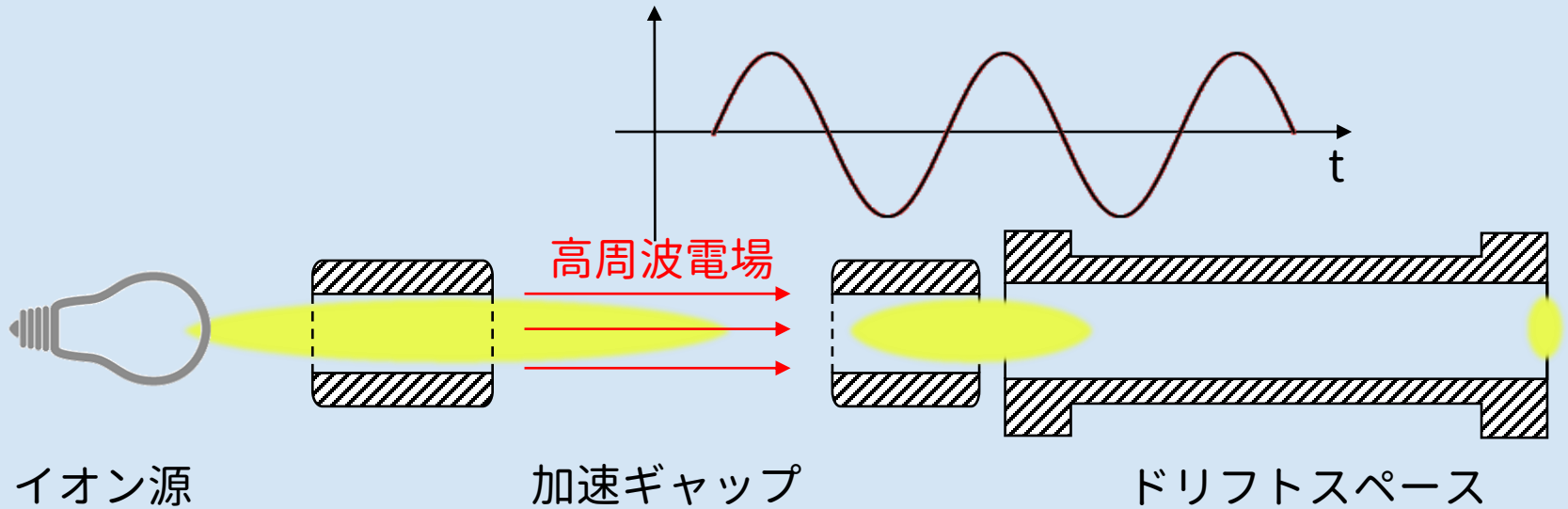
MAP

- 大強度陽子ビームでパイオン→ミューオン生成。
その後、冷やして加速。
- 2011~2018年に設計 & 要素開発 [arXiv:1808.01858]。



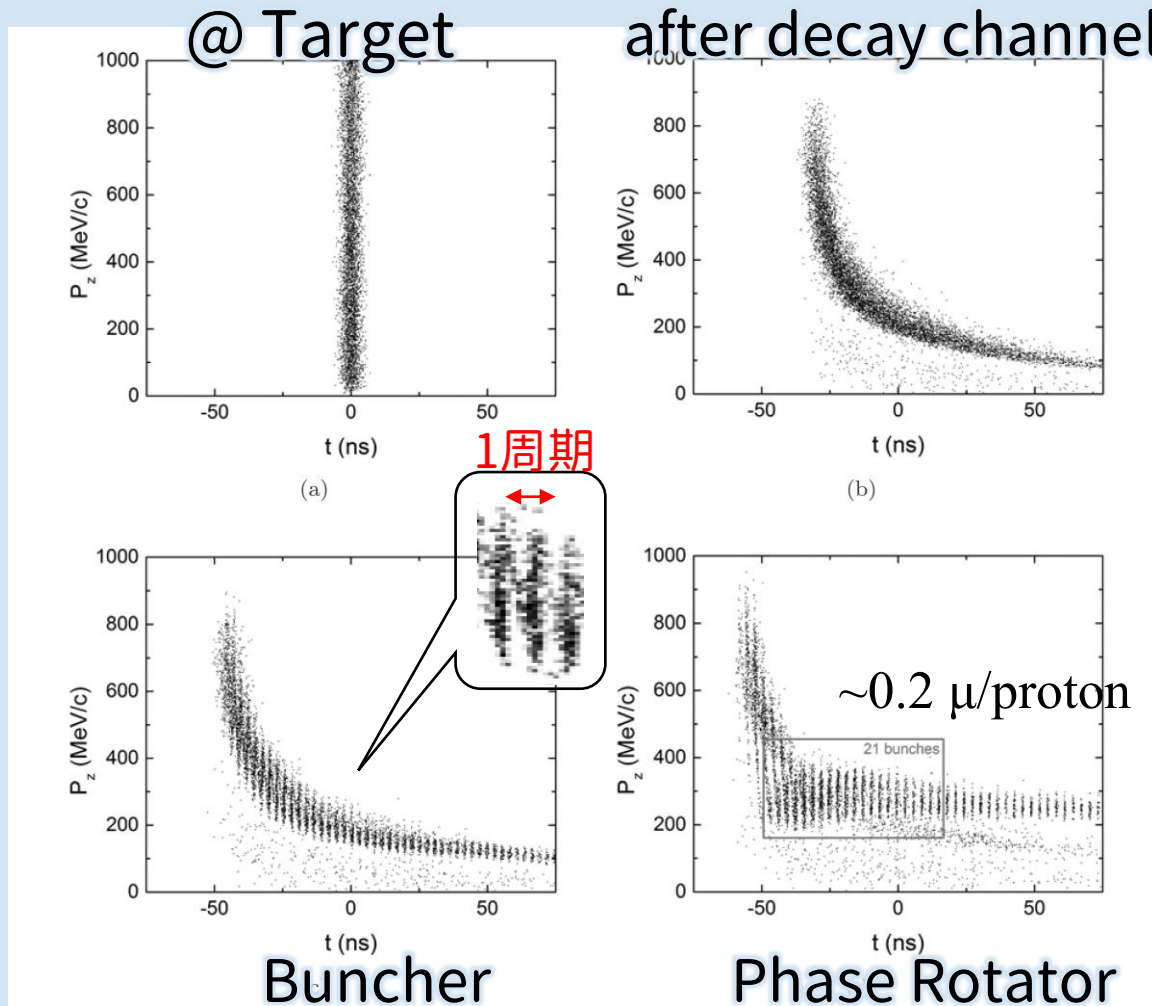
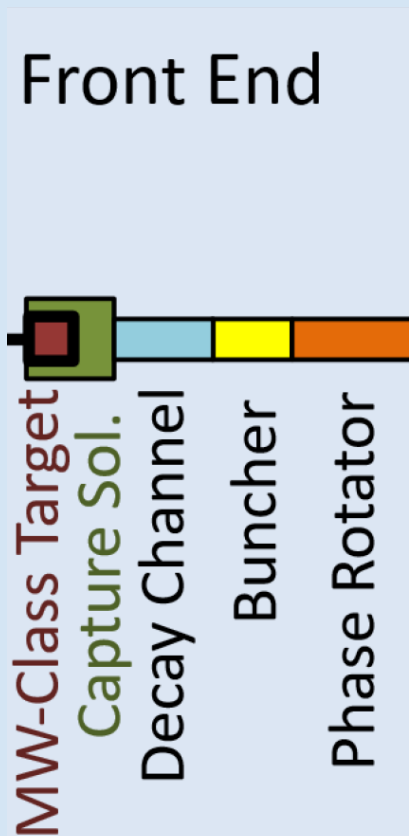
次ページから詳しく説明

高周波加速器入門:バンチング



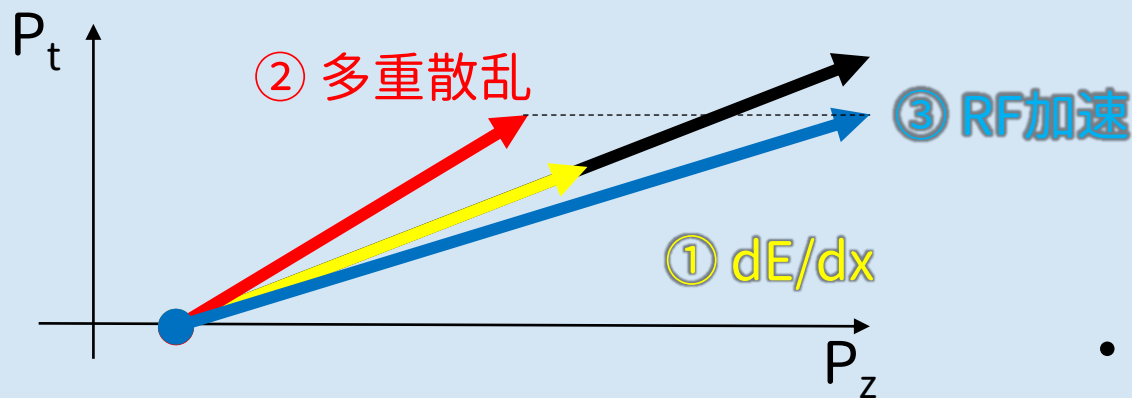
Buncher & Phase Rotator

- パルス陽子ビームでパイオン→ミュオン生成のあと、先ほどのスキームでミュオンバンチを生成



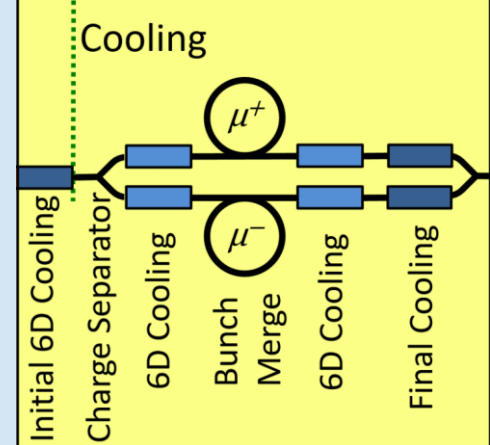
Cooling

- 寿命 $2 \mu\text{s}$ のミュオンを素早く冷却するために、イオン化冷却手法を採用

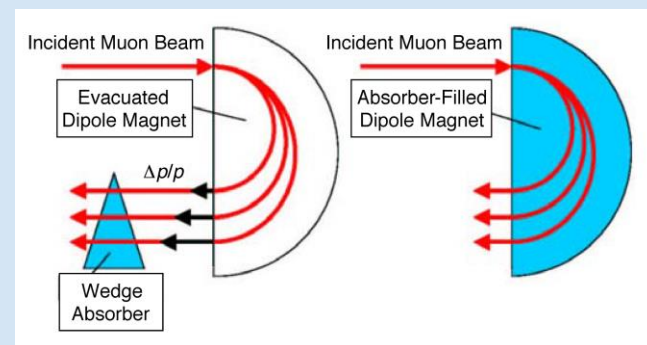


$$\frac{d\varepsilon_{\perp}}{dz} \approx -\frac{\varepsilon_{\perp}}{\beta^2 E_{\mu}} \left| \frac{dE_{\mu}}{dz} \right| + \frac{\beta_{\perp} (13.6 \text{ MeV } c^{-1})^2}{2\beta^3 E_{\mu} m_{\mu} X_0}$$

- β_{\perp} を小さく \rightarrow 強磁場
- 高周波空洞による高い加速勾配
- low Z material (large X_0)



- 縦方向 (P_z) は運動量分散 + degrader



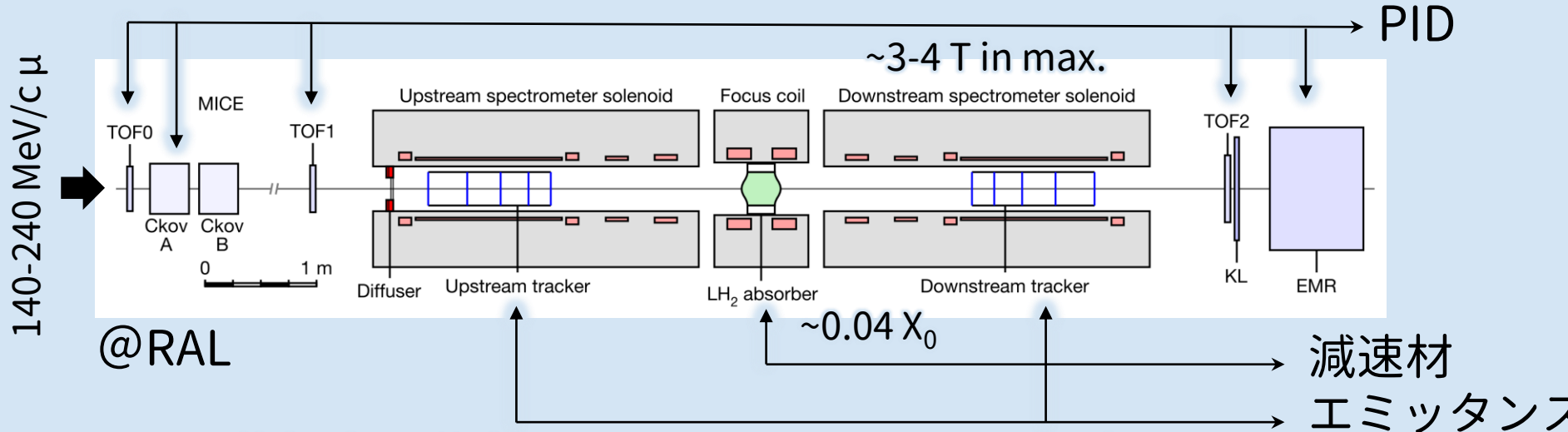
arXiv:1307.3891v1



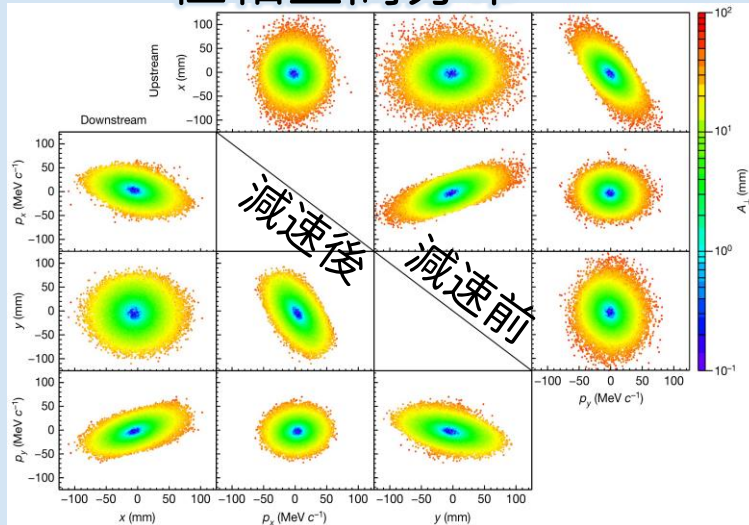
- ⊖ ビーム径大 (RF周波数、収束力 \leftrightarrow ビーム径)
- ⊖ electron loading \rightarrow 次々ページで説明

MICE (International Muon Ionization Cooling Experiment)

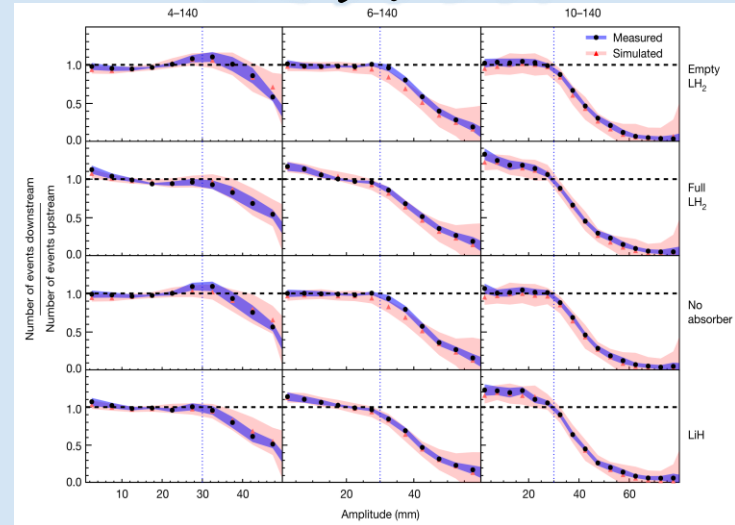
- 近年、イオン化冷却 (減速のみ) を実証 [*Nature* 578, 53-59 (2020)]



位相空間分布



~エミッタンス



→エミッタンスは数%減少

高周波加速器入門: Electron loading

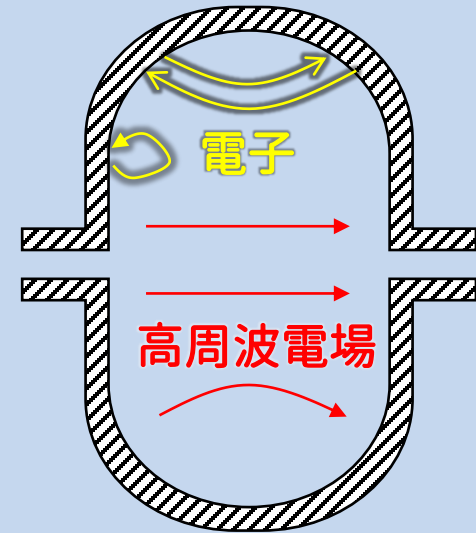
- 電解放出などで生じた電子が空洞の性能・運転に影響を与える

例1: マルチパクティング

- 2次電子放出数 > 1
- 電子加速と加速高周波が同期

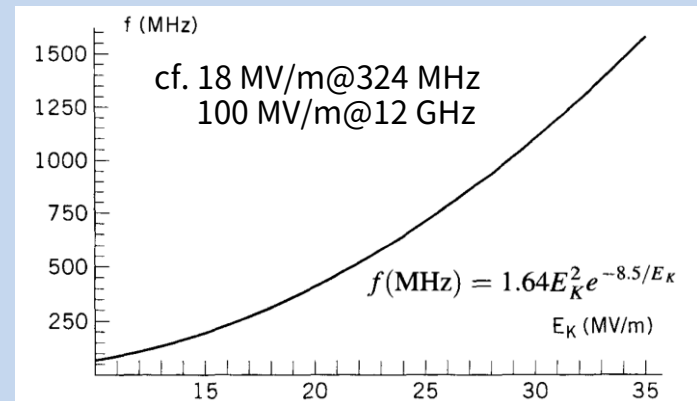


- 効率悪化 (2次電子加速で電力が消費)
- RFブレークダウン… etc



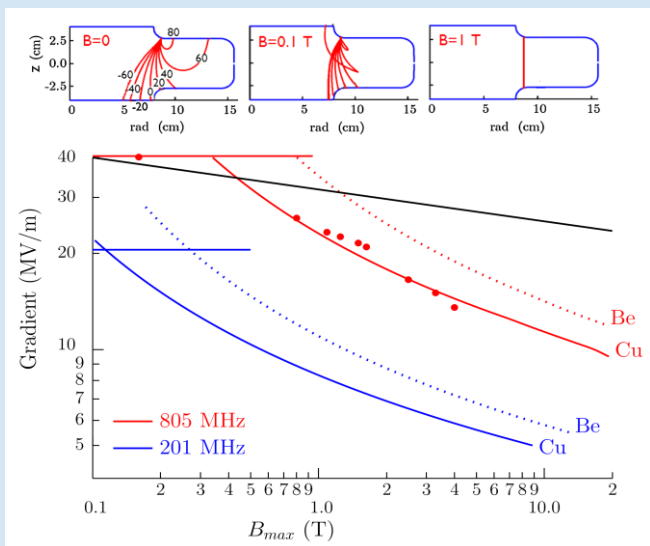
例2: RFブレークダウン

- 到達電場の目安→Kilpatrick limit (右図)
 - あくまで目安値 (例えばJ-PARCリニアックでは0.8~2×目安値)
 - 周波数大→電場大 (cf: CLIC 12 GHz)



磁場中での高周波空洞

- 特に電場//磁場の場合、全ページのローディング現象が増長
→到達可能な電場が低下
 - 一部にBe (通常用いるCuより軽くて損傷が小さい)を使った試作空洞で50MV/m@3Tを達成したという報告もある。

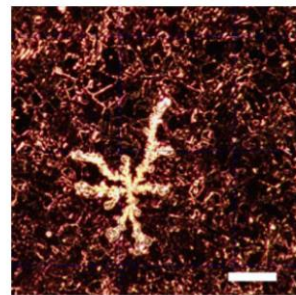


表面損傷の観察

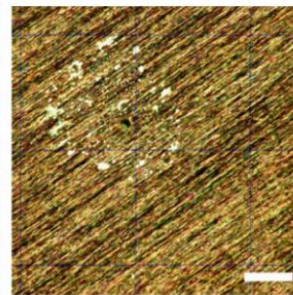
Cu @ 0T

Be @ 0T

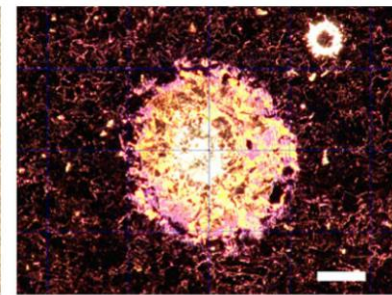
Cu @ 3T



(a)



(b)



(c)

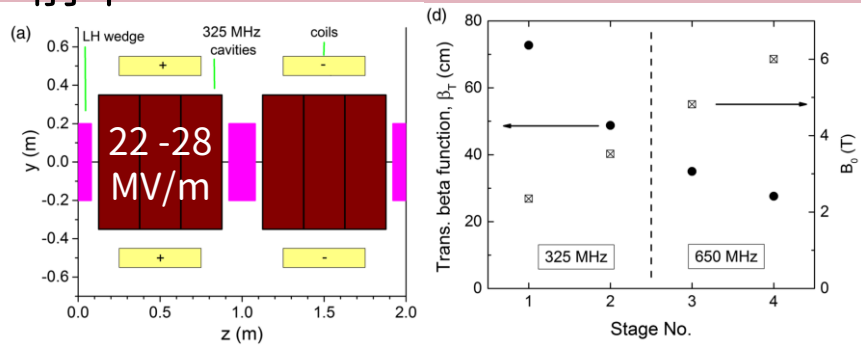
PRAB 23, 072001 (2020)

Cooling

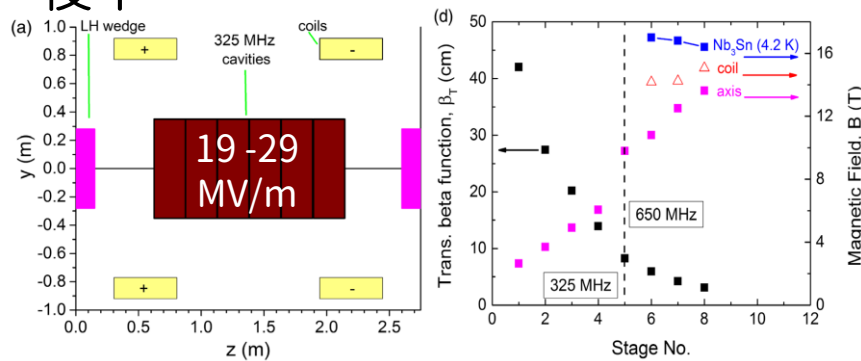
② Bunch Merge

6D Cooling (tilt solenoid + RF + degrader)

前半



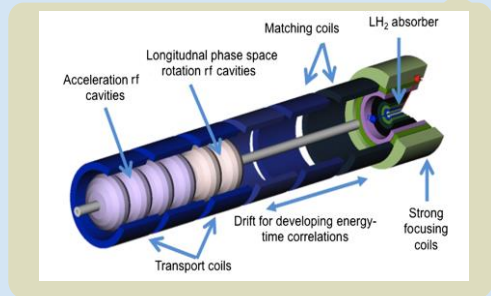
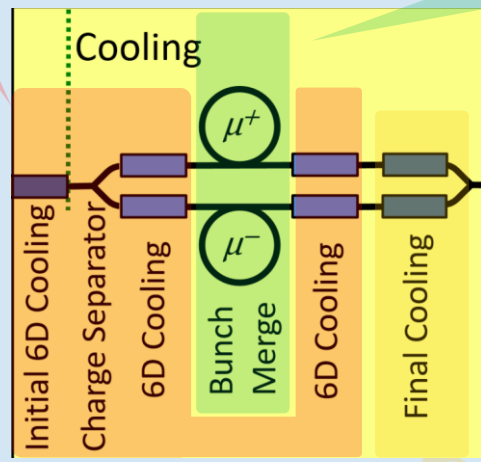
後半



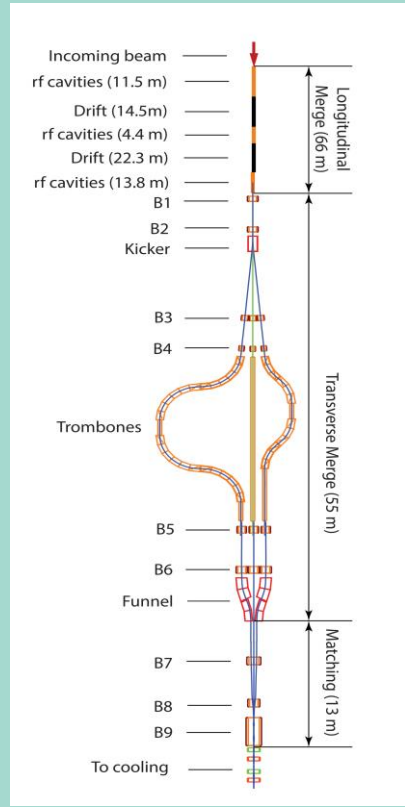
• ~ 1 km並べて $\epsilon_t \sim 1/100$, $\epsilon_l \sim 1/10$
(右下図左)

• 加速勾配は未実証? (前ページ)

Phys. Rev. AB 18, 031003 (2015)

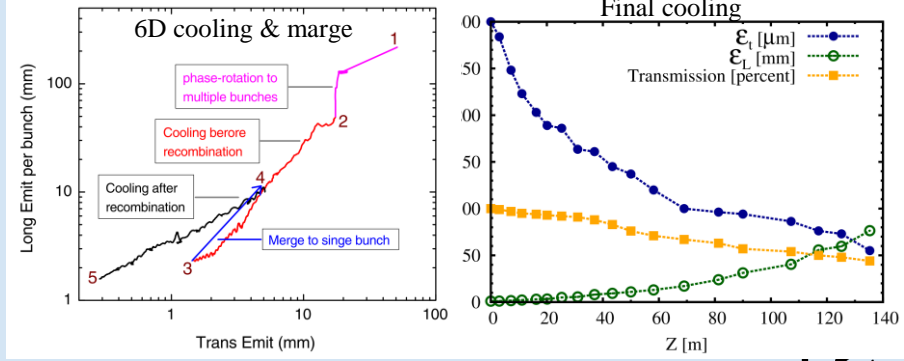


Phys. Rev. AB 18, 091001 (2015)



Phys. Rev. AB 19, 031001 (2016)

Emittance evolution along the stages



強度・エミッタンスまとめ

* 前述の通り、CDR等にまとまっていないので、強度は最新デザインっぽい論文を参考に手計算した結果

location	ϵ_t [π mm rad]	ϵ_l [π mm rad]	強度 / 透過率	参考
Proton driver		2.1×10^{14} p/bunch (8GeV, 15 Hz, 4MW)		
Target・Front end	~100	~100	4×10^{13} μ /bunch	RAST, Vol 10, No. 01, pp. 189-214 (2019)
Cooling	0.05	70	0.08 ($0.2 \times 0.8 \times 0.5$)	PRAB 18, 031003 (2015) PRAB 19, 031001 (2016) PRAB 18, 091001 (2015)
Acceleration ($\rightarrow 7$ TeV)	↑	↑	0.25 ($\sim 1 \times 0.5 \times 0.5$)	JINST 13 P02002 (2018) FERMILAB-PUB-18-508-APC*
Collision	↑	↑	8×10^{11} μ/bunch	

* レーストラックLINAC ($\rightarrow 0.5$ TeV)の後、SPS・LHCトンネルに常電動・超電導磁石 (14T) と超電導空洞を並べた検討

デザイン

Parameter	Units	Higgs	Top-high resolution	Top-high luminosity	Multi-TeV		
CoM energy	TeV	0.126	0.35	0.35	1.5	3.0	6.0*
Avg. luminosity	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	0.008	0.07	0.6	1.25	4.4	12
Beam energy spread	%	0.004	0.01	0.1	0.1	0.1	0.1
Higgs production/ 10^7 sec		13,500	7000	60,000	37,500	200,000	820,000
Circumference	km	0.3	0.7	0.7	2.5	4.5	6
Ring depth [1]	m	135	135	135	135	135	540
No. of IPs		1	1	1	2	2	2
Repetition rate	Hz	15	15	15	15	12	6
$\beta_{x,y}^*$	cm	1.7	1.5	0.5	1 (0.5–2)	0.5 (0.3–3)	0.25
No. muons/bunch	10^{12}	4	4	3	2	2	2
Norm. trans. emittance, ε_T	π mm-rad	0.2	0.2	0.05	0.025	0.025	0.025
Norm. long. emittance, ε_L	π mm-rad	1.5	1.5	10	70	70	70
Bunch length, σ_s	cm	6.3	0.9	0.5	1	0.5	0.2
Proton driver power	MW	4	4	4	4	4	1.6
Wall plug power	MW	200	203	203	216	230	270

*Accounts for off-site neutrino radiation

RAST, Vol 10, No. 01, pp. 189-214 (2019)

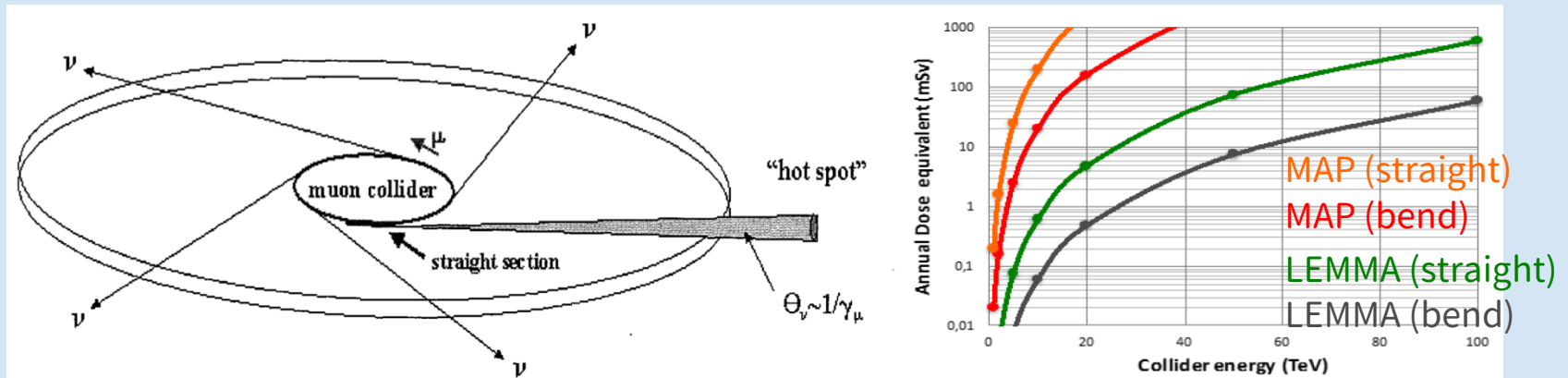
- ほぼ前ページのテーブル通り

ニュートリノによる地表部線量

- 実はかなり大きな線量が見込まれている。
 - 主に加速器トンネル深さ、ビーム強度に依存。
 - 潜在的にビーム強度を制限する要因に。
 - エミッタンスが小さい方が有利。

$$- L \propto N_+ N_- / \sqrt{\epsilon_x \beta_x} \sqrt{\epsilon_y \beta_y}$$

加速器トンネル @ 地下100m



Proc. EPAC98, pp. 841-843, RAST, Vol 10, No. 01, pp. 189-214 (2019)

- MAPスキームは>TeVで結構厳しい (>1mSv/year)
- LEMMAスキーム (次ページ)はエミッタンスが小さい分、ミュオン強度も低く済むので線量も小さい。

LEMMA

- 45 GeV e^+ を固定標的にぶつけて($\sqrt{2m_e E} = 2m_\mu$)
 $\mu^+ \mu^-$ ペアを生成、さらに加速してコライダー
 - ☺もともとからエミッタンスが小さいので冷却の必要がない
 - ☹生成断面積が小さい。
 - $\sim 1 \mu\text{b}$ ($e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$), $\sim 100 \text{mb}$ (@ GeV $p+X \rightarrow \pi^+ \dots$)
 →大強度ビームを何度も標的にぶつける

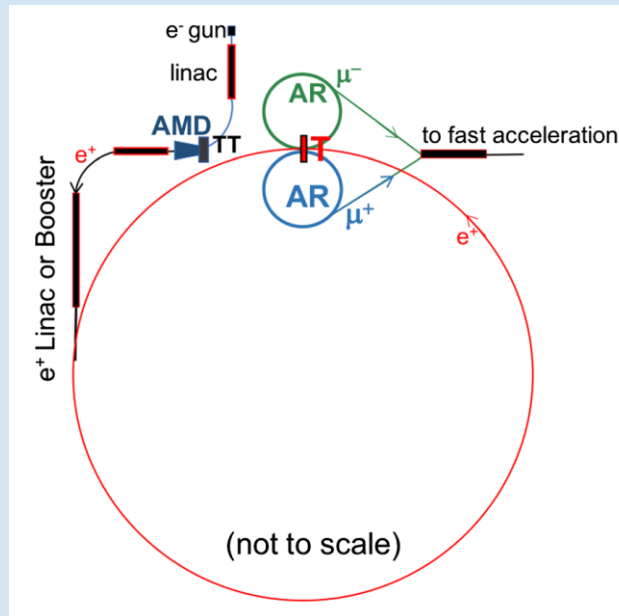


TABLE I. Positron ring parameters.

Parameter	Units	
Energy	GeV	45
Circumference (32 ARCs, no IR)	m	6300.960
Geometrical emittance x, y	m	5.73×10^{-9}
Bunch length	mm	3
Beam current	<u>mA</u>	<u>240</u>
rf frequency	MHz	500
rf voltage	GV	1.15
Harmonic number	#	10508
Number of bunches	#	100
No. of particles/bunch	#	3.15×10^{11}
Synchrotron tune		0.068
Transverse damping time	turns	175
Longitudinal damping time	turns	87.5
Energy loss/turn	GeV	0.511
Momentum compaction		1.1×10^{-4}
rf acceptance	%	± 7.2
Energy spread	dE/E	1×10^{-3}
SR power	MW	120

cf. 5.79 mA@ILC

PRAB 21, 061005 (2018).

設計パラメータ

LEMMA

MAP

Parameter	Units	
CoM energy	TeV	6.0*
Avg. luminosity	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	12
Beam energy spread	%	0.1
Higgs production/ 10^7 sec		820,000
Circumference	km	6
Ring depth [1]	m	540
No. of IPs		2
Repetition rate	Hz	6
$\beta_{x,y}^*$	cm	0.25
No. muons/bunch	10^{12}	2
Norm. trans. emittance, ε_T	π mm-rad	0.025
Norm. long. emittance, ε_L	π mm-rad	70
Bunch length, σ_s	cm	0.2
Proton driver power	MW	1.6
Wall plug power	MW	270

*Accounts for off-site neutrino radiation

Parameter	Units	LEMMA-6TeV
LUMINOSITY/IP	$\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	5.09E+34
Beam Energy	GeV	3000
Hourglass reduction factor		1.000
Muon mass	GeV	0.10566
Lifetime @ prod	sec	2.20E-06
Lifetime	sec	0.06
c*tau @ prod	m	658.00
c*tau	m	1.87E+07
1/tau	Hz	1.60E+01
Circumference	m	6000
Bending Field	T	15
Bending radius	m	667
Magnetic rigidity	T m	10000
Gamma Lorentz factor		28392.96
N turns before decay		3113.76
β_x @ IP	m	0.0002
β_y @ IP	m	0.0002
Beta ratio		1.0
Coupling (full current)	%	100
Normalised Emittance x	m	4.00E-08
Emittance x	m	1.41E-12
Emittance y	m	1.41E-12
Emittance ratio		1.0
Bunch length (zero current)	mm	0.1
Bunch length (full current)	mm	0.1
Beam current	mA	0.048
Revolution frequency	Hz	5.00E+04
Revolution period	s	2.00E-05
Number of bunches	#	1
N. Particle/bunch	#	6.00E+09
Number of IP	#	1.00
σ_x @ IP	micron	1.68E-02
σ_y @ IP	micron	1.68E-02
$\sigma_{x'}$ @ IP	rad	8.39E-05
$\sigma_{y'}$ @ IP	rad	8.39E-05

@European Strategy Update & SMOWMASS

3. High-priority future initiatives

...

The timely realisation of the electron-positron International Linear Collider (ILC) in Japan would be compatible with this strategy and, in that case, the European particle physics community would wish to collaborate.

b) Innovative accelerator technology underpins the physics reach of high-energy and high-intensity colliders. It is also a powerful driver for many accelerator-based fields of science and industry. The technologies under consideration include high-field magnets, high-temperature superconductors, plasma wakefield acceleration and other high-gradient accelerating structures, bright muon beams, energy recovery linacs. The European particle physics community must intensify accelerator R&D and sustain it with adequate resources. A roadmap should prioritise the technology, taking into account synergies with international partners and other communities such as photon and neutron sources, fusion energy and industry. Deliverables for this decade should be defined in a timely fashion and coordinated among CERN and national laboratories and institutes.

CERN-ESU-013, June 2020

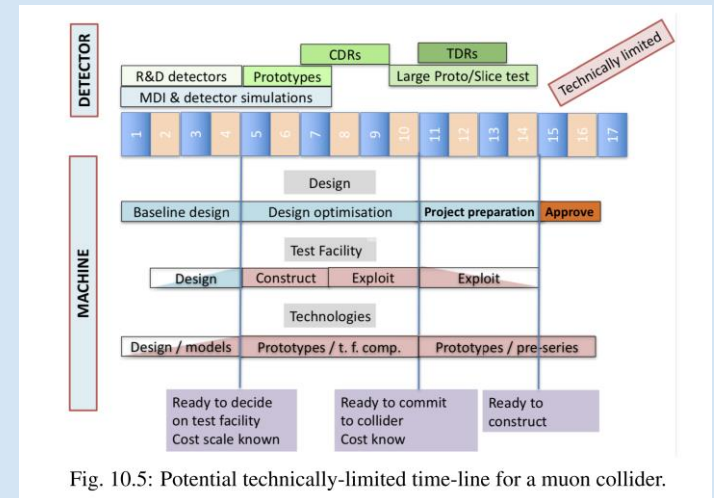
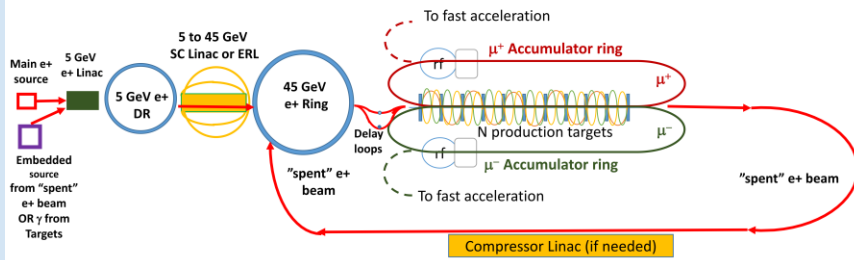


Fig. 10.5: Potential technically-limited time-line for a muon collider.

CERN-ESU-004, 1 October 2019

LEMMA new scheme in brief

- Positron for first fill produced by Main e^+ source (MPS) and accelerated to 5 GeV for damping in a 5 GeV Damping Ring (DR)
- Acceleration to 45 GeV in a SC Linac or ERL and storage of 1000 e^+ bunches in a Positron Ring (PR)
- Extraction of e^+ bunches to one or more muon production lines, while produced muons are accumulated in two AR and a muon bunch is "built" by several passages through the targets, to be then delivered to the fast acceleration chain
- Re-injection and damping in the PR @45 GeV of the spent e^+ beam to save on the number of needed e^+ , the MPS and a possible γ -embedded source will provide the refilling of lost e^+



Planned MAP Contributions

- MAP members intend to support the new International Muon Collider Collaboration that is being formed
- For the LoI Process, the MAP team has particular elements to contribute:
 - Design Parameters
 - Synergies
 - In particular high brightness muon source and neutrino factory applications
 - Concepts for how research and potential machine development could integrate with ongoing US HEP thrusts
 - The MAP Feasibility R&D program results form the basis for :
 - Next steps in the R&D effort
 - Developing a proton-driver based full conceptual design
- Members of the MAP effort are enthusiastic about the world-wide interest that has been expressed in this path to the energy frontier

April 21, 2020

APS Virtual April Meeting, April 18-21, 2020

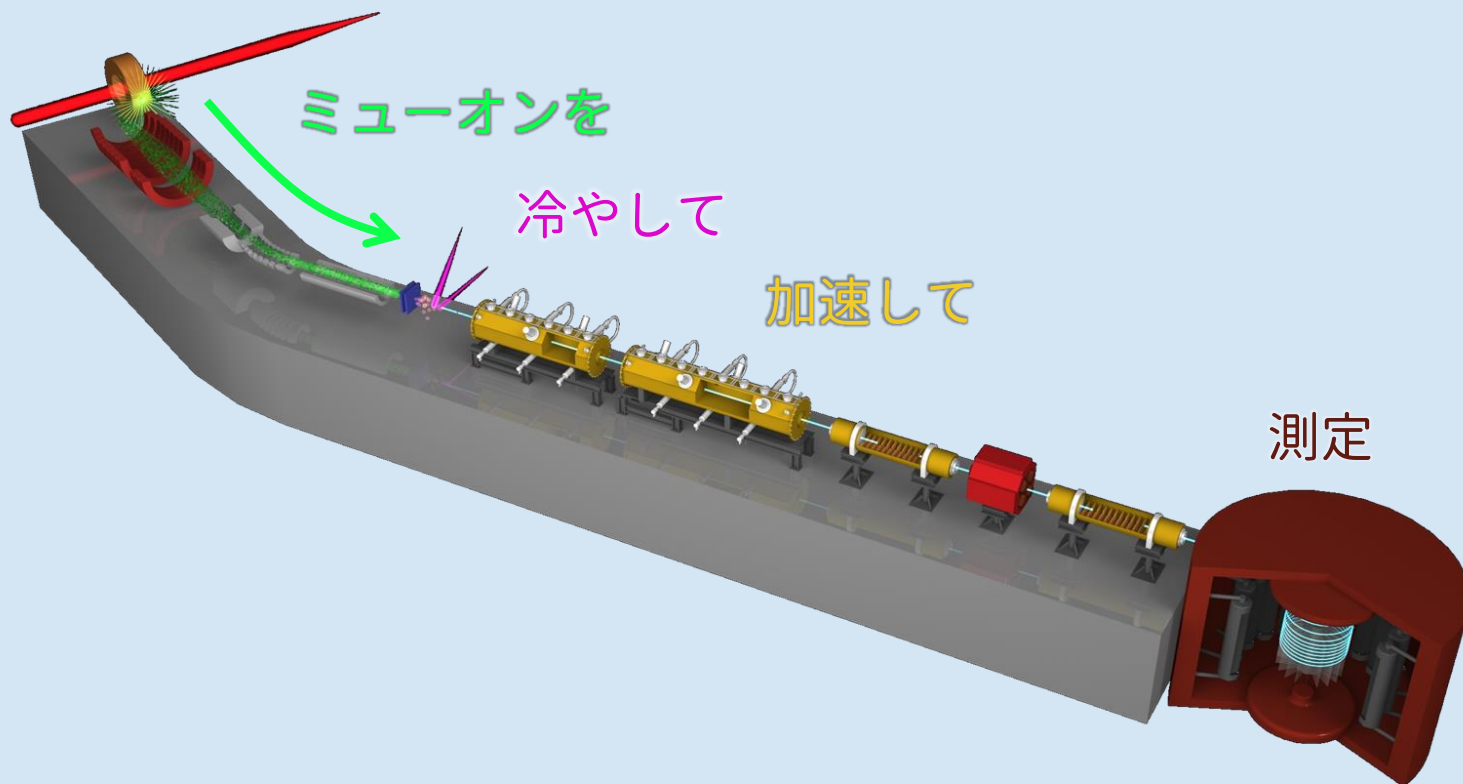


SMOWMASS AF4: Multi-TeV Collider Kickoff Meeting

私の経歴と研究

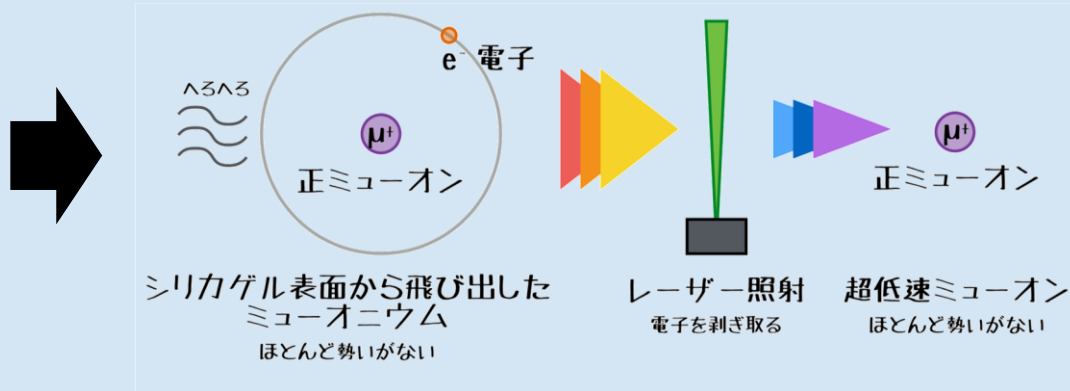
- 大学院ではT2K実験 (前置検出器を作って初物理データ解析でD論)
- 1.5年ほどニュートリノレス2重ベータ崩壊探索@カムランド禅
- 現在はJ-PARCミューオンg-2/EDM実験とJ-PARC加速器

@J-PARC MLF



ミュオン(μ^+)の冷却・加速

従来の
ミュオン
ビーム



☺ 圧倒的な冷却率 (=エミッタンスが小さい)

☹ 収量が小さい → $L \propto N_+ N_- / \sqrt{\epsilon_x \beta_x} \sqrt{\epsilon_y \beta_y}$ なのでペイできる

☹ μ^- は不可能 → μ^- の冷却ができればミュオンコライダー?

	MAP (after Cooling)	LEMMA	g-2/EDM
ϵ_t [π mm rad]	25	0.04	0.3
ϵ_l [π mm rad]	70?	2000?	10
強度	$0.08/\mu_{inj.}$	-	$0.001/\mu_{inj.}$

まとめ

- MAPをレビューした。
 - イオン化冷却などの原理実証が完了、あと少しでCDRレベルの設計？
 - ニュートリノによる地表部の放射化が厳しそう
- LEMMA
 - 低エミッタンスは魅力だが、目標ルミノシティを出せるか？
- 個人的には、ミューオン(μ^+)加速を実現しつつ、 μ^- を冷やす手法を開発し、新しい可能性を考えたい (数年くらいで)