

# ミュオンビームライン1

— OHO' 23 —



高エネルギー加速器研究機構 (KEK)



大強度陽子加速器施設 (J-PARC)

河村 成肇

# はじめに

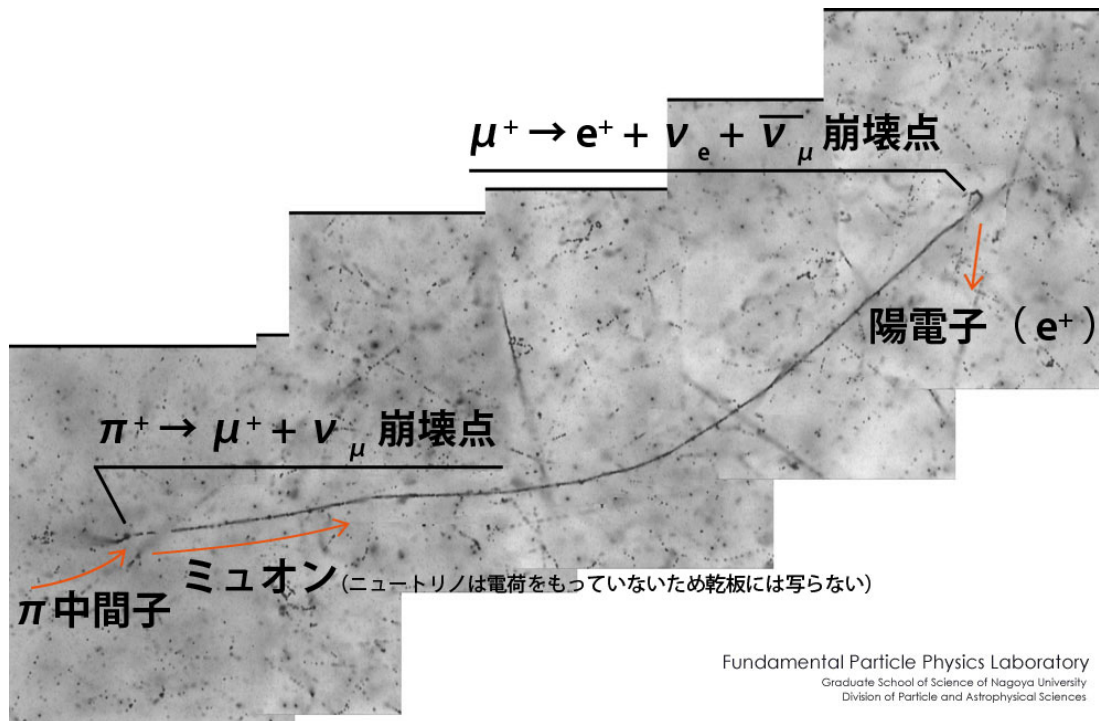
印刷資料の内容とは1対1にはなっていません

講義の方が一般的です。資料はより詳細な内容も含むので、興味を持った人は目を通してみてください。

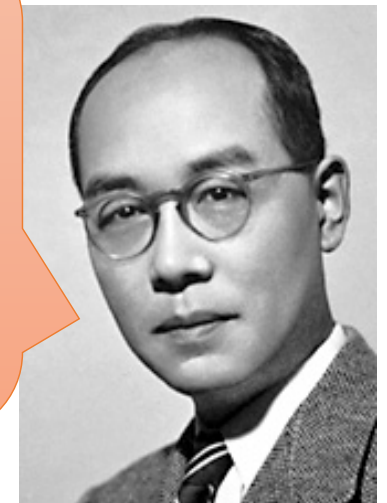
1、2章は大学院レベル、3章はミュオンビームを使いたい人、4章以降はビームラインを作りたい人向けです。

ミュオン( $\mu$ 粒子、ミューオンとも)は素粒子の一種です

- 大きさ: なし(陽子などと異なり内部構造を持たない)
- **寿命**:  $2.2\mu\text{s}$ (100万分の2秒)で崩壊  
中性子に次いで長く、観測するのに程よい時間
- **質量**:  $105.6\text{MeV}/c^2$  ( $2 \times 10^{-28}$  kg、1穰(1兆 $\times$ 1兆 $\times$ 1万)分の2kg)  
電子の200倍、陽子の1/9の中間的な重さ
- **電荷**:  $+1e$ または $-1e$ (電子と同じまたはその反対の2種)



1936年に宇宙線の中から発見される。発見当初、湯川秀樹博士の予言した中間子と考えられ、ミュー中間子と呼ばれた。



# ミュオンは湯川の間接子？

- 電磁力は(バーチャル)光子が媒介  
⇒核力は中間子が媒介(中間子論)
- “中間”とは(電子と核子の)中間的な質量に由来
- ハイゼンベルグの不確定性原理

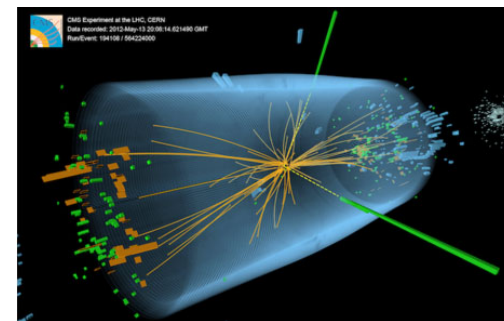
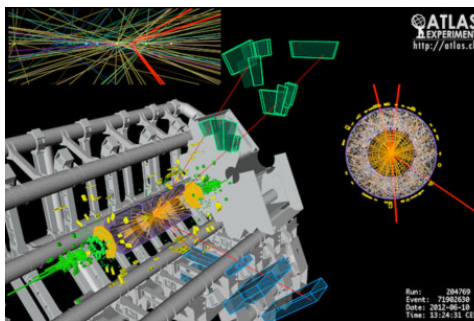
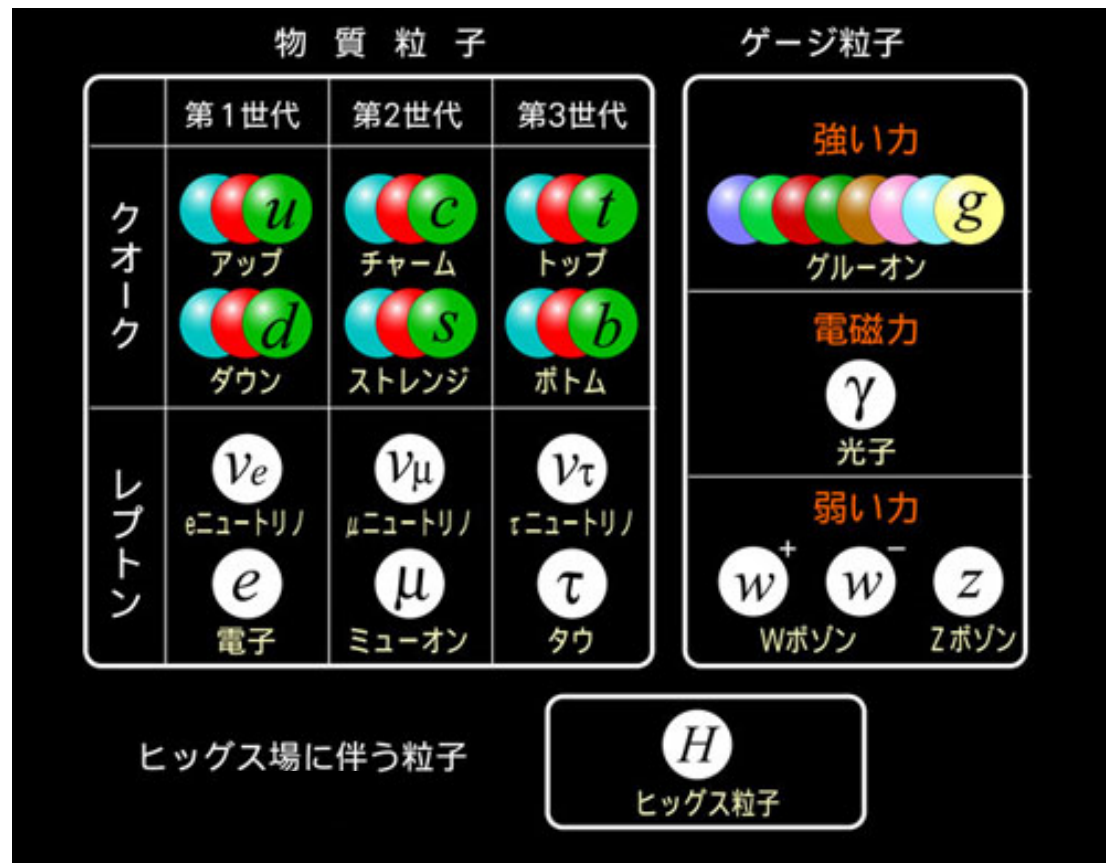
$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar \approx 6.6 \times 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s}$$

時間の不確定性 $\Delta t$ は核子間を光速程度で粒子が飛ぶとして $\Delta t \sim 2 \times 10^{-15} / 3 \times 10^8 \sim 6.6 \times 10^{-24} \text{ s}$   
つまり $\Delta E \sim 100 \text{ MeV}$ 、中間子質量は $100 \text{ MeV}/c^2$ 程度と見積もられていた

- 予想通りの質量をもつミュオンは当初、中間子と  
思われたが、発見から5年後の1941年、寿命測定  
で別粒子となる(中間子として $2.2 \mu\text{s}$ は長過ぎ)

# 素粒子標準理論

- クォークは陽子や中性子などの核子や中間子を形成
- 電子などはレプトンに分類  
ミュオンはレプトンの第2世代  
ニュートリノは質量なし
- ゲージボソンは力を媒介
- ヒッグスが質量を与える
- クォークとレプトンは3世代
- 2012年、CERNのLHCで最後の未発見素粒子ヒッグスが発見、標準理論は一応の完成

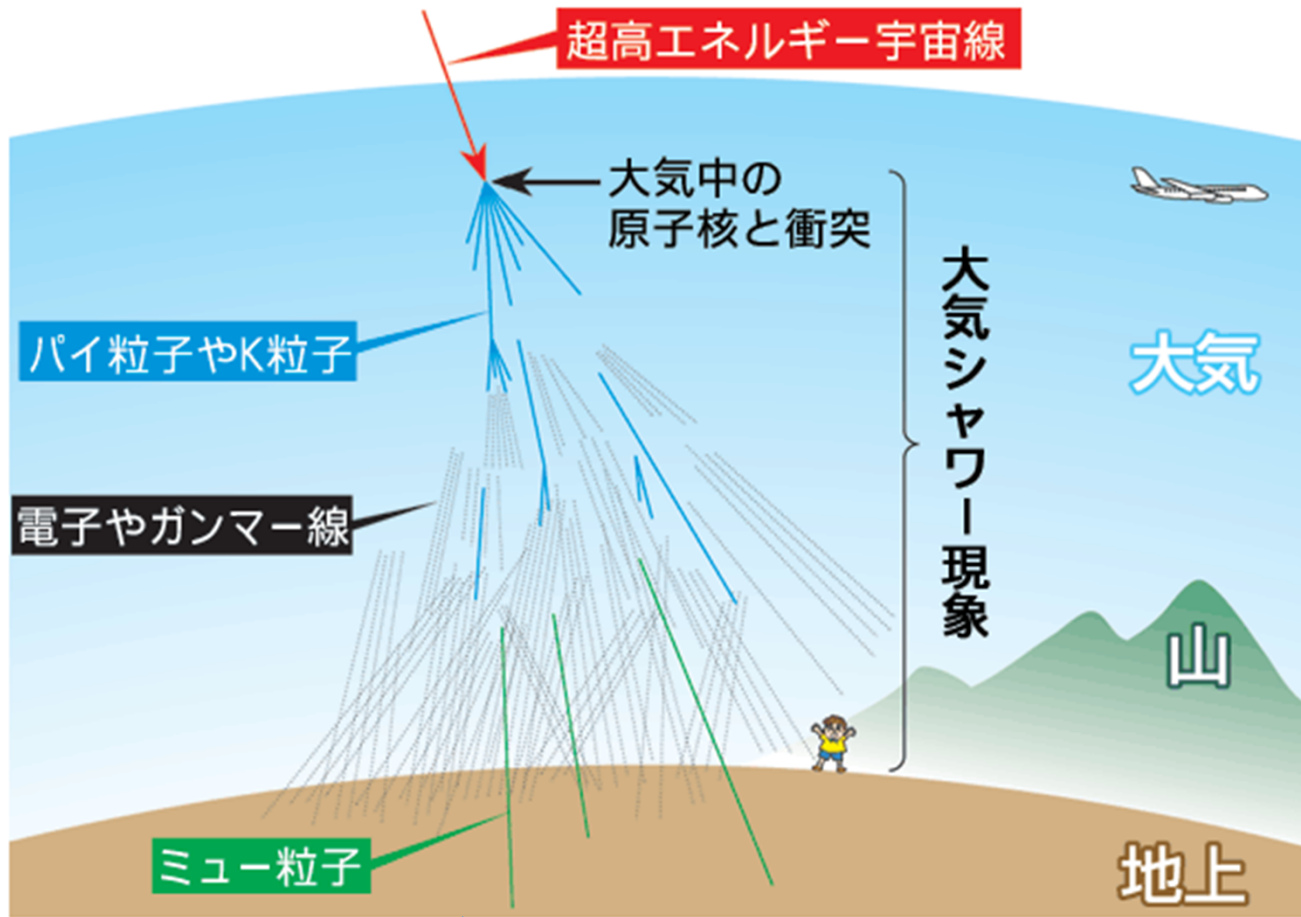


# つまり...

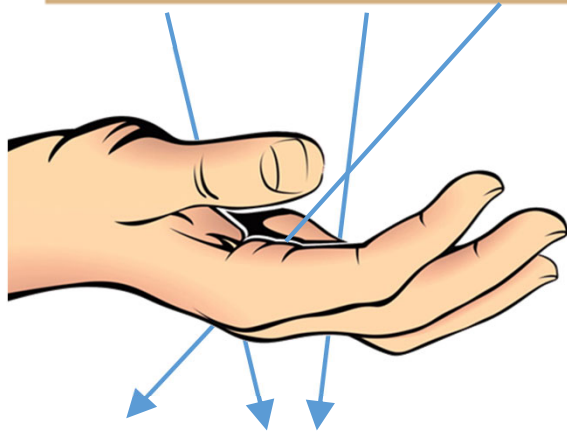
- 不安定な素粒子なので、いわゆる“イオン源”でミュオンを作ることはできない
- 何らかの高エネルギー反応からのみ作られる
  - ハドロンビーム + 標的 (中間状態で  $\pi^+$ 、 $\pi^-$  を生成)  
$$p + p \rightarrow p + n + \pi^+ \Rightarrow \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$
$$p + n \rightarrow n + n + \pi^- \Rightarrow \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$
  - レプトン衝突 ( $\mu^+ \mu^-$  の対生成)  
$$e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$$
- 以下では一般的なハドロンビーム + 標的 (衝突) で生成されたミュオンビームについて説明
  - なぜ、ハドロン衝突の方が一般的なのか？ は最後まで聞くと分かるかも



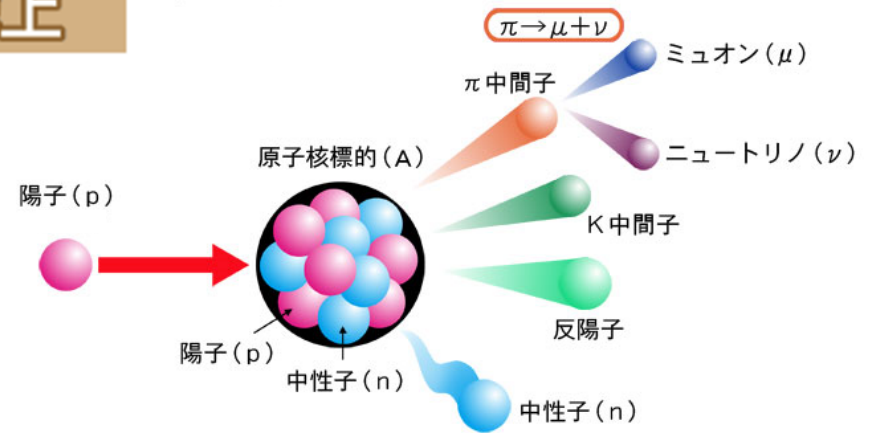
# 宇宙線の中のミュオン



宇宙から飛来した一次宇宙線(主に陽子)が、大気を構成する元素の原子核と衝突、 $\pi$ 中間子をはじき出す。 $\pi$ 中間子が崩壊してミュオンが作られる。



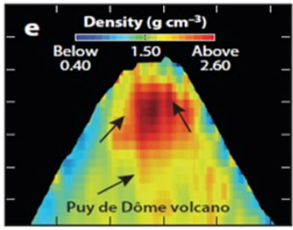
地表に到達する宇宙線の多くはミュオンと電子  
 掌(10cm × 10cm)に毎秒1個が降り注いでいる



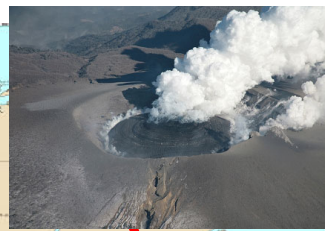
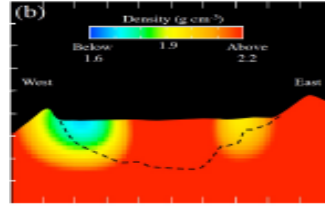
# 宇宙線ミュオンで山を透視

資料提供: 東大地震研 田中宏幸博士

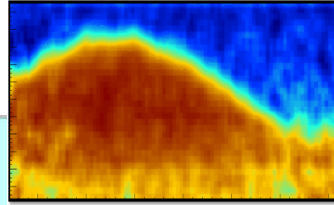
Puy de Dome (FR)



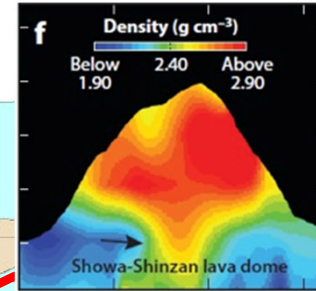
Kirishima (JP)



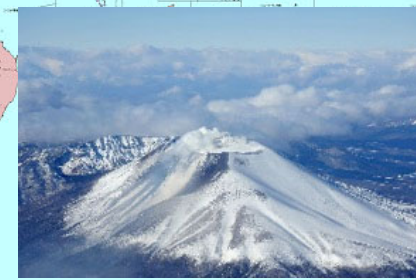
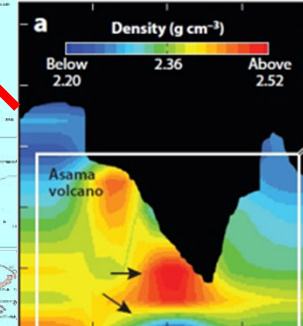
Vesuvio (IT)



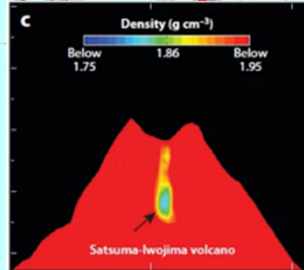
Showa-Shinzan (JP)



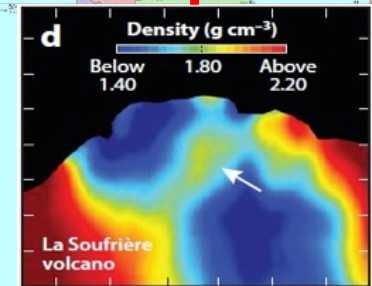
Soufrier Hills (UK) underway



Asama (JP)

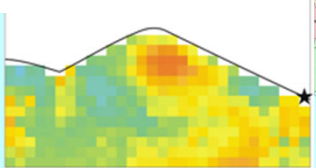


Satsuma-Iwojima (JP)

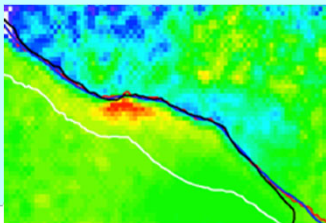


La Soufriere (FR)

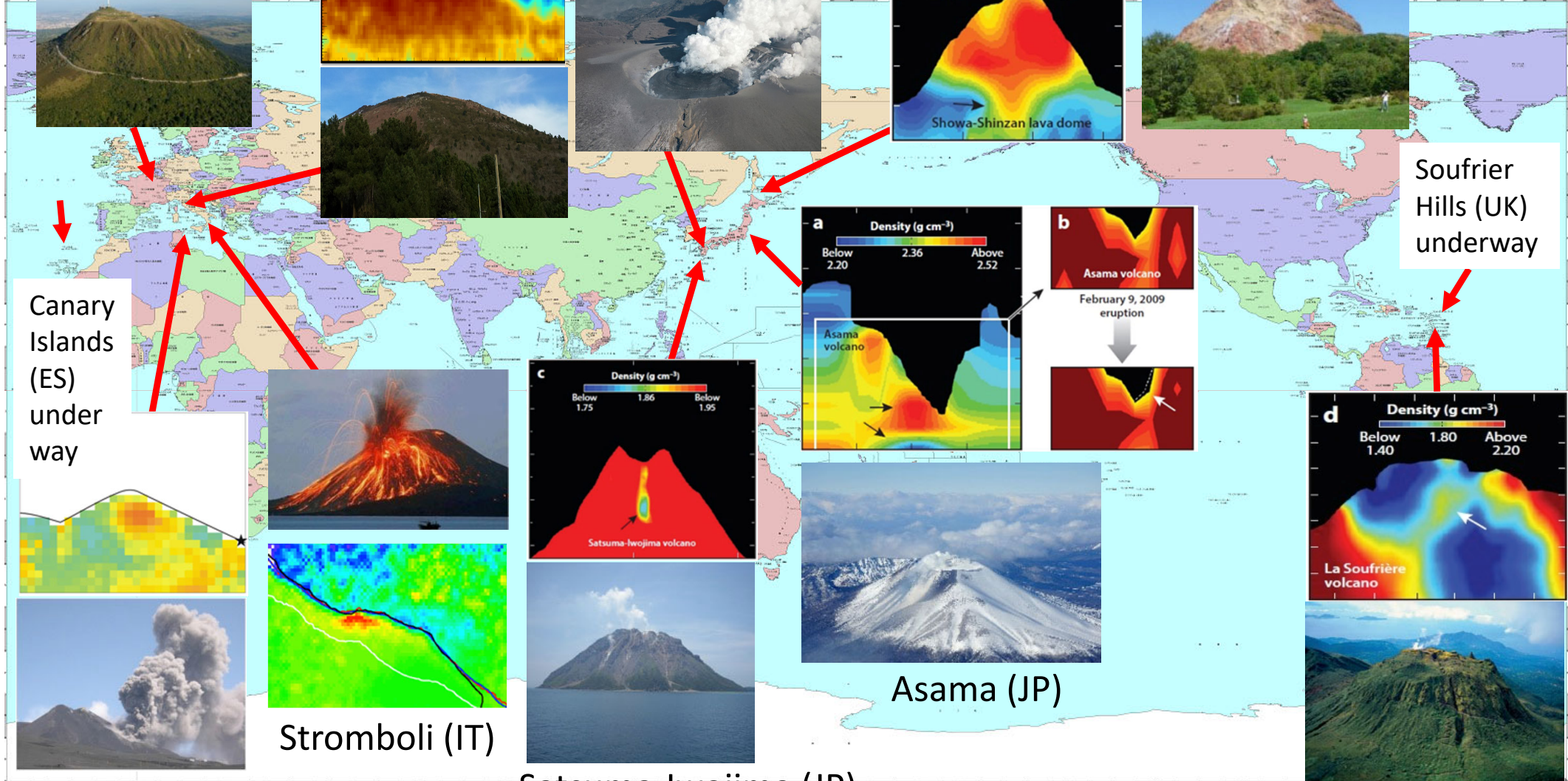
Canary Islands (ES) underway



Etna (IT)



Stromboli (IT)





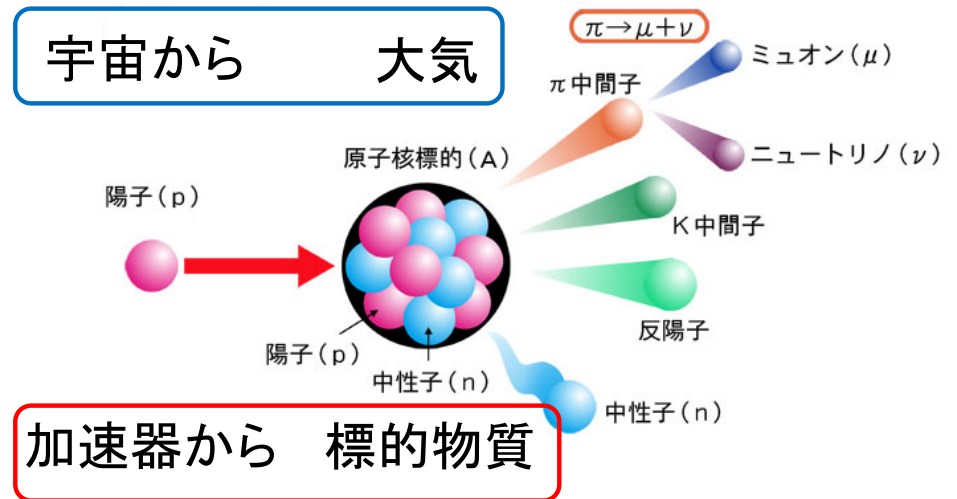
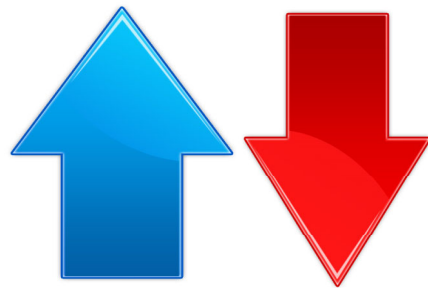
# 加速器でミュオンを作る

J-PARCの誕生

# 宇宙線ミュオンと加速器のミュオン

## 宇宙線ミュオン

- 数が少ない(1個/100cm<sup>2</sup>/秒)  
⇒測定時間が長い、小さい“対象物”は測定できない
- エネルギーは非常に高く不揃い  
⇒“対象物”に止めることは困難

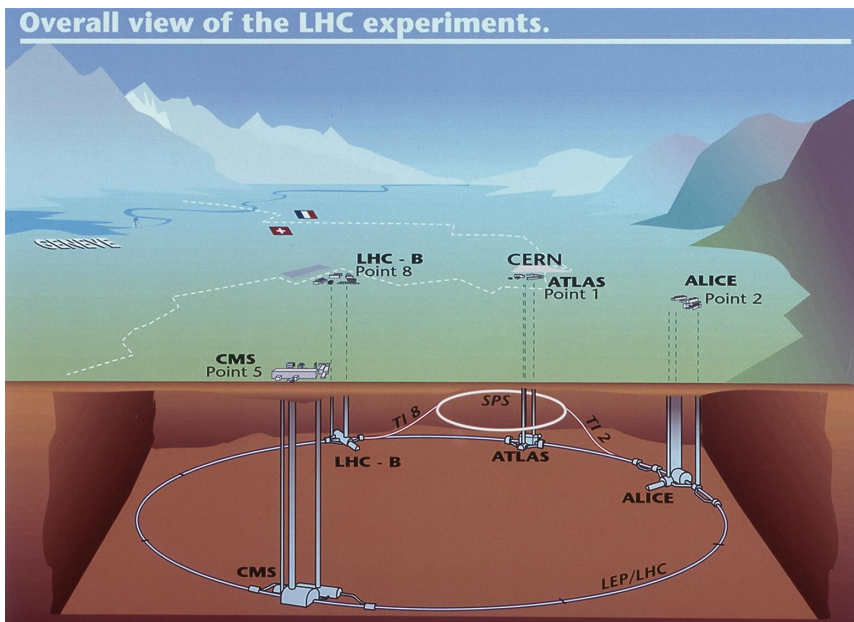


## 加速器で作られるミュオン

- 大量に生成可能
- 程々のエネルギーで“対象物”に止めることができる

# 世界の大型加速器施設

- エネルギーの高さを極める加速器 (**Energy Frontier**)  
LHC加速器(スイスCERN)など  
未知の物理現象を人工的に発生(素粒子物理学)
- 加速する粒子数を極める加速器 (**Intensity Frontier**)  
SNS(米国ORNL)など  
中性子・ミュオン等の2次粒子を利用(科学全般)



LHC(全周27km=山手線×0.8)

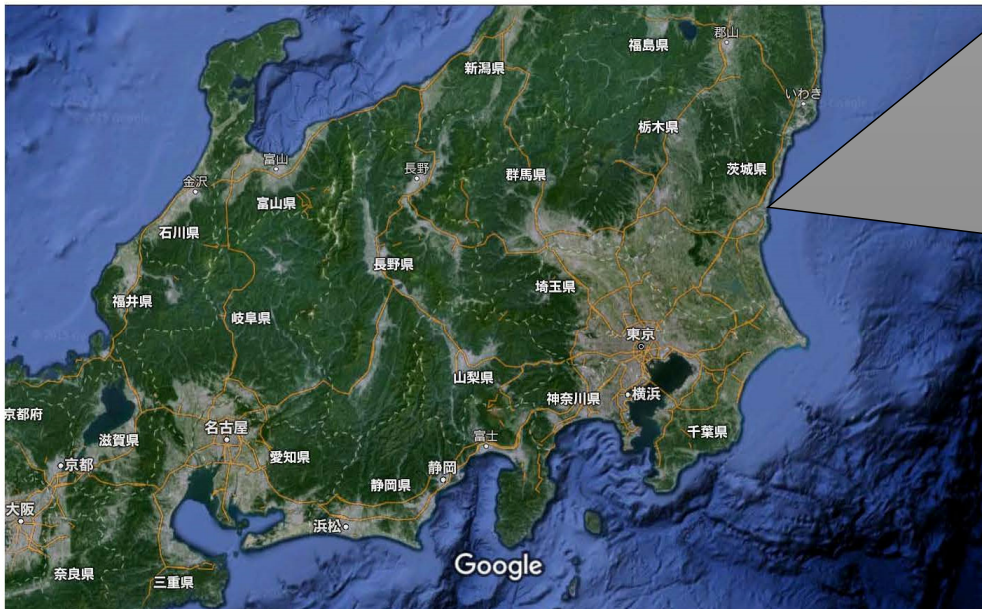


SNS(直線加速器300mと2次粒子を利用建屋)

# J-PARC

## Japan Proton Accelerator Research Complex

ミュオン施設を日本に！



画像 ©2015 Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO. Data Japan Hydrographic Association, Landsat. 地図データ ©2015 Google, ZENRIN 50 km



J-PARCはKEKとJAEAが共同で建設をすすめた加速器複合施設  
世界最大強度のビームを目指し、2008年から運用を開始

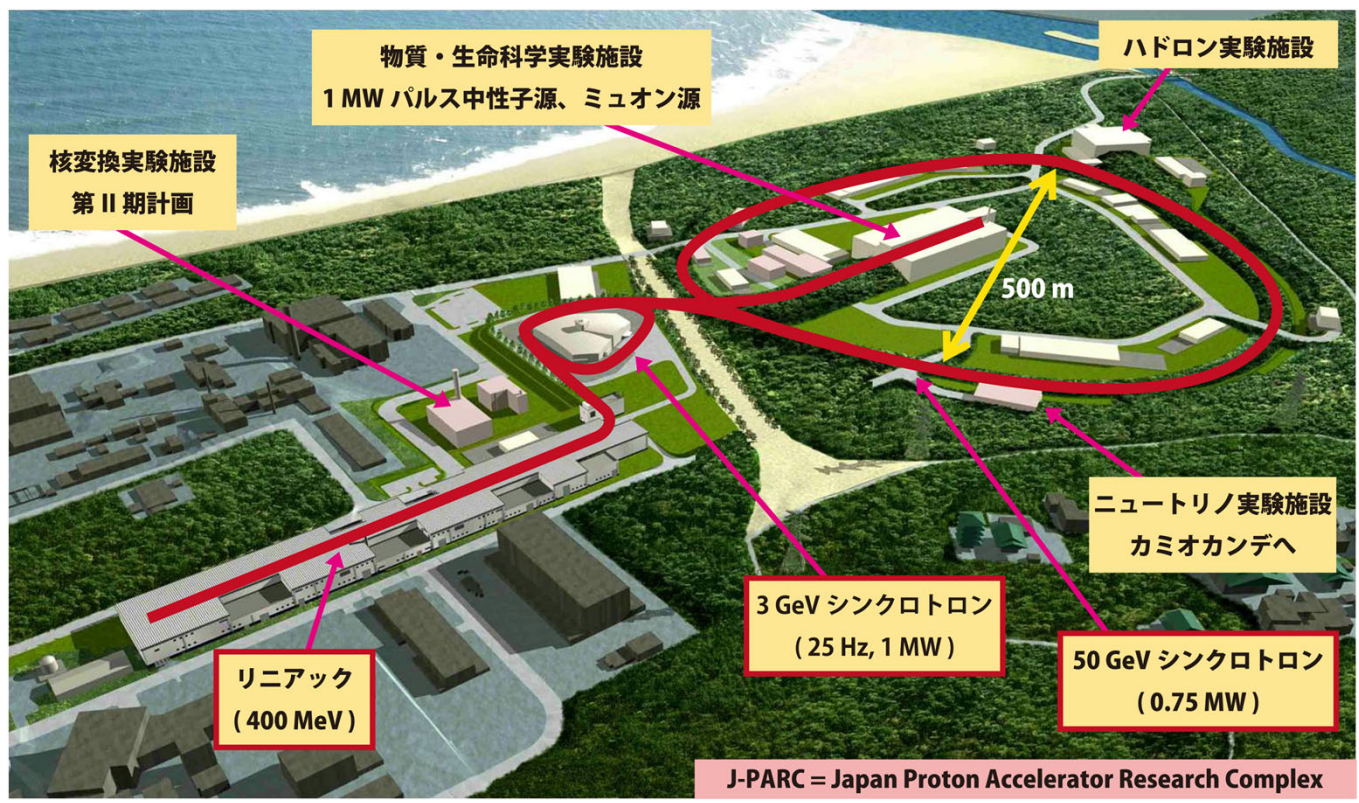
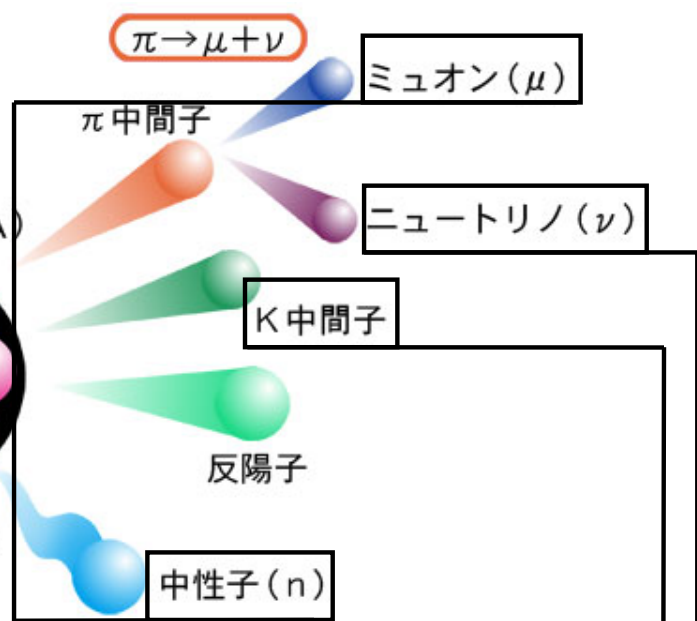
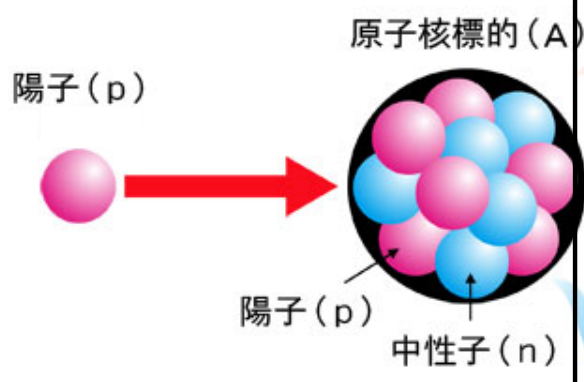
# J-PARC

## 3つの加速器

リニアック  
 3GeVシンクロトロン  
 50GeVシンクロトロン

1eVは電子を1Vの電圧で加速した時のエネルギー ( $1.6 \times 10^{-19} \text{J}$ )

大強度陽子ビームによる  
 多様な粒子ビームの生成



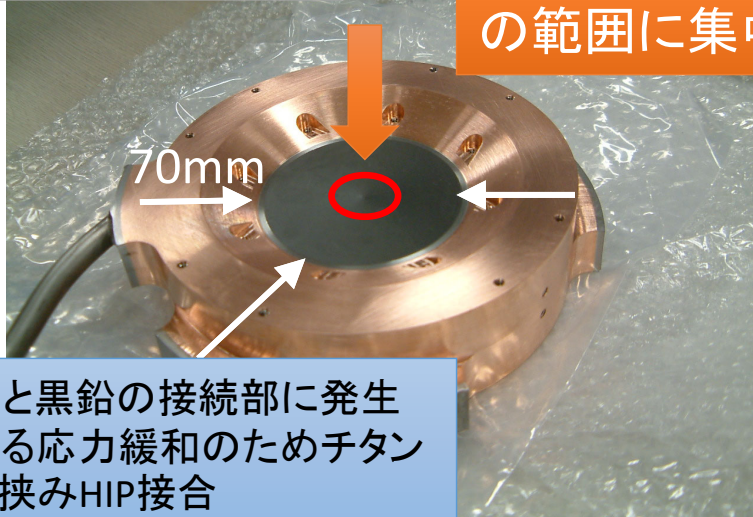
- 物質・生命科学実験施設
- ハドロン実験施設
- ニュートリノ実験施設
- 核変換実験施設

4つの実験施設  
 (稼働中は3つ)

# ミュオンを作り出す

2014年まで使用

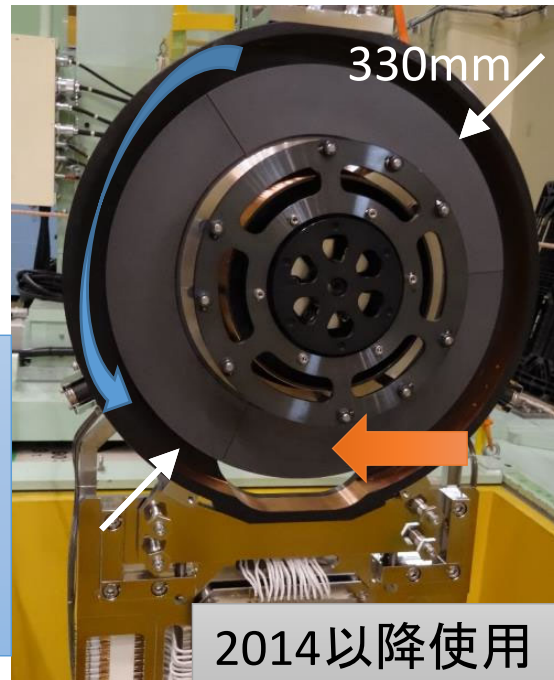
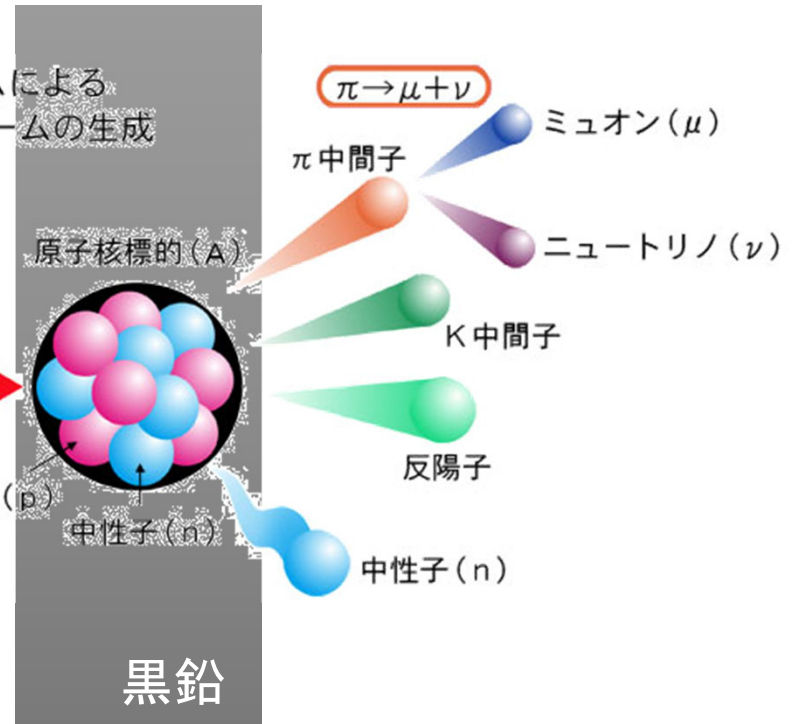
陽子は直径16mm  
の範囲に集中



銅と黒鉛の接続部に発生  
する応力緩和のためチタン  
を挟みHIP接合

大強度陽子ビームによる  
多様な粒子ビームの生成

陽子 (p)  
3 GeV



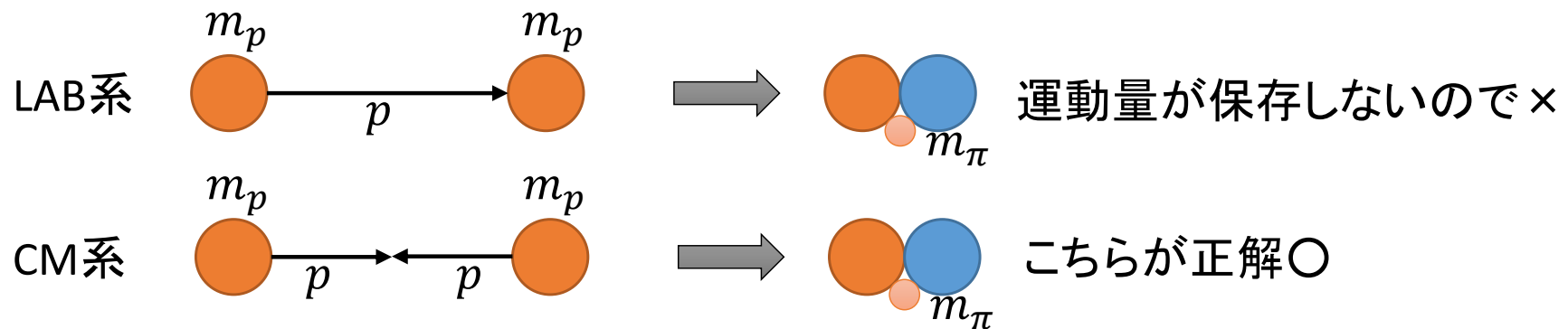
陽子ビームが当たる場所は  
放射線損傷で縮んでしまう  
↓  
黒鉛の円盤を回転し、陽子  
ビームによる放射線損傷を  
拡散、標的寿命を延ばす

2014以降使用

2cm厚の黒鉛にビームを打ちこみ、陽子と炭素原子核との反応で、 $\pi$ 中間子を生成する。 $\pi$ 中間子が崩壊して、ミュオンが作られる。

# ミュオンを作りだす

- ミュオンはパイオンの崩壊で得られる  
一つのパイオンを作るのに必要な最小のエネルギー



- $$2\sqrt{m_p^2 + p^2} = m_p + m_n + m_\pi \cong 2m_p + m_\pi$$

$$\rightarrow \beta_{\text{CM}} = \frac{p}{E} = \frac{p}{\sqrt{m_p^2 + p^2}} = \frac{\sqrt{4\alpha + \alpha^2}}{2 + \alpha} \quad \text{ただし } \alpha = \frac{m_\pi}{m_p}$$

# ミュオンを作りだすー続き

- CM系からLAB系の変換は相対論的(ローレンツ変換)

$$\beta_{\text{LAB}} \neq 2\beta_{\text{CM}}$$

$$\beta_{\text{LAB}} = \frac{2\beta_{\text{CM}}}{1 + \beta_{\text{CM}}^2} = \frac{(2 + \alpha)\sqrt{4\alpha + \alpha^2}}{(2 + \sqrt{2} + \alpha)(2 - \sqrt{2} + \alpha)}$$

- $\beta_{\text{LAB}}$  では複雑だが、 $\gamma_{\text{LAB}} = 1 + 2\alpha + (1/2)\alpha^2$
- パイオンを作りだすのに必要な最小エネルギー

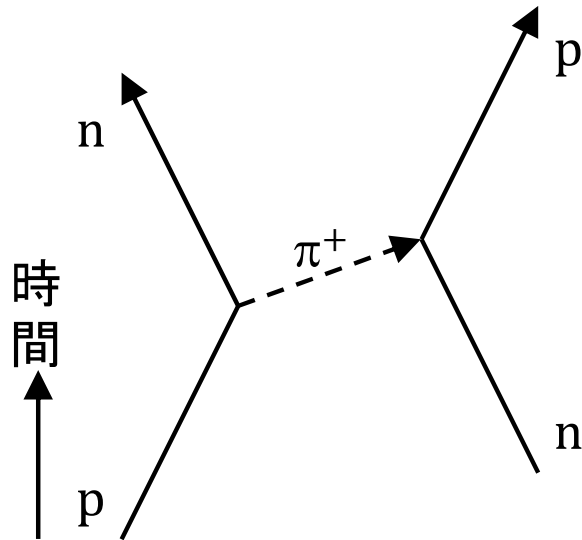
$$T = (\gamma_{\text{LAB}} - 1)m_p = 2m_\pi \left(1 + \frac{m_\pi}{4m_p}\right)$$

- パイオンの生成閾値は約290MeV  
世界的なmeson factoryは500MeV以上の陽子加速器
  - K中間子(494MeV)なら約1.1GeVが閾値⇒MLFでも生成

- 相対論的速度の合成則、 $u \oplus v = \frac{u+v}{1+uv/c^2}$

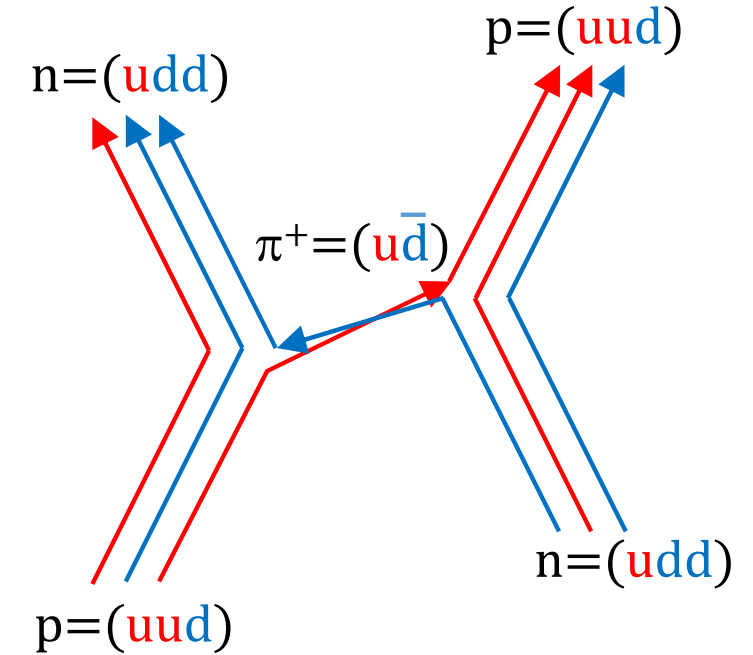


# π中間子の生成

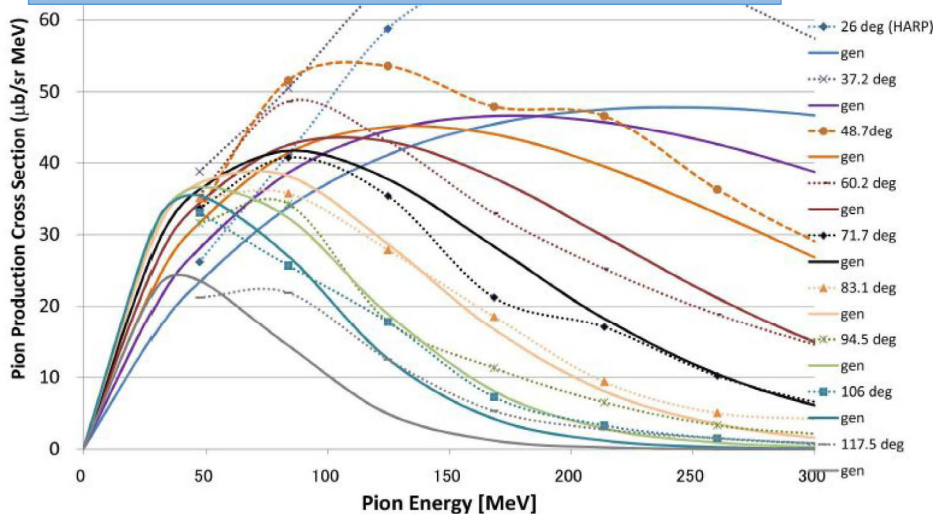


**湯川の中間子論**  
 強い相互作用(核力)はπ中間子を媒介して伝播  
 通常、π中間子は原子核から飛び出すことはない

クォークで書くとこうなる  
 ※この色はクォークの色とは無関係



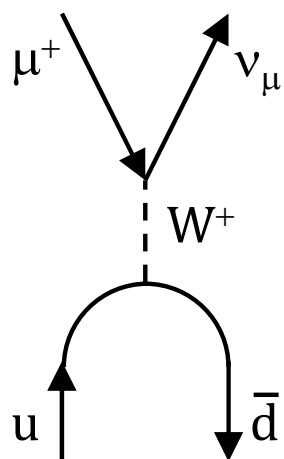
P(3GeV)+Cのπ<sup>+</sup>生成微分断面積



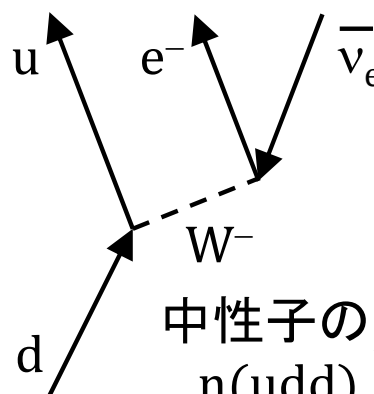
高エネルギー陽子を原子核にぶつけ、π中間子を叩き出す。π中間子は中間子では最も軽く生成されやすいが、それでも微分断面積は~10μb/sr/MeV  
 全断面積でσ<sub>tot</sub>~50mb  
 2cm厚の黒鉛(C)に陽子を入射させると、  
 $2[\text{cm}] \times 1.8[\text{g/cc}] \div 12[\text{g/mol}] \times N_A \times \sigma_{\text{tot}} \sim 10^{-2}$   
 $3\text{GeV} \times 333\mu\text{A} \rightarrow 2 \times 10^{15} \text{p/sec} \rightarrow 10^{13} \pi^+ / \text{sec}$   
 立体角、エネルギー選択などで“使える”π中間子は5桁以上少ない、さらにミュオンは少ない  
 J-PARCでは毎秒10<sup>6</sup>~10<sup>8</sup>個のミュオンが得られる

# $\pi$ 中間子からミュオンへ

- $\pi^\pm$ は26nsで $\mu^\pm$ と $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ に2体崩壊する

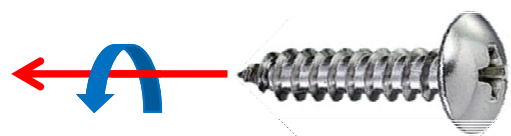


$\pi$ 中間子崩壊は  
弱い相互作用

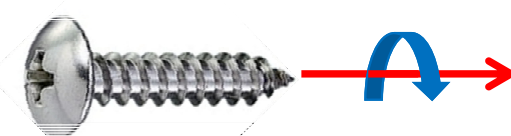
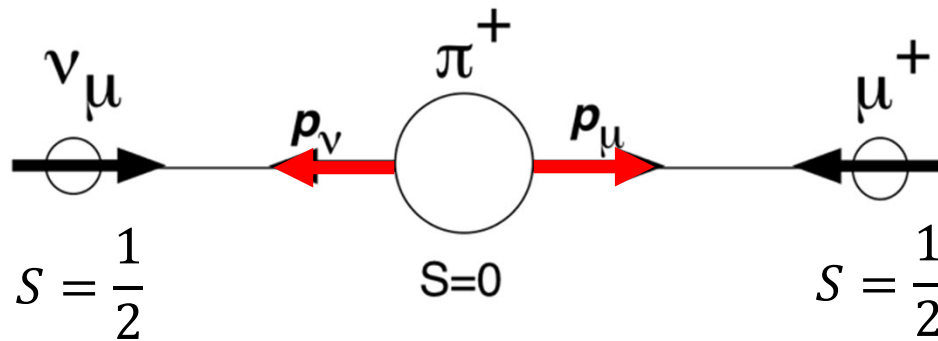


中性子の $\beta$ 崩壊も弱い相互作用  
 $n(udd) \rightarrow p(uud) + e^- + \bar{\nu}_\mu$

- $\pi$ 中間子崩壊(弱い相互作用)におけるパリティ非保存の発見(宇宙には左巻きのニュートリノのみ)

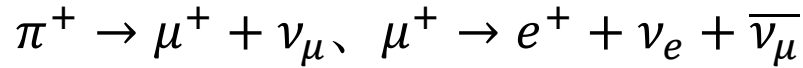


ニュートリノは左巻き  
(反ニュートリノは右)



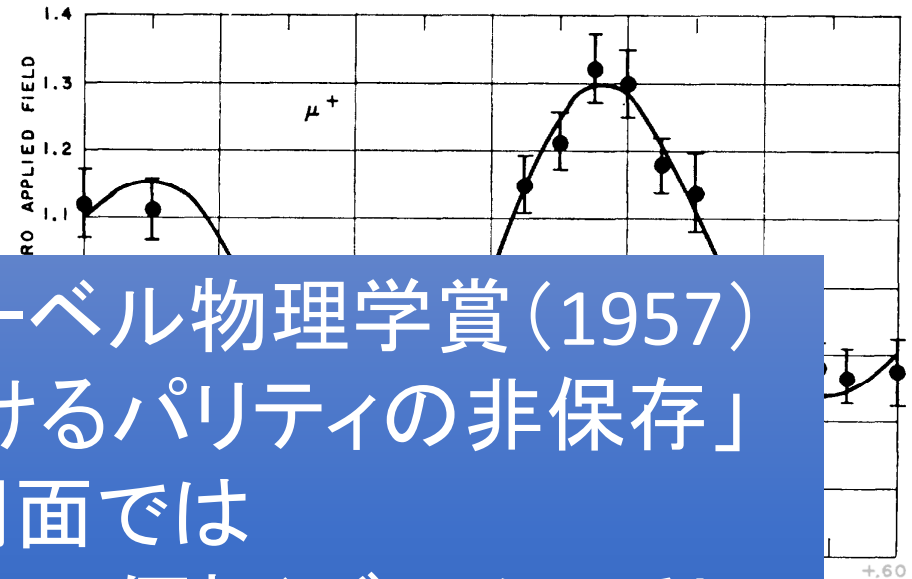
反跳粒子のミュオンも  
**100%スピン偏極**

# 弱い相互作用におけるパリティ非保存

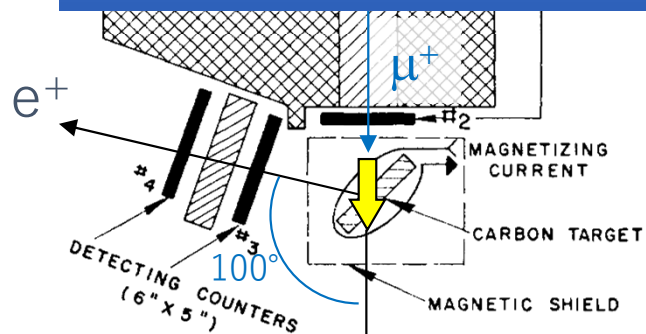


崩壊でのパリティ非保存の検証

(R.L. Garwin, L.M. Lederman, M. Weinrich,  
Phys. Rev. 105, 1415 (1957))



T.D. Lee, C.N. Yang ノーベル物理学賞 (1957)  
 「弱い相互作用におけるパリティの非保存」  
 ↓応用面では  
 高偏極 (原理的には100%偏極) ビームの利用  
 ミュオン科学の展開へ



この間に来た $e^+$ のみを数える↑

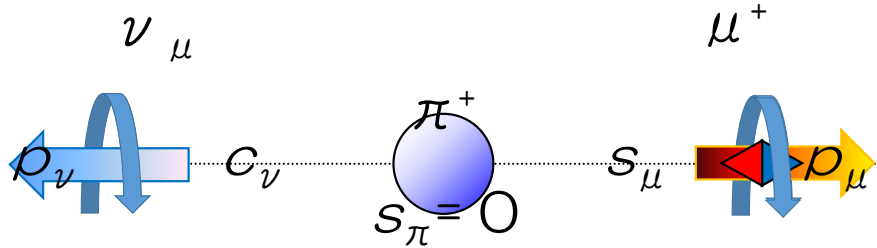
磁場をかけて $\mu^+$ スピンと検出器の相対角度を変えながら測定 (数は積分)

$$e^+ \text{数} \propto 1 - \frac{1}{3} \cos \theta, \quad \theta = \gamma_\mu B t$$

$$B = 15\text{G} \rightarrow \theta = 100^\circ$$

FIG. 1. Experimental arrangement. The magnetizing coil was close wound directly on the carbon to provide a uniform vertical field of 79 gauss per ampere.

# ミュオンを利用者の元へ届ける

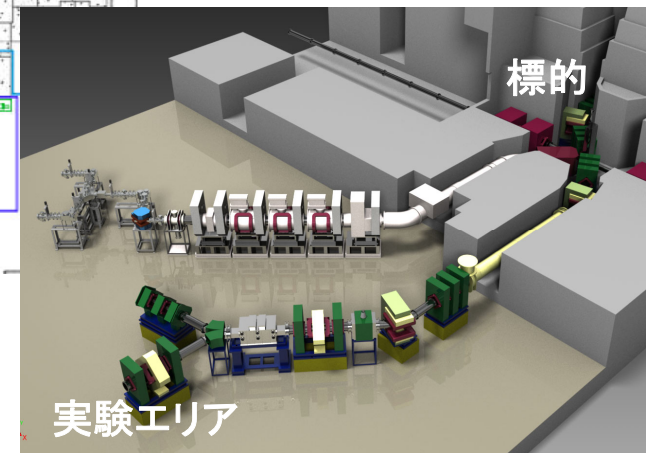
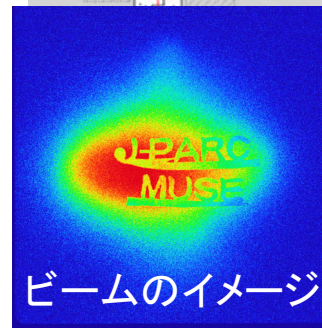
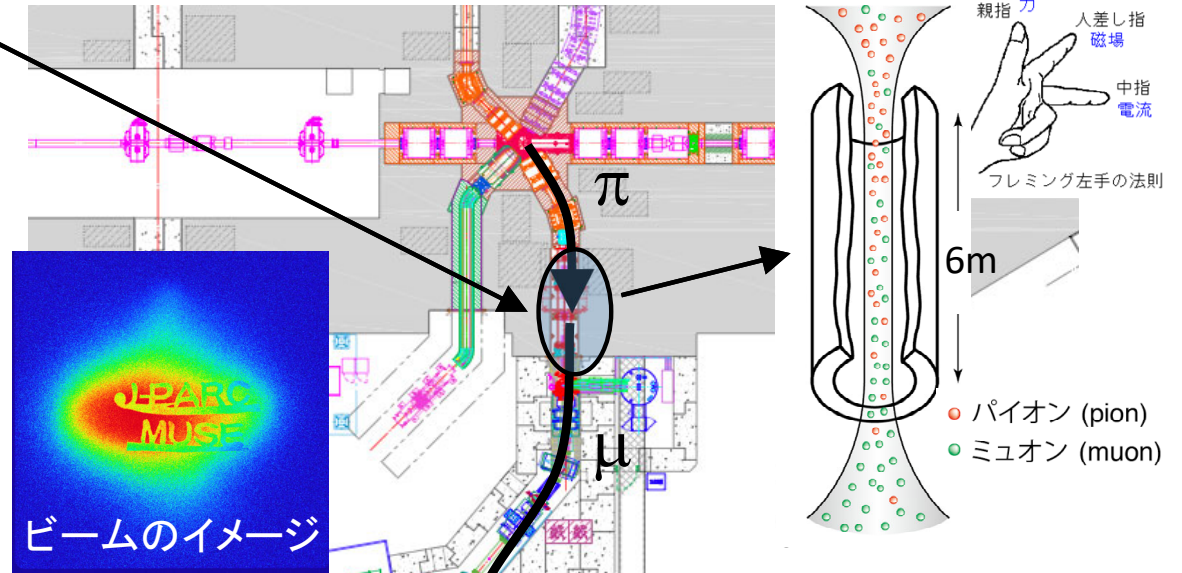


$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$\pi$ 中間子やミュオンは+や-の荷電粒子なので、磁場で軌道を曲げることが可能  
標的から飛び出した $\pi$ 中間子やミュオンを**電磁石の磁場で収束**させながら、目的の場所(実験エリア)まで輸送する

$\pi$ 中間子から生まれるのは何故か  
右巻きの $\mu^+$ か左巻きの $\mu^-$ のみ  
その理由はヒッグス粒子等が登場する素粒子物理学の最前線に関係



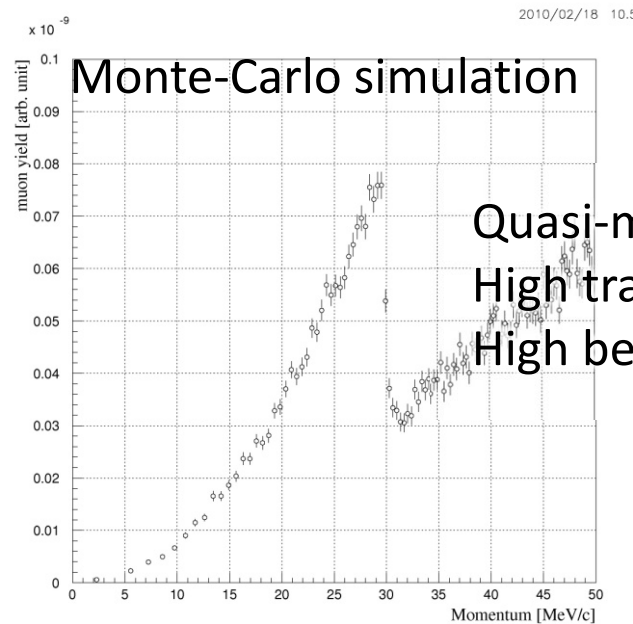
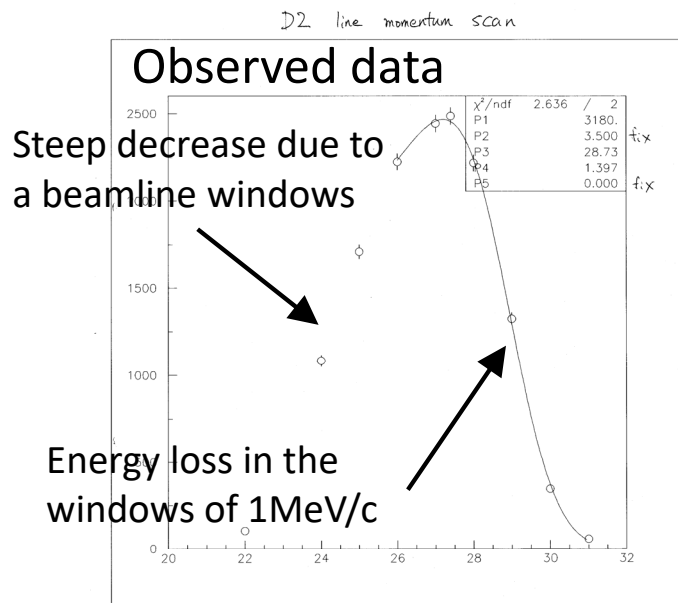
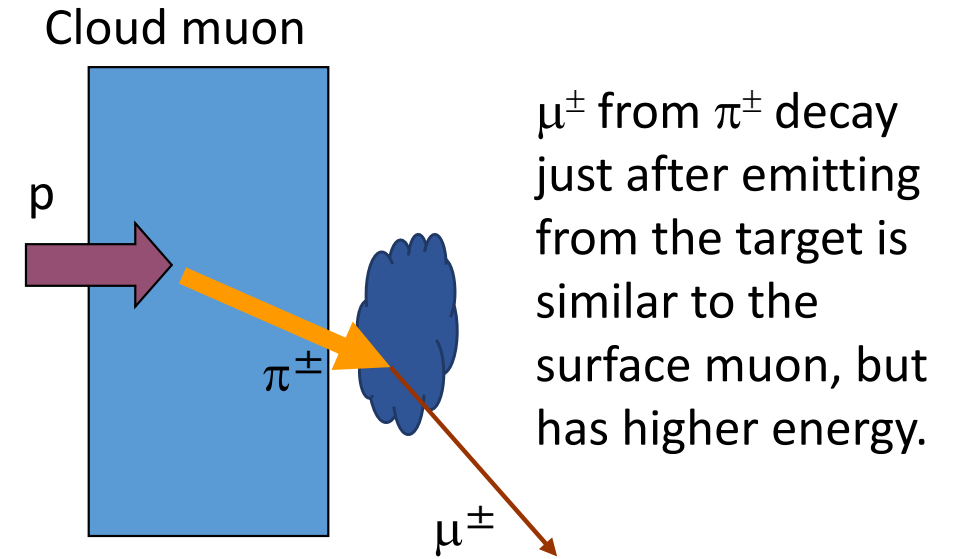
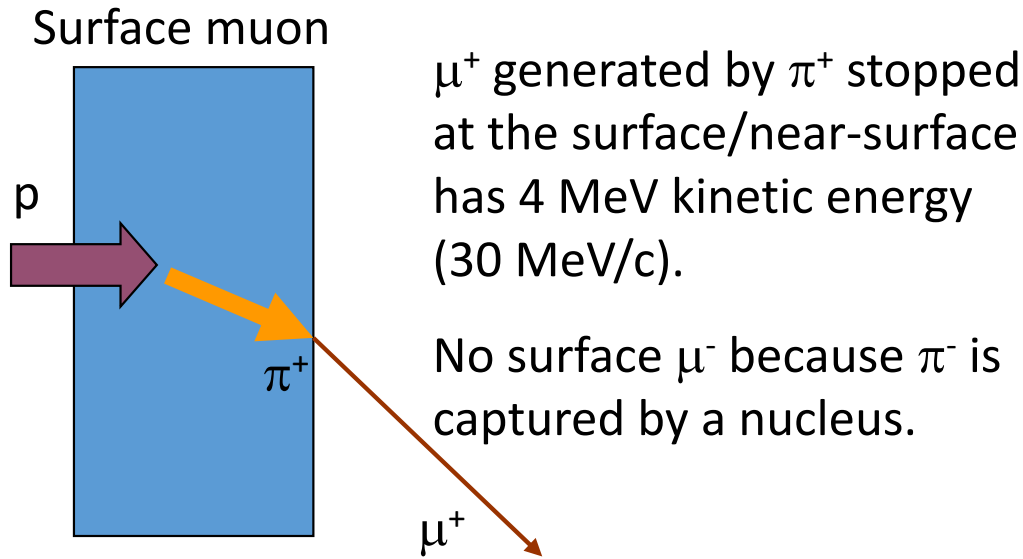
ミュオンを使った実験を行うためのエリア

来週の講義で

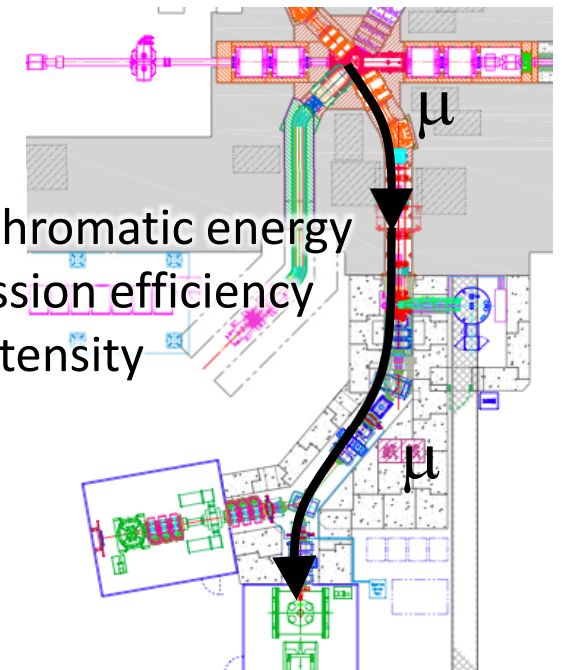
# ミュオンビームの色々

英語のスライドが増えますごめんなさい

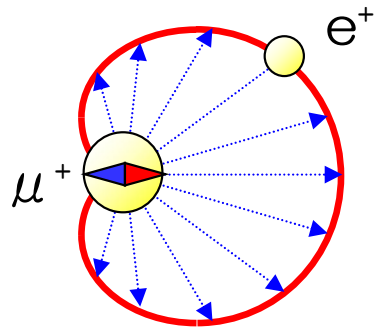
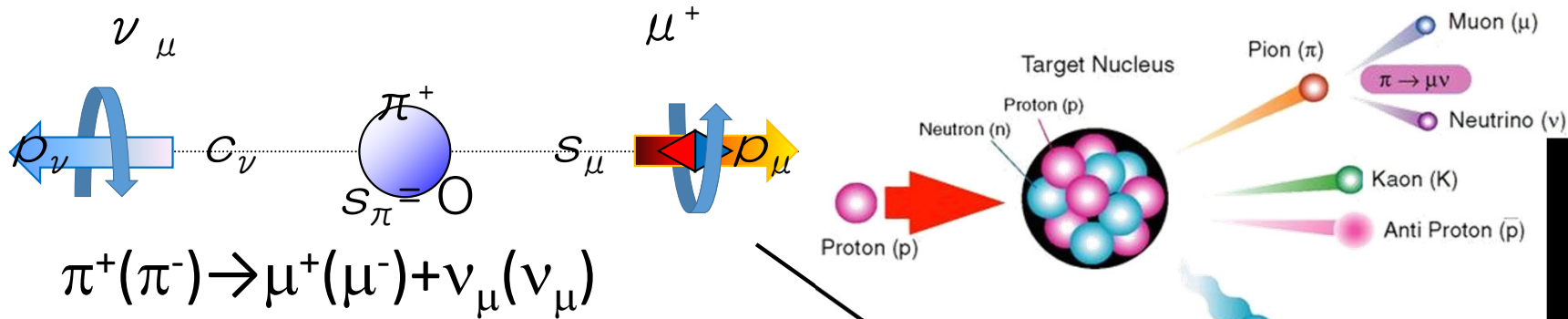
# Surface muon beam



Quasi-monochromatic energy  
 High transmission efficiency  
 High beam intensity



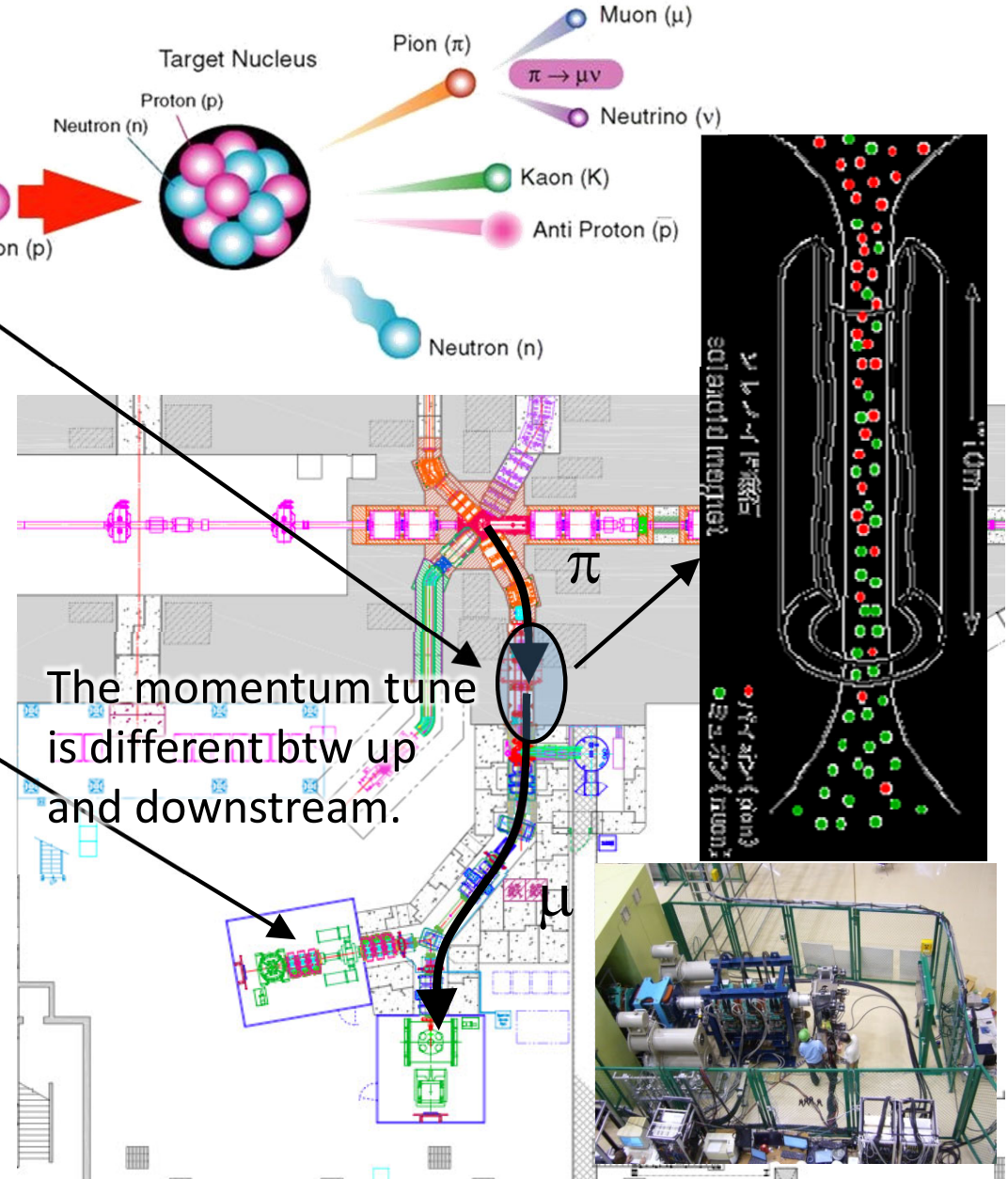
# Decay muon beam



$$\mu^+(\mu^-) \rightarrow e^+(e^-) + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu})$$

- 100% spin polarized due to recoil of a neutrino
- Momentum tunable (5-120 MeV/c)
- Momentum is selected by B-field

$$m \frac{v^2}{\rho} = evB \rightarrow p = e\rho B$$



# Pulse and CW beam

## ■ Pulse beam

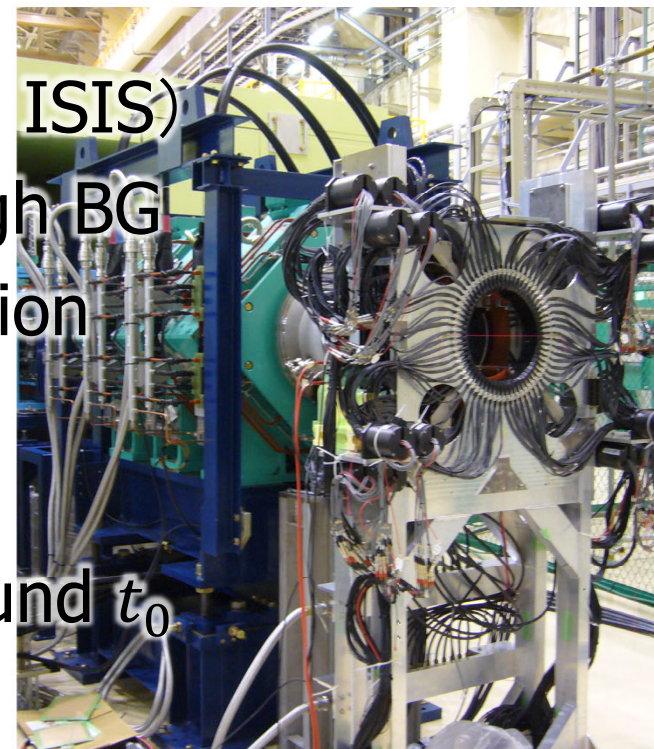
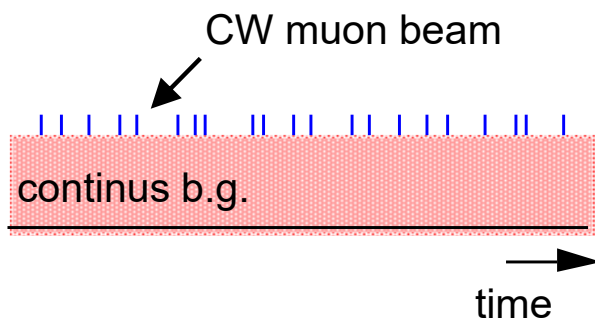
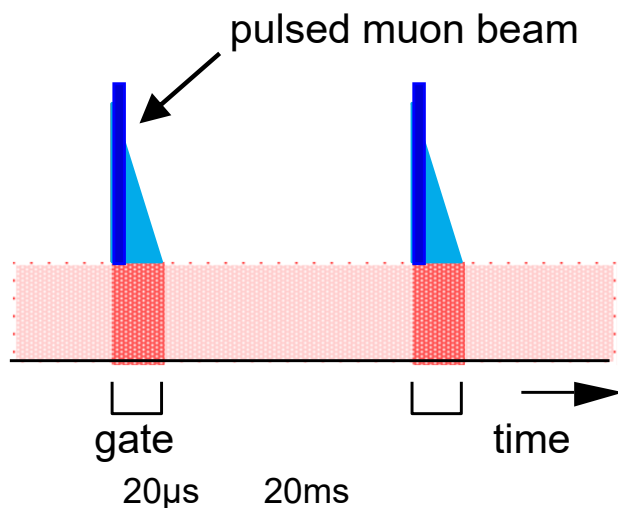
(Synchrotron; J-PARC, ISIS)

- Good S/N under high BG
- Long-time observation (relaxation  $> 10 \mu\text{s}$ )
- × Particle identify
- × Low time reso. around  $t_0$  (Muonium rotation)

## ■ CW beam

(Cyclotron; PSI, TRIUMF)

- × Practical limit in the beam int. due to pile-up events. (PSI MORE solved this issue.)

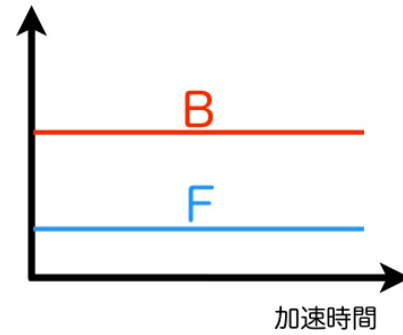


A highly segmented spectrometer is required

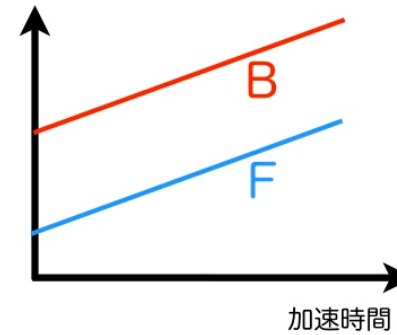


# Synchrotron and cyclotron

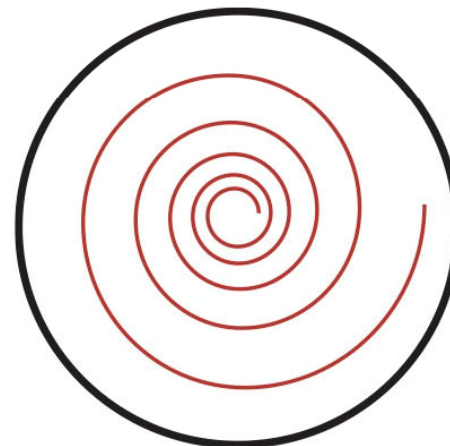
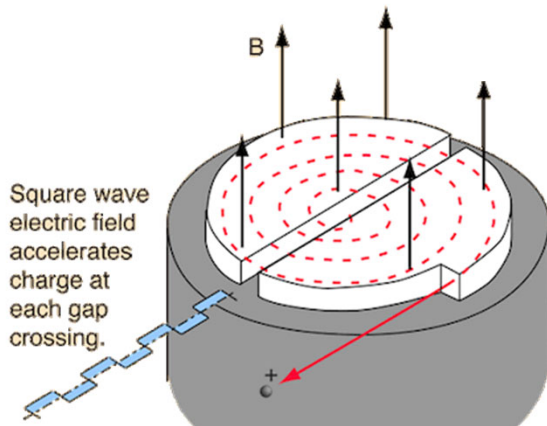
**cyclotron**



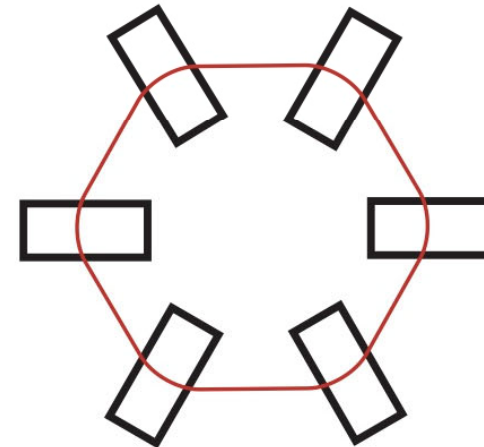
**synchrotron**



PSI, TRIUMF

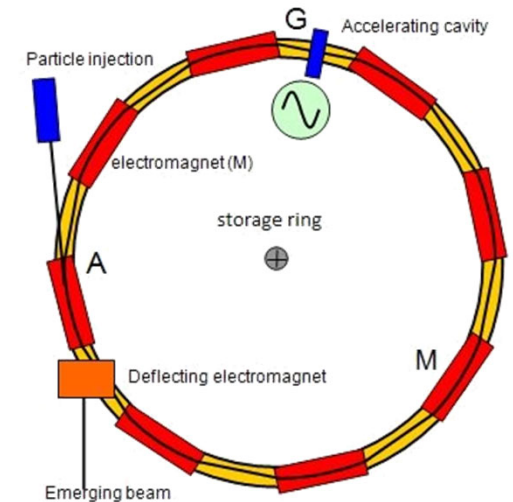


サイクロトロン  
ビーム軌道は変化  
周回時間と磁場は一定



シンクロトロン  
ビーム軌道は一定  
磁場を変化させる

ISIS, J-PARC



Cyclotron and synchrotron accelerate protons by alternative electric field in radio frequency (RF). The RF in cyclotron is constant and proton is continuously introduced from the source, while that in synchrotron increases with the proton energy to keep its orbit constant. Thus, protons are accelerated in a cluster (bucket). We call this cluster beam bunch or beam pulse.

# ミュオンを輸送する

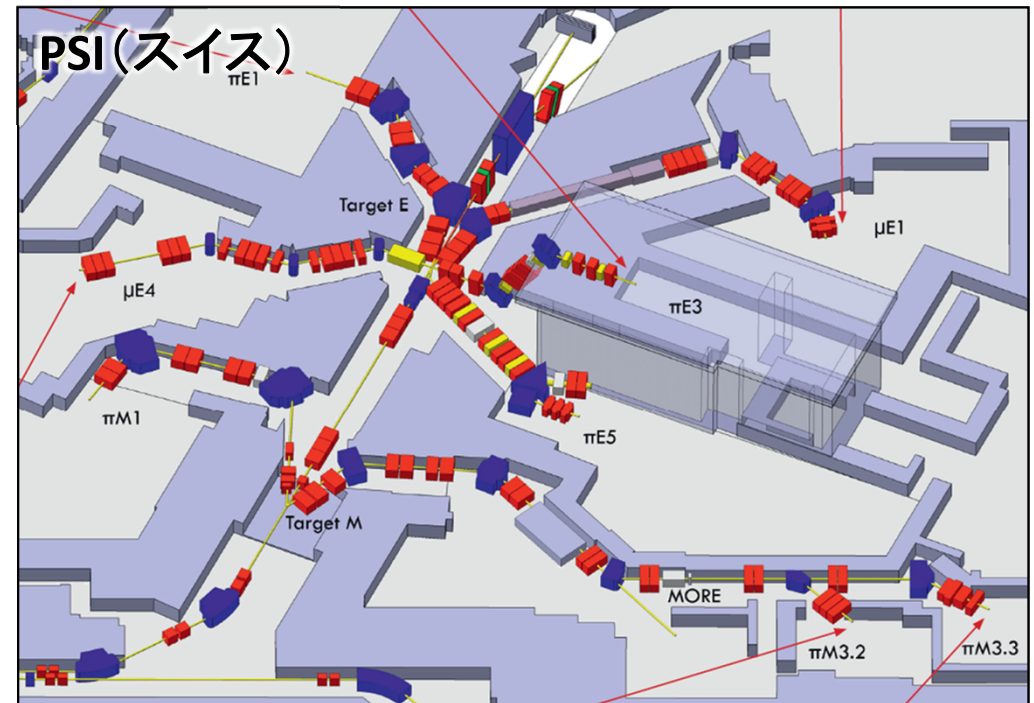
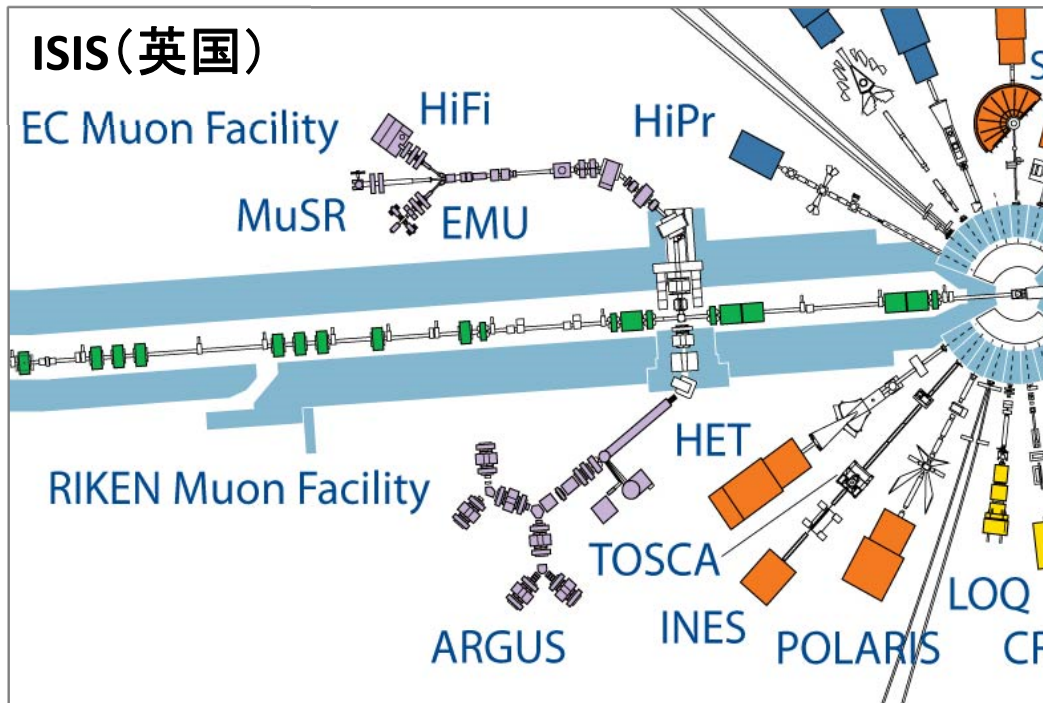
本質的には加速器のBTラインと似てるけど...

# 基本的な考え方

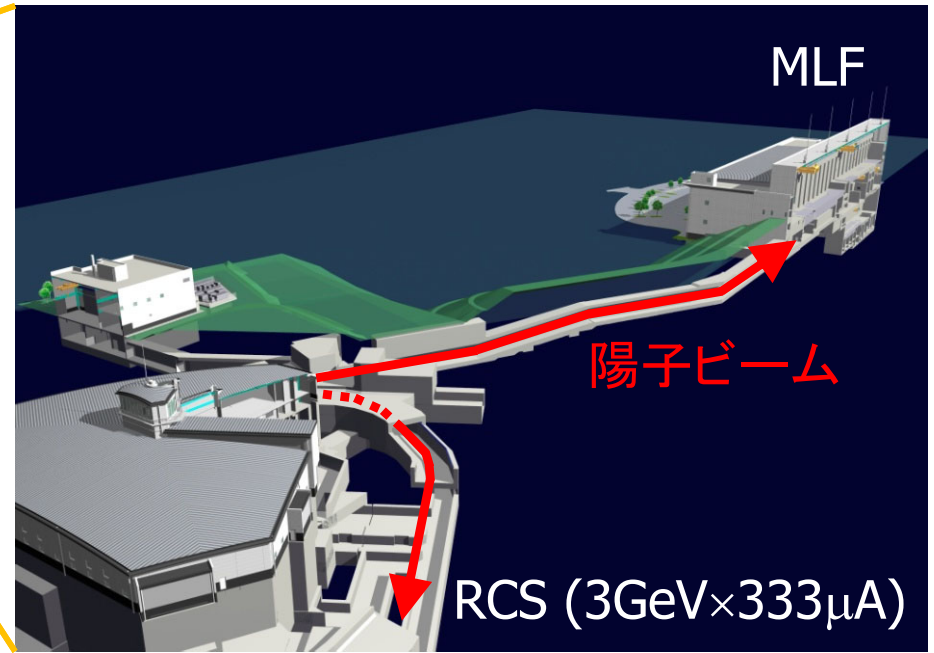
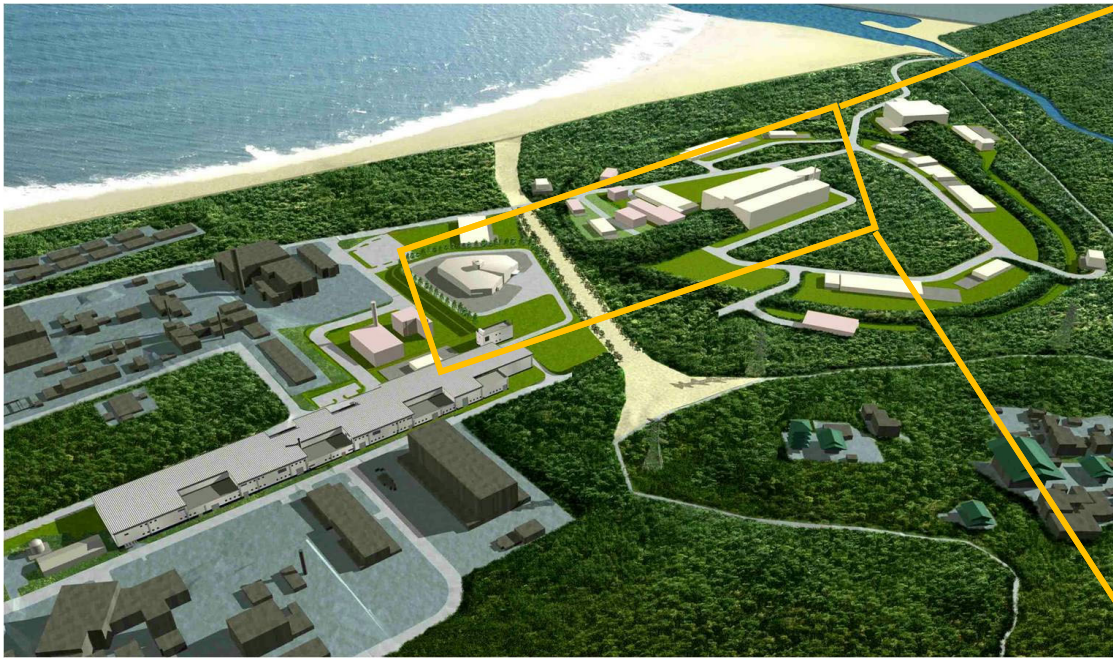
- ミュオンは貴重？、1つでも多く実験に利用したい  
「ビームの1滴、血の1滴」と言われたこともあった
    - パワハラ紛いなので、さすがに最近は言われなくても
    - ミュオンは(K中間子や反陽子と比べて)比較的、大量にできるのでまだマシ
  - アクセプタンス(空間、運動量)はとにかく大きく
  - 多くの利用者に(同時に)実験の機会を提供する
- ↓
- 一つの標的から複数のビームラインを展開させる  
かつ、各ビームラインは限界まで標的に近づける

# MLFミュオン施設の設計コンセプト

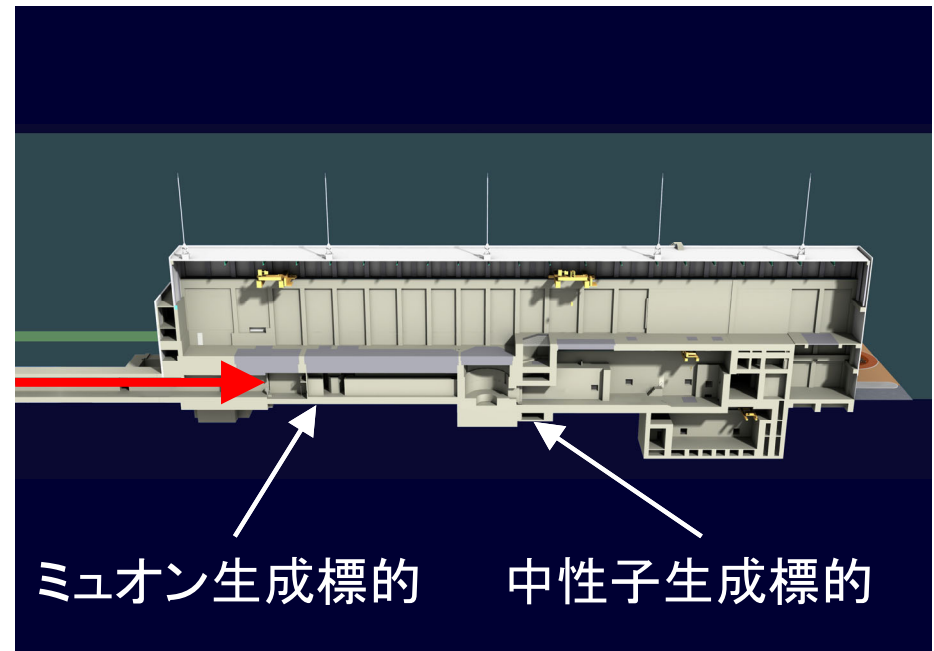
- 大強度標的はok！
- 標的からは4本のビームラインを展開させる？！
  - カスケード型標的(ミュオン標的30m下流は中性子)
  - 標的近傍は高放射線場、建屋内棟屋構造⇒拘束大世界の他の施設では遮蔽ブロックを積むだけ⇒自由度大
  - 予算上で最初は1.5本まで⇒運転開始(放射化)後に建設

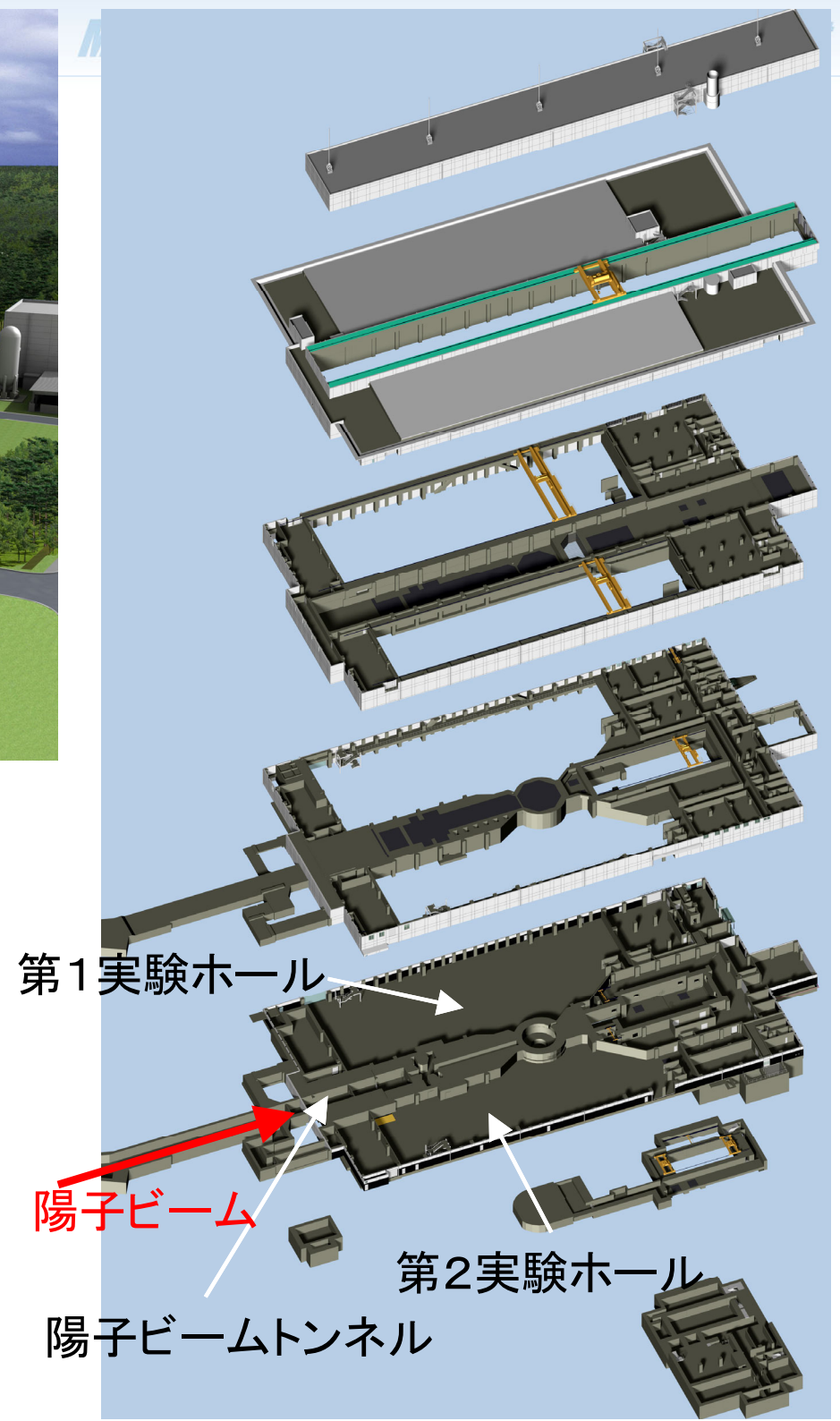
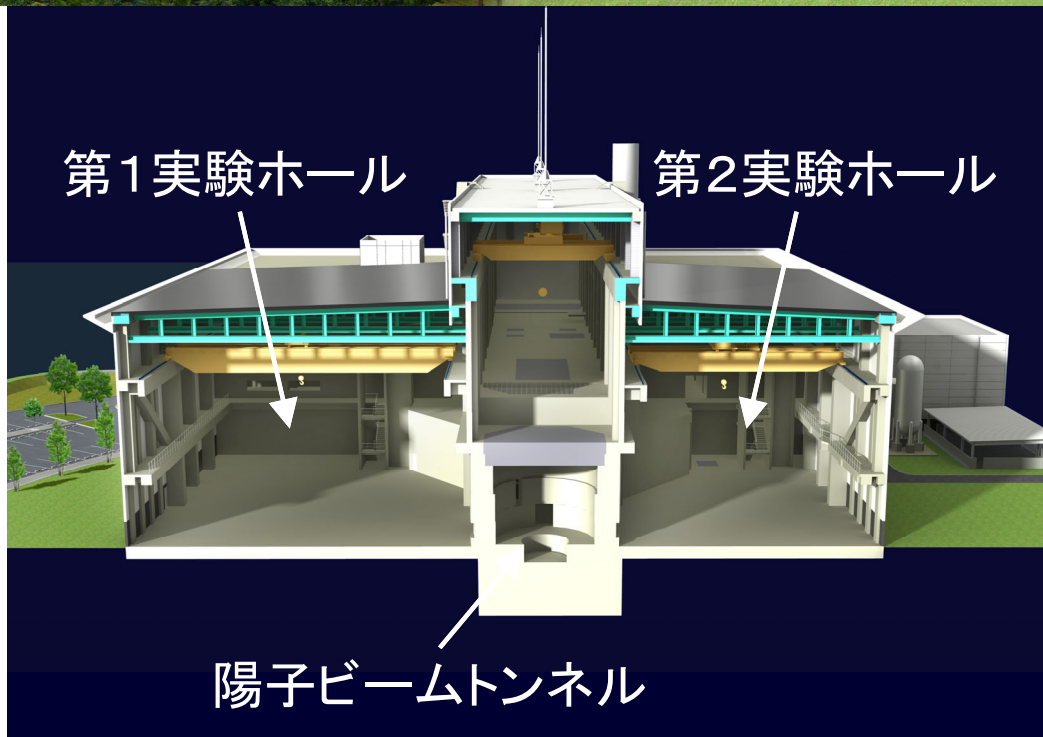
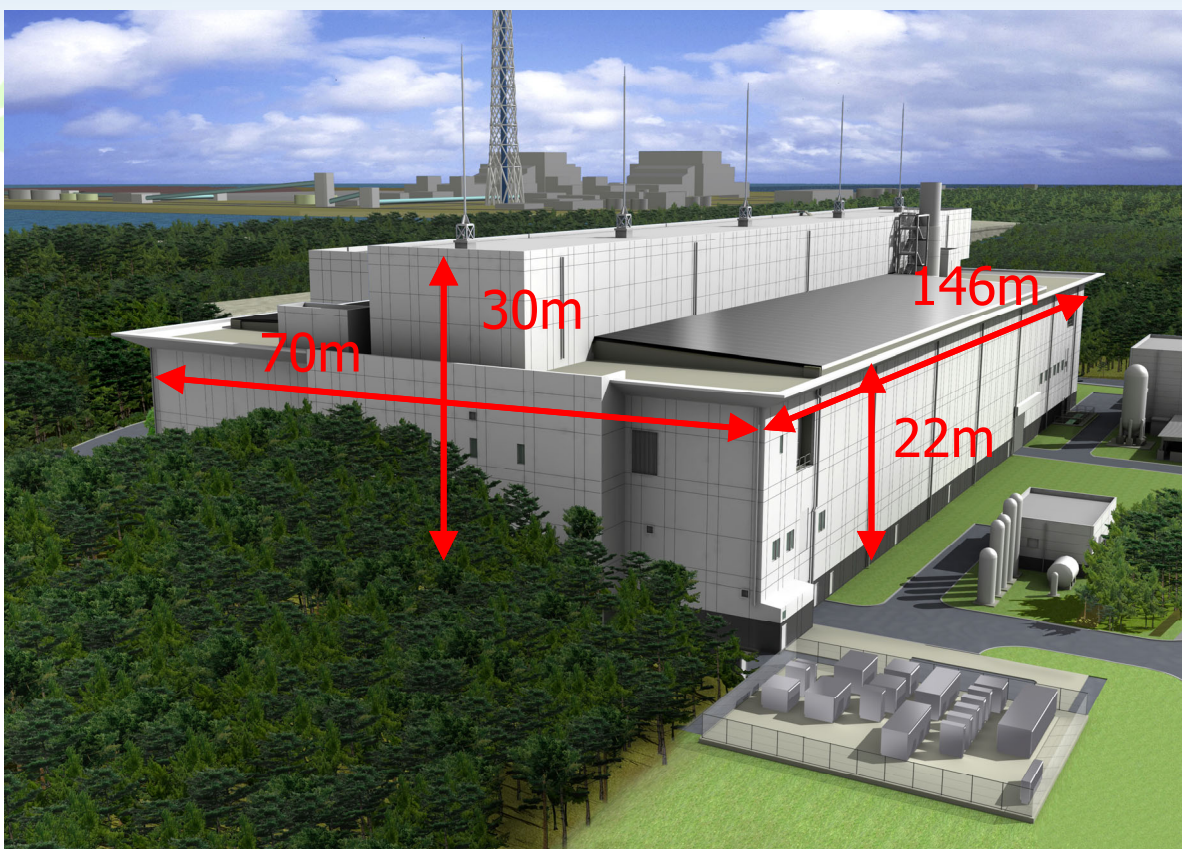


# 物質・生命科学実験施設 (MLF)

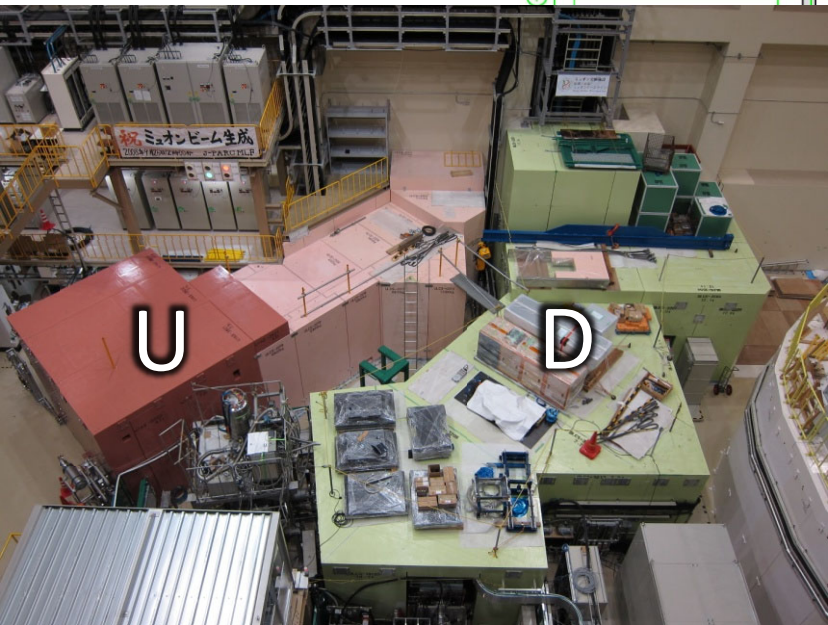
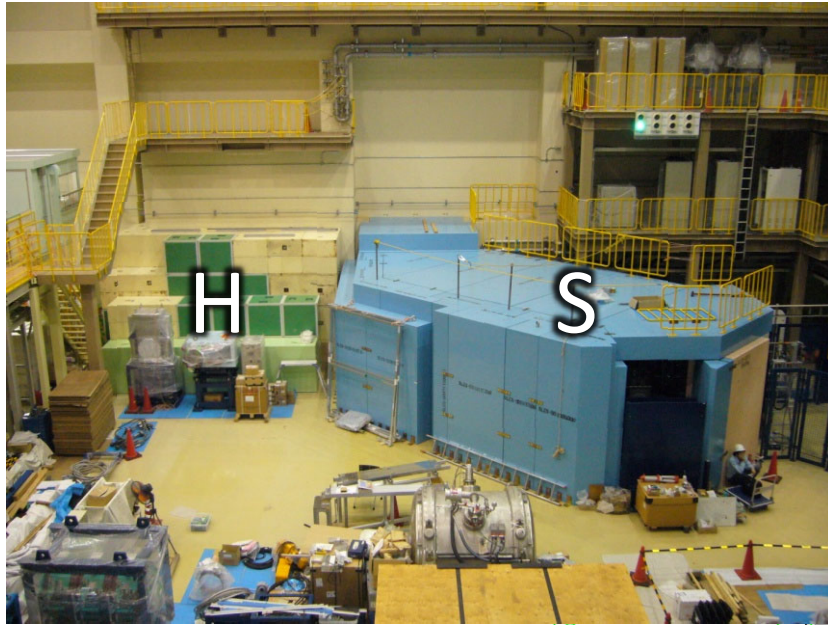


物質・生命科学実験施設では3GeVに加速した陽子を利用して、ミュオンと中性子を発生している。陽子ビーム強度は1MW、毎秒 $2 \times 10^{15}$ 個の陽子がMLFに到達する。

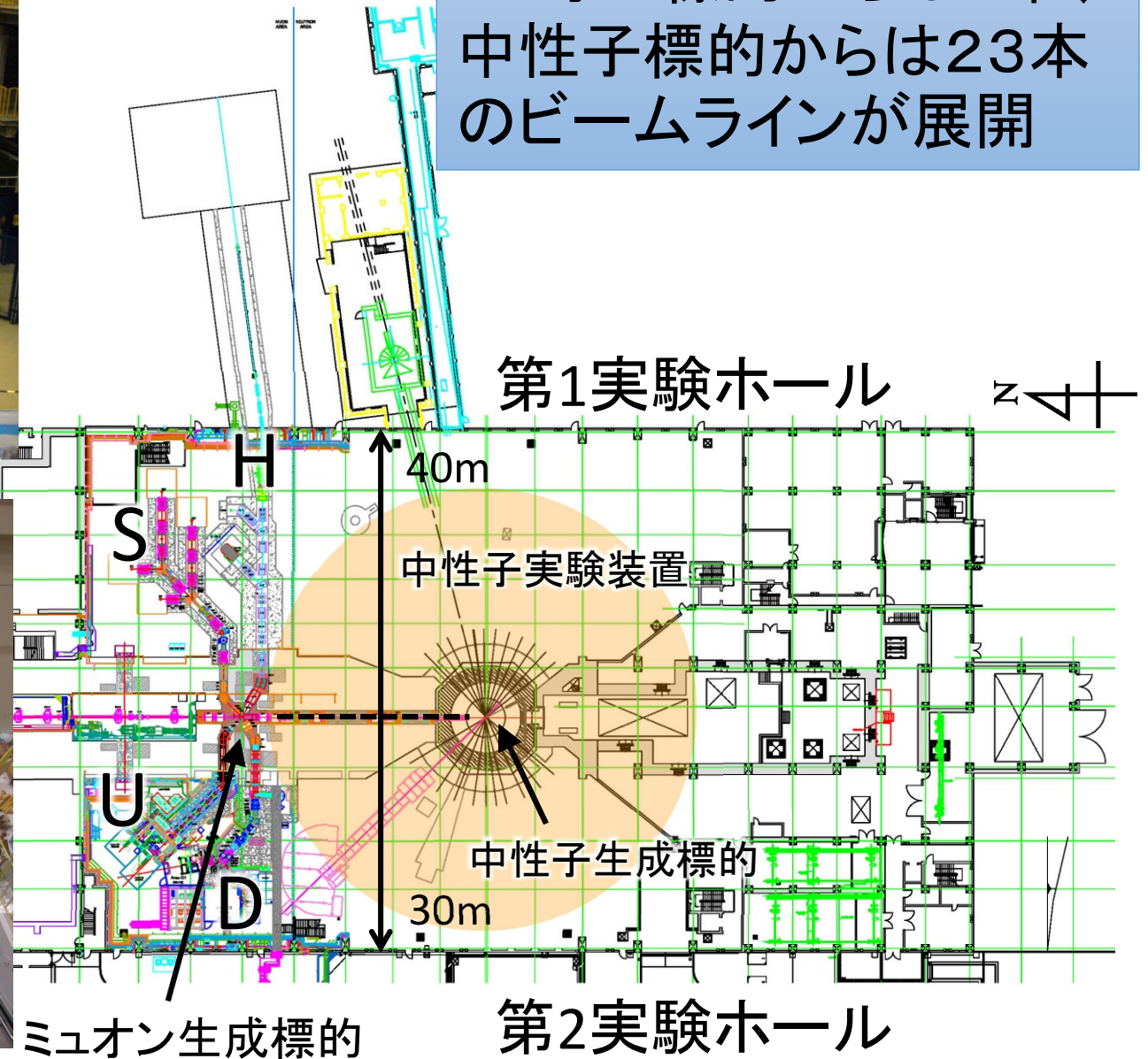




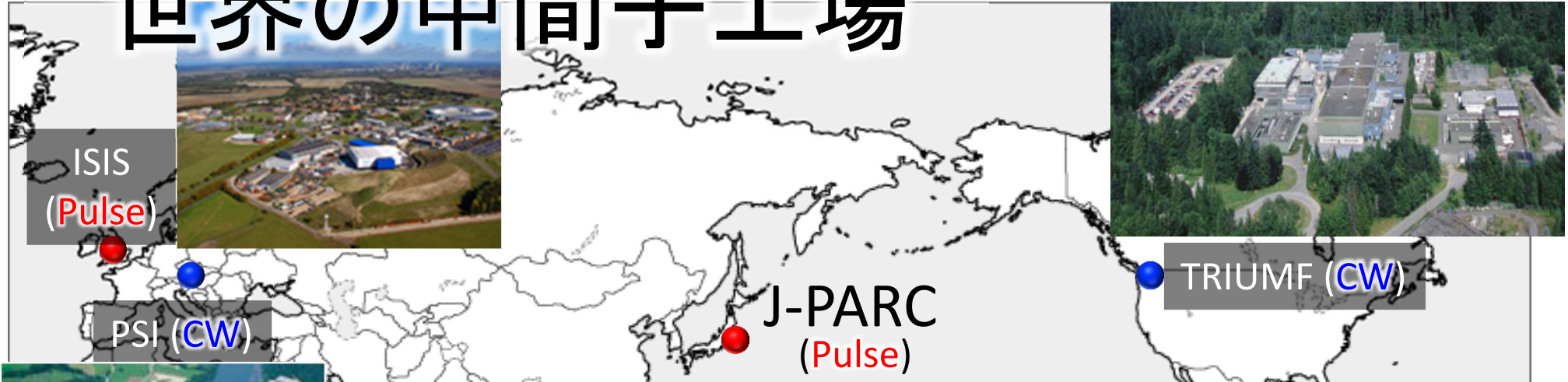
# 物質・生命科学実験施設



ミュオン標的からは4本、  
中性子標的からは23本の  
ビームラインが展開



# 世界の中間子工場

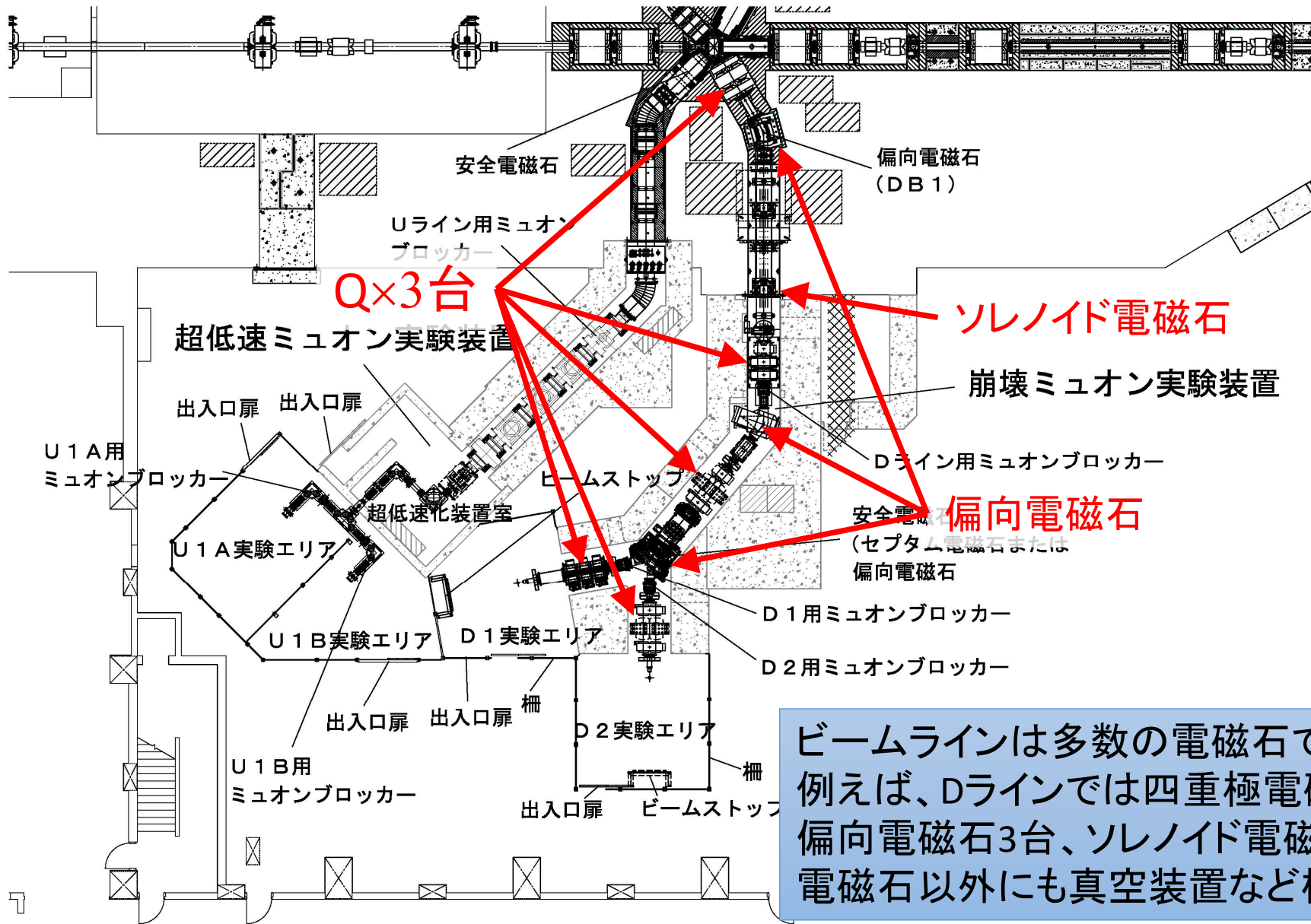


国名	日本	英国	スイス	カナダ
施設名	J-PARC MUSE	RAL ISIS	PSI	TRIUMF
陽子エネルギー [GeV]	3.0	0.8	0.59	0.52
陽子ビーム強度 [MW]	1.0	0.16	1.4	0.05
$\mu^+$ [/s] (surface)	$3 \times 10^8$ (U line)	$6 \times 10^5$	$3 \times 10^7$	$2 \times 10^5$
$\mu^-$ [/s]	$1 \times 10^7$	$7 \times 10^4$	$2 \times 10^7$	$(5 \times 10^4)$
時間構造	パルス(25Hz)	パルス(50Hz)	連続	連続

大強度ミュオンビームの時間構造は「パルス」か「連続」のどちらかに分類できる。各々、得意とする実験が異なるので相補的に利用されている。



# ビームラインを設計する

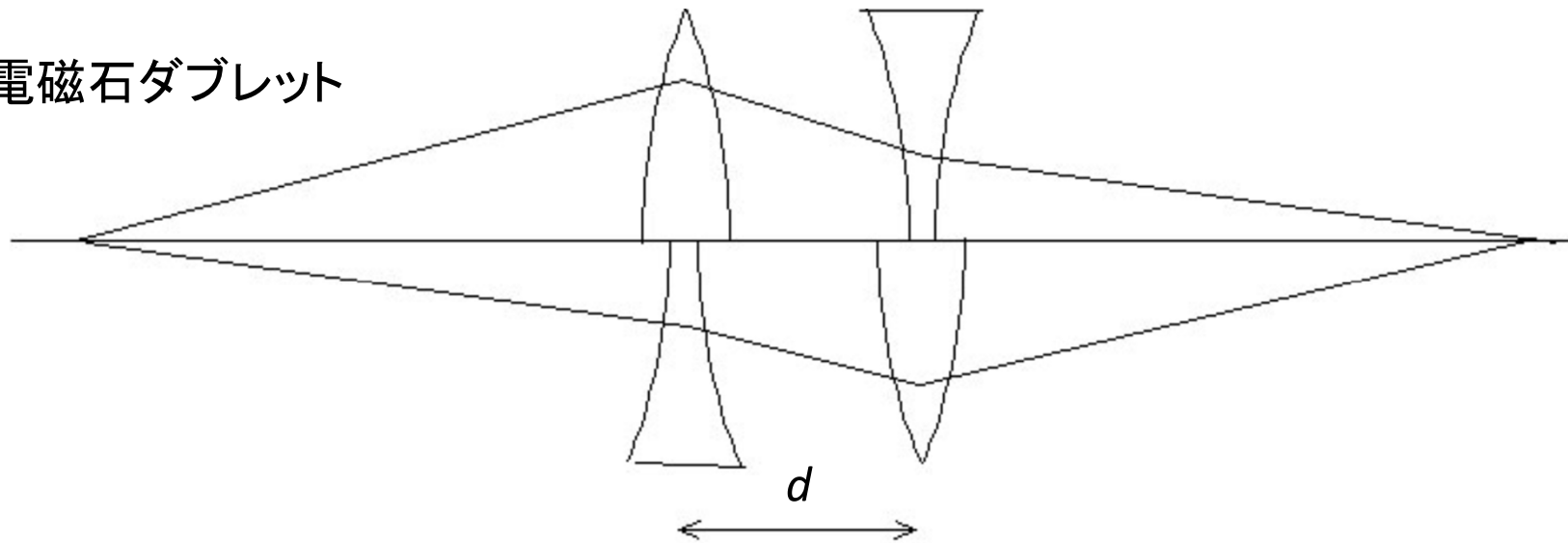


ビームラインは多数の電磁石で構成される  
 例えば、Dラインでは四重極電磁石15台、  
 偏向電磁石3台、ソレノイド電磁石1台  
 電磁石以外にも真空装置など様々な機器

# ビームの収束原理

- 加速器の講義 (OHO'07とか) の復習
- Q電磁石の収束と発散を組み合わせて、水平方向、鉛直方向ともにビームを収束できる

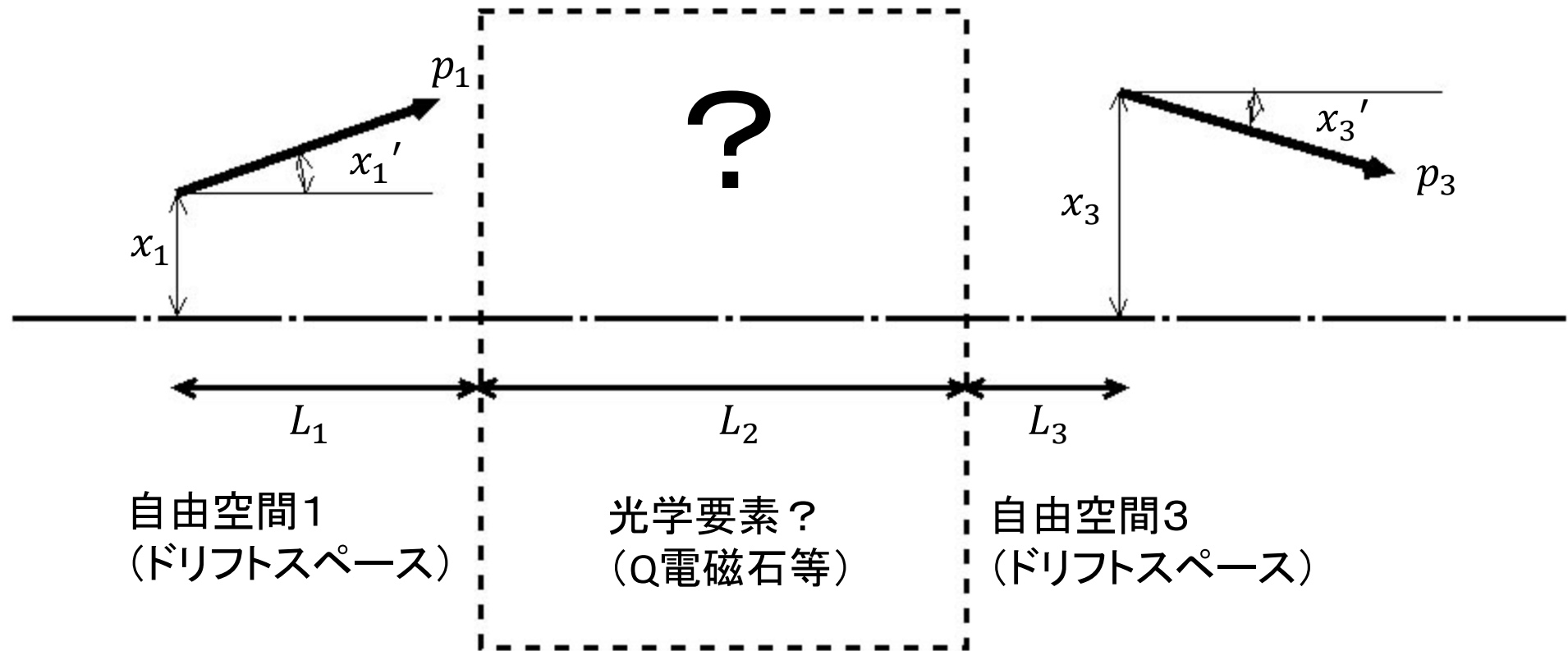
Q電磁石ダブレット



$$1/F = 1/f_1 + 1/f_2 - d/f_1 \cdot f_2$$

ここで、 $f_1 = -f_2$ なら、 $F = f_1^2/d > 0$   
 合成系は必ず凸レンズになる

# ビーム輸送計算—マトリックス法



$$\begin{bmatrix} x_3 \\ x_3' \\ p_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} M \begin{bmatrix} 1 & L_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1' \\ p_1 \end{bmatrix} \text{で書き表せる行列 } M (\det[M] = 1) \text{ が存在する}$$

行列  $M$  が分かれば、複雑そうに見える粒子の軌道も行列の積だけで線形に表せる

# 実際のマトリックス

## 4極電磁石のマトリックス

*First-order quadrupole matrix*

$$\begin{bmatrix}
 \cos k_q L & \frac{1}{k_q} \sin k_q L & 0 & 0 & 0 \\
 -k_q \sin k_q L & \cos k_q L & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \cosh k_q L & \frac{1}{k_q} \sinh k_q L & 0 \\
 0 & 0 & k_q \sinh k_q L & \cosh k_q L & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 x \\
 x' \\
 y \\
 y' \\
 p
 \end{bmatrix}$$

$L$  = the effective length of the quadrupole

$a$  = the radius of the aperture

$B_0$  = the field at radius  $a$

$k_q^2 = (B_0/a)(1/B\rho_0)$ , where  $(B\rho_0)$  = the magnetic rigidity (momentum) of the central trajectory.

実際の計算では、いちいちこんな面倒な式は解かず、計算コードにお任せ  
 入力パラメータは出発点のエミッタンス、要素の大きさ、磁場の強さなど

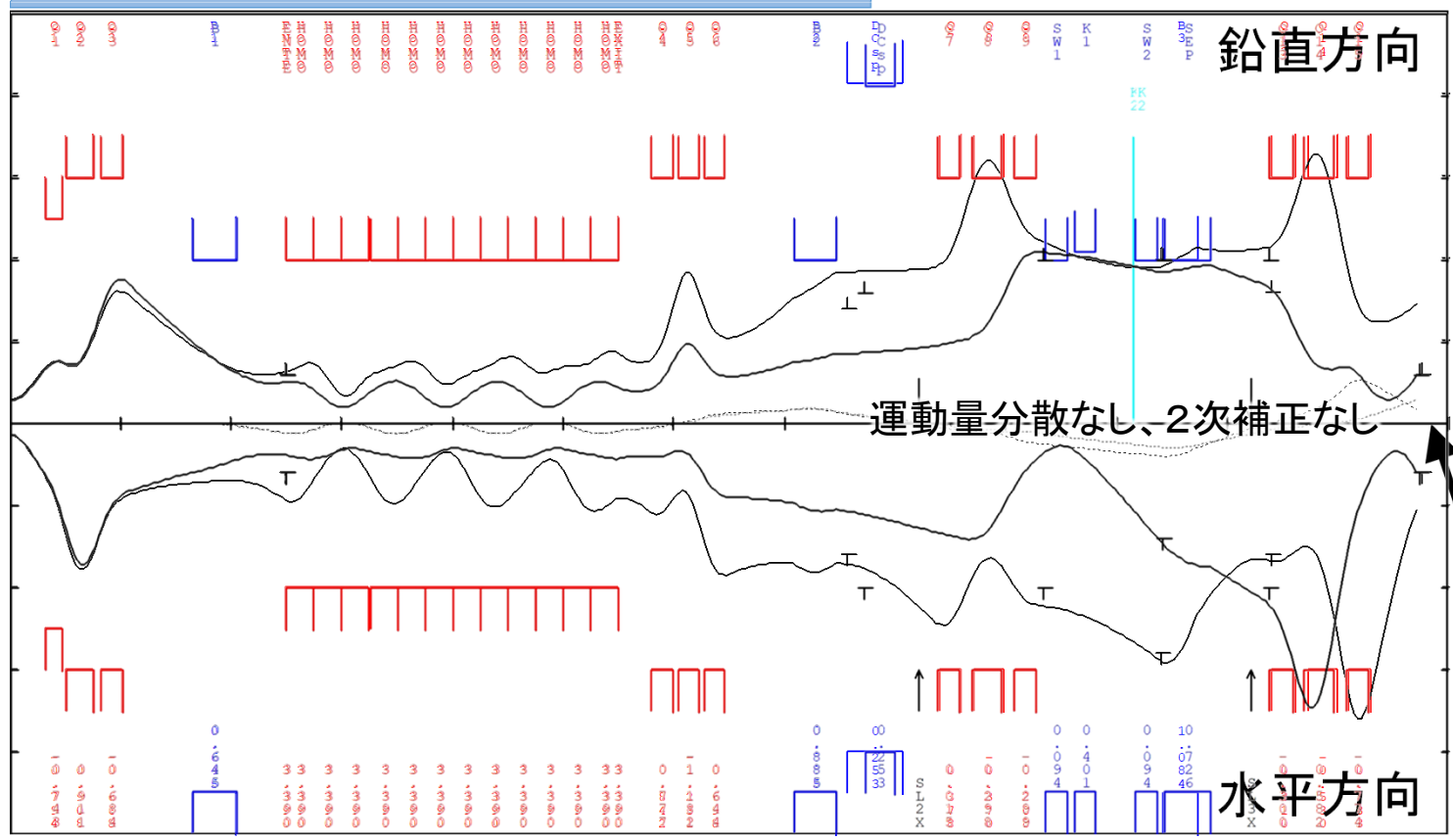
# Liouvilleの定理

- $|M| = 1$ ならば“エミッタンス”は一定 (Liouvilleの定理) は数学の定理であって、物理法則ではない
- そもそもローレンツの法則 ( $d^2x/ds^2 + K(s) \cdot x = 0$ ) で、 $K(s)$  が  $s$  によらず一定という近似が成り立たないと線形ではないため、行列計算自体ができない
  - Qの場合、 $K(s) = -e/p \cdot G$ ともかけ、磁場勾配  $G$  に比例  $GL$ 積でfringe fieldの寄与が無視できない場合、補正が必要
  - $K(s) > 0$ の場合は三角関数 (sin, cos) の収束解  
 $K(s) < 0$ の場合は双極関数 (sinh, cosh) の発散解
- ミュオンビームラインは広がった ( $x, x'$ 等が大きい) ビームを通すため、Liouvilleの定理の前提条件が崩れ、転送行列計算では高次 ( $x^2, xx'$ 等) 補正必須

# ビームを輸送する

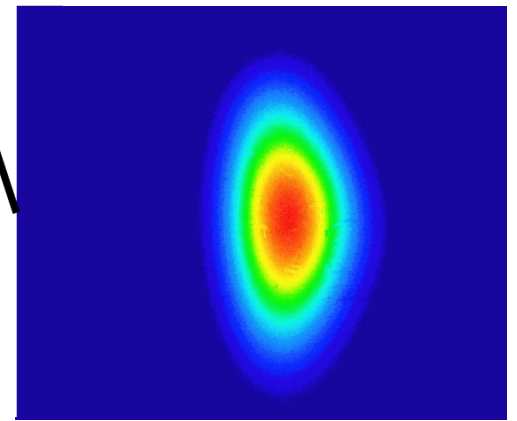
## マトリクス計算 (TRANSPORT) の結果

Thu Oct 28 00:59:03 2010



25cm  
20  
15  
10  
5

エミッタンス増加は下流に行く程、重畳して現れる



ミュオンビームの場合、①運動量分散、②Q電磁石の漏れ磁場 (fringe field)、③電磁石磁場分布の理想的なものとのズレ、の影響でエミッタンスが増加 (Liouvilleの定理は×) 高次 (最低限2次の効果 ( $x^2, xx'$  等)) を含めた計算をしないとビーム輸送の再現性× 偏向電磁石、Q電磁石、(シンプルな形状の)ソレノイドだけなら2次補正のMATRIXで○ モダンなビームライン (MUSEのU、Hライン) は粒子軌道計算 (G4beamline等) が必須

# MATRIX計算 (TRANSPORT) 入力例

/JPARC MUON D2 SURFACE with fringing field/

0

1. 0.75 50.0 1.5 50.0 .0 5.0 .030 /BEAM/;

16. 3. 206.7683 ;

17. 2. /SECO/;

2次の効果のスイッチ

3. 0.6231;

16.0 25. 0.2303 /FI11/;

16.0 26. -2.105E-02 /FI12/;

16.0 27. 7.071E-02 /FI13/;

16.0 28. -0.3640 /FI14/;

PSI版のTRANSPORTで拡張されたQ電磁石の fringe fieldによる2次効果の補正パラメータ

16.0 100.0 17.0 17.0 ;

16.0 101.0 12.5 0.0 ;

2.0 1000.;

5.0 0.3238 -0.787 12.50 /Q1/;

2.0 1000.;

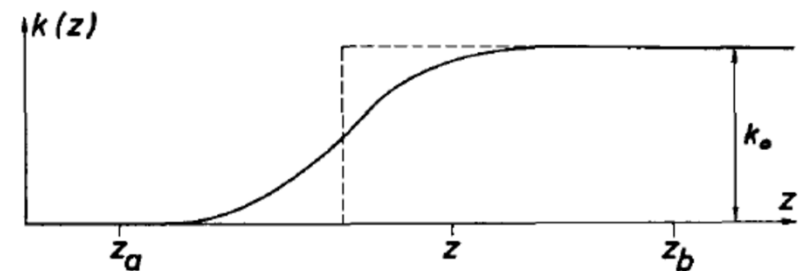
...

$$I_1 = k_0^{-1} \int_{z_a}^{z_b} \int k(z) dz dz - \frac{1}{2} z_b^2$$

$$I_2 = k_0^{-1} \int_{z_a}^{z_b} z \int k(z) dz dz - \frac{1}{3} z_b^3$$

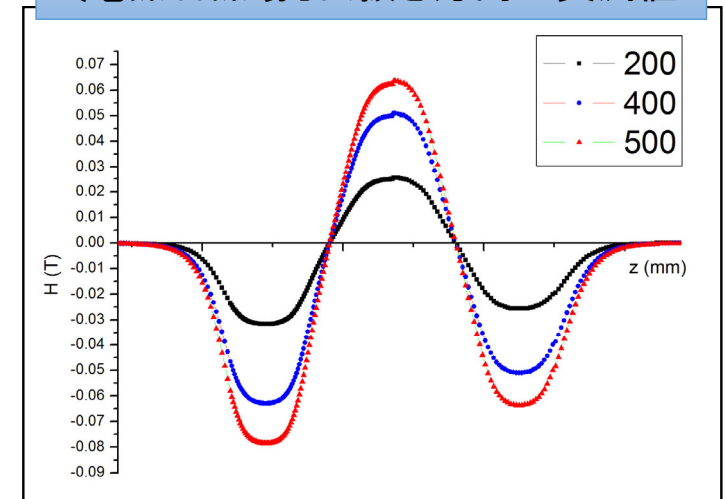
$$I_3 = k_0^{-2} \int_{z_a}^{z_b} \left[ \int k(z) dz \right]^2 dz - \frac{1}{3} z_b^3$$

$$I_4 = k_0^{-2} \int_{z_a}^{z_b} k(z)^2 dz - z_b$$



磁場分布(電磁石の形状)に依存

Q電磁石磁場引く抜き方向の実測値



軌道計算には電磁石の磁場分布(FEM計算等)が必要になり、かなり厄介

# ミュオンを止める

止まってからが「ミュオン科学」の始まり



# ビームを止める

- 実験エリアまでビームを輸送できた！
- ビームの**運動量**はビームライン電磁石（特に偏向電磁石）の**磁束密度（電流値）**に比例する

$$B\rho = P/e, \quad B[\text{T}] \cdot \rho[\text{m}] = P[\text{MeV}/c]/300$$

曲率半径 $\rho$ が一定の場合、運動量 $P$ は磁束密度 $B$ に比例

- 加速器由来のミュオンを用いた実験では、一般に**ミュオンを物質中に止めて**、その性質を測る
- 狙った位置にミュオンを止めることが必要
- ビームの**運動量**を変えることで、**停止位置を調整**

# 物質中でのエネルギーロス

- 物質に入射した荷電粒子はその物質の電子にエネルギーを渡すことで減速する(**電離損失**)  
GeV程度の高エネルギーでは、制動輻射、 $e^+e^-$ 対の生成などの離散過程も無視できない、MeV程度では電離損失だけ考えても大外れしない

- Bethe-Bloch公式** (導出方法は色々な教科書に出ているので、そちらを参照)

$$-\frac{dE}{dl} = 4\pi z^2 \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{n}{m_e v^2} \left( \ln \left( \frac{2m_e v^2}{I \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right)$$

$z$ : 入射粒子の電荷、 $n$ : 電子数密度、 $v$ : 入射粒子の速さ、 $I$ : 電子の束縛エネルギー(イオン化エネルギー)

# 電離損失—Bethe-Bloch

- 少し書き換えると、

$$-\frac{dE}{dl} = 4\pi z^2 \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \right)^2 \frac{n(\hbar c)^2}{m_e c^2} \left[ \frac{1}{\beta^2} \ln \left( \frac{2m_e c^2}{I} \frac{\beta^2}{1-\beta^2} \right) - 1 \right]$$

- $\alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{1}{137}$

$$\hbar c = 197 [\text{MeV} \cdot \text{fm}]$$

$$I \approx 10Z [\text{eV}] \quad \therefore 2m_e c^2 / I \approx 10^5 / Z$$

$$n [1/\text{cm}^3] = \frac{Z}{A [\text{g/mol}]} \rho [\text{g/cm}^3] N_A [1/\text{mol}]$$

- これらを使うと、

$$-\frac{dE}{dl} \approx 0.32 \frac{Z}{A} \rho z^2 f(Z, \beta) [\text{MeV/cm}]$$

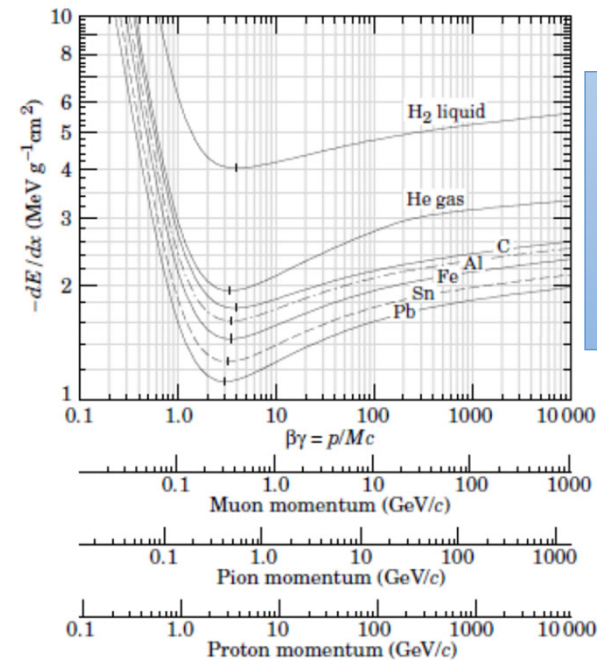
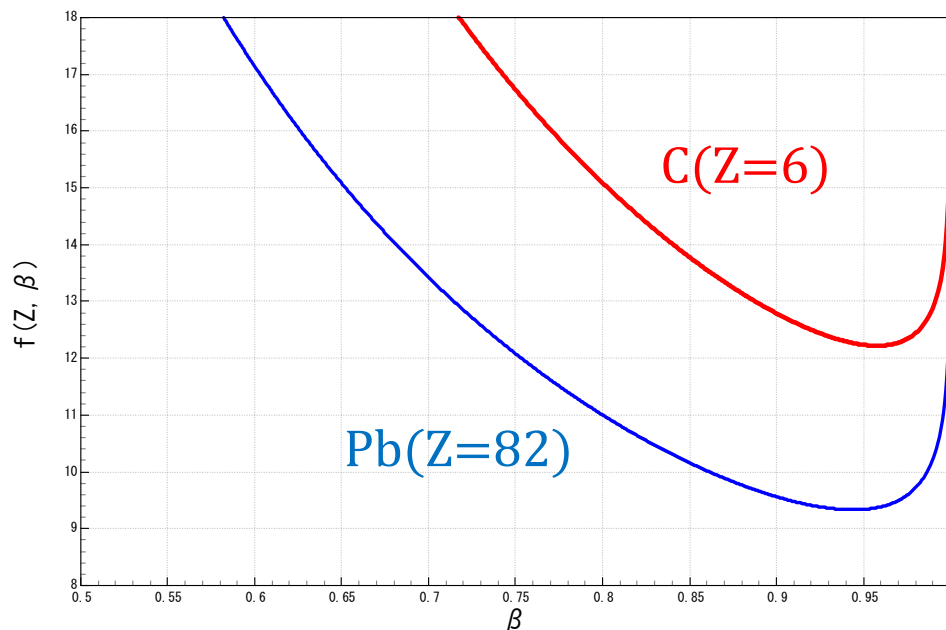
$$\text{ただし、} f(Z, \beta) = \frac{1}{\beta^2} \ln \frac{10^5}{Z} \frac{\beta^2}{1-\beta^2} - 1$$

# 電離損失—Bethe-Bloch

- 距離 $l$ の代わりに、 $x \equiv \rho l [\text{g}/\text{cm}^2]$ を使うと

$$-\frac{dE}{dx} \approx 0.32 \frac{Z}{A} z^2 f(Z, \beta) [\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}]$$

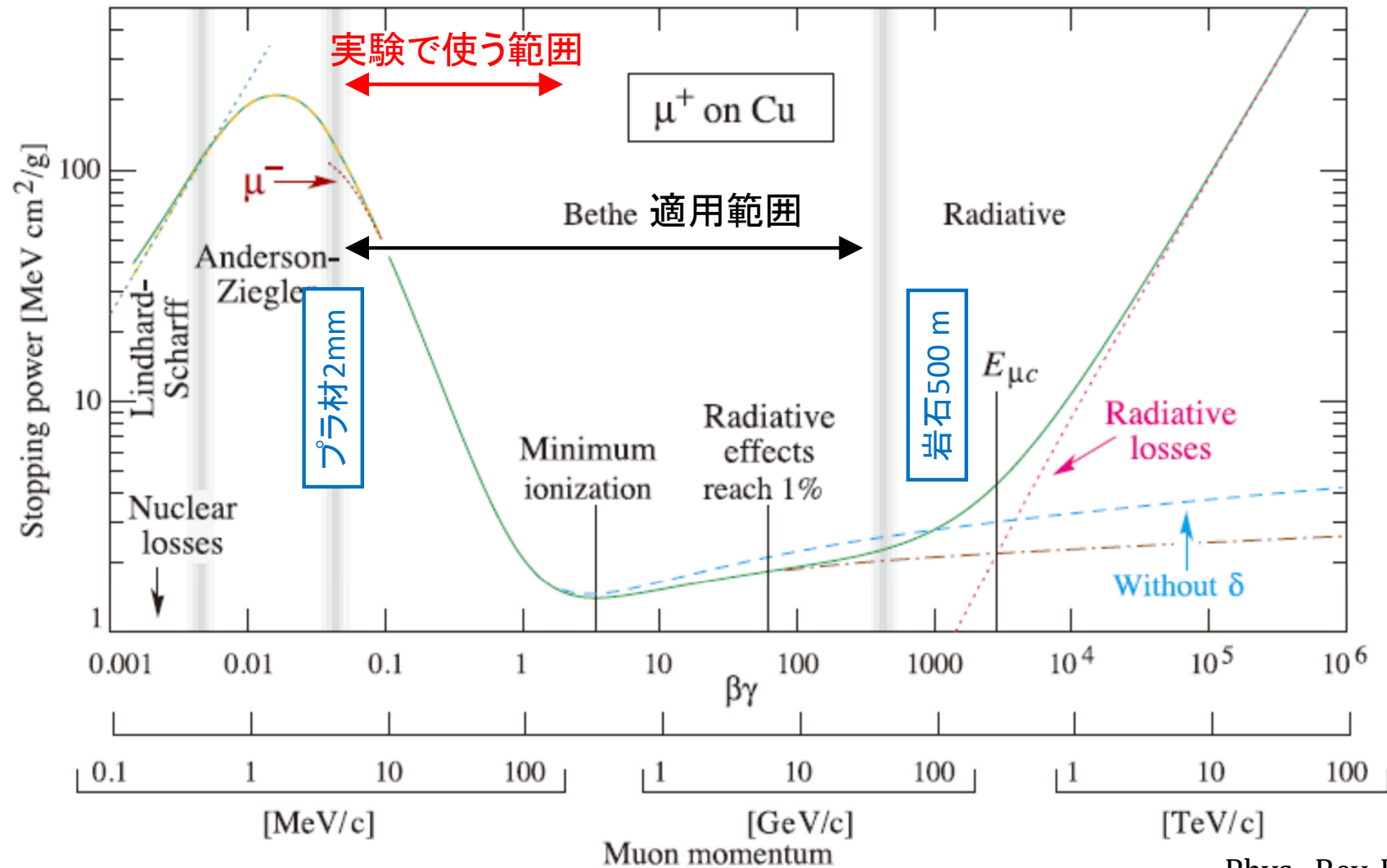
- $Z/A \sim 1/2$ で物質依存性は小さい
- $f(Z, \beta)$ の $Z$ 依存性は対数的で小さい、 $\beta \sim 0.95$ で最小値
- 炭素： $-\frac{dE}{dx} \approx 2.0 [\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}]$ 、鉛： $1.2 [\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}]$



入射粒子の違いは、  
速さの違いを通して  
現れる  
x軸方向へシフト

# ミュオンの阻止能

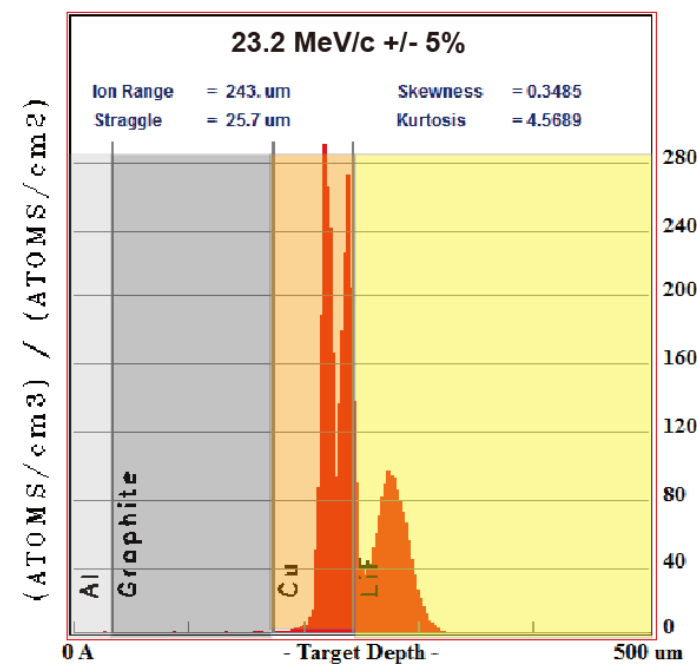
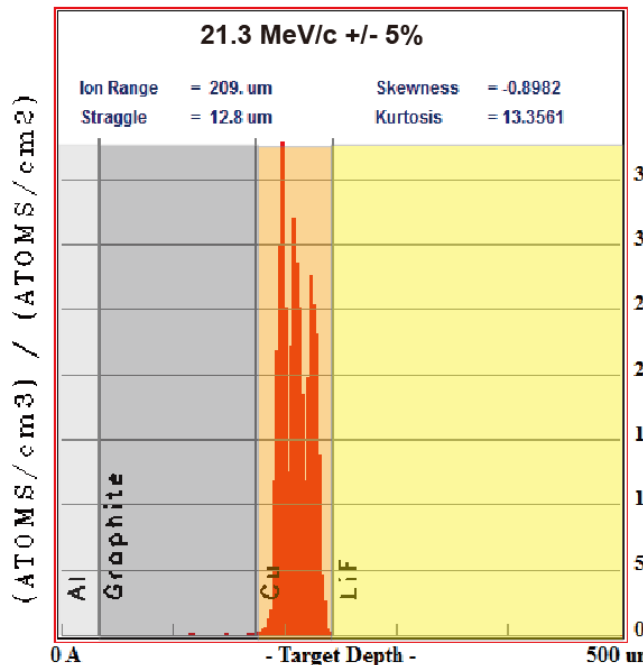
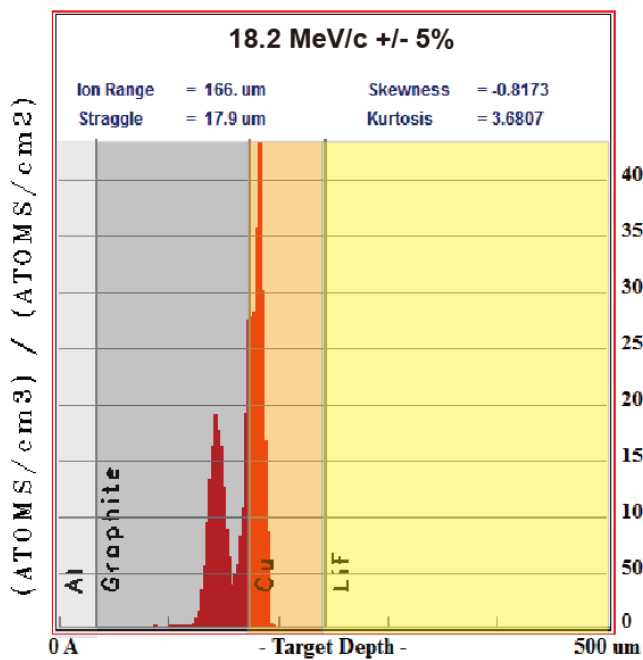
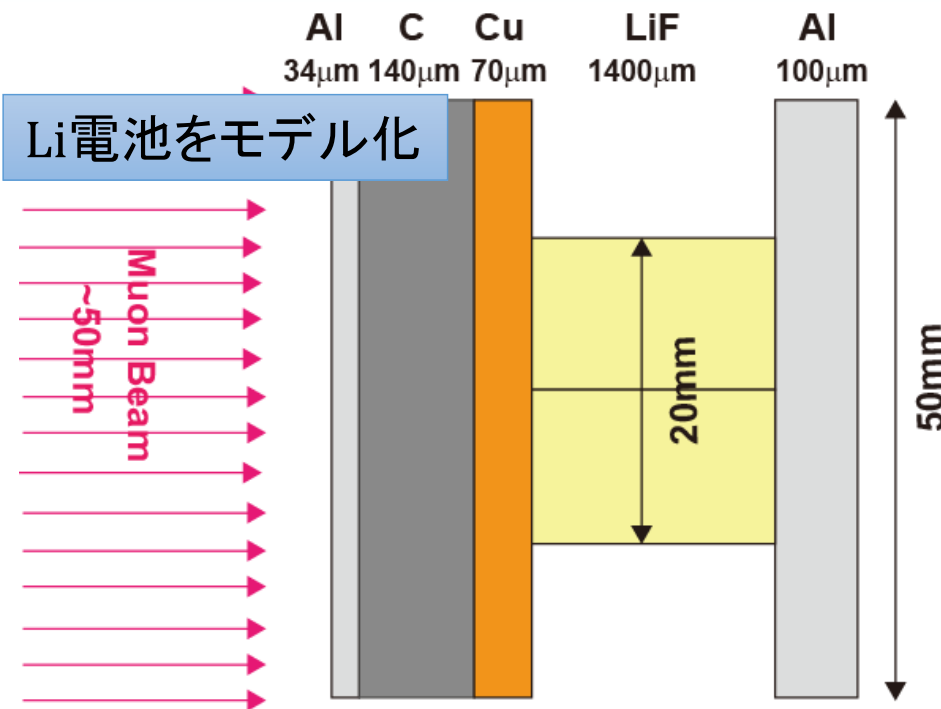
ある運動エネルギーを持つミュオンが透過できる厚さは、物質の密度（と原子番号）で決まる。



# ビームを止める

実際にはMonte-Carloで、  
ミュオンの停止位置を計算  
必要な運動量を決定

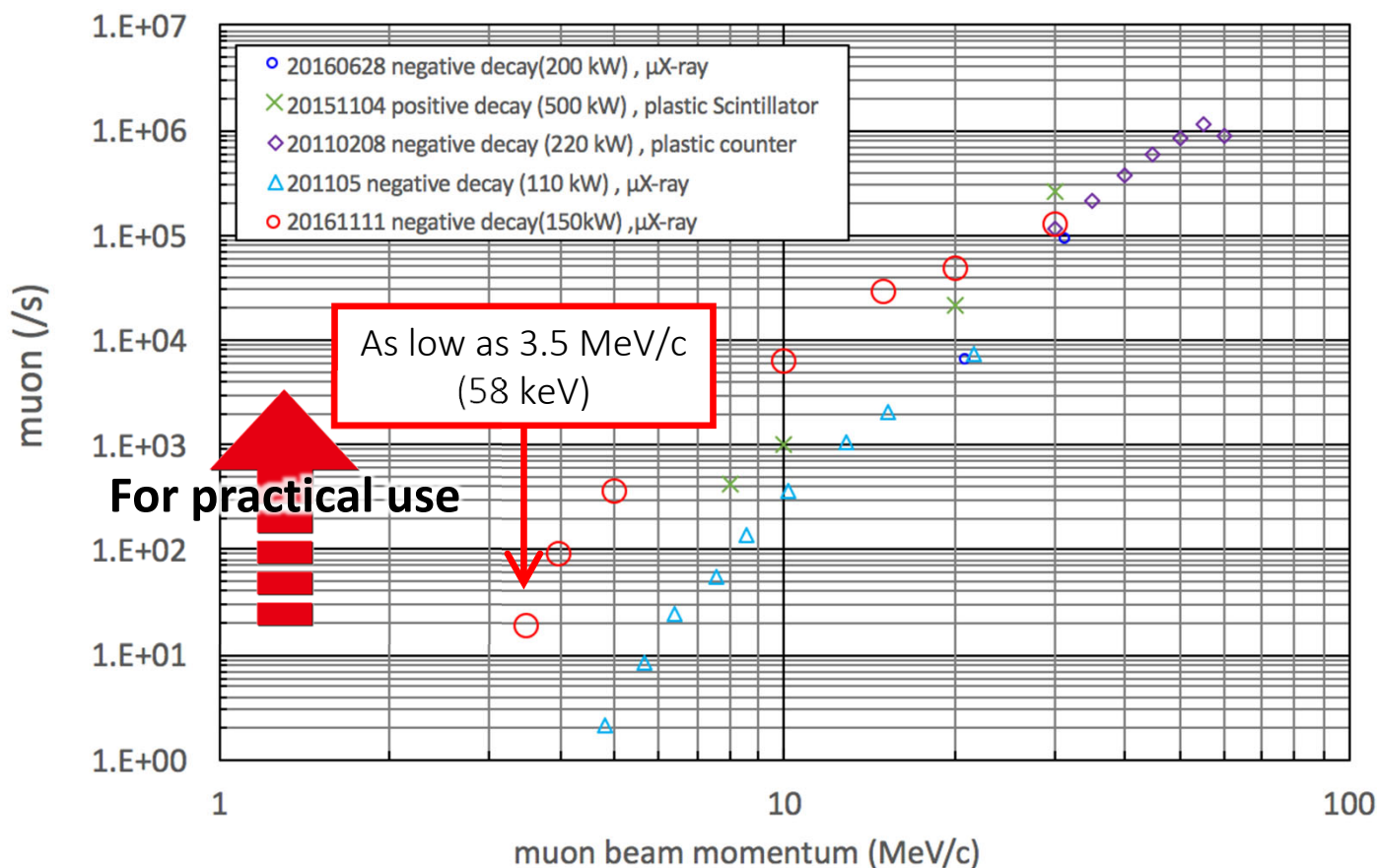
※実際のビームは運動量に幅がある  
(モーメントムバイト)注意が必要  
TRIMの計算(中心+/-5パーセント運動量3本の線スペクトルを入射)



# Negative muon yield in MLF J-PARC

High negative muon yield owing to

- Beam transport without intersecting windows in SC solenoid
- Relatively large negative pion yield for 3 GeV proton driver



“The world’s strongest pulse” and “high negative muon yield” are our specialties that differentiate the other meson factories in the world.

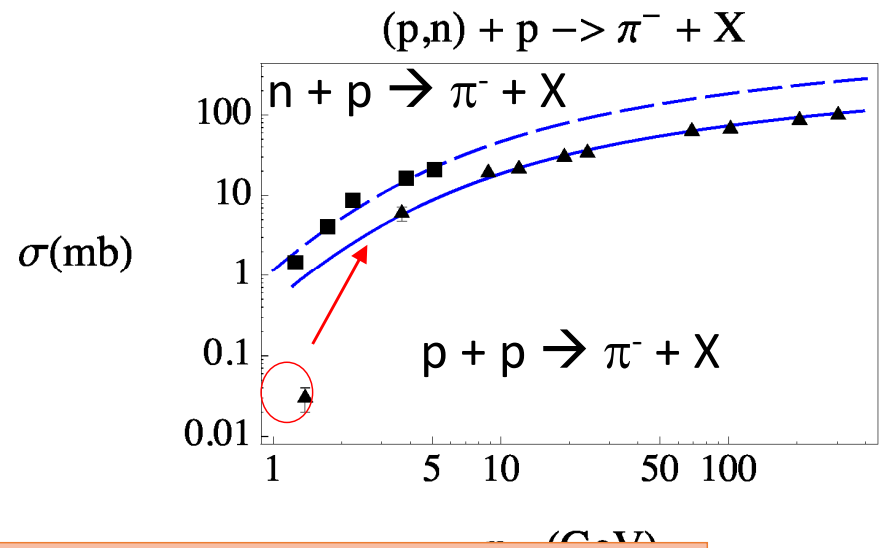
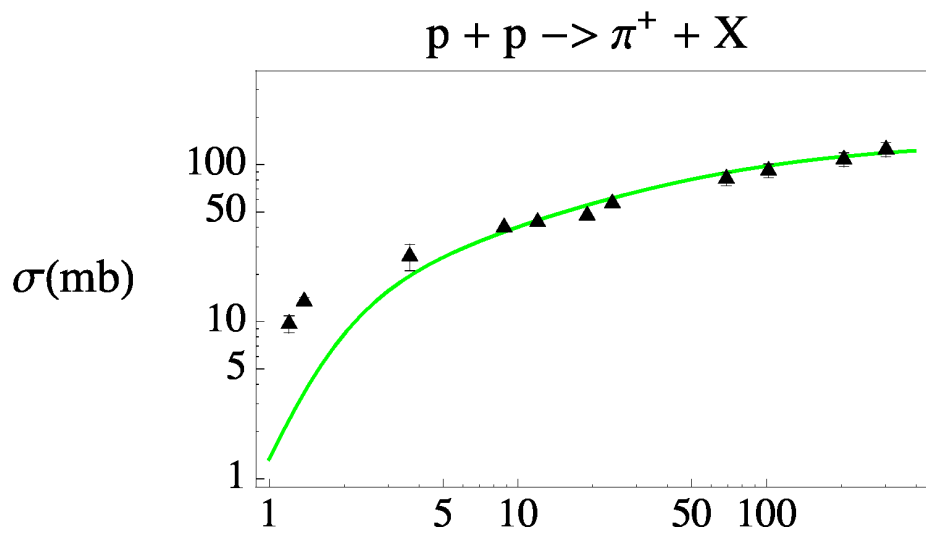


Figure 5: Log-log plot of cross-section  $\sigma$  (mb) vs energy (GeV) for  $p + p \rightarrow \pi^+ + X$ . The solid line represents a parameterization. Data points are from references [6, 7, 9, 14].

MUSE utilizes **3 GeV** proton, and the  **$\pi^-$**  yield is higher than the other meson factories.

parameterization (blue, solid line), experimental data (triangles), and simulation data (solid squares). The red arrow points to the data point at low energy, which is circled in red.

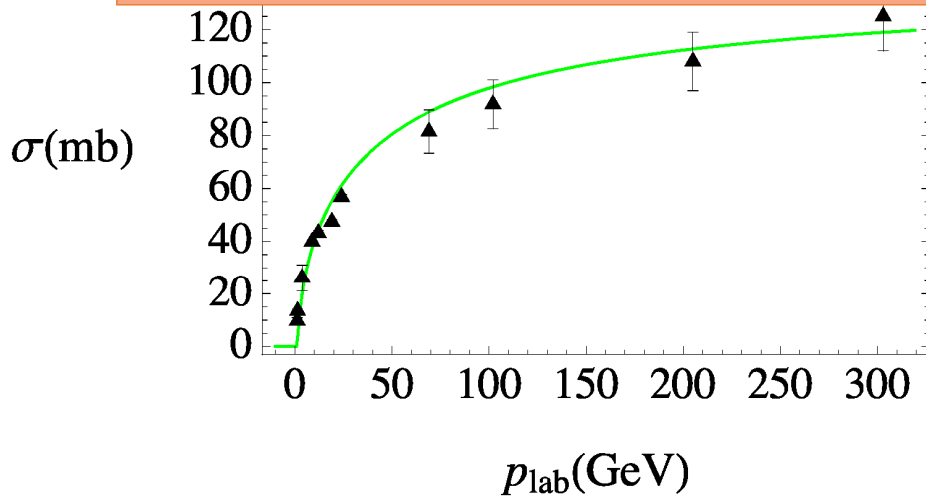


Figure 6: Same as figure 5, except for use of linear axes.

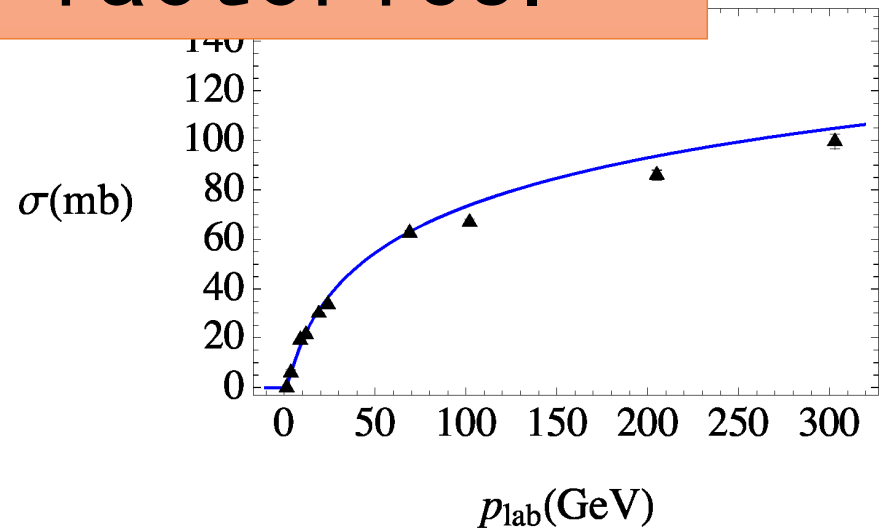


Figure 8: Same as Figure 7, except for use of linear axes and n+p reaction is included.



# 世界一のミュオン強度(数)達成

2010年、設計値1/5のビーム強度で世界一を達成！

www2.kek.jp/ja/newskek/2010 ミュオン 世界- →



News@KEK

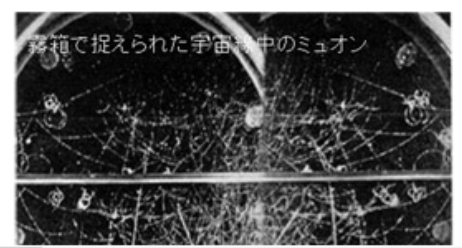
世界最高強度のパルスミュオンを発生 ~まだ誰も見たことのない未知の世界へ~

**最終的には毎秒1億個以上**

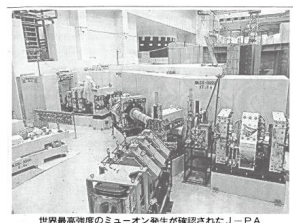
目標は「性能と強度で世界一のミュオン施設」(みやけやすひろ) 物質構造科学研究所(KEK)にて2009年12月10日、大強度陽子加速器施設(J-PARC)の物質・生命科学実験施設(MLF)にて1パルスあたり約18万個のミュオンの発生を確認しました。これは、これまでの最高レベルであった英国ミュオン施設を上回る結果であり、新たなフロンティアへの幕開けとなるビームとなりました。現在の運用は設計性能の8分の1のレベルで行われており、今後の記録更新に大いに期待がかかります。

ミュオンとは？

肉眼で見ることができないため、全く実感はありませんが、実は、私たちは毎日たくさんのミュオンに触れています。手のひらを空に向けて広げてみてください。すると、1秒に1個の割合で宇宙線として地球に降り注いでいるミュオンが手のひらを通り抜けていきます。このように、普段は誰もその存在に気付



**ミュオンビーム発生に成功** J-PARC (KEK) 高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究開発機構は、原子力研究開発機構が、物質構造科学研究所(KEK)の大強度陽子加速器施設(J-PARC)にて、2009年12月10日、大強度陽子加速器施設(J-PARC)の物質・生命科学実験施設(MLF)にて1パルスあたり約18万個のミュオンの発生を確認しました。これは、これまでの最高レベルであった英国ミュオン施設を上回る結果であり、新たなフロンティアへの幕開けとなるビームとなりました。現在の運用は設計性能の8分の1のレベルで行われており、今後の記録更新に大いに期待がかかります。



**世界最高出力を達成** J-PARC「ミュオン」発生装置 東海村の大強度陽子加速器施設(J-PARC)の物質・生命科学実験施設(MLF)にて、2009年12月10日、大強度陽子加速器施設(J-PARC)の物質・生命科学実験施設(MLF)にて1パルスあたり約18万個のミュオンの発生を確認しました。これは、これまでの最高レベルであった英国ミュオン施設を上回る結果であり、新たなフロンティアへの幕開けとなるビームとなりました。現在の運用は設計性能の8分の1のレベルで行われており、今後の記録更新に大いに期待がかかります。

読売新聞 2010年3月16日掲載

日経産業新聞 2008年9月掲載



**世界最高強度 ミュオン発生** J-PARC 実験で成功 東海村の大強度陽子加速器施設(J-PARC)の物質・生命科学実験施設(MLF)にて、2009年12月10日、大強度陽子加速器施設(J-PARC)の物質・生命科学実験施設(MLF)にて1パルスあたり約18万個のミュオンの発生を確認しました。これは、これまでの最高レベルであった英国ミュオン施設を上回る結果であり、新たなフロンティアへの幕開けとなるビームとなりました。現在の運用は設計性能の8分の1のレベルで行われており、今後の記録更新に大いに期待がかかります。

科学新聞 2010年4月2日掲載

