

レーザーコンプトン γ 線 によるミュオン対生成と その応用

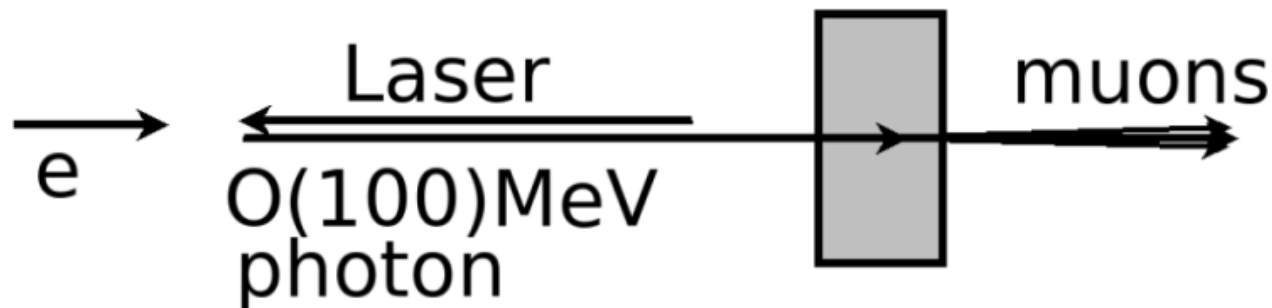
KEK物構研ミュオン 山崎高幸*

* takayuki@post.kek.jp

@ILCの多角的活用を考える会2

案(2) γ beam on a fixed target

e^- storage ring から取り出した e^- にレーザーを当て、inverse Compton 散乱を利用して $\mathcal{O}(200)$ MeV の光子を作る。それを標的に当て、 μ^\pm を対生成する。



今日はこの方式についてももう少し詳しく
検討した結果について

検討事項は3つ

1. 電子ビーム（のエネルギー）

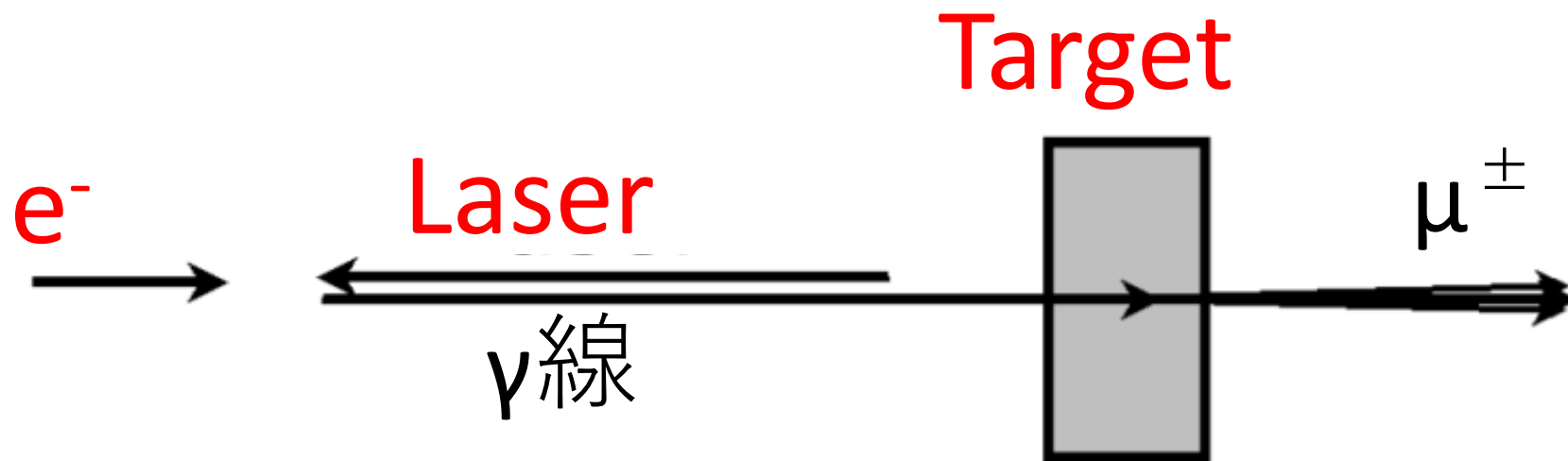
5GeV・125GeVの2パターンで検討

2. レーザー（の種類）

レーザーコンプトンの収量から決定

3. ターゲット（の材質、厚み）

μ^\pm の収量から決定



レーザーコンプトン

- 出てくる γ 線のエネルギー E_γ [eV] とフラックス F_γ [個/s] は

$$E_\gamma = \frac{4\gamma^2 E_L}{1 + (\gamma\theta)^2 + 4\gamma E_L/m_e}$$

$$F_\gamma = 2f \frac{\sigma}{A} N_e N_L$$

γ : 電子の γ ファクター
 E_L [eV] : レーザー光子エネルギー
 θ [rad] : 散乱角 (広がり $\sim 1/\gamma$)
 m_e [eV] : 電子質量
 f [回/s] : 衝突頻度
 σ [m²] : トムソン散乱断面積
 A [m²] : ビーム断面積の大きな方
※通常はレーザーのビームサイズ
 N_e : パルスあたりの電子数
 N_L : パルスあたりの光子数

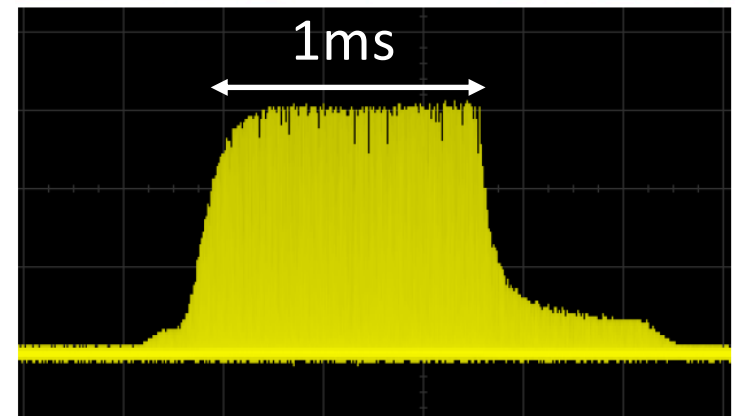
- ILCに同期したパルスレーザーを使うわけだが、レーザーの平均パワーを P [W]、波長 λ [m] とすると、

$$F_\gamma \propto f N_L / A \propto P \lambda / A \propto P / \lambda$$

なので、平均パワーが高く波長が短いレーザーがよい

レーザーについて

- ILCはバンチ幅0.3mmのバンチが554ns間隔で1312個並んでパルスを作っている。パルスの繰り返しレートは5Hz
- AMPHOS社が開発しているレーザー
 - ✓ 波長1 μm
 - ✓ 平均パワー200W
 - ✓ Burst Modeにおいては、20Jマクロパルス（幅1ms）が10Hzで繰り返し
 - ✓ マクロパルス内では~1MHzで20mJパルスが繰り返される
 - ✓ バースト直後のパルス幅は500ps程度だが、グレーティングで94%の効率で1ps=0.3mm程度に圧縮可能
 - ✓ $M^2 < 1.25$ （波長の1.25倍まで集光可）
- 次ページ以降では上記のレーザーをすべてILCのバンチに当てられると仮定する



Beam Dump Specification

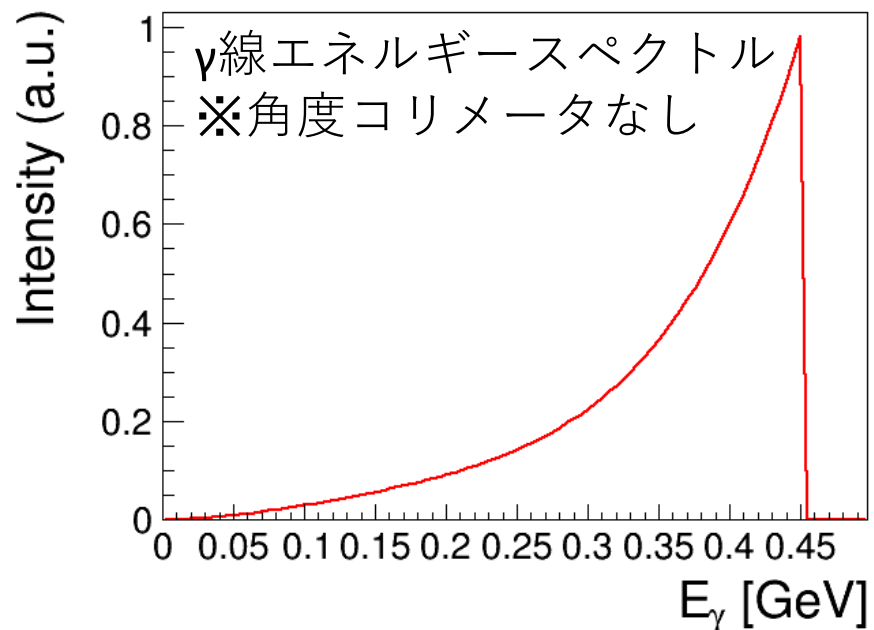
- PB max = ILC250GeVでの通常運転中の、そのダンプ付近でのビームパワー
- W = ビームダンプのスペック (20%のマージン込)

Name	用途	E GeV	PB max kW	W kW
E-1	電子入射器調整用	5	100	60
E-2	電子DRからの取出し	5	100	60
E-3	電子バンチ圧縮直前	5	100	60
E-4	電子主リナックのtuneup	125	2500	400
E-5	電子メインダンプ	125	2500	17000
E-6	電子バンチ圧縮直後	15	300	60
E-7	電子主リナック直後の非常用ダンプ (アンジュレータ保護)	125	2500	60
E-8	陽電子生成使用後の電子ダンプ (5+5Hz用)	150	3000	8000
E+1	陽電子のDR入射前	5	100	60
E+2	陽電子DRからの取出し	5	100	60
E+3	陽電子バンチ圧縮直前	5	100	60
E+4	陽電子主リナックのtuneup	125	2500	400
E+5	陽電子メインダンプ	125	2500	17000
E+6	陽電子バンチ圧縮直後	15	300	60
E+7	アンジュレータからの光子のダンプ	~0.008	60	300

5GeVダンプ (E-1) の場合

- ダンプ付近でのビームパワー PB max=100kW
- ダンプのスペック W=60kW ※20%マージン込み
→ 50kW (10μA) で、 1.25×10^{13} e-/pulse (10^{10} e-/bunch)
- レーザーの $M^2 < 1.25$ だが、集光は $w_0 = 10\mu\text{m}$ とする
 - 電子ビームのバンチ長は0.3mm (レーザーも0.3mm)
 - 波長 $\lambda = 1\mu\text{m}$ のレーザーを $w_0 = 10\mu\text{m}$ に絞ったときのレイリー長 (絞れたまままでの距離) $z_R = \pi w_0^2 / \lambda = 0.3\text{mm}$

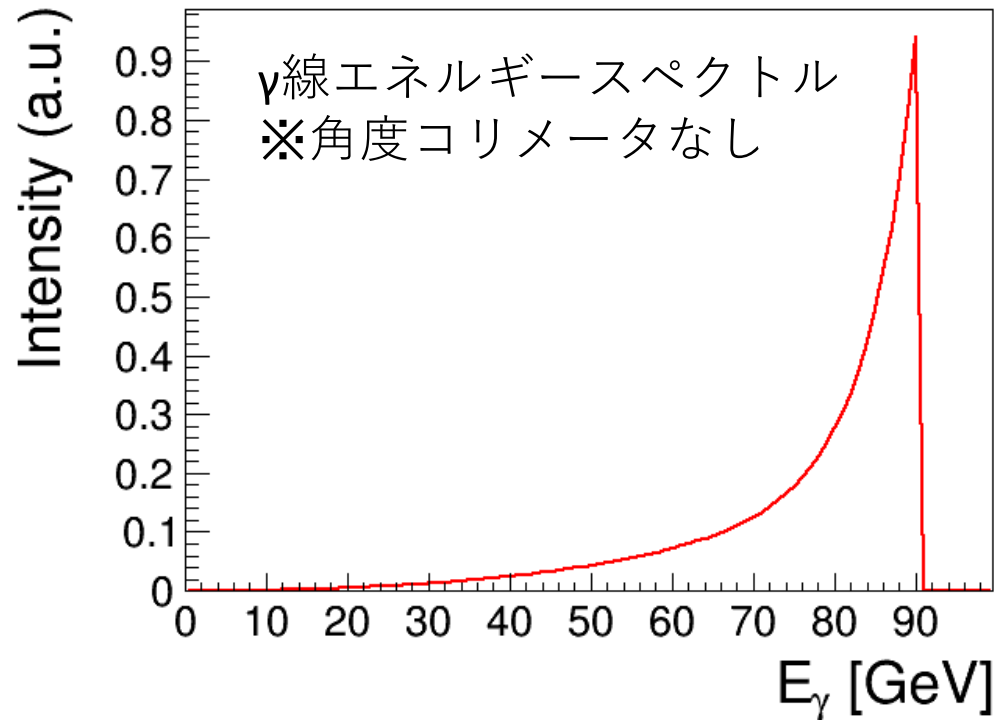
- P. 4の式に代入すると、
 - 最大 $E_\gamma = 450\text{MeV}$
 - $F = 8.4 \times 10^{12}$ photons/s
 - 角度発散は0.1mrad



125GeVダンプ (E-5) の場合

- ダンプ付近でのビームパワー PB max=2500kW
- ダンプのスペック W=17000kW ※20%マージン込み
→ 2500kW (20μA) で、 2.5×10^{13} e⁻/pulse (2×10^{10} e⁻/bunch)
- レーザー集光は $w_0=10\mu\text{m}$

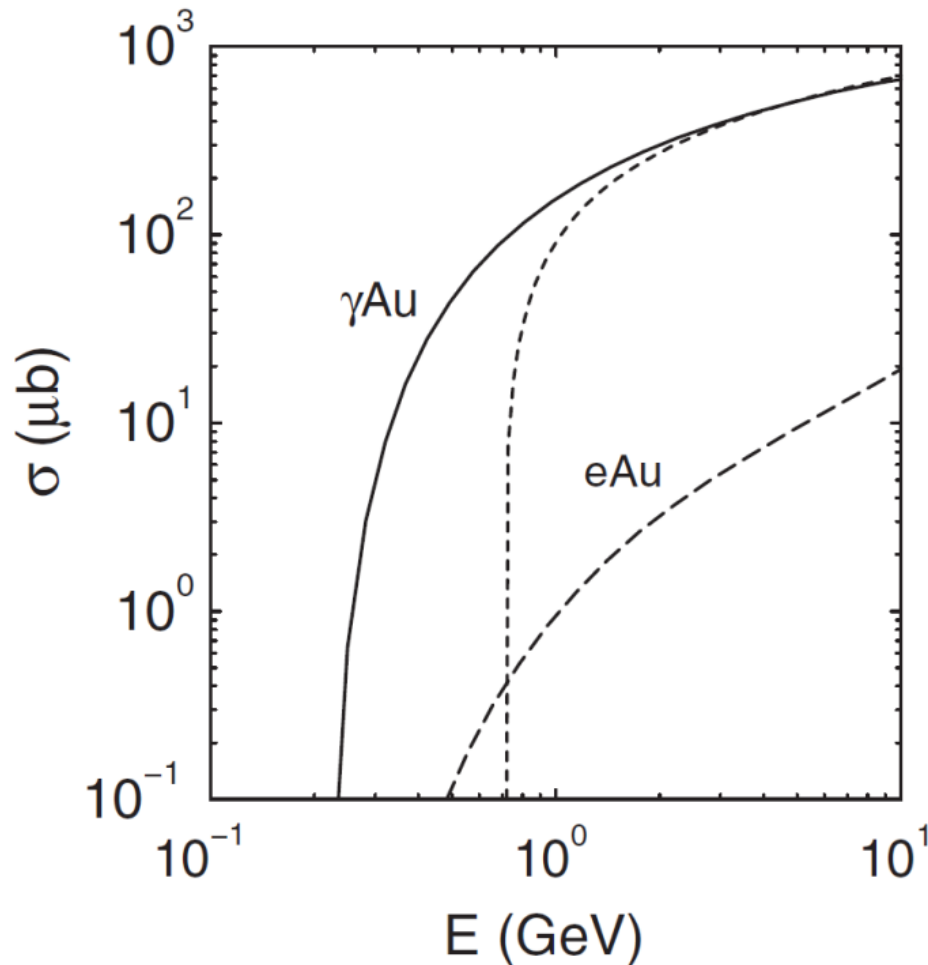
- P. 4の式に代入すると、
 - 最大 $E_\gamma = 90\text{GeV}$
 - $F = 1.7 \times 10^{13}$ photons/s
 - 角度発散は $4\mu\text{rad}$
- $\gamma \rightarrow \infty$ で $E_\gamma \rightarrow E_e$ なので、5GeVダンプのときより単色性がよくなる



$\gamma A \rightarrow \mu^+ \mu^- A$ によるミュオン生成

$\gamma A \rightarrow \mu^+ \mu^- A$ の全断面積

c.f. Phys. Rev. ST Accel. Beams **12**, 111301 (2009)



- 左図で点線は近似式

$$\sigma \simeq \frac{28}{9} Z_A^2 \alpha r_0^{\mu 2} \left(\ln \frac{2E_\gamma}{\mu} - \frac{109}{42} \right)$$

r_0^μ : ミュオンの古典半径

μ : ミュオン質量

- Au ($Z=79$, $\rho=19\text{g/cc}$) 厚さ 1cm を固定標的とすると
 - 5GeVダンプの場合、 $E_\gamma = 450\text{MeV}$ より $\sigma \sim 30\mu\text{b}$
 - 125GeVダンプの場合、 $E_\gamma = 90\text{GeV}$ より $\sigma \sim 1300\mu\text{b}$

ターゲット

- ミュオン対のフラックス $F_{\mu\mu}$ は

$$F_{\mu\mu} = \frac{\sigma_{\mu\mu} N_A}{A} \rho L F_\gamma$$

$\sigma_{\mu\mu}$: ミュオン対生成断面積
 N_A : アボガドロ数
 A : 質量数、 ρ : 密度、 L : 厚さ

- ターゲットの厚さ L を γ 線の減衰長程度とすると、 γ 線のエネルギーが十分高ければ

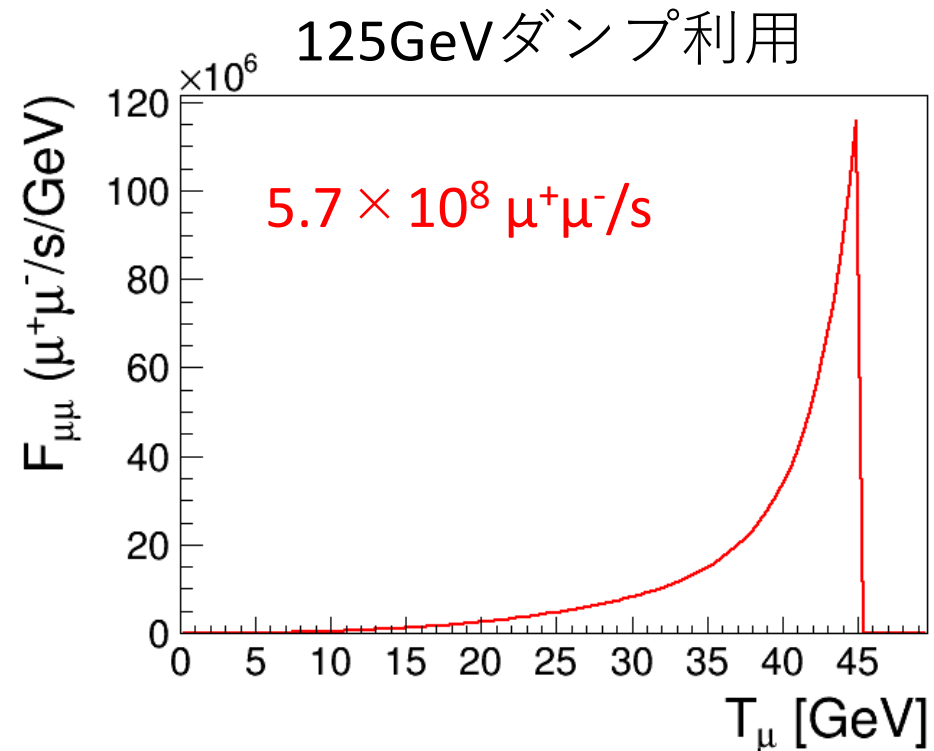
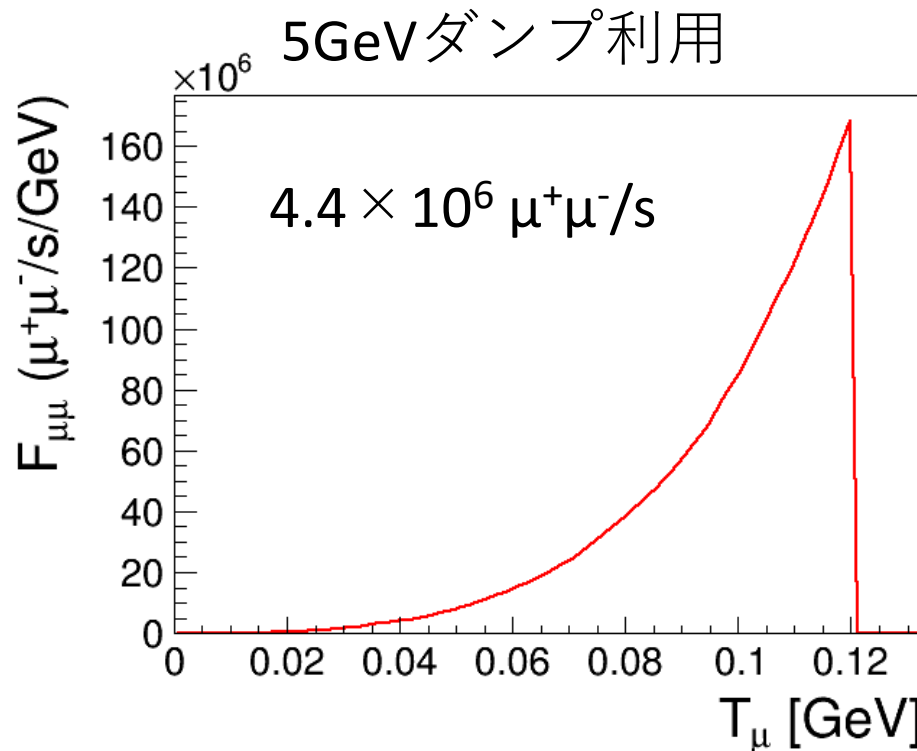
$$F_{\mu\mu} = \frac{\sigma_{\mu\mu}}{\sigma_{ee}} F_\gamma$$

σ_{ee} : 電子対生成断面積

- 上式を見るとターゲットは何でも良いように思えるが、電子対生成の場合、ターゲット原子核の電荷 Z は電子雲によって遮蔽を受けやすく、 $Z \rightarrow$ 大で σ_{ee} が Z^2 依存性より小さく出るため、 **Z が大きい原子を使うと少しだけ得**

ミュオンビーム

- Au ($Z=79, A=197, \rho=19.3\text{g/cm}^3$) ターゲットの場合



- 125GeVダンプ利用では、 γ 線のエネルギーが高いため、 $\mu^+\mu^-$ ペアの角度発散 $\theta \sim 2m_\mu/E_\gamma = O(1) \text{ mrad}$ と小さい。5GeVダンプはかなり広がってしまう
- ミュオン源サイズは、コンプトンしてから固定標的までの距離で決まり、10mでも5GeVダンプ利用で1mm、125GeVダンプ利用だと40 μm と極めて小さい

各種ミュオンビームとの比較

- J-PARC, PSIなどでは~1GeVの陽子を標的に当てて π を作り、崩壊して出てきた μ を使う。 μ SRや元素分析などの物質科学では μ を試料に止めて利用

ILCの多角的活用を考える会1

生成手法	~1GeV p	45GeV e ⁺	5GeV e ⁻	125GeV e ⁻
運動エネルギー (GeV)	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	22	0.1	45
エネルギー幅 (%)	10	20	20	10
エミッタンス (mm*mrad)	O(10^3)	O(10^{-4})	O(10^3)	O(0.1)
フラックス (/s)	O(10^8)	2×10^7	4×10^7	6×10^8
その他		$\mu^+\mu^-$ 対	$\mu^+\mu^-$ 対	$\mu^+\mu^-$ 対

- レーザーコンプトンからのミュオンビーム生成は、エミッタンスが小さく、高エネルギーで、フラックスも大きい。また $\mu^+\mu^-$ が同じ数だけ生じるなど、まさしく**ミュオンコライダー向け**

今後の検討事項

- 500GeV, 1TeVの場合にどうなるのか？
- Muon以外 (π , K, B, τ など) の対生成の強度は？
- 可視～赤外ではなく、マイクロ波・テラヘルツ波などは使えないか？
- 別種のパルスレーザーを光学共振器に蓄積する？ (c.f. H. Shimizu, et al., NIMA **745** (2014) 63-72)

その他の利用①

- 大強度ミュオンビームによる核子構造研究の精密化

核子スピン構造

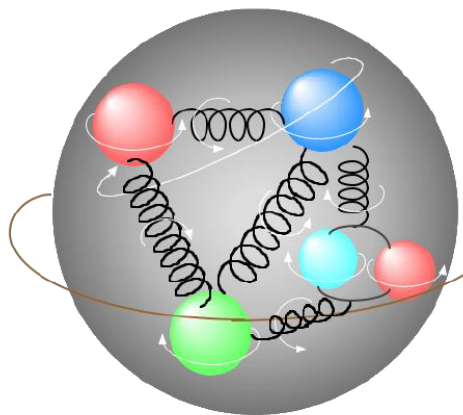
核子スピン

$$\frac{1}{2}h = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + \Delta G + L_q + L_g$$

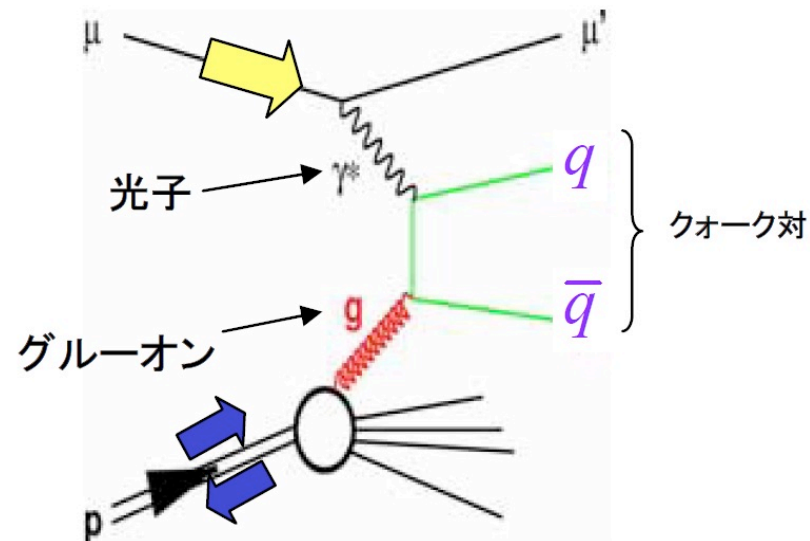
$\Delta\Sigma$: クォークスピン

ΔG : グルーオンスピン

L_q, L_g : 軌道角運動量



~200GeVミュオンビーム利用



1980-90年代のCERNでのEMC実験、SMC実験、米国SLACでの一連の実験における測定

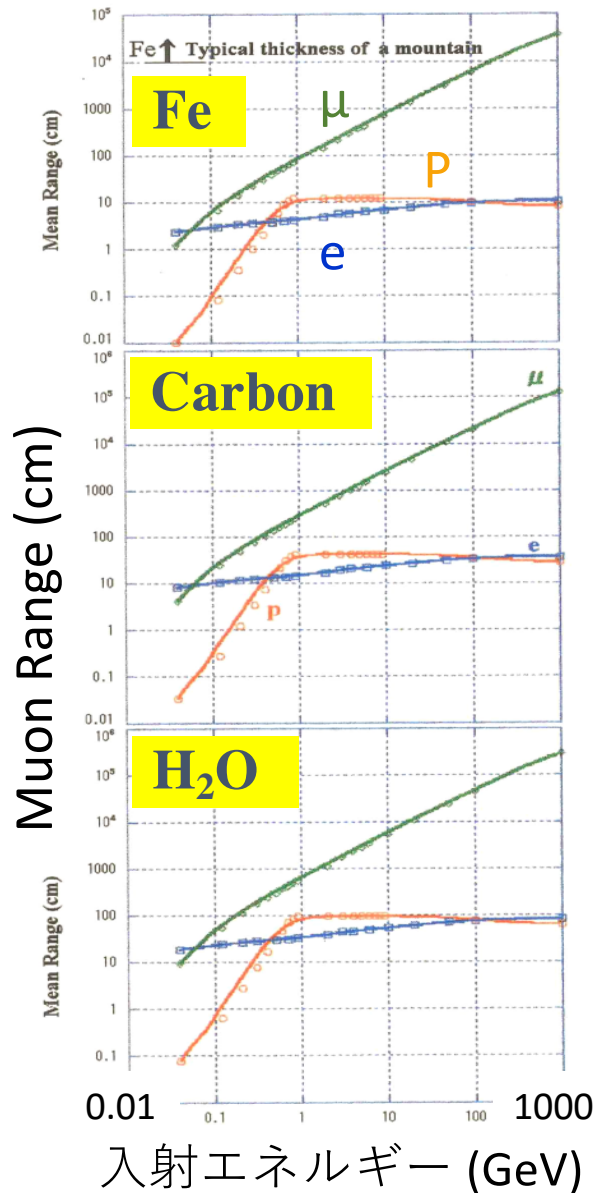
$$\Delta\Sigma \approx 0.25$$

ΔG ? COMPASSでの目的

COMPASS実験 山形大学 クォーク核物理学研究室

その他の利用②

- 非破壊分析：大きな物質を透過する高エネルギーミュオン



- ミュオンのみがエネルギーを高くすることで100m～1kmもの物質を透過できる
 - ✓ 電子：質量が軽いため光に変わる
 - ✓ 陽子：核力による粒子変換
- ミュオンは検出効率100%で、経路決定も容易。対象物を放射化しないなど非破壊分析に最適
- 宇宙線ミュオン（手のひらに1秒あたり1個、GeV領域）を利用した研究が行われているが、これを高エネルギー・低エミッタンスなミュオンビームで行う

まとめ

- ILC電子ビームとハイパワーレーザーの逆コンプトン散乱によって生じる γ 線を固定標的に照射し、 $\gamma A \rightarrow \mu^+ \mu^- A$ によって対生成されるミュオンビームについて検討した
- 125GeV電子ビームを用いれば、**45GeV**の運動エネルギーを持つミュオン対が少なくとも **$\sim 10^9$ /s**のフラックスで得られる。エミッタンスは **~ 0.1 mm*mrad**
 - ✓ 今後、フラックスの増大手法、ミュオン以外の粒子の対生成レートなどに関してさらに詳細に検討を進める
- 従来の陽子ビーム生成ミュオンと異なる高エネルギー・低エミッタンスなどの特徴により、将来のミュオンコライダー、核子構造研究、巨大構造物の非破壊分析などへの応用が拓ける