

QCDのこれから

- 課題と展望 -

“QCD old boy”の視点から

T. Uematsu (Kyoto Univ.)

日本物理学会

QCDシンポジウム

於：東京理科大学

2005.3.25

QCD (Quantum Chromo-Dynamics)

- 30年余りの歴史を経て
強い相互作用の基礎理論として確立した。
- 第1期 1973 - 1970年代 勃興期 Kodaira's classification
 - 漸近的自由性の発見 Gross-Wilczek & Politzer 1973
 - 短距離 Q 大 パarton描像 e^+e^- でのjet生成, Bjorken scaling
 - 長距離 Q 小 クォーク閉じ込め
 - 摂動論的QCDで様々なハード過程のLO, NLO高次補正の計算
- 第2期 1980年代 中間期
 - QCDの摂動論および非摂動論での様々な理論的整備/実験の進歩
- 第3期 1990年代 - 現在
 - Precision QCD: 当初のLO, NLO $\rightarrow$ NNLO: 検証から精密化へ

- 場の量子論から75年

W. Heisenberg and W. Pauli

Z.Phys.56(1929)1;59(1930)168



- 中間子理論から70年

H. Yukawa

Proc.Phys.Math.Soc.Jap. 17(1935)48



Photos from Nobel
Committee Web page

- QEDくりこみ理論から60年



R.P.Feynman ~1949

J. Schwinger ~1949

S.Tomonaga ~1943

- QCDの誕生から30年

Asymptotic Freedom

D.J.Gross and F.Wilczek

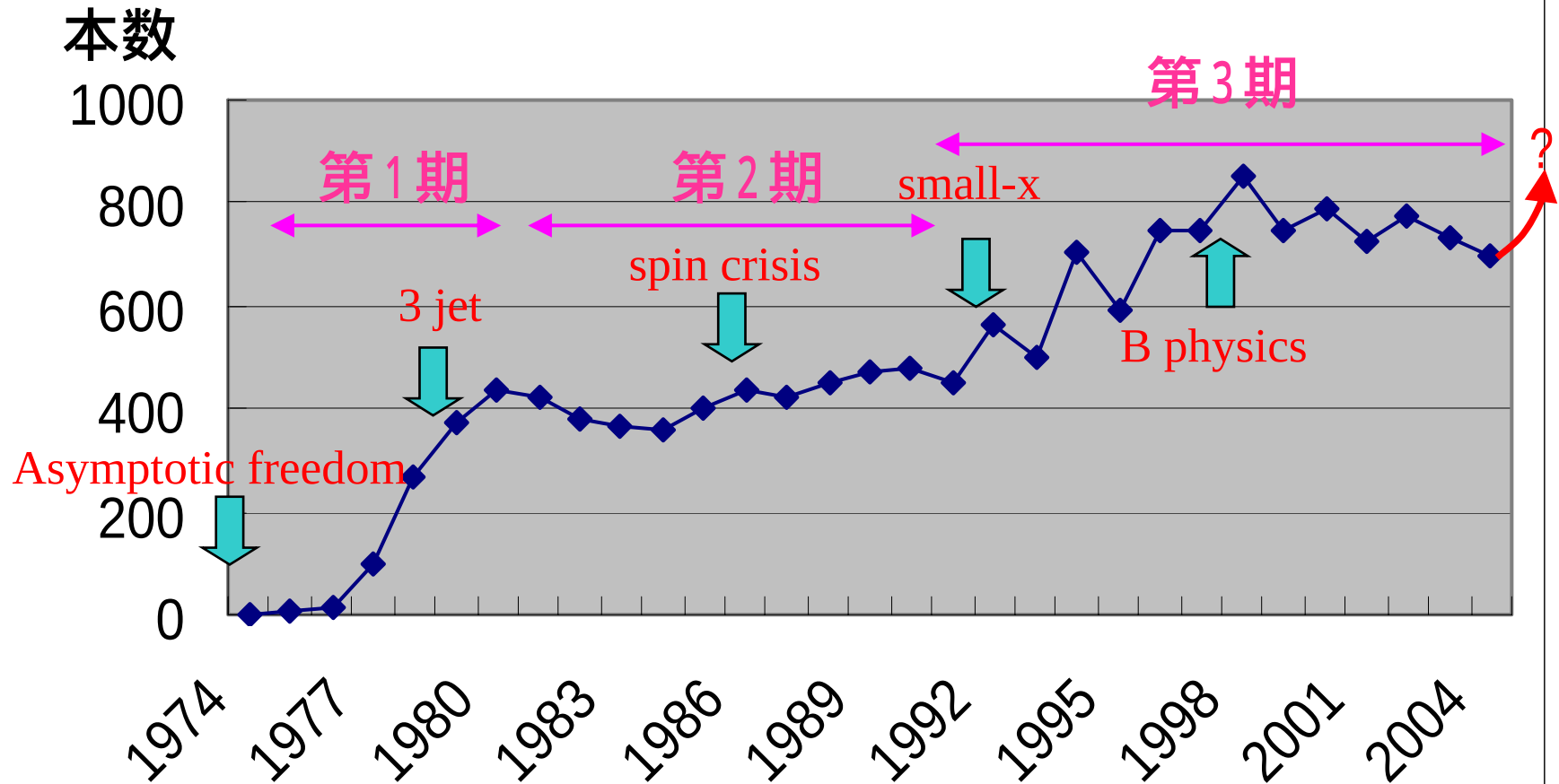
Phys.Rev.Lett.30(1973)1343.

H.D.Politzer,

Phys.Rev.Lett.30(1973)1346.



QCD 論文数の推移 (SPIRES)



“fin t QCD and d (year)”

QCDの重要性の復活

2007年 LHC (Large Hadron Collider)の登場

大きな目標: ヒッグズ粒子の発見

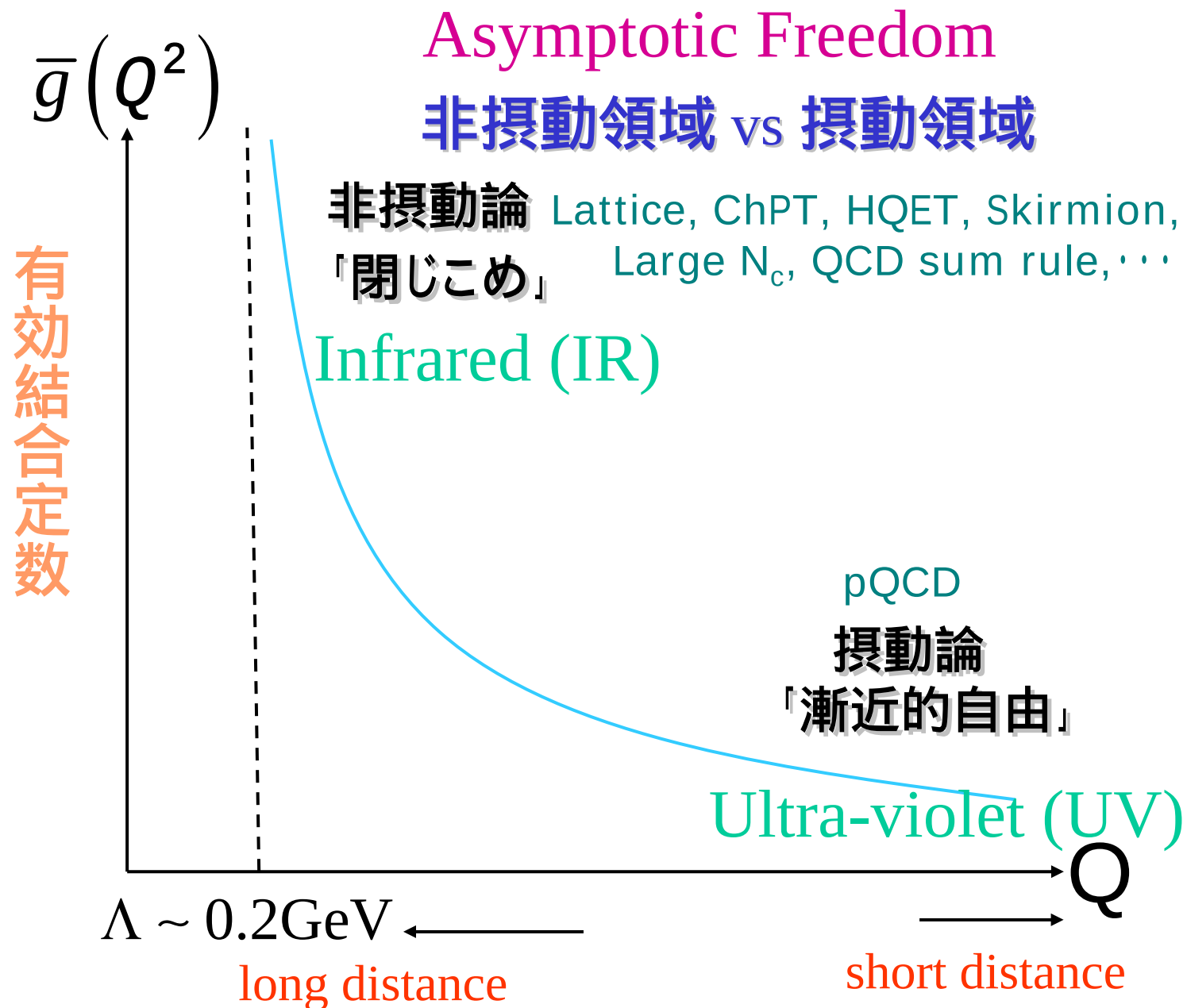
→ 標準模型の確立

- Higgs生成と強い相互作用の効果の正確な評価
- クォークやグルーオンの分布関数PDFsの精密化

また、超対称粒子の探索 → 統一理論

さらに、リニア・コライダー (ILC) での

強い相互作用効果の正しい estimate



因子化定理 (Factorization Theorem)

$$\sigma \sim \underset{\substack{\text{物理量} \\ \text{摂動論}}}{\text{(短距離の物理)}} \underset{\substack{\text{convolution}}}{\otimes} \underset{\substack{\text{非摂動論} \\ \text{物理}}}{\text{(長距離の物理)}}$$

short distance long distance

Soft/collinear factorization

$$\underset{\substack{\text{Structure fn.}}}{F} \sim \underset{\substack{\text{hard scattering}}}{C} \otimes \underset{\substack{\text{PDF (Q}^2\text{dep)}}}{f} = \underset{\substack{\text{scheme- dep}}}{\tilde{C}} \otimes \tilde{f}$$

Q^2 dependence $\longrightarrow$ DGLAP eq. or OPE+RGE

検証から精密化へ

- これまでLO, NLOのオーダーで計算されていた量子補正をNNLOの精度に高める

Splitting functions

$P(x)$

of
diagrams

LO

18

NLO

350

NNLO

9607

$$\underbrace{P^{(0)}(x)}_{\substack{LO \\ 1\text{-loop}}} + \underbrace{\alpha_s^1 P^{(1)}(x)}_{\substack{NLO \\ 2\text{-loop}}} + \underbrace{\alpha_s^2 P^{(2)}(x)}_{\substack{NNLO \\ 3\text{-loop}}} + \dots$$

MVV

Coefficient functions

$$C = \underbrace{C_0}_{\text{tree}} + \underbrace{C_1 \alpha_s}_{1\text{-loop}} + \underbrace{C_2 \alpha_s^2}_{2\text{-loop}} + \underbrace{C_3 \alpha_s^3}_{3\text{-loop}} + \dots$$

3-loop splitting fn.
 $P^{(2)}$ の計算の完成

Moch-Vermaseren-Vogt (MVV)
Nucl.Phys.B688(2004)101;B691(2004)129



3-loop anomalous dims. 12 ページ

$P^{(1)}$ と C_1 → NLO

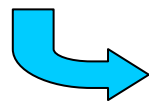
$P^{(k)}$ と C_k → N^kLO

$P^{(2)}$ と C_2 → NNLO

↑
k+1 loop

↑
k loop

今後の課題



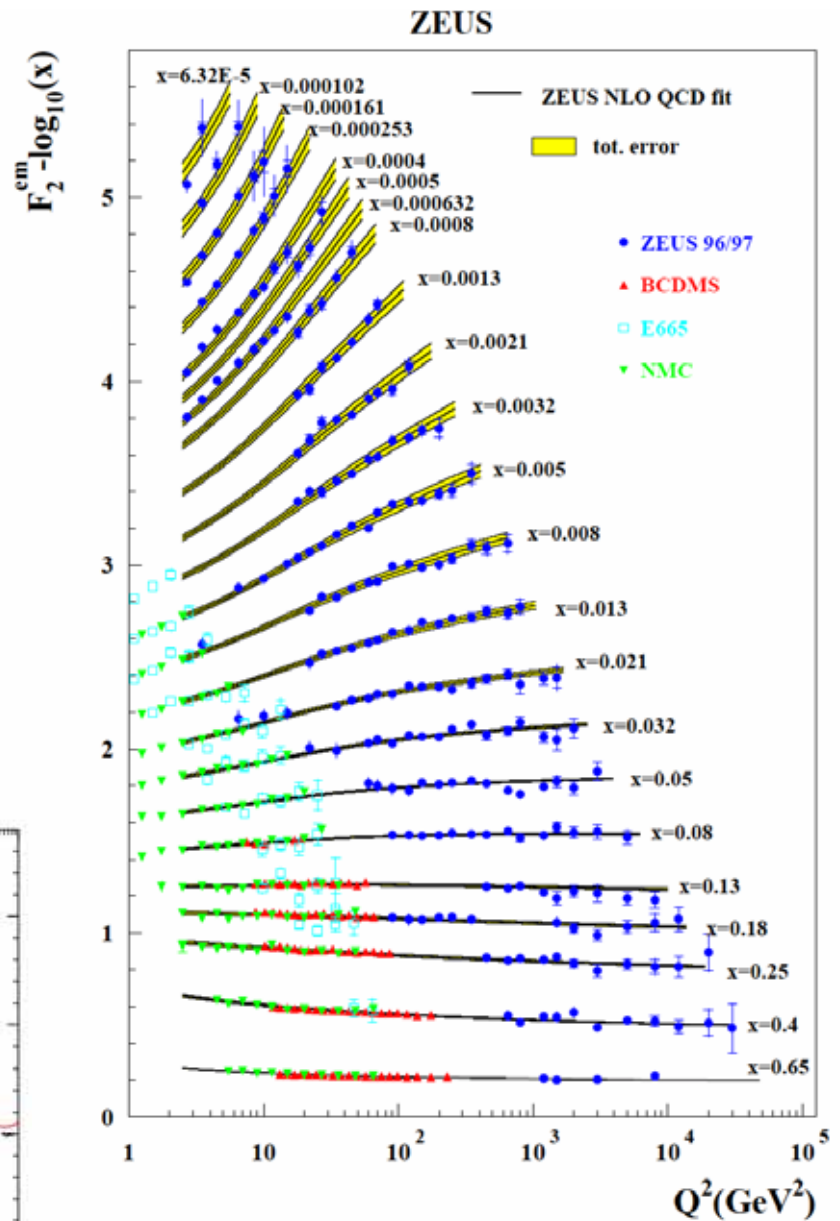
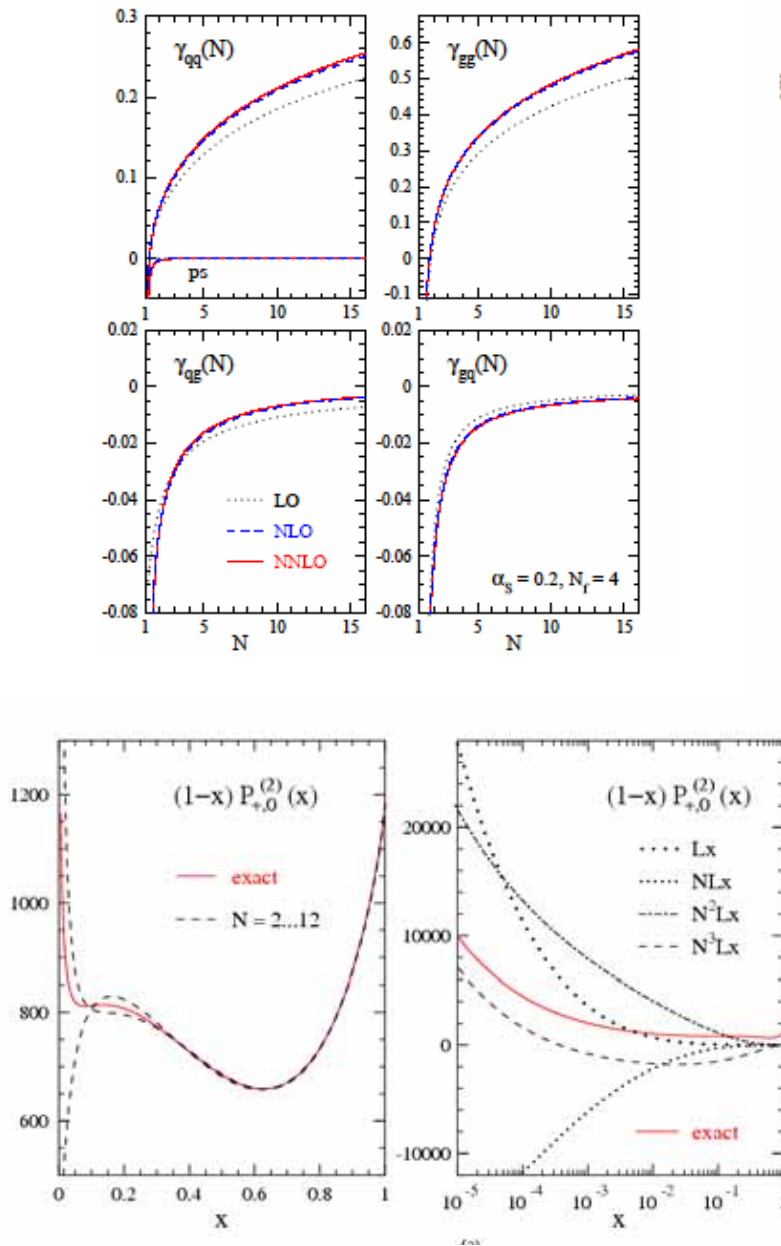
NNLOを取り入れたPDFsの計算

To be done soon

3-loop coefficient
functions C_3

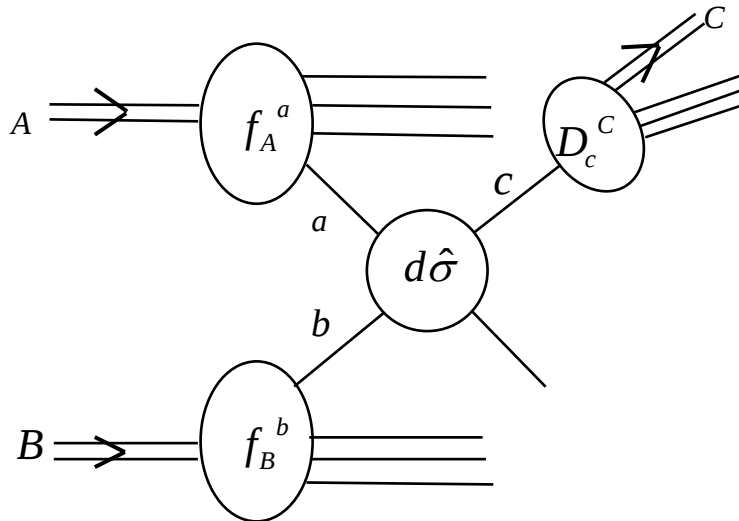
Moch-Vermaseren-Vogt (MVV)
to appear

3-loop coefficient fns. 100 ページ!



HERAにおける
 F_2 データとNLOfit

FactorizationとPDFs



high-energy QCD process:
 $A + B \rightarrow C + X$

$$\frac{Q^2}{4} \leq \mu_R^2, \mu_F^2, \mu_D^2 \leq 4Q^2$$

$$d\sigma = \int dx_a dx_b dz_c f_A^a(x_a, \mu_F) \otimes f_B^b(x_b, \mu_F) \\
\otimes \underbrace{d\hat{\sigma}(x_a, x_b, z_c, \mu_R, \mu_F, \mu_D)}_{\text{摂動計算可能}} \otimes D_c^C(z_c, \mu_D)$$

DIS, $e^+ e^- \rightarrow hX$, Drell-Yan, hadron-hadron semi-inclusive . .

摂動QCDの諸課題

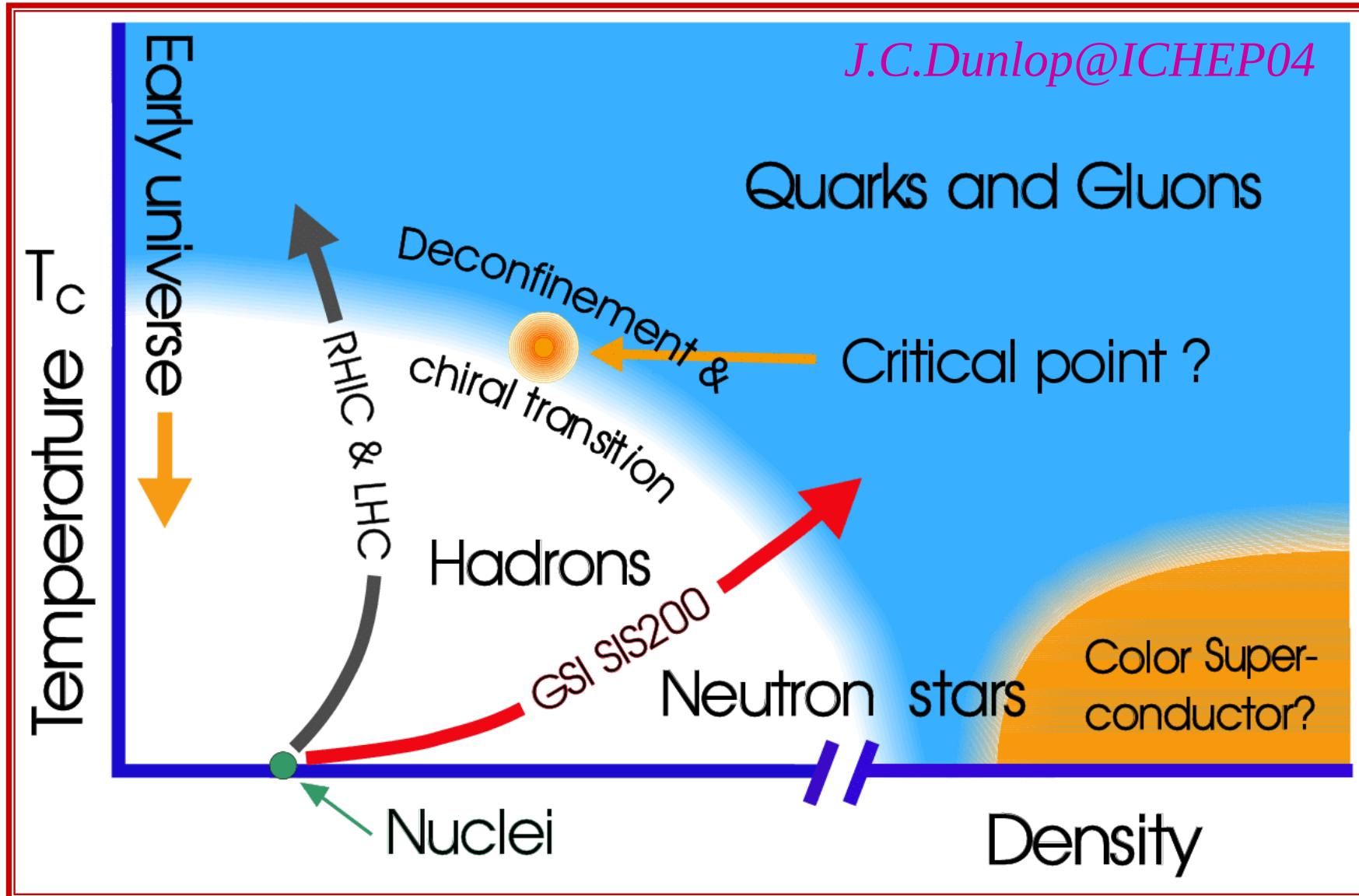
- スピン物理 ΔG gluon pol. δq transverse pol. Fn
chiral odd 分布関数, fragmentation fn. ... Goto's talk
 - small x physics BFKL vs. DGLAP eqs. Tokushuku's talk
 - PDFs Factorization-Scale Dependence
NNLOでのfactorization scaleを変化させたときの安定性
$$\frac{Q^2}{4} \leq \mu_R^2, \mu_F^2, \mu_D^2 \leq 4Q^2$$
 - QCD resummation 二つのmass scaleが存在するとき
soft-gluon emission のlarge log のresummation
 - QCD@LHC Higgs生成のQCD効果 Kodaira's talk
- etc.

非摂動論的アプローチ

- QCDの low-energyでの振る舞い
- Lattice gauge theory ... Ukawa's talk
- Chiral perturbation theory (ChPT)
- Heavy quark effective theory (HQET) .. Kodaira's talk
- Skyrme model (Chiral soliton theory) Pentaquark?
- Quarkonium potential approach
- QCD sum rule

hadronのspectroscopy, B-physics, exotic states
(pentaquark?, X(3872)), ...

QCD の相図 (高温・高密度)



QCDと弦理論

- AdS/CFT対応 String on $\text{AdS}_5 \times S^5 \sim \text{N}=4\text{SCFT}$
Polyakov et al Maldacena
5次元AdS時空での弦のsemi-classicalな振る舞いと
boundaryの4次元Yang-Mills理論の複合演算子の
anomalous dimensionのlarge spin J での振る舞いが
対数的 $\sim \ln J$
- AdS/CFT対応(弦 / ゲージ双対性)とDIS
Polchinski et al
string理論でエネルギーについてベキ的振舞いが出
せるか？
- MHVとTwistor Space
QCDでのn-gluon振幅の新たな画期的な計算法
Witten, Cachazo-Svrcek-Witten (CSW)

弦理論の散乱振幅

*Regge limit (散乱角 $\theta \rightarrow 0$, $E \rightarrow \infty$)

$$\text{Amp} \propto s^{\alpha(t)}$$

$$\text{Regge traj. } \alpha(t) \equiv \alpha' t + 1$$

*ハード散乱のlimit (θ :finite, $E \rightarrow \infty$)

$$\text{Amp} \propto \exp[-\alpha' s f(\theta)]$$

弦理論での大角度散乱振幅は指数関数的振舞い
一方、constituentが直接関わる反応ではベキ的振舞い

QFTの散乱断面積

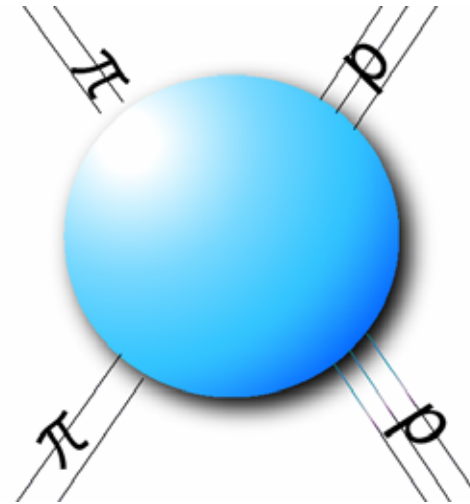
$$\frac{d\sigma}{dt}(A, B \rightarrow C, D) \approx s^{-n+2} f(t/s)$$

n : total number of field (A, B, C, D)

弦理論でもpower lawを再現できるか？

$$\left(\frac{d\sigma}{dt} \right)_{\pi p \rightarrow \pi p} \approx s^{-8}$$

$$\left(\frac{d\sigma}{dt} \right)_{pp \rightarrow pp} \approx s^{-10}$$



AdS/CFT (Gauge/String)対応

J.Polchinski and M.Strassler, Phys.Rev.Lett.88(2002)031601

$$\frac{d\sigma}{dt} \approx s^{-\Delta} \quad \Delta : \text{conformal dimension}$$

張力: $T = r^2 \tilde{T} / R^2$

$\text{AdS}_5 \times \text{S}_5$

$$R = (4\pi gN)^{1/4} \alpha'^{1/2}$$

AdSの半径

Power-lawの起源

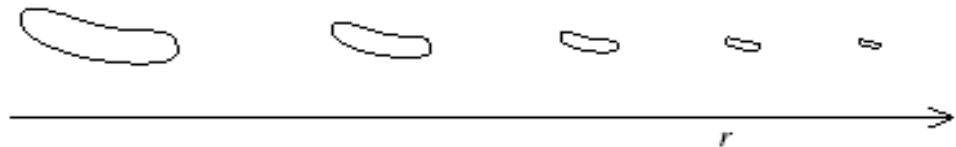
$$ds^2 = \frac{r^2}{R^2} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + \frac{R^2}{r^2} dr^2 + R^2 ds_X^2$$



$$\text{Warp factor} \quad w(r) = \frac{R}{r}$$

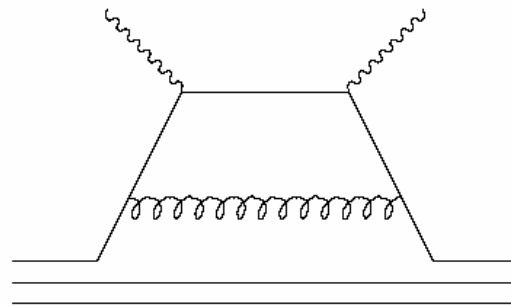
$$\tilde{p}_{\mu(10\text{dim})} = \frac{R}{r} p_{\mu(4\text{dim})}$$

$$\tilde{p} \approx R^{-1} \Leftrightarrow p \approx \frac{r}{R^2}$$



Gauge theory with string dual

- gN 小 $\rightarrow$ twist-2 scattering from weakly int. partons



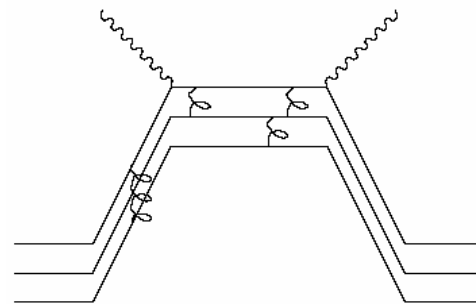
twist-2 op.



QCDに同じ

- gN 大 $\rightarrow$ scattering from entire hadron

double-trace op.



$x=O(1)$

supergravity states

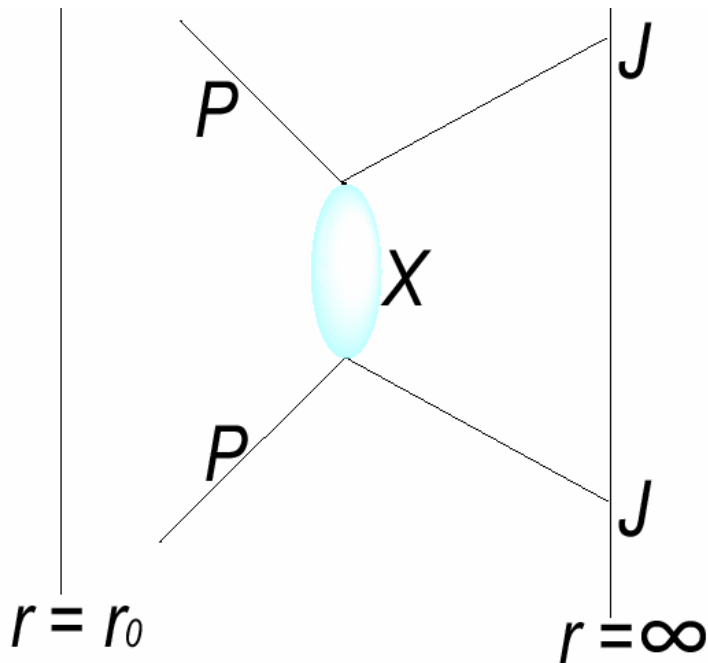
$x=\text{small}$

excited strings produced

DISと構造関数

J.Polchinski and M.Strassler
JHEP05(2003)012

Spin0 (dilaton)



$$D_m F^{mn} = 0$$

$$A_\mu = n_\mu e^{iq \cdot y} \frac{q R^2}{r} K_1(q R^2 / r)$$

$$A_r = i q \cdot n e^{iq \cdot y} \frac{R^4}{r^3} K_0(q R^2 / r)$$

$$r_{\min} \equiv r_0 \approx \Lambda R^2$$

$$\Phi = e^{ipx} \psi(r, \Omega) \quad : \text{dilaton}$$

$$F_1 = 0 \quad F_2 \approx \left(\frac{\Lambda^2}{q^2} \right)^{\Delta-1} x^{\Delta-1} (1-x)^{\Delta-1} \psi(r, \Omega) \approx \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\Delta} Y(\Omega)$$

n-gluon 散乱振幅を計算する画期的新手法

- Witten Commun.Math.Phys.252(2004)189
N=4超対称理論で運動量空間からFourier変換で得たtwistor spaceにおける散乱振幅を弦理論のインスタントンの寄与に結びつけた
- Cachazo-Svrcek-Witten (CSW) JHEP09(2004)006
最大にヘリシティを破る(MHV)振幅をvertexに拡張し, 一般のMHVでないhelicity振幅を計算するルールを与えた

n-gluon QCD amplitudes

- gluon+gluon $\rightarrow$ n gluons

Numbers of tree-level Feynman diagrams

n	2	3	4	5	6	7	8
グラフ数	4	25	220	2485	34300	5595405	10525900

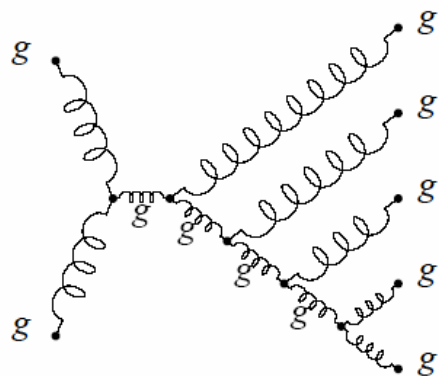
Mangano&Parke
Phys. Rept.

GRACEで生成 n=5 gluons

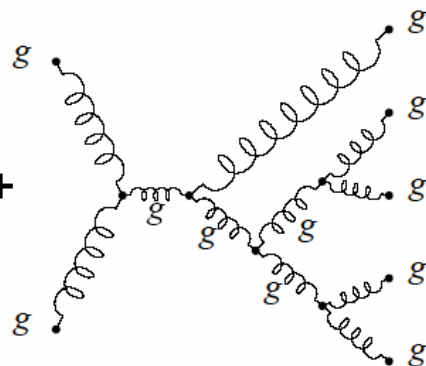


2485 Diagrams!

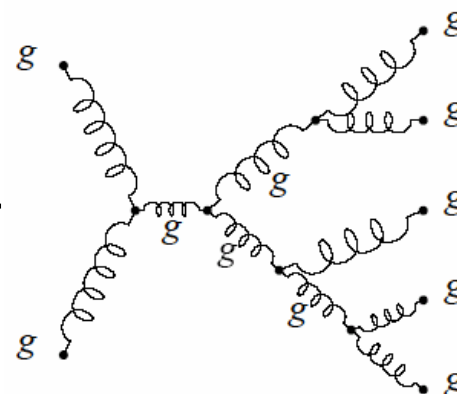
Graph 1



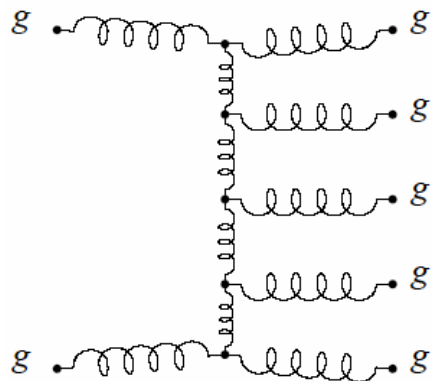
Graph 13



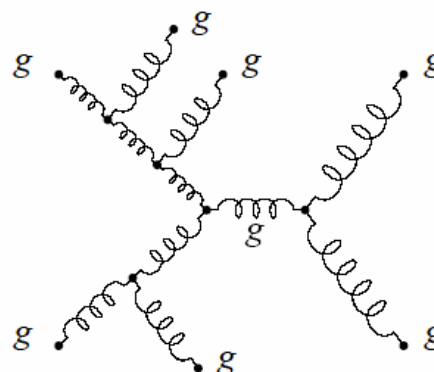
Graph 77



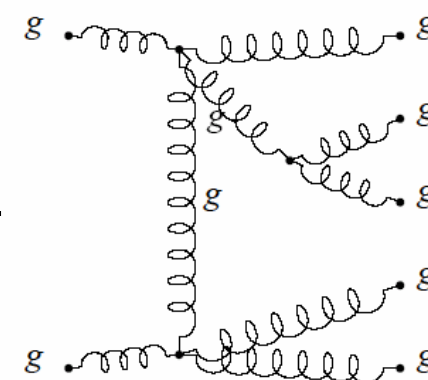
Graph 125



Graph 149



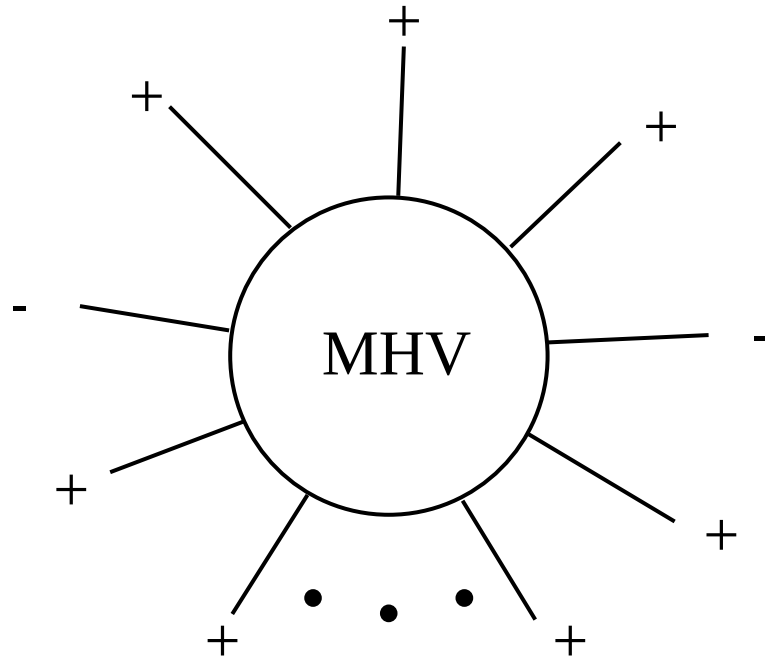
Graph 2485



by Kurihara@KEK

ghostを加えるとグラフの数 → 7245

Helicity amplitudes



$$A_n(g_r^-, g_s^-) = ig^{n-2} \frac{\langle \lambda_r, \lambda_s \rangle^4}{\prod_{i=1}^n \langle \lambda_i, \lambda_{i+1} \rangle}$$

Parke-Taylor,
Phys.Rev.Lett.56(1986)2459

$$\begin{aligned} & (+ + + + + \cdots + + + +) \\ & = (- + + + + \cdots + + + +) = 0 \end{aligned}$$

Maximally Helicity Violating amp
MHV amp

$$(- \underbrace{-}_{2 \text{ - helicity}} + \underbrace{+ + + \cdots + + + +}_{(n-2)+\text{helicity}})$$

$$M_n = T_n A_n$$

full amp $\uparrow$ color factor $\leftarrow$ kinematic amp

Bi-spinor表示

$$p_{a\dot{a}} = \lambda_a \tilde{\lambda}_{\dot{a}} \quad (p^2 = 0)$$

$$\langle \lambda_r, \lambda_s \rangle = \epsilon_{ab} \lambda_r^a \lambda_s^b$$

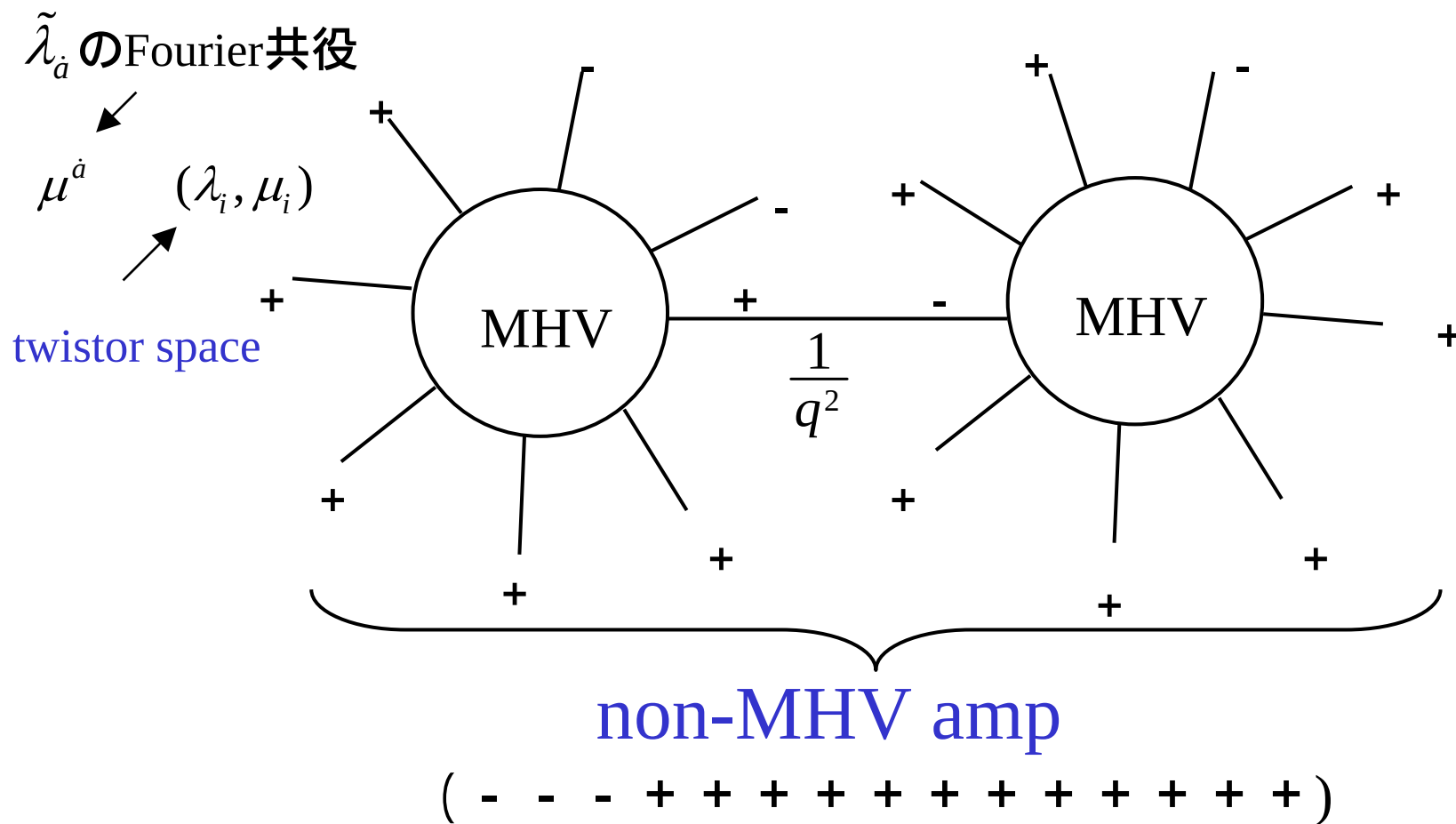
CSWの方法

Cachazo, Svrcek & Witten, JHEP09(2004)006

MHV amp
on-shell



MHV vertex
off-shell



n-gluon amplitudesとSUSY

- Tree-level QCD = effectively supersymmetric

$$\left. \begin{aligned} [Q(\eta), g^\pm(p)] &= \mp \Gamma^\pm(p, \eta) \Lambda^\pm \\ [Q(\eta), \Lambda^\pm(p)] &= \mp \Gamma^\pm(p, \eta) g^\pm \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \Lambda: \text{gluino} \\ \text{Supersymmetry 変換} \end{array}$$

Supercharge Q は真空をannihilate

$$0 = \langle 0 | [Q, \Lambda_1^+ g_2^+ g_3^+ \cdots g_n^+] | 0 \rangle = -\Gamma^-(p_1, q) A_n(g_1^+ g_2^+ g_3^+ \cdots g_n^+) \\ + \Gamma^+(p_2, q) A_n(\Lambda_1^+ \Lambda_2^+ g_3^+ \cdots g_n^+) + \cdots + \Gamma^+(p_n, q) A_n(\Lambda_1^+ g_2^+ g_3^+ \cdots \Lambda_n^+)$$

||

massless gluino は helicity を
保存する interaction をする

0

よって (+ + ... +) はゼロ

CSW法の拡張と課題

- 外線にフェルミオンを含む場合

Georgiou-Khoze JHEP05 (2004) 070  MHVが3種類

$$A_n(g_r^- g_s^-), A_n(g_t^- \Lambda_r^- \Lambda_s^+), A_n(\Lambda_t^- \Lambda_s^+ \Lambda_r^- \Lambda_q^+)$$

- Higgs+gluons Dixon-Glover-Khoze JHEP12 (2004) 015
- Higgs+quarks+gluons Badger-Glover-Khoze hep-ph/0412275

課題

- ・ 1-loopへの拡張は可能であるか
- ・ massiveの場合へ拡張可能か

Parton Shower と Event Generator

GRACEによる自動計算

- Monte CarloによるParton Shower (PS)の生成

Q^2 evolution/x分布/Soft-collinear jets $\rightarrow$ LL/NLL PS

NLL PS $\longleftrightarrow$ 2-loop Splitting fns.

- Factorizationの正しい適用 $\longleftarrow$ 理論屋との協力

- Hard散乱のQCD行列要素 (ME)とパートン・シャワー (PS)をdouble countingを避けて組み合わせる必要 $\longrightarrow$ CKKW法 etc

k_T - clustering, virtuality ordering アルゴリズム

- MEはSudakov form factorでmodifyされる

Event Generator と Parton Shower

cf. Tsuno's talk

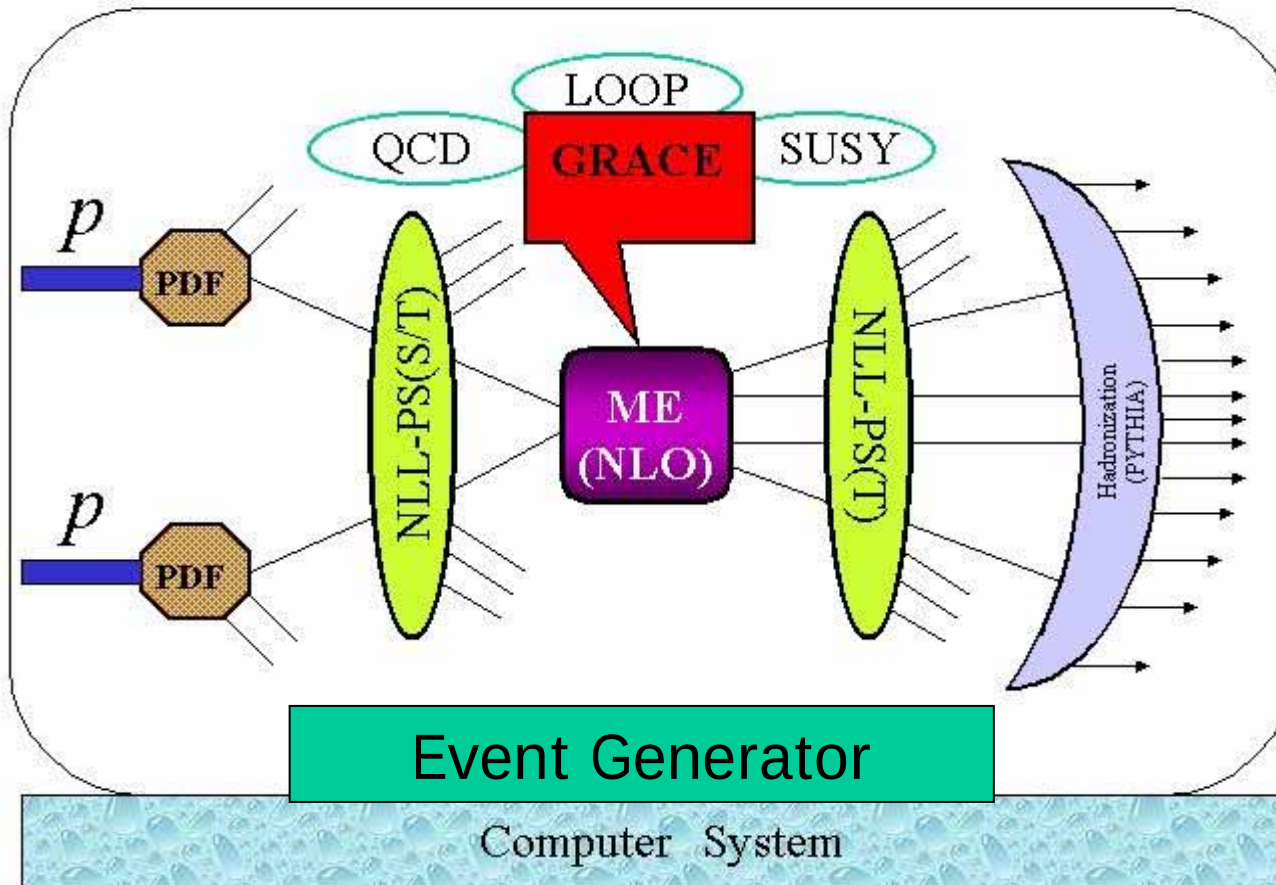
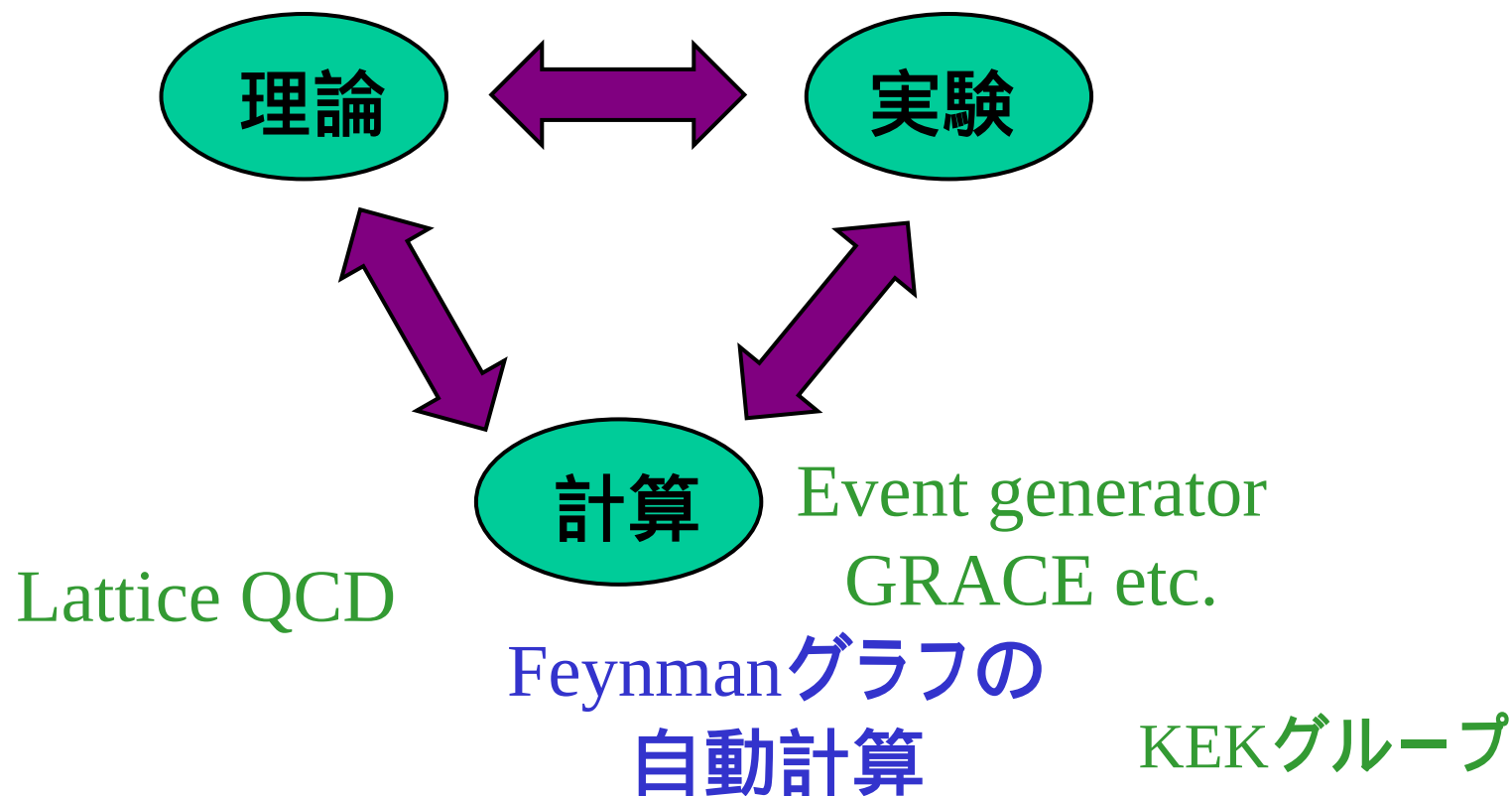


Illustration by Kurihara@KEK

理論物理，実験物理，計算機物理 の三位一体の連携

将来の加速器：LHCやILCでの物理 → 大きな流れ



Summary

- QCDは30年を経て確立 検証から精密化へ
- 標準模型の確立とそれを超えたNew Physicsの探索には、強い相互作用 QCDの効果の正確な評価が必要
- 新たなアイデアの創出 e.g. CSW法
- 理論屋と実験家のcollaboration@LHC,ILC...
- Young generationの参加
純理論 vs. 現象論の壁を越えて

最後に

“QCD old boys” invite young people
to join the QCD research!

そうは言うものの

“QCD old boys” should also work!