

現代物理学II 2007年度
「最高エネルギー陽子コライダー
LHCでの散乱現象」

山崎祐司（粒子物理）

自然科学研究棟 3号館 313号室

内線 5635

このスライドのありか

<http://ppssh.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~yamazaki/lectures/07/modernphysII-yamazaki07.pdf>

講義の内容

- LHC実験と陽子コライダー（衝突実験）の基礎
- 素粒子の標準模型（要約）
- 高エネルギー陽子・陽子散乱LHCの物理過程
 - 例：Higgs 生成散乱
- 電子・陽子散乱による陽子の構造の測定(ちょっとだけ)

- 高エネルギー物理実験の「社会学」
 - どんな組織？
 - どんな生活？

Atlas実験の検出器の話は次回藏重先生がします。

ジュラ山脈

CMS実験

LHC実験

ATLAS実験(神戸大含む
日本グループ参加)

レマン湖

ジュネーブ空港

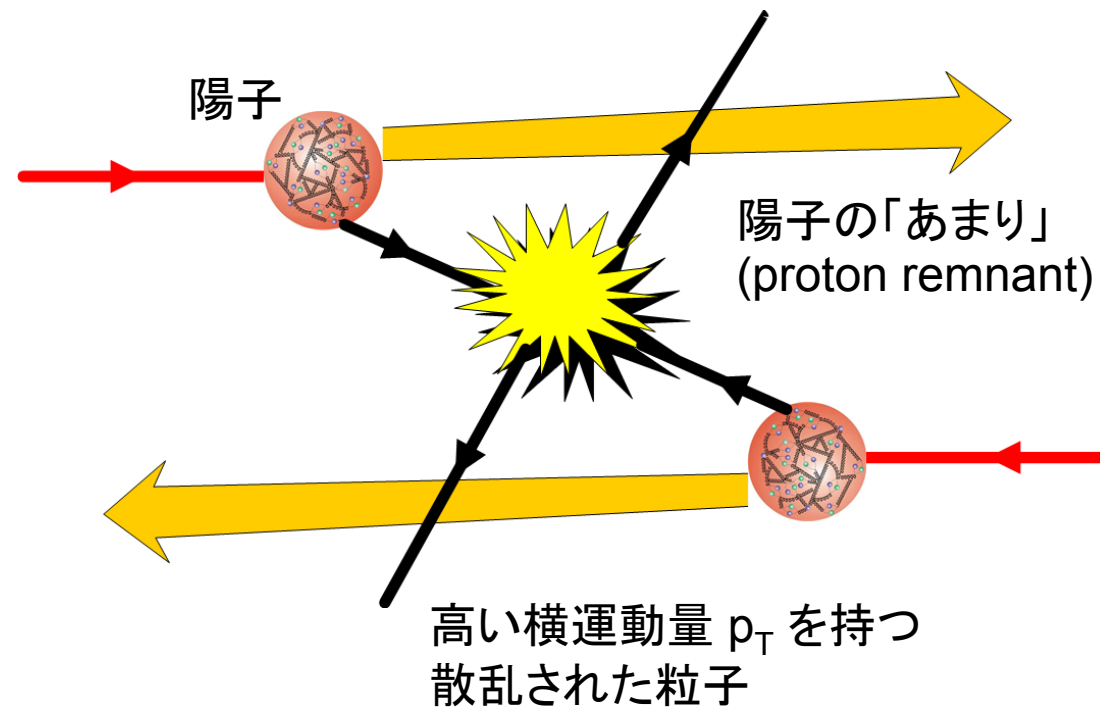
CERN

周長 27km
陽子・陽子衝突
7x7 TeV
→ 重心系エネルギー
14TeV
(アメリカ・フェルミ研の
Tevatron: 2TeV)

- スイス・ジュネーブの欧州原子核機構 (CERN) で行われる最高エネルギーの加速器実験 (large hadron collider)

ハドロンコライダーとは

- 陽子・陽子衝突
(Tevatronまでは陽子・反陽子衝突)
 - 点状粒子＝素粒子の衝突ではない
 - 陽子の「なかみ」＝クォーク，グルーオンの衝突



- {クォーク，グルーオン} = パarton parton
(ハドロンの構成部分をなす粒子という意味の造語。
強い相互作用に関連する素粒子の総称)
同士がぶつかって散乱
 - パートンの性質をお勉強しよう。

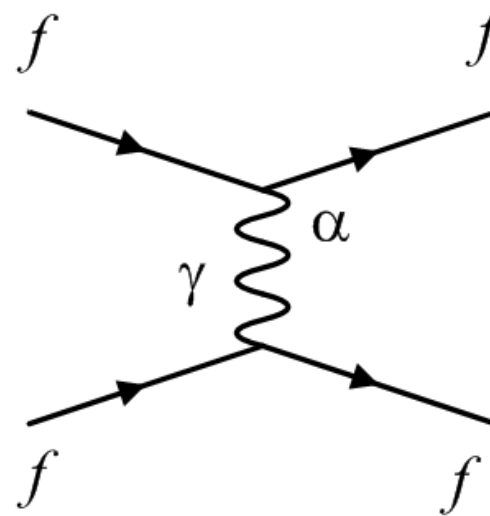
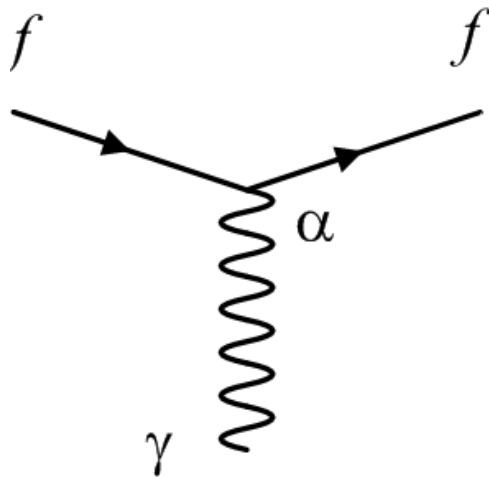
スライド 4

Y.Y.2

Feynman Diagram
山崎祐司, 2007/11/25

素粒子の相互作用

- フェルミオン（電子，ニュートリノ，クォーク）がゲージ粒子＝ボーズ粒子（光子，W/Z 粒子，グルーオンなど）を放出，交換力を及ぼしている。
- Yukawa interaction, Yukawa Coupling!
湯川博士の考えた歴史的発見です。



標準模型の概略

数字は質量 (GeV)
陽子:0.938

フェルミオン

ニュートリノ
レプトン
「電子」

$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$
0.511×10 ⁻³	0.105	1.78

電弱相互作用
(弱荷,
ハイパー荷)
 γ, W^\pm, Z^0

u-type
クォーク
d-type

$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$
0.002程度	1.3 0.1	179.2 4.2

強い相互作用
(量子色力学,
カラー荷)
 g (グルーオン)

+質量を生成する Higgs粒子 h^0 (スカラー)

- クォーク (Cabbibo小林益川), ニュートリノ (牧中川坂田)
ともに世代間混合がある (KEKB/Belle, T2K, DoubleChooz ...)

なぜ陽子を衝突させるの？

- 電子， ミューオンなどの点状粒子を加速できれば最高だが：
 - 電子は曲げられない：磁場中でシンクロトロン放射（いわゆる放射光）がでる

電荷 e の粒子一周あたりのエネルギー損失 $\frac{e^2 \gamma^4}{3\epsilon_0 \rho}$ ρ ：加速器の曲率半径

$E = \gamma m$ より， エネルギーの 4 乗， 質量の 4 乗分の 1 に比例 ($v/c = \beta = 1$ とした)

加速器大きくするのは効率よい方法ではない

- 重ければいい？でも，
ミューオンはパイオン（中間子=クォーク・反クォークでできた粒子）崩壊でしか作れない 2 次粒子
- 重い自然界の荷電粒子は， 陽子だけ
- LHC の次の世代：電子線形加速器， ミューオン

クォークとグルーオン

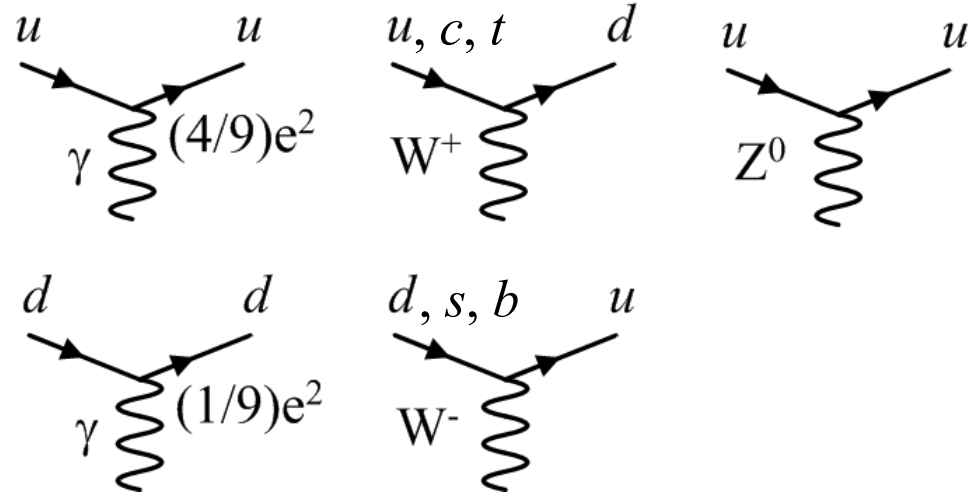
- クォークと電磁気 (γ)

u-type ($e_u^2 = 4/9$)

d-type ($e_d^2 = 1/9$)

- W^\pm : u, d 同じ電荷

- Z^0 は複雑

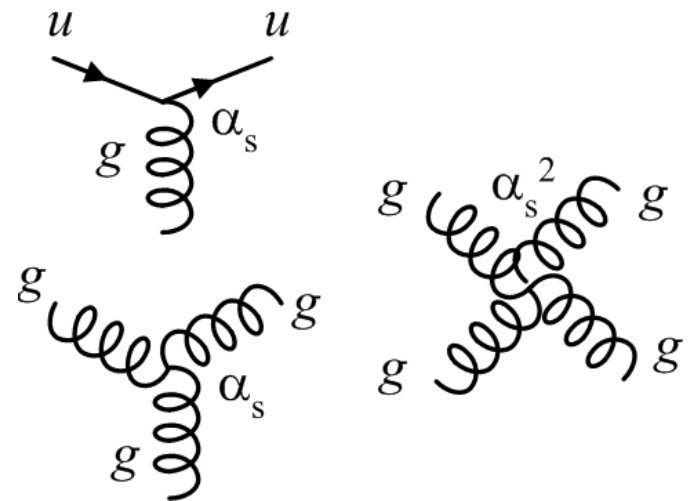


- グルーオン

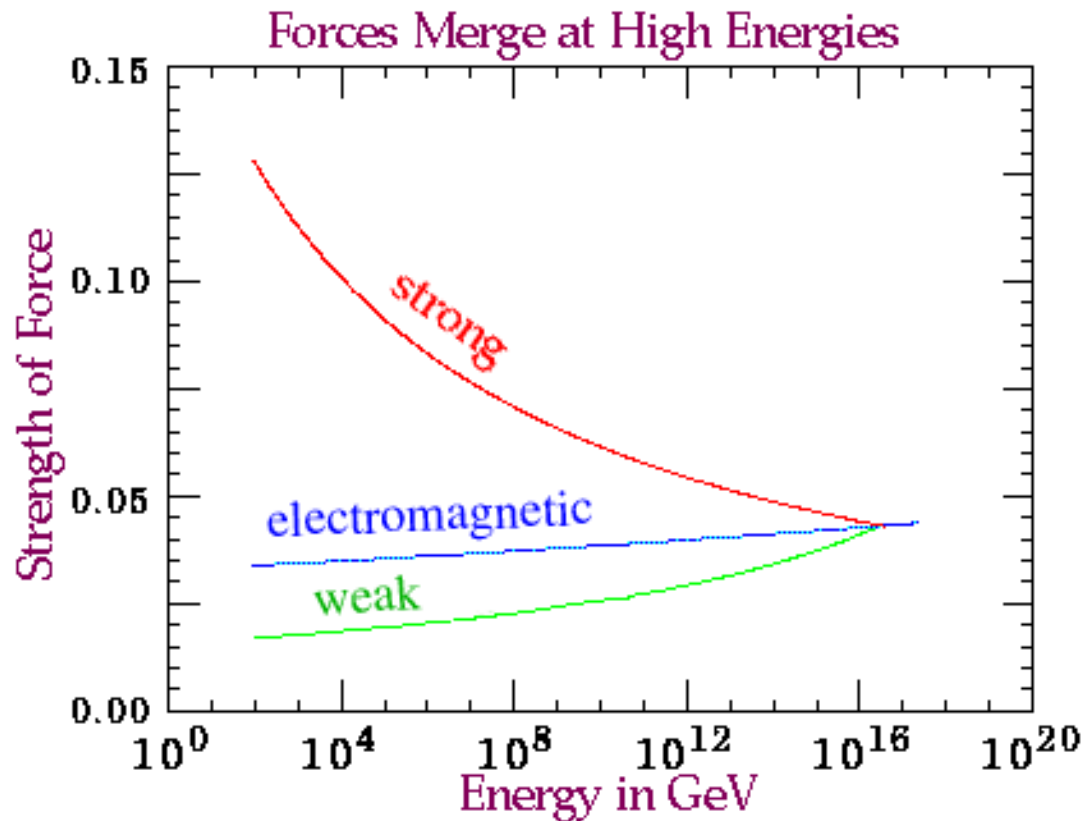
クォーク間の相互作用

電弱相互作用との違い:

- 結合定数がむちゃくちゃ大きい
- 自己結合する
(非可換群の性質,
弱ゲージボゾンも同じ)



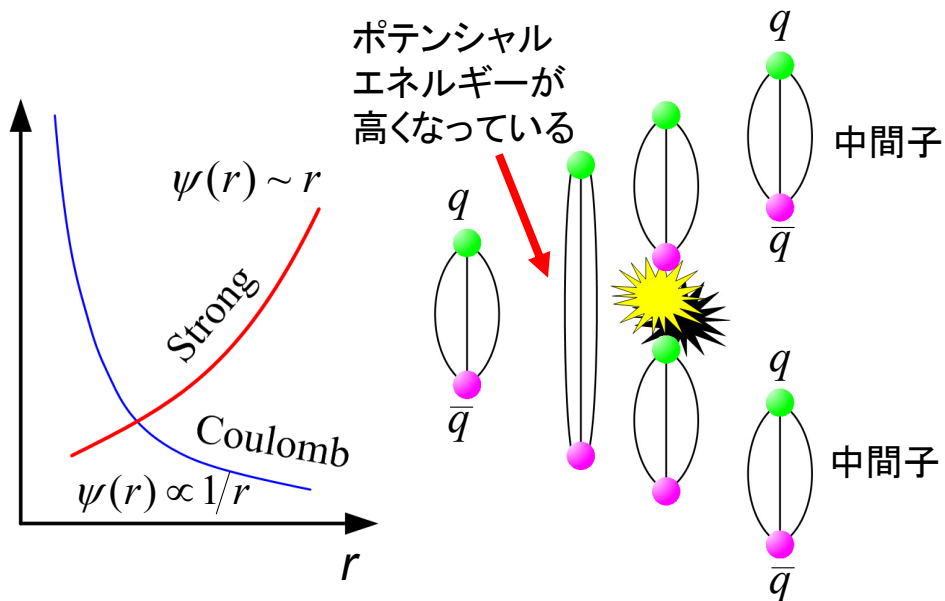
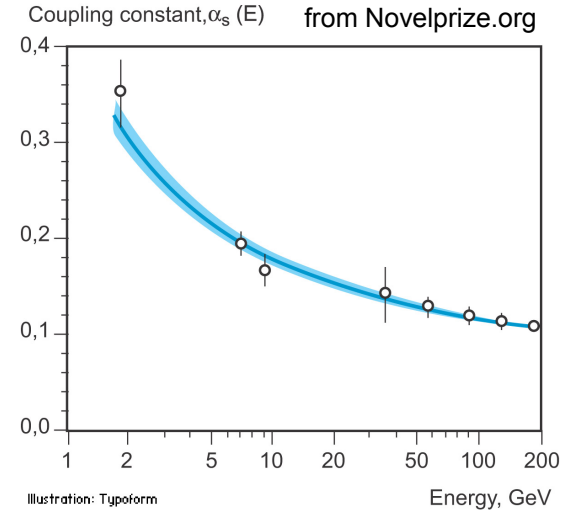
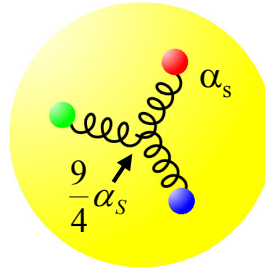
3つの力の結合定数



- 強い相互作用：摂動計算が収束しにくい
 - 特に ~ 0.5 GeV以下では収束しない
 - 非摂動論的な取り扱いが必要

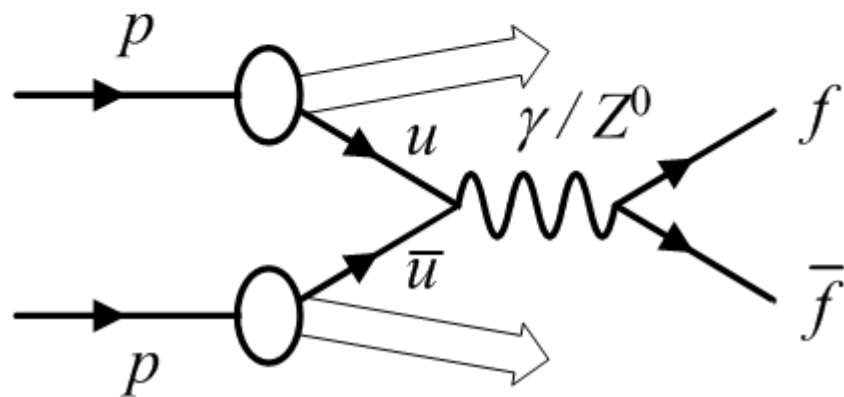
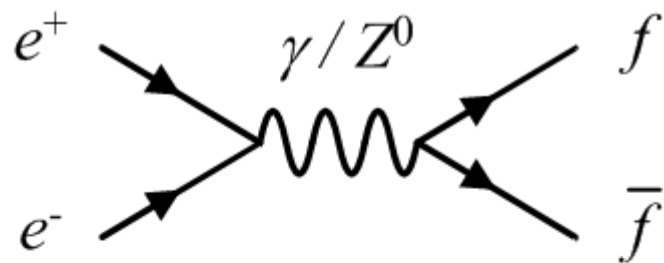
強い相互作用によるクォークの閉じこめ

- 強い相互作用の結合定数は、相互作用のエネルギーが高いほど小さい（低いほど大きい）
 - **Asymptotic freedom**
2004 ノーベル物理学賞
- 力は距離が離れるほど強くなる
 - ポテンシャルエネルギーにより新たに粒子・反粒子が対生成



ハドロンコライダー： e^+e^- 衝突との違い

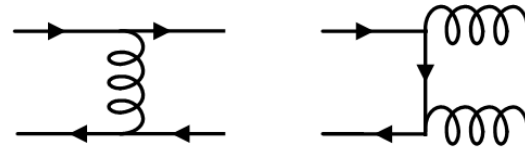
- e^+e^- 衝突：
ビームが完全に対消滅できる
 - 新粒子・反粒子の対生成が（エネルギー効率よく）できる
- ハドロンコライダー：
ビームの一部が対消滅
 - ただし，対消滅はあまりメジャーな過程ではない



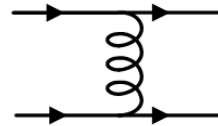
ハドロンコライダーの主なプロセス

- QCD過程が主な断面積を占める

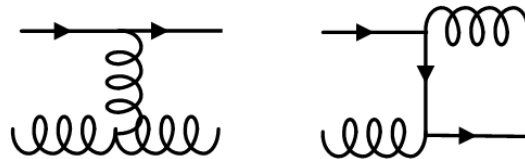
$$q\bar{q} \rightarrow q\bar{q}, gg$$



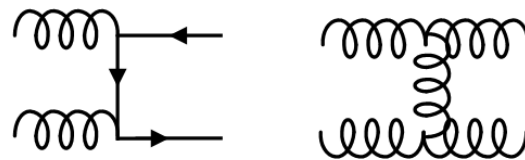
$$qq \rightarrow qq$$



$$qg \rightarrow qg$$



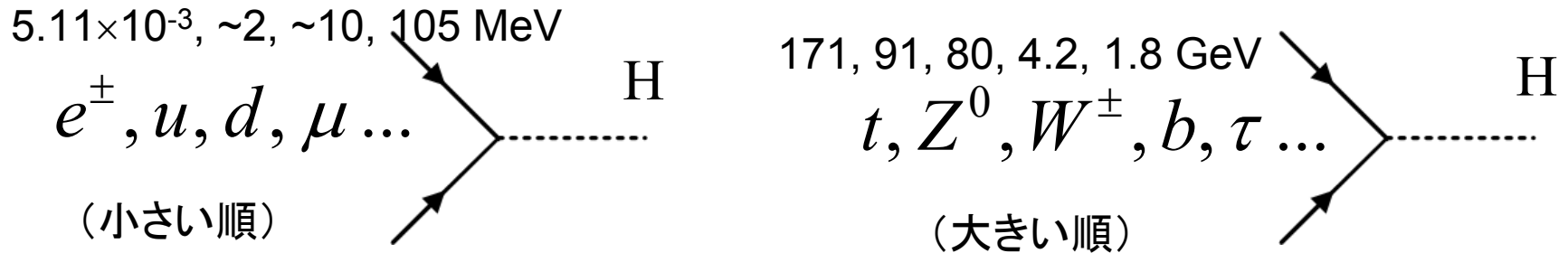
$$gg \rightarrow qq, gg$$



クォーク, グルーオンは直接観測されない
破砕化して, ハドロン束(ジェット)を生成

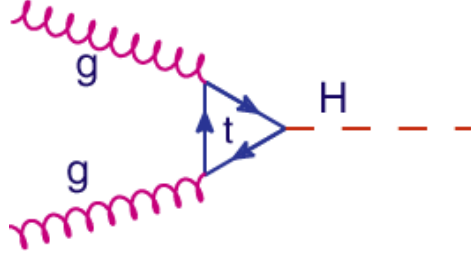
Higgsの作り方

- Higgs は慣性質量を生成する粒子：
「重たい」ほど生成しやすい（ m に比例）

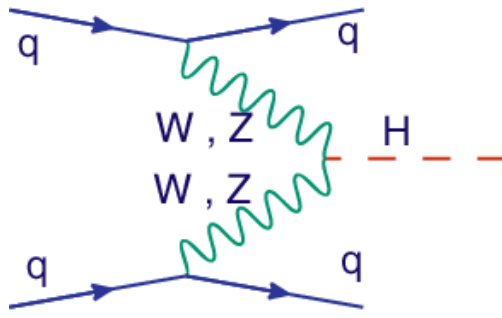


- ところが、重たい粒子はどれも始状態に存在しないので
 - これらの粒子を通して生成されるが、それを作るのが難しい
 - これらの粒子に崩壊する

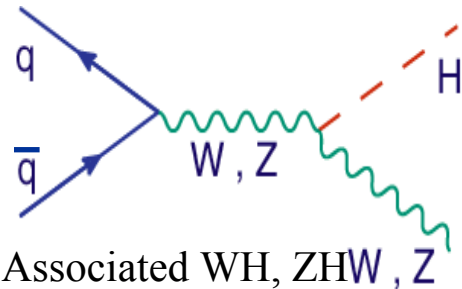
ハドロンコライダーでの生成



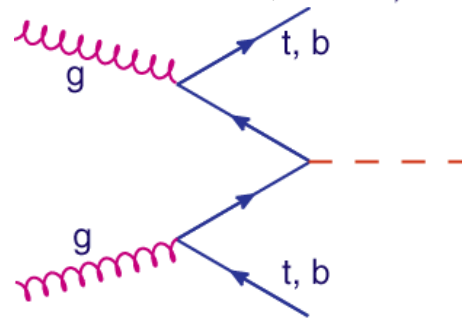
Gluon Fusion



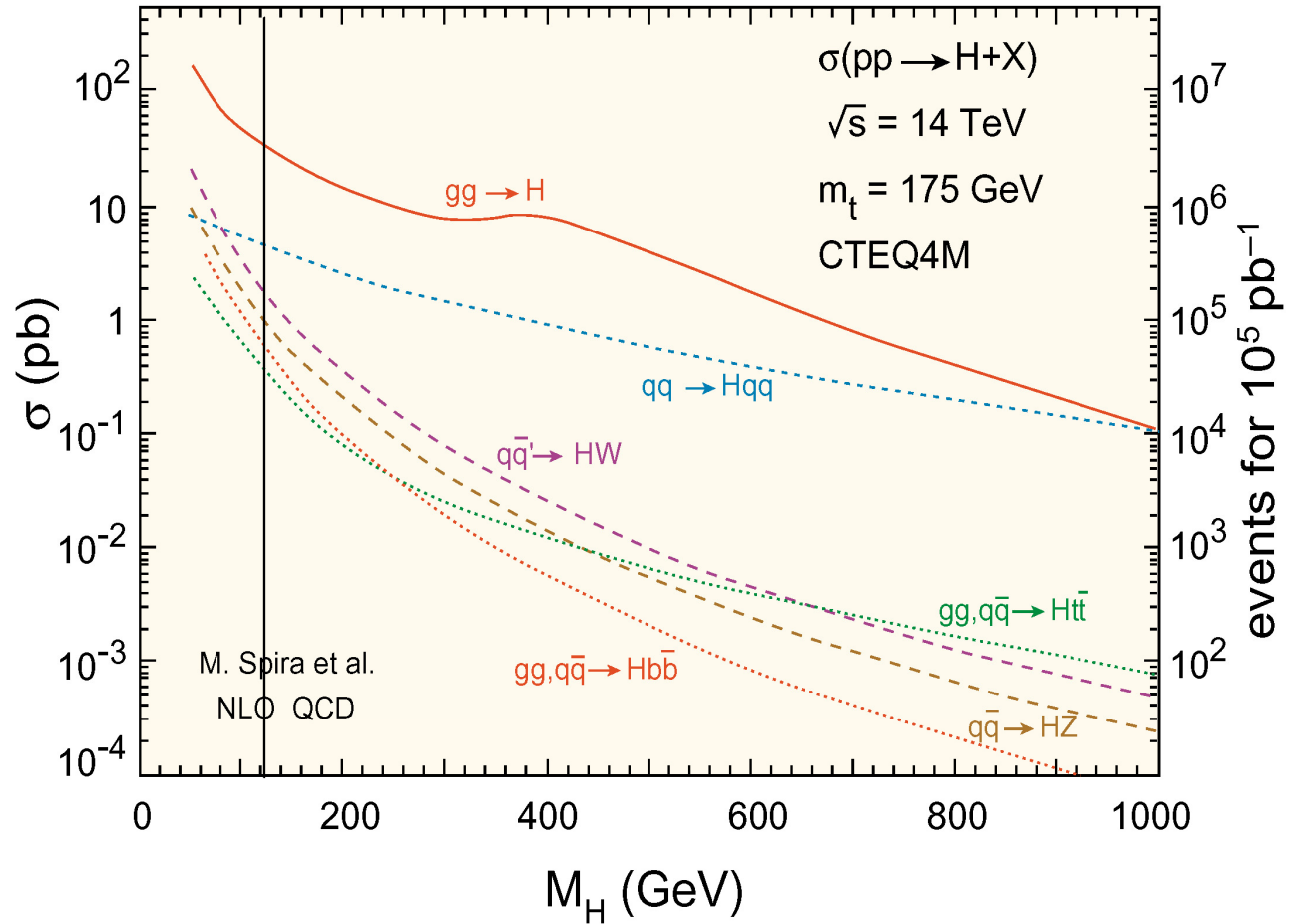
Vector Boson Fusion (VBF)



Associated WH, ZHW, Z



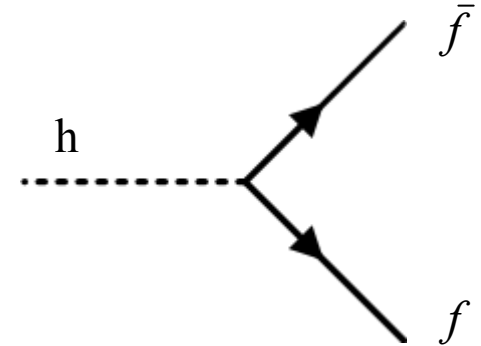
Associated ttH, bbH



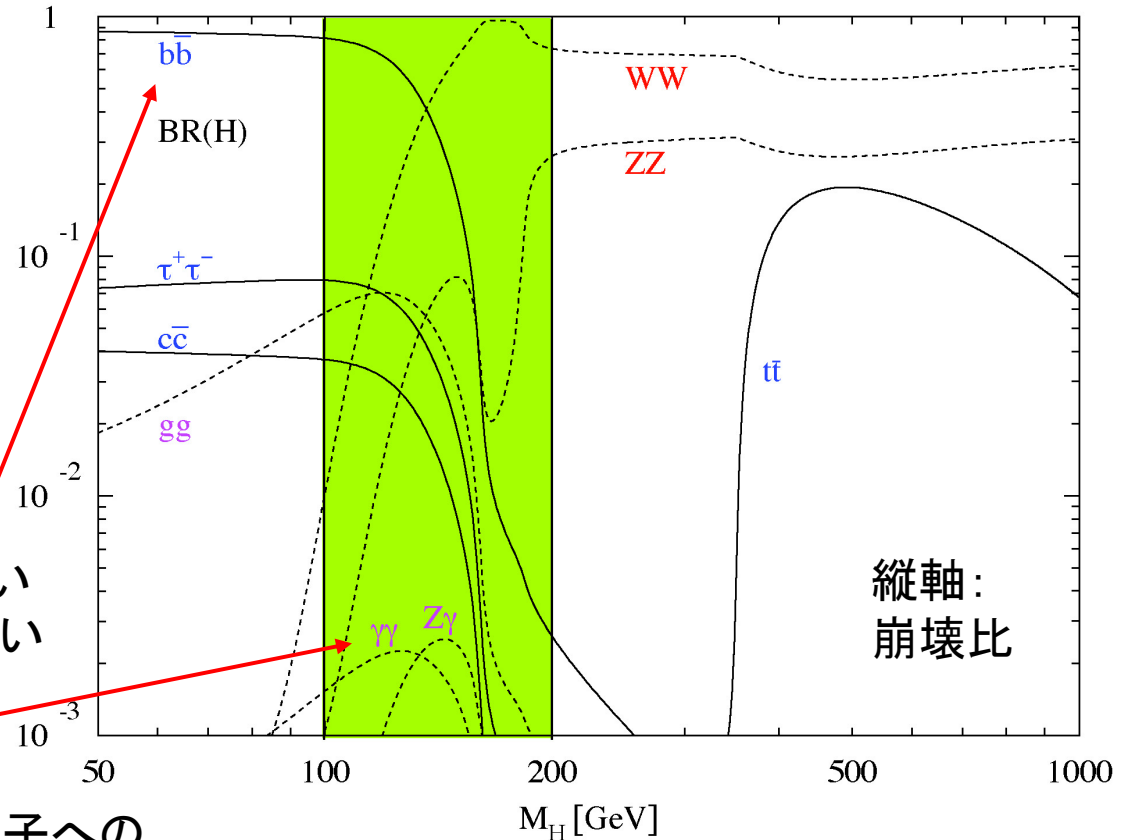
トップクォークを経由して Higgs だけ作る方法が一番効率よい(質量重いものから/省エネルギー)。

Higgs粒子の崩壊

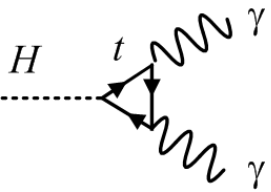
- 2つの粒子に崩壊
- やはり重いものに崩壊するが...



- Higgs のありそ
な領域：緑バン
(100-200 GeV)
- エネルギーが
足りないと
崩壊できない



クォークの種類
の判定は難しい
bクォークへの崩壊は使いにくい



実験的にはこの
ごくわずかな2つの光子への
崩壊が大切だったりする(光子だと同定するのが楽)。

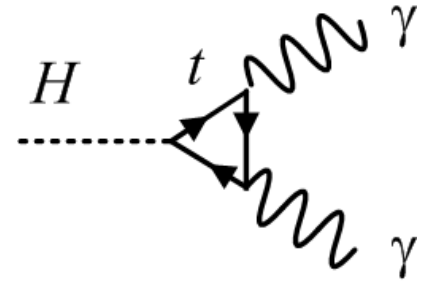
どうやって崩壊をとらえる？

- 藏重さんが検出器のことを話してくれます。
- いずれにせよ，崩壊で出てきた
 - レプトン (電子, ミューオン, タウ粒子)
 - クォーク：中間子の束＝ジェットとして観測
 - 光子
 - 様々な中間子一つずつを見ることも，可能
...を組み合わせて，粒子の種類と不変質量(*)から Higgs を見つけることができます。
- バックグラウンドに埋もれた信号探しが
実験屋さんの腕の見せ所

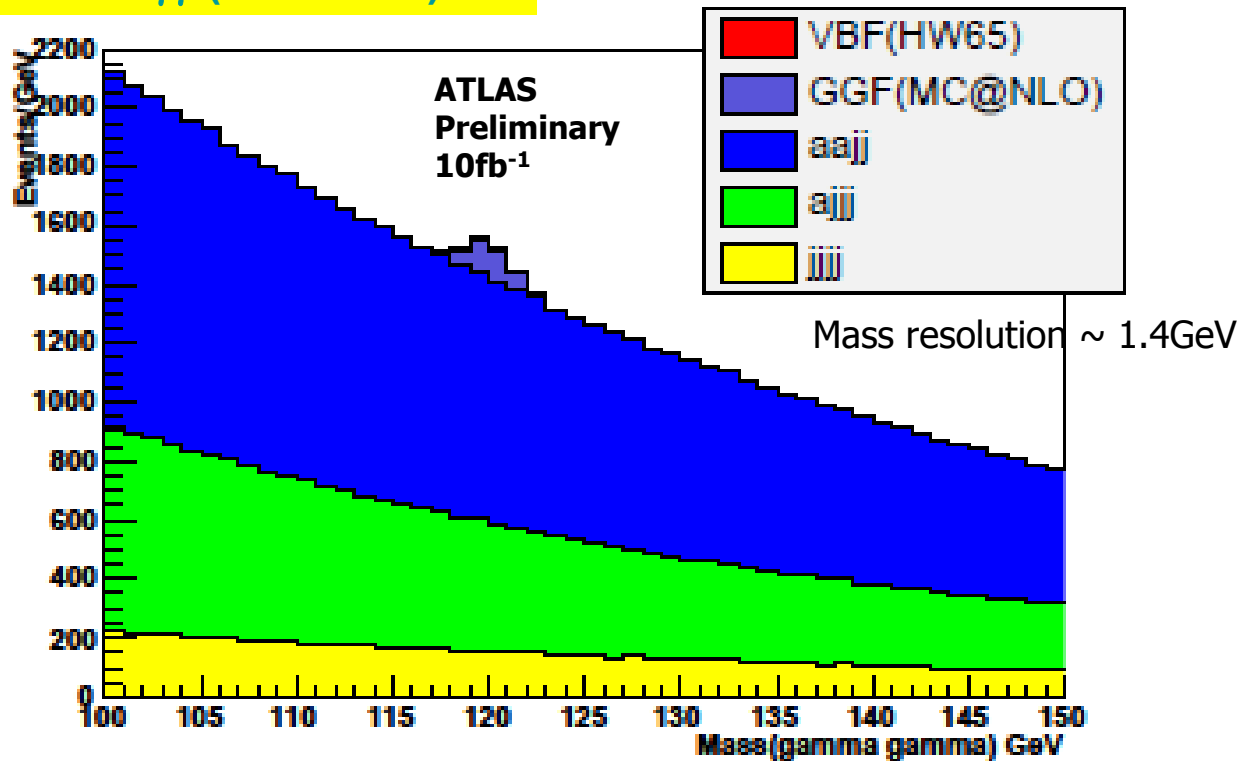
*不変質量：運動量とエネルギーから崩壊もと粒子の質量がわかります

Higgs の信号の例

- $H \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊を用いた例 :



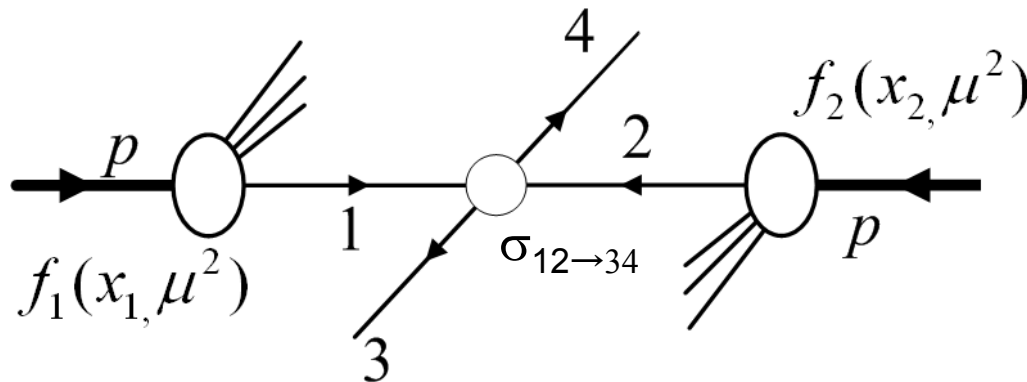
$H \rightarrow \gamma\gamma$ (inclusive)



2光子の不変質量 (GeV)

ハドロンコライダーの散乱過程

これら, Higgs 生成断面積はどうやって計算したのか?



$$\sigma \propto \sum_{q,g} f_1(x_1, p_T) f_2(x_2, p_T) \sigma_{12 \rightarrow 34}(p_T) p(34 \rightarrow FS)$$

x_1, x_2 : パートの縦方向の運動量比(陽子に対する)

- 信号も, 巨大なバックグラウンドも, 始状態のパートン密度 $f(x, Q^2)$ がないと計算できない
- つまり, 核子(陽子, 中性子)の内部構造を知る必要がある

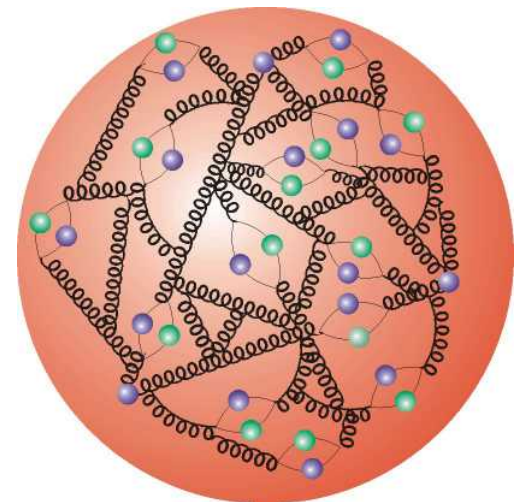
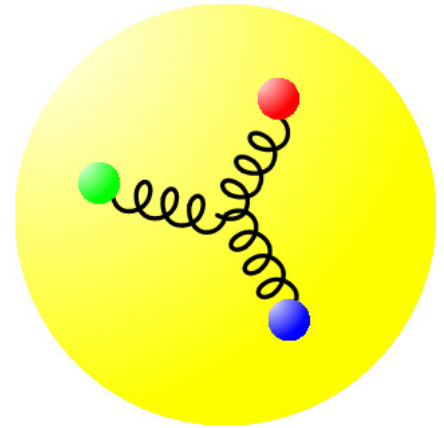
陽子の基本構造

- バリオン：3つのクォーク
 - 強い相互作用で閉じこめられている
カラー相互作用＝グルーオン
 - RGB（赤緑青）でカラー中性

$$p = (u \quad u \quad d) \quad n = (u \quad d \quad d)$$

$$1 = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} \quad 0 = +\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{2}{3}$$

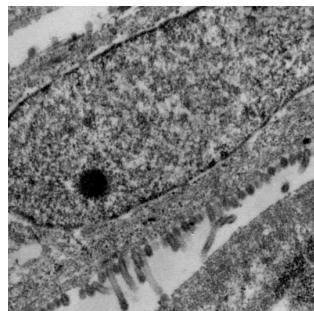
- 強い相互作用@低エネルギー
結合定数が大きい
 - もっと細かく見ると，右図の
ようにうじゃうじゃしている？



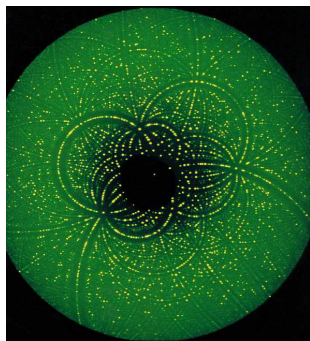
陽子の構造, どうやって調べるか



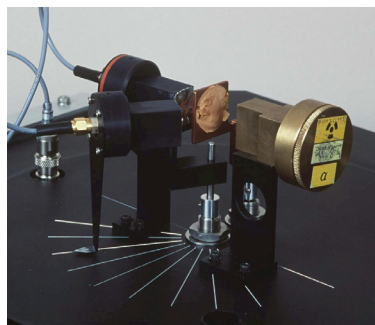
ミドリムシ



鳥インフルエンザウィルス



放射光の回折パターン



Rutherford 散乱の再現
(Rutherford 研究所)



核子のスピンを固定標的
電子散乱で探るHERMES実験

光学顕微鏡

電子顕微鏡

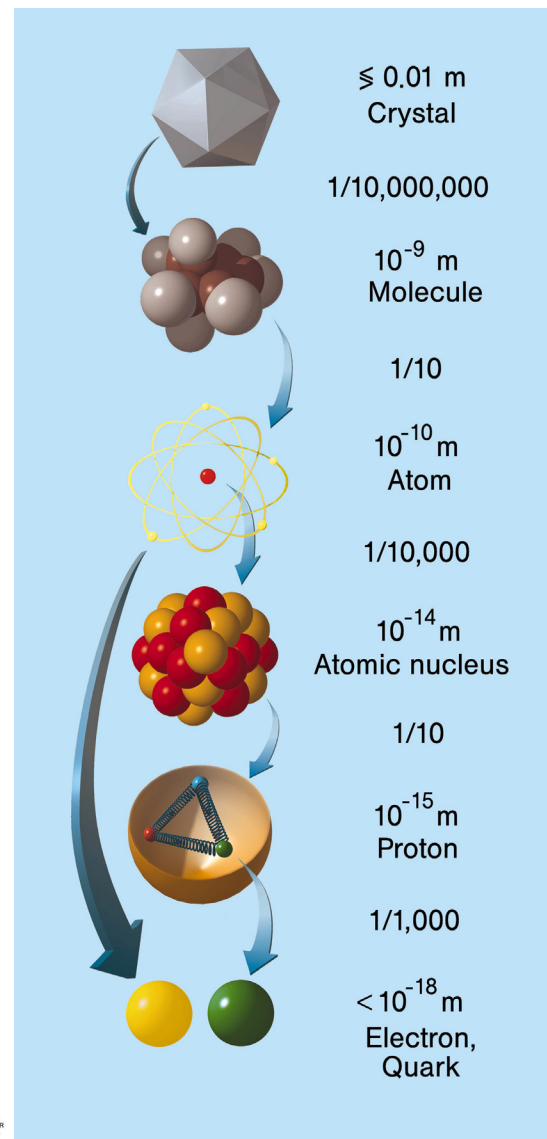
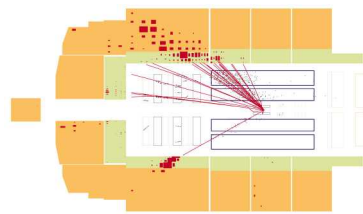
X線発生器

放射光

α, β 線 (同位体
元素の崩壊)

電子ビーム
重イオンビーム

電子・陽子衝突
散乱 HERA




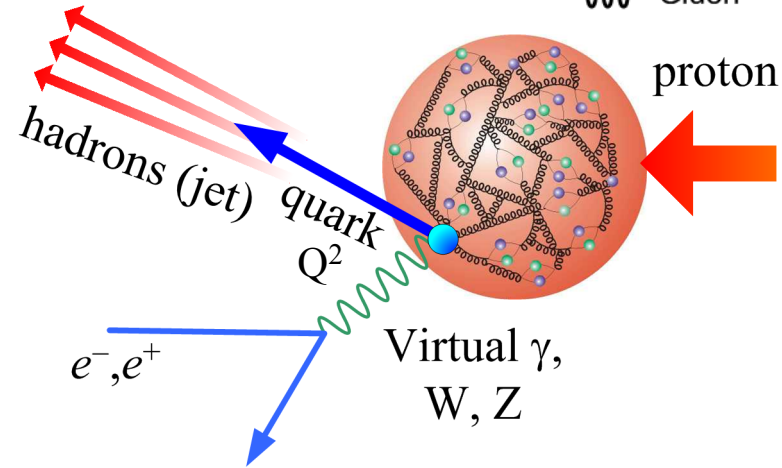
電子散乱でどう やって測るか

- クォークの縦方向の運動量比(x)は、散乱した電子の散乱角とエネルギーから
- 散乱角が大きいほど、移行運動量(Q^2)が大きい
 - 短い波長(λ)の仮想光子(γ^*)で陽子を見たことになる
つまり、よりよい解像度で見ている

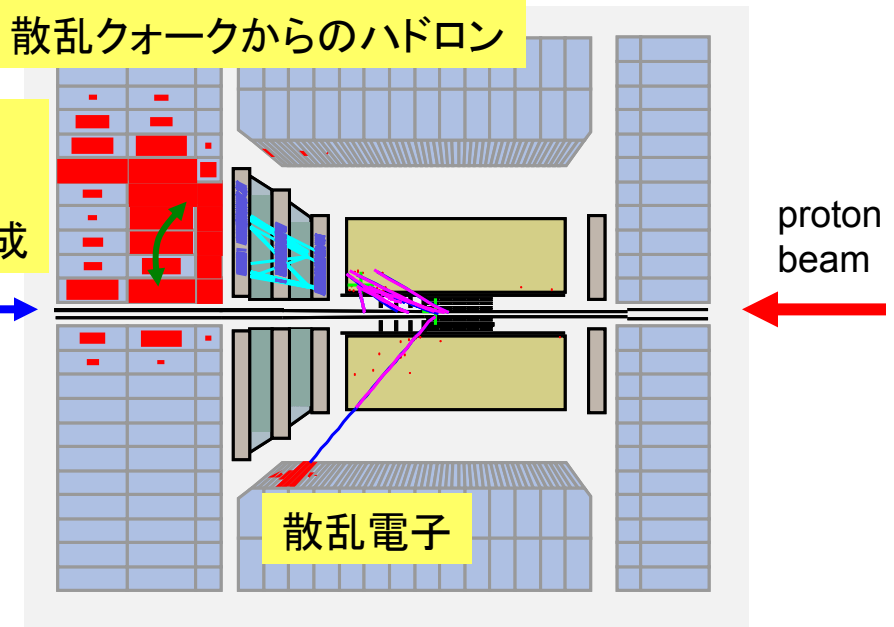
$$Q^2 \approx \frac{1}{\lambda^2}$$

深非弾性散乱 (DIS)
Deep-inelastic scattering

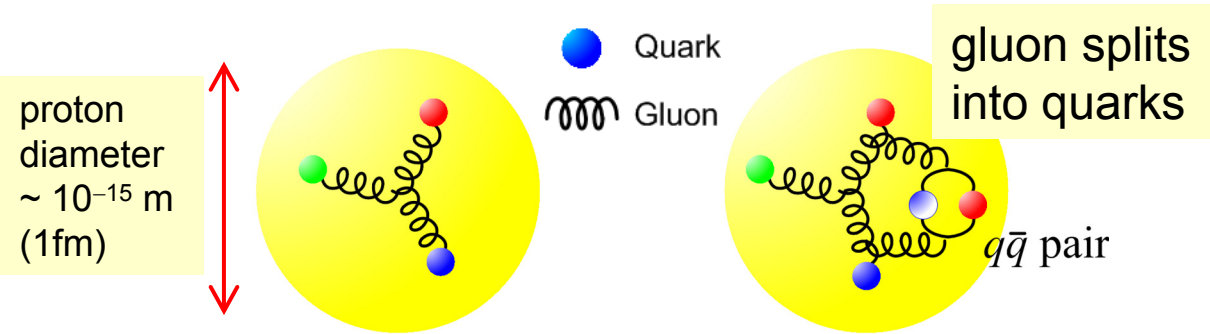
● Quark
 Gluon
 proton



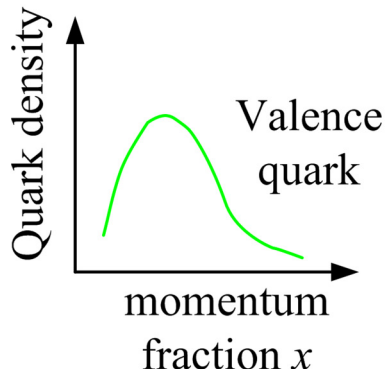
点状粒子(電子)で直接クォークをたたく



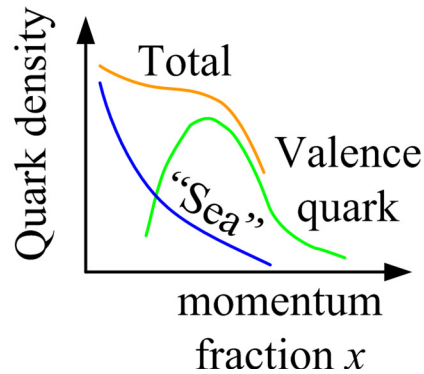
固定標的実験での陽子構造測定



- Q^2 が大きくなると波長が短くなる
 - 細かい内部構造が見えてくる
 - グルーオンがクォーク・半クォーク対に分解してできる「Sea (海) クォーク」



early fixed target exp'ts
 $Q \sim 1-3$ GeV (10^{-1} fm)

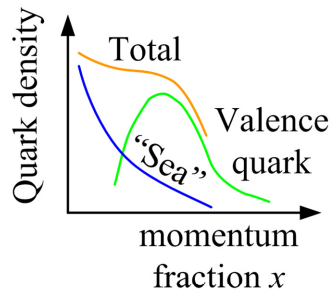
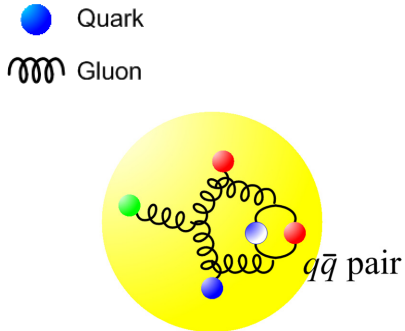


recent fixed target + muon
 $Q \sim 1-10$ GeV (10^{-2} fm)

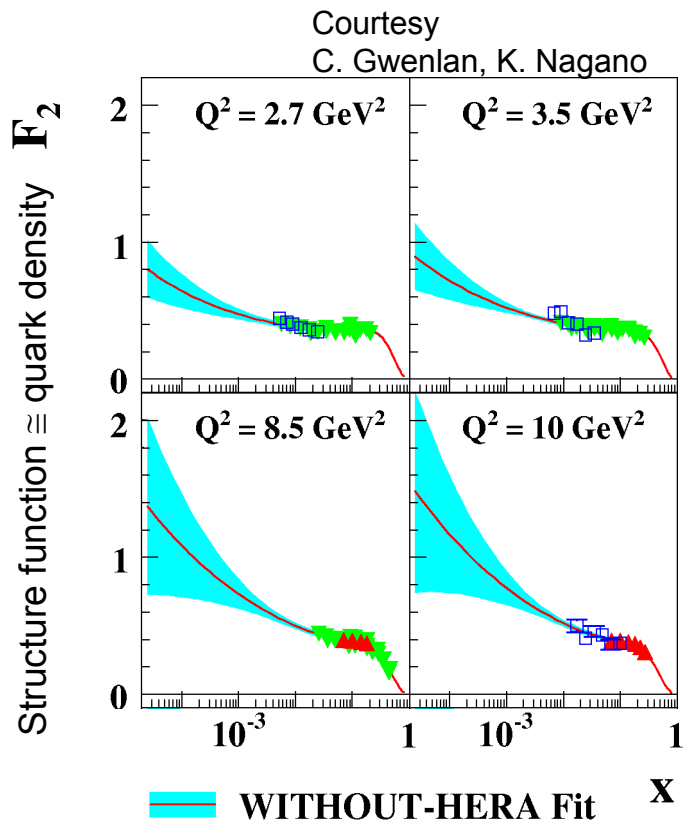
Increasing resolution (large Q^2)

$$Q^2 \approx \frac{1}{\lambda^2}$$

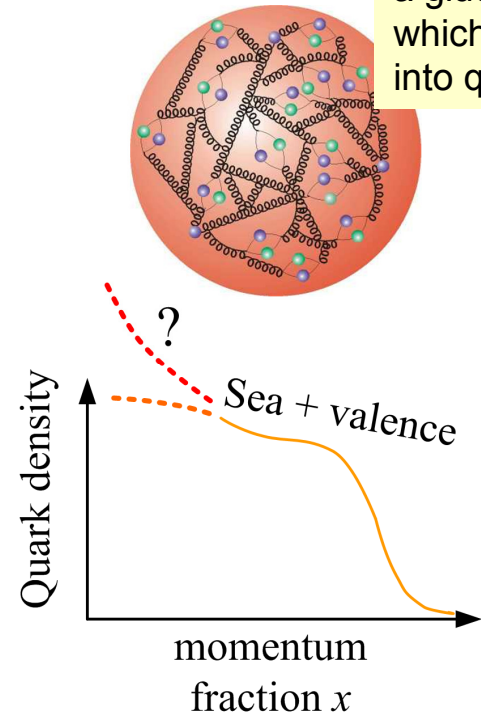
HERA実験までのクォーク分布



recent fixed target + muon
 $Q \sim 1-10 \text{ GeV}$ (10^{-2} fm)



Quarks emit a gluon, which splits into quarks ...

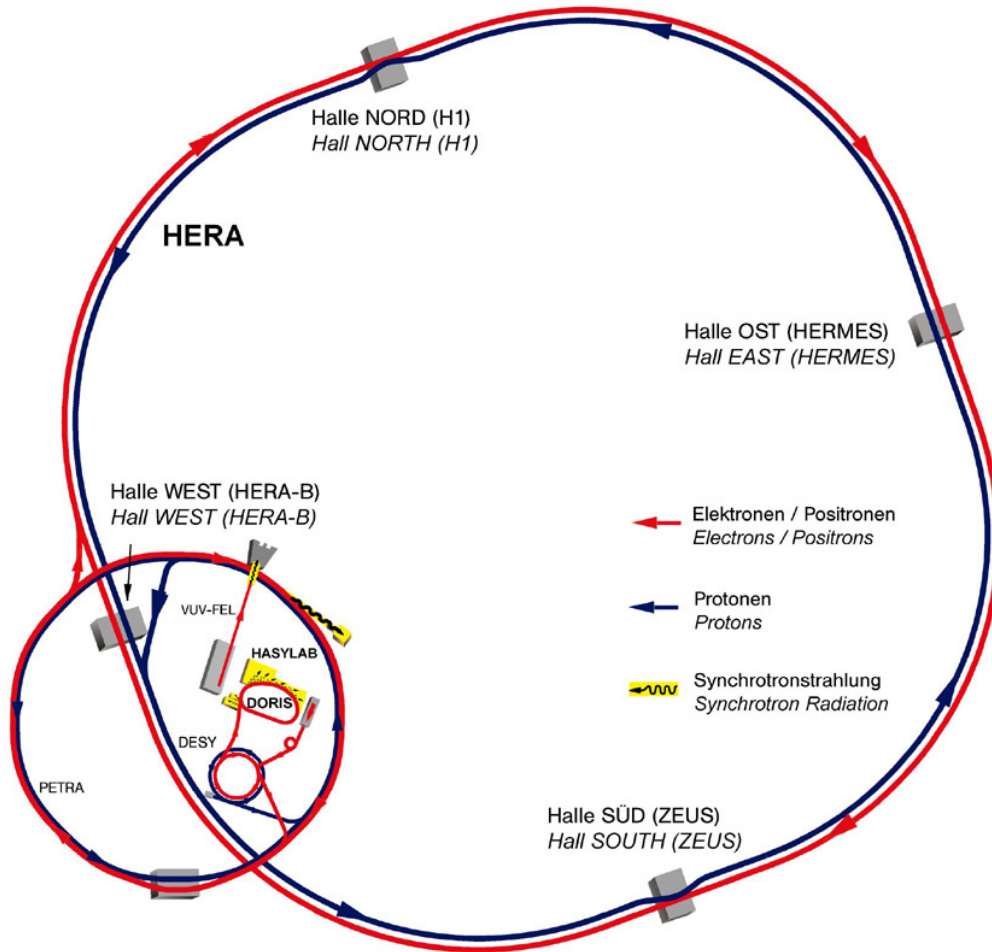


HERA
 $Q > 1-300 \text{ GeV}$ ($< 10^{-3} \text{ fm}$)

Increasing resolution (large Q^2)

- 固定標的ではわからなかった、低い運動量比 (小さい x) での構造は？

衝突型電子・陽子衝突 HERA 実験



- 周長 6.3 km
(陽子・反陽子衝突型加速器
Tevatron とほぼ同じ)

- 陽子ビーム: 920 GeV
- (陽)電子ビーム:
27.5 GeV

→ 重心系エネルギー

$$\sqrt{s} = 318 \text{ GeV}$$

(構造を 10^{-18}m =陽子の大きさの1/1000まで見ることができる)



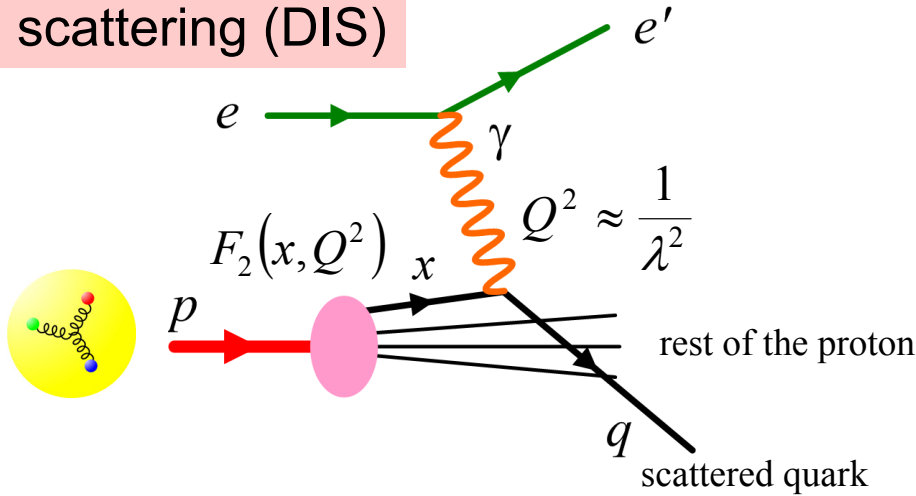
ドイツ・ハンブルク市西のDESY研究所にある

加速器：陽子（上段），電子の2階建て
陽子を曲げる磁場は超伝導磁石

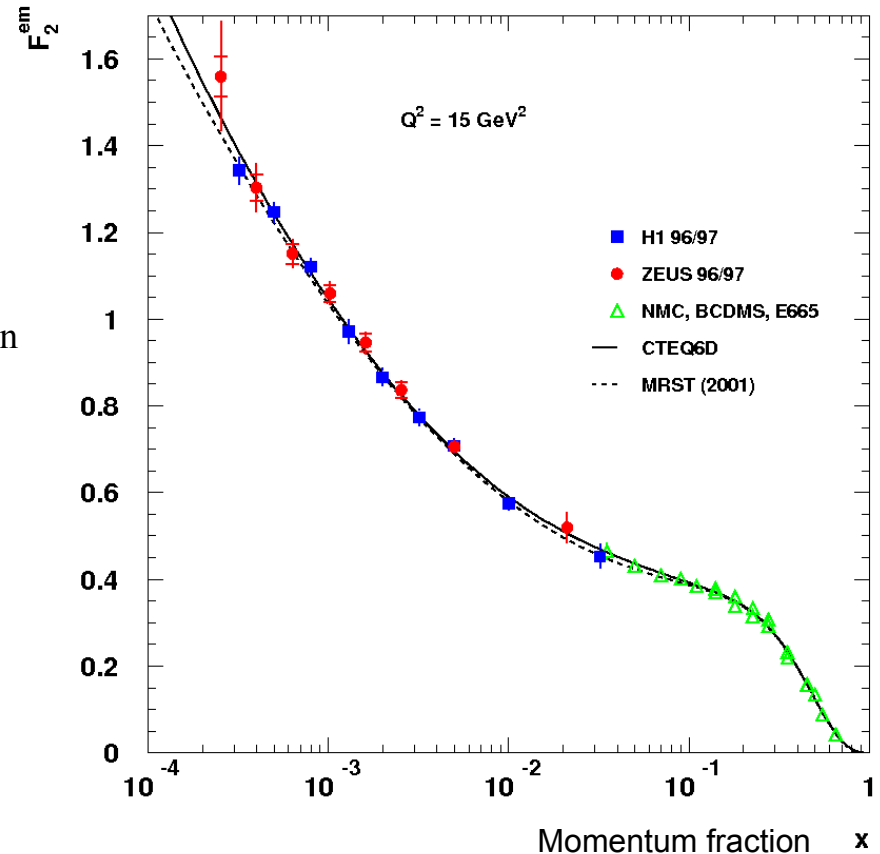


2000年, HERAでの構造関数測定

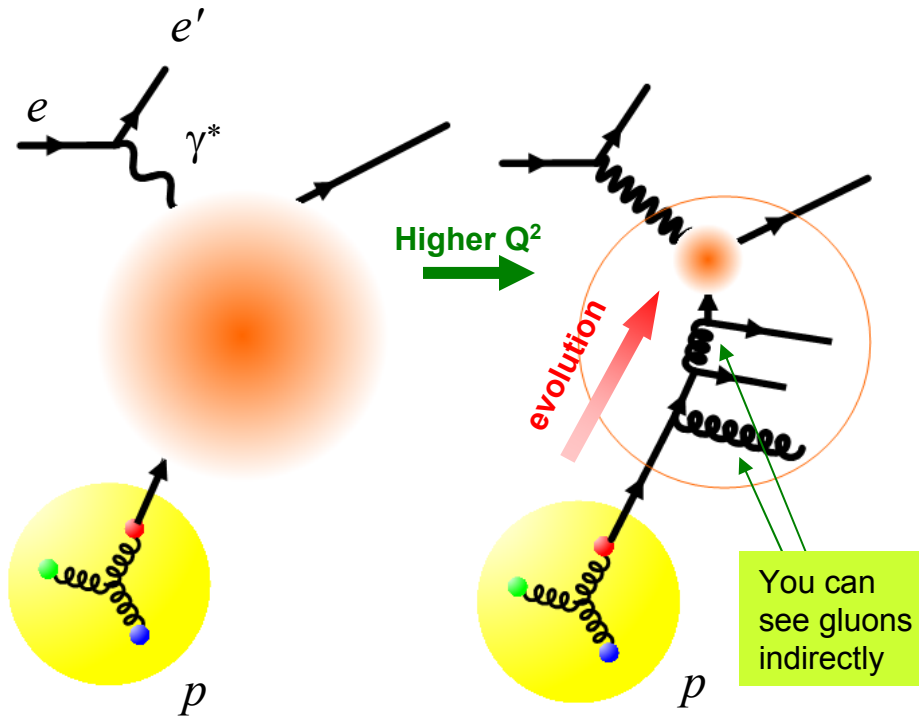
Deep-inelastic scattering (DIS)



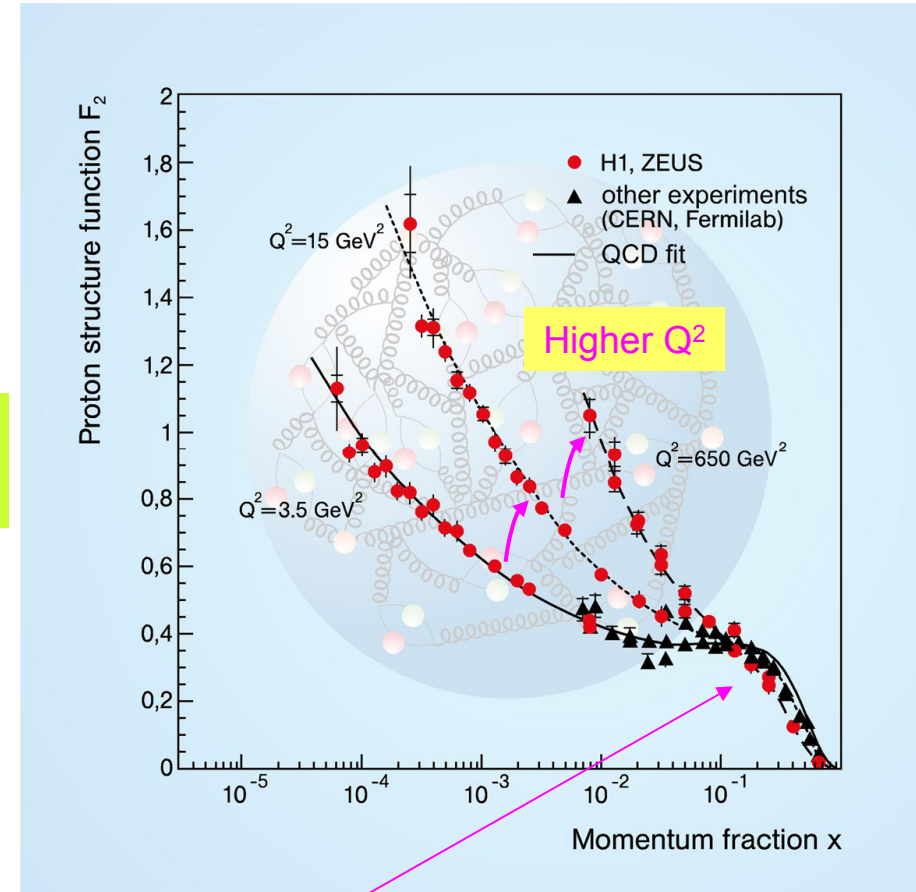
- $F_2(x) = e^2_q x(q(x) + \bar{q}(x))$
 - F_2 (縦軸) はクォーク密度 $q(x)$ に比例
 - x と Q^2 の関数
- 海クォークが低い x に向けて急速に増えている



解像度を上げるとたくさんのクォークが見えてくる



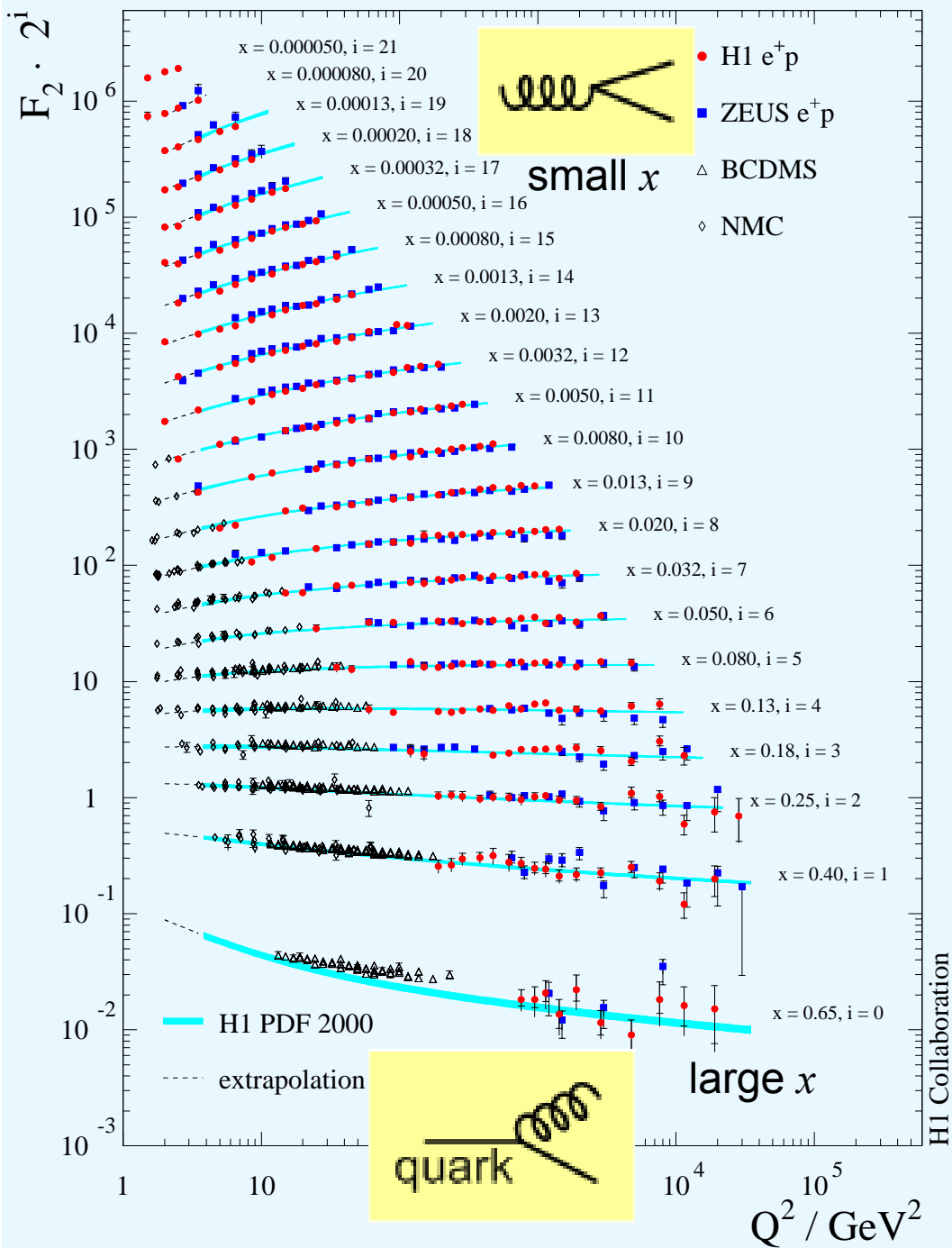
- 海クォークがより高い Q^2 で動的に作られている。
- この振る舞いは、有名なDGLAP (Dokschitzer-Gribov-Lipatov-Altarelli-Parisi) 発展方程式により予言されていた。
 - 摂動論的QCDに基づいている。



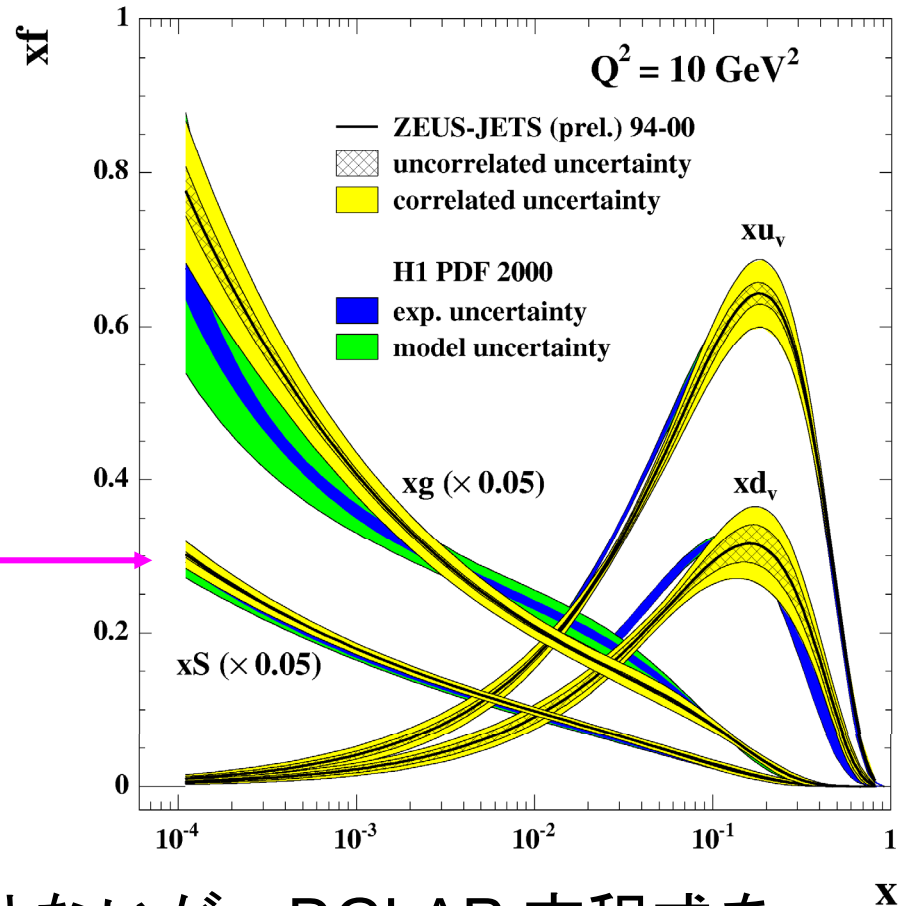
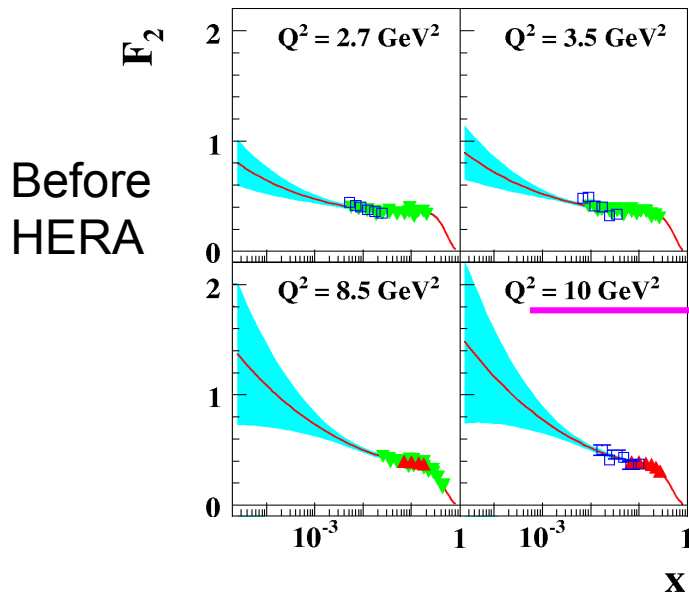
Quark density decreasing at high- x with Q^2

Q²の関数でみた クォーク密度

- 構造関数が非常に精度よく求まっている
(LHCへの準備ができた！)
- DGLAP方程式で予言された、クォークと
グルーオンの動的な生成が見て取れる
 - F_2 の傾きからグルーオン分布が求まる。



クォーク, グルーオン 密度決定の結果



- グルーオンは直接の測定ではないが, DGLAP 方程式を用いて精度よく決めることができた
- 低い x の領域ではグルーオンの量が圧倒的に多い
- HERAの測定で精度が飛躍的に上がった

まとめ

- 最高エネルギー陽子衝突 LHC では，新物理の発見が期待されている。
 - 例として，Higgs の作り方と崩壊を見ました。
- そこでの散乱断面積の理解には，陽子のパートン密度の知識が欠かせないが，「巨大顕微鏡」HERA実験で精度よく求まっている。

高エネルギー物理の組織

- 最近の実験：どんどん巨大化。
だいたい 200-700 人
 - KEKB Belle 実験 / アメリカ SLAC BaBar 実験
 - ドイツ HERA H1 / ZEUS 実験
 - アメリカ Tevatron CDF / D0 実験
 - 加速器ニュートリノ実験も， 2 けたから 3 けたの真ん中あたりになる予定
- 世界中で， 同じ実験は 1-2 個
 - 今のところ， 衝突型実験は実験が 2 つで追試できる
 - これからも， 競争とクロスチェックは大切だが， だんだん難しくなっている。

神戸大は、どうやって参加しているの？

- LHC の Atlas 実験 (約 2000 人) のうち
 - 日本人は数パーセント (100 人程度)
 - 神戸大は、日本の中で 3 番目に大きい参加機関
 - 著者リストには、約 10 人
 - + 修士の学生さん (実験が始まったとき、1 年以上貢献があれば)
- 参加国の義務を果たしている
 - 検出器の建設担当
神戸大は、他大学/高エネルギー加速器研究機構とともに飛跡検出トリガー装置を担当
 - 日本全体で、運転経費の割り当て分負担

ATLAS Collaboration

(As of the October 2006)

35 Countries
164 Institutions
1800 Scientific Authors total
(1470 with a PhD, for M&O share)



Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, LAPP Ancey, Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku, IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, HU Berlin, Bern, Birmingham, Bologna, Bonn, Boston, Brandeis, Bratislava/SAS Kosice, Brookhaven NL, Buenos Aires, Bucharest, Cambridge, Carleton, Casablanca/Rabat, CERN, Chinese Cluster, Chicago, Clermont-Ferrand, Columbia, NBI Copenhagen, Cosenza, AGH UST Cracow, IFJ PAN Cracow, DESY, Dortmund, TU Dresden, JINR Dubna, Duke, Frascati, Freiburg, Geneva, Genoa, Giessen, Glasgow, LPSC Grenoble, Technion Haifa, Hampton, Harvard, Heidelberg, **Hiroshima, Hiroshima IT**, Indiana, Innsbruck, Iowa SU, Irvine UC, Istanbul Bogazici, **KEK, Kobe, Kyoto, Kyoto UE**, Lancaster, UN La Plata, Lecce, Lisbon LIP, Liverpool, Ljubljana, QMW London, RHBNC London, UC London, Lund, UA Madrid, Mainz, Manchester, Mannheim, CPPM Marseille, Massachusetts, MIT, Melbourne, Michigan, Michigan SU, Milano, Minsk NAS, Minsk NCPHEP, Montreal, McGill Montreal, FIAN Moscow, ITEP Moscow, MEPHI Moscow, MSU Moscow, Munich LMU, MPI Munich, **Nagasaki IAS, Nagoya**, Naples, New Mexico, New York, Nijmegen, BINP Novosibirsk, Ohio SU, **Okayama**, Oklahoma, Oklahoma SU, Oregon, LAL Orsay, **Osaka**, Oslo, Oxford, Paris VI and VII, Pavia, Pennsylvania, Pisa, Pittsburgh, CAS Prague, CU Prague, TU Prague, IHEP Protvino, Regina, **Ritsumeikan**, UFRJ Rio de Janeiro, Rome I, Rome II, Rome III, Rutherford Appleton Laboratory, DAPNIA Saclay, Santa Cruz UC, Sheffield, **Shinshu**, Siegen, Simon Fraser Burnaby, SLAC, Southern Methodist Dallas, NPI Petersburg, Stockholm, KTH Stockholm, Stony Brook, Sydney, AS Taipei, Tbilisi, Tel Aviv, Thessaloniki, **Tokyo ICEPP, Tokyo MU**, Toronto, TRIUMF, **Tsukuba**, Tufts, Udine, Uppsala, Urbana UI, Valencia, UBC Vancouver, Victoria, Washington, Weizmann Rehovot, FH Wiener Neustadt, Wisconsin, Wuppertal, Yale, Yerevan

義務を果たすと、データがもらえる

- 実験で取得したデータは自由に解析可能。
ただし、
 - ATLAS 実験として論文を出さなければならない。
2000 人の論文著者リスト。
 - 論文となるには、内部審査が必要。
 - データ解析は共同実験の他のメンバーとの共同作業になる。
 - データははじめの数年は非公開、その後検討
- 参考：宇宙業界では：
 - 建設に参加した研究者が、一定期間データを独占
 - その後広く一般に開放され、勝手に論文を書ける
- この違いはデータの複雑さから来る
 - 天体観測は、最初の数ヶ月－2年くらいで所期の性能が出るかわかる
 - 高エネルギー、特にハドロンコライダーのデータの理解は時間がある
また、地上に検出器→随時改良

物理解析の進め方

- まずは検出器の理解から
 - 信号がエネルギーに比例しているか
 - 検出器が思った位置にあるか
 - 信号を出さない部分はあるか, などなど
- すると, 晴れて粒子のエネルギー and/or 運動量 and/or 種類 がわかる
 - これらを組み合わせて, 事象を再構成
 - 必要な事象をバックグラウンド事象と区別するための方法を考える (事象選別, 確からしさの計算)
...などなど
- 解析のノウハウは, 往々にして文書化されていない
 - 人に聞きに行くのが一番早い! なので, 解析は結局現地 CERN で行われる。特に初心者は行かないとだめ (自分も含め)。
 - その機会に, お友達がたくさんできます。

解析の結果は？

- 少しでもかたちになったら，まず共同研究のメンバーに認知してもらうことが大切
 - 神戸大グループ内で指導
 - 結果が意味・意義あるものかを検討
 - よければ，現地の物理解析グループで発表
 - 当然英語です（フランス語でなくて，よかった...）。
 - だいたい毎週ミーティングあるが，ある程度のレベルに達しないと時間がもらえないことあり。
 - 似たような作業をやっている人からフィードバックがもらえたら，しめたもの
 - その人と共同作業になると，相乗効果で解析のスピードが上がるかも。

後半まとめ

- LHC は 2008 年秋からデータ取得
 - 世界のトップレベルでの検出器理解（修士），物理解析（修士，博士）ができる
 - 現地の人と一緒にできる
 - 日本グループのバックアップもあり
- 物理解析だけでなく，実験技術に興味ある人も
 - LHC 検出器アップグレードの研究
 - 粒子物理他の研究でも，検出器開発，物理（ニュートリノ等）
- 研究者を目指す人も，就職かなーと思う人も，経験は必ず役立ちます。

お金の話

- 加速器の予算：数百－数千億円
 - 参考：核融合炉 ITER: 5000億超
すばる望遠鏡: 400+1000億運営費
かぐや：すばると同規模
 - 参考：高速道路 6.5 兆/yr
整備新幹線 2500 億/yr
防衛予算 約 5兆/yr
- 検出器の予算：だいたい1けた下
- 運転費：100億/yr 超えることもあり