

# 強い場の物理とそのハドロン 物理への応用

板倉数記

(KEK理論センター)

Aug 5, 6 2014@夏の学校

# はじめに

- 「強い場の物理」は実験施設の高度化に伴って、最近ますます重要性を増している視点ですが、それを現代的な視点から体系的にまとめた教科書や講義は今までにありません。
- 本講義は、私が今までの研究活動で理解し、身に着けてきた事柄を、試行錯誤しながら自分なりにまとめたもの。まだ最善の提示方法かどうか分かりません。私の中では自然に結びついた流れでもそう聞こえないかもしれません。分かりにくい部分があったら積極的に教えてください。
- これから皆さんがそれぞれの研究活動で良く聞く話題は意識的に取り上げていません。なるべく「他では聴けない」話題を話します。つまり、ここで話すことは皆さんが通常の教育の過程で当然理解しているべき事柄では、ありません。初めて聞くのなら、分からないのが当然です。質問しましょう。

# 予定

- 第1講 「強い場の物理」概観
- 第2講 強い場自体のダイナミクス  
主に強い場の非線形性と不安定性 場
- 第3講 外場中の素粒子・ハドロンが示す現象 場と粒子
- 第4講 未解決問題群  
媒質や相転移の外場応答  
重イオン衝突での熱化機構 多粒子

# 講義1

## 「強い場の物理」

### 概観

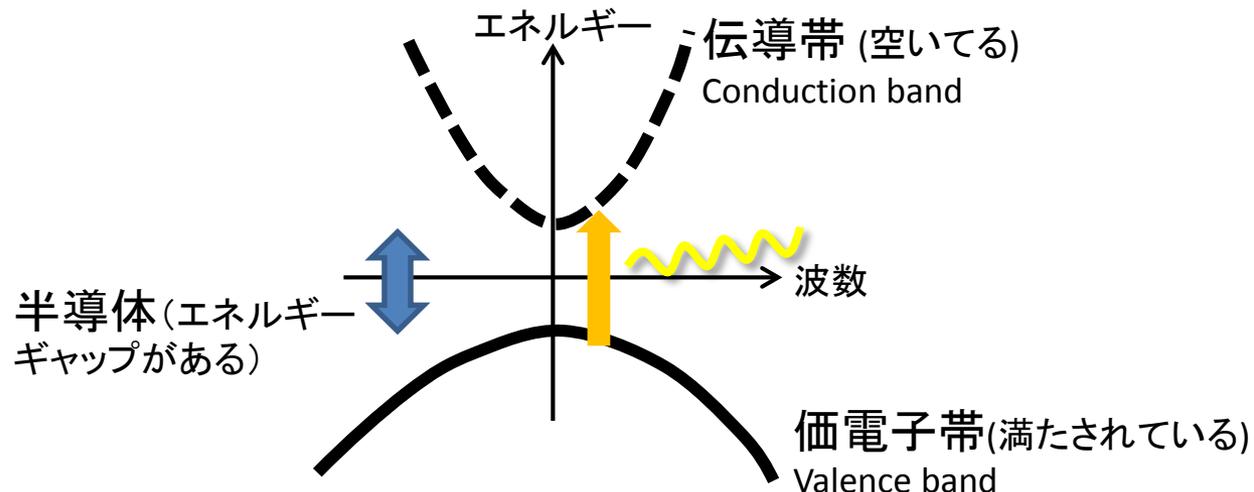
# 場はいつ強いと言えるのか？

- 系による
- 弱い外場は系に対する微小な摂動。外場 $\rightarrow 0$ で緩和し回復
- 「場が強い」とは

系の固有の励起エネルギー  $<$  場のエネルギー

場の存在が本質的に系のダイナミクスに影響を与える  
摂動では扱えない

- 等号 $\rightarrow$ 「臨界場」



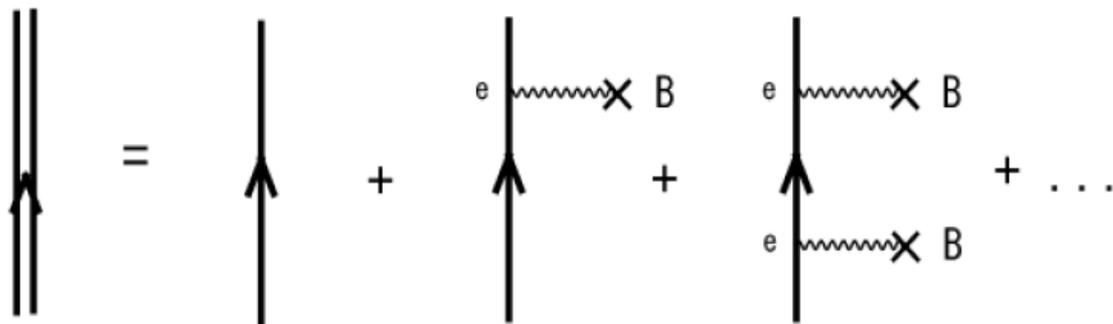
# 「強い場の物理」とは何か？

- 強い場があることによって初めて生ずる特徴的な現象が対象
- 強い場自体のダイナミクス、強い場中の粒子、強い場中での媒質・相転移
- 主に「電磁場」、「カラー電磁場(Yang-Mills場)」を扱う

(外場として同様な効果がある場合もある)

- **結合は弱くとも、本質的に非摂動的なダイナミクス**

磁場中の電子のプロパゲーター



$$1 + O\left(\frac{eB}{m_e^2}\right) + O\left(\left(\frac{eB}{m_e^2}\right)^2\right) + \dots$$

$$eB_c \equiv m_e^2$$

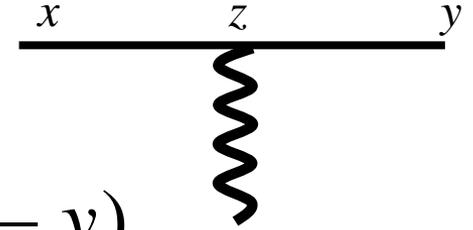
$$eE_c \sim m_e^2$$

Schwingerの臨界電場

$B \gg B_c$ のときは無限次まで足し上げが必要 → 「非線形QED」

# (補)外場の挿入

外場が1回挿入した場合の寄与



$$G(x-y) = \int dz G_0(x-z) ie\cancel{A}(z) G_0(z-y)$$

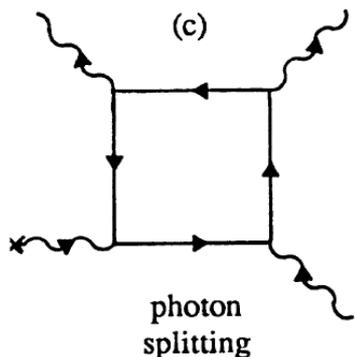
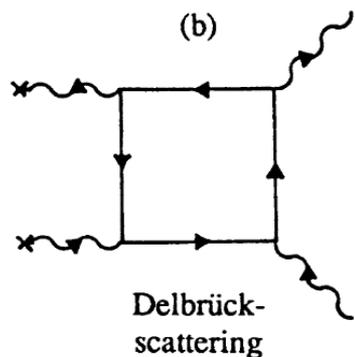
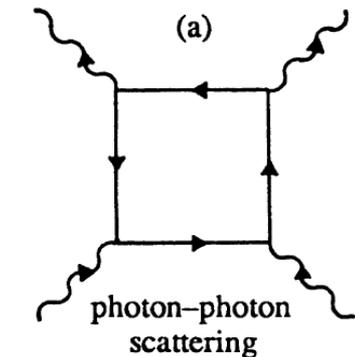
free  $G_0(z-y) = \int dq \frac{i}{\cancel{q} - m} e^{iq(z-y)}$

Fock-Schwinger gauge  $A^\mu(z) = -\frac{1}{2} F^{\mu\nu} z_\nu$

$$\begin{aligned}
 G(x-y) &= -\frac{ieF^{\mu\nu}}{2} \int dz \int dpe^{ip(x-z)} \frac{i}{\cancel{p} - m} \gamma_\mu z_\nu \int dq e^{iq(z-y)} \frac{i}{\cancel{q} - m} \\
 &\sim \frac{ieF^{\mu\nu}}{2} \int dz \int dpe^{ip(x-z)} \frac{i}{\cancel{p} - m} \gamma_\mu z_\nu \int dq \frac{1}{i(z-y)^\rho} e^{iq(z-y)} \frac{\partial}{\partial q_\rho} \frac{i}{\cancel{q} - m} \\
 &\sim -\frac{\gamma_\mu \gamma_\nu}{2} \int dpe^{ip(x-y)} \frac{i}{\cancel{p} - m} \times \frac{ieF^{\mu\nu}}{(\cancel{p} - m)^2}
 \end{aligned}$$

部分積分

# QEDの高次効果とは違う！



- 光子・光子散乱は高次効果で可能(揺らぎの効果)
- 真空中では、断面積は非常に小さい  $\sim O(\alpha^4)$   
強い外場があつて、ようやく同じポロジ-の効果観測可能  
例)原子のクーロン場(電荷  $Ze$ )

2つを置き換える **Delbrueck scattering**  $\sim O(Z^4\alpha^4)$

1つを置き換える **Photon splitting**  $\sim O(Z^2\alpha^4)$

どちらも測定されている。

Milstein, Schumacher, Phys. Rep. 243 (1994) 183

Akhmadaliev et al. PRL 89 (2002) 061802

- しかし！外場が強くなるとこれらの最低次の寄与では不十分  
無限次までの足し上げが必要
- QCDでも同様の事が起こる。そもそもQCDでは結合が強い  
ために外場がそれほど強くなくとも起こり得る。日常茶飯事。  
QCDを理解するためには、「非線形QED」効果を理解すべし

# どれくらい強い場が、 どこで生成するのか？

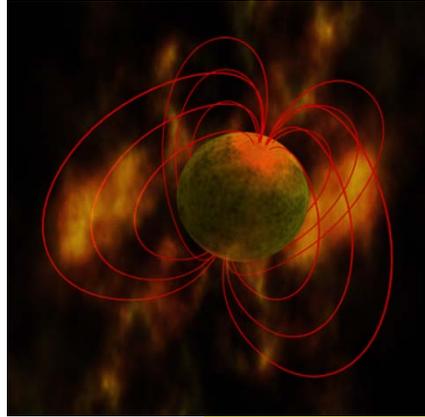
**$10^{17} - 10^{18}$  Gauss**

$\sqrt{eB} \sim 1 - 10 m_\pi$

**Noncentral heavy-ion collisions  
at RHIC and LHC**

**Also strong Yang-Mills fields**

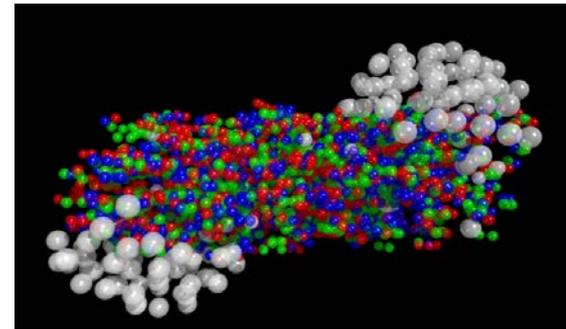
$\sqrt{gB} \sim 1 - \text{a few GeV}$



**$10^{15}$  Gauss :  
Magnetars**

**$4 \times 10^{13}$  Gauss : "Critical"  
magnetic field of electrons**

$\sqrt{eB_c} = m_e = 0.5 \text{ MeV}$



**Super critical magnetic  
field may have existed in  
very early Universe.  
Maybe after EW phase  
transition? (cf: Vachaspati '91)**



**45 Tesla : strongest  
steady magnetic field**  
(High Mag. Field. Lab. In Florida)

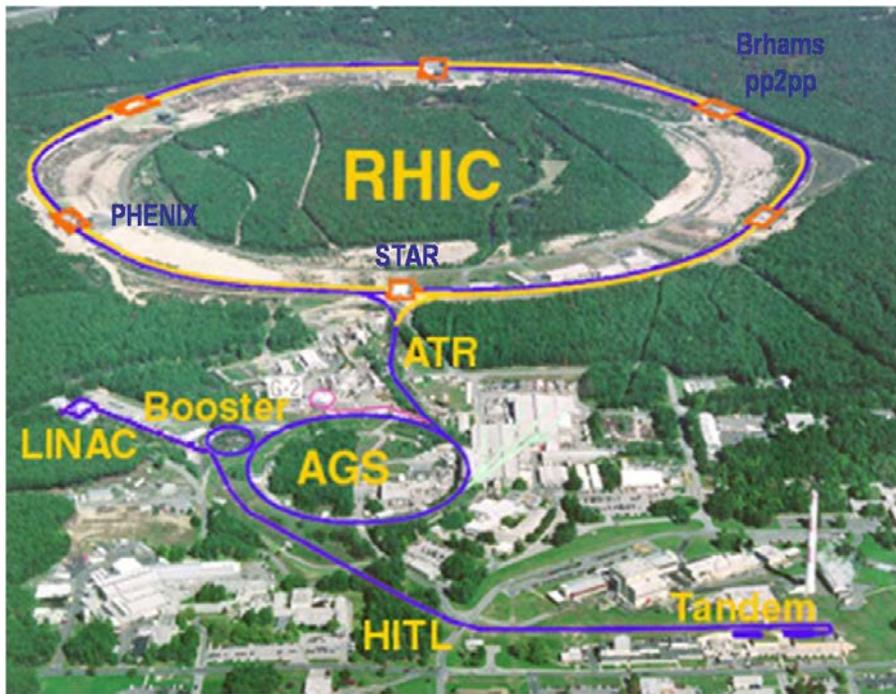
**$10^8 \text{ Tesla} = 10^{12} \text{ Gauss}$ :  
Typical neutron star  
surface**

**8.3 Tesla :  
Superconducting  
magnets in LHC**

( $5 \times 10^{-5} \text{ Tesla} = 0.5 \text{ Gauss}$  on the earth)

# RHIC & LHC

- 衝突型の加速器
- pp, pA(dA), AAの様々なタイプの高エネルギー衝突を起こす

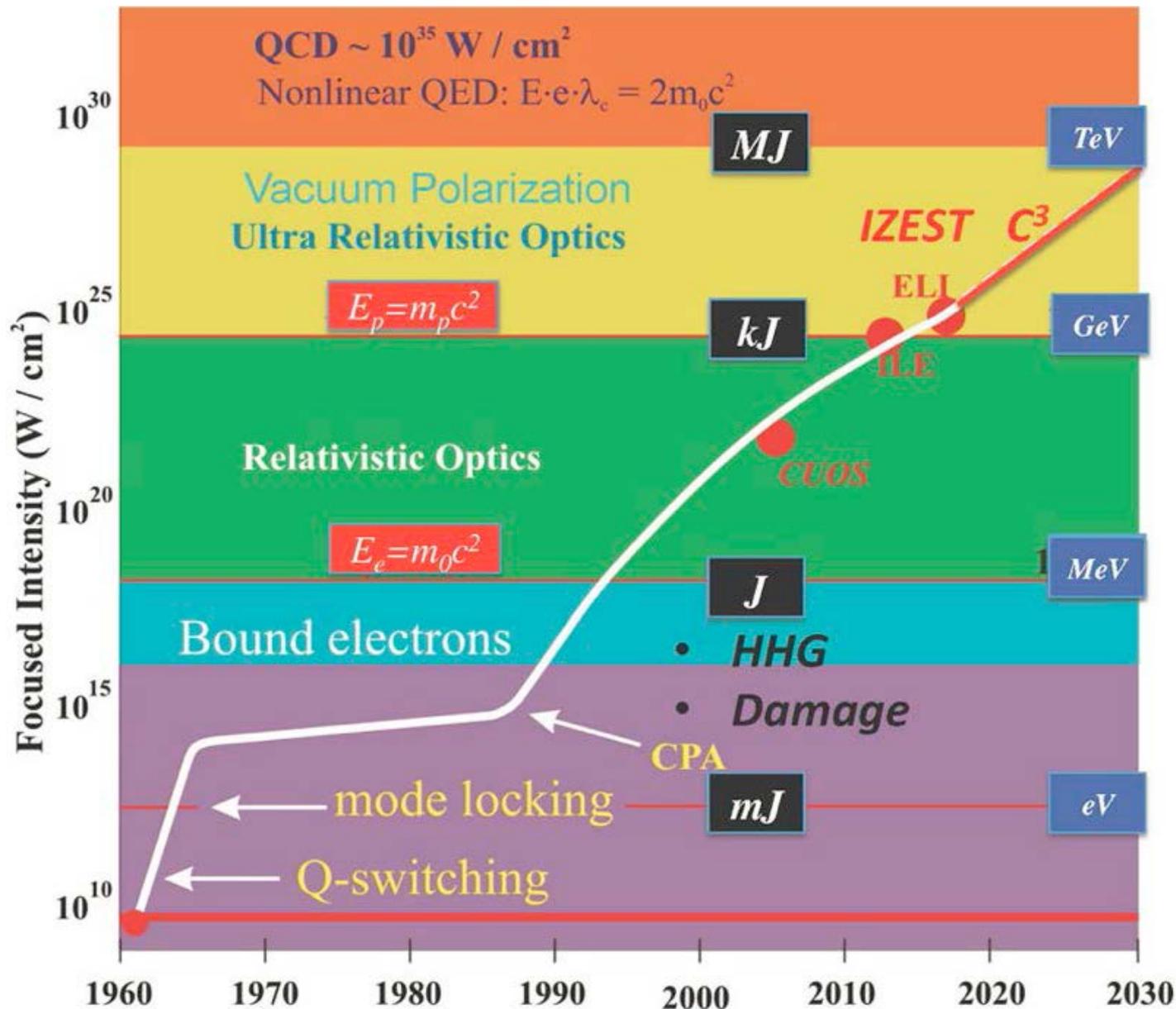


Relativistic Heavy Ion Collider  
at Brookhaven National Laboratory in NY, USA  
energy upto 200GeV/nn (500GeV for pp)



Large Hadron Collider at CERN in Europe  
energy upto 5TeV/nn (8TeV for pp)

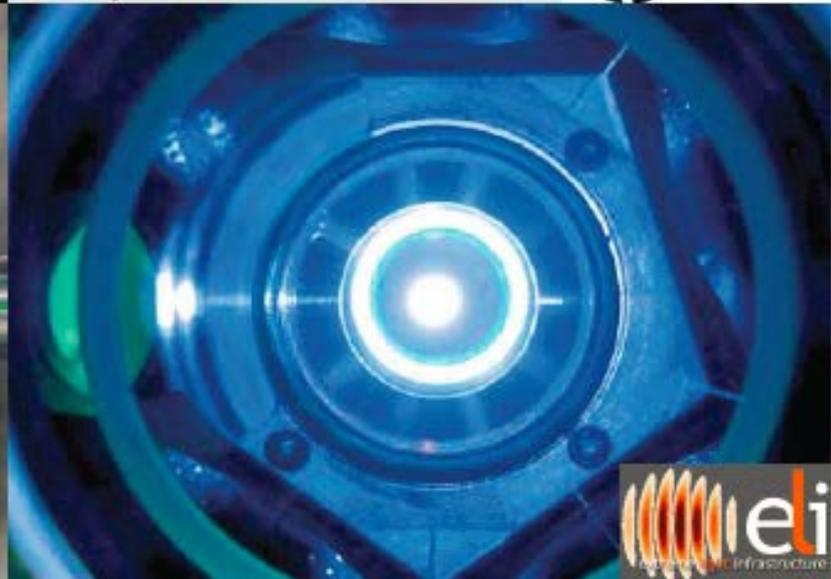
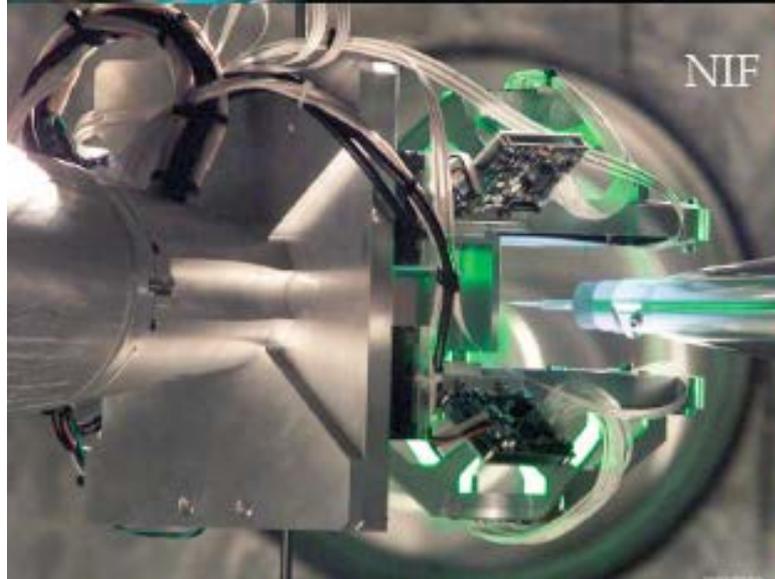
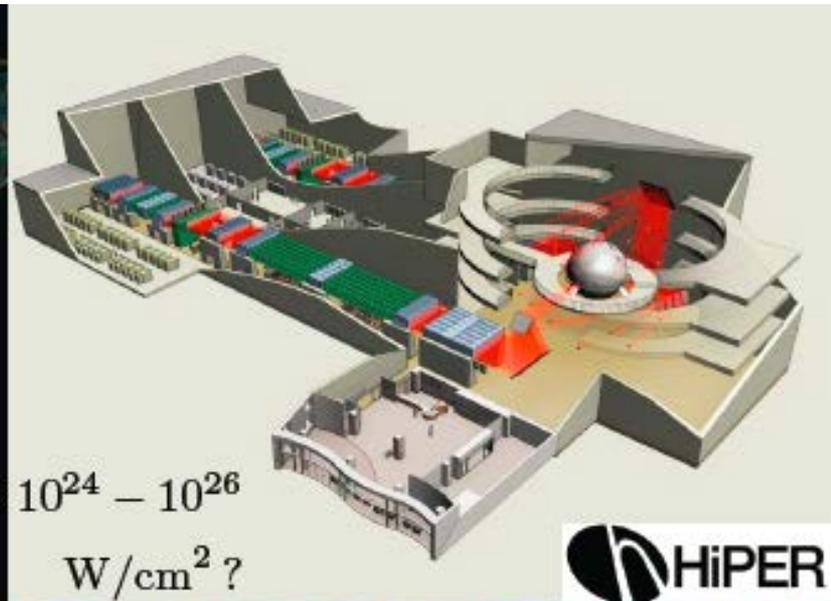
# ますます高強度化するレーザー



GEKKO-EXA (Japan)  
 XFEL, POLARIS, NIF, etc

CUOS @ Michigan U.  
 (Center for Ultrafast  
 Optical Science)  
 Hercules has the world  
 Record  $10^{22} \text{ W/cm}^2$

# 現在建設中・稼働始めたばかりの施設



# Extreme light infrastructure (ELI)

<http://www.eli-beams.eu/>

からの抜粋

## Research Activity Description

This largely untouched intensity territory will provide access to fundamental physical effects with much higher characteristic energies and will regroup many subfields of contemporary physics (atomic physics, plasma physics, particle physics, nuclear physics, gravitational physics, nonlinear field theory, ultrahigh-pressure physics, astrophysics and cosmology). In a longer-term perspective, relativistic compression offers the potential of intensities exceeding  $10^{25}$  W/cm<sup>2</sup>, which will challenge the vacuum critical field as well as provide a new avenue to ultrafast attosecond ( $10^{-18}$  s) and even zeptosecond ( $10^{-21}$  s) studies of laser-matter interaction.

## Some of the particular QED phenomena that will be studied at ELI are:

Electron-positron plasmas

Vacuum four-wave mixing

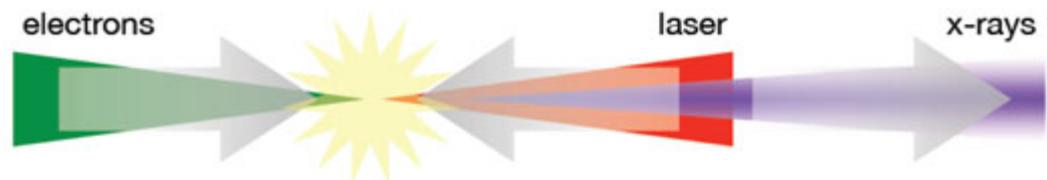
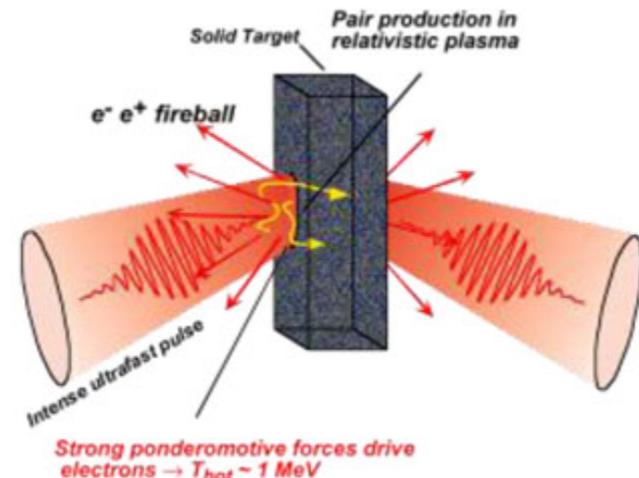
Vacuum polarisation

Vacuum birefringence

Unruh radiation

QED cascades: Inverse Compton Scattering

Quark-gluon plasmas



# なぜ強い場の物理を研究するのか

- Because **there exists in Nature especially in extreme conditions**
- Because we can learn something about **“vacuum”**
- Because it is a special tractable case of **non-equilibrium physics** (can be formulated in weak-coupling theory)
- Because it may allow for a new kind of **universal picture in Nature**
- Because it could give hints to **unsolved problems.**
- Because it gives a new **controllable parameter** in addition to  $T$  and  $\mu$ . New axis in the phase diagram.

# 非常に学際的なテーマ

- **Traditional ways of understanding physics**

→ based on **classification of physical systems** (in scale hierarchy)

ex) elementary particle physics, nuclear physics, atomic physics, optics,  
condensed matter physics (metal, insulator, semiconductor), astrophysics

- **Interdisciplinary ways of understanding physics**

→ based on properties that are **common in different systems**

ex) nonlinear physics, critical phenomena, non-equilibrium physics, etc

- **Strong field physics is one of such.**

→ we treat **extreme phenomena in many different systems**  
which could be hopefully described in “universal” ways.

# Workshop series “Physics in Intense Fields”

covered many areas in physics

(particle physics, nuclear-hadron physics, cond-mat physics, astrophysics, laser physics)

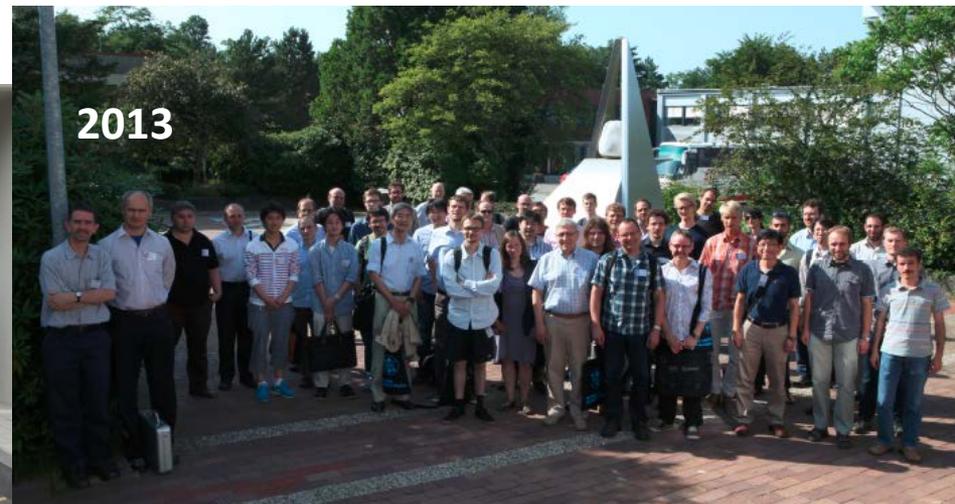
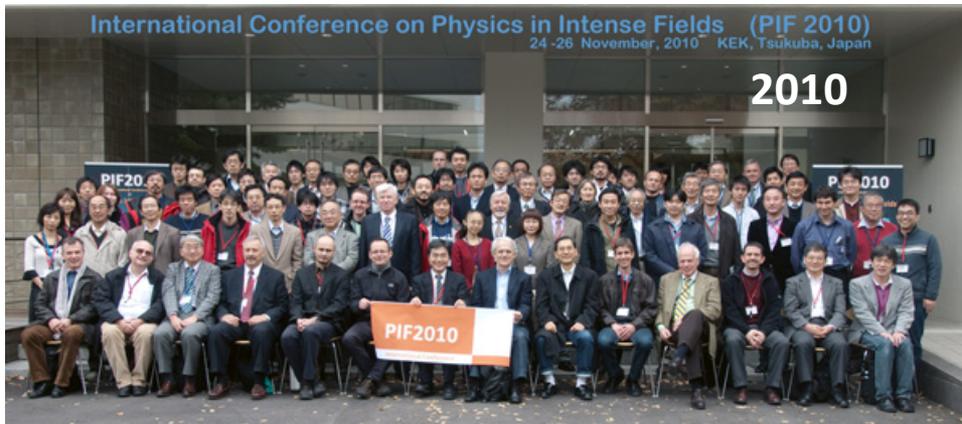
- **PIF2010 @ KEK** (# of participants ~100) chair of program committee

<http://atfweb.kek.jp/pif2010/>

- **PIF2013 @ DESY** (# of participants ~60) one of organizers

<https://indico.desy.de/conferenceDisplay.py?confId=7155>

- PIF2015 ? @ England?



# 強い場はどのように生成するのか？

- **レーザー** CPA法の発明
- **中性子星・マグネター** 超新星爆発における磁場の凍結
- **重イオン衝突**
  - 電磁場 高速に走る大きな電荷を持つ粒子の衝突
  - グルオン場 高速に走るカラー荷の作る強いカラー場の衝突
- **宇宙初期** 電弱対称性の破れ

# Chirped Pulse Amplification

Strickland & Mourou (1985)

パルス時間幅 10fs – 1ps  
レーザーでも多少の  
スペクトル幅がある

チャープパルス  
時間幅 200ps以上  
波長によって並ぶ  
強度は低くなる

広域帯で増幅が可能なもの Ti:sapphire  
増幅器の耐性ぎりぎりまで強度を確保

Recompress

Short pulse oscillator

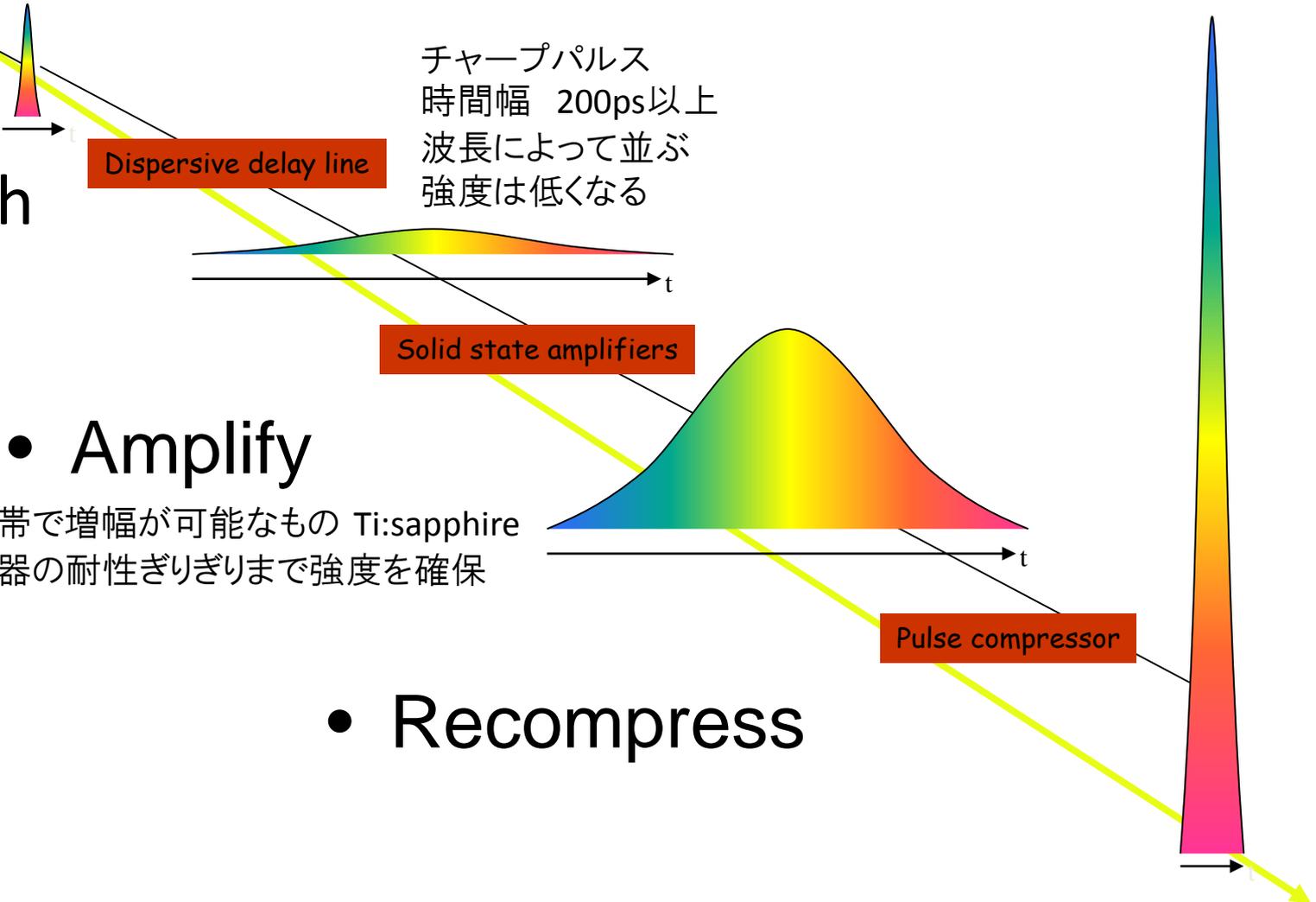
Dispersive delay line

Solid state amplifiers

Pulse compressor

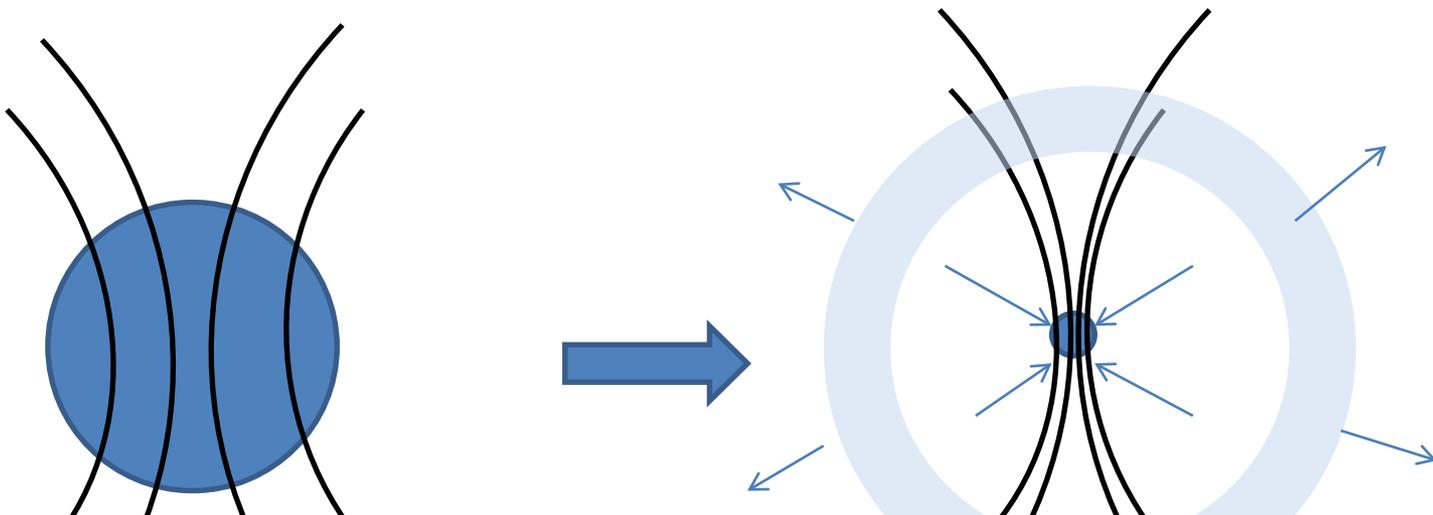
Stretch

Amplify



# 中性子星・マグネターの磁場

- 中性子星、パルサーは超新星爆発の残骸物
- どんな天体でもそれぞれ磁場を持つ
- 例:
  - 地球      0.5 Gauss
  - 太陽      10 Gauss (1000 Gauss @ 黒点)
- 磁場は星に補足されていて、物質の重力崩壊とともに中心へ絞られていく



# 太陽が重力崩壊したとすると

実際には軽いので崩壊しませんが

太陽      半径       $R \sim 7 \times 10^5 \text{ km}$   
              磁場       $B \sim 10 \text{ Gauss}$

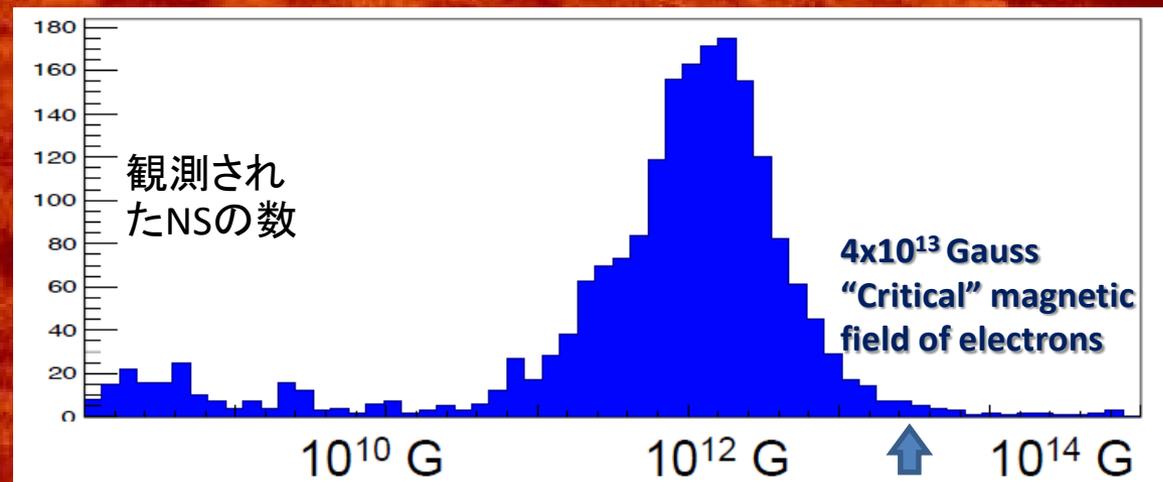
中性子星 半径       $R \sim 10 \text{ km}$

星を貫く磁束が保存されていると仮定

$$R^2 B = \text{一定} \quad \rightarrow \quad B \sim 5 \times 10^{10} \text{ Gauss} \quad \text{十分強い!!}$$

しかし、実際には  
中性子星の磁場は  
もっと強い

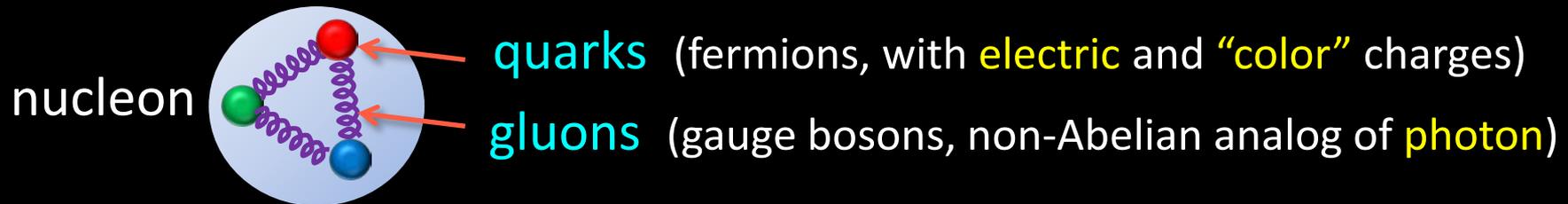
生成、保持の機構？  
強磁性？  
超伝導渦？



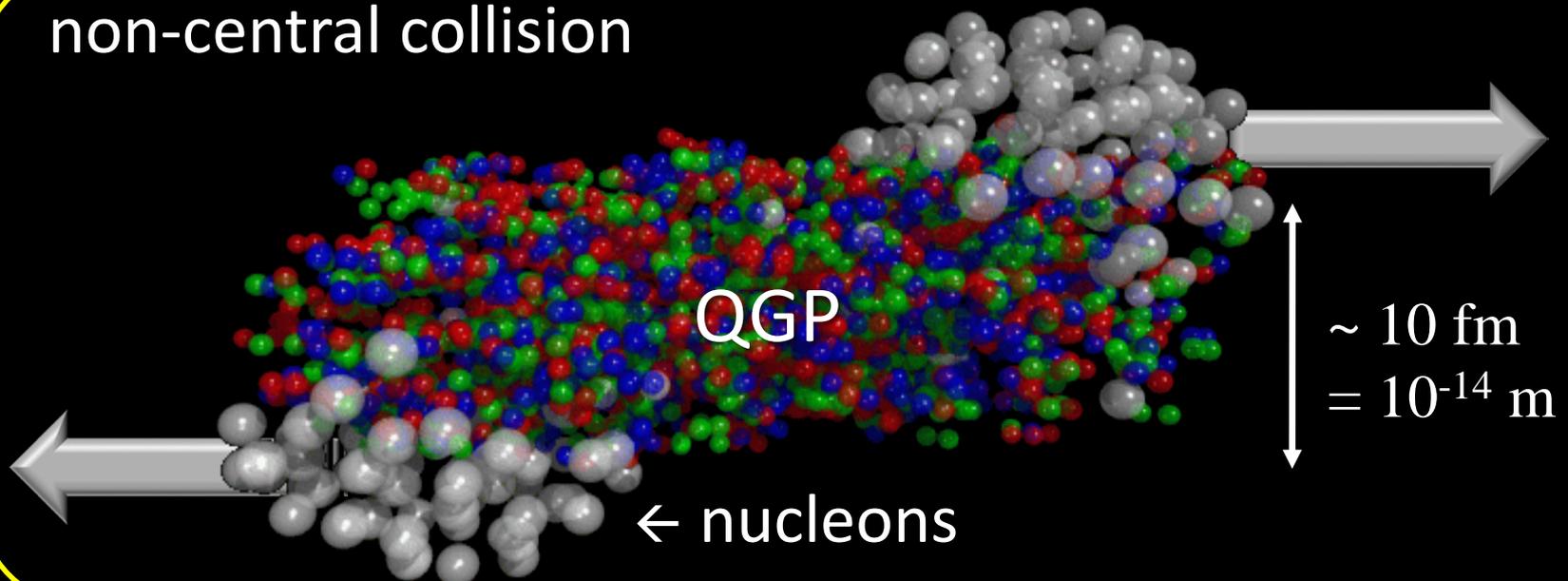
# 重イオン衝突

Collide two heavy ions (nuclei without electrons)

at very high energies to create “Quark-Gluon Plasma (QGP)”

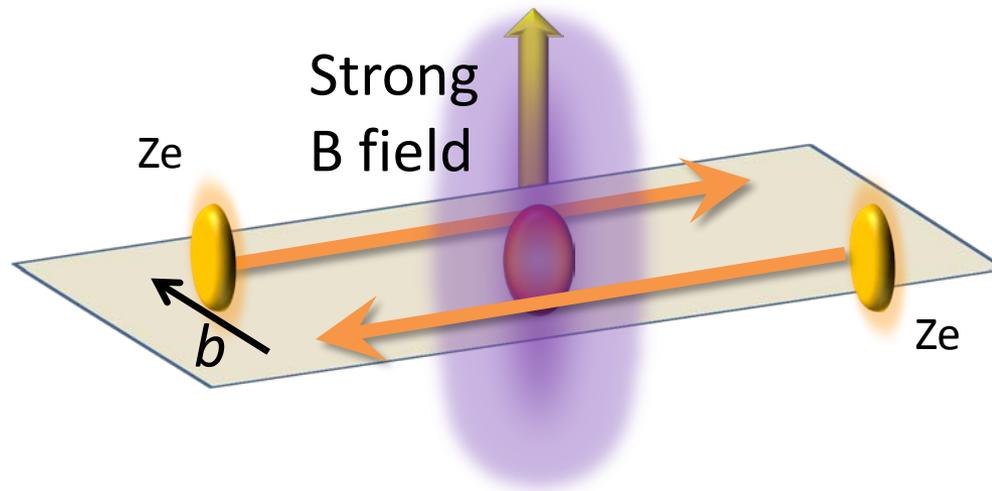


non-central collision



# 重イオン衝突における電磁場生成

- Two ions with **large electric charges** collide at high energy
- **Non-central** HICs at RHIC and LHC provide **STRONGEST** magnetic fields.



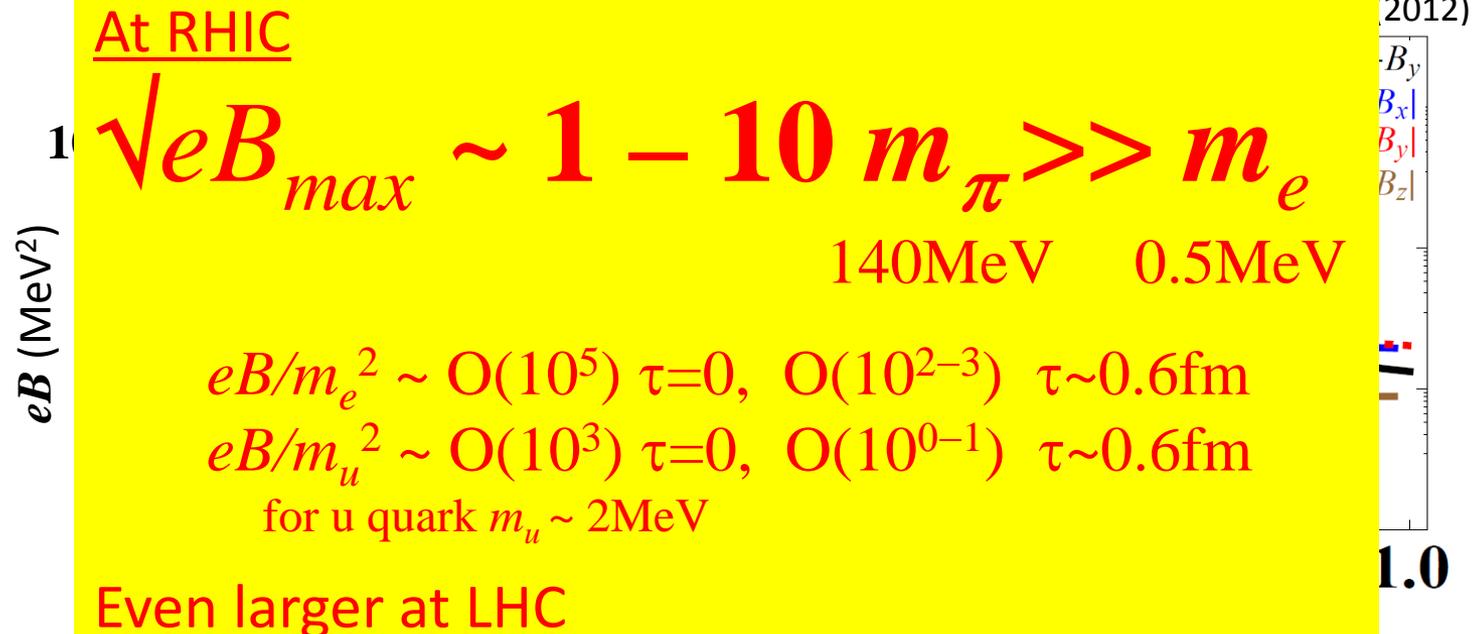
$$e\vec{B}(\vec{x}) = Z\alpha_{\text{EM}} \sinh(Y) \frac{(\vec{x}'_{\perp} - \vec{x}_{\perp}) \times \vec{e}_z}{[(\vec{x}'_{\perp} - \vec{x}_{\perp})^2 + (t \sinh Y - z \cosh Y)^2]^{3/2}}$$

$x'_{\perp}$ ,  $Y$ : transverse position and rapidity (velocity) of moving charge

$$Z=79 \text{ (Au)}, Y=6, b=4\text{fm} \rightarrow eB \text{ (origin, } t=z=0) \sim 10^4 - 10^6 \text{ MeV}^2$$

# 重イオン衝突における電磁場生成

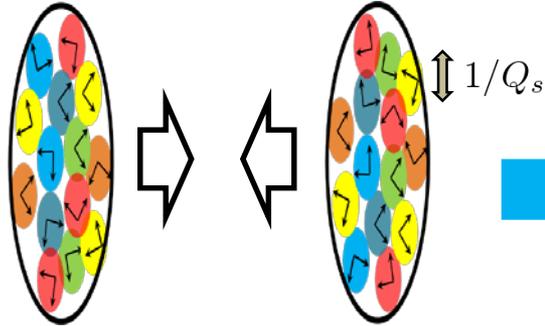
- Two ions with **large electric charges** collide at high energy
- **Non-central** HICs at RHIC and LHC provide **STRONGEST** magnetic fields.



- **Decay very fast:**  
Strong field physics will be most prominent in very early time!  
(though the fields are still strong enough even at QGP formation time)

# 重イオン衝突の現代的 (21世紀の) 描像

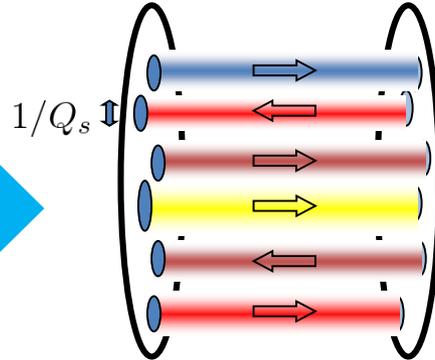
Lorentz contracted



Color Glass Condensate

$$\mathbf{E}_T^a \perp \mathbf{B}_T^a$$

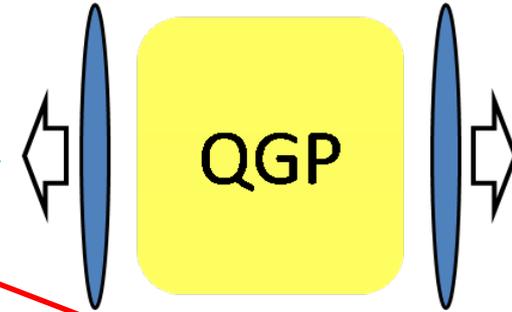
Gluon dominant



Glasma flux tubes

$$\mathbf{E}_L^a \parallel \mathbf{B}_L^a$$

Original figure by N.Tanji



non-Abelian Gauss's laws

$$\nabla \cdot \mathbf{E}^a = -gf^{abc} \mathbf{A}^b \cdot \mathbf{E}^c$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}^a = -gf^{abc} \mathbf{A}^b \cdot \mathbf{B}^c$$

After the collision: GLASMA

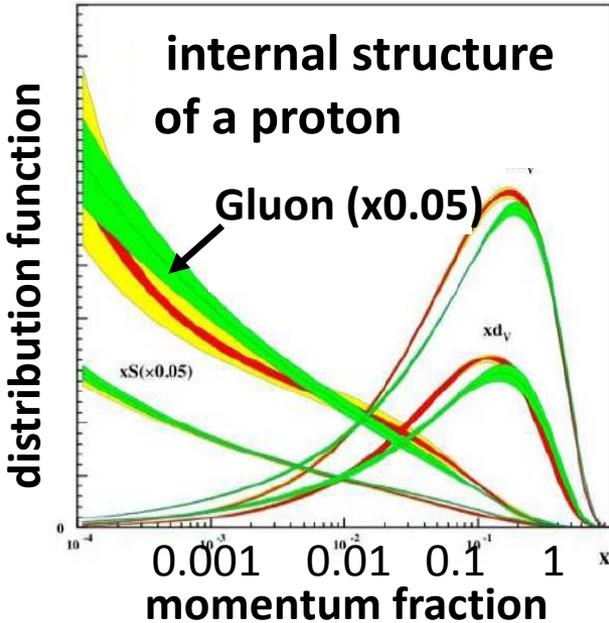
**Very strong color SU(3) electromagnetic fields**

with flux structure

Both color ELECTRIC and MAGNETIC fields

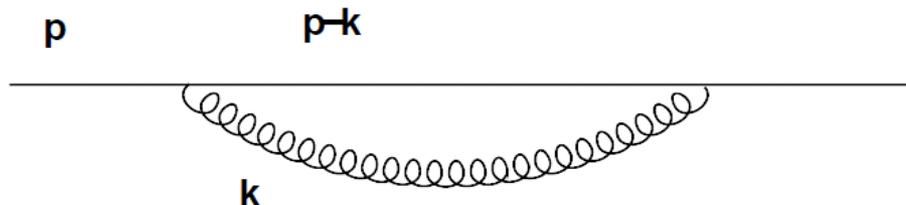
$$\sqrt{gB} \sim \sqrt{gE} \sim Q_s \sim 1 - \text{a few GeV} \gg m_q$$

Strong fields, but weak coupling  $Q_s \gg \Lambda_{\text{QCD}}$



# グルーオンの大放出

## 高運動量パートンの「揺らぎ」の寿命



$$p^\mu = (p, 0_\perp, p)$$

$$k^\mu = (E_k, k_\perp^i, k^z = xp)$$

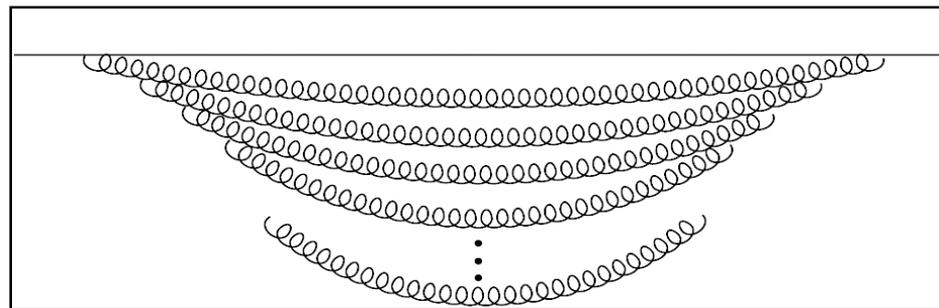
揺らぎの寿命  $\Delta t \sim \frac{1}{\Delta E} = \frac{1}{E_k + E_{p-k} - p} \sim \frac{2x(1-x)p}{k_\perp^2}$   
( $xp \gg kt$  のとき)

- 親パートンのエネルギー(運動量)大  $xp \gg kt \rightarrow$  **揺らぎが長寿命化**
- エネルギーが大きければ大きいほど、 $x$ の小さい長寿命の揺らぎが可能
- 子供のパートンが十分長寿命ならば、「孫」を産む  $\rightarrow$  **多重生成** (グルオン3点相互作用)
- 揺らぎはパートンの波動関数を与え、「散乱」によって、それが顕在化する
- 一つのグルオンを生成するdiagram

$$\rightarrow \alpha_s \ln 1/x \quad (\alpha_s = g^2/4\pi)$$

$$n \text{ 個の生成} \quad (\alpha_s \ln 1/x)^n$$

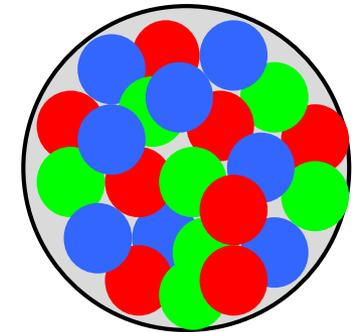
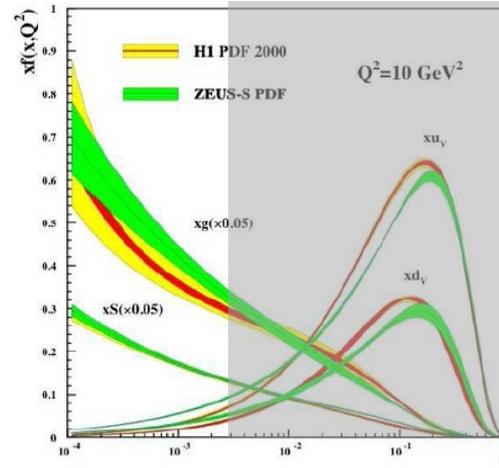
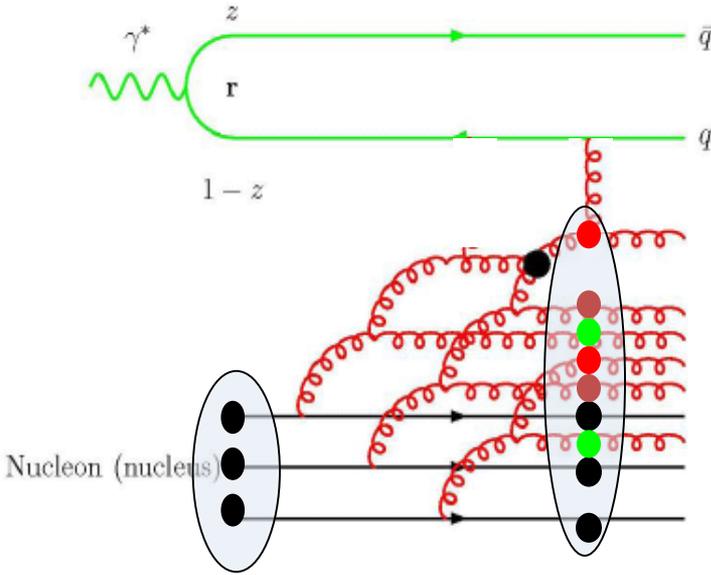
**小さい $x$ が大きな寄与**



$\rightarrow$  **高エネルギー散乱では  
グルオンの多重生成が重要**

# カラーグラス凝縮の出現

グルオン数が膨大になると、生成グルオン同士の相互作用が効きはじめる



カラーグラス凝縮 (CGC):  
高密度グルオン状態

グルオン再結合 ( $gg \rightarrow g$ ) により、増加が遅くなる

→ グルオン数の飽和、ユニタリ性の回復、カラーグラス凝縮

非線形な発展方程式:

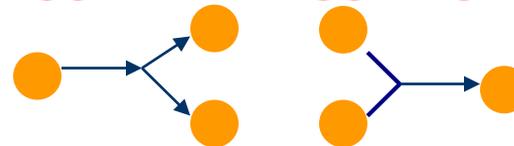
Balitsky-Kovchegov 方程式

$$\partial_Y N_F = \bar{\alpha} \chi * N_F - \bar{\alpha} N_F^2$$

BFKL + 非線形項

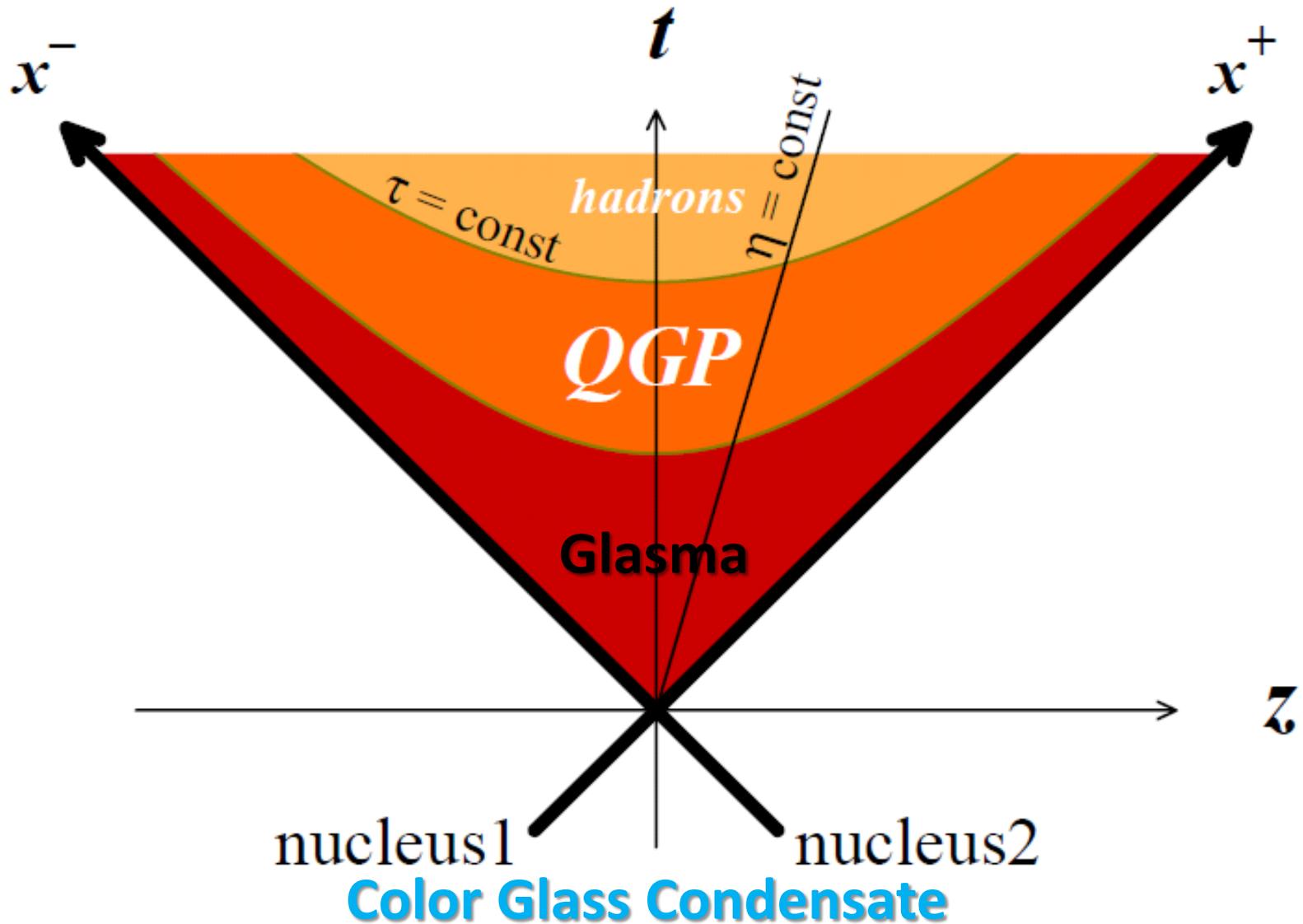
$Y \sim \ln 1/x$  ラピディティ

$g \rightarrow gg$  (分裂) と  $gg \rightarrow g$  (再結合) の競合



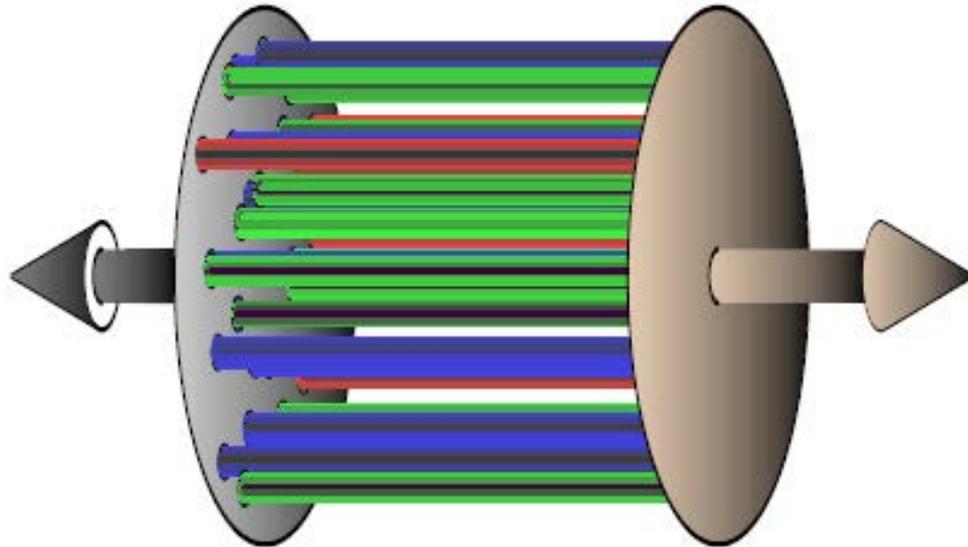
日本語での解説: 板倉、物理学会誌2004年3月

# 重イオン衝突の時間経過



# Glasma = Glass + Plasma

- 重イオン衝突直後に生成するグルオン場(非可換ゲージ場)
- CGCの強い場をそのまま引き継ぐので、やはり強い
- 衝突直後はビーム軸方向には一定、横方向にはランダムに分布  
→「フラックスチューブ構造」
- カラー電場、カラー磁場両方を持ちうる



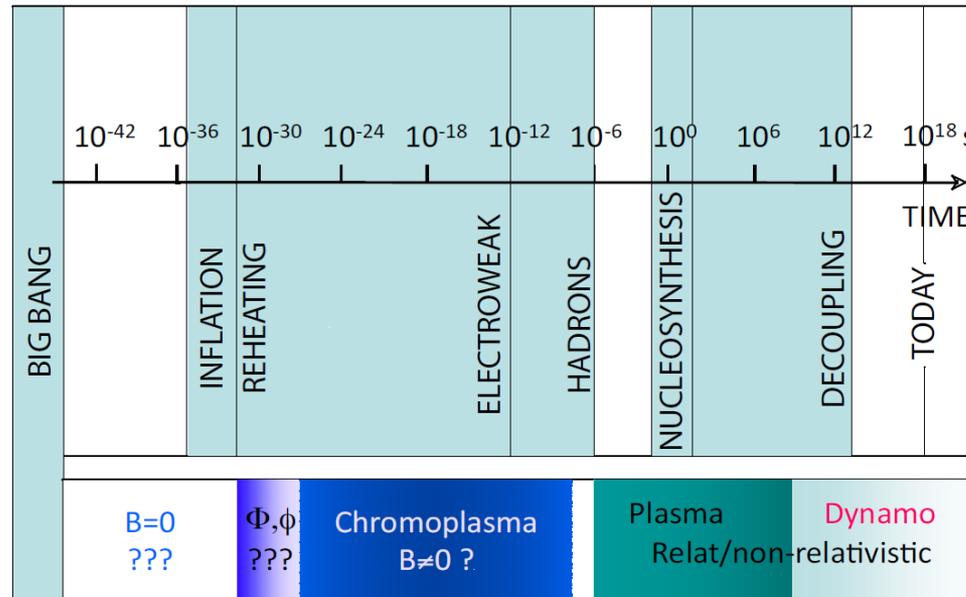
$$E^z = ig[\alpha_1^i, \alpha_2^i]$$
$$B^z = ig\epsilon^{ij}[\alpha_1^i, \alpha_2^j].$$

$$\sqrt{g}B \sim \sqrt{g}E \sim Q_s$$

$\sim 1\text{- a few GeV} \gg m_q$

# 宇宙初期の磁場

Cosmological Time Table



Widrow, et al. arXiv:1109.4052  
“The First magnetic Fields”

あまりよく分かって  
いないようだが、..

## 電弱相転移による磁場生成 Vachaspati, PLB265 (1991) 258

Higgs場の期待値が空間的に一様でない場合(一様であるほうが不自然)、その勾配が電流を生成し、磁場をつくる。

その強さ、なんと

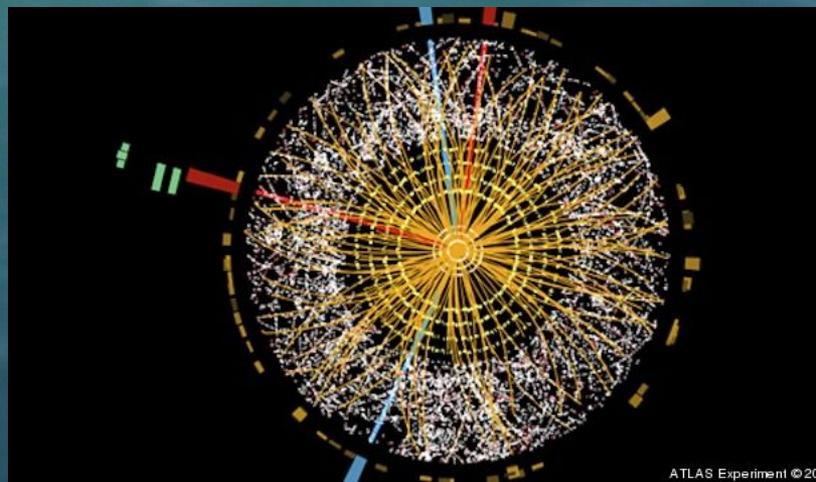
$$B \sim 10^{23} \text{ Gauss}$$

QGPはこの強磁場の中で生成する

# “Vacuum” in modern physics

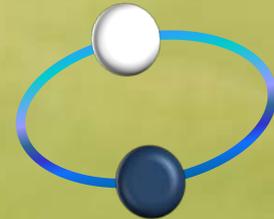
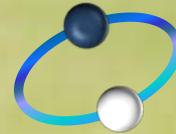
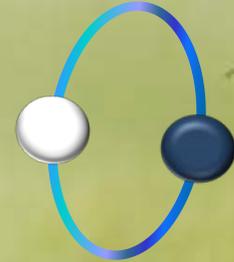
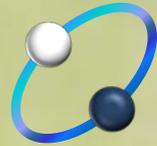
- **Quantum Field Theory** is the basic language of modern physics  
→ describes dynamics of oscillating degrees of freedom at each space point
- **“Vacuum”** = lowest energy state of the system having nontrivial structure. Always fluctuating.
- Unveiling the vacuum structure is the first step towards understanding the physical world.  
The same is true for condensed matter physics.

ex) “Higgs particle” is a fluctuation, excitation of the vacuum with nontrivial structure (condensed Higgs fields).



**QED ----- A world of photons, electrons and positrons**

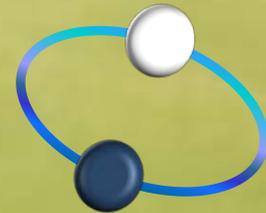
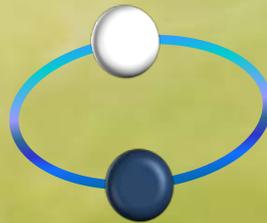
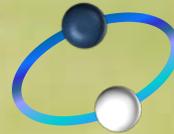
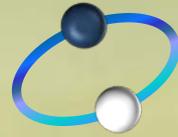
**The vacuum is always fluctuating with virtual electron-positron pairs.**



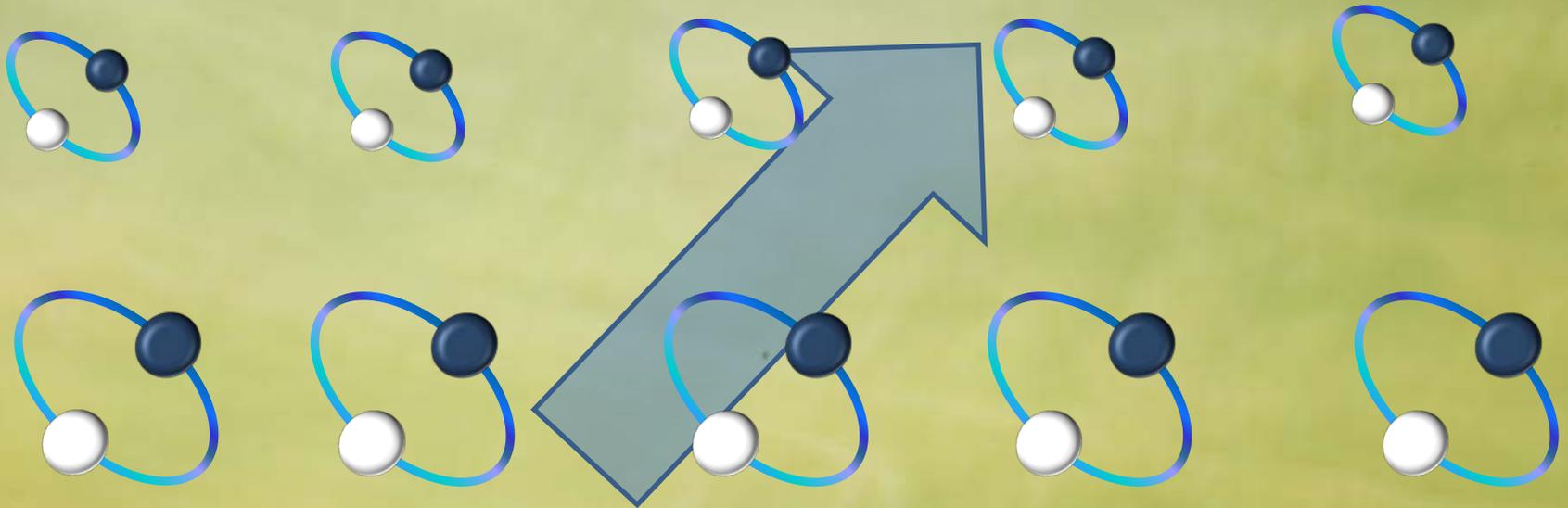
The vacuum is always fluctuating with virtual electron-positron pairs.



**The vacuum is always fluctuating with virtual electron-positron pairs.**

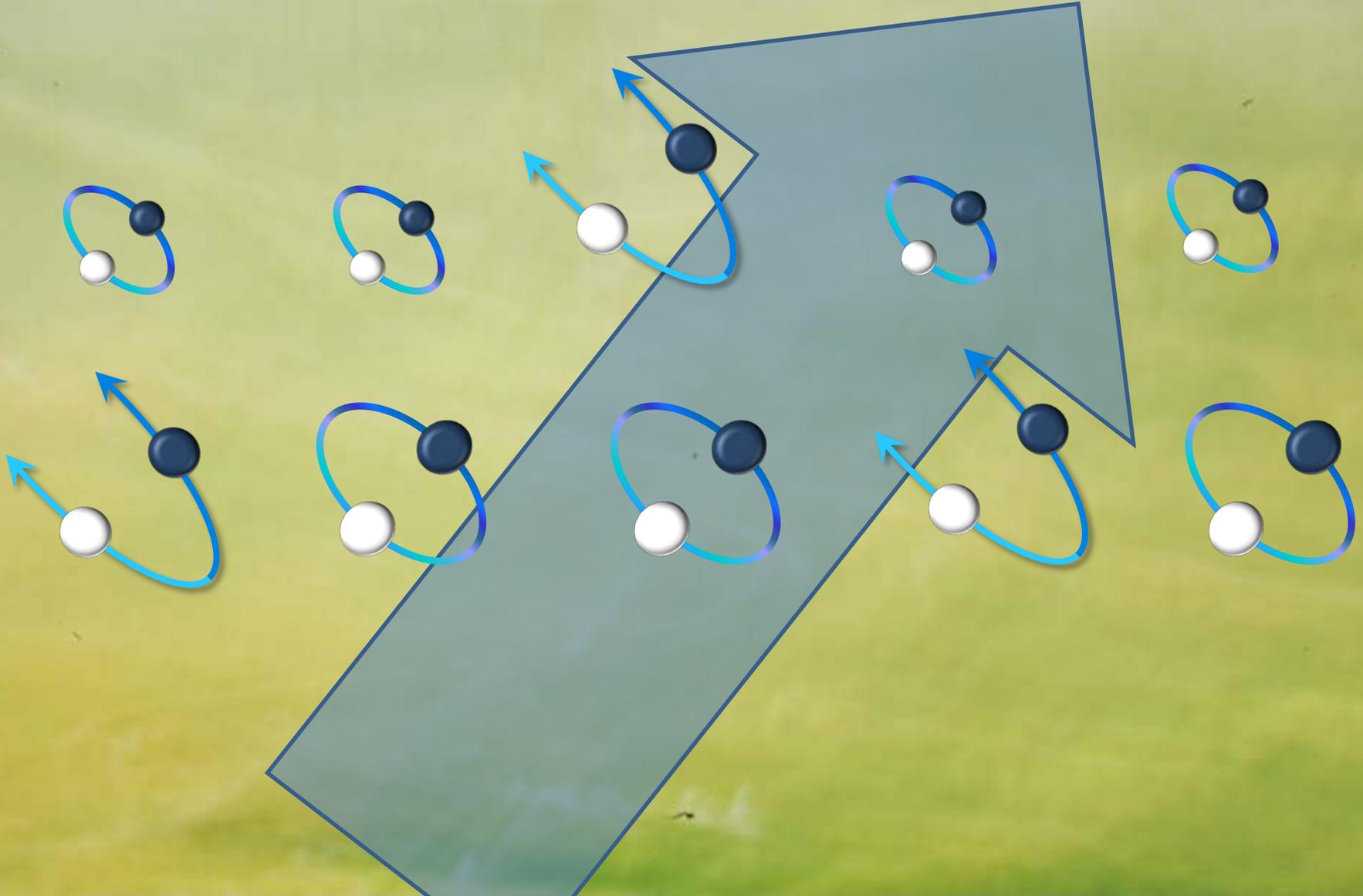


**Random fluctuations align in external fields  
→ they behave “coherently”.**

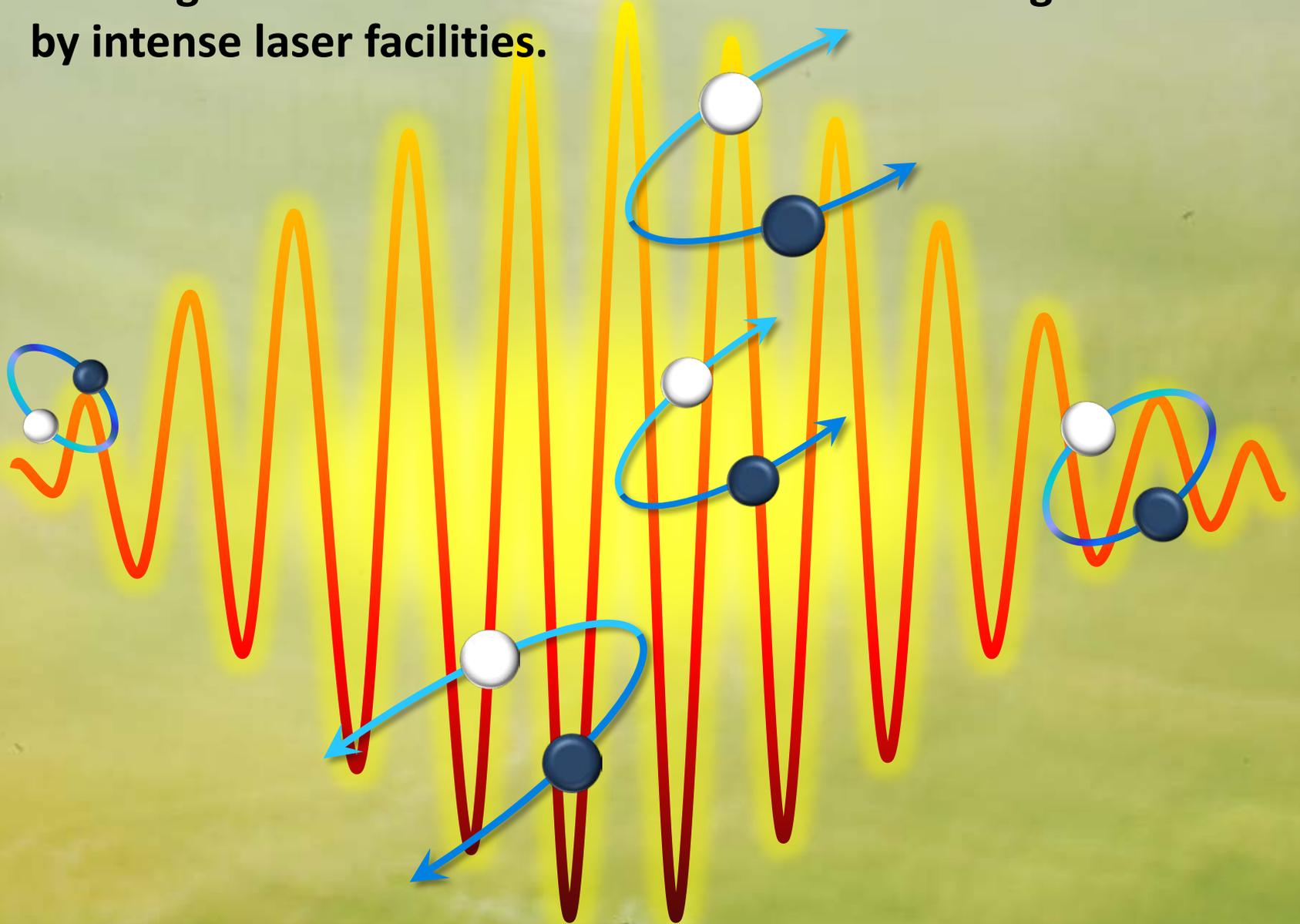


**With increasing external electric fields, virtual pair becomes real.  
Amplification of fluctuation!**

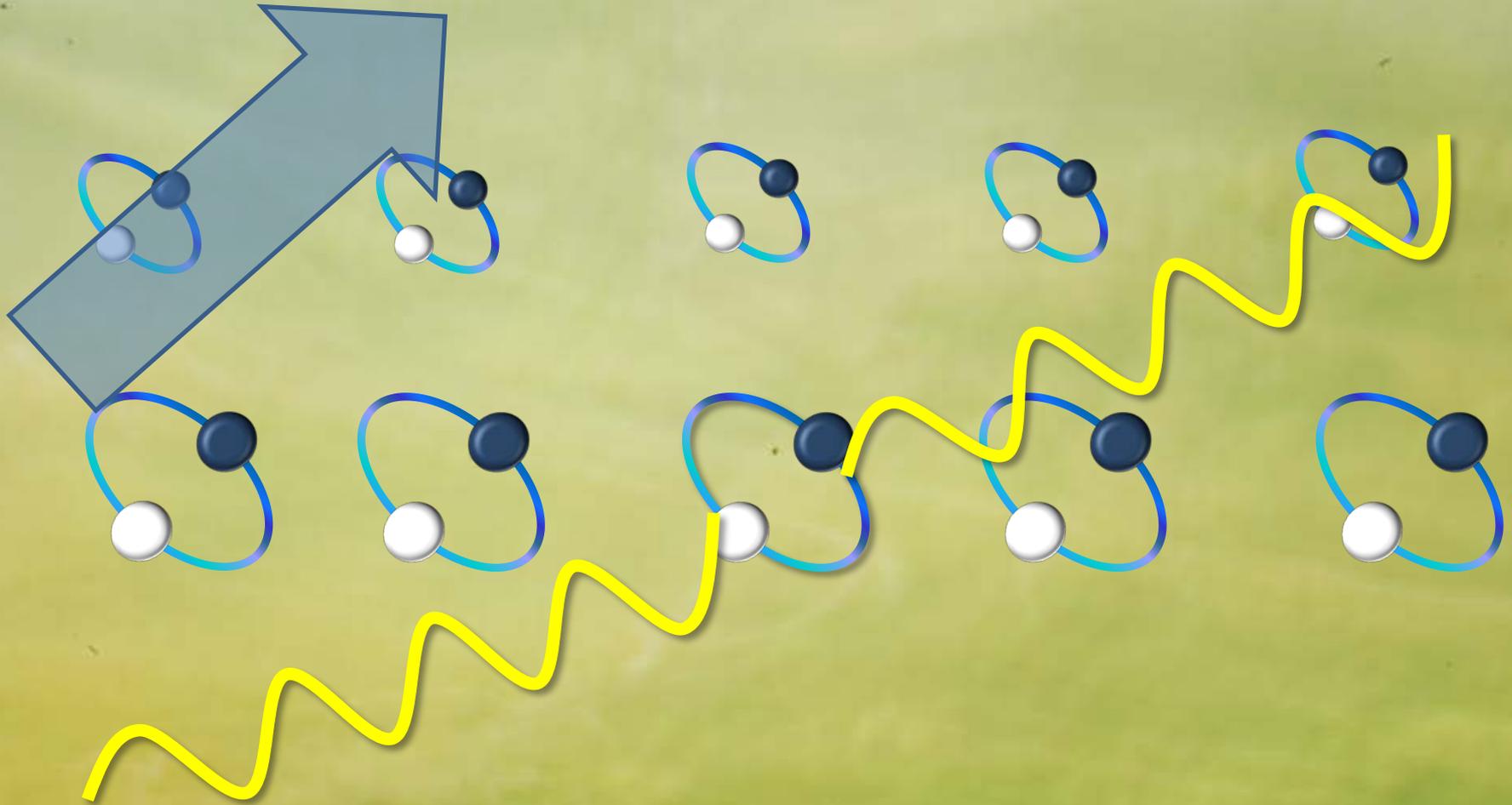
**→ Vacuum “break-down” (Schwinger mechanism)**



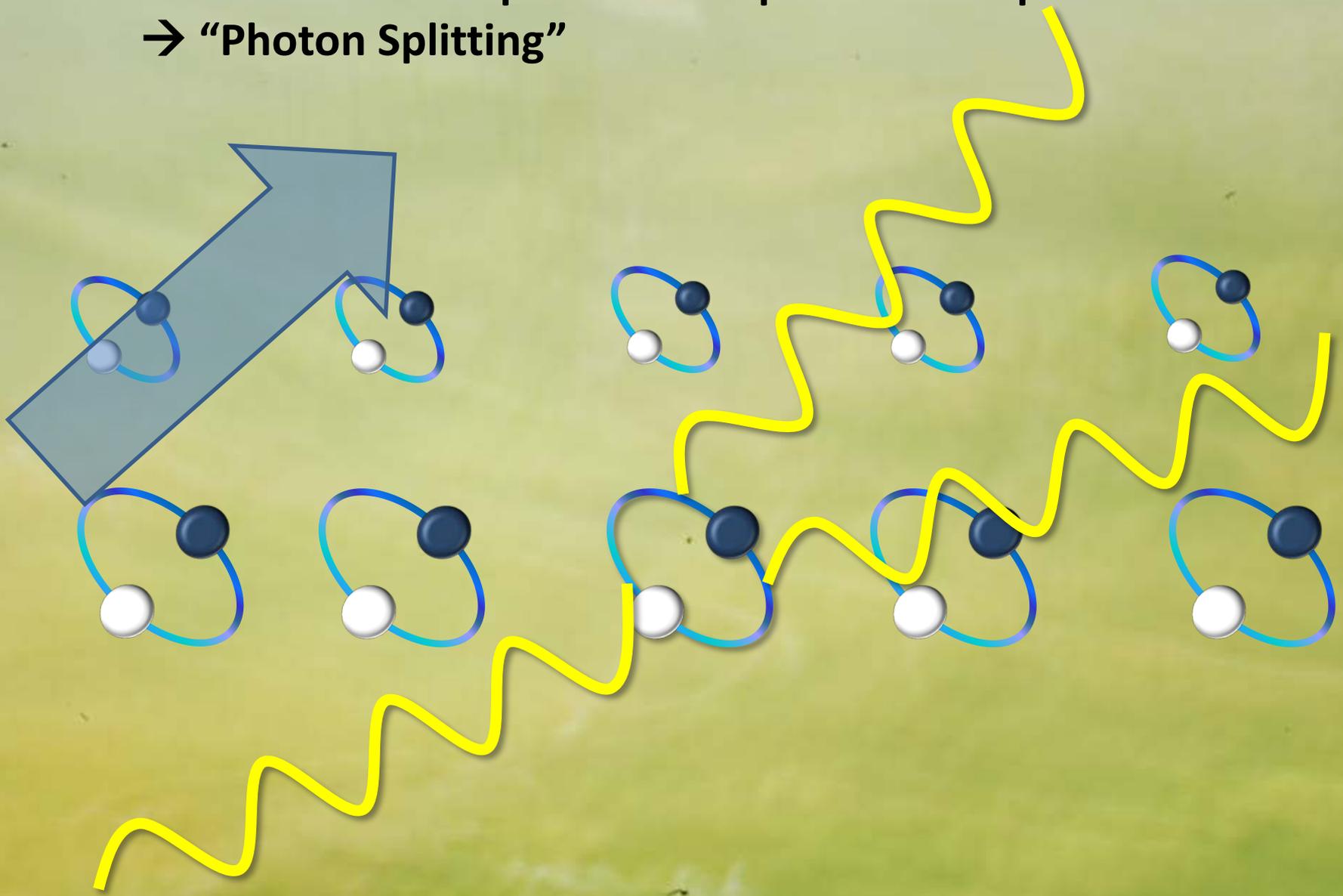
**Schwinger mechanism is now about to be investigated by intense laser facilities.**



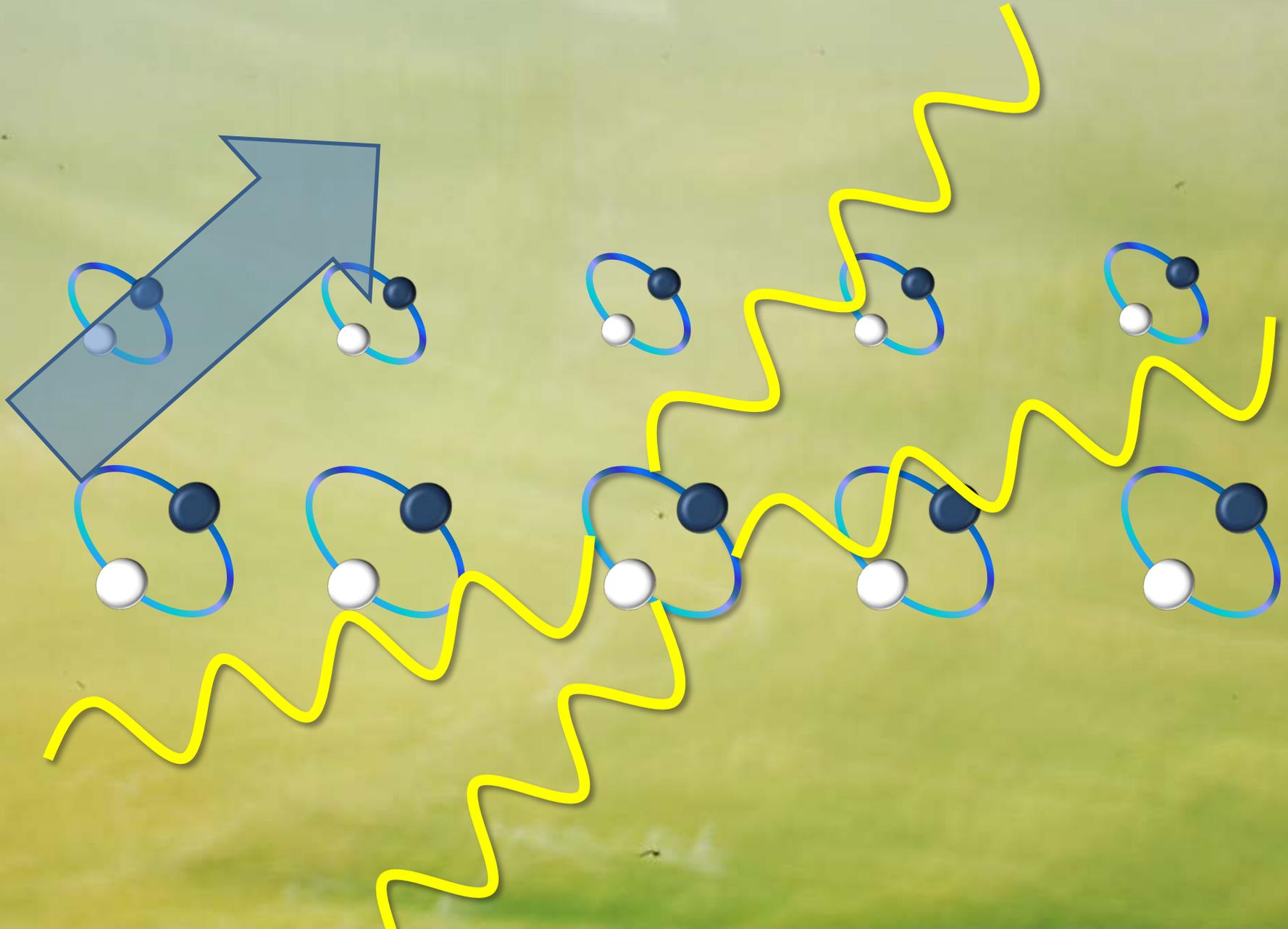
**External photons easily couple to aligned (enhanced) fluctuations to change their properties. cf) exciton-polariton**



Sometimes a real photon can split into two photons  
→ "Photon Splitting"



# Photon-photon scattering is enhanced due to external fields



# 強い場の物理

- 場自体のダイナミクス  
不安定性  
Schwinger機構、  
Nielsen-Olesen不安定性
- 場と粒子の相互作用  
粒子の性質変化  
分散、相互作用、混合  
崩壊モードの変化
- 場と媒質の相互作用  
性質変化、相転移温度などの変化

場のみ

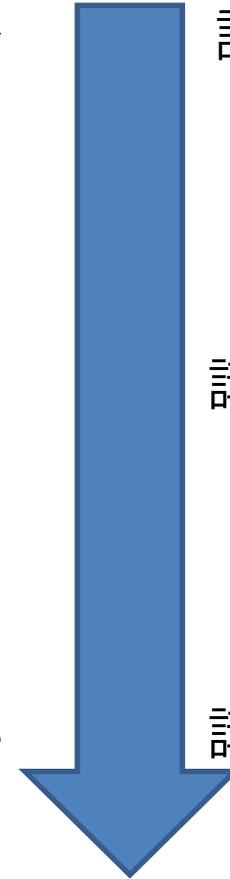
講義2

1粒子

講義3

多粒子

講義4



# ハドロン・原子核物理における強い場の物理

- 重イオン衝突の初期過程      YM & EM
  - 早い熱平衡化の問題
  - 熱平衡化過程を知り得る手段
  - ジェットの新しいエネルギー損失機構など
  
- 中性子星・マグネター内部      EM
  - 状態方程式
  - 磁場構造と渦の関係