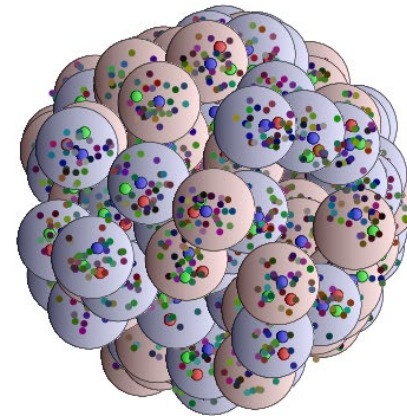
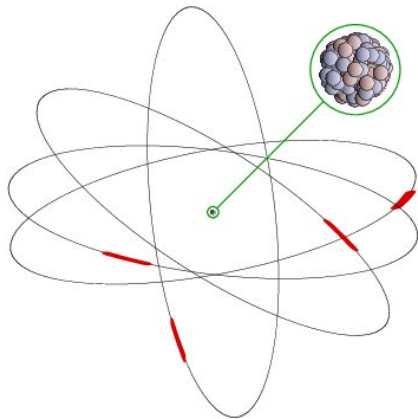


# EIC計画の科学的意義とその波及効果



© F. Gelis

初田哲男

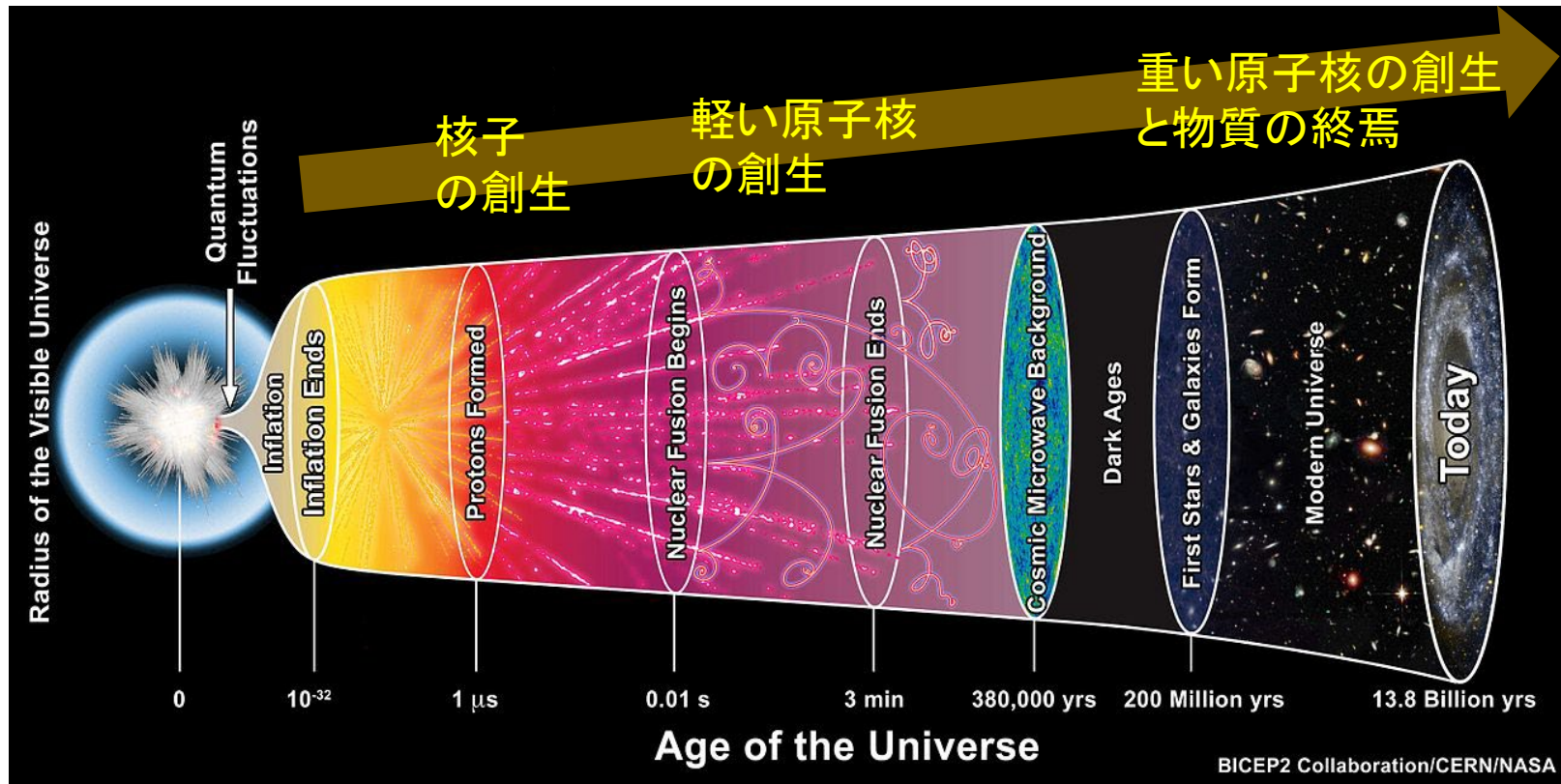
理化学研究所 数理創造プログラムディレクター  
東京大学 名誉教授

EIC計画及びこれに関連する原子核物理学の新たな展開に関する有識者会議 (第2回)  
6月14日(金)

# 原子核物理学とは

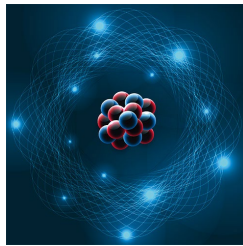
基礎科学として : フェムト物質(\*)の創生, 進化, 終焉の解明  
応用科学として : フェムト物質の予測と制御 (フェムトテクノロジー)

(\*) フェムト物質(サブアトム物質) = 原子の1/10000以下のサイズを持つ物質

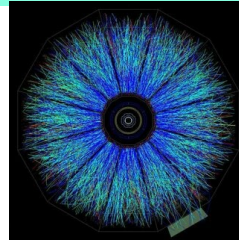


現代の宇宙像

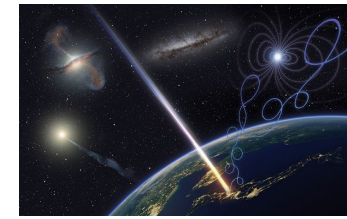
# 原子核物理学の拡がり



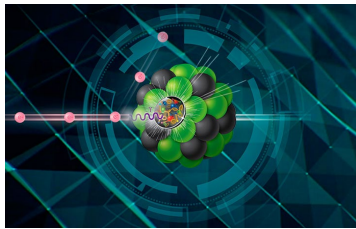
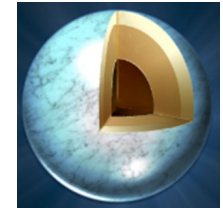
宇宙初期  
プラズマ



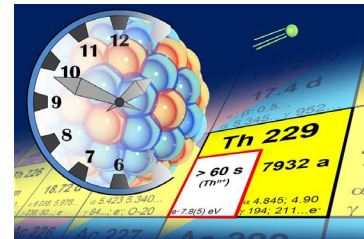
宇宙  
放射線



中性子星



質量の起源



核物性

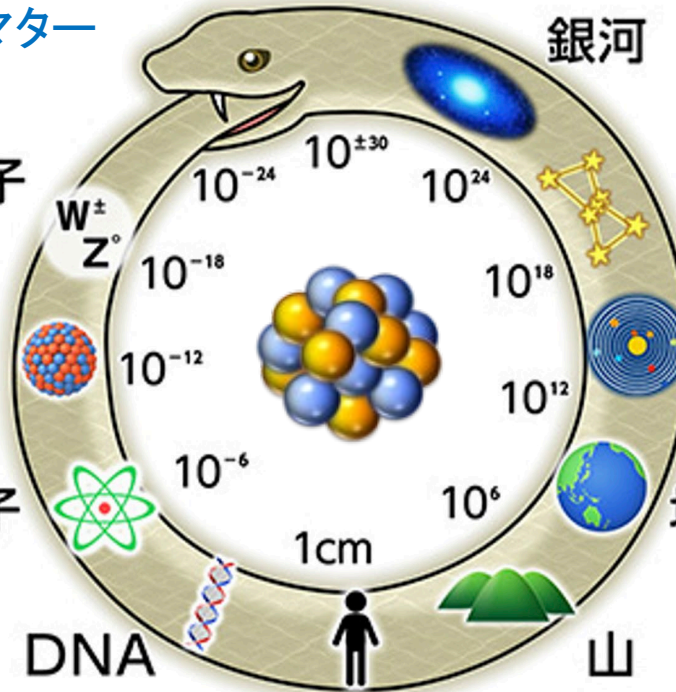
ダークマター  
検出

素粒子

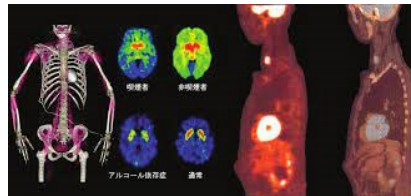
原子核

原子

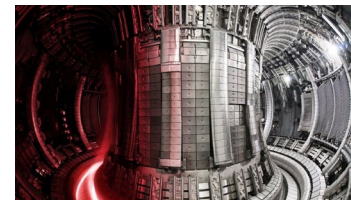
核化学



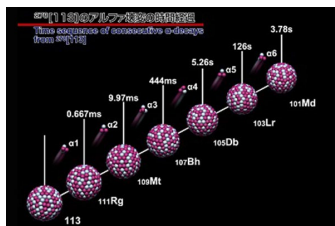
核医学



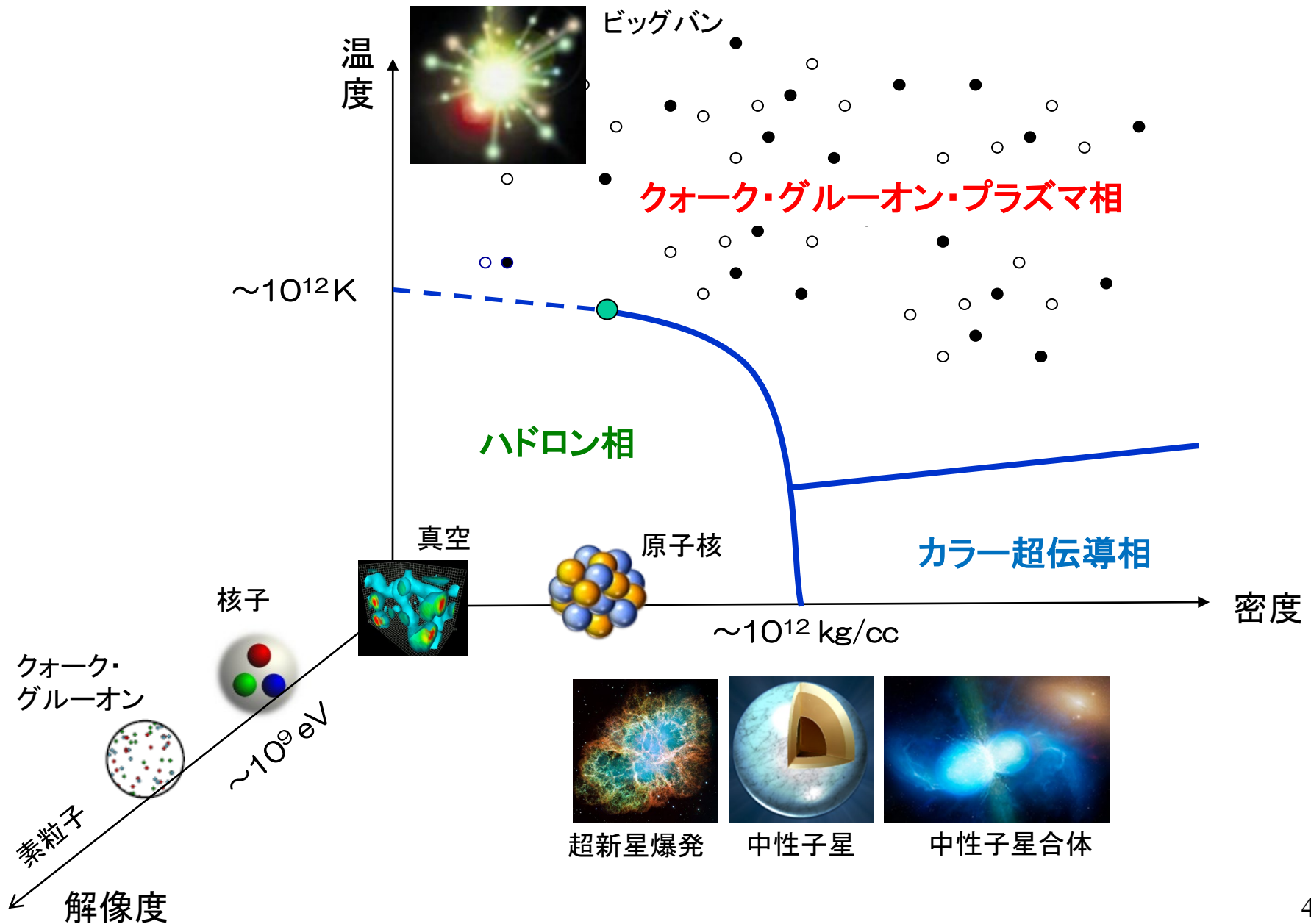
核工学



元素の  
起源



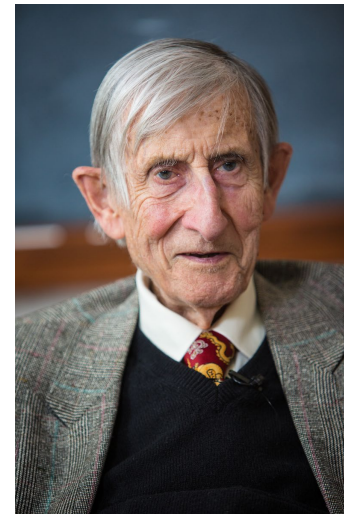
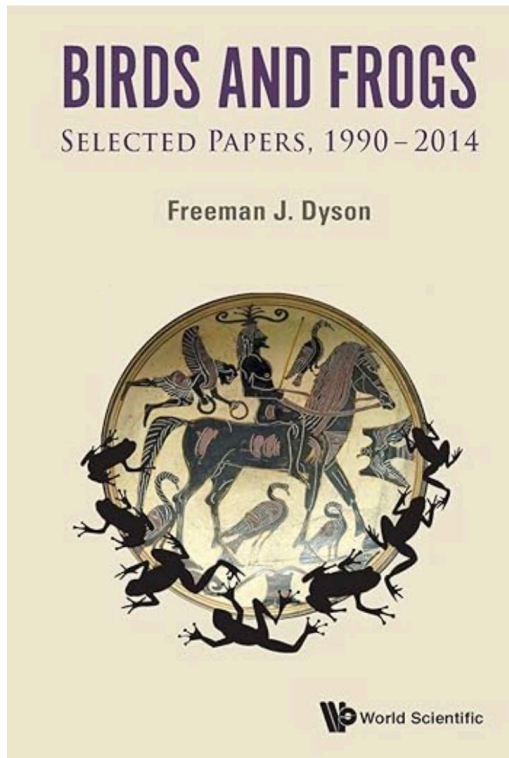
# 原子核物理学の挑戦的課題



# 物理学における“道具主導”の革命

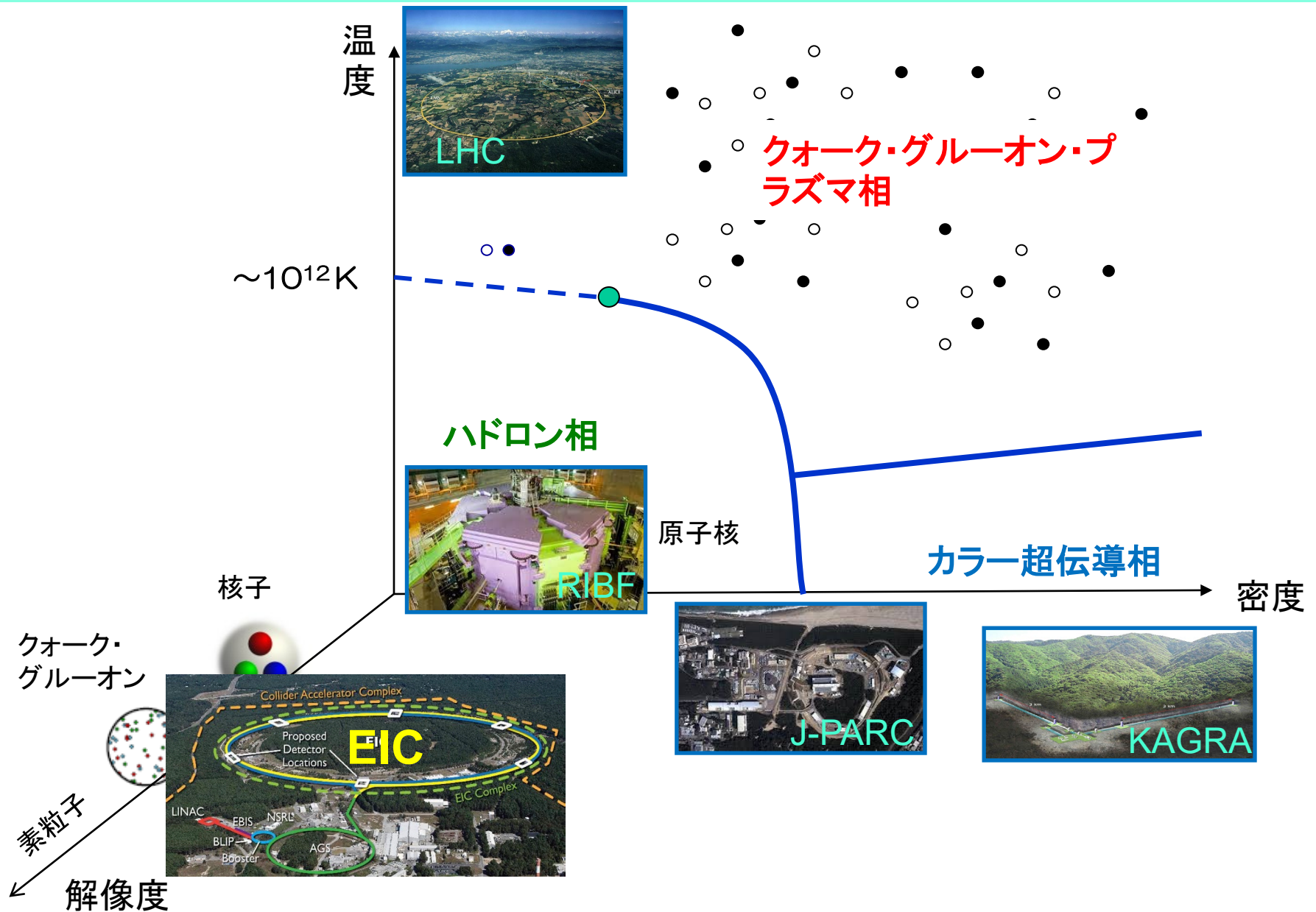
概念主導の革命の効果は、古い物事を新しい方法で説明することにある。道具主導の革命の効果は、説明しなければならぬ新しい事柄を発見することにある。物理学においては、道具主導の革命が圧倒的に多い。私たちは、古い物事を説明する以上に、新しい物事を発見することに成功してきたのだ。

フリーマン・ダイソン



Freeman Dyson  
(1923-2020)

# 原子核物理学において自然を観る“道具”

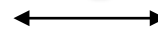


# フェムトスケール“電子顕微鏡”の進展

## 原子核の電荷分布の発見 (Lyman-Hanson-Scott)

電子と原子核の弾性散乱実験 (1951)

ベータトロン@イリノイ (15.7MeV)



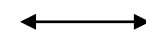
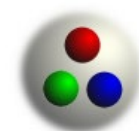
$10^{-12}$  cm



## 核子構造の発見 (Hofstadter) → Nobel Prize (1961)

電子と核子の弾性散乱実験(1956)

リニアック@スタンフォード (187 MeV)



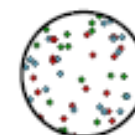
$10^{-13}$  cm



## クォークの発見 (Kendall-Friedman-Taylor) → Nobel Prize (1990)

電子と核子の非弾性散乱実験(1967-1973)

リニアック@SLAC (-20 GeV)



## 核子の1次元構造

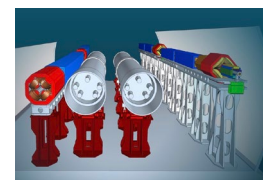
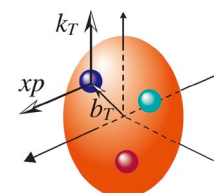
電子/陽電子 と陽子の非弾性衝突実験(1991-2007)

HERA(シンクロトロン)@DESY (重心系 320 GeV)

## 核子/原子核の3次元構造

電子と 陽子/軽イオン/重イオンの非弾性衝突実験 (2033-)

EIC(シンクロトロン)@BNL (重心系 20-140 GeV)



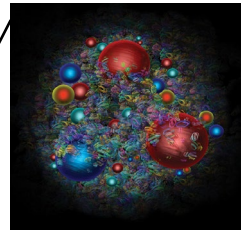
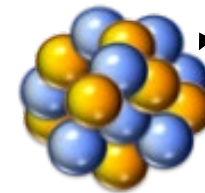
# 核子・原子核の特徴とEIC

**核子の特徴:** クォーク・反クォーク・グルーオンが生成消滅を繰り返す多体系

- ⇔ 原子、分子、原子核と全く異なる束縛状態
- ⇔ 核子の質量 ~ クォーク質量の約100倍

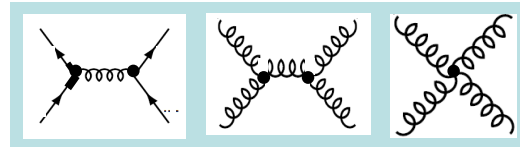
**原子核の特徴:** 原子核サイズ ~ 10 x 核子サイズ

- ⇔ 原子サイズ > 10,000 x 原子核サイズ



**基礎理論:** 量子色力学 (QCD)

- 核子から原子核、中性子星に至る多階層物質世界を支配するゲージ理論
- 非線形・強結合量子系: クレイ数学研究所ミレニアム懸賞問題



南部陽一郎  
(2008年ノーベル賞)  
が1966年にQCDを提唱

**EICの特徴:** 衝突型加速器: 可変エネルギー, 高ビーム輝度 (HERAの1000倍)

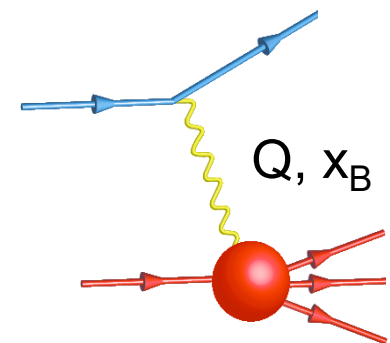
偏極: 電子、軽い原子核

解像度 ( $1/Q$ ): 陽子サイズの1/10 - 1/1000

シャッター速度 ( $x_B$ ):  $(1-10^{-5}) \cdot 10^{-23}$  秒

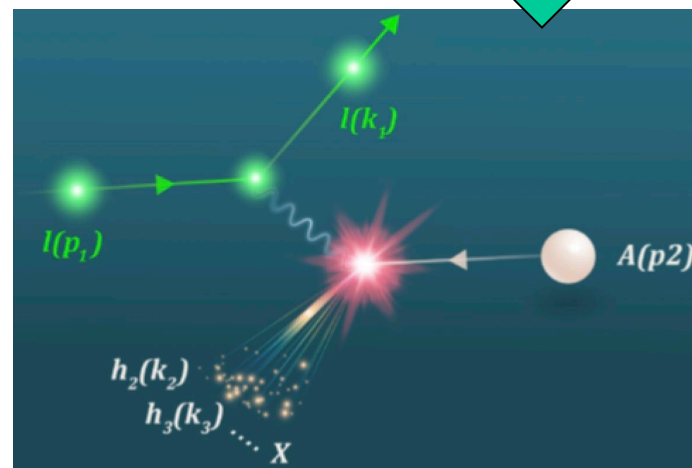
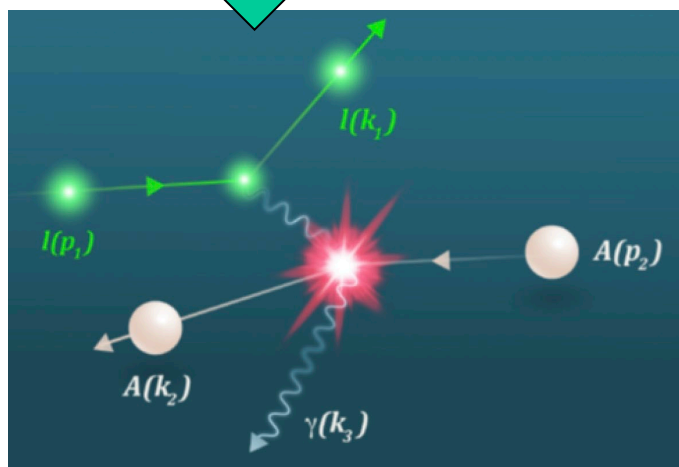
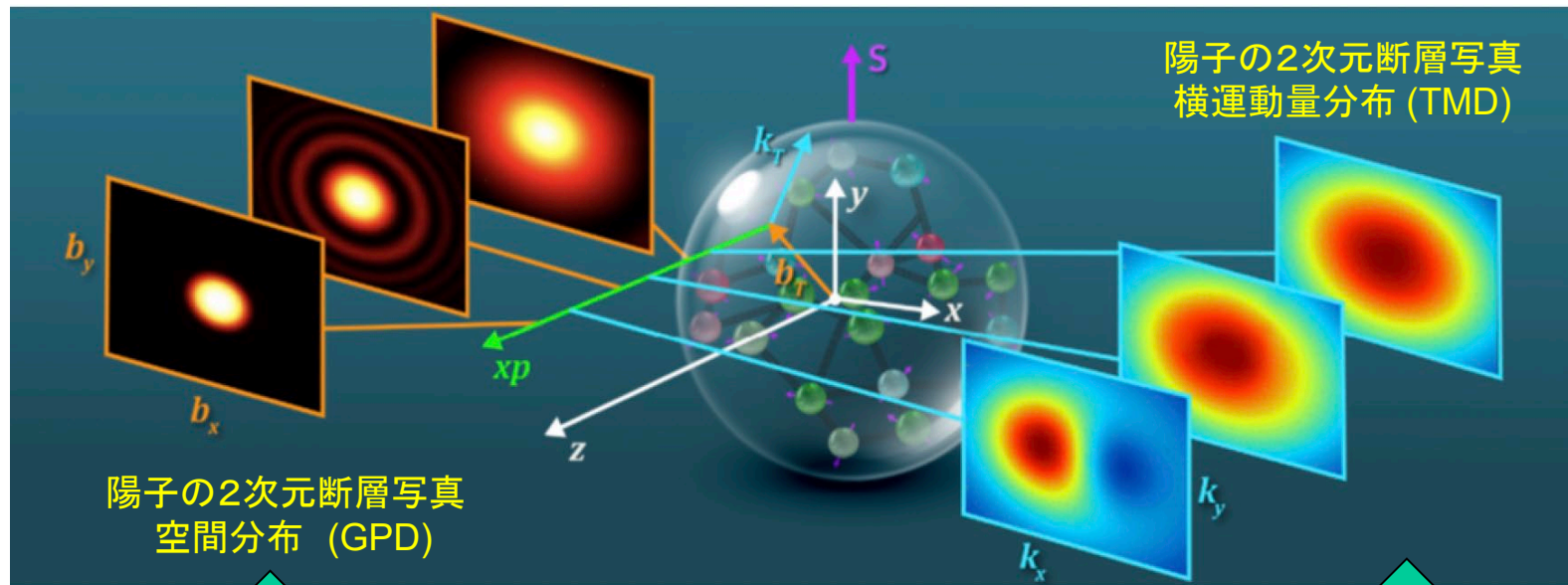


**EICの測定:** 核子・原子核のクォーク・グルーオン3次元構造  
核子・原子核中のグルーオン飽和現象





# 電子線トモグラフィーによる核子の構造

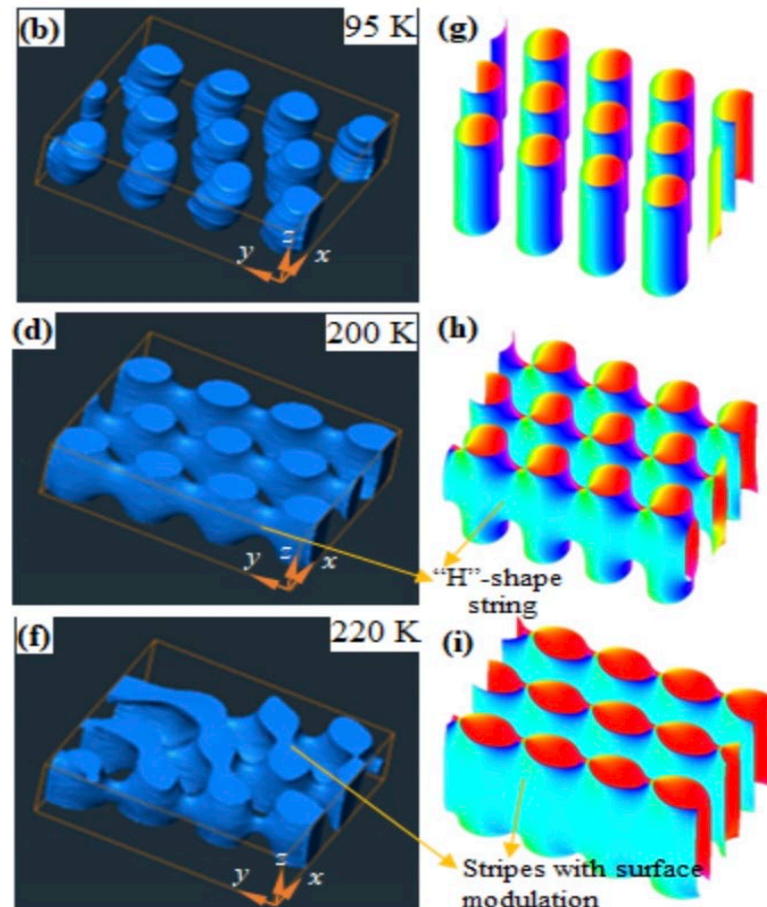
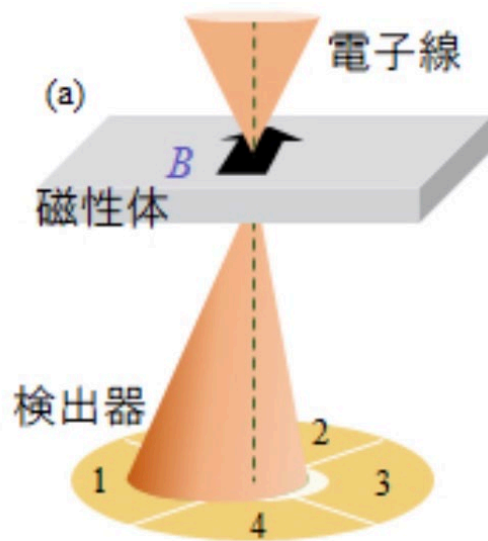


Article | [Open access](#) | Published: 21 May 2024

## 3D skyrmion strings and their melting dynamics revealed via scalar-field electron tomography

[Xiuzhen Yu](#) , [Nobuto Nakanishi](#), [Yi-Ling Chiew](#), [Yizhou Liu](#), [Kiyomi Nakajima](#), [Naoya Kanazawa](#), [Kosuke Karube](#), [Yasujiro Taguchi](#), [Naoto Nagaosa](#) & [Yoshinori Tokura](#)

*Communications Materials* **5**, Article number: 80 (2024) | [Cite this article](#)



# クォーク・グルーオン（パートン）分布関数の統一理論 (2012-)

(ファインマンのパートン：核子や原子核内のクォーク・反クォーク・グルーオンの総称)

$$W(x, \vec{k}_\perp, \vec{b}_\perp) = \int \frac{d^2 \Delta_\perp}{(2\pi)^2} e^{i\vec{b}_\perp \cdot \vec{\Delta}_\perp} \int \frac{dz^- d^2 z_\perp}{16\pi^3} e^{ixP^+ z^- - i\vec{k}_\perp \cdot \vec{z}_\perp} \langle P - \frac{\Delta}{2} | \bar{q}(-z/2) \gamma^+ q(z/2) | P + \frac{\Delta}{2} \rangle$$

ウィグナー分布関数

21世紀

横運動量  
パートン分布

$$f(x, \vec{k}_\perp)$$

一般化  
パートン分布

$$f(x, \vec{b}_\perp)$$

5次元

3次元

20世紀

$$\int d\vec{k}_\perp$$

$$f(x)$$

$$\int d\vec{b}_\perp$$

$$F(\vec{b}_\perp)$$

2次元

1次元

パートン分布

形状因子

19世紀

$$\int dx$$

$$Q$$

$$\int d\vec{b}_\perp$$

電荷

0次元

Courtesy of  
Y. Hatta

# クォーク・グルーオンの多次元分布関数からわかること (例)

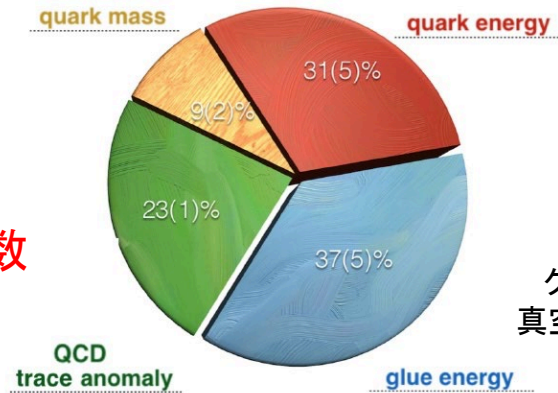
- 核子質量の起源 (クォーク + グルオン + クォーク質量 + 真空の"ひずみ")

陽子のエネルギー分解

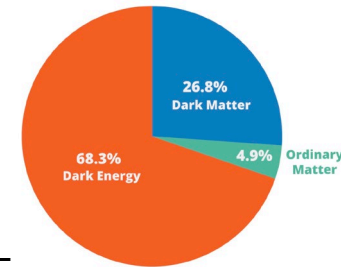
宇宙のエネルギー分解

$$M = M_q + M_g + M_m + M_a$$

⇔ 一般化パートン分布関数



クォーク ⇔ バリオン  
 グルーオン ⇔ ダークマター  
 真空のひずみ ⇔ ダークエネルギー

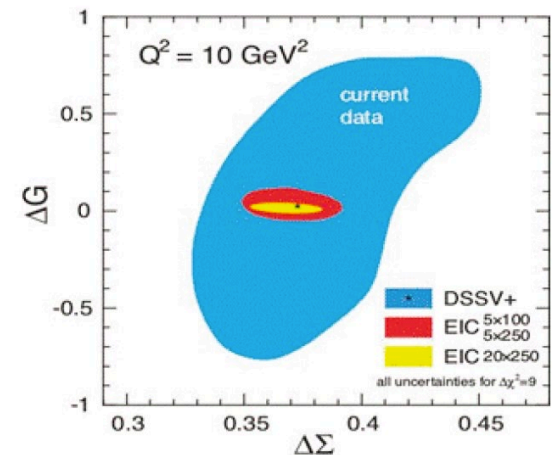
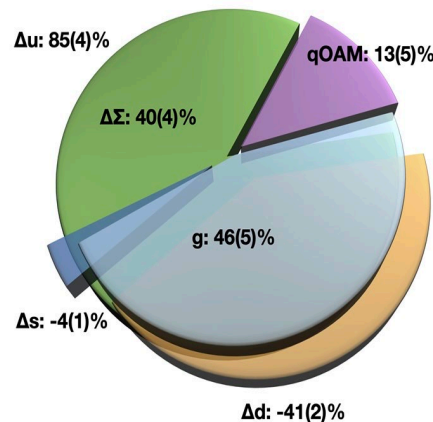


- 核子スピンの起源 (クォークとグルーオンのスピンと軌道運動)

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + \Delta G + L^q + L^g$$

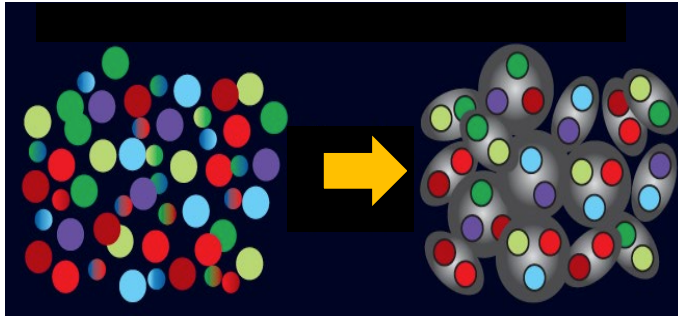
↑ ↑  
 スピン                      軌道角運動量

⇔ ウィグナー分布関数

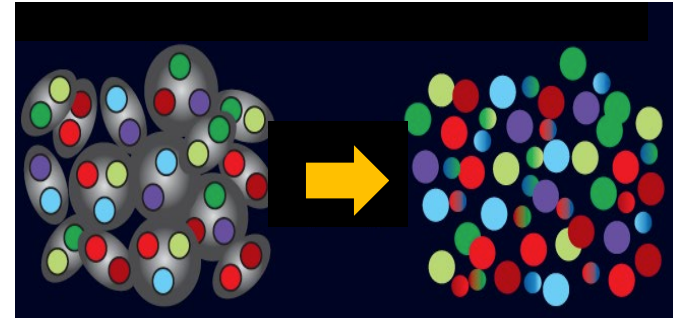


# クォーク・グルーオンの多次元分布関数からわかること (例)

- 極限宇宙や地上実験における物質創生と物質終焉の過程

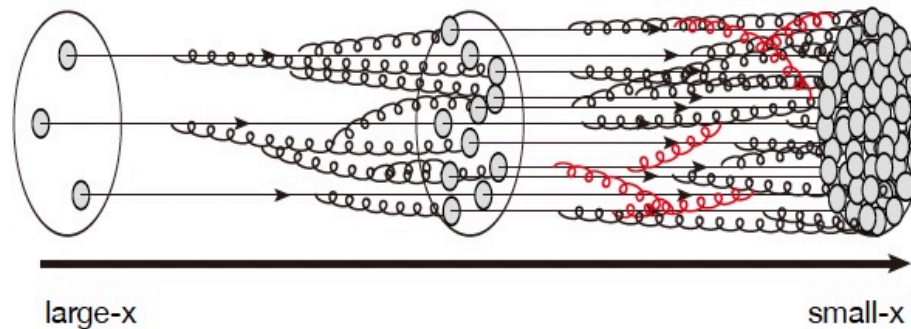


宇宙初期のハドロン生成  
QGPからのハドロン生成



中性子星内部のハドロン融解  
原子核衝突からのQGP生成

- 高エネルギーでの原子核の新しい描像: グルオン飽和 (カラーガラス凝縮)

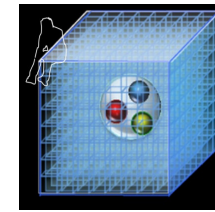


グルーオンの分岐と再結合の競合 = **グルーオン飽和**

# EICの波及効果：“普遍的学際研究”の振興（理論の立場から）

## ● スパコン (FUGAKU, FUGAKU-NEXT)

- 格子QCD計算による多次元クォーク・グルーオン分布
  - ⇨ 核子の内部構造と核力（日本が世界トップ研究）
  - ⇨ 質量の起源とカイラル対称性



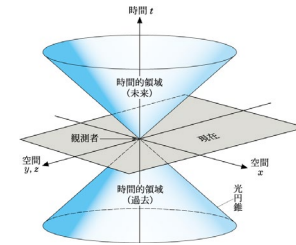
格子QCD



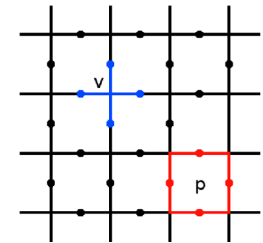
FUGAKU

## ● 量子コンピューティング

- SU(3)ゲージ理論(QCD)の時間発展シミュレーション
  - ⇨ パートの光円錐相関, ハドロン化の時間発展
- $Z_2$ ゲージ理論の相構造
  - ⇨ 量子計算の誤り訂正 (toric code)



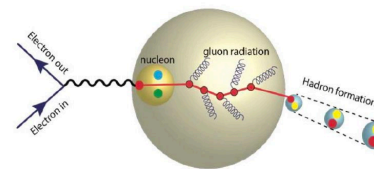
光円錐相関



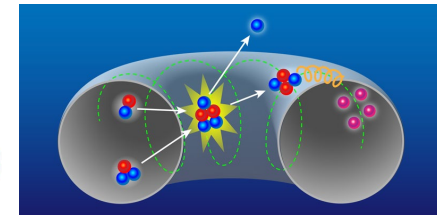
Toric code

## ● 核融合科学

- クォークとカラーガラス凝縮の相互作用
  - ⇨ 核融合炉における $\alpha$ 粒子加熱
- カラー分子動力学(CMD)による量子計算
  - ⇨ 先進燃料核融合( $p^{11}B \rightarrow 3\alpha$ )のAMD量子計算



Parton-CGC相互作用

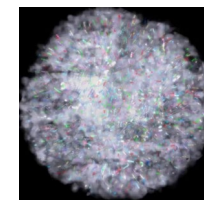


$\alpha$ 粒子加熱

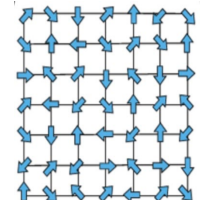
<https://physics.aps.org/articles/v16/137>

## ● 物質科学

- カラーガラス凝縮（グルーオンの高密度ガラス状態）
  - ⇨ 物質科学における様々な量子ガラス状態



カラーガラス



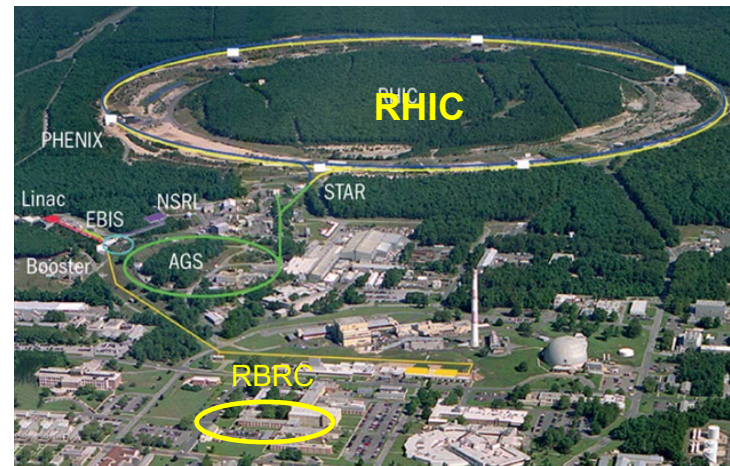
スピングラス

# 国際的環境の中での人材育成 -- RBRCの成功例 --

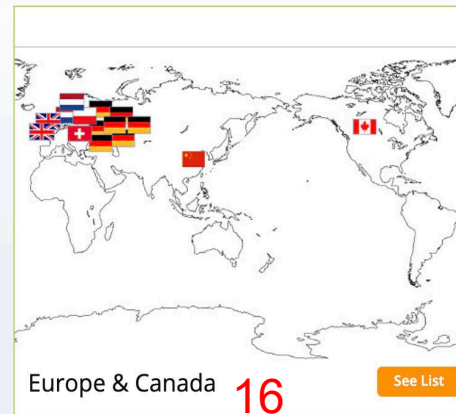
## RIKEN BNL Research Center (RBRC) 1997-

<https://www.bnl.gov/riken/> <https://indico.bnl.gov/event/19596/>

原子核物理学の実験と理論  
若手人材の育成に成功



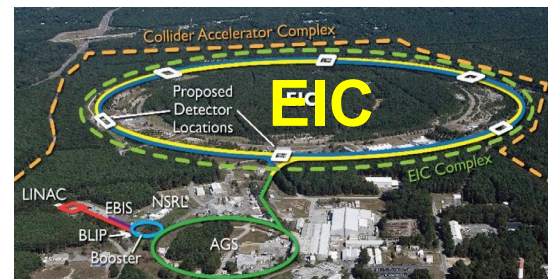
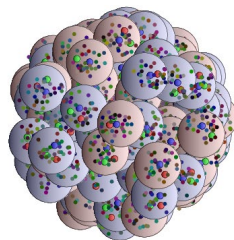
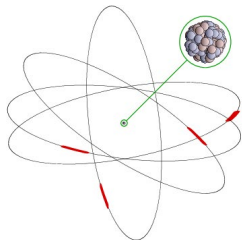
### 世界でテニユア職を得たRBRC出身者



→ EICでは、原子核物理学、量子計算科学、量子物質科学など広い意味での  
**Fundamental Quantum Science**における学際的/国際的人材育成が期待できる

# まとめ

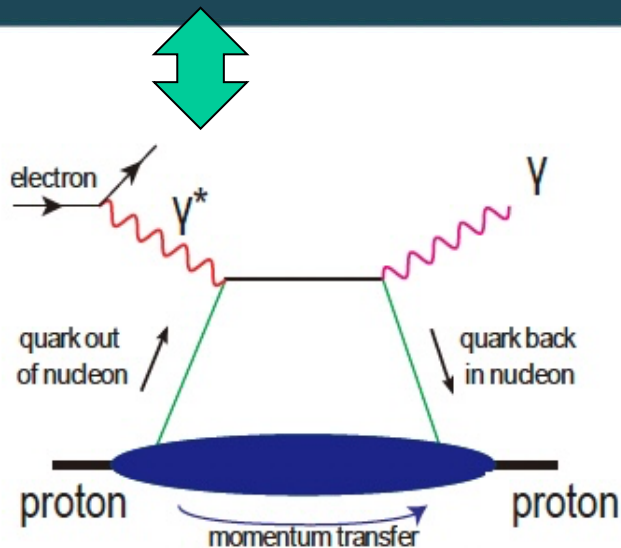
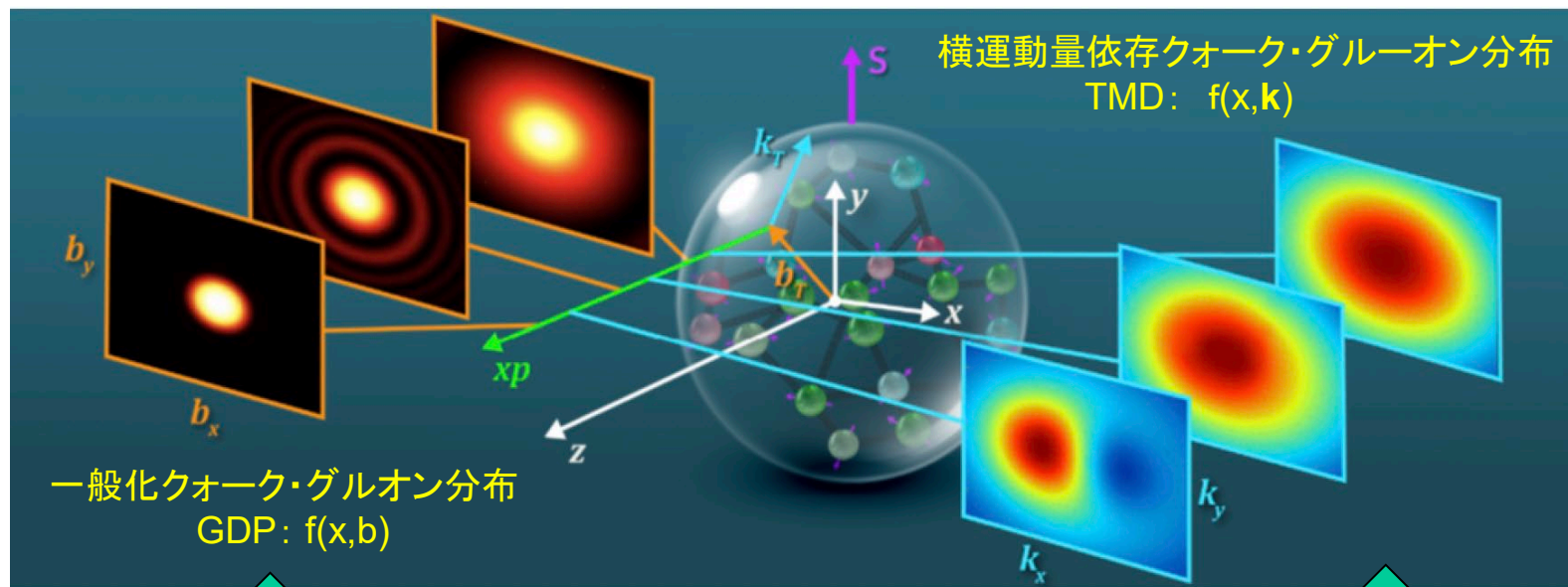
1. EICは、原子核物理学の基礎をQCDから構築し、原子核物理学の究極のテーマである“宇宙における物質の創生と終焉”についての人類の知見拡大に資する、高い科学的価値をもつ国際共同研究である。
2. EICに関わる実験技術と理論手法の開発は、原子核物理学に閉じない普遍的な波及効果を基礎科学にもたらす。
3. EICで得られる実験成果の理論的研究は、ハイパフォーマンスコンピューティング、量子コンピューティング、核融合科学、物質科学など、広範な波及効果を応用科学にもたらす。
4. EICの実験・理論研究は原子核物理学、量子計算科学、量子物質科学など広い意味でのFundamental Quantum Scienceにおける学際的/国際的  
人材育成に大きく貢献する。



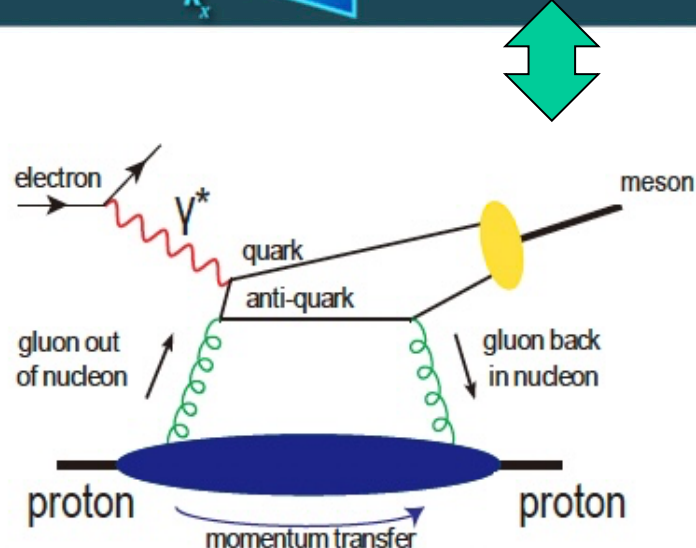


## 補足資料

# 電子線トモグラフィーによる核子の構造 (散乱プロセスの例)



排他過程



準包含過程

# EICでカバーする解像度とシャッター速度

