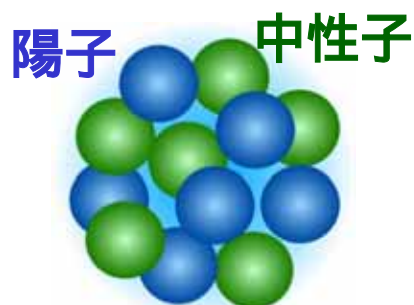
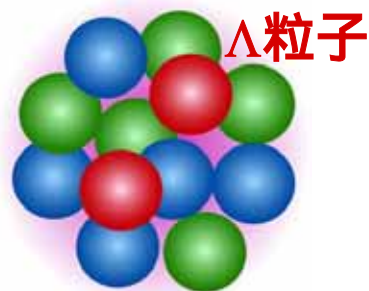


物理に夢中

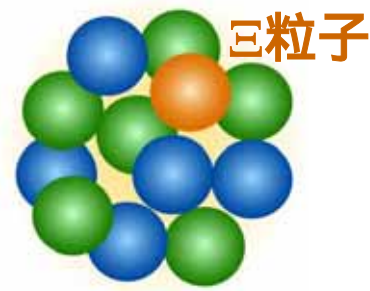
ハイパー原子核 —クォーク多体系の科学—



通常の原子核



ハイパー原子核



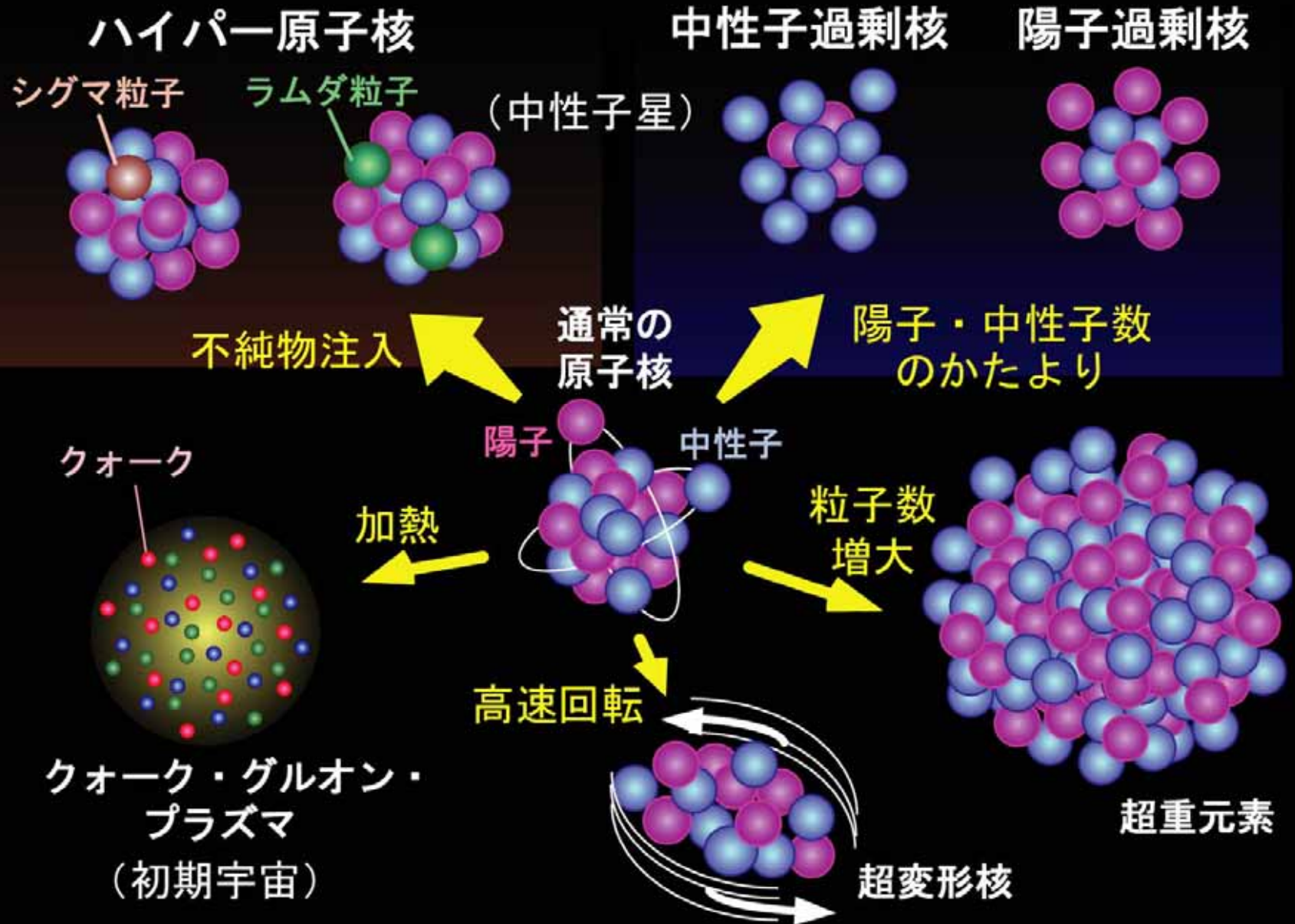
素粒子・核物理講座 原子核物理研究室
田村 裕和

内容

1. 原子核研究の最先端
2. クォークと原子核
3. ハイパー核とは何か？宇宙のどこにある？
4. ハイパー核を作り、調べよう
5. 世界をリードする東北大のハイパー核研究
6. 東北大の加速器の紹介

1. 原子核研究の最先端

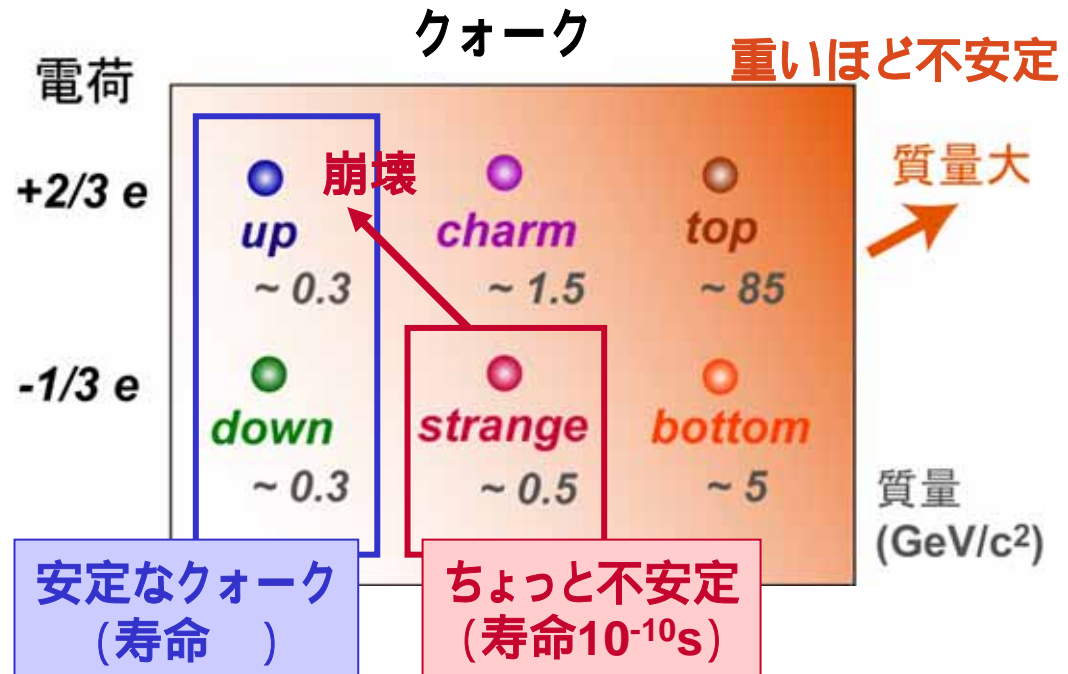
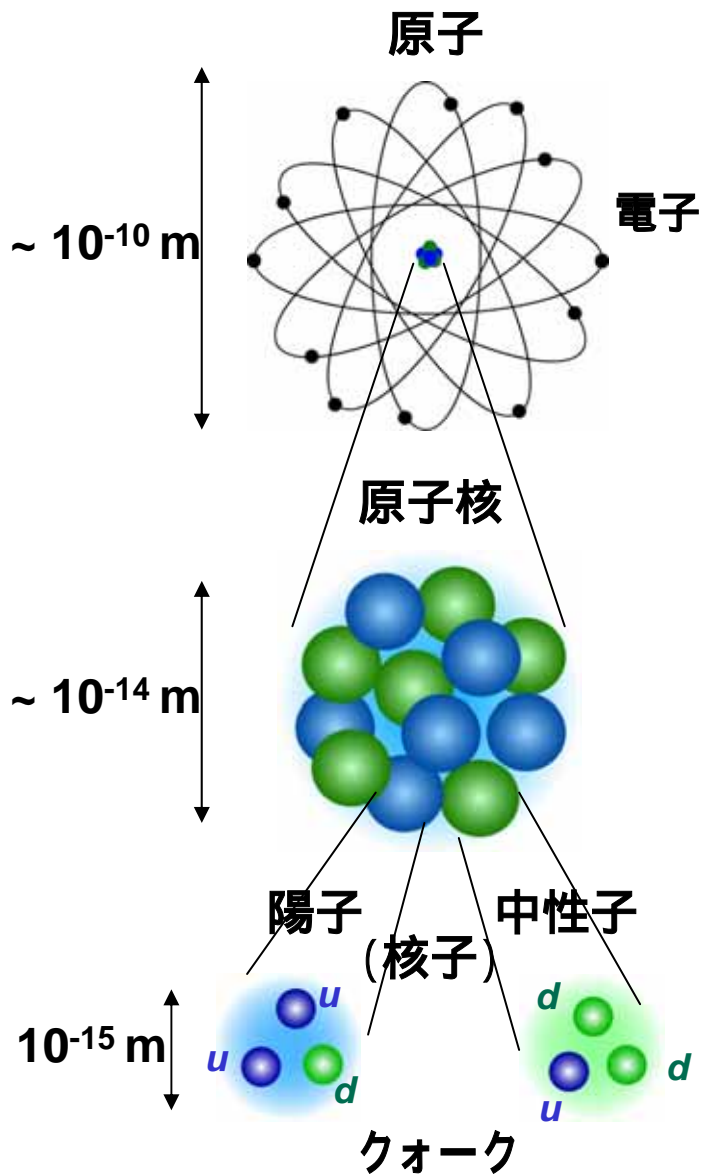
原子核物理学の最先端



2. クォークと原子核

—物質の成り立ち—

物質は何からできているか？



物質の“もと” = 原子核

原子の質量の99.5%

陽子の数 \rightarrow 電子の数 \rightarrow 化学的性質 “元素”

原子核 = 陽子 + 中性子

= up クォークとdownクォーク

8つの核子の仲間

u, d, s クォークからなるバリオン
(重粒子 = 3つのクォークからなる粒子)

quark



すべて原子核の
構成要素となる

核子の回転周期:

$$2\pi R/v \sim 10^{-14} / 0.3 c$$

$$\sim 10^{-22} s \ll \tau \sim 10^{-10} s$$

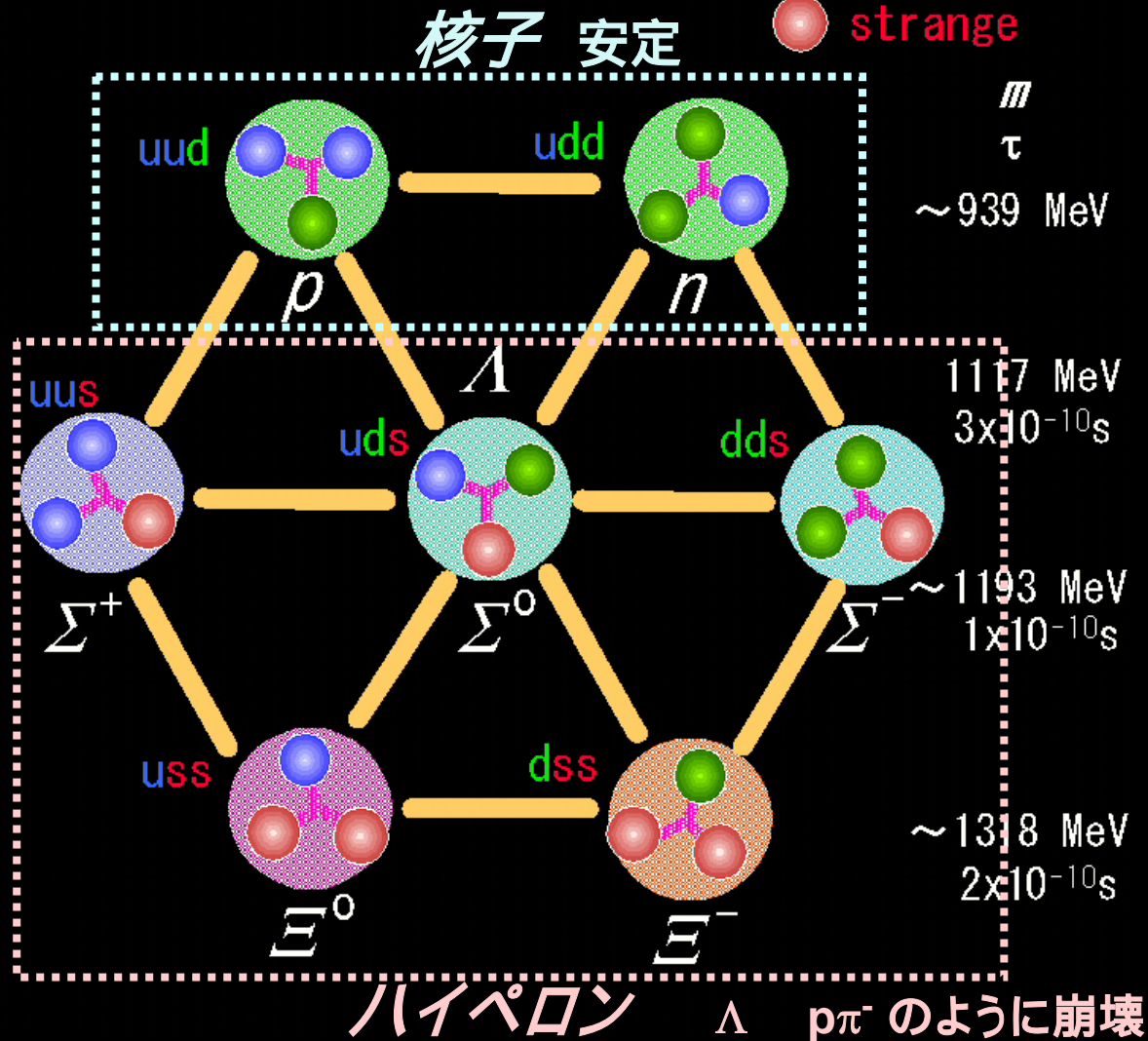
---寿命の間に 10^{12} 回まわる

■ 通常の原子核

- u, d クォークからなる
(核子のみ)

■ ハイパー原子核

- u, d, s クォークからなる
(ハイペロンを含む)

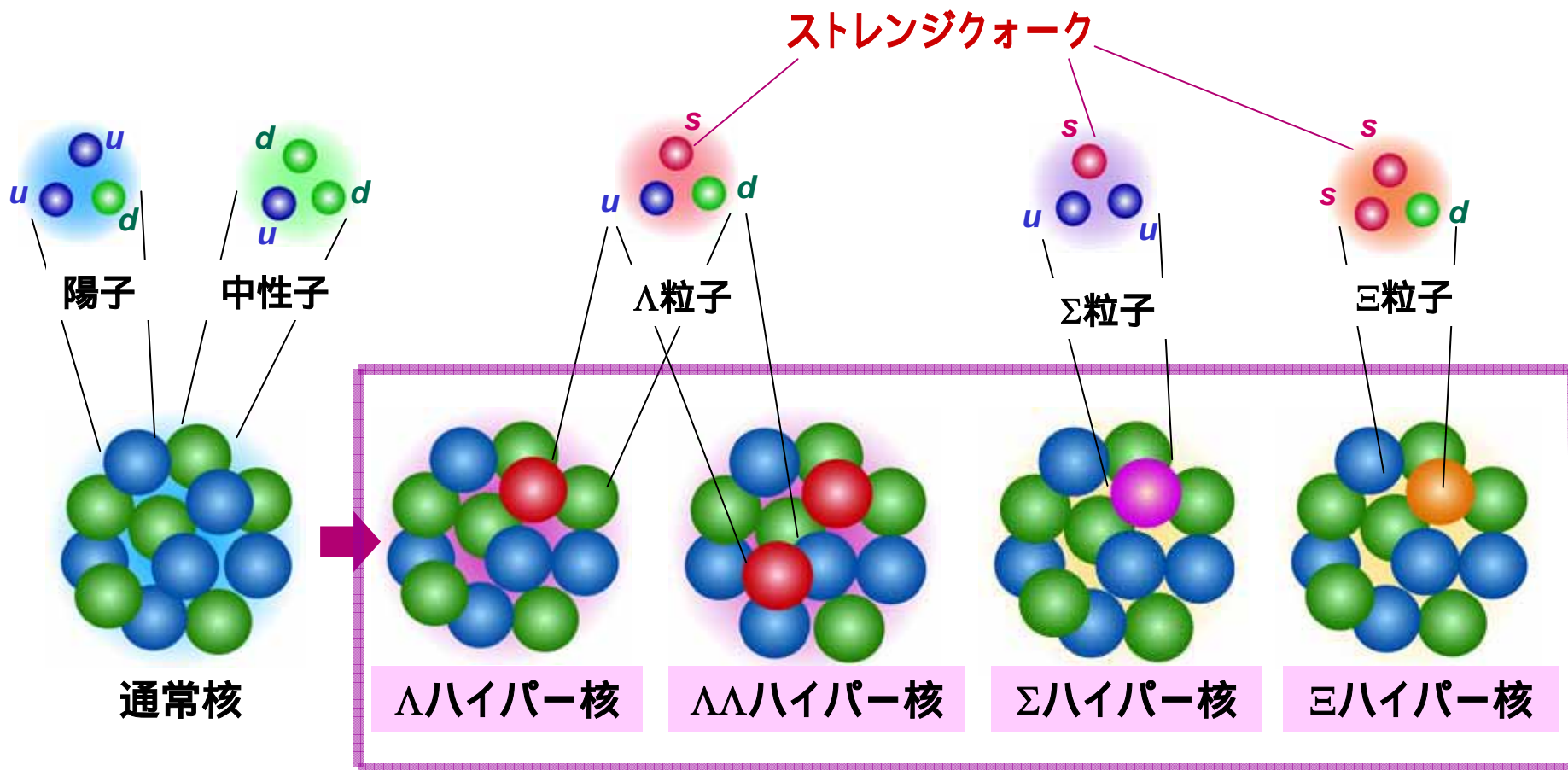


**3. ハイパー核とは何か？
宇宙のどこにある？**

—原子核と宇宙の話—

ストレンジ・クォークを含む新しいタイプの“原子核”

原子核の描像を
核子多体系 クォーク多体系へと拡張する



陽子と中性子からなる原子核の世界

“核図表”

- 安定核
- これまで発見された不安定核
- ドリップ線(原子核の存在限界)(理論予想)
- == 魔法数

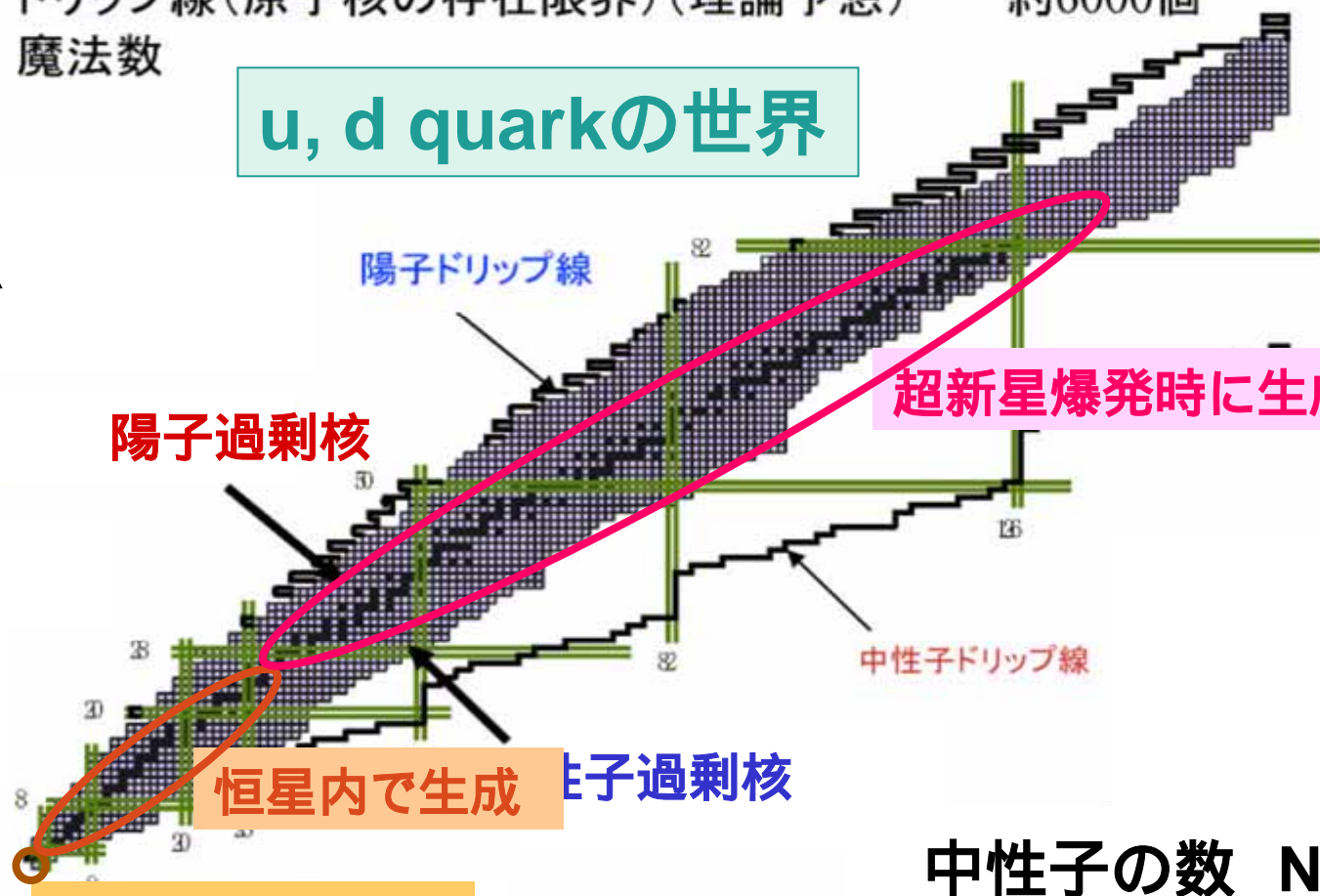
約300個
約2700個
約6000個

陽子間の
クーロン斥力のため
質量数には上限あり

← Z~113が
(現在の)限界

u, d quarkの世界

陽子の数 Z



陽子過剰核

超新星爆発時に生成?

恒星内で生成 中性子過剰核

ビッグバンで生成

中性子の数 N

ストレンジ・クォークで果てしなく広がる物質の世界

Nu ~ Nd ~ Ns

ストレンジ物質 (A)
中性子星の中心部 に存在 ?

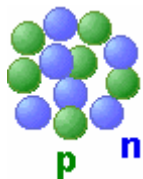


p, n, Δ, Ξ⁰, Ξ⁻

高密度化



Δ



p n

陽子数

ストレンジネス数

u, d, s quarkの世界

ΔΔハイパー核
Ξハイパー核

Δ ハイパー核

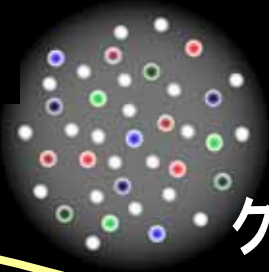
通常核 u, d quarkの世界

中性子数

3次元核図表

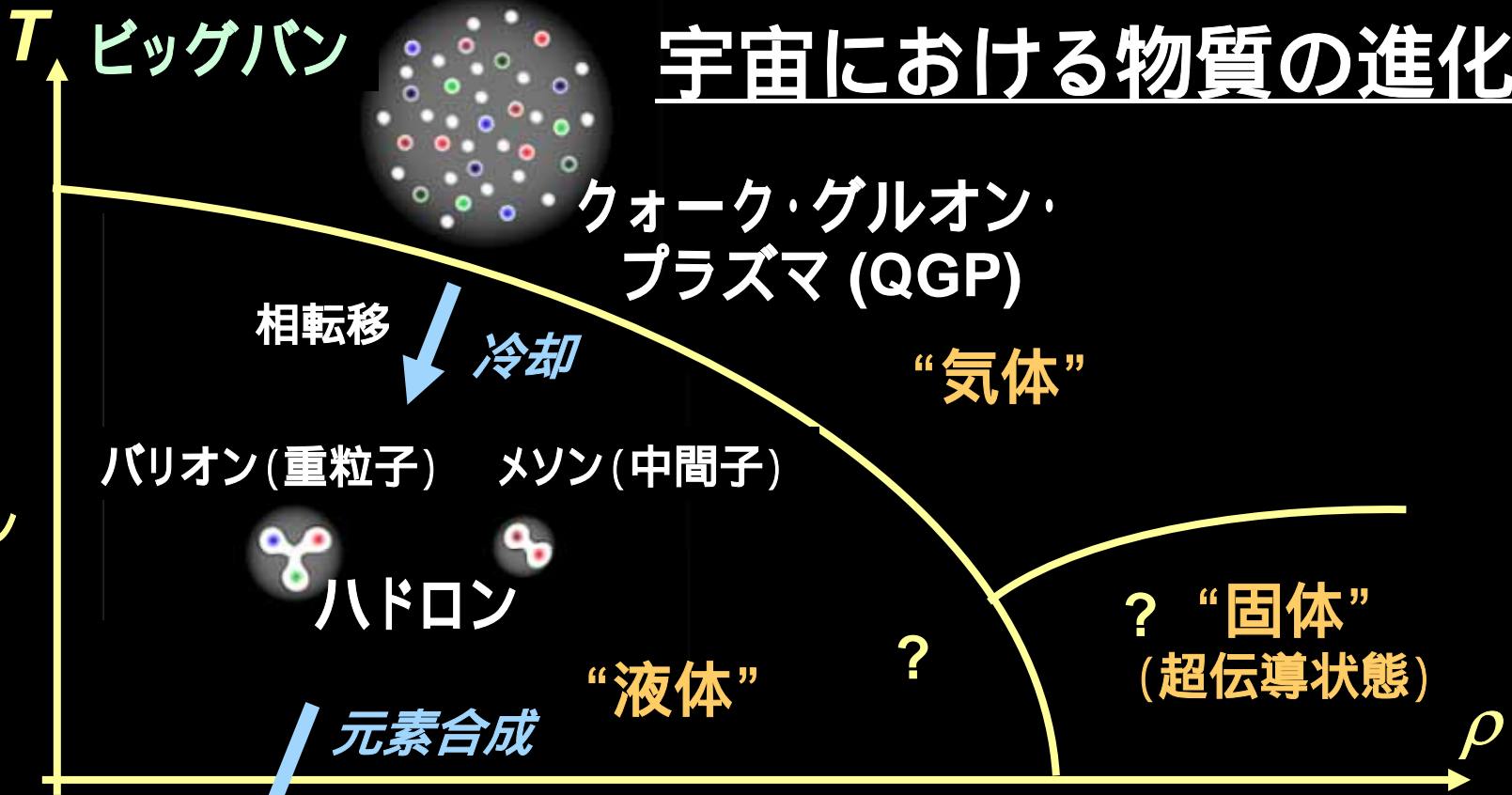
宇宙における物質の進化

ビッグバン



クォーク・グルオン・プラズマ (QGP)

素粒子
クォーク
グルオン



元素合成

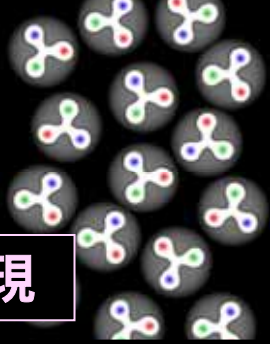
恒星

中性子星

クォーク星?



重力圧縮



重力圧縮



相転移

u,dクォークのみ

sクォーク出現

通常の原子核

高密度核物質

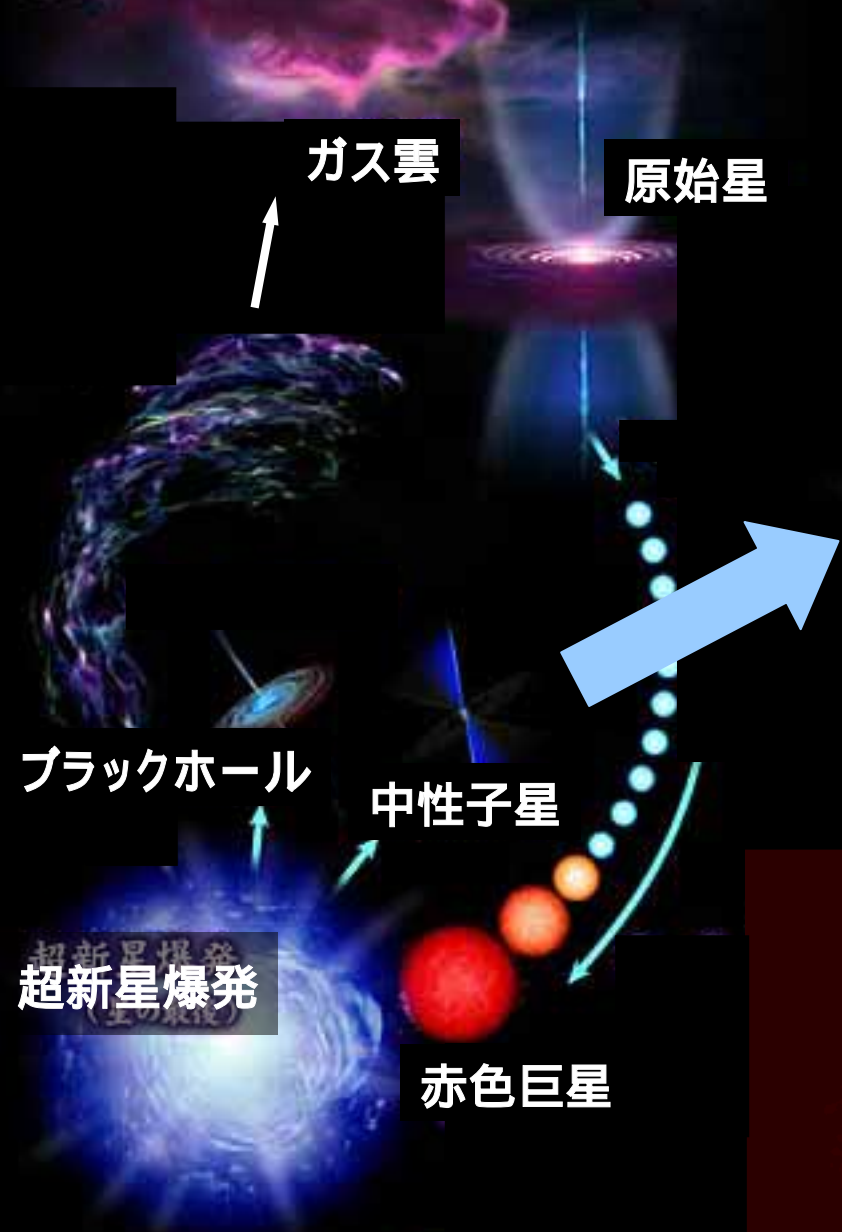
クォーク物質?

星の進化と中性子星

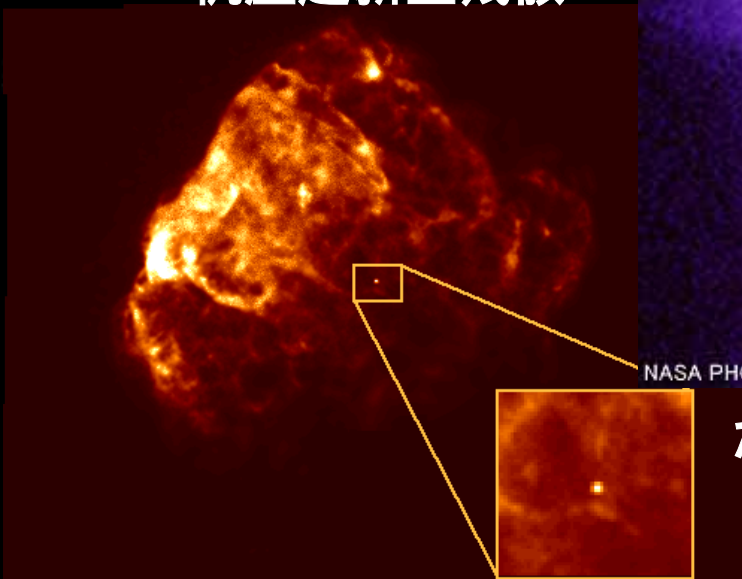
中性子星 = 主に中性子からなる
超高密度(一つの原子核と同等)
の星。X線パルサーとして観測。

ハイペロン(Λ , Σ , Ξ)が
安定に存在するらしい

ハイパー核の研究から中性子星の
内部構造がわかりつつある



帆座超新星残骸



かに座超新星残骸

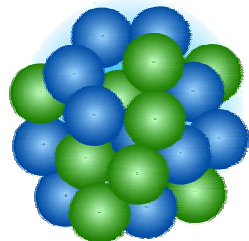
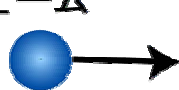
NASA PHOTO

4. ハイパー核を作り、調べよう

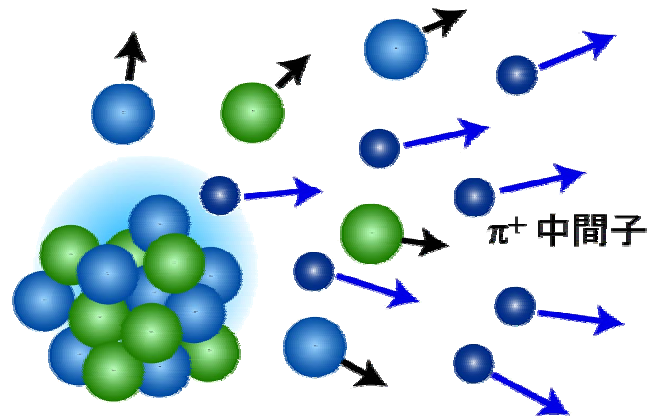
ハイパー核の作り方

陽子加速器を使う方法 (KEK陽子シンクロトロン)

陽子ビーム $> 1\text{GeV}/c$



原子核



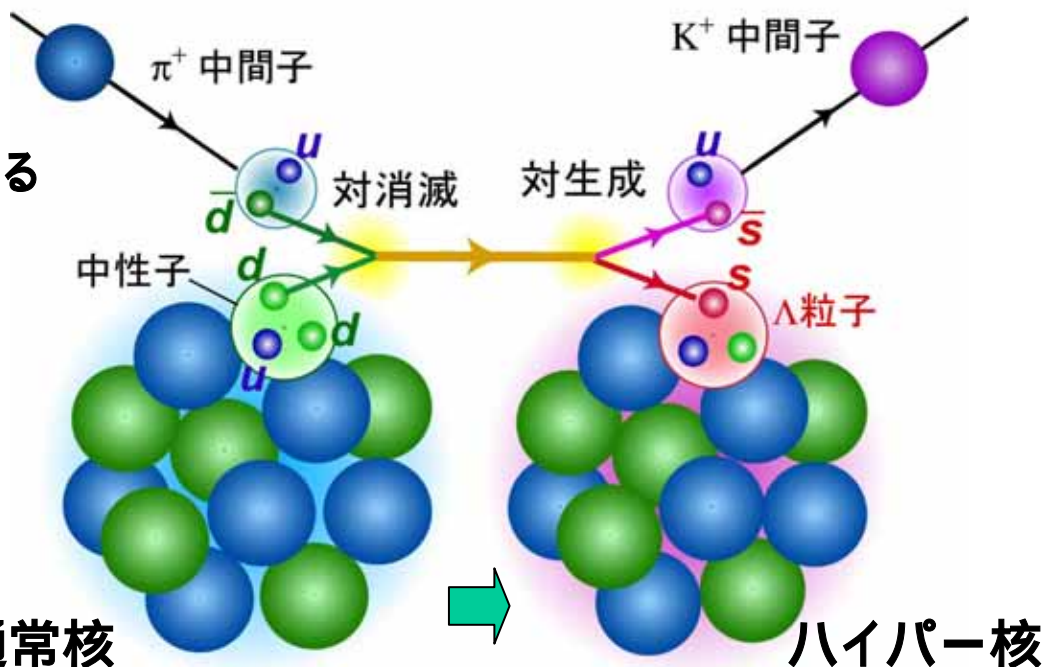
■ 加速した高エネルギーの陽子を原子核に当て中間子を放出させる

■ π 中間子を集めてビームとする

■ π 中間子ビームを標的の核に当てる

■ 核内の中性子と π 中間子の反応 (dクォーク,反dクォークの対消滅と sクォーク,反sクォークの対生成) により 粒子が作られる

■ 粒子がもとの核に貼りつきハイパー核となる

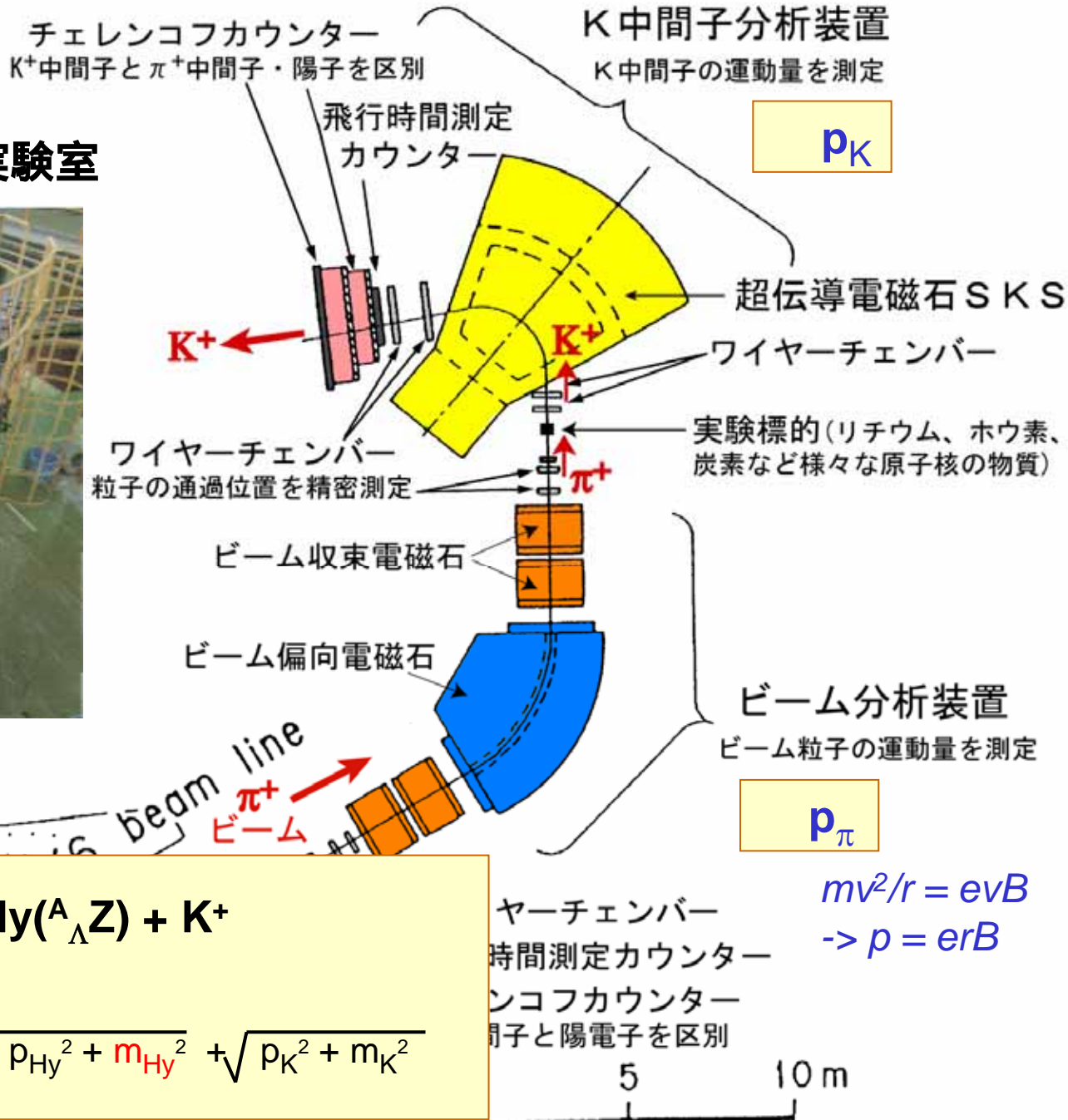


実験装置

KEK陽子シンクロトン実験室



SKS
(超伝導K中間子分析装置)



p_K

p_π

$$\pi^+ + A(AZ) \rightarrow Hy(A_\Lambda Z) + K^+$$

$$\begin{cases} p_\pi = p_{Hy} + p_K \\ \sqrt{p_\pi^2 + m_\pi^2} + m_A = \sqrt{p_{Hy}^2 + m_{Hy}^2} + \sqrt{p_K^2 + m_K^2} \end{cases}$$

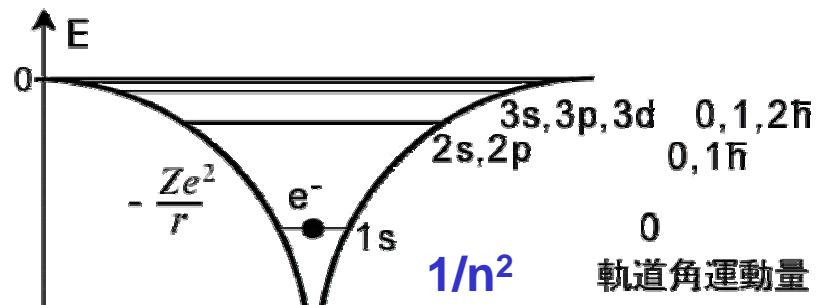
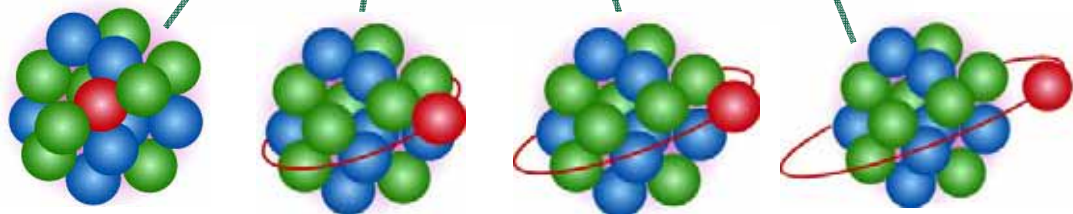
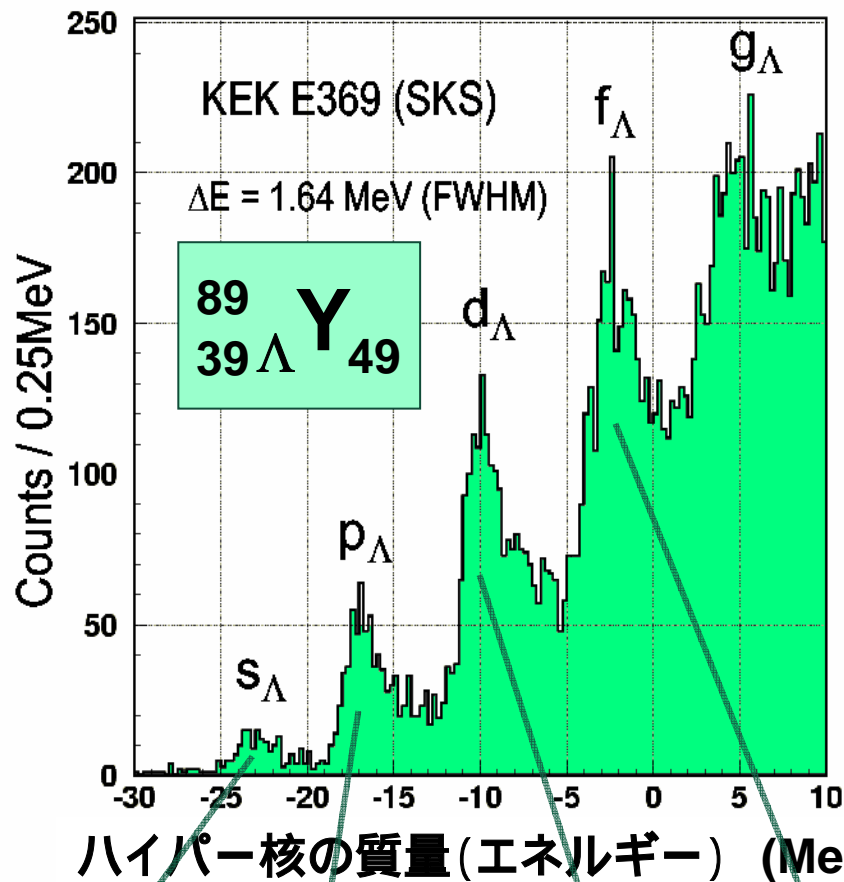
$$mv^2/r = evB$$

$$\rightarrow p = erB$$

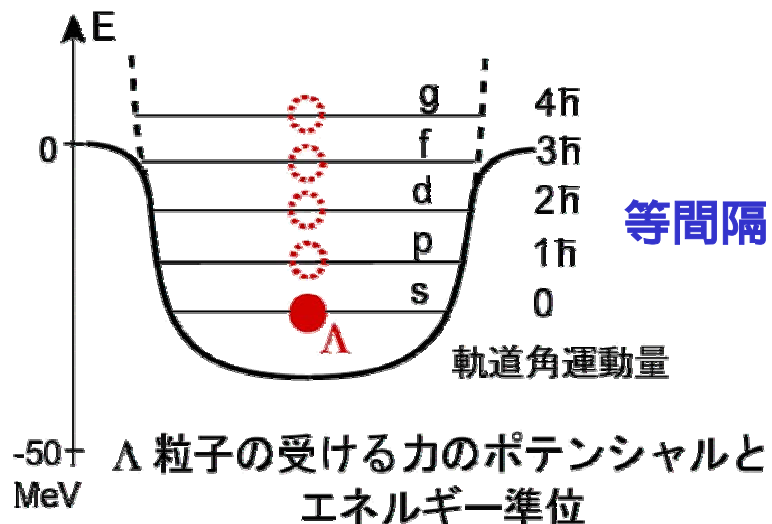
ワイヤーチェンバー
飛行時間測定カウンター
チェレンコフカウンター
K中間子と陽電子を区別

5 10 m

Λハイパー核の画期的データ - 原子核の深部の軌道を見る -



電子のクーロンポテンシャルと
エネルギー準位



Λ 粒子の受ける力のポテンシャルと
エネルギー準位

原子核中の粒子軌道が初めて見えた！
 陽子・中性子は「パウリの排他原理」により同じ軌道・同じスピンの向きに1個しか入れない
 軌道の埋まった核内部に入れられない
 Λ粒子は別粒子 どの軌道にも入れられる
 さらにΛと核子の間の力の強さもわかる

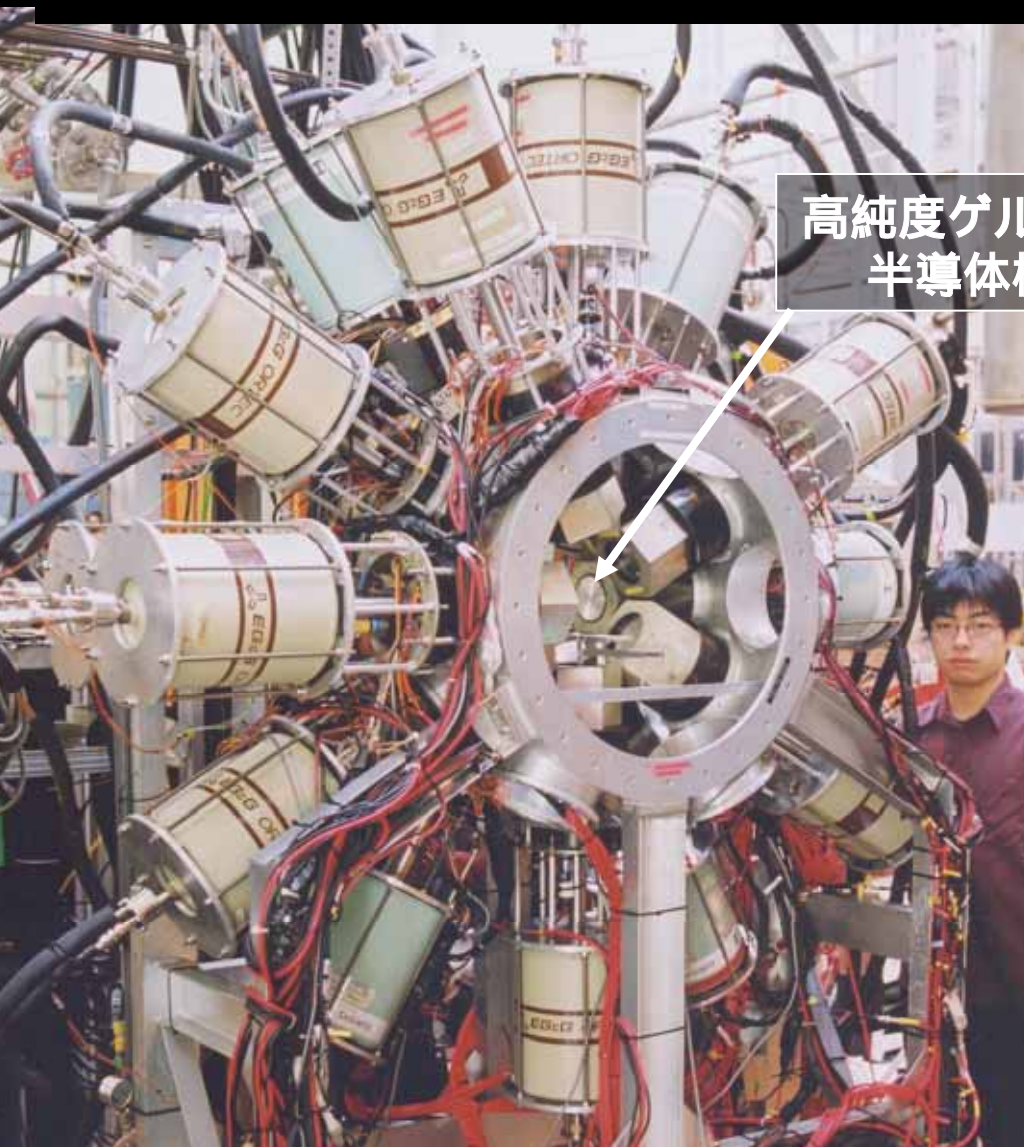
5. 世界をリードする 東北大のハイパー核研究

**ハイパー核研究は、実験・理論とも
日本が圧倒的に世界をリード**

**中でも東北大物理(原子核物理研究室)は
ハイパー核の実験的研究の世界有数の拠点**

Hyperball

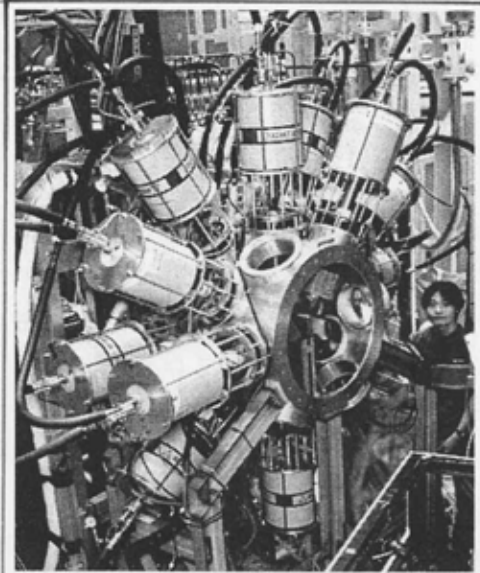
ハイパー核精密ガンマ線分光装置



高純度ゲルマニウム
半導体検出器

- ハイパー核からの線測定が世界で初めて可能に
- エネルギー分解能 2 MeV -> 2 keV 1000 倍の画期的改善
- 4倍に改良した Hyperball-Jを設計中

科学



中性子星の世界探る一歩 ハイパー原子核を見た

ラムダ粒子という素粒子
を人工的に作り出した「ハ
イパー原子核」が放つガン
マ線を測定することに、田
村裕和、東北大学大学院
理学研究科助教らでつく
る研究チームが成功した。

国際共同研究チームが成功
した。
私の身の回りには、多
くの中性子、わずかな陽
子、電子を中心につくられ
たと想像されている。

エネルギーを測って、ラム
ダ粒子と陽子、中性子の間
に働く力を精度よく調べ
た。

研究チームの永江知文・
同機長官はこうして研究が
進んで中性子星の中うら
まの存在が確かめられ
れば、中性子星の中だけ
はいえ、物質は陽子と中性子

た
フ

ら成る。第一段階では、長
いプログラムを分解し、中
たなは、1からnまで
換えていく。
そのプログラムをもろ二
助教役。だが、九六年か
つク、コペンハーゲン大学
だ。今回の研究と組み合わせ

換えていく。
そのプログラムをもろ二
助教役。だが、九六年か

つク、コペンハーゲン大学
だ。今回の研究と組み合わせ

活用できるかははっきりす
る」といっている。

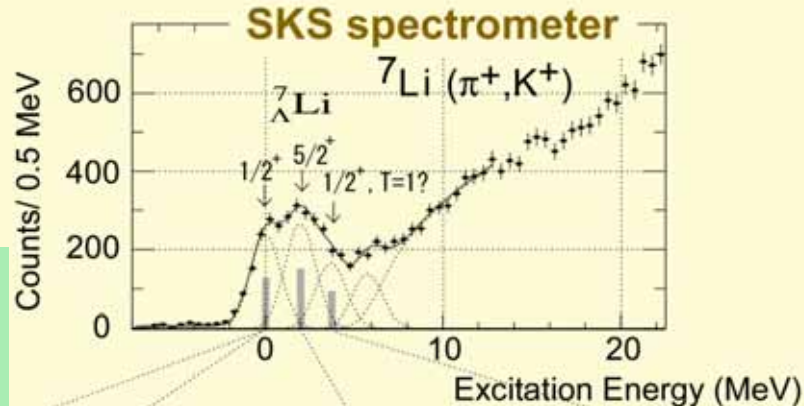
KEKでのハイパー核 ガンマ線測定実験

実験メンバー
(ほとんど東北大学生、4年生も4人)

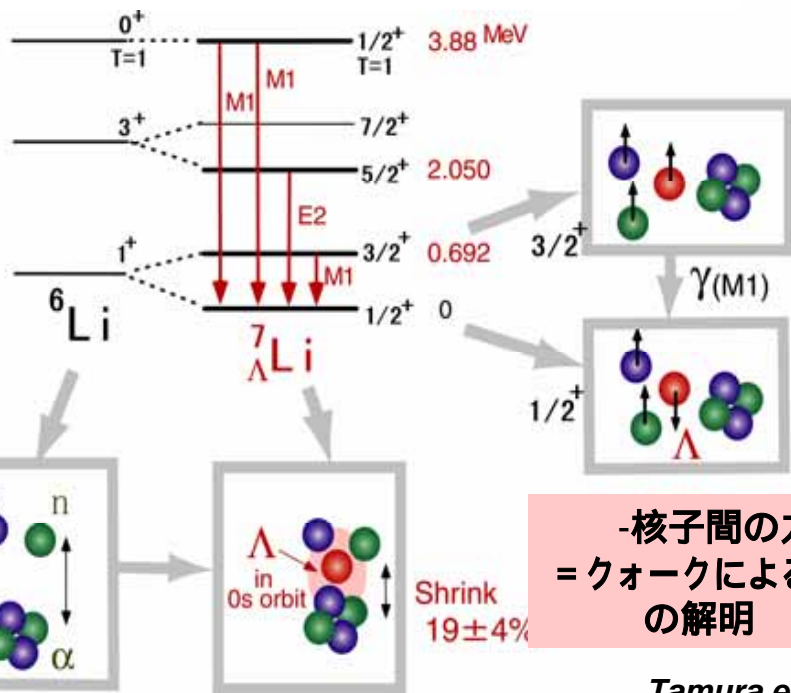


ハイパー核精密ガンマ線分光の成果例

従来の方法(電磁石のみ)
 $\Delta E = 2 \text{ MeV (FWHM)}$



説明された ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ のエネルギー準位

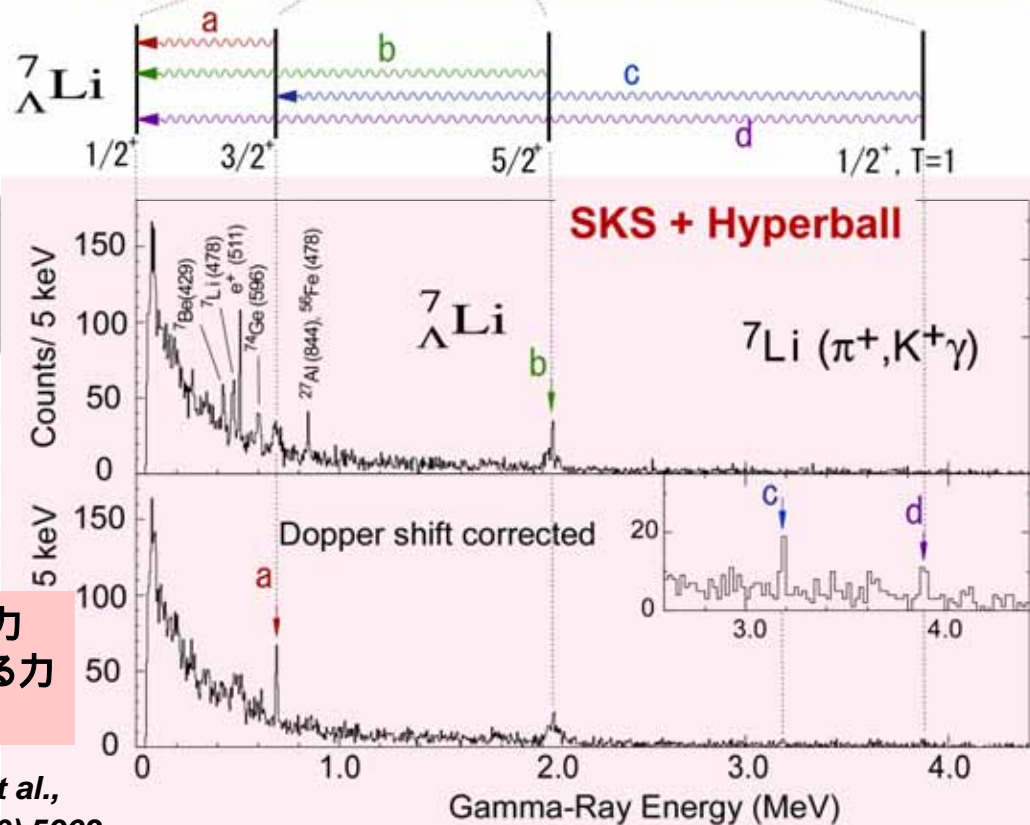


-核子間の力
 =クォークによる力
 の説明

Tamura et al.,
 PRL 84 (2000) 5963

による原子核の圧縮効果の発見

Tanida et al., PRL 86 (2001) 1982



Hyperballによるガンマ線分光

$\Delta E = 2 \text{ keV (FWHM)}$: 10^3 の向上

米国 Jefferson 研究所

世界最強の電子加速器

東北大グループは、電子ビームによって Δ ハイパー核を精度よく作ることに世界ではじめて成功



Jefferson研究所での実験メンバー

Nucleons go hyper in Hall C experiment . . .

スタッフ1 - 2名、学生3 - 4名が約2年常駐

on and a traditional nucleon — a proton or a neutron. We need to know much more.”

Although up to 200 million particle interactions per second are generated during the experiment, genuine hypernuclear interactions that form hypernuclei are extremely rare, on the order of a few per hour. Capturing such scarce events required development of specialized sensing gear, including a hypernuclear spectrometer system, HNSS.

Tang’s research team from Hampton University took a lead role in developing the equipment, and is also actively involved in designing the next generation of high-resolution, short-orbit, and large-acceptance spectrometers that will be used by future high-precision hypernuclear physics experimenters.

次の実験は2008年から

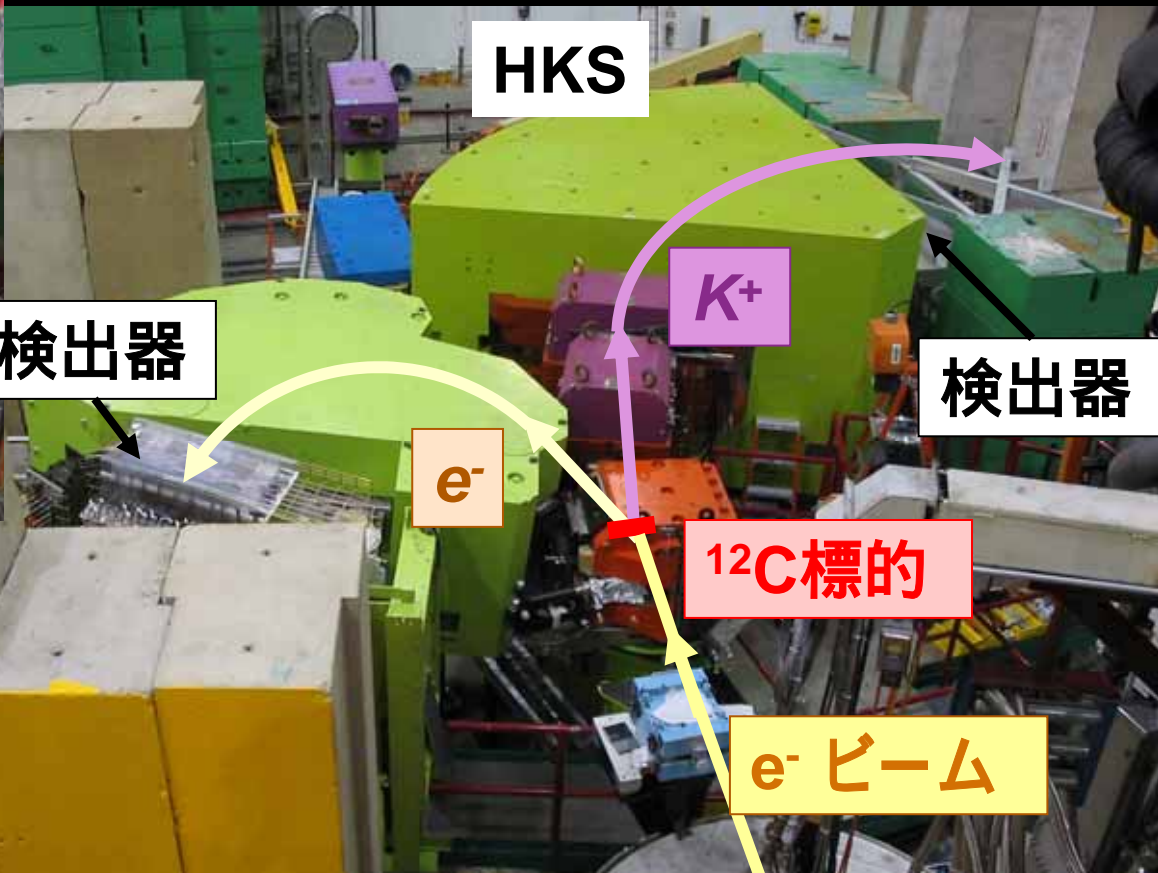
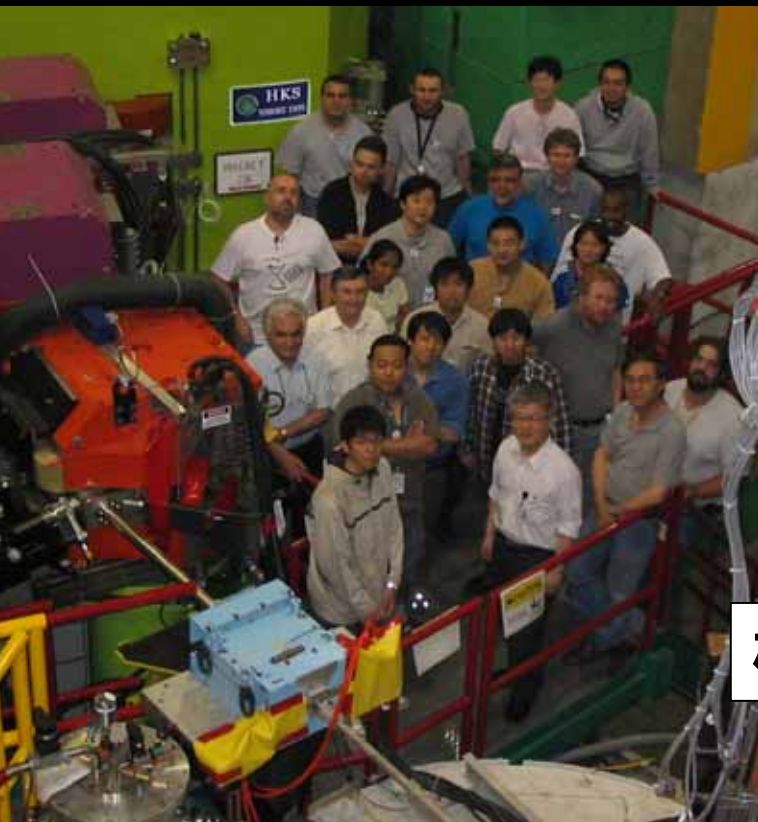
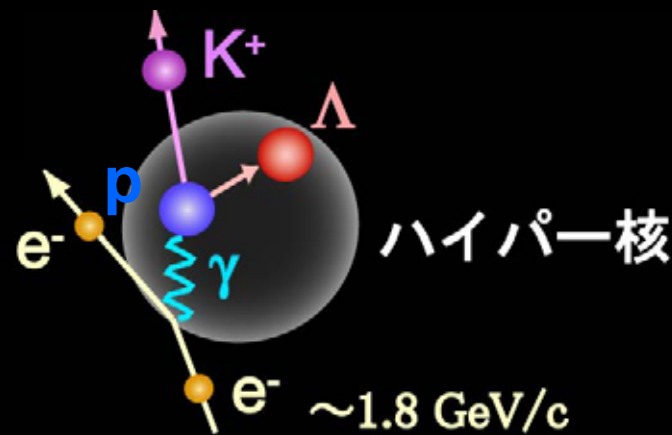
ments — an electron beam intense enough to capture the infrequent



A small number of collaborators on experiment E89-009 met May 9 to summarize experiment activities, take a preliminary look at the data and analyses of their research, and to plan a collaborators’ meeting for mid-June. Those able to attend the meeting included (l. to r.) Yamaguti Yamaguchi, Tohoku University; Jinghua Liu, U. of Minnesota; Henry Jüngst, Minnesota; Liguang Tang (spokesperson), U. of Minnesota & JLab; Mifuyu Ukai, Tohoku; Murad Sarsour, U. of Houston; Osamu Miyoshi, Tohoku; Razmik Asaturyan, Yerevan Physics Institute; Osamu Moto, Tohoku; Liping Gan, Hampton; Yuu Fugii, Tohoku; Lulin Yuan, Hampton; Ed Hungerford (spokesperson), Houston; Xiaofeng Zhu, Hampton; and Yoshinori Sato, Tohoku/Hampton/JLab. The experiment’s run ended in mid-May.

Jefferson研究所に 東北大の装置を設置し実験

電子からハイパー核を作る



高分解能K中間子分析装置HKS
(巨大電磁石 + 検出器)

日本で製作、米国に運搬・設置
東北大中心に米国人と共同研究

新しい検出器の 開発・製作・テスト実験

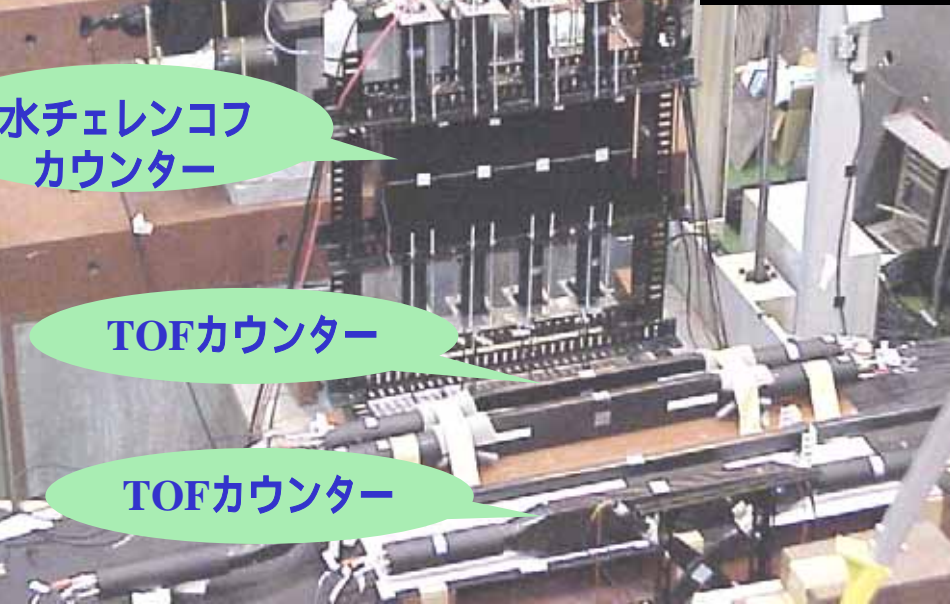
大学院生と4年生が中心

陽子、 K 中間子のビーム

検出器の製作風景(アメリカの学生と)



エアロジェル
チェレンコフ
カウンター

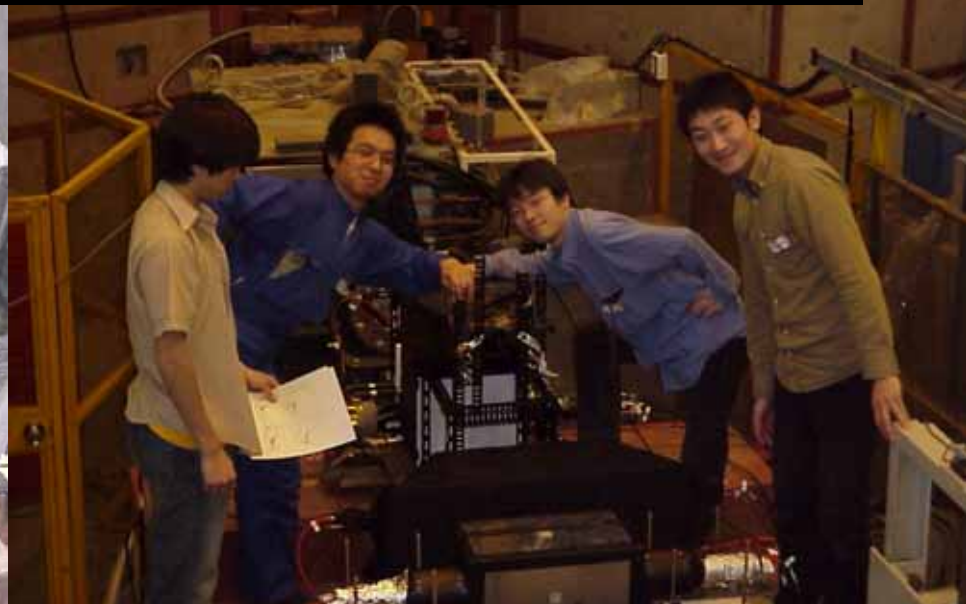


水チェレンコフ
カウンター

TOFカウンター

TOFカウンター

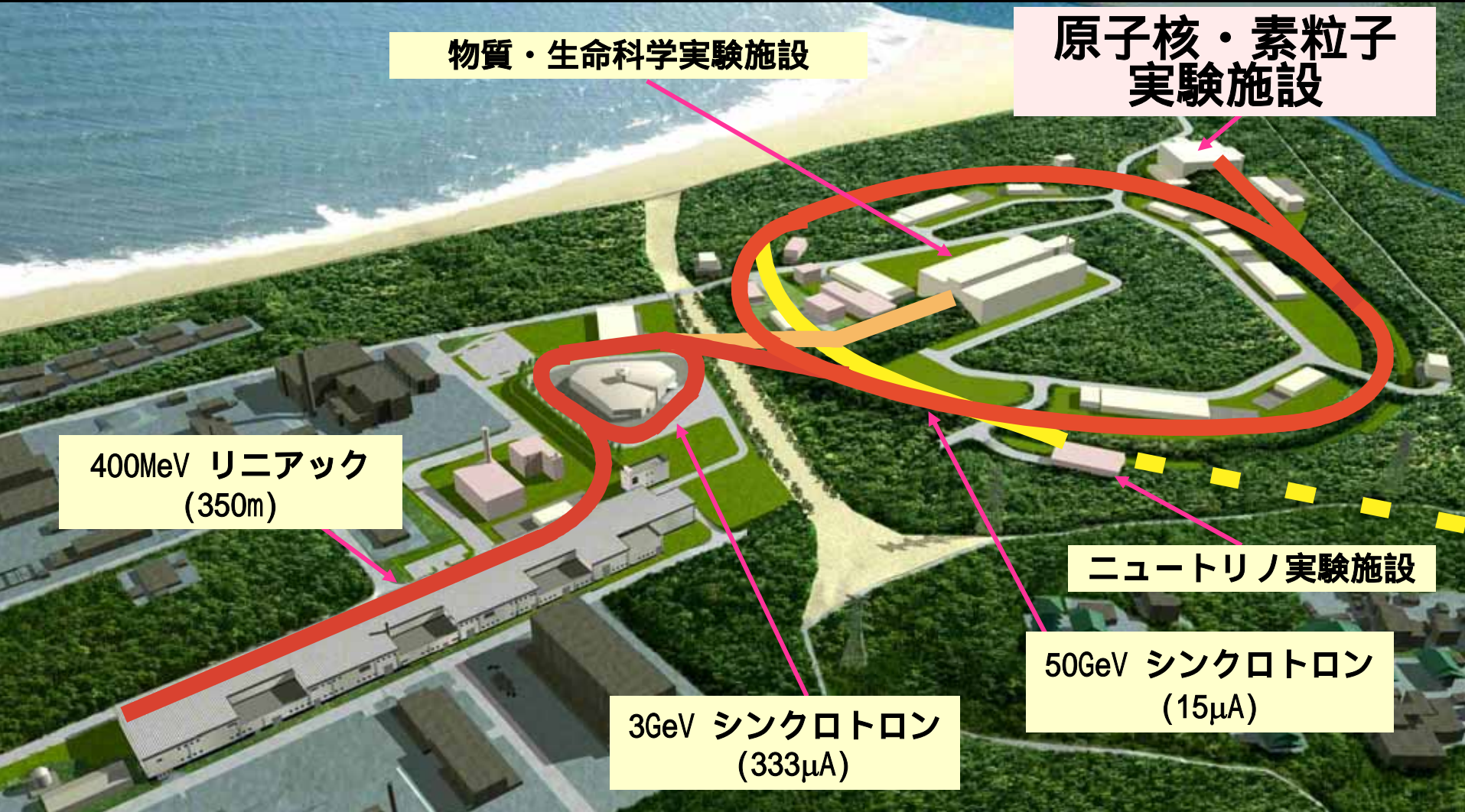
検出器のビームテスト実験
KEK(高エネルギー加速器研究機構:つくば)



将来へ：世界最強の陽子加速器 J-PARC

茨城県東海村 2008年完成予定

陽子ビーム強度は、現在世界最高の加速器の10倍、KEK(つくば)陽子加速器の数100倍



物質・生命科学実験施設

原子核・素粒子
実験施設

400MeV リニアック
(350m)

ニュートリノ実験施設

3GeV シンクロトロン
(333 μ A)

50GeV シンクロトロン
(15 μ A)

2006.11

完成間近のJ-PARC加速器



2007.4.22
東北大4年生見学会

原子核・素粒子
実験施設

J-PARC 原子核・素粒子実験施設

☐ ハイパー核
△△ ハイパー核
☐-原子の X線
△ハイパー核γ線分光
中性子過剰△ハイパー核
ハイパー核の崩壊

SKS

ビーム
ダンプ

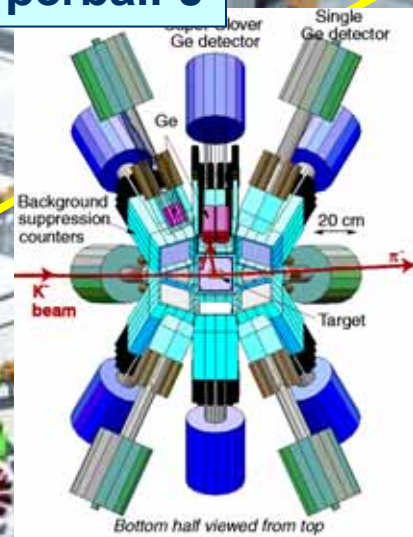
SPES-II

Hyperball-J

中間子ビームライン

中間子
生成標的

30GeV - 50GeV
陽子ビーム



2008年から実験スタート
みなさん参加できます

6. 東北大の先端加速器の紹介

核理研(理学部付属原子核理学研究施設):
日本最大級の1.2GeV電子シンクロトロン

サイクロトロンRIセンター(理学部キャンパス内):
日本最大級の120MeVサイクロトロン

東北大の 2つの大型先端加速器

これらを使って物理学科生・院生は
日々最先端の実験をしています。

「素粒子・原子核から宇宙への物理学」
クォークからどうやって原子核ができるのか？
さまざまな元素は宇宙の中でどうやってつくられたのか？

核理研(理学部付属原子核物理学研究施設)：
日本最大級の1.2GeV電子シンクロトロン



電子を光速の0.9999999倍まで加速して
原子核にぶつけ、核内のクォークを見る！

サイクロトロンRIセンター：日本最大級のサイクロトロン

陽子や原子核を光速の1/3まで加速してぶつけ、
さまざまな新種の原子核を作り、宇宙での
元素生成機構を解明する。



粒子を加速する電極



核理研のK中間子分析装置



おわりに

- **ハイパー原子核の世界とは**
ストレンジクォークが拓く新しい物質世界
原子核物理学を「核子多体系」から「クォーク多体系」へ拡張
中性子星など宇宙の全物質世界の理解へつながる
- **東北大物理のハイパー核の研究グループは世界最強**
われわれの研究室では誰もが最先端を体験できる
物理学を作っていく楽しさを味わう
世界最高の加速器(陽子: J-PARC, 電子: 米国Jefferson研)を使う
海外での実験、外国人研究者との交流も楽しい
- **国内屈指の東北大の加速器(核理研、サイクロ)でも
最先端の研究**

もっと知りたい人は:

原子核物理研究室ホームページ

<http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/>

ここに今日のスライドも置いておきます。

いつでも見学できます。連絡先は

理学総合棟643, tel: 795-6454 (田村)、

645, tel: 795-6453 (中村)

email: tamura@lambda.phys.tohoku.ac.jp

7月30,31日 オープンキャンパス

「霧箱を作って原子核をみよう」

「楽しい原子核・素粒子の実験」

6 or 7 月にKEK(つくば) + J-PARC(東海)の見学会
(バスツアー)を予定。