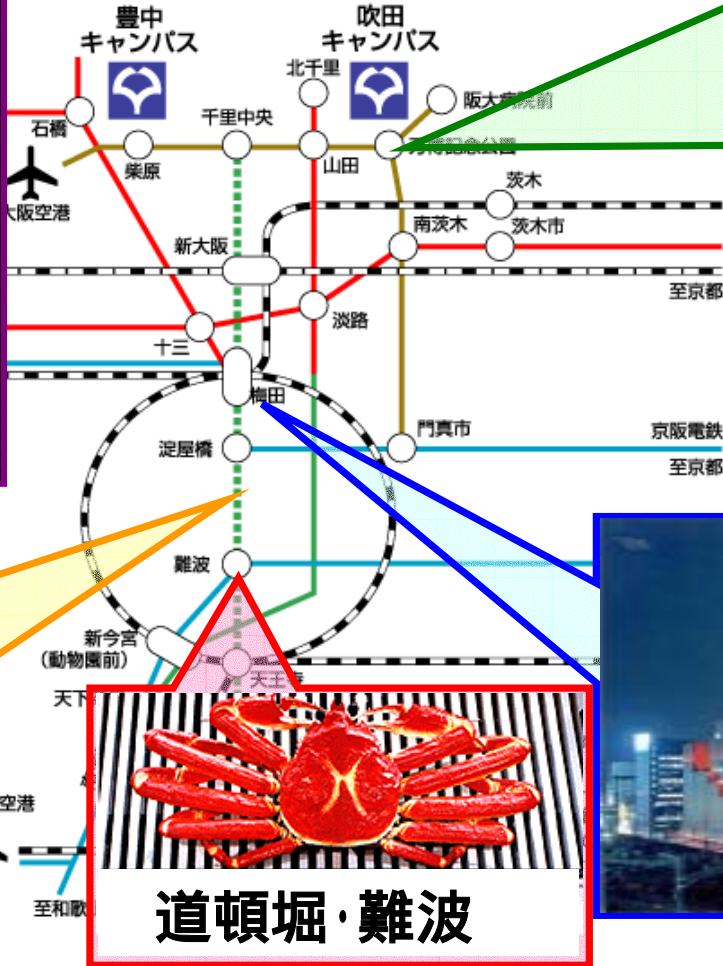


# 原子核を通して 観る宇宙

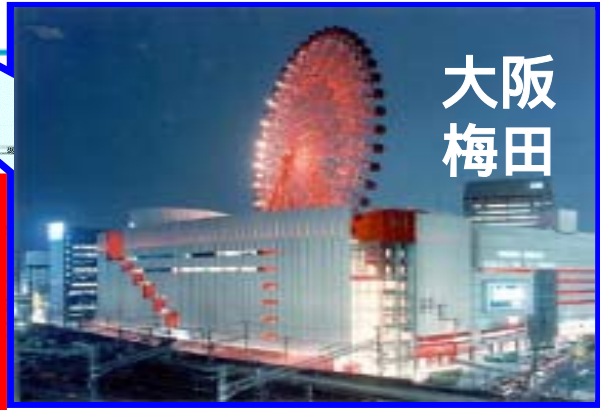
若狭 智嗣

大阪大学  
核物理研究センター

# 「大阪大学」の場所



太陽の塔  
(万博記念公園)



# 大阪大学 「豊中」キャンパス

- 「豊中キャンパス」
  - 全学共通教育機構 (一般教養)
  - 文学部・法学部・経済学部・理学部・基礎工学部(教育)

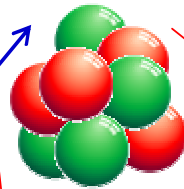




# 「大阪大学」の特色

- 前期課程(一般)・後期課程(専門)という教育課程の区分の廃止
  - 体系的な一貫教育を実施
- セメスター制を導入
  - 4年(医、歯は6年)一貫教育の実施
- 飛び級制度(学部3年次からの大学院入学)
  - 平成12年度(24人) 平成13年度(20人) 平成14年度(23人)
- 先進的学部の設置
  - 歯学部...国立の総合大学で最初に設置(昭和26年)
  - 基礎工学部...理学と工学を融合した形で生まれた国立大学で唯一の学部(昭和36年)
  - 人間科学部...社会学や心理学、教育学などを融合した実践的な人文科学の学部として全国で最初に設置(昭和47年)
- 研究所・センターにおける世界第一線級の研究とCOE形成
  - 附置研究所 5施設
  - 学内共同研究施設 15施設
  - 全国共同利用施設(センター) 2施設

# 「原子」と「原子核」



原子核

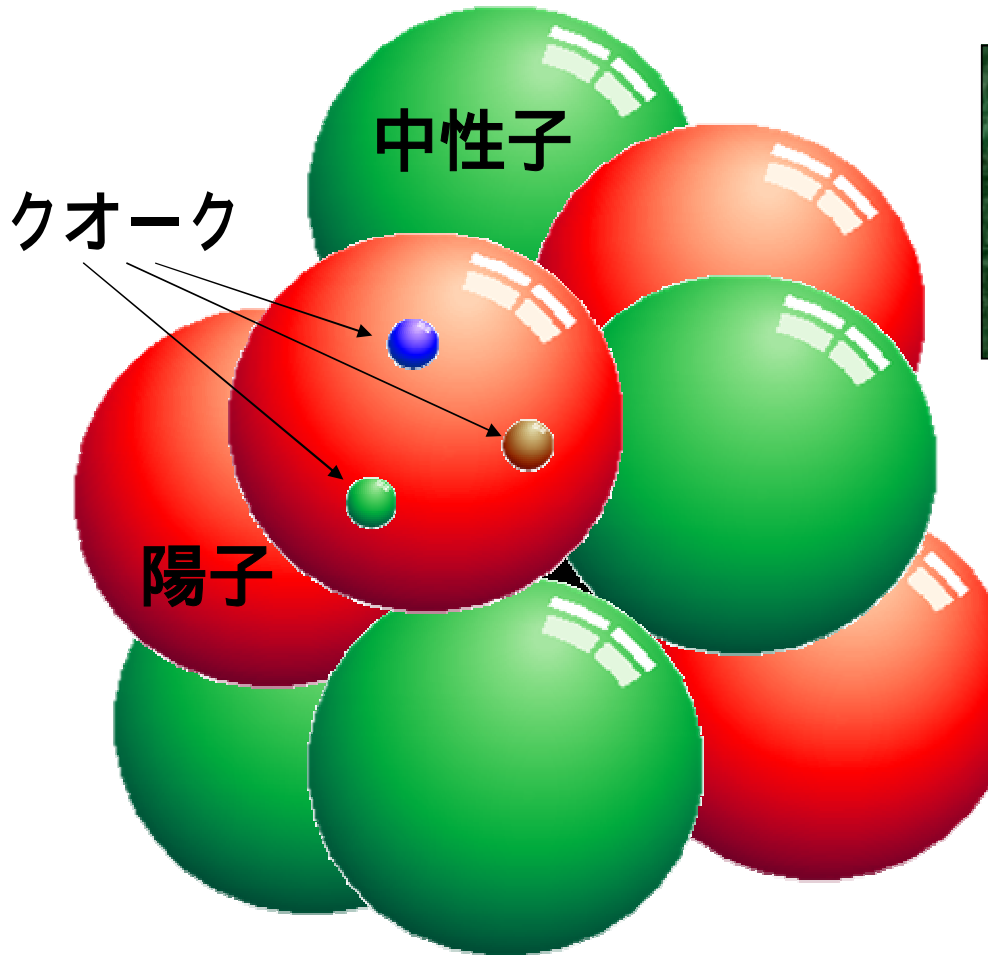
原子  
= 「原子核」と「電子」  
からなる、極めて空虚  
な世界

1オングストローム  
= 1億分の1cm

• 電子

1フェルミ  
= 10万分の1オングストローム  
= 10兆分の1cm

# 「原子核」と「クォーク」



原子核  
= 「陽子」と「中性子」  
からなる、極めて高密度な世界

クォーク  
= 「陽子」や「中性子」  
という袋の中に閉じ込められている

# 「原子核」と「原子力」

## ■ 原子核

- いくつかの核子(陽子と中性子)が核力によって結合してできた複合粒子。正電荷をもつ。大きいものでも半径は $10^{-12}$ センチメートル以下。原子の中心部にあり、その質量の大部分を占める。核。
- 「原子核」の研究
  - 核力(強い力)の研究... 陽子と中性子を結び付けている力
  - 陽子と中性子からなる多体系の研究
  - 放射線と原子核の相互作用(強い力・電磁気力・弱い力)

## ■ 原子力

- 核分裂や核融合などの核変換によって放出されるエネルギー。変換によって質量が減少すれば、その減少量に相当する質量エネルギーが放出される。原子核エネルギー。原子力。
- 「原子力」の研究
  - 効率的な核変換の研究
  - 核変換の際に生じる放射線(放射能)遮蔽
  - 核変換の際に生じる放射性廃棄物の処理

相対性理論によれば質量は  
エネルギーと同等であり、  
質量としてもっている  
エネルギーをいう

$$E = mc^2$$

( $c$ は真空中の光速)

# 核兵器...「人工の放射線源」

## ■ 核兵器の種類

- 広島型原子爆弾(高濃度ウラン)
- 長崎型原子爆弾(プルトニウム)
- 水素爆弾(小型太陽)
- 中性子爆弾

## ■ 広島型原子爆弾

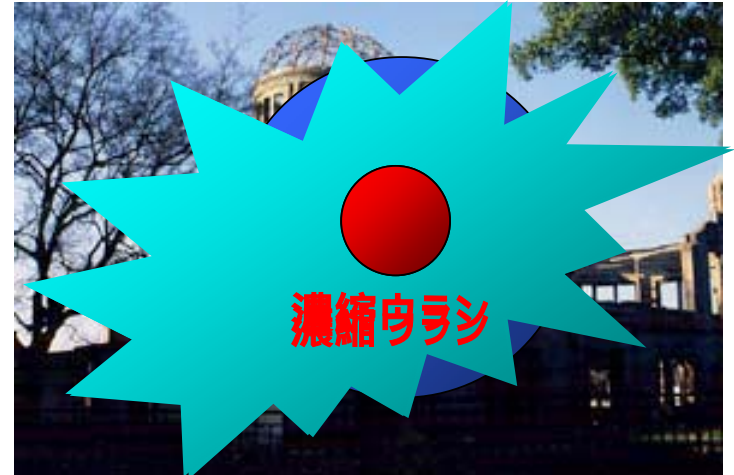
- 米国「マンハッタン計画」  
20億ドル@1942
- 濃縮ウランの塊同士を瞬時にくっつける  
核分裂を約100万分の1秒で終了  
(発電:核分裂を継続的に生じさせ、長時間かけてエネルギーを抽出)
- ウラン235:天然ウランの0.7%(高濃度化が比較的困難)

## ■ 長崎型原子爆弾

- プルトニウムは原子炉内で容易に生成(実験用原子炉から抽出・保有)
- プルトニウムの塊を爆縮させる  
莫大なエネルギーを瞬時に、「爆発」の形で放出

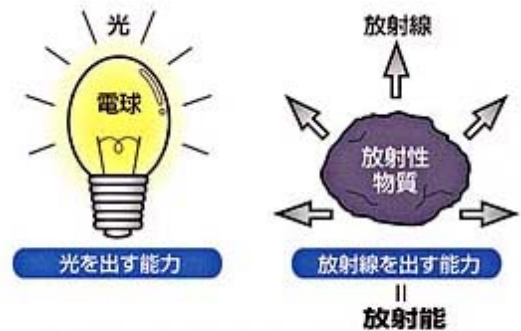
## ■ 「核兵器」開発疑惑

- プルトニウム保有...生成・保有は比較的容易だが、爆弾化(爆縮)は困難
- 濃縮ウラン生成...生成(遠心分離等)は比較的困難だが、爆弾化は容易

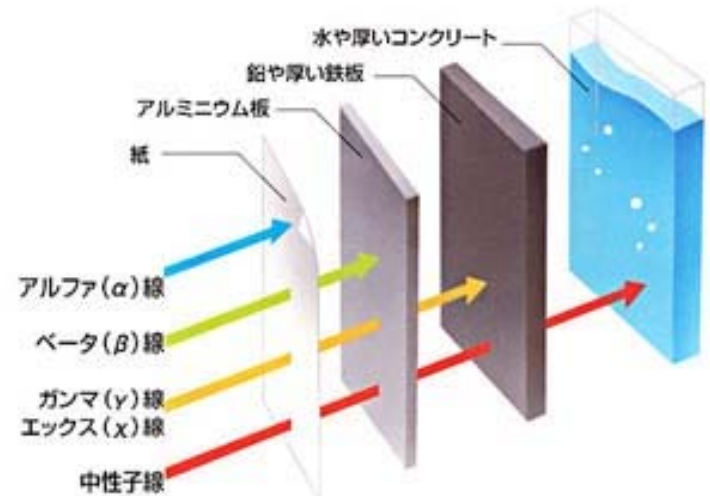


# 身の回りの放射線の種類

- 放射線と放射能
  - 放射能は、電球でいう光を出す能力、放射線を出す能力で、放射線は、出てきた光そのものに相当
- 色々な単位
  - **放射能の単位；**  
Bq(ベクレル)、Ci(キュリー)
  - **人体に与える影響についての指標；**  
Sv(シーベルト)、rem(レム)
- 放射線と透過力
  - **制動エックス線・ガンマ線**  
高エネルギーの電磁波・光
  - **中性子線**  
核分裂や核融合から作られる中性子
  - **アルファ線**  
原子核から放出されるヘリウム原子核
  - **ベータ線**  
原子核から放出される電子



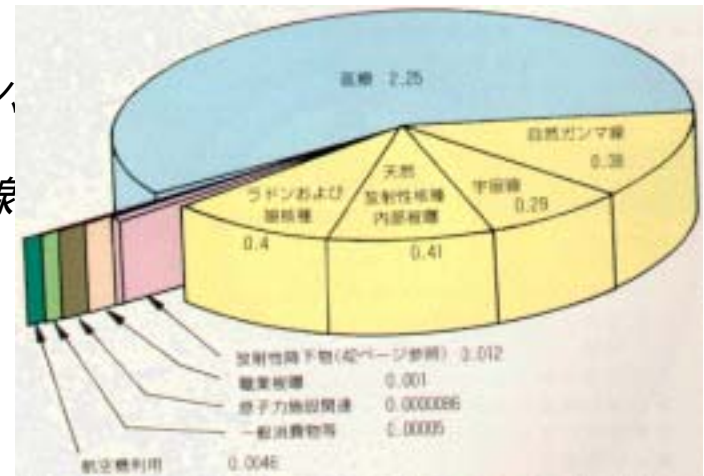
※放射性物質を電球に例えると、「光」に相当するのが「放射線」にあたります。



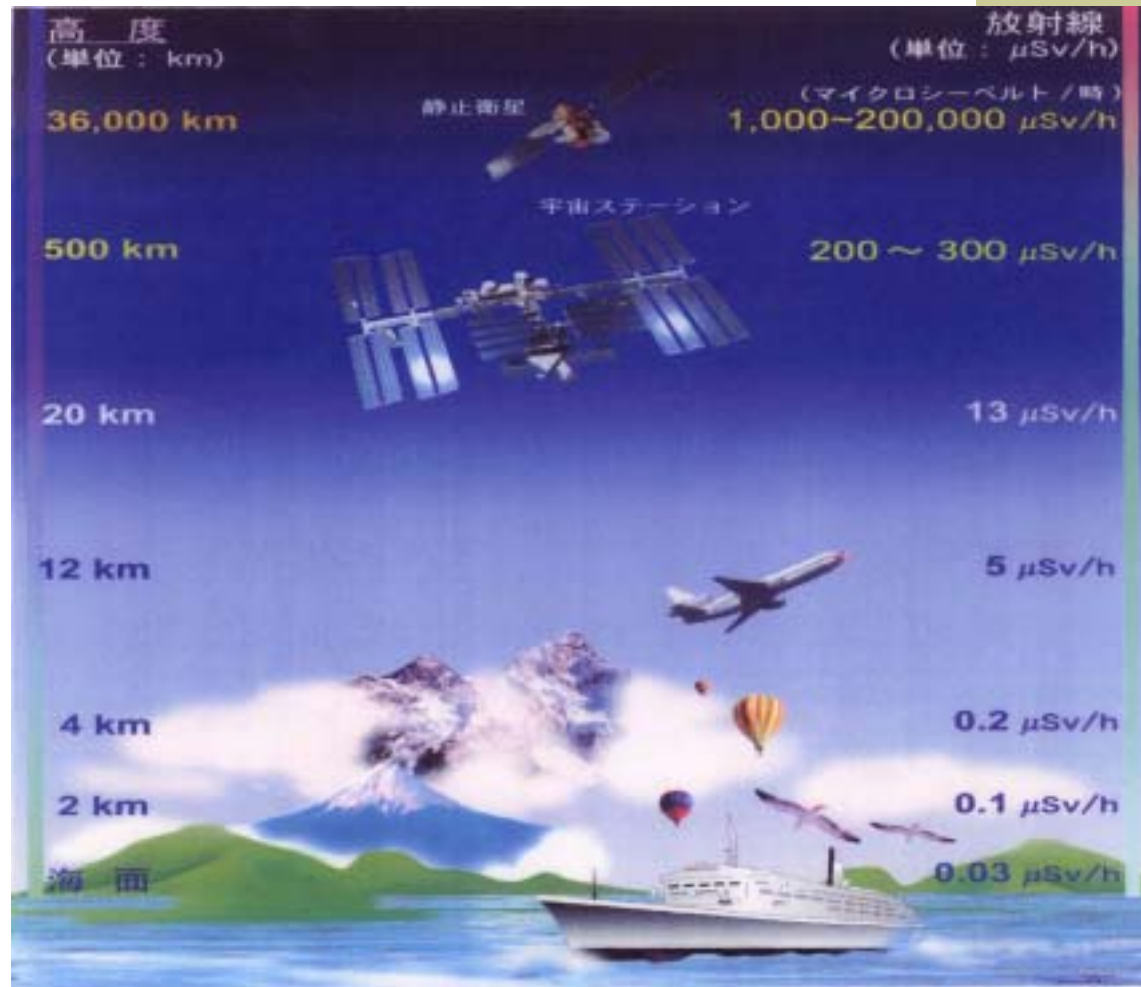
# 身の回りの放射線

## 環境放射能

- **大地からのガンマ線: 年間0.38mSv**
  - 大地(土壌や岩石等)に含まれるウラン、トリウム、カリウム-40など  
自然の放射性同位元素からのガンマ線
- **食物などから体内へ: 年間0.41mSv**
  - 呼吸や食物などを通じて体内に取り込まれる。カリウム-40などは、筋肉に多く存在
- **ラドン族: 年間0.4mSv**
  - 大地や建物のコンクリートなどに含まれるラジウム-226から生まれる空気中のラドン等は呼吸によって肺に吸い込まれる
- **宇宙線: 年間0.29mSv**
  - 地球には、太陽や銀河系宇宙から常にいろいろな放射線が降り注いでいる
- **医療放射線: 年間2.25mSv**
- **年間被曝線量: 3.75mSv**



# 放射線と高度の関係

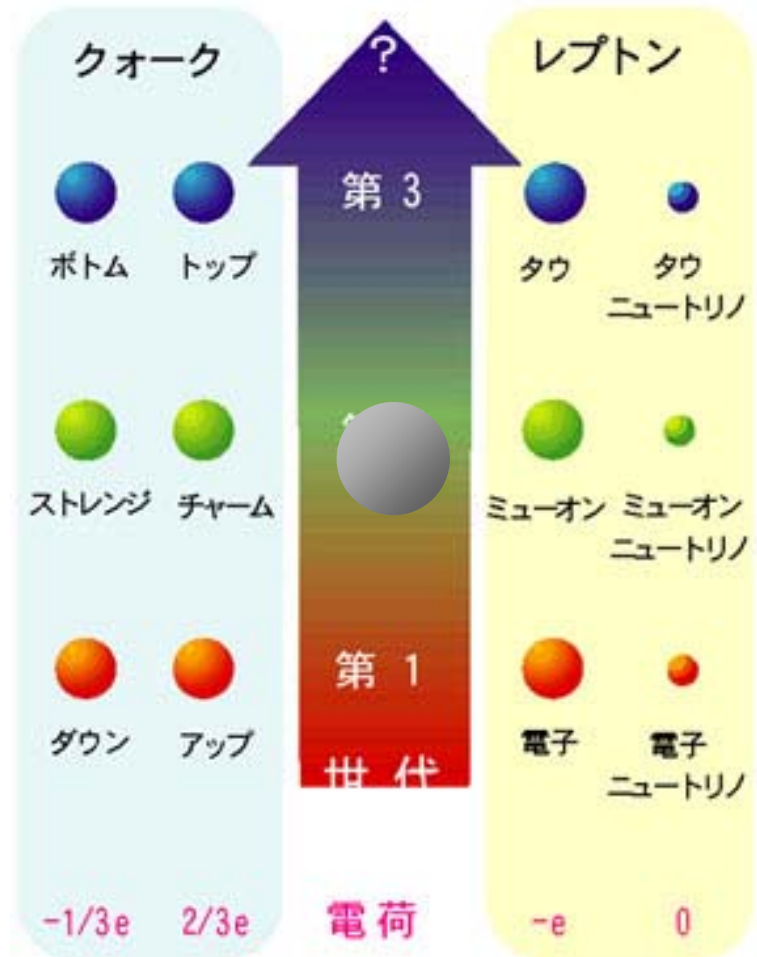


# 「原子核」物理




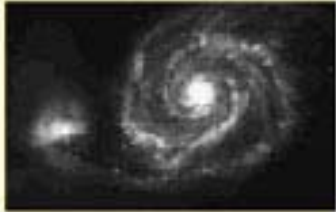
- 「物理学」の研究テーマ
  - 我々は何から出来ているか？ (分子 原子 原子核 素粒子)
  - 我々はどこから来たのか？ (時間軸・時間ゼロの前は？)
  - 我々はどこへ向かうのか？ (時間軸・宇宙の膨張は止まるのか？)
  - 宇宙の果ては？ (空間軸・果ての向こうは？)
- 「原子核」の研究テーマ
  - 素粒子(陽子・中性子)から原子核がどの様に作られているか？  
(クォーク・スープ時代の再現 過去の時空への旅)
  - 現在100種類以上ある元素が、いつ・どのように作られたか？  
(元素合成～物質の時代の再現 過去の時空への旅)
  - 恒星(太陽等)の内部で何(核融合)が起こっているか？
  - 星の終焉の1形態である中性子星(超巨大原子核)はどんなものか？  
(現在及び未来の時空への旅)

# 素粒子 「クォーク」と「レプトン」

- 究極(?)の素粒子
  - 6種類のクォーク  
(強い力を感じる)
  - 6種類のレプトン  
(強い力を感じない)
  - 3世代  
(祖父母・父母・兄妹)
  - まだ見つかっていない粒子  
(ヒッグス粒子...)



# 自然界の「4つ」の力

	電弱力			
力の種類	強い力	電磁気力	弱い力	重力
力の伝達粒子	グルーオン	光子	W, Zボゾン	重力子
力の大きさの目安	1	0.01	$10^{-5}$	$10^{-40}$
	原子核 ハドロン 核融合 太陽エネルギー	分子、原子 エレクトロニクス 放射光 オーロラ	中性子崩壊 原子核崩壊 ニュートリノ 地熱	万有引力 銀河系 ブラックホール 渦巻き星雲
				

# ビッグ・バン

- ビッグ・バン: 120 ~ 200億年前
  - 超高密度・超高温 ( $> 10^{32}$ 度)
  - 物質・エネルギー・時空の生成
  - 「神の一撃」(パラレル・ワールド)
- 大統一の時代 ( $10^{-43} \sim 10^{-35}$ 秒後)
  - 第1次相転移(重力の分離) @  $10^{32}$ 度
- インフレーションの時代 ( $10^{-35}$ 秒後)
  - 第2次相転移(強い力の分離) @  $10^{27}$ 度
  - 莫大なエネルギー放出 急激な膨張 ( $10^{50}$ 倍)
  - クォーク・スープ
- 物質の生成 (~ 1秒後)
  - クォーク・陽子・中性子の誕生 @  $10^{10}$ 度
  - 星や銀河の誕生は10億年後  
(現在の宇宙の1/5の大きさ)



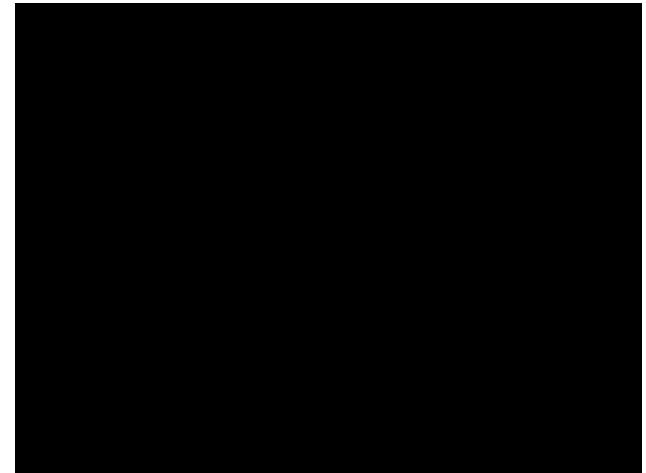
# 「原子核」の誕生

- 中性子の孤立化(1秒後)
  - ~1秒後:陽子 中性子
  - 1秒後:陽子 中性子(寿命10分)
  - 陽子10個に対して中性子1個
- 元素合成の時代(1秒後~100秒後)
  - アルファ(陽子2個+中性子2個)生成
  - リチウム(陽子3個+中性子4個)生成
- 原子の誕生(200秒後)
  - 電子が核に捕捉される
    - 陽子 水素
    - アルファ粒子 ヘリウム
- 輻射(不透明)の時代(~30万年)
  - 光子・電子・ニュートリノからなる不透明な海の中で陽子や原子が漂う
  - 原子の電子は剥がれやすい(プラズマ状態)
- 再結合(透明)の時代(30万年~100万年)
  - 電子が陽子や核に「固く」捕捉される(中性状態)



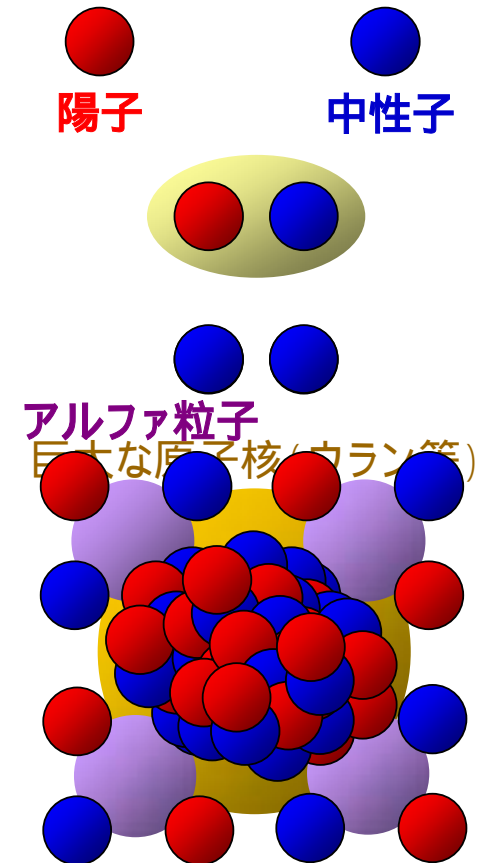
# 「星」・「銀河」の形成

- 物質・重力の時代(10億年後)
  - 宇宙の膨張に伴う物質の希薄化  
力の主役は重力へ
  - 不均一な物質(水素やヘリウム)分布  
ガス雲(物質の多い所)の生成
- 星・銀河の誕生  
(10億年後～現在)
  - ガス雲が周囲の物質を重力で引き寄せる
  - ガス雲同士が引き寄せられる  
星(系)の誕生
  - 星(系)同士が引き寄せられる  
銀河の誕生



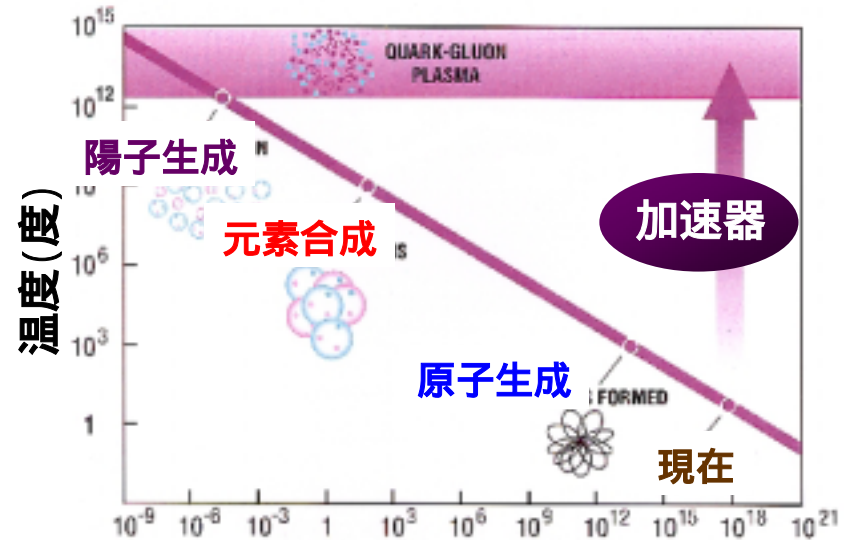
# 原子核の基本的性質

- 陽子と中性子は「中間子」を媒介して結合
  - 人も「言葉」や「身振り手振り」でコミュニケーション
- 陽子と中性子は結合するが、陽子と陽子、中性子と中性子は結合しない
  - 人も男女はカップルを作る
- 陽子と中性子の数が同数が安定
  - 人も男と女は半々
- 多量の陽子・中性子がある場合、陽子2個と中性子2個からなるアルファ粒子を形成し易い
  - 人も数人のグループを形成し易い
- 巨大な原子核(多量の陽子・中性子からなる)は自発的に崩壊する
  - 人も巨大な組織(企業・政党...)は崩壊し易い

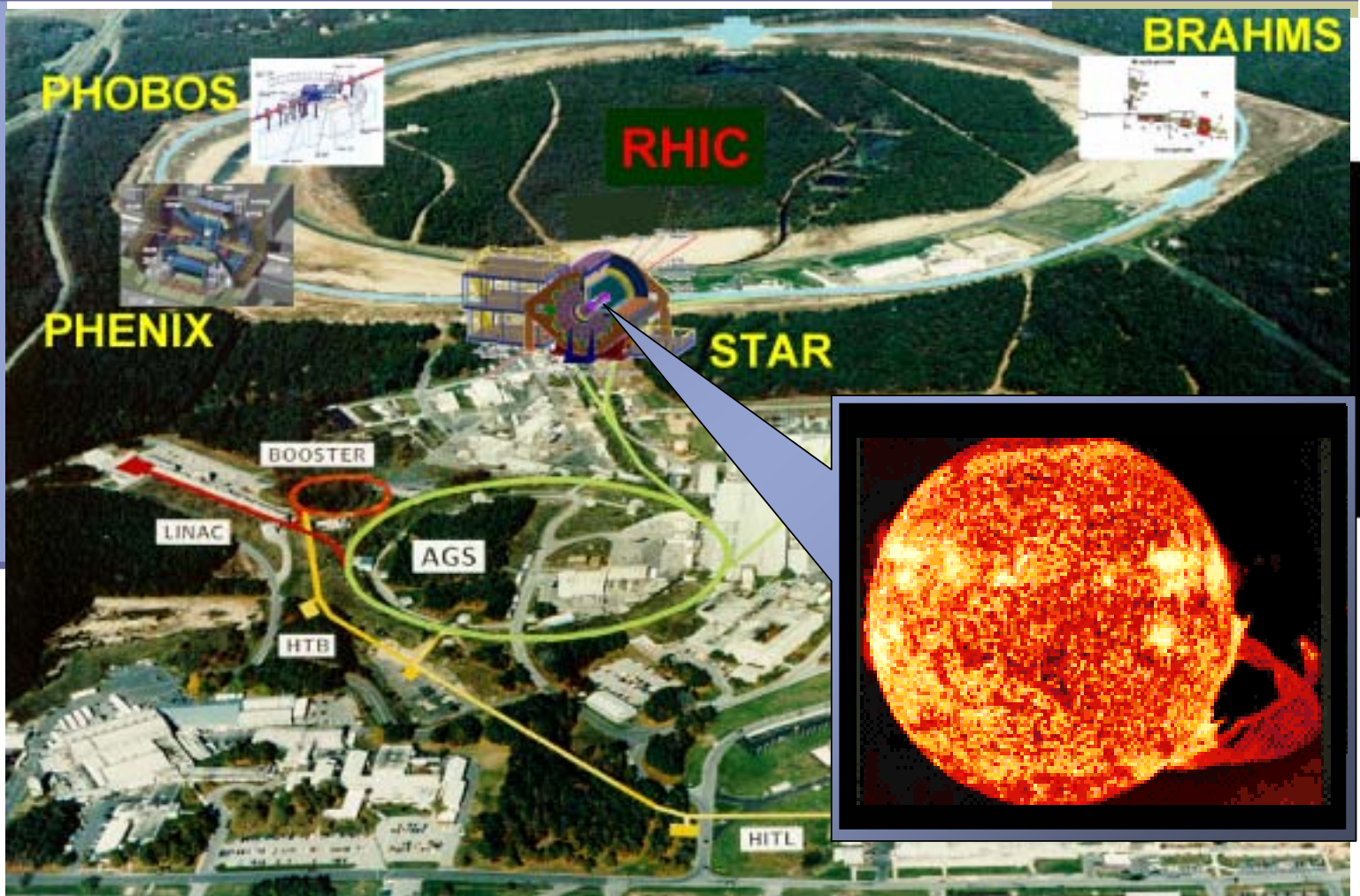


# 「クォーク・スープ」の時代へ

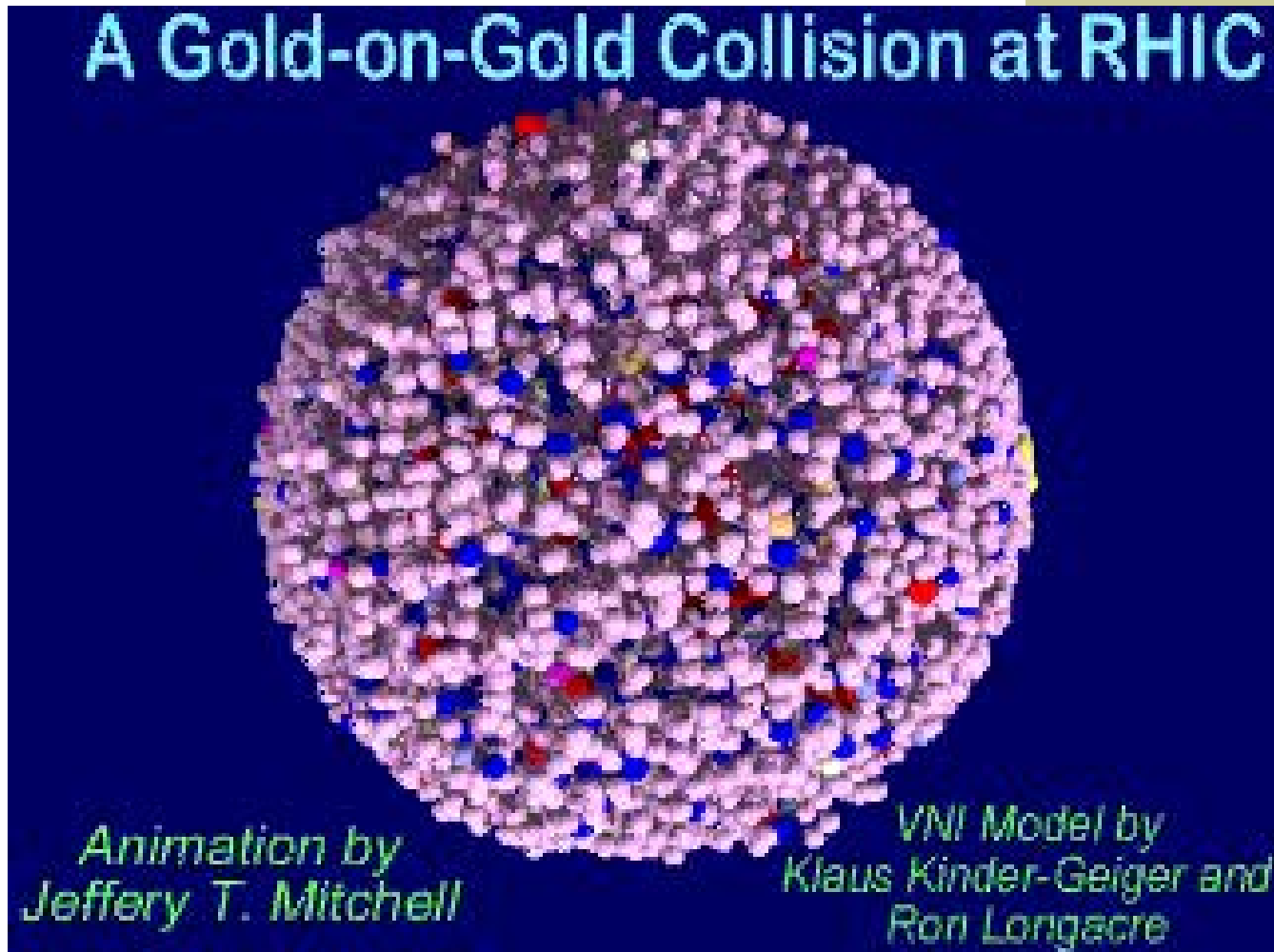
- 現在
  - 温度: 3度
  - 密度: 希薄(空虚な宇宙)
- 高エネルギー原子核衝突実験
  - 高いエネルギーの原子核同士を正面衝突
  - 非常に高い温度・エネルギー密度を持った状態が生成
  - 宇宙初期のクォーク・スープの時代(高温・高密度)の再現
- 相転移
  - 水の場合  
氷 水 水蒸気
  - 物質(ハドロン)の場合  
陽子・中性子 クォーク・スープ



# 高エネルギー原子核加速器:RHIC (Brookhaven National Lab. at U.S.A.)

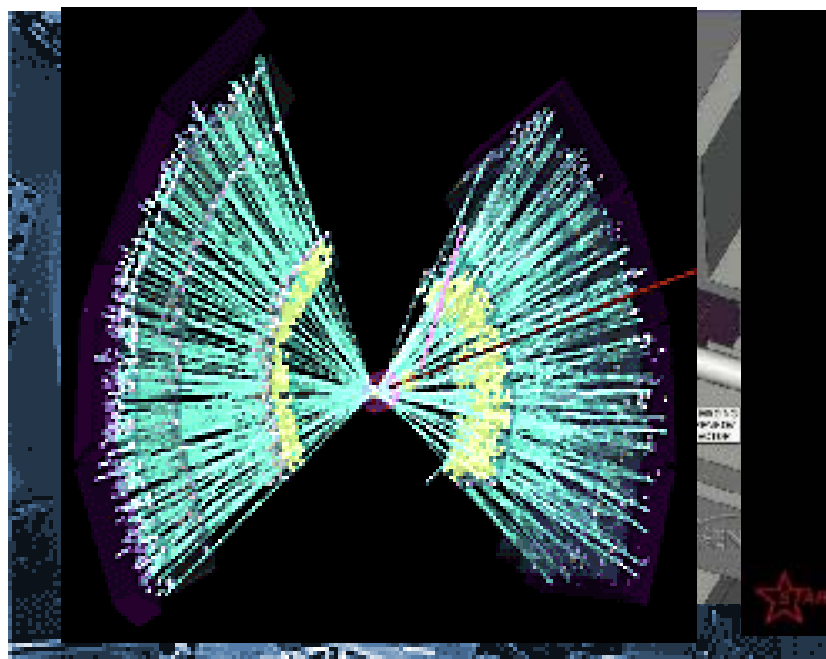


# クォーク・レプトン時代の再現 (太陽の1万倍以上の数兆度の世界へ)

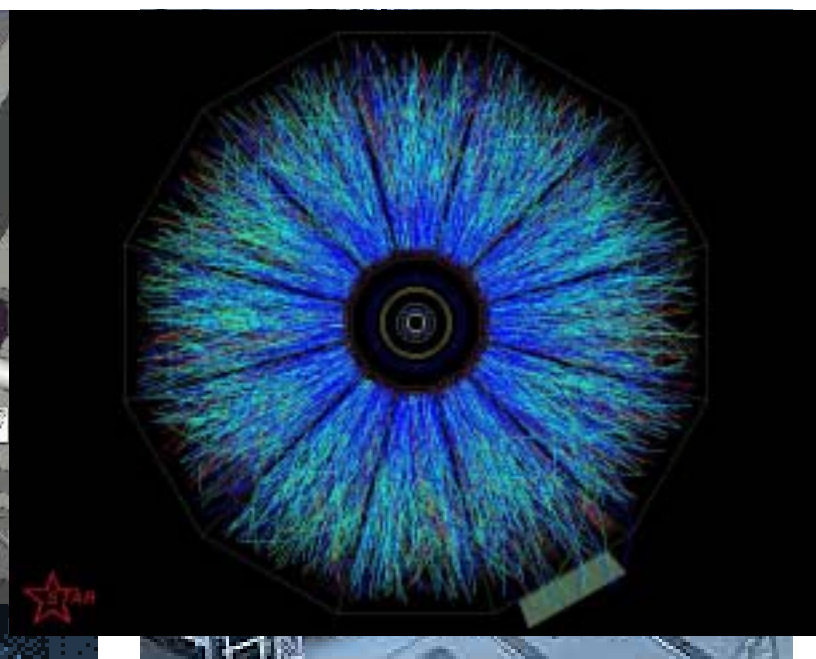


# 「クォーク・レプトン」の時代から「物質」の時代へ ハドロン(陽子・中間子) / レプトン(電子・ミュー)の検出

## PHENIX検出器



## STAR検出器



PHENIX国際共同研究(メガ・サイエンス)

- ・日本側: 東京大学、京都大学、筑波大学、広島大学等8大学・研究機関
- ・米国側: BNL、ANL、LLNL、LANL、等16大学点研究機関

# 「極端」な原子核

## もし「陽子だけ」の原子核があったら...

- 水素原子の電子のエネルギー

$$\varepsilon = 13.6eV$$

- Z個の陽子の周りを回る電子のエネルギー

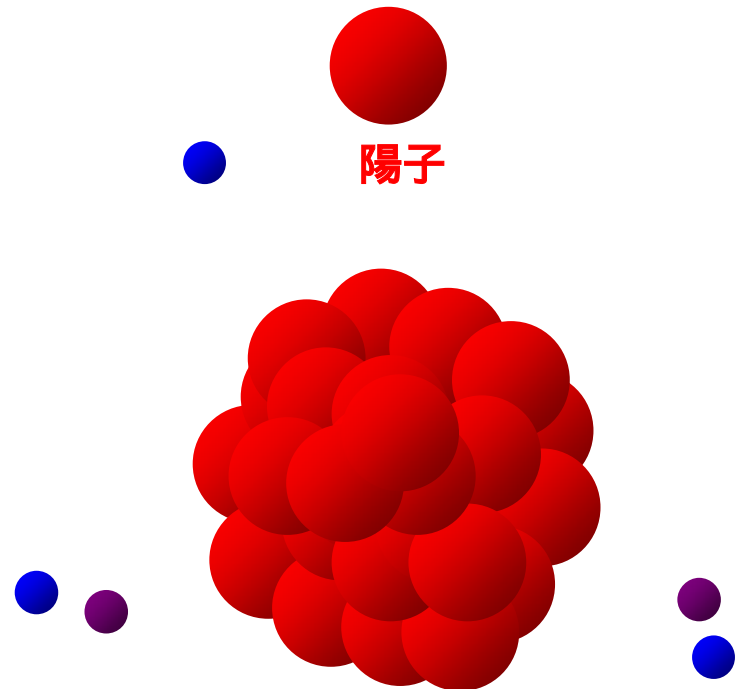
$$\varepsilon = m_e c^2 \sqrt{1 - \left(\frac{Z}{137}\right)^2} \quad \text{陽電子}$$

- 虚数エネルギー

- Z=137でエネルギーが虚数
- 虚数エネルギー = 有限な寿命

- 有限な寿命 相転移

- 真空から2組の電子・陽電子対が生成



137個以上の陽子の塊

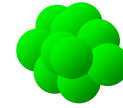
# 「極端」な原子核

もし「中性子だけ」の原子核があったら

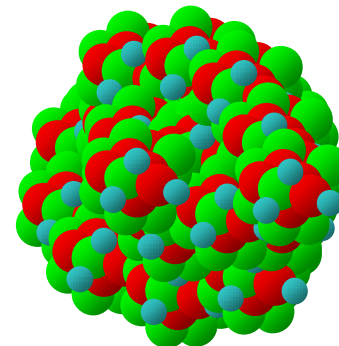
- 中性子
  - 電氣的に中性
  - 真空から電子・陽電子は作れない
  - 中間子は作れないか？
- 相転移で生成する中間子の速度:k

$$k = m_{\pi} \sqrt{\frac{1}{6\rho - 1}}$$

- $\rho > 1/6$ : kが実数 中間子が生成(相転移)
- $\rho < 1/6$ : kが虚数 中間子は生成しない
- 原子核と中性子星
  - 原子核:  $\rho < 1/6$  相転移しない
  - 中性子星:  $\rho > 1/6$  相転移する



中性子だけの(中性子が極端に多い)原子核



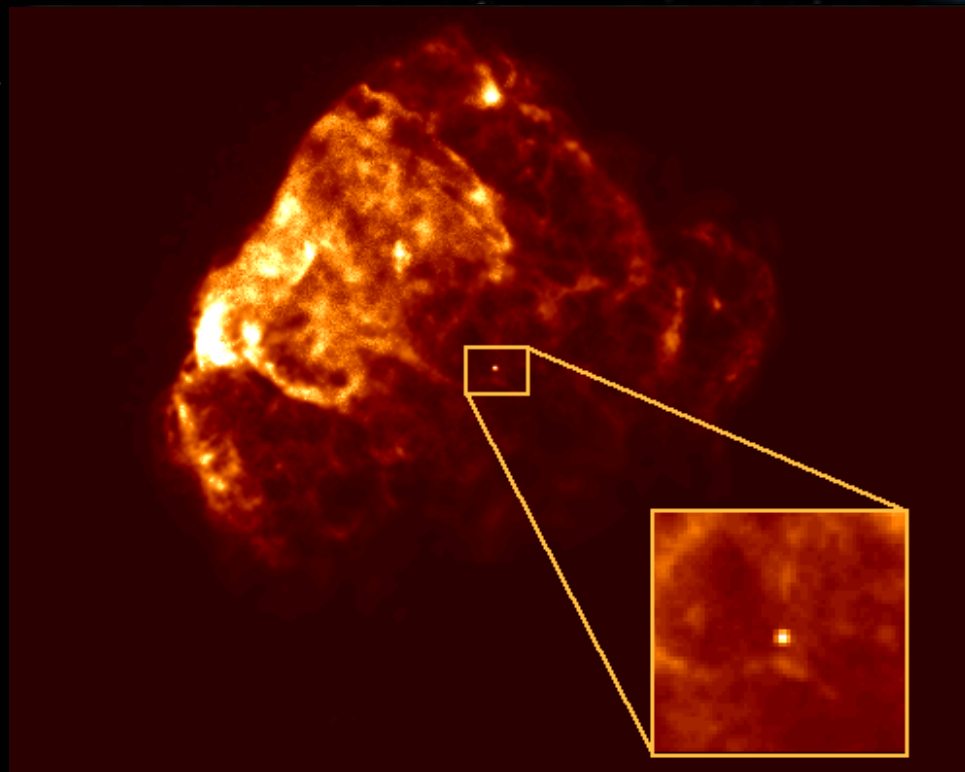
● 陽子

● 中間子

中性子星  
(相転移前)  
(相転移後)

# 中性子星

- 中性子星
  - 半径: 10 km
  - 重さ: 太陽の1.4倍
  - スプーン一杯 = 10億トン!!
- 中性子星の誕生
  - 太陽の4 ~ 8倍の重さの星の終焉
  - 超新星爆発で外壁を吹き飛ばした後の中心部分
  - 重力による圧力:  
陽子 + 電子 → 中性子



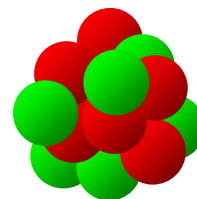
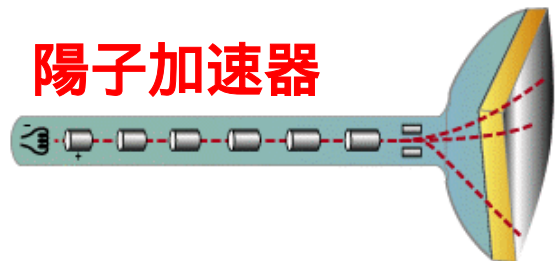
# 中性子星の相転移の兆候を観る 通常の原子核を中性子星内部の状態へ

- 通常の原子核(中性子星に比べて)
  - 低温
  - 低密度

中性子星内部の状態とは程遠く、  
相転移は起きない

- 原子核を陽子を使って叩く
  - 中性子星内部の状態に近づける
  - 相転移の兆候(前駆現象)の発生?
- 出てくる中性子を捕まえる
  - 相転移の兆候の情報を持っている

加速器を用いて、原子核を  
中性子星内部の状態に近づける  
「星の終焉(超新星爆発後)の再現」



中性子検出器

# 大阪大学・核物理研究センター *Research Center for Nuclear Physics (RCNP)*

- 加速器(AVF・リング)
  - 陽子を光速の0.7倍に加速
- 特色
  - 世界最高品質の加速性能
  - 世界最高性能の検出器



中性子検出器



リングサイクロトロン(2,200t)

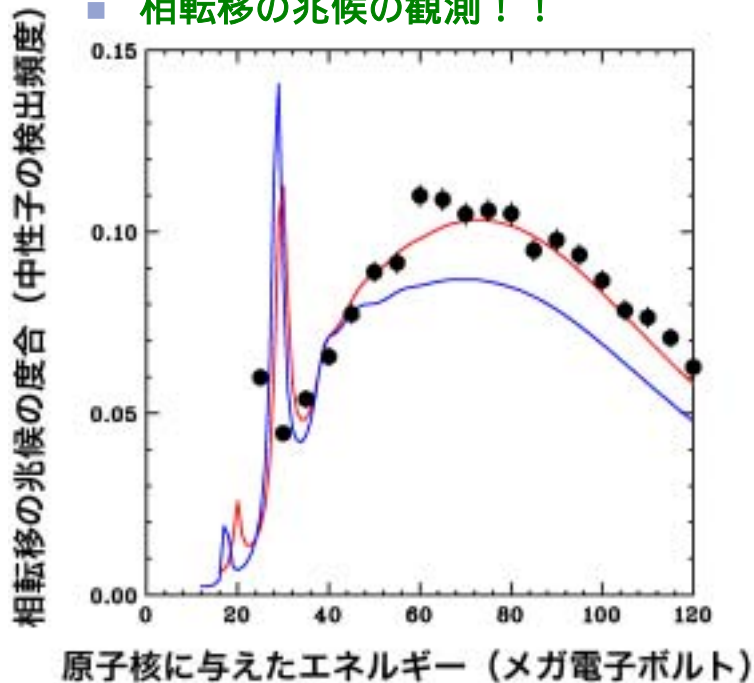


AVFサイクロトロン(450t)

# 相転移の兆候の観測！！

## ■ 相転移の兆候のシグナル(地球上)

- 青線:相転移の兆候が無いとした時の予測
- 赤線:相転移の兆候があるとした時の予測
- 相転移の兆候の観測！！



## ■ カシオペア座「3C 58」(宇宙)

- 1181年の超新星爆発で生成(「明月記」)
- 100万度より低い(超低温の中性子星)
- 相転移で冷却が促進

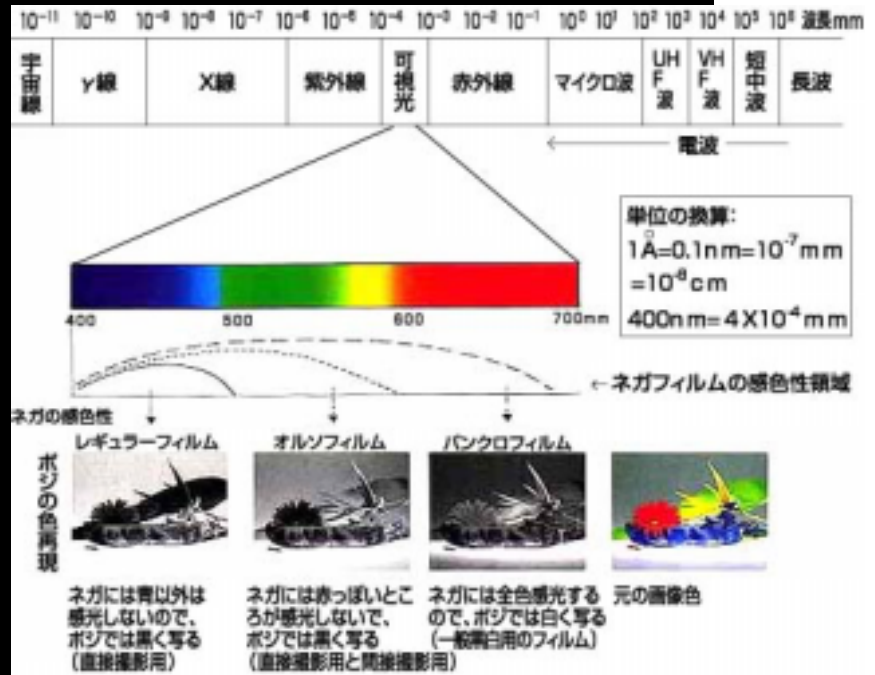


# 「加速器」の粒子線治療への応用 放射線の人体への影響

X線・可視光の1/10000の波長

低エネルギー

(加速器)



加速器からの陽子・アルファ粒子等を用いた癌治療

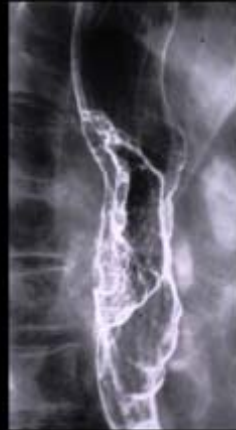
癌細胞だけを集中的に破壊

臓器や体の形をあまり損なわない(社会復帰への配慮)

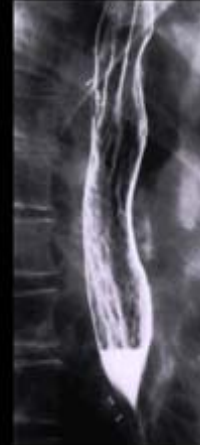
# 「粒子線」による癌治療の実際

## 膵臓癌の場合

治療前



治療後



# 放射線の応用 色とりどりの菊の花

## ■ 菊の

- 
- 
- 

## ■ 放射

- 
- 

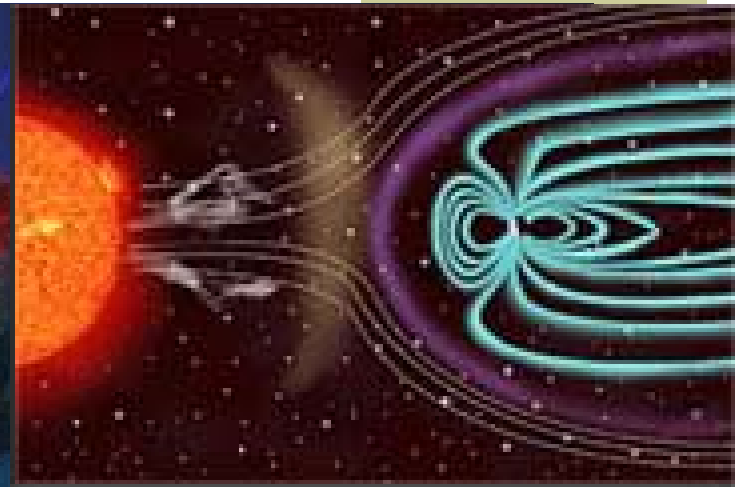
## ■ 組織

- 
- 



# 「宇宙」にある「加速器」

- 本
- 地
- 本

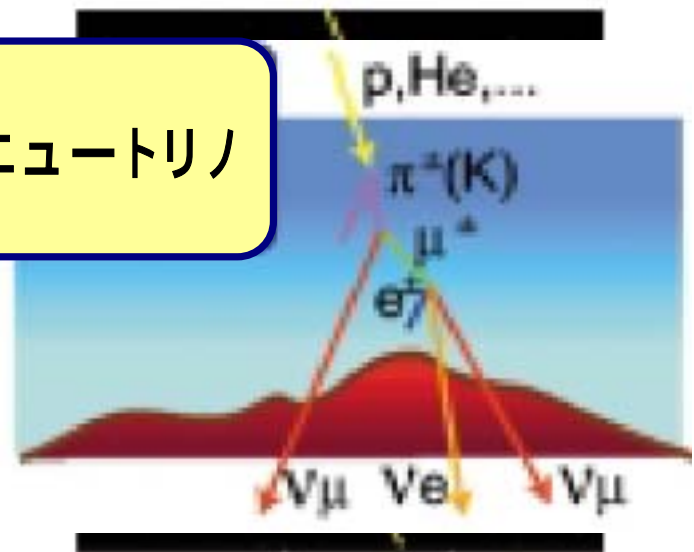


# 「自然」と「人工」のニュートリノ(幽霊粒子)

- ニュートリノ(幽霊粒子)
  - 電荷:ゼロ
  - 重さ:ゼロ / 非常に軽い  
(現在の標準理論ではゼロを仮定)
- ニュートリノの発生源
  - 超新星爆発(SN1987A)
  - 太陽
  - 大気中(大気ニュートリノ)
- もしニュートリノに重さがあったら...
  - 標準理論は破綻  
(何らかの修正が必要)
  - ニュートリノは「旅」をするうちに  
変身する
  - 地球の上から来るニュートリノと下  
地球を突き抜けて来るニュートリノ  
「顔」が異なる(変身している)

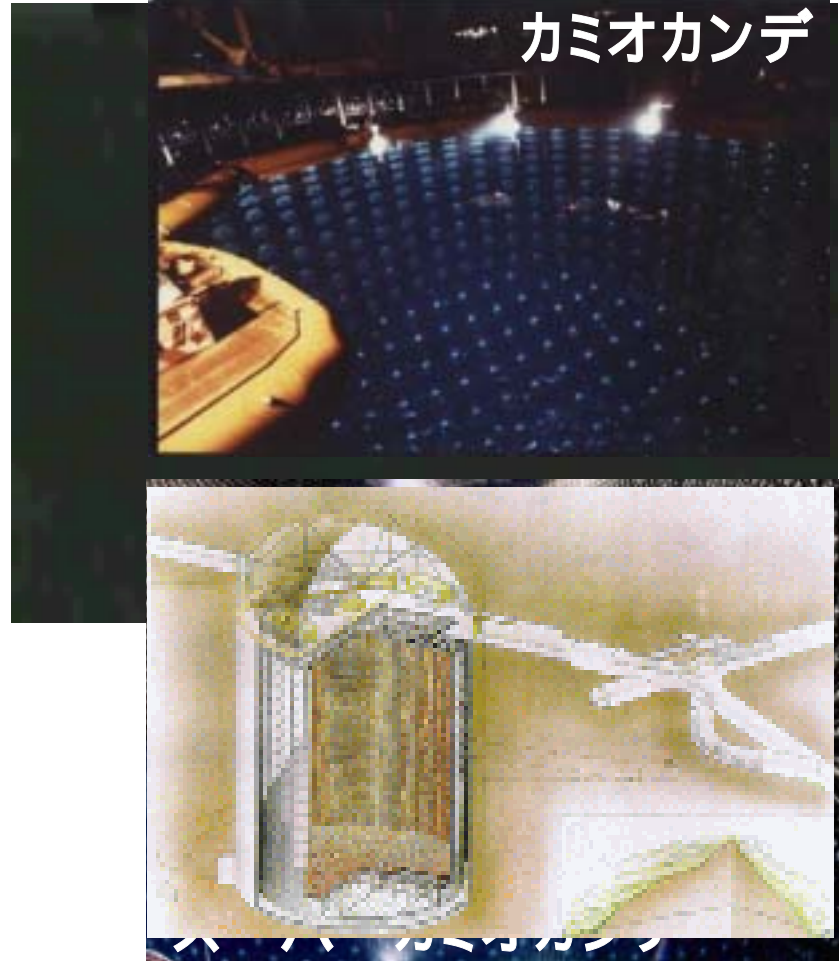


大気ニュートリノ



# 幽霊粒子「ニュートリノ」を捕まえる

- ニュートリノと水の反応
  - 極まれにニュートリノが水(陽子)を蹴飛ばす
  - 蹴飛ばすと、チェレンコフ光が発生
  - 発生した光を検出
- カミオカンデ
  - 神岡鉱山地下1000メートル
  - 純水3,000トン
- スーパーカミオカンデ
  - カミオカンデの後継
  - 純水50,000トン
  - 光検出器11,200本



# 捕まえられた「幽霊粒子」ニュートリノ

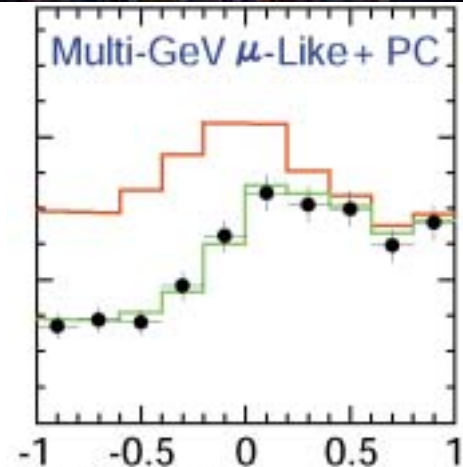
## SN1987Aからのニュートリノ

- 15万年前、大マゼラン、タランチエラ星団の隣にあった青い超巨星が超新星爆発
- 10兆個を超えるニュートリノが日本時間1987年2月23日16時35分35秒に飛来
- そのうちの11個をカミオカンデで検出
- 小柴先生(東京大学名誉教授) 2002年ノーベル物理学賞受賞

## ニュートリノの「変身」の観測

- 赤線: 「変身しない」場合
- 緑線: 「変身する」場合
- 黒丸: 実験値(スーパーカミオカンデ)

ニュートリノは「変身する」  
 ニュートリノは質量を持つ  
 (数年後のノーベル賞)



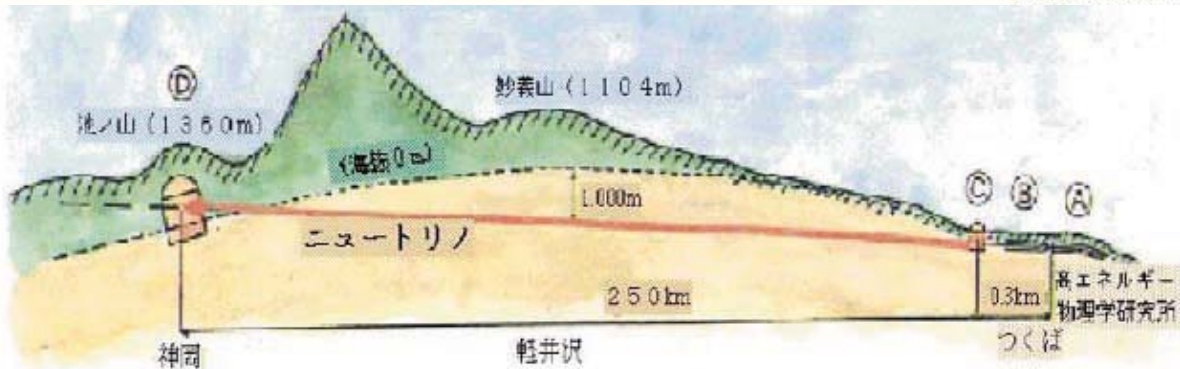
# 「宇宙空間」から「地上」へ K2K つくば 神岡間 長基線ニュートリノ振動実験

ニュートリノビームの飛行方向と観測装置の配置



神岡 大 神岡間 長基線ニュートリノ振動実験公式HP  
<http://neutrino.kek.jp/index-j.html>

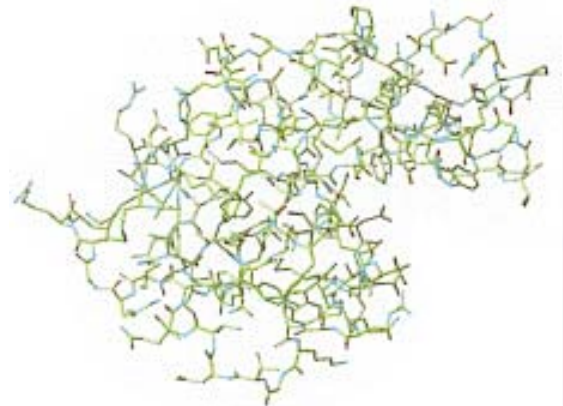
前置観測装置



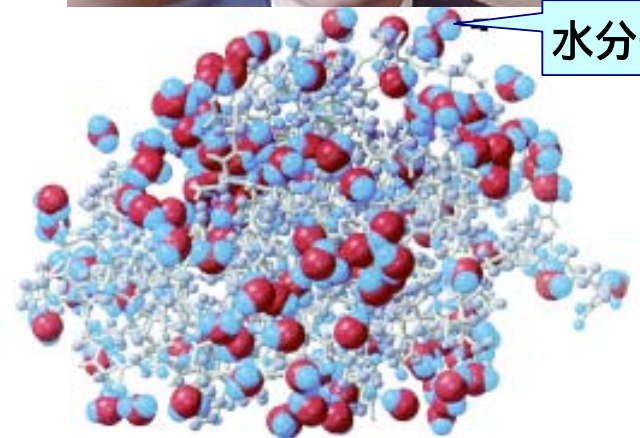
構 (KEK)  
速器

# 素粒子と生命の融合

- 2002年ノーベル化学賞
  - 田中耕一氏(島津製作所)
    - たんぱく質の精密質量測定法の開発
  - ジョン・B・フェン氏(米国・コモンウェルス研)
  - クルト・ビュートリッヒ氏(スイス連邦工科大学)
    - たんぱく質の立体構造解析
- 中性子で観るたんぱく質
  - 水分子が中性子で見える
  - たんぱく質の立体構造は水分子で保たれている



X線で見えたたんぱく質



水分子

中性子で見たたんぱく質

# おわりに

- 小柴先生(2002年ノーベル物理学賞)のお言葉
  - モーツァルトのピアノ曲は彼でなければ生まれなかったが、相対性理論はアインシュタインでなくてもほかの科学者がいずれ発見しただろう
  - 自分が達成できなくても、ほかの誰かがニュートリノをとらえることができたと思う
  - 最初に到達できることは科学者みょうりにつきる
    - 15万年前に、たまたま超新星爆発が起こった
    - 1987年2月23日にニュートリノ検出器がなければならなかった
- 科学は万人に理解できる共通の知識・財産である
  - 正しい知識(自然放射能等)
  - 財産の有効活用(放射線治療等)
  - 純粹な人としての好奇心
    - 我々はどこから来たのか?
    - 我々はどこへ向かうのか?
    - 宇宙の果ては?
- みなさんが科学の担い手である