

核構造と元素合成の理解へ 向けて



谷畑 勇夫
大阪大学・北航大学

杉本記念シンポジウム

Nuclei, The Playing Field of Physics 30年史

2013, 4, 6-7

何をするにもその理由を説明できないといけない

なぜ今この研究をしているのかを問い直してみる

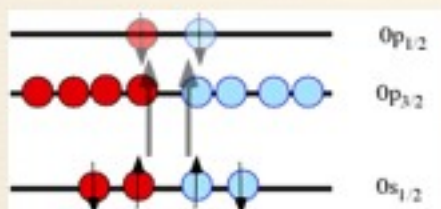
- ❖ 杉本先生と始めた不安定核ビーム
 - ❖ 話 (鏡核の半減期、重イオン反応、不安定核ビーム)
- ❖ 不安定核ビームが開いた研究
- ❖ 宇宙核物理学への疑問
- ❖ 核構造の疑問
- ❖ テンソル力の研究にたどり着くまで

研究課題

- ◆ 鏡核の半減期測定
 - ◆ 鏡核のミラーモーメント **isoscalar moments**のテンソル力の重要性 (有馬、清水)
- ◆ ^{12}B - ^{12}N β 崩壊非対称度 (Gパリティ)
- ◆ 重イオン反応
 - ◆ 準弾性核子散乱成分、パイオン生成
- ◆ 核子の高運動量成分(p, pd)反応
- ◆ 不安定核ビーム
 - ◆ 半径、運動量分布、中性子ハロー、スキン、魔法数
 - ◆ ビッグバン元素合成、R-過程
- ◆ テンソル力と核構造

Isoscalar moments need other explanations Arima 1985.

- ◆ If a nucleon-nucleon interaction is central, the total spin is a constant of motion.
- ◆ The expectation value of spin in nuclei with and LS-closed shell $\pm$ one nucleon are then the same as their Schmidt values, irrespective of the degree of configuration mixing.
- ◆ In order to modify the values, one has to have non-central interaction.
- ◆ Pion exchange potential include a strong tensor force.

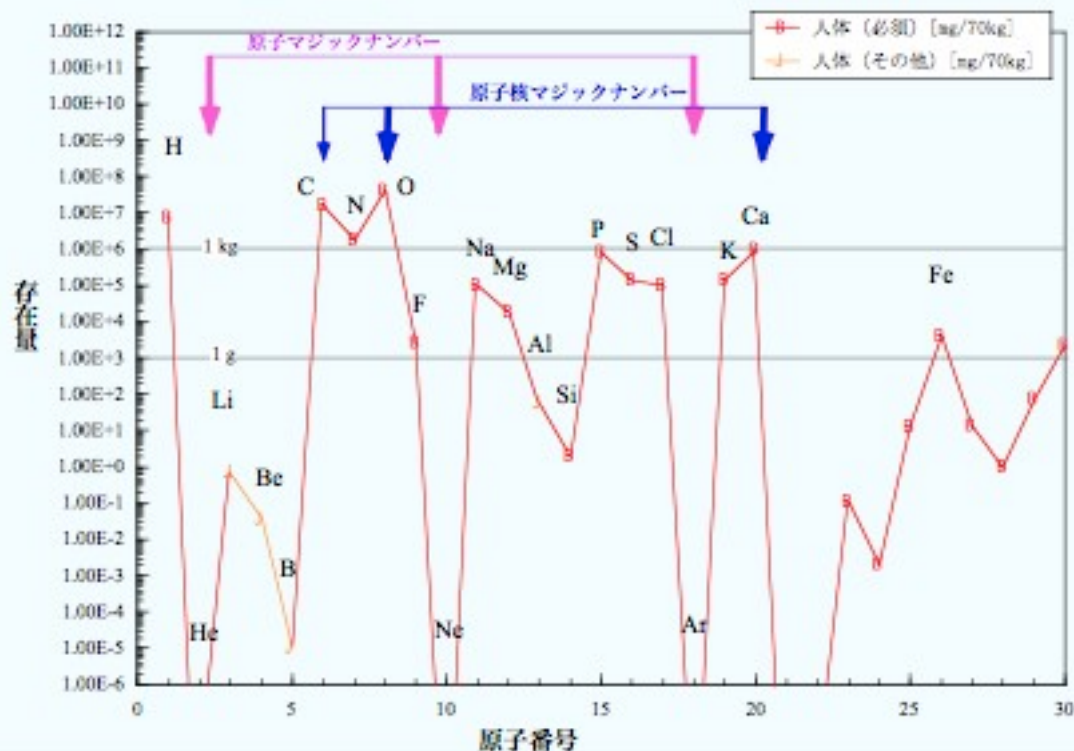


$\Delta L=2, \Delta S=2$
p-n pair: yes
n-n, p-p pair: no

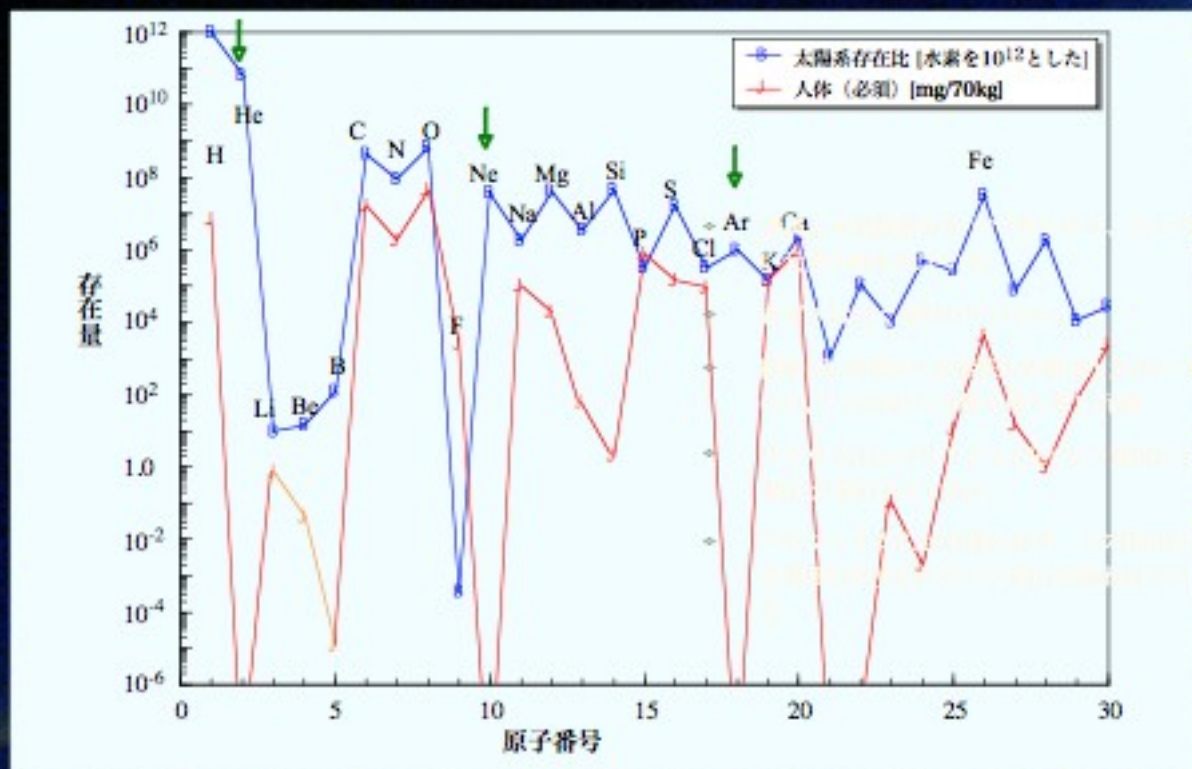
研究課題

- ◆ 鏡核の半減期測定
 - ◇ 鏡核のミラーモーメント
- ◆ ^{12}B - ^{12}N β 崩壊非対称度 (Gパリティ)
- ◆ 重イオン反応
 - ◇ 準弾性核子散乱成分、パイオン生成
- ◆ 核子の高運動量成分(p,pd)反応 高運動量成分を選択的に選び出す反応である！
- ◆ 不安定核ビーム
 - ◇ 半径、運動量分布、中性子ハロー、スキン、魔法数 中性子ハロー中の違ったパリティの軌道の混合
魔法数の変化
 - ◇ ビッグバン元素合成、R-過程、元素と我々 中性子過剰核の性質と、構造
- ◆ テンソル力と核構造 ←

人体は軽い元素で作られている

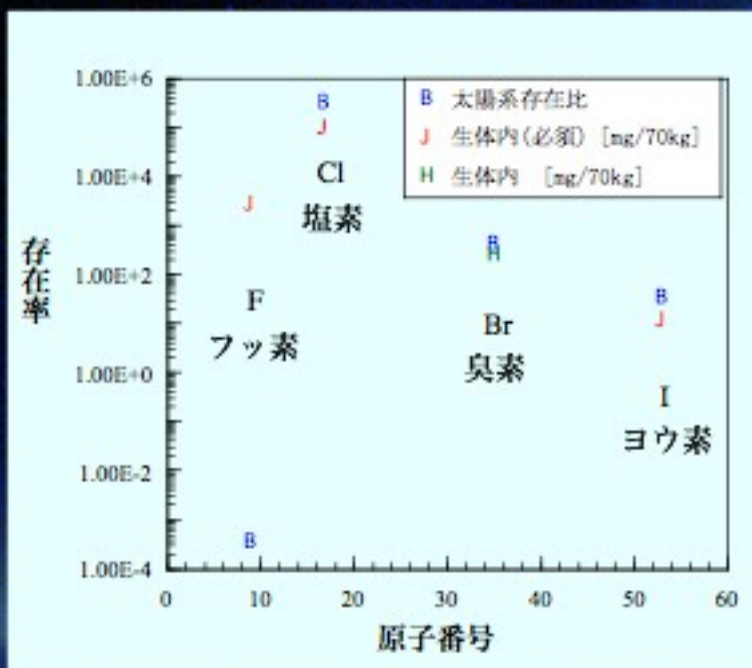


宇宙と生体内の軽元素



17族元素

2	13	14	15	16	17	18
					He	
					4.002602	
	5	6	7	8	9	10
	B	C	N	O	F	Ne
	10.811	12.011	14.00674	15.9994	18.9984032	20.1797
	13	14	15	16	17	18
	Al	Si	P	S	Cl	Ar
	26.981538	28.0855	30.973762	32.059	35.4527	39.948
30	31	32	33	34	35	36
Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
65.38	69.723	72.61	74.92159	78.96	79.904	83.80
48	49	50	51	52	53	54
Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
112.411	114.818	118.710	121.760	127.60	126.90447	131.29
80	81	82	83	84	85	86
Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
200.59	204.3833	207.2	208.98037	[209]	[210]	[222]
元素						
元素						
87	88	89	90	91	92	
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	
223	226	227	232	231	238	
101	102	103	104	105	106	
Db	Sg	Bh	Hs	Mt	106	
[262]	[263]	[264]	[265]	[266]	[267]	



- ・ Fは化学的に重要なので使用したいが、宇宙存在量が少ないので、最も有用な役割を Clにゆだねている。実はLiも、...
- ・ Cl, Br, I は宇宙存在比と人体存在比がほぼ同じだが、Brは生物学的働きはない。生物学的理由？ 環境的理由？

私たちを作っている元素は

- ・ 化学的な理由で選ばれている（希ガスはない）。
- ・ 元素合成過程により選ばれている
 - ・ なぜLi, Be, Bが少なくC, N, Oが多い？
 - ・ なぜFが少ない？ (LiF, NaCl...)
- ・ 生物学的理由で選ばれている。（???）

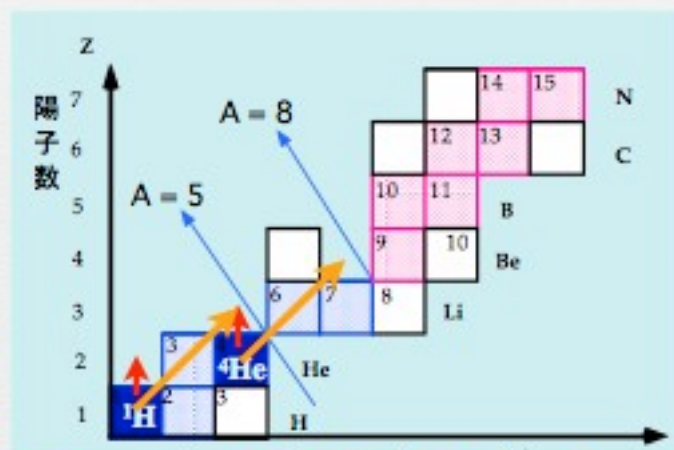
元素の変化は核反応でのみ可能である！

なぜ、Liが少ない？

- ・ ビッグバンでは ${}^4\text{He}$ までが作られた
($A=5$ のギャップ)
- ・ 星の中では？

Big Bangでは、中性子と陽子が混在する、
恒星中では陽子、 ${}^4\text{He}$ が主に存在する。

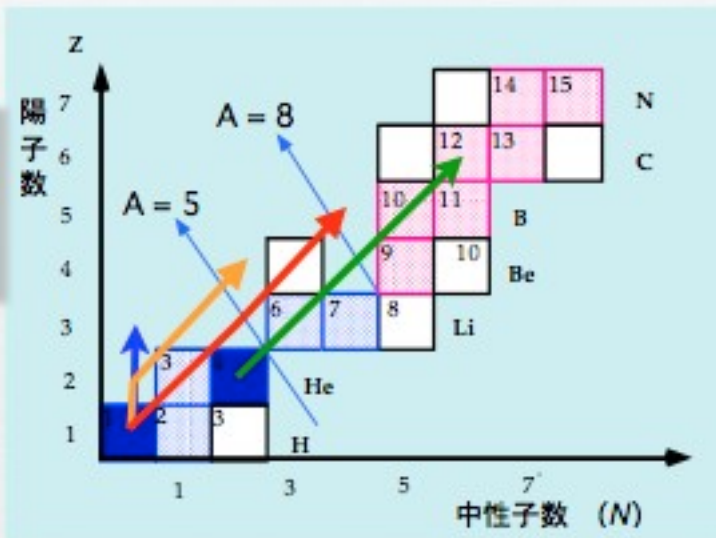
陽子の融合
 ${}^4\text{He}$ の融合



二体の融合では重い元素は作れない

三体の融合？

3個の ^4He が融合したときだけ、寿命の長い原子核(^{12}C)になる。



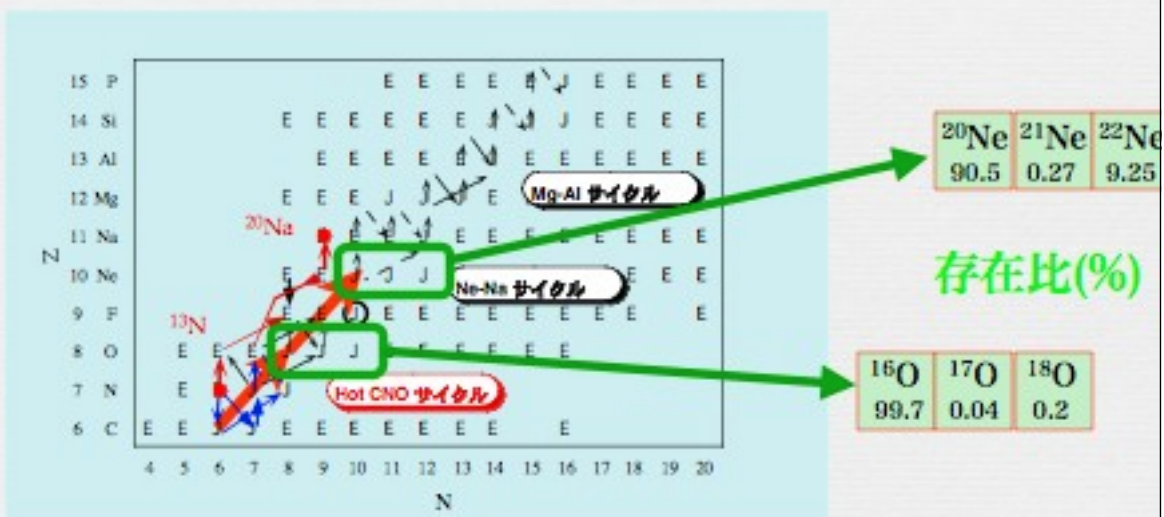
Li, Be, Bはスキップされるので、存在比が少ない

どうしてFが少ないのか？

・Fの安定同位元素は ^{29}F

・ ^{16}O に比べて中性子数が2個多い

・恒星中には中性子はほとんどない



元素合成はビッグバンや星の中で

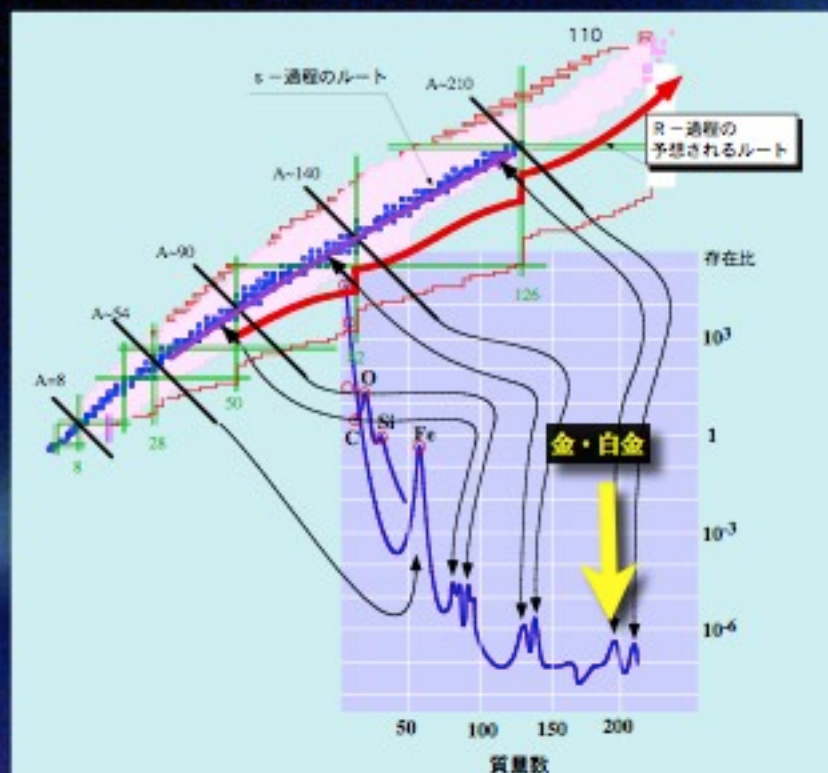
- ✧ 元素合成は安定な原子核を徐々に作る
- ✧ 元素合成は水素から始まった

🕒 とすると合成は鉄、ニッケルで止まる。

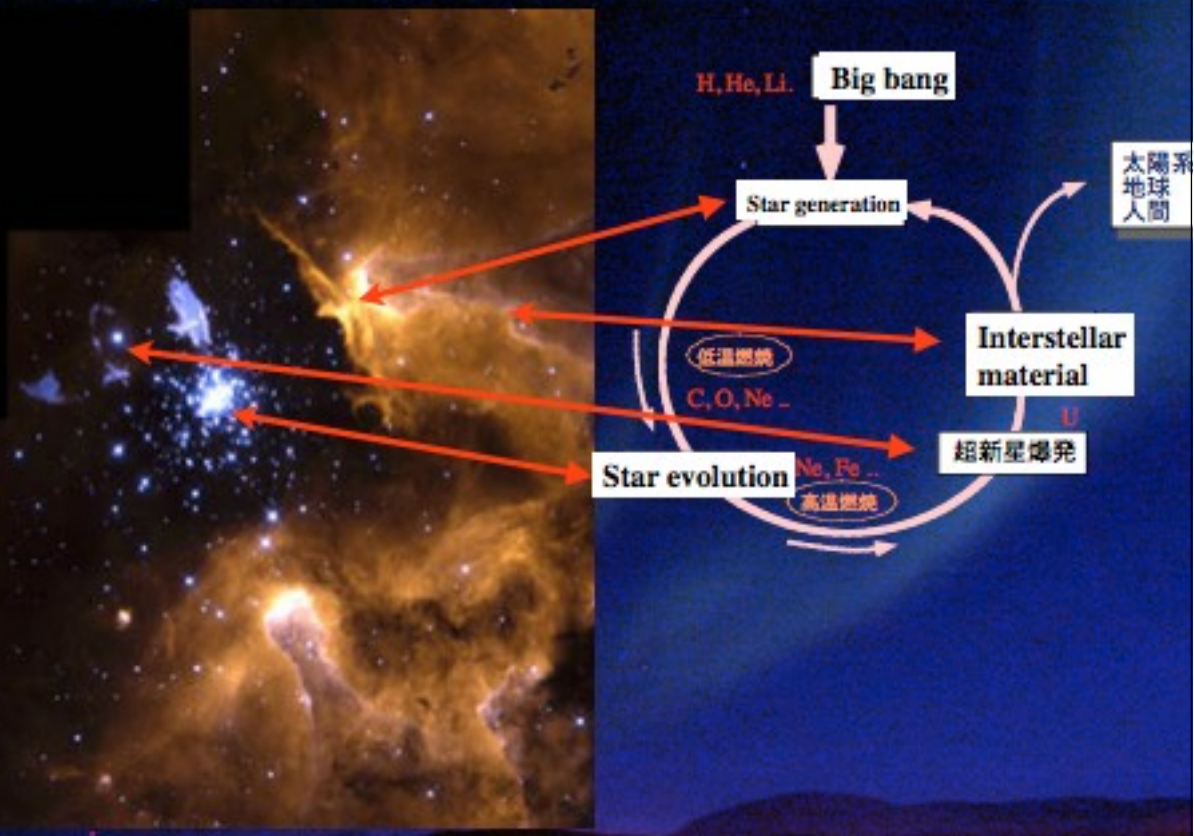
- ✧ 金やウランはどこで作られたのか？

二回目のバン（超新星）

- ◆ s-過程とr-過程
- ◆ s: マジックナンバーと完全に一致
- ◆ r: マジックナンバーのちょっと下
- ◆ r-過程は超新星爆発で、
- ◆ Feのコアが壊れて中性子が大量に放出。
- ◆ 金・白金やウランを作った。



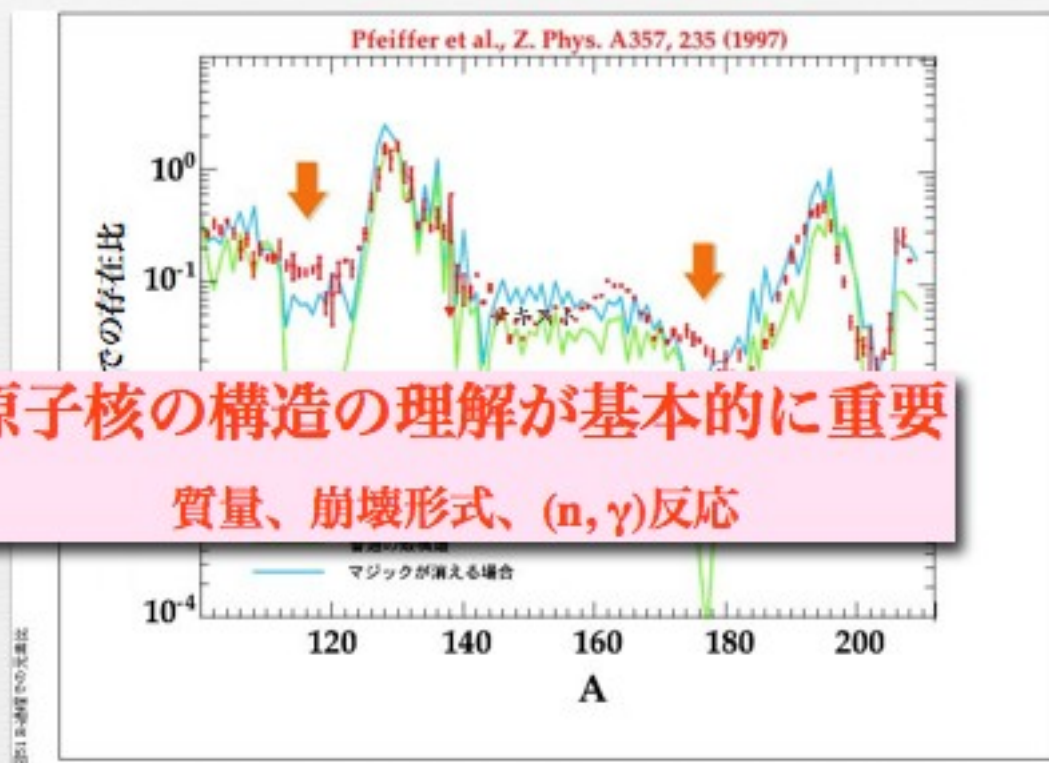
星の輪廻



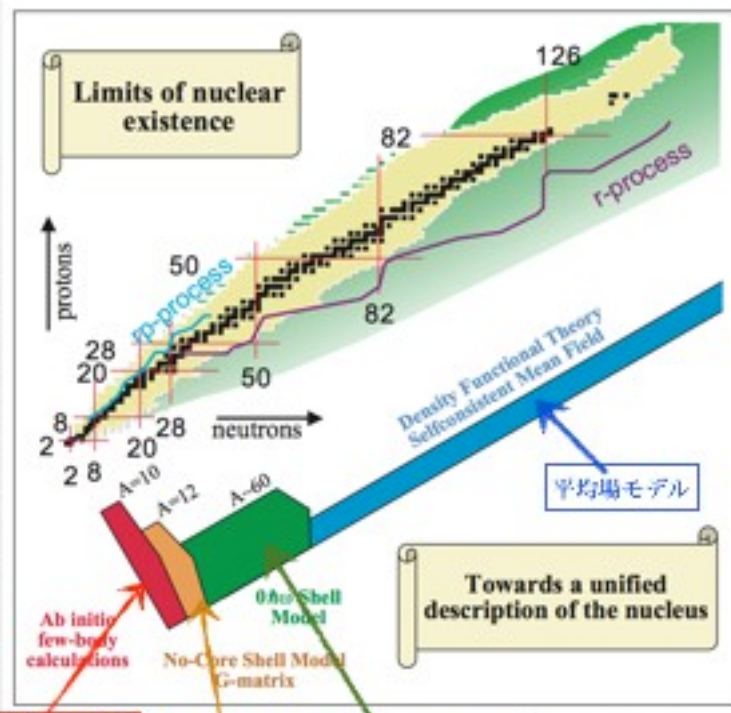
自然への恩返し

ところが、

R-過程の理解は？



現在の核物理学は 十分な情報を与えられるか？



基本相互作用からの計算
ab-initio calc.

最近の理論発展

シェルモデル

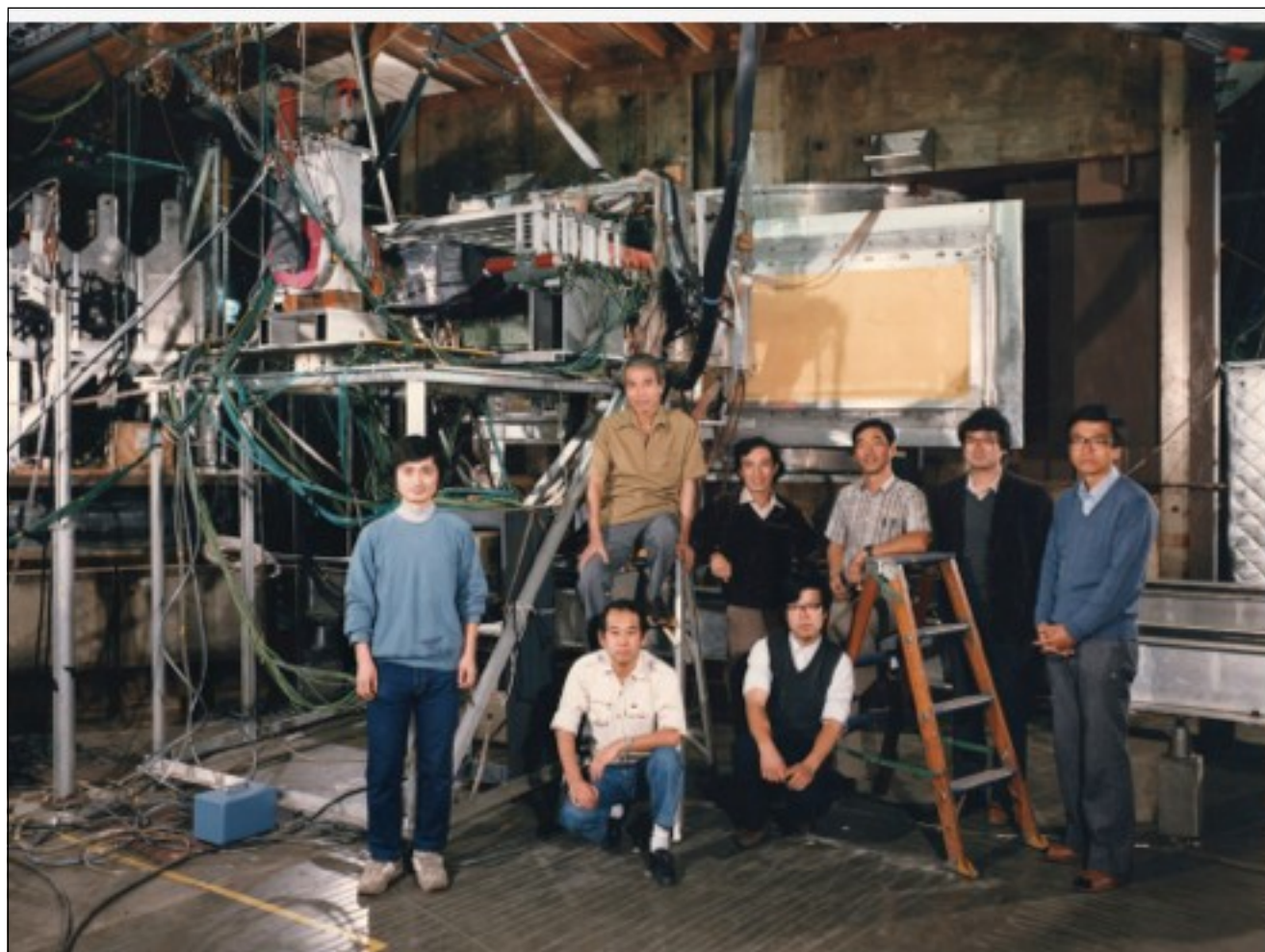
実験技術の発達

- 核物理は加速ビームを用いて反応をさせることにより情報を得てきた。（ラザフォード以来ずっと）
- 80年代までは、加速する粒子は素粒子か地上に存在する安定原子核のみであった
- そのため、安定線からはなれた短寿命核の構造研究は非常に困難であった。
- 80年代中頃に不安定核を入射粒子として反応を起こさせる実験法を開発、それが世界中に広がって、不安定核の構造の研究が急速に進んだ。

発見また発見

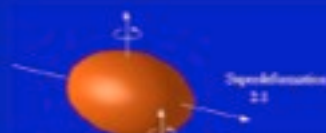
不安定核には

- ・ これまでになかった形態がある。
- ・ 新しい励起モードがある。
- ・ 魔法数（核子軌道）が変化する。



原子核の形

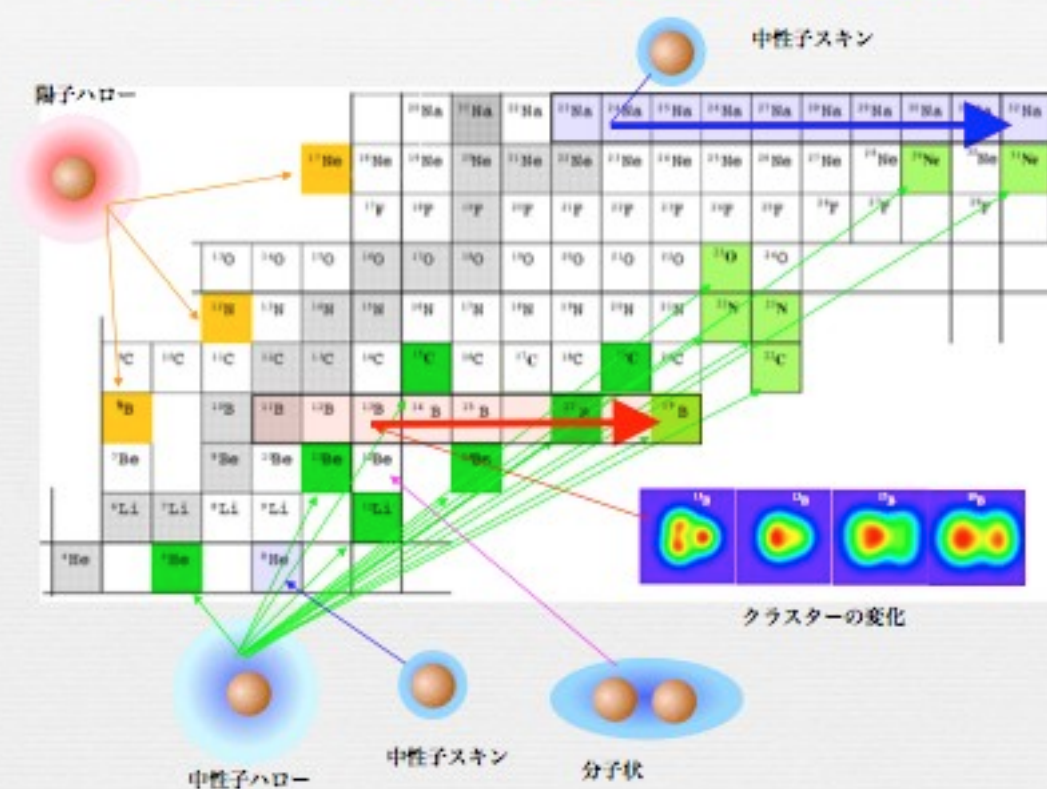
安定核



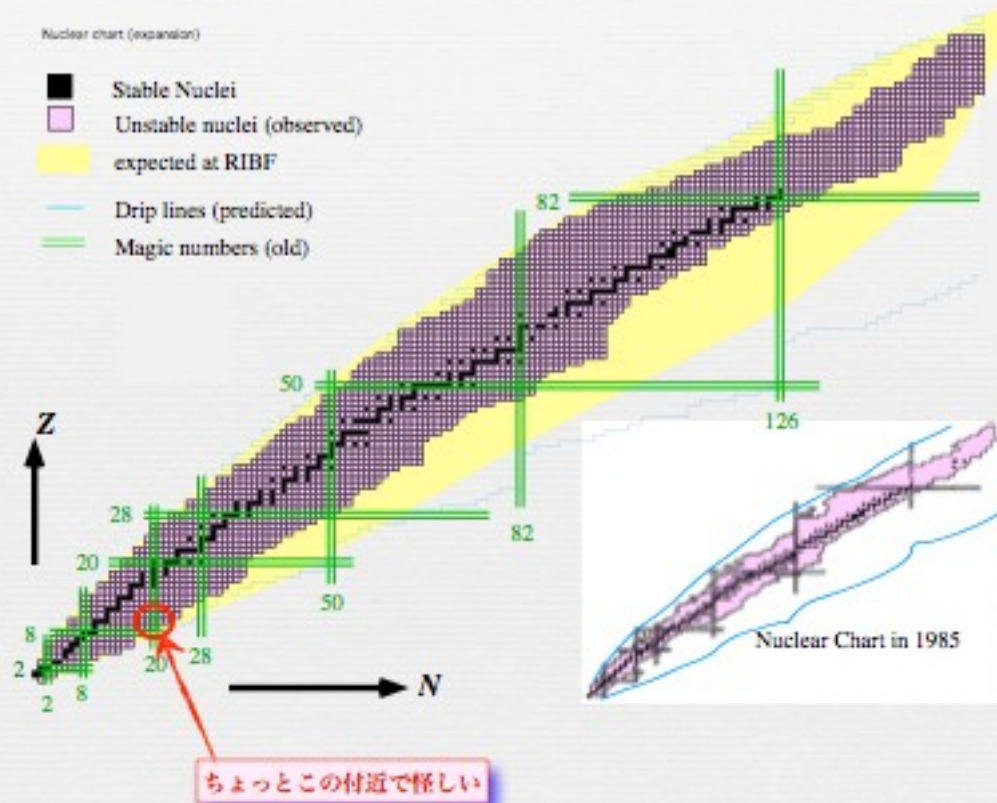
変形核

不安定核で発見された種々の核構造

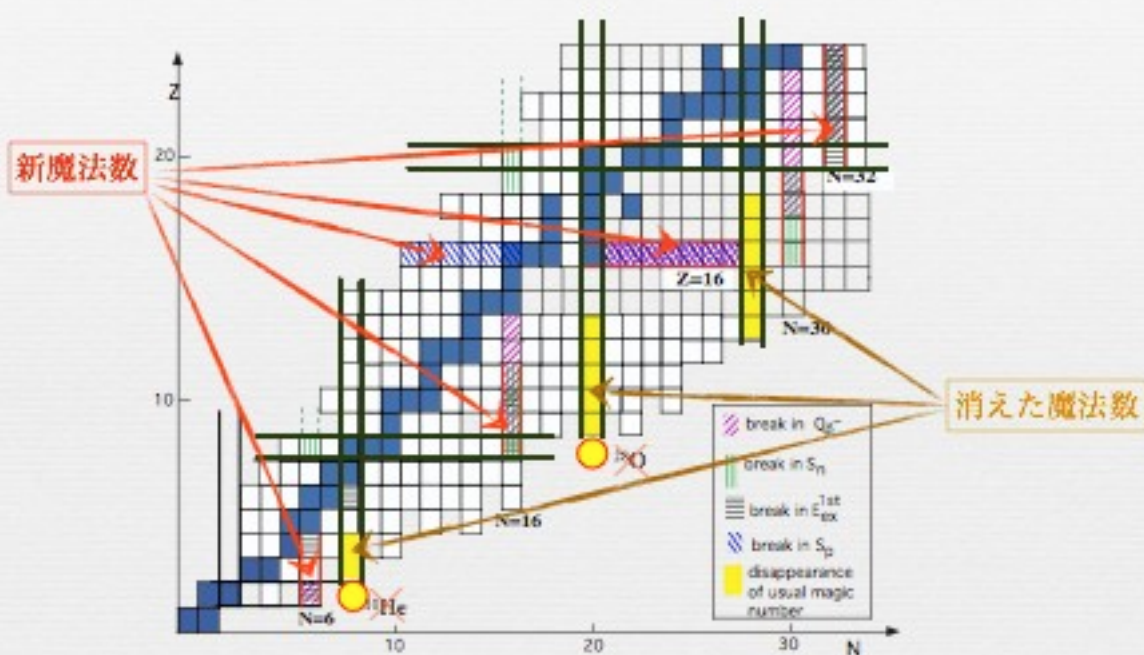
おかしい原子核はまれではない



過去の魔法数の考え方



ところが不安定核の研究から



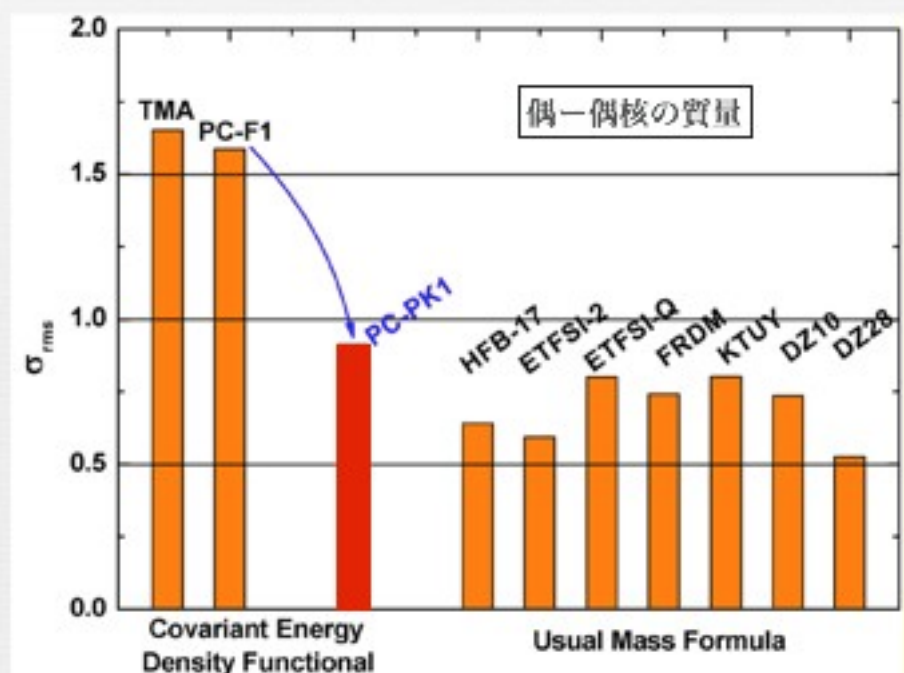
安定核：2、8、20、28、...

安定線からはなれた核：2、6、16、30、...

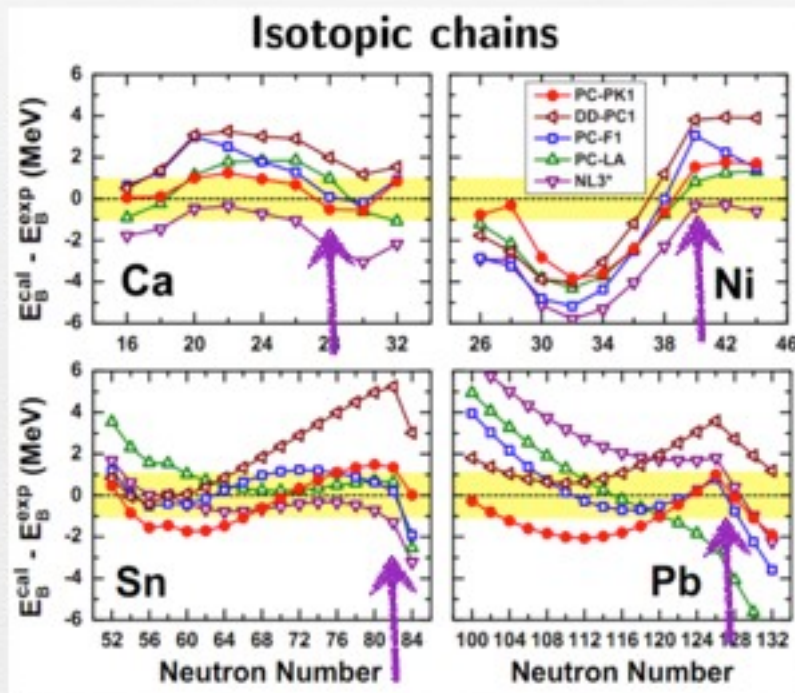
興味を持った一つ一つのことに熱中していれば、
そのときは散らばっている点のような別々の存在
が、将来にはつながり合ってすばらしい一つの大き
なものとなる。

スティーブ・ジョブス

相対論的平均場モデル



実験値との差を詳しくみると

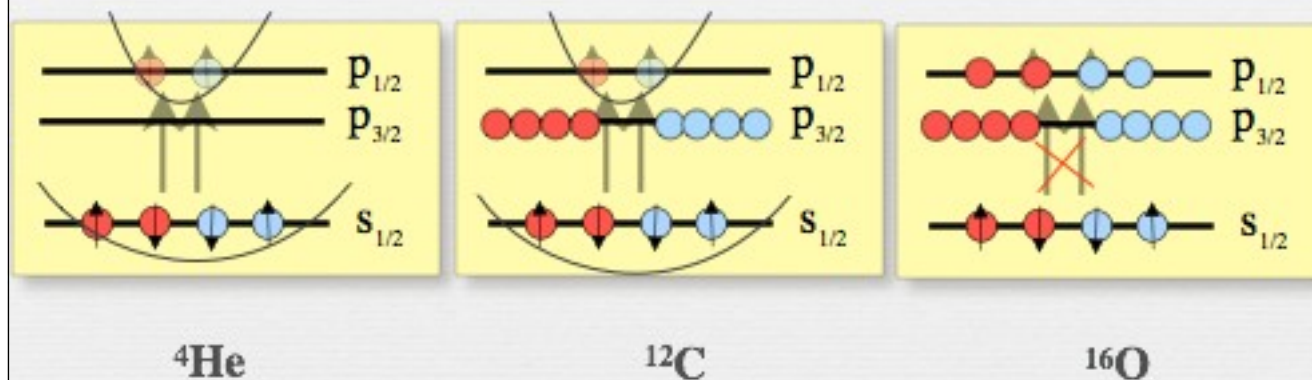


シェルが変化するところで不連続になる
＝パラメータが大きく変化する

シェルが閉じると テンソル力で許されなない配位が生まれる

テンソル力の
選択則

$\Delta L=2, \Delta S=2$
p-n pair: yes
n-n, p-p pair: no



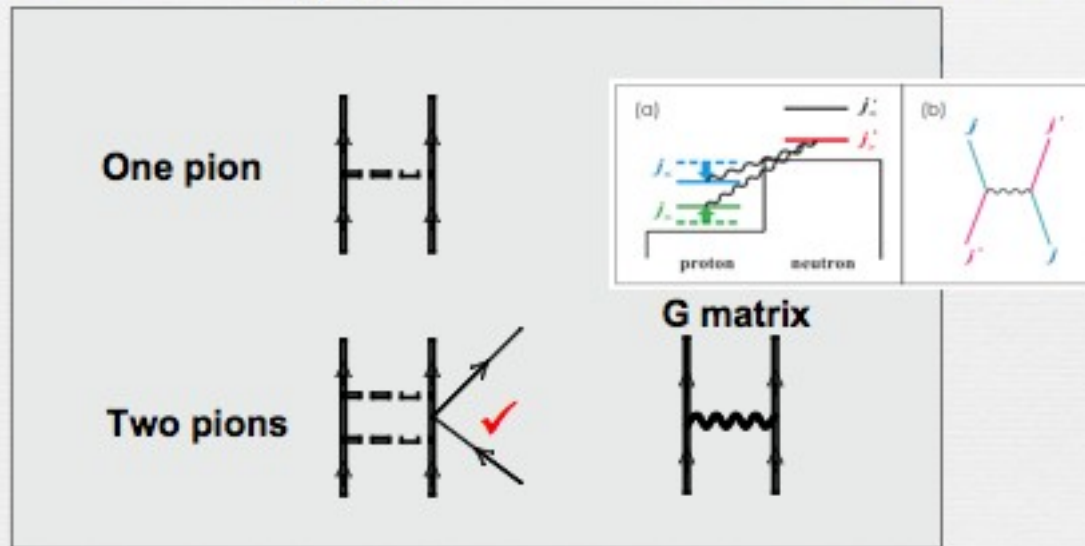
${}^4\text{He}$ や ${}^{12}\text{C}$ で大きな引力を作っていたテンソル力の効果が酸素ではブロックされる

jj閉殻とLS閉殻の違い

核模型としてのテンソル力

- ・ シェルモデルや平均場近似と現実との違い

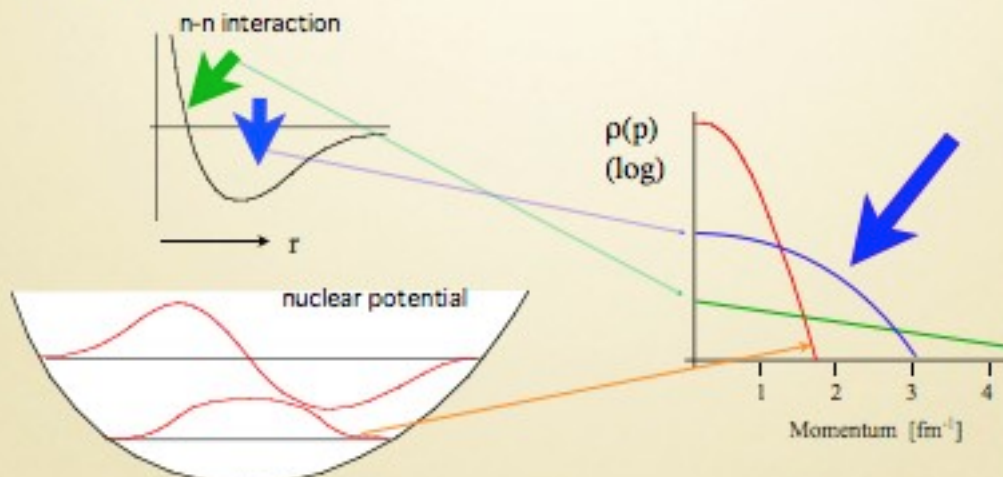
pion exchange: $\propto S_{12} \frac{q^2}{m^2 + q^2}$ ← 移行運動量 → 移行運動量大きいほど引力が強い



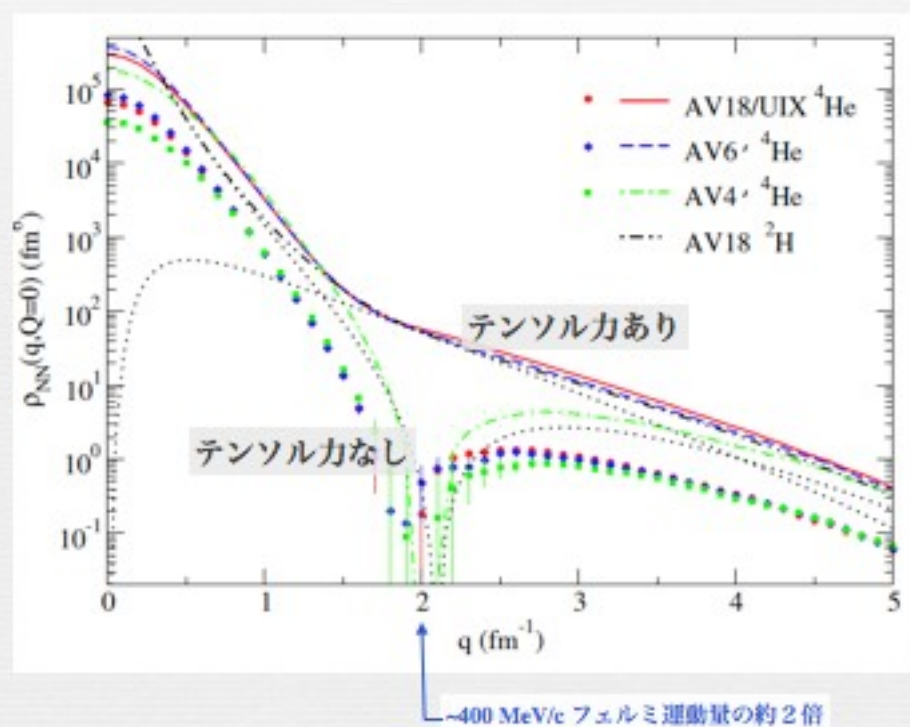
✓ High Momentum Component

Tensor forces as high momentum WAVE FUNCTIONS

- Range of tensor force is about the distance of pion exchange, and thus gives momentum component specific to it.



ab-initio計算による核内核子の運動量分布



大阪大学での最近の実験

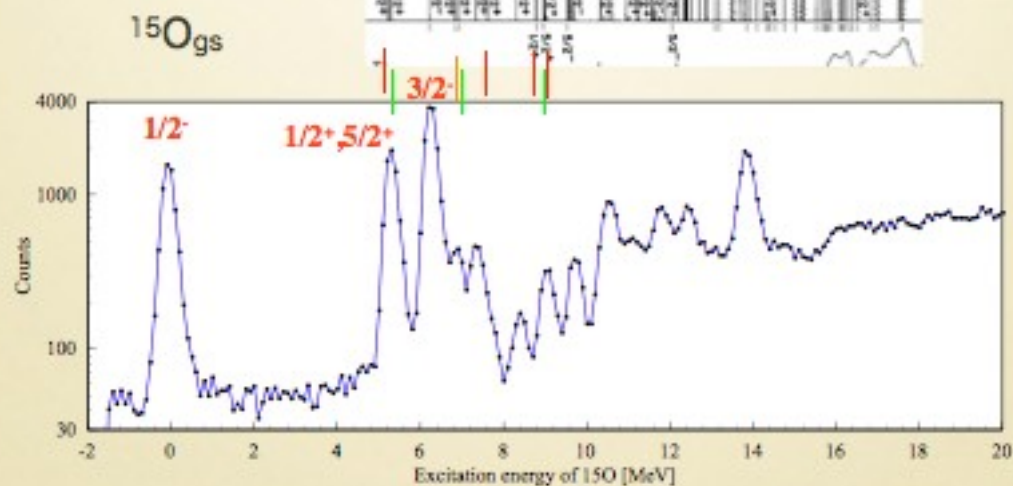
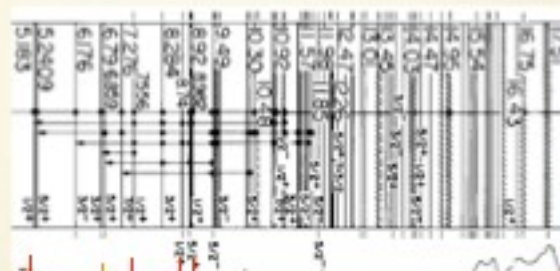
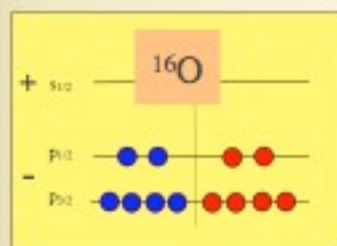


$^{16}\text{O} + p \rightarrow ^{15}\text{O} + d$
中性子ピックアップ反応
高運動量を持った中性子をピックアップ

$^{16}\text{O} \text{ (P, D) } ^{15}\text{O} \text{ AT 400 MEV}$

H.J. Ong et al

arXiv:1205.4296



Transition to $1/2^+, 5/2^+$ is as strong as the transition to the ground state.

AT 45 MEV

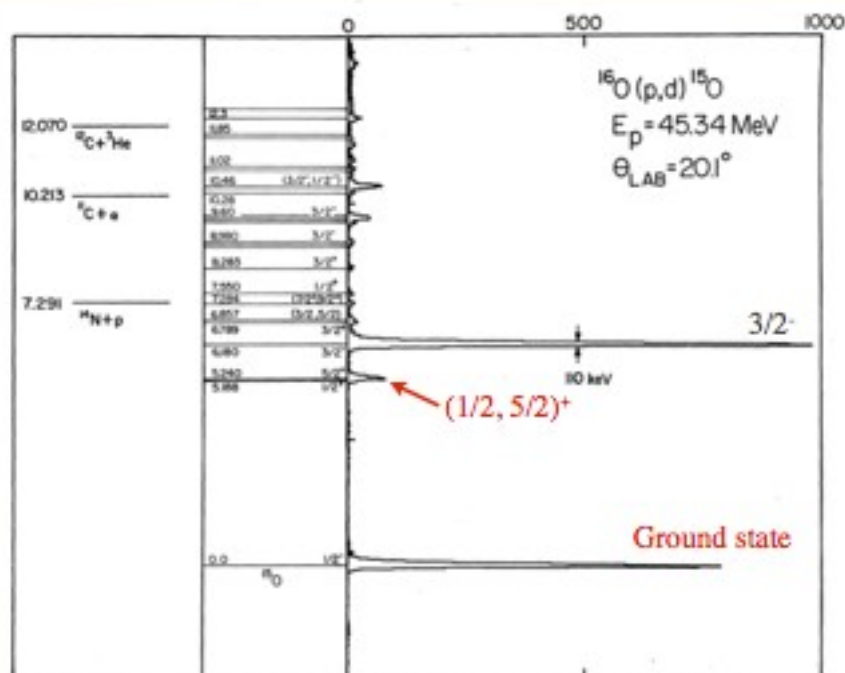
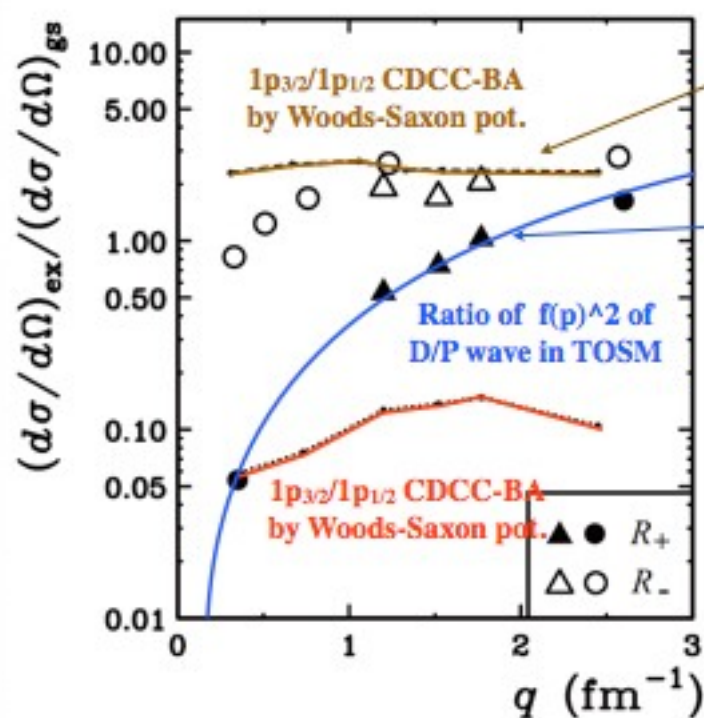


FIG. 2. Energy-level diagram of ^{10}O displayed beside a deuteron energy spectrum from the $^{10}\text{O}(p, d)^{10}\text{O}$ reaction for $E_p = 45.34$ MeV and $\theta_{\text{lab}} = 20.1^\circ$.

テンソル力に関連した状態では 高運動成分が必要

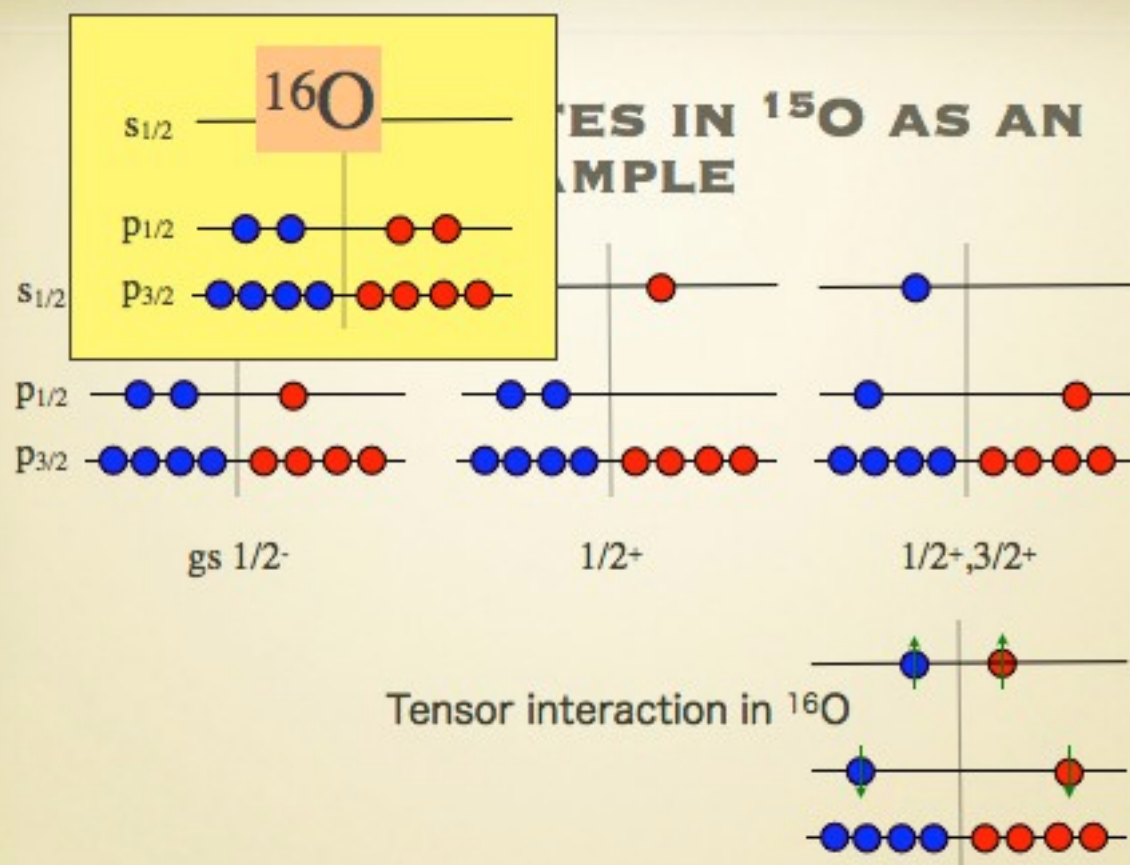


普通の状態($p_{1/2}/p_{3/2}$)の確率の比

テンソルで励起される状態と通常
の状態の(d, s/ $p_{3/2}$)の確率の比

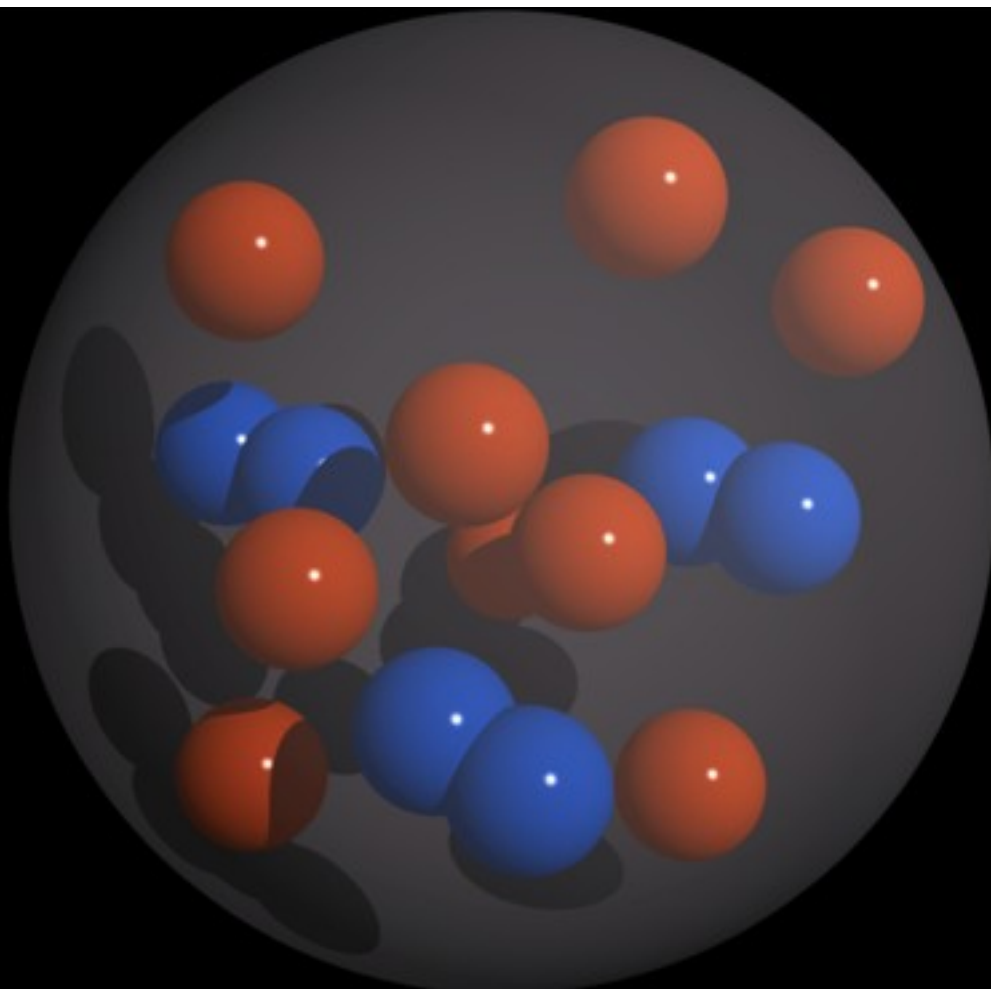
一桁以上増加する

The dashed (dotted) curve represents the ratios of the $1p_{3/2}$ ($1d_{5/2}$) and $1p_{1/2}$, obtained by zero-range CDCC-BA calculations with finite-range correction using the Dirac phenomenological potentials. Wavefunctions are from Woods-Saxon potential.



最後に

- ・テンソル力は核の束縛やその他の性質に非常に重要なのに、
- ・これまで、非常に軽い核をのぞいて、核構造論では陽に含められてこなかったが、
- ・シェル構造の変化（元々シェルモデルの成功の基本である「スピン・軌道相互作用」の起源を含めて）はテンソル力の現れであることがはっきりしてきた、
- ・高運動量の核子の影響が低励起状態の核構造にも強い影響を及ぼしていることがわかってきた、ので
- ・核力に対するパイオンの働きを見直し、
- ・テンソル力を陽に含めた核構造論の構築が必要である、
- ・と信じるから、今の研究を進めている。



まとめ

湯川先生が核力を担う粒子を介しては殆ど忘れられていた。核構造を説明するのには現象論的な2体の計算が、例えばls力はこれらから良くわからな二体力の中にが極端に困難でできていた。

杉本先生

私の今興味を持っている物理を始めた理由は理解していただけましたか？

寝た子は起こされた。

テンソル力は核の結合をつくる上で基本的に重要である事が分かり、テンソル力による核構造の特殊性が観測できるようになってきた。またテンソル力を陽に含めた核構造論もいくつかの発展を見せつつある。この理解は元素合成経路を知るために必要な核構造の情報を、外挿を含めて信じられるものにする可能性を持っている。安定性付近の原子核とそこから遠くはなれた原子核の構造を統一的に理解するためにはテンソル力の理解とそれを取り扱う方法の確立が不可欠のものとなっている。

ご精聴ありがとうございました

Importance of ^4He in nuclei

Binding energy per nucleon [keV]

