

核天体物理创新群体汇报

柳卫平

2010年9月16日

北京，原子能院

- 题目：元素核合成中的关键科学问题研究
- 起止时间：2011年1月-2013年12月
- 项目号：11021504
- 项目组成员
 - 原子能院：柳卫平，李志宏，王友宝，陈永寿，郭冰，连钢，白希祥
 - 国家天文台：施建荣
 - 兰州近物所：何建军
 - 美国圣母大学：唐晓东

- 柳卫平：原子能院，核天体物理群体研究思路
- 李志宏：原子能院，关键核天体反应的间接测量
- 王友宝：原子能院，核天体物理共振能级性质的实验研究
- 陈永寿，原子能院，天体核网络方程
- 施建荣：国家天文台，恒星中一些重要元素的丰度
- 何建军：兰州近物所，天体rp过程中关键核反应截面及共振态性质的研究
- 郭冰：原子能院，中加、中日核天体物理国际合作实验
- 连钢：原子能院，地下核天体物理实验研究
- 白希祥：原子能院，核天体物理重要问题

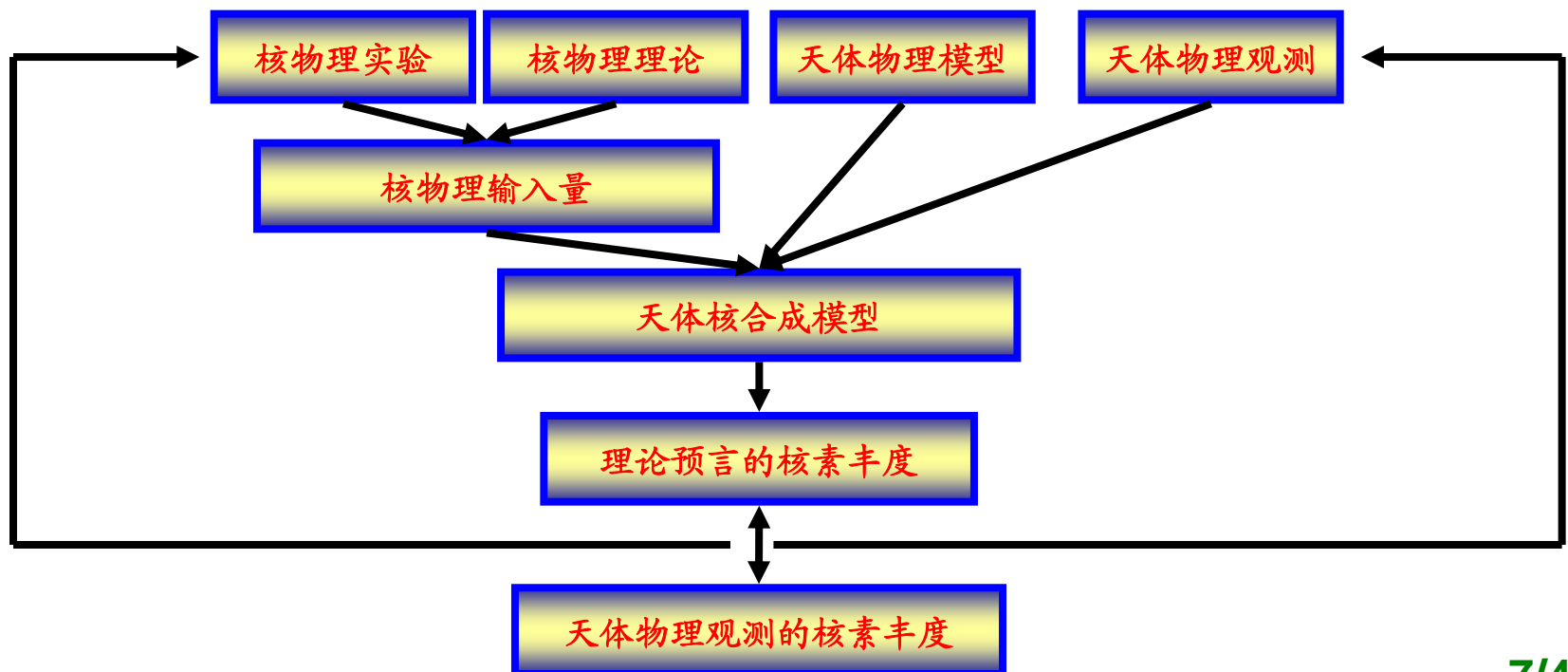
- 群体负责人报告
- 柳卫平：原子能院，核天体物理群体研究思路
- 群体成员报告
- 李志宏：原子能院，天体物理中关键核反应的间接测量
- 王友宝：原子能院，核天体物理共振能级性质的实验研究
- 陈永寿：原子能院，天体核网络方程
- 施建荣：国家天文台，恒星中一些重要元素的丰度
- 何建军：兰州近物所，天体rp过程中关键核反应截面及共振态性质的研究
- 郭 冰：原子能院，中加、中日核天体物理国际合作实验
- 连 钢：原子能院，地下核天体物理实验研究
- 白希祥：原子能院，恒星演化进程中的主要核过程

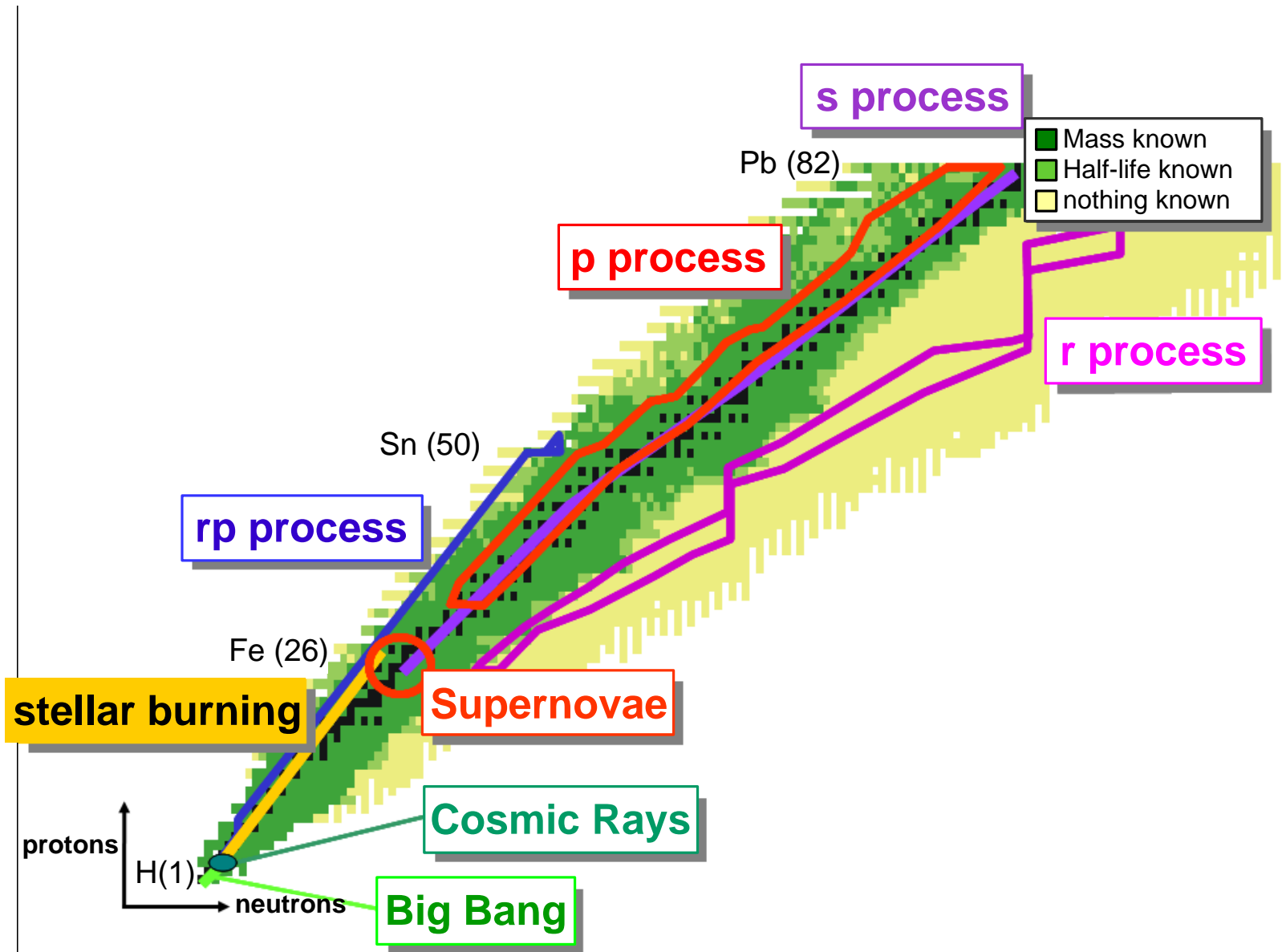
- 核天體物理的前沿
- 群體的研究計劃
- 群體的组织思路

核天體物理的前沿進展

核天体物理的研究内容

- 对微观尺度(10^{-15} m)的核过程的了解, 可以解释对宇观尺度(10^{14} m)的天文观测, 构成了学科发展和交叉的动力和挑战, 使核天体物理始终处于物理学科的前沿
- 应用核物理的知识和规律阐释恒星中核过程产生的能量及其对恒星结构和演化的影响, 自然界中化学元素的起源





核天体物理的形成和发展



- **30年代Hans Bethe**等提出太阳和恒星的能源主要来自氢通过**pp**反应链和**CNO**循环转化为氦的聚变反应的理论。获得**1967年度诺贝尔物理奖**，该工作开辟了核天体物理这一交叉学科

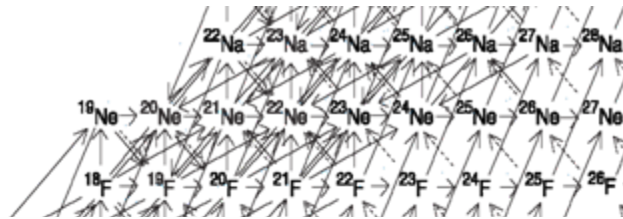


- **William Fowler**等人对恒星演化过程中的核反应进行了系统的实验和理论研究。获得**83年度诺贝尔物理奖**



- **Raymond Davis**和**Masatoshi Koshihara**因中微子的探测与**Riccardo Giacconi**分享**2002年诺贝尔物理奖**

元素合成网络和核物理输入量



Relative probability

Maxwell-Boltzmann distribution

exp

- 挑战
- 截面 → 强流, 间接
- 能量 → 间接, 外推
- 强度 → 装置, 探测
- 束流 → 装置
- 本底 → 地下, 符合
- 数据库 → 实验, 理论

E_0

ing through
nb barrier
($-b/E^{1/2}$)

度

pernoyae,
neutron stars

Energy

site disputed

j, k, l

10^{-5}

0

50

100

150

200

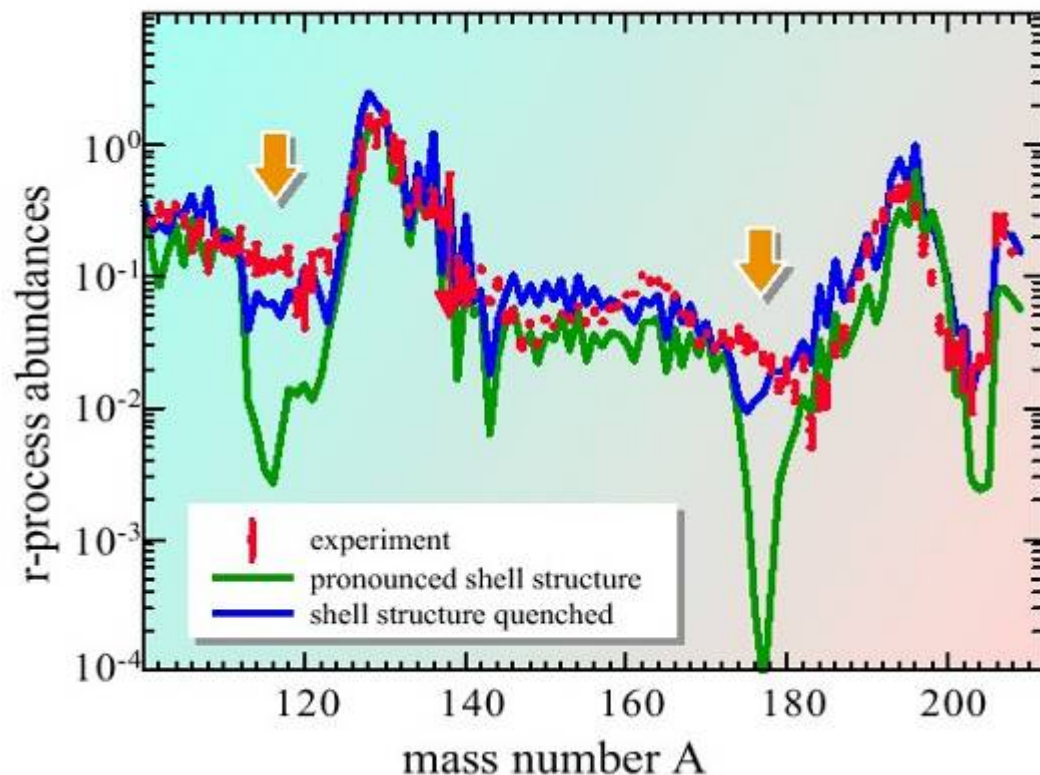
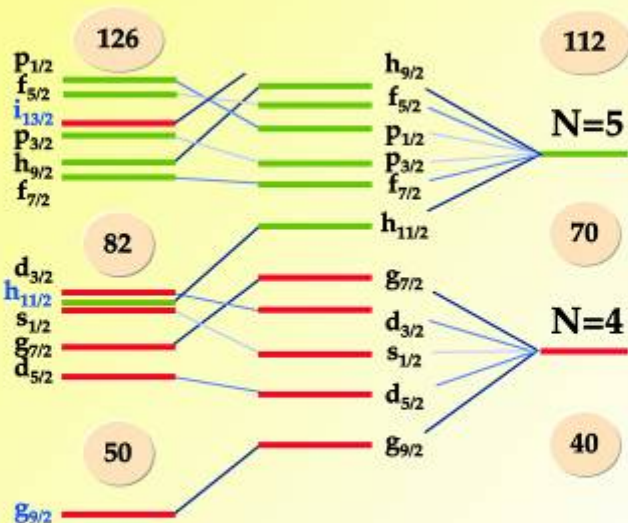
A

衰变常数

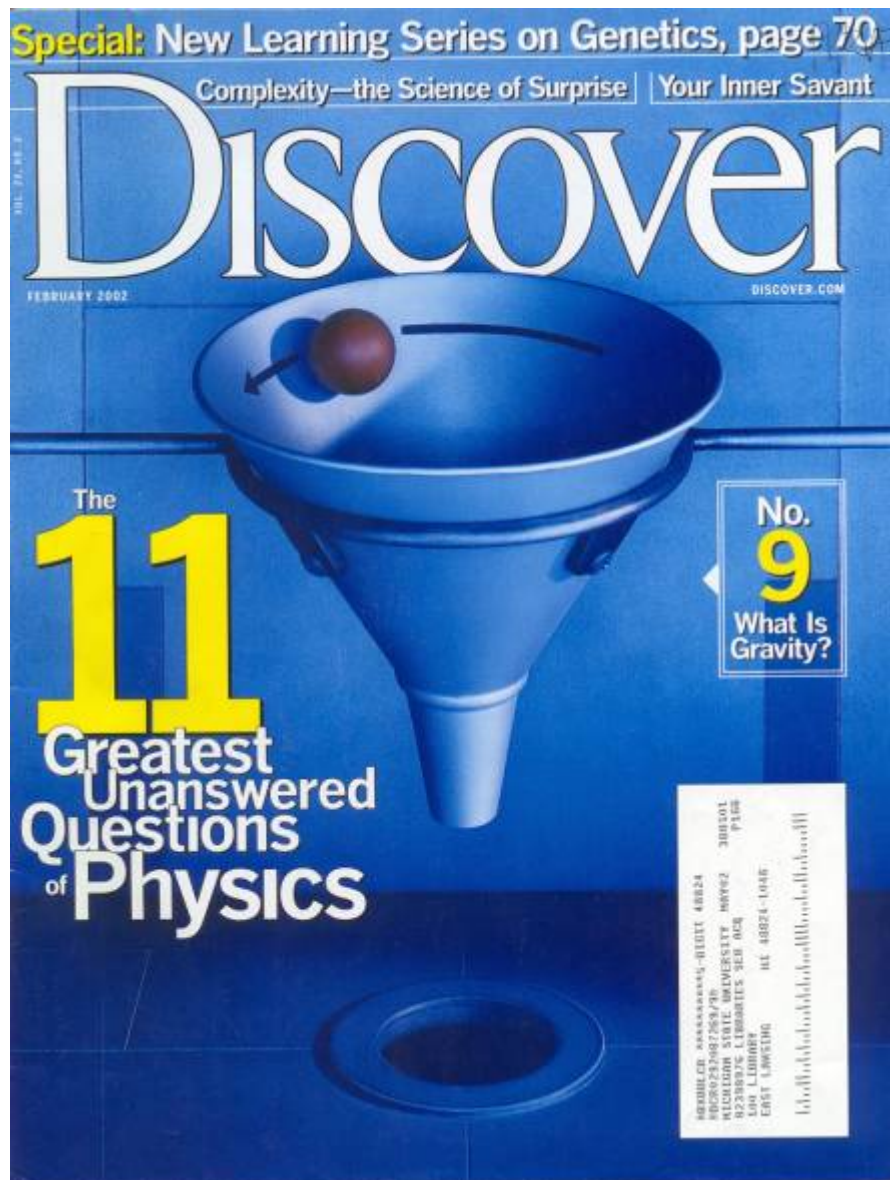
- 基金委数理科学**13**个优先领域中
 - 恒星的形成、演化与太阳活动
 - 极端条件下的核物理和核天体物理
- **2007 美国DOE核科学中长期规划中**
 - What is the nature of the nuclear force that binds protons and neutrons into stable nuclei and rare isotopes?
 - What is the origin of simple patterns in complex nuclei?
 - What is the nature of neutron stars and dense nuclear matter?
 - **What is the origin of the elements in the cosmos?**元素起源
 - **What are the nuclear reactions that drive stars and stellar explosions?**驱动恒星演化和爆发的核反应
- 美国科学院在发现杂志上认为世纪之谜的第三个问题：**铁到铀元素是如何合成出来的？**

天体物理与核物理的互动

Nuclear Shell Structure

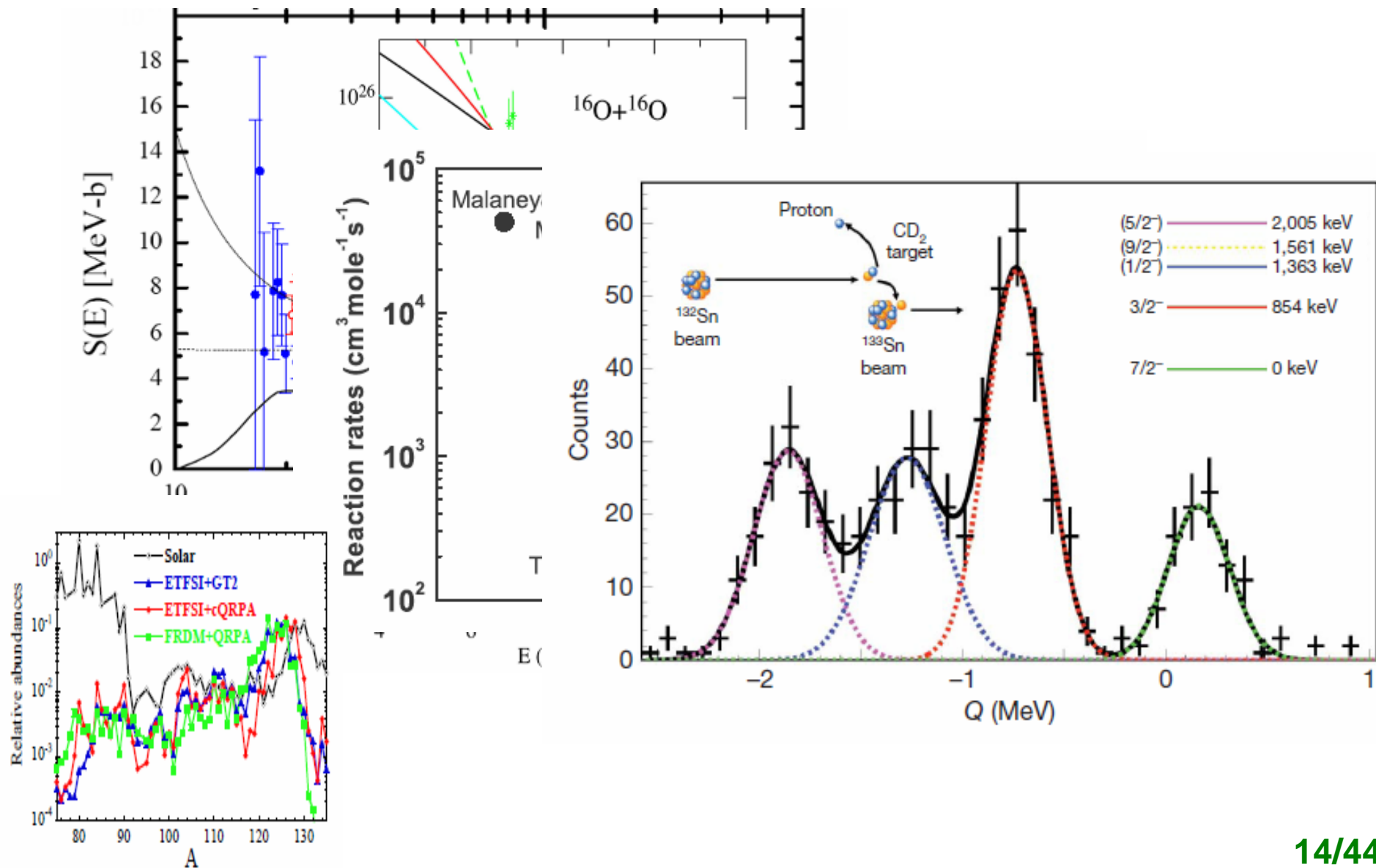


美国国家科学院：20世纪留下的11个重大物理问题

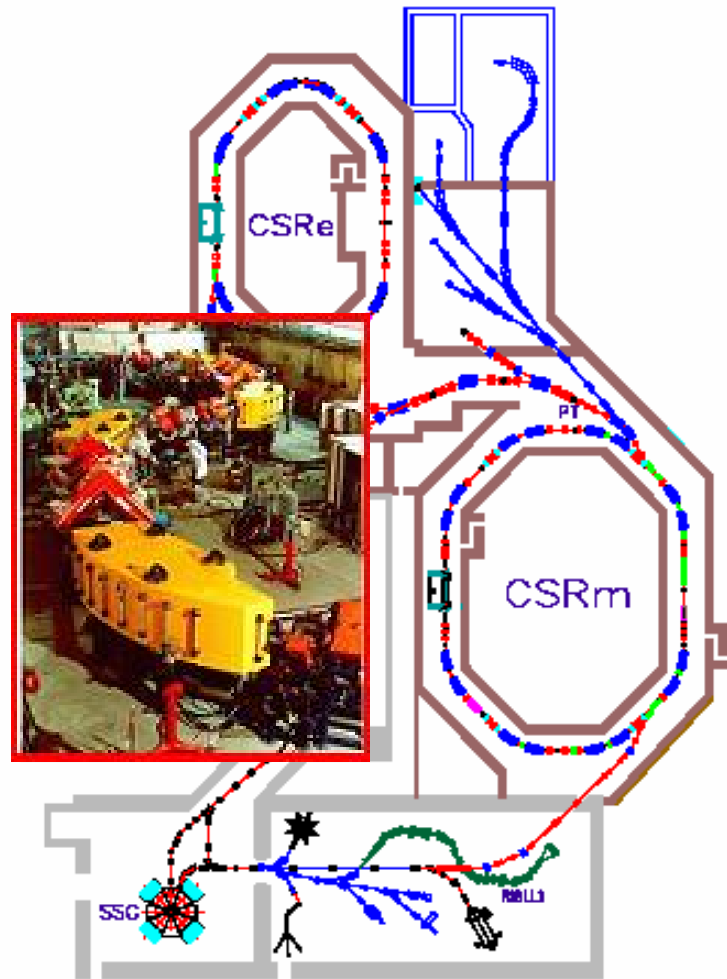


1. What is dark matter?
2. What is dark energy?
3. How were the heavy elements from iron to uranium made?
4. Do neutrinos have mass (and how much)?
5. Where do ultra-energy particles come from?
6. Is a new theory of light and matter needed to explain what happens at very high temperature?
7. Are there new states of matter at ultrahigh temperatures and densities?
8. Are protons unstable?
9. What is gravity?
10. Are there additional dimensions?
11. How did the Universe begin?

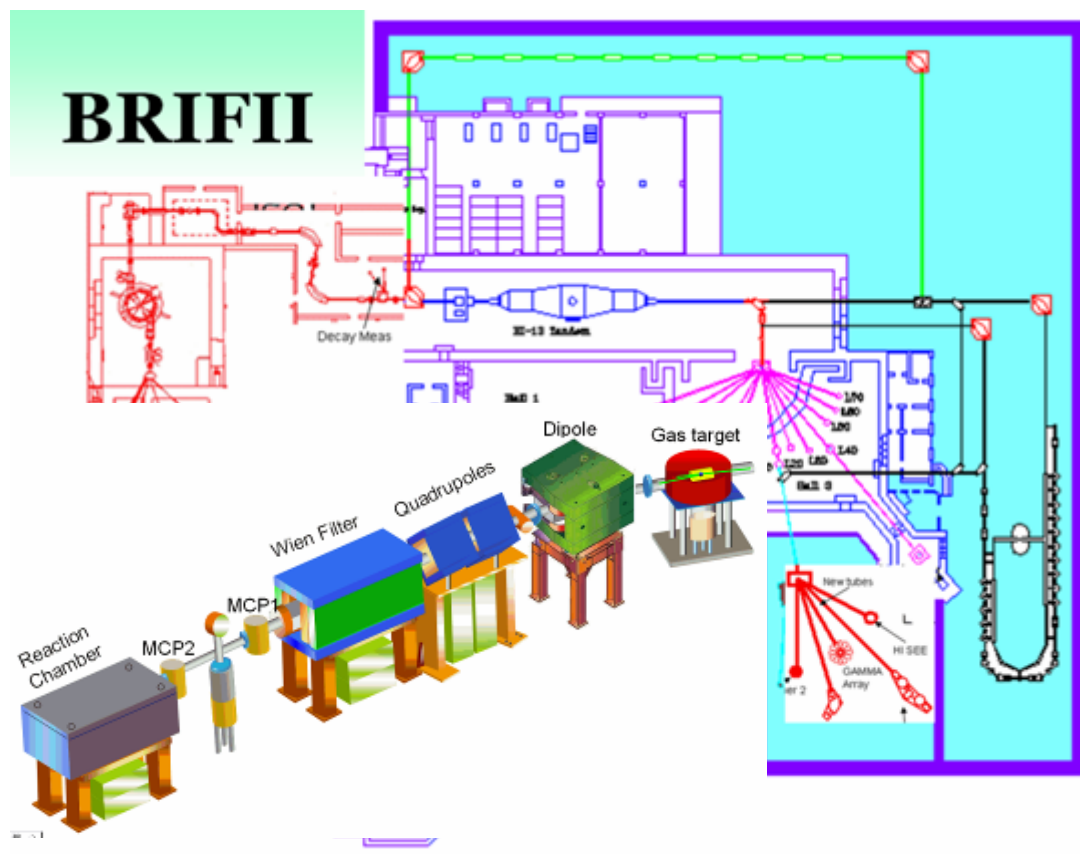
国际研究前沿进展



主要研究平台：我国2个核物理大科学装置



兰州重离子加速器
国家实验室CSR加速器
中高能重离子、放射性束



北京串列加速器
核物理国家实验室
串列加速器
低能重离子、放射性束

群体在国际上的地位

- Carmen Angulo, Université catholique de Louvain
- Wako Aoki, National Astronomical Observatory of Japan
- Jeff Blackmon, Oak Ridge National Laboratory
- Adam Burrows, University of Arizona
- Cristina Chiappini, Osservatorio Astronomico di Trieste - INAF and Observatoire de Geneve
- Barry Davids, TRIUMF
- Roland Diehl, MPE Garching
- Falk Herwig, Keele University
- Wolfgang Hillebrandt, MPA Garching
- Inese Ivans, Observatories of the Carnegie Institution of Washington and Princeton University
- Shigeru Kubono, CNS Tokyo
- Karlheinz Langanke, GSI Darmstadt
- John Lattanzio, Monash University
- Jim Lattimer, SUNY Stony Brook
- Gail McLaughlin, North Carolina State University
- Alberto Mengoni, CERN, Geneva
- Nikos Prantzos, CNRS, Paris
- Ernst Rehm, Argonne National Laboratory
- Claus Rolfs, Ruhr Universitaet Bochum
- Bob Rutledge, McGill University
- Friedrich-Karl Thielemann, Universitaet Basel
- Frank Timmes, Los Alamos National Laboratory
- Weiping Liu, CIAE, Beijing
- Michael Wiescher, University of Notre Dame
- Stan Woosley, UC Santa Cruz
- Ernst Zinner, Washington University, St Louis

核天体反应间接测量的重要基地

核天体反应直接测量的重要力量

广泛的国际合作基础

核天体网络计算的理论优势

天文观测的结合的优势

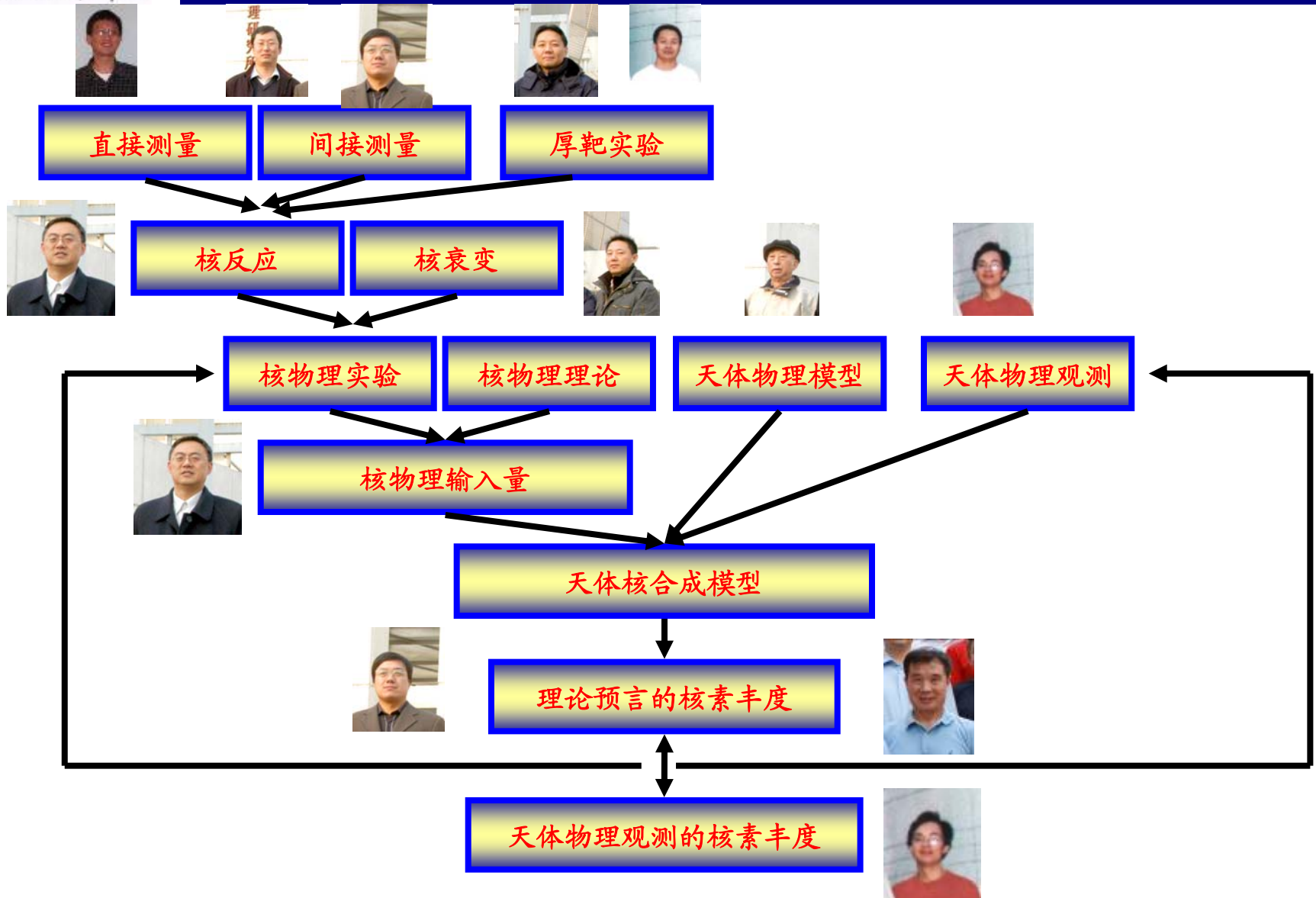
2004, 2008, 2010连续三次宇宙与核
NIC会议 IAC委员

群体的研究计划

群体针对的 国际公认的核天体物理关键科学问题

1. 恒星平稳演化阶段最重要的热核反应在天体物理能区的直接测量
2. 高能区带电粒子反应截面向天体物理能区的合理外推
3. 若干关键的平稳核燃烧阶段和爆发性 rp 及 r 过程核反应截面的间接测量
4. rp 和 r 过程涉及核素衰变性质、质量、反应和共振态性质的测量
5. 核天体物理反应和衰变性质的理论研究、数据库和网络方程的建立
6. 通过关键数据输入网络计算，结合元素丰度的观测研究天体核合成的场所

学科交叉和群体研究分工



解决核天体物理难题的研究思路

- 截面外推存在不确定性 → 开展若干低能聚变反应测量，检验外推模型
- 不稳定核束强度低，且无法做成靶 → 采用间接测量方法
- 国内实验条件的局限性 → 利用高水平国际合作
- 核物理成果与天文观测的结合 → 开展网络计算，并选择丰度比较作为切入点

- 开展直接测量，检验和澄清间接测量的分歧
 - 在**TRIUMF**实验室开展 (p,γ) 反应直接测量，澄清理论和实验分歧；将融合反应截面的测量向下扩展，检验**Hindrance**低能外推模型
- 通过间接测量确定关键核天体物理反应数据
 - 利用渐近归一化常数和核谱因子方法，在原子能院和日本理化所开展恒星平稳燃烧轻核区 (p,γ) 和 (n,γ) 反应间接测量
 - 开展不稳定核束的共振弹性散射研究，得出核天体物理感兴趣的激发态共振参数
- 开展核素的衰变性质测量
 - 在兰州近物所开展快速质子俘获**rp**过程核素衰变测量，得出系统性的衰变半衰期和**GT**强度分布数据，对壳模型理论计算进行刻度
- 实验与理论相结合，将反应和衰变数据带入网络计算，与天文观测数据相比较，研究元素核合成的天体场所
 - 将以上得到的反应和衰变数据输入核天体物理数据库，利用网络方程对元素丰度进行预言，研究元素核合成的天体场所

群体工作计划一

- 开展直接测量，检验和改进低能外推模型
- 利用后加速的不稳定核束和超低本底的反冲质量谱仪，在加拿大**TRIUMF**实验室开展 $^{33}\text{S}(\text{p},\gamma)$ ^{34}Cl 和 $^{11}\text{C}(\text{p},\gamma)^{12}\text{N}$ 反应的直接测量，澄清目前理论和间接测量结果的分歧
- 使用美国圣母大学新建的低能强流离子加速器，将重离子融合反应截面的测量向下扩展到核天体物理能区，开展 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 和 $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ 反应的直接测量，检验低能外推模型
- 通过间接测量充实关键核天体物理反应数据库
- 在北京原子能院和日本理化所开展恒星平稳核燃烧阶段轻核区 (**$A=6-15$**) 核天体物理(p,γ)和(n,γ)反应间接测量；在兰州近代物理所和日本大阪大学开展爆发性核燃烧过程中等质量核区 (**$A=10-30$**) (p,γ)和(n,γ)反应间接测量；通过测量转移反应的角分布，导出一批高精度的(p,γ)和(n,γ)反应截面；利用电荷对称性，将实验结果用于镜像核的(p,γ)和(n,γ)反应截面导出
- 在北京原子能院、兰州近代物理所和日本理化学研究所，开展不稳定核束在氢和氦靶上的共振弹性散射研究，得出核天体物理感兴趣的激发态共振参数
- 开展**rp**和**r**过程相关核素的衰变性质测量，得出核天体物理网络计算的另一类输入量
- 在兰州近代物理所和日本理化所开展衰变测量。从在兰州开展快速质子俘获**rp**过程的丰质子核素测量入手，条件成熟后扩展到在日本理化学研究所的快速中子俘获**r**过程丰中子核素衰变测量，对壳模型理论计算进行刻度，并将衰变数据输入网络计算

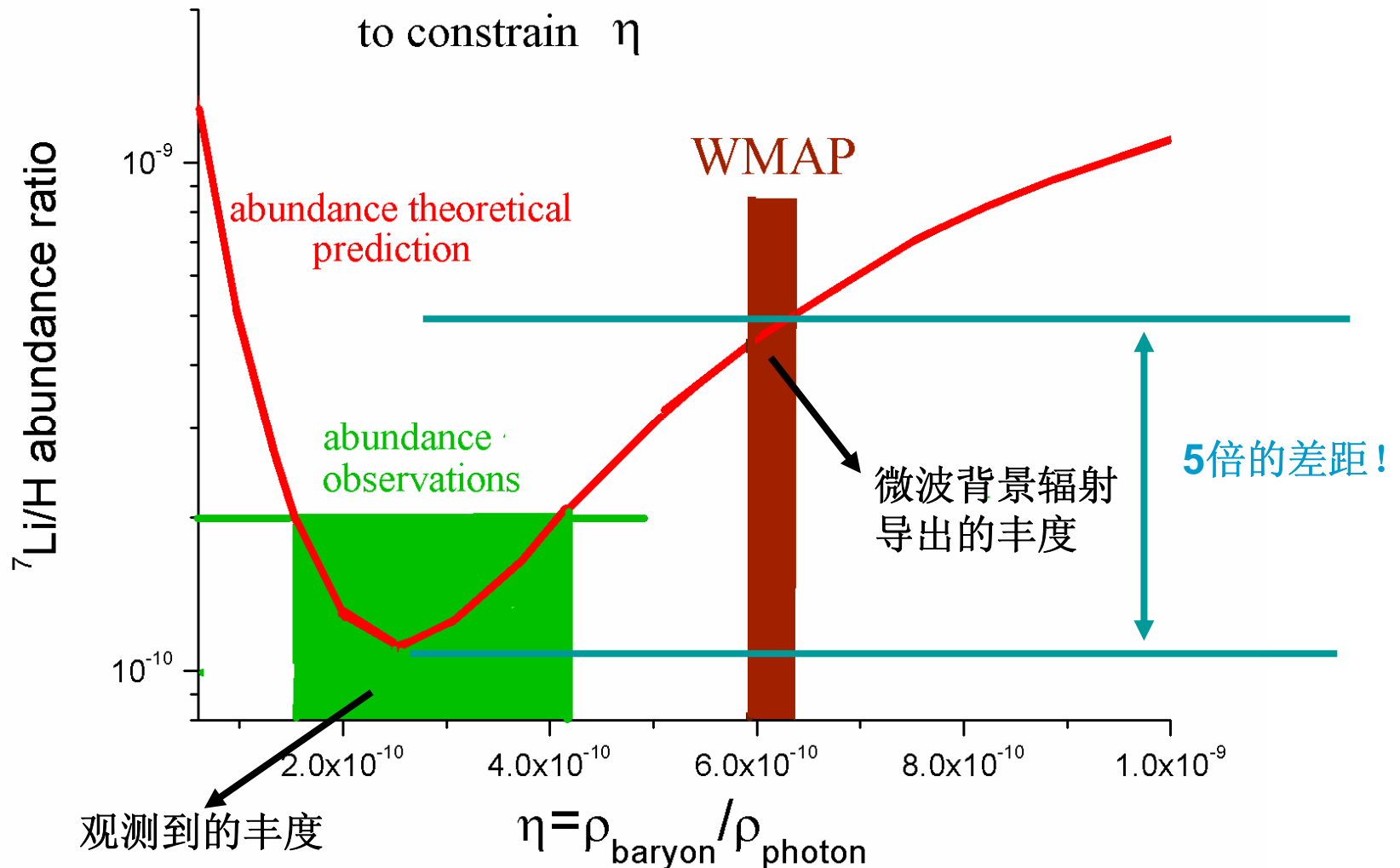
1、恒星平稳演化阶段最重要的热核反应在天体物理能区的直接测量

2、高能区带电粒子反应截面向天体物理能区的合理外推

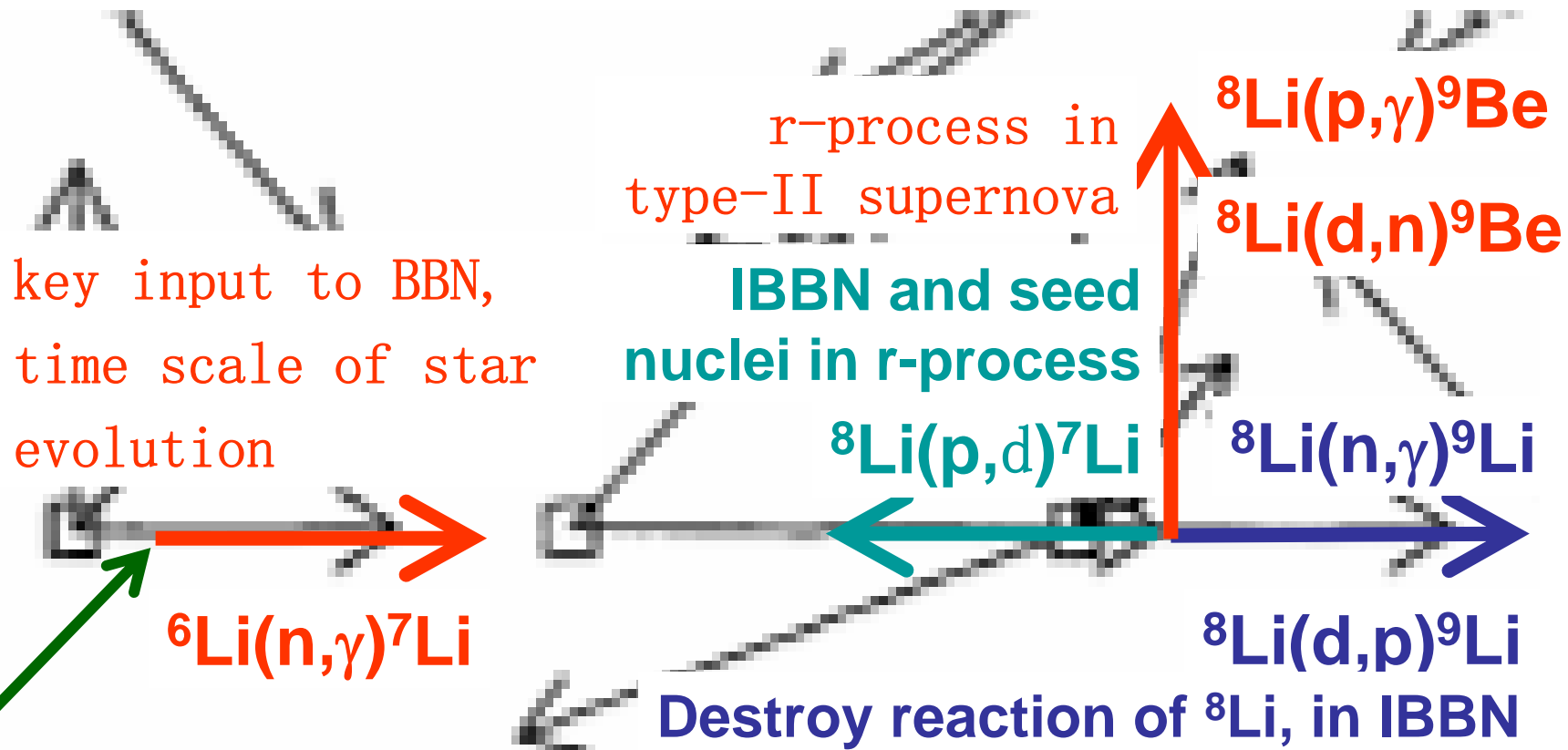
- $^{11}\text{C}(\text{p},\gamma)^{12}\text{N}$, CIAE-TRIUMF-, 高温pp链中重要反应, 间接测量的S-因子不确定度很大, 无共振数据; 本实验将直接测量 2^+ 共振态, 任国际合作实验发言人
- $^{33}\text{S}(\text{p},\gamma)^{34}\text{Cl}$, Yale-TRIUMF-CIAE, 解释观测新星中 ^{33}S 过丰现象, 反应率只有高能量数据, 不确定度对丰度影响很大(两个量级), 本实验直接测量100-400keV范围
- 计划使用美国圣母大学新建的低能强流离子加速器, 将融合反应截面的测量向下扩展, 开展 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 和 $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ 反应的直接测量, 检验最新提出的Hindrance低能外推模型
- 围绕锂丰度问题, 利用国际合作, 在已有实验基础上, 开展系统研究

郭冰的报告

锂丰度是国际前沿问题



围绕Li元素反应的系统研究



李志宏的报告

在Gran Sasso地下實驗室 $D(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$ 等反應直接測量

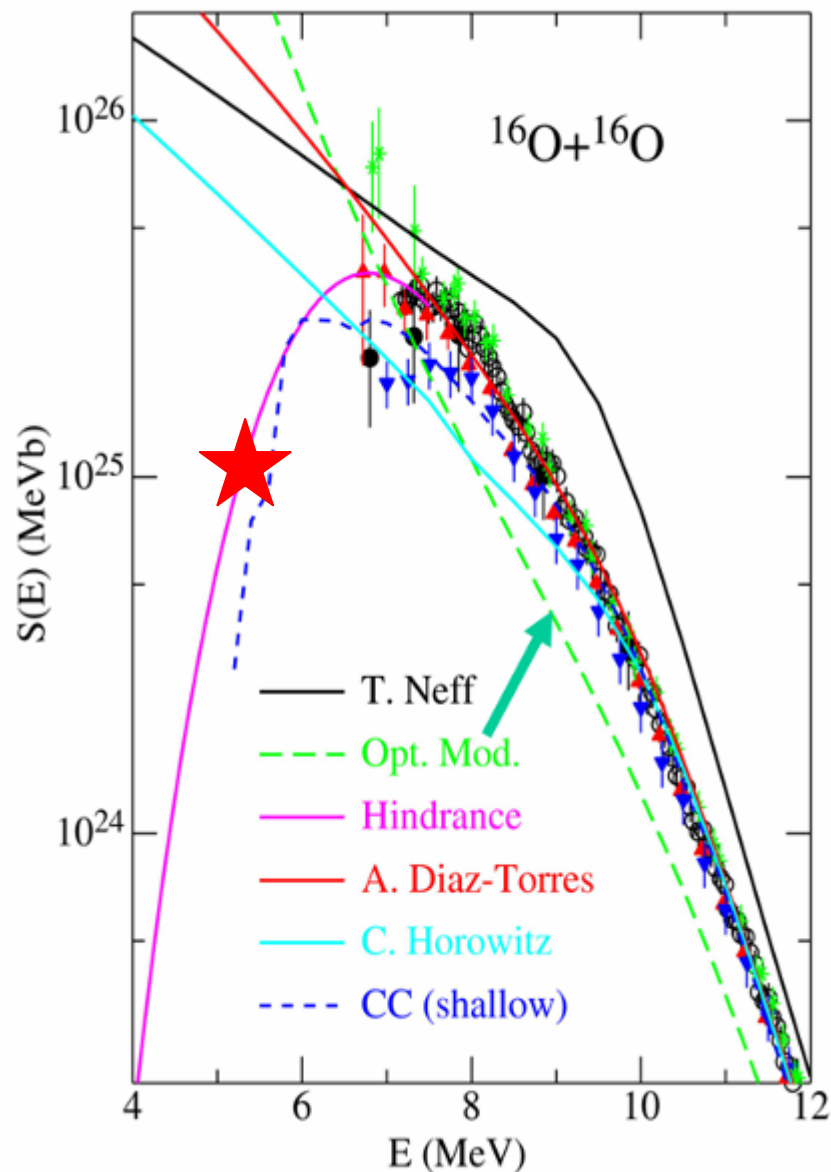


- 利用国际合作开展 $D(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$ 等反应直接测量
- 形成自主测量的Li丰度研究的系统实验数据
- 为在我国天体物理地下实验室开展核天体物理反应直接测量打下基础

连钢的报告

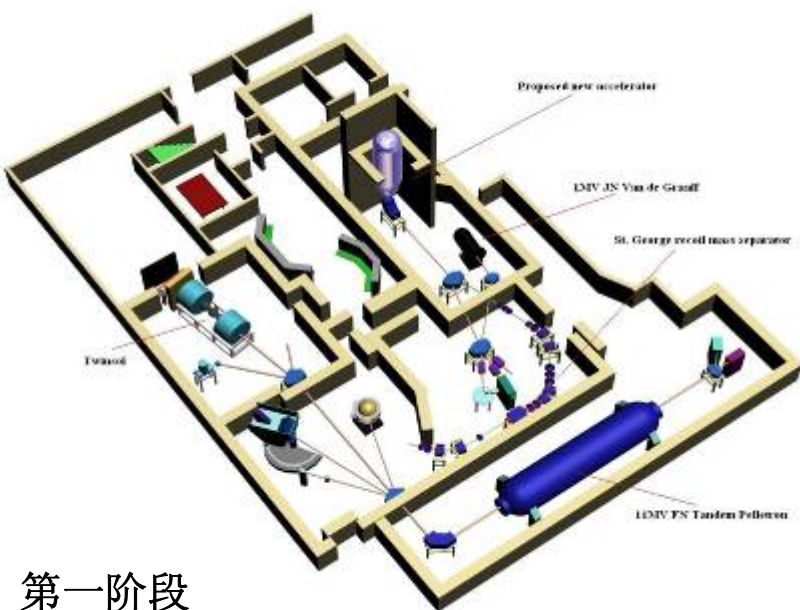
低能外推的檢驗

- ^{12}C 和 ^{16}O 核素的聚變反應，如 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$, $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 和 $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$, 在平穩的核燃燒具有廣泛的重要性
- 它們不僅影響 ^{26}Al 和 ^{60}Fe 的合成，還對後續的合成有影響
- 目前，這些反應還只能在較高的能量測量，遠高於伽莫夫窗口



此部分研究计划

- 利用带电粒子探测器阵列，将重离子融合反应能量推向平稳核燃烧的窗口
- 实验分两阶段进行
 - 建立带电粒子探测器阵列并在美国圣母大学串列上检测，同时开展聚变系统的系统研究
 - 利用新建**5 MV**强流加速器将测量能量推向更低。该加速器将于**2011**年底建成，同时从理论上发展可靠的低能外推模型



唐晓东

3、若干关键的平稳核燃烧阶段和爆发性rp及r过程核反应截面的间接测量

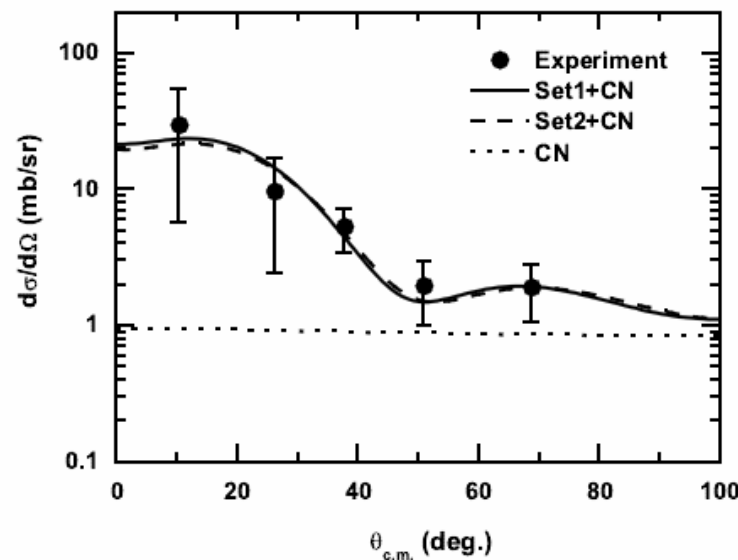
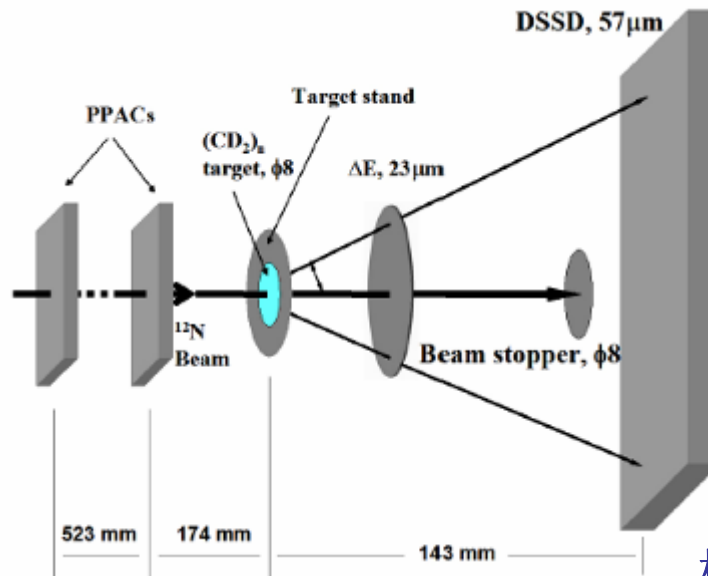
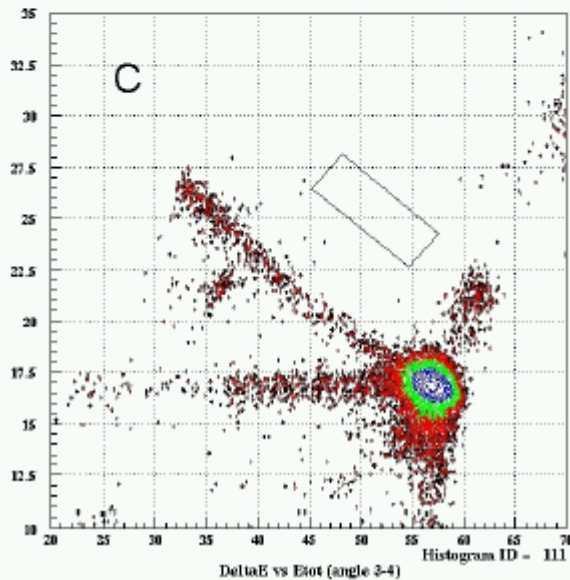
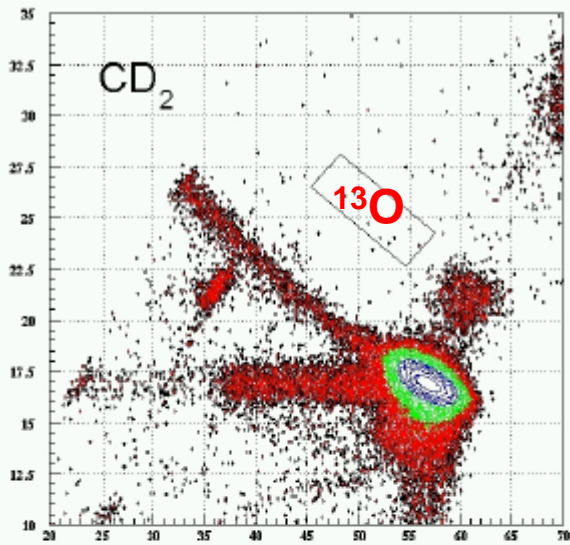
- 开展恒星平稳核燃烧中 $^{13}\text{C}(\text{p},\gamma)^{14}\text{N}$, $^{13}\text{N}(\text{n},\gamma)^{14}\text{N}$, $^{11}\text{B}(\text{p},\gamma)^{12}\text{C}$, $^{11}\text{C}(\text{n},\gamma)^{12}\text{C}$, $^{10}\text{B}(\text{p},\gamma)^{11}\text{C}$, $^{10}\text{B}(\text{n},\gamma)^{11}\text{B}$, $^{16}\text{O}(\text{p},\gamma)^{17}\text{F}$, $^{16}\text{O}(\text{n},\gamma)^{17}\text{O}$ 反应的间接测量
- 完成在日本理化所提出的快速 αp 过程中重要反应 $^{12}\text{N}(\text{p},\gamma)^{13}\text{O}$ 间接测量
- 利用ORNL的 $^{132}\text{Sn}(\text{d},\text{p})^{133}\text{Sn}$ 反应数据（**Nature 465(2010)454**）进行 $^{132}\text{Sn}(\text{n},\gamma)^{133}\text{Sn}$ 理论计算，建立r过程反应的间接测量方法

平穩核燃燒的核天體物理反應間接測量

- 在原子能院Q3D譜儀上測量對應彈性散射轉移反應的角分布
 - 通過拟合彈性散射角分布準確得到光學勢參量
 - 比較實驗與理論的轉移反應角分布，得到核譜因子
 - 通過鏡像電荷對稱性得到鏡像核譜因子
 - 由輻射俘獲理論給出 (n,γ) 與 (p,γ) 的天體物理反應率和S因子
-
- $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}, ^{13}\text{N}(n,\gamma)^{14}\text{N} \leftarrow ^{13}\text{C}(^7\text{Li},^6\text{He})^{14}\text{N}$
 - $^{11}\text{B}(p,\gamma)^{12}\text{C}, ^{11}\text{C}(n,\gamma)^{12}\text{C} \leftarrow ^{11}\text{B}(^7\text{Li},^6\text{He})^{12}\text{C}$
 - $^{10}\text{B}(p,\gamma)^{11}\text{C}, ^{10}\text{B}(n,\gamma)^{11}\text{B} \leftarrow ^{10}\text{B}(^7\text{Li},^6\text{He})^{11}\text{C}$
 - $^{16}\text{O}(p,\gamma)^{17}\text{F}, ^{16}\text{O}(n,\gamma)^{17}\text{O}, \leftarrow ^{16}\text{O}(^7\text{Li},^6\text{He})^{17}\text{F}$

李志宏的報告

$^{12}\text{N}(p,\gamma)^{13}\text{O}$ 工作

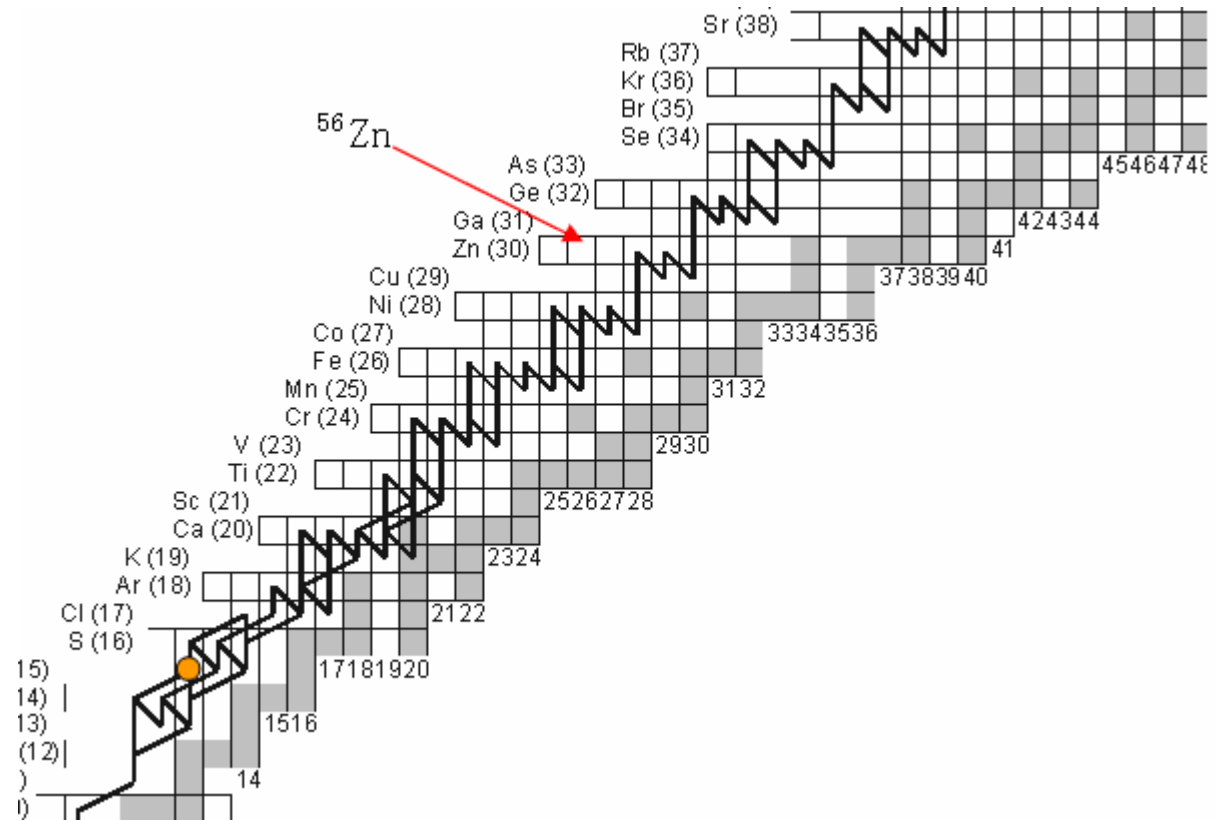


核谱因子结果
Wiescher 0.72
Warner 0.623
 本工作 **0.80 ± 0.30**
 天体物理S-因子计算中

郭冰的报告

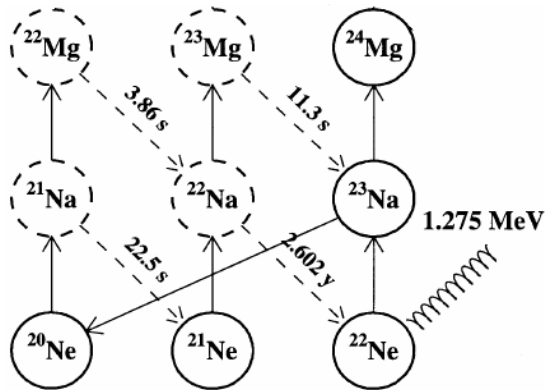
4、核素衰变性质和共振态性质的测量

- 快速质子俘获是发生在丰质子核区的爆发性氢燃烧 (**rp-**) 过程, 涉及大量丰质子不稳定核素。 ^{56}Zn 、 ^{55}Cu 等是 **rp-** 过程反应路径上可能的等待核, 其衰变特性是决定 **rp-** 过程反应路径的关键因素之一

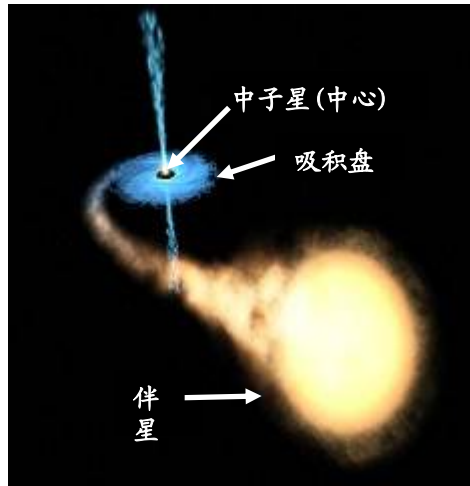


- 除天体物理意义外, 研究这些核素的衰变性质还有助于检验原子核壳理论模型在远离 β 稳定线的核区适用性

共振态性质的测量

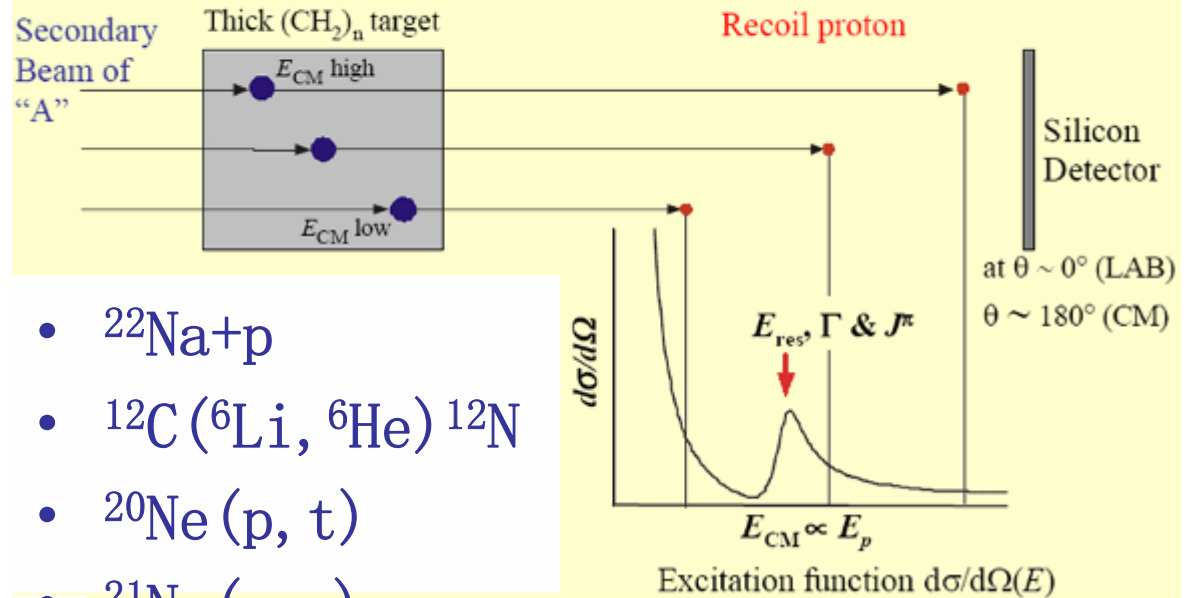


新星演化



X射线暴中突破CNO循环到rp过程

Thick-target method for A+p in inverse kinematics



- $^{22}\text{Na}+p$
- $^{12}\text{C} (^6\text{Li}, ^6\text{He}) ^{12}\text{N}$
- $^{20}\text{Ne} (p, t)$
- $^{21}\text{Na} (p, \gamma)$
- $^{14}\text{O} (\alpha, p) ^{17}\text{F}$

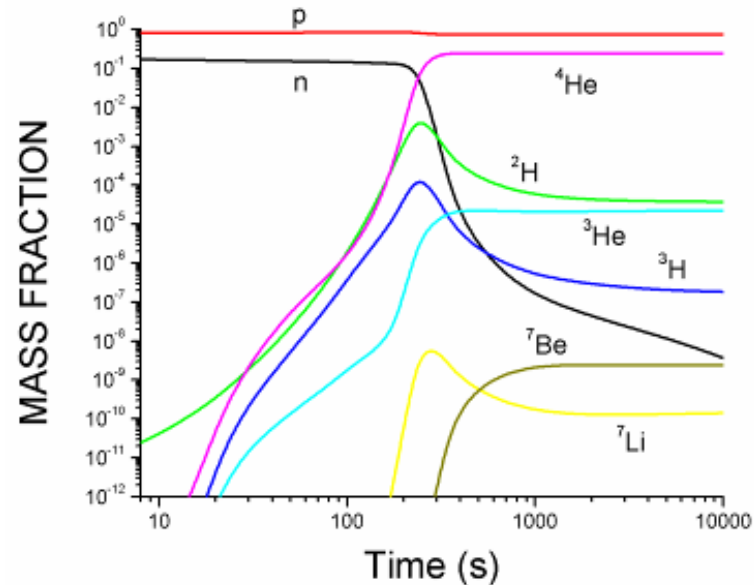
王友宝、贺建军的报告

- 通过实验与理论相结合，将反应和衰变数据带入网络计算，与天文观测数据相比较，研究元素核合成的天体场所
- 将得到的反应和衰变数据输入核天体物理数据库，发展核理论模型和适应多种核天体物理场所的网络方程，对元素丰度进行预言，与国家天文台的观测丰度进行比较，研究元素核合成的天体场所
- 在国家天文台得到观测数据的基础上，通过建立可靠的**Fe**、**Cu**和**Zn**等重要元素的原子模型，与实验测量的核天体物理数据和网络计算结合，深入研究这些元素的起源

5、核天体物理反应和衰变性质的理论研究、数据库和网络方程的建立

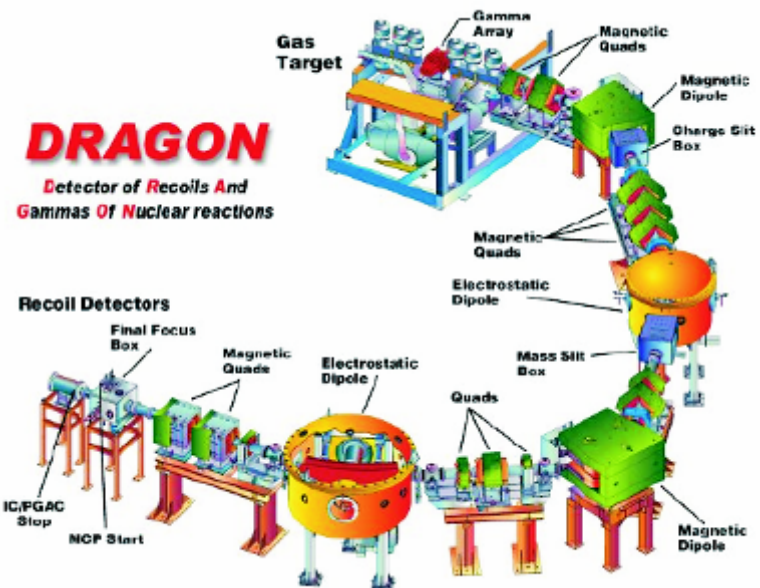
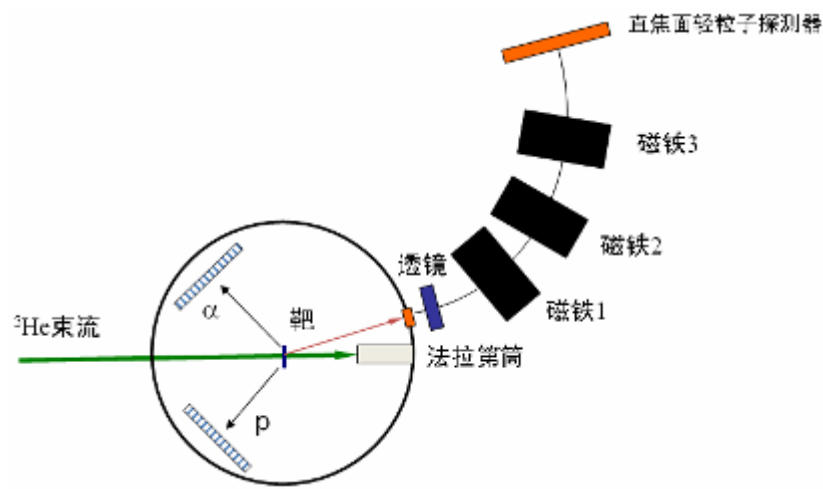
6、通过关键数据输入网络计算，结合元素丰度的观测研究天体核合成的场所

- 利用自主发展的投影壳模型计算计算基态和激发态 β 衰变（后者无法实验测量）
- 将自主建立的网络计算方法拓展到rp和r过程
- 更新核反应率数据库，扩展程序计算的核素范围
- 通过分析国家天文台观测的极贫金属星的元素丰度分布异常，利用我们发展网络计算结果找到其核物理的解释。例如，利用我们系统测量的涉及r过程和Li丰度的核反应截面带入网络计算与观测丰度进行比较



項目期間實驗技術的預期進展

- 重離子磁譜儀大面積焦平面探測技術
- 超导螺線管帶電粒子探測技術
- 極低本底和極低計數率的核反應測量技術
- 帶電粒子和伽瑪射线符合辐射俘获反应直接測量技術



群体未来3年研究计划总结

研究地点 科学问题	CIAE 北京	IMP 兰州	NAO 北京	UND 美国	TRIUMF 加拿大	RIKEN 日本	Gran Sasso 意大利
直接测量					$^{33}\text{S}(p,\gamma)$ $^{11}\text{C}(p,\gamma)$	$^9\text{Li}(p,\alpha)^6\text{He}$	$d(\alpha,\gamma)^6\text{Li}$ 等
合理外推				$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$			
间接测量	$^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$, $^{13}\text{N}(n,\gamma)^{14}\text{N}$, $^{11}\text{B}(p,\gamma)^{12}\text{C}$, $^{11}\text{C}(n,\gamma)^{12}\text{C}$, $^{10}\text{B}(p,\gamma)^{11}\text{C}$, $^{10}\text{B}(n,\gamma)^{11}\text{B}$, $^{16}\text{O}(p,\gamma)^{17}\text{F}$, $^{16}\text{O}(n,\gamma)^{17}\text{O}$					$^{12}\text{N}(p,\gamma)$ $^{22}\text{Mg}(p,\gamma)$ $^{30}\text{P}(p,\gamma)$	
衰变和共振	$^{22}\text{Na}+p$	^{56}Zn , ^{55}Cu β^- 衰变 $^{20}\text{Ne}(p,t)$ $^{21}\text{Na}+p$				$^{21}\text{Na}(p,\gamma)$ $^{14}\text{O}(\alpha, p)^{17}\text{F}$	
理论和网络	投影壳模型 计算衰变 rp和r过程网络计算						
天文观测和比较	锂丰度		LAMOST 锂丰度 Cu、Zn起源				

群体的研究思路

- 创新研究群体是基金委中竞争最激烈的项目，创新研究群体能得到基金支持，显示了科学界和基金委对创新研究群体的综合实力认可，今后面向科学前沿和国家重大需求，做出更突出的贡献
- 我们将建立一个固定的群体成员的交流模式，在成员定期大研讨和充分交流的前提下，使群体成为一个真正的、不断涌现高水平成果的富有活力的研究集体，使群体产生一流成果和优秀人才

群体人才、交叉与国际合作

- 作为交叉学科，群体十分注意加强与国内天文口的交流。09年7月在国家天文台举办了核物理与天体物理联合研讨会。参加会议的有原子能院、国家天文台、紫金山天文台、南京大学、北京大学、中国科学院院士。会议加强了我院与天文口的交流，把核天体物理与天文口的交流推向了共识。
- 研究群体建立了与美国圣母大学、德国重离子研究中心、美国橡树岭国家实验室等建立了紧密的合作关系，自主提出的在日本理化学研究所的实验已完成。



群体准备会的情况

- 2010年8月12-13日在北京召开，加强了对创新群体项目高标准
- 群体负责人创新情况、部分
- 各群体骨干研究思路
- 群体讨论成果以及群作内容的书，每年开两次交流会议等。



科学基金委
本的总体情

未来3年的

主高水平成
制定群体工
设立群体秘

在群体讨论形成的集成创新的若干思路

- 围绕锂丰度开展合作研究，系统测量若干核反应，结合群体实验数据，结合网络计算给出原创成果
- 基于自主的大气模型到处r过程丰度，并利用群体的网络计算进行比较，形成集成创新成果
- 在衰变测量实验技术上取得突破，使群体的实验结果从反应率向衰变拓展
- 通过国际合作开展低能外推实验，回答重要的外推走势问题
- 参加一些重要的国际实验（**Gran Sasso**地下实验室核天体反应直接测量），拓展群体的成果范围。
- 通过若干实验刻度理论计算，利用理论大范围计算反应和衰变数据，带入网络计算
- 通过以上思路，实现 $1+1>2$ 的效果，取得重要的创新成果

群体的特色总结

- 以核物理实验为主，结合理论计算、网络方程和天文观测
- 以国内大型科学工程的实验设备为主，利用国际先进实验室和国际合作拓展研究能力
- 在同核物理实验和天文观测的比较中发展理论，并为进一步实验提供建议
- 重视核物理实验技术、核天体物理理论和网络计算方法的新发展

- 核天体物理是国际前沿的交叉学科，尚存在许多挑战性的科学问题
- 基于原子能院的放射性次级束装置、兰州近物所的大科学工程，与国际重要的核天体物理实验室结合，形成学科交叉、核物理与天体物理结合、实验与理论结合的研究优势
- 研究瞄准核天体物理六个关键科学问题，在群体项目的支持下，利用国内外的大科学平台，测量了一批关键核天体物理反应及衰变数据，将实验数据代入网络计算，在恒星演化和元素核合成方面将取得创新成果
- 核天体物理在创新研究群体项目的支持下，研究的深度和广度将有很大的提高
- 感谢基金委的支持，希望得到更多指导和帮助！