

元素核合成中的关键科学问题研究 创新研究群体科学基金申请

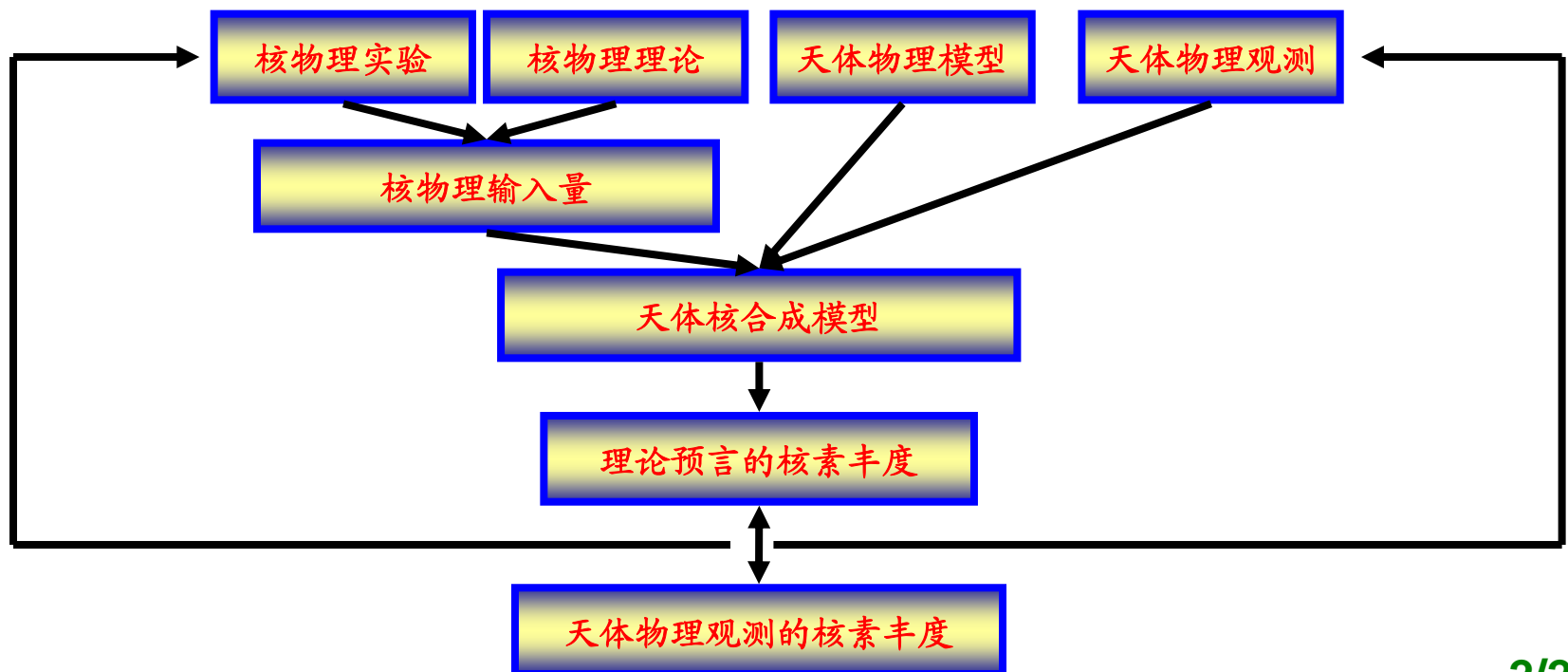
柳卫平

中国原子能科学研究院

2010年6月19日

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**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

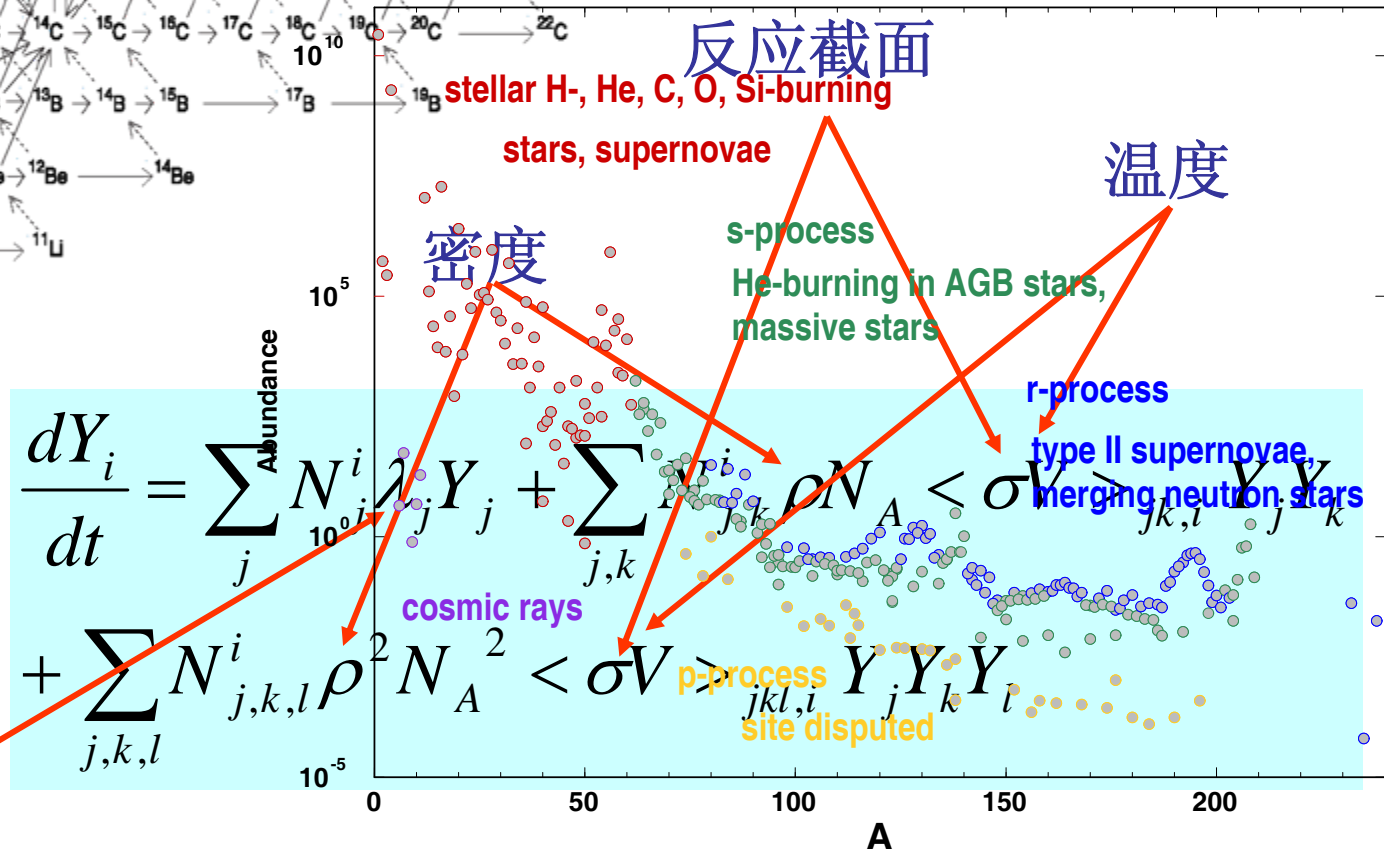
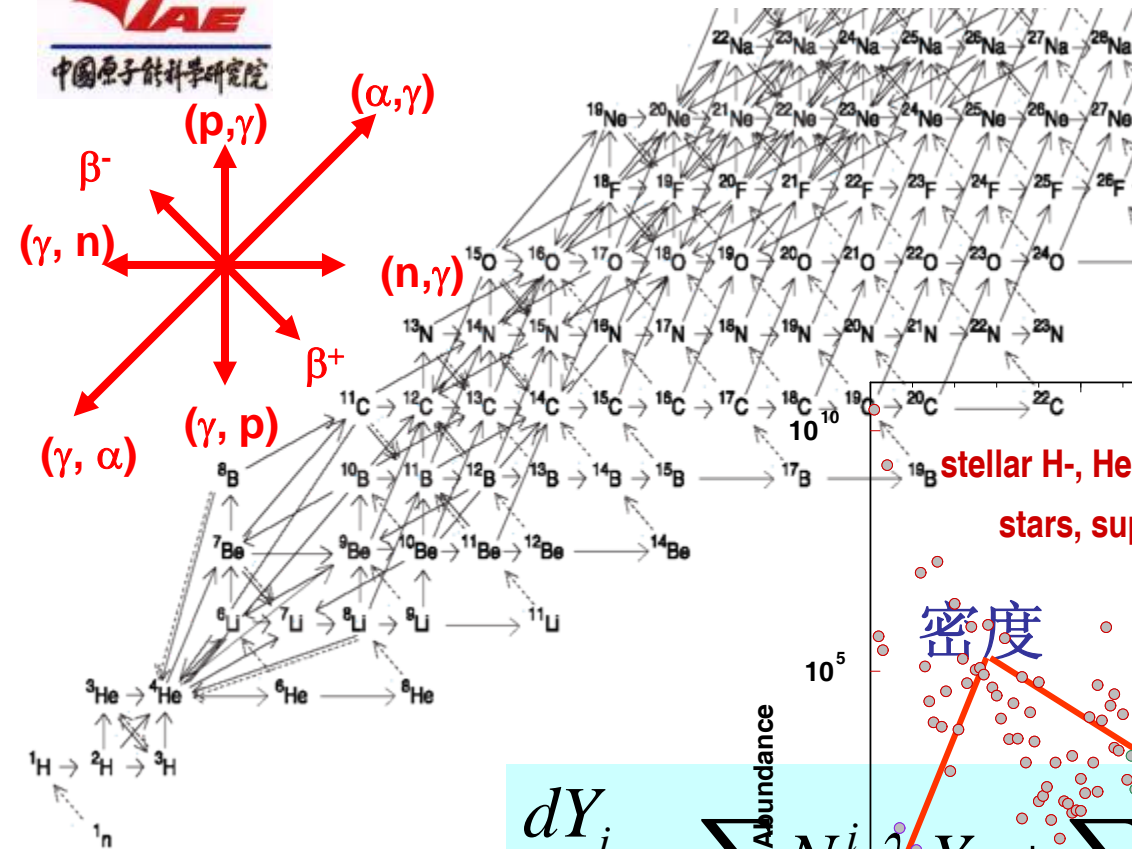


- **William Fowler**等人对恒星演化过程中的核反应进行了系统的实验和理论研究。获得**83**年度诺贝尔物理奖



- **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



$$\frac{dY_i}{dt} = \sum_j N_j^i \lambda_j Y_j + \sum_{j,k} N_j^i \rho N_A \langle \sigma V \rangle_{jk,i} Y_j Y_k - \sum_{j,k,l} N_{j,k,l}^i \rho^2 N_A^2 \langle \sigma V \rangle_{jkl,i} Y_j Y_k Y_l$$

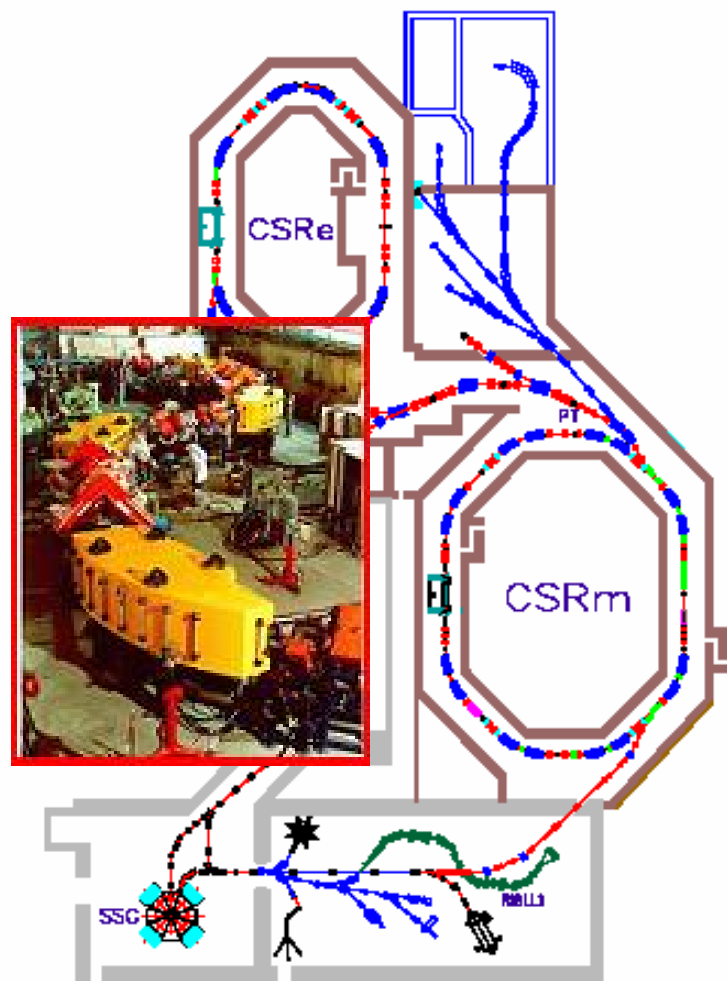
衰变常数

今年德国Nuclei in Cosmos (NIC宇宙中的原子核) 国际会议邀请报告

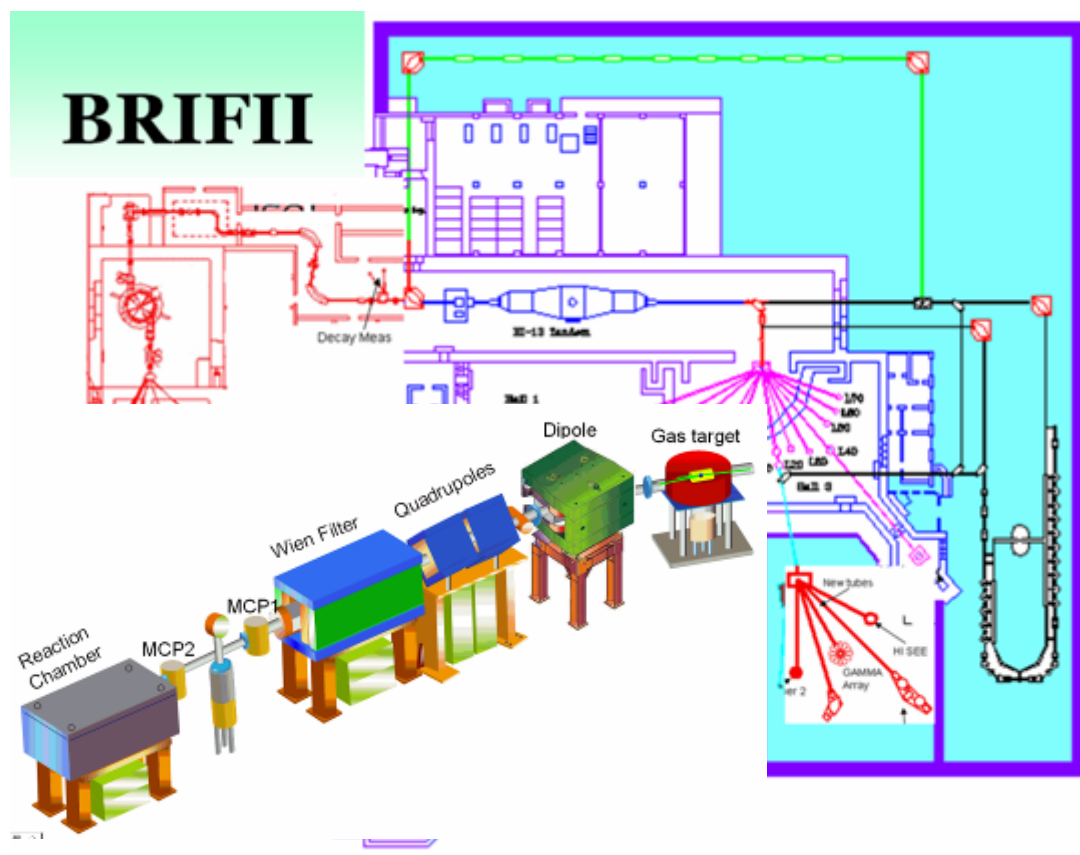
- Big Bang Nucleosynthesis
- Formation of the first stars
- Evolution of massive stars
- Reaction rate measurements in underground labs
- 3D stellar models
- Final stages of stellar evolution
- The s-process
- Experimental side of the s-process
- The rp-process in X-ray bursts
- Novae – theory and experiment
- Mass measurements on the rp-process path
- SNIa
- Black hole and neutron star mergers
- Core collapse Supernovae
- Hypernovae and gamma-ray bursts
- Explosive nucleosynthesis and the p-process
- Experiments on reaction rates for the p-process
- The r-process -- experimental side, mass measurements
- Nuclear structure far from stability
- The r-process -- theoretical/astrophysical side
- Nuclear equation of state
- Pulsar mass measurements
- Measurements of pre-solar grains
- Modeling the abundances of pre-solar grains
- r-process enhanced metal-poor stars
- Galactic chemical evolution/theoretical side
- Galactic chemical evolution/observational side
- Future radioactive ion beam facilities – FAIR, FRIB, RIP
- Future underground labs
- Future surveys for metal-poor stars
- Future facilities for high-resolution spectroscopy of metal-poor stars

- 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？**

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

核天体物理创新群体的研究基础

- 在原子能院建立了我国第一个低能放射性次级束流实验装置，经过十多年的研究工作，结合国际合作，开创和发展了利用低能次级束进行核天体物理研究的新领域，并在国际核天体物理学界占有了一席之地 **NPA834 (10) 651c**
- 首次利用渐进归一化常数方法确定了产生高能太阳中微子的 ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$ 反应的截面，为这个有重要天体物理意义的数据提供了独立的交叉检验 **PRL77(96)611**
- 在国际上首次通过实验确定了对超新星爆发快速中子俘获过程和大爆炸原初核合成有重要意义的 ${}^8\text{Li}(n,\gamma){}^9\text{Li}$ 反应率 **PRC71(05) 052801R**
- 通过测量 ${}^{16}\text{N}$ 的 β 缓发 α 衰变，确定了最重要核天体反应 ${}^{12}\text{C}(\alpha,\gamma){}^{16}\text{O}$ 的反应截面电偶极成分 **PRL99(07)052502**
- 自主提出和开展了在加拿大和日本实验室的核天体物理实验，建立了核天体物理网络方程计算程序并实际应用于核合成的计算；在恒星光谱的定量分析及非局部热动平衡效应方面做了大量工作 **A&A503(09)533**

取得重要研究成果的国内外评价

- **Phys. Rev. Lett.** 评委之一对 ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$ 工作的评价是：本工作描述了一个极好的实验，它是首次利用放射性核束研究逆几何转移反应的范例之一；另一评委的评价是：本工作涉及了核物理的重要课题；作者利用新的技术来解决问题；该工作应该尽快在物理学界发布以激发起广泛的讨论
- **Phys. Rev.**的评委对 ${}^8\text{Li}(n,\gamma){}^9\text{Li}$ 的工作的评价是：就我所知，迄今尚无天体物理重要的不稳定核中子俘获截面的成果发表；本文描述了一个极好的工作，它消除了 ${}^8\text{Li}(n,\gamma)$ 绝对截面的长期分歧。日本国立天文台的**Toshitaka Kajino**教授认为：你们的实验吸引了众多日本同行的注意，他们想了解更多的细节， ${}^8\text{Li}$ 的物理数据是国际核天体物理的关注点之一。同期在**Phys. Rev. Lett.**发表类似工作的作者来信认为：我非常有兴趣地发现，你们将数据用于天体物理中，在这点上我必须承认在我的工作中没有加以关注。
- 在国家自然科学基金重点基金的结题专家认为：项目组在核物理与天体物理交叉的重要科学研究领域中做了大量的工作，全面完成了研究计划，取得了一些重要的研究成果。在取得上述重要研究成果的同时，通过本项目的实施，培养了一批年轻的科研人才，促进了国内核物理界与天体物理界的交流与合作，开展了有效的国际合作，为我国该领域的研究打下了良好的基础。

群体的学科交叉：以核物理为基础， 与天体物理交叉

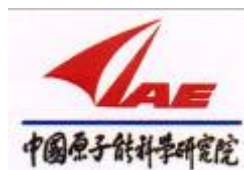
- 基于原子能院的放射性次级束装置、兰州近物所的**CSR** 大科学工程
- 与国际重要的核天体物理实验室和国家天文台的观测条件结合
- 自然形成学科交叉、核物理与天体物理结合、实验与理论结合的群体优势



核物理与天体物理联合研讨会

群体与天文口的交叉和国际合作情况

- 作为交叉学科，本群体十分注意加强与国内天文口的交流。如今年在国家天文台举办了核物理与天体物理联合研讨会。中国原子能科学研究院、中科院国家天文台、中科院紫金山天文台、南京大学、北京大学和中科院近代物理所参会，包括陆埏和张焕乔两位院士。加强了我国核物理与天体物理的学科交叉，就通过网络计算把核天体物理实验数据与天文观测联系起来开展联合研究形成了共识
- 研究群体建立了广泛的国际交流渠道；与加拿大粒子物理与核物理国家实验室**TRIUMF**和美国圣母大学核天体物理研究所**ISNAP**等签署了谅解合作备忘录
- 与上述两个实验室及日本理化学研究所、日本大阪大学、德国重离子研究中心、日本东京大学（今年将签订谅解合作备忘录）、日本国立天文中心、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



群体学术负责人 柳卫平简介

- 在中国原子能科学研究院建成我国第一个低能次级放射性核束装置，并在此装置上主持完成了一系列重要的放射性核束物理和核天体物理实验，其中包括**96**年国际上首次利用渐进归一化常数方法确定高能太阳中微子的产生截面等，主持本组在加拿大和日本核天体物理实验。在我国开创了利用放射性核束开展核天体物理交叉学科实验研究的新领域
- 获国家优秀留学回国人员称号，任多次核天体物理国际会议的国际咨询委员会(IAC)成员，现任国际纯粹与应用物理学会IUPAP-C12成员，日本理化学研究所核物理学学术委员会成员
- 获**96**年香港求是杰出青年学者奖、国家科技进步二等奖和**06**年国防科技进步二等奖
- 主持多项国家自然科学基金，其中包括国家杰出青年基金，重大国际合作基金；被评为国家自然科学基金优秀成果；任**973**项目课题负责人

- 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 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

2010年德国第11届NIC会议IAC委员
在国际上占有一席之地
(04, 08, 10三次任IAC委员)

群体成员介绍



- **李志宏**：原子能院研究员。曾在日本理化学研究所从事**RHIC-SPIN**实验研究。从事放射性核束和核天体物理实验研究。负责**3**项国家自然科学基金，主持了 ${}^6\text{He}(\text{p}, \text{n}){}^6\text{Li}$ ， ${}^8\text{Li}(\text{d}, \text{p}){}^9\text{Li}$ 和 ${}^{13}\text{N}(\text{d}, \text{n}){}^{14}\text{O}$ 工作，获得了一些对核结构、核天体物理有重要意义的**不稳定核反应数据**



- **王友宝**：原子能院研究员，曾在芬兰获博士学位，从事衰变核谱学-核结构实验研究。人事部留学人员科技活动项目择优资助经费，基金委科学部主任基金及面上项目等多项资助。开展了**次级束核天体物理相关弹性共振散射的厚靶实验研究**



- **陈永寿**：原子能院研究员。从事原子核结构以及核天体物理等理论研究。在国际上较先完成了对**典型三轴形变系统**学研究。建立了**反射不对称壳模型**，开展了核天体物理理论和网络计算



- **施建荣**：国家天文台研究员，德国慕尼黑大学天文和天体物理研究所工作。主要从事**高分辨率光谱的分析**、**银河系化学演化和恒星参数确定**方面的研究工作。在**晚型恒星大气中非局部热动平衡效应**、**银河系化学演化和实验室天体物理**等方面开展了一系列的研究工作



- **何建军**：中科院近物所研究员，百人计划获得者。先后在日本东京大学和英国爱丁堡大学开展研究工作，目前在兰州近物所从事核天体物理研究工作。

群体成员介绍（续）



- **唐晓东**：美国圣母大学讲师，主要从事放射性核束与核天体物理实验研究。曾任美国Texas A&M大学博士，Texas A&M大学和阿贡国家实验室博士后



- **郭冰**：原子能院副研究员，曾在加拿大开展核天体物理实验，全国优秀博士论文提名奖获得者。目前主要从事放射性核束与核天体物理实验研究



- **连钢**：原子能院副研究员，曾德国波鸿大学做访问学者。目前主要从事放射性核束与核天体物理实验研究



- **白希祥**：原子能院研究员，93年在中国原子能科学研究院建成我国第一个低能次级放射性核束装置，96年获国家科技进步2等奖。目前主要从事放射性核束与核天体物理实验研究

- 本群体以原子能院多位优秀科研骨干为核心，适当结合国内外优秀的研究成员，均具有在国内外一流实验室开展研究的经历，核物理实验、理论和天体物理人才搭配合理，自然形成了学科交叉和优势互补，具备了集成创新的能力

群体研究的主攻方向： 国际公认的核天体物理关键科学问题

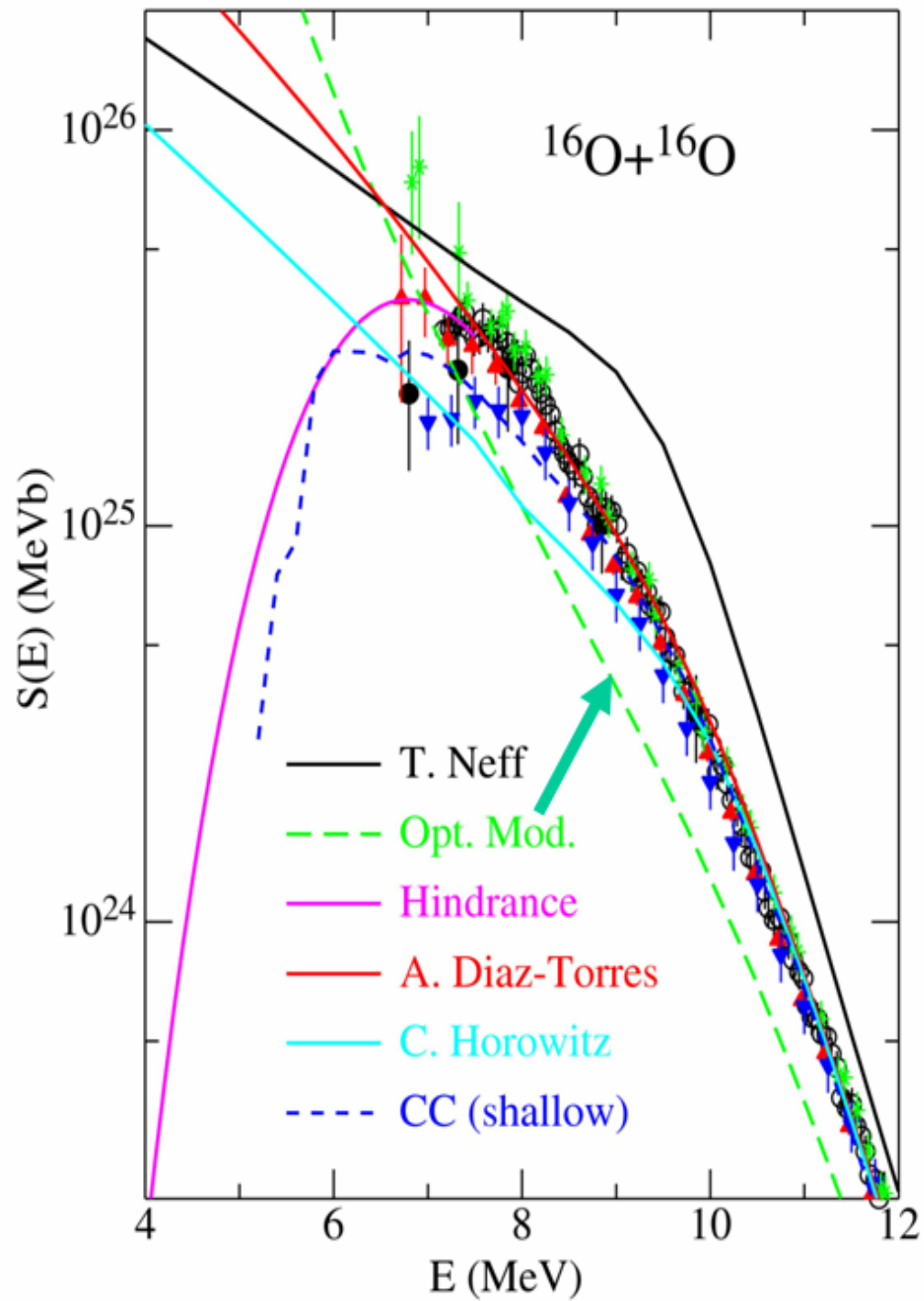
1. 恒星平稳演化阶段最重要的热核反应在天体物理能区的直接测量
2. 高能区带电粒子反应截面向天体物理能区的合理外推
3. 若干关键的平稳核燃烧阶段和爆发性 rp 及 r 过程核反应截面的间接测量
4. rp 和 r 过程涉及核素衰变性质、质量、反应和共振态性质的测量
5. 核天体物理反应和衰变性质的理论研究、数据库和网络方程的建立
6. 通过关键数据输入网络计算，结合元素丰度的观测研究天体核合成的场所

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

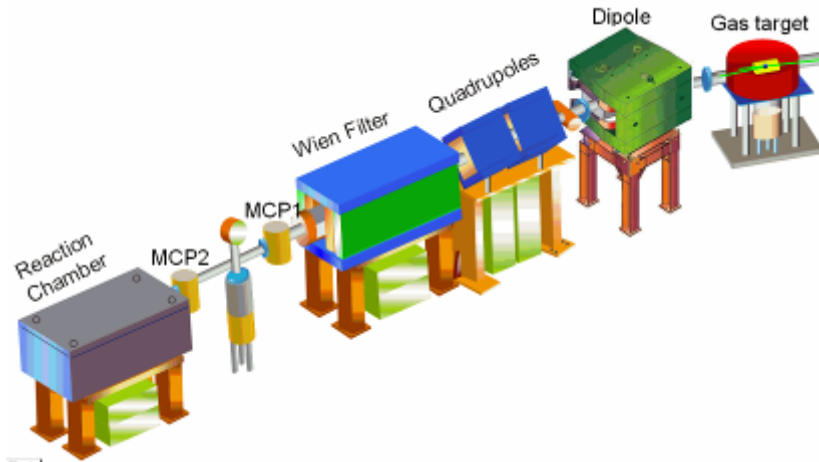
群体计划研究工作的主攻方向

- 开展直接测量，检验和改进低能外推（问题1、2）
 - 在TRIUMF实验室开展 (p,γ) 反应直接测量，澄清理论和实验分歧
 - 在美国圣母大学将重离子融合反应截面的测量扩展到核天体物理能区，开展 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 和 $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ 等反应的直接测量，检验低能外推
- 通过间接测量确定关键核天体物理反应数据（问题3）
 - 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；在兰州近物所和日本大阪大学开展爆发性核燃烧过程中重核区 (p,γ) 和 (n,γ) 反应间接测量
 - 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

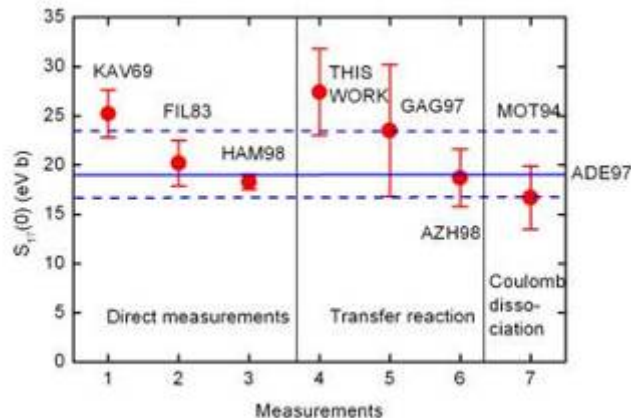
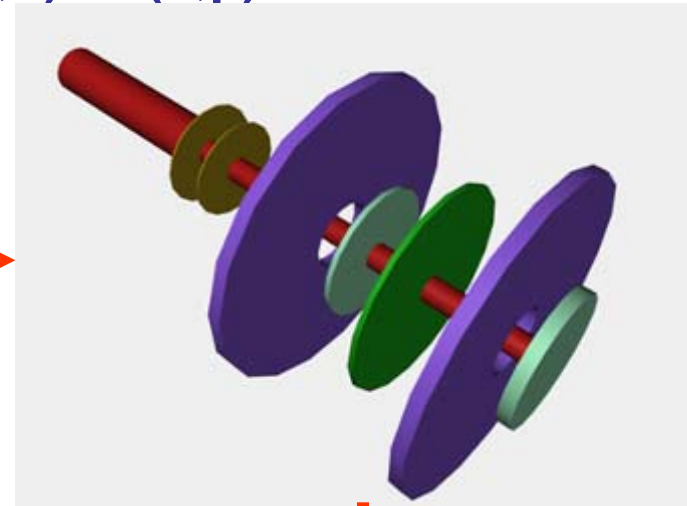


间接测量的研究路线

RIB production



(d,n) or (d,p) measurement



$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{exp}} - \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{CN}} = \sum_{ji j_f} (C_{li ji}^d)^2 (C_{lf jf}^{12\text{N}})^2 \frac{d\sigma_{lf jf li ji}^{\text{DW}}/d\Omega}{b_{li ji}^2 b_{lf jf}^2},$$

$$\sigma_t = \frac{16\pi}{9} \left(\frac{E_\gamma}{\hbar c}\right)^3 \frac{1}{\hbar v} \frac{e_{\text{eff}}^2}{k^2} \frac{(2j_f + 1)}{(2I_1 + 1)(2I_2 + 1)} C_{\ell_f j_f}^2 \times \left| \int_{R_N}^{\infty} r^2 dr f_{\ell_j}(kr) W_{\eta, \ell_f + 1/2}(2\kappa r) \right|^2,$$

Astrophysical reaction rates

ANC or Spec factor

群体计划研究工作的主攻方向

- 开展**rp**和**r**过程核素的衰变性质测量（问题4）
 - 在兰州近物所和日本理化学研究所分别开展快速质子俘获**rp**过程核素和快速中子俘获**r**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（问题5，6）
 - 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，并与国家天文台等天文观测丰度进行比较，研究元素核合成的天体场所
 - 建立可靠的**Fe**、**Cu**和**Zn**等重要元素的原子模型，与上述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

- 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
- 本群体通过在核天体物理领域近二十年的研究工作，开创和发展了利用低能放射性束流开展关键核天体物理反应测量的新领域，取得了一系列开创性的研究成果，在国际核天体物理学界占有了一定的地位
- 本群体瞄准核天体物理六大关键科学问题，利用国内外的大科学平台，采取先进的研究方案，系统测量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，并与天文观测相比较，在恒星演化和元素核合成方面取得创新成果

谢谢各位评委！

网络计算丰度结果与天文观测的结合思路

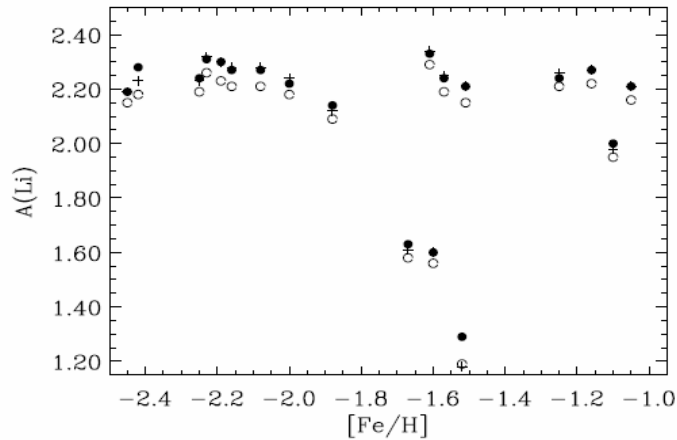


Fig. 5. $A(\text{Li})$ abundances analysis as a function of $[\text{Fe}/\text{H}]$. Symbols are the same as in Fig. 4.

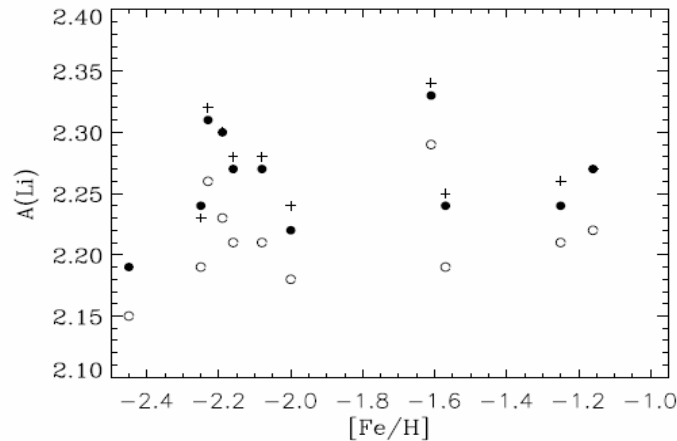


Fig. 6. Same as Fig. 3, but only with the stars with $T_{\text{eff}} > 6000$ K. Symbols are the same as in Fig. 4.

- 目前,天文学发展到这样的一个阶段:宇宙大尺度结构和恒星演化理论比较清楚,对中间的星系比较模糊
- 在这样的背景下,星系演化作为连接宇宙和恒星的桥梁,具有重要意义。核天体物理反应测量及网络计算对澄清以上问题有重要意义
- 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解释
- 例如,利用我们系统测量的涉及Li的核反应截面带入网络计算可与左图的观测丰度进行比较

${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$ 核天体物理反应间接测量

- ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$ 核天体物理反应间接测量
- ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$ 反应的天体物理S因子与核天体物理中著名的太阳中微子丢失之谜密切相关。利用串列加速器次级束装置产生的 ${}^7\text{Be}$ 束流，完成了 ${}^7\text{Be}(d,n){}^8\text{B}$ 反应角分布的研究工作。这是我国第一个放射性核束物理实验，也是国际上最早将放射性核束用于研究逆运动学转移反应的工作之一。在国际上率先利用测量的角分布和渐进归一化常数方法，间接测出了太阳温度下 ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$ 反应的S因子。这项采用全新实验方案和理论的研究成果，对已有数据提供了一个重要的交叉检验，表明 ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$ 反应截面不是造成太阳中微子丢失的原因。论文发在Physical Review Letters上，并引发了国外若干类似的实验和理论工作
- ${}^{40}\text{Ti}$ 衰变性质的测量
- 在德国GSI重离子实验室负责开展了 ${}^{40}\text{Ti}$ β -缓发质子衰变的测量，并利用镜像对称性，在国际上首次导出了 ${}^{40}\text{Ar}$ 吸收太阳中微子的截面，其结果是国际权威学者Bahcall预言值的四倍，该结果已被用于探测中微子振荡的意大利ICARUS探测器的刻度，成果发表在Z. Physics和Physical Review C上

$^8\text{Li}(\text{d}, \text{p})^9\text{Li}$ 反应的实验研究

- $^8\text{Li}(\text{d}, \text{p})^9\text{Li}$ 反应的实验研究
- $^8\text{Li}(\text{n}, \text{g})^9\text{Li}$ 反应在二类超新星及大爆炸核合成中具有重要意义，但由于没有自由中子靶，而 ^8Li 的半衰期又太短（**838 ms**）不能作靶，无法实现直接测量。国际上用 ^9Li 库仑离解的方法对该反应进行了间接测量，但只给出了截面上限，同时理论结果也相差很大。利用原子能院次级束流线产生的 ^8Li 次级束，采取 ^9Li 与质子符合的实验技术，测量了 $^8\text{Li}(\text{d}, \text{p})^9\text{Li}$ 反应的角分布。通过**DWBA**理论分析导出了 ^9Li 基态的中子谱因子，应用体积分限制光学势的理论处理方法，解决了几何参数不确定的难题，在国际上首次得出了 $^8\text{Li}(\text{n}, \text{g})^9\text{Li}$ 反应直接俘获过程的核天体物理反应率。文章发表在**Physical Review C**的 **Rapid communication**上。
- 高温**CNO**循环中的关键反应 $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ 的实验研究
- 通过测量 $^{13}\text{N}(\text{d}, \text{n})^{14}\text{O}$ 反应的角分布，利用**ANC**方法间接确定了 $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ 的天体物理**S**因子和反应率，证实了直接俘获贡献不可忽略，成果发表在**Physical Review C**上。
- 放射性离子束与 ^4He 和 ^1H 的弹性和非弹共振散射实验
- 通过 ^{17}F 束流轰击氢靶测量了弹性和非弹共振散射，得到了对新星和X射线爆有重要意义的 $^{14}\text{O}(\text{a}, \text{p})^{17}\text{F}$ 反应的非弹性道贡献。结果表明其非弹性道与基态贡献相当，说明该反应在新星和X射线爆的高温环境中更加重要，成果在**Physical Review C**的 **Rapid communication**上发表。
- 通过 ^{13}N 束流轰击氢靶测量了弹性共振散射，得到了 ^{14}O 若干激发态的能级参数，对已有的数据提供了一个独立的交叉检验，成果发表在**Physical Review C**上。

- 利用(d,p)反应确定不稳定核的天体物理(p,γ)反应率
- 利用 ^8Li , ^{11}B , ^{26}Mg (d,p)反应的角分布和镜像核电荷对称性间接导出了 $^8\text{B}(p,\gamma)^9\text{C}$, $^{11}\text{C}(p,\gamma)^{12}\text{N}$ 和 $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$ 的天体物理S因子和反应率。其中, $^8\text{B}(p,\gamma)^9\text{C}$ 反应的结果为现有数据提供了一个独立的交叉检验;对于 $^{11}\text{C}(p,\gamma)^{12}\text{N}$ 反应,我们给出的 ^{12}N 第一激发态的质子宽度为 $0.91 \pm 0.29\text{keV}$,远小于IAEA收录的质子宽度上限(20keV);对于 $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$ 反应,我们第一次从实验上导出了 $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$ 反应的直接俘获贡献。成果分别发表在Nuclear Physics A、Journal of Physics G和Physical Review C上。这种方法具有较好的普适性,可以用于其它一系列重要天体物理反应的研究。
- 国际合作取得多项成果
- 除以上提到的 ^{40}Ti 的衰变的研究外,与德国波鸿大学合作,开展了各种金属、半导体和绝缘体中d(d,p)t反应电子屏蔽势的系统测量,发现金属环境中的电子屏蔽势普遍显著增高。该工作对研究天体等离子体中的热核聚变反应有重要意义;项目负责人提出在加拿大TRIUMF国家实验室开展 $^{11}\text{C}(p,\gamma)^{12}\text{N}$ 反应直接测量的国际合作实验计划,获得该实验室学术委员会的批准,目前项目进展顺利。同时,项目组参加了该实验室和芬兰JYFL实验室完成的最重要的核天体物理反应 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 和 $3\alpha \rightarrow ^{12}\text{C}$ 的实验工作,研究成果分别在Physical Review Letters和Nature上发表。完成了自主在日本理化所提出的 $^{12}\text{N}(p,\gamma)^{13}\text{O}$ 实验,已取得初步实验结果。

其他研究成果

- 确定了最重要核天体反应 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 的SE1 因子
- $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应是决定恒星中碳和氧的比例的主要反应之一，对大质量恒星晚期的演化有决定性的影响，其截面是最重要的核天体物理数据。测量 ^{16}N 的 β 缓发 α 衰变被认为是决定截面电偶极E1成分（SE1 因子）的最好方法，利用设计巧妙的电离室，克服了本底干扰，成功地得到这一关键数据，成果在Physical Review Letters上发表；
- 建立核天体物理网络方程
- 自主建立了核天体物理网络方程计算程序及相应的核数据库，并实际应用于核合成的计算，将项目组测量的 $^{11}\text{C}(\text{p}, \gamma)^{12}\text{N}$ 和 $^8\text{Li}(\text{n}, \gamma)^9\text{Li}$ 反应带入，得到对高温pp反应链和 ^{12}C 丰度的影响。开发的核天体物理网络方程，不但可以计算天体环境元素的核合成，同时还有潜在的国防应用价值。得到的实验数据和理论成果在相关的核工程计算方面也有一定的应用前景，其中 $^8\text{Li}(\text{d}, \text{p})^9\text{Li}$ 的实验成果已被国际原子能组织IAEA的数据库收录。
- 在恒星光谱的定量分析及非局部热动平衡（NLTE）效应方面做了大量工作
- 建立了Li至Fe多个原子模型，分析了多批样元素丰度，相关成果被《天文与天体物理年评》大量引用。系统研究了高自行恒星和晕星的Na、Mg和Al三种元素的丰度，表明结合恒星的运动学性质可以区分晕、厚盘和薄盘恒星；详细分析了一批贫金属恒星中Li、Be和B等轻元素的丰度，并做了NLTE效应修正。研究了Si在太阳中的NLTE效应，并发现Si在贫金属晕星和厚盘恒星中是过丰的。这些结果对我们了解银河系的形成有很大的帮助，相关的论文在国际天文杂志Astronomy and astrophysics上发表。

研究成果在国内外的地位

- 由于我们开展的各项研究均为国际前沿课题，均面临着激烈的国际竞争，同期开展相关工作的有美国得克萨斯农工大学、密西根州立大学和阿贡国家实验室，法国重离子物理国家实验室和日本理化学研究所。由于研究集体及时掌握了国际动态，并采用了创新的实验技术和理论方法，在国际竞争中走到了前列
- 近10年来，课题组多次获973和杰出青年等基金项目支持，在包括Phys. Rev. Lett. 和Phys.Lett. B等国、内外重要物理刊物上发表SCI文章超过150篇，被包括Review of Modern Physics多次正面引用，并被国际原子能机构和美国联合天体物理研究中心数据库多次收录，在国际核天体物理学术会议上报告超过40人次。相关研究成果获96年国家进步2等奖，96年香港求是杰出青年奖、06年国防科技进步2等奖
- 由于上述国际水平的研究成果，研究集体在国际实验核天体物理学界的知名度日渐提高，成员多次在国外实验任发言人、在国际会议上做报告和在国内学术组织任职。项目负责人柳卫平在加拿大2002年EMIS会议、美国2004年NIC8会议、日本2005年OMEG会议上做邀请报告或大会报告，5次被选为国际会议的国际咨询委员会成员；任北京2009年NN会议和日本中日核物理会议联合主席；现任中国物理学会核物理分会副主任委员、兰州国家实验室、北京大学国家重点实验室和上海光源国家实验室学术委员、日本理化学研究所核物理国际咨询委员会委员、国际纯粹与应用物理学会核物理分会（IUPAP-C12）委员和中国科学、中国物理的学术刊物编委

人才培养、学科交叉与国际合作

- 通过以上工作，自然形成了一个高水平的、理论、实验和观测结合的青年科技骨干为主的研究团队。在项目组中**1**人获国家杰出青年基金和人**973**项目课题负责人、**1**人入选中科院百人计划、**9**人具有高级职称、**1**人在美国圣母大学任助教授、**1**人获全国优秀博士论文提名奖。项目组成员荣获国家科技进步二等奖、国家自然科学基金二等奖、香港求是基金会杰出青年奖、吴有训物理奖和胡济民教育科学奖
- 作为交叉学科，本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。参加会议的有中国原子能科学研究院、中科院国家天文台、中科院紫金山天文台、南京大学、北京大学和中科院近代物理所的研究人员，包括陆埏和张焕乔两位院士。以本群体为主的研究人员在会议上作了报告。会议加强了我国核物理与天体物理的学科交叉，就通过网络计算把核天体物理实验数据与天文观测联系起来开展联合研究形成了共识
- 研究群体建立了广泛的国际交流渠道；与加拿大粒子物理与核物理国家实验室**TRIUMF**和美国圣母大学核天体物理研究所**ISNAP**等签署了谅解合作备忘录；与上述两个实验室及日本理化学研究所、日本大阪大学、德国重离子研究中心、日本东京大学、日本国立天文中心、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

与当前国内外同类研究的综合比较

- 对于高能太阳中微子的产生反应 ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$ ，当时国际上仅有直接测量结果，受放射性 ${}^7\text{Be}$ 靶的影响，绝对误差很大。迫切需要独立的实验测量方法进行交叉检验。利用转移反应开展间接测量的思路虽已提出，但当时国际上受实验条件和理论处理方法的限制尚未开展。我们及时抓住了这一宝贵机遇，利用我国刚建成的第一个低能放射性次级束装置开展了该项工作，取得了国际领先的研究成果
- ${}^8\text{Li}(n,\gamma){}^9\text{Li}$ 是IBBN模型中关键反应之一。由于 ${}^8\text{Li}$ 无法做成反应靶，只能进行间接测量，但国际上采用库伦裂解方法进行的测量只给出了反应率的上限。我们采用 ${}^9\text{Li}$ 与质子符合以降低本底的实验方案，测量了 ${}^8\text{Li}(d,p){}^9\text{Li}$ 反应，在国际上第一次通过实验给出了 ${}^8\text{Li}(n,\gamma){}^9\text{Li}$ 反应率的上、下限，并澄清了理论计算的分歧
- 在核天体物理网络计算方面，美国橡树岭国家实验室开展了此项研究，但由于其潜在的国防应用价值，计算程序不对外公开。我们自主开发了网络计算程序，并建立了核天体物理数据库，用于核天体物理计算。结果表明我们程序的能力与国际水平相当

群体成员近5年发表的代表性成果



- **Z.H. Li (李志宏), W.P. Liu (柳卫平), X.X. Bai (白希祥) et al.**, The $^8\text{Li}(d, p)^9\text{Li}$ reaction and the Astrophysical $^8\text{Li}(n, \gamma)^9\text{Li}$ reaction rate, *Phys. Rev. C* 71 (2005) 052801(R).
- **Hans O.U. Fynbo, ..., YouBao Wang (王友宝) et al.**, Revised rates for the stellar triple- α process from measurement of ^{12}C nuclear resonance, *Nature* 433 (2005) 136
- **Z. H. Li (李志宏), B. Guo (郭冰), S.Q. Yan et al.**, The $^{13}\text{N}(d, n)^{14}\text{O}$ Reaction and the Astrophysical $^{13}\text{N}(p, g)^{14}\text{O}$ Reaction Rate, *Phys. Rev. C* 74 (2006) 035801.
- **B. Guo (郭冰), Z.H. Li (李志宏), W.P. Liu (柳卫平) et al.**, Determination of the astrophysical $^{11}\text{C}(p, \gamma)^{12}\text{N}$ reaction rate from the asymptotic normalization coefficients of $^{12}\text{B} \rightarrow ^{11}\text{B} + n$, *J. Phys. G* 34 (2007) 103
- **X.D. Tang (唐晓东), K. E. Rehm, I. Ahmad et al.**, New Determination of the Astrophysical S Factor $SE1$ of the $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ Reaction, *Phys. Rev. Lett.* 99 (2007) 052502.
- **Y. S. Chen (陈永寿), Yang Sun and Zao-Chun Gao**, Nonaxial-octupole effect in superheavy nuclei, *Phys. Rev. C* 77 (2008) 061305(R).
- **Y.B. Wang (王友宝), B.X. Wang, X. Qin et al.**, $^{13}\text{N} + p$ elastic resonance scattering via a thick-target method, *Phys. Rev. C* 77 (2008) 044304.
- **J.J. He (何建军), P.J. Woods et al.**, Measurement of the inelastic branch of the $^{140}(\alpha, p)^{17}\text{F}$ reaction: Implications for explosive burning in novae and x-ray bursters, *Phys. Rev. C* 80 (2009) 042801 (R).
- **J.R. Shi (施建荣), T. Gehren, L. Mashonkina, G. Zhao**, Statistical equilibrium of silicon in metal-poor stars' atmosphere, *Astronomy and Astrophysics* 503 (2009) 533-540.
- **W.P. Liu (柳卫平), Z.H. Li (李志宏), X.X. Bai (白希祥) et al.**, Lithium induced nuclear reactions of astrophysical interest, *Nucl. Phys. A* 834 (2010) 651c32/23

群体成员研究分工

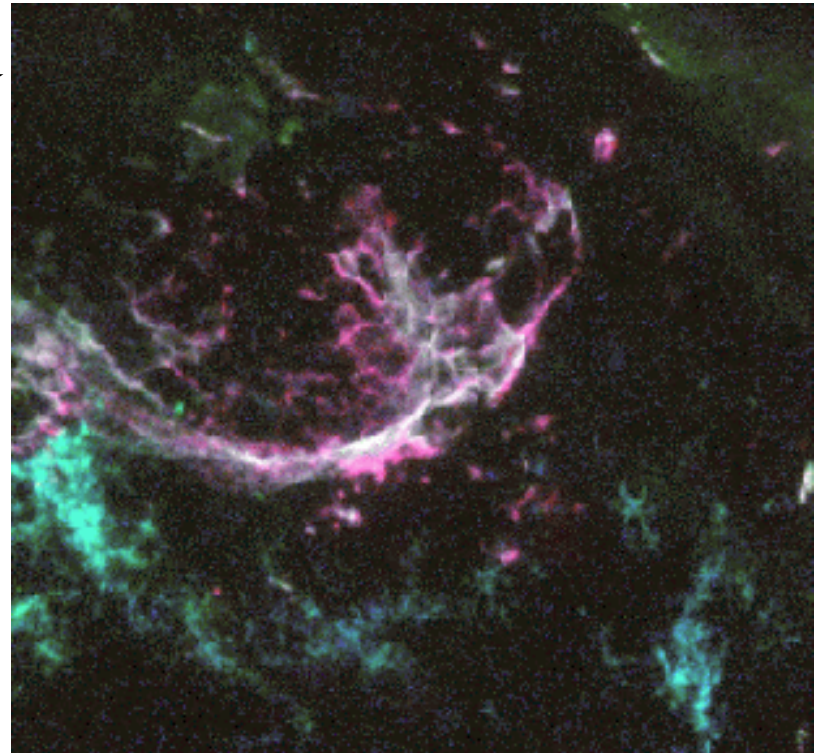
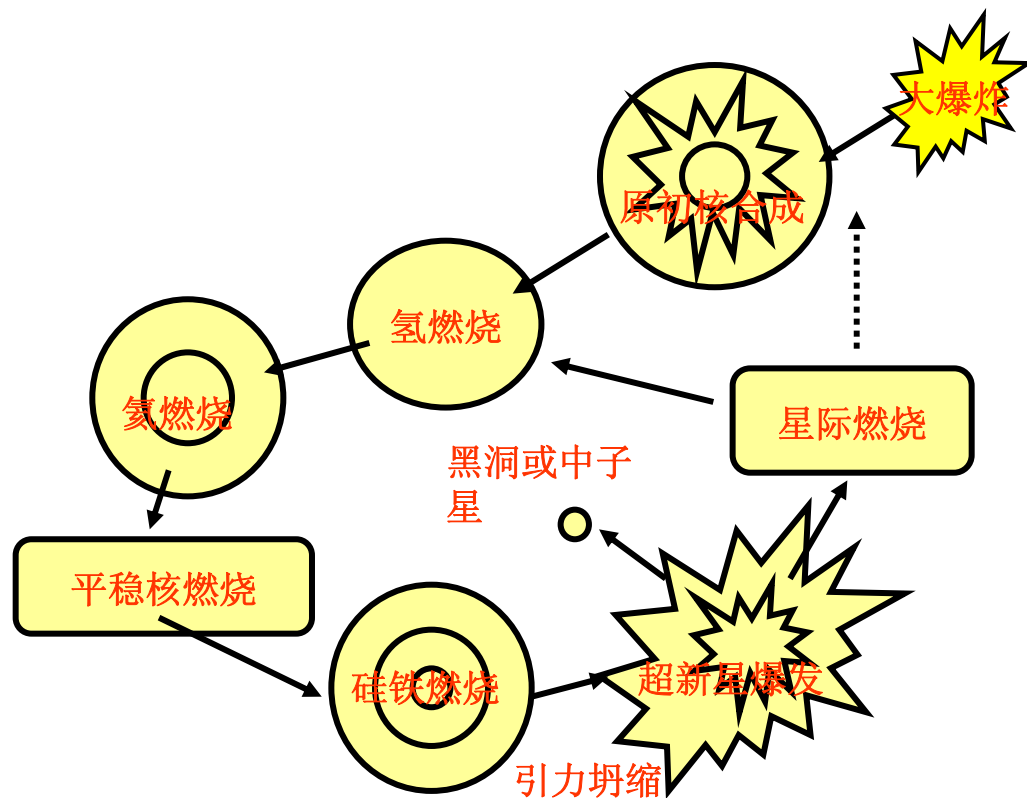
李志宏	中国原子能科学研究院	核反应实验
王友宝	中国原子能科学研究院	核衰变实验
陈永寿	中国原子能科学研究院	天体网络方程
施建荣	中国科学院国家天文台	元素丰度观测
何建军	中国科学院近代物理研究所	核散射实验
郭冰	中国原子能科学研究院	核反应实验， 数据处理
连钢	中国原子能科学研究院	核衰变实验， 探测器
白希祥	中国原子能科学研究院	物理指导
唐晓东	美国圣母大学	核反应直接 测量



天文数据和核物理实验

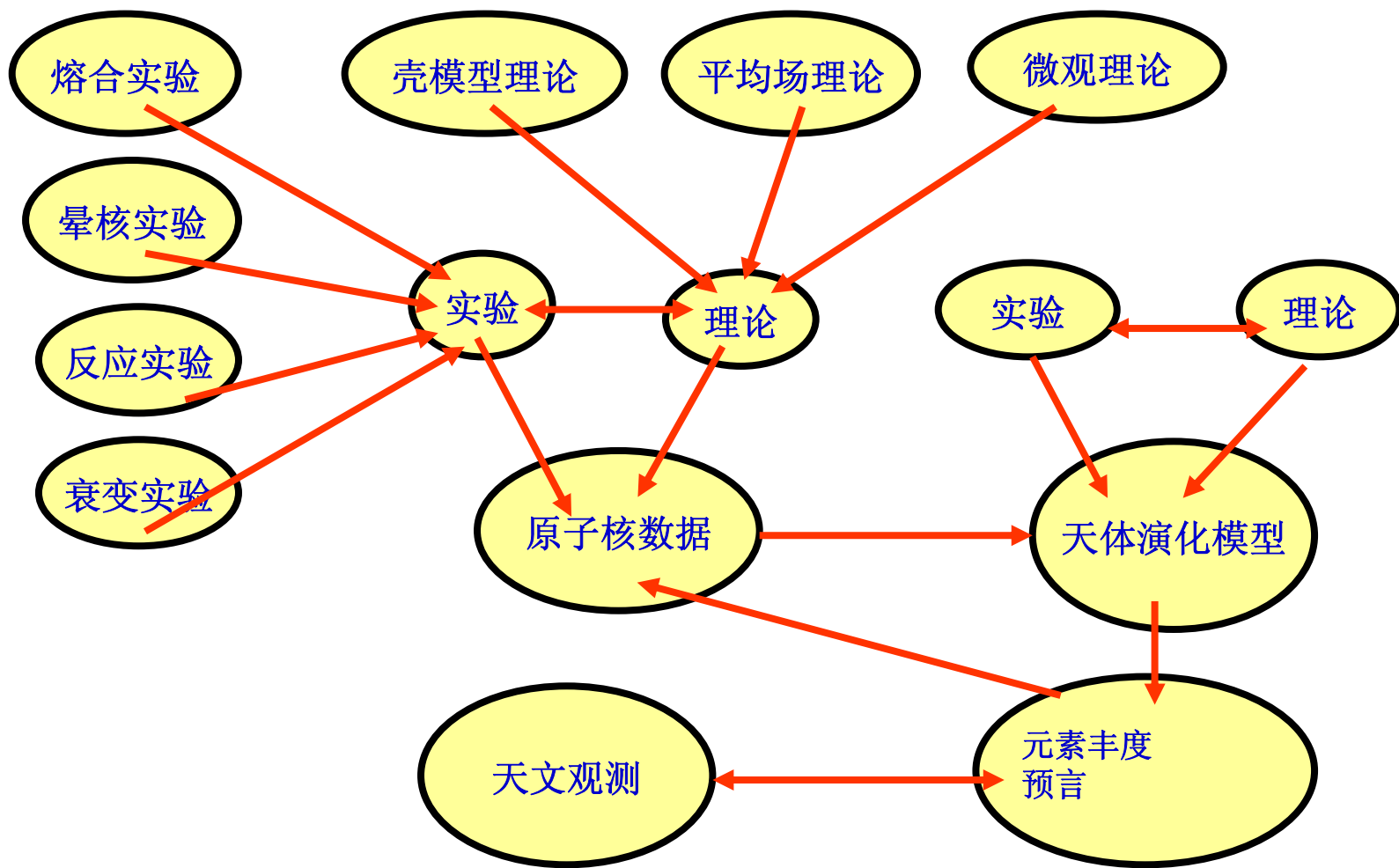
- 地面和空间日益增长的观测数据提供了丰富的宝藏，它需要包括复杂的流体动力学和核过程的精细的理论模型来解释。同时，核物理研究的进展是我们可以突破了解宇宙核过程的障碍。这些核过程覆盖了从超新星过程中的微子-核子相互作用，恒星中的低能带电粒子核反应，和平稳及爆发性核燃烧中的不稳定核反应，到在中子星内部极高密度物质中的光致裂变过程
- 由于星体环境的极端条件，了解其中的核过程对核物理的理论和实验工作者是一个极大的挑战。而核天体物理实验的进展使得今天我们可以在实验室条件下研究许多发生在星体环境的核过程。这些研究同样涵盖了广泛的大科学平台和探测技术，包括研究恒星内部过程的新的核反应测量方法，研究极端环境下爆发性新的放射性束流装置

天体演化中的核过程



Hubble天文望远镜得到的超新星爆发遗迹**N132D**的图像。大质量星通过核聚变反应在核心进行元素合成。从轻元素氢和氦开始，逐步到更重的碳氮氧，一直到铁。在其生命的尽头是壮观的大爆炸，即超新星爆发。它们产生的物质抛洒到空间，对其他星体和星系的形成产生贡献。 **Credit: J. Morse (STScI) and NASA.**

核物理与核天体物理



- 现有的核物理知识主要是通过研究稳定核建立起来的，对远离稳定线的核素是否适用还有待进一步探讨。核天体物理也是前沿领域之一。
- 放射性束流的产生和应用，为开展远离稳定线的核素和核天体物理研究打下了基础。

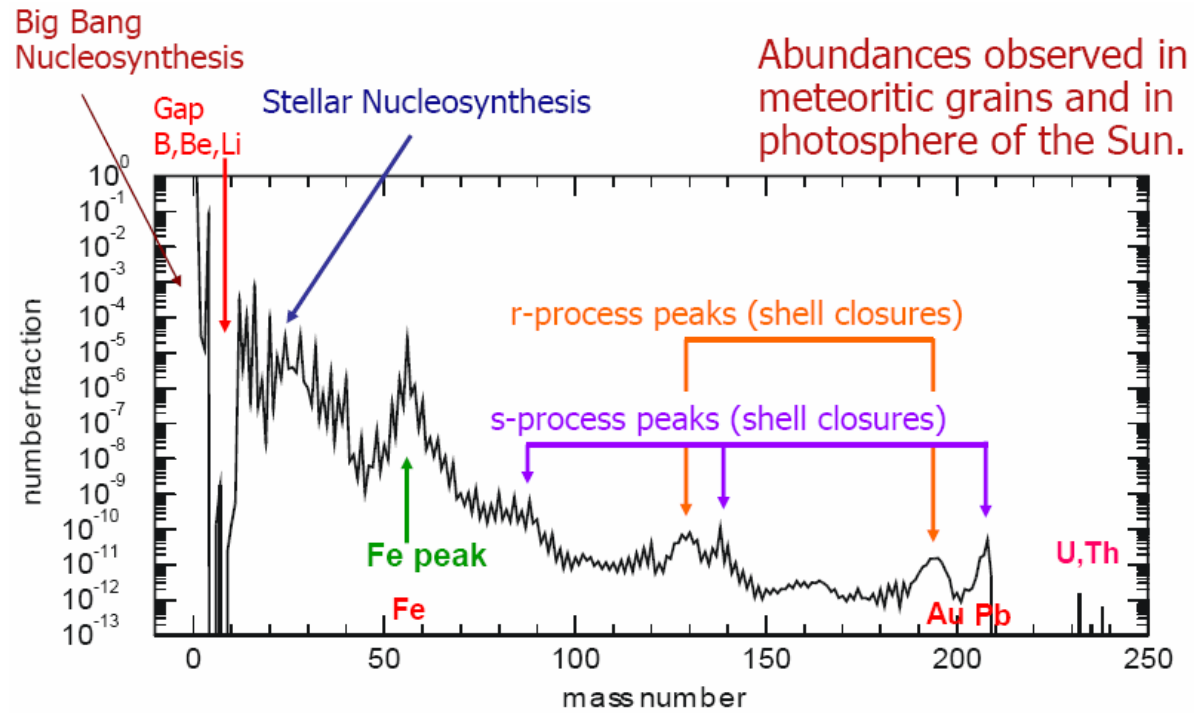


原子核的极限-超重核

远离稳定线的放射性束的出现，可以对离开稳定核数个中子的核素依次系统研究，实现原子核层次的单中子操作，可能会产生新的幻数、壳的减弱和消失等新现象，可能会引起对原子核结构认识的突破。放射性核束物理也可理解成在新的同位旋平台上对核物理进行再研究。这也为核天体物理的研究提供了机遇。

快速中子俘获r过程-1

- 对重核素的贡献大约占一半(^{209}Bi 以上核素全部由r-过程产生)。但很多基本问题, 如过程的具体场所和产生元素丰度的微观机制, 还远未彻底了解, 这集中体现在理论与实验的r-过程核素丰度的差别上
- 合成场所存在多样性缺乏判断其正确性的判据; 中微子效应的不确定性和丰中子核的基本数据的缺乏
- r-过程的中子俘获速率大大高于 β -衰变的速率, 大量丰中子核素的反应卷入其中, 弄清r-过程的天体物理环境和重元素形成的机制是当前核天体物理研究的重要问题之一



- 为了消除这些不确定性，除了加强天文观测和发展天体物理模型之外，是通过核物理和粒子物理实验提供更加准确的关键数据，用于刻度r-过程核的理论计算模型
- 需要测量几十个有代表性的极端丰中子核的质量、衰变、反应和裂变数据，国内外都在兴建和计划放射性核束大科学装置，如兰州**CSR**和北京**BRIF**，国际上有日本的**RIBF**、法国的**SPIRAL**和美国的**FRIB**，将提供测量r-过程路径上的丰中子核数据的机遇，从而发展核理论模型，排除核物理输入量的不确定性
- **G. Wallerstein et al., Rev. Mod. Phys. 69, 995(1997)**
- **Burbidge, E. M., G. R. Burbidge, W. A. Fowler, and F. Hoyle, 1957, Rev. Mod. Phys. 29, 547.**
- **C. Rolfs, Cauldrons in the cosmos, The University of Chicago Press, 1988.**

美国的核物理大科学工程: FRIB

- Nuclear physics and astronomy are inextricably intertwined. In fact, more than ever, astronomical discoveries are driving the frontiers of nuclear physics while our knowledge of nuclei is driving progress in understanding the universe.
- Because of its powerful technical capabilities, FRIB will forge tighter links between the two disciplines. Rare isotopes play a critical role in the evolution of stars and other cosmic phenomena such as novae and supernovae, but up to now the most interesting rare isotopes have been largely out of the reach of terrestrial experiments. FRIB will provide access to most of the rare isotopes important in these astrophysical processes
- Recent astronomical missions such as the [Hubble Space Telescope](#), [Chandra X-ray Observatory](#), [Spitzer Space Telescope](#), and the [Sloan Digital Sky Survey](#) have provided new and detailed information on element synthesis, stellar explosions, and neutron stars over a wide range of wavelengths. However, scientists attempting to interpret these observations have been constrained by the lack of information on the physics of unstable nuclei.
- FRIB and future astronomy missions such as the [Joint Dark Energy Mission](#), and the [Advanced Compton Telescope](#) will complement each other and provide a potent combination of tools to discover answers to important questions that confront the field.

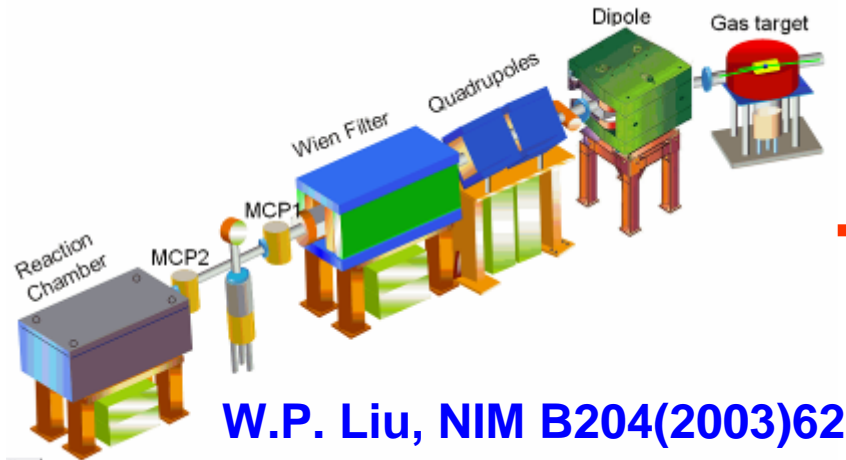
研究团队的进展

- 在核天体物理和放射性核束物理的国际前沿课题的研究中，采用了直接反应间接测量等创新的研究路线，在某些关键核天体物理和奇异核反应研究国际的竞争中走到了前列
- 项目成员多次发表高水平的文章，在国际会议上报告，并被选为国际会议国际咨询委员会成员。参加和提出了多次国际合作实验。培养了一批高水平的人才队伍
- 在我国发展了利用放射性核束进行核天体物理和放射性核束研究的领域，成为国际公认的放射性核束物理和核天体物理实验研究基地之一

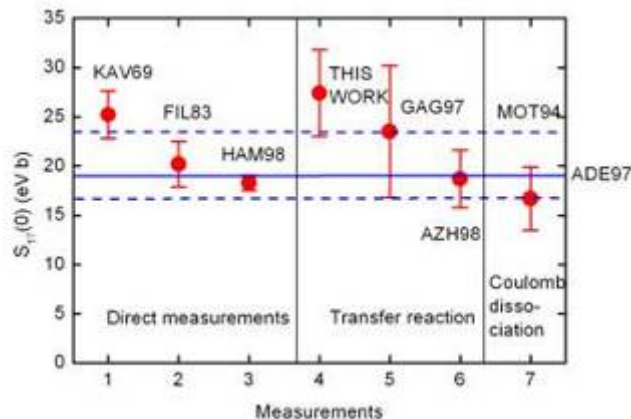
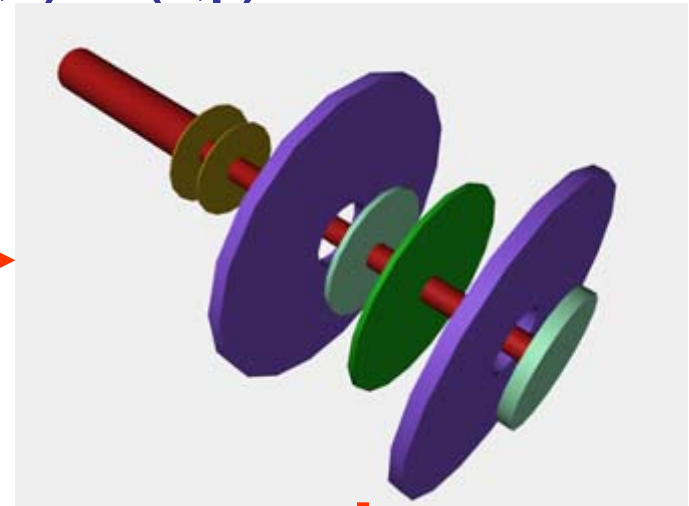
以往研究成果

- 作为一个独立的实验方法， ${}^7\text{Be}(\text{d},\text{n}){}^8\text{B}$ 反应角分布测量和 ${}^7\text{Be}(\text{p},\gamma){}^8\text{B}$ 反应天体物理 $S_{17}(0)$ 因子的导出，为探索太阳中微子问题作出了贡献（柳卫平等，**Phys. Rev. Lett.** **77(1996)611**，他引**25**次，引发多次国际同类实验和理论研究），建立了质子俘获截面间接测量方法
- 通过实验确定了对大爆炸原初核合成有重要意义的 ${}^8\text{Li}(\text{n},\gamma){}^9\text{Li}$ 反应率，建立了丰中核的中子俘获截面间接测量方法（李志宏，柳卫平等，**Phys. Rev. C** **71, 052801(R) (2005)**）；
- 核天体物理网络计算和相关结构计算；同位旋相关的微观光学模型势推广到不稳定核（陈永寿，舒能川；荣键，马中玉等，**Phys. Rev. C** **73, 014614 (2006)**）。

RIB production



(d,n) or (d,p) measurement



W.P. Liu, PRL77(1996)611

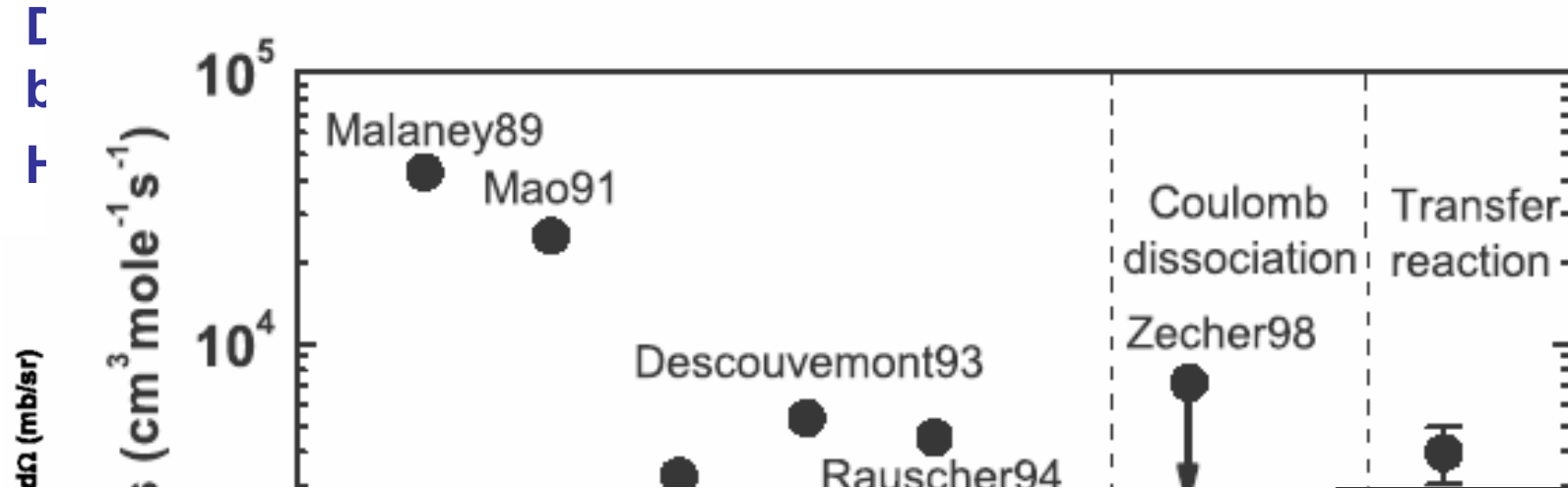
$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{exp}} - \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{CN}} = \sum_{ji j_f} (C_{li ji}^d)^2 (C_{lf jf}^{12\text{N}})^2 \frac{d\sigma_{lf jf li ji}^{\text{DW}}/d\Omega}{b_{li ji}^2 b_{lf jf}^2},$$

$$\sigma_t = \frac{16\pi}{9} \left(\frac{E_\gamma}{\hbar c}\right)^3 \frac{1}{\hbar v} \frac{e_{\text{eff}}^2}{k^2} \frac{(2j_f + 1)}{(2I_1 + 1)(2I_2 + 1)} C_{\ell_f j_f}^2 \times \left| \int_{R_N}^{\infty} r^2 dr f_{\ell_j}(kr) W_{\eta, \ell_f + 1/2}(2\kappa r) \right|^2,$$

Astrophysical reaction rates

ANC or Spec factor

原初核合成 ${}^8\text{Li}(n,\gamma){}^9\text{Li}$ 反应首次测量



sig

P.
PRC
(P)

RAPID COMMUNICATIONS

PHYSICAL REVIEW C **71**, 052801(R) (2005)

The ${}^8\text{Li}(d, p){}^9\text{Li}$ reaction and the astrophysical ${}^8\text{Li}(n, \gamma){}^9\text{Li}$ reaction rate

Z. H. Li, W. P. Liu, X. X. Bai, B. Guo, G. Lian, S. Q. Yan, B. X. Wang, S. Zeng,
Y. Lu, J. Su, Y. S. Chen, K. S. Wu, and N. C. Shu

China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275(46), Beijing 102 413, P. R. China

T. Kajino

National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan;

Department of Astronomy, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033 Japan

(Received 12 July 2004; revised manuscript received 28 October 2004; published 19 May 2005)

与加拿大TRIUMF签订的谅解备忘录

Memorandum of Understanding on Scientific Collaboration between China's Institute of Atomic Energy (CIAE) and Canada's National Laboratory for Particle and Nuclear Physics (TRIUMF)

(Final Revision at TRIUMF Oct 2 2006)

The collaboration between CIAE and TRIUMF during the first three years since the original signing of the MOU (June 20 2002) has been significant, with initial emphasis on accelerators. On the experimental side several contacts between scientists in both laboratories took place. A ^{11}C Radioactive Ion Beam (or RIB) experiment, approved and planned for 2005, could not yet take place because of difficulties encountered with the ECR source in a highly radioactive environment. An improved ECR source now being developed should allow the delayed experiment to take place soon. In the mean time a $^{19}\text{Ne}(p,\gamma)$ experiment is being organized to be on the floor within a year. The planned experiment will involve CIAE scientists.

It is agreed that the original MOU between CIAE and TRIUMF has been very useful for both laboratories and should be renewed for a period of three years from the date of this document. Following is the text of the renewed MOU for 2006-2009.

TRIUMF is a major Canadian national facility for fundamental and applied physics including subatomic physics, nuclear astrophysics, condensed matter research and life science. CIAE is a major Chinese national facility for fundamental research and nuclear technology including nuclear physics, nuclear chemistry, reactor physics, and nuclear technology applications.

For TRIUMF

A. Shotter

Director

Date:

17 Oct 2006

For CIAE

Z. Zhao

Director

Date:

06.10.9

海外成员唐晓东的情况

Letter of assurance

To NSFC:

As one of the members in the innovation research group fund application, I assure that if the fund is granted, I will be able to come back to China to work with research team for at least 2 months per year within the period of 2011 to 2013.

With best regards,

Xiaodong Tang

Assistant professor

Department of physics

University of Notre Dame

Current and Pending Support

(See GPG Section II.C.2.h for guidance on information to include on this form.)

Investigator: Xiaodong Tang		Other agencies (including NSF) to which this proposal has been/will be submitted:	
Support:	<input type="checkbox"/> Current <input checked="" type="checkbox"/> Pending <input type="checkbox"/> Submission Planned in Near Future <input type="checkbox"/> *Transfer of Support		
Project/Proposal Title: ARI-R2 Repair and Renovation of Nuclear Science Laboratory at University of Notre Dame			
Source of Support: NSF			
Total Award Amount: \$ 1,909,215		Total Award Period Covered: 04/01/10 - 03/31/12	
Location of Project: University of Notre Dame			
Person-Months Per Year Committed to the Project: Cat:0.00 Acad:0.50		Sum: 0.00	
Support:	<input checked="" type="checkbox"/> Current <input type="checkbox"/> Pending <input type="checkbox"/> Submission Planned in Near Future <input type="checkbox"/> *Transfer of Support		
Project/Proposal Title: Nuclear Structure and Nuclear Astrophysics			
Source of Support: NSF-0758100(with Aprahamian, Collon, Tang and Wiescher)			
Total Award Amount: \$ 4,499,999		Total Award Period Covered: 04/01/08 - 03/31/11	
Location of Project: University of Notre Dame			
Person-Months Per Year Committed to the Project: Cat:0.00 Acad:2.50		Sum: 1.00	
Support:	<input checked="" type="checkbox"/> Current <input type="checkbox"/> Pending <input type="checkbox"/> Submission Planned in Near Future <input type="checkbox"/> *Transfer of Support		
Project/Proposal Title: MRI: Development of GEORGINA--A Ge Detector Array for Research in Nuclear astrophysics at the University of Notre Dame Nuclear Science			
Source of Support: NSF-0923222			
Total Award Amount: \$ 498,746		Total Award Period Covered: 07/01/09 - 06/30/11	
Location of Project: University of Notre Dame			
Person-Months Per Year Committed to the Project: Cat:0.00 Acad:0.50		Sum: 0.00	
Support:	<input checked="" type="checkbox"/> Current <input type="checkbox"/> Pending <input type="checkbox"/> Submission Planned in Near Future <input type="checkbox"/> *Transfer of Support		
Project/Proposal Title: MRI: Acquisition of an Accelerator for Stellar Nucleosynthesis Measurements			
Source of Support: NSF-0820883(with Wiescher, Collon, Goerres, Lamm, Stech)			
Total Award Amount: \$ 2,464,379		Total Award Period Covered: 08/01/08 - 07/31/11	
Location of Project: University of Notre Dame			
Person-Months Per Year Committed to the Project: Cat:0.00 Acad:1.00		Sum: 0.50	
Support:	<input type="checkbox"/> Current <input checked="" type="checkbox"/> Pending <input type="checkbox"/> Submission Planned in Near Future <input type="checkbox"/> *Transfer of Support		
Project/Proposal Title: Study heavy ion reactions at deep sub-barrier energies (this proposal)			
Source of Support: DOE			
Total Award Amount: \$ 755,270		Total Award Period Covered: 04/01/10-04/01/15	
Location of Project: University of Notre Dame			
Person-Months Per Year Committed to the Project: Cat:0.0 Acad:2.5		Sum: 1.0	

- 群体组成
- 取得成果和研究基础
- 拟开展的研究工作
- 支撑环境

- 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。国内外先进的放射性离子束等核物理实验手段、网络计算和天文观测数据的建立，使它进入一个新的发展阶段
- 本群体瞄准核天体物理的关键科学问题，基于雄厚的研究基础，利用国内的大科学平台，结合国际合作，采取先进的研究方案，是有竞争力的创新群体
- 通过间接测量和直接测量相结合的方案，得出关键的核天体物理反应数据；通过中等质量核的衰变性质测量，得出关键的核天体物理衰变数据；通过实验与理论相结合，并将反应和衰变数据带入网络计算，与天文观测相比较，在元素核合成机制和场所方面取得集成创新成果