

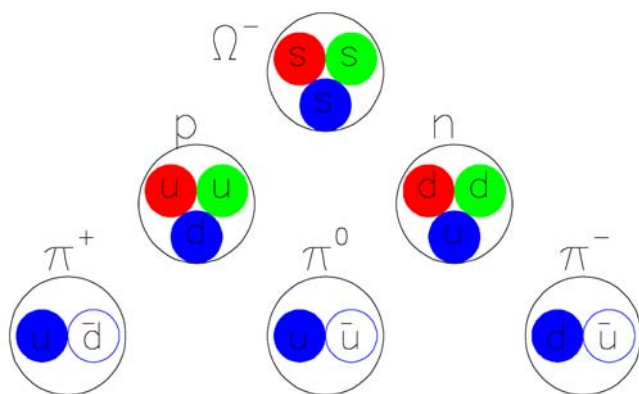
Co se stalo (a nestalo) ve fyzice elementárních částic od Šlapanic 98

Jiří Chýla
Fyzikální ústav AV ČR

Co dnes o mikrosvětě víme

Základní znalosti zákonů mikrosvěta získané studiem vlastností a srážek elementárních částic za uplynulých 50 let jsou shrnuty v tzv. **standardním modelu** (SM). Podle něj jsou základními stavebními kameny hmoty tři tzv. **generace fermionů**, tj. částic se spinem 1/2, jež se dále dělí na **kvarky a leptony**

Fundamentální fermiony				Síly	
Generace	1	2	3	název	IVB
Kvarky	u u u	c c c	t t t	elektromagnetické	foton
	d d d	s s s	b b b	slabé	W^+, W^-, Z
Leptony	ν_e	ν_μ	ν_τ	silné	gluony
	e	μ	τ		



Kvarkové složení tripletu pionů (spodní řada), protonu a neutronu (prostřední dvojice) a hyperonu omega.

Každý z šesti kvarků, označovaných symboly u (z anglického up), d (down), s (strange), c (charm), t (top), b (bottom), existuje ještě ve třech různých stavech, poeticky nazývaných „barvy“. Z kvarků první generace jsou složeny například protony a neutrony, jež spolu s elektrony vytvářejí atomy a tím i většinu hmoty na Zemi i ve viditelné části vesmíru.

Mezi kvarky a leptony působí čtyři typy sil: **gravitační, elektromagnetické, slabé a silné**. Kromě gravitační, jež v mikrosvětě nehraje prakticky žádnou

roli, mají ostatní síly jednu důležitou společnou charakteristiku: lze je popsat pomocí výměny, schématicky znázorněné na obr. 1, zprostředkujících částic, tzv. **intermediálních vektorových bosonů** (IVB), jež mají všechny spin 1. Základní rozdíl mezi kvarky a leptony je v tom, že silné síly působí jen na "barevné" částice a tedy jen mezi kvarky. Právě tyto síly zodpovídají za vazbu kvarků uvnitř protonů a neutronů a s elektromagnetickými silami za existenci a vlastnosti atomů. Ani bez slabých sil by ovšem vesmír nevypadal tak, jak vypadá. Ačkoliv jsou skutečně „slabé“ na vzdálenostech řádu průměru protonu, mají jednu důležitou vlastnost: **nejsou invariantní vůči prostorové (P) a nábojové (C) inverzi** (tj. záměně pojmů "vpravo" a "vlevo", resp. "částice" a "antičástice"), ba **ani vůči kombinované prostorové a nábojové inverzi (CP)**. Přitom právě narušení CP invariance je klíčem k pochopení skutečnosti, proč je ve vesmíru více hmoty než antimoty a proč tedy vůbec existujeme.

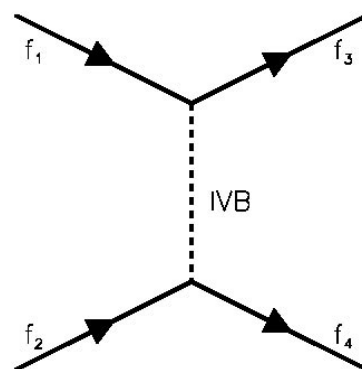


Diagram znázorňující výměnný mechanismus sil působících mezi kvarky a leptony (f_i) ve SM.

Kromě částic uvedených v tabulce hraje ve SM důležitou roli i tzv. **Higgův boson**, částice se spinem nula, jež je ve standardním modelu v obrazném slova smyslu odpovědná za velikost hmotností kvarků, leptonů a intermediálních vektorových bosonů.¹

Elektromagnetické a slabé síly jsou v rámci SM popsány sjednocenou teorií elektroslabých sil, formulovanou koncem 60. let Sheldonem Glashowem, Abdusem Salamem a Stevenem Weinbergem (**GSW teorie**), kteří za ni dostali v roce 1979 Nobelovou cenu za fyziku. Teorie silných sil byla formulována počátkem v roce 1973 Davidem Grossem, Frankem Wilczekem a Davidem Politzerem. Její název **kvantová chromodynamika** (QCD) odráží skutečnost, že tato síla působí jen na částice nesoucí barvu. Poznání, že QCD netrpí problémy, kvůli nimž v polovině 50.let ochladla důvěra v kvantovou teorie pole, znamenalo dramatický přelom. Klíčovou vlastností kvantové chromodynamiky je skutečnost, že **teorie silných sil je tím jednodušší, čím jsou vzdálenosti mezi kvarky, antikvarky a gluony menší**.

Důležitou roli při vzniku QCD sehrál **kvark-partonový model**, formulovaný Richardem Feynmanem koncem 60. let pro fenomenologický popis tvrdých srážek elektronů s nukleony. Experimenty prováděné v té době ve SLAC ukazovaly, že **protony a neutrony se v těchto srážkách chovají jako svazek vzájemně slabě interagujících bodových částic, jež měly stejná kvantová čísla jako kvarky**. To bylo překvapivé, neboť žádné volné kvarky nebyly do té doby (a ani dosud) pozorovány. Skutečnost, že QCD je schopna smířit tak odlišné jevy, je netriviální a představuje triumf základního teoretického rámce, v němž se fyzika částic pohybuje: **kvantové teorie pole**.

Skutečnost, že kvarky a gluony, na rozdíl od leptonů, neexistují jako volné částice a že má přesto smysl o nich mluvit jako o základních stavebních kamenech hmoty, se opírá o důležité zjištění. Ačkoliv izolované kvarky nelze z protonu či neutronu vyrazit, na rozdíl od elektronů z atomu, pozorujeme, že je-li energie vyraženého kvarku či gluonu dostatečně velká, vylétají ve směru kvarků či gluonů úhlově kolimované svazky částic, nazývané „**jety**“. Z měření jejich vlastností pak usuzujeme na dynamiku samotných kvarků a gluonů. Jety dnes hrají při hledání zákonů mikrosvěta klíčovou roli, kterou v minulosti hrály jen částice samotné.

.... a co si domýšlíme

Standardní model je, až na stále otevřenou otázku **existence Higgsova bosonu**, experimentálně prověřen do značných podrobností a poskytuje odpovědi na mnoho otázek týkajících se struktury hmoty. Některé zásadní otázky ovšem ponechává nezodpovězeny:

- Proč existují právě **tři generace** kvarků a leptonů?
- Proč mají takové elektrické **náboje a hmotnosti**, jaké mají?
- Existují i **další síly**, o nichž dosud nic nevíme?
- Jsou kvarky a leptony skutečně **fundamentální**, nebo i ony mají **vnitřní strukturu**?
- Mají všechny čtyři známé síly **společný původ**?
- Jak může být **gravitace zahrnuta** do standardního modelu?
- Proč je ve vesmíru **přebytek hmoty nad antihmotou**?

Odpovědi na tyto a řadu dalších otázek hledají experimenty, ale hledá je i teorie sama, neboť poněkud překvapivě **fyzika částic již téměř tři desetiletí čeká na nějaký skutečně zásadní objev**, který by rozhodujícím způsobem pomohl orientovat teoretické úvahy jdoucí za SM, tak jak byl načrtnut v předchozích odstavcích. Ten je totiž přes svou dosavadní úspěšnost při

¹ Pro svět subatomárních částic je mezinárodní systém jednotek nevhodný a je proto zvykem používat přirozené jednotky, jimiž je v případě energie elektronvolt (eV), či dnes spíše gigaelektronvolt (GeV= miliarda eV). Klidová hmotnost protonu přitom odpovídá energii 0.94 GeV.

popisu mikrosvětla z řady hledisek nedokonalý a představuje jen určitou aproximaci hlubších fyzikálních zákonitostí. V takové situaci je proto přirozené, že se hnacím motorem teorie v posledních zhruba 20 letech staly snahy vybudovat teorii, která by byla nejen matematicky konsistentní a v jistém, byť nutně subjektivním, smyslu „krásná“, ale která by také odpověděla aspoň na některé z výše uvedených otázek.

Důležitým krokem v tomto směru jsou tzv. **teorie velkého sjednocení** (zkráceně GUT a z anglického Grand Unified Theory). Jejichž základní myšlenka, formulovaná Howardem Georgi a Sheldonem Glashow v roce 1974, spočívá v tom, že kvarky a leptony jsou jen různé stavy jednoho fundamentálního fermionu a že elektromagnetické, slabé a silné síly jsou jen různé projevy téže „prasily“. Základní předpověď těchto teorií je dramatická: **proton a neutron nejsou stabilní!**

Nejambicióznější pokus v tomto směru pak vychází z předpokladu, že zákony mikrosvětla splňují speciální typ vnitřní symetrie, tzv. **supersymetrii**, tj. symetrii mezi fermiony a bosony. Ta postuluje, že ke každému kvarku a leptonu z tabulky fundamentálních fermionů, i každému intermediálnímu vektorovému bosonu elektroslabých a silných interakcí, existují jejich **supersymetričtí partneři**. Tyto částice mají mít spin, jenž se od spinu svých „normálních“ partnerů liší o jednu polovinu a supersymetrie tedy koreluje částice s různým spinem. To představuje skutečně revoluční myšlenku a hledání supersymetrických částic je proto předmětem experimentálního zájmu již po více než dvě desetiletí. Skutečnost, že **zatím žádná taková částice nebyla nalezena**, znamená, že pokud existují, musí být jejich hmotnosti tak velké, že pro jejich produkci nestačí ani dnešní nejmohutnější urychlovače.

Jedním z hlavních argumentů pro supersymetrii je zjištění, že existence supersymetrických partnerů částic SM odstraňuje některé problémy teorií velkého sjednocení. Supersymetrie je součástí většiny dnešních modelů GUT, obzvláště těch, které se snaží do jednotné teorie zahrnout i gravitaci. V tomto případě jde předvoj teorie ještě dál a postuluje, že **základním objektem mikrosvětla nejsou částice, bodové objekty, ale struny**, či dokonce vícerozměrné membrány, které se pohybují ve více než čtyřrozměrném prostoročasu. Další rozměry prostoročasu jsou podstatné, neboť právě ony mohou poskytnout klíč ke sjednocení teorie gravitace s kvantovou teorií. Klasická teorie gravitace je totiž přirozenou limitou kvantových teorií strun na velkých vzdálenostech.

Fyzika je ovšem empirická věda, a tak o tom, zda v mikrosvětě vládne supersymetrie či dokonce superstruny, rozhodne experiment. Proto je s takovým napětím očekáváno spuštění urychlovače LHC v CERN, který bude na dlouhou dobu jediným zařízením, kde je naděje projevy supersymetrie pozorovat.

Je ovšem také možné, že ani kvarky a leptony nejsou základní úrovní struktury hmoty, ale že i ony jsou v jistém smyslu složeny z nějakých ještě elementárnějších objektů. Tato přirozená myšlenka **substruktury kvarků a leptonů** má dlouhou historii, ale zatím se nepodařilo zkonstruovat nějaký matematicky konsistentní model, který by byl současně fyzikálně relevantní. I tak má ovšem stále smysl tuto možnost zkoumat experimentálně. Zatím ovšem **neexistují žádné jasné příznaky, že kvarky a leptony nějakou substrukturu mají.**

Jak se dělá fyzika elementárních částic ve světě

Výzkum, především experimentální, v oblasti fyziky částic má několik charakteristických rysů, jimiž jsou **velké týmy, široká mezinárodní spolupráce, vysoká koncentrace prostředků a základních zařízení a dlouhodobý charakter**. Tyto rysy vykristalizovaly během 50. a 60. let a jsou dány samotnou povahou výzkumu v této oblasti fyziky. Zatímco při objevu atomového jádra stačili Rutherfordovi dva asistenti, kteří po několika týdnech obsluhovali

zařízení, jež mělo rozměr většího hrnce, dnešní experimenty sice v zásadě opakují základní schéma tohoto pokusu, ale jeho realizace je dramaticky jiná. Dnes čítají experimentální týmy stovky fyziků z desítek zemí, kteří po léta vyvíjejí detektory vážící tisíce tun, aby je pak řadu

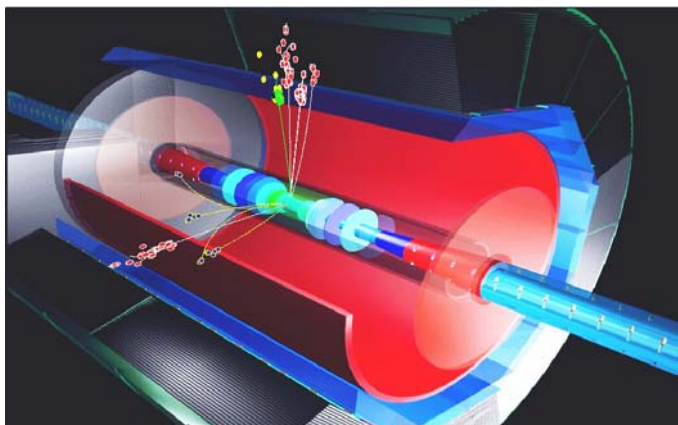


Schéma detekční aparatury pro studium srážek protiběžných svazků částic pohybujících se v trubici.

protonů, antiprotonů, elektronů nebo pozitronů, které jsou předtím standardním způsobem urychleny. Výhoda tohoto uspořádání oproti klasickým urychlovačům je v tom, že při čelné srážce dvou částic je jejich energie lépe využita, podobně jako jsou důsledky čelní srážky dvou aut daleko horší, než pokud jedno z nich stojí.

Klíčovou roli při budování a provozu dnešních experimentů a následném zpracování dat hrají výpočetní a komunikační technologie. Obrovské objemy dat a požadavky na jejich rychlý přenos byly v minulosti podnětem k rozvoji těchto technologií a zůstávají jimi i dnes.

Finanční náročnost a složitost dnešních experimentů je taková, že mezinárodní spolupráce je ve fyzice částic nevyhnutelností. Ve světě jsou dne tři hlavní střediska experimentálního výzkumu: **Evropské středisko fyziky částic CERN** v Ženevě a **německá národní laboratoř DESY** v Hamburku v Evropě, **Fermiho národní laboratoř FERMILAB** u Chicaga,

Hlavní událostí ve fyzice elementárních částic za uplynulých 5 let

byl **objev oscilací neutrin**, který velmi úzce souvisí s otázkou **klidové hmotnosti neutrin** a jenž byl oceněn polovinou Nobelovy ceny za fyziku pro rok 2002, jež byla udělena

za průkopnické příspěvky k astrofyzice, zejména za detekci kosmických neutrin

Raymondu Davisovi a Masatoshi Koshihovi



Příběhy jejich objevů jsou krásnou ilustrací několika klíčových aspektů vědecké výzkumu: **intuice, vytrvalosti a nezbytného kousku štěstí**. A také skutečnosti, že důsledky a význam vědecké práce nelze předvídat. V obou případech byly totiž motivy experimentů jiné než měření klidové hmotnosti neutrin.

Klíčové okamžiky cesty k dnešnímu stavu našich znalostí mikrosvětla byly velmi často spojeny s jevy, v nichž hrály důležitou roli neutrina (i když to vědci často netušili):

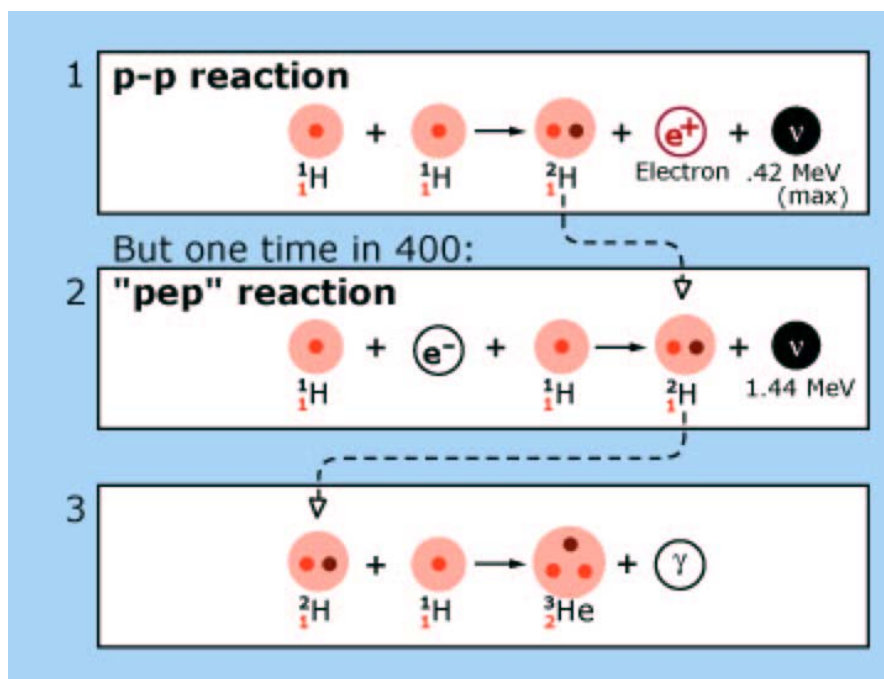
1897: **H. Becquerel, P. a M. Curie**: za objev spontánní **alfa a beta radioaktivity** získali všichni tři Nobelovu cenu za fyziku v roce 1903. To, že v rozpadech beta vzniká kromě elektronu ještě něco nikdo z nich netušil a trvalo 17 let než to začalo být divné a to když

1914: **J. Chadwick**: spojitě spektrum beta-rozpadu. Tato neočekávaná skutečnost vedla Bohra k **hypotéze, že v mikrosvětě se energie v jednotlivých případech nezachovává**. Tuto možnost rozhodně odmítal Pauli a pro vysvětlení spojitěho spektra beta rozpadu přišel s jinou, stejně radikální, myšlenkou.

1930: **W. Pauli**: pro vyjasnění spojitěho spektra beta rozpadu **postuloval existenci neutrina**. Požehnání Pauliho hypotéze fyzikální obcí přišlo až během Solvayské konference v říjnu 1933, kde Pauli se svou myšlenkou poprvé veřejně vystoupil a kde Perrin vyslovil předpoklad, že **hmota neutrina je nulová**. Na této konferenci byla také odmítnuta Bohrova hypotéza nezachování energie v mikrosvětě. Trvalo ovšem 20 let než byla Pauliho hypotéza experimentálně potvrzena.

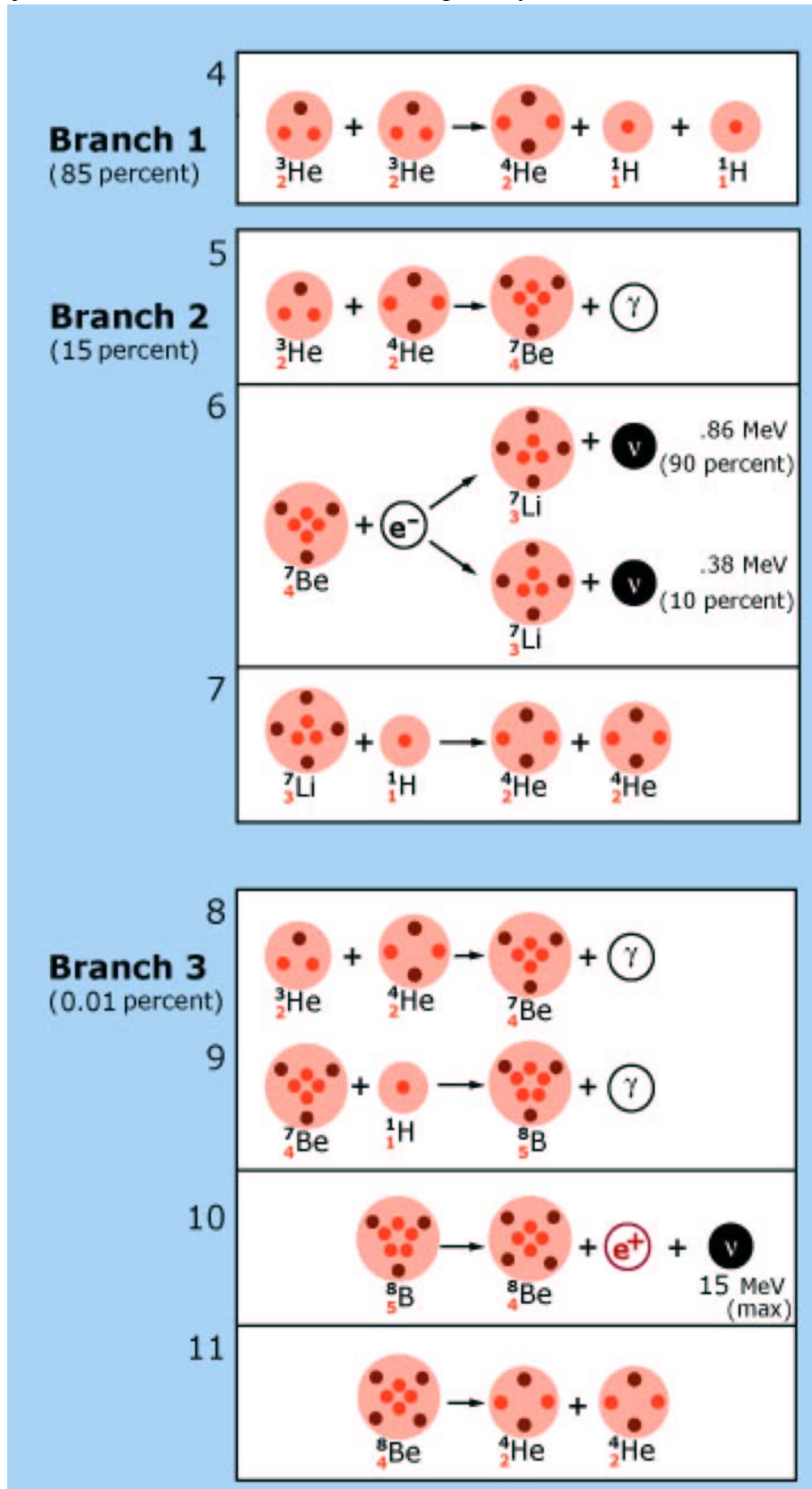
1934: **E. Fermi**: formuloval teorie slabých interakcí zahrnující neutrina a byl první, kdo pochopil, že **neutrino vznikající v beta rozpadu není součástí jádra!**

1939: **H. Bethe**: návrh **mechanismu produkce energie ve hvězdách**, který v podstatě platí dodnes a jenž lze znázornit následujícím schématem procesů. Základní procesem je fúze dvou protonů na deuteron, při současné emisi pozitronu a elektronového neutrina.



V dalším kroku se deuteronem sloučí s protonem na izotop hélia ${}^3_2\text{He}$ a vyzáří foton.

Dvě jádra ${}^3\text{He}$ se dále sloučí na ${}^4\text{He}$ a dva protony, čímž končí hlavní část řetězce.



Při těchto reakcích se *přeměňuje klidová hmotnost nukleonů na kinetickou energii*, přičemž *neutrino hraje klíčovou roli*. Je také *jediným svědkem procesů v nitru hvězd*, který dopadá až na Zem. Jedině **neutrino** nám proto mohou říci, zda měl Bethe pravdu.

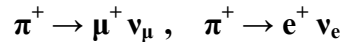
1953: **F. Reines, W. Cowan** dokázali *existenci antineutrin* vznikajících v jaderném reaktoru

1954: **R. Davis** přišel s myšlenkou *měřit tok neutrin ze slunce* metodou navrženou Brunem Pontecorvo:



Této metodě se Ray Davis věnoval celý život a dosáhl v ní neuvěřitelné přesnosti.

1962: **L. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger**: objevili *mionové neutrino* v rozpadech



Trpělivost růže přináší

VOLUME 12, NUMBER 11

PHYSICAL REVIEW LETTERS

16 MARCH 1964

SOLAR NEUTRINOS. II. EXPERIMENTAL*

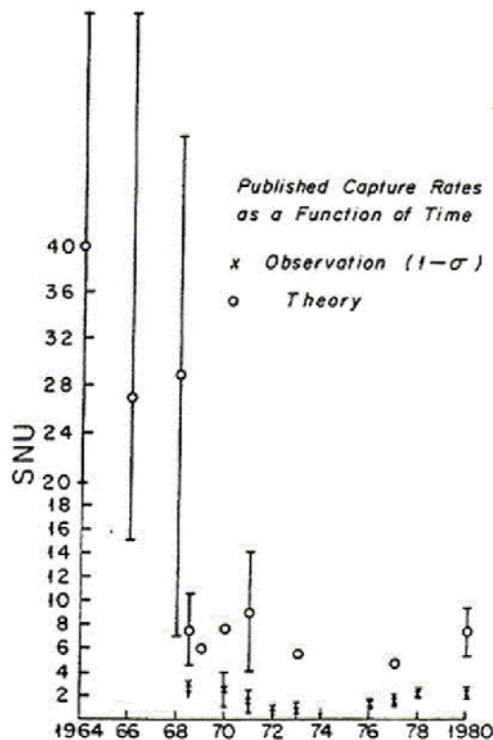
Raymond Davis, Jr.

Chemistry Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York

(Received 6 January 1964)

The prospect of observing solar neutrinos by means of the inverse beta process $^{37}\text{Cl}(\nu, e^-)^{37}\text{Ar}$ induced us to place the apparatus previously described¹ in a mine and make a preliminary search. This experiment served to place an upper limit on the flux of extraterrestrial neutrinos. These results will be reported, and a discussion will be given of the possibility of extending the sensitivity of the method to a degree capable of measuring the solar neutrino flux calculated by Bahcall in the preceding paper.²

We may conclude from the above considerations that an experiment using 100 000 gallons of pure perchlorethylene in a mine 4500 feet deep, properly shielded from fast neutrons, would have a background ^{37}Ar production rate at least a factor of ten below the expected rate from solar neutrinos. It should be noted that if a positive result



Časový vývoj měření toku slunečních neutrin (prázdná kolečka) a teoretických výpočtů (křížky)

1964: **R. Davis** ve spolupráci s J. Bahcallem provedli první analýza slunečních neutrin

1967: **B. Pontecorvo, V. Gribov**: přišli s myšlenkou, že *neutrino mohou „oscilovat“* mezi stavy, které označujeme „elektronové neutrino“ a „mionové neutrino“ podle hesla *co není zakázáno, je dovoleno*. V přednášce bude tento pozoruhodný jev vysvětlen.

1968: **R. Davis a J. Bahcall**: pozorovali první náznak *deficitu slunečních neutrin*.

Po celý dalších 25 let Ray Davis tvrdošijně pokračoval ve svém experimentu přes pochyby mnohých teoretiků i experimentátorů. Jahn Bahcall pak sehrál klíčovou roli při teoretické interpretaci naměřeného deficitu. Věrohodnost jevu stále rostla, ale Davisova metoda měla své meze a bylo třeba nezávislého potvrzení.

J. Bahcall, R. Davis (1982)

Závěrem bychom chtěli říci, že věříme, že at bude řešení problému slunečních neutrin jakékoliv, spojené úsilí mnoha lidí chemiků, jaderných fyziků, astrofyziků, geofyziků a fyziků elementárních částic během uplynulých

dvou desetiletí nakonec přinese větší porozumění dějů probíhajících v nitru Slunce i hranic našich dnešních znalostí.... Budoucí experimenty se slunečními neutrinami musí jasněji vymezit chybějící články našich znalostí u ukázat, zda je primárně ve fyzice nebo astrofyzice.

- 1967: S. Glashow, A. Salam, S. Weinberg: jednotná teorie *elektroslabých interakcí*
- 1973: D. Gross, D. Politzer, F. Wilczek: formulace *kvantové chromodynamiky*
- 1974: H. Georgi, S. Glashow: teorie velkého sjednocení: výchozím bodem je předpoklad, že kvarky a leptony jsou součástí stejného multipletu grupy vnitřní symetrie. To vede na *předpověď nestability všech hadronů, včetně nukleonů!*

Šťěstí přeje připraveným

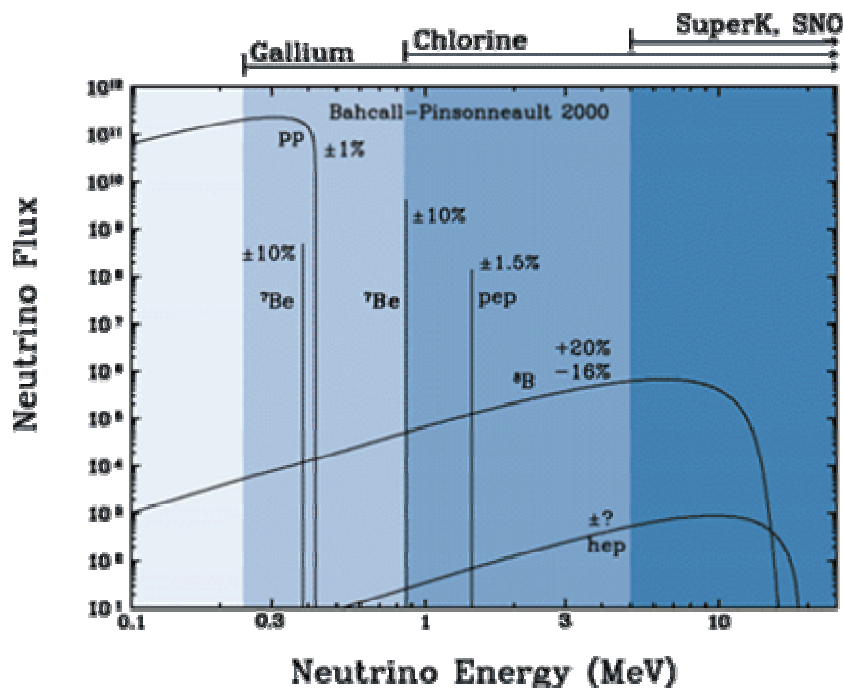
- 1983: M. Koshiba: navrhl a postavil experiment Kamiokande pro *hledání rozpadu protonu*
 $\text{proton} \rightarrow \text{neutrální pion} + \text{pozitron}$

Šlo o velký čerenkovský vodní detektor:

- umístěný **1000 metrů pod zemí** v dole na zinek Kamioka
- obsahující **3000 tun vody** (v 100 kg je $0.6 \cdot 10^{29}$ protonů) sledovaných
- **1000 fotonásobičů** o průměru 50 cm, které registrovaly
- **čerenkovské záření** nabitých částic pro než $(v/c)n > 1$ (n je index lomu, $n_{\text{voda}} = 1.33$)
- čímž umožnily **rozlišit elektrony od mionů a pionů** a tím
- **detegovat sluneční neutrina** z rozpadu ${}_5\text{B} \rightarrow {}_4\text{B} + e^+ + \nu_e$

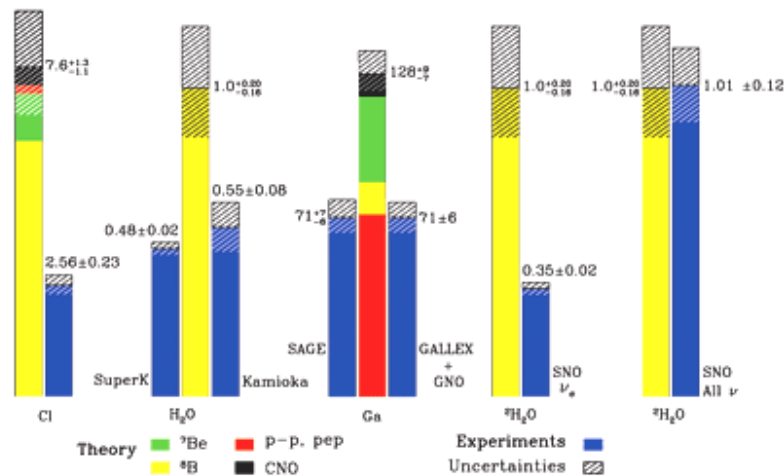
- 1987: Kamiokande za celou dobu provozu *nezaregistroval žádný případ rozpadu protonu* tj. **protonu $\geq 3 \cdot 10^{32}$ let**, ale 23.2. 1987 ve Velkém Magellanově mraku pozoroval výbuch SN1987A: 3 hodiny fotony *zachytil během 13 vteřin 11 neutrin*.

- 1995: J. Bahcall, M. Pinsonneault: (velmi netriviální) výpočet toku slunečních neutrin



- 1996: Superkamiokande v provozu: **55 000 tun superčisté vody, 11 000 fotonásobičů**,
- 1998-2001: Superkamiokande: poprvé pozorovalo *oscilace atmosférických neutrin* (v přednášce bude tento jev podrobněji vysvětlen) také *změřilo tok slunečních neutrin*.
- 2001-2002: Sudbury Neutrino Observatory: součet toků všech třech neutrin *souhlasí s předpověďmi standardního solárního modelu*.

Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Pinsonneault 2000



Srovnání příspěvků různých procesů probíhajících na Slunci do celkového toku neutrin dopadajících na Zem, spočtených v rámci **standardního** solárního modelu (barevné pruhy), s experimentálními hodnotami naměřenými v jednotlivých typech experimentů (modré pruhy).

Bethe měl tedy pravdu a my díky jemu, Bahcallovi a oběma laureátům (ale i řadě dalších)

**dobře rozumíme jak svítí sluníčko
a také víme, že (aspoň jedno) neutrino má nenulovou klidovou hmotnost.**

To není ale konec celého příběhu, neboť *oscilace neutrin měří pouze rozdíly hmotností*, ne jejich absolutní velikost. Dnešní situaci lze přibližně shrnout takto:

hmotnost elektronového neutrina	$m_e = \mathbf{M}$
hmotnost mionového neutrina	$m_\mu = \mathbf{M} + 0.005 \text{ eV}$
hmotnost tauonového neutrina	$m_\tau = \mathbf{M} + 0.05 \text{ eV}$

O velikosti **M** víme pouze to, že $\mathbf{M} \leq 2 \text{ eV}$, přičemž hmotnosti neutrin mohou hrát klíčovou roli při objasnění snad **největší záhady současné fyziky**, jímž je otázka, co tvoří

TEMNOU HMOTU

jenž nás obklopuje ve vesmíru. Ukazuje se totiž, že *většina hmoty ve vesmíru „není vidět“*, tj. máme nepřímá svědectví, pocházející primárně z jejího gravitačního působení, že existuje, ale nevíme z jakých částic se skládá. Neutrina s hmotnostmi okolo výše zmíněné horní meze jsou jedním z hlavních kandidátů. Proto je experimentální určení **M** tak důležité.

Záhady přicházejí z kosmu

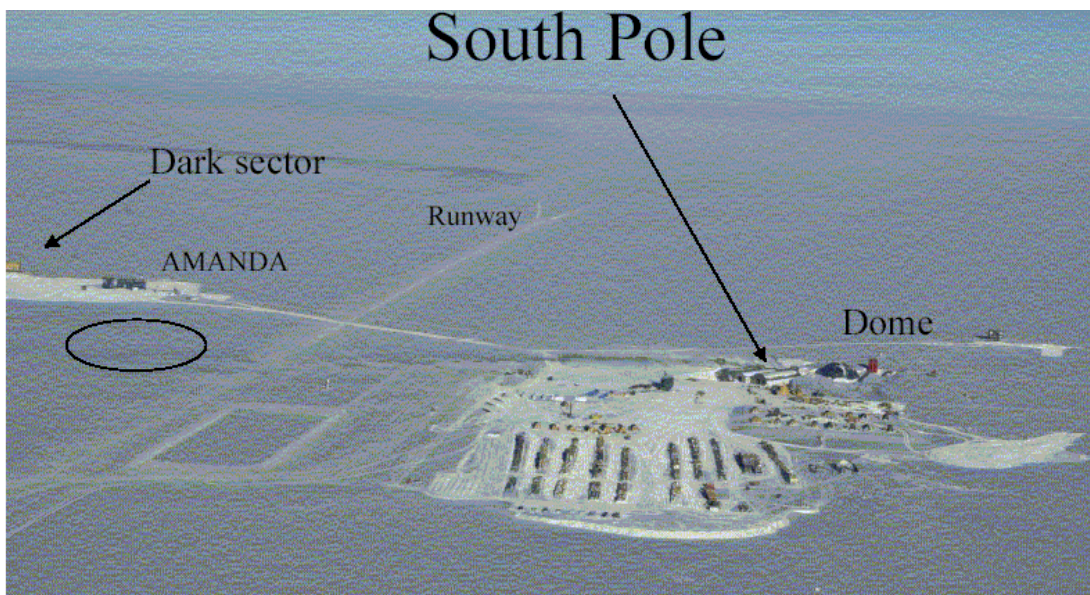
Objev oscilací neutrin nebyl ovšem jediným případem, kdy částice dopadající na Zem z kosmu sehrály klíčovou roli. Posledních zhruba pět let jsme svědky přímo výbuchu nových a mimořádně zajímavých dat z experimentů, které měří různé složky kosmického záření – fotonů, neutrin či atomových jader – v širokém oboru energií, které přesahují i energie dosažitelné na pozemských urychlovačích.

Nový obor, kterému se říká **částicová astrofyzika** (z anglického astroparticle physics) a jenž se nachází na pomezí astrofyziky, astronomie a fyziky elementárních částic, prochází bouřlivým vývojem především proto, že se opírá o množství nových experimentálních dat. Otázka, **co tvoří „temnou hmotu“** je jen jedna z mnoha záhad, které nám nová pozorování předkládají, byť záhada pravděpodobně největší.

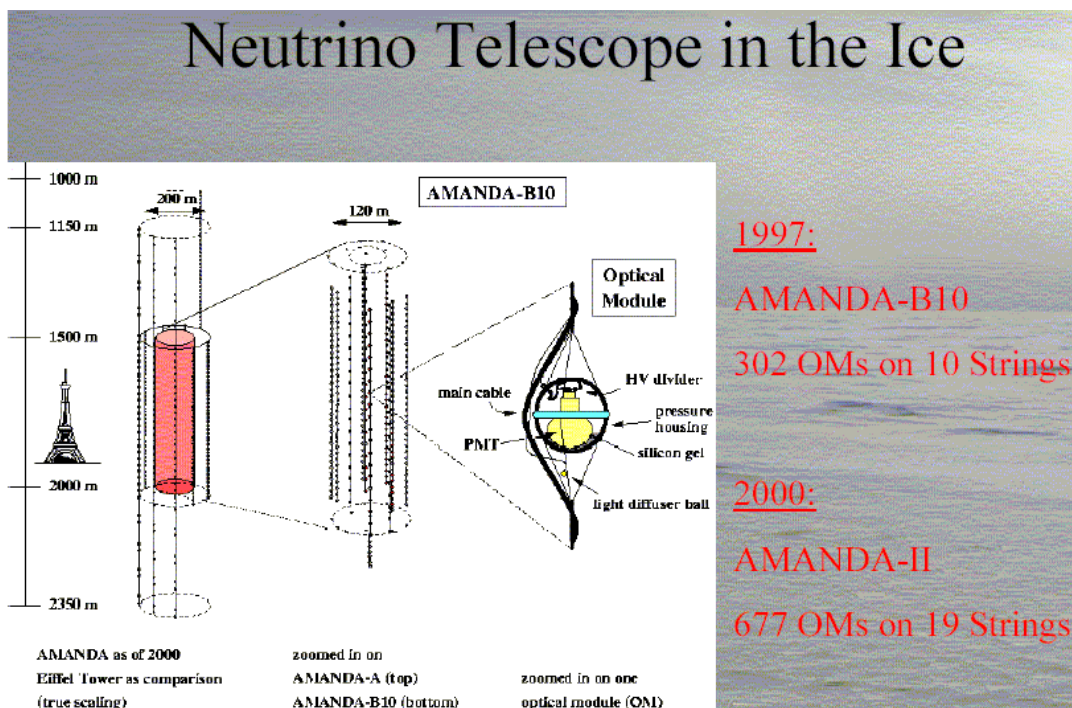
Z řady dalších záhad jmenujme jen několik:

- Odkud přicházejí a co je zdrojem mohutných extragalaktických výronů paprsků gamma (gamma ray bursts)?
- Z čeho se skládá a odkud k nám přichází kosmické záření nejvyšších energií?
- Jakým mechanismem jsou elektricky nabitě částice urychlovány na tak obrovské energie?
- Jaké je spektrum a odkud k nám přicházejí vysokoenergetická neutrina?

Observatoře snažící se nalézt odpovědi na tyto a další otázky jsou na těch nejexotičtějších místech: na dně Středozemního moře, v Namibijské poušti, na palubě raketoplánu či přímo na **Jižním pólu**. Na posledně jmenovaném místě mezinárodní tým vědců měří tok neutrin nejvyšších energií. Jako základní detektor projektu **AMANDA** přitom slouží ledový krunyř!



Neutrina jsou detegována speciálními teleskopy 1 až 2 kilometry pod povrchem.



V budoucnu má být sledovaný objem ledu rozšířen dokonce až na **krychlový kilometr!**

Styčným bodem mezi fyzikou elementárních částic a astrofyzikou je skutečnost, že k odpovědi na mnohé otázky týkající se vesmíru potřebujeme znát dobře zákonitosti mikrosvěta a také obráceně, mnohé z částic, které se snažíme najít pomocí nákladných urychlovačů, včetně například zatím marně hledaných supersymetrických partnerů, k nám mohou přiletět z vesmíru. Vzájemná propojenost zákonů mikrosvěta a makrosvěta je snad nejpozoruhodnějším poznáním, k němuž fundamentální fyzika v posledním období dospěla.

Godot (snad) už brzy přijde

Jak jsme již uvedli v úvodu, pokrok v našem chápání zákonů mikrosvěta závisí na tom, zda se podaří experimentálně objasnit několik zásadních otázek dnešního standardního modelu:

- Existuje **Higgsův boson** s vlastnostmi, které předpokládá standardní model?
- Existují **supersymetrickí partneři** kvarků a leptonů?
- Existují příznaky, že **prostorčas je více než čtyřrozměrný**?
- Jsou základními objekty částice nebo **struny**?
- Mají i kvarky a leptony **strukturu**?

Současnou situaci v samotné fyzice elementárních částic nejlépe charakterizuje dialog inspektora Gregoryho s Sherlockem Holmesem v Doyleho *Stříbrném*

G.: Na co chcete upoutat mou pozornost?

H.: Na zvláštní chování psa v noci.

G.: Ale ten pes v noci přece nic nedělal!

H.: **A právě to je na tom to zvláštní!**

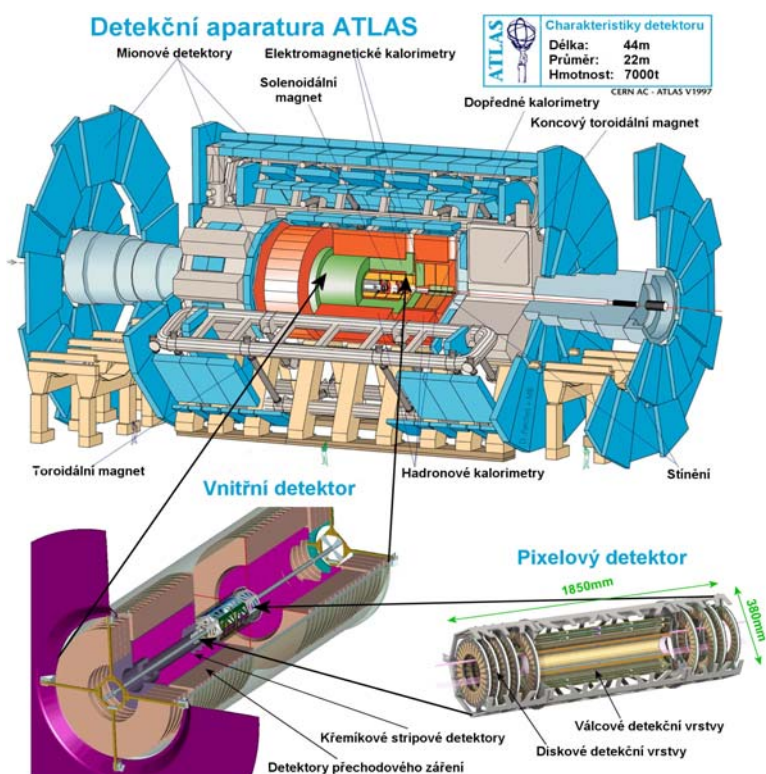


Schéma detektoru ATLAS na urychlovači LHC v CERN spolu s umístěním centrálního dráhového detektoru.

Čekání na nějaký skutečně zásadní a překvapivý objev snad brzy skončí a to v souvislosti se spuštěním nového mohutného urychlovače LHC v CERN, k němuž má dojít v polovině roku 2007. Na tomto urychlovači se budou ve 27 kilometrů dlouhém kruhovém tunelu asi 100 metrů pod zemí srážet dva protiběžné svazky protonů, každý o energii 7000 GeV. Doufáme, že aspoň na některou z výše uvedených otázek odpoví experimenty prováděné dvěma obrovskými detektory. Na vývoji a konstrukci jednoho z nich, zvaného ATLAS, se podílí i Fyzikální ústav AV ČR, MFF UK a FJFI ČVUT.

Doufám, že i díky jemu budeme za dalších pět let podstatně moudřejší než dnes.